



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KAZIK TEMELLİ BETONARME BİR BİNANIN ALTSİSTEM
YAKLAŞIMI (YÖNTEM I) İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN TAŞTAN

Tez Danışmanı

DR. ÖĞR. ÜYESİ MEHMET ÖZGÜR

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KAZIK TEMELLİ BETONARME BİR BİNANIN ALTSİSTEM YAKLAŞIMI
(YÖNTEM D) İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN TAŞTAN

Tez Danışmanı

DR. ÖĞR. ÜYESİ MEHMET ÖZGÜR

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Hüseyin TAŞTAN tarafından Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZGÜR yönetiminde hazırlanan ve **07/01/2022** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Kazık Temelli Betonarme Bir Binanın Altsistem Yaklaşımı (Yöntem D) İle Analizi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZGÜR

(Danışman)

Prof. Dr. Kanat Burak BOZDOĞAN

Doç. Dr. Utkan MUTMAN

.....

.....

.....

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 07/01/2022

.....
Doç. Dr. Yener PAZARCIK
Enstitü Müdürü

../01/2022

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Hüseyin TAŞTAN

07/01/2022

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer akademik danışman hocam Dr. Mehmet ÖZGÜR'e,

Çalışmalarımı aksatmadan yürütebilmemde her türlü desteği ve kolaylığı sağlayan Sn. Sanat Tarihçisi Gökhan GÜMÜŞDAĞ'a,

Düzenlemiş olduğu eğitimler aracılığıyla geoteknik modelleme ve dinamik analiz konularında bilgi ve tecrübelerinden istifade etmiş olduğum Sn. Dr. Sevinç ÜNSAL'a,

Tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli eşim Tuğba TAŞTAN'a,

Gülücükleri ve sevgi dolu minik kalbiyle her daim bana moral olan sevgili kızım Nil TAŞTAN'a,

Sevgilerilerini daima hissettiğim başta annem Melek TAŞTAN ve babam Turan TAŞTAN olmak üzere tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin TAŞTAN
Çanakkale, Ocak 2022

ÖZET

KAZIK TEMELLİ BETONARME BİR BİNANIN ALTSİSTEM YAKLAŞIMI (YÖNTEM I) İLE ANALİZİ

Hüseyin TAŞTAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZGÜR

07/01/2022, 110

Türkiye’de KAF (Kuzey Anadolu Fay Hattı) ve Doğu Anadolu Fay Hattı olmak üzere iki ana fay güzergahı bulunmaktadır. KAF, 1350 km olup dünyanın en hızlı ve en aktif sağ-yanal atımlı faylarından birisidir (Yalçın vd., 2013). Bu sebeple Türkiye’de kısa periyotlarda büyük depremler meydana gelmekte, can kayıpları ve maddi hasarlar oluşmaktadır. Bu bakımdan inşaat mühendislerinin zeminin geoteknik parametrelerini en doğru şekilde belirlemesi ve yapıları deprem gerçeğini göz önüne alarak tasarlaması önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, dinamik yükler altında, 23 katlı betonarme çerçeve tipi, derin (kazık) temelli bir yapı ile bu yapının mesnetlendiği zemin arasındaki karşılıklı etkileşim incelenmiştir. Zemin-kazık-yapı etkileşimi, altsistem yaklaşımı Yöntem I ile üstyapının dinamik analizine yansıtılmıştır. Böylelikle üstyapıda, üstyapı temelinde ve kazıklarda iç kuvvet, yer değiştirme ve şekil değiştirme talepleri elde edilmiştir.

Altsistem yaklaşımı için TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) Bölüm 16 “Deprem Etkisi Altında Temel Zemini ve Temellerin Tasarımı İçin Özel Kurallar” kapsamında verilen yöntemlerden “Yöntem I” seçilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Karşılaştırma yapabilmek için, aynı sistemin, yatak katsayısı yayları kullanılarak TDTH’den (Türkiye Deprem Tehlike Haritası) elde edilen tasarım spektrumu ile dinamik analizi yapılarak tekrardan iç kuvvet, yer değiştirme ve şekil değiştirme talepleri elde edilmiştir. Ayrıca sistemde etkileşimsiz duruma ait sonuçları görebilmek için sistem, zemine ankastre mesnetli olarak modellenerek tekrardan analiz edilmiştir.

Üç yönteme göre elde edilen analiz çıktıları karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi, Doğrusal Olmayan Zaman-Tanım Alanında Analiz, Altsistem Yaklaşımı, Yöntem I, Sahaya Özel Çözüm



ABSTRACT

ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE BUILDING ON PILE FOUNDATION WITH SUBSTRUCTURE APPROACH (METHOD I)

Hüseyin TAŞTAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Civil Engineering

Advisor: Assis. Prof. Mehmet ÖZGÜR

07/01/2022, 110

Turkey has two major faults routes, including North Anatolian Fault Line and EAF (East Anatolian Fault Line). The NAF is 1350 km and is one of the fastest and most active right-lateral slip faults in the world (Yalçın, et al, 2013). Therefore, strong earthquakes occur in short periods in Turkey, loss of lifes and material damages. In this respect, it's important for civil engineers to determine the geotechnical parameters of the ground correctly and design the structures considering the earthquake.

Within the scope of this thesis, the interaction between the 23-storey reinforced concrete frame type, deep (pile) foundation structure and the ground under dynamic loads has been investigated. The soil-pile-structure interaction is reflected in the dynamic analysis of the superstructure with the substructure approach Method I. Thus, internal force, displacement and deformation demands on the superstructure, foundation and piles were obtained.

For the subsystem approach, the calculations were made by choosing "Method I" from the methods given in TBER (Turkey Build Earthquake Regulation) Chapter 16 "Special Rules for the Design of Foundation Soil and Foundations Under Earthquake Effect".

In order to make a comparison, the dynamic analysis of the same system with the design spectrum obtained from TEHM (Turkey Earthquake Hazard Map) using the bearing coefficient springs was made and the internal force, displacement and deformation

demands were obtained again. In addition, to be able to see the results of the non-interaction state in the system, the system was modeled as rigid connection to the ground and reanalyzed.

The results were analyzed by comparing the analysis outputs obtained according to three methods.

Keywords: Soil-Pile-Structure Interaction, Nonlinear Time History Analysis, Substructure Method, Method I, Site Specific Solution



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xviii

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Deprem Dalgaları ile Zemin Arasındaki İlişki	2
1.3. Zemin - Yapı ve Yapı - Zemin Karşılıklı Etkileşimi	6
1.4. İvme Spektrumundaki Değişime Yönelik Sayısal Örnekler	8
1.5. Zemin - Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri	12
1.6. Sonlu Elemanlar ve Eşdeğer Statik/Elastik Yaylar ile Modelleme	15
1.7. Ortak Sistem Yaklaşımı ile Zemin - Yapı Etkileşimi	19
1.8. Altsistem Yaklaşımı ile Zemin - Yapı Etkileşimi	21
1.9. Altsistem Yaklaşımında Kinematik Etkileşim	22
1.9.1. Zemin Bünye Modeli ve Geometrik Ölçülerin Belirlenmesi	23
1.9.2. Kazıkların Modellenmesi ve Arayüz Elemanlarının Tanımlanması	28
1.9.3. Uygun Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi	31
1.9.4. Özdeğer Analizi ve Doğrusal/Doğrusal Olmayan Analizler	32
1.10. Altsistem Yaklaşımında Eylemsizlik Etkileşimi	39
1.10.1. Doğrusal Olmayan Kazık-Zemin İlişkisinin Tanımlanması	41
1.10.2. Doğrusal Olmayan Üstyapı Analizleri	45

İKİNCİ BÖLÜM	
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	46

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM	52

3.1. Literatür Derlemesi	52
3.2. Saha Çalışmaları ve Mühendislik Verilerinin Temini	52
3.3. Kullanılan Yazılım ve Donanımlar	53
3.4. Uygulanan Yöntem	54
3.5. Altsistem Yaklaşımı ile Örnek Uygulama	54
3.5.1. Üstyapı Geometri Bilgileri	55
3.5.2. Zemin Ortamı ve Malzeme Parametreleri	58
3.5.3. Deprem Kayıtları ve Ölçek Katsayıları	64
3.5.4. Kinematik Etkileşim Hesap Modeli ve Doğrusal Olmayan Analizler	72
3.5.5. Eylemsizlik Etkileşimi Hesap Modeli ve Üstyapı Analizleri	74
3.6. Yatak Katsayısı Yöntemi ile Örnek Uygulama	76

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	80

4.1. Altsistem Yaklaşımı Analiz Çıktıları	80
4.1.1. Düşey Yük Kaynaklı Kazık Eksenel Kuvvetleri	81
4.1.2. Özdeğer Analizi ile Elde Edilen Kritik Modlar	82
4.1.3. Temel Seviyesi İvme - Zaman Grafikleri	83
4.1.4. Kinematik Etkileşimde Pilot Kazıklarda Oluşan İç Kuvvetler	87
4.1.5. Eylemsizlik Etkileşiminde P-y Eğrilerinin Elde Edilmesi	88
4.1.6. Eylemsizlik Etkileşimi Üstyapı Analizleri ve Hesap Çıktıları	89
4.2. Yatak Katsayısı Yöntemi Analiz Çıktıları	93
4.2.1. Yatak Katsayısı Yöntemi Kazık İç Kuvvetleri	94
4.2.2. Yatak Katsayısı Yöntemi Deplasman ve Taban Kesme Kuvvetleri	96
4.3. Rijit Modele Ait Analiz Çıktıları	97
4.4. Hesap Yöntemlerine Ait Sonuçların Karşılaştırılması	98

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER

101

KAYNAKÇA 103

ÖZGEÇMİŞ I



SİMGELER VE KISALTMALAR

a	İvme
A_k	Zemin büyütme oranı
A_{loop}	Döngü alanı
BKS	Bina kullanım sınıfı
BYS	Bina yükseklik sınıfı
C	Kohezyon
$C_{(U)30}$	Üst 30 m'deki ortalama drenajsız kayma dayanımı
D	Kazık çapı
DD-1	50 Yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-2	50 Yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-3	50 Yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-4	50 Yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DES	Düşey elektrik sondaj
DTS	Deprem tasarım sınıfı
E	Elastisite modülü
E_{oed}	Ödometrik elastisite modülü
fck	Betonun karakteristik basınç dayanımı
fctk	Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
F	Sisteme etkiyen kuvvetler
F_S	Kısa periyot bölgesi yerel zemin etki katsayısı
F_u	Boyuna donatı kopma dayanımı
F_y	Boyuna donatı akma dayanımı
F_l	1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi
G	Ölü yük
G_{eq}	Eşdeğer birim deformasyon
G_i	R (0,7-1) katsayısı ile azaltılmış kiriş kayma modülü

G_{sec}	Kesme mukavemet modülü
G_{max}	Kesme mukavemeti
G^*	Bileşik kesme modülü
H_N	Bina toplam yüksekliği
j	Sistemdeki toplam düğüm noktası sayısı
k	Rijitlik
k_h	Yatay yatak katsayısı
kN	Kilo newton
kPa	Kilo pascal
k_s	Yatak katsayısı
k_v	Düşey yatak katsayısı
K	Bulk modülü
K_n, K_t	Normal direnç modülü
K_0	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı
L	Kazık boyu
m	Metre
m^2	Metre kare
m^3	Metre küp
M	Sistemdeki çubuk eleman sayısı
Masw	Çok kanallı yüzey dalgası analizi
Mw	Tasarım depreminin moment büyüklüğü
M_{DEV}	Betonarme perde veya çaprazlı çerçeve tabanında deprem yükünden oluşan devrilme momenti
M_0	Binanın tabanında meydana gelen toplam devrilme momenti
n	Sistemin hiperstatiklik derecesi
$N_{(60)30}$	Üst 30 m deki ortalama standart penetrasyon sayısı
PEER	Pasific Earthquake Engineering Research Center
PGA	En büyük yer ivmesi
PGV	En büyük yer hızı
r	Sistemdeki toplam mesnet reaksiyonu sayısı
R	Deprem yükü azaltma katsayısı
sn	Saniye
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı

S_S	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_{DI}	1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
SPT	Standart penetrasyon deneyi
SSR	Efektif kayma gerilmesi oranı
S_I	1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
t	Zaman
t_v	Sanal kalınlık
T	Yapı titreşim periyodu
T_A, T_B	Spektruma ait karakteristik periyotlar
T_L	Spektruma ait uzun periyot
T_P	Binanın göz önüne alınan deprem doğrultusunda hâkim doğal titreşim periyodu
T_0	Zemin hâkim titreşim periyodu
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDTH	Türkiye Deprem Tehlike Haritası
u	Yer değiştirme
V_P	P dalgası hızı
V_S	Kayma dalgası hızı
$V_{(S)30}$	Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
YASS	Yeraltı su seviyesi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
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
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği

yüksek killler,

3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$)

killler,

4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer

W	Üçgenin alanı
ΔW	Histerik döngünün alanı
\emptyset	Zemin içsel sürtünme açısı
Q_b	Kazık uç kapasitesi
γ	Birim hacim ağırlık
γ_d	Zeminin suya doymuş birim hacim ağırlığı
τ	Kesme mukavemeti
ν	Poisson oranı
ξ	Sönümlenme oranı
$\{\ddot{u}_{ff}(t)\}$	Zemin sınır bölgesi düğüm noktalarında tanımlı ivme
1D	1 boyutlu
2D	2 boyutlu
3D	3 boyutlu

TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Deprem esnasında meydana gelen sismik dalgalar (Ersoy, 2019)	3
Tablo 2	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018)	5
Tablo 3	1,0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018)	5
Tablo 4	Kocaeli deprem kaydı parametreleri (PEER, 2020)	8
Tablo 5	Zemine ait analiz parametreleri	9
Tablo 6	Doğrusal olmayan analizlere ait sonuç çıktıları	12
Tablo 7	Etkileşim analiz yöntemlerinin uygulama alanları (TBDY, 2018)	13
Tablo 8	Etkileşim yöntemleri tasarım detayları özeti (Ünsal, 2020)	14
Tablo 9	Ortak sistem yaklaşımı avantaj ve dezavantajları	21
Tablo 10	Kullanım alanlarına göre geliştirilmiş zemin bünye modelleri (Kılıç, 2017)	24
Tablo 11	Dinamik analiz yöntemleri ve tasarım koşulları (Ünsal, 2020)	35
Tablo 12	Karşılaştırmalı analiz modelleri (Ünsal, 2020)	39
Tablo 13	P-y, t-z ve Q-Z yayları için kaynaklar (TBDY, 2018)	43
Tablo 14	Kazıkların yatay kapasitesi için karşılaştırma	44
Tablo 15	Altsistem yaklaşımı tasarım ve hesap şeması	45
Tablo 16	BYS ve DTS'ye göre Bina Yükseklik Aralıkları (TBDY, 2018)	55
Tablo 17	Tabakalara ait dinamik-elastik parametreler (Akın vd., 2020)	59
Tablo 18	Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018)	61
Tablo 19	Zemin ortamı tasarım parametreleri	63
Tablo 20	Beton sınıfı dayanım parametreleri (TS 500, 2000)	63
Tablo 21	Betonarme çeliği mekanik özellikleri (TS 708, 2016)	64

Tablo 22	Bölgede meydana gelmiş hasar yapıcı depremler (Öztoprak ve Sarğın, 2020)	65
Tablo 23	Biga Yarım Adası ve Ganos fayı civarı depremler (Yıldız vd., 2013)	65
Tablo 24	PEER parametre giriş arayüzü	66
Tablo 25	Seçilen deprem kayıtlarına ait parametreler (PEER, 2020)	68
Tablo 26	Kazık-zemin arayüz parametreleri	72
Tablo 27	Taşıma gücü katsayıları (Vesic, 1973)	73
Tablo 28	Dinamik analiz parametreleri (TDTH İnteraktif Web Uygulaması, 2021)	77
Tablo 29	Yatak katsayısı azaltma faktörü (DLH, 2007)	78
Tablo 30	Düşey yüklerden dolayı kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetler	81
Tablo 31	Kritik modlara ait periyot değerleri	82
Tablo 32	Kinematik etkileşimde pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler	87
Tablo 33	İlk 15 moda ait periyot değerleri	91
Tablo 34	Sistemde meydana gelen en büyük deplasman değerleri	91
Tablo 35	Sistemde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti	92
Tablo 36	Sistemde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti	92
Tablo 37	P-y yaylarında meydana gelen reaksiyon kuvvetleri	92
Tablo 38	Pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler	93
Tablo 39	Altsistem yaklaşımı nihai kazık iç kuvvetleri	93
Tablo 40	İlk 15 moda ait periyot değerleri	94
Tablo 41	Pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler	95
Tablo 42	Sistemde oluşan mutlak değerce en büyük deplasman değerleri	96
Tablo 43	Sistemde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti	97

Tablo 44	Sistemde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti	97
Tablo 45	İlk 3 moda ait periyot değerleri	97
Tablo 46	Sistemde meydana gelen en büyük deplasman değerleri	98
Tablo 47	Sistemde x ve yönlerinde meydana gelen taban kesme kuvvetleri	98



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Sismik dalgaların yayılma formları (Yeşilce ve Demirdağ, 2003)	3
Şekil 2	Deprem dalgaları yayılma doğrultusu ile zeminin ilişkisi	4
Şekil 3	Anakaya - zemin yüzeyi deprem kaydı (Ünsal, 2020)	6
Şekil 4	Zemin - yapı, yapı-zemin karşılıklı etkileşimi	7
Şekil 5	Kocaeli deprem kaydı ivme, hız, deplasman - zaman grafikleri	8
Şekil 6	Tabaka kalınlığının ivme spektrumundaki değişime etkisi	10
Şekil 7	V_s 'nin ivme spektrumundaki değişime etkisi	10
Şekil 8	ξ 'nin ivme spektrumundaki değişime etkisi	11
Şekil 9	BHA'nın ivme spektrumundaki değişime etkisi	11
Şekil 10	Hiperstatik düzlem çerçeve sistem	16
Şekil 11	1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu sonlu eleman tipleri (Funnel, 2018)	17
Şekil 12	Eşdeğer yaylar ve sönümleyiciler ile zemin modellemesi (Özpalanlar, 2004)	18
Şekil 13	Ortak sistem yaklaşımı sistem hesap modeli	20
Şekil 14	Ortak sistem yaklaşımında zemin sınırlar koşulları (Erginsoy, 2019)	20
Şekil 15	Kinematik etkileşim sistem hesap modeli	23
Şekil 16	Malzeme davranış eğrileri (Demir, 2017)	25
Şekil 17	Zemin ortamının kısımları (Kutunis ve Elmas, 2005)	26
Şekil 18	Zemin ortamı için ihtiyaç duyulan asgari geometrik ölçüler	27
Şekil 19	Dolu gövdeli katı eleman kazık model	28
Şekil 20	Çizgisel eleman kazık model	29
Şekil 21	Normal kuvvet / kayma kuvveti yayları için eğriler (Itasca, 2011)	30

Şekil 22	Zemin ortamı sönüm katsayıları (Ünsal, 2020)	34
Şekil 23	Birim deformasyon ve kesme mukavemeti değişim döngüsü (Wasti, Y.)	36
Şekil 24	Sönümleme tanımı (Wasti, Y.)	37
Şekil 25	Döngüsel doğrusal olmayan analiz modeli zemin davranışı (Wasti, Y.)	38
Şekil 26	Eylemsizlik etkileşimi sistem hesap modeli	40
Şekil 27	Kinematik etkileşim - eylemsizlik etkileşimi - genel sistem hesap modelleri	40
Şekil 28	Dinamik durumda yanal yüklü kazıkların davranışı (Kramer, 2013)	41
Şekil 29	Eğrilerin karakteristik şekli ve derinlikle değişimi (Rocscience, 2018)	42
Şekil 30	Zemin kat, 1-17. katlara ait kalıp planı	56
Şekil 31	18-22. katlara ait kalıp planı	56
Şekil 32	Radye temel-kazık kesitleri	57
Şekil 33	Fore kazık aplikasyon planı	57
Şekil 34	Genel sisteme ait 3D render	58
Şekil 35	Proje alanı hava fotoğrafı (Parsel Sorgulama Uygulaması, 2020)	61
Şekil 36	Sondaja dayalı jeolojik zemin kesiti	62
Şekil 37	Modellemeye esas zemin ortamı geometrik ölçüleri	62
Şekil 38	Modellemeye esas düşey doğrultuda zemin geometrisi	63
Şekil 39	Proje alanı merkezli 100 km yarıçaplı alanda $3 \leq M_w \leq 9$ olan depremler (Kandilli Rasathanesi, 2020)	64
Şekil 40	Ölçeklemeye esas referans spektrumu gösterir arayüz (PEER, 2020)	66
Şekil 41	Kayıtların referans spektrumla ilişkisini gösterir arayüz (PEER, 2020)	67

Şekil 42	Kayıt-1'e ait ivme - zaman grafikleri	69
Şekil 43	Kayıt-2'ye ait ivme - zaman grafikleri	69
Şekil 44	Kayıt-3'e ait ivme - zaman grafikleri	69
Şekil 45	Kayıt-4'e ait ivme - zaman grafikleri	70
Şekil 46	Kayıt-5'e ait ivme - zaman grafikleri	70
Şekil 47	Kayıt-6'ya ait ivme - zaman grafikleri	70
Şekil 48	Kayıt-7'ye ait ivme - zaman grafikleri	70
Şekil 49	Kayıt-8'e ait ivme - zaman grafikleri	71
Şekil 50	Kayıt-9'a ait ivme - zaman grafikleri	71
Şekil 51	Kayıt-10'a ait ivme - zaman grafikleri	71
Şekil 52	Kayıt-11'e ait ivme - zaman grafikleri	72
Şekil 53	3 Boyutlu sistem genel görünüm	73
Şekil 54	3 Boyutlu sistem genel görünüm (Transparan)	74
Şekil 55	Hesap modeli sistem kesiti	74
Şekil 56	Kazıklar ve arayüz elemanları	74
Şekil 57	Eylemsizlik etkileşimi 3 boyutlu sistem hesap modeli	75
Şekil 58	Sistem x-x ve y-y kesitleri	75
Şekil 59	Temel tabanına tanımlanan doğrusal olmayan p-y yayları	76
Şekil 60	DD-2 elastik tasarım spektrumları (TDTH İnteraktif Web Uygulaması, 2021)	78
Şekil 61	3 boyutlu sistem hesap modeli	79
Şekil 62	Sistem x-x ve y-y kesitleri	79
Şekil 63	Kazıklara tanımlanan etkileşim (yatak katsayısı) yayları	79
Şekil 64	Seçilen pilot kazıkları gösterir aplikasyon planı	80
Şekil 65	Eksenel kuvvetlerin kazıklara etkitilmesi	81
Şekil 66	Kayıt-1'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	83

Şekil 67	Kayıt-2'ye ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	83
Şekil 68	Kayıt-3'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	84
Şekil 69	Kayıt-4'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	84
Şekil 70	Kayıt-5'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	84
Şekil 71	Kayıt-6'ya ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	85
Şekil 72	Kayıt-7'ye ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	85
Şekil 73	Kayıt-8'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	85
Şekil 74	Kayıt-9'a ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	86
Şekil 75	Kayıt-10'a ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	86
Şekil 76	Kayıt-11'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği	86
Şekil 77	3 boyutlu artımsal statik hesap modeli	88
Şekil 78	Kazık derinliği boyunca yer değiştirme eğrisi	88
Şekil 79	Kazık derinliği boyunca zemin direnci eğrisi	89
Şekil 80	Kuvvet - yerdeğiştirme (p-y) eğrisi	89
Şekil 81	Temel seviyesinde elde edilen 22 kayda ait spektrumlar	90
Şekil 82	Ortalama spektrum ile TDTH tasarım spektrumu ilişkisi	90
Şekil 83	İlk 3 moda ait mod davranış şekilleri	94
Şekil 84	Pilot kazık-1'e ait iç kuvvet diyagramları	95
Şekil 85	Pilot kazık-2'ye ait iç kuvvet diyagramları	95
Şekil 86	Pilot kazık-3'e ait iç kuvvet diyagramları	96
Şekil 87	x, y ve z yönlerinde sistem deplasmanı	96
Şekil 88	Hesap yöntemine bağlı taban kesme kuvvetlerindeki değişim	98
Şekil 89	Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-1 için iç kuvvet değerleri	99
Şekil 90	Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-2 için iç kuvvet değerleri	99
Şekil 91	Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-3 için iç kuvvet değerleri	99
Şekil 92	Hesap yöntemine bağlı ilk 3 mod için periyot değerleri	100



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

18 Mart 2018 tarihli Resmi Gazete ile yayınlanan ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren TBDY ile zemin-yapı etkileşimi analiz yöntemleri resmi olarak yönetmelikte yerini almış ve uygulamaya girmiş durumdadır. Yapısal analizlerin zemin etkisinden bağımsız olarak gerçekleştirilmesi en basit tabirle eksik/hatalı bir yaklaşımdır. Nitekim TBDY, zemin-yapı etkileşimi hesaplamalarının hangi şartlar altında zorunlu olduğunu kapsamlı bir şekilde açıklayarak ilgili şartlar altında zemin-yapı etkileşiminin göz önünde bulundurulması suretiyle hesaplama yapılmasını istemektedir. Bu kapsamda yapı ve zemin arasındaki karşılıklı etkileşimin hesaplara yansıtılması en doğru yaklaşım olacaktır.

Her ne kadar TBDY’de teorik olarak zemin-yapı etkileşimi ile ilgili hususlar detaylandırılmış olsa da uygulamaya yönelik örnekler ve bu alandaki araştırma sayısı oldukça azdır. Zemin-yapı etkileşimi hesap yöntemleri, birden fazla uzmanlığın koordineli çalışmasını gerektirmesi, yüksek özellikte yazılım/donanım ihtiyacı gerektirmesi yönüyle alışılmamış yapısal analizlerden oldukça farklı, kapsamlı ve sonuç çıktılarının elde edilmesi bakımından daha uzun bir süreçtir. Diğer yapısal analiz yöntemleri ile mukayese edildiğinde ise, tamamlanan araştırma ve uygulama sayısı açısından oldukça bakir bir alan olup bu alandaki bilimsel çalışmaların artırılması, zemin-yapı etkileşimi hesap yöntemlerinin doğru uygulanması açısından büyük önem arz etmektedir. Türkiye’de yapı stoğunun (özellikle yüksek yapılar) büyük bir kısmının aktif fay güzergâhlarında kalıyor olması, zemin-yapı etkileşiminin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisinin doğru belirlenmesini hayati bir ihtiyaç kılmaktadır (Öcal ve İnce, 2012).

Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile altsistem yaklaşımıyla zemin-yapı etkileşiminin, yapıların zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile deprem hesabını ne ölçüde değiştirdiği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için TBDY Bölüm 16’da açıklanan Yöntem I ile ve yatak katsayısı yöntemi ile deprem hesabı yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca sistem zemine ankastre şekilde

mesnetlenerek etkileşimsiz duruma ait sonuçlarda elde edilmiştir. Böylelikle zemin-yapı etkileşiminin üstyapıda daha elverişli bir durum oluşturup oluşturmadığı hususu ve zemin-yapı etkileşiminin her koşulda üstyapı performansına olumlu etkisi olduğu önyargısı sorgulanmış ve açığa çıkarılmaya çalışılmıştır. Öte yandan, coğrafyasının %93 ü aktif deprem kuşağı üzerinde kalan Türkiye için (Siyahi vd., 2013), deprem gerçeğinin insan hayatı ve maddi kaynaklar üzerinde oluşturduğu tehditin asgariye indirilmesine yönelik katkı sağlaması maksadıyla bilimsel bir kaynak üretmek hedeflenmiştir.

Bunlara ilaveten 3 boyutlu zemin ve yapı modelleme, serbest saha (free-field) analizleri ile deprem kaydındaki değişimi elde etme, zemin-kazık etkileşim yaylarının elde edilmesi, doğrusal olmayan geoteknik analizler gibi altsistem yaklaşımının gerektirdiği modelleme ve analiz aşamaları, sondaja dayalı zemin etüt çalışmaları ile raporlaması yapılmış bir zemin profili ve 23 katlı, kazık temelli, betonarme çerçeve tipi bir yapı üzerinden gerçekleştirilerek konu ile ilgili uygulamaya yönelik kapsamlı bir bilimsel kaynak üretilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Deprem Dalgaları ile Zemin Arasındaki İlişki

Genel bir ifade ile deprem; bir noktada belirli bir zaman zarfı içerisinde meydana gelen birim deformasyon birikiminin üretmiş olduğu enerjinin belirli bir sınır değerin üzerine çıkması sonucu, fay düzlemi boyunca uzanan ve tabakaların durabilitesini destekleyen sürtünme kuvvetini aşarak düzlemin her iki tarafında yer alan blokların hareket etmelerine neden olması ve söz konusu hareketler sonucu yer kabuğunda kırılma, yırtılma gibi deformasyonların meydana gelmesi durumudur (Koroğlu, 2017).

Deprem esnasında, deformasyonlara bağlı olarak yer kabuğunda biriken enerji, kinetik enerjiye dönüşerek zemin içerisinde her yönde sismik dalgalar halinde yayılmaktadır. Bu dalgalar cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olmak üzere iki ana başlıkta değerlendirilmektedir. Bu dalgalara ait genel bilgiler Tablo 1’de yer almaktadır.

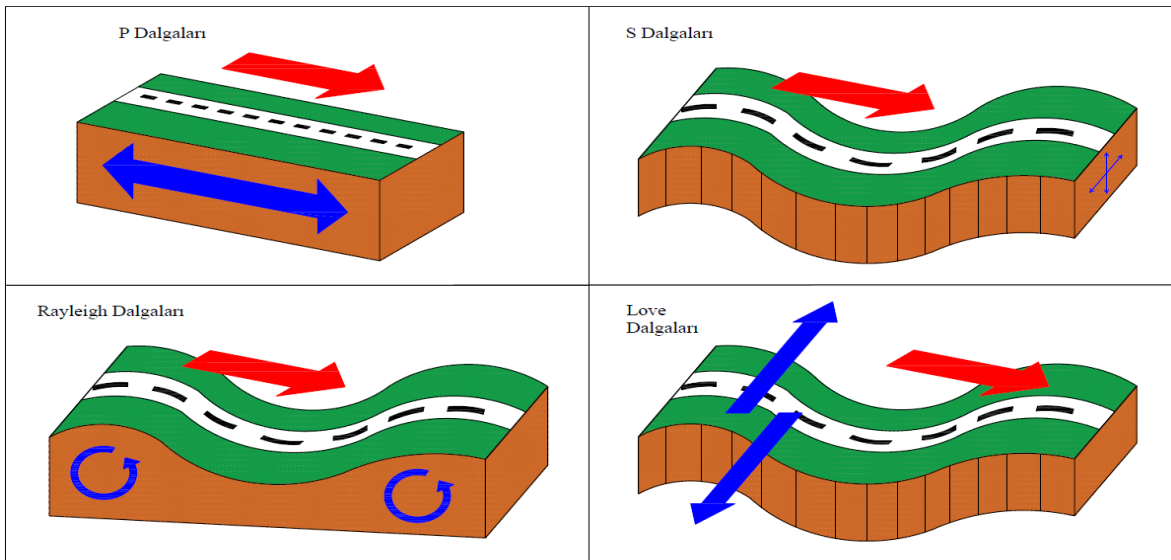
Fay kırılmasının meydana geldiği odak noktasından başlayarak, her yöne doğru yayılan sismik dalgalara “cisim dalgaları” denilmektedir. Cisim dalgalarının P ve S dalgaları olmak üzere iki çeşidi vardır (Utkucu, 2012).

Yerkabuğunun yüzeyinde, fay kırılmasının meydana geldiği odak noktasına en yakın yer olan merkez üssü bölgesinden yayılan sismik dalgalara ise “yüzey dalgaları” denilmektedir. Love dalgası ve Rayleigh dalgası olmak üzere iki çeşidi vardır. Yüzey dalgaları yerkabuğu yüzeyinde yayıldıkları için deprem esnasında meydana gelen hasarın büyük bir bölümü bu dalgalardan, özellikle de Rayleigh dalgasından kaynaklanmaktadır (Utkucu, 2012).

Tablo 1

Deprem esnasında meydana gelen sismik dalgalar (Ersoy, 2019)

Cisim Dalgaları		Yüzey Dalgaları	
P Dalgası	S Dalgası	Love Dalgası	Rayleigh Dalgası
<ul style="list-style-type: none"> •Boyuna dalgalardır •Hızları 6 km/s dir •Yayılırken hacim ve şekil değiştirme olur. •Titreşimler, dalga yönüne paraleldir. 	<ul style="list-style-type: none"> •Enine dalgalardır •Hızları 3,5 km/s dir •Yayılırken şekil değiştirme oluşur •Titreşimler, dalga yönüne diktir. 	<ul style="list-style-type: none"> •Merkez üssüne en son ulaşır. •Hızları 1,5-2 km/s •Max hasara veren dalgalardır •Sismogramda en şiddetli hareketi 	<ul style="list-style-type: none"> •Sarsıntıların çoğu, büyük genlikli Rayleigh dalgalarından kaynaklanır.

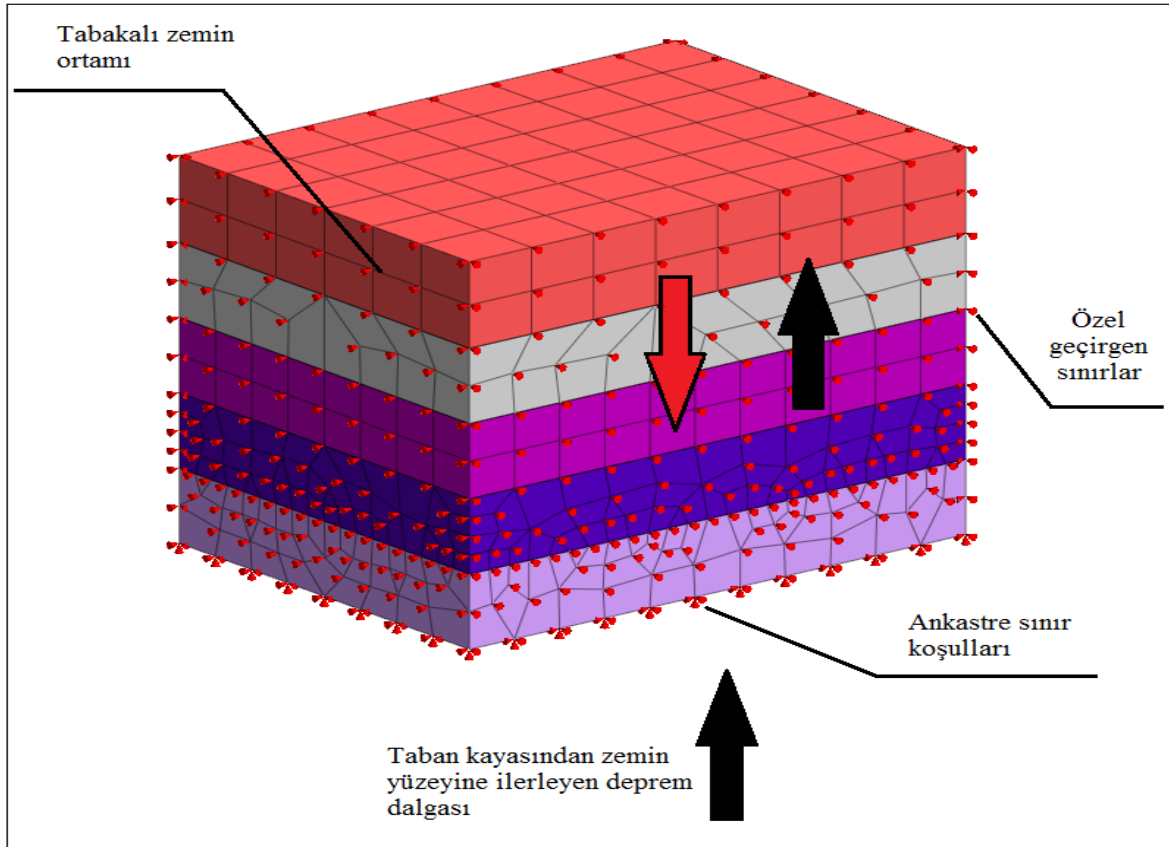


Şekil 1. Sismik dalgaların yayılma formları (Yeşilce ve Demirdağ, 2003)

Deprem esnasında meydana gelen sismik dalgalar, taban kayasından üst kısımdaki görece rijitliği daha zayıf olan zemin tabakaları boyunca ilerleyerek zemin yüzeyine

ulaşırlar (Şekil 2). Dalgalar, genellikle alt katmanlardaki rijit zemin tabakalarından üst bölümlerdeki yumuşak tabakalara ilerledikleri için ivmelerin genliklerinde artışlar meydana gelir. Deprem dalgalarının zemin ile etkileşimi sonucu ivme genliklerinde meydana gelen bu artışa zemin büyütmesi (amplifikasyon) denir.

Bazı durumlarda ise zemin ileri derecede doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir ve bunun sonucu olarak da ivme genliklerinde artış yerine azalmalar söz konusu olmaktadır. Bu duruma ise zemin azaltması (deamplifikasyon) denir. (Aydınoglu M. N., 2012).



Şekil 2. Deprem dalgaları yayılma doğrultusu ile zeminin ilişkisi

Zeminin deprem dalgaları üzerindeki etkisinin hesaplamaya yansıtılmasında, F_S ve F_I (yerel zemin etki katsayıları) kullanılmaktadır. Yerel zemin sınıfına bağlı olarak değişen bu katsayılar TBDY Bölüm 2.3.3'te yer almakta olup F_S ve F_I , Tablo 2 ve 3'te özetlenmiştir. Tablo 2 ve 3'e göre F_S ve F_I , yerel zemin sınıfına ve TDTH'den yapının konumu ve DTS' ye (deprem tasarım sınıfı) bağlı olarak elde edilecek S_S ve S_I 'e (harita

spektral ivme katsayıları) göre belirlenecektir. S_S ve S_I 'in Tablo 2 ve 3'te bulunmayan ara değerler alması durumunda ise, F_S ve F_I enterpolasyon yöntemi ile elde edilebilir.

Tablo 2

Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018)

Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S \leq 0,5$	$S_S \leq 0,75$	$S_S \leq 1$	$S_S \leq 1,25$	$S_S \leq 1,5$
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	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Tablo 3

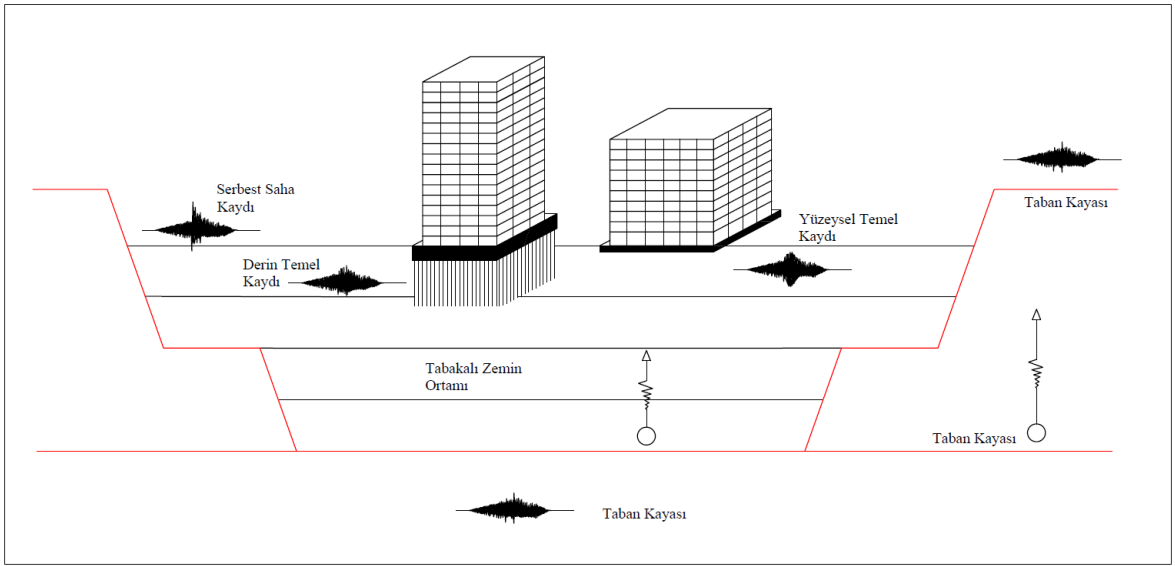
1,0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018)

Zemin Sınıfı	1,0 saniye için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S \leq 0,5$	$S_S \leq 0,75$	$S_S \leq 1$	$S_S \leq 1,25$	$S_S \leq 1,5$
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	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yapı tasarımı yaparken, zemin büyütmesinin söz konusu olduğu durumlarda, deprem dalgalarının genliklerinde oluşan artma sonucu dalgalar değişime uğramakta, bunun sonucu olarak yapı temeline etkiyen taban kesme kuvvetinde, deprem dalgalarının genliklerindeki değişime paralel olarak artış meydana gelmektedir. Bu sebeple zemin etkisinin hesaplamalara dahil edilmesi doğru sonuçlar elde edilebilmesi adına büyük önem arz etmektedir. Tam tersi olarak zemin azaltmasının söz konusu olduğu durumlarda ise, yapıya etkiyen deprem kuvveti, zemin etkisine bağlı olarak azalacağından dolayı güvenli tarafta kalmak maksadıyla zemin-yapı etkileşimi hesaplamalara dahil edilmeyebilir.

1.3. Zemin - Yapı ve Yapı - Zemin Karşılıklı Etkileşimi

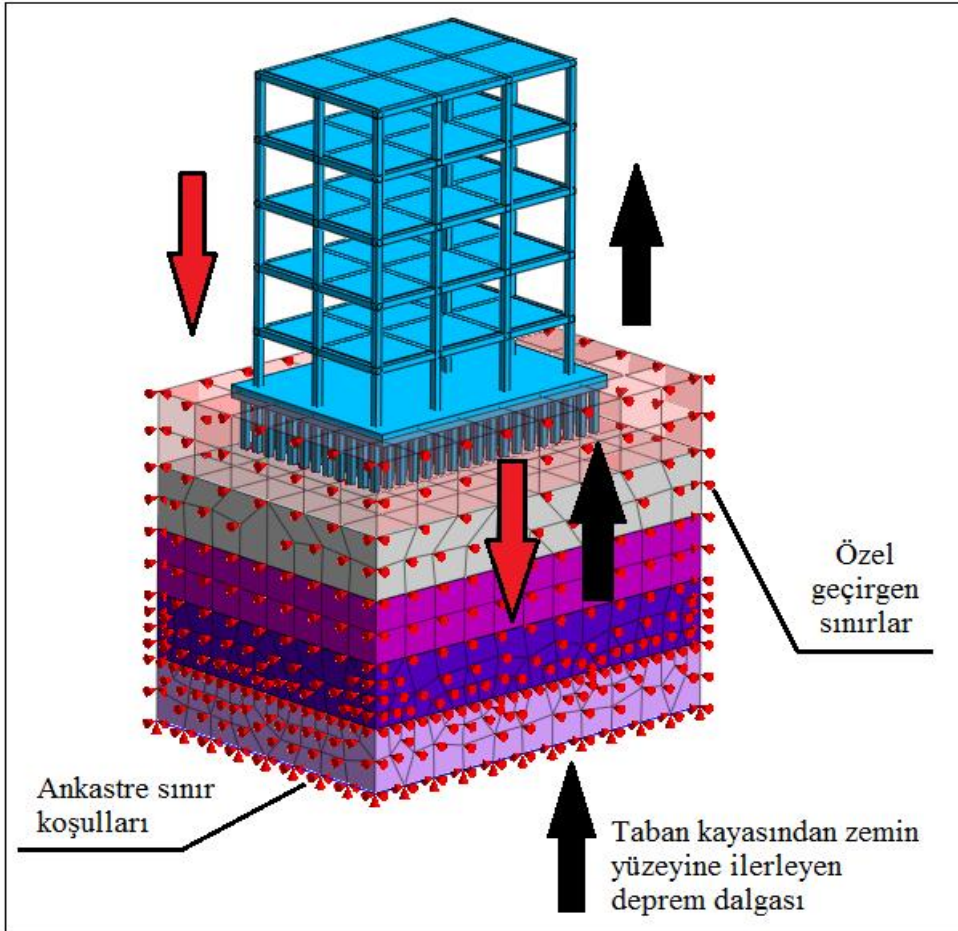
Anakayadan tabakalı zeminler boyunca yüzeye doğru ilerleyen deprem dalgaları, anakaya ile yüzey arasındaki zemine ait tabaka kalınlığı, ξ (sönüm oranı), V_S (kayma dalgası hızı), BHA (birim hacim ağırlık), yüzeyde herhangi bir yapı bulunup bulunmaması, yüzeydeki yapının temel sistemi (yüzeysel, derin) gibi bir çok etkene bağlı olarak değişime uğramakta, bunun sonucu olarak yapı tabanına etkiyen deprem kuvveti artmakta yada azalmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Anakaya - zemin yüzeyi deprem kaydı (Ünsal, 2020)

Yapı ve zemin, deprem sırasında birbirini etkileyecek şekilde titreşirler. Zemin ortamının üstyapıya oranla çok daha rijit olduğu durumlar dışında üstyapı ve zeminin her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler olarak statik ve dinamik dış etkilere karşı birlikte tepki gösterir. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir (Mamuk, 2010). Zemin-yapı etkileşimi, zeminin yapı üzerindeki etkisi ve buna karşılık olarak yapının zemin üzerindeki etkisi olmak üzere karşılıklı olarak gerçekleşen fiziksel bir tepki durumudur. Zeminin yapı üzerindeki etkisi, taban kayasından yüzeye doğru ilerleyen deprem dalgalarının ivmelerinin genliklerinde zemine bağlı faktörler sonucu artma yada azalma meydana gelmesi sonucu yapıya etkiyen deprem kuvvetinin, bu artma/azalmaya bağlı olarak değişmesi durumudur. Yapının zemin üzerindeki etkisi ise, deprem esnasında taban kayasından tabakalı zemin ortamını geçerek yüzeye ilerleyen deprem dalgalarının

yapıya ulaşması ve yapının sönüm kabiliyetine bağlı olarak bir miktarının ısı enerjisine dönüştürülerek sönümlenmesi, sönümlenemeyen kısmın ise tekrardan zemin ortamına ulaşması şeklinde ifade edilebilir. Yapıdan ayrılarak tekrardan zemin ortamına dönen dalgalara “yansıma dalgaları” denir. Bu noktada yapının sönüm kabiliyeti ne kadar yüksek ise zemine dönen yansıma dalgaları da o kadar az olacaktır. Bu yönüyle bakıldığında yapının rijitliği, yüksekliği, temel sistemi vb. durumlar, yapıdan ayrılarak/yansıyarak tekrardan zemin ortamına dönen deprem dalgalarını etkilemektedir (Şekil 4). Deprem yükleri altında, zemin ile yapı arasındaki dinamik etkileşim dikkate alınarak yapılan yapısal hesaplamalarda, şekil değiştiren zemin ortamı, yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunurken, yapı da zemini hem kinematik, hem de dinamik bakımdan etkilemektedir. Böylece yapının var olmadığı durumda, yalnızca zeminin kendi içindeki dinamik davranışının bir sonucu olan deprem verisi, artık yapının da varlığından etkilenen daha karmaşık bir yer hareketi niteliği kazanmaktadır (Aydemir, 2011).



Şekil 4. Zemin - yapı, yapı-zemin karşılıklı etkileşimi

1.4. İvme Spektrumundaki Değişime Yönelik Sayısal Örnekler

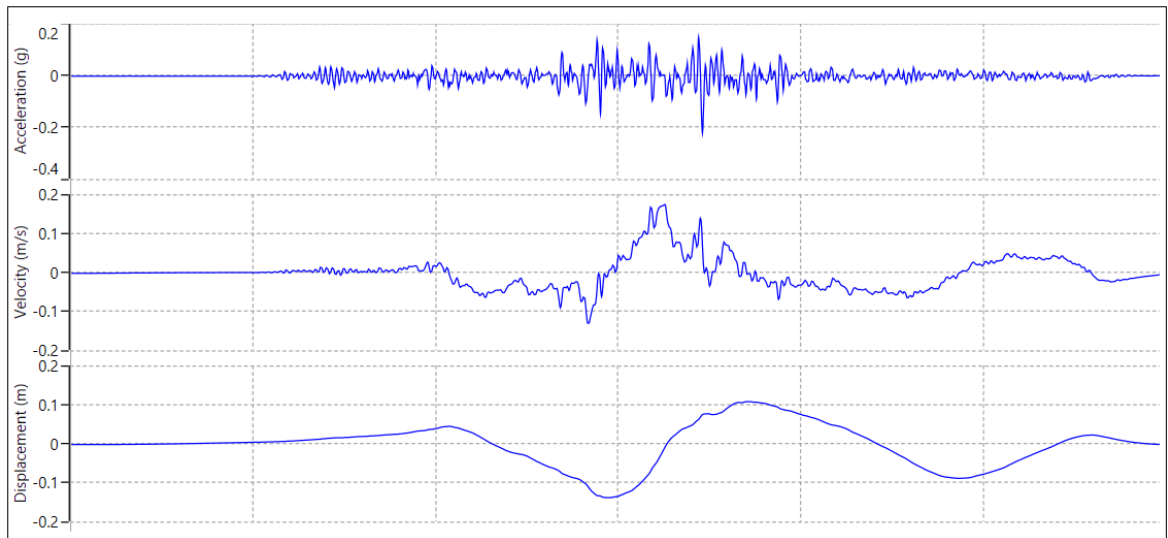
Anakayadan zemin yüzeyine doğru ilerleyen deprem dalgaları, daha öncede ifade edildiği üzere zemine ait bir takım parametrelere bağlı olarak artma yada azalma eğilimi göstermektedir. Bu parametrelerden bazıları seçilerek Deepsoil yazılımı ile doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek anakayadan yüzeye doğru ilerleyen deprem kaydına ait ivme spektrumunda meydana gelen değişimler irdelenmiştir.

Analizlerde, Kocaeli deprem kaydı kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve serbest saha yüzeyinde zemin etkisine bağlı olarak değişime uğramış yeni spektrumlar elde edilmiştir. Kocaeli deprem kaydına ait parametreler Tablo 4 ve Şekil 5’te yer almaktadır.

Tablo 4

Kocaeli deprem kaydı parametreleri (PEER, 2020)

Parametre	Birim	Değer
Nokta sayısı	Adet	6000
Zaman adımı	Saniye	0,005
Nyquist frekansı	Hz	100
PGA	g	2,20E-01
PGV	m/s	1,80E-01
PGD	m/s	1,40E-01



Şekil 5. Kocaeli deprem kaydı ivme, hız, deplasman - zaman grafikleri

İlk olarak tabaka kalınlığının ivme spektrumundaki değişime etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Tablo 5'te yer alan zemin parametreleri kullanılarak, tüm parametreler sabit tutulup yalnızca tabaka kalınlığı değiştirilerek serbest saha yüzeyindeki yeni spektrum elde edilmiştir. Yapılan diğer analizlerde de, spektrumdaki değişime etkisi araştırılan ilgili parametre haricinde diğer tüm parametreler sabit tutularak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek serbest saha yüzeyindeki yeni spektrumlar elde edilmiştir.

Tablo 5

Zemine ait analiz parametreleri

Parametre	Değer	İvme (anakaya)	İvme (serbest saha)
Tabaka kalınlığı (m)	20		
BHA (kN/m ³)	19,635		
V _S (m/sn)	304,8		
Kesme muk. (Kpa)	157,44		
Sönüm (%)	5		
Theta 1	-8,04	0,76g	0,48g
Theta 2	2,89		
Theta 3	15,48		
Theta 4	1		
Theta 5	0,99		
A	1		

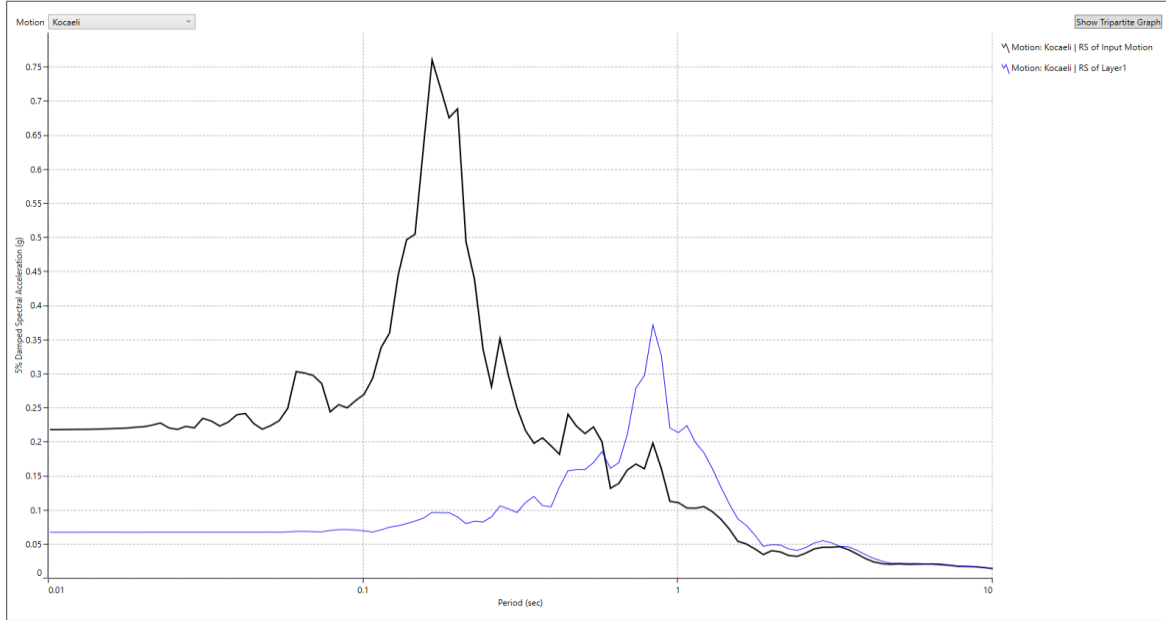
Doğrusal olmayan analizler için efektif kayma gerilmesi oranı hesaplanmasında Denklem (1.1) kullanılmıştır.

$$SSR = (M - 1)/10 \quad (1.1)$$

Bileşik kesme modülü formülasyonu için Denklem (1.2) kullanılmıştır.

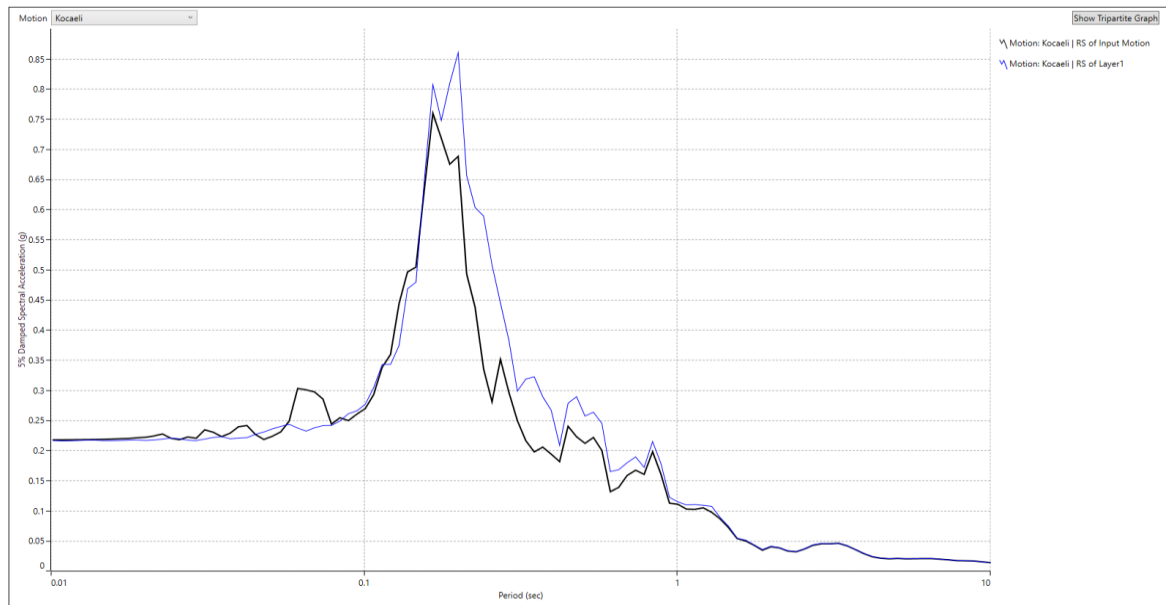
$$G^* = G \cdot (1 + 2 \cdot i \cdot \varepsilon) \quad (1.2)$$

Tablo 5’te yer alan parametreler sabit tutularak yalnızca tabaka kalınlığı iki katına (40 m) çıkartılmış ve serbest saha yüzeyindeki yeni spektrum elde edilmiştir. Elde edilen spektrumda, maksimum ivme değerinin yaklaşık 0,37g olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6).



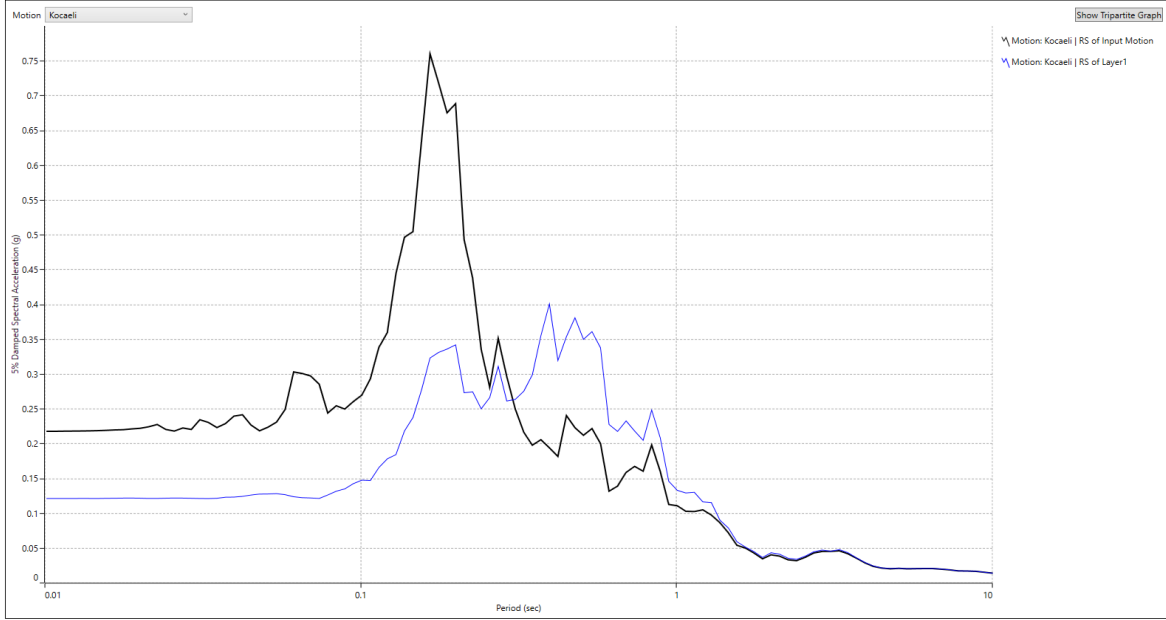
Şekil 6. Tabaka kalınlığının ivme spektrumundaki değişime etkisi

V_S 'nin ivme spektrumu üzerindeki etkisini incelemek için V_S iki katına çıkartılarak (609,6 m/sn) doğrusal olmayan analiz yapılmış ve serbest saha yüzeyinde elde edilen spektrumda maksimum ivme değerinin yaklaşık 0,86g olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7).



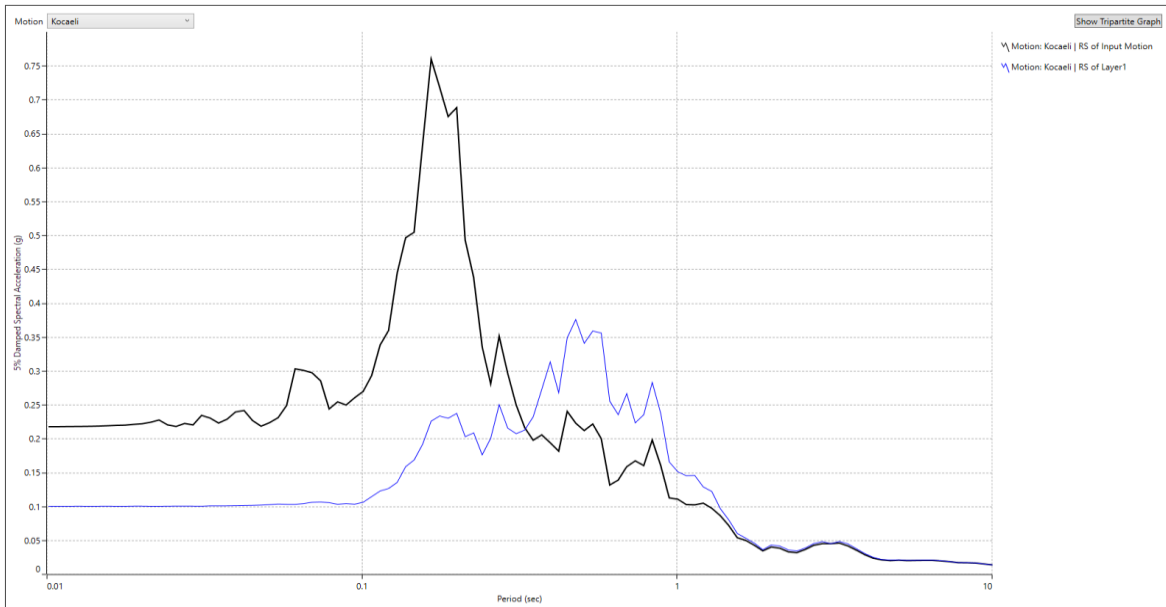
Şekil 7. V_S 'nin ivme spektrumundaki değişime etkisi

ξ 'nin ivme spektrumu üzerindeki etkisini incelemek için ξ iki katına çıkartılarak (%10) doğrusal olmayan analiz yapılmış ve serbest saha yüzeyinde elde edilen spektrumda maksimum ivme değerinin yaklaşık 0,4g olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. ξ 'nin ivme spektrumundaki değişime etkisi

BHA'nın ivme spektrumu üzerindeki etkisini incelemek için BHA iki katına çıkartılarak ($39,27 \text{ kN/m}^3$) doğrusal olmayan analiz yapılmış ve serbest saha yüzeyinde maksimum ivme değerinin yaklaşık 0,37g olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. BHA'nın ivme spektrumundaki değişime etkisi

Doğrusal olmayan analizler neticesinde ivme spektrumlarındaki değişimlere yönelik elde edilen sonuçlar Tablo 6’da yer almaktadır.

Tablo 6

Doğrusal olmayan analizlere ait sonuç çıktıları

Parametre	Değer	Anakaya Spektrumunda Max İvme (g)	Serbest Saha Spektrumunda Max İvme (g)
Tabaka Kalınlığı (m)	20	0,76	0,48
	40	0,76	0,37
V_S (m/sn)	304,8	0,76	0,48
	609,6	0,76	0,86
ξ (%)	5	0,76	0,48
	10	0,76	0,4
BHA (kN/m ³)	19,635	0,76	0,48
	39,27	0,76	0,37

Tablo 6’da, tek tabakalı jenerik bir zemin profili seçilerek gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler neticesinde, anakaya ve serbest saha yüzeyinde elde edilen spektrumlardaki maksimum ivme değerleri yer almaktadır. Her bir parametrenin, anakayadan tabakalı zeminler boyunca devam ederek serbest sahaya ulaşan deprem kaydına ait spektrum üzerinde, ciddi oranda artırıcı/azaltıcı etkileri olduğu görülmektedir. Söz konusu analizler doğrusal olmayan jenerik bir zemin profili üzerinden gerçekleştirildiği için, zemin profili ve parametrelerinin yani çalışma sahasının değişmesi durumunda, serbest saha yüzeyindeki ivme değerleri de değişkenlik gösterecektir. Bu durumda, yapı tasarımı yaparken, sahaya özel zemin-yapı etkileşimli analizlerin, yapısal performansın en doğru şekilde belirlenmesi adına önem arz ettiği görülmektedir.

1.5. Zemin - Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri

TBDY’nin “Deprem Etkisi Altında Temel Zemini ve Temellerin Tasarımı İçin Özel Kurallar” başlıklı 16. Bölümünde, zemin-yapı etkileşimi analiz yöntemleri ile ilgili usul ve esaslar yer almaktadır. Burada ortak sistem yaklaşımı ve altsistem yaklaşımı olmak üzere iki ayrı hesap yöntemi sunulmaktadır. Bu iki yöntemin tasarım detayları ise DTS,

yerel zemin sınıfı ve BYS'ye (bina yükseklik sınıfı) bağlı olarak seçilecek olan Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III'e göre belirlenecektir (Tablo 7).

Tablo 7

Etkileşim analiz yöntemlerinin uygulama alanları (TBDY, 2018)

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 DTS = 3, 3a, 4, 4a	BYS = 2, 3 BYS = 1	ZD, ZE, ZF
Yöntem III	DTS = 1a, 2a DTS = 1, 2, 3, 3a	BYS \geq 4 BYS \geq 2	ZD, ZE, ZF

TBDY'ye göre, DTS ve BYS koşullarının sağlanması halinde ZD, ZE ve ZF yerel zemin sınıfları için zemin-yapı etkileşiminin yapısal hesaplara yansıtılması gerekmektedir. İstenildiği takdirde görece daha rijit zemin sınıfları için de zemin-yapı etkileşimi yapısal hesaplara dahil edilebilir.

Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III için gerekli parametrelere bakıldığında, Yöntem I'in en olumsuz koşulları ihtiva ettiği görülmektedir. Tasarım mühendisinin tercihinine bağlı olarak Yöntem II yerine Yöntem I, Yöntem III yerine ise Yöntem II kullanılabilir ve yöntemlerin uygulama alanları genişletilebilir (TBDY, 2018).

Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III'e ait tasarım detayları ile ilgili hususlar Tablo 8'de özetlenmiştir. Yöntem I'in en olumsuz koşulları ihtiva ediyor olması, bu durumun bir sonucu olarak Yöntem I seçilerek hesaplama yapılması gerektiği durumlarda, Yöntem II ve Yöntem III'e göre çok daha kapsamlı modelleme ve hesaplama yapılması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Benzer şekilde Yöntem II seçilerek hesaplama yapılması gerektiğinde de Yöntem III'e kıyasla daha kapsamlı modelleme ve hesaplama yapmak gerekmektedir. Bu sebeple 1.7 ve 1.8'de ortak sistem yaklaşımı ve altsistem yaklaşımı ile ilgili modelleme ve hesaplamalara yönelik belirtilen hususlar, Yöntem I'e uygun olacak şekilde ifade edilmiştir.

Tablo 8

Etkileşim yöntemleri tasarım detayları özeti (Ünsal, 2020)

Yöntem-I	Yöntem-II	Yöntem-III
Kinematik Etkileşim	Kinematik Etkileşim	<ul style="list-style-type: none"> •Yöntem III, Yöntem II'nin basitleştirilmiş halidir. •Bu kapsamda zemin ortamı için herhangi bir modelleme yapılmayacaktır. •Yöntem III için, Yöntem I ve Yöntem II'de elde edilen etkin temel hareketlerine ilişkin yerdeğiştirme ve spektrumların, statik kinematik etkileşim hesabına dayalı hesaplanması söz konusu değildir. Bunun yerine TBDY'de tanımlı tasarım spektrumu kullanılabilir, yani dinamik analiz yapılmasına dahi gerek duyulmadan doğrudan TBDY'den elde edilen spektrum etkisinde gerekli hesaplamalar yapılabilmektedir.
<ul style="list-style-type: none"> •Zemin ortamı sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemi ile analize uygun şekilde 3 boyutlu olarak modellenecektir. •Kazıklar çubuk eleman olarak modellenecek, kazık ile zemin arasına uygun arayüz elemanları tanımlanacaktır. •Bina temeli (varsa bodrum kutusu) kütsüz sonsuz rijit eleman olarak modellenecektir. •En az 11 çift uygun deprem kaydı taban kayasından sisteme etkitilecektir, temel seviyesi ivme spektrumları elde edilecektir. 	<ul style="list-style-type: none"> •Zemin ortamı için herhangi bir modelleme yapılmayacaktır. •Kazıklar çubuk eleman olarak modellenecek, kazık ile zemin arasındaki ilişki TBDY'e uygun yaylarla modellenecektir. •Bina temeli (varsa bodrum kutusu) kütsüz sonsuz rijit eleman olarak modellenecektir. •Bodrum perdeleri ile zemin arasındaki yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisini temsilen, literatürden p-y/t-z/q-z eğrileri kullanılacaktır. 	
Eylemsizlik Etkileşimi	Eylemsizlik Etkileşimi	
<ul style="list-style-type: none"> •Temel-kazık-zemin alt sistemine statik tekil kuvvetler etkitilerek etkileşim yaylarına ait p-y eğrileri elde edilecektir. •Temel ve üstyapı, varsa bodrum kutusu ile birlikte kütleli olarak modellenecektir. •P-y eğrilerinden elde edilen etkileşim yayları, bina tabanına etkitilerek uygun histeretik davranış elde edilecektir. •Sisteme kinematik etkileşimde elde edilen ivme spektrumları etkitilecektir, üstyapı ve üstyapı temelinde zamana bağlı kuvvet - deplasman değişimleri elde edilecektir. 	<ul style="list-style-type: none"> •Eylemsizlik etkileşiminde izlenenecek olan hesaplama aşamaları, Yöntem I için uygulanması gerekli hesaplama aşamalarıyla aynıdır, yalnızca sistem hesap modelinde farklılık söz konusudur. Yöntem I'deki temel-kazık-zemin ortamı modeli yerine Yöntem II'de temel-kazık-zemin yayları (p-y/t-z/q-z yayları) modeli göz önüne alınacaktır. 	

Tablo 8’de yer alan etkileşim yöntemleri ile ilgili tasarım detayları, altsistem yaklaşımı esas alınarak ifade edilmiştir. Ortak sistem yaklaşımı ile hesaplama yapılması durumunda ise, Tablo 8’de bahsi geçen kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi modelleri birleştirilerek elde edilen zemin+kazık+temel+üstyapı modelinin, taban kayasında tanımlanacak olan en az 11 çift deprem kaydı etkisi altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesi şeklinde hesaplama yapılacaktır.

1.6. Sonlu Elemanlar ve Eşdeğer Statik/Elastik Yaylar ile Modelleme

Zemin-yapı etkileşimli hesaplamalarda, zemin ortamının modellenmesi ile ilgili sonlu elemanlar/sonlu farklar ile modelleme, eşdeğer statik/elastik yaylar ve sönümleyiciler ile modelleme gibi birden çok yöntem kullanılmaktadır.

Tablo 8’de, Yöntem I için zemin ortamının sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemi ile analize uygun şekilde modellenmesi gerektiği ifade edilmektedir. Teorik olarak sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemlerinin her ikisi ile de modelleme yapmak uygun olsa da pratikte geoteknik ve yapısal analizlerin yapıldığı bilgisayar yazılımlarının pek çoğu sonlu elemanlar tabanlı çalışmaktadır ve bu sebeple gerek zemin ortamının gerekse de üstyapının modellenmesinde yaygın olarak sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir.

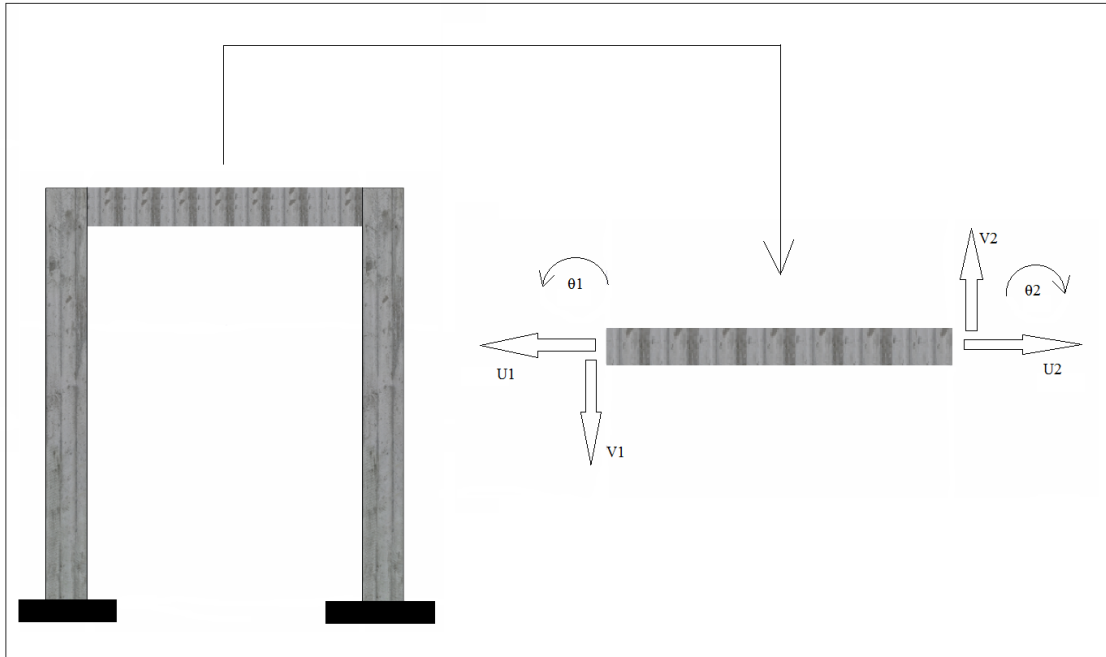
Sonlu elemanlar yönteminin genel felsefesi, çözümü karmaşık komplike bir sistemi, çok daha küçük alt elemanlar şeklinde ele alarak bu alt elemanlar üzerinden yapılacak görece daha basit çözümlerle bütüncül sisteme ait nihai sonuç çıktılarını elde etmektir. Öne çıkan faydalarının başında ise; sistemin, tasarımcının inisiyatifi ile istenilen ölçülerde alt elemanlara ayrılabilmesi ve bu alt elemanlarda kuvvet, yer değiştirme, deformasyon vb. birçok etkinin lokal olarak elde edilebilmesi gelmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat, makine, otomotiv, havacılık, denizcilik, savunma sanayii, ulaştırma vb. bir çok alanda ve mesleki disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin İnşaat Mühendisliği disiplinindeki karşılığını örnek bir model üzerinden ifade edecek olursak:

Yapısal sistemlerde, mesnet reaksiyonlarının, kesit zorlarının, şekil değiştirme ve yer değiştirmelerin denge denklemleri ile hesap edilmesinin mümkün olmadığı hiperstatik sistemlerde, sistemin çözümü için üç adet denge denkleminin yanı sıra şekil değiştirmeyi de içeren ilave denklemlerin hesaplamalara dahil edilmesi gereklidir (Şen, 2019). Örnek olarak, her iki uçta da kolonlara ankastre olarak bağlanmış kirişli bir çerçeve sistemde (Şeki 10), Denklem (1.3) ile hiperstatiklik derecesini elde edecek olursak;

$$n = 3 \cdot M + r - 3 \cdot j \quad (1.3)$$

$$n = 3 \cdot 3 + 6 - 3 \cdot 4 \quad , \quad n = 3 \quad (\text{sistem 3. dereceden hiperstatik})$$

Burada kiriş uçlarındaki yer değiştirme ve dönmeler üç adet denge denklemi ile hesaplanamaz. Bu sebeple şekil değiştirme denklemleri de hesaplamalara dahil edilmelidir.



Şekil 10. Hiperstatik düzlem çerçeve sistem

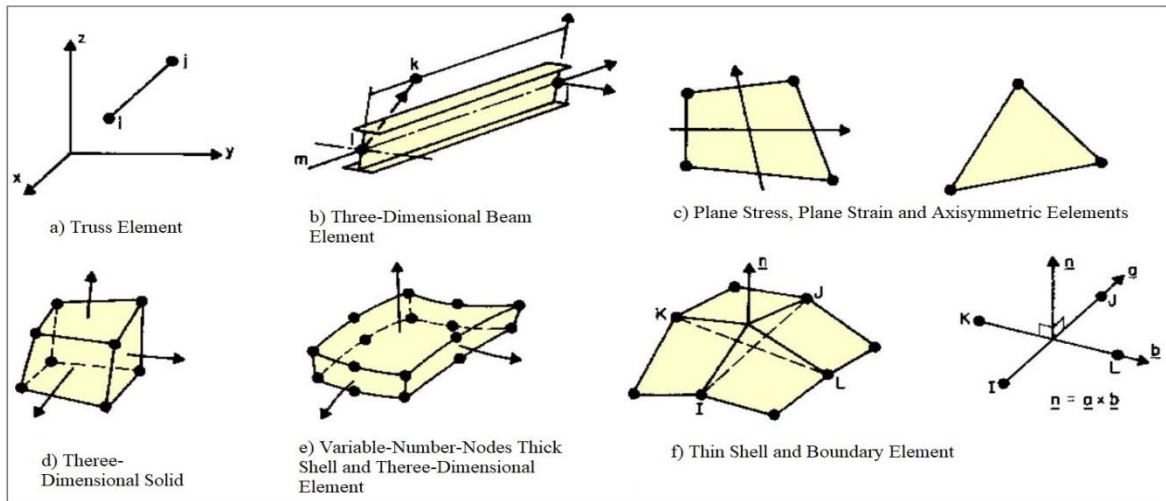
$$[k] \cdot [u] = [F] \quad (1.4)$$

$$U_1 \quad V_1 \quad \theta_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad \theta_2$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ \theta_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M_1 \\ F_3 \\ F_4 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)'teki matrisin çözümü ile çerçeve sistemdeki bilinmeyenlere ait istenilen sonuçlar elde edilebilir. Burada olduğu gibi, sistemdeki elemanları istenilen ölçülerde bölerek sonlu sayıda parçalara ayırma ve her parçanın denklemini ayrı ayrı yazarak, sonrasında da kendi aralarında ortak noktalarından birleştirme ve global matrisi elde etme işlemine “Sonlu Elemanlar Yöntemi” denir (Şen, 2019).

Şekil 11’de görüldüğü üzere, Sonlu Elemanlar Yöntemi, 1 boyutlu çubuk sistemlerde kullanılabildiği gibi 2 boyutlu düzlem ve 3 boyutlu hacimsel elemanların çözümüne de olanak sağlar (Şen, 2019).



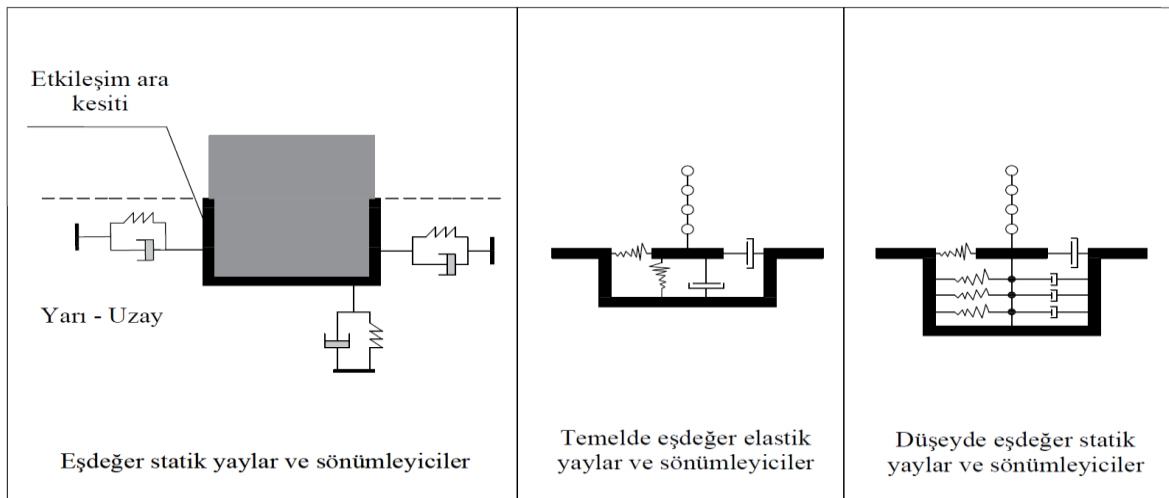
Şekil 11. 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu sonlu eleman tipleri (Funnel, 2018)

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili olarak dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biri, sistemin hangi ölçekte/detayda alt elemanlara ayrılacağı hususudur. Şekil 11’de görüldüğü üzere yapısal/zeminsel sistemin özelliklerine bağlı olarak farklı geometrik formlarda ve ölçülerde sonlu eleman tipleri tercih edilebilir. Hacimsel elemanlarda üçgen, dörtgen veya karma (hibrit) formlar kullanılabilir. Sistemdeki minimum eleman ölçüleri

belirlenirken dikkat edilmesi gereken husus kullanılacak analiz türüdür. Doğrusal elastik analiz kullanıldığında, sonlu eleman ağı tasarımcının inisiyatifi ile istenilen detayda oluşturulabilir. Fakat rijitliğin kademeli olarak azaldığı doğrusal olmayan analizlerde, alt eleman ölçüleri belirli değerlerin altında seçilmemelidir. Çünkü yük taşıma eğrisi eğilir ve rijitlik azalacaktır, bu durumda sistem ne kadar küçük alt parçalara ayrılırsa, parçalar taşıma gücünü o kadar erken yitirecek ve kırılacaktır. Bu durum ise hesaplamalarda hatalı sonuçlar alınmasına sebep olacaktır.

Modelde kullanılan sonlu elemanların maksimum boyutu belirlenirken ise boyutlar, analizlerde kullanılan en kısa dalga boyunun sekizde biri ile onda biri arasında sınırlandırılmalıdır. Sonlu elemanların maksimum boyutları, genellikle dalga yayılma hızı ve belirli bir frekans aralığı ile kontrol edildiğinden, elemanların boyutlarının büyütülmesi ve buna bağlı olarak sayısının azaltılması demek, çalışılan bölgenin boyutunu küçültmek anlamına gelir (Karabörk vd., 2010). Bu durumda zeminin deprem dalgaları üzerindeki etkisi tam anlamıyla hesaplamalara yansıtılmamış olacaktır.

Zemin ortamının geometrik formu, tabaka kalınlığı, sınır koşulları gibi unsurlar eşdeğer statik/elastik yaylar yöntemleri ile tam anlamıyla idealize edilemez. Eşdeğer yay yöntemlerinde statik/elastik yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini, sönümleyiciler ise enerji kaybına eşdeğer anlamda kullanılan (fiktif) zemin sönümünü temsil etmektedir (Mamuk, 2010). Zemin sönümünün temsilinde kullanılan sönüm değerleri doğru seçilemediği takdirde, etkileşim hesaplamalara doğru şekilde yansıtılamaz.



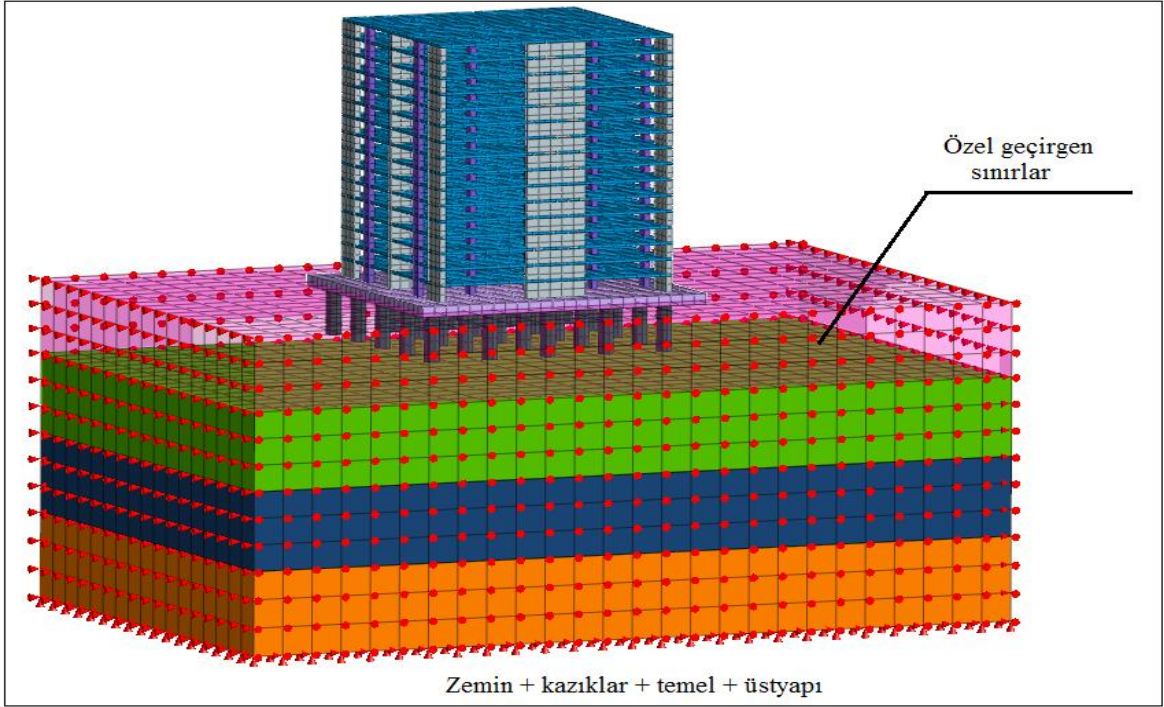
Şekil 12. Eşdeğer yaylar ve sönümleyiciler ile zemin modellemesi (Özpalanlar, 2004)

Özellikle yumuşak zeminlerde, zeminin deprem dalgaları üzerindeki olumsuz etkileri artmakta ve zemin ortamının doğru şekilde modellenmesi etkileşimin hesaplamalara doğru yansıtılabilmesi adına büyük önem taşımaktadır. Eşdeğer yay yöntemleri ile zemin ortamını tam anlamı ile modellemek mümkün olmamakta, sonlu elemanlar yöntemi ise 3 boyutlu modelleme imkanı sunduğu için zemin ortamı çok daha detaylı şekilde modellenebilmektedir. Bu sebeple zemin-yapı etkileşimin en doğru şekilde hesaplamalara yansıtılması noktasında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen sistemler, statik/elastik yaylar ve sönümleyiciler ile modellenen sistemlere kıyasla daha gerçekçi ve doğru sonuçlar verecektir.

1.7. Ortak Sistem Yaklaşımı ile Zemin - Yapı Etkileşimi

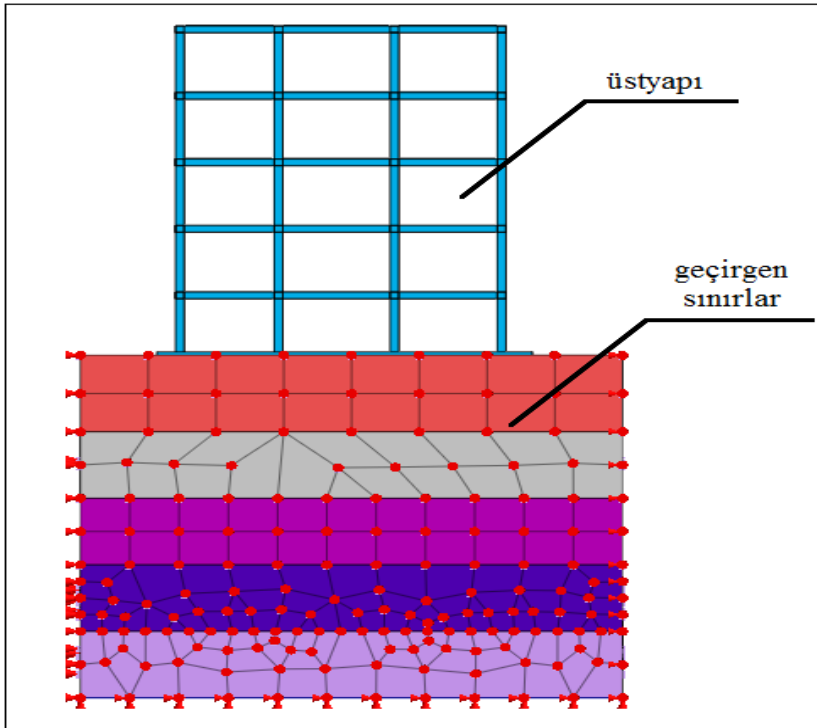
Ortak sistem yaklaşımında, zemin ortamı, kazıklar, bodrum kutusu (varsa), temel ve üstyapı 3 boyutlu olarak Şekil 13'te gösterildiği gibi birlikte modellenir (Siyahi vd., 2013). Zemin ortamı ile üstyapının birlikte modellendiği bu yaklaşımda, zemin geometrisindeki doğrusal olmayan formlar, zemine ait mekanik özelliklerin tabakalı zemin ortamı şartlarındaki değişimi ve üstyapı temelinin zemin ortamına gömülü olması (veya bodrum kutusu bulunması) durumları 3 boyutlu modellere rahatlıkla yansıtılabilir. Gerek ortak sistem yaklaşımı, gerekse de altsistem yaklaşımında, sistem statik durumda çözülecek ise, zemin modelindeki her bir sonlu elemanın düğüm noktasına, zemin tabanında x , y ve z yönlerinde tutulu olacak şekilde (ankastre), yan kısımlarda ise x ve y yönlerinde tutulu olacak şekilde (basit) mesnetler tanımlanarak zemin sınırları idealize edilir. Sistem dinamik koşullar altında çözümlenecek ise, deprem dalgalarının zemin ortamının sınırlarından yansiyarak tekrar yapıya dönmemesi için zemin yan kısımlarında özel geçirgen sınır koşulları tanımlanmalıdır (Kausel, 1988).

Ortak sistem yaklaşımında, zemin ortamındaki girdi hareketleri modelin tabanında ve yan kısımlarında tanımlanır. Bu hareketten etkilenen sistemin, harekete karşı gösterdiği tepki, Denklem (1.6) ile hesaplanır (Karabörk vd., 2010). Özel sınır koşulları, zemin ortamının yan kısımları ve tabanında yer alan her bir sonlu elemanın düğüm noktasına tanımlanır (Şekil 14).



Şekil 13. Ortak sistem yaklaşımı sistem hesap modeli

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [k] \cdot \{u\} = -|[M] \cdot \{\ddot{u}_{ff}(t)\}| \quad (1.6)$$



Şekil 14. Ortak sistem yaklaşımında zemin sınırlar koşulları (Erginsoy, 2019)

Ortak sistem yaklaşımında, üstyapı modeli ve geoteknik modelin uyumlu bir şekilde birleştirilerek zemin+temel+üstyapı sisteminin oluşturulabileceği ve yapısal/geoteknik analizlerinin yapılabileceği bilgisayar yazılımları çok nadir olmakta ve söz konusu yazılım/donanımları temin etmek ise maliyetler açısından oldukça güç olmaktadır. TBDY kapsamında en az 11 çift (x ve y yönlerinde) deprem kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılması gerektiği hususu düşünüldüğünde, minimum 22 ayrı analiz, çok ciddi bir zaman ihtiyacı doğurmaktadır. Bu pencereden bakıldığında, ortak sistem yaklaşımının avantajları olduğu kadar dezavantajları da mevcuttur (Tablo 9).

Tablo 9

Ortak sistem yaklaşımı avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"> •Dinamik zemin-yapı etkileşiminin çözümü için direkt modelleme imkanı sağlar. •Altsistem yaklaşımında yapılan tüm basitleştirmeler azaltılır. •Tek bir model çözüleceği için yapının tasarım parametreleri ve kütlesi göz önüne alınır. •Süperpozisyon gerekmediği için doğrusal olmayan davranış göz önüne alınabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> •Analiz süreleri diğer yöntemlere göre çok uzun ve karmaşıktır. •Özel yazılımlar ve yüksek kapasiteli donanım ihtiyacı gerektirir. •Yapısal analizler ile geoteknik analizler konsolide edildiği için her iki alana yönelik mesleki uzmanlık gerektirir.

1.8. Altsistem Yaklaşımı ile Zemin - Yapı Etkileşimi

Altsistem yaklaşımında, adından da anlaşılacağı üzere hesaplamalara esas zemin-yapı sistemi, ortak sistem yaklaşımından farklı olarak “zemin ortamı+kazıklar+kütlesiz temel (varsa bodrum kutusu)” altsistemi ve “kütleli temel+üstyapı” altsistemi olmak üzere iki ayrı problem şeklinde ele alınır (TBDY, 2018). Genel problemin bu şekilde iki ayrı altsistem şeklinde ele alınması, zemin+kazık+temel altsisteminin Geoteknik Mühendisleri tarafından çözülmesi bu çözümlerden elde edilecek veriler ile temel+üstyapı altsisteminin Yapısal Tasarım Mühendisleri tarafından çözülerek genel sisteme ait sonuç çıktılarının elde edilmesi yönüyle uygulama pratiği açısından daha kullanışlı bir metottür.

Zemin ortamının bağımsız bir sistem olarak incelenmesi ile zemin-yapı ara kesitindeki serbestlik dereceleri cinsinden elde edilen zemin dinamik rijitlik matrisi ve etkin yük vektörü, daha sonra yapının dinamik dengesinde göz önüne alınır. Zemin idealleştirilmesi açısından, altsistem yaklaşımının ortak sistem yaklaşımına oranla en önemli üstünlüğü, ayrı sistemler yanında sürekli sistemlerin de zemin modeli olarak kullanılabilmesi olanağıdır (Aydemir, 2011).

Altsistem yaklaşımında genel sisteme ait probleminin çözümü:

- İlk adımda, zemin ortamı, kazıklar ve kütsüz temel şeklinde modellenen altsistemde, taban kayasında tanımlanmış en az 11 çift deprem kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak temel seviyesinde meydana gelecek olan etkin yer hareketinin elde edilmesi,
- İkinci adımda, ilk adımdan elde edilen etkin temel hareketlerinin tanımlandığı serbestlik derecelerine (rijit temelin tabanında iki yatay eksen doğrultusunda ve bu eksenler etrafında dönme için) ayrı ayrı statik tekil kuvvetlerin artımsal olarak etki ettirilmesiyle zemin-kazık-temel sistemini temsil eden kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin elde edilmesi,
- Üçüncü adımda ise, ikinci adımdan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin tanımlanmış olduğu temele oturan üstyapı sisteminin, birinci adımdan elde edilen etkin yer hareketi etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizinin yapılması,

şeklinde üç aşamada gerçekleştirilir. Burada bahsedilen zemin+kazık+temel altsistemi üzerinden hesaplamaların gerçekleştirildiği ilk adım “Kinematik Etkileşim”, kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin elde edildiği ikinci adım ile temel+üstyapı altsistemi üzerinden yapısal analizlerin gerçekleştirildiği üçüncü adım ise “Eylemsizlik Etkileşimi” kapsamında değerlendirilmektedir.

1.9. Altsistem Yaklaşımında Kinematik Etkileşim

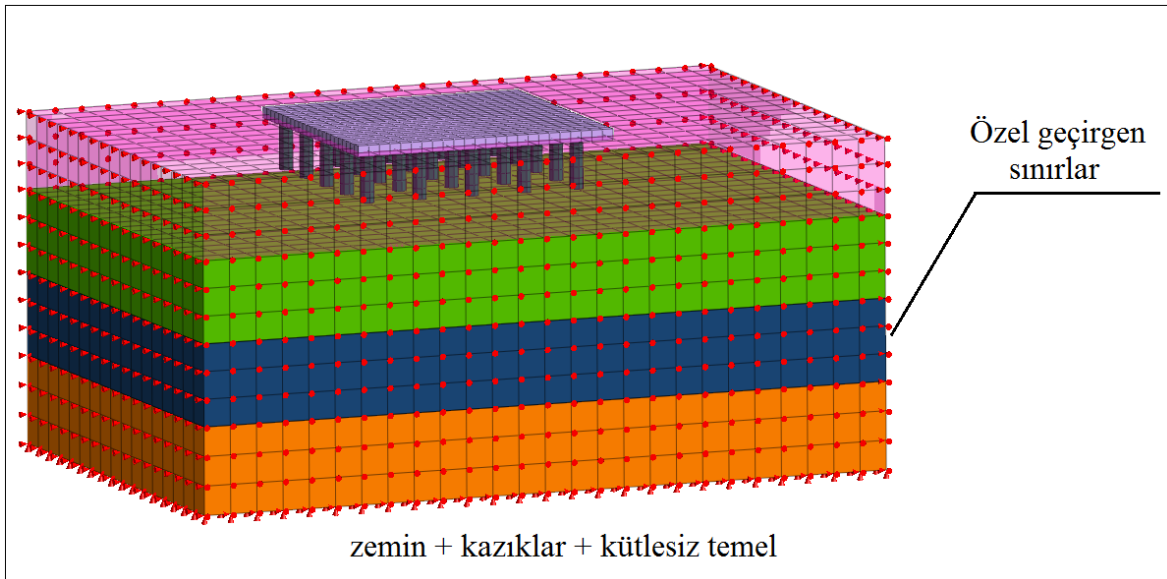
Altsistem yaklaşımı ile yapılacak çözümlerinin temelini oluşturan iki ana hesap aşamasından ilki olan Kinematik Etkileşim, üstyapının atalet etkilerinin göz önüne alınmadığı zemin+kazık+temel altsistemi temsil etmektedir. Kinematik Etkileşim kapsamında en az 11 çift deprem kaydı seçilerek yatay eksenler (x,y) doğrultusunda

zemin+kazık+temel altsistemine taban kayasından etki ettirilerek yapılacak analizler neticesinde;

- Temel seviyesi ivme spektrumları,
- Kazıklardaki iç kuvvetler ve şekil değiştirme talepleri (herbir kazıkta 22 analizin herbirinden hesaplanan sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması),

elde edilecektir. Elde edilen hesap çıktıları, temel+üstyapı altsistemi ile yapılacak analizlerin girdilerini oluşturacaktır (TBDY, 2018).

Zemin+kazık+temel altsisteminde zemin ortamı ve temel 3 boyutlu hacimsel eleman olarak, kazıklar ise çubuk eleman olarak modellenecektir (Şekil 15). Dinamik analizlerden evvel kazıklarda meydana gelecek eksenel kuvvetleri elde edebilmek için doğrusal olmayan statik analiz yapılmalıdır. Zemin ortamı modellenirken ortak sistem yaklaşımında olduğu gibi dinamik analizlerde üstyapıda sönümlenemeyerek zemin ortamına geri dönen deprem dalgalarının zemin sınırlarından yansyarak tekrar yapıya dönmemesi için zemin yan kısımlarında özel geçirgen sınırlar kullanılır.



Şekil 15. Kinematik etkileşim sistem hesap modeli

1.9.1. Zemin Bünye Modeli ve Geometrik Ölçülerin Belirlenmesi

Zemin ortamının davranışını tayin edebilmek oldukça güç bir iştir. Zemin ortamının değişken geometrili doğrusal olmayan bir forma sahip olması, tabakaların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılıklar, yeraltı suyu etkisi, deprem, raylı sistemler, taşıt

yükleri gibi dinamik etkiler zemin mukavemetinin tayinini kompleks bir problem haline getirmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi, yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları neticesinde üretilen amprik formüller, hesap yaklaşımları ve geliştirilen bünye modelleri sayesinde zemin davranışının tayini ve hesaplara yansıtılması mümkün hale gelmiştir. Zemin-yapı etkileşimli çözümlenmelerde, zemin etkisinin hesaplara yansıtıldığı aşama olan Kinematik Etkileşim de, etkileşimin doğru yansıtılabilmesi için zemin ortamının doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Modellemede, problemin türüne göre farklı zemin bünye modelleri tercih edilebilirken, özellikle dinamik analizlerde zemin ortamının geometrik ölçülerinin belirli kritik değerlerin altında boyutlandırılmaması gerekmektedir. Problemin türüne göre (sıvılaşma, oturma hesabı, şev stabilitesi, derin kazı vb.) kullanılmak üzere geliştirilmiş birçok zemin bünye modeli bulunmakta ve bunların bir kısmı Tablo 10'da yer almaktadır. Bilgisayar destekli gerçekleştirilen sayısal çözümlenmelerde doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun bünye modellerinin seçilmesi gereklidir.

Tablo 10

Kullanım alanlarına göre geliştirilmiş zemin bünye modelleri (Kılıç, 2017)

Kullanım Alanı	Önerilen Bünye Modeli
Kaya Ortamı İçin Bünye Modelleri	Mohr Coloumb
	Modified Mohr Coloumb
	Hoek Brown
	Jointed Rock
Hiperbolik Modeller	Koedner
	Duncan-Chan
	Hardening Soil Model
Cam Clay Modeller (Yumuşak Zemin Davranışı)	Cam Clay
	Modified Cam Clay
	Soft Soil Model
Sıvılaşma	UBCSAND
	Modified UBCSAND

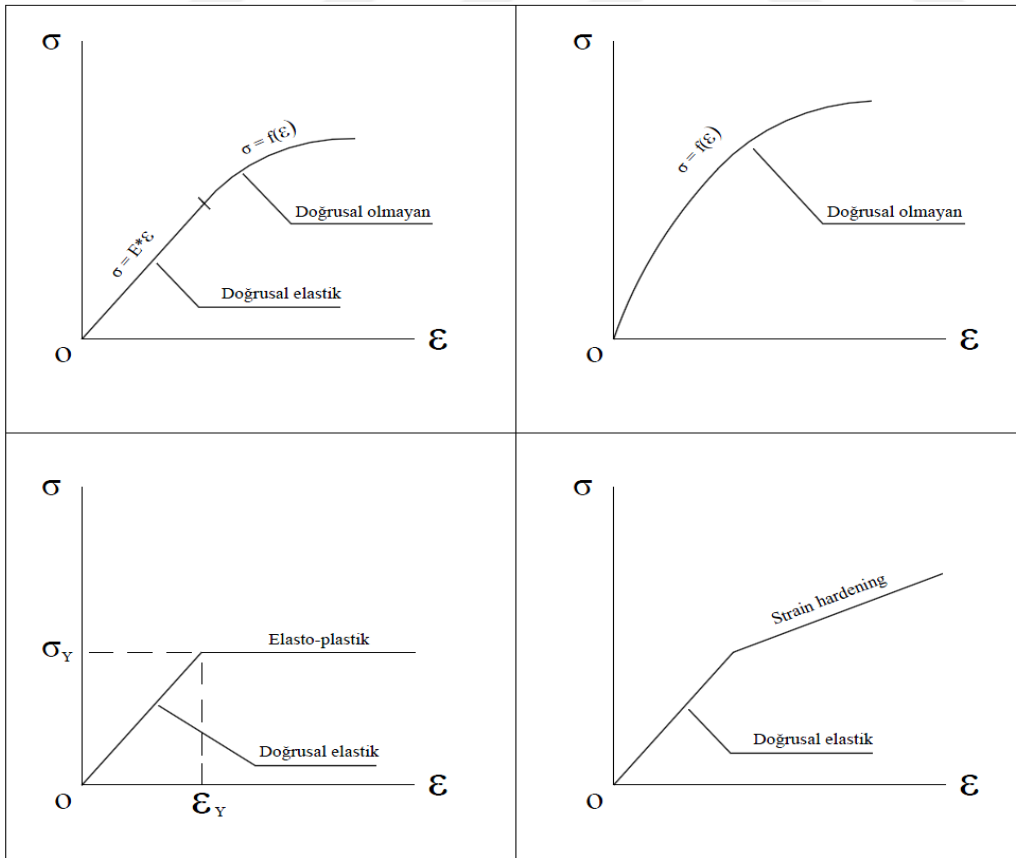
Tablo 10'da görüleceği üzere örneğin sıvılaşma üzerine bir çalışma yapılacaksa UBCSAND bünye modeli ile çalışmak veya kaya ortamı ihtiva eden bir sahada çalışma

yapılacaksa kaya ortamını temsil eden bünye modelleri kullanılarak hesaplama yapılması zemin davranışının doğru tayin edilmesi noktasında oldukça önemlidir.

Zemin ortamı için malzeme bünye davranışı dört ana başlıkta değerlendirilebilir:

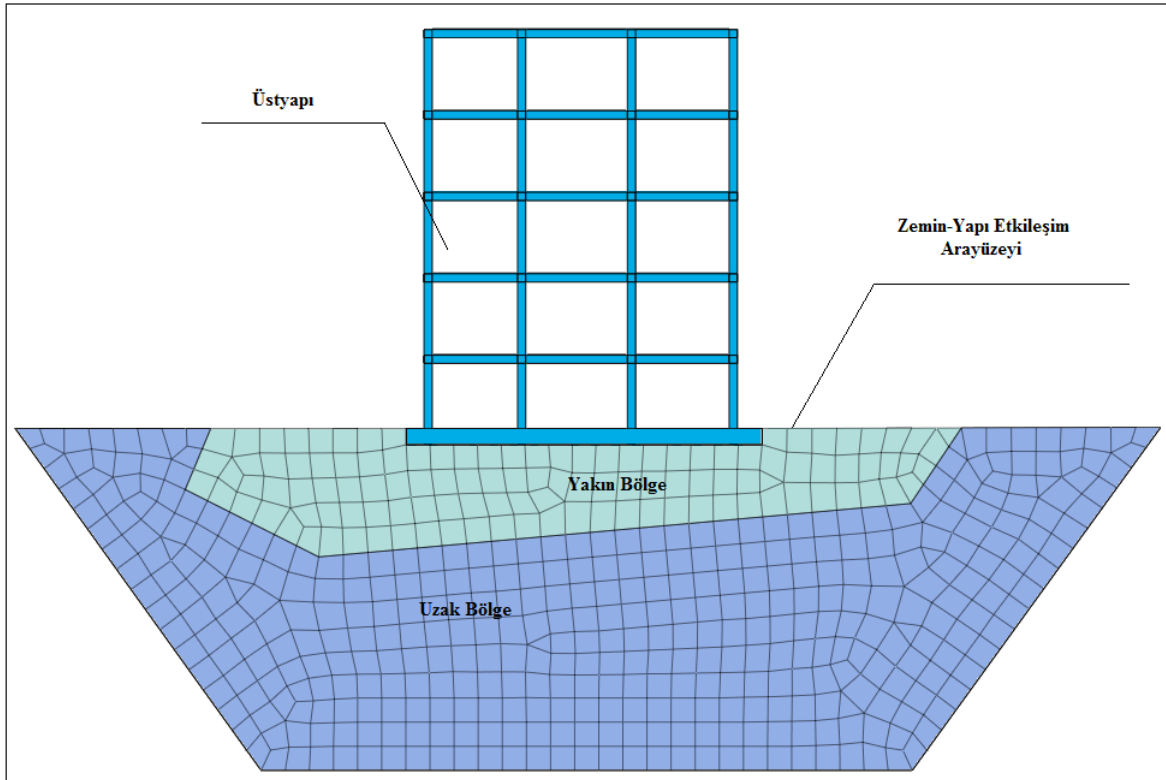
- Doğrusal / doğrusal olmayan elastik modeller
- Doğrusal / doğrusal olmayan elastik - ideal plastik modeller
- İzotropik pekleşen tek yüzey plastik modeller
- İzotropik pekleşen tek yüzey elastik modeller

Şekil 16'da dört ana grup için malzeme davranışlarını temsil eden eğriler yer almaktadır. Zeminlerin dinamik davranış özellikleri, zeminde oluşan deformasyonların mertebesi ile ilişkilidir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarındaki şekil değiştirme seviyelerinde, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Daha büyük şekil değiştirme seviyelerinde ise uygulanan yük altında zemindeki mukavemet kayıpları ve plastik şekil değiştirme özellikleri önem kazanmaktadır (Kılıç, 2017).



Şekil 16. Malzeme davranış eğrileri (Demir, 2017)

Zemin ortamı davranışının daha anlaşılır hale getirilmesi amacıyla zemin genellikle üç kısım şeklinde değerlendirilir (Şekil 17). Uzak bölge, yakın bölge ve zemin-yapı etkileşim arayüzeyi olarak adlandırılan bu üç kısım, farklı davranış özelliklerine sahip olmakla birlikte bilgisayar destekli sayısal çözümlerde, her üç kısım için de doğrusal/doğrusal olmayan davranış ve sınır koşulları gibi özelliklerinin modellemeye tanımlanması ile gerçek davranış ve en doğru sonuç çıktıları elde edilmeye çalışılır.



Şekil 17. Zemin ortamının kısımları (Kutaniş ve Elmas, 2005)

Uzak bölge, diğer bir ifadeyle sınırsız ortam; sayısal modellemelerde sınır koşullarının uygulandığı bölgeyi temsil eder. Uzak bölge modellenirken, zemin ortamı sonsuz olarak kabul edildiği için bu kabulün modele yansıtılması uzak bölgenin taban ve yan kısımlarında tanımlanacak sınır koşulları ile mümkün olmaktadır. Bu bölgenin doğrusal davranış sergilediği varsayılır.

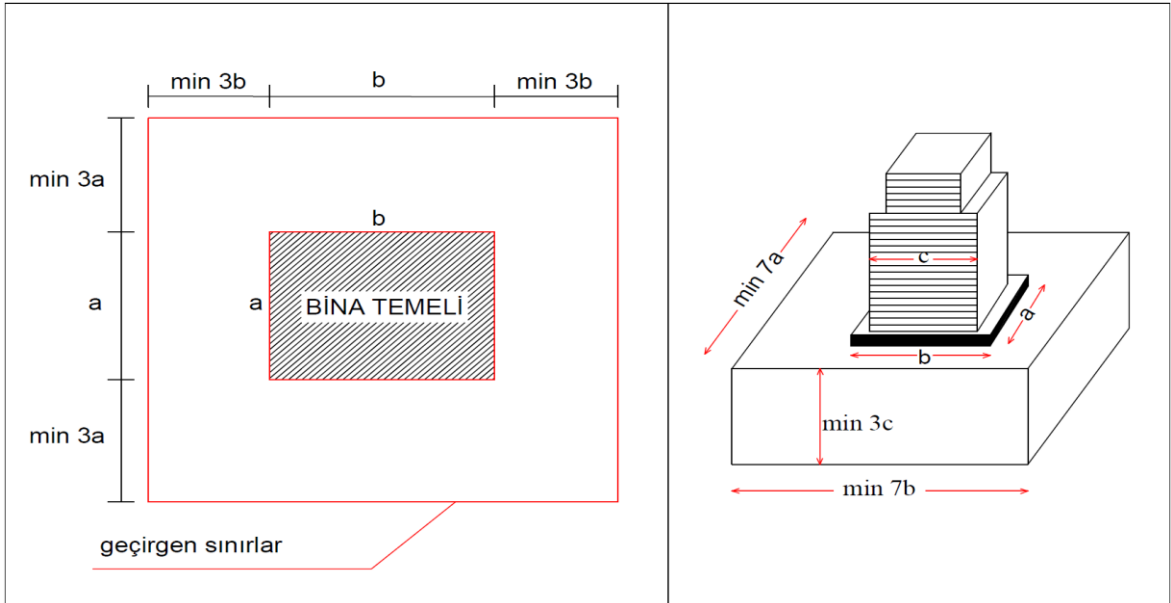
Yakın bölge, diğer bir ifade ile sınırlı ortam; üstyapı ile uzak bölge arası etkileşimin temsil edildiği, doğrusal davranışın sona erdiği ve doğrusal olmayan davranışın sergilendiği, gerilme ve şekil değiştirme deformasyonlarının meydana geldiği, uzak bölge ile etkileşim arayüzeyi arasında kalan zemin bölümüdür.

Etkileşim arayüzeyi, zemin-yapı etkileşiminin ara kesitini temsil eder ve bu etkileşimin hesaplara yansıtılabilmesi için uygun yaylar ile modellenerek histeratik davranış elde edilir (Barış, 2020).

Zemin-yapı etkileşimli analizlerde zeminin deprem kaydı üzerindeki etkisinin hesaplamalara doğru bir şekilde yansıtılabilmesi için zemin ortamının uygun ebatlarda modele dahil edilmesi gerekmektedir. Zemin ortamı sonsuz olarak kabul edilmektedir fakat pratikte bu şekilde modelleme yapmak mümkün değildir. Bu sebeple viskos sınır şartlarına (özel geçirgen sınırlar) ihtiyaç duyulmaktadır. Dinamik analizlerde zemin etkisinin hesaplara dahil edilebilmesi için TBDY’de zemin ortamının ölçüleri ile ilgili olarak:

- Bina temelinden itibaren derinliği en büyük bina genişliğinin üç katından ve en uzun kazık boyundan daha az olmayacaktır,
- Geçirgen sınırların binaya yatay uzaklığı, her iki doğrultuda ve her iki tarafta ayrı ayrı olmak üzere, bina temel genişliğinin üç katından daha az olmayacaktır,

denilmekte olup zemin ortamının asgari ölçüleri belirlenmiştir (TBDY, 2018). Sonlu elemanlar ağının boyutu ve analiz süreleride göz önünde bulundurulmak suretiyle söz konusu ölçüler tasarım mühendisinin inisiyatifi dahilinde büyütülebilir. TBDY’de tariflendiği şekliyle zemin etkisinin hesaplara doğru şekilde yansıtılabilmesi için zemin ortamına ait ihtiyaç duyulan asgari geometrik ölçüler Şekil 18’de yer almaktadır.



Şekil 18. Zemin ortamı için ihtiyaç duyulan asgari geometrik ölçüler

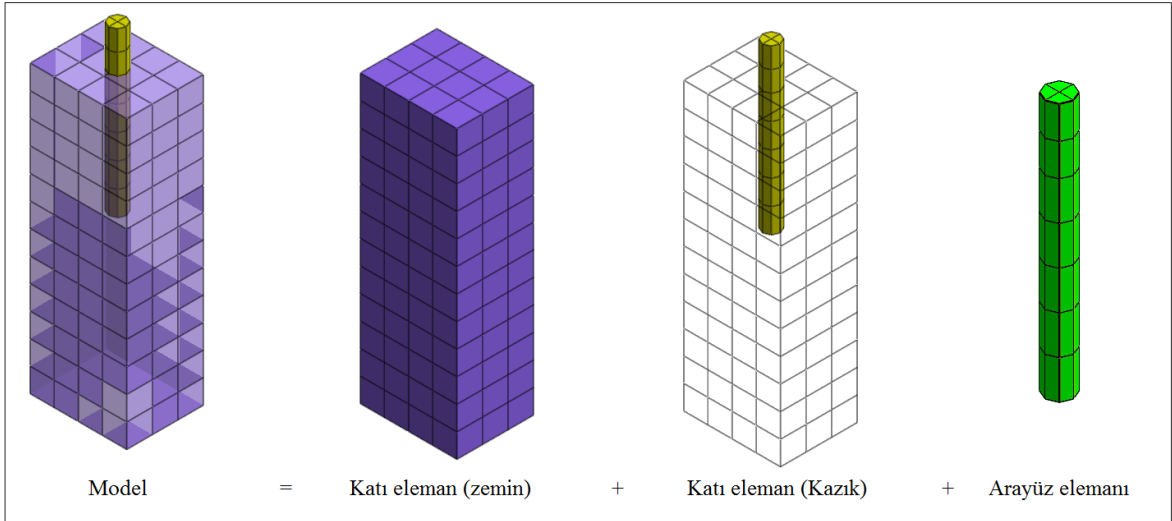
1.9.2. Kazıkların Modellenmesi ve Arayüz Elemanlarının Tanımlanması

Zemin-yapı etkileşimli hesaplamalarda, kazıklar çubuk eleman olarak modellenmeli ve kazık ile zemin arasına uygun arayüz elemanlarının tanımlanması gerekmektedir.

Bilgisayar destekli sayısal çözümlerinde, kullanılan yazılımların birçoğu kazıkların modellenmesi ile ilgili olarak üç seçenek sunmaktadır. Bunlar;

- Dolu gövdeli katı eleman modeli,
- Kiriş-katı eleman bağlantı modeli,
- Çizgisel eleman modeli

Dolu gövdeli katı eleman modelinde, zemin ortamı ve kazıklar 3 boyutlu katı eleman (solid) olarak modellenir. Model tanımı ve sonlu eleman ağı oluşturma işlemleri her kazık için detaylı olarak yapılmak zorundadır. Kazık sayısının fazla olduğu büyük modellerde, 3 boyutlu sonlu eleman ağı çok büyük boyutlarda olacağı için analiz süreleri çok fazla uzamaktadır. Bu şekilde yapılan modellemelerde kazıklarda oluşan tesirler direkt olarak okunamaz, bu işlemin yapılabilmesi için kazık-zemin etkileşimini tanımlayan uygun arayüz elemanlarının tanımlanması gereklidir (Şekil 19).

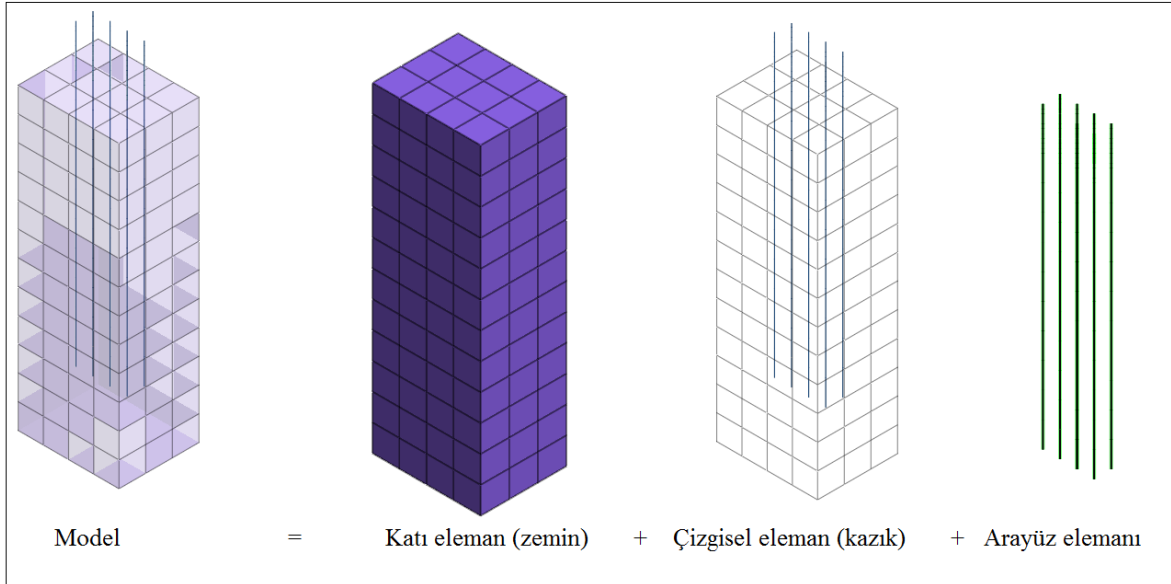


Şekil 19. Dolu gövdeli katı eleman kazık model

Kiriş-katı eleman bağlantı modelinde, zemin ortamı 3 boyutlu katı eleman olarak, kazıklar ise kiriş eleman olarak modellenir. Bu modelleme yönteminde, kazık üzerindeki sonlu eleman düğüm noktaları ile zemin ortamındaki sonlu elemanların düğüm noktalarının uyum içerisinde çalışabilmesi gerekmektedir. Bu yöntemde ilk yöntemde

olduğu gibi kazık sayısının fazla olduğu büyük modellerde, sonlu eleman ağı çok büyük boyutlarda olacağı için analiz süresi uzayacaktır. İlk yöntemden farklı olarak kazıklarda meydana gelecek tesirler direkt olarak okunabilmektedir.

Çizgisel eleman modelinde ise, zemin ortamı yine 3 boyutlu katı eleman olarak modellenir. Kazıklar ise 1 boyutlu çizgisel eleman olarak tanımlanır. Bu yöntemde 3 boyutlu eleman yoğunlu azalacağı için analiz süreleride diğer iki yönteme kıyasla daha kısa olacaktır. Doğrusal olmayan sürtünme-kayma özellikleri, kazık-zemin arayüz elemanlarına tanımlanabilmektedir (Şekil 20).



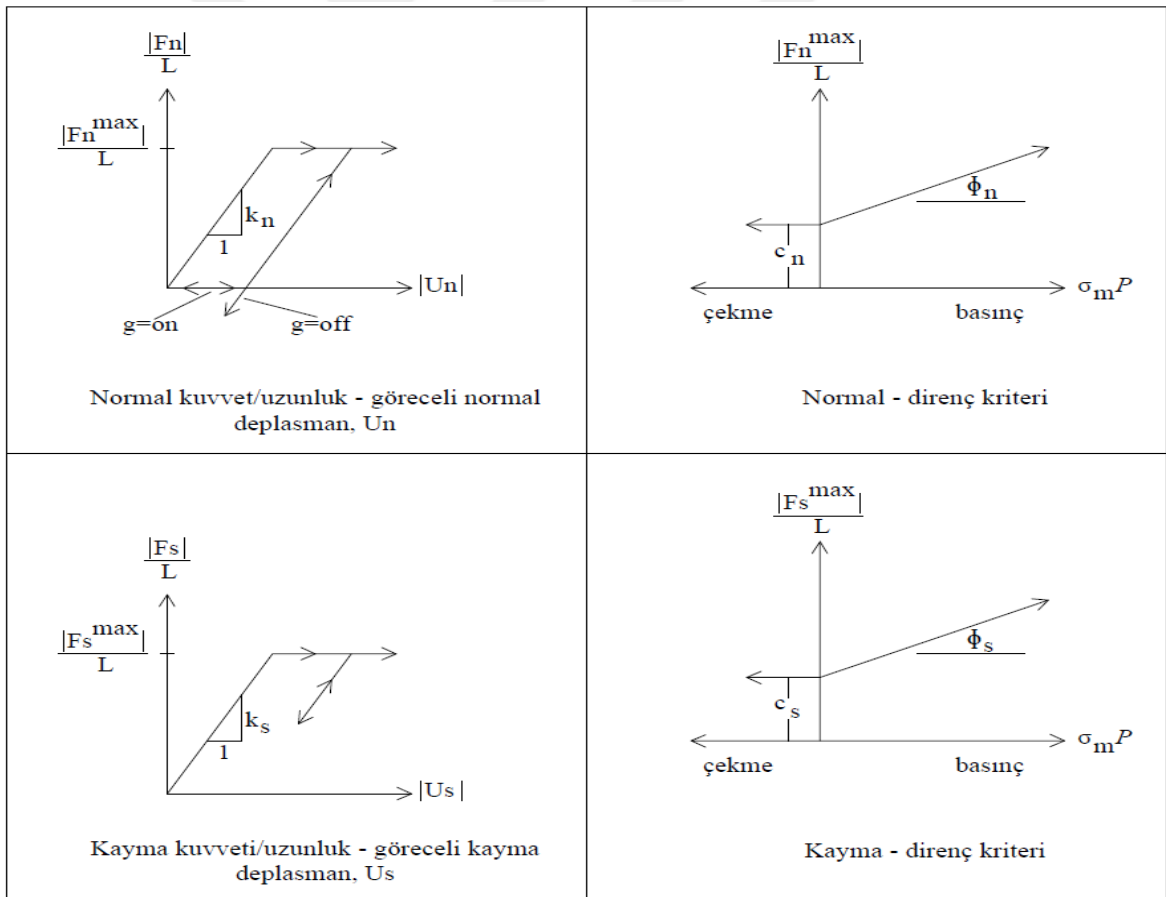
Şekil 20. Çizgisel eleman kazık model

Her üç modelleme tekniği ile de tasarım yapmak uygun olsa da dinamik zemin-yapı etkileşimli analizlerde model boyutu çok büyük olacağı için analiz sürelerinin kısa tutulması yönünden kazıkların çizgisel eleman olarak modellenip üzerine zemin-kazık etkileşim arayüz elemanlarının tanımlanarak çözüm yapılması en pratik yöntem olacaktır.

Düşey yüklerden dolayı kazıklarda meydana gelecek eksenel kuvvetlerin belirlenebilmesi için dinamik analizlerden evvel doğrusal olmayan statik analiz yapılmalıdır. Elde edilen eksenel kuvvetler ilgili kazıklara etkililmelidir. Eksenel kuvvetlerin deprem analizinde bir fonksiyonunun olabilmesi için ($F = m.a$) bu kuvvetlerin yazılım arayüzünde kütleye dönüştürülmesi (load to masses) gereklidir.

Modellemede ihtiyaç duyulan zemin-kazık arayüz elemanları, statik ve dinamik analizler neticesinde kazıklarda oluşacak iç kuvvetler açısından oldukça önemlidir. Kazıklarda oluşacak iç kuvvetler ancak arayüz elemanları aracılığı ile okunabileceği için kazıkların dizaynında (boyutlama ve donatılendirma) bu arayüz elemanlarından elde edilecek iç kuvvet değerleri esas alınır.

Kazık ile zemin arayüzeyinin kesme davranışı koheziv ve sürtünmeye dayalıdır. Bu davranış ise malzemeler arasındaki rijitlik farkı, birim alan ve yüzeye dik yönde etki eden kuvvete bağlıdır. Şekil 21’de normal kuvvet ve kesme kuvveti yayları için grafikler verilmiştir. Yay parametreleri; K_t ve K_n (normal direnç modülü), c_s , c_n (kohezyon), ϕ_s , ϕ_n (içsel sürtünme açısı), çevre uzunluğuna, normal yöndeki kuvvet için boşluğa, g (gap) ve efektif gerilmeye bağlıdır (Bilal vd., 2014).



Şekil 21. Normal kuvvet ve kayma kuvveti yayları için eğriler (Itasca, 2011)

Arayüz elemanları aşağıda verilen bağıntılar ile hesaplanabilmektedir (Bilal vd., 2014).

$$Kn = Eoed, i / (L \cdot tv) \quad (1.7)$$

$$Kt = Gi / (L \cdot tv) \quad (1.8)$$

$$Ci = R \cdot Csoil \quad (1.9)$$

$$Gi = R \cdot Gsoil \quad (1.10)$$

$$Gsoil = E / 2 \cdot (1 + Vsoil) \quad (1.11)$$

Denklem (1.7) ve (1.8)' de yer alan ve sanal kalınlığı ifade eden tv , genellikle 0,01 ile 0,1 arasında bir değer olarak alınır ve hesaplama yapılır.

Dayanım azaltma faktörünü temsil eden R katsayısı ise, zemin ortamının ve kazık elemanların malzeme özelliğine göre farklı değerler alır. Bu kapsamda R katsayısı;

- Kum zemin - çelik kazık olması durumunda; $R = 0,6 - 0,7$
- Kil zemin - çelik kazık olması durumunda; $R = 0,5$
- Kum zemin - betonarme kazık olması durumunda; $R = 0,8 - 1$
- Kil zemin - betonarme kazık olması durumunda; $R = 0,7 - 1$

arasında değerler almaktadır (Ünsal, 2017).

1.9.3. Uygun Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi

Zemin-yapı etkileşimli hesaplamalarda, TDTH aracılığıyla yapının konumuna, yerel zemin sınıfına ve DTS'ye bağlı olarak elde edilen ivme spektrumları kullanılamaz. Bu şekilde üretilen spektrumlar etkileşimin yansıtılmasında yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine x ve y yönlerinde en az 11 adet olmak üzere toplamda en az 22 adet deprem kaydının seçilerek sisteme ayrı ayrı etkitilmesi gerekmektedir.

Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi ile ilgili hususlar, TBDY'de "Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması" başlıklı Bölüm 2.5.'te yer almaktadır. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi,

- Tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri,
- Fay uzaklıkları,
- Kaynak mekanizmaları,

- Yerel zemin koşulları

dikkate alınarak yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır. Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır (TBDY, 2018).

Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi ile ilgili olarak ise, 3 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 $0,2T_P$ ve $1,5T_P$ periyotları arasındaki genliklerinin, TDTH'den üretilen veya sahaya özel üretilecek tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının $1,3$ 'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir (TBDY, 2018).

Deprem kayıtlarının elde edilmesinde halihazırda en geniş veri altyapısına sahip olan PEER'de (Pasific Earthquake Engineering Research Center) yer alan uygun kayıtlar temin edilerek problemin çözümünde kullanılabilir. Burada veri altyapısındaki kayıtlar arasında filtreleme yaparken, fay tipi (yanal atımlı, doğrultu atımlı), moment büyüklüğü (magnitüd), fay yırtılma mesafesi, V_S gibi parametreler ile uygun deprem kayıtları listelenebilir. Burada ham data verileri yerine uygun şekilde ölçeklendirilmiş ivme spektrumlarının kullanılması gereklidir. PEER kullanıcı arayüzünde üç farklı ölçekleme seçeneği yer almakta olup TDTH'den elde edilen S_{DS} , S_{D1} ve T_L parametreleri sisteme girilerek hedef spektrum belirlenebilir ve buna uygun ölçekleme katsayıları hesaplanarak temin edilecek kayıtların ölçeklenmesinde kullanılabilir.

1.9.4. Özdeğer Analizi ve Doğrusal/Doğrusal Olmayan Dinamik Analizler

Zemin etkisinin yapısal analizlere doğru yansıtılabilmesi için zemin ortamının **1.9.1**'de belirtilen minimum ölçüleri sağlayacak şekilde modellenmesi gerekmektedir. Zemin ortamının deprem dalgaları üzerindeki sönüm etkisinin hesaplara yansıtılması için üstyapıya oranla çok daha büyük bir zemin hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Model boyutu bakımından böylesi büyük bir sistemde, zamana bağlı doğrusal olmayan deprem

analizlerinde kullanılacak sönüm değerlerini belirleyebilmek için öncelikle özdeğer (eigen value) analizleri yapılarak sistemin titreşim modlarının belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle yüksek kütle katılımının sağlandığı kritik titreşim modlarına karşılık gelen periyotlar elde edilir ve bu periyotlar esas alınarak zamana bağlı doğrusal olmayan deprem analizlerindeki sönüm değerleri belirlenebilmektedir.

Zemin yatak katsayılarının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır:

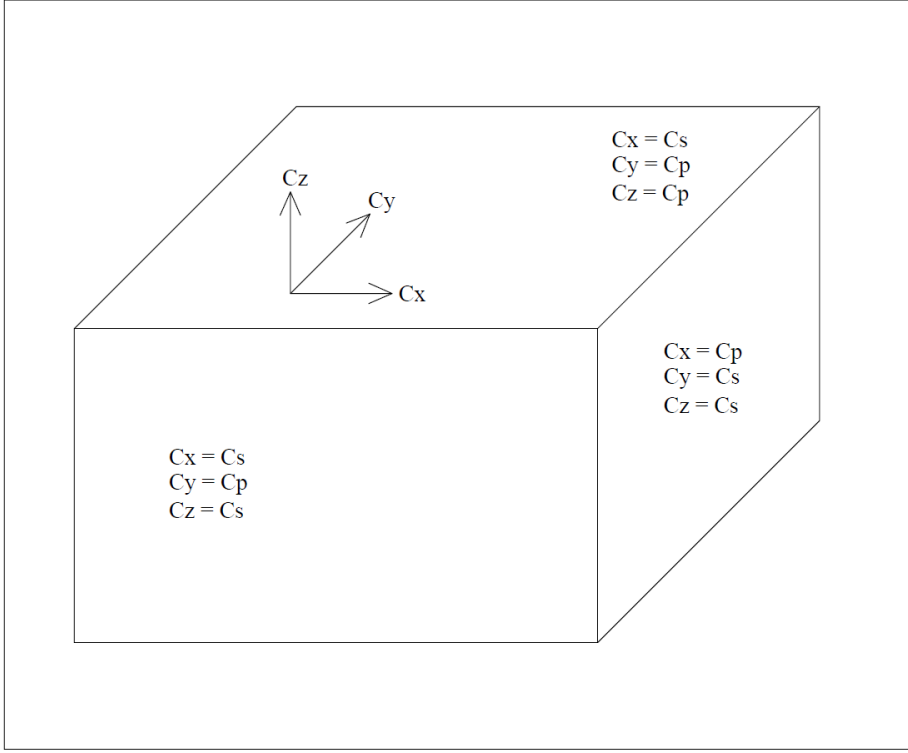
$$\text{Düşey yatak katsayısı} \quad kv = kv0 \cdot \left(\frac{Bv}{30}\right)^{\left(-\frac{3}{4}\right)} \quad (1.12)$$

$$\text{Yatay yatak katsayısı} \quad kh = kh0 \cdot \left(\frac{Bh}{30}\right)^{\left(-\frac{3}{4}\right)} \quad (1.13)$$

$$kv0 = \left(\frac{1}{30}\right) \cdot \alpha \cdot E = kh0 \quad Bv = \sqrt{Av} \quad Bh = \sqrt{Ah} \quad (1.14)$$

Özdeğer analizi sonucunda, yüksek kütle katılım faktörü olan birinci ve ikinci mod kontrol edilip bu modlar arasındaki sönüm oranlarına göre dinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Burada kullanılacak sönüm sabitleri, genel kabul olarak 0,05 (%5) seçilerek hesaplamalar yapılıyor olsa da, daha doğru bir çözüm yapabilmek için sönüm sabitlerinin hesaplanarak çözüme dahil edilmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlar tabanlı geoteknik yazılımlarda sönüm sabitlerinin hesaplanmasında, zemine ve kayma modülüne göre uygun sönüm değerleri atanır. Belirlenen sönüm değerleri anakayadan etkilecek deprem kaydındaki değişimi (amplifikasyon/ deamplifikasyon) belirleyecektir. Sonlu eleman tabanlı yazılımlarda, λ (hacimsel modül), G (kesme modülü), E (elastisite modülü), ν (poisson oranı) ve yüzey alanına bağlı olarak aşağıda yer alan bağıntılar kullanılarak sönüm sabitleri elde edilebilmektedir (Şekil 22).



Şekil 22. Zemin ortamı sönüm katsayıları (Ünsal, 2020)

$$\text{Birincil dalga; } Cp = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda+2G}{W \cdot 9,81}} = Cp \cdot A \quad (1.15)$$

$$\text{İkincil dalga; } Cs = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9,81}} = Cs \cdot A \quad (1.16)$$

$$\text{Konum; } \lambda = \frac{v \cdot E}{(1+v) \cdot (1-2 \cdot v)} \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1+v)} \quad (1.17)$$

Özdeğer analizi neticesinde en yüksek kütle katılımının sağlandığı modlar ve bu modlarda ki periyot değerleri elde edildikten sonra, hesaplanan sönüm değeri bu modlar için atanarak en az 11 çift olarak seçilmiş ve ölçeklendirilmiş olan deprem kayıtları ile zaman tanım tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılabilecektir. Analizlerin x ve y yönleri için ayrı ayrı yapılması gerekmektedir. Bu analizler neticesinde eylemsizlik etkileşimi hesap aşamasında kullanılmak üzere kinematik etkileşim çıktıları elde edilecektir.

Problemin temelinde, zemin ortamının deprem dalgaları üzerindeki etkisi ve bu etkinin üstyapının yapısal davranış parametrelerini ne derecede etkilediği hususu yer aldığı için statik analizlerde kullanılan tipik yükleme koşulları, dinamik analizlerde meydana gelecek kuvvetleri temsil etmekte yetersiz kalmakta ve bu sebeple dinamik (sismik) analiz yapılması zorunlu hale gelmektedir. Dinamik analizler ve tasarım koşulları ile ilgili hususlar Tablo 11’de özetlenmiştir.

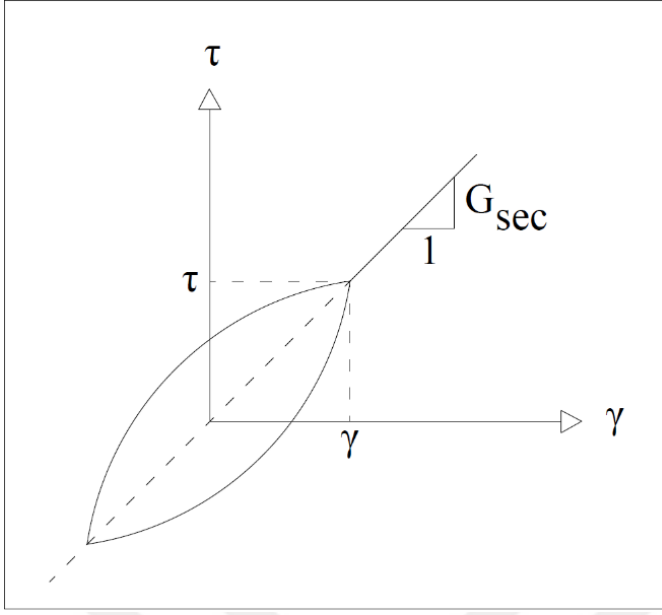
Tablo 11

Dinamik analiz yöntemleri ve tasarım koşulları (Ünsal, 2020)

Analiz Kriteri	Kategori	Tasarım
Boyut	1D	1D; Zemin davranış analizleri (free field)
	2D ve 3D Analizler	2D ve 3D; Zemin-yapı etkileşimi
Alan (Domain)	Zaman Uzayı	
	Frekans Uzayı	
Gerilme-Birim Deformasyon Etkileşimi	Doğrusal Analiz	Doğrusal; elastik aralıkta sonuç verir
	Eşdeğer Doğrusal Analiz	Eşdeğer doğrusal; daha verimli bir yaklaşım
	Doğrusal Olmayan Analiz	Doğrusal olmayan; daha detaylı analiz
Aşırı Boşluk Suyu Basıncı	Toplam Gerilme	Susuz durum; toplam gerilme analizi
	Efektif Gerilme Analizi	Sıvılaşma; Efektif gerilme analizi

Tablo 11’de ifade edildiği üzere temel olarak eşdeğer doğrusal analiz modeli ve döngüsel doğrusal olmayan analiz modeli olmak üzere iki ana dinamik analiz modeli bulunmaktadır.

Eşdeğer doğrusal analiz modelinde, zemin kütlesi simetrik döngüsel yüklemeye maruz kalır. Oluşan döngünün iki önemli özelliği, eğimi ve yataydaki genişliğidir. Eğim, zeminin mukavemetine bağlıdır ve Gsec (kesme mukavemet modülü) olarak adlandırılır (Şekil 23). Daha sert zeminlerde, Gsec büyümekte, yumuşak zeminlerde ise küçülmektedir.



Şekil 23. Birim deformasyon ve kesme mukavemeti değişim döngüsü (Wasti, Y.)

Statik analizlerde E (elastisite modülü) önemliyken, dinamik analizlerde ise yatay yükleme söz konusu olduğu için G_{sec} daha önemli olmaktadır. Çünkü doğru sonuçlar alabilmek için yatay yükleme altında γ 'ya (birim deformasyon) bağlı olarak G_{sec} 'in biliniyor olması gereklidir.

G_{sec} , Denklem (1.18)'de gösterildiği şekliyle τ 'nun (kesme mukavemeti) γ 'ya bölünmesi ile elde edilir. ξ ise A_{loop} (döngü alanı), G_{sec} ve γ 'ya bağlı olarak Denklem (1.19)'de verilen bağıntı ile hesaplanır.

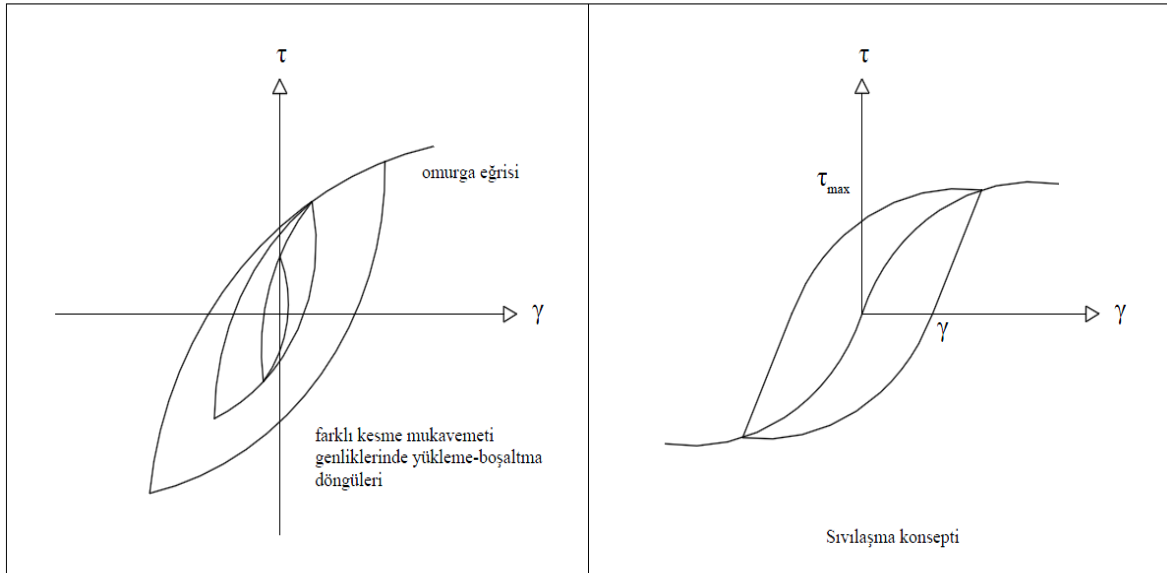
$$G_{sec} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.18)$$

$$\xi = \frac{A_{loop}}{2 \cdot \pi \cdot G_{sec} \cdot \gamma^2} \quad (1.19)$$

Burada bahsedilen ξ , üst bölümde bahsedilen ve sonlu eleman tabanlı yazılımlar için hesap bağıntıları verilen zemin sönümü ile aynı parametredir. Bu kısımda üst bölümden farklı (ilave) olarak ξ 'nin kesme mukavemeti ve eşdeğer birim deformasyon ile ilişkisi ve el hesabına yönelik bağıntıları yer almaktadır (Şekil 24).

kaya zeminlerde oluşabilir. Sönümlenememe durumu ise sistemin denge haline gelememesi ve belirli bir referans aralığında salınımına devam etmesi (jel formu) halidir.

Döngüsel doğrusal olmayan analiz modelinde, doğrusal olmayan gerilme birim deformasyon davranışı çok daha doğru şekilde modellenebilir. Zemin, tek bir döngü etrafında dönmek yerine değişken bir hareket sergilemektedir. Burada omurga eğrisi, histertik bir döngüyü ifade eder ve döngüsel birim deformasyon artışı ile değişmektedir. Sıvılaşmanın söz konusu olduğu durumlarda, bu döngü daha geniş bir form halini almaktadır (Şekil 25).



Şekil 25. Döngüsel doğrusal olmayan analiz modeli zemin davranışı (Wasti, Y.)

Eşdeğer doğrusal analiz modeli ve döngüsel doğrusal olmayan analiz modellerinin tercihinde, tasarım mühendisinin problemin türüne göre gerekli kontrolleri yaparak karar vermesi gerekmektedir. Her iki analiz modelinde çok verimli çalıştığı durumlar olduğu gibi dezavantaj doğuracak durumlarda mevcuttur. Örneğin çok yumuşak bir zeminde çalışılıyor ise, zemin ortamı eşdeğer doğrusal davranıştan uzaklaşarak doğrusal olmayan davranış sergileyecektir. Veya yer altı su seviyesinin etkili olduğu durumlarda, toplam gerilme yerine efektif gerilme hesabının yapılması gerekecektir. Bu ve benzeri durumlarda yer yer eşdeğer doğrusal analiz daha verimli iken bazı durumlarda ise döngüsel doğrusal olmayan analiz zorunlu hale gelmektedir. Bu kapsamda bu iki analiz modeli için kullanım koşullarına bağlı olarak avantaj ve dezavantajlar Tablo 12’de özetlenmiştir.

Tablo 12

Karşılaştırmalı analiz modelleri (Ünsal, 2020)

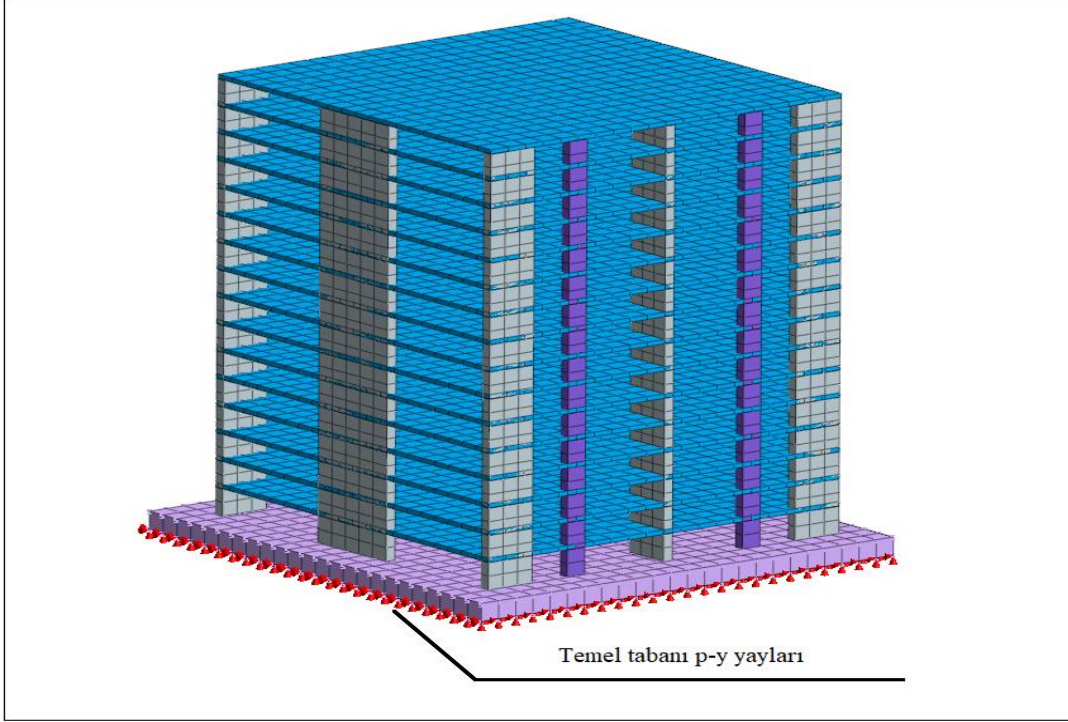
Analiz Modeli	Avantajları	Dezavantajları
Eşdeğer doğrusal analiz	<ul style="list-style-type: none"> - Verimli hesaplama, yoğun şekilde verifikasyon mevcut - Geniş kullanım alanı var, geliştirilme ihtiyacı yok - Çok sayıda yazılım kodu mevcut, analiz süreleri daha kısadır 	<ul style="list-style-type: none"> - Çok yumuşak zeminlerde kullanımı uygun değil - Zemin büyütme ve küçültme hesapları yansıtılamaz - Efektif gerilme analizi yapılamaz
Döngüsel Doğrusal Olmayan Analiz	<ul style="list-style-type: none"> - Gerime-birim deformasyon tabanlı daha gerçekçi davranış modellenir - Efektif gerilme tabanlı modelleme yapılabilir - Hem deplasman hem zemin tepkisi temelinde modelleme yapılabilir - Halen aktif olarak geliştirilmekte 	<ul style="list-style-type: none"> - Gelişmiş zemin bünye modellerine ihtiyaç duyulur - Model parametreleri çok iyi kurgulanmamış, halen geliştirilmeye ihtiyaç duyulmakta - İleri seviye laboratuvar deneylerine ihtiyaç duyulur - Analiz süreleri uzun sürmektedir

1.10. Altsistem Yaklaşımında Eylemsizlik Etkileşimi

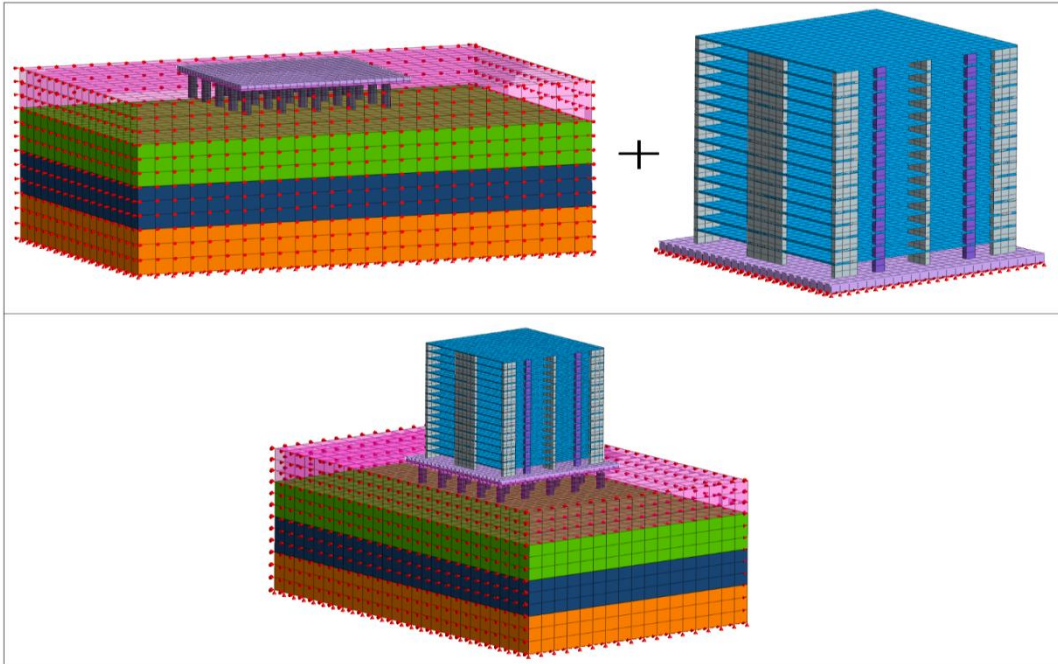
Titreşim etkisindeki bir yapıda burulma, eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşur. Bu kuvvet ve momentler temel-zemin etkileşim arakesitinde yerdeğiştirme ve dönme meydana getirir. Tüm yapısal sistemin şekil değiştirmesine önemli katkı sağlayan bu yerdeğiştirme ve momentler yalnız temel-zemin sisteminin şekil değiştirebilirliğinde mümkündür. Aynı zamanda bu yerdeğiştirmeler enerji tüketimine yol açar ve bu durum sistemin sönümünü önemli derecede etkiler. Bu etkilerin yapısal ataletten kaynaklanması durumu eylemsizlik etkileşimi olarak adlandırılır (Çetinkaya vd., 2017).

Kinematik etkileşim zemin ortamı ve kazıklar ile ilgilenirken, eylemsizlik etkileşimi üstyapı ve üstyapı temelinde zamana bağlı doğrusal olmayan davranış ile ilgilenir. Eylemsizlik etkileşiminde, doğrusal olmayan kazık-zemin etkileşim yayları üstyapı temeline tanımlanır ve kinematik etkileşimden elde edilen temel seviyesi ivme spektrumu etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak üstyapı ve üstyapı temelinde iç kuvvetler, şekil değiştirme ve yer değiştirme taleplerinin zamana

değişimleri elde edilir (Şekil 26). Nihai kazık iç kuvvetleri, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşiminden elde edilen sonuçların mutlak değerlerinin toplamı şeklinde belirlenir.



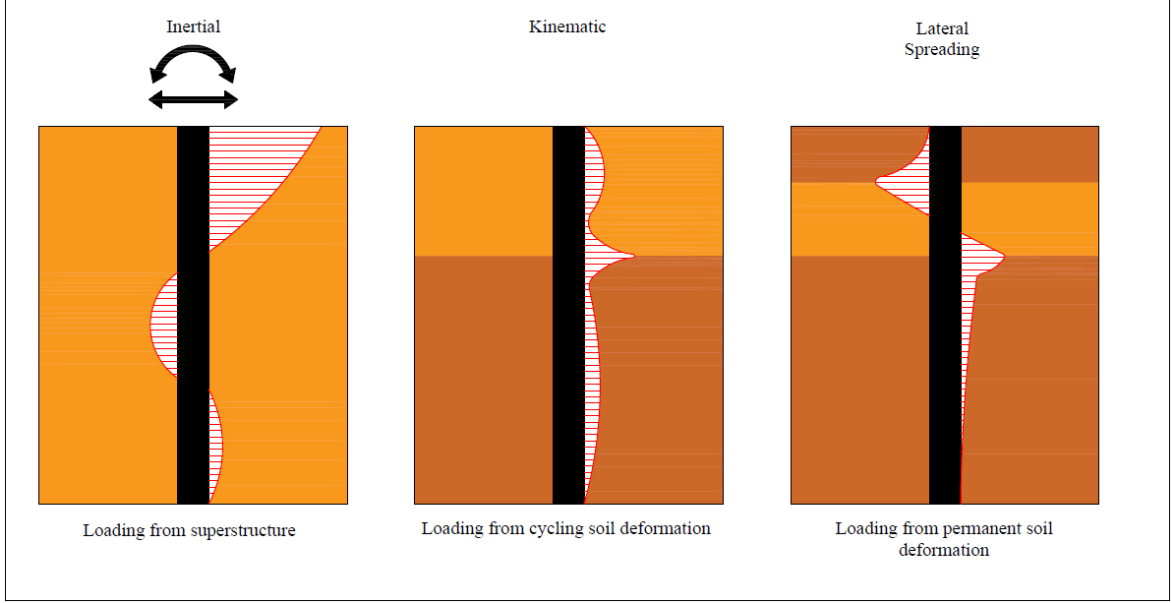
Şekil 26. Eylemsizlik etkileşimi sistem hesap modeli



Şekil 27. Kinematik etkileşim - eylemsizlik etkileşimi - genel sistem hesap modelleri

1.10.1. Doğrusal Olmayan Kazık - Zemin İlişkisinin Tanımlanması

Dinamik zemin-yapı etkileşimi problemleriyle ilgili olarak Kramer'in yapmış olduğu çalışma, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi adımlarında kazıkların sergilemiş olduğu davranışı özetlemektedir (Şekil 28).



Şekil 28. Dinamik durumda yanal yüklü kazıkların davranışı (Kramer, 2013)

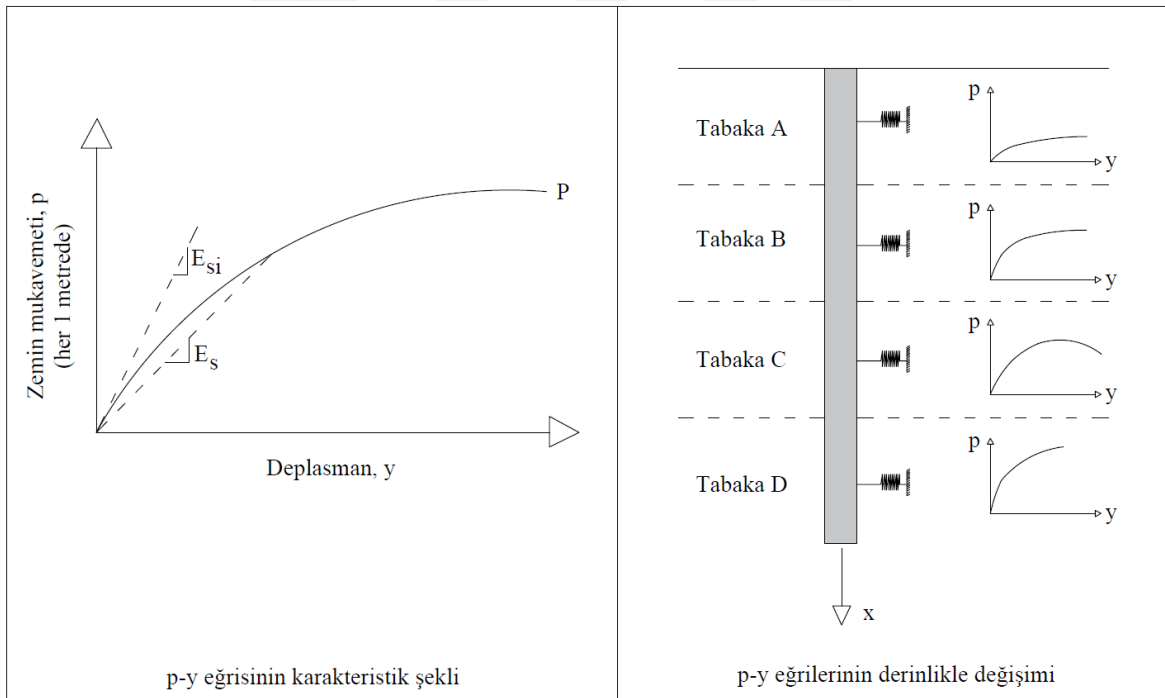
Şekil 28'de, ilk durumda ataletsel etkileşimden dolayı kazıkta oluşan davranış gösterilmektedir. Uygulanan yatay yük etkisi (deprem) ile üstyapının kütesine bağlı olarak bir ivme oluşmakta bu ivmenin kazık boyunca değişimi ve sönümü ifade edilmektedir. İkinci durum ise kinematik etkileşimi özetlemekte ve tabakalı zemin ortamında deprem dalgalarının ortamdaki farklı rijitlikler bağlı olarak kazık boyunca farklı deformasyonlar oluşturması sebebiyle oluşan etkileri, son gösterim ise ilk iki durumun etkisiyle meydana gelen yanal yayılma halini ifade etmektedir.

Kazık davranışının ve kazık-zemin arası doğrusal olmayan etkileşimin modellenerek hesaplara yansıtılmasında en sık kullanılan iki yöntem, yatak katsayısı yayları ve p-y (kuvvet-yerdeğiştirme) yayları yöntemleridir. Yatak katsayısı yönteminde, zeminin birbirinden bağımsız yaylar ile modellenip düşey bir kiriş gibi davrandığı kabul edilmektedir. P-y yöntemi ise zeminin plastik özelliklerindeki hesaba katıldığı ve şekil değiştirmelerin bunların bir fonksiyonu olarak tanımlandığı yöntemdir (Öztürk ve Işık, 2015). Zemin-yapı etkileşimli hesaplamalarda, yatak katsayısı ile tanımlanan bağımsız

yaylar, etkileşimi temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple TBDY’de kazık davranışı ve kazık-zemin etkileşim elemanlarının temsilinde p-y, t-z ve Q-Z yaylarının kullanılması gerektiği belirtilmektedir.

P-y yayları, kazık boyunca belirli aralıklarla herbir kazık için kazık yüzeyine tanımlanmalıdır. Burada y; kazığın yanal yüklenmesinden dolayı kazıkta meydana gelen yatay yönlü yerdeğiştirmeyi, p ise; kazıkta meydana gelen yatay yönlü yerdeğiştirme neticesinde zeminin kazık birim uzunluğuna uygulamış olduğu kuvveti ifade etmektedir.

Zemin ortamının tabakalı olması durumunda, p-y yayları her tabakaya ait karakteristik özellikler değerlendirmeye dahil edilerek hesaplanmalıdır. Şekil 29’da eğrilerin karakteristik şekli ve derinliğe bağlı eğrilerde meydana gelen değişim gösterilmektedir.



Şekil 29. Eğrilerin karakteristik şekli ve derinlikle değişimi (Rocscience, 2018)

P-y eğrilerinin elde edilerek doğrusal olmayan temel-zemin etkileşiminin tanımlanması için üstyapı temeline etkilmesi aşamalarında, kazık sayısının fazla olduğu sistemlerde herbir kazığın sonlu elemanlara ayrılacağı ve kazıklar üzerindeki her sonlu eleman için ayrı ayrı p-y eğrileri üretileceği için yüzlerce p-y eğrisi üretilmiş olacak ve bu eğrilerin temel tabanına etkilmesi hususunda tasarım mühendisinin en uygun olan eğrileri

tercih ederek sistemin temeline etkitmesi gerekmektedir. Burada güvenli tarafta kalmak maksadıyla en elverişsiz eğri tercih edilerek üstyapı temeline etkitilebileceği gibi, daha gerçekçi ve ekonomik sonuçlar elde edebilmek için kazık aplikasyon planı bölgeler halinde ele alınabilir. Kazık aplikasyon planı, projenin boyutuna bağlı olarak köşe bölgeler, iç bölgeler, orta bölge gibi farklı bölgelere ayrılabilir. Bu bölgeleri temsil etmek üzere her bir bölge için kendi sınırları içerisinde yer alan kazıklardaki en elverişsiz eğriler seçilir ve temel tabanındaki sonlu elemanların düğüm noktalarına etkilerek doğrusal olmayan temel-zemin ilişkisi tanımlanabilir. Bu şekilde daha gerçekçi ve ekonomik bir çözüm yapılmış olacaktır.

P-y eğrilerinin elde edilmesinde bilgisayar destekli yazılımlar kullanılabileceği gibi literatürde yer alan referans eğriler kullanılarak da hesaplama yapılabilir. TBDY’de p-y yayları ile ilgili olarak, temel-kazık-zemin alt sistemine statik tekil kuvvetler etkilerek etkileşim yaylarına ait doğrusal olmayan p-y eğrilerinin elde edilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Aynı zamanda yine TBDY Bölüm 16C.6.2’de p-y yayları için, Bölüm 16C.6.3’de ise, t-z ve Q-Z yayları için kaynaklar yer almaktadır (Tablo 13).

Tablo 13

P-y, t-z ve Q-Z yayları için kaynaklar (TBDY, 2018)

P-y yayları için kaynaklar	Matlock,H. (1970). “Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay.” Proc.,2nd Annu. Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 1204, Houston, Texas, pp. 577-594.
	Reese, L. C. and Welch, R. C. (1975). “Lateral loading of deep foundation in stiff clay.” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(7), pp. 633-649.
	Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1975). “Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay.” Proc. 7th Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 2321, Houston, Texas, pp. 671-690.
	Welch, R. C. and Reese, L. C. (1972). “Laterally loaded behavior of drilled shafts.” Research Report 3-5-65-89, Center for Highway Research, University of Texas, Austin.
	Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974). “Analysis of laterally loaded piles in sand.” Proc. 6th Offshore Technology Conference, Paper 2080, Houston, Texas, pp. 473-483.
t-z ve Q-Z yayları için kaynaklar	API WSD RP-2A (2000). Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, American Petroleum Institute.

Tablo 13’de yer alan kaynaklar kullanılabileceği gibi bilgisayar destekli yazılımlar ile de pratik bir şekilde p-y eğrileri üretilebilir. Bu hesaplamaları yapan yazılımlar

genellikle 2 boyutlu çalışma imkanı sunmakta olup 3 boyutlu çalışma imkanı sağlayan yazılımlarda mevcuttur. Bilgisayar destekli numerik analizler ile p-y eğrilerini elde edebilmek için;

- Temel sistemi malzeme ve kesit bilgileri, temel yükleri,
- Kazıkların malzeme ve kesit bilgileri, tekil kazık/grup kazık durumu, kazık aplikasyon planı,
- Tabakalı zemin ortamı malzeme ve kesit bilgileri,

gibi parametrelerin yazılım editörüne tanımlanması gereklidir. Analizler gerçekleştirilirken;

- Kazık elemanı parçalara ayrılmış kiriş olarak, zemin ise doğrusal olmayan yay olarak tanımlanır,
- Herbir kazık segmenti için deplasman hesaplanır,
- Deplasmana bağlı olarak zemin direnci hesaplanır,
- Kazık deplasmanı ve zemin basıncı birbiri ile entegre edilir,
- İterasyon yapılarak birbiri ile uyumlu değerler elde edilir.

Zemin-kazık etkileşimini temsil eden p-y eğrileri, kazıkların yatay kapasite hesabında da kullanılmaktadır. Fakat gelişen bilgisayar teknolojisi ile bilgisayar destekli numerik analizlerle de bu iş kolaylıkla yapılabilmekte ve numerik analizler daha kapsamlı modelleme imkanı sunduğu için daha detaylı analizler ve görece daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir (Tablo 14).

Tablo 14

Kazıkların yatay kapasitesi için karşılaştırma

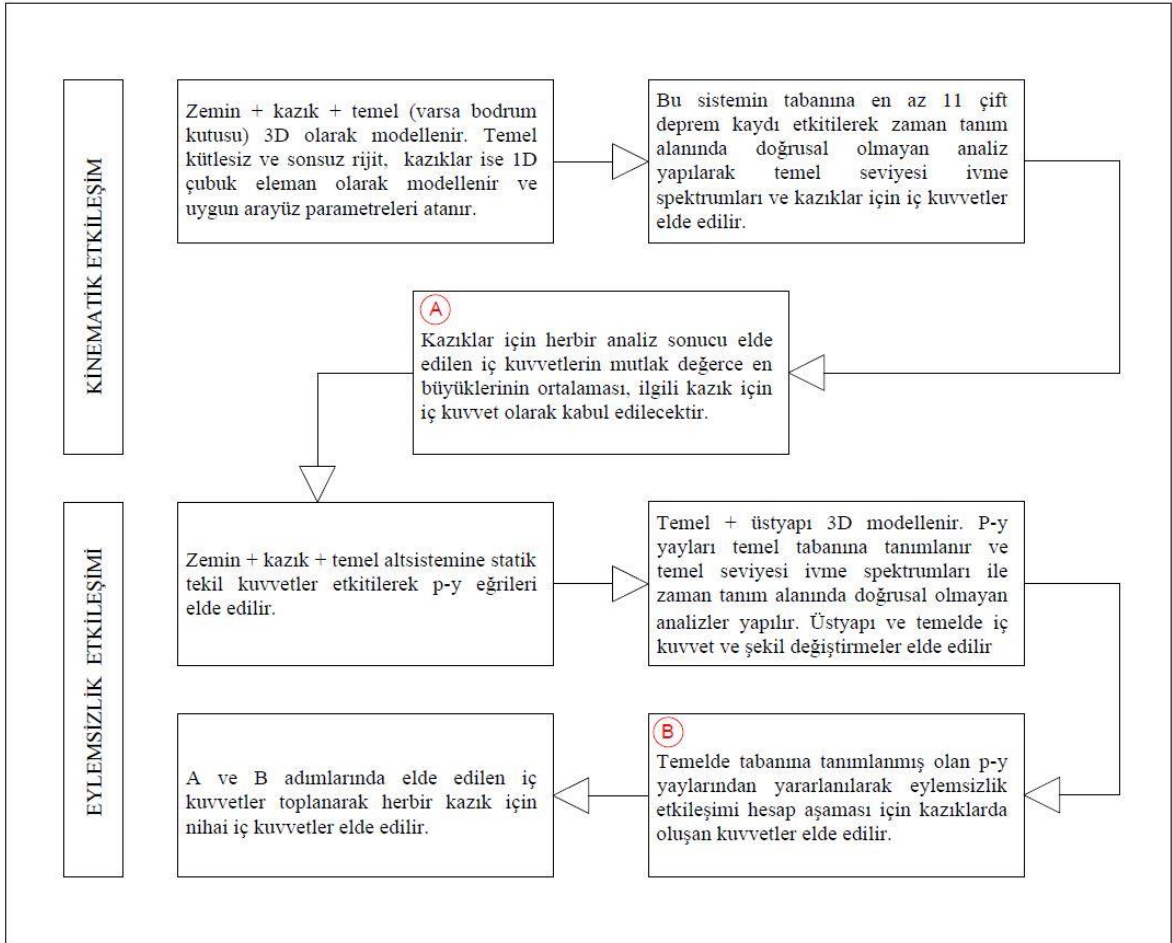
Parametre	P-y Analizleri	Nümerik Analizler
Zemin Davranışı	P-y eğrisine dayalı	Bünye modeline dayalı
Kazık Elemanı	Kiriş elemanı olarak modellenir	Katı/kiriş elemanı olarak
Modelleme	Zemin; nonlinear yay, kazık; kiriş	2D/3D yapısal model
Zemin-Kazık Etkileşimi	P-y eğrisine dayalı	Arayüz elemanları
Üstyapı	Kısmen tanımlama yapılabilir	Birebir tanımlanabilir
Komşu Yapılar	Tanımlanamaz	Birebir tanımlanabilir
Yapım Aşamaları	Tanımlanamaz	Birebir tanımlanabilir
Tasarım Uygulaması	Geleneksel analizler	Teknolojik analizler

1.10.2. Doğrusal Olmayan Üstyapı Analizleri

Eylemsizlik etkileşiminde sistem; kütlesi tanımlanmış temel (varsa bodrum kutusu) ve üstyapı şeklinde modellenir. Bu altsistemde, temel tabanındaki her bir sonlu elemanın düğüm noktasına **1.10.1**'de ifade edildiği şekliyle elde edilecek olan doğrusal olmayan p-y yayları etkiltilerek temel-zemin ilişkisi tanımlanır. Aynı altsisteme Kinematik etkileşimde elde edilen temel seviyesi ivme spektrumları tanımlanarak zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılır. Üstyapı ve üstyapı temelinde iç kuvvetler ile zamana bağlı kuvvet-deplasman değişimleri elde edilir. Temel tabanında tanımlanmış olan p-y yaylarından yararlanılarak kazıklarda için iç kuvvetler elde edilir. Bu kuvvetler kinematik etkileşimden elde edilen kazık iç kuvvetleri ile toplanarak nihai kazık iç kuvvetleri elde edilmiş olur. Altsistem yaklaşımı Yöntem-I kapsamında (kinematik + eylemsizlik etkileşimi) yapılan tasarım ve hesaplama aşamaları Tablo 15'de özetlenmiştir.

Tablo 15

Altsistem yaklaşımı tasarım ve hesap şeması



İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında ele alınan zemin-yapı dinamik etkileşimi, yapısal davranış parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olması nedeni ile pek çok araştırmaya konu olmuştur. Zemin-yapı etkileşimi ile ilgili bilinen en eski çalışma 1960'lı yılların ortasına dayanmakla birlikte günümüze kadar bu alanda birçok çalışma yapılmıştır (Aydemir, 2011). Bu bölümde zemin-yapı etkileşimi ile ilgili yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

Zaimoğlu (1996), Yüksek Lisans tez çalışmasında, 2 km² lik bir çalışma alanı için mevcut yapıları, yapım tekniği ve yapı malzemelerine göre sınıflandırarak bu yapıların zemin-yapı ilişkisi ve fay uzaklıklarını dikkate alınarak olası hasar senaryolarını araştırmıştır. Çalışmasında, zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmayarak yapılan tasarımların deprem hasarını artıran en önemli etkenlerden biri olduğunu vurgulamıştır.

Keshishian (2001), Doktora tez çalışmasında, köprü türü geniş açıklıklı sistemler için, deprem yer hareketindeki değişime bağlı olarak yapı-zemin etkileşiminin sistemin analizine olan etkilerini araştırmıştır. Zemin özelliklerine bağlı olarak deprem yer hareketinde meydana gelen değişimleri dikkate alarak yapmış olduğu analizler neticesinde, zeminin deprem ivmeleri üzerinde artırıcı yada azaltıcı etkileri olabileceği, bu sebeple yapı-zemin etkileşiminin analiz sonuçlarını küçültebileceği gibi tam tersi şekilde büyütebileceğininde söz konusu olduğunu ifade etmiştir.

Tongaonkar ve Jangid (2003), zemin-yapı etkileşiminin deprem izolatörlü 3 açıklı bir karayolu köprüsünün analizine olan etkisini incelemişlerdir. Zaman tanım alanında yapmış oldukları dinamik analizler neticesinde, zemin-yapı etkileşiminin köprü sistemini etkileşimsiz hesaba kıyasla daha güvenli tarafta bıraktığını ve buna bağlı olarak maliyeti düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Xu vd. (2004), büyük bir sanayi yapısı ve yanında daha küçük bir işletme yapısı olması durumu için yapılan saha ölçümleri ile zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alındığı bilgisayar ortamında yapılan sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında

etkileşimin hesaplamalara dahil edildiği sayısal modellerin, yapıları daha güvenli tarafta bıraktığı hususunu belirtmişlerdir.

Severcan (2004), Doktora tez çalışmasında, dinamik zemin-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde kullanılacak sınır eleman formülasyonlarını incelemiştir. Geliştirdiği formülasyonlar kapsamında, çözüm bölgesi içerisinde yer alan noktalarda iç kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin nasıl hesaplanacağını açıklamış, bahsi geçen noktaların sınırlara çok yakın olması durumunda ise teklik durumlarının söz konusu olabileceği ve hatalı sonuçların üretileceğini, teklik durumunun önüne geçilebilmesi için yeterli sınır mesafelerinin tanımlanması gerektiğini ve bunun ayrı bir araştırma konusu olduğunu ifade etmiştir.

Ala (2007), Yüksek Lisans tez çalışmasında, yumuşak kat, zayıf kat, kısa kolon gibi olumsuz durumları göz önünde bulundurmamak suretiyle zemin etkisinin betonarme binaların davranışı üzerindeki etkileri araştırmıştır. Çalışmasında, yapıların tasarımından kaynaklanan el verişsiz durumlara (kısa kolon, zayıf kat vb.) zemin-yapı etkileşiminden kaynaklanabilecek olumsuz durumlarda ilave edilince (zemin amplifikasyonu vb.) yapılarda yıkıma kadar gidebilecek hasarların söz konusu olduğunu, bu sebeple yapı tasarımında zemin etkilerinin dikkate alınması ve kısa kolon, zayıf kat gibi olumsuzluklardan kaçınılması gerektiğini belirtmiştir.

Gökçe (2008), Yüksek Lisans tez çalışmasında, güçlendirme perdeleri ile taşıyıcı sistemi takviye edilmiş olan mevcut bir yapının, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak deprem performansını araştırmıştır. Çalışmaları neticesinde, temel sisteminin yapı performansına önemli etkilerinin olduğunu, aynı sistemin ankastre mesnet tanımlaması ile çözümü güvenli sonuçlar verirken, sisteme yapı temelinin eklenmesi sonucu zemin-yapı etkileşiminden dolayı sistemde ciddi hasarların söz konusu olduğunu ve bu sebeple hesaplamalarda zemin-yapı etkileşiminin göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamıştır.

Mamuk (2010), Yüksek Lisans tez çalışmasında, çok katlı çerçeve tipi betonarme yapı ile elastik zemin arasındaki dinamik etkileşimi incelemiştir. Çalışmaları neticesinde, zemin-yapı etkileşimi modelinin, zemini tamamen rijit kabul eden yaklaşımdan farklı

olduğunu, etkileşimli modelde periyotların, gerilmelerin, iç kuvvetlerin zemin özelliklerine göre değiştiğini, yapı periyodunun rijit zeminli modele göre daha yüksek olduğunu, yapı-zemin etkileşiminin yapı tabanındaki deprem hareketini değiştirdiği için serbest saha ile yapı tabanındaki deprem kayıtlarında farklılıklar olduğu hususlarını ifade etmiştir.

Anderson vd. (2011), büyük ölçekli ağır sanayi (nükleer santraller) yapılarının varlığının yapı-zemin etkileşimi kapsamında yakın civardaki diğer binalar üzerinde oluşturacağı etkileri incelemiştir. Çalışmaları sonucu, yapı-zemin etkileşiminin varlığına bağlı olarak çevre yapıların bazılarının yapısal tepkilerinde artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Aydemir (2011), Doktora tez çalışmasında, zemin-yapı etkileşiminin yapısal davranış parametreleri üzerine etkisini araştırmış, Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlardaki sonuçları mukayese etmiştir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde 2~6 katlı yapılarda görülen ağır hasarların veya tümünden göçmelerin tamamıyla zemine bağlı etkenlerden meydana geldiğini söylemek mümkün olmasa bile zemin amplifikasyonu sonucu ivmelerde meydana gelen artışların etkisinin ortaya konması açısından önemli bir örnek olduğunu belirtmiştir.

Aydinoğlu (2011), deprem bölgelerinde zayıf zeminlerde kazıklı olarak inşaa edilecek binalarda, tabakalı zemin ortamı boyunca düşey olarak ilerleyen deprem dalgalarında, zemin özellikleri ve kazıkların varlığına bağlı olarak meydana gelecek değişimi ve bu değişimin yapı tasarımı üzerine etkilerini belirleyebilmek için pratik bir hesap yöntemi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmasında, zemin-yapı etkileşim analizinin kazık tasarımı bakımından çok önemli bir işlevinin olduğu, kazıkların zayıf zemine oranla çok daha rijit oldukları için büyük etkilere maruz kaldıkları ve bu etkilerin ancak kinematik etkileşim ile hesaplanabildiği, dinamik etkiler altında kazıkların doğru tasarlanabilmesi için kinematik etkileşim hesaplamasının zorunlu olması gerektiği hususlarını ifade etmiştir.

Korkmaz (2012), Yüksek Lisans tez çalışmasında, düşey ve eğik kazıklı iskelelerin DLH 2008 kapsamında zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerini ve maksimum deplasmanlarını araştırmıştır. Araştırmaları sonucunda, yerel zemin sınıfının iyileşmesi durumunda düşey kazıklı iskelelerde, yatay deplasmanların artış

gösterdiği fakat buna karşılık kazık iç kuvvetlerinde azalma söz konusu olduğu, eğik kazıklı iskelelerde ise aynı şartlarda deplasman değerleri daha az iken kazık iç kuvvetlerinde artış meydana geldiğini belirtmiştir.

Siyahi vd. (2013), zemin-temel-yapı etkileşimi analizlerini geoteknik bakış açısı ile ele almış ve kinematik etkileşim ile eylemsizlik etkileşimi konularını hem teorik hem de uygulama açısından incelemiştir. Yumuşak zeminlerde zemin-temel-yapı etkileşimi probleminin oldukça karmaşık olduğu, sistemin çözümünde problemi basitleştiren altsistem yaklaşımının kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca sistemin davranışının kinematik etkileşim hesabı ile belirleneceği ve seçilen derin temel sisteminin rijitliğine bağlı olarak yer hareketinin yapı hakim periyodu bölgesinde artma yada azalma eğilimi göstereceğini ifade etmişlerdir.

Maviş (2014), Yüksek Lisans tez çalışmasında, farklı zemin koşullarındaki düşey ve eğik kazıklı iskele yapılarında, zemin-kazık etkileşiminin, kazıkların yatay yük taşıma kapasitelerine olan etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, düşey kazıklı iskele yapılarında zemin-kazık etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre mesnet koşulları altındaki modelleme tekniğinin mühendislik pratiği açısından yeterli olabileceğini, ancak eğik kazıklı iskele yapılarında doğrusal olmayan p-y yayları ile zemin-kazık etkileşiminin dikkate alınarak modelleme yapılması gerektiğini belirtmiştir.

Naiboğlu (2019), Yüksek Lisans tez çalışmasında, TBDY’de yer alan Yöntem III kapsamında, zemin kazık-yapı etkileşimini dikkate alarak kum ve kil zeminlere oturan farklı ölçülerdeki kazıklarının davranışını incelemiştir. Çalışma neticesinde; taban kayasının konumunun daha alt kotlara inmesiyle kazıklarda meydana gelen deplasmanlarda artış meydana geldiği, kil zeminlerde kohezyon ve deplasman ilişkisi arasında ters orantının söz konusu olduğu ve analizlerde kullanılan deprem düzeyinin DD-2’den DD-1’e yükseltilmesi sonucu kesit tesirlerinin yaklaşık iki kat arttığını belirtmiştir.

Altun (2019), Yüksek Lisans tez çalışmasında, betonarme bir minare yapısını, 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri kapsamında zemin-yapı etkileşimli ve etkileşimsiz analiz ederek, zemin-yapı etkileşiminin analiz sonuçları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma neticesinde, etkileşimli modellerde görece yumuşak zeminlerde periyot sürelerinin

uzadığını, yine etkileşimli modellerde deplasman ve düzlem gerilme değerlerinin etkileşimsiz modellere kıyasla daha büyük olduğu, tam tersi olarak ise etkileşimli modellerde taban kesme kuvvetinin daha düşük olduğu hususlarını belirtmiş ve yapıda değişikliğe yol açabilecek tüm etkilerin (özellikle zemin-yapı etkileşimi) yapısal analizlerde göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamıştır.

Çomaklı (2019), Yüksek Lisans tez çalışmasında, zemin-yapı etkileşiminin göz önünde bulundurulduğu durum ve etkileşimsiz durum için, yumuşak kat düzensizliği davranışını araştırmıştır. Çalışmaları neticesinde, düşük rijitliğe sahip zeminlerde analiz sonuçlarının, zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı modellerde, etkileşimsiz modellere kıyasla oldukça farklı olduğu, ivme kayıtlarındaki değişimlerin sonuçlar üzerinde doğrudan belirleyici olduğu ve ankastre mesnet (etkileşimsiz) tanımlamasıyla modellenen sistemlerin gerçekçi sonuçlar vermediği hususlarını ortaya koymuştur.

Dincer (2019), Yüksek Lisans tez çalışmasında, numerik analizler kullanarak, zemin ortamının, farklı karakteristik özelliklere sahip çelik yapıların dinamik etkiler altındaki davranışına etkilerini araştırmıştır. Çalışmasında, analiz sonuçlarının etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için farklılıklar gösterdiğini, etkileşimli durumda, bazı ivme kayıtlarında sisteme etkileyen yükler artarken bazılarında ise azaldığı ve 1. doğal titreşim periyodu arttıkça, yapı ile zemin arasındaki karşılıklı etkileşimin daha etkin olduğu hususlarını ortaya koymuştur.

Şen (2019), Yüksek Lisans tez çalışmasında, mevcut bir demiryolu köprüsü için farklı zemin koşullarında yapısal analizler yaparak zemin-yapı etkileşiminin demiryolu köprüsü tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini ve farklı zemin tiplerinin elastik-elastoplastik davranış tepkilerini araştırmıştır. Weiherfeld köprüsü için iki farklı zemin tipi için yaptığı çalışmalar neticesinde, direkt killi zemine outran köprü sisteminin dinamik yükler altında kumlu zemine oturan köprü sistemine oranla daha fazla şekil değiştirdiğini ve uygun zemin iyileştirme yöntemleri ile bu yerdeğiştirmenin büyük oranda sınırlandırılabilirdiğini ifade etmiştir.

Sarioğlu (2020), Yüksek Lisans tez çalışmasında, zemin-yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için, düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda, statik ve

dinamik analiz yöntemlerini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, görece rijit zeminlerde etkileşimsiz ve etkileşimli modellerdeki deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğunu, zayıf zeminlerde dinamik analizler sonucu ivme kaydındaki değişimle ilgili kesin bir hüküm vermenin mümkün olmadığını, zemin-yapı etkileşimli durumda, zemin rijitliği düştükçe aksenal yük oranlarının arttığı ve buna bağlı olarak kolon moment kapasitelerinde artış meydana geldiğini belirtmiştir.

Sarı (2020), Yüksek Lisans tez çalışmasında, şev stabilitesinin kazıklarla artırılması durumu için 2 boyutlu analizlere dayalı yaklaşımlar ile zemin-yapı etkileşimini incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle farklı kazık çapı ve aralıklarında modeller ile elasto-plastik zemin davranışı ve gömülü sıra kiriş eleman kullanılarak yapılan analizler sonucu hesaplanan kazık kapasitelerinin Broms (1964) tarafından önerilen değerlerle uyumluluk gösterdiğini saptamıştır.

Ada (2020), Doktora tez çalışmasında, birbirine yakın konumda yer alan yapıların arasında meydana gelecek zemin-yapı etkileşiminin, yapıların davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Zemin ortamının yeterli boyutlarda modellenmesi gerektiği, aksi halde bazı pik değerlerde kayıp yaşandığı, zemin ortamının yan kısımlarına uygun sınır şartlarının tanımlanması gerektiği, zemin davranışının yapılar üzerindeki etkisinin azaltılması için yapılar arasında belirli bir mesafenin bulunması gerektiği hususlarını vurgulamıştır.

Kamal (2021), Doktora tez çalışmasında, çekiçleme ve zemin-yapı etkileşimini birlikte değerlendirerek, ankastre mesnetli (etkileşimsiz) modeller ile zemin-yapı etkileşimli modelleri karşılaştırarak, zemin-yapı etkileşiminin komşu binalar üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmasında, çekiçlemenin söz konusu olduğu durumda, kat yüksekliğinin artması ile etkileşimli ve etkileşimsiz durumların her ikisinde de deplasman talebinde de artış meydana geldiğini, bu artış talebinin etkileşimli modellerde çok daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Çekiçlemenin olmadığı durumda ise, etkileşimsiz modelde deplasman talebi sınırlı iken etkileşimli modelde yine ciddi deplasman talebi olduğunu, bu sebeple komşu binaların tasarımında zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının büyük önem arz ettiğini belirtmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, “Altsistem Yaklaşımıyla Zemin-Yapı Etkileşiminin Deprem Analizine Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlanmasında yürütülen çalışmalar, kullanılan malzemeler/veriler/yazılım ve donanımlar ile uygulanan yöntemler açıklanmaktadır

3.1 . Literatür Derlemesi

Literatür derlemesi kapsamında, deprem dalgaları ile zemin/yapı arasındaki ilişkiyi inceleyen dinamik zemin-yapı etkileşimi alanında yapılmış ve **Bölüm 2**'de özetlenen ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmalar incelenerek, farklı yapı tipleri ve zemin koşullarında etkileşimin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3.2. Saha Çalışmaları ve Mühendislik Verilerinin Temini

Bu tez kapsamında analizlerde kullanılan zemin ortamına ait dinamik-elastik mühendislik parametreleri, “Deniz İskele Projesi Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu Hazırlanması İşİ” kapsamında proje alanında 22.12.2019 - 12.01.2020 tarihleri arasında yapılan arazi çalışmaları (Masw ölçümleri, Mikrotremör, zemin araştırma sondajları) neticesinde hazırlanan Veri ve Geoteknik Raporundan temin edilmiştir.

Proje alanına ait spektral ivme katsayıları, TDTH kullanılarak, proje alanının koordinatları, yerel zemin sınıfı ve deprem düzeyi parametreleri aracılığıyla elde edilmiştir.

Analizlerde kullanılan 11 çift deprem kaydı, PEER veri tabanı üzerinden, alana özgü spektral ivme katsayıları referans alınarak hesaplanan ölçek katsayıları ile birlikte elde edilmiştir.

Tüm analizlere altlık teşkil eden 23 katlı, kazık temelli betonarme yapı, uygulanmış yahut herhangi bir kaynaktan temin edilmiş bir proje olmayıp bu tez çalışması kapsamında analizlerde kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmıştır.

3.3. Kullanılan Yazılım ve Donanımlar

Zemin-yapı etkileşimine ait problemler, oldukça karmaşık olup TBDY’de bahsedildiği şekliyle problemin ele alınabilmesi için gelişmiş yazılımlar ve yüksek özellikte donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, PEER veri tabanı kullanılarak elde edilen 11 çift deprem kaydının ölçeklenmesinde, ticari bir yazılım olan SeismoSignal 2021’in lisanslı akademik sürümü kullanılmıştır.

Deprem kaydına ait ivme spektrumundaki değişimin incelendiği serbest saha analizlerinde, ücretsiz bir yazılım olan Deepsoil kullanılmıştır.

Kinematik Etkileşim modelleme ve hesaplama aşamalarında (zemin ortamının modellenmesi, kazıkların arayüz elemanları ile birlikte modellenmesi, sonsuz rijit radye temelin modellenmesi, özdeğer analizi, 11 çift deprem kaydının taban kayasından etkilerek temel seviyesi ivme-spektrumlarının elde edilmesi, kazıklar için iç kuvvetlerin hesaplanması) ticari bir yazılım olan Midas GTS NX’in tam fonksiyonlu deneme sürümü kullanılmıştır.

Kazık aplikasyon planı ve zemin parametrelerine bağlı olarak kazıklar için belirli derinliklerde elde edilen p-y eğrileri için, ticari bir yazılım olan RSPile’nin tam fonksiyonlu deneme sürümü kullanılmıştır.

Eylemsizlik Etkileşimi hesaplamalarında (temel tabanına p-y yaylarının tanımlanması, dinamik üstyapı analizleri), yatak katsayısı yöntemi ile yapılan hesaplamalarda (kazık+temel+üstyapı sisteminin kazıklara tanımlanan yatay yatak katsayısı yayları ile dinamik analizi) ve zemine ankastre şekilde bağlı rijit modelin analizinde Sap2000 yazılımı kullanılmıştır.

Kalıp planları, kesitler, görünüşler ve diğer teknik çizimler, ticari bir yazılım olan Autocad’in tam fonksiyonlu öğrenci sürümü ile hazırlanmıştır.

Bilgisayar donanımı olarak ise, Intel Core i7 işlemci, 12 çekirdek, NVIDIA Geforce 840M ekran kartı, 1 TB SSD hard disk, Windows 10, 64 Bit işlemci ve 8 Gb ram özelliklerinde bir bilgisayar kullanılmış olup kinematik etkileşim kapsamında yapılan herbir analiz ortalama 24 saat sürmüştür. Analiz datalarının her biri ortalama 60 gb olup tüm çalışma kapsamında yaklaşık 1,5 tb büyüklüğünde bir veri depolaması yapılmıştır. Analiz datalarını yedeklemek ve muhafaza etmek için ise 6 TB kapasiteli harici bir hard disk kullanılmıştır.

3.4. Uygulanan Yöntem

Bu çalışmada, zemin-yapı etkileşimin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisi, **3.5** ve **3.6**'da yer aldığı şekliyle, aynı zemin ve üstyapı özelliklerine sahip iki sistemin, TBDY'de yer alan altsistem yaklaşımı Yöntem I ile ve yatak katsayısı yöntemiyle ele alınarak sonuç çıktılarının mukayese edilmesi şeklinde incelenmiştir. Ayrıca etkileşimsiz duruma ait sonuçları görebilmek için sistemin zemine ankastre şekilde mesnetlendiği rijit modelin de analizi yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

3.5. Altsistem Yaklaşımı ile Örnek Uygulama

TBDY, zemin-yapı etkileşimi analiz yöntemleri ve tasarım uygulamaları ile ilgili olarak **1.5**'te bahsedildiği üzere yerel zemin sınıfı, BYS ve DTS'ye bağlı olarak 3 yöntem sunmaktadır. Tablo 8'de detayları verilen bu yöntemlerden Yöntem I, en elverişsiz koşulları ihtiva etmekte olup TBDY'ye göre bu yöntemin kullanılmasının gerektiği durumlarda Yöntem II ve Yöntem III'e göre çok daha detaylı şekilde modelleme ve analiz yapılması gerekmektedir. Belirtilmelidir ki, Yöntem II yahut Yöntem III'ün kullanılması gerektiği durumlarda, tasarım mühendisi daha detaylı bir hesap yapmak maksadıyla Yöntem III yerine Yöntem II veya Yöntem II yerine Yöntem I'i kullanarak hesaplama yapabilir.

Tablo 7'de ifade edildiği üzere ZD, ZE ve ZF yerel zemin sınıflarında, BYS = 1 ve DTS = 1,1a,2,2a koşullarının sağlanması durumunda Yöntem I'e göre hesap yapmak gerekmektedir. DTS'ye bağlı olarak BYS bilgileri Tablo 16'da özetlenmiştir.

Tablo 16

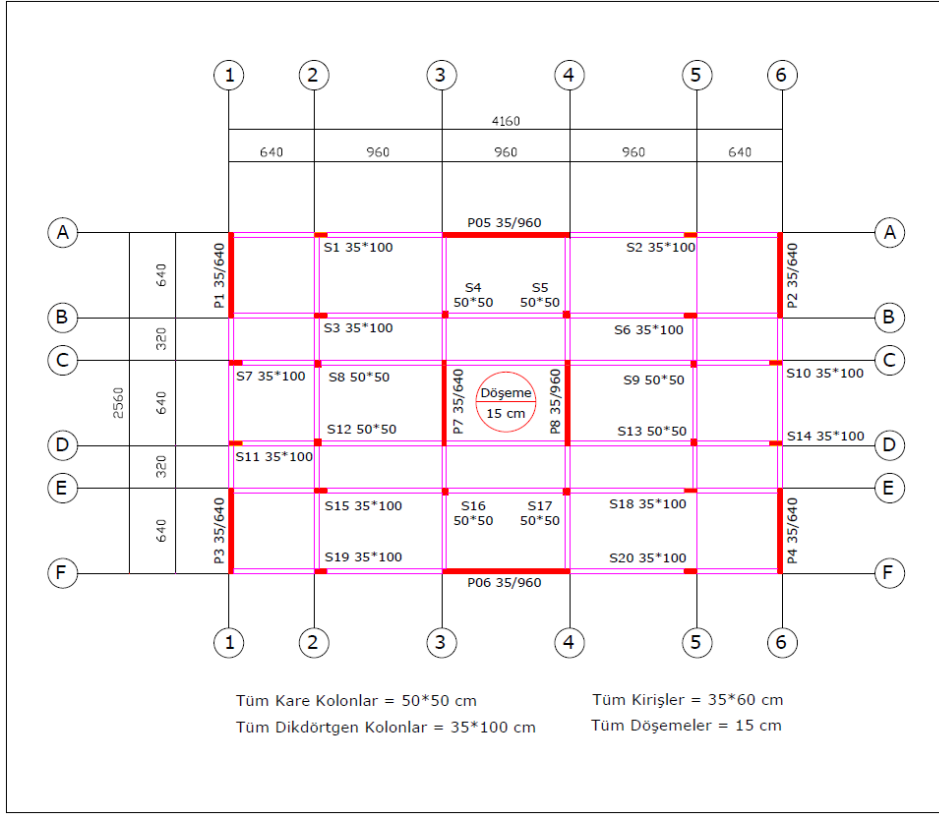
BYS ve DTS'ye göre Bina Yükseklik Aralıkları (TBDY, 2018)

Bina Yükseklik Sınıfı	BYS ve DTS' ye Göre 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	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10,5$	

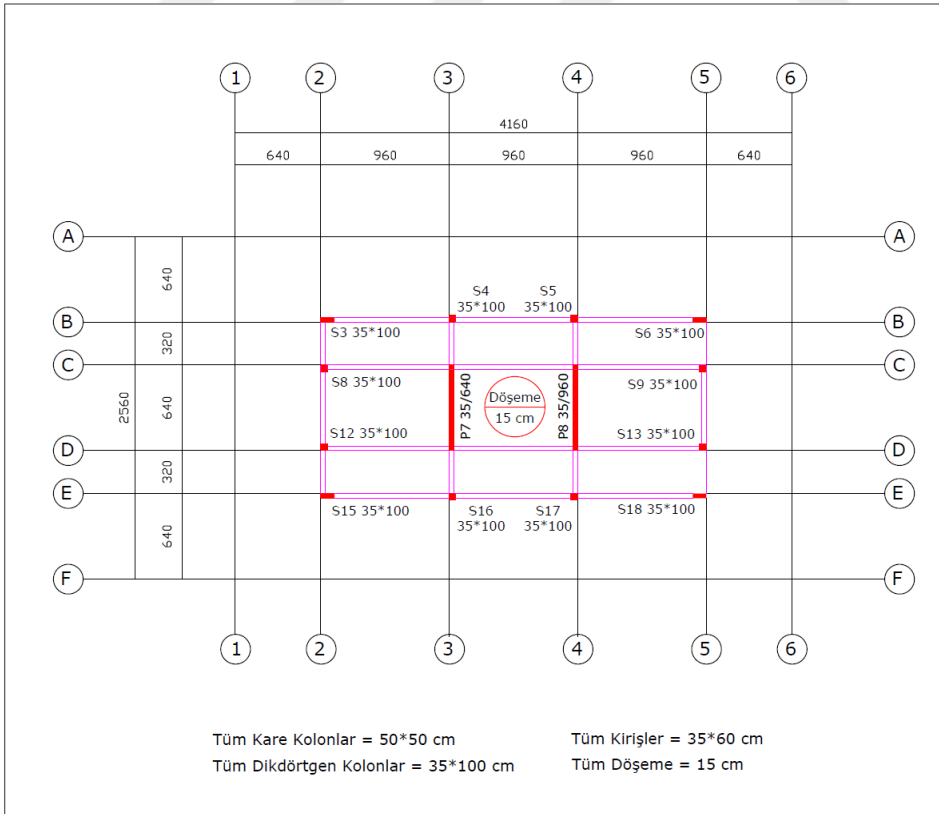
Tablo 16'da belirtilen bina yükseklik aralıklarına bakıldığında, DTS = 1,1a,2,2a koşullarında $H_N > 70$ m olan yapılar BYS = 1'e dahil olmaktadır. Bu durumda TBDY'ye göre $H_N \leq 70$ m olan yapılar için Yöntem I'in uygulanması zorunlu değildir. Fakat burada belirtmelidir ki, zorunlu olmasa bile tasarım mühendisinin tercihine bağlı olarak istenilen her durumda Yöntem I seçilerek hesaplama yapılmasında herhangi bir sakınca yoktur. Bu çalışmada ele alınan örnek uygulamada altsistem yaklaşımının gerektirdiği tüm modelleme ve analiz aşamalarının detaylı olarak işlenebilmesi için Yöntem I seçilerek gerekli tasarım ve hesaplamalar yapılmıştır.

3.5.1 Üstyapı Geometri Bilgileri

Üstyapı, herbir katı 3 m yüksekliğinde olan zemin kat üzeri 22 normal kat şeklinde, $H_N = 69$ m olmak üzere toplam 23 kattan oluşmaktadır. 18. normal kattan itibaren kalıp planında daralma olmaktadır. Katlara ait kalıp planları Şekil 30 ve Şekil 31'de, genel sisteme ait 3D renderler ise Şekil 34'te yer almaktadır.

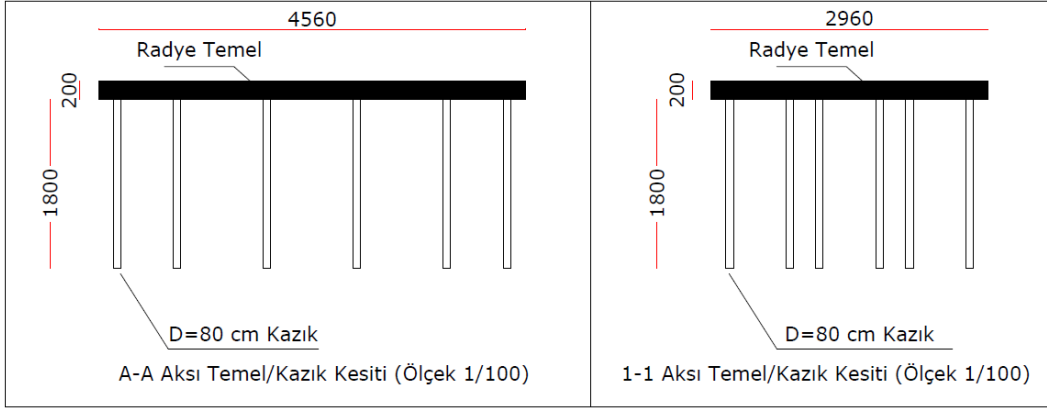


Şekil 30. Zemin kat, 1-17. katlara ait kalıp planı

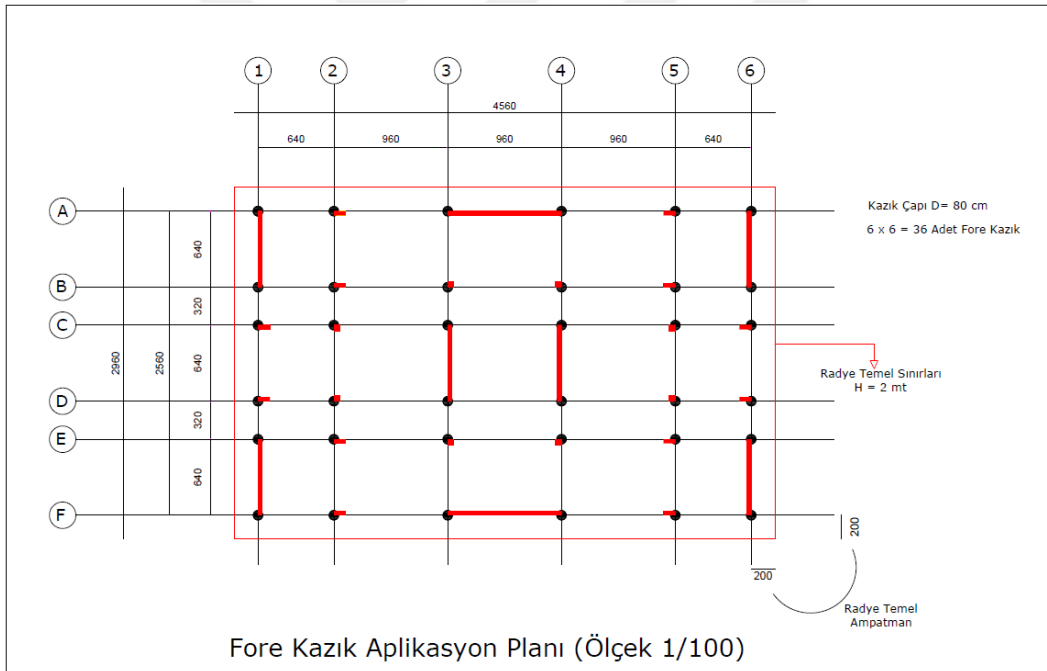


Şekil 31. 18-22. katlara ait kalıp planı

Temel sistemi, 2 m yüksekliğinde radye temel ve radyenin tabanında $D = 80$ cm çapına sahip betonarme kazıklar (fore kazık) şeklinde olup temel kesitleri ile kazık aplikasyon planı Şekil 32 ve Şekil 33'de yer almaktadır.



Şekil 32. Radye temel-kazık kesitleri



Şekil 33. Fore kazık aplikasyon planı

Kazıklar, sonlu eleman yoğunluğuna bağlı analiz süreleri göz önünde bulundurularak, sonlu elemanların ideal çalışabilmelerini sağlamak amacıyla düşey taşıyıcı sistem elemanlarının (kolon ve perdelerin) düğüm noktaları ile uyumlu ve grup etkisi dikkate alınarak aralarında hiçbir aksta 3D mesafenin altına düşülmeyecek şekilde applike edilmiştir. Sistemde $D=80$ cm çapında ve $H=18$ m yüksekliğinde toplam 36 adet betonarme (fore) kazık bulunmaktadır. Hassas sonuçlar elde edebilmek için tüm kazıklar geoteknik

analizlerde zemine ait sonlu elemanların düğüm noktalarını tutacak şekilde, yatak katsayısı yaklaşımıyla yapılan üstyapı analizlerinde ise 1'er metrelik sonlu elemanlara ayrılarak modellenmiştir.



Şekil 34. Genel sisteme ait 3D render

3.5.2. Zemin Ortamı ve Malzeme Parametreleri

Proje alanı, Çanakkale ilinde yer alıp, Şekil 35'te tariflenen taşınmaz olarak belirlenmiştir. Alanda 22.12.2019 - 12.01.2020 tarihleri arasında yapılan arazi çalışmalarında, 10 adet Masw (çok kanallı yüzey dalgası analizi), 5 adet Mikrotremör ve 5 adet DES (düşey elektrik sondaj) ölçümlerini içeren jeofizik araştırmalar yapılmıştır. Jeofizik araştırmalar neticesinde sahada yer alan birimlere ait elde edilen dinamik-elastik mühendislik parametreleri Tablo 17'de yer almaktadır.

Aynı zamanda 35 m derinlikte olmak üzere 3 ayrı lokasyonda toplam 105 m zemin araştırma sondajı yapılmıştır. Arazi deneyleri kapsamında her kuyuda SPT (standart penetrasyon deneyi) ve presiyometre deneyleri ile YASS (yeraltı su seviyesi) ölçümleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri kapsamında ise elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, özgül ağırlık, zemin sınıflandırması, karot yükleme, tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak elde edilen saha ve laboratuvar verilerine göre jeolojik kesitler oluşturulmuştur (Şekil 36).

Tablo 17

Tabakalara ait dinamik-elastik parametreler (Akın vd., 2020)

Sismik Hızlar ve Elastik Parametreler															
Ölçü No	Tbk. No	Vp	Vs	Hız Oranı	Kalnlık	Derinlik	Yoğunluk (γ)	Poisson Oranı (ν)	Kes.Mod. (Gsec)	Els. Mod. (E)	Bk. Mod. (K)	V(S)30	TA	TO	TB
		m/sn	m/sn	Vp/Vs	m	m	gr/cm3		kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	m/sn	sn	sn	sn
1	1	815	399	2.0	3.5	3.5	1.66	0.34	2637	7080	7486	479	0.16	0.24	0.36
	2	1395	435	3.2	18.5	22	1.89	0.45	3585	10369	32088				
	3	1940	701	2.8			2.06	0.42	10110	28812	63951				
2	1	838	526	1.6	2.1	2.1	1.67	0.17	4615	10844	5560	524	0.15	0.22	0.33
	2	1100	458	2.4	19.7	21.8	1.79	0.40	3745	10449	16609				
	3	1833	799	2.3			2.03	0.38	12949	35810	50886				
3	1	880	447	2.0	5.4	5.4	1.69	0.33	3374	8948	8577	500	0.14	0.21	0.31
	2	1135	527	2.2	8.2	13.6	1.80	0.36	4997	13618	16516				
	3	950	435	2.2	10.7	24.3	1.72	0.37	3257	8906	11190				
	4	1750	729	2.4			2.01	0.40	10656	29729	47197				
4	1	820	434	1.9	6.5	6.5	1.66	0.31	3125	8158	6988	488	0.16	0.24	0.36
	2	950	449	2.1	16.3	22.8	1.72	0.36	3470	9411	10906				
	3	1764	702	2.5			2.01	0.41	9901	27839	49314				
5	1	767	359	2.1	5.5	5.5	1.63	0.36	2103	5718	6794	452	0.16	0.24	0.35
	2	1000	465	2.2	11	16.5	1.74	0.36	3769	10268	12407				
	3	800	381	2.1	6.5	23	1.65	0.35	2393	6478	7361				
	4	1833	677	2.7			2.03	0.42	9297	26422	55756				
6	1	815	518	1.6	2.4	2.4	1.66	0.16	4444	10321	5076	537	0.15	0.22	0.33
	2	1503	448	3.4	16	18.4	1.93	0.45	3874	11244	38438				
	3	1750	746	2.3			2.01	0.39	11158	30997	46526				
7	1	905	495	1.8	5.7	5.7	1.70	0.29	4166	10720	8371	536	0.13	0.2	0.3
	2	1966	542	3.6	7.3	13	2.06	0.46	6064	17693	71700				
	3	950	485	2.0	11.4	24.4	1.72	0.32	4048	10718	10135				
	4	1850	746	2.5			2.03	0.40	11314	31746	54496				
8	1	950	462	2.1	24.5	24.5	1.72	0.35	3673	9883	10634	492	0.16	0.24	0.36
	2	1700	685	2.5			1.99	0.40	9340	26210	45073				
9	1	850	400	2.1	6.2	6.2	1.67	0.36	2678	7273	8523	461	0.18	0.26	0.4
	2	950	423	2.2	13.6	19.8	1.72	0.38	3079	8477	11427				
	3	1400	585	2.4			1.90	0.39	6489	18095	28514				
10	1	579	372	1.6	9.8	9.8	1.52	0.15	2104	4834	2292	553	0.14	0.21	0.31
	2	1390	691	2.0	15.6	25.4	1.89	0.34	9038	24147	24521				
	3	1900	861	2.2			2.05	0.37	15172	41597	53655				

Tablo 17’de yer alan γ ; V_P ’ye bağlı olarak Telford vd. (1976) tarafından geliştirilen ve Denklem 3.1’de yer alan bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\gamma = 0,31 \cdot V_P^{0,25} \text{ gr/cm}^3 \quad (3.1)$$

v ; V_S ve V_P 'ye bağılı olarak Denklem 3.2'de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$v = \frac{V_P^2 - 2 \cdot V_S^2}{2 \cdot V_P^2 - 2 \cdot V_S^2} \quad (3.2)$$

G_{sec} ; V_S 'ye ve γ 'ya bağılı olarak Denklem 3.3'te verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$G_{sec} = \frac{V_S^2 \cdot \gamma}{100} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (3.3)$$

E ; G_{sec} ve v 'ye bağılı olarak Denklem 3.4'te verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$E = 2 \cdot G_{sec} \cdot (1 + v) \quad \text{kg/cm}^2 \quad (3.4)$$

K ; V_S ve V_P 'ye bağılı olarak Denklem 3.5'te verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$K = d \cdot \frac{V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2}{100} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (3.5)$$

A_k (zemin büyütme oranı); V_S kullanılarak Midorikawa (1987) tarafından önerilen ve Denklem 3.6 ve 3.7'de yer alan bağıntılar ile hesaplanmıştır.

$$A_k = 68 \cdot (V_{(S)30})^{-0,6} \quad V_{(S)30} < 1100 \text{ m/sn} \quad (3.6)$$

$$A_k = 1 \quad V_{(S)30} < 1100 \text{ m/sn} \quad (3.7)$$

T_0 ; Kanai (1983) tarafından önerilen ve Denklem 3.8'de yer alan bağıntı ile, T_A ve T_B ise Aytun (2001) tarafından önerilen ve Denklem 3.9'da yer alan bağıntılar ile hesaplanmıştır.

$$T_0 = \sum 4 \cdot \frac{h_i}{V_{Si}} \quad \dots (sn) \quad (3.8)$$

$$T_A = \frac{T_0}{1,5} \quad (sn) \quad T_B = T_0 \cdot 1,5 \quad (sn) \quad (3.9)$$

30 metre derinlik için hesaplanan ortalama $V_{(S)30}$ değeri 452 - 553 m/sn arasında olup Tablo 18'e göre yerel zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiştir.

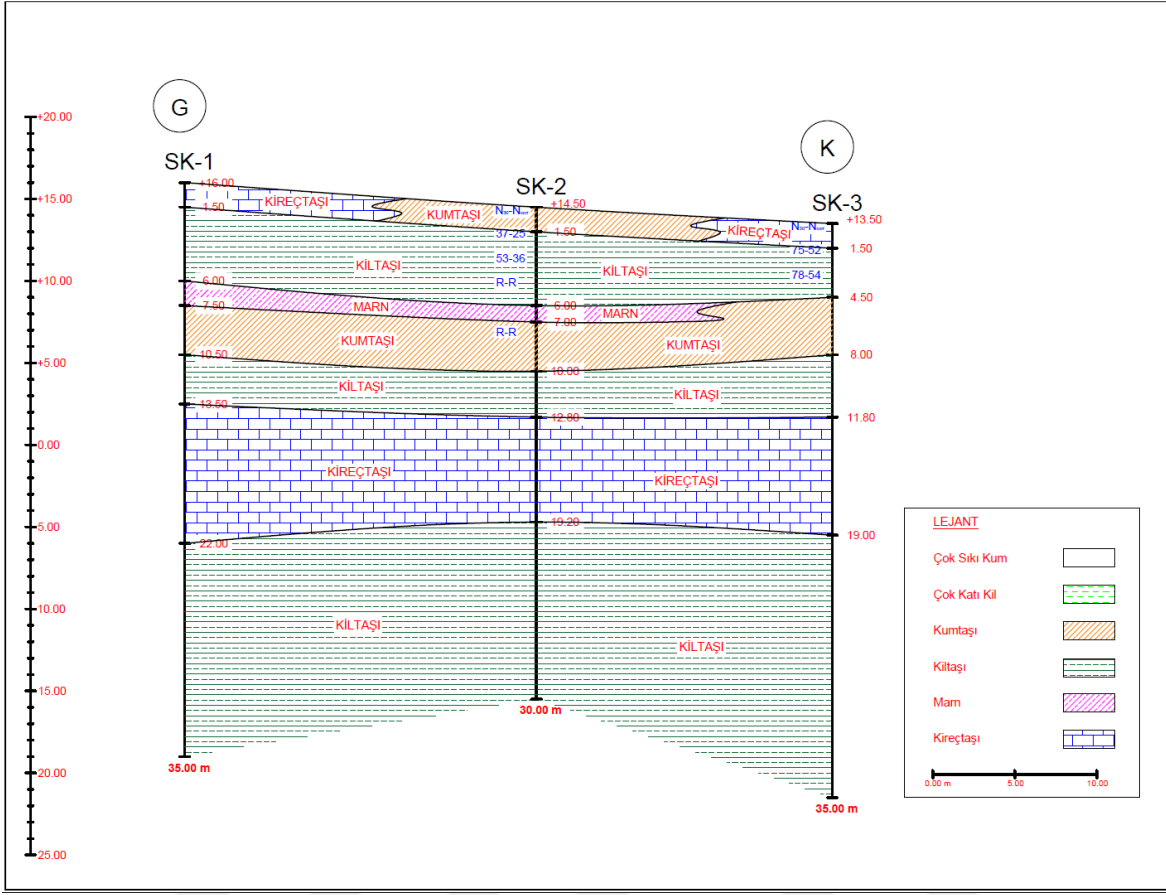
Tablo 18

Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$V_{(S)30}$ (m/sn)	$N_{(60)30}$ (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: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer			

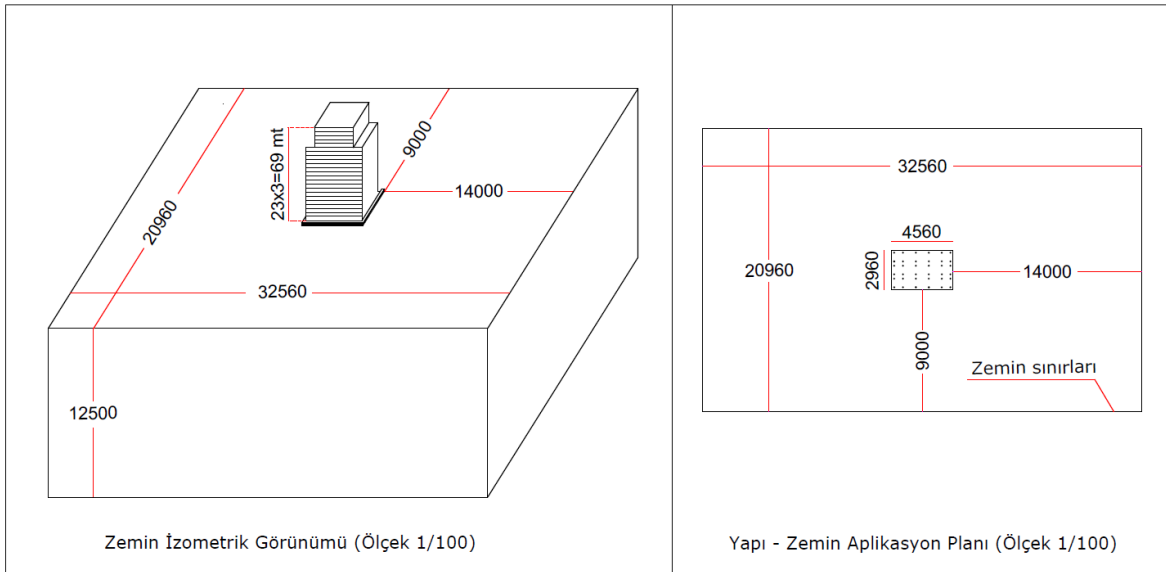


Şekil 35. Proje alanı hava fotoğrafı

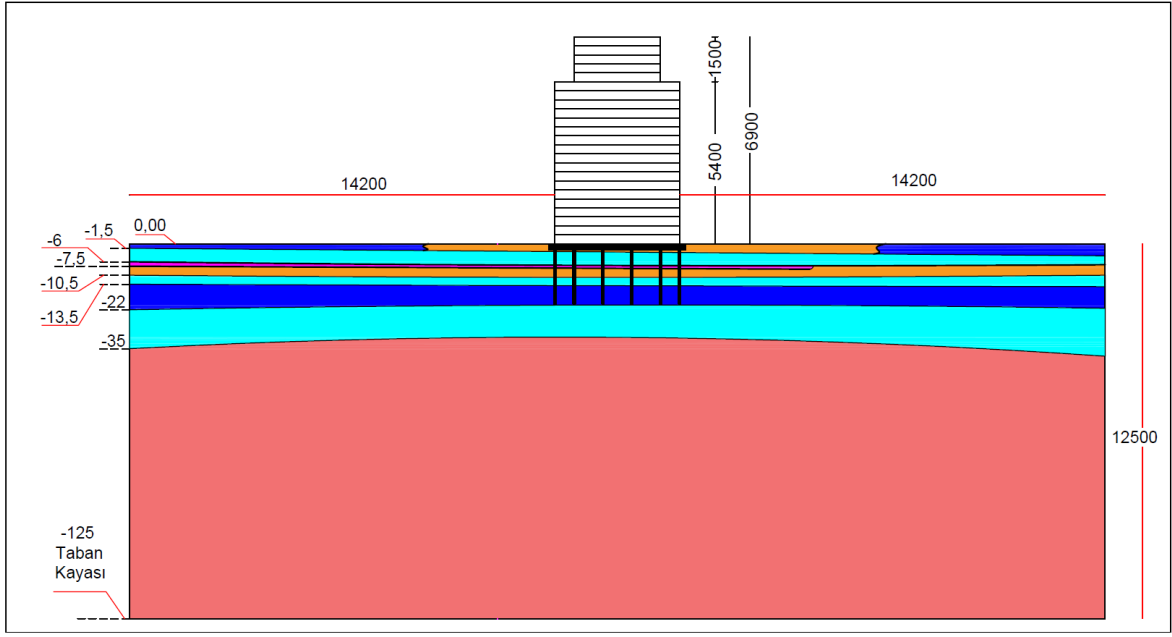


Şekil 36. Sondaja dayalı jeolojik zemin kesiti

Şekil 30 ve Şekil 31’de yer alan kalıp planlarına göre TBDY’ye uygun olarak belirlenmiş olan zemin geometrisi Şekil 37 ve 38’de yer almaktadır.



Şekil 37. Modellemeye esas zemin ortamı geometrik ölçüleri



Şekil 38. Modellemeye esas düşey doğrultuda zemin geometrisi

Tablo 19

Zemin ortamı tasarım parametreleri

Zemin Tabakaları	Kumtaşı	Kireçtaşı	Kiltaşı	Marn	Taban Kayası
Form	İzotropik	İzotropik	İzotropik	İzotropik	İzotropik
Bünye modeli	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb
K_0	0,809	0,794	0,794	0,809	0,794
Drenaj	✓	✓	✓	✓	✓
Termal katsayı	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
Sönüm oranı	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
E (kN/m ²)	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
ν	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
γ (kN/m ³)	26	21,8	21,3	21,3	21,4
C (kN/m ²)	550	570	570	550	590
\emptyset (°C)	11	11,88	11,88	11	12,2

Tablo 20

Beton sınıfı dayanım parametreleri (TS 500, 2000)

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck}	Eşdeğer Küp (200 mm) Basınç Dayanımı	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk}	28 Günlük Elastisite Modülü, E_c	Poisson Oranı
C25	25 Mpa	30 Mpa	1,8 Mpa	30.000 Mpa	0,2

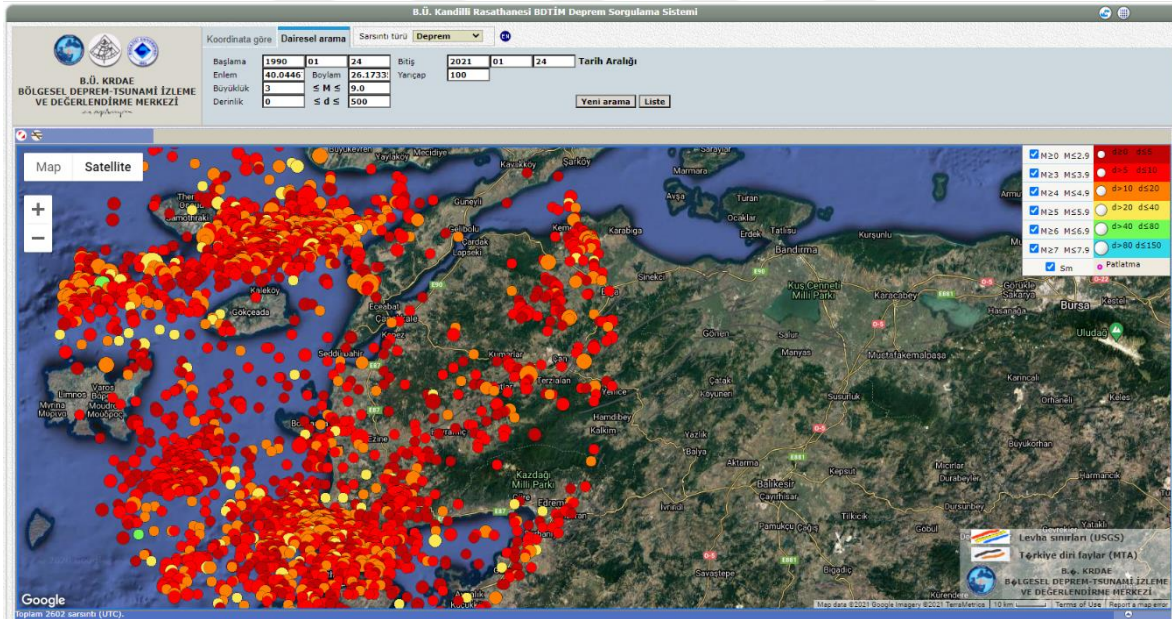
Tablo 21

Betonarme çeliği mekanik özellikleri (TS 708, 2016)

Çelik Sınıfı	Akama Dayanımı $f_yk = Re$	Çekme Dayanımı $f_{su} = R_m$	$f_{su}/f_{yk} = R_m/Re$	Kopma Uzunluğu $E_{su} = A_5$	Max Yükte Toplam Uzunluk
B 420C	$\geq 420 \text{ N/mm}^2$	-	$\geq 1,15 \text{ N/mm}^2$ $< 1,35 \text{ N/mm}^2$	$\geq \%12$	$\geq \%7,5$

3.5.3. Deprem Kayıtları ve Ölçek Katsayıları

Sahaya özel uygun deprem kayıtlarının doğru seçilebilmesi için öncelikle proje alanının depremselliği araştırılmış ve bölgede meydana gelen depremlere ait veriler elde edilmiştir. Bu kapsamda Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Sorgulama Sistemi kullanılarak proje alanını kapsayacak şekilde 100 km yarıçaplı dairesel bir alan taranarak 1990 - 2021 yılları arasında $3 \leq M_w \leq 9$ büyüklüğünde olan depremler sorgulanmıştır (Şekil 39).



Şekil 39. Proje alanı merkezli 100 km yarıçaplı alanda $3 \leq M_w \leq 9$ olan depremler (Kandilli Rasathanesi, 2020)

Marmara Bölgesinde 1912 ile 1999 yılları arasında büyüklüğü 6,0 ile 7,4 arasında değişen 15 adet yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Öztoprak & Sarğın, 2020). Söz konusu depremlere ait bilgiler Tablo 22’de yer almaktadır. Biga Yarım Adası ve Ganos fayı yakın çevresinde 2003 - 2010 yılları arasında $M \geq 3,5$ büyüklüğündeki depremlere ait veriler ise

Tablo 23’de yer almakta olup bölgedeki fayların davranış biçiminin günümüzde de doğrultu atımlı olarak devam ettiğini görülmektedir. (Öztoprak ve Sarğın, 2020).

Tablo 22

Bölgede meydana gelmiş hasar yapıcı depremler (Öztoprak ve Sarğın, 2020)

No	Tarih	Enlem	Boylam	Büyükük	Lokasyon
1	09.08.1912	40.60	27.20	7,30	Şarköy-Mürefte
2	10.08.1912	40.60	27.10	6,30	Şarköy-Mürefte
3	02.05.1928	39.64	29.14	6,10	Bursa-Kütahya arası
4	04.01.1935	40.40	27.49	6,40	Marmara Adası
5	04.01.1935	40.30	27.45	6,30	Marmara Adası
6	15.11.1942	39.55	28.58	6,10	Balıkesir
7	20.06.1943	40.85	30.51	6,50	Sakarya
8	18.03.1953	39.99	27.36	7,20	Yenice-Gönen
9	20.02.1956	39.89	30.49	6,40	Bilecik-Eskişehir arası
10	26.05.1957	40.67	31.00	7,10	Abant
11	18.09.1963	40.77	29.12	6,30	Çınarcık
12	06.10.1964	40.30	28.23	7,00	Manyas
13	22.07.1967	40.67	30.69	7,20	Adapazarı-Mudurnu
14	17.08.1999	40.76	29.97	7,40	Gölcük
15	12.11.1999	40.74	31.21	7,20	Düzce

Tablo 23

Biga Yarım Adası ve Ganos fayı civarı depremler (Yıldız vd., 2013)

No	Tarih	Enlem	Boylam	Mw	h (m)	Düzlem	
						Doğr./Eğim/Dalım	Doğr./Eğim/Dalım
1	5.7.2003	40.4652	26.0653	4,0	8	238 / 81 / -151	143 / 61 / -10
2	6.7.2003	40.4155	26.2088	5,5	10	170 / 85 / 6	80 / 84 / 174
3	6.7.2003	40.5005	26.0483	5,1	16	246 / 83 / 159	153 / 69 / 7
4	6.7.2003	40.4688	25.9523	4,3	10	30 / 42 / -150	277 / 70 / -52
5	31.1.2004	40.7893	27.3005	3,3	12	87 / 75 / -155	350 / 66 / -16
6	15.6.2004	40.4512	25.7523	4,9	12	339 / 74 / 19	244 / 72 / 163
7	13.8.2004	40.8271	26.4106	3,9	10	285 / 86 / -36	18 / 54 / -175
8	4.4.2005	40.4156	26.3528	3,6	12	155 / 83 / 18	63 / 72 / 172
9	4.11.2005	40.7040	27.2861	3,9	16	72 / 72 / -146	331 / 59 / -20
10	28.12.2008	40.3995	25.8176	5,1	12	340 / 89 / 34	249 / 56 / 179
11	27.4.2009	40.7383	27.5560	3,9	8	96 / 78 / -115	343 / 28 / -26
12	3.11.2010	40.4283	26.3372	5,4	15	243 / 84 / -165	152 / 75 / -6

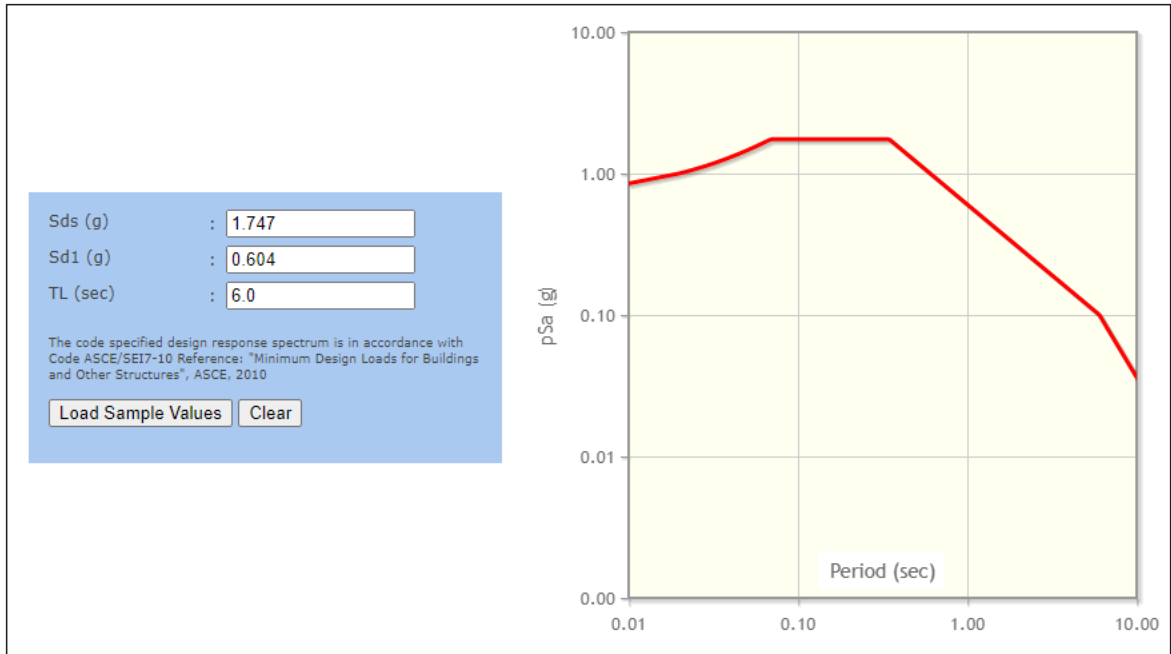
Deprem kayıtları, PEER veri tabanı kullanılarak temin edilmiştir. Kayıtlar seçilirken proje sahasına uygun nitelikte kayıtlar temin edebilmek için bir takım parametreler üzerinde filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Tablo 24). Ayrıca seçilecek

kayıtların ölçek katsayılarının tespit edilebilmesi ve uygun benzeştirme yapılabilmesi adına TDTH aracılığı ile DD-1 için spektral ivme katsayıları elde edilerek PEER sistemi üzerinde ölçeklemeye esas referans spektrum oluşturulmuştur (Şekil 40).

Tablo 24

PEER parametre giriş arayüzü

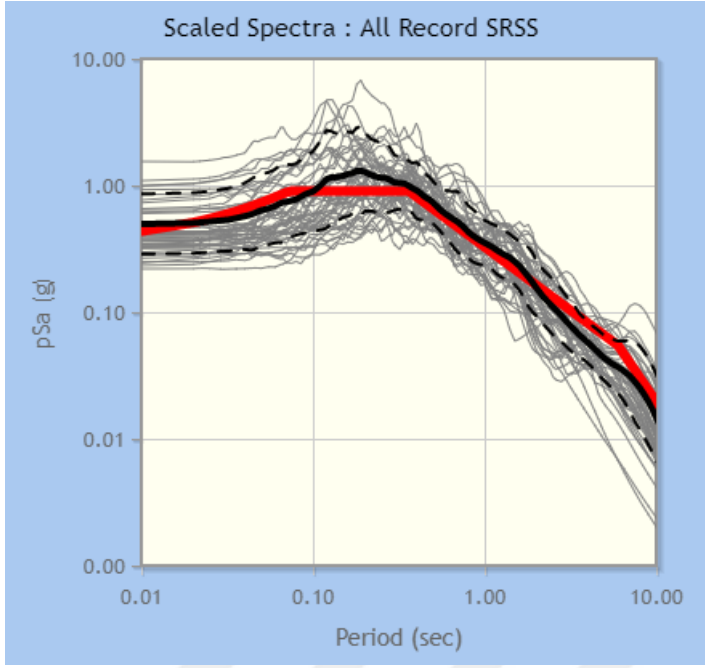
Parametre	Değer
Fault Type	Strike Slip (SS)
Magnitude	6,5 - 7,5
R_JB min (km)	0
R_JB max (km)	25
R_rup min (km)	0
R_rup max (km)	25
$V_{(S)30}$ min (m/sn)	300
$V_{(S)30}$ max (m/sn)	800
Damping Ratio (%)	5
Scaling Method	Minimize MSE



Şekil 40. Ölçeklemeye esas referans spektrumunu gösterir arayüz (PEER, 2020)

Tablo 24'de görüleceği üzere, proje alanına uygun deprem kayıtları elde edebilmek için Kuzey Anadolu Fay Hattı'nı temsil eden doğrultu atımlı fay tipi (Strike Slip), alanın

depremselliği ile uyumlu moment büyüklük değerleri ve kayma dalgası hızı gibi veriler kullanılmıştır. Hazırlanan filtrasyona uygun nitelikte ve henüz ölçeklenmemiş kayıtların referans spektrum ile ilişkisi Şekil 41’ de yer almaktadır.



Şekil 41. Kayıtların referans spektrumla ilişkisini gösterir arayüz (PEER, 2020)

Filtrasyona uygun olan kayıtlar içerisinde 11 çift (x ve y yönlerinde) olmak üzere toplamda 22 adet kayıt temin edilmiştir. PEER sisteminden temin edilen kayıtlar, txt dosya uzantısında olup doğrudan kullanıma uygun değildir. Excell veya harici yardımcı yazılımlar ile gerekli düzenleme işlemlerinin yapılması ve sonrasında Kinematik Etkileşim hesaplamalarında kullanılmak üzere geoteknik yazılımlara tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada PEER dataları, Seismosignal ve Deepsoil yazılımları ile düzenlenmiş/ayıklanmış, gerekli ölçekleme işlemleri ise Tablo 25’de yer alan ölçek katsayıları kullanılarak Seismosignal yazılımı ile yapılmıştır. Kayıtların seçiminde bilhassa ölçek katsayılarının büyük olmamasına, 1’e yakın olmasına dikkat edilmiştir. Çünkü yapılan çalışmalar göstermektedir ki, deprem kayıtlarının çok büyük ölçek katsayıları (10 - 15 gibi) kullanılarak ölçeklenmesi, kayıtların frekans uzayındaki davranışında bozulmalar meydana getirmektedir.

Deprem kayıtlarına ait ölçek katsayıları, PEER arama motorunda yer alan Minimize MSE ölçekleme yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Minimize MSE ölçekleme

yönteminde ölçek katsayıları, Denklem 3.10'da yer alan bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Seçilen deprem kaydı çiftleri ve bu kayıtlara ait ilgili parametreler Tablo 25'de yer almaktadır.

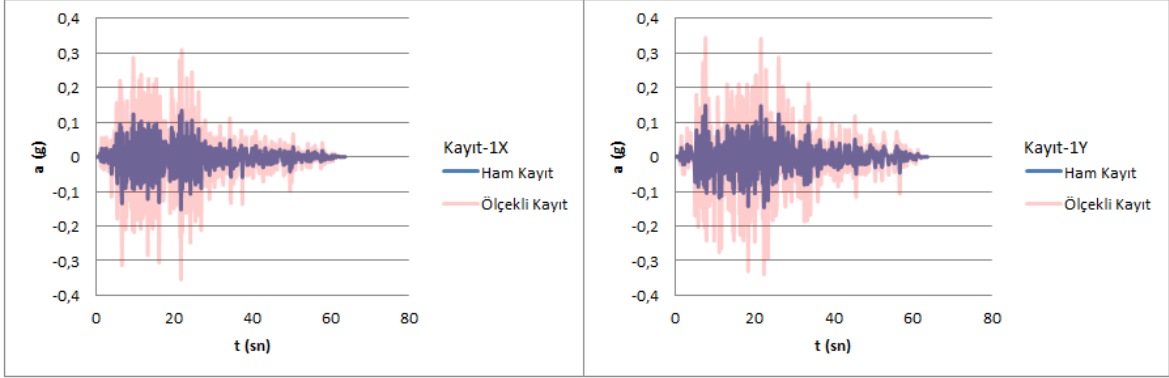
$$lnf = \frac{\sum_i w(T_i) \ln\left(\frac{Sa^{referans}(T_i)}{Sa^{kayıt}(T_i)}\right)}{\sum_i w(T_i)} \quad (3.10)$$

Tablo 25

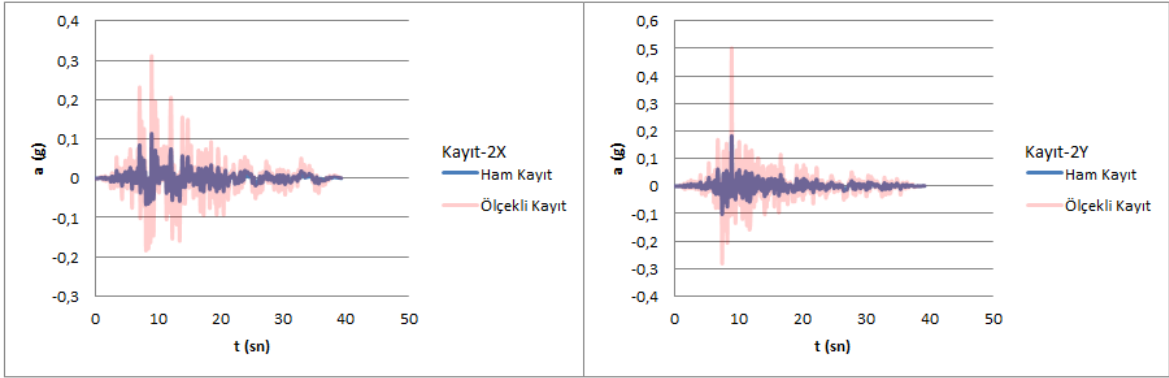
Seçilen deprem kayıtlarına ait parametreler (PEER, 2020)

Kayıt Çifti	Kayıt Adı	YÖN	PGA (g)	PGV (m/sn)	PGD (m)	$V_{(S)30}$ (m/sn)	Magnitude	Ölçek Katsayısı																																																																																																																																								
1	IMPVALL.H_H-CPE147.AT2	x	0,17	0,12	0,052	471,53	6,53	2,3195																																																																																																																																								
	IMPVALL.H_H-CPE237.AT2	y	0,16	0,19	0,079				2	IMPVALL.H_H-PTS225.AT2	x	0,11	0,18	0,140	348,69	6,53	2,7492	IMPVALL.H_H-PTS315.AT2	y	0,21	0,18	0,120	3	SUPER.B_B-SUP045.AT2	x	0,58	0,24	0,023	362,38	6,54	1,9502	SUPER.B_B-SUP135.AT2	y	0,84	0,44	0,052	4	LANDERS_DSP000.AT2	x	0,17	0,19	0,082	359,00	7,28	2,6067	LANDERS_DSP090.AT2	y	0,15	0,21	0,078	5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100	6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088	7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2
2	IMPVALL.H_H-PTS225.AT2	x	0,11	0,18	0,140	348,69	6,53	2,7492																																																																																																																																								
	IMPVALL.H_H-PTS315.AT2	y	0,21	0,18	0,120				3	SUPER.B_B-SUP045.AT2	x	0,58	0,24	0,023	362,38	6,54	1,9502	SUPER.B_B-SUP135.AT2	y	0,84	0,44	0,052	4	LANDERS_DSP000.AT2	x	0,17	0,19	0,082	359,00	7,28	2,6067	LANDERS_DSP090.AT2	y	0,15	0,21	0,078	5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100	6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088	7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180										
3	SUPER.B_B-SUP045.AT2	x	0,58	0,24	0,023	362,38	6,54	1,9502																																																																																																																																								
	SUPER.B_B-SUP135.AT2	y	0,84	0,44	0,052				4	LANDERS_DSP000.AT2	x	0,17	0,19	0,082	359,00	7,28	2,6067	LANDERS_DSP090.AT2	y	0,15	0,21	0,078	5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100	6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088	7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																								
4	LANDERS_DSP000.AT2	x	0,17	0,19	0,082	359,00	7,28	2,6067																																																																																																																																								
	LANDERS_DSP090.AT2	y	0,15	0,21	0,078				5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100	6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088	7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																						
5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153																																																																																																																																								
	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100				6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088	7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																				
6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733																																																																																																																																								
	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088				7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089	8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																		
7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612																																																																																																																																								
	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089				8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074	9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																																
8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713																																																																																																																																								
	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074				9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110	10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																																														
9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445																																																																																																																																								
	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110				10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100	11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																																																												
10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217																																																																																																																																								
	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100				11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																																																																										
11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114																																																																																																																																								
	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180																																																																																																																																											

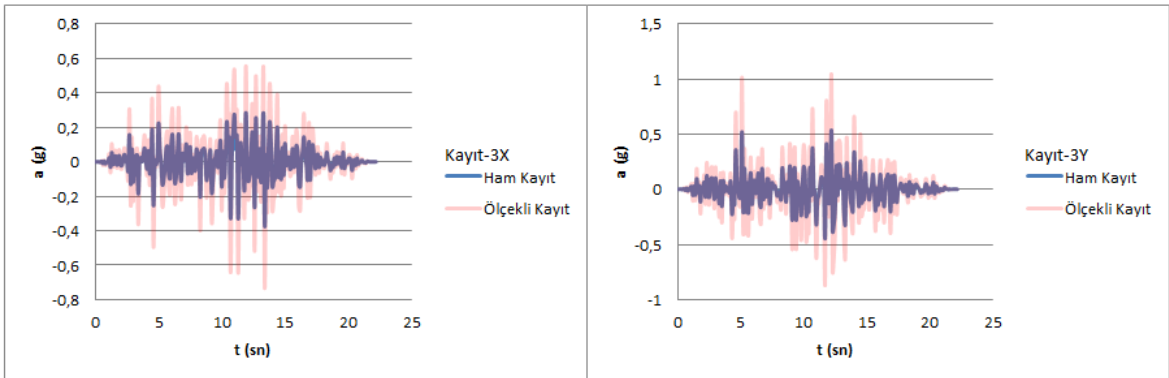
Tablo 25’de yer alan deprem kayıtlarına ait ham kayıt ve ölçeklenmiş kayıt ivme - zaman grafikleri Şekil 42 ile Şekil 52 arasında yer almaktadır.



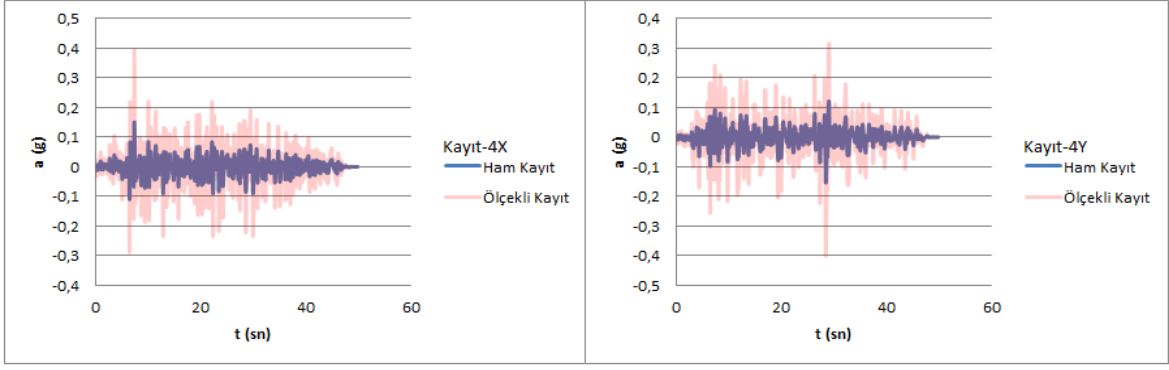
Şekil 42. Kayıt-1’e ait ivme - zaman grafikleri



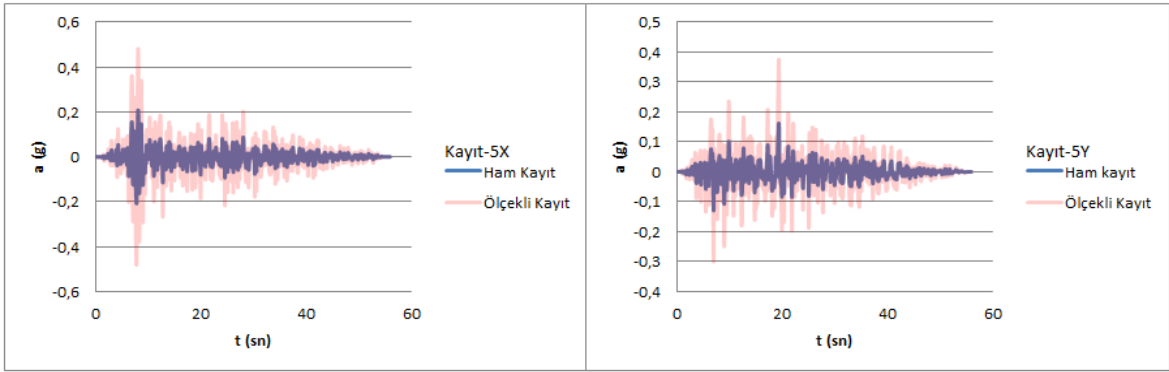
Şekil 43. Kayıt-2’ye ait ivme - zaman grafikleri



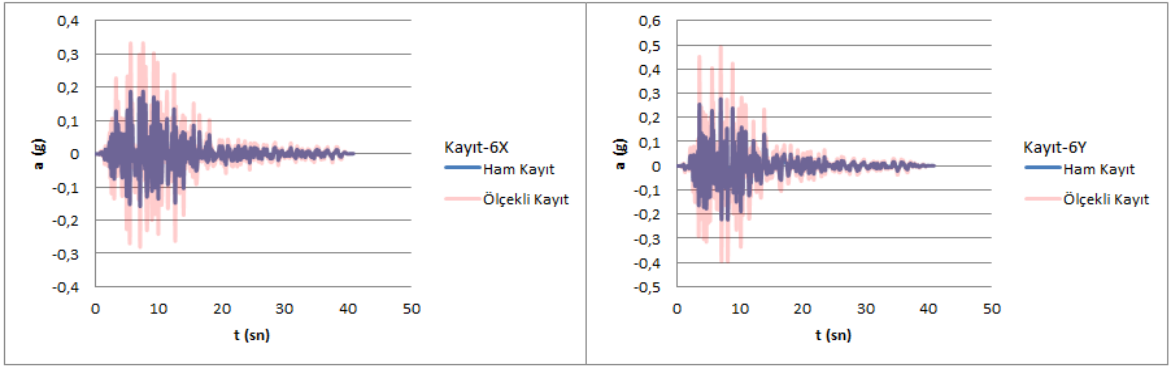
Şekil 44. Kayıt-3’e ait ivme - zaman grafikleri



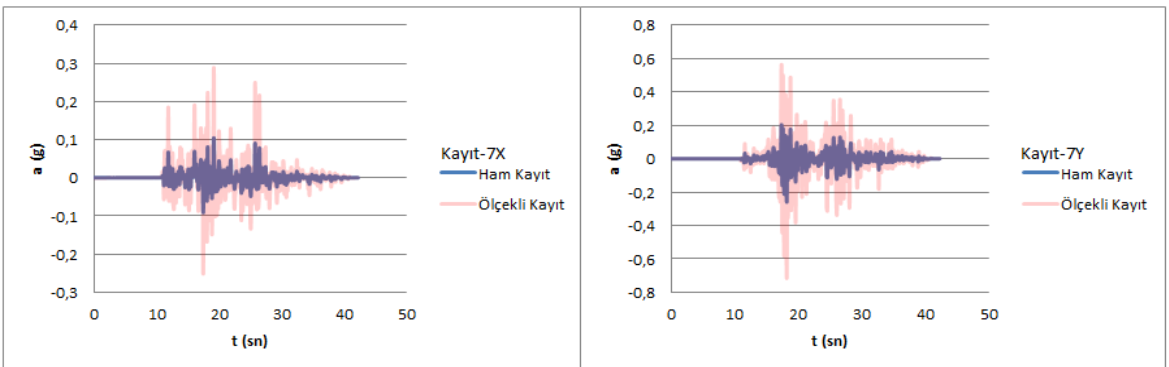
Şekil 45. Kayıt-4'e ait ivme - zaman grafikleri



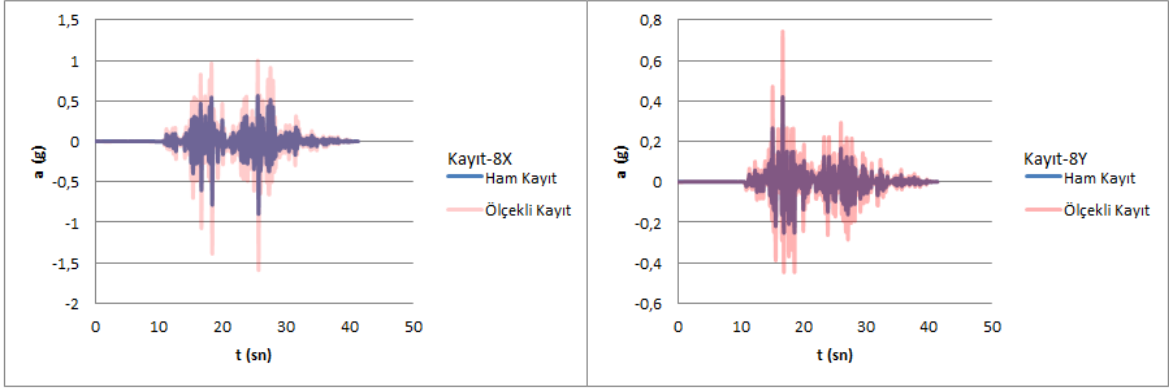
Şekil 46. Kayıt-5'e ait ivme - zaman grafikleri



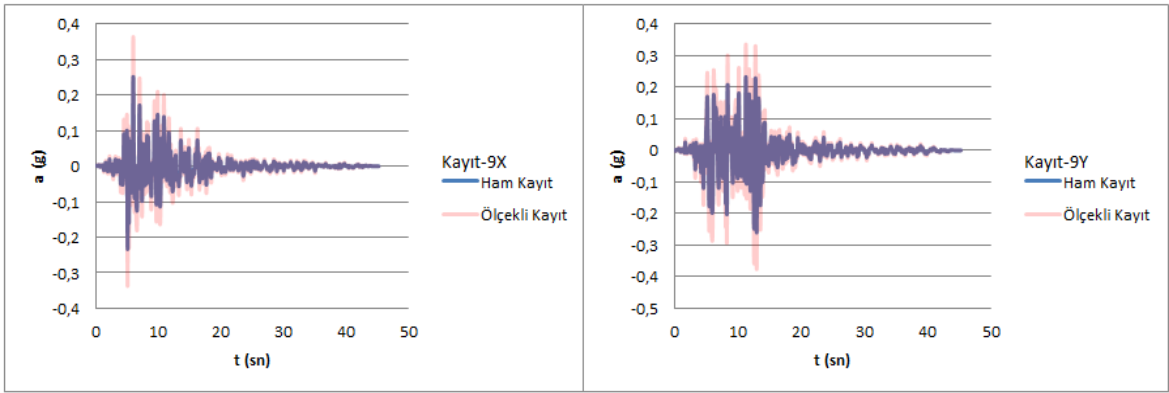
Şekil 47. Kayıt-6'ya ait ivme - zaman grafikleri



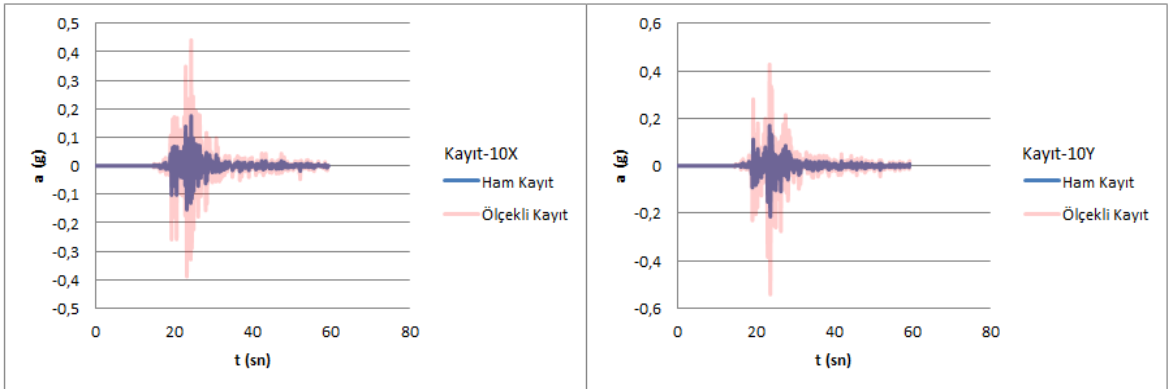
Şekil 48. Kayıt-7'ye ait ivme - zaman grafikleri



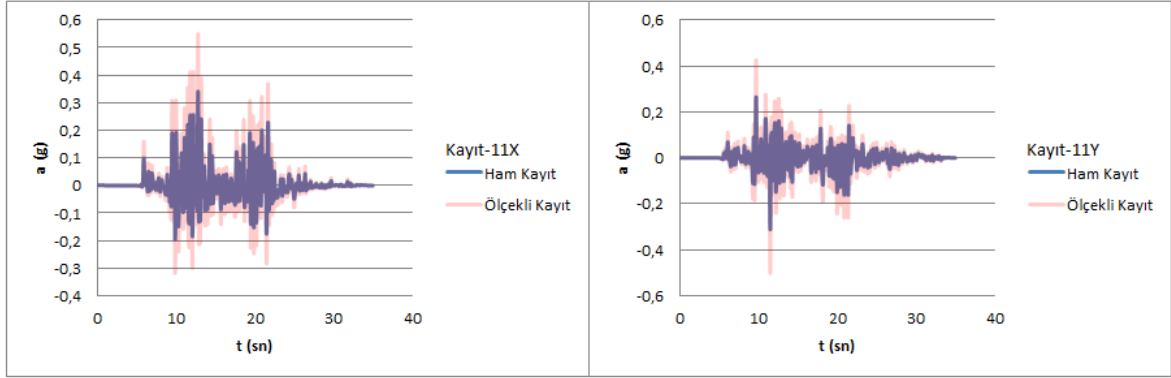
Şekil 49. Kayıt-8'e ait ivme - zaman grafikleri



Şekil 50. Kayıt-9'a ait ivme - zaman grafikleri



Şekil 51. Kayıt-10'a ait ivme - zaman grafikleri



Şekil 52. Kayıt-11'e ait ivme - zaman grafikleri

3.5.4. Kinematik Etkileşim Hesap Modeli ve Doğrusal Olmayan Analizler

3.5.1'de yer alan yapısal parametreler ve 3.5.2'de yer alan zemin parametreleri kapsamında, 1.9'da anlatılan hususlara uygun olacak şekilde hazırlanan kinematik etkileşim sistem hesap modeli (zemin + kazıklar + kütsüz temel) Şekil 53 ve Şekil 56 arasında yer almaktadır. 3.5.3'de yer alan 11 çift ölçeklenmiş deprem kaydı, bu sistemin tabanından etkilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan deprem analizleri yapılmış ve temel seviyesi ivme spektrumları ve kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler elde edilmiştir.

Kazık-zemin arayüz parametreleri K_n ve K_t , Tablo 26'da belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Kazıklar için uç kapasitesi ise, Denklem 3.11'de verilen bağıntı ile hesaplanarak kazık uç mesh seti olarak kullanılmak üzere tanımlanmıştır.

Tablo 26

Kazık-zemin arayüz parametreleri

Parametre	Birim	Referans	Değer
$E_{oed,i}$	kN/m ²	$E*(1-\nu) / (1+\nu)*(1-2\nu)$	300.000
L	m	-	18
t_v	Boyutsuz	0,01 - 0,1	0,10
R	Boyutsuz	0,7 - 1	0,70
E	kN/m ²	-	250.000
ν_{soil}	Boyutsuz	-	0,25
G_{soil}	kN/m ²	$E/2*(1+\nu)$	100.000
G_i	kN/m ²	$R* G_{soil}$	70.000
K_n	kN/m ³	$E_{oed}/(L*t_v)$	166.667
K_t	kN/m ³	$G_i / (L*t_v)$	38.889

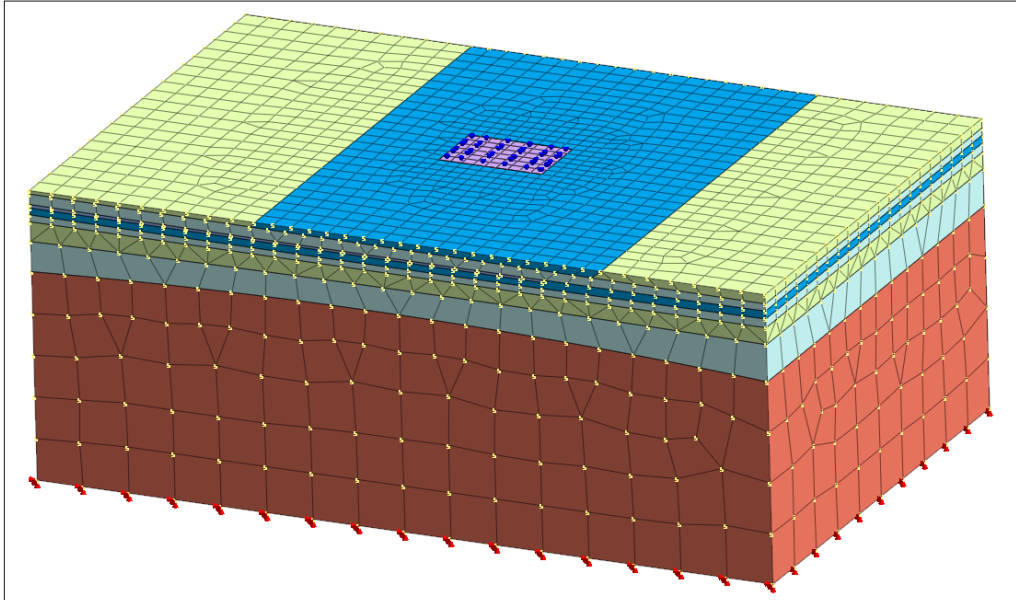
$$Qb = C_u \cdot N_c \cdot A_c \quad (\text{kN}) \quad (3.11)$$

Denklemden yer alan C_u ; drenajsız kayma mukavemetini (500 kN/m^2), N_c ; taşıma gücü katsayısını (Tablo 27) ve A_c ; kazığın en kesit alanını ($0,5 \text{ m}^2$) ifade etmektedir.

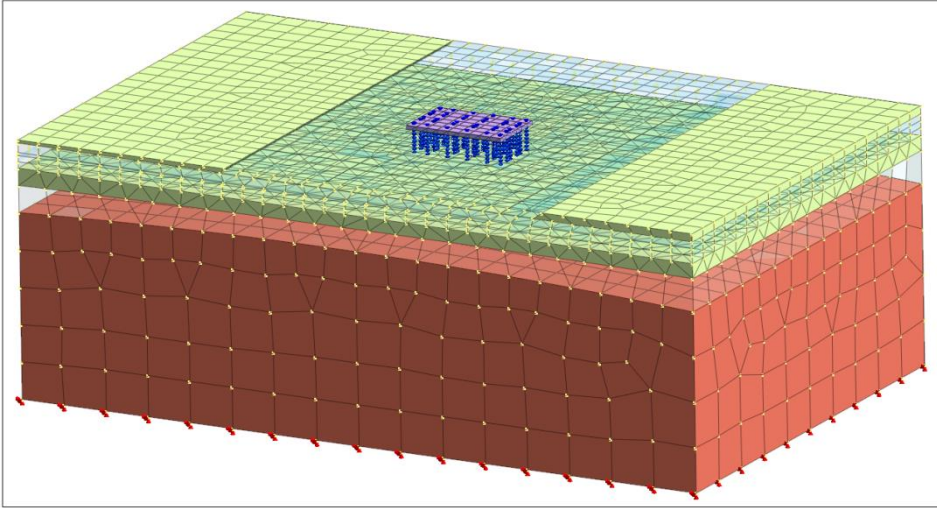
Tablo 27

Taşıma gücü katsayıları (Vesic, 1973)

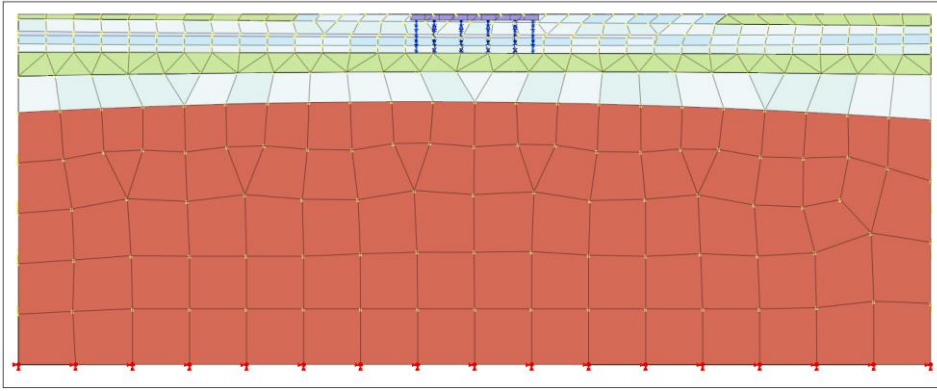
ϕ (derece)	N_c	ϕ (derece)	N_c	ϕ (derece)	N_c	ϕ (derece)	N_c
0	5,14	13	9,81	26	22,25	39	67,87
1	5,38	14	10,37	27	23,94	40	75,31
2	5,63	15	10,98	28	25,8	41	83,86
3	5,9	16	11,63	29	27,86	42	93,71
4	6,19	17	12,34	30	30,14	43	105,11
5	6,49	18	13,1	31	32,67	44	118,37
6	6,81	19	13,93	32	35,49	45	133,88
7	7,16	20	14,83	33	38,64	46	152,1
8	7,53	21	15,82	34	42,16	47	173,64
9	7,92	22	16,88	35	46,12	48	199,26
10	8,35	23	18,05	36	50,59	49	229,93
11	8,8	24	19,32	37	55,63	50	266,89
12	9,28	25	20,72	38	61,35		



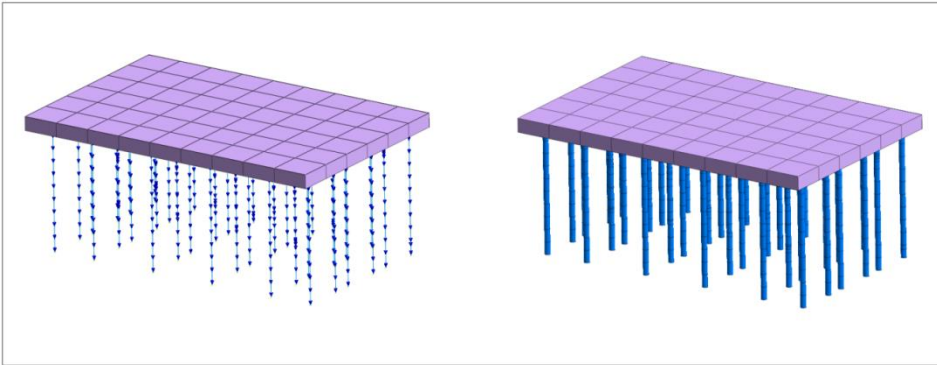
Şekil 53. 3 Boyutlu sistem genel görünüm



Şekil 54. 3 Boyutlu sistem genel görünüm (Transparan)



Şekil 55. Hesap modeli sistem kesiti

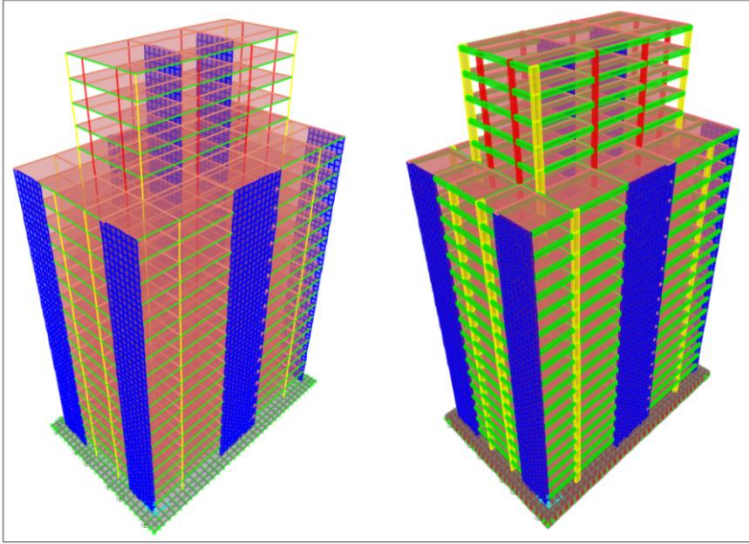


Şekil 56. Kazıklar ve arayüz elemanları

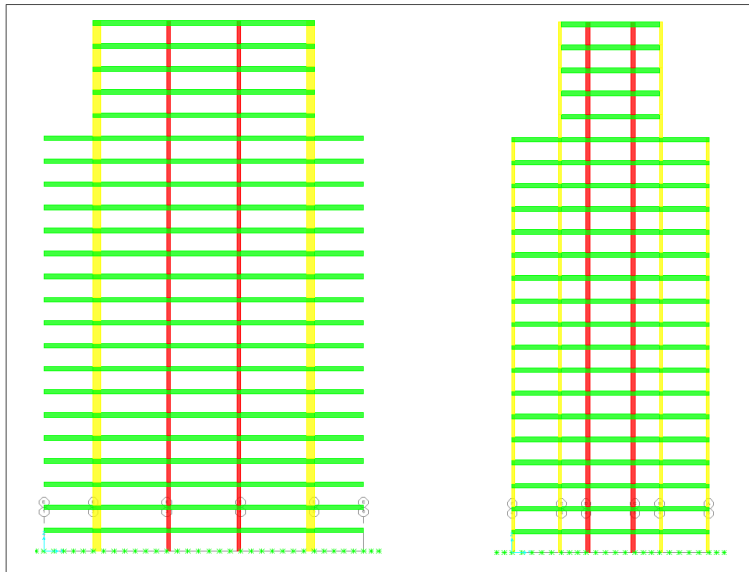
3.5.5. Eylemsizlik Etkileşimi Hesap Modeli ve Üstyapı Analizleri

3.5.1’de yer alan yapısal parametreler ve 1.10’da anlatılan hususlara uygun şekilde hazırlanan eylemsizlik etkileşimi sistem hesap modeli (temel + üstyapı) Şekil 57 ve Şekil 59 arasında yer almaktadır. Bu sistemde, temel tabanına tanımlanan doğrusal olmayan p-y yayları ve 3.5.4’teki temel seviyesi deprem kayıtlarına ait ortalama spektrum etkisinde

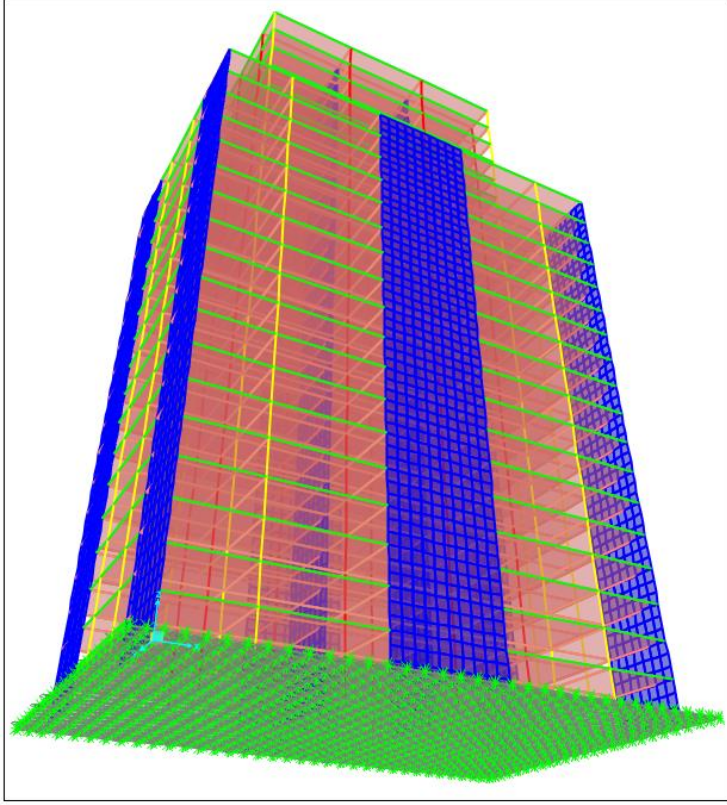
dinamik üstyapı analizler yapılmış ve 3.5.4'ten elde edilen sonuçlarla birleştirilmek üzere kazıklar için iç kuvvetler elde edilmiştir. Modellemede; radye temel, perdeler ve döşemeler kabuk eleman olarak, kolonlar ve kirişler ise çubuk eleman olarak modellenmiştir. Kabuk elemanlar 50x50 cm ölçülerinde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Radye temelde, sonlu elemanların düğüm noktaları ile çubuk elemanların (kolon) düğüm noktaları çakışacak şekilde mesh işlemi yapılmıştır. Temeldeki sonlu elemanların düğüm noktalarına p-y yayları tanımlanarak etkileşim modele aktarılmıştır. P-y yayları, Sap2000 yazılımında, “Link/Support Property Data” penceresinde “Multilinear Plastic” ve “Nonlinear” seçenekleri seçilerek, p-y değerlerinin yazılıma girilmesi ile tanımlanmıştır.



Şekil 57. Eylemsizlik etkileşimi 3 boyutlu sistem hesap modeli



Şekil 58. Sistem x-x ve y-y kesitleri



Şekil 59. Temel tabanına tanımlanan doğrusal olmayan p-y yayları

3.6. Yatak Katsayısı Yöntemi ile Örnek Uygulama

3.5'te altsistem yaklaşımı ile hesaplamaları yapılan sistemin, TBDY'de belirtilen hususlar kapsamında TDTH ile yapının konumu, yerel zemin sınıfı ve deprem düzeyine bağlı olarak elde edilen spektral ivmeler ve çalışma sahasına ait veri ve geoteknik raporundan alınan yatay yatak katsayısı kullanılarak yeniden hesaplamaları yapılmış, elde edilen sonuçlar (sistemin yapısal davranış parametreleri ve kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler) ile altsistem yaklaşımından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Modellemede; kazıklar, radye temel, perdeler ve döşemeler kabuk eleman olarak, kolonlar, kirişler ve kazıklar ise çubuk eleman olarak modellenmiştir. Kabuk elemanlar 50x50 cm ölçülerinde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Kazıklar ise 1'er metrelik sonlu elemanlara ayrılarak bu elemanların düğüm noktalarına yatay yatak katsayısı yayları tanımlanmıştır. Radye temelde, sonlu elemanların düğüm noktaları ile çubuk elemanların (kazık ve kolon) düğüm noktaları çakışacak şekilde mesh işlemi yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan spektral ivmeler ve ilgili diğer parametreler Tablo 28'de yer almaktadır.

Tablo 28

Dinamik analiz parametreleri (TDTH İnteraktif Web Uygulaması, 2021)

Parametre	Birimi	Değer
S_S	Boyutsuz	0,751
S_I	Boyutsuz	0,218
PGA	g	0,315
PGV	cm/sn	19,889
F_S	Boyutsuz	1,2
F_I	Boyutsuz	1,5
S_{DS}	Boyutsuz	0,901
S_{DI}	Boyutsuz	0,327
T_L	sn	6,00
BKS	Boyutsuz	3
BYS	Boyutsuz	2
Süneklik D.	Boyutsuz	Yüksek
R (x)	Boyutsuz	7
R (y)	Boyutsuz	5,6
D (x,y)	Boyutsuz	2,5

Yapı davranış katsayısı (R) belirlenirken, her iki yön içinde (x ve y), TBDY Bölüm 4.3.2.4 de yer alan “a” ve “b” maddeleri ile Bölüm 4.3.4.5 de yer alan kontroller yapılmıştır. Bu kapsamda Bölüm 4.3.2.4’ e göre;

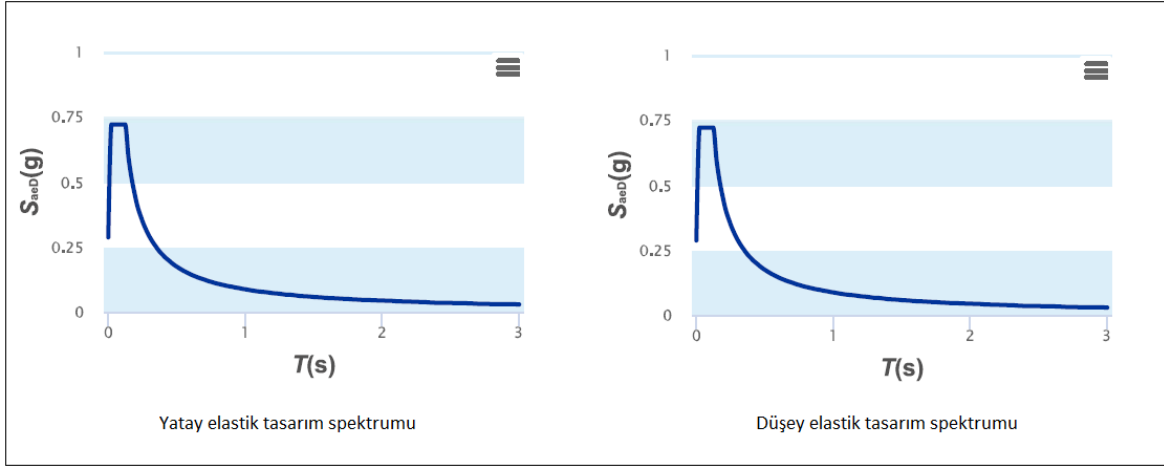
- “a” maddesinde $M_{DEV} < M_0/3$ kontrolü sağlanmalıdır,
- “b” maddesinde $M_{DEV} > M_0/6$ kontrolü sağlanmalıdır,
- Bölüm 4.3.4.5’ te ise $0,4M_0 < \Sigma M_{DEV} < 0,75M_0$ kontrolü sağlanmalıdır.

Yapılan hesaplamalarda, x yönü için tüm kontroller sağlanırken, y yönü için 4 adet perde “b” kontrolünü sağlamadığı için y yönünde R değeri TBDY’de belirtildiği üzere $(4/5)R$ olarak yani 5,6 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliklerinin tanımlanmasında eğilme durumu için TBDY Bölüm 4.5.8’de belirtildiği üzere;

- Perde ve döşemelerde 0,25
- Çerçeve kirişlerinde 0,35
- Çerçeve kolonlarında 0,70 katsayısı kullanılmıştır.

Yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 60’da yer almaktadır.



Şekil 60. DD-2 elastik tasarım spektrumları (TDTH İnteraktif Web Uygulaması, 2021)

Kazıklara tanımlanmak üzere k_h (yatay yatak katsayısı) hesabında, Geoteknik Tasarım Esasları (2007) de önerilen Denklem 3.12' de yer alan bağıntı kullanılmıştır.

$$k_h = 67 \cdot C_u / D \text{ kN/m}^3 \quad (3.12)$$

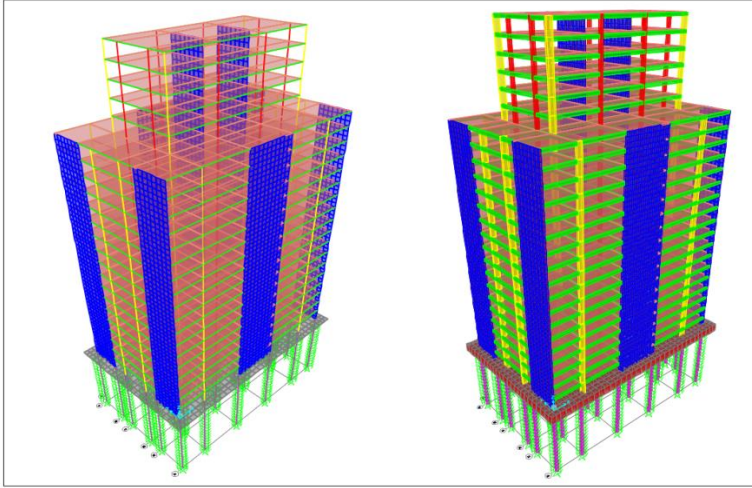
Denklem 3.12'de drenajsız kayma mukavemetini ifade eden $C_u=500 \text{ kN/m}^2$ ve kazık çapını ifade eden $D=0,8 \text{ m}$ olup, $k_h= 41.875 \text{ kN/m}^3$ olarak hesaplanmıştır ve bu değer, kazıklar arası mesafeye bağlı olarak belirlenen azaltma faktörleri ile çarpılarak nihai yatak katsayısı değeri elde edilmiştir. Azaltma katsayısı için Tablo 29'dan yararlanılmıştır. Bu çalışmada kazık aplikasyon planına bağlı olarak azaltma faktörü 1 alınarak herhangi bir azaltma yapılmamıştır.

Tablo 29

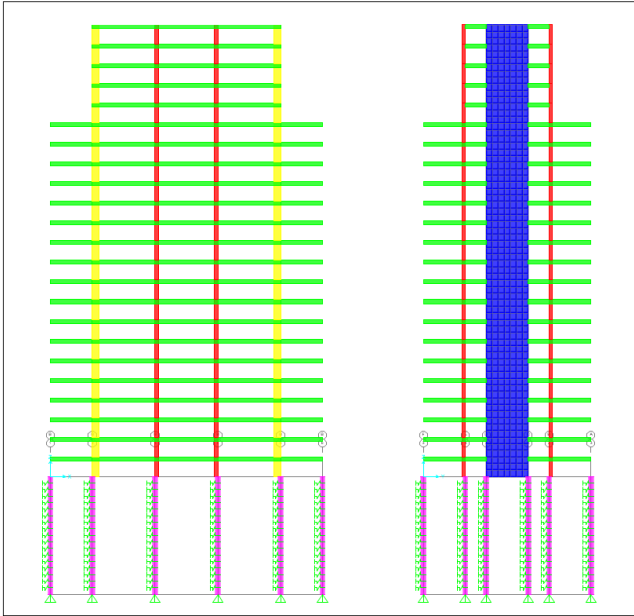
Yatak katsayısı azaltma faktörü (Geoteknik Tasarım Esasları, 2007)

Kazık Aralığı	Azaltma Faktörü
8D	1
6D	0,7
4D	0,4
3D	0,25

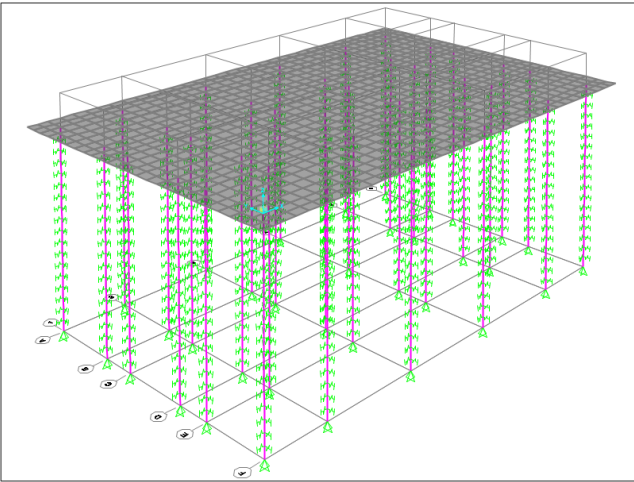
Sistem hesap modeline ait görseller Şekil 61 ile Şekil 63 arasında yer almaktadır.



Şekil 61. 3 boyutlu sistem hesap modeli



Şekil 62. Sistem x-x ve y-y kesitleri



Şekil 63. Kazıklara tanımlanan etkileşim (yatak katsayısı) yayları

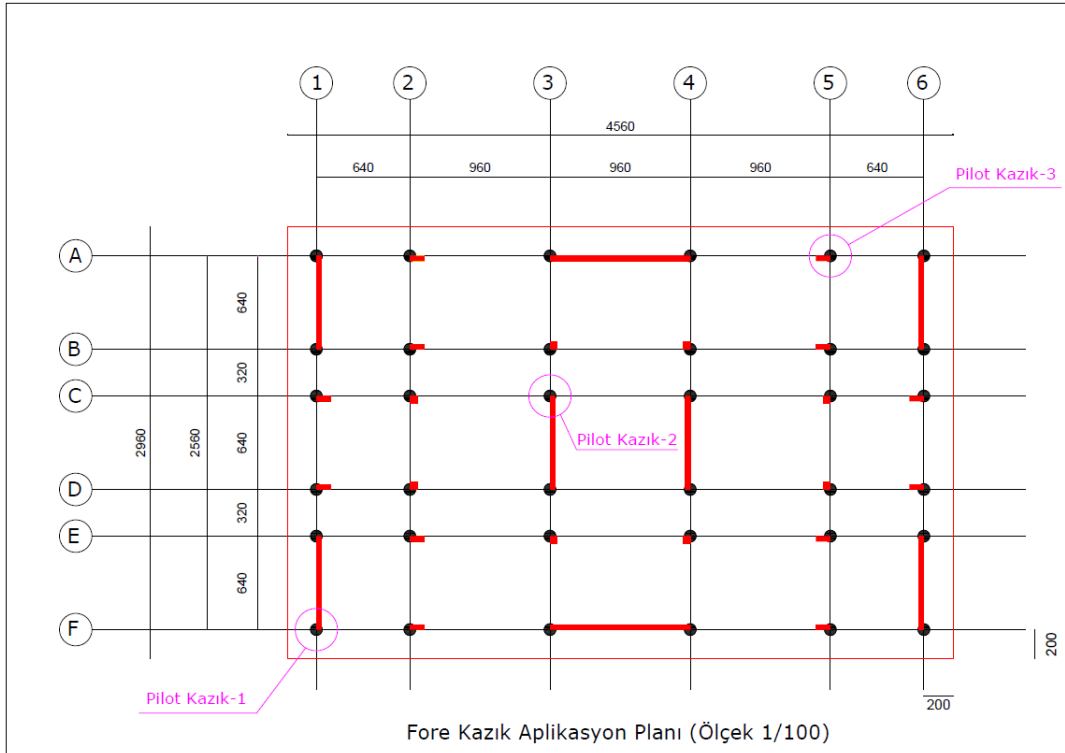
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, **Bölüm 3**'te altsistem yaklaşımı ve yatak katsayısı yöntemine göre yapılan analizlere ait sonuç çıktılarına yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar mukayese edilerek aynı sistem üzerinde, iki farklı hesap yöntemine göre analizlerin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1. Altsistem Yaklaşımı Analiz Çıktıları

Altsistem yaklaşımı hesaplamaları sonucu elde edilen iç kuvvetler ile yatak katsayısı yönteminden elde edilen iç kuvvetlerin karşılaştırılması kapsamında sistemi temsil etmek için 2 adet dış kenarlardan, 1 adet merkezden olmak üzere toplam 3 adet pilot kazık seçilerek bu kazıklardaki nihai iç kuvvetler elde edilmiştir (Şekil 64). Nihai kazık iç kuvvetleri, kinematik etkileşim için elde edilen sonuçlar (her bir kazıkta 22 analiz için elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması) ve eylemsizlik etkileşiminden elde edilen sonuçların mutlak değerlerinin toplamı şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 64. Seçilen pilot kazıkları gösterir aplikasyon planı

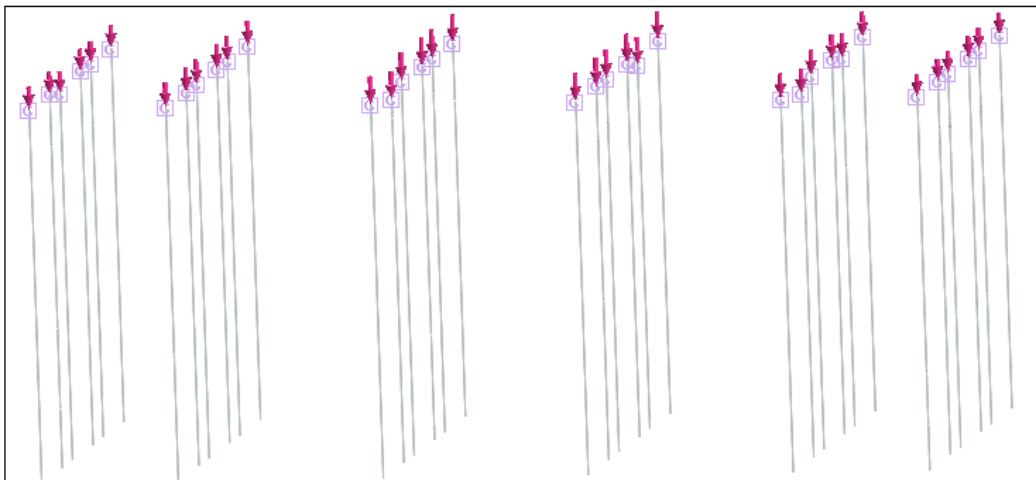
4.1.1. Düşey Yük Kaynaklı Kazık Eksenel Kuvvetleri

Dinamik analizlerden önce, düşey yüklere bağlı olarak kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetlerin tespit edilebilmesi için doğrusal olmayan statik analiz yapılarak her bir kazık için elde edilen eksenel kuvvetler Tablo 30 ve Şekil 65’de yer almaktadır.

Tablo 30

Düşey yüklerden dolayı kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetler

Kazık No	Birim	Eksenel Yük	Kazık No	Birim	Eksenel Yük
Pilot Kazık-1	kN	4.680,93	19	kN	4.479,91
2	kN	6.162,68	20	kN	6.286,87
3	kN	8.097,94	Pilot Kazık-2	kN	8.555,61
4	kN	8.097,94	22	kN	8.555,61
5	kN	6.162,68	23	kN	6.286,87
6	kN	4.680,93	24	kN	4.479,91
7	kN	4.594,07	25	kN	4.594,07
8	kN	6.292,87	26	kN	6.292,87
9	kN	8.264,13	27	kN	8.264,13
10	kN	8.264,13	28	kN	8.264,13
11	kN	6.292,87	29	kN	6.292,87
12	kN	4.594,07	30	kN	4.594,07
13	kN	4.479,91	31	kN	4.680,93
14	kN	6.286,87	32	kN	6.162,68
15	kN	8.555,61	33	kN	8.097,94
16	kN	8.555,61	34	kN	8.097,94
17	kN	6.286,87	Pilot Kazık-3	kN	6.162,69
18	kN	4.479,91	36	kN	4.680,93



Şekil 65. Eksenel kuvvetlerin kazıklara etkitilmesi

Elde edilen kuvvetler, her bir kazığa düşey yük olarak etkitildikten sonra söz konusu yüklemelerin “ $F = m.a$ ” fonksiyonu kapsamında dinamik analizlere dahil olabilmesi için kütleyle çevrilmiştir.

4.1.2. Özdeğer Analizi ile Elde Edilen Kritik Modlar

Dinamik analizde kullanılmak üzere, en yüksek kütle katılımlarının sağlandığı kritik modların tespit edilebilmesi için yapılan özdeğer analizi neticesinde, x ve y yönleri için elde edilen kritik modlar ve bu modlara ait periyot değerleri Tablo 31’de yer almaktadır.

Tablo 31

Kritik modlara ait periyot değerleri

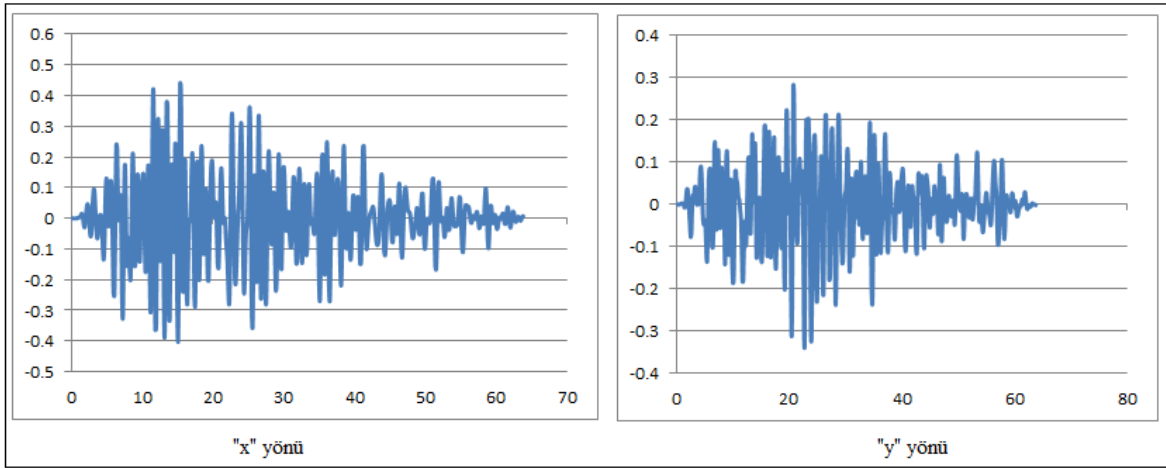
PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS			REAL EIGENVALUES
MODE NUMBER	X	Y	PERIOD
1	68,43%	0,00%	1,696901
2	0,00%	0,16%	1,549861
3	0,00%	39,83%	1,477366
4	0,50%	0,00%	1,409111
5	4,83%	0,00%	1,390659
6	0,00%	0,61%	1,327115
7	0,00%	35,97%	1,298586
8	0,00%	0,00%	1,287643
9	0,00%	0,11%	1,252508
10	0,00%	0,04%	1,161499
11	0,00%	0,01%	1,114613
12	0,35%	0,00%	1,058483
13	0,03%	0,00%	1,055218
14	0,00%	0,00%	1,038715
15	0,04%	0,00%	1,013038
16	0,00%	0,00%	0,970653
17	0,05%	0,00%	0,947554
18	0,00%	0,00%	0,939965
19	0,00%	0,00%	0,914256
20	0,00%	0,00%	0,899924

Tablo 31’de görüleceği üzere “x” yönünde en yüksek kütle katılımı 1. ve 5. modlarda, “y” yönünde ise 3. ve 7. modlarda gerçekleşmiştir. Kinematik etkileşim

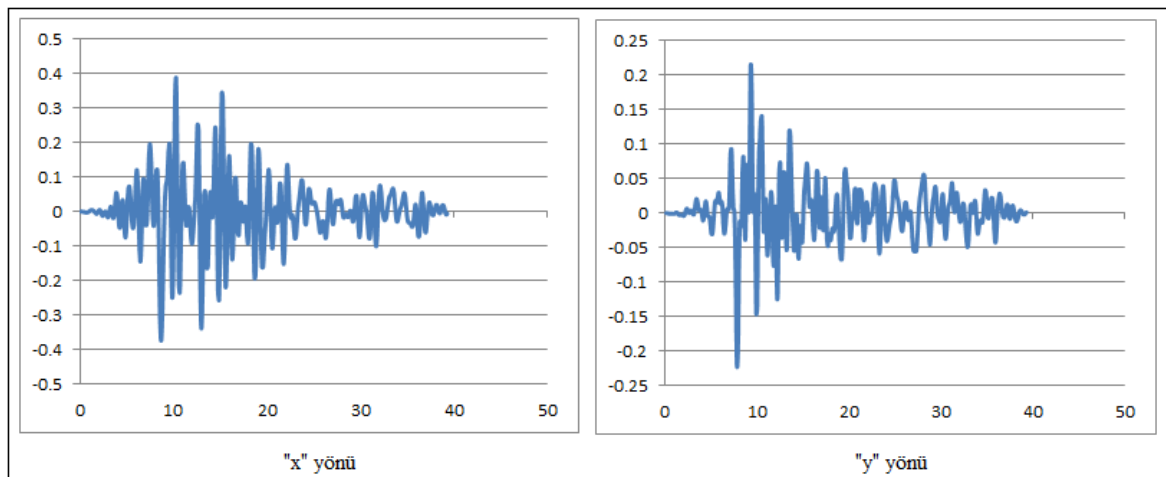
hesaplamaları kapsamında yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde söz konusu periyot değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

4.1.3. Temel Seviyesi İvme - Zaman Grafikleri

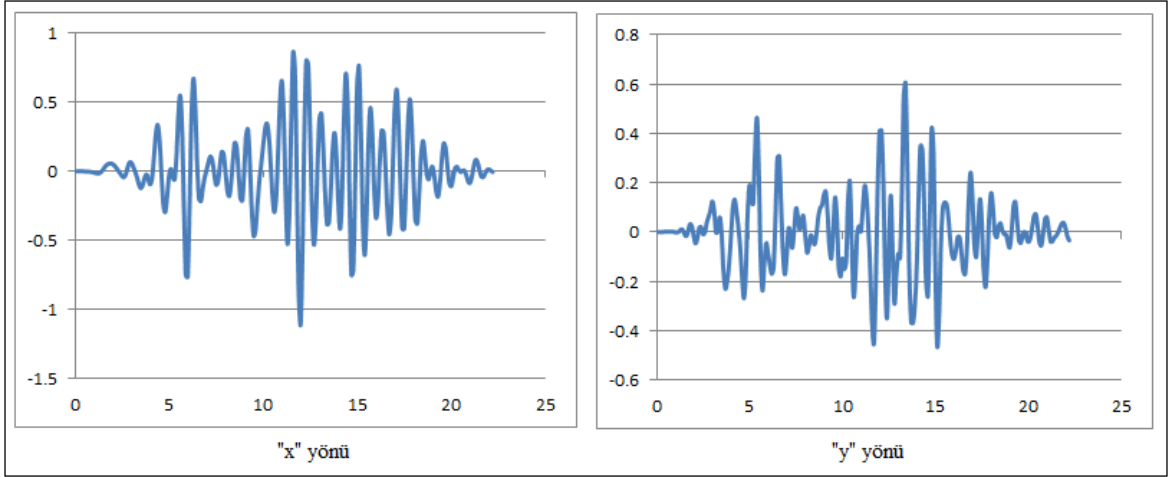
Tablo 25’de yer alan 11 çift deprem kaydının, kinematik etkileşim hesap modelinin (zemin+kazıklar+kütlesiz temel) tabanından etkilenmesi suretiyle yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler neticesinde, temel seviyesinde (temel alt orta bölgesi) elde edilen kayıtlara ait ivme-zaman grafikleri Şekil 66 ile Şekil 76 arasında yer almaktadır.



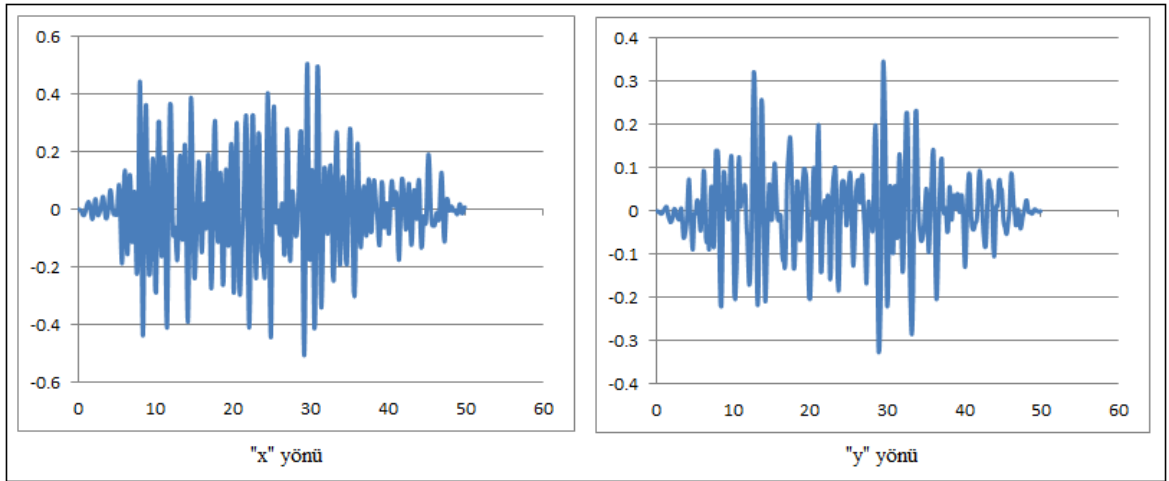
Şekil 66. Kayıt-1'e ait temel seviyesi ivme zaman grafiği



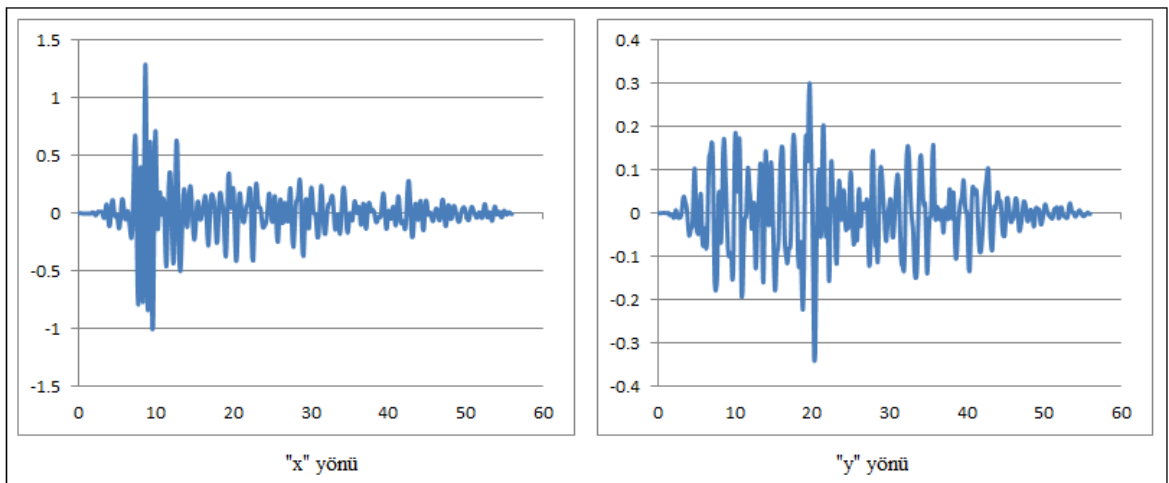
Şekil 67. Kayıt-2'ye ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



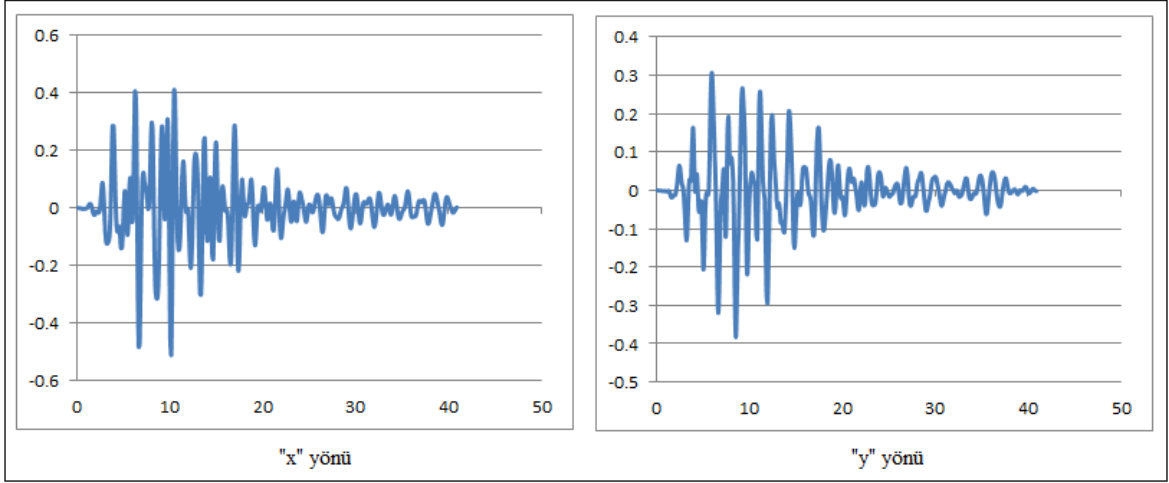
Şekil 68. Kayıt-3'e ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



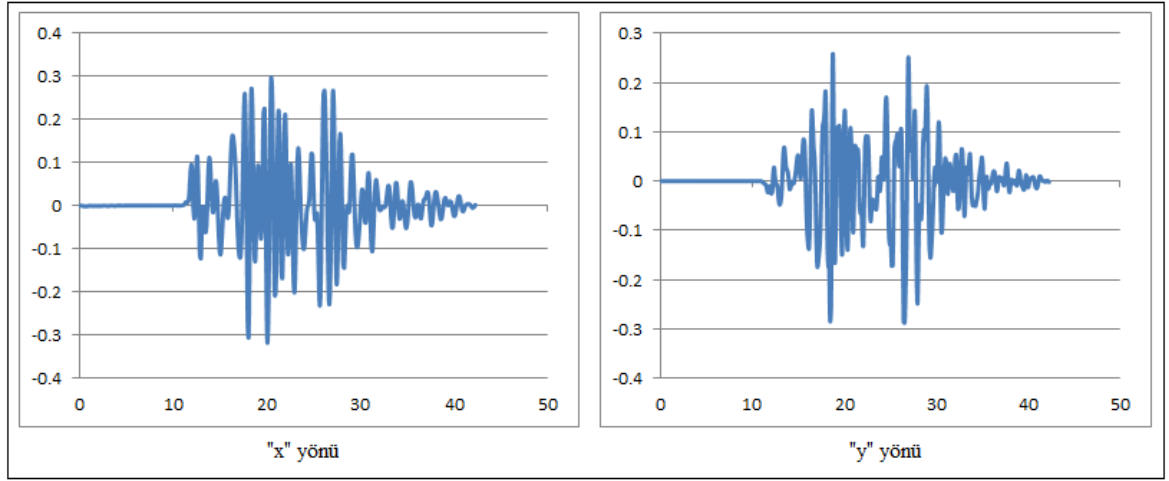
Şekil 69. Kayıt-4'e ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



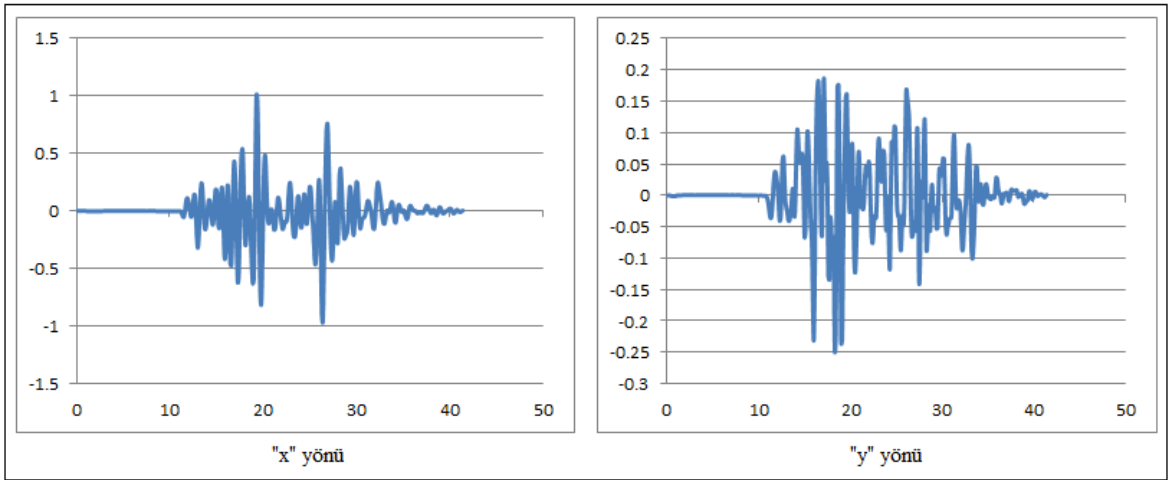
Şekil 70. Kayıt-5'e ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



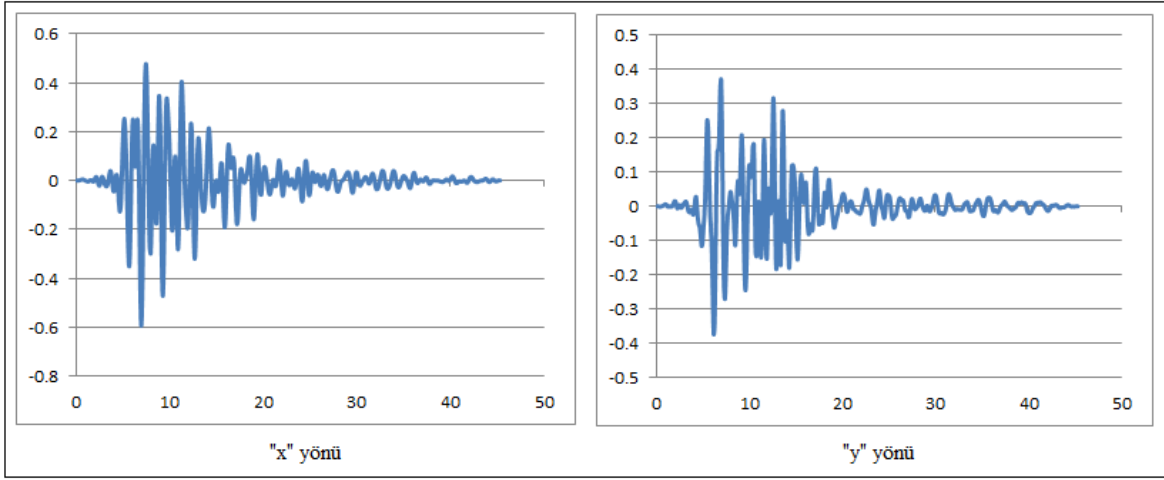
Şekil 71. Kayıt-6'ya ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



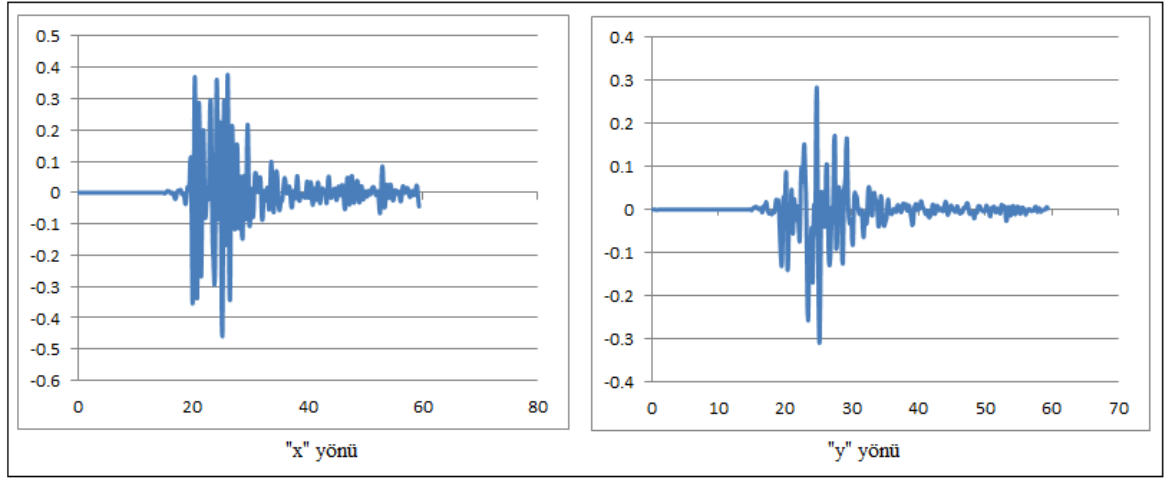
Şekil 72. Kayıt-7'ye ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



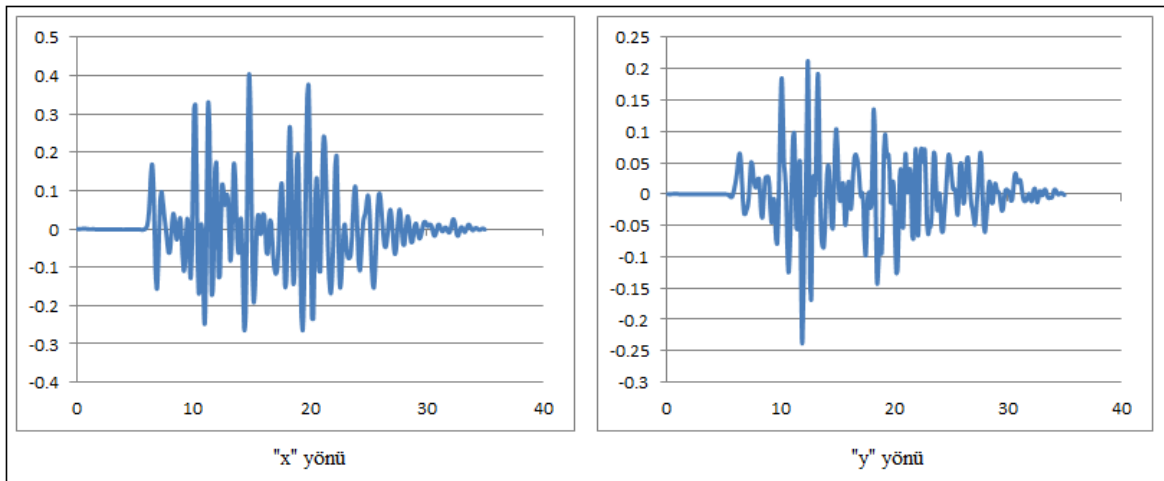
Şekil 73. Kayıt-8'e ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



Şekil 74. Kayıt-9'a ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



Şekil 75. Kayıt-10'a ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği



Şekil 76. Kayıt-11'e ait temel seviyesi ivme-zaman grafiği

4.1.4. Kinematik Etkileşimde Pilot Kazıklarda Oluşan İç Kuvvetler

Kinematik etkileşimde kazık iç kuvvetleri, TBDY Bölüm 16'da tariflendiği şekliyle, 11 çift deprem kaydının ayrı ayrı olarak sistemin taban kayasından etkilmesi ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler neticesinde hesaplanan değerlerin, mutlak değerce en büyüklerinin toplamının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bu kapsama 22 analize ait pilot kazıklarda meydana gelen mutlak değerce en büyük iç kuvvetler ve bu kuvvetlere ait ortalama değerler Tablo 32' de yer almaktadır.

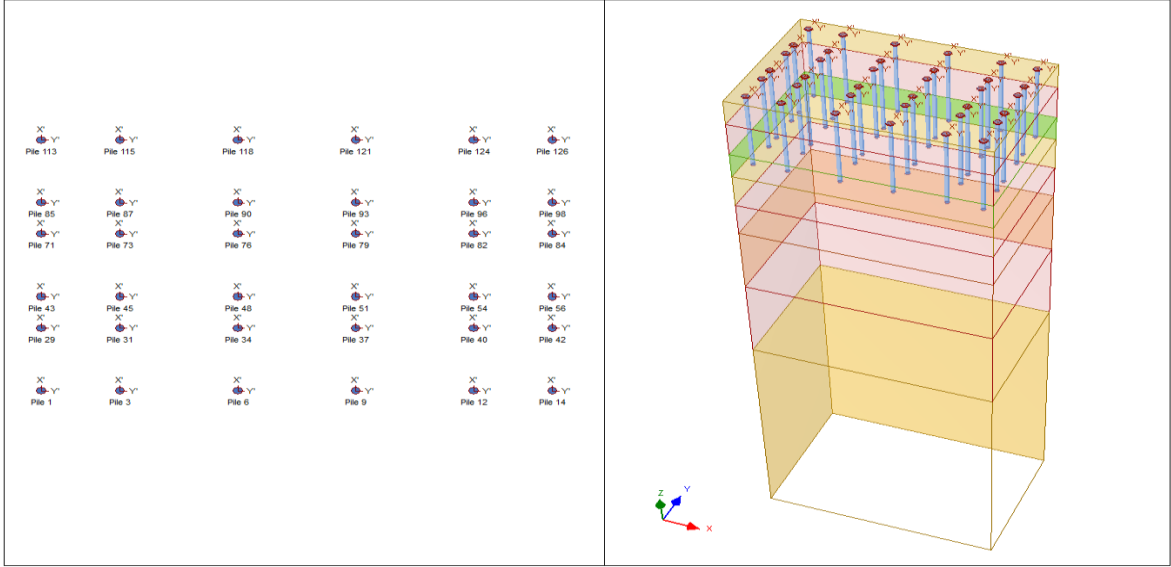
Tablo 32

Kinematik etkileşimde pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler

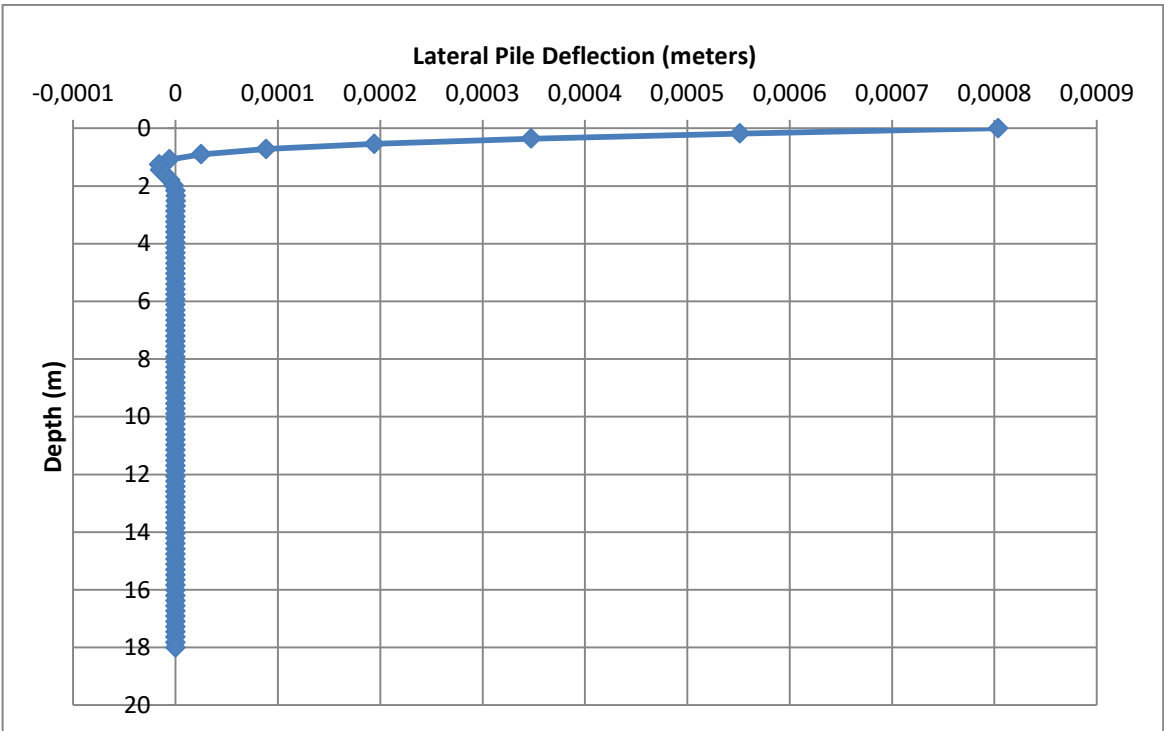
Kayıt No	Pilot Kazık-1				Pilot Kazık-2				Pilot Kazık-3			
	Shear Force 2-2 (kN)	Shear Force 3-3 (kN)	Moment 2-2 (kN.m)	Moment 3-3 (kN.m)	Shear Force 2-2 (kN)	Shear Force 3-3 (kN)	Moment 2-2 (kN.m)	Moment 3-3 (kN.m)	Shear Force 2-2 (kN)	Shear Force 3-3 (kN)	Moment 2-2 (kN.m)	Moment 3-3 (kN.m)
Kayıt-1X	2.075,3	25,8	35,8	1.569,4	1.832,0	12,5	23,2	3.586,1	619,7	17,2	20,5	1.084,1
Kayıt-1Y	142,0	2.116,1	1.449,3	94,2	16,1	1.235,6	2.465,7	34,1	22,4	593,4	925,8	43,0
Kayıt-2X	1.916,5	22,8	24,9	1.121,5	1.505,1	8,3	13,9	2.514,3	495,1	13,3	13,8	825,9
Kayıt-2Y	131,1	1.539,9	1.352,1	87,0	16,1	963,4	2.439,2	23,7	22,6	497,5	892,0	41,2
Kayıt-3X	4.615,5	54,2	73,3	4.023,0	4.611,8	18,0	35,9	9.166,2	1.352,7	35,4	38,8	2.825,2
Kayıt-3Y	343,0	4.776,6	2.960,8	220,9	47,3	2.815,6	5.223,6	83,9	63,8	968,4	1.808,8	91,4
Kayıt-4X	2.441,9	19,9	31,9	1.591,7	1.780,0	7,9	14,4	3.192,5	701,8	14,4	16,7	1.135,2
Kayıt-4Y	75,6	1.380,4	1.055,7	51,7	13,5	1.141,5	1.924,2	21,9	23,7	507,5	1.009,1	27,3
Kayıt-5X	6.857,6	57,8	89,4	4.097,7	5.399,1	28,5	50,9	9.808,5	1.942,6	52,2	57,4	2.886,2
Kayıt-5Y	93,4	1.975,2	1.116,5	62,8	17,9	1.414,1	2.276,1	32,8	19,4	521,8	889,9	31,6
Kayıt-6X	2.126,6	22,7	31,4	1.787,6	1.663,4	9,8	16,4	3.549,0	579,2	16,8	18,2	1.296,9
Kayıt-6Y	100,2	2.321,4	1.044,3	82,2	17,0	1.522,0	2.552,0	26,9	23,7	489,1	933,5	35,3
Kayıt-7X	1.494,1	22,9	19,6	1.027,3	1.337,5	5,9	10,9	2.205,0	428,5	10,5	12,1	748,0
Kayıt-7Y	158,5	2.162,5	1.389,9	104,9	10,7	1.151,2	2.343,7	22,5	26,9	739,1	1.345,1	51,1
Kayıt-8X	4.976,5	46,4	64,1	3.586,6	3.508,0	15,3	28,8	6.393,0	1.351,0	35,8	47,1	2.745,3
Kayıt-8Y	97,6	1.474,7	892,1	69,3	11,9	1.062,3	2.250,9	19,7	27,1	509,4	957,7	44,2
Kayıt-9X	1.886,3	18,4	38,8	1.942,1	1.602,9	9,5	16,4	3.952,8	529,8	14,9	18,0	1.404,1
Kayıt-9Y	229,8	2.094,8	1.482,8	142,6	42,3	3.016,5	4.769,4	85,4	24,0	553,5	1.251,4	48,8
Kayıt-10X	1.904,1	19,4	35,8	1.534,6	1.450,7	9,3	16,5	3.533,5	523,1	14,9	16,8	1.104,3
Kayıt-10Y	96,7	2.205,9	1.131,5	71,3	16,4	1.560,3	1.821,4	29,8	28,3	669,5	897,1	36,0
Kayıt-11X	1.934,0	33,8	36,9	1.060,7	1.703,9	10,9	21,0	2.695,5	550,0	17,1	20,5	780,2
Kayıt-11Y	108,3	1.777,9	1.441,3	77,2	8,9	1.191,0	1.702,1	16,9	26,0	527,6	1.060,0	48,9
Ortalama Değer	1.536,6	1.098,6	718,1	1.109,4	1.209,7	782,2	1.364,4	2.317,9	426,4	310,0	556,8	787,9

4.1.5. Eylemsizlik Etkileşiminde P-y Eğrilerinin Elde Edilmesi

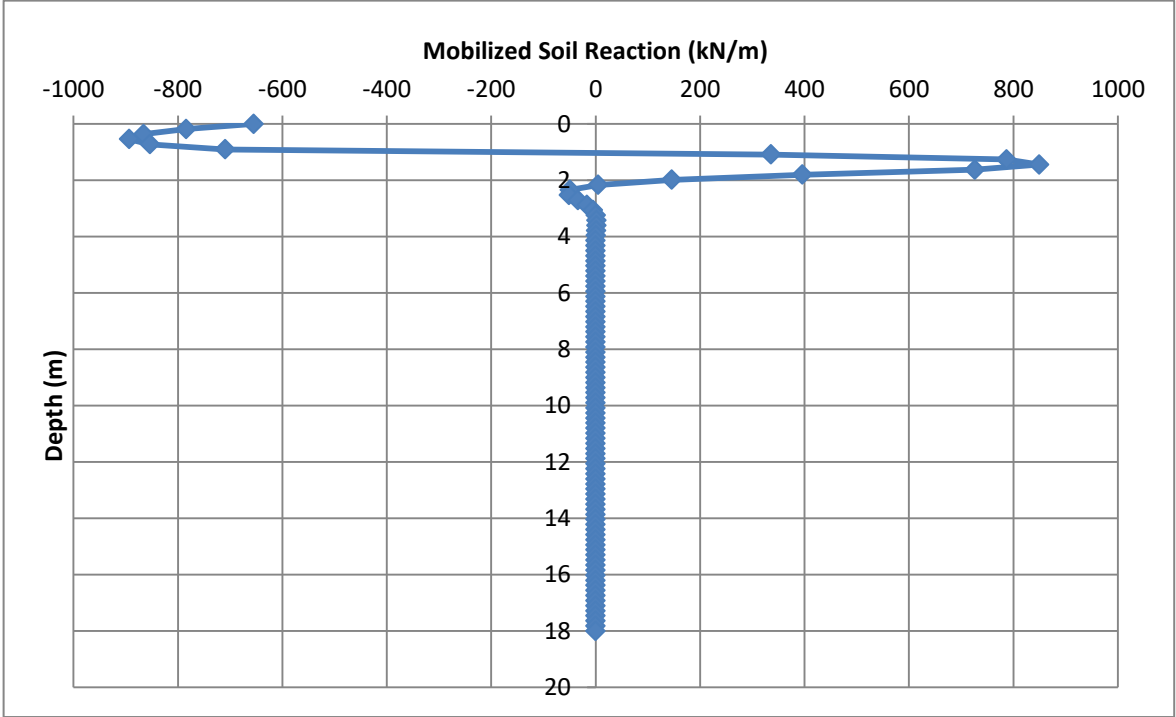
Zemin ortamı, kazık aplikasyon planı ve sistem yükleri etkisi altında yapılan artımsal statik hesaplamalar sonucu kazık - zemin ilişkisini temsil eden p-y eğrileri elde edilmiştir. Sistem hesap modeli ve kazık derinliği boyunca (18 m) elde edilen kuvvet - yerdeğiştirme iskelet eğrileri Şekil 77, Şekil 78, Şekil 79 ve Şekil 80'de yer almaktadır.



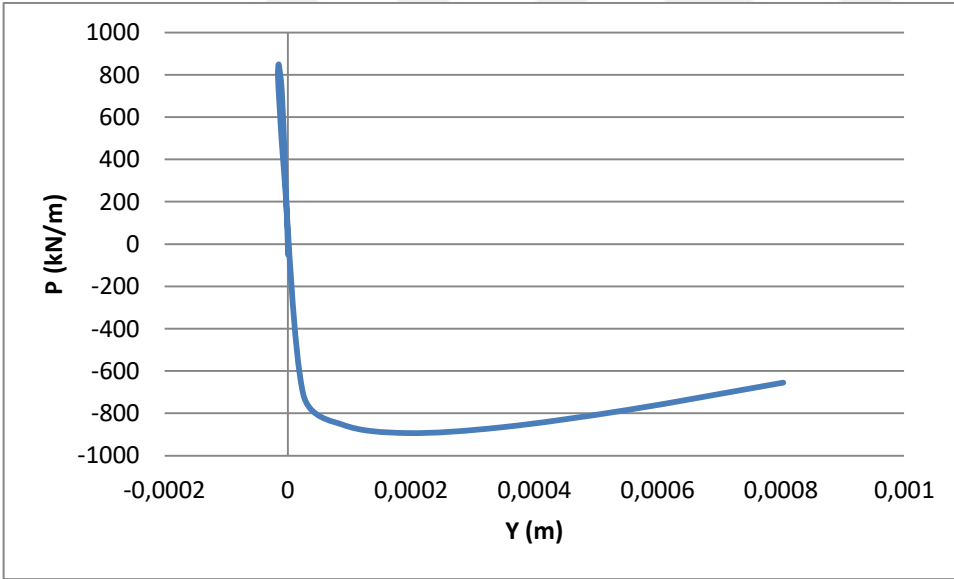
Şekil 77. 3 boyutlu artımsal statik hesap modeli



Şekil 78. Kazık derinliği boyunca yer değıştirme eğrisi



Şekil 79. Kazık derinliği boyunca zemin direnci eğrisi

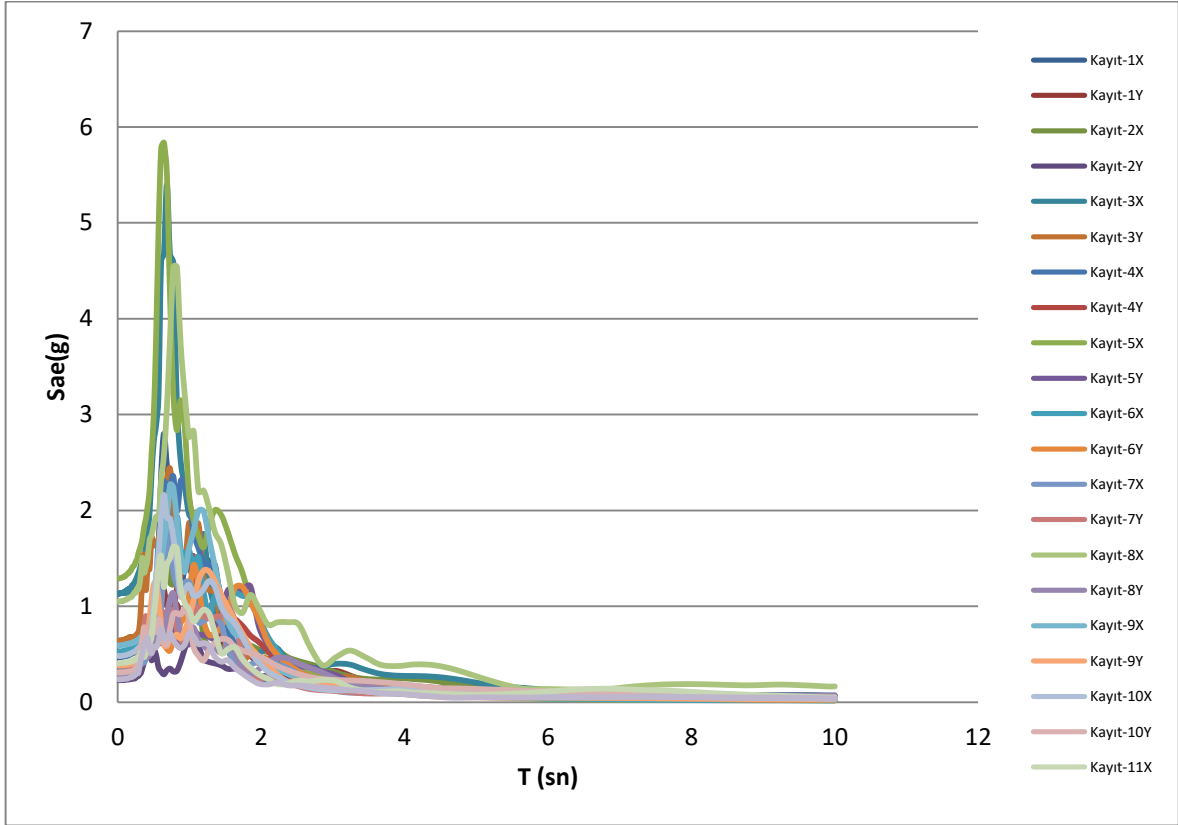


Şekil 80. Kuvvet – yerdeğiştirme (p-y) eğrisi

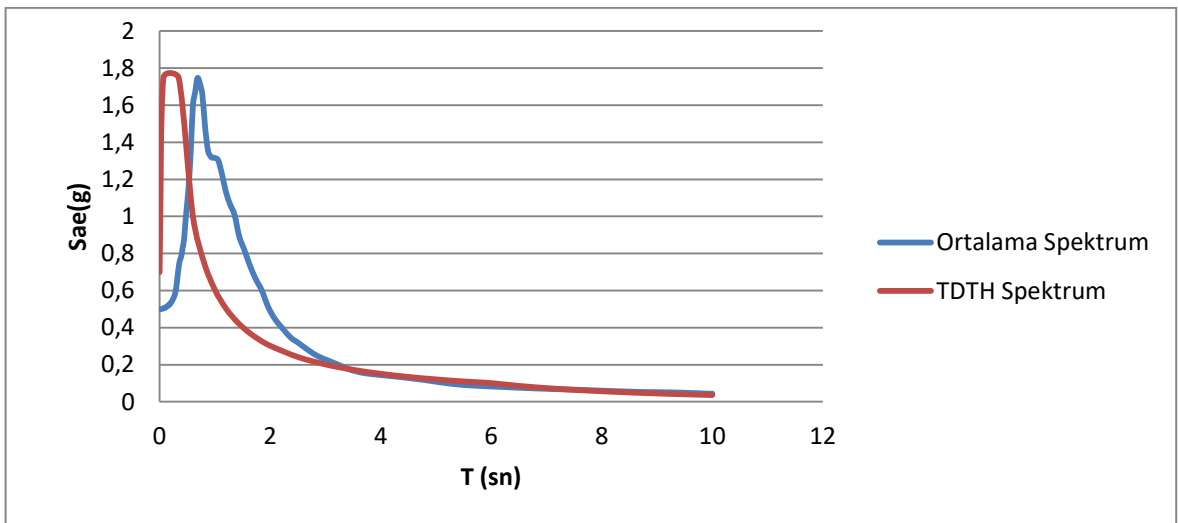
4.1.6. Eylemsizlik Etkileşiminde Üstyapı Analizleri ve Hesap Çıktıları

Eylemsizlik etkileşimi hesaplarında, kinematik etkileşim hesaplamaları sonucu elde edilen temel seviyesi deprem kayıtlarının (22 adet) tamamı kullanılarak bu kayıtlara ait ortalama spektrum elde edilmiş ve bu spektrum ile üstyapı analizler gerçekleştirilmiştir.

Temel seviyesinde elde edilen 22 kayda ait spektrum ve bu spektrumların ortalaması ile TDTH tasarım spektrumu arasındaki ilişki Şekil 81 ve Şekil 82’de yer almaktadır.



Şekil 81. Temel seviyesinde elde edilen 22 kayda ait spektrumlar



Şekil 82. Ortalama spektrum ile TDTH tasarım spektrumu ilişkisi

Hesap modelinin (temel+üstyapı) tabanına tanımlanan p-y yayları ve temel seviyesi ortalama spektrum etkisinde, 72 mod kullanılarak yapılan dinamik analiz neticesinde hesaplanan ilk 15 moda ait üstyapı periyot değerleri Tablo 33’de yer almaktadır.

Tablo 33

İlk 15 moda ait periyot değerleri

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	2,397289	0,69188	0	0
MODAL	Mode	2	2,292029	0,69188	0,69525	0
MODAL	Mode	3	1,564871	0,69188	0,69525	0
MODAL	Mode	4	0,865992	0,74725	0,69525	3,97E-20
MODAL	Mode	5	0,503685	0,74725	0,84073	4,074E-17
MODAL	Mode	6	0,463387	0,74725	0,84073	4,485E-17
MODAL	Mode	7	0,423121	0,8685	0,84073	4,491E-17
MODAL	Mode	8	0,368644	0,8685	0,84073	0,95118
MODAL	Mode	9	0,33408	0,8785	0,84073	0,95118
MODAL	Mode	10	0,290552	0,8785	0,84166	0,95118
MODAL	Mode	11	0,286389	0,8785	0,84166	0,96236
MODAL	Mode	12	0,279182	0,8785	0,84166	0,96236
MODAL	Mode	13	0,25774	0,88807	0,84166	0,96236
MODAL	Mode	14	0,2366	0,88807	0,84166	0,96236
MODAL	Mode	15	0,232809	0,88807	0,89175	0,96236

Sistemde, dinamik üstyapı analizi neticesinde x, y ve z yönlerinde meydana gelen en büyük deplasman değerleri Tablo 34’de yer almaktadır.

Tablo 34

Sistemde meydana gelen en büyük deplasman değerleri

Yön	Yükleme Durumu	Deplasman (cm)
X Yönü	Ortalama Spektrum-X	11,9
Y Yönü	Ortalama Spektrum-Y	11,2
Z Yönü	G Yüklemesi	4,2

Sistemde, dinamik üstyapı analizi neticesinde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti Tablo 35’de yer almaktadır.

Tablo 35

Sistemde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti

Taban Kesme Kuvveti		
Yön	Yükleme Durumu	Kuvvet (kN)
X	Ortalama Spektrum-X	6.216,95

Sistemde, dinamik üstyapı analizi neticesinde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti Tablo 36’da yer almaktadır.

Tablo 36

Sistemde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti

Taban Kesme Kuvveti		
Yön	Yükleme Durumu	Kuvvet (kN)
Y	Ortalama Spektrum-Y	7.039,871

Dinamik üstyapı analizi sonucu, pilot kazıkların düğüm noktalarına denk gelen p-y yaylarında meydana gelen reaksiyon kuvvetleri Tablo 37’de yer almaktadır.

Tablo 37

P-y yaylarında meydana gelen reaksiyon kuvvetleri

Yay No	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	M3 (kN-m)
Pilot Yay-1	10,02	586,10	39,03	332,39
Pilot Yay-2	7,63	589,54	12,65	254,09
Pilot Yay-3	119,71	12,43	38,73	2.716,05

Eylemsizlik etkileşimi kapsamında, üstyapıda meydana gelen titreşimler, kazıklarda bir miktar iç kuvvet meydana gelmesine sebep olacaktır. Bu kapsamda, eylemsizlik etkileşimi hesaplamaları sonucu pilot yaylarda meydana gelen reaksiyon kuvvetleri kullanılarak yapılan kazık analizleri neticesinde hesaplanan eylemsizlik etkileşimi kazık iç kuvvetleri Tablo 38’de yer almaktadır.

Tablo 38

Pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler

	Birim	Pilot Kazık-1	Pilot Kazık-2	Pilot Kazık-3
Shear 2-2	kN	4,34	3,51	59,59
Shear 3-3	kN	521,35	570,71	22,37
Moment 2-2	kN-m	101,05	115,68	12,41
Moment 3-3	kN-m	0,32	0,52	6,18

Altsistem yaklaşımı Yöntem-I kapsamında kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşiminde elde edilen kazık iç kuvvetlerinin toplanması ile nihai kazık iç kuvvet değerleri elde edilerek Tablo 39’da gösterilmiştir.

Tablo 39

Altsistem yaklaşımı nihai kazık iç kuvvetleri

	Birim	Pilot Kazık-1	Pilot Kazık-2	Pilot Kazık-3
Shear 2-2	kN	1.540,94	1.213,21	485,99
Shear 3-3	kN	1.619,95	1.352,91	332,37
Moment 2-2	kN-m	819,15	1.480,08	569,21
Moment 3-3	kN-m	1.109,72	2.318,42	794,08

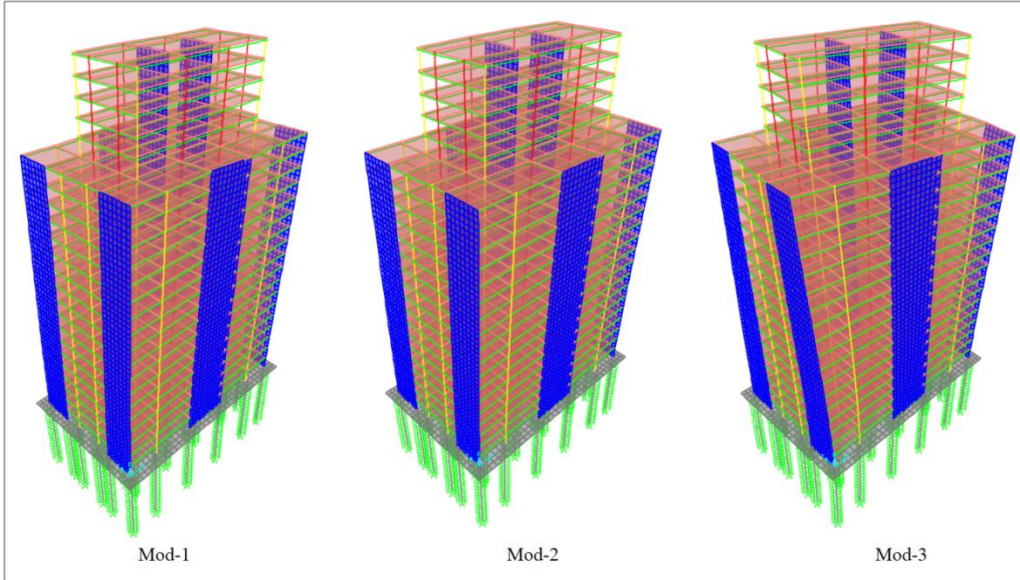
4.2. Yatak Katsayısı Yöntemi Analiz Çıktıları

Yatak katsayısı yöntemi ile yapılan analizler neticesinde, periyotlar, sistem deplasmanları, ilgili yönler için taban kesme kuvvetleri ve pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler bu bölümde yer almaktadır. Analizler, kazıkların sonlu eleman düğüm noktalarına tanımlanan yatak katsayısı yayları ile TDTH üzerinden elde edilen tasarım spektrumu etkisinde 72 mod kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu ilk 15 mod için elde edilen periyot, frekans, ilgili modlardaki kütle katılım oranları Tablo 40’da yer almaktadır. Sistem, x yönünde 12. modda, y yönünde ise 15. modda %95 kütle katılım oranını yakalamıştır. İlk 3 moda ait mod davranış şekilleri ise Şekil 83’de yer almaktadır. Sistem ilk 2 modda x ve y yönünde, 3. modda ise burulma şeklinde davranış sergilemiştir.

Tablo 40

İlk 15 moda ait periyot değerleri

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	2,333553	0,48321	0	0
MODAL	Mode	2	2,08913	0,48321	0,4919	0
MODAL	Mode	3	1,564282	0,48321	0,4919	0
MODAL	Mode	4	0,871368	0,53572	0,4919	1,769E-18
MODAL	Mode	5	0,542928	0,53572	0,72755	7,793E-16
MODAL	Mode	6	0,480554	0,53572	0,72755	7,794E-16
MODAL	Mode	7	0,468425	0,79247	0,72755	5,906E-15
MODAL	Mode	8	0,351443	0,79247	0,72755	4,466E-14
MODAL	Mode	9	0,323802	0,79247	0,94632	4,534E-14
MODAL	Mode	10	0,298062	0,9485	0,94632	4,562E-14
MODAL	Mode	11	0,261325	0,9485	0,94632	0,64219
MODAL	Mode	12	0,250851	0,96771	0,94632	0,64219
MODAL	Mode	13	0,23795	0,96779	0,94632	0,64219
MODAL	Mode	14	0,225748	0,96779	0,94632	0,64219
MODAL	Mode	15	0,223445	0,96779	0,96901	0,64219



Şekil 83. İlk 3 moda ait mod davranış şekilleri

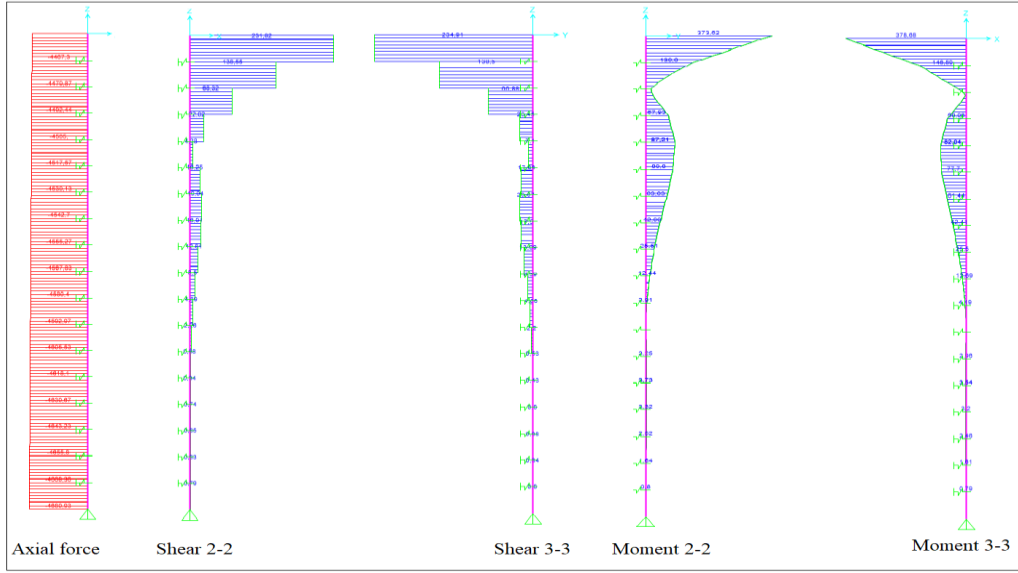
4.2.1. Yatak Katsayısı Yöntemi Kazık İç Kuvvetleri

Belirlenen 3 adet pilot kazıkta meydana gelen iç kuvvetler Tablo 41'de yer almaktadır. İç kuvvetlere ait diyagramlar ise Şekil 84 ile Şekil 86 arasında yer almaktadır.

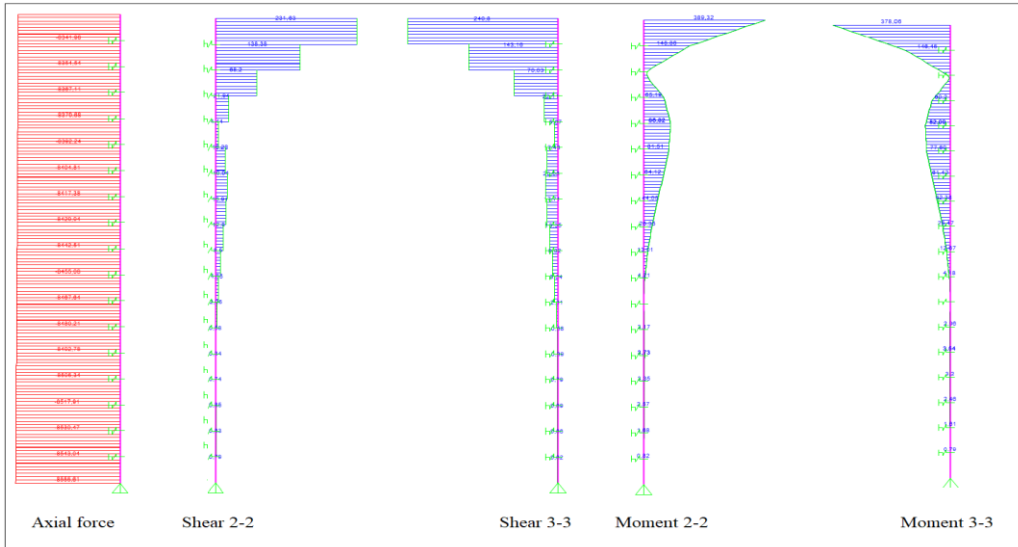
Tablo 41

Pilot kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler

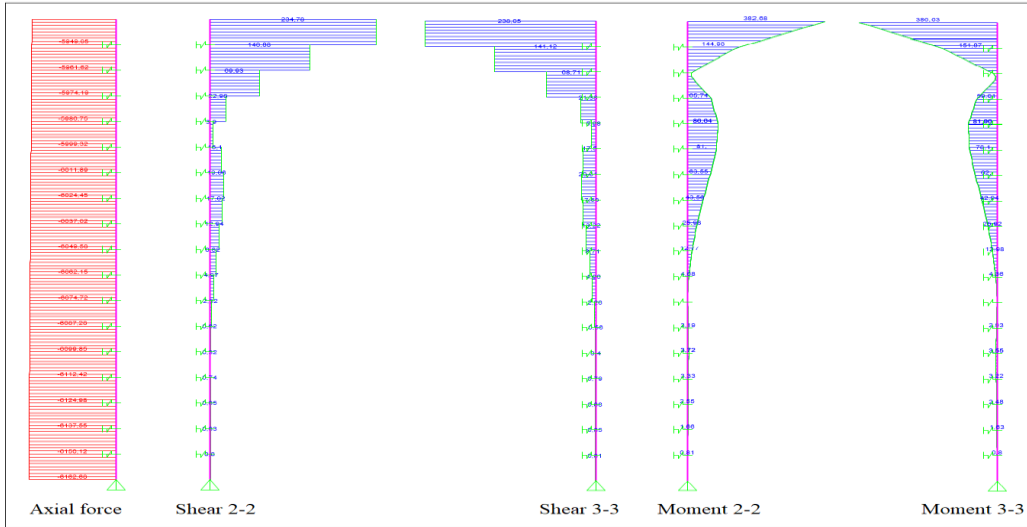
	Birim	Pilot Kazık-1	Pilot Kazık-2	Pilot Kazık-3
Axial Force	kN	4.680,93	8.555,61	6.162,69
Shear 2-2	kN	231,82	231,63	234,78
Shear 3-3	kN	234,91	240,80	238,05
Moment 2-2	kN-m	373,62	389,32	382,68
Moment 3-3	kN-m	378,68	378,06	386,63



Şekil 84. Pilot kazık-1'e ait iç kuvvet diyagramları



Şekil 85. Pilot kazık-2'ye ait iç kuvvet diyagramları



Şekil 86. Pilot kazık-3'e ait iç kuvvet diyagramları

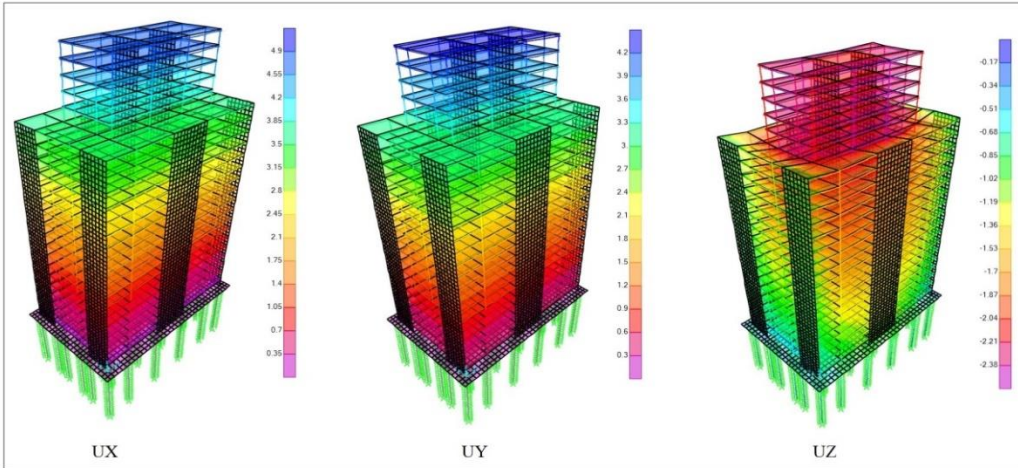
4.2.2. Yatak Katsayısı Yöntemi Deplasman ve Taban Kesme Kuvvetleri

Sistemde x, y ve z yönlerinde meydana gelen mutlak değerce en büyük deplasman değerleri Tablo 42'de, sistemin deforme olmuş haline ait görseller ise Şekil 87'de yer almaktadır.

Tablo 42

Sistemde oluşan mutlak değerce en büyük deplasman değerleri

Yön	Yükleme Durumu	Deplasman (cm)
X Yönü	SPEC-EX	4,90
Y Yönü	SPEC-EY	4,20
Z Yönü	G	2,38



Şekil 87. x, y ve z yönlerinde sistem deplasmanı

Sistemde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti Tablo 43'de yer almaktadır.

Tablo 43

Sistemde x yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti

Taban Kesme Kuvveti		
Yön	Yükleme Durumu	Kuvvet (kN)
X	SPEC-EX	8.393,079

Sistemde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti Tablo 44'de yer almaktadır.

Tablo 44

Sistemde y yönünde meydana gelen taban kesme kuvveti

Taban Kesme Kuvveti		
Yön	Yükleme Durumu	Kuvvet (kN)
Y	SPEC-EY	8.677,989

4.3. Rijit Modele Ait Analiz Çıktıları

Sistemin zemin ortamına ankastre mesnetler ile bağlandığı diğer bir ifadeyle zemin-yapı etkileşiminin ihmal edildiği rijit (etkileşimsiz) model için ilk 3 moda ait periyotlar Tablo 45'te yer almaktadır.

Tablo 45

İlk 3 moda ait periyot değerleri

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	2,007188	0,63095	0	0
MODAL	Mode	2	1,821809	0,63095	0,64587	0
MODAL	Mode	3	1,356097	0,63095	0,64587	0

Rijit modelde meydana gelen maksimum deplasman değerleri Tablo 46'da yer almaktadır.

Tablo 46

Sistemde meydana gelen en büyük deplasman değerleri

Yön	Yükleme Durumu	Deplasman (cm)
X Yönü	SPEC-EX	4,2
Y Yönü	SPEC-EY	3,5
Z Yönü	G	1,54

Rijit modelde x ve y yönlerinde meydana gelen taban kesme kuvvetleri Tablo 47’de yer almaktadır.

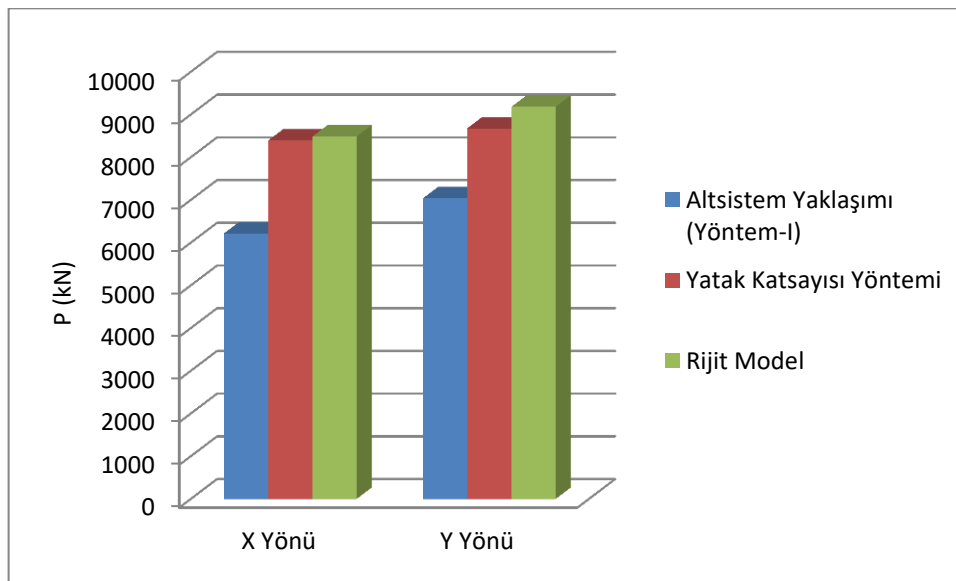
Tablo 47

Sistemde x ve y yönlerinde meydana gelen taban kesme kuvvetleri

Taban Kesme Kuvveti		
Yön	Yükleme Durumu	Kuvvet (kN)
X	SPEC-EX	8.485,308
Y	SPEC-EY	9.181,906

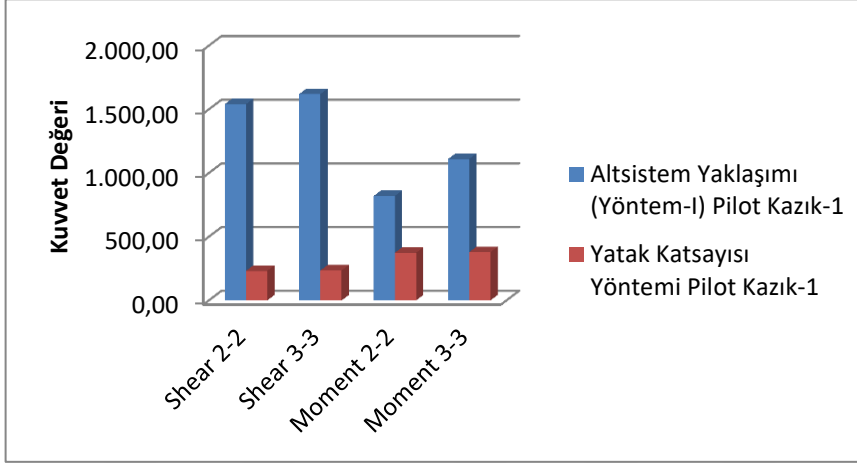
4.4. Hesap Yöntemlerine Ait Sonuçların Karşılaştırılması

Bu kısımda, her üç yöntem ile yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı grafikler üzerinden görselleştirilerek aşağıda sunulmuştur. Her üç yöntem ile elde edilen taban kesme kuvvetleri arasındaki ilişki Şekil 88’de yer almaktadır.

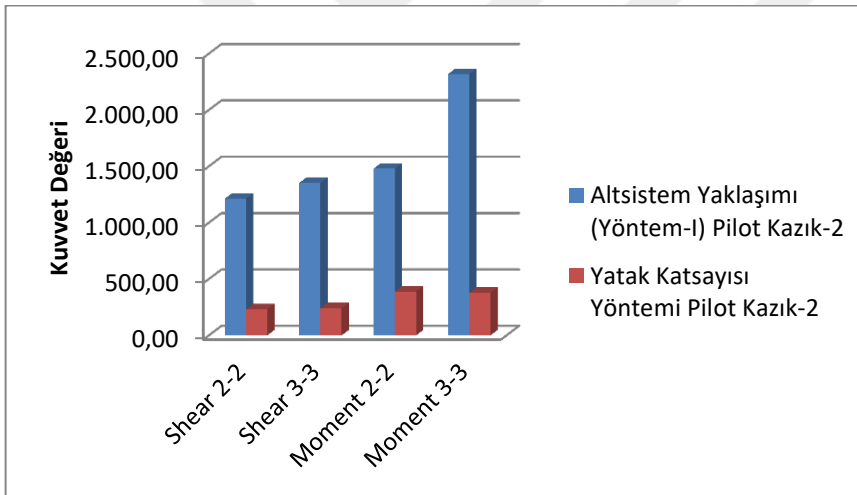


Şekil 88. Hesap yöntemine bağlı taban kesme kuvvetlerindeki değişim

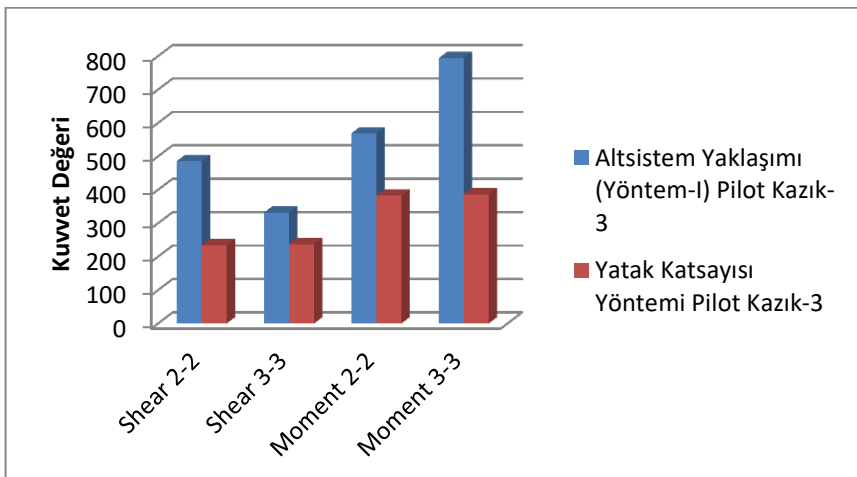
Altsistem yaklaşımı ve yatak katsayısı yöntemleri ile elde edilen kazık iç kuvvetleri arasındaki ilişki Şekil 89, Şekil 90 ve Şekil 91’de yer almaktadır.



Şekil 89. Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-1 için iç kuvvet değerleri

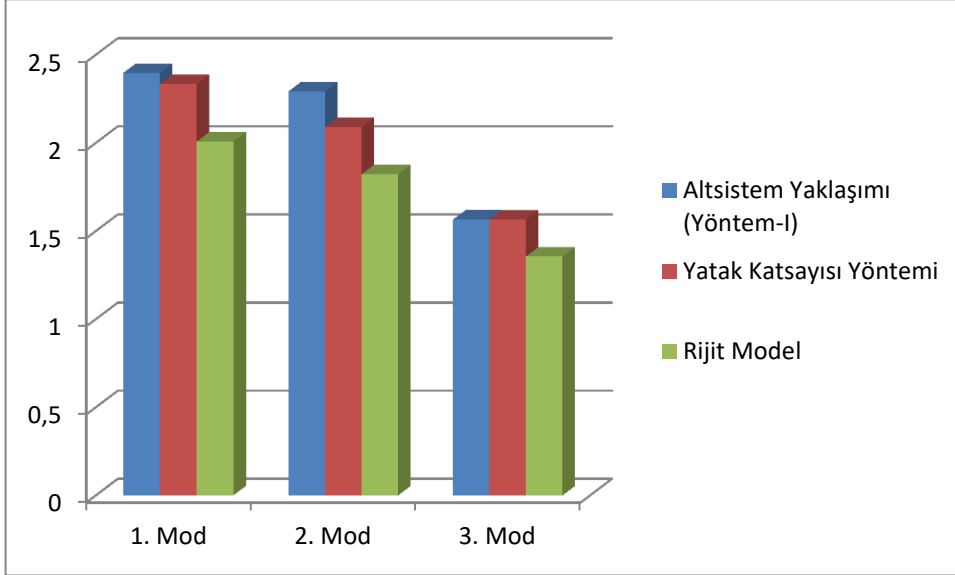


Şekil 90. Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-2 için iç kuvvet değerleri

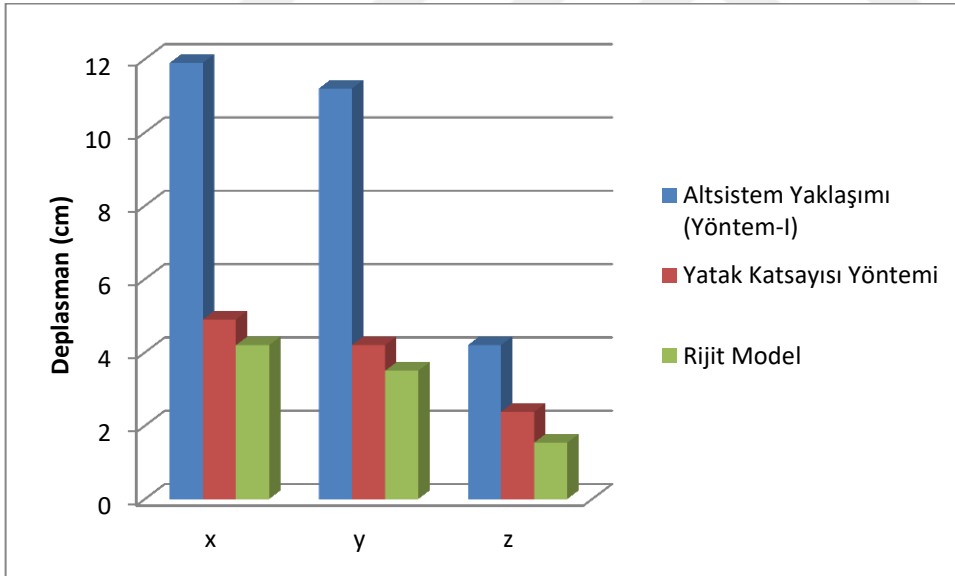


Şekil 91. Hesap yöntemine bağlı Pilot kazık-3 için iç kuvvet değerleri

Her üç yöntem ile elde edilen ilk 3 moda ait periyot değerleri arasındaki ilişki Şekil 92’de, deplasman değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 93’de yer almaktadır.



Şekil 92. Hesap yöntemine bağlı ilk 3 mod için periyot değerleri



Şekil 93. Hesap yöntemine bağlı elde edilen deplasman değerleri

BEŞİNCİ BÖLÜM BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, 23 katlı, kazık temelli betonarme bir yapı, TDTH üzerinden elde edilen tasarım spektrumu etkisi altında, kazıklar üzerine tanımlanan yatay yatak katsayısı yayları ile analiz yapılarak çözülmüş ve yine aynı yapı, TBDY Bölüm 16 kapsamında, altsistem yaklaşımı (Yöntem I) ile çözümlenerek sonuçlar mukayese edilmiş ve aşağıda yer alan bulgular elde edilmiştir.

Zemin-kazık-yapı etkileşimi kapsamında, kinematik etkileşim analizleri neticesinde, taban kayasından sisteme etkitilen deprem kaydının tabakalı zemin ortamı ve kazıkların etkisi ile temel seviyesine ulaştığında değişime uğradığı görülmüştür. Bu değişim zemin ve kazık sistemine bağlı olarak ivme genliklerinde artış veya azalma şeklinde olabilir.

Zemin-kazık-yapı sistemi, arazi özelliklerini (tabaka kalınlıkları ve özellikleri) ve yapısal sistemi gerçeğe en yakın temsil edecek şekilde tasarlanmalıdır. Analizlerde seçilen parametreler (kazık-zemin arayüz parametreleri, zemin bünye modeli vb.), hesaplamaları doğrudan etkileyeceği için modelleme ve parametre seçimine dikkat edilmelidir.

Altsistem yaklaşımı ile elde edilen kazık iç kuvvetlerinin, yatak katsayısı yöntemi ile elde edilen değerlere göre oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kazıkların rijitliklerinin tabakalı zemin ortamına kıyasla çok daha büyük olması sebebiyle, kazıkların deprem etkisiyle zeminde meydana gelen şekil değiştirmelere uyum sağlayamaması sonucu zemin tabakalarının kazıklara yüklenerek kazıklarda büyük iç kuvvetler meydana getirdiği tezini destekler niteliktedir.

Altsistem yaklaşımı ve yatak katsayısı yöntemlerinden elde edilen periyot değerlerinin rijit modele (etkileşimsiz) kıyasla daha yüksek olduğu, taban kesme kuvveti değerlerinin ise rijit modele kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Periyot değerlerindeki artışa paralel olarak, etkileşimli modellerdeki deplasman değerlerinde rijit modelden elde edilen değerlere göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, görece iyi zeminlerde, etkileşimli durumda etkileşimsiz duruma kıyasla tasarım spektrumunda periyot uzaması olacağı ve buna bağlı olarak üstyapıya etkiyecek deprem kuvvetinde azalma olacağı görüşünü desteklemektedir.

Eylemsizlik etkileşimi hesaplarında, sistemde meydana gelen taban kesme kuvvetlerinin, yatak katsayısı yöntemine kıyasla daha küçük olduğu tespit edilmiş, elde edilen sonuçlar, görece rijit zeminlerde zemin-kazık-yapı etkileşiminin üstyapıyı güvenli tarafda bırakacağı yaklaşımını destekler niteliktedir.

Özellikle kazık temelli yapılarda, zemin-kazık-yapı etkileşiminin üst yapıyı güvenli durumda bırakabileceği durumlarda bile, kazık iç kuvvetlerinin doğru tespit edilerek kazık dizaynının yapılabilmesi için zemin-kazık-yapı etkileşimin hesaplamalara dahil edilmesinin en doğru yaklaşım olacağı düşünülmektedir. Çünkü üstyapı her ne kadar güvenli tarafda kalıyor olsada, zemin-kazık etkileşiminden kaynaklı kazıklarda oluşabilecek iç kuvvetler, ancak kinematik etkileşim hesapları ile en doğru şekilde tayin edilebilmektedir.

Altsistem yaklaşımında, kazıklarda meydana gelen iç kuvvetlerin çok büyük bölümünün kinematik etkileşimde meydana geldiği, eylemsizlik etkileşiminde ise üstyapıda meydana gelen titreşimlerden dolayı da kazıklarda bir miktar iç kuvvet oluştuğu tespit edilmiştir.

Zemin-kazık-yapı etkileşiminde, deprem dalgaları üzerindeki değişimin doğru tayin edilebilmesi için, zemin ortamı TBDY’de tariflenen asgari ölçülerde modellenmeli ve uygun sınır koşulları ile idealize edilmelidir. Modeldeki sonlu eleman boyutları ise gerek etkileşimin eleman bazında çalışabilmesi, gerekse de model boyutu ve analiz süreleri göz önünde bulundurularak tespit edilmelidir.

Bu çalışma özelinde her ne kadar zemin-kazık-yapı etkileşimi üstyapıyı güvenli tarafda bırakmış olsada, görece daha zayıf zeminlerde özellikle yüksek katlı ve derin (kazık) temelli yapılarda zemin-kazık-yapı etkileşiminin gerek kazıklarda oluşacak iç kuvvetler, gerekse de üstyapı performansının doğru tayin edilebilmesi adına göz önünde bulundurulmasının doğru bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ada, M. (2020). Bina Grupları Üzerindeki Yapı-Zemin-Yapı Etkileşiminin İncelenmesi. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akın, C., Koyunlu, K. ve Öztürk, H. (2020). *Deniz İskele Projesi Sondaja Dayalı Zemin ve Temel Etüdü Veri ve Geoteknik Raporu*.
- Ala, N. (2007). Adapazarı Zemininde Yapılan Betonarme Yapılarda Zemin-Yapı Etkileşimi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, Sakarya.
- Altun, N. (2019). 2007 Ve 2018 Deprem Yönetmelikleri Işığında Betonarme Minarelerin Zemin-Yapı Etkileşimi Göz Önünde Bulundurularak Projelendirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.
- Anderson, L., Carey, S. ve Amin, J. (2011). Effect of Structure, Soil and Ground Motion Parameters on Structure-Soil-Structure Interaction of Large Scale Nuclear Structures. *Structures Congress*, Las Vegas, USA.
- Aydemir, M. E. (2011). Zemin Yapı Etkileşiminin Yapısal Davranış Parametreleri Üzerine Etkisi. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, İstanbul.
- Aydinoğlu, M. N. (2011). Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi İçin Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Erişim: 10 Ocak 2021, http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/raporlar/Aydinoglu_Etkilesim_Rapor.pdf.
- Aydinoğlu, M. N. (2012). Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi. Erişim: 15 Ocak 2021, https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/ea2700a19e67cc2_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16.

- Aytun, A. (2001). Olası Deprem Hasarını En Aza İndirmek Amacıyla Yapıların Doğal Salınım Periyotlarının Yerin Baskın Periyodundan Uzak Kılınması. *Uşak İli ve Dolayı (Frigya) Depremleri Jeofizik Toplantısı*, (73-82).
- Barış, D. (2020). Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi. Erişim: 1 Şubat 2021, https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:mND0awKxnkwJ:https://www.researchgate.net/profile/Defne-Baris-2/publication/347424701_Defne_Baris-Zemin-Yapi_Etkilesimi/links/5fdb2f4692851c13fe90cbc7/Defne-Baris-Zemin-Yapi-Etkilesimi+&.
- Bilal, O., Fahjan, Y. ve Önen, Y. H. (2014). Kazık-Zemin Arayüzeyi Parametrelerinin Dinamik Deprem Analizi Açısından Değerlendirmesi. Erişim: 5 Şubat 2021, https://www.researchgate.net/publication/271846607_KAZIK-ZEMIN_ARAYUZEYI_PARAMETRELERININ_DINAMIK_DEPREM_ANALIZI_ACISINDAN_DEGERLENDIRMESI.
- Çetinkaya, M. Y., Çelebi, E. ve Kırtel, O. (2017). Yapı-Temel-Zemin Sismik Etkileşim Probleminin Adapazarı Bölgesi İçin Empedans Fonksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 20(2) : 325-332.
- Çomaklı, B. (2019). Düşük Ve Orta Yükseklikteki Binalarda Yumuşak Kat Düzensizliğinin Ve Zemin Yapı Etkileşiminin Araştırılması. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Demir, G. (2017). Zemin Davranışı ve Bünye Modelleri. Erişim: 15 Mart 2021, [file:///C:/Users/H%C3%BCseyin%20Ta%C5%9Ftan/Downloads/zemin%20davran%C4%B1%C5%9F%C4%B1%20ders%20notu%20son%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/H%C3%BCseyin%20Ta%C5%9Ftan/Downloads/zemin%20davran%C4%B1%C5%9F%C4%B1%20ders%20notu%20son%20(2).pdf).
- Dincer, C. (2019). Çok Katlı Çelik Yapıların Sismik Davranışının Zemin-Yapı İle Etkileşimi Dikkate Alınarak İncelenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Duman, T. ve Emre, Ö. (2012). Türkiye Diri Fay Haritası. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri*

Odası Haber Bülteni, 2012-2.

Erginsoy, Z. K. (2019). Sığ Temelli Binalarda Bodrum Kat Adedinin Deprem-Zemin-Yapı Etkileşimi Bakımından İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek lisans tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

Ersoy, Ş. (2019). Litosferik Hareketler ve Deprem. Erişim: 24 Mart 2021, <https://avesis.yildiz.edu.tr/sersoy/dokumanlar>.

Funnel, R. (2018). Finite-Element Method. Erişim: 20 Mart 2021, <http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/teach/fem/fem.html>.

Geoteknik Tasarım Esasları, (2007). T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü. Erişim: 15 Mart 2021, <https://aygm.uab.gov.tr/uploads/pages/kiyi-yapilari-deprem-teknik-sartnameleri/mart-2020-geoteknik-tasarim-esaslari.pdf>.

Gökçe, T. (2008). Mevcut Binaların Zemin Yapı Etkileşimini Dikkate Alarak Deprem Performanslarının Değerlendirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.

Itasca. (2011). FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua, FLAC 3D Version 4.0. Itasca Consulting Group. Erişim: 8 Şubat 2021, www.itascacg.com.

Kamal, M. (2021). Zemin-Yapı Etkileşiminin Dikkate Alındığı Orta Katlı Betonarme Binalarda Çekiçlemenin Sismik Davranışlar Üzerindeki Etkileri. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Kanai, K. (1983). *Engineering Seismology*. University of Tokyo Press. pp 128-140.

Kandilli Rasathanesi, (2020). B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi. Erişim: 11 Şubat 2021, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>.

Karabörk, T., Deneme, İ. ve Bilgehan, R. (2010). Temeli İzole Edilen Yapılarda Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1):

77-87.

Kausel, E. (1988). Local Transmitting Boundaries. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, Vol 114, pp. 1011-1027.

Keshishian, P. G. (2001). Analysis of Interconnected Systems Accounting for Spatial Variability of Ground Motions and Soil-Structure Interaction. Unpublished Ph. D. thesis, University of California, Berkeley.

Kılıç, H. (2017). Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Analizler Notları. Erişim: 19 Mart 2021, <http://imoistanbul.org/imoarsiv/geoteknik-kurs-notlari-2017/2-3%20aral%C4%B1k/havvanur-kilic-1.pdf>.

Korkmaz, Ş. (2012). Düşey Ve/Veya Eğik Kazıklı İskele Yapılarında Zemin-Yapı Etkileşimi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, İstanbul.

Koroğlu, M. A. (2017). Deprem Mühendisliği Esasları. Erişim: 1 Mart 2021, <https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/insaatmuhendisligi/editor/DersSayfaları/DepremMuhGir/deprem%20hareketi.pdf>.

Kramer, S. L. (2013). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Pearson Education.

Kutunis, M. ve Elmas, M. (2005). Yapı Zemin Dinamik Etkileşiminde Geometrik Narinlik Etkisi. Erişim: 8 Mart 2021, http://kocaeli2007.kocaeli.edu.tr/kocaeli2005/deprem_sempozyumu_kocaeli_2005/4_yapi_ve_yerlesimler/d_31_yapi_zemin_etkilesimi/yapi_zemin_dinamik_etkilesiminde_geometrik_narinlik_etkisi.pdf.

Mamuk, F. (2010). Üç Boyutlu Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi. Yayımlanmamış Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.

Maviş, S. (2014). Düşey Ve Eğik Kazıklı İskele Yapılarında Zemin-Kazık Etkileşiminin Detaylı Ve Basitleştirilmiş Modeller İle İrdelenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, İstanbul.

- Midorikawa, S. (1987). Prediction of Isoseismal Map in Kanto Plain due to Hypothetical Earthquake. *Journal of Structural Dynamics*, (33B) pp: 43-48 .
- Naiboğlu, H. (2019). Farklı Zemin Koşullarında Kazık-Zemin-Yapı Etkileşiminin Sayısal Analizi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Van.
- Öcal, C., & İnce, H. H. (2012). Türkiye'de Mevcut Yapı Stođu ve Kentsel Dönüşüm. *SDU International Technologic Science*, Vol.4, No 2, pp. 89-95.
- Özpalanlar, C. G. (2004). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemler. Yayınlanmamış Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Öztoprak, S. ve Sarđın, S. (2020). Çanakkale Belediyesi Sınırları İçerisinde İnşaa Edilecek Binalarda Deprem Sırasında Oluşabilecek Sıvılaşma Kaynaklı Hasarın Tahmin Edilmesi ve Azaltılması/Önlenmesi Projesi.
- Öztürk, P. S. ve Işık, N. S. (2015). Sıvılaşan Zeminlerde Kazık Davranışının P-Y Yöntemi ile İncelenmesi. *International Sustainable Buildings Symposium (2 nd)*. Erişim adresi: <http://www.isbs2015.gazi.edu.tr/belgeler/bildiriler/349-354.pdf>.
- PEER, (2020). Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database. (2021, 21 Mart). Erişim adresi: <https://ngawest2.berkeley.edu/site>.
- Rocscience, (2018). Laterally Loaded Piles. Erişim: 3 Nisan 2021, https://www.rocscience.com/help/rspile/pdf_files/theory/RSPile_-_Laterally_Loaded_Pile_Theory.pdf.
- Sarı, C. (2020). Şev Kazıklarında Zemin-Yapı Etkileşiminin Analizlerle İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı, İstanbul.
- Sarıoğlu, İ. (2020). Statik İtme Ve Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz Yöntemlerinin Zemin Yapı etkileşimi Dikkate Alınarak İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

- Sesli, H. (2013). Zemin Sınır Şartlarının Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Severcan, M. H. (2004). Dinamik Yapı-Zemin Etkileşim Problemleri İçin Sınır Eleman Formülasyonu. Yayımlanmamış Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Siyahi, B., Çetin, K. Ö. ve Bilge, H. T. (2013). Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış. *ZMGM (Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Derneği) Geoteknik Sempozyumu*, (5), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Şen, K. (2019). Demiryolu Köprülerinde Zemin-Yapı Etkileşimi. Yayımlanmamış Yüksek lisans tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı, Sakarya.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Erişim: 8 Aralık 2020, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf>.
- TDTH İnteraktif Web Uygulaması*, (2021). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020, 8 Aralık). Erişim adresi: https://giris.turkiye.gov.tr/Giris/gir?oauthClientId=824612ca-ff05-4cef-b74a-446363af1669&continue=https%3A%2F%2Fgiris.turkiye.gov.tr%2FOAuth2AuthorizationServer%2FAuthorizationController%3Fresponse_type%3Dcode%26client_id%3D824612ca-ff05-4.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. ve Sheriff, R. E. (1976). *Applied Geophysics*. Cambridge Universty Press.
- Tongaonkar, N. P. ve Jangid, R. S. (2003). Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-structure Interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23: 287-302.
- TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, (2000). Türk Standartları

Enstitüsü.

TS 708 Çelik - Betonarme İçin Donatı Çeliği, (2016). Türk Standartları Enstitüsü.

Utkucu, M. (2012). Depremle Yaşamak. Erişim: 14 Mart 2021, https://jfm.sakarya.edu.tr/sites/jfm.sakarya.edu.tr/file/Sunu3_Depremler.pdf.

Ünsal, S. (2017). GTS NX ile Kolay 3D Fore Kazıklı Köprü Temeli Analizi (2021, 19 Şubat). Erişim adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=bX50Dz4m198>.

Ünsal, S. (2020). GTS NX ile 1D, 2D ve 3D Dinamik Analizler. (2021, 19 Şubat). Erişim adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=nRqxP6WJoy0>.

Ünsal, S. (2020). Zemin Yapı Etkileşimli Sonlu Elemanlar Analizleri. Erişim: 5 Mart 2021, http://ankara.imo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=33338&tipi=79&sube=3.

Vesic, A. (1973). Analysis of Ultimate Load of Shallow Foundations. *ASCE, JSMFD*, Vol.99, SM. 1, pp:45-73.

Wasti, Y. Zemin Dinamiği Problemlerinde Kullanılan Zemin Parametrelerinin Tayini. Erişim: 11 Ocak 2021, <http://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=1721>.

Xu, J., Costantino, C., Hofmayer, C. ve Ali, S. (2004). Seismic Response Prediction of NUPEC's Field Model Tests of NPP Structures With Adjacent Building Effect. *ASME-PVP Conference*, California, USA.

Yalçın, H., Gülen, L. ve Utkucu, M. (2013). Active Fault Data Base and Assesment of Earthquake Hazard for Turkey and Surrounding Regions. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 34 (3), 133-160.

Yeşilce, Y. ve Demirdağ, O. (2003). *Deprem Parametreleri*. İmo Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı - Deprem Sempozyumu.

Yıldız, S. Ç., Özden, S., Tutkun, S. Z., Ateş, Ö., Poyraz, S. A., Yeşilyurt, S. K. ve Karaca, Ö. (2013). Ganos Fayı Boyunca Geç Senozoyik Yaşlı Gerilme Durumları, KB Türkiye. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Türkiye Jeoloji Bülteni*. Cilt 56, Sayı 1.

Zaimoğlu, A. Ő. (1996). Erzurum Őehir Merkezinde Zemin+Yapı Etkileşimi ve Deprem Hasarları. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

İsim SOYİSİM :
Doğum Yeri :
Doğum Tarihi :

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi :
Yüksek Lisans Öğrenimi :
Bildiği Yabancı Diller :

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl:

İLETİŞİM

E-posta Adresi :

ORCID :