

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİSMİK YÜKLER ALTINDA ZEMİN KAZIK YAPI
ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

Cemre Cenani CİVCİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİSMİK YÜKLER ALTINDA ZEMİN KAZIK YAPI
ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

Cemre Cenana CİVCİK tarafından hazırlanan tez çalışması 05.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üye. Murat Ergenokon SELÇUK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür YILDIZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi Üniversitesi

Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ, Üye
Aksaray Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Sismik Yükler Altında Yapı Kazık Zemin Etkileşimi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Cemre Cenân CİVCİK



*Aileme
ve
eşime*

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim sürecim başa olmak üzere tez çalışmalarım boyunca bilgi birikimlerinden yararlandığım, başından beri beni meslektaş olarak görerek yol gösteren ve destek olan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında göstermiş olduğu yardım ve katkılarından dolayı değerli tüm bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez komitemde yer alan Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ ve Dr. Öğr. Üyesi Özgür YILDIZ'a, değerli görüş ve önerileri için teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen Geobos Zemin Güçlendirme Sistemleri İnşaat Mühendislik Taahhüt ve TİC. LTD. ŞTİ. Firması'na teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, tez sürecim boyunca, her anımda beni tolere eden elimden tutan başta eşim Ekrem CİVCİK olmak üzere annem Nurhan GÜRTÜRK, ablam Günce Cenani ERDEM'e teşekkür ederim.

Bu tez aileme ve rahmetli babam Kadir Kaan GÜRTÜRK'e ithaf edilmiştir.

Cemre Cenani CİVCİK

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Sismik Dalga Yayılımı	12
1.3 Hareket Denklemi	13
1.4 Sönümleme	15
1.5 Serbest Titreşim	16
1.6 Zeminin Doğrusal Olmayan Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı	18
1.7 Saha Tepki Analizi	23
1.8 Tepki Spektrumu	26
1.9 Spektrum Analizi	28
1.10 Dinamik Zemin-Yapı Etkileşim	28
1.10.1 Doğrudan, Direkt Yöntem (Ortak Sistem):	30
1.10.2 Alt Sistem Yöntemi:	31
1.11 Sonlu Eleman Analizi: PLAXIS	34
1.11.1 PLAXIS 2D'de bir kazığın modellenmesi	38
2 YER HAREKETİ KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE SPEKTRAL UYUŞUM	43
2.1 Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Seçilmesi	45
2.2 Spektral Uyuşum Sağlanması	47
3 1 BOYUTLU VE 2 BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN YER TEPKİ ANALİZLERİ	55
3.1 DeepSoil ile 1 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi	56
3.2 Plaxis ile 1 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi	59
3.3 Plaxis ile 2 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi	62
3.4 DeepSoil 1boyutlu, Plaxis 1 Boyutlu ve Plaxis 2 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizlerinin karşılaştırılması	62
4 PLAXIS İLE 2 BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN YAPI KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ	72
4.1 1. Zemin Modeli Serbest Saha Analizi	76

4.2	1. Zemin Modeli Yapı+Zemin Etkileşimi.....	81
4.3	1. Zemin Modeli Yapı+Kazık+Zemin Etkileşimi	86
4.4	2. Zemin Modeli Serbest Saha Analizi	93
4.5	2. Zemin Modeli Yapı Zemin Analizi.....	95
4.6	2. Zemin Modeli Yapı+Kazık+Zemin Etkileşimi	97
4.7	1. ve 2. Zemin Modeli Analiz Karşılaştırılması.....	101
5	SONUÇ	102
	KAYNAKÇA	113
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	117



SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal Frekans
S_1	Bir Saniye Periyot için Harita Spektral İvme Katsayısı
S_{D1}	Bir Saniye Periyot için Tasarım Spektral İvme Katsayısı
F_1	Bir Saniye Periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı
γ	Birim Hakim Ağrlık
G_0	Çok Küçük Birim Deformasyonlara Tekabül Eden Kayma Modülü
u	Denge Konumundan Kütle Yer Değiştirmesi
$\ddot{u}$	Denge Konumundan Kütlenin İvmesi
$P(t)$	Deprem Kaynaklı Dış Kuvvet
v	Diklemesine Parçacık Hareketi
ω_n	Doğal Açısal Frekans
T_D	Doğal Periyot
c_u	Drenajsız Kohezyon
$\gamma_{0.7}$	$G_s/G_0 = 0.722$ Durumundaki Kayma Birim Deformasyonu
$\ddot{u}(t)$	Hız
Φ	İçsel Sürtünme Açısı
γ	Kayma Birim Deformasyonu
V_s	Kayma Dalgası Hızı
G	Kayma Modülü
F_s	Kısa Periyot Bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı
S_s	Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
S_{DS}	Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
c_{cr}	Kritik Sönümleme Katsayısı
m	Kütle
$u_g(t)$	Kütle ile Yer Arasındaki Göreceli Yer Değişimi
α	Rayleigh Katsayısı, Kütle Matrisi
β	Rayleigh Katsayısı, Sertlik Matrisi
G_s	Sekant Kayma Modülü
k	Sertlik
M	Sıkışma Modülü
V_p	Sıkıştırma Dalgası Hızı
c	Sönümleme Katsayısı
C	Sönümleme Matrisi
ξ	Sönümleme Oranı
T_n	Sönümsüz Doğal Periyot
K_0	Sükunetteki Toprak Basıncı
u	Uzunlamasına Parçacık Hareketi
g	Yerçekimi İvmesi
$u_t(t)$	Yerin Yer Değiştirmesi
$u(t)$	Yerin Yer Değiştirmesi ile Kütle Yer Arasındaki Göreceli Yer Değişiminin Toplamı
ρ	Yoğunluk
E	Young Modülü
t	Zaman
H	Zemin Tabakası Kalınlığı

KISALTMA LİSTESİ

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
HS	Hardening Soil
HSS	Hardening Soil Small
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research
PGA	Maksimum yer ivmesi
PGV	Maksimum yer hızı
PI	Plastisite İndisi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSD	Tek Serbestlik Dereceli



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Basit bir TSD sistemine deprem uyarısı (Clough & Penzien,1993).....	14
Şekil 1.2	Sönümlemenin serbest titreşim üzerindeki etkileri (Chopra, 2007).....	17
Şekil 1.3	Kayma gerilimi ile kayma deformasyonları arasındaki ilişki (Brandt,2014).....	19
Şekil 1.4	Döngüsel yükleme altında zeminin histeretik davranışı (Laera & Brinkgreve, 2015)	19
Şekil 1.5	(a) Omurga eğrisi (b) modül azalım eğrisi (Kramer, 1996)	20
Şekil 1.6	(a) Kayma gerilmesinin zamana bağlı değişimi ve (b) tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer,1996)	21
Şekil 1.7	Plastisite indisindeki değişim ile $G/G_{max} - \gamma_c(a)$ ve $\xi - \gamma_c$ eğrileri(b) (Vucetic & Dobry, 1991)	23
Şekil 1.8	Yer tepkisi terminolojisi: (a) anakaya üzerinde zemin; (b) anakaya üzerindezemin yok. (Kramer, 1996)	25
Şekil 1.9	İki boyutlu düzlem gerilme dinamik tepki analizi sırasında tipik olarak karşılaşılan yaygın sorun örnekleri şunlardır: (a) konsol duvar, (b) toprak barajı, (c) tünel (Kramer, 1996).	26
Şekil 1.10	Tepki spektrumunun oluşturulması (Stensløkken, 2016).....	27
Şekil 1.11	Ortalama tepki spektrumları (Seed,Ugas, & Lysmer, 1976).....	28
Şekil 1.12	Üç-adım yöntemi (Kausel, Whitman, Morray, & Elsabee, 1978).....	29
Şekil 1.13	Direkt (Dogrudan) yöntem modeli	30
Şekil 1.14	Altsistem yöntemi modeli	31
Şekil 1.15	Kinematik etkileşim (adım 1).....	32
Şekil 1.16	Eylemsizlik etkileşimi için zeminin eşdeğer dinamik rijitlik matrisi.....	33
Şekil 1.17	Eylemsizlik etkileşimi (üstyapı-temel) analizi	33
Şekil 1.18	Elastik-plastik davranışın stres ve gerinim ilişkisi	35
Şekil 1.19	Asal gerilme alanında gösterilen başlık ile HS akma yüzeyi	36
Şekil 1.20	Modül azalma eğrisi örneği	37
Şekil 1.21	Kazık davranışı, kazık mesafesine ve kazık çapına göre ilişkisi.....	38
Şekil 1.22	3D kazık ve etrafındaki elastik bölge (Brinkgreve vd., 2015).	40
Şekil 1.23	Zemin-kazık etkileşimi, Plaxis	41
Şekil 1.24	Kazık tabanını çevreleyen plastik bölge (Sluis, 2012).	42
Şekil 2.1	Deprem kayıtlarının filtrelenmesi, (PEER, 2006)	46
Şekil 2.2	Filtreleme sonucunda elde edilen deprem kayıtları, (PEER, 2006)	46
Şekil 2.3	Seçilen 3 farklı deprem kayıtlarının ivme zaman grafikleri	47
Şekil 2.4	Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN169 deprem kaydı	50
Şekil 2.5	Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN169 deprem kaydı	50
Şekil 2.6	Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN1121 kaydı	51
Şekil 2.7	Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN1121 deprem kaydı.....	51
Şekil 2.8	Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN5823 kaydı	52
Şekil 2.9	Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN5823 deprem kaydı.....	52
Şekil 2.10	Hedef ve orjinal spektrumların grafiği, tüm deprem kayıtları.....	53
Şekil 2.11	Hedef ve eşleştirilmiş spektrumların grafiği, tüm deprem kayıtları.....	53
Şekil 3.1	Belirlenen zemin profillerine göre kayma modülü azalım oranı ile çevrimsel birim kayma deformasyonu arasındaki ilişki	59
Şekil 3.2	Kayma modülü azalım oranı ile çevrimsel birim kayma deformasyonu arasındaki ilişkiden HSS model girdisi elde edilmesi	60
Şekil 3.3	DeepSoil 1D(a), Plaxis 1D(b) ve Plaxis 2D(c) analiz modelleri.....	63

Şekil 3.4	Farklı deprem kaydına ait deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, kil zemin	64
Şekil 3.5	3 Farklı deprem kaydına ait elde edilen deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının ortalamasına ait periyot ve spektral ivme grafiği	65
Şekil 3.6	3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, Kil zemin	66
Şekil 3.7	Model sınır ve genişliğinin incelendiği analiz sonuçları, kil zemin	67
Şekil 3.8	3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, kum	68
Şekil 3.9	3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının ortalama periyot ve spektral ivme grafiği	69
Şekil 3.10	3 Farklı deprem kaydına ait periyot ve spektral ivme grafiği	70
Şekil 4.1	Sistemin kesit ve plan görüntüsü	71
Şekil 4.2	Serbest saha (free field) analizi	72
Şekil 4.3	Zemin + yapı etkileşimi	72
Şekil 4.4	Zemin + kazık + yapı etkileşimi	72
Şekil 4.5	Yapı + zemin + kazık sisteminin numaralandırılması	74
Şekil 4.6	Yapı + zemin sisteminin numaralandırılması	74
Şekil 4.7	1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN169	76
Şekil 4.8	1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN5823	77
Şekil 4.9	1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN1121	78
Şekil 4.10	1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, ortalama	79
Şekil 4.11	1. ve 2. Zemin profilinde yapının periyodunu belirlenmesi	80
Şekil 4.12	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN169	81
Şekil 4.13	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN5813	82
Şekil 4.14	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN1121	83
Şekil 4.15	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama	84
Şekil 4.16	Kazık + yapı sisteminin periyodunu belirlenmesi	85
Şekil 4.17	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN169	86
Şekil 4.18	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN5813	87
Şekil 4.19	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN1121	88
Şekil 4.19	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama	89
Şekil 4.19	1. Zemin modeli analizleri deprem kaydı karşılaştırılmaları, 1. nokta	90
Şekil 4.22	1. Zemin modeli analizleri karşılaştırılmaları, 1. nokta	90
Şekil 4.23	1. Zemin modeli maksimum değerlerin karşılaştırılması, 1. nokta	91
Şekil 4.24	2. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama	92
Şekil 4.25	Serbest saha analizi maksimum değerlerin karşılaştırılması	93
Şekil 4.26	2. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama	94
Şekil 4.27	Zemin+yapı analiz maksimum değerlerin karşılaştırılması	94
Şekil 4.28	Serbest saha ve zemin+yapı analizleri karşılaştırılması	95
Şekil 4.29	2. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama	96
Şekil 4.30	Kazık + zemin+yapı analiz maksimum değerlerin karşılaştırılması	97
Şekil 4.31	2. Zemin modeli analizleri deprem kaydı karşılaştırılmaları, 1. nokta	98
Şekil 4.32	2. Zemin modeli analizleri karşılaştırılmaları, 1. nokta	98
Şekil 4.33	2. Zemin modeli analizleri maksimum değerler karşılaştırılmaları	98
Şekil 4.34	1. ve 2. Zemin modeli analizleri ivme zaman grafiği, 1. nokta	100
Şekil 4.35	1. ve 2. Zemin modeli analizleri karşılaştırılmaları, 1. nokta	100

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	İnceleme alanı deprem parametreleri.....	43
Tablo 2.2	Yerel zemin katsayıları	44
Tablo 2.3	Yerel zemin etki katsayıları, kısa periyot bölgesi için.....	44
Tablo 2.4	Yerel zemin etki katsayıları, 1.0 saniye periyot için.....	44
Tablo 2.5	Elde edilen yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu	44
Tablo 2.6	Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler	47
Tablo 2.7	Deprem kayıtlarının parametreleri, orjinal	54
Tablo 2.8	Deprem kayıtlarının parametreleri, eşleştirilmiş	54
Tablo 3.1	Zemin parametreleri.....	59
Tablo 3.2	Zemin parametreleri, Plaxis programında kullanılan	61
Tablo 3.3	3 Farklı deprem kaydının ortalamasına ait elde edilen deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının özet tablosu	65
Tablo 3.4	Deprem kayıtlarının ortalaması, analiz sonuçlarının özet tablosu, kil.....	67
Tablo 3.5	Deprem kayıtlarının ortalamasının analiz sonuçlarının özet tablosu.....	69
Tablo 4.1	Kazık Malzemesi Özellikleri.....	73
Tablo 4.2	Numaraların açıklamaları	74
Tablo 4.3	1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN169	76
Tablo 4.4	1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN5823	77
Tablo 4.5	1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN1121	78
Tablo 4.6	1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, ortalama	79
Tablo 4.7	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN169.....	81
Tablo 4.8	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN5813.....	82
Tablo 4.9	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN1121.....	83
Tablo 4.10	1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama	84
Tablo 4.11	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN169.....	86
Tablo 4.12	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN5813.....	87
Tablo 4.13	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN1121.....	88
Tablo 4.14	1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama	89
Tablo 4.15	2. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, ortalama	92
Tablo 4.16	2. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama	94
Tablo 4.17	2. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler.....	96
Tablo 4.18	1. Zemin modeli analizlerindeki maksimum değerler	104
Tablo 4.19	2. Zemin modeli analizlerindeki maksimum değerler	106

Sismik Yükler Altında Yapı Kazık Zemin Etkileşiminin İncelenmesi

Cemre Cenân CİVCİK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK

Yapısal analizlerde kullanılan ivme spektrumlarının, çeşitli yönetmeliklerde (TBDY, Eurocode, ASCE) nasıl elde edileceği belirtilmektedir. İvme spektrumları, inceleme alanının koordinatlarına, deprem düzeyine ve zemin sınıfına göre belirlenen yerel zemin etki sayıları gibi değerler ile hesaplanabilmektedir. Farklı zemin koşullarında projeye özgü zemin davranış analizleri yapılarak ivme spektrumları oluşturulabilmektedir. Bu kapsamda ivme spektrumlarındaki periyot ve ivme değerlerinde değişimler oluşabilmektedir. İvme spektrumlarının yapısal analizlerde elde edilmesi ve bu spektrumların zemin koşullarına, serbest sahada, yapı mevcutken ve kazıklı yapı tasarımındaki değişimin incelenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında serbest saha, yapı-zemin etkileşimi ve yapı-kazık-zemin etkileşimi konuları ele alınarak tepki spektrumlarındaki değişimler incelenmiştir. İnceleme süreci, ilk olarak 2 boyutlu analizler için 1 boyutlu Deepsoil ve 2 boyutlu Plaxis analizleri gerçekleştirilerek başlamıştır. Bu analizlerde model sınırları, genişlikleri ve zemin parametreleri belirlenmiştir.

Serbest saha için yapılan analizler, kontrol model olarak kullanılmıştır. Ardından, yapı ve zemin arasındaki etkileşimi değerlendirmek için yalnızca Zemin yapı analizi yapılmıştır. Son aşamada ise, kazıklı yapının olduğu zemin kazık yapıetkileşim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yapı-kazık-zemin etkileşimi detaylı bir şekilde incelenmiş ve yapı için ivme spektrumlarındaki değişimler belirlenmiştir.

Bu analizler, yapıların ivme spektrumları üzerindeki değişimleri anlamak ve zemin-kazık-yapı etkileşiminin bu değişimlere olan etkilerini belirlemek için kapsamlı bir temel oluşturmuştur. Elde edilen bulgular, mühendislik uygulamalarında daha hassas ve yerel parametrelere dayalı kararlar alınmasına yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu tez, yapısal tasarımlarda ve deprem dayanıklılık analizlerinde daha etkili ve güvenli çözümler geliştirme amacını taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Serbest saha, yapı-zemin etkileşimi, yapı-kazık-zemin etkileşimi, doğrusal olmayan analiz, tepki spektrumu.

Soil-Pile-Structure Interaction Under Seismic Loads

Cemre Cenani CİVCİK

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Murat Ergenokon SELÇUK

Acceleration spectra used in structural analyses are specified in various regulations (TBDY, Eurocode, ASCE). These spectra can be calculated using values such as local ground effect numbers determined based on the coordinates of the investigation area, earthquake level, and soil class. Acceleration spectra can be generated by performing project-specific soil behavior analyses under different soil conditions. In this context, changes may occur in the period and acceleration values within the acceleration spectra. Analyses were conducted to obtain acceleration spectra in structural analyses and to examine how these spectra change according to soil conditions, both in the free field and in the presence of structures, as well as in pile structure designs.

Within the scope of this thesis, the goal is to analyze the changes in period-spectral acceleration spectra. These changes in acceleration spectra for the structure are analyzed by considering the free field, structure-soil interaction, and structure-pile-soil interaction. The investigation process began by performing 1-D Deepsoil and 2-D Plaxis analyses for 2-D analyses. In these analyses, model boundaries, widths, and soil parameters were determined.

The analyses conducted for the free field were used as a basic reference point. Subsequently, a structure-only soil analysis was performed to evaluate the interaction between the soil and the structure. In the last stage, a soil-pile-structure

analysis with a piled structure was conducted. At this stage, the soil-pile-structure interaction was analyzed in detail, and the changes in the acceleration spectra for the structure were determined.

This study provides an important understanding of how acceleration spectra can change for a given structure under different soil conditions. The results obtained will contribute to making more precise decisions based on local parameters in engineering designs and structural safety analyses.

These analyses provide a comprehensive basis for understanding the variations in the acceleration spectra of structures and determining the effects of structure-pile-soil interaction on these variations. The findings offer important information for making more precise and localized decisions in engineering applications. This thesis aims to develop more effective and safer solutions in structural design and earthquake resilience analyses.

Keywords: Free field, Structure-soil interaction, Structure-pile-soil interaction, Nonlinear analysis, Response spectrum.

1.1 Literatür Özeti

Nguyen vd., (2017) çalışmasında, yüksek deprem riskine sahip bölgelerde orta yükseklikteki binaların desteklenmesi için kullanılan kazık temellerin türünün ve boyutunun zemin-kazık-yapı etkileşimini nasıl etkileyebileceğini araştırmaktadır. Bu çalışma, sayısal simülasyonlar kullanarak, farklı boyutlardaki kazık temellerin 15 katlı moment-dirençli çerçeveye olan etkisini değerlendirmiştir. Çalışmanın sonuçları, kazık elemanlarının türü ve boyutunun, yapıların dinamik karakteristiklerini ve deprem tepkisini önemli bir şekilde etkileyebildiğini göstermektedir. Özellikle, kazık boylarının artması, binanın maksimum yanal deformasyonunu artırmıştır. Kazık elemanlarının uzunluğu, deprem sırasında yapı tarafından emilen toplam kayma kuvvetlerini etkiler; uzun kazıklar, çevredeki zeminle daha fazla temas yüzeyine sahip olduğundan daha fazla enerji sönmüleyebilir ve daha güçlü dirençleri nedeniyle kısa kazıklara göre daha az salınım gösterir. Bu bilgi, yapıların deprem performansını değerlendirirken kazık temel seçiminin kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, bu çalışma, zemin-kazık-yapı etkileşiminin farklı katlarda farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, kazık temel seçiminin, yapıların her seviyedeki deprem tepkisi üzerinde farklı etkileri olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Uzun kazıkların, zemin-yapı etkileşimi göz önüne alındığında güçlü yer hareketleri altında her zaman daha güvenli bir tasarımı garanti etmediği vurgulanmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, benzer şekilde kazık temellerin etkileşimini inceleyen ve yapıların deprem performansını optimize etmeyi amaçlayan gelecekteki araştırmalar için önemli bir referans kaynağıdır.

Hokmabadi vd., (2014) sismik zemin-kazık-yapı etkileşiminin rolü genellikle deprem yüklemeleri altında yapı sistemine faydalı olarak kabul edilir çünkü bu etkileşim, periyodunu uzatır ve sabit temel varsayımına göre sistemde daha yüksek sönmüleme sağlar. Ancak, son depremlerden çıkarılan dersler, sabit temel varsayımının yanıltıcı olabileceğini ve depremli durumda etkileşiminin etkisinin göz ardı edilmesinin özellikle yumuşak zeminlere oturan yapılar için güvensiz

tasarımlara yol açabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, sismik zemin-kazık-yapı etkileşimi daha iyi anlamak amacıyla üç farklı durumu içeren bir dizi sarsma masa testi gerçekleştirilmiştir: (i) zemin-yapı etkileşimini dışlayan durumu temsil eden sabit temel yapısı; (ii) yumuşak zemin üzerine oturan sığ temel destekli yapı; ve (iii) yumuşak zemin üzerinde yüzen kazık temelli yapı. Sarsma masa testleri sırasında sınır etkilerini minimize etmek amacıyla bir laminar zemin konteyneri tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Ayrıca, FLAC3D kullanılarak gerçekleştirilen tamamen doğrusal olmayan üç boyutlu sayısal model, söz konusu üç durum üzerinde zaman tanım alanlı analiz gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Sayısal model, zeminin çevrim içi kesme gerilmesinin enerji emici özelliklerini yakalayan histerik sönümleme algoritmasını benimsemektedir. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar, sismik zemin-kazık-yapı etkileşiminin, yüzen kazık temelleri üzerine oturan yapıların yanal sapmalarını ve kat arası kaymalarını sabit temel yapılarına kıyasla artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, depremli durumda etkileşimi, yumuşak zemin üzerine oturan yapıların performans seviyesini etkiler, katlar arası kaymalarını artırır ve bu da yapının performans seviyesini yaşamsal güvenliğinden neredeyse çökme seviyesine kadar kaydırabilir. Bu nedenle, gerçek deformasyonu göz ardı etmek, hem sığ hem de kazık temelli durumlarda, yapısal ve yapısal olmayan elemanların tahmini hasar seviyelerini ve zemin-yapı sisteminin lateral yük taşıma mekanizmasını etkileyen yanıltıcı değerlendirmelere yol açabilir.

Chu ve Truman (2004) Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi, rijit yapıların ve kazık temellerin dinamik analizi ve deprem tasarımında önemli bir etkiye sahiptir. Deprem uyarıları altında zemin sertliğindeki azalma nedeniyle, kazık temel konfigürasyonları zemin-kazık-yapı sistemlerinin deprem tepkisini etkiler. Söz konusu çalışmanın konusu, zemin ile kazığının ortak sisteminde depremin tepkisini irdelemektir. Bu kapsamda 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ile lineer ve nonlinear zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Bu analizler farklı yapı ve kazık durumları için belirlenen sistemlerin deprem etkisindeki performansını inceleyebilmek için yöntem sunulmuştur. Sismik zemin kazık kinematik etkileşimini detaylı bir şekilde analiz ederek, biri 2x2 kazık temel sistemini diğeri ise farklı zemin özellikleri ve kazık aralık oranları içeren 3x3 kazık temel sistemini karşılaştırmaktadır. Hem harmonik hem de belirli deprem uyarıları

dikkate alınmıştır. Malzemenin modeli olarak Drucker-Prager modeli kullanılmış olup, Abaqus program ile nonlinear analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde birden fazla değişkenin etkileri incelenmiştir. Kazıkların aralığı, çap oranları ve zemin ile kazığın rijitlik oranlarındaki farklılıkların ortak sistemdeki depremin etkileri irdelenmiştir. Konu olan çalışmada, zeminin mukavemet ve fiziksel özellikleri, kazık ile beraber sistem davranışı sergilediği durumda davranışın değiştiği ve bu değişimin büyük ölçüde olduğu aktarılmaktadır. Ancak kazıkların aralık oranlarının kazıkların başında meydana gelen davranışı çok az miktarda etkilediği ifade edilmiştir. Sistemin deprem performansını incelemek için kazık sayısının etkilerini araştırmak için sistemli bir çalışma önerilmektedir. Toprak özellikleri, kazık başı ivmesi, kazık başı deplasmanı ve zemin-kazık sisteminin deprem etkileşimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Genel olarak, geniş aralıklı kazık gruplarının, yakın aralıklı kazık gruplarına kıyasla biraz daha büyük kazık başı tepkilerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, kazık aralık oranlarının zemin-kazık sistemlerinin deprem tepkileri üzerinde genel etkileri ihmal edilebilir düzeydedir. Kazık sayısının kazığın en üst seviyesinde oluşan ivme üzerindeki etkisi sınırlı olmasına rağmen, kazık sayısının kazık başı deplasmanı üzerindeki etkileri, özellikle belirli kazık aralık oranları ve El Centro deprem kaydı önemlidir. Daha detaylı bir araştırma yapılması önerilerek, zemin-kazık temel sistemlerinin deprem performansı üzerinde kazık sayısının etkilerinin daha derinlemesine anlaşılmasına vurgu yapılmaktadır.

Zhang vd., (2017) yumuşak kaolin kilindeki kazık gruplarının davranışını incelemek santifirij model tekniğiyle incelemiştir. Kazık-radye temel sisteminin rijitlik-kütle oranının hem ivme tepkisini hem de kazık eğilme momenti tepkisini etkilediği; kazık aralığının ivme tepkisini belirgin bir şekilde etkilemediği, ancak kazık eğilme momenti tepkisini önemli ölçüde etkilediği bulundu. Ayrıca, 4×3 kazık grubundaki kazıkların sırasının kazık eğilme momentini de etkilediği gözlemlendi. Ayrıca, kaolin kilini modellemek için hiperbolik-histeretik bir toprak constitutive model kullanarak, bir dizi üç boyutlu sonlu eleman analizi, deprem santrifüj testleriyle karşılaştırmak üzere gerçekleştirildi. Sezgisel bir şekilde, santrifüj testi ile sayısal hesaplamalar arasında oldukça iyi karşılaştırmalar elde edildi; bu da 3D sonlu eleman modelleme prosedürünün hiperbolik-histeretik bir toprak constitutive model ile deprem santrifüj testlerini tamamlamak için

genişletilebileceğini göstermektedir. 2×1 seyrek (kazık aralığı 9D), 2×1 yoğun (kazık aralığı 3D), 2×3 (kazık aralığı 3D) ve 4×3 (kazık aralığı 3D) kazık-raft modellerine odaklanan 4 farklı sayısal simülasyon gerçekleştirildi. İvme yönünden, hem kil yüzeyi hem de raft ivme yanıtları için hakim periyodun ivme amplifikasyon etkisi ve uzama etkisi gözlemlendi, ancak uzama etkisi kil yüzeyi ivme yanıtları için daha belirginken raft ivme yanıtları için belirgin değildi. Kil yüzeyi ve raft ivme yanıtları arasındaki farklar, zemin-temel etkileşimini hesaba katmadan bina yanıtının dinamik analizi için serbest alan yüzey hareketinin kullanımının tam olarak doğru olmadığını, ancak bu yaygın bir mühendislik uygulaması olsa bile göstermektedir. Öte yandan, kazık eğilme momenti tepkisi, kazık grubu büyüklüğü ve kazık arası mesafe tarafından önemli ölçüde etkilenebilir. Ayrıca, 4×3 kazık grubu için dıştaki ve iteki kazıklar arasındaki maksimum eğilme momenti profilleri genellikle farklıdır. Santrifüj deneyleri, kazık gruplarının yumuşak zeminde gömülü olduğu deprem tepkisi üzerine odaklanan ivme ve kazık eğilme momenti yanıtlarıyla ilgili bazı test sonuçlarını sunmaktadır. Bu, gelecekteki ilgili santrifüj deneyleri için değerli veri referansları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu çalışmada sunulan sonlu eleman analizi prosedürünü doğrular. Umarım benzer sonlu eleman analizi, diğer toprak-kazık-yapı etkileşimi sorunlarına genişletilebilir ve pratik kazık tasarımı için yumuşak zeminlerde depreme dayanıklılık konusunda bir dizi parametrik çalışma yapılabilir.

Maheshwari vd., (2004) zaman alanında formüle edilen ve zemin malzemesinin doğrusal olmayan etkilerinin deprem tepkisi üzerindeki etkilerini araştıran bir model geliştirilmiştir. Bir yapı alt sistemini ve bir kazık-temel alt sistemini içeren bir alt sistem modeli kullanılmıştır. Sistemin deprem tepkisi, ardışık bağlantılı artımlı bir çözüm şeması kullanılarak bulunur. Her bir zaman adımımda her iki alt sistemin de bağlantılı olduğu varsayılmıştır. Malzeme doğrusallığı, sonlu eleman formülasyonunda gelişmiş bir plastisite tabanlı toprak modeli olan HSS kullanılmıştır. Tekli kazıklar ve kazık grupları dşnlmş ve harmonik ve geçici uyarılar göz önüne alınarak deprem tepkisinin kinematik ve eylemsizlik etkileri incelenmiştir. Doğrusallığın, kazık temellerinin yanı sıra yapıların deprem tepkisini de önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Doğrusallığın tepki üzerindeki etkileri, uyarmanın düşük frekanslarında bir artışa neden olarak

frekansa bağılıdır. Zemin plastisitesinin SPS sistemlerinin deprem tepkisi üzerindeki etkileri, zaman alanında üç boyutlu sonlu eleman analizleri kullanılarak araştırılmıştır. Analizler, bir alt sistem modelini ve ardışık bağlantılı bir artımlı şema içerir. Analizler, hem tekli kazıklar hem de kazık grupları için gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki sonuçlara varılabilir: Etkileşimin etkisi (düşünülen temel ve yapı parametreleri aralığında), genel olarak kazığın başındaki tesirleri arttırmak ancak yapının tepkisini önemli ölçüde azaltmaktır. Harmonik bir uyarı için, zemin doğrusallığı kazık başı ve yapı tepkilerini düşük frekansta artırır. Yüksek frekansta ise hem kazık başı hem de yapı tepkileri toprak doğrusallığından hafifçe etkilenir. Geçici uyarı için, zemin doğrusallığı hem kazık başı hem de yapı tepkilerini artırır. Fourier spektrumları, genel olarak, doğrusallığın düşük ve orta frekanstaki tepkileri artırdığını ancak yüksek frekansta etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Kazık grup etkisi, hem harmonik hem de geçici uyarılar için tepki pik değerlerini azaltır (yani toprak doğrusallığının etkisini azaltır). Bu çalışmada düşünülen parametre aralığına dayanarak, toprak doğrusallığı tepkiyi düşük frekansta artırır ($a_0, 0.2$); ki bu, deprem yüklemeleri için ilgi alanı olan bir aralığı temsil eder. Ancak, bu sonuçların genelleştirilmesi, farklı toprak ve kazık parametreleri ile yapılacak daha fazla analiz gerektirebilir.

Luo vd., (2016) çalışmasında doğrusal olmayan 3D sonlu elemanlı sayısal simülasyonlar kullanılarak deprem etkisi altındaki bir zemin-kazık-yapı etkileşimi (SSPSI) sisteminin dinamik tepkisi araştırılmıştır. Non-reflecting sınır koşulu ve zemin-kazık-yapı etkileşimi ile modellenmiş olan doğrusal olmayan davranışlar dikkate alınmıştır. Zemin zemini için zemin tepki analizinden geliştirilen bir eşdeğer lineer model ve modifiye Drucker-Prager modeli ayrı ayrı kullanılmıştır. İki modelin karşılaştırılması, eşdeğer lineer zemin modelinin bu zemin sarsıntısı altında yapının tahmini ivme tepkisine neden olduğunu ve zemin davranışının SSPSI sisteminin tasarım sürecinde tamamen doğrusal olmayan bir konstitütif model olarak düşünülmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, sistemdeki dinamik tepkisinin zemin-kazık arayüzünün doğrusallığından büyük ölçüde etkilendiği ve zeminin genleşme açısına duyarlı olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kazıklı temellerin SSPSI tepkisi üzerindeki etkisi de analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Zemin-kazık arayüzünün doğrusallığı ve zemin genleşme açısının sistemin

dinamik tepkisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmektedir. Makalenin analizlerinden çıkarılan önemli sonuçlar şunlardır: Eşdeğer lineer zemin modeli ile gerçekleştirilen 3D sonlu eleman analizi sonuçları, 1D eşdeğer lineer analiz sonuçları ile iyi bir uyum içindedir. Zemin doğrusallığı, deprem uyarımı altındaki SSPSI sisteminin yapısal ivme tepkisini büyük ölçüde etkileyebilir ve geleneksel eşdeğer lineer zemin modeli, deprem uyarımı altındaki yapısal ivme tepkisini küçümsemektedir. Depreme maruz kalan SSPSI sisteminin tasarım sürecinde, zemin davranışı doğrusal olmayan bir konstitütif model olarak düşünülmelidir. Zemin ve kazıkların belirgin bir şekilde ayrılma ve birleşme durumu gözlemlenebilir. Zemin-kazık arayüzünün doğrusallığı, sistemin dinamik tepkisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve gerçek zemin-kazık etkileşimlerini simüle etmek için daha uygun bir yapıya sahiptir. Kazık temellerinin varlığı, yapının sallanmasını bastırabilir ve zemin ile yapı arasındaki etkileşim sırasında zemin ve yapı deplasman tepkisini azaltabilir.

Siyahi vd., (2015) çalışmasında kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi, teorik ve uygulama açısından detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Kazıklı temellere sahip yüksek binaların deprem davranışı, sığ veya rijit tabanlı yapıların davranışından farklılığına değışniş olup yumuşak zeminlerde bu etkileşim karmaşık bir problem olduğunu dile getirmiştir. Yapılan çalışmada, Zemin-temel-yapı sisteminin periyodu ile serbest saha hareketinin periyodu arasındaki oranın rezonanstan kaçınabilmek için 1'den uzak olmasının önemine, Yumuşak zeminlerde tasarlanan kazıklarda kinematik etkileşimden dolayı kazık eğilme davranışları kontrol edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca üst yapıdaki eylemsizlik etkileşimi nedeniyle ortaya çıkabilecek hasarlar, genellikle kazığın üst yapı veya kazık başlığı ile birleştiği bölgelerde görülmektedir. Sonuç olarak, bu analizlerin zaman tanım alanında gerçekleştirilmesi ve malzeme modellerinin zemin davranışını doğru bir şekilde temsil etmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sistemin davranışının deprem, zemin, kazık ve radye temel etkileşimi ile belirleneceği, bu nedenle derin temel sistemlerinin seçiminde dikkatli olunması gerektiği belirtilmiştir.

Kurt (2019), çalışmasında 3 ayrı model üzerinde analizlerini gerçekleştirmiştir. 1.model Temel+Kazık+Zemin, 2.Model temel+kazık+zemin+binaykü, 3.Model ise üst yapı+temel+kazık+zeminden oluşmaktadır. Temelin taban seviyesi, kazık orta noktası ve kazık ucundaki deprem hareketinin değışimini incelemiş olup, temel ortasındaki ivmeler 1.modelde en yüksekken 3.modelde en düşük gözlenmiştir. Aynı değerler

temelin dışındaki konumandırılmış noktada da aynı elde edilmiştir. 3. Modelde temel seviyesindeki ivme kaydı ve maksimum ivme değeri daha düşük olmuştur. 1. modelde temel kazık birleşim bölgesinde moment ve kesme değerlerinde maksimum değerler oluşmuş olmuştur. Statik analizlere oranla dinamik analizlerde oluşan maksimum moment değerlerinde 3-7katı oluşmaktadır. Bu değer kinematik etkileşim hesabı ile 3-6 katı oluşurken, iki boyutlu analizlerde 5-7 kat arası tespit edilmiştir. Kesme kuvvetlerinde oluşan fark moment değerine göre daha az oluşmakta olup kinematik etkileşimde 2-3 katı, ortak sistemde ise 3-5 katı olarak hesaplanmıştır. Bina ve temel ağırlığı hesaba katıldığı takdirde moment ve kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelmektedir. Köşe kazıklarda maksimum değerlerin oluştuğu gözlenmiştir.

Alver vd., (2021) çalışmasında, TBDY-2018 temelinde gerçekleştirilen bir vaka çalışması üzerinden geoteknik tasarım, sıvılaşma analizi ve temel sistem tasarımını detaylı bir şekilde ele almaktadır. İnceleme, Bursa'nın Mudanya ilçesinde planlanan bir konut yapısının tasarımına odaklanmıştır. Arazi düz ve engebesiz bir topoğrafyaya sahiptir ve toplam 10 katlı dört blok içermektedir. Zemin profilinde çakıllı kum ve orta sıkı kum tabakaları bulunmaktadır. Yeni yönetmeliğe göre sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiş ve zeminin sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayıları elde edilmiştir.

Analizler sonucunda, sıvılaşmaya karşı düşük güvenlik sayıları elde edilen bölgelerde derin (kazıklı) temel sistemi önerilmiştir. Kazıklı temelin ön boyutlandırılması ve üstyapıdan kaynaklanan statik ve dinamik yükler altındaki davranışı TBDY-2018'e göre detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yönetmelikte önerilen üç farklı yöntemden biri olan Yöntem III'e göre yapılan yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Bahsedilen 2 farklı aşama kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimidir.

Ancak, bu çalışma sırasında yönetmeliğin bazı noktalarda geliştirilmesi gerektiği ve özellikle deprem etkisi altında tasarım için kullanılan deprem kayıtlarının seçimi ve sıvılaşma esnasında temel verilerinin belirlenmesinde yaşanan zorluklar ortaya çıkmıştır. Yönetmelikte belirtilen deprem yer hareketlerine ilişkin eksik veri ve deprem kayıtlarının belirlenmesi sürecindeki zorluklar, tasarım sürecindeki eksikliklere işaret etmektedir.

Yiğit vd., (2022) Türkiye Deprem Yönetmeliği 2018'de yer alan kinematik etkileşim hesaplama yöntemlerinden biri olan Yöntem III'ün hesaplama adımları uygulanarak toprak-kazık etkileşimi incelenmiştir. Analizler, tek kazığın yer altındaki kum, kil ve

tabakalı zeminlere nüfuz etmesi ve kazık grubunun kil zeminine nüfuz etmesi durumları için gerçekleştirilmiştir. Modellerde değişken parametreler olarak kazık çapı, kazık uzunluğu, kazık elastik modülü ve toprak tipi seçilmiştir. Kazık boyu 18 metreden 25 metreye uzadığında, kazıkta meydana gelen kesme kuvveti zemin türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kum zemini için artış oranı %160, kil zemini için %65 ve tabakalı zemin için %42'dir. Eğilme momenti ise aynı sıralamayla %10, %76 ve %7 artmıştır. Kazık boyu 18 metre olduğu halde kazık çapı 0.6 metreden 1 metreye çıkarıldığında, kesme kuvvetinde kumda %60, kilde %50 ve tabakalı zeminde %94 artış gözlemlenmiştir. Kazık boyu 25 metreyken, kesme kuvvetindeki artış oranı yine aynı sıralamada %52, %82 ve %78'dir. Eğilme momentindeki artış ise sırasıyla %300, %105 ve %166'dır. Kazık elastisite modülünün artması, kazıkların daha az deformasyona uğramasına ve bu nedenle daha fazla eğilme momenti oluşmasına neden olmuştur. Kum zeminlerinde Q-Z yaylarının yay sabitlerinin daha yüksek olması, kum zeminlerinde kil zeminlere göre daha düşük deformasyonlar göstermiştir. İki tabakalı zemin profili olduğunda, kinematik etkilerin arttığı gözlemlenmiştir. Kazıklar grup olarak modellendiğinde, kinematik etkilerin tekil kazıklara göre azaldığı ancak grup kazık analizlerinde TBDY-2018'e göre kazık yüklerinin deprem yönüne bağlı olarak kazık sırasına göre kuvvetlerin azaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tüm analiz sonuçları göstermektedir ki, kazık boyu ve çapındaki artışlar kazığa etki eden eğilme momenti ve kesme kuvvetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum, kazıklı temel tasarımında yüklerin yanı sıra olası oturma miktarlarının da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Akın (2021), Bu tez kapsamında, İstanbul ilinde güçlendirilmiş bir yapı altındaki kazıkların TBDY-2018'e göre yapı-kazık-zemin etkileşimi hesaplarına (Yöntem-III) odaklanılmıştır. Analizler, değişik kazık çapları ve deprem takımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, mevcut temel altındaki kazıkların üstyapı yüklerini güvenle taşıdığını ve kazık kapasitelerinin yeterli olduğunu göstermiştir. Çalışmanın ilk kısmında Ø120 cm çapındaki kazıklar için yapılan analizlerde, farklı deprem takımları kullanıldığında kazıkların kapasite oranlarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak, ikinci kısımda Ø65 cm çapındaki kazıklar için yapılan analizlerde kazık çapının azalmasıyla kazık kapasite oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, zemin kalitesinin kazık kapasite oranları üzerinde etkili olduğu, daha iyi zeminlerde kapasite oranlarının düşük kaldığı, kötü zeminlerde ise arttığı görülmüştür. Farklı kazık çapları ve değişik deprem takımları kullanılarak yapılan Yöntem III analizlerinin sonuçları incelendiğinde, kazıklarda meydana gelen iç

kuvvetlerin ve kazık taşıma kapasite oranlarının kazık çapının azaltılmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kazık çapının etkileşim analizleri sonucunda optimum çapın belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, kazık çaplarının sabit tutulduğu ve yalnızca deprem takımlarının değiştirildiği durumlarda kazıklarda meydana gelen iç kuvvetlerde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu durum, kazık çapının değişiminin iç kuvvetlere majör bir etki yapmadığını, ancak deprem takımlarının değiştirilmesinin kazık performansını etkilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, analizlerin genelinden elde edilen bulgular, kazık çapının azaltılmasıyla kazık kapasite oranlarının arttığını ve bu değişikliklerin deprem takımlarıyla birlikte değerlendirilerek optimum çapın belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Keskin, (2018) çalışmasında TBDY 2018'e göre kazıklı betonarme çerçeve sistem için iki farklı zemin profilinde doğrusal olmayan üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir.

Zemin profillerinde yapılan serbest saha tepki analizlerinde temel altındaki spektrumların kayada tanımlanan spektrumlardan daha yüksek elde edilmiştir. 2 farklı zemin profilinden 1.sinde(Kil Birim) yapıyı etkileyecek şekilde artarken 2. Zemin profilinde(Çakıl Birim) spektrum değerlerinin periyot değerlerinin ötelendiği tespit edilmiştir. İki farklı zemin profiline göre kazıkların iç kuvvetlerindeki değerlerde farklılıklar gözlenmiştir. Tasarlanması planlanan kazıklar deprem ve zeminin etkilerinden dolayı binanın temel altındaki hareketlerin genlik ve frekans içeriklerini değiştirmektedir.

İnce & Yılmazoğlu, (2014) çalışmasında, deprem sırasındaki yüzey yer hareketini incelemek ve bu hareketin farklı zemin kesitlerinde nasıl değiştiğini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu analizler bir boyutlu (1D) ve iki boyutlu (2D) yaklaşımlarla yapılmıştır, bu da analiz sonuçlarının daha ayrıntılı ve kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Çalışmanın giriş bölümünde deprem dalgalarının zemin türlerinden geçerken nasıl değişebileceği ve bu değişikliklerin yapılar üzerindeki etkisini artırabileceği vurgulanmıştır. Yerel zemin koşullarının, deprem dalgalarının genlik ve frekans özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve bu nedenle zemin hareketinin yapılar üzerinde etkili olduğu açıklanmıştır. Çalışma alanı olarak İstanbul'un tarihi yarımadası seçilmiştir ve bu bölgenin jeolojisi ve topografyası detaylı bir şekilde incelenmiştir. Farklı formasyonların ve zemin derinliklerinin olduğu beş farklı kesit seçilmiş ve bu

kesitlerin özellikleri açıklanmıştır. Analizler için kullanılan yöntemler ve parametreler ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Deprem ivmesi için İstanbul'daki depremleri temsil eden sentetik ivme kullanılmış ve farklı zemin derinliklerinde pik yer ivmesi ve ivme spektrumu değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ve matematiksel yöntemler detaylı olarak tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarına gelindiğinde, farklı zemin kesitlerinde yüzey yer hareketinin nasıl değiştiğini gösteren grafikler sunulmuştur. Bu grafikler, yüzey topografyasının, yerel zemin koşullarının ve zemin derinliğinin yüzey yer hareketi üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Özellikle 2D analizlerin, 1D analizlere kıyasla daha büyük ivme değerleri ürettiği ve bu değerlerin farklı zemin koşullarında nasıl değiştiği gösterilmiştir. Ayrıca, yüzey topografyasının ivme değerleri üzerinde etkili olduğu ve bu etkinin analiz sonuçlarını nasıl etkilediği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Zemin davranışının anlaşılması, yapıların daha güvenli bir şekilde tasarlanması ve depreme karşı daha iyi hazırlıklı olunması açısından büyük önem taşır.

Yu vd., (2020) Bu çalışma, sismik olarak aktif bölgelerde bulunan enerji yapılarının, özellikle deniz üstü rüzgar çiftlikleri gibi yeni yapıların tasarımı ve mevcut enerji yapılarının deprem yüklemelerinin değerlendirilmesi için zemin tabakalarının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesinin neden kritik olduğunu incelemektedir. Çalışma, Tayvan Boğazı'ndaki bir deniz üstü rüzgar enerjisi santrali geliştirme alanında gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Analizler, DEEPSOIL ve Cyclic 1D kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, pik yer ivmesi, ivme zaman geçmişleri ve tasarım yanıt spektrumları gibi belirli derinliklerdeki parametreleri karşılaştırarak değerlendirilmiştir.

Ayrıca, sismik risk değerlendirmesi bağlamında yer tepki analizinin önemi üzerinde durulmuştur. Yer tepki analizi, zemin tabakalarının sismik dalgaların enerjisi, frekans içeriği ve diğer temel özelliklerini nasıl etkilediğini inceleyerek bu etkiyi daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Elde edilen yer tepki analiz sonuçlarının tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı programların kullanılabileceği ve sonuçların güvenilir olduğu anlamına gelir. Her programın kendi avantajları ve sınırlamaları olsa da, hangi programın kullanılacağı veya tercih edileceği, kullanıcının hedeflerine ve analiz gereksinimlerine bağlıdır. Sonuç olarak, bu çalışma, enerji yapılarının deprem etkilerini daha iyi anlamak ve

tasarlamak için zemin tabakalarının güvenilir tahminlerinin ne kadar önemli olduğunu vurgulayan önemli bir katkı sunmaktadır. Bu tür yapıların tasarımı ve güvenliği için yer tepki analizlerinin kullanılması, daha sağlam ve güvenilir enerji yapıları oluşturulmasına katkıda bulunabilir. Kazık temelleri, özellikle altındaki toprakların özellikleri sığ bir temel aracılığıyla gerekli desteği sağlamadığında, yıllardır kullanılmaktadır. Tek kazıkların ve kazık gruplarının dinamik yüklemeler altındaki dinamik davranışı ve analizi, özellikle depremlerde ciddi hasarlar gözlemlendiği için inşaat mühendisliği alanında araştırmacılar ve uygulayıcılar için kırk yıldan fazla bir süredir ilgi odağı olmuştur.

Zemin-yapı etkileşimi çok karmaşık bir fenomendir. Zemin yapı etkileşimi çalışmaları, zemin ve yapı mekaniği, dinamiği, deprem mühendisliği gibi hesaplamalı ve sayısal metodolojiler, uygulamalı matematik gibi bir dizi alandan katkılarla disiplinlerarası bir yaklaşım gerektirir. Zemin-yapı etkileşimi ile ilgili başlıca sorunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir (Kausel):

- Yüzeydeki (veya yakınındaki) dış statik veya dinamik yüklerin bir zemin alanına olan tepkisi. Yapıların kaynaklı yükler, kolon temeli veya radye temeller olabilir ve zaman içinde harmonik (makine temelleri) veya rastgele (rüzgar veya dalga) olabilir.
- Depremler veya yeraltı tünellerinde hızlı hareket eden trenler gibi başka kaynaklardan kaynaklanan deprem titreşimlerine zemin tepkisi.
- Zemin içinde yayılan deprem dalgalarına karşı zemin etkileşimi gösteren rijit yapıların tepkisi.
- Yerleşik temellerin, kazıkların veya tünellerin, doğrudan bu yapısal elemanlara uygulanan statik, harmonik veya geçici yüklerle olan tepkisi.

Kaya üzerine kurulan yapılar, katı kaya'nın aşırı yüksek rijitliği (sertliği) nedeniyle sabit tabanlı yapılar olarak kabul edilir. Ancak, yumuşak bir toprak tabakasındaki yapılar farklı bir tepki gösterir.

Yapıların varlığından etkilenmeyen zemin hareketleri serbest alan hareketleri olarak adlandırılır; ancak temelin serbest alan hareketlerinin deformasyonlarına uyum sağlayamaması, yapı tabanının hareketini serbest alan hareketinden sapmasına neden olur. İkinci olarak, yapıların kendi dinamik tepkisi destekleyen zeminin deformasyonuna neden olur.

Bu nedenle, zemin tepkisi yapı hareketini etkiler ve yapı tepkisi zemin hareketini etkiler; bu durum genellikle zemin-yapı etkileşimi olarak adlandırılır.

Zemin yapı etkileşiminin zemin-yapı sistemi üzerindeki iki önemli etkisi şunlardır (Wolf, 1985):

- Zemin yapı etkileşimi, zemin-yapı sisteminin doğal frekansını, sabit taban koşulları altındaki yapıdan daha düşük bir değere indirir. Diğer bir deyişle, sistem periyodu artar.
- Zemin yapı etkileşimi, etkili sönüm oranını, yapının kendisinden daha büyük bir değere yükseltir.

1.2 Sismik Dalga Yayılımı

Bir deprem meydana geldiğinde, deprem enerjisinin serbest bırakılmasıyla birlikte stres dalgaları yeryüzünün kabuğunda yayılmaya başlar. Sismik dalgalar genellikle gövde dalgaları ve yüzey dalgaları olarak iki gruba ayrılır. Gövde dalgaları, yeryüzünün içinden yayılan P-dalgaları ve S-dalgaları şeklinde görülür. P-dalgaları veya birincil dalgalar, ortamın sıkışma ve seyrekleşme hareketleriyle yayılır. S-dalgaları veya ikincil dalgalar ise ortamda kayma deformasyonuna neden olur ve parçacıkların hareketi, hareket yönüne dik olarak gerçekleşir. Sismik dalgaların yayılma hızı, zeminin mukavemet özelliği olan rijitlik ile ilişkilidir.

Zeminin sıkıştırıldığı durumda, zeminin elastik özelliklerinin artması(sertleşmesi) sebebiyle P-dalgalarının hareket hızı artar. Yüzey dalgaları ise, gövde dalgalarının yeryüzeyi ile etkileşiminden kaynaklanan dalgalardır.

Rayleigh dalgaları ve Love dalgaları olarak adlandırılan yüzey dalgaları, yeryüzeyi boyunca seyahat eder. Yüzey dalgaları, deprem kaynağına uzak yerlerde daha belirgin bir etkiye sahiptir (Kramer, 1996)

Elastik dalgaların yayılımını tanımlamak için, sonsuz bir boyutlu sınırsız ortamı varsayarak kuvvet dengelemesine dayalı olarak basit bir denklem elde edilebilir. Kramer (1996) tarafından verilen diferansiyel denklem aşağıda gösterilmiştir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Bu denklemde, u uzunlamasına parçacık hareketini, v ise diklemesine parçacık hareketini temsil eder. E Young modülünü, M ve G sırasıyla sıkışma ve kayma modülünü, ρ ise malzemenin yoğunluğunu ifade eder.

$$M = \frac{(1-\nu)}{[(1+\nu)(1-2\nu)]} E \quad (1.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.3)$$

Ayrıca, sıkıştırma ve kayma dalgası hızları şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1.4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.5)$$

Sıkıştırma dalgası hızı (V_p), E ve ρ arasındaki ilişkiyle şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.6)$$

Dalga yayılma hızı, malzemenin özelliklerine (rijitlik ve yoğunluk) bağlıdır ve gerilme dalgasının genliğinden bağımsızdır. Rijitlik arttıkça, dalga yayılma hızı da artarken yoğunluk arttıkça dalga yayılma hızı azalır.

1.3 Hareket Denklemi

Yapıların dinamik davranışını anlamak için genellikle basit tek serbestlik dereceli (TSD) yapılar için hareket denklemi açıklanır. Chopra (2007)'nin serbestlik derecesi tanımı, "tüm kütlelerin yer değiştirmiş konumlarını orijinal konumlarına göre tanımlamak için gereken bağımsız yer değiştirmelerin sayısı"dır.

TSD sisteminin dengesiz serbest titreşimi(dış yük etkisi altında olmadan) için hareket denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1.7)$$

Burada, m yapıya ait kütle, u denge konumundan kütle yer değiştirmesini, $\ddot{u}$ denge konumundan kütle ivmesini, t zamanı ve k ise yapıya ait sertliği temsil eder.

Bu denklem, TSD sisteminin kütle, sertlik ve yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tanımlar. Denklem, kütledeki ivmenin, yer değiştirmeyle doğru orantılı olduğunu ve yapının sertliği tarafından dengelemeye çalışıldığını gösterir.

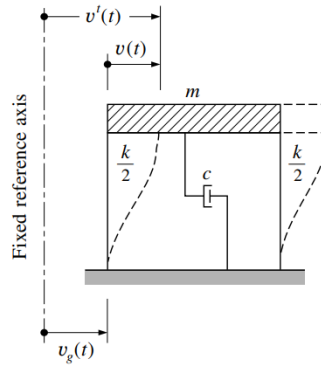
TSD sistemi için hareket denklemi, yapıların doğal frekanslarını, mod şekillerini ve dış kuvvetlere tepkilerini anlamada önemli bilgiler sunar. Yapısal dinamik analiz ve tasarımda temel bir araç olarak kullanılır.

Genellikle, gerçek bir problemi tanımlamak için daha fazla serbestlik derecesine ihtiyaç vardır ve bu durumda çoklu serbestlik dereceli bir sistem olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

Yapı davranışı, deprem hareketine göre değişir. Clough & Penzien (1993) tarafından açıklandığı gibi, kütle toplam yer değiştirmesi, $u_t(t)$, yerin yer değiştirmesi, $u_g(t)$, ve kütle ile yer arasındaki göreceli yer değişimi, $u(t)$, toplamından oluşur. Söz konusu ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$u_t(t) = u_g(t) + u(t) \quad (1.8)$$

Bu denklem, yapıya etki eden deprem hareketi ile birlikte yer değişikliklerinin ilişkisini tanımlar ve yapının davranışını karakterize eder.



Şekil 1.1 Basit bir TSD sistemine deprem uyarısı (Clough & Penzien, 1993)

Zemin ivmesi ve yapının ivmesi (zemin ivmesine göre göreceli olarak) ikinci dereceden türev alınarak elde edilebilir ve aşağıdaki denklemi verir:

$$m\ddot{u}_g(t) = m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1.9)$$

Denklem (1.9) yeniden düzenlenerek şu şekilde ifade edilebilir:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) = P(t) \quad (1.10)$$

Burada, $\ddot{u}(t)$ veya $P(t)$ deprem kaynaklı dış kuvveti temsil eder. Toplam sistemin tepkisi, adım adım entegrasyon yaparak elde edilir (Clough & Penzien, 1993) .

1.4 Sönümleme

Sönümleme, serbest titreşimin genliğinin sürekli olarak azaldığı bir süreçtir. (Chopra, 2007) sönümleme fenomenini, titreşen bir sistemin enerjisini bir veya daha fazla mekanizma aracılığıyla dağılması olarak ifade etmektedir. Bir viskoz sönümleyici varsayıldığında, denklem (1.10) aşağıdaki şekilde olur:

$$m\ddot{u}(t) + k\dot{u}(t) + c\ddot{u}(t) = P(t) \quad (1.11)$$

Bu denklemde c sönümleme katsayısı ve $\ddot{u}(t)$ hızıdır. Rayleigh sönümlemesi, dinamik analizlerde uygulanabilir sönümleme sağlamaktadır. Sönümlemenin etkisi, sistemin matrisi içinde toplanır. Söz konusu bu matris kütle ve sertliktir. Rayleigh sönümleme matrisi C ile ifade edilirken, kütle matrisi α kısmı, sertliğin matrisi ise β kısmı ile ifade edilmektedir. Formül 1.12’de ifade edilmektedir(Plaxis 2D Reference Manual, 2021).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1.12)$$

- Alfa parametresi, bir sistemin sönümlemesinde kütle etkisini hesaba katar. Alfa değeri yükseldikçe daha düşük frekanslar sönümlenir.
- Beta parametresi, sistemin sönümlemesinde sertlik etkisini hesaba katar. Beta değeri arttıkça daha yüksek frekanslar sönümlenir.

Mühendislik uygulamalarında, sönümleme malzemesel ve geometrik sönümleme açısından değerlendirilmektedir. Sönümleme oranı olarak adlandırılan ξ parametresi ile ölçülür. Katsayı α ve β , sönümleme oranı ξ ve titreşim açısal frekansı ω 'nin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemle elde edilebilir.

$$\alpha + \beta + \omega_i^2 = 2\omega_i \xi_i \quad (1.13)$$

Bu denklem, sönümleme oranı için en az iki hedef frekans belirleyerek çözülebilir.

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad (1.14)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad (1.15)$$

Hudson vd., (1994) tarafından verilen yöntem, ilk hedef frekans, zemin biriminin ortalama doğal frekansdır ve ikinci hedef frekans, deprem kaydının temel frekansının belirlenen zeminin doğal frekansına bölümünden elde edilen sayıdan bir sonraki tek sayısıdır.

Zeminin doğal frekansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f = \frac{V_s}{4H} \quad (1.18)$$

V_s , zemin biriminin kayma hızı ve H zemin tabakasının kalınlığıdır.

Sismik dalganın bir zemin sistemi içinden yayılması durumunda, dalga enerjisi yol boyunca dağılmaktadır. Zemin-yapı sisteminin tepkisi sönümleme parametrelerinin özellikleri tarafından etkilenmektedir. Zeminin davranışı, küçük deformasyonlarda bile geri dönüşü olmayan bir şekilde gerçekleşir. Sönümleme, birden çok durumda oluşmaktadır. Örnek olarak aşağıda sıralanmaktadır. (Kramer, 1996).

- Zemin malzeme özelliklerine (sertlik/ dayanıklılık özellikleri) bağlı olarak oluşan sönümleme
- Zemin ve yapı arayüzünde oluşan sönümleme
- Zemine bağlı sönümleme
- Kırılma olayına bağlı sönümleme

1.5 Serbest Titreşim

Yapının statik başlangıç koşulundan dış bir yük tarafından etkilendiğinde ve daha sonra dış etkisiz bırakıldığında serbest bir şekilde titreşim yapması, (Chopra, 2007) serbest titreşim olarak tanımlanmaktadır. Serbest titreşim, tek serbest dereceli sistemin doğal titreşim periyodunun ve sönümleme oranının tanımlanması için altlık oluşturmaktadır.

Dış yük olmadan bir viskoz olarak sönümlendirilmiş TSD yapısı için $P(t) = 0$, denklem (1.11) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$m\ddot{u}(t) + k u(t) + c\dot{u}(t) = 0 \quad (1.19)$$

Bu denklemi kütleyle bölerek aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$\ddot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) + 2\zeta\omega_n \dot{u}(t) = 0 \quad (1.20)$$

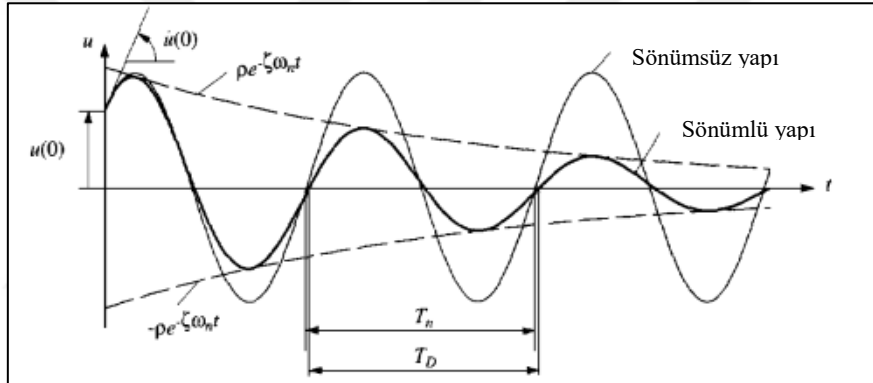
Burada, doğal açısal frekans,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.21)$$

Sönümlenme oranı,

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (1.22)$$

c_{cr} kritik sönümlenme katsayısı ve ζ sönümlenme oranıdır ve sönümlenmenin boyutsuz bir ölçüsüdür. $c \geq c_{cr}$ veya $\zeta \geq 1$ durumunda sistem başlangıç koşullarına geri döner. Ancak, $c < c_{cr}$ veya $\zeta < 1$ ise sistem titreşir ve genlik azalarak başlangıç koşullarına geri döner. Bu tür sistemlere az sönümlü sistem denir. Bu tür sistemler yapı mühendisliği açısından önemlidir çünkü çoğu yapıda $\zeta < 1$, genellikle 0.1'den daha azdır (Chopra, 2007).



Şekil 1.2 Sönümlenmenin serbest titreşim üzerindeki etkileri (Chopra, 2007)

Sönümlü bir sistemin doğal periyodu T_D , sönümsüz doğal periyod T_n ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.23)$$

Bu ilişki, iki ardışık tepe arasındaki oranın logaritması olan logaritmik azalım δ 'yı belirleyerek sönümsüz doğal periyodu belirlemek için kullanılabilir.

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.24)$$

n döngü boyunca yer değiştirme u_1 'den u_{n+1} 'e kadar azalırsa, denklem aşağıdaki gibi olur:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{u_1}{u_{n+1}} \cong 2\pi\zeta \quad (1.25)$$

Bu denklemde, u_1 başlangıçtaki yer değiştirme, u_{n+1} ise n döngüsü sonunda ulaşılan yer değiştirme değeridir. Bu denklem, sönümlü bir sistemde logaritmik azalımı kullanarak sönümsüz doğal periyodu tahmin etmek için kullanılır.

1.6 Zeminin Doğrusal Olmayan Gerilme-Şekil Değiştirme

Davranışı

Doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı, zeminin mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar. Özellikle zemin yapılarının tasarımı ve zemin davranışının analizi gibi konularda bu davranışın dikkate alınması gerekmektedir. Doğrusal olmayan davranış, zemin yapılarının dayanıklılığını, deformasyon özelliklerini ve stabilitelerini etkileyebilir. Bu nedenle, doğru tasarım ve analiz yapabilmek için zeminin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışının anlaşılması önemlidir.

Boşaltma ve yükleme kuralları, modelin gerilme çevrilmesindeki davranışını kontrol eder. Gerçek zeminlerin altındaki düzensiz ve tekrarlı yükler altındaki davranışı eşleştirerek, gerilme-birim deformasyon grafiği üzerinde daha etkili bir kontrol sağlar. Tekrarlı doğrusal olmayan modeller, kalıcı birim deformasyonların ortaya çıkmasına izin veren eşdeğer doğrusal modellerden farklıdır.

Zeminlerin dinamik davranışı, bir dizi parametre ve değişkene bağlıdır. Bu durumda karmaşık bir modelleme gerektirir. Dinamik davranışta değişen parametreler söz konusudur. Hareketin karakteristik özelliklerine (frekans, genlik, süre, vb.) bağlı olarak dinamik davranış değişkenlik gösterir. Bu parametrelerin dikkate alınması, gerçek zemin koşullarına daha yakın ve güvenilir bir model oluşturmada önemlidir.

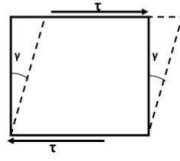
Zeminin nonlinear davranışını gerilme-birim deformasyon grafiği ifade eder. Birim deformasyon seviyelerine göre şekillenir. Bu grafik, zeminin elastik olmayan davranışını anlamak ve analiz etmek için kritik bir araçtır. Bu grafik, gerilme seviyeleri arttıkça zeminin nasıl deformasyon gösterdiğini ve plastik davranışın nasıl geliştiğini gösterir.

Bu sayede, boşaltma-yükleme kuralları, dinamik yükler altında zemin davranışını daha hassas bir şekilde modellemek ve gerçek koşullara daha yakın sonuçlar elde etmek için kullanılır. Elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği, zeminin

karmaşık dinamik davranışını analiz etmek ve tasarım süreçlerinde daha güvenilir kararlar almak için tasarımcılara değerli bir rehberlik sağlar.

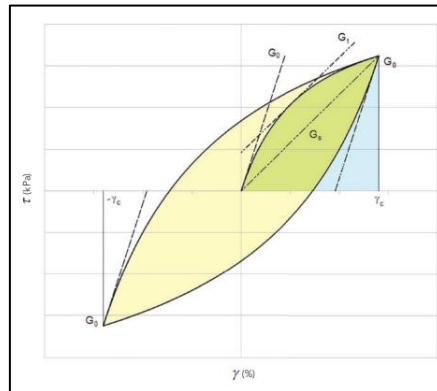
Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Zeminin kayma deformasyonuna karşı direncini ölçmek, kayma modülü (G) olarak adlandırılır. Zeminin düşük deformasyonlarda olan kayma modülü, birkaç faktöre bağlı olarak değişir, bunlar sıkıştırma basıncı, boşluk oranı, aşırı konsolidasyon oranı ve plastisite indeksi gibi faktörlerdir (Kramer, 1996).



Şekil 1.3 Kayma gerilimi ile kayma deformasyonları arasındaki ilişki (Brandt, 2014)

Döngüsel yüklemeler altında, zemin doğrusal olmayan, enerji kaybeden ve geri dönüşü olmayan bir davranış sergiler, bu nedenle gerilme-deformasyon ilişkisinde bir histeretik döngü oluşur (Şekil 1.4). Bu döngü, boşaltma ve tekrar yükleme yollarından oluşur. Sismik hareketlere maruz kaldığında, zemin küçük deformasyonlar yaşar ve yüksek kayma rijitliği (G_0) sergiler. Ancak, kayma deformasyonu (γ) arttıkça enerji kaybı artar ve kayma modülünün (G) büyüklüğü azalır (Bardet vd., 2020).



Şekil 1.4 Döngüsel yükleme altında zeminin histeretik davranışı (Laera & Brinkgreve, 2015)

Gerilme ve deformasyon ilişkisi, gerilmenin kontrollü olduğu durum için denklem 1.26'daki gibi yazılabilir:

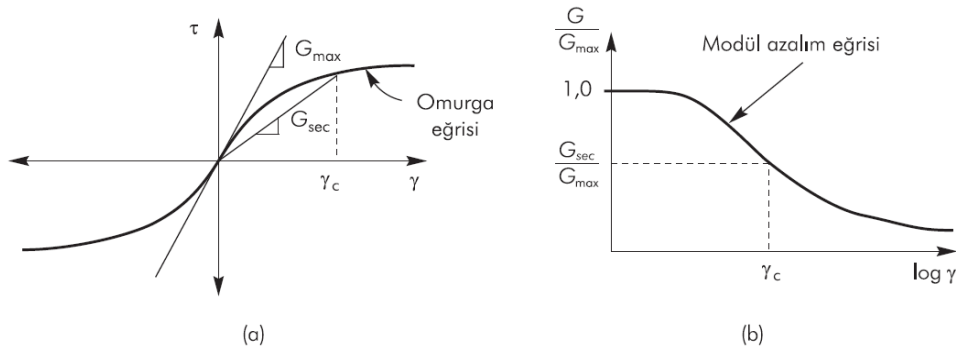
$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.26)$$

Burada, G_s eğimden oluşan eğim kayma rijitliğini temsil eder, bu eğim döngünün eğimini ifade eder.

Yerel histeretik sönüm oranı, enerji tüketilen ve biriken alanlar tarafından tanımlanan alana bağlıdır. Sönüm oranı, malzeme davranışı plastik aralık içinde olduğu sürece etkilidir ve kayma modülü deformasyon arttıkça azalır (Bardet vd., 2020).

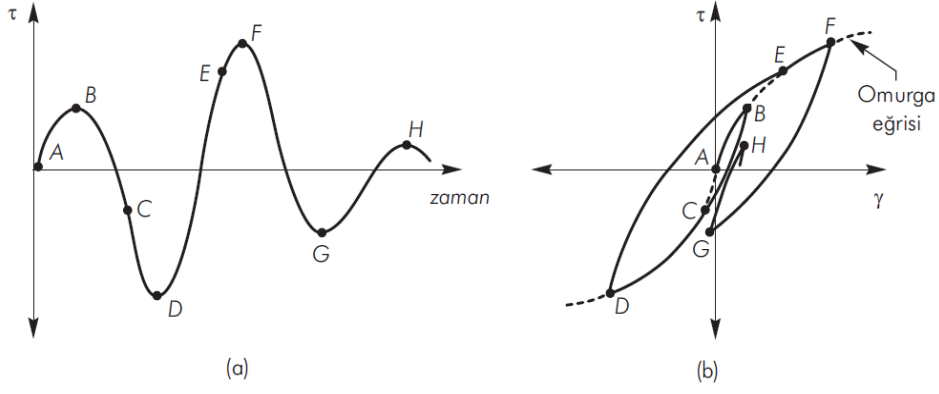
$$\xi = \frac{E_d}{4\pi E_s} \quad (1.27)$$

Şekil 1.4'e ifade edilen sarı alan; E_d tüketilen enerjiyi, mavi ve yeşil alanlar ise maksimum deformasyon durumunda birikebilecek enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 1.5 (a) Omurga eğrisi (b) modül azalım eğrisi (Kramer, 1996)

Kayma modülünün kayma deformasyonu ile değişimini temsil eden eğriye "omurga eğrisi" denir ve Şekil 1.5 (a) olarak gösterilir. G_{max} , omurga eğrisinin orijinden geçen eğimidir. Belirli kayma deformasyonu için omurga eğrisi üzerinde orijinden bir düz çizgi çekilerek elde edilen kayma rijitliği ise G_{sec} olarak adlandırılır. Genellikle, kayma rijitliği ve maksimum rijitlik arasındaki oran "modül azalım eğrisi" olarak sunulur (Şekil 1.5 (b)) Modül azalım eğrileri, farklı yazarların önerileri temelinde eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analizde malzeme davranışını tanımlamak için sıkça kullanılır.



Şekil 1.6 (a) Kayma gerilmesinin zamana bağlı değişimi ve (b) tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer, 1996)

Şekil 1.6'da, A noktasından başlayarak zamanla değişen kayma gerilmesinin gösterildiği omurga eğrisi üzerindeki kesik çizgi, gerilme-birim deformasyon davranışını temsil eder. Bu değişim, gerilme-birim deformasyon davranışının çevrimler halinde devam ettiğini gösterir. Bu nedenle, tekrarlı yükler altında doğrusal olmayan zemin davranışı, farklı gerilme-birim deformasyon özellikleri sergileyebilir ve dinamik hareketin sürekliliğine bağlı olarak çeşitli dönemlerde değişebilir. Bu doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı, zeminin özelliklerine bağlı olarak değişir. Zemin türü, fiziksel ve mukavemet özellikleri, doğrusal olmayan davranışı etkileyen faktörler arasındadır.

Doğrusal olmayan modeller, tekrarlı yüklemelerde efektif gerilmedeki değişimleri anlamak önemlidir. Bu kapsamda boşluk suyu basıncı oluşturma modelleri ile uyumlu çalışabilir. Tekrarlı doğrusal modellerde, boşluk suyu basıncındaki değişim ve dolayısıyla efektif gerilmedeki değişimler hesaplanabilir. Boşluk suyu basıncındaki artış, efektif gerilmelerin azalmasına ve doğru orantılı olarak G_{max} ve τ_{max} değerlerinde azalmalara neden olur. Omurga eğrisinin şekli ve pozisyonu, G_{max} ve τ_{max} değerlerine bağlıdır; bu nedenle, bu tür davranışın modellenebilmesi için boşluk suyu basıncının artmasıyla orijinal omurga eğrisinin küçülmesi (yumuşaması) beklenir.

Gerçek zemin davranışını yansıtabilmek için gerilme-birim deformasyon modelindeki rijitlik, sadece tekrarlı birim deformasyon genliğine değil, aynı zamanda zeminin gerilme geçmişine de bağlıdır.

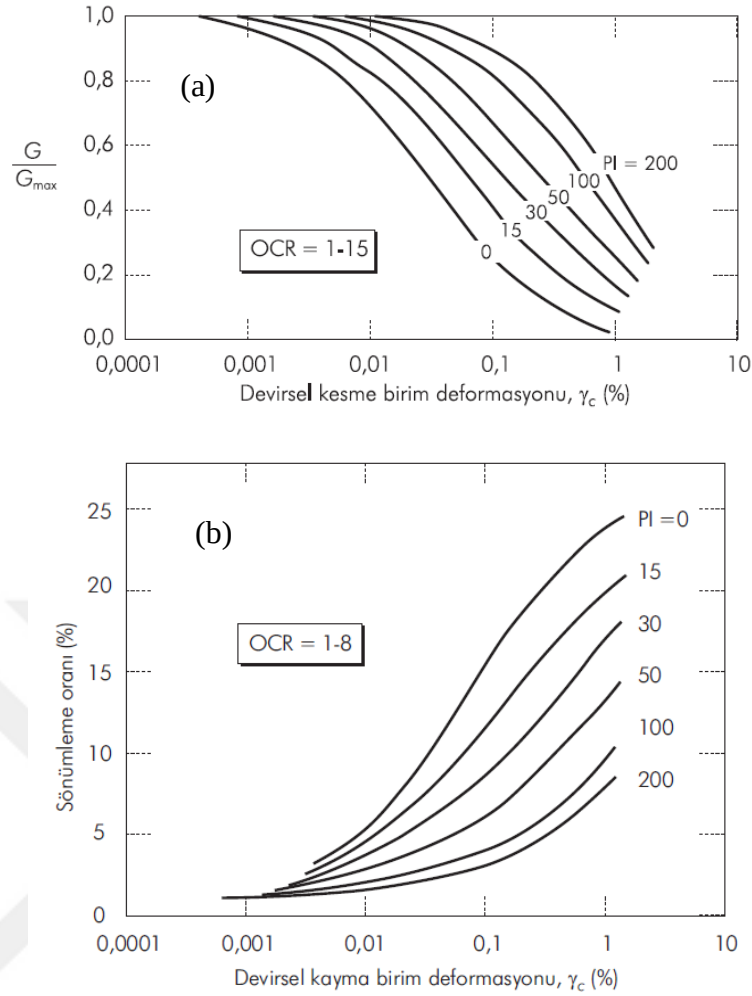
Tekrarlı doğrusal modeller, deprem sarsıntısı sırasında, öncesinde ve sonrasındaki boşluk suyu basıncını değerlendirebilir ve zemin tepkisinin hesaplanması için modellemelerde kullanılır. Bu şekilde, zeminin gerçek zamanlı tepkisi ve geçmiş dikkate alınarak daha kapsamlı analizler gerçekleştirilebilir. Dinamik analizlerde kullanılan temel parametrelerden biri, kayma modülü oranı ($G_{sec}/G_{maks} = G/G_{maks}$) olarak adlandırılır. Diğer bir temel parametre ise sönüm oranı (ξ)'dir. Sönüm oranı, tekrarlı yüklemeler altında bir döngü sonucunda yutulan enerjiyi temsil eder. Sönüm oranı, histeresis eğrisinin alanı ve eğrinin altında kalan üçgenin alanı ile orantılıdır.

Kayma birim deformasyon seviyeleri arttıkça histeresis eğrisinin düzleşmesi ve kayma modülünün ($G=G_{sek}$) maksimum kayma modülü değerine göre daha düşük bir değere sahip olması beklenir. Aynı şekilde, kayma birim şekil değiştirme seviyesi arttıkça histeresis eğrisinin genliği artar. Bu deformasyon seviyelerinde zeminin rijitliği azalır ve enerji dönümlene kapasitesi artar. Bu nedenle, kayma modülü oranının davranışı ile ters ilişkili olarak sönüm oranı artar.

Zeminlerin plastisite özellikleri arttıkça kayma birim deformasyonuna karşılık gelen kayma modülü oranının daha yavaş azaldığı gözlenir. Ayrıca, sönüm oranı açısından, yüksek plastisiteli zeminlerde bu oran düşük plastisiteli zeminlere kıyasla daha düşüktür.

Bu değişimler, zeminlerin deprem hareketini sönümleme veya büyütme özellikleri ile doğrudan ilişkilidir.

Vucetic ve Dobry (1991) çalışmalarında plastisite indislerindeki değişimler başta olmak üzere, test ekipmanlarındaki veya testlerin tiplerindeki farklılıkları irdeleyerek birçok sonuç elde etmişlerdir. Bu sonuçlar kullanılarak temsilci G/G_{max} ve ξ eğrileri grafiksel olarak uygun bir şekilde uydurulmuştur ve birçok modül azalımı ve sönüm oranı eğrisi oluşturmak için kullanılmıştır.



Şekil 1.7 Plastisite indisindeki değişim ile $G/G_{max} - \gamma_c$ (a) ve $\xi - \gamma_c$ eğrileri(b)
(Vucetic & Dobry, 1991)

1.7 Saha Tepki Analizi

Yer Tepki Analizi, yapılar üzerinde etkili olan deprem kuvvetlerinin yerel zemin koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiğini değerlendirmek için yapılan önemli bir analiz yöntemidir. Deprem dalgaları, kaynağından yayılmaya başlayarak zemin tabakaları arasında geçerken frekans içeriğine bağlı olarak farklı davranış sergiler. Yer yüzeyinde oluşan tepki hareketlerinden farklı olup, söz konusu zeminin malzeme özelliğine ve deprem hareketlerinin karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, zemin tabakalarının yer hareketine verdiği tepkiyi anlamak ve doğru bir analiz yapabilmek için zemin davranış analizleri gerçekleştirilir. Zemin tepki analizi yapmak için, hareketin karakteristikleri, zeminlerin dinamik özellikleri ve yer hareketinin hesaplanması gibi bilgilere ihtiyaç vardır.

Analiz yöntemi, ihtiyaca bağlı olarak 1, 2 veya 3 boyutlu olabilir. Geçerli teknikler, doğrusal, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analize dayanabilir.

Bir boyutlu analiz, araştırma alanında en yaygın yaklaşım olmakla beraber aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır(Govindaraju vd.,2004):

- Üsteki zemin biriminin yüzeyi tamamen yataydır.
- Zemin birimi yanal yönde sonsuzdur
- Zemin yüzeyindeki tepki, dalga yukarı doğru yayıldıkça oluşur ve mekansal olarak homojendir.

Bu tür analiz için dikey bir boyutlu sütun kabul edilir. Zemin özellikleri yatay yönde büyük ölçüde değişmez, ancak dikey yönde değişir. Deprem enerjisi bir kırılma kaynağından açığa çıkar ve tüm yönlerde yayılmaya başlar ve sonunda yüzeye ulaşır. Yüzeye ulaşan dalga tekrardan sert tabakaya ulaşmak için yüzeyden itibaren derinleştikçe daha sert olan tabakalardan geçerek sönümlenecektir. Bu olay dalganın tamamen sönümlenmesine kadar devam etmektedir.

SHAKE (Schnabel, 1972) ve SHAKE 91 (Idriss & Sun, 1992), bir boyutlu eşdeğer lineer yöntemin en yaygın kullanılan yazılım uygulamalarıdır. SHAKE, zeminin doğrusal olmayan davranışı ile yer tepki analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır. İlk olarak 1972'de yayımlanmış olup yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

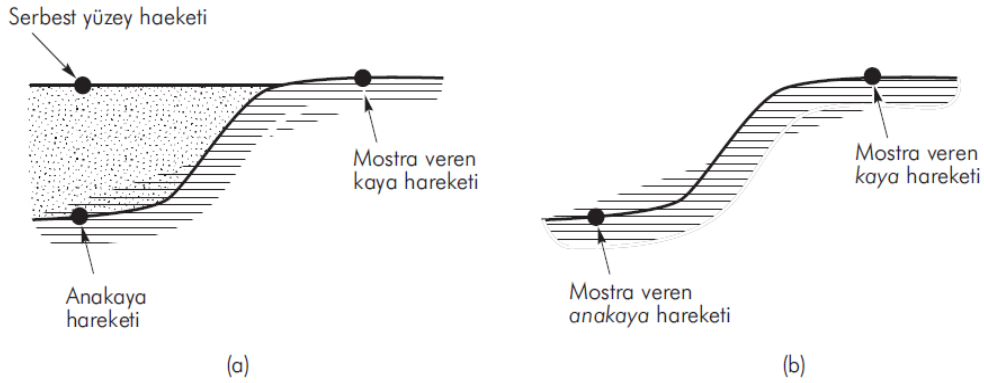
Bu yazılım ile bir boyutlu eşdeğer lineer yöntemi ile zeminin deprem etkisi altında nasıl davranacağını tahmin etmek için kullanılmaktadır.

SHAKE91 (Idriss ve Sun, 1992) ise orijinal SHAKE'in bir güncellemesidir. Bu versiyon, orijinal SHAKE'in bazı kısıtlamalarını gidermek ve analizlerin doğruluğunu artırmak için geliştirilmiştir. SHAKE91, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte daha fazla hesaplama gücünü kullanarak daha karmaşık analizler yapabilmektedir.

Deepsoil programı, bu tür bir boyutlu zemin davranış analizlerinin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Program, zaman veya frekans tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapabilme yeteneğine sahiptir.

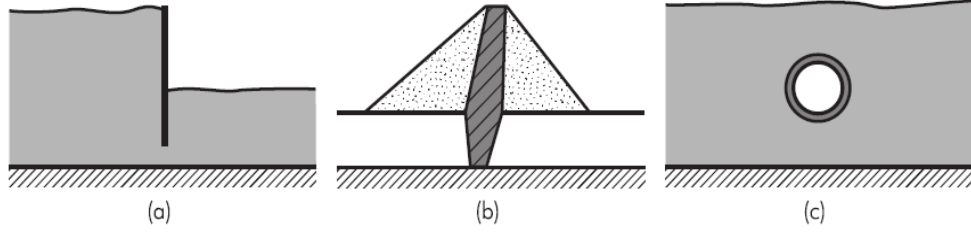
Kullanıcı, analiz yöntemini ve çözüm tipini seçerek deprem dalgalarının zeminde nasıl davranış gösterdiğini inceleyebilir. Doğrusal analizlerde, kayma modülü ve sönüm oranı sabit kabul edilirken, eşdeğer doğrusal analizlerde iteratif yöntemler kullanılarak zemin parametreleri belirlenir. Doğrusal olmayan analizlerde ise zeminin kayma birim şekil değiştirme değerleri ile değişen kayma modülü ve sönüm oranları dikkate alınır.

Elde edilen analiz sonuçları, yer hareketinin zemin tabakaları üzerindeki etkilerini anlamak ve yapıların deprem yüklerine karşı güvenli tasarımını yapmak için kullanılır. Ancak, yapılan kabuller ve kullanılan parametrelerin gerçek zemin davranışını tam olarak yansıtmayabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, analiz sonuçları dikkatli bir şekilde yorumlanmalı ve yapı tasarımlarında kullanılmalıdır. Ayrıca, yapıların deprem yüklerine karşı davranışını anlamak için diğer analiz yöntemleri ve saha deneylerinden elde edilen verilerle birlikte değerlendirilmelidir. Yer Tepki Analizi, mühendisler için önemli bir araç olmakla birlikte, doğru sonuçlar alabilmek için dikkatli ve dengeli bir yaklaşım gerektirir.



Şekil 1.8 Yer tepkisi terminolojisi: (a) anakaya üzerinde zemin; (b) anakaya üzerinde zemin yok. (Kramer, 1996)

Çoğu durumda tek boyutlu zemin tepki analizi kullanılabilir, ancak eğimli veya düzensiz zemin yüzeyleri, gömülü yapılar, tüneller ve ağır sert yapıların varlığı, iki boyutlu zemin tepki analizi gerektirir.

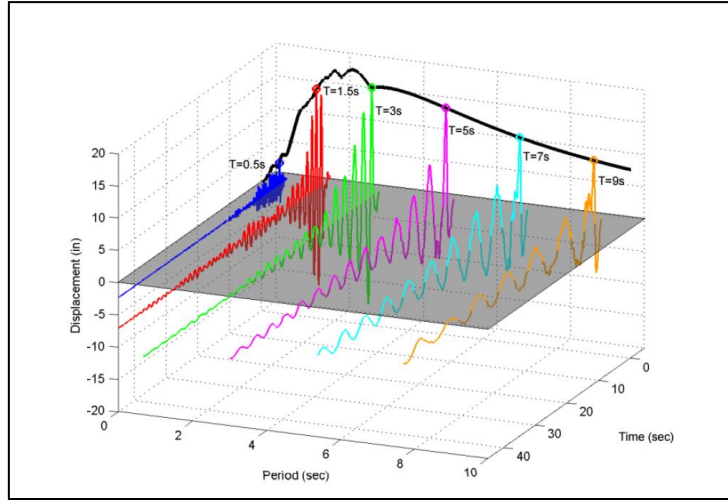


Şekil 1.9 İki boyutlu düzlem gerilme dinamik tepki analizi sırasında tipik olarak karşılaşılan yaygın sorun örnekleri şunlardır: (a) konsol duvar, (b) toprak barajı, (c) tünel (Kramer, 1996).

1.8 Tepki Spektrumu

Deprem tepki spektrumu, zemin hareketlerini ve bu hareketlere karşı yapıların tepkilerini karakterize etmek için kullanılan bir kavramdır. Chopra'nın (2007) tanımına göre, tepki spektrumu, belirli bir kütle için tüm olası lineer elastik tek serbestlik derecesi (SDOF) sistemlerinin maksimum ivme, hız ve deplasman özetidir. Farklı zayıflık oranları için tepki spektrumları farklı şekillerde ortaya çıkar.

Altı farklı doğal periyotlu yapı için tepki spektrumu oluşturulurken, tüm doğal frekanslara sahip SDOF titreşimli sistemler göz önüne alınır. Bu sistemlere aynı yer hareketi uygulanarak her durumda maksimum tepki ölçülür. Elde edilen tepki spektrumu, bu tepkileri temel periyotlara karşı grafikleme yoluyla elde edilir. Şekil 1.10 bu sürecin altı farklı doğal periyotlu yapı için nasıl gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 1.10 Tepki spektrumunun oluşturulması (Stensløkken, 2016)

Renkli zaman serileri, altı farklı yapıların tepkisini temsil ederken, siyah grafik elde edilen tepki spektrumunu göstermektedir. Bu şekilde, deprem tepki spektrumu, farklı doğal periyotlara ve zayıflık oranlarına sahip yapıların nasıl tepki vereceğini ayrıntılı bir şekilde özetleyen bir tasarım aracıdır.

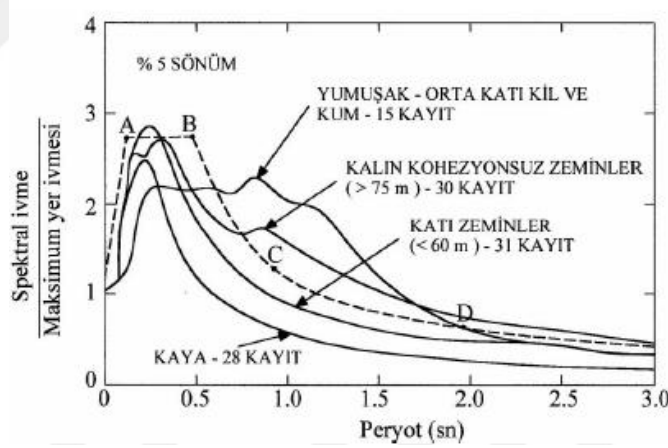
Kaydedilen zemin hareketlerinden elde edilen önemli parametreler arasında maksimum spektral deplasman ve maksimum spektral mutlak ivme bulunmaktadır. Bu parametrelerin okunmasını kolaylaştırmak için kaydedilen zemin hareketi, farklı doğal frekans (ω) ve zayıflık oranı (ξ) kombinasyonlarıyla bir SDOF denklemine temel giriş olarak kullanılır. Her bir kombinasyon için maksimum spektral deplasmanlar bulunur ve bunlar ξ ve doğal periyot (T_n) ile ilgili fonksiyonlar olarak çizilir. Bu çizelge, deplasman tepki spektrumu olarak adlandırılır ve her bir yapının T_n doğal periyodu ile ilişkilendirilen maksimum spektral deplasmanını temsil eder.

Dolayısıyla, kaydedilen zemin hareketi, farklı ω ve ξ kombinasyonlarına sahip SDOF denklemlerinde temel giriş olarak kullanılarak elde edilen tepe göreceli deplasman ve mutlak ivmeyi içeren önemli parametrelerle birlikte, bu değerleri daha anlamak için bir çerçeve sunar. Bu süreç, deplasman tepki spektrumu olarak adlandırılan ve her bir yapı için özgün T_n ile ilişkilendirilen maksimum spektral deplasmanları temsil eden bir çizelge ile görselleştirilir.

1.9 Spektrum Analizi

Deprem mühendisliği açısından spektrumlar, belirli bir yer hareketinin etkisi altında (sönüm oranı değerinin sabit tutulmasıyla), farklı periyotlara ve tek serbestlik derecesine sahip sistemlerde meydana gelebilecek en büyük tepki değerlerini gösteren diyagramlar olarak tanımlanır (Saraçoğlu, 2017). Farklı periyotlara sahip ancak eşit kütlelere sahip yapıların aynı deprem bileşenine karşı gösterdikleri tepkilerin maksimum değerlerinden oluşan eğri tepki spektrumu (spektrum eğrisi) olarak adlandırılır. Tasarım spektrumu, deprem yer hareketlerinin karakteristik özelliklerini ve yapılarda oluşacak etkileri tanımlayan pratik bir araç olarak kullanılabilir. Tasarım spektrumları, belirli bir bölgenin sismik özellikleri ve yerel zemin davranışları göz önüne alınarak, farklı ivme kayıtları kullanılarak elde edilir. Elde edilen tepki spektrumları, uygun zarf eğrilerinin benzetilmesiyle oluşturulur (Kale, 2017).

Spektrum eğrileri, farklı saha koşullarında ve ivme kaydı içeriğine göre (Şekil 2.15.) değişebilir.



Şekil 1.11 Ortalama tepki spektrumları (Seed, Ugas, & Lysmer, 1976)

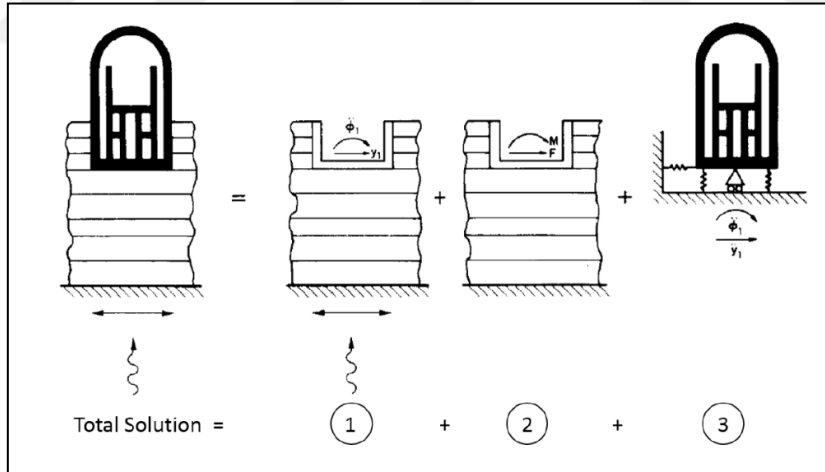
1.10 Dinamik Zemin-Yapı Etkileşim

Yüzeyde veya bir zemin katmanına gömülü bir temel, çevresindeki serbest alan hareketine kıyasla çevredeki zemin hareketinde sapmaya neden olur; bu etkiye zemin-yapı etkileşimi (ZYE) denir ve bu fenomen, bir sabit temel analizinden beklenen yanıtı önemli ölçüde değiştirebilir. Bu etki, temel geometrisine, gömme derinliğine ve zemin dinamik özelliklerine bağlıdır.

Genel olarak TYE etkileri genellikle daha yumuşak bir davranışa ve doğal periyotların artmasına neden olacaktır.

Kausel&Whitman (1978) tarafından yapı-zemin etkileşimi için geliştirilen yöntemin 3 adımı aşağıdaki gibidir:

- Kinematik Etkileşim: zemin hareketine maruz kalan kütsüz, rijit bir temelin hareketinin belinmesidir.
- Dinamik Empedans: frekansa bağı zemin özelliklerinin belirlenmesini içerir. Bu özellikler, dinamik impedans fonksiyonu aracılığıyla ifade edilir; bu, zemin sertliği ve sönümlleme ile ilgili karmaşık ve frekansa bağı bir fonksiyondur. Bu adım genellikle sonlu eleman veya sonlu fark analizi gerektirir.
- İnertial Etkileşim: Bu nihai adımda, temel giriş hareketinden kaynaklanan inertial kuvvetler yapıya uygulanır. Yapı, zemin özelliklerini dinamik impedans fonksiyonu aracılığıyla temsil eden yaylar üzerine oturtulmuştur. Yapının, SSI etkilerini içeren tepkisi daha sonra frekans ve zaman alanlarında analiz edilir.



Şekil 1.12 Üç-adım yöntemi (Kausel, Whitman, Morray, & Elsabee, 1978)

Yapı-Zemin-Kazık etkileşimi analiz yöntemleri, genellikle zaman alanında doğrudan (direkt) ve frekans alanında altsistem yöntemi olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Doğrudan/Direkt yöntem, deprem etkisi altındaki yapı-zemin-kazık sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile bütün olarak modellenip analiz edildiği yaklaşımdır. Altsistem yöntemi ise Doğrudan yöntemle göre daha bist bir yaklaşık olup zemin- kazıkların ayrı, üstyapının ayrı modellendiği temel kütesinin

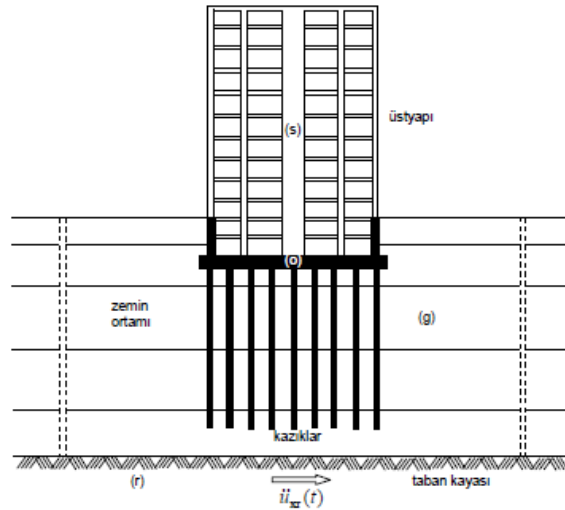
hesaplamalara katılmadığı yöntemdir. Üstyapı analizleri yapı mühendislerince, zemin-kazık analizleri ise geoteknik mühendislerince koordineli olarak yürütülmelidir.

1.10.1 Doğrudan, Direkt Yöntem (Ortak Sistem):

Doğrudan yöntemler, zemin ve yapı analizlerini aynı anda ele alarak sayısal entegrasyonu sağlayan mühendislik hesaplama yaklaşımlarını ifade eder. Bu metodolojiler, genellikle karmaşık yapıların ve zemin etkileşimlerinin daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanıyan kesikli eleman yöntemlerini içerir.

Sonlu Eleman Metodu (FEM), doğrudan yöntemler ailesine dahil olan bir sayısal analiz tekniğidir. FEM, bir yapı veya zeminin karmaşık geometrisini küçük elemanlara böler ve her bir elemanın davranışını matematiksel modellerle ifade eder. Bu elemanlar bir araya getirilerek bütün sistem oluşturulur.

Doğrudan yöntemlerin avantajlarından biri, zemin ve yapı etkileşimlerini aynı anda modellerleyerek daha gerçekçi sonuçlar elde etmesidir. Bu, özellikle geoteknik mühendislik uygulamalarında, zemin davranışının yapı üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.



Şekil 1.13 Direkt (Dogrudan) yöntem modeli

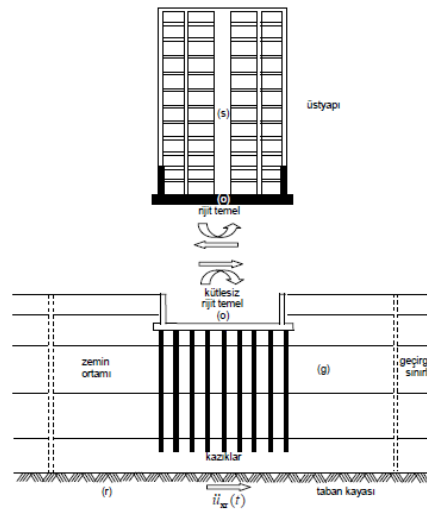
Dinamik analizlerde, genellikle büyük ve karmaşık modellere ihtiyaç duyulur. Ancak, bu durum geleneksel doğrudan yöntemlerle hesaplama sürelerinin artmasına neden olabilir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, yapı mühendisliğinde alternatif teknikler geliştirilmiştir.

Bu teknikler, hesaplama sürelerini azaltmak ve büyük modellerle daha etkili bir şekilde başa çıkmak amacıyla özel olarak tasarlanmıştır.

Bu bağlamda, doğrudan yöntemlerin evrimi, mühendislerin daha karmaşık ve büyük ölçekli projeler üzerinde çalışmalarına olanak tanımış, yapı mühendisliğinde daha kesin ve hızlı analizlerin yapılabilmesine katkıda bulunmuştur.

1.10.2 Alt Sistem Yöntemi:

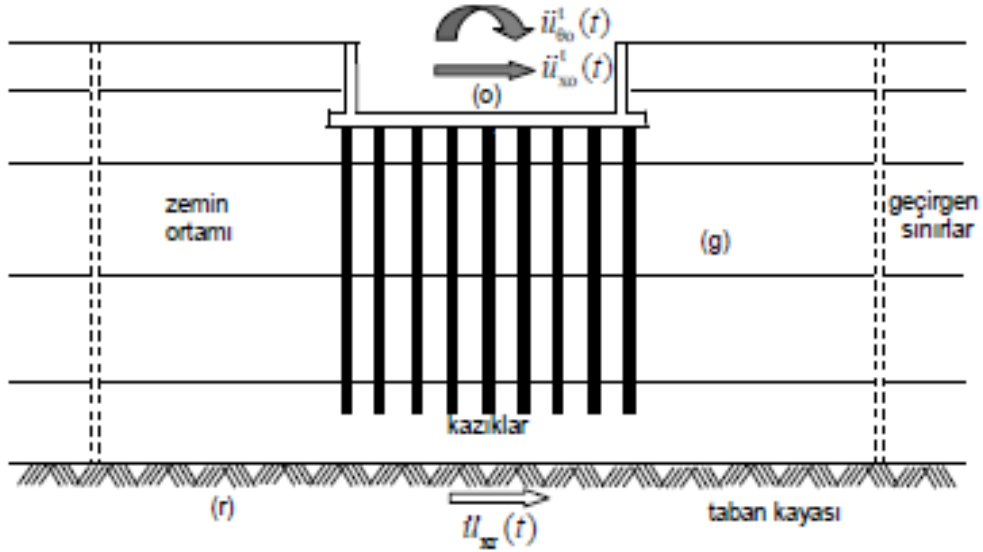
Alt yapı yöntemleri, problemin parçalara ayrılmasına izin verir. Bu yöntem, kinematik etkileşim analizi ve eylemsizlik etkileşim analizi adımlarını içerir ve genellikle yalnızca lineer ve eşdeğer lineer sistemler için geçerlidir. Kausel ve diğerleri tarafından (1978) belirtildiği gibi, bu yöntemler, güçlü yer hareketinde bile yüksek doğruluk seviyelerini koruyabilir ve çoğu durumda tam doğrudan analize kıyasla dikkate değer bir uyum sağlayabilir.



Şekil 1.14 Altsistem yöntemi modeli

1.10.2.1 Kinematik etkileşim

Üstyapının dikkate alınmadığı durumu ifade eder. Özellikle temel-kazık-zemin sistemine etki eden etkileşime kinematik etkileşim denir. Zayıf zeminlerde inşa edilen kazıklı yapıların deprem etkisi altında kazıkları ciddi şekilde etkileyebileceği bir senaryoda, kazıklar deprem dalgalarının frekans ve genliğini değiştirebilir.

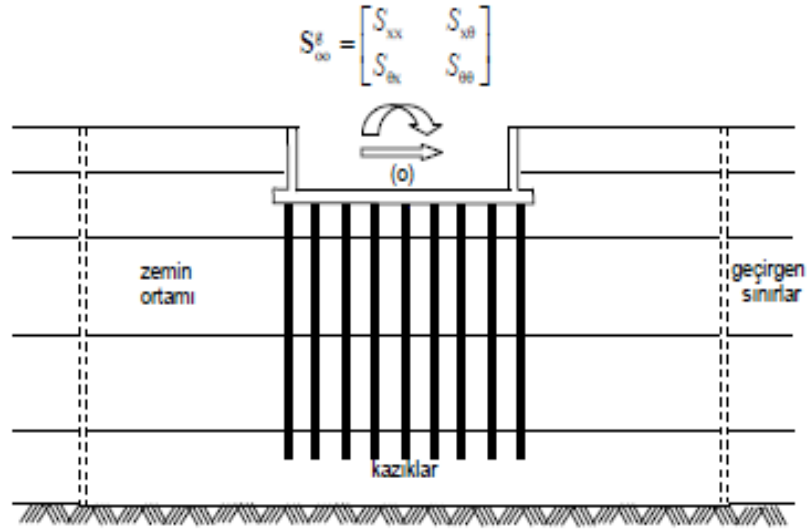


Şekil 1.15 Kinematik etkileşim (adım 1)

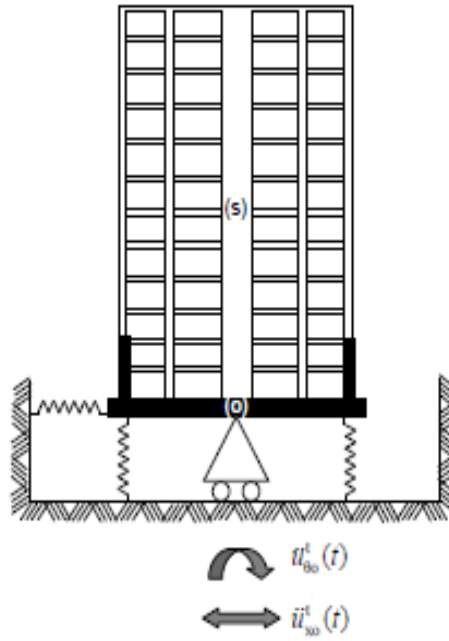
1.10.2.2 Eylemsizlik etkileşimi

Alt sistem yönteminin ikinci adımını oluşturur. Kinematik etkileşim analizi sonuçları, üstyapı altsistemine temel alt seviyesinden etki eder. Ancak yapılacak analizde zemin-kazık altsisteminin eşdeğer dinamik rijitliğinin de gözönüne alınması gerekmektedir. Bu aşamada elde edilen veriler, üstyapının dinamik etkileşimini ve geriye aktarımını içerir. Bu yöntemde deprem hareketi ile nonlinear zaman tanım alanında analiz yapılmaktadır.

Zemin ortamı, sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemiyle üç boyutlu olarak modellenenebilir. Ayrıca, nonlinear yaylar (p-y, t-z, Q-Z) gibi elemanlar kullanılarak detaylı analizler yapılabilir. Bu teknik, sayısal yöntemlere göre daha güvenilir, ekonomik ve zaman açısından daha az tüketen bir seçenek olarak öne çıkar. Analiz sonuçları, yapı mühendisliği ve geoteknik mühendislik uygulamalarında karmaşık yapıların performansını anlamak ve optimize etmek için değerli bilgiler sağlar.



Şekil 1.16 Eylemsizlik etkileşimi için zeminin eşdeğer dinamik rijitlik matrisi



Şekil 1.17 Eylemsizlik etkileşimi (üstyapı-temel) analizi

1.11 Sonlu Eleman Analizi: PLAXIS

PLAXIS 2D ve 3D, sonlu eleman yazılım paketleridir. Zemin, kaya ve yapıların kuvvetleri ve yer değiştirmeleri, birleşik bir (kısmi) diferansiyel denklem sistemi ile tanımlanır. PLAXIS 2 boyutlu modeli düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetri kullanılarak modellenip zeminin yada kayanın davranışını karakterize etmek için çeşitli malzeme modelleri kullanılmaktadır. Yapılar çoklu nokta, çizgi ve plaka elemanları kullanılarak modellenebilir.

Gerilim ve gerinim (Stress-Strain), malzemelerin mekanik davranışını anlamak için önemli kavramlardır ve bir malzemenin mekanik davranışını anlamak ve karakterize etmek için kullanılır. Gerilim, bir malzemenin üzerine uygulanan kuvvetin birim alan başına düşen miktarını ifade eder. Stres genellikle σ (sigma) ile gösterilir. Strain (Şekil Değişimi): Şekil değişimi veya deformasyon, bir malzemenin orijinal boyutlarında meydana gelen değişimi ifade eder. Strain genellikle ϵ ile gösterilir ve bir birimsiz değerdir. Şekil değişimi, malzemenin elastik, plastik veya viskoz davranışını açıklamak için kullanılır. Stress-strain ilişkisi, bir malzemenin mekanik özelliklerini tanımlar. Bu ilişki genellikle malzemenin elastik davranışını, plastik deformasyonunu, ve kırılma noktasını içerir. Malzeme testleri, özellikle çekme ve basınç testleri, bu stres-strain ilişkisini belirlemek için kullanılır. Elde edilen veriler, malzemenin dayanıklılığı, esnekliği ve diğer mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlar ve mühendislik tasarımlarında kullanılır.

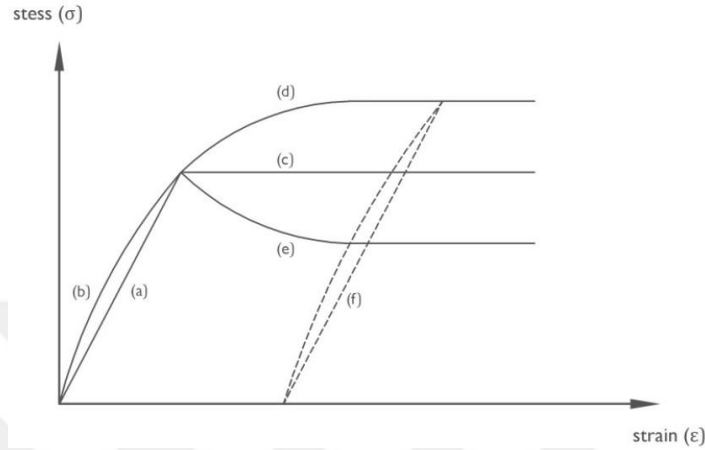
PLAXIS gibi sonlu eleman analizi yazılımları, karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için matematiksel modeller kullanır. Bu modeller genellikle malzemenin elastik veya plastik davranışını tanımlayan matematiksel ifadeleri içerir.

Stres ve gerinim arasındaki ilişki, farklı malzeme modelleri için matematiksel ifadeler kullanılarak ifade edilebilir. Sürekli bir ortamdaki bir noktadaki gerilme, o noktadan geçen düzlemlere etki eden karşılıklı üç dik gerilme bileşeni ile tanımlanır. Bu düzlemler koordinat sisteminin düzlemlerine dik olarak alınır. PLAXIS'in sonlu eleman modelinde, gerilme koşullarını tanımlamak için bir koordinat sistemi (x, y, z) kullanılır.

Stress ve Strain arasındaki ilişki, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$d\sigma = D * d\epsilon \quad (1.28)$$

Burada D, sürekliliğin Stress ve Strain davranışını tanımlayan rijitlik matrisidir. Elastik-plastik davranış için bu yapısal ilişki, Stress ve Strain artışları olarak formüle edilir. Genel olarak altı farklı yanıt meydana gelebilir, farklı yanıtlar (a) ila (f) şeklinde adlandırılır.



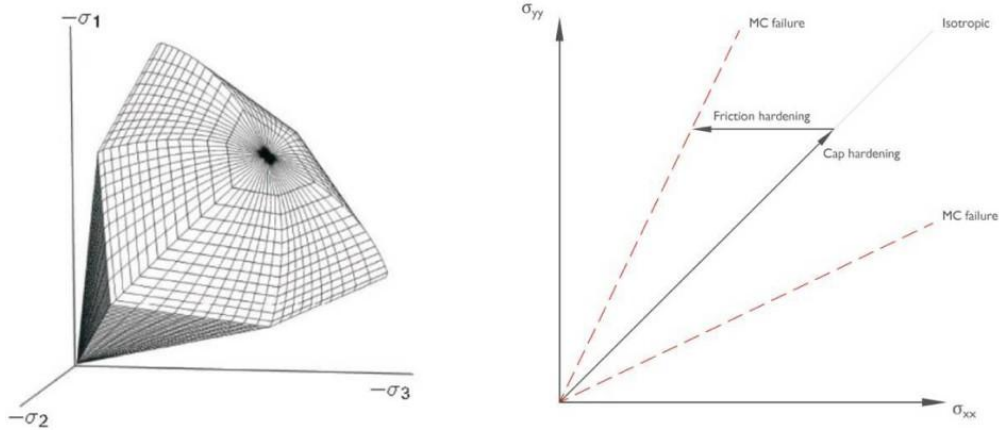
Şekil 1.18 Elastik-plastik davranışın stres ve gerinim ilişkisi

Elastik davranış (a) ve (b) olarak etiketlenen iki eğri ile tanımlanır. (a)'daki düz çizgi doğrusal elastik davranış gösterirken (b)'deki eğri çizgi doğrusal olmayan elastik davranış gösterir. Plastik davranış (c), (d) ve (e)'de gösterilen üç yanıtla gösterilebilir. (c) mükemmel plastik davranış temsil eder, yani zemin tarafından hiçbir ilave yük taşınmaz. (d) ve (e) sırasıyla gerinim sertleşmesini ve yumuşamayı göstermektedir. (f) ile işaretli çizgiler elastik boşaltma/yeniden yükleme davranışını göstermektedir.

Farklı zemin modelleri, zeminin farklı davranışını tanımlar, hangi davranışın meydana geleceği malzeme özelliklerine, yük geçmişine ve Stress ve Strain geçmişine bağlıdır.

Hardening Zemin Modeli (HS modeli), sert zeminlerin yanı sıra yumuşak zeminlerin davranışını simüle etmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Mohr-Coulomb modelinden farklı olarak, akma yüzeyi prensip stres uzayında sabit değildir. Bunun yerine, plastik gerilmelerin etkisiyle akma yüzeyi şekillenebilir.

Bu durum, zeminin rijitliğinde değişikliklere yol açabilir, özellikle yüklemelerden sonra ve yeniden yüklemekten sonra. Bu modelde Mohr-Coulomb başarısızlık yüzeyi, "akma" şapkasıyla birleştirilmiştir (Şekil 7, sol).



Şekil 1.19 Asal gerilme alanında gösterilen başlık ile HS akma yüzeyi

HS modeli aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Gerilimeye bağlı sertlik,
- Kesme sertleşmesi: Birincil deviatorik yüklemekten kaynaklanan plastik gerilme,
- Sıkıştırma sertleşmesi: birincil sıkıştırma (yükleme) nedeniyle plastik gerilme,
- Yükleme geçmişinin dikkate alınması,
- Boşaltma / yeniden yükleme için bağımsız davranış,
- Mohr-Coulomb göçme yüzeyli kapak.

Mohr-Coulomb modelinin aksine, bu modeldeki akma yüzeyi belirli bir zemin gerilme durumuna sabitlenmemiştir. Plastik gerilmelerin bir sonucu olarak akma yüzeyi genişler ve bu olgu sertleşme olarak adlandırılır. Bu modelde iki tür sertleşme ayırt edilebilir: sıkıştırma sertleşmesi ve kesme sertleşmesi. Hem sıkıştırma hem de kesme sertleşmesi elastik bölgenin genişlemesine yol açar (Şekil 10, sağ). Bu akma konturu içerisinde, malzeme elastik davranışı yönlendirir ve sertlik $E_{ur,ref}$ tarafından tanımlanır.

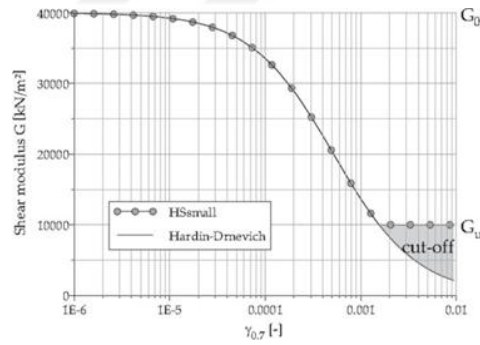
Zeminin göçmesi hala Mohr-Coulomb kriterine göre modellenmekte ve bu göçme c' ve ϕ' parametreleri ile tanımlanmaktadır.

Bu HS modeli, zeminin hem yumuşak hem de sert zeminlerde statik türdeki geoteknik problemler için daha hassas deplasman ve başarısızlık tahminleri için kullanılabilen bir iyileştirmedir.

Ancak bu model izotropik olmayan mukavemet/rijitlik davranışını ifade etmemekte olup, süneklik yani zamana bağımlı davranışını ve harmonik/sismik etkileri içermemektedir.

Bu kapsamda zeminin davranışını modellerken Hardening Soil Small Strain (HSS) modeli tercih edilmiş olup model ile ilgili önemli noktalar aşağıda açıklanmıştır.

HSS, HS modeline ek olarak küçük gerilme sertlik ilişkisi (Benz, 2007)formulasyonuna göre uyarlanmıştır. HS modelinin akma yüzeyi içinde lineer elastik boşaltma/yeniden yükleme davranışının varsayımı, gerçekte çok küçük gerilme aralığı için uygundur. Boşaltma/yeniden yükleme sertliği, gerilmenin artmasıyla artan gerilme bağımlılığına sahiptir. Küçük gerilme ilişkisi, kayma modülünün G 'nin, kayma gerilmesi $\gamma_{0,7}$ 'nin logaritmik bir fonksiyonu olarak çizilmesiyle oluşturulur. Bu sertlik parametreleri G_0 , diğer HS modellerinden farklı olan tek parametrelerdir ve $\gamma_{0,7}$ olarak bilinir. Küçük gerilme sertliğini tanımlayan hiperbolik bir yasayı açıklar. Bu ilişkinin temel özelliği, zemin iskeleti içindeki aramoleküler ve yüzey kuvvetleri nedeniyle gerilmenin artması ile sertliğin azalmasıdır, Şekil 1.20'de görüldüğü gibi.



Şekil 1.20 Modül azalma eğrisi örneği

Hardening Soil model ile karşılaştırıldığında, HS küçük modeli, iki ek parametrenin tanıtılmasıyla genişletilmiştir: küçük gerilme seviyesinde yüksek rijitlik (G_0) ve G 'nin başlangıçtaki G_0 'unun %70'ine düştüğü kayma gerilme düzeyi (0.7). Tipik histeretik davranış, Şekil 8'de gösterilmiştir. İlk yükleme eğrisinin başlangıç teğet ve sekant rijitliği, maksimum kayma rijitliği G_0 ile örtüşür. Kayma deformasyonu arttıkça, rijitlik azalır. Yük yönlendirmesi ters çevrildiğinde, rijitlik aynı G_0 'dan başlar ve bir sonraki yük tersine çevrilene kadar azalır.

1.11.1 PLAXIS 2D'de bir kazığın modellenmesi

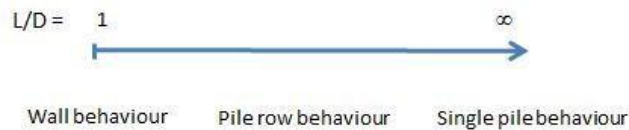
PLAXIS 2D'de bir kazık modelleme yöntemi kullanmak için çeşitli seçenekler bulunmaktadır. Söz konusu yöntemlerde iki boyutlu sonlu eleman modeli, düzlem dışındaki yönde sonsuz bir uzunluğun mevcut olduğunu varsayarak analizleri gerçekleştirir. 2D'de kazık davranışının modellenmesi, gerçek 3D davranışının bir yaklaşımıdır.

PLAXIS 2D'de kazık elemanın modellenmesinde hacim elemanları, plate, node to node anchors ve embedded beam aşağıdaki elemanlar kullanılabilir:

- Hacim elemanları (+arayüzler)
- Levhalar (+arayüzler)
- Noktadan noktaya çelikler (+levhalar)
- Gömülü giriş

Hacim elemanları ve

Bu yöntemlerin hangisinin en iyi olduğunu belirlemek için en önemli faktör, kazıkların merkezden merkeze mesafesinin ve kazık çapının oranıdır. Genel olarak, üç türlü kazık sırası ayırt edilebilir ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Kazık aralığı ile çap arasındaki ilişki (veya oran) 1 olduğunda, davranış bir duvara benzer. Diğer uçta, bu ilişki sonsuza giderse, tek kazık davranışı varsayılır. İkisi arasında, bir kazık sırası modellenir.



Şekil 1.21 Kazık davranışı, kazık mesafesine ve kazık çapına göre ilişkisi

Kazıklar 1D eleman olmasına karşın çevresi ile etkileşimi 3D oluşmaktadır. Bu kapsamda 2D modellerde tam doğru sonucu elde etmenin zorlukları oluşmaktadır. Bu zorluklar doğruluğu olumsuz yönde etkilemektedir. 2D model kullanıldığı durumlarda geometric olarak modeled değişimler söz konusu olmaktadır.

Hacim elemanları veya plakalar kullanıldığında ortaya çıkabilecek bazı eksiklikler aşağıdaki gibidir:

- Sonsuz bir duvar modellenir; ancak, çeper alanı gerçek kazık çeperinden farklı olabilir. Kuvvetlerin çepere doğru doğru bir şekilde aktarılması için

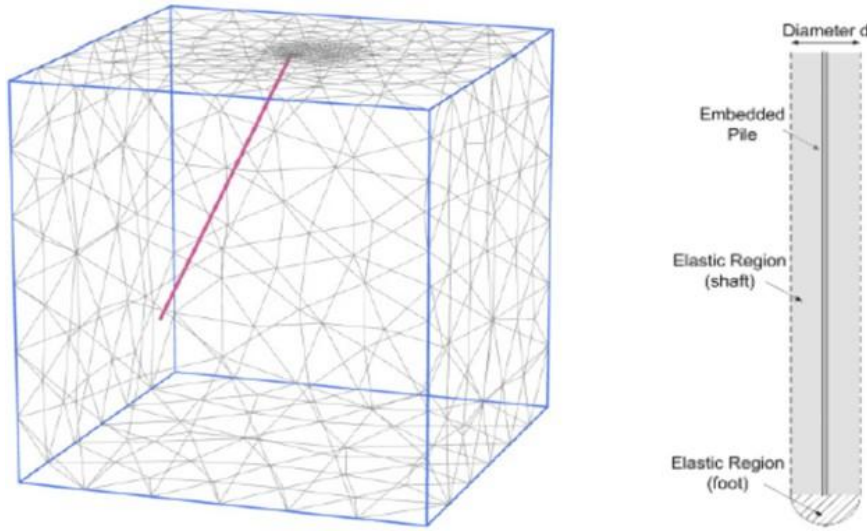
interface'i (R_{inter}) ayarlamak gerekebilir. Bu, gerçektışı bir kayma düzlemi oluşturabilir.

- Kazıkların çevresinde zeminin etkisi duvar olarak modellendiğinden zeminin davranışı gerçeğı yansıtmayabilir. Bu durum yanal yüklemelerin olduğı durumlarda doğruluktan uzaklaşabilir.
- Gövde taşıma kapasitesi ve duvar (kazık) ucunun direnci doğrudan kontrol edilemez;
- Eksenel ve yanal yönde yük-deplasman davranışını gerçekçi bir şekilde elde etmek zor veya neredeyse imkansızdır. Duvarın rijitliğı modellenirken bu sorunun çözümü olarak modellenen kazıkların aralıkları oranında azaltılarak kullanılabilir.

Yukarıda özetlenen durumları kazıkların modellenmesinde gömülü kiriş modeli kullanılması ile iyileştirilebilir. Ancak, sürtünme kuvvetinin ve uç direncinin dayanma kapasitesi gibi daha fazla giriş parametresi gereklidir.

1.11.1.1 PLAXIS Gömülü Kiriş (Sıralar)

Gömülü kiriş, PLAXIS içinde yer alan, zemin hacim elemanlarını herhangi bir yer ve yönde geçebilen bir kirişi uygulayan bir işlemdir. Bu kiriş, özel arayüzler aracılığıyla çevre zeminle bağlantılıdır ve bu arayüzler, çeper ve uç direncini açıklar. Bu kiriş bir hacmi işgal etmemesine rağmen, plastik zemin davranışının ihmal edildiğı bir elastik bölge varsayılır. Elastik bölgenin boyutu kazık çapı ile ilişkilidir. Elastik bölgenin varlığı hacimli kazık davranışına olanak sağlamaktadır (Dao, 2011). Hacimli kazıklar geometrik mpede sonlu elemanlar ağına etki ederken gömülü kiriş ağa etki etmemektedir. Bu nedenle hesaplama zamanı tasarrufu sağlar. Buna karşın, kazıların etkileri gömülü kirişe dahil edilmemektedir bu nedenle sadece kazık aşaması sonucunda az müdahale ile sonuçlanan kazıklar (örneğin delik kazıklar) etkili bir şekilde bu kiriş ile modellenebilir. Plaxis 2D ve 3D'de gömülü kiriş mevcut olup, PLAXIS kılavuzunda Gömülü Kiriş (sıra), 3D gömülü kazığın 2D sürümü olarak bahsedilir.



Şekil 1.22 3D kazık ve etrafındaki elastik bölge (Brinkgreve vd., 2015).

Gömülü kirişlerde tanımlanan arayüzler ile zemin-yapı etkileşimini modellenenbilmektedir. Gömülü kiriş sırasının doğrultu kapasitesini sağlamak için arayüz elemanlarına sertlik matrisleri kullanılır. Gömülü kazıkta elastik çeper direnci (birim başına kuvvet çevresi uzunluk biriminde) ve uç direnci (kuvvet biriminde) olmak üzere iki direnç vardır.

Bu iki direnç, kazığın aksenal yöndeki taşıma kapasitesini sağlar ve PLAXIS'teki bir giriş parametresidir. Her iki arayüzün de başarısızlık kriterleri vardır ve elastik, plastik davranış arasındaki fark belirtilmiştir.

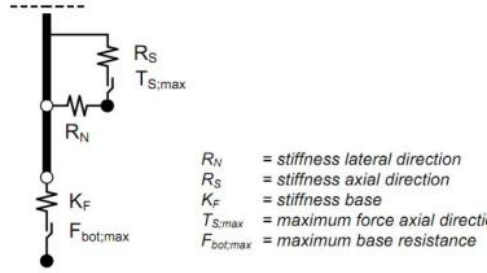
Gömülü kiriş sırasının özellikleri 3D gömülü kazıkla benzerdir, ancak 2D uzayda uygulanma şekli farklıdır. Modellenen kazıklar, 2 boyutlu modelden ayrı olarak davranırlar. Bu durumda model ağı bozulmadan sürekli davranış sergilemektedir. Özel arayüz elemanları, ağı ve gömülü kazık arasındaki zemin-yapı etkileşimi için kullanılır. 2D düzlem gerilme modeli, tekrarlanan kabul edilmesi gereken 1 metrelik bir dilimi temsil eder. Bu nedenle kazık da tekrarlayan bir şekilde dış düzlemde bir sıra kazık, 1 metre aralıklı, modellenmiştir.

Gömülü kiriş ile zemin-yapı etkileşimi irdelenebilmektedir. Söz konusu bu etkileşim arayüz elemanları ile tanımlanmaktadır. Kazık çevresindeki arayüz elemanı çizgi/alan olarak tanımlanır. Kazık ucunda/tabanda ise arayüzü nokta/alan olarak yer almaktadır.

İfade edilen arayüzler yaylar ile ifade edilir (RS ve RN)(Şekil 12). Yük-deplasman davranışı hesaplamaların sonucu kazığın rijitlik, zemin rijitlik ve

arayüz rijitlikleri arasındaki etkileşim tarafından belirlenir. Plaxis 2D programında arayüz sertliklerinin değerleri program tarafından belirlenmektedir. Belirlenen değerler ile yük-deplasman eğrisi Plaxis 2D tarafından tanımlanmaktadır.

R_N , R_S ve K_F değerleri almak için kullanılan formüller (Sluis, 2012) tarafından türetilmiştir. Farklı bir uygulama olan kazık yükleme deney sonuçları söz konusu bu eğrinin oluşturulmasını sağlayabilmektedir.



Şekil 1.23 Zemin-kazık etkileşimi, Plaxis

Arayüz sertlikleri (R_S , R_N ve K_F), çevre zeminin kayma rijitliği ile ilişkilidir:

$$R_S = ISF_{RS} \frac{G_{zemin}}{L} \quad (1.29)$$

$$R_N = ISF_{RN} \frac{G_{zemin}}{L} \quad (1.30)$$

$$K_F = ISF_{KF} \frac{G_{zemin} R_{eq}}{L} \quad (1.31)$$

Tanımlanacak arayüz sertlik faktörleri şunlardır:

- Eksenel deri sertliği faktörü, ISF_{RS}
- Yanal sertlik faktörü, ISF_{RN}
- Kazık taban rijitlik faktörü, ISF_{KF}

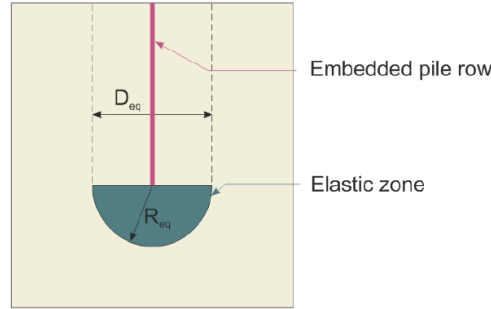
$$ISF_{RS} = ISF_{RN} = ISF_{KF} = 25 \left(\frac{L}{D_{eq}} \right)^{-0.75} \quad (1.32)$$

D_{eq} , kazığın gömülü çapı olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{12EI}{EA}} \quad (1.33)$$

Gömülü kiriş modelinde kazığın etrafında elastik bir bölge otomatik olarak tanımlanır ve bu bölge kazık boyunca eşdeğer kazık çapına eşittir. Plaxis yazılımı tarafından gömülü kazık sırasının etrafındaki zeminde elastik bir bölge otomatik

olarak tanımlanır. Bu bölgenin boyutu kazık boyunca gömülü kazığın eşdeğer çapına eşittir ve kazık tabanındaki eşdeğer yarıçap R_{eq} 'ye ($=D_{eq}/2$) eşittir.



Şekil 1.24 Kazık tabanını çevreleyen plastik bölge (Sluis, 2012).

Eksel ve yanal çeper direnci T_{max} üç şekilde modellenebilir:

- Kazığın boyunca sabit/doğrusal;
- Çoklu doğrusal, homojen olmayan veya çoklu katmanları hesaba katmak için;
- Katman bağımlı, çeper direncini mukavemet özellikleriyle ilişkilendirmek için.

Gömülü kiriş malzeme veri setleri, yani eksel ve yanal çeper direncinin belirtildiği veri setleri, yalnızca kazık taşıma kapasitesini içerir. Bu, davranışın mükemmel plastik hale geldiği noktayı belirtir. Kazığın rijitliğini, uzunluk, eşdeğer yarıçap, taşıma kapasitesi ve kazığı çevreleyen zemin ile oluşturmaktadır. Genel olarak, gömülü kazıklar sonlu etkili yüklü kazıklar olarak kullanılmamalıdır, çünkü transvers kuvvetler TS, elastik bölgenin dışında bulunan çevre zeminin başarısızlığına bağlı olmadıkça sınırlı değildir.

Kazık ile çevresel zemin arasındaki arayüz davranışı, elastik-plastik bir modelle tanımlanır. Elastik davranış, kazık deplasmanları ile dış düzlem yönde ortalama zemin deplasmanları arasındaki farkları dikkate alır. Bir cilt direnci T_{max} (uzunluk başına kuvvet birimi cinsinden) ve bir taban direnci F_{max} (kuvvet birimi cinsinden) elastik ve plastik davranışı ayırt etmek için bir başarısızlık kriteri ile tanımlanmıştır.

YER HAREKETİ KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE SPEKTRAL UYUŞUM

TBDY (2018) kapsamında yapılacak analizler zaman tanım alanında olacaktır. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının seçilmesi ve spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi için uygulanması gerekli kurallar 2.5.1 ve 2.5.3'te belirtilmiştir.

Bölüm 2.5.1'de deprem kaydı seçilirken inceleme alanının yerel zemin koşulları, uygun deprem büyüklükleri, faya olan uzaklık ve kaynak mekanizmaları gibi özelliklerin dikkate alınması yer almakta olup seçilen kayıtların öncelikle gerçek deprem kayıtları olması önerilmiştir. Gerçek deprem kayıtlarının mevcut olmaması ya da yeterli olmadığı durumlarda ise zaman tanım alanında benzeştirilmiş kayıtların kullanılabileceği ancak benzeştirilmiş kayıtların gerçek depremlerle olan uygunluğunun (inceleme alanının jeolojik durumu, sismik özellikleri vb.) gösterilmesi şart koşulmuştur.

Bölüm 2.5.3'te analizlerde kullanılacak deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarının tasarım spektrumu ile spektral olarak uyumlu hale getirilmiş şekilde ve uyuşturulan deprem hareketlerinin spektrum ortalamaları, her periyot değerinde tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır.

Bu tez kapsamında inceleme alanının karakteristik özelliklerine göre seçilen gerçek deprem kayıtlarının seçiminin ardından analizlerde kullanılacak kayıtlar spektral eşleşme yöntemi ile dönüştürülmüştür.

İnceleme alanına ait deprem parametreleri ve yerel zemin katsayıları AFAD, TDHT tarayıcısından elde edilmiş olup aşağıda sunulmuştur.

Tablo 2.1 İnceleme alanı deprem parametreleri

Koordinatlar		Yerel Zemin Sınıfı	Deprem Yer Hareketi Düzeyi
Enlem	Boylam		
36.839163°	35.886974°	ZD	DD-2

Tablo 2. 2 Yerel zemin katsayıları

Tanım	Simge	Değer
Kısa periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]	S_s	0.727
1.0 saniye periyot değerinde harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]	S_1	0.186
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]	S_{DS}	0.886
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]	S_{D1}	0.414
Maksimum yer ivmesi [g]	PGA	0.316
Maksimum yer hızı [cm/sn]	PGV	17.706

Tablo 2.3 Yerel zemin etki katsayıları, kısa periyot bölgesi için

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1	1

Tablo 2.4 Yerel zemin etki katsayıları, 1.0 saniye periyot için

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZD	2.4	2.2	2	1.9	1.8	1.7

Buna göre $F_s=1.218$, $F_1= 2.228$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.5 Elde edilen yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu

Tanım	Simge	Değer (s)
Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları	T_A	0.094
	T_B	0.468
Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu	T_L	6
Düşey tasarım spektrumu köşe periyotları	T_{AD}	0.031
	T_{BD}	0.156
Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu	T_{LD}	3

Göz önüne alınan bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları hesaplanmıştır. Sonrasında eşleştirme yapılacak periyod değerleri ve tolerans değeri ile eşleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.1 Deprem Yer Hareketi Kayıtlarının Seçilmesi

Yer hareketi verilerine erişebilmek için farklı alternatifler mevcuttur. Bu tez kapsamında “PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) NGA West2 veri tabanı kullanılarak istenilen kriterlere uygun deprem kayıtlarına erişilmiştir.

PEER’da 1. Adım ASCE Code, PEER NGA-West2 gibi farklı spektrum modelleri yer almakta olup aynı zamanda hedef spekturumun eklenebilmesi de mümkündür. Bu çalışma kapsamında AFAD interaktif uygulamasından spectrum hedef spectrum olarak tanımlanmıştır.

2. adımda istenilen nitelikte deprem parametreleri girilerek detaylı bir filtreleme yapılabilmektedir. Bu tez kapsamında spektral uyuşum yöntemi ile deprem kayıtları eşleştirileceğinden kayıtlar seçilirken inceleme alanına ait tüm karakteristik özelliklerin sağlanması amaçlanmamış olup deprem kayıtlarına ait seçilen parametreler aşağıda açıklanmıştır:

- Tasarım spekturumu: Spektrum modeli olarak No Scaling seçilmiştir.
- Fay atılım şekli: Türkiye’de etkin fay tipi olarak yanal atımlı faylanma görülmektedir.
- Bölgede oluşması muhtemel deprem büyüklüğü, 6 – 9,
- Kayma dalgası hızı aralığı, 180 – 360 m/s,
- Kuvvetli yer hareketi süresi: Deprem enerjisinin %5-95 sönümlendiği zaman aralığı (significant duration) minimum 15 saniye maksimum 60 saniye seçilmiştir.

Load Sample Input Values

Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN1,...RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type :

Magnitude : min,max

R_jb(km) : min,max

R_rup(km) : min,max

Vs30(m/s) : min,max

D5-95(sec) : min,max

Pulse :

Additional Characteristics:

Max No. Records : (<=100)

Initial ScaleFactor : min,max

Suite

Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Scaling

Scaling Method :

Şekil 2.1 Deprem kayıtlarının filtrelenmesi, (PEER, 2006)

Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq(Hz)	Initial-Search SF	H1 Acc. File Name	H2 Acc. File Name	Vertical Acc. File Name
21.98	21.98	249.92	0.1	1.0	IMPVALL.H_H-E13140.AT2	IMPVALL.H_H-E13230.AT2	IMPVALL.H_H-E13230.AT2
17.85	17.85	256.0	0.1	1.0	KOBE_FKS000.AT2	KOBE_FKS090.AT2	KOBE_FKS-UP.AT2
20.86	20.86	247.5	0.05	1.0	DARFIELD_SMTCN88W.AT2	DARFIELD_SMTCS02W.AT2	DARFIELD_SMTCS02W.AT2
27.77	27.77	256.0	0.0	1.0	KOBE_YAE000.AT2	KOBE_YAE090.AT2	KOBE_YAE-UP.AT2
25.32	26.55	242.05	0.0625	1.0	SIERRA.MEX_TAM000.AT2	SIERRA.MEX_TAM090.AT2	SIERRA.MEX_TAM090.AT2
18.21	19.47	242.05	0.075	1.0	SIERRA.MEX_CHI000.AT2	SIERRA.MEX_CHI090.AT2	SIERRA.MEX_CHI090.AT2
22.03	22.03	242.05	0.0875	1.0	IMPVALL.H_H-DLT262.AT2	IMPVALL.H_H-DLT352.AT2	IMPVALL.H_H-DLT352.AT2

Şekil 2.2 Filtreleme sonucunda elde edilen deprem kayıtları, (PEER, 2006)

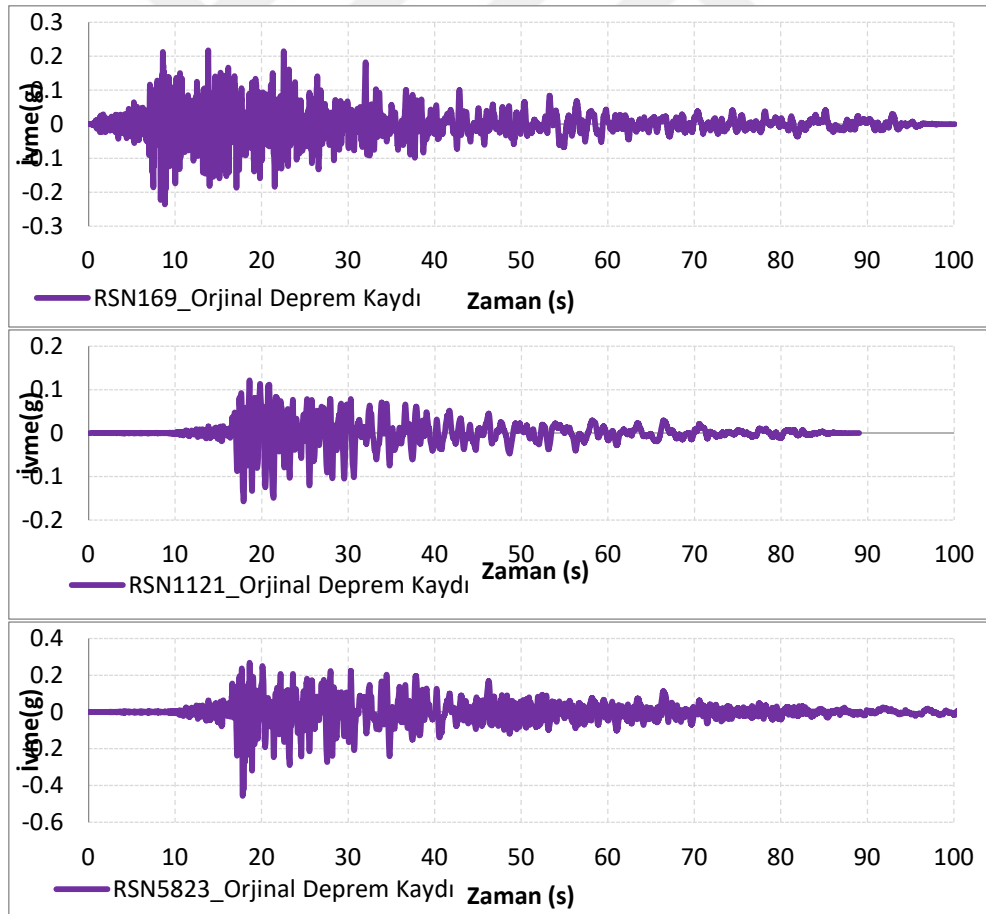
Kriterlere uygun kayıtlar listelenmiş olup bu çalışma kapsamında seçilen deprem kayıtları Tablo 2.6'da sunulmuştur.

Tablo 2.6 Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler

Deprem Adı	Yıl	İstasyon Adı	Büyüklik	Mekanizma	V_s 30 (m/s)	D 5-75 (s)	D 5-75 (s)	R jb (km)	R rup (km)
Imperial Valley- 06	1979	Delta	6.53	Yanal Atılımlı	242.05	24.4	51.4	22.03	22.03
Kobe, Japan	1995	Yae	6.9	Yanal Atılımlı	256	20.3	44.2	27.77	27.77
El Mayor- Cucapah, Mexico	2010	Chihahaua	7.2	Yanal Atılımlı	242.05	26.8	51.2	18.21	19.47

Yukarıda yer alan depremler tezin devamında kısaltmalar ile tariflenecektir. Söz konusu bu kısaltmalar aşağıda sunulmuştur:

- Imperial Valley-06 = RSN169
- Kobe, Japan = RSN1121
- El Mayor- Cucapah, Mexico = RSN 5823



Şekil 2. 3 Seçilen 3 farklı deprem kayıtlarının ivme zaman grafikleri

2.2 Spektral Uyuşum Sağlanması

SeismoMatch (Seismosoft 2009) bilgisayar programı, yer hareketlerini hedef spektrumla spektral olarak eşleştirmek için kullanılmıştır. SeismoMatch, Abrahamson (1992) ve Hancock ve diğerleri (2006) tarafından deprem yer hareketlerini ayarlamak ve ilgilenilen bir periyot aralığında hedef spektruma yakın bir eşleşme ile bir tepki spektrumu elde etmek için önerilen dalgacık algoritmasını kullanan bir uygulamadır.

Bu yaklaşımda, dikkatlice seçilen temel dalgacıklar, kayda fazladan bir yer değiştirme uygulanmayacak şekilde orijinal kayda eklenir ve çıkarılır. Zaman geçmişi süresi boyunca kaydın genlik ve frekans içeriği açısından orijinal kaydın temel özelliği korunur ve geliştirilen bir tasarım zaman geçmişleri bir tasarım spektrumuna benzer bir spektruma sahip olur (NEHRP 2011). Bu prosedür, deprem kayıtlarının değişkenliği nedeniyle yapısal tepkilerin varyansını azalttığı ve daha az sayıda analizle ortalama tepkiyi tahmin etmek için bir platform sağladığı için mühendislik uygulamalarında popülerdir (Seifried & Baker, 2014). Bu yöntemin hedef spektrum gereksinimlerini yeterince karşılamasına rağmen gerçek deprem kayıtlarını temsil eden yer hareketleri üretmektedir.

Spektral eşleştirme yöntemi, sismik kayıtların frekans tepkisindeki farklılıkları dikkate alır. Farklı kaynaklardan gelen kayıtlar genellikle farklı spektral içeriklere sahip olabilir. Bunun nedeni, kaynak mesafeleri, kaynak mekanizmaları, zemin koşulları ve diğer faktörlerden kaynaklanabilir. Spektral eşleştirme yöntemi, bu farklılıkları gidermek ve kayıtları karşılaştırılabilir hale getirmek için kullanılır.

Spektral eşleştirme yöntemi genellikle şu adımları içerir:

1. Kayıtların Frekans Analizi: İlk adımda, farklı kaynaklardan gelen sismik kayıtların frekans analizi yapılır. Bu analiz, kayıtların frekans spektrumlarının belirlenmesini sağlar.
2. Referans Spektrum Belirleme: Spektral eşleştirme için bir referans spektrumu belirlenir. Genellikle, en güvenilir veya temsil edici bir kaynaktan elde edilen kaydın spektrumu referans olarak seçilir.
3. Spektral Eşleştirme: Diğer kaynaklardan gelen sismik kayıtların spektral eşleştirme işlemi gerçekleştirilir.

Bu işlem, kaynak kaydının frekans tepkisine uyacak şekilde kayıtların frekans spektrumlarını dönüştürmeyi içerir. Bu dönüşüm genellikle amplitüd düzeltmeleri veya filtreleme teknikleri kullanılarak yapılır.

4. Kontrol ve Doğrulama: Eşleştirilmiş kayıtların spektral uyumunun kontrol edilmesi ve sonuçların doğrulanması yapılır. Bu adımda, eşleştirilmiş kayıtların frekans spektrumları karşılaştırılır ve hedeflenen uyumu sağladığından emin olunur.

Seismomatch programına hedef spektrum tanımlayarak, tanımlanan spektrum kapsamında yüklenen deprem kayıtları için eşleştirme yapılmaktadır.

Seismomatch programı 3 adımdan oluşmaktadır. 1 adım deprem kayıtlarının programa yüklenmesi, 2. Adım hedef spektrumun tanımlanması, 3. Adım ise eşleştirme yapılacak sınırları/sınırlamaları olarak açıklanabilir.

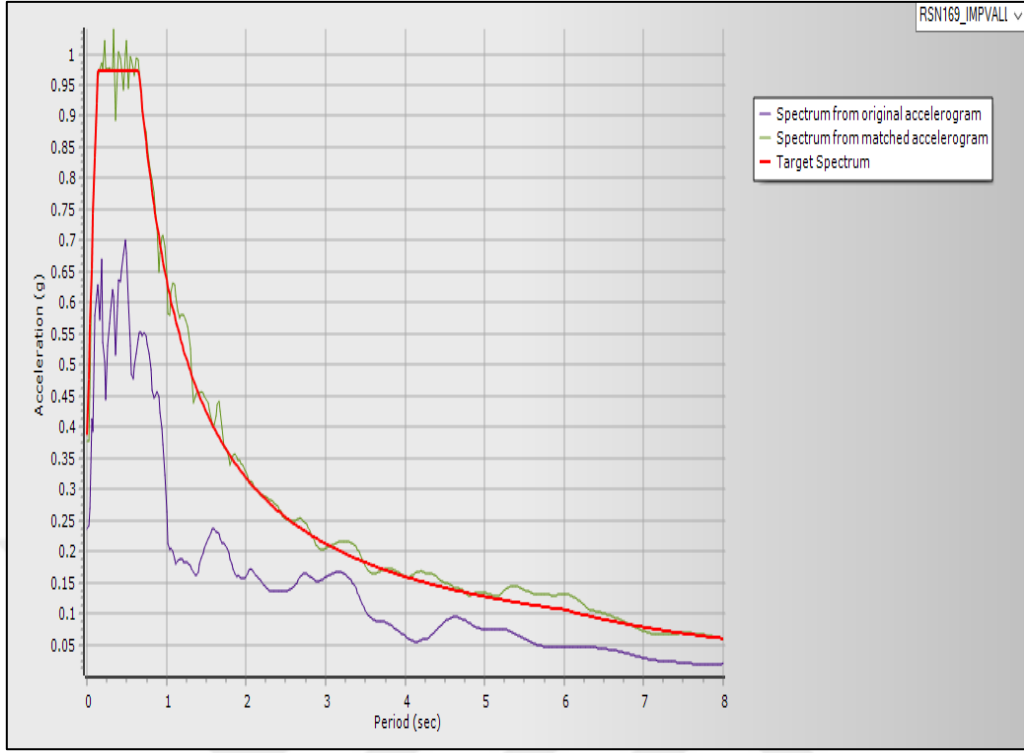
2. adım olan programa hedef spektrum girilmesi ile ilgili 3 farklı alternatif yer almaktadır.

- Programın kendi bünyesinde yer alan mevcut ulusal kodların seçilmesi ve bu kodlara ait gerekli karakteristik özelliklerin girilmesi.
- Programa yüklenebilen ivme kaydı ve sönüm oranı ile,
- Spektrumun metin dosyası ile yüklenmesi ile

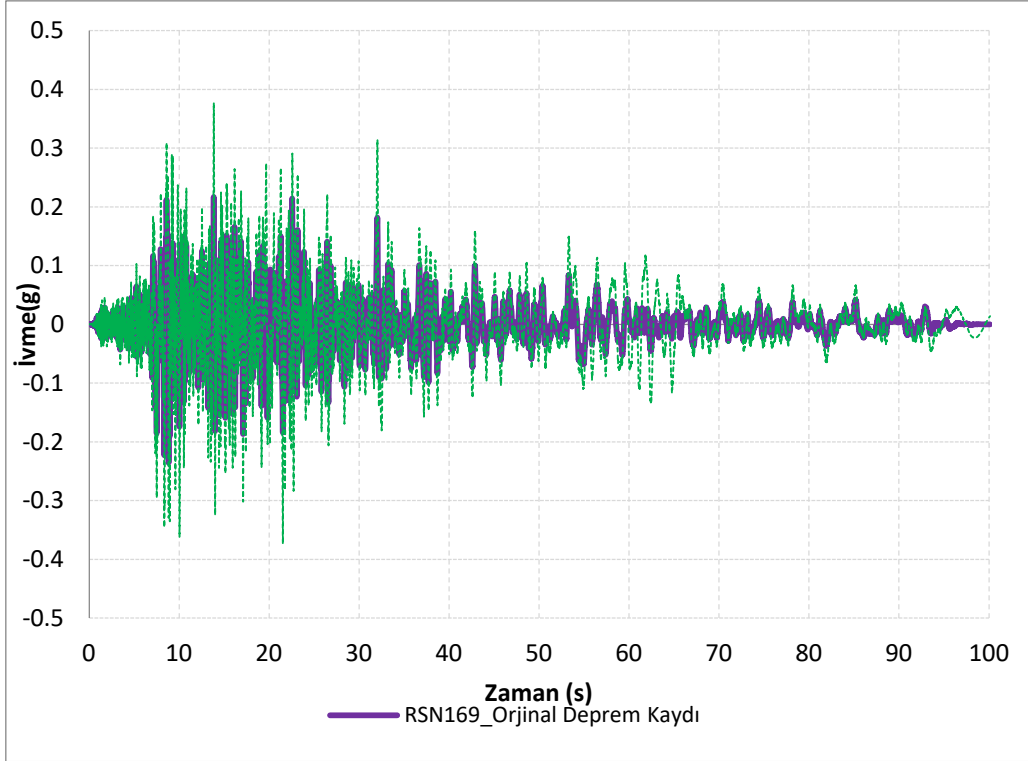
Program bünyesinde birçok ülkeye ait standartlar yer almaktadır. Bu tez kapsamında structural code için TBDY 2018 seçilmiş ve inceleme alanına ait kısa periyot ve 1 saniye için harita spektral ivme katsayısı değerleri ile zemin sınıfı tanımlanmış olup %5 sönüm oranına göre hedef spektrum belirlenmiştir. , AFAD Sismik Tehlike Detay Haritası Raporu)

Akademik ve deneme sürümünde tolerans minimum 0.3 olarak belirlenmiş olup daha hassas bir eşleştirme söz konusu değildir. Periyot aralığı olarak ise akademik versiyonda maksimum 4 sn için eşleştirme yapılsa dahi deneme sürümünde periyot değerinde herhangi bir kısıtlama yer almamaktadır. Bu kapsamda periyot değer aralığı için $0.05 < T < 8$, tolerans olarak ise 0.3 değeri seçilmiş ve eşleştirme işlemi yapılmıştır.

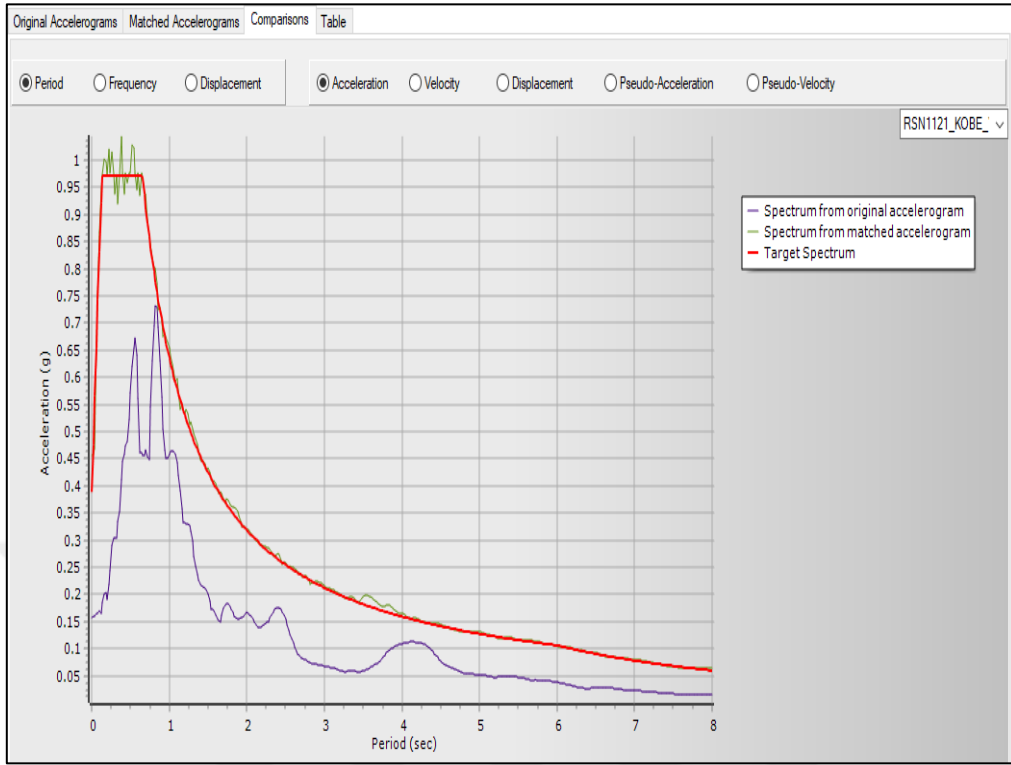
Aşağıdaki şekillerde ivme kayıtlarına ait orjinal ve eşleştirilmiş spekturumlar gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında eşleştirilen ivme kayıtları ile analizlere devam edilecektir.



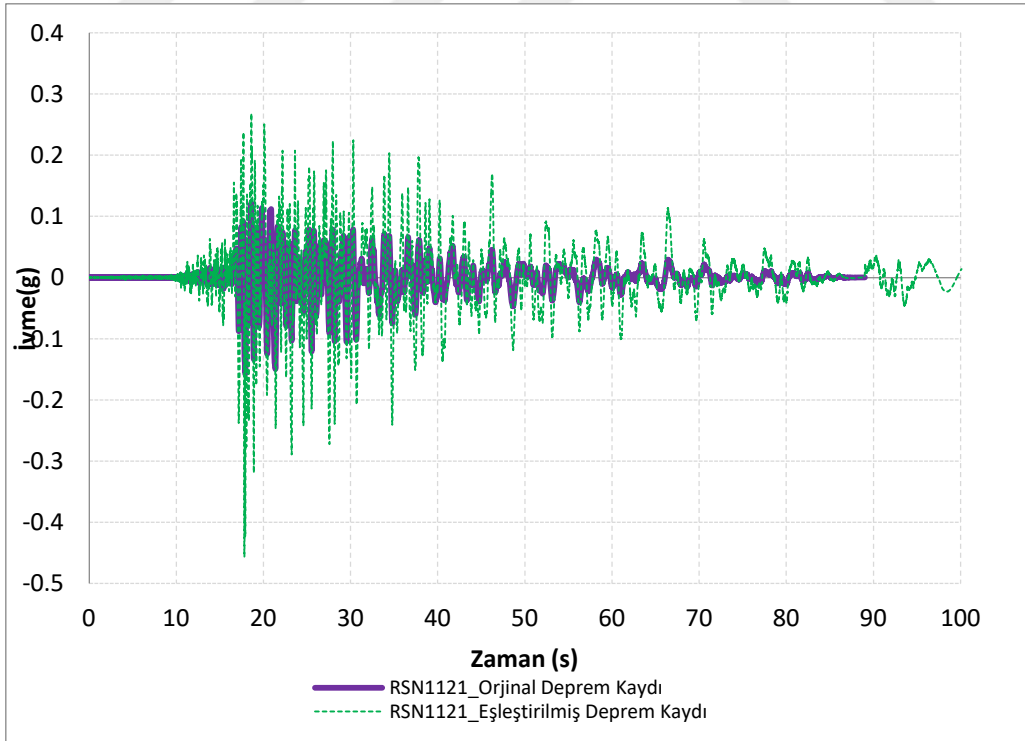
Şekil 2.4 Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN169 deprem kaydı



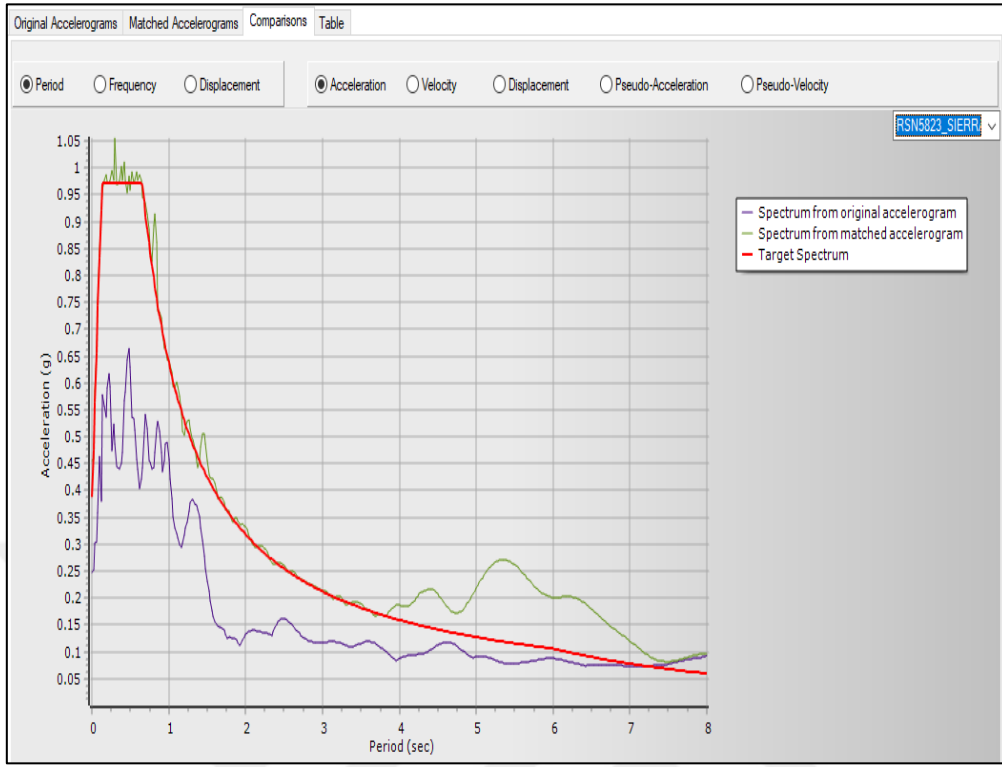
Şekil 2.5 Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN169 deprem kaydı



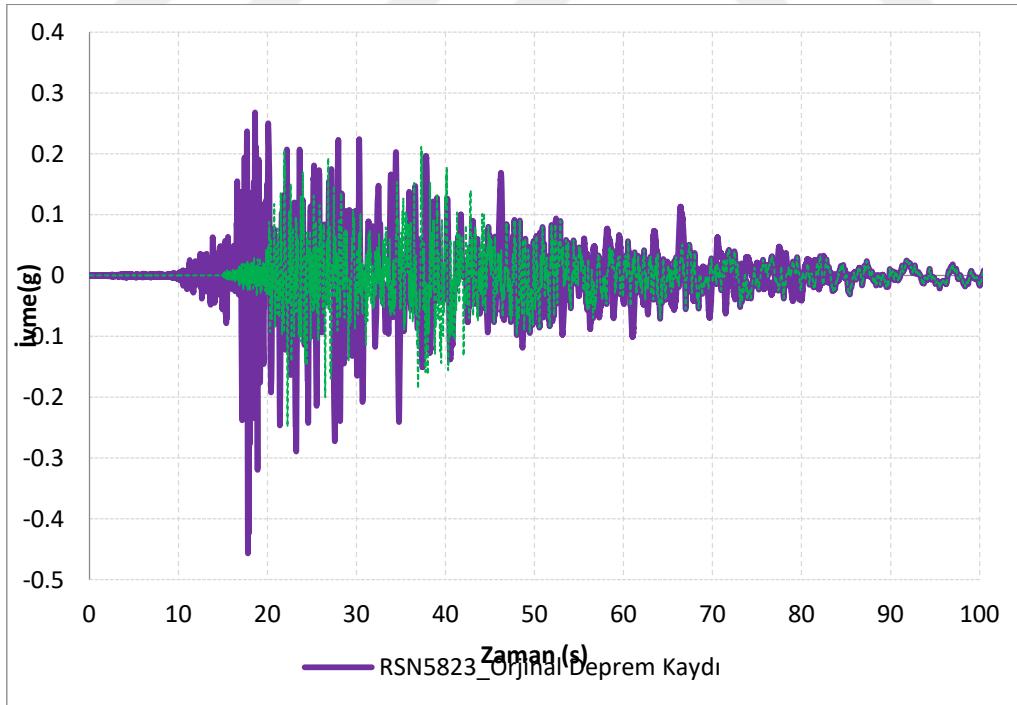
Şekil 2.6 Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN1121 deprem kaydı



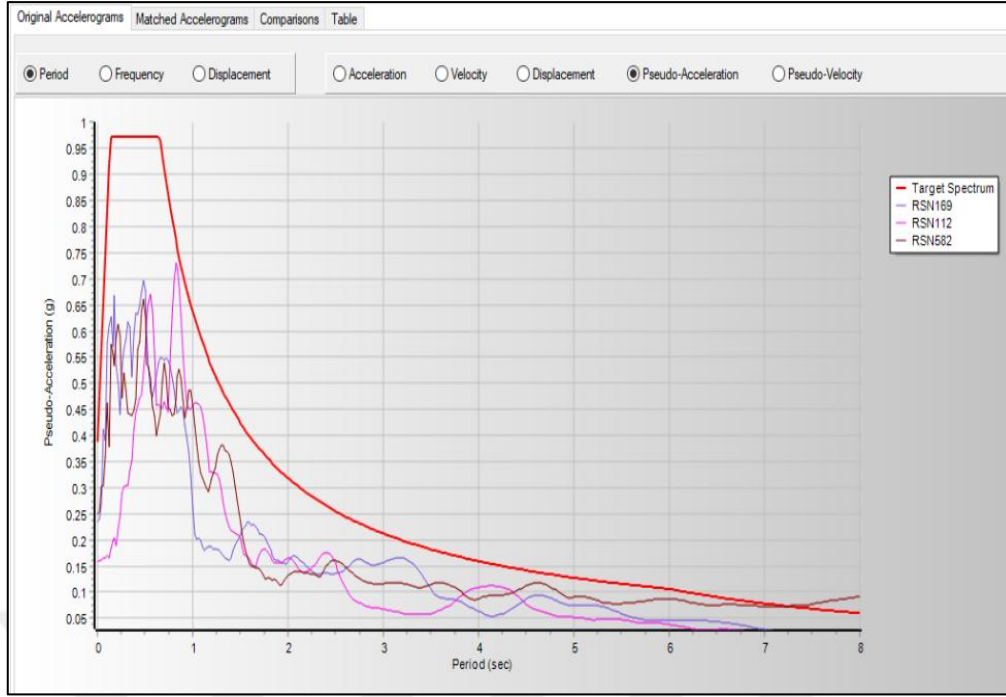
Şekil 2.7 Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN1121 deprem kaydı



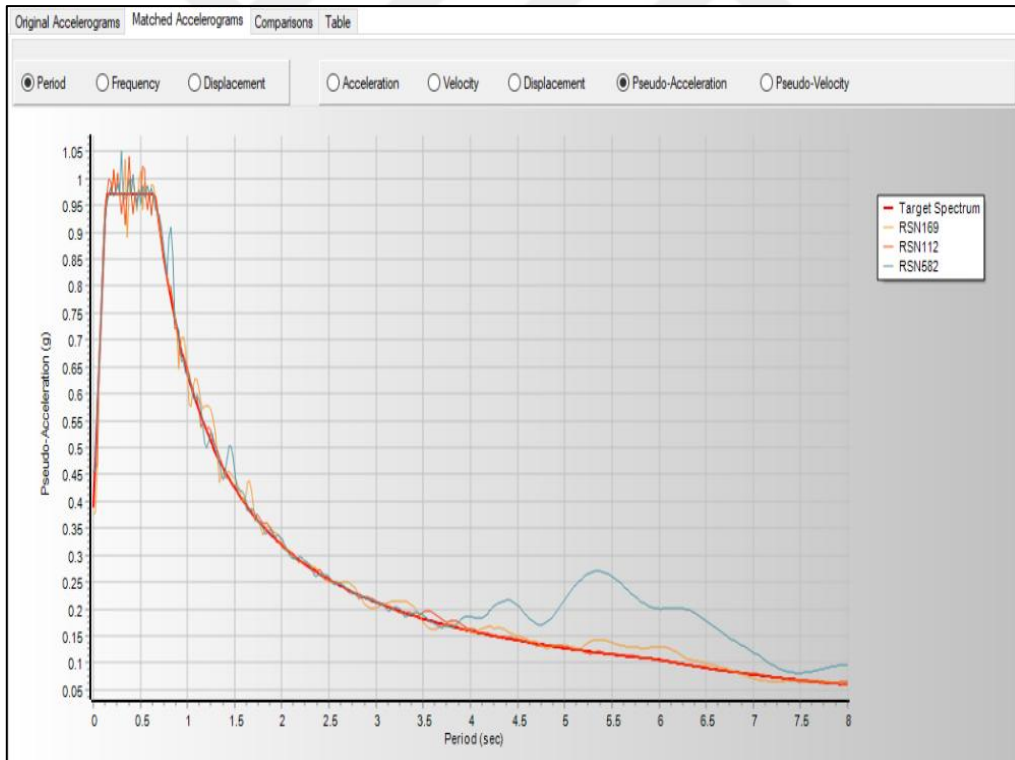
Şekil 2.8 Hedef, orjinal ve eşleştirilmiş spektrum grafiği, RSN5823 deprem kaydı



Şekil 2.9 Orjinal ve eşleştirilmiş ivme zaman grafiği, RSN5823 deprem kaydı



Şekil 2.10 Hedef ve orjinal spektrumların grafiği, tüm deprem kayıtları



Şekil 2.11 Hedef ve eşleştirilmiş spektrumların grafiği, tüm deprem kayıtları

Tablo 2.7 Deprem kayıtlarının parametreleri, orjinal

Ground Motion Parameters for Original Accelerograms			
Accelerogram	1- RSN169_	2- RSN1121	3- RSN5823
Max Acceleration (g)	0.23570	0.15763	0.24849
Max Velocity (cm/sec)	26.32481	21.19307	38.34568
Max Displacement (cm)	14.69485	8.73599	48.22705
Vmax/Amax (sec)	0.11385	0.13705	0.15730
Acceleration RMS (g)	0.03935	0.02791	0.03215
Velocity RMS (cm/sec)	6.60562	6.06419	10.60051
Displacement RMS (cm)	4.21347	3.27360	13.92177
Arias Intensity	2.38935	1.06885	2.07069
Characteristic Intensity	0.07811	0.04400	0.06573
Specific Energy Density (cm ² /sec)	4369.52967	3273.66022	14607.6562
Cum. Abs. Velocity (cm/sec)	2537.53950	1418.56750	2388.49440
Acc Spectrum Intensity (g*sec)	0.23873	0.12936	0.21203
Vel Spectrum Intensity (cm)	115.61979	123.35216	120.74126
Housner Intensity (cm)	109.41715	120.08516	114.76541
Sustained Max. Acceleration (g)	0.21701	0.13367	0.20682

Tablo 2.8 Deprem kayıtlarının parametreleri, eşleştirilmiş

Ground Motion Parameters for Matched Accelerograms			
Accelerogram	1- RSN169_	2- RSN1121	3- RSN5823
Max Acceleration (g)	0.37702	0.45657	0.43301
Max Velocity (cm/sec)	54.46620	56.10646	68.51570
Max Displacement (cm)	32.58298	47.56159	73.11174
Vmax/Amax (sec)	0.14726	0.12527	0.16129
Acceleration RMS (g)	0.06741	0.06339	0.06568
Velocity RMS (cm/sec)	13.17803	15.34016	18.31934
Displacement RMS (cm)	9.70457	14.23260	23.29874
Arias Intensity	7.01297	5.51229	8.64208
Characteristic Intensity	0.17516	0.15059	0.19193
Specific Energy Density (cm ² /sec)	17390.3553	20948.2355	43626.1061
Cum. Abs. Velocity (cm/sec)	4511.46936	3498.82380	5031.39722
Acc Spectrum Intensity (g*sec)	0.38978	0.38975	0.39046
Vel Spectrum Intensity (cm)	230.00574	229.24552	227.31239
Housner Intensity (cm)	219.09857	216.46079	218.21310
Sustained Max. Acceleration (g)	0.36263	0.28919	0.40531

1 BOYUTLU VE 2 BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN YER TEPKİ ANALİZLERİ

Bu bölüm, 5. Bölümü oluşturan 2 Boyutlu Lineer Olmayan Yapı Kazık Zemin Etkileşimi için malzeme modeli, model boyutu ve model sınırlarını belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak DeepSoil programı kullanılarak zaman alanında doğrusal olmayan tek boyutlu analizler yapılmıştır. Her iki zemin profili de 30 metre kalınlığında tek tabakadan oluşmaktadır. DeepSoil programında her iki zemin profili de frekansın 30 Hz'i geçmemesi için zemin tabakalarının mukavemet özellikleri aynı olacak şekilde(değiştirilmeden) DeepSoil programında otomatik olarak alt katmanlara ayrılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise Plaxis programında 1 boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Sönüm oranı eğrileri zemin tabakasının özelliklerine göre Darandeli (2001) eğrileri ile oluşturulmuştur. Bu kapsamda Plaxis'te kullanılan HSS modeli için parametreler, DeepSoil programında kullanılan parametrelerle uyumlu olmaktadır. Devamında ise PLAXIS 2D kullanılarak serbest alan davranışı koşullarını simüle etmek için 1 boyutlu yer tepki analizi yapılmıştır. Zeminin dinamik yükleme altındaki doğrusal olmayan davranışı için HSS modeli kullanılarak zemin profili sütun olarak temsil edilmiştir. 1-D dalga yayılımı için, yanıl sınır koşulları bağılı serbestlik dereceleri olarak modellenmiştir. Bu sınır koşulu ile aynı yükseklikte konumlandırılan sol ve sağ sınırlardaki düğümler birbirine bağlanarak dinamik yükleme uygulaması sırasında eşit yer değiştirmelere olanak sağlamaktadır (Plaxis, 2022).

Bir boyutlu analizlerin ardından Plaxis programında iki boyutlu analizler yapılmıştır. İki boyutlu analizlerde sınır koşullarının seçimi büyük önem taşır ve farklı sınır koşulları seçildiğinde tutarsız sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, analiz sonuçlarını karşılaştırmak için kil profili için modelin genişliği ve sınır koşulları değiştirilmiştir. 2 boyutlu dalga yayılımında ise yanıl sınır koşulları serbest alan (Free Field), Viscous olarak modellenmiştir ve taban koşulları Compliant Base uyumlu tabandır. Yer hareketinin ana kaya seviyesinde uygulandığı kabul edilmiş olup alt sınırda öngörülen bir deprem kayıtları yer değiştirme uygulanarak simüle edilmiştir.

Kum zemin için drenajlı analizler yapılırken, Kil zemin üzerinde yapılan analizlerde, yeraltı suyunun olmaması nedeniyle drenajlı ve drenajsız modeller arasındaki farkı ortaya koymak için drenajlı ve drenajsız iki ayrı model analiz edilmiştir. Deepsoil ve Plaxis ile yapılan 1 boyutlu analizler karşılaştırılmış, drenajsız analizlerin Deepsoil ile benzer davranış sergilediği, drenajlı analizlerde ise farklılıklar gözlenmiştir. Bu bağlamda, 2 boyutlu analizler için Kil profilindeki drenajsız model tercih edilmiştir.

Söz konusu kil profilinde 1 boyutlu ve 2 boyutlu analizlerde 2. boyut etkisinden etkilenmeden benzer değerler ve davranışlar elde etmek için sınır koşulları değiştirilerek farklı analizler yapılmıştır. Sınır koşullarındaki değişimin davranış üzerindeki etkisini gözlemlemek için serbest alan ve viskoz sınır olmak üzere iki ayrı analiz yapılmıştır. Aynı zamanda model genişliğindeki değişimin sonuçlara etkisini incelemek için model genişliği -100 m, +100 m ve -25 m - +25 m olarak analiz edilmiştir.

3.1 DeepSoil ile 1 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi

Sismik olaylar zemin-yapı sistemini dinamik ve genellikle oldukça doğrusal olmayan kuvvetlere maruz bırakır ve doğrusal analiz yöntemleri gerçek tepkiyi yeterince yansıtmayabilir. Doğrusal olmayan analiz, deprem yükü altında zemin ve yapıların karmaşık davranışının daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar.

DeepSoil'de sismik analiz için doğrusal olmayan analizin gerekliliğinin nedeni aşağıda sıralanmaktadır:

- Deprem sırasında zeminler önemli deformasyonlara ve doğrusal olmayan davranışlara maruz kalır. DeepSoil'deki doğrusal olmayan analiz, zemin plastisitesi, gerinim yumuşaması ve zemin özelliklerinin döngüsel bozulması gibi olguları hesaba katar. Program, bu doğrusal olmayan davranışları dikkate alarak, zemin sıvılaşması, zemin büyümesi ve deprem sonrası oturmalar da dahil olmak üzere, zeminlerin sismik kuvvetlere karşı gerçekçi tepkisini yakalayabilir.
- Sismik yükleme, farklı frekans içeriği ve yer hareketi özelliklerinin bir kombinasyonunu içerir.

DeepSoil'deki doğrusal olmayan analiz, sismik yüklerin zaman geçmişini dikkate alarak deprem kaynaklı tepkilerin daha gerçekçi bir şekilde simüle edilmesini sağlar. Bu, özellikle birden fazla yer hareketinin kümülatif etkilerini ve farklı frekansların zemin ve yapı davranışı üzerindeki etkisini yakalamak için önemlidir.

Özetle, DeepSoil'deki doğrusal olmayan analiz sismik analiz için gereklidir çünkü zemin ve yapısal doğrusal olmayanlığın dikkate alınmasını sağlar, zemin ve yapı arasındaki karmaşık etkileşimi yakalar ve sismik yüklerin gerçekçi simülasyonuna izin verir.

Söz konusu bu tez kapsamında DeepSoil programında bir boyutlu yer tepki analizleri yapılırken 5 adım takip edilmiştir:

1. Adımda analiz özellikleri belirlenmiştir. Doğrusal olmayan, zaman tanım alanında, GQ/H Zemin modeli ve Non-Masing Re/Unloading histerik modeli kullanılmıştır. GQ/H Zemin modeli, zeminin gerilme-deformasyon ilişkisini tanımlamak için kullanılır ve özellikle zeminin doğrusal olmayan davranışlarını anlamak için önemlidir. Zeminin gerçekçi bir şekilde modellenmesine ve zeminin büyük deformasyonlara maruz kaldığında doğru şekilde tepki vermesine olanak tanır. Non-Masing Re/Unloading Formülasyonu ise, zeminin yüklenme ve boşaltma süreçlerindeki davranışını tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu formülasyon, zeminin gerilme-deformasyon ilişkisinde Masing histerizmine dayalı olmayan davranışları modeller. Masing kuralları, bir zemin malzemesinin yüklenme ve boşaltma sırasında aynı yolu izlemesi gerektiğini önerir. Ancak zeminler genellikle elastik olmayan davranış sergiler. Bu nedenle, Masing kuralları, bazı zemin malzemelerinin gerçek davranışını tam olarak modelleyemez. Özellikle, zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkisinde histeretik davranış göstermesi durumunda, Masing kuralları uygun bir modelleme yaklaşımı sağlamamaktadır. Bu kapsamda zeminin yüklenme ve boşaltma sırasında gösterdiği farklı davranışları ele almak amacıyla Non-Masing Re/Unloading histerik modeli tercih edilmiştir. Bu model, Yüklenme ve boşaltma sırasında farklı davranışlar sergileyen zeminler için daha doğru sonuçlar sağlar.

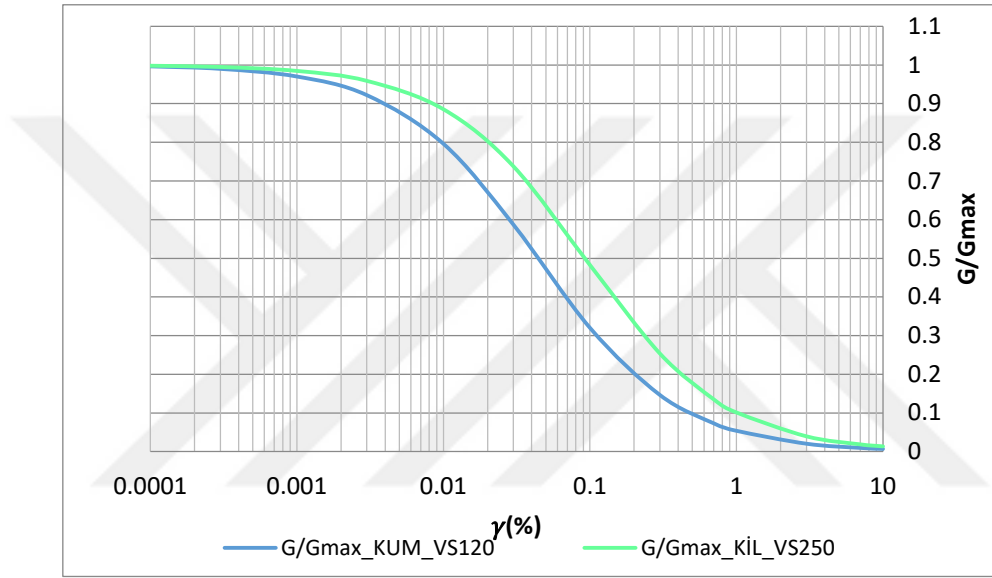
2. Ardından zemin profilinin sahip olabileceği maksimum frekans değerini belirleyip Zemin profilinin maksimum frekans değerini geçmeyecek şekilde tabaka kalınlıklarına ait istenilen özellikler seçilmiştir.
Zeminin frekans değerini $f_s=4H/V_s$ maksimum 30 Hz olmasını sağlamak amacıyla tek tabakadan oluşan zemin modeli, zemin tabakalarının mukavemet özellikleri aynı olacak şekilde(değiştirilmeden) DeepSoil programında otomatik olarak 1-2 m arasında değişecek şekilde otomatik olarak alt katmanlara bölünmüş olup frekans değeri 30 Hz olacak şekilde oluşturulmuştur.
3. Adımda zemin profiline ait tabakalara ait özellikler yer almaktadır.Zemin profilinin oluşturan tabakaların kalınlığı, birim hacim ağırlığı, kayma dalgası hızı drenajsız kohezyon değeri gibi fiziksel ve mukavemet özellikleri belirlenmektedir. Programda yer alan azalım ve sönümleme referans eğrilerine göre zeminin histerik davranışı modeli belirlenir. Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan(standartlaşan), laboratuvar deneyleri ve saha verileri ile uyumlu sonuçların elde edildiği Darendeli (2001) eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca Darandeli (2001) eğrileri farklı aşırı konsolidasyon oranları, sükunetteki toprak basıncı değeri ve plastisite indislerine bağlı olarak birden fazla girdi ile hesaplandığından tercih edilmiştir. Ardından zeminin kalınlığı, hakim Frekans ve periyot değeri kontrol edilerek grafiksel olarak derinlikle tabaka özelliklerindeki değişimler gösterilmektedir.
4. Adım programda mevcut olan deprem kayıtları yada yeni deprem kayıtları eklenir. Bu çalışmada Şekil1.6'da yer alan deprem kayıtları kullanılarak analizler yapılmıştır.
5. Adım yalnızca zaman tanım alanında yapılan analizlerde yer almaktadır. Bu adımda viskos sönümleme formülasyonu ile düşük deformasyon seviyelerindeki sönümleme modellenebilmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen analiz için Deepsoil programının da önerdiği frekans bağımsız sönümleme formülasyonu seçilmiştir.

6. Adımda ise analiz sonuçlarına erişilmektedir.

30 m kalınlığında tek tabakadan oluşan 2 Ayır zemin profili seçilmiştir. Kil ve Kum olmak üzere seçilen zemin prfillerine ait malzeme özellikleri aşağıda yer almaktadır. Zemin profillerine ait özet bilgiler Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Zemin parametreleri

Zemin Tabakası	γ (kN/m ³)	H (m)	Vs (m/s)	Cu (kPa)	Φ (°)	K0	PI
KUM	19	30	120	0	29	0,515	0
KİL	20	30	250	5	30	0,50	20



Şekil 3.1 Belirlenen zemin profillerine göre kayma modülü azalım oranı ile çevrimsel birim kayma deformasyonu arasındaki ilişki

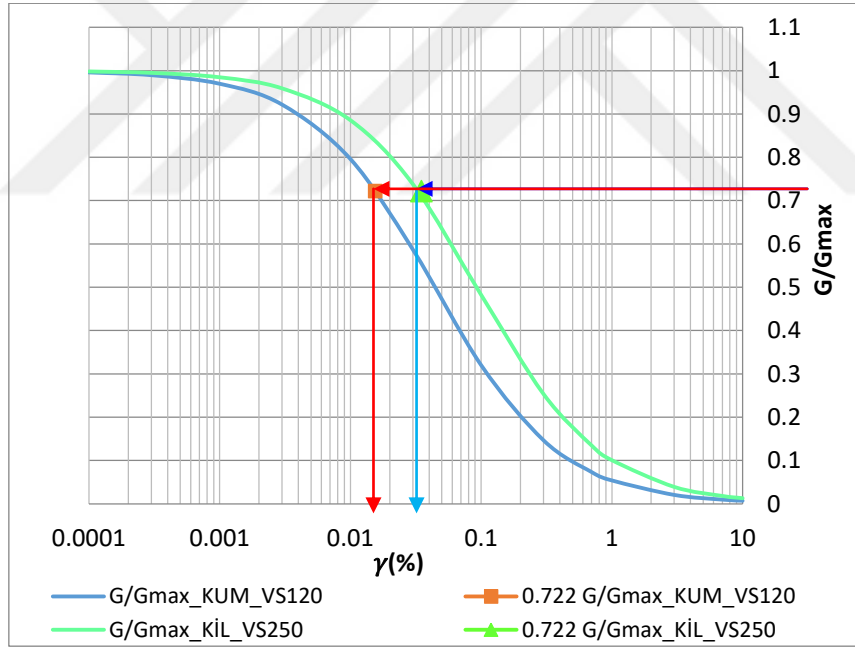
3.2 Plaxis ile 1 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi

PLAXIS ile 1 boyutlu lineer olmayan yer tepki analizi yapılırken Plaxis 2D programı kullanılarak zemin kolonu üzerinde analizler yapılmıştır. 1 boyutlu DeepSoil sonuçları ile Plaxiste 1 boyutlu sonuçlar karşılaştırılarak 2 boyutlu modele altlık oluşturmak amacı güdülmektedir.

1 boyutlu lineer olmayan yer tepki analizi için adımlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Modelin Hazırlanması: 1 boyutlu analiz için 1 m genişliğinde 31 m derinliğinde zemin modeli tanımlanmıştır. 30 m’lik tabaka zemin tabakası olup ayrıca 1 m kalınlığında kaya tanımlanmıştır.

2. Zemin Modelinin Seçilmesi: Lineer olmayan analizler için uygun materyal modelinin seçilmesi gereklidir. Bu modeller, büyük deformasyonları ve zeminin gerilme-yer değiştirme ilişkilerinde doğrusal olmayan etkileri içermektedir. HSS model ile kum ve kil birim tanımlanmıştır. HSS modelinde G_0 ve $\gamma_{0.7}$ parametrelerinin de girilmesi gerekmektedir. $\gamma_{0.7}$ parametresinin belirlenmesinde belirlenen zemin parametreleri ile DeepSoil programında sönüm oranı eğrileri zemin tabakasının özelliklerine göre Darandeli (2001) eğrileri ile elde edilen kayma modülü azalım oranının çevrimsel birim kayma deformasyonu ile değişimi grafiği kullanılmıştır. Bu grafik, modül azalma ve sönüm eğrisi uyumu (MRDF) için UIUC Azaltma Faktörü, Masing dışı davranışın ifade edilebilmesi için Modül Azalma Eğrisinin %10 kayma geriliminde hedef kayma dayanımının %95'ine ulaştığı koşul altında 0.05%'lik bir kayma aralığı için uygun hale getirilmiş olup aşağıda sunulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kayma modülü azalım oranı ile çevrimsel birim kayma deformasyonu arasındaki ilişkiden HSS model girdisi elde edilmesi

Tablo 3.2 Zemin parametreleri, Plaxis programında kullanılan

Parametreler	Zemin Profili		
	Kum	Kil	Kil
Malzeme Modeli	Hardening Soil Small	Hardening Soil Small	Hardening Soil Small
Drenaj Tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajsız B
γ (kN/m ³)	19	20	20
$\phi'(o)$	29	30	-
ν'	0,2	0,2	0,2
c' (kPa)	0	5	-
c_u (kPa)	-	100	100
E_{50}^{ref} 50(kPa)	11000	22500	22500
E_{oed}^{ref}	11000	22500	22500
E_{ur}^{ref} (kPa)	33000	67500	67500
p_{ref} (kPa)	100	100	100
$G_{0,ref}$	27800	139000	139000
$\gamma_{0.7}$	0,00016	0,00035	0,00035
V_s (m/s)	120	250	250

3. Sınır Koşullarının Tanımlanması: Modelin sınır koşulları belirlenirken alt sınır olarak sönüleyici alt sınır/uyumlu taban(compliant base) seçilmiş olup yüzeye ulaşan deprem dalgasının yansıyarak sonsuza gittiği modellenmiştir. Düşey sınırlar ise tek boyutlu zemin kolonu olarak ifade edebilmek adına bağlı serbestlik derecesi(tied degree of freedom) seçilerek karşılıklı düğümlerin (nodeların) birbirlerine bağlanmasını sağlamaktadır.
4. Deprem Kaydı tanımlanması: Zemin kolonunun alt sınır olarak tanımlanan sönüleyici alt sınırında arayüz(interface) tanımlanarak yerdeğiştirme(deplasman) olarak deprem ivme kaydının yarısı etkililmektedir. Bu durum kayadan yukarı yansıyan deprem dalgalarını ifade etmektedir.
5. Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi: Sonlu elemanlar modelinde dinamik analizler gerçekleştirilirken üçgen eleman boyutları kontrol edilmelidir. Dinamik analizlerde eleman boyutlarının ortalaması deprem hareketinin maksimum frekans içeriğine göre tanımlanan dalga boyunun 8’de 1’i boyutundan küçük olması gerekliliğini dile getirmiştir Kuhlemeyer ve Lysmer (1973),

$$L_{max} \leq \frac{V_{s,min}}{8 \cdot f_{max}} \quad (3.1)$$

Bu çalışma kapsamında deprem kayıtlarının maksimum frekans değeri 10 Hz. Mertebesindedir. Zemin profilleri tek tabakadan oluşmakta olup Kil ve Kumbirimin Vs değerleri 120-250 m/s'dir.

Her iki zemin profilinde eleman boyutu sınırı farklı olmakta olup Denklem 3.1'e göre kum birim için ≤ 1.5 m, kil birim için ise ≤ 3.1 m olması gerektiği hesaplanmıştır.

6. Analizde kullanılacak uygun adım büyüklüğü, analiz süresi ve diğer parametreler belirlenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

3.3 Plaxis ile 2 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizi

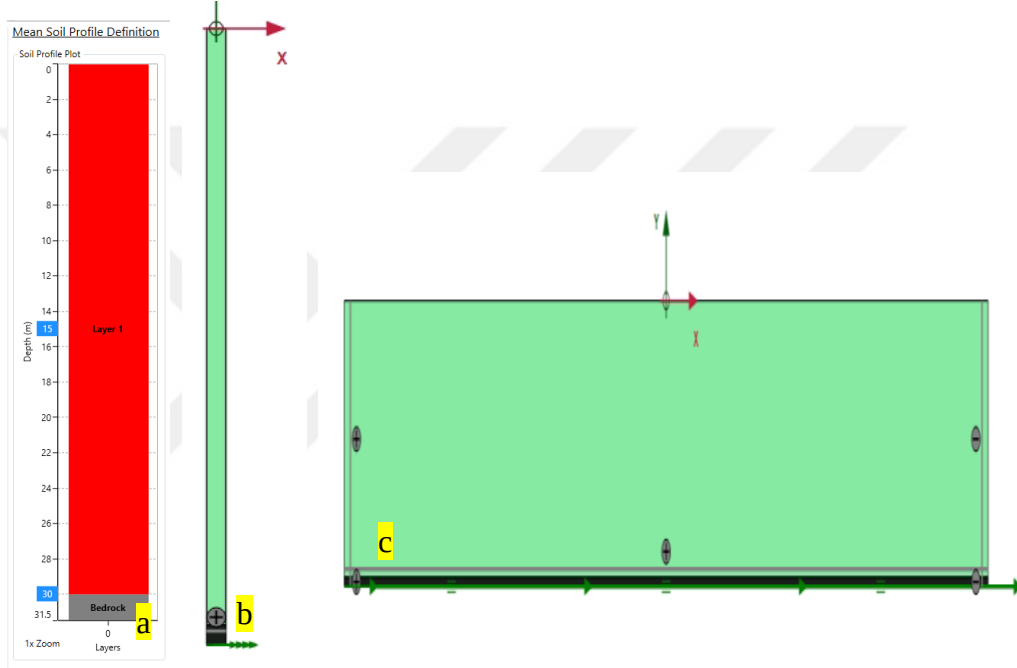
İki boyutlu analizlerde sınır koşullarının seçimi büyük önem taşımaktadır ve farklı sınır koşulları seçildiğinde tutarsız sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Sınır koşulu düzeyde geçirgen(free field) olarak ve viskoz(vicous) olarak farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sınır değerinin de 50 m genişliğinde bir model ve 200 m genişliğinde model olmak üzere farklı analizler yapılmıştır. Bu analizlerin yapılmasındaki amaç 5. Bölümde kullanılacak olan modelin belirlenmesidir. 2 boyutlu yapılan analizler 1 boyutlu analizler ile karşılaştırılıp 2. Boyut etkisinin ortadan kalktığı model sınırı seçilecektir. 2 farklı zemin profilinde analizler gerçekleştirilirken Kil birimde yer altı suyunun olmadığı durumda drenajlı ve drenajsız analizler yapılmış olup malzeme modeline de ayrıca karar verilmiştir.

Kil profili üzerinde yapılan drenajlı analizlerde DeepSoil ile farklılıkların olduğu, drenajsız analizlerde ise DeepSoil ile benzer davranış sergilediği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda Kil profili için 2D analizlerde drenajsız model tercih edilmiştir.

Kil profili üzerinde 1D ve 2D analizlerde ikinci boyut etkisinden etkilenmeyen benzer değerleri ve davranışları elde etmek için sınır koşulları değiştirilerek farklı analizler yapılmıştır. Davranış üzerinde sınır koşullarının değişiminin etkisini gözlemlemek için serbest alan ve viskoz sınır olmak üzere iki ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, model genişliğinin sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek için model genişliği -100 m, +100 m ve -25 m - +25 m olarak analiz edilmiştir.

3.4 DeepSoil 1boyutlu, Plaxis 1 Boyutlu ve Plaxis 2 Boyutlu Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizlerinin karşılaştırılması

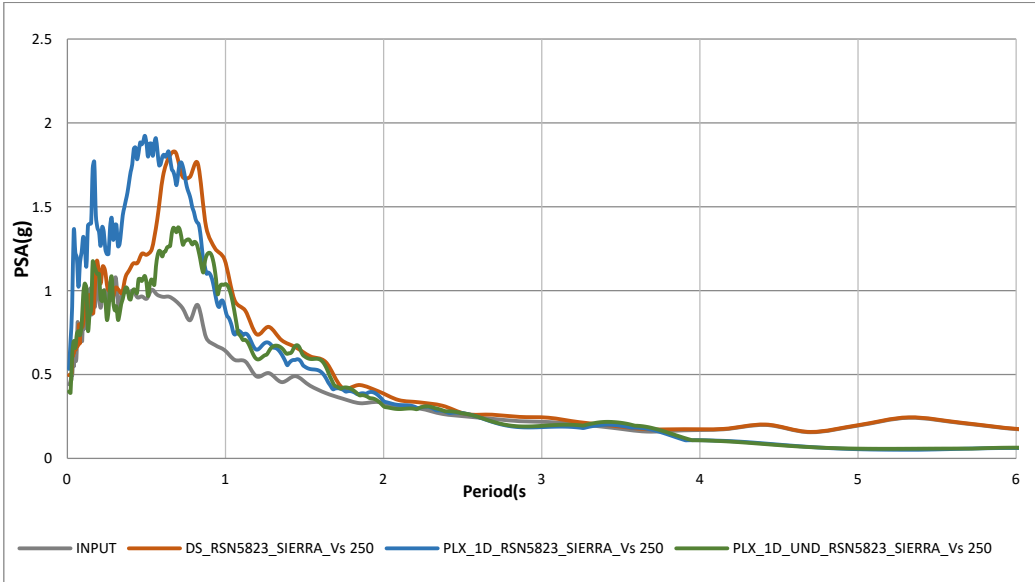
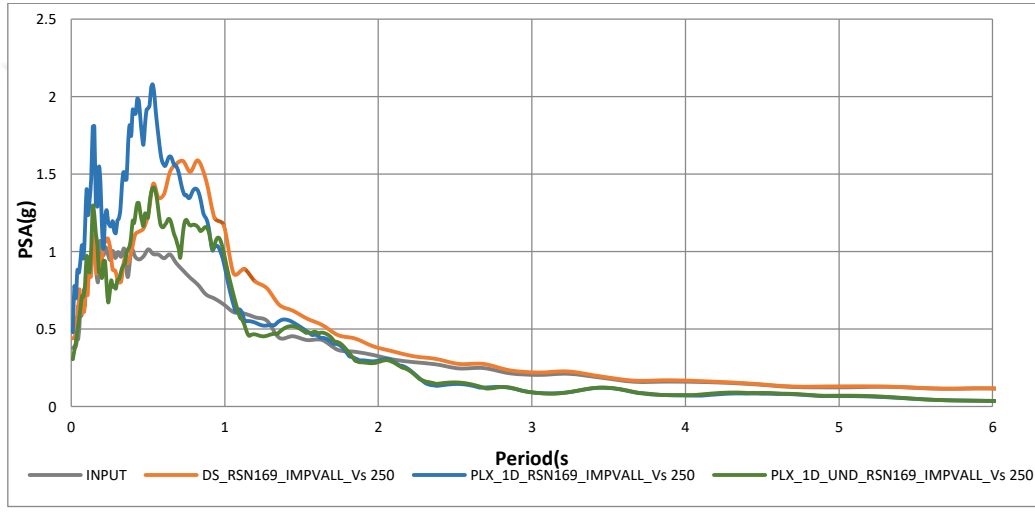
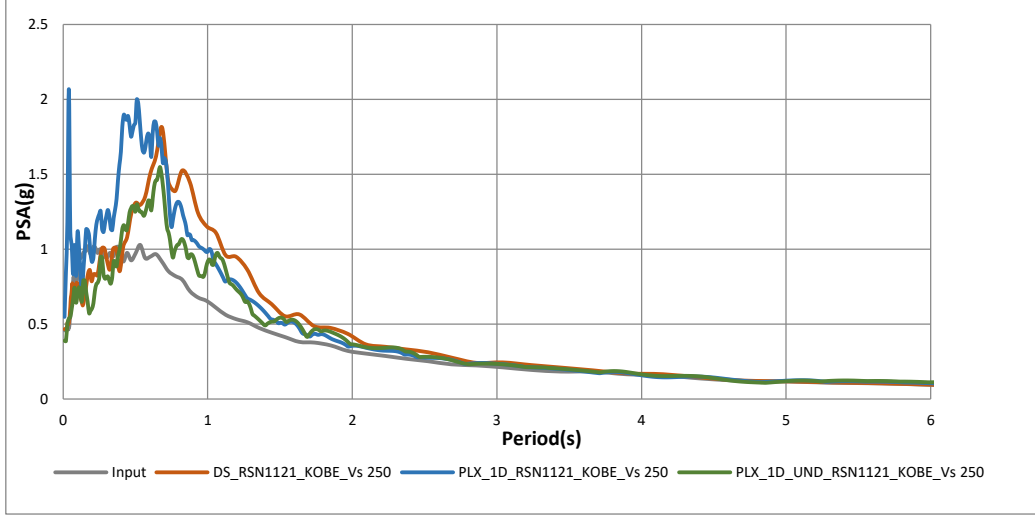
DeepSoil 1 boyutlu, Plaxis 1 boyutlu ve Plaxis 2 boyutlu analiz sonuçlarının karşılaştırılması bu bölümde yapılacaktır. Analizlerde örnek olarak modellerin görüntüsü aşağıda sırasıyla DeepSoil, Plaxis 1D ve Plaxis 2D olmak üzere sunulmuştur.



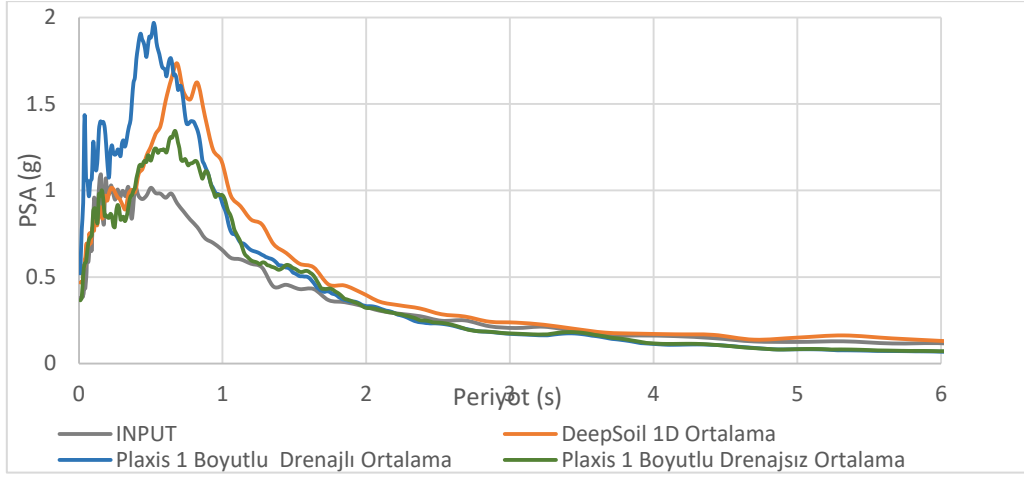
Şekil 3.3 DeepSoil 1D(a), Plaxis 1D(b) ve Plaxis 2D(c) analiz modelleri

İlk olarak belirlenen Kil zemin profilinde üç farklı deprem için ayrı ayrı ve bir ortalama olarak analiz sonuçlarının özet tabloları aşağıda sunulmuştur. Tablolar ve grafiklerden görülebileceği gibi, DeepSoil ve Plaxis 1-boyutlu analiz sonuçları drenajlı koşullarda benzer değildir, ancak drenajsız analizler benzer davranış sergilemektedir (Şekil 3.4, 3.5, Tablo 3.2).

Analiz sonuçlarına göre, DeepSoil ve Plaxis analizleriyle karşılaştırıldığında, maksimum spektral ivmenin meydana geldiği periyot değerlerinin uyumlu olduğu ve maksimum spektral ivmenin değerinin Plaxis analizlerinde DeepSoil analizlerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, yer yüzeyinde meydana gelen ivme değerlerinin Plaxis ile gerçekleştirilen çözümlerde daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.4, 3.5, Tablo 3.2).



Şekil 3.4 Farklı deprem kaydına ait deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, kil zemin



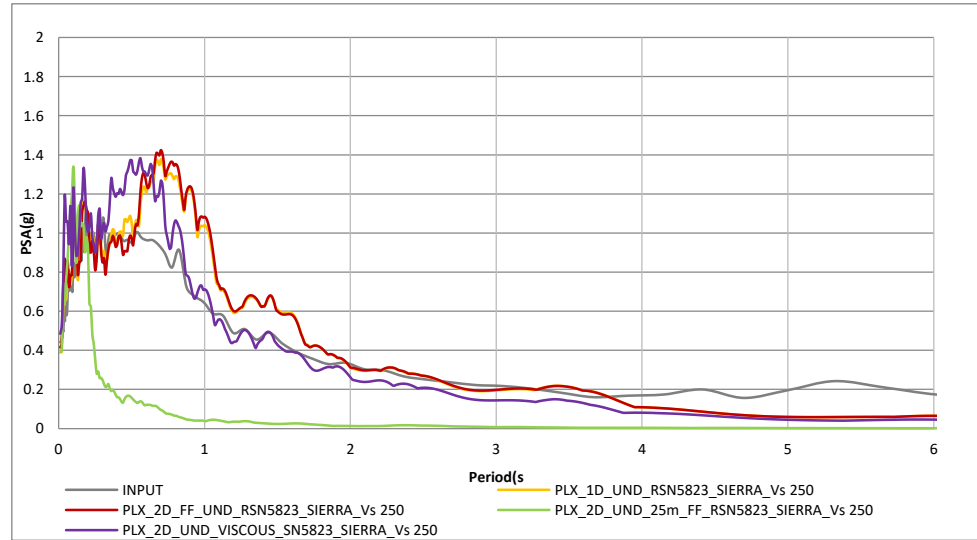
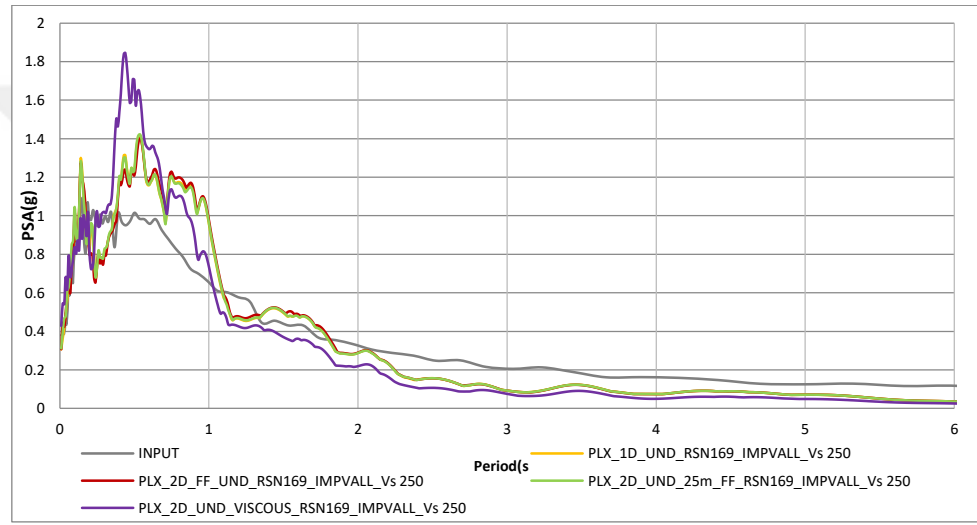
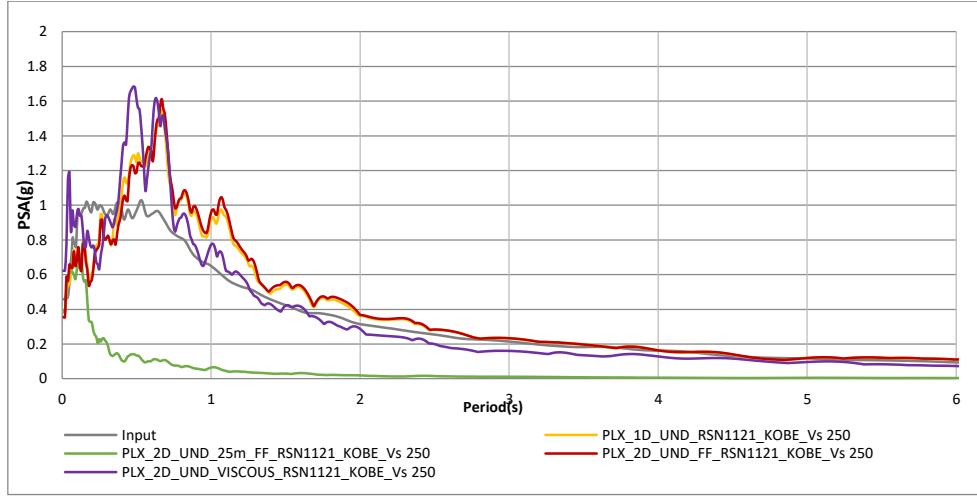
Şekil 3.5 3 Farklı deprem kaydına ait elde edilen deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının ortalamasına ait periyot ve spektral ivme grafiği

Tablo 3. 3 3 Farklı deprem kaydının ortalamasına ait elde edilen deepsoil ve plaxis analiz sonuçlarının özet tablosu

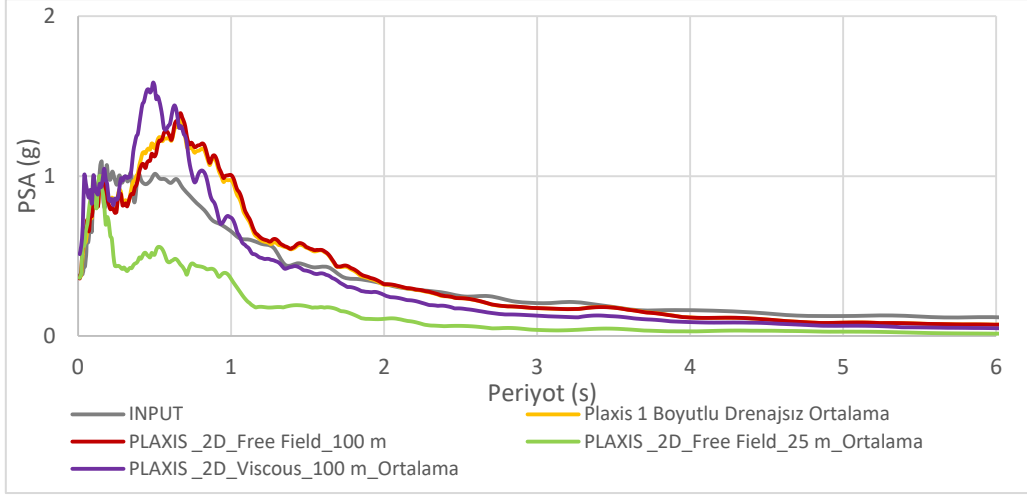
ORTALAMA	PERİYOT (s)	MAKSİMUM SPEKTRAL İVME (g)	YERYÜZÜ İVMESİ (g)
TBDY AFAD-Sismik Tehlike Haritası		0.886	0.316
DEEPSOIL	0.68	1.74	0.47
PLAXIS 1D_Drenajlı	0.52	1.97	0.52
PLAXIS 1D_Drenajsız	0.67	1.34	0.36

Kil birim için 3 farklı depremin ortalama spektrum değerlerine göre bakıldığında DeepSoil ile yapılan 1 boyutlu analizlerin sonucunun, Plaxiste yapılan drenajsız analizler için maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değeri ile benzer sonuç vermiştir. Maksimum spektral ivme değeri ve maksimum yer ivme değerleri ise Plaxis ile yapılan 1 boyutlu analizlerde DeepSoil analiz sonuçlarına göre daha düşük olmaktadır. Bu kapsamda devam edilen analizlerde Kil birim için Plaxis analizlerinde malzeme modeli olarak drenajsız için analizlere devam edilecektir.

Drenajsız analiz modeline karar verildikten sonra, serbest saha analizlerinde diğer bir önemli konu ise model sınırı ve model genişliğidir. Söz konusu bu parametreler deprem dalgalarını gerçeğe en yakın ifade etmesi amacı ile doğru seçilmelidir. Bu nedenle model sınırındaki ve genişliğindeki değişimi irdelenmek ve gerçeğe en yakın şekilde ilerlemek adına farklı analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, Kil zemin



Şekil 3.7 Model sınır ve genişliğinin incelendiği analiz sonuçları, kil zemin

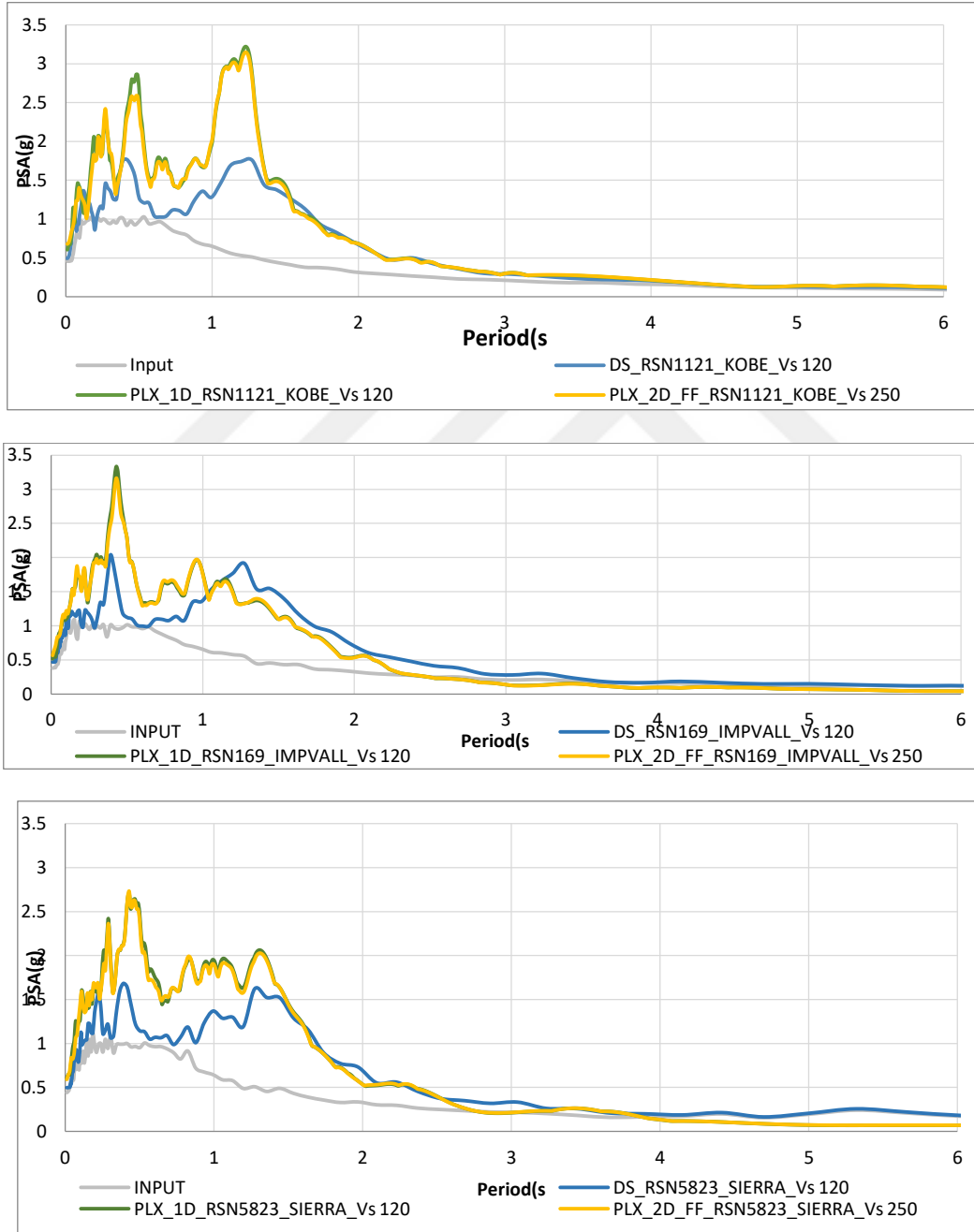
Tablo 3. 4 Deprem kayıtlarının ortalaması, analiz sonuçlarının özet tablosu, kil

ORTALAMA	PERİYOT (s)	MAKSİMUM SPEKTRAL İVME (g)	YERYÜZÜ İVMESİ (g)
TBDY AFAD		0.886	0.316
DEEPSOİL	0.70	1.74	0.47
PLAXIS 1D_UNDRAINED	0.64	1.45	0.36
PLAXIS_2D_FREE FIELD_100 m	0.64	1.48	0.36
PLAXIS_2D_FREE FIELD_25 m	0.26	1.16	0.36
PLAXIS_2D_VISCOUS_100 m	0.49	1.64	0.51

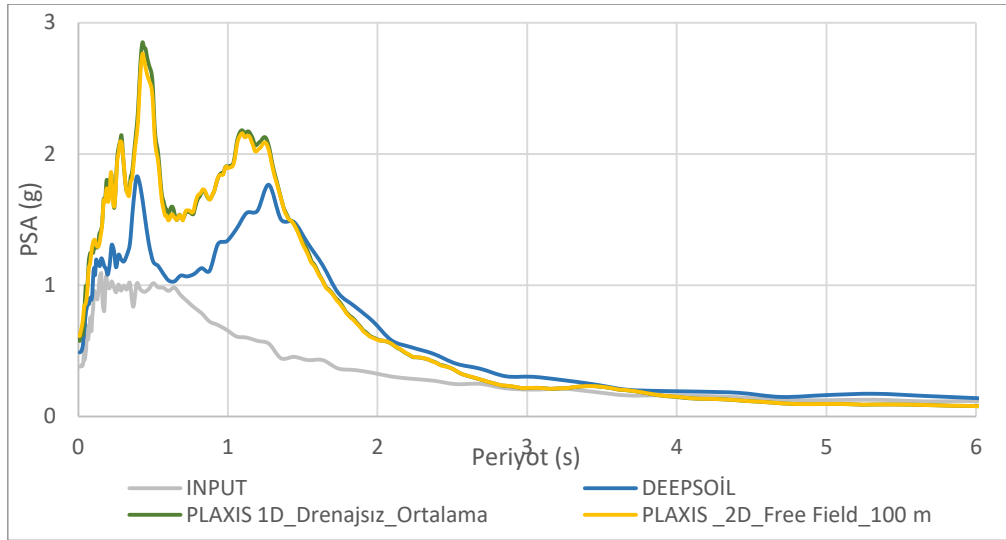
Model sınırı Free field seçilerek 2 farklı model genişliği için analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak model genişliği 50 m seçilerek yapılan analizde maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değeri DeepSoil 1B ve Plaxis 1B sonuçlarından farklı olduğu tespit edilerek model genişliği 200 m için analizler tekrarlanmıştır. Model genişliğinin 200 m olduğu durum için model sınırı Free field ve viscous olacak şekilde 2 farklı analiz yapılmıştır. Sınır koşulu viscous olarak seçilerek yapılan analizde periyot değeri DeepSoil ile ve Plaxis ile yapılan 1 boyutlu analiz sonucundan farklı elde edilmiştir. Free field model sınırında ise maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değeri aynı olduğundan gerçeğe en yakın durumu ifade ettiği kabul edilerek model genişliği olarak 200 m'ye ve model sınırı için ise free field olacak şekilde karar verilmiştir.

Ayrıca Plaxiste yapılan 2 boyutlu analiz sonucunun 1 boyutlu analiz sonuçlarındaki maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değerinin aynı oluşması 2 boyutlu analizde 2. boyut etkisinin göz ardı edildiği doğruya en yakın sonucun ulaşıldığı sonucunu çıkarabilir.

Kil profili üzerinde yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, model genişliği 100 m - 100 m olarak seçilmiş ve kum profili için analizlerde serbest alan sınır koşulu uygulanmıştır.



Şekil 3.8 3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının periyot ve spektral ivme grafiği, kum Zemin



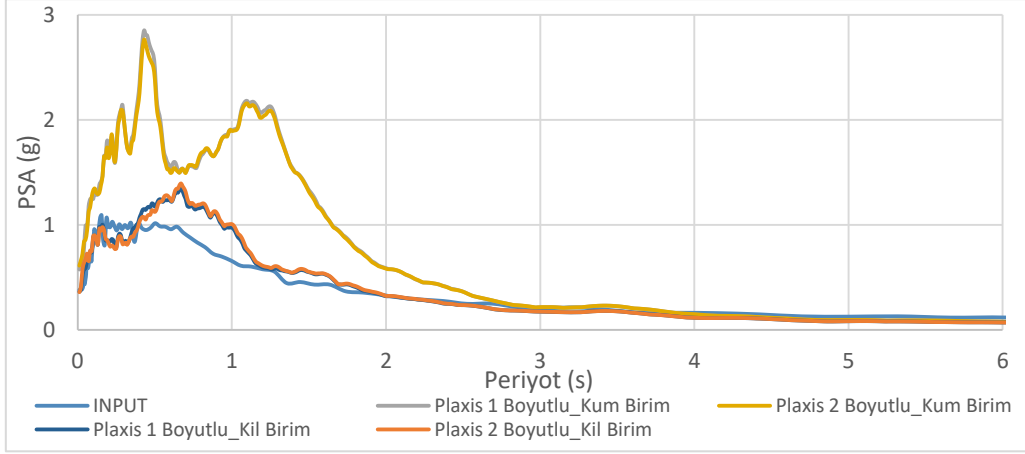
Şekil 3.9 3 Farklı deprem kaydına ait model sınır ve genişliğinin incelendiği plaxis analiz sonuçlarının ortalama periyot ve spektral ivme grafiği, kum zemin

Tablo 3. 5 Deprem kayıtlarının ortalamasına ait elde edilen analiz sonuçlarının özet tablosu

ORTALAMA	PERİYOT	MAKSİMUM SPEKTRAL İVME	YERYÜZÜ İVMESİ
TBDY AFAD		0.886	0.316
DEEPSOİL	0.39	1.83	0.49
PLAXIS 1D_Drenajsız_Ortalama	0.43	2.85	0.57
PLAXIS_2D_Free Field_100	0.43	2.76	0.61

Kum profilinde, hem DeepSoil hem de Plaxis kullanarak gerçekleştirilen bir boyutlu analizler incelendiğinde, ortalama spektrumdan elde edilen değerlere göre maksimum spektral ivme meydana geldiği periyot değerleri birbirine çok yakındır. Maksimum spektral ivme değerleri ise DeepSoil ile karşılaştırıldığında Plaxis'te daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Plaxis 2D analizinde, bir boyutlu analizlerden elde edilen davranış ve değerler arasında tutarlılık tespit edilmiştir.

Kil profili üzerinde yapılan analizlerde, maksimum spektral ivme değeri, kum profiline göre yaklaşık olarak iki kat daha az bulunmuştur. Bu fark, kum profili için gevşek kil birim seçimi, kil profili için ise orta sert kabulüyle ilişkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.10 3 Farklı deprem kaydına ait periyot ve spektral ivme grafiği

Ayrıca, DeepSoil kullanılarak gerçekleştirilen kum profilindeki analizlerde, maksimum spektral ivmenin meydana geldiği periyot genişlemiştir. Plaxis'te, benzer bir geniş periyot aralığında ivmeler DeepSoil ile gözlemlenmiştir, ancak maksimum spektral ivme tek bir periyot değerinde meydana gelmiştir. Bu farklılık, kum profillerinin analizinde periyot değerini doğru seçmenin önemini vurgulamaktadır.

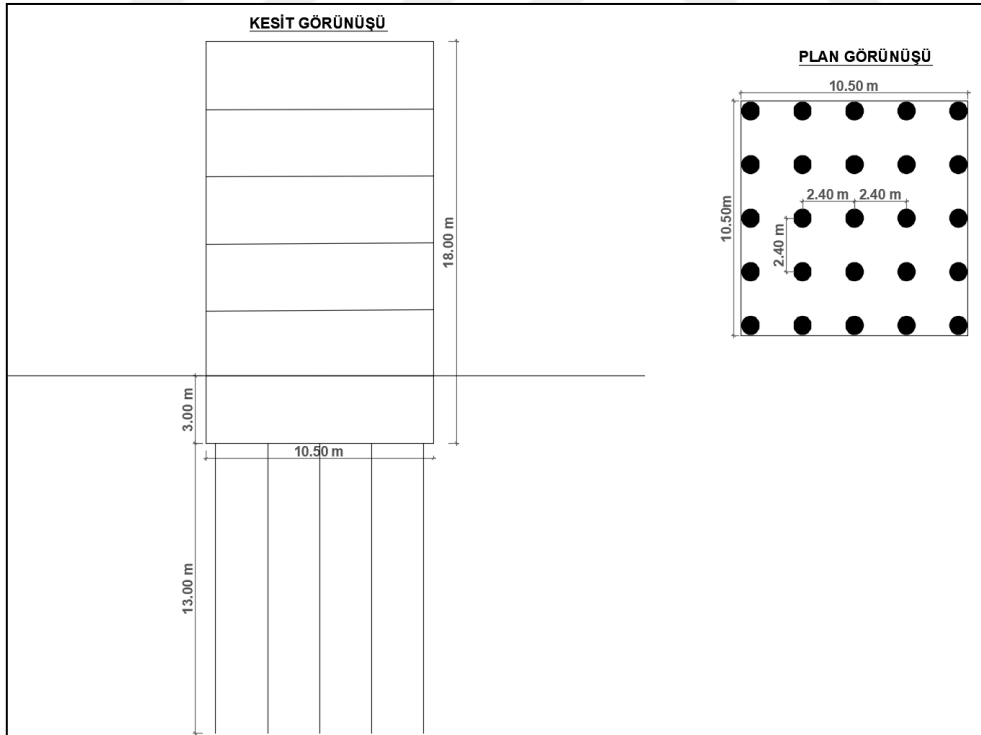
Ayrıca, kum profili üzerindeki analiz sonuçlarını incelendiğinde, Plaxis 2D'deki maksimum zemin ivmesi değeri DeepSoil'de bulunandan yaklaşık olarak iki kat daha fazladır. Kil profilde ise, DeepSoil'de hesaplanan PGA'lar Plaxis'dekilerden daha yüksektir.

Analiz sonuçları, bir boyutlu ve iki boyutlu analizler arasında farklılıklar olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, 2D analiz modeli oluşturulurken model genişliği ve sınırların doğru seçiminin güvenilir sonuçlar elde edilmesinde önemli bir rol olmasını göstermektedir. Bir boyutlu analiz ile iki boyutlu analizlerde maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değerindeki davranışlar arasındaki benzerlik, ikinci boyut etkilerinden etkilenmeyen kriterlerin dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu, özellikle daha karmaşık zemin modelleri ve analizlerde son derece önemlidir.

Bu bölümde yukarıda aktarıldığı üzere DeepSoil programında 1 boyutlu analizlerin Plaxis 2D programı ile yapılan 1 boyutlu ve 2 boyutlu analizlerin karşılaştırılıp, 2. Boyut etkisinin göz ardı edileceği şekilde 2 boyutlu analiz için malzeme modelinin, model sınırı ve genişliğinin belirlenmesini kapsamaktadır.

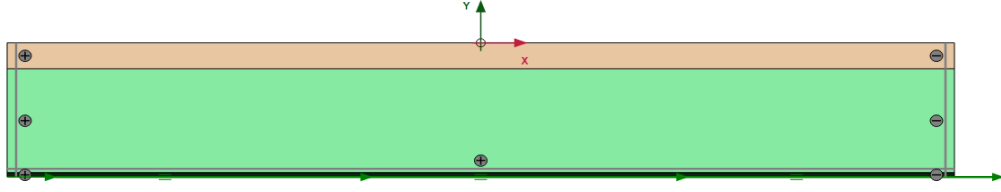
PLAXIS İLE 2 BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN YAPI KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Söz konusu bu tezde zemin parametreleri parametrik olarak belirlenmiş olup yapı-kazık-zemin etkileşiminin irdelenebilmesi adına 10.5 m x 10.5 m boyutlarında radye temele sahip 1 bodrum kat+5 normal kattan oluşan, $H_n=15$ m yüksekliğinde yapı üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Yapıdan zemine aktarılacak yük hesabında kat başına ve radye temel için 10 kPa, çatı için 15 kPa gerilme değeri kabul edilmiş olup 85 kPa gerilme değeri söz konusudur. Faktörlü durumda bu değer 1.5 katı kabul edilmiş olup 130 kPa gerilme değeri mertebesi oluşmaktadır. Binanın temele aktaracağı toplam yük ise $10.5 \times 10.5 \times 127.5 \text{ kN} = 14056 \text{ kN}$ olarak belirlenmiştir. $10.5 \text{ m} \times 10.5 \text{ m}$ boyutlarındaki temel içerisine 2.4 m x 2.4 m aralıklar ile 25 adet 80 cm çapında kazık projelendirilmiştir (Şekil18). 1 adet Kazık gelen yükü $1405.6/25=56$ ton mertebesindedir. Kazık boyunun seçimi hesaplanan bu yüke göre seçilmiş olup 13 m'dir.

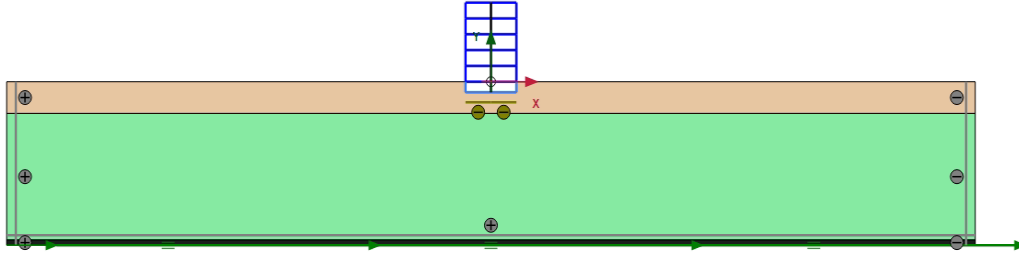


Şekil 4.1 Sistemin kesit ve plan görüntüsü

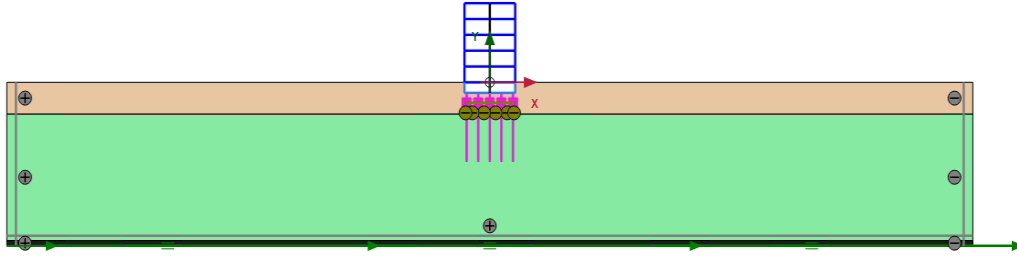
Oluşturulan bu model üzerinde yapılan analizler ve kesit görüntüleri aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.2 Serbest saha (free field) analizi



Şekil 4.3 Zemin + yapı etkileşimi



Şekil 4.4 Zemin + kazık + yapı etkileşimi

Zemin modeli 2 ayrı tabakadan oluşmaktadır. Kum ve Kil tabakası. Söz konusu bu tabakalara ait özellikler önceki bölümlerdeki gibi olup yalnızca tabaka kalınlıkları farklılık göstermektedir. Zemin modeli için analizlere esas olan tabaka kalınlıkları 6 m kalınlığında Kum birim devamında 30 m'ye dek Kil birimdir.

Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde model genişliği temel sınırlarından itibaren her iki yönde de bina genişliğinin beş katından daha fazla ($>5B$), düşey yönde ise maksimum bina genişliğinin 3 katından daha büyük olup, kazıklardan itibaren minimum kazık boyu kadar mesafe olacak şekilde belirlenmiştir.

Bir önceki bölümde de aktarıldığı üzere model sınırları olarak deprem model içerisinde tekrar yayılmasını önleyecek geçirgen sınır koşulları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan analizlerin geoteknik veri tabanlı olan Plaxis programında yapıldığı göz önünde bulundurularak bina ve kazık elemanlarının bu kapsamda oluşturulduğu, yapı+kazık etkileşiminin sınırlı olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışmanın amacı belirlenen zemin üzerinde deprem dalgalarının oluşturduğu spektral ivme değerlerinin yapı ve kazık ile olan değişimlerini incelemektedir.

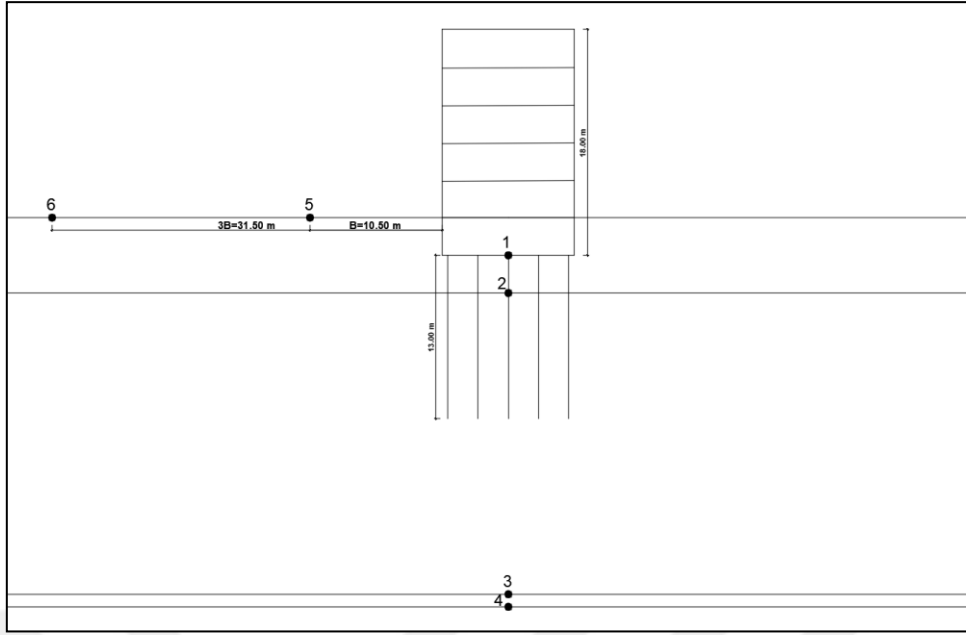
Bu kapsamda, binanın yapısal elemanları modellenirken Plaxiste mevcut olan plate elemanları ile verilen bir örnek referans alınarak kütle ve rijitlik ile modellenmiştir.

Plaxis programında kazıkların modellenebilmesi için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Yaygın olarak plate elemanı kullanılırken bu durum kazıkların arasındaki mesafenin az olması durumunda davranışı tam yansıtmamaktadır. Bunun sebebi temel altında modellenen kazıkların kapasitesini oluşturan çeper ve uç dirençlerinin modellenememesidir. Gömülü kiriş elemanları (embedded beam row) ile kazık rijitliğine ilaveten kazıktaki çeper sürtünmesindeki değişim ve uç direnci değerleri girilerek kazık davranışı daha doğru bir şekilde oluşturulmaktadır. Kazığın malzeme özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

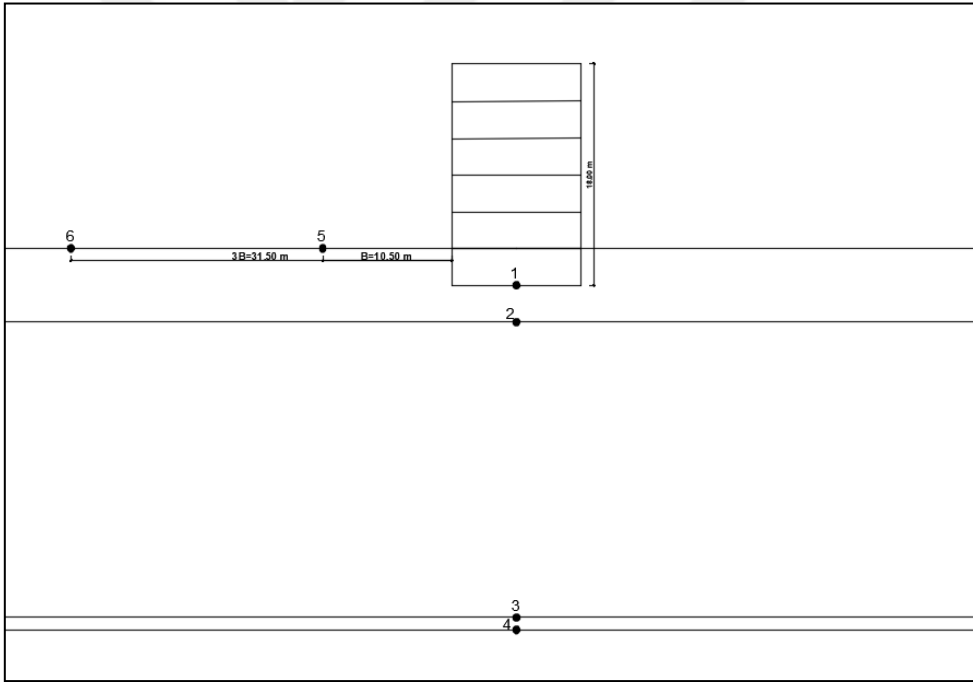
Tablo 4.1 Kazık malzemesi özellikleri

Açıklama	Değer
E (kN/m ²)	32.00E6
γ (kN/m ³)	25.00
D (m)	0.80
A (m ²)	0.503
I (m ⁴)	0.020
Kazık Aralığı (m)	2.4
T _{skin} (kN/m)	18
	139
F _{uç} (kN)	452.00

Analiz sonuçları karşılaştırılırken kullanılan numaralandırma Şekil 4.5 ve 4.6’da numaralandırmanın açıklamaları ise Tablo 4.2’de ki gibidir.



Şekil 4.5 Yapı + zemin + kazık sisteminin numaralandırılması



Şekil 4.6 Yapı + zemin sisteminin numaralandırılması

Tablo 4.2 Numaraların açıklamaları

1	0.00,-2.00	Temel Altı/Kazık Üstü-Tabaka Ortası
2	0.00,-6.00/-12	Tabaka Geçiş
3	0.00,-30.00	Tabaka Altı
4	0.00,-31.00	İnput
5	10.50,0.00	Yer Yüzü-Tabaka Ortasından B=10.5 m Mesafe
6	31.50,0.00	Tabaka Geçiş-Tabaka Ortasından 3B=31.5 m Mesafe

4.1 1. Zemin Modeli Serbest Saha Analizi

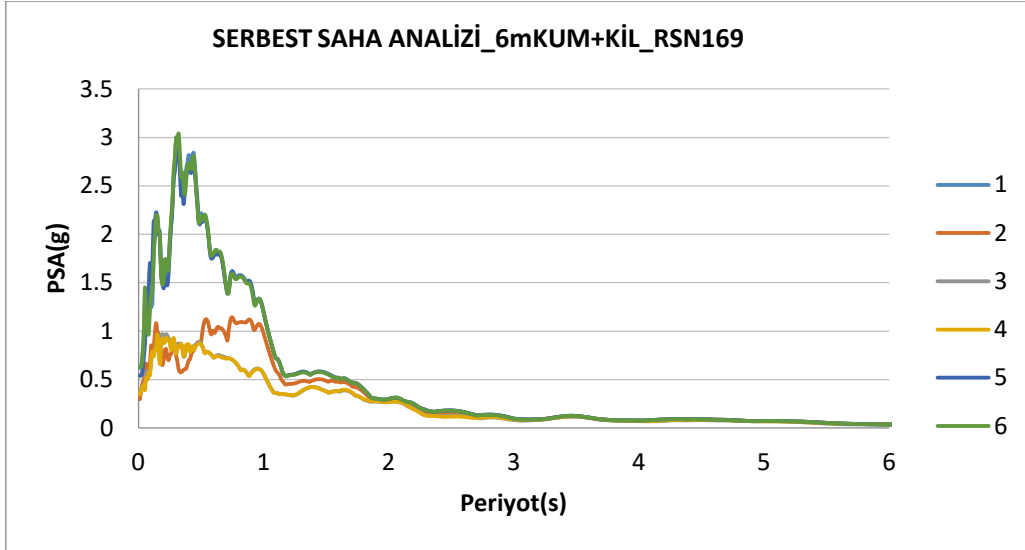
Belirlenen zemin profilinde ilk olarak sahaya özel serbest saha analizi yapılmıştır. Yapılan serbest saha analizinde herhangi bir yapı olmadan yatay tabakalı zemin profilinde etkitilen deprem kayıtları sonucunda yer yüzünde elde edilen spektral ivme kaydı elde edilmiştir. Ayrıca zemin profiline ait hakim periyot değeri belirlenmiştir. Zeminin hakim periyodu 4.1 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (4.1)$$

Deprem özellikleri, zemin koşullarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle oluşabilecek hasarları tahmin etmek için yapılan çalışmalarda zemin tabakalarının etkisinin belirlenmesi önemli bir adımdır. Katmanların tepkisi kalınlıklarına, zemin türüne ve özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Aynı şekilde farklı kalınlık ve özellikteki zemin tabakalarının bir noktadan diğerine tepkisi de farklı olabilmektedir. Bu nedenle depreme dayanıklı tepki tasarımında zemin temel periyotları ve zemin büyütmesi gibi dinamik davranış özelliklerinin bir noktadan diğerine değişimi belirlenmelidir.

Bu kapsamda yapılan analizler sonucunda 3 farklı deprem kaydına göre serbest saha analizi Periyot-spektral ivme grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerden ve özet tablolardan görüleceği üzere zemin modeline etkitilen 3 farklı deprem kaydına göre yüzeyde ve tabaka geçişlerinde benzer davranışlar elde edilmiştir.

Anakayadan etkitilen deprem kayıtları zemin tabakalarından geçerken farklı davranışlar sergilemiştir. Input olarak adlandırılan deprem kayıtları Kil tabakasından Kum tabakasına geçişte maksimum spektral ivme değerlerinde artış gözlemlenirken maksimum ivmenin olduğu periyot değeri artmıştır.



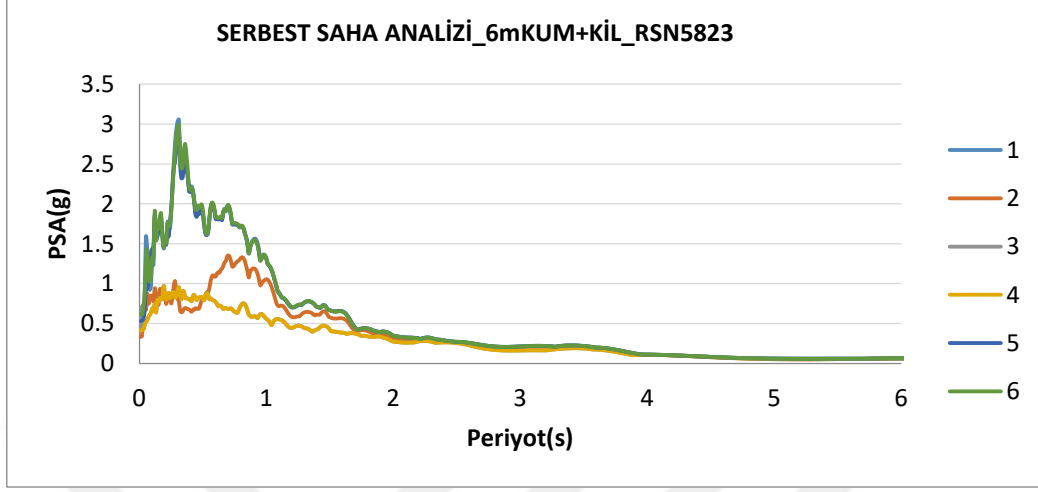
Şekil 4.7 1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN169

Tablo 4.3 1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN169

<u>RSN169</u>	<u>Serbest Saha (Zemin)</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(q)</u>	0.62	0.30	0.37	0.35	0.54	0.63
<u>PSA (q)</u>	3.00	1.14	0.97	0.96	2.85	3.04
<u>T(s)</u>	0.30	0.75	0.19	0.15	0.30	0.32

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.96 g, periyot değerinin ise 0.15 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 3.00 g, 0.30 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 3 kat artış söz konusudur. Benzer şekilde yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 2 kat büyümektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B ve 2 B mesfesi için hesaplanan değerlerde 2B'deki (6) değerler B'deki (5) değerlere göre daha yüksek oluşmaktadır. Ancak mertebe olarak çok düşük gözlemlendiğinden göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.
- Tabaka geçişindeki noktada (2) hesaplanan değerler ise input değerlerine göre artmaktadır. Periyot değerinde yaklaşık 5 kat fark gözlenirken ivme değerinde %20'lik bir artış gözlenmektedir.

- Zemin modelinin en altından etkililen deprem kaydı ile tanımlanan kaya birimin üzerinde/zemin birimin altında ölçülen ivme değerlerinin ve periyot değerlerinin benzerliği analizi doğrular niteliktedir.



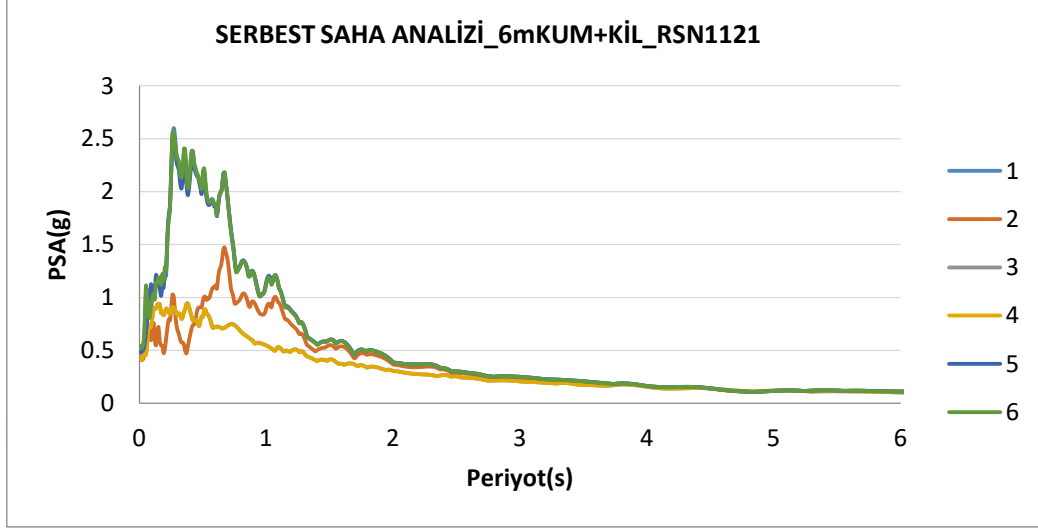
Şekil 4.8 1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN5823

Tablo 4.4 1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN5823

<i>RSN5813</i>	<i>Serbest Saha (Zemin)</i>					
<i>NOKTA</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>PGA(q)</i>	0.67	0.33	0.43	0.42	0.53	0.62
<i>PSA (q)</i>	3.06	1.35	0.97	0.97	2.91	2.99
<i>T(s)</i>	0.31	0.7	0.19	0.19	0.31	0.31

- Anakayadan etkililen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.97 g, periyot değerinin ise 0.19 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 3.06 g, 0.31 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 3 kat artış söz konusudur. Benzer şekilde yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.6 kat büyümektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B ve 2 B mesfesi için hesaplanan değerlerde 2B'deki (6) değerler B'deki (5) değerlere göre daha yüksek oluşmaktadır. Ancak mertebe olarak çok düşük gözlemlendiğinden göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.
- Tabaka geçişindeki noktada (2) hesaplanan değerler ise input değerlerine göre artmaktadır. Periyot değerinde yaklaşık 3.5 kat fark gözlenirken ivme değerinde %40'lık bir artış gözlenmemektedir.

- Zemin modelinin en altından etkitilen deprem kaydı ile tanımlanan kaya birimin üzerinde/zemin birimin altında ölçülen ivme değerlerinin ve periyot değerlerinin benzerliği analizi doğrular niteliktedir.



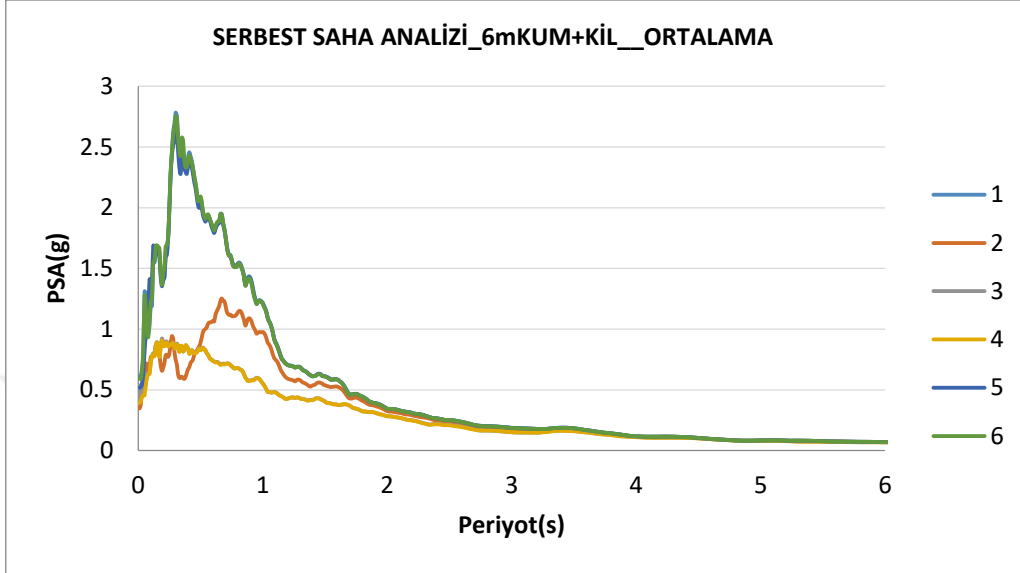
Şekil 4.9 1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, RSN1121

Tablo 4.5 1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, RSN1121

<u>RSN1121</u>	<u>Serbest Saha (Zemin)</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.55	0.41	0.42	0.41	0.48	0.53
<u>PSA (g)</u>	2.60	1.47	0.94	0.94	2.54	2.57
<u>T(s)</u>	0.27	0.67	0.15	0.15	0.27	0.27

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.94 g, periyot değerinin ise 0.15 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 2.60 g, 0.27 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2.5 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 2.5 kat artış söz konusudur. Benzer şekilde yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.4 kat büyümektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B ve 2 B mesfesi için hesaplanan değerlerde 2B'deki(6) değerler B'deki(5) değerlere göre daha yüksek oluşmaktadır. Ancak mertebe olarak çok düşük gözlendiğinden göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.
- Tabaka geçişindeki noktada(2) hesaplanan değerler ise input değerlerine göre artmaktadır. Periyot değerinde yaklaşık 4.5 kat fark gözlenirken ivme

değerinde %60'lık bir artış gözlenmemektedir. Zemin modelinin en altından etkitilen deprem kaydı ile tanımlanan kaya birimin üzerinde/zemin birimin altında ölçülen ivme değerlerinin ve periyot değerlerinin benzerliği analizi doğrular niteliktedir.



Şekil 4.10 1. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, ortalama

Tablo 4.6 1. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, ortalama

<u>ORTALAMA</u>	<u>Serbest Saha (Zemin)</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.61	0.35	0.41	0.39	0.52	0.59
<u>PSA (g)</u>	2.78	1.25	0.92	0.91	2.65	2.75
<u>T(s)</u>	0.3	0.67	0.19	0.19	0.31	0.31

Yer yüzüne ulaşan ivmeler etkitilen deprem kayıtlarının her birine göre benzer davranış sergilemektedir. Ortalama davranışa bakıldığında;

Kayadan geçen deprem, Kil tabakasından ve kum tabakasından geçerek yeryüzüne ulaşmaktadır. Kil tabakasından Kum tabakasına geçişte maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değeri 3.5 kat artarken bu periyotta oluşan maksimum spektral ivme değeri yaklaşık %40 mertebesinde artmıştır. Daha sonrasında kum birimden geçip yeryüzüne ulaştığında ise maksimum spektral ivme değerinin olduğu periyot değeri input değerine göre 1.6 kat artarken ivme değerinde 3 kat mertebesinde artış gözlenmiştir.

Belirlenen zemin profili için sonuçlara özet olarak bakıldığında AFAD'tan elde edilen sismik tehlike haritasından elde edilen spektruma göre benzeştirilen deprem kayıtları etkilendiğinde input değerlerine göre yer yüzünde oluşan maksimum ivme değeri 0.39 g'den 0.61g'ye çıkmış, maksimum spektral ivmenin oluştuğu periyot değeri 0.19 s'den 0.3s'ye çıkarken ivme değeri de 0.91 g'den 2.78 g'ye artmıştır.

4.2 1. Zemin Modeli Yapı+Zemin Etkileşimi

Bu bölümde ilk olarak yapının periyodu ve yapı+zemin sisteminin periyodu hesaplanmıştır. Bu sayede bir sonraki bölümde yapılacak yapı zemin kazık analizleri sonucunda periyot değerlerindeki değişim kıyaslanabilecektir.

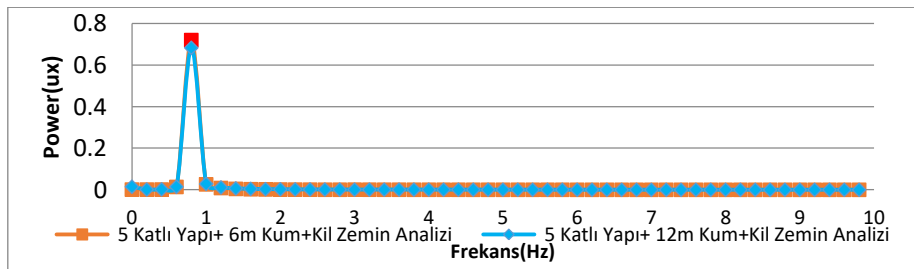
Yapının periyodunun belirlenmesi, Ampirik hakim doğal titreşim periyodu aşağıda tanımlanan 4.2 denklem ile hesaplanacaktır.

$$T_{pA} = C_t H_N^{3/4} \quad (4.2)$$

H_N toplam bina yüksekliği, C_t Ampirik doğal titreşim periyodu hesabında kullanılan katsayını belirtmektedir. Analiz yapılacak bina kat sayısı 5, kat yüksekliği 3 metredir. $H_N = 15$ metre olmaktadır. Taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan binalarda $C_t = 0.1$ alınarak hesaplanmıştır (TBDY 2018).

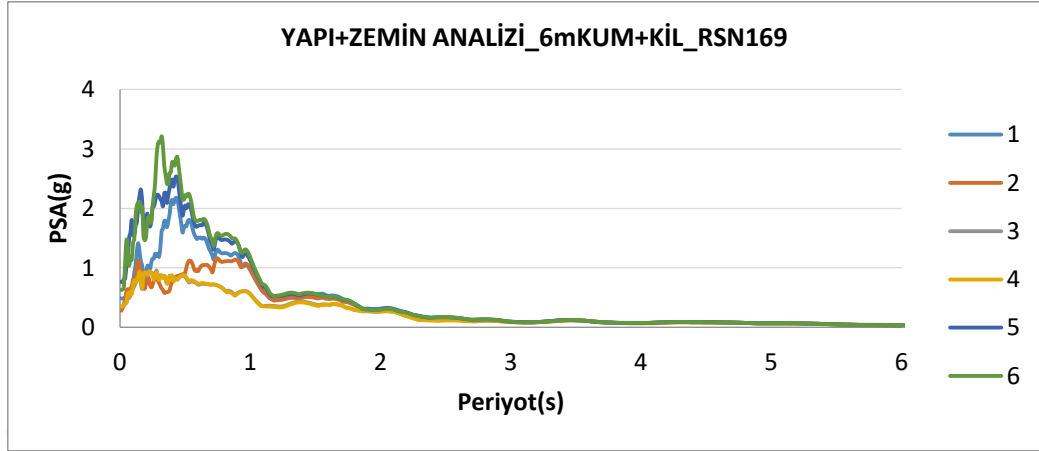
$$T_{pA} = 0.1 \times 15^{3/4} = 0.7622 \text{ s} \quad (4.3)$$

Yapı+zemin sisteminin periyodunun belirlenmesi ise Yapı+zemin modeli Plaxis programında serbest titreşime maruz bırakılarak 5 katlı yapının doğal frekansı belirlenmiştir. Serbest titreşim analizinde viskoz sınır koşulları kullanılmıştır. Analiz sonucunda Fourier spektrumundan doğal frekans belirlenmiş olup 0.8 Hz hesaplanmıştır. Periyodu ise $T=1/f = 1/ 0.8 = 1.25$ s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 1. ve 2. Zemin profilinde yapının periyodunu belirlenmesi

Yapı zemin etkileşiminde daha öncesinde proje özellikleri belirlenen şekilde aynı zemin profillerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen grafikler ve özet tablosu aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.12 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN169

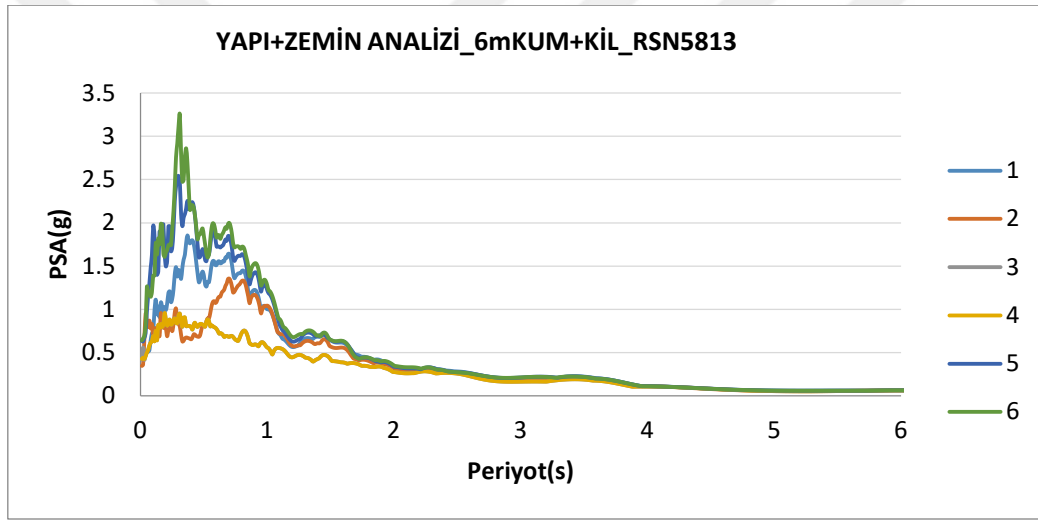
Tablo 4.7 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN169

<u>RSN169</u>	<u>YAPI+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(q)</u>	0.49	0.28	0.33	0.35	0.77	0.63
<u>PSA (q)</u>	2.18	1.16	0.96	0.94	2.54	3.21
<u>T(s)</u>	0.43	0.75	0.28	0.22	0.43	0.32

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.94 g, periyot değerinin ise 0.22 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 2.18 g, 0.43 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 2 kat artış söz konusudur. Benzer şekilde yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.4 kat büyümektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.54 g olup 0.43 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada daha düşük periyot değerinde daha yüksek spektral ivme değeri ile karşılaşmıştır. Ancak yer yüzünde ölçülen ivme değeri B mesafede daha yüksektir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.7 kat artarken periyot değeri de yaklaşık 2 kat artmaktadır. 2B mesafede ise periyot değeri 1.5 kat artarken spektral ivme değeri yaklaşık 3.5 kat

artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot ve spektral ivme değerlerinde artış gözlenmiş, PGA değerlerinde ise azalma gözlenmiştir.

- Tabaka geçişindeki noktada(2) hesaplanan değerler ise input değerlerine göre artmaktadır. Periyot değerinde yaklaşık 3.5 kat fark gözlenirken ivme değerinde %20'lik bir artış gözlenmektedir. Serbest saha analizinden elde edilen sonuçlara göre maksimum spektral ivme değerinde düşüş söz konusuyken periyot değerinde herhangi bir değişiklik söz konusu olmamaktadır.
- Zemin modelinin en altından etkitilen deprem kaydı ile tanımlanan kaya birimin üzerinde/zemin birimin altında ölçülen ivme değerlerinin ve periyot değerlerinin benzerliği analizi doğrular niteliktedir.



Şekil 4.13 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN5813

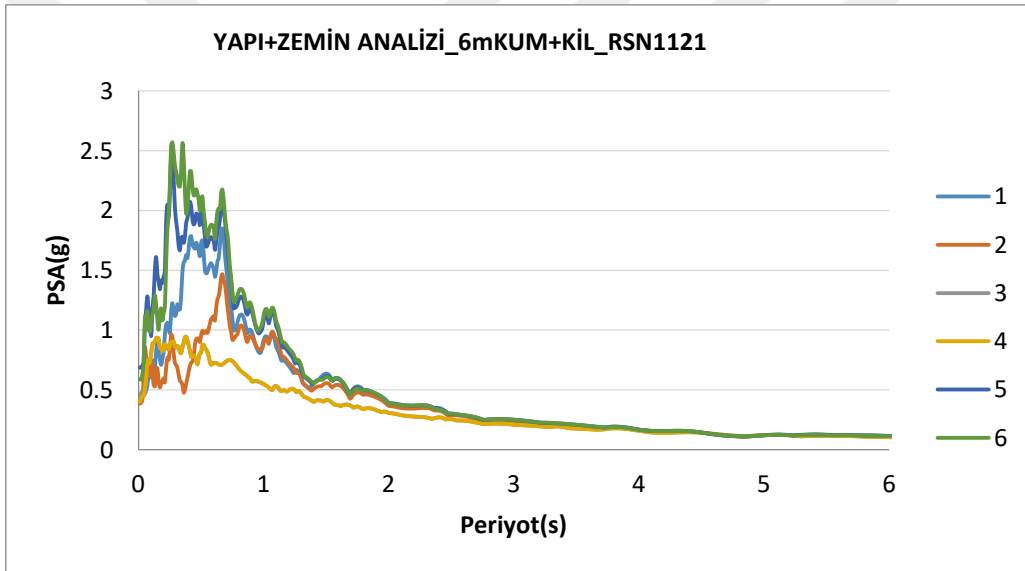
Tablo 4.8 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN5813

<u>RSN5813</u>	<u>YAPI+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.45	0.35	0.42	0.42	0.64	0.64
<u>PSA (g)</u>	1.86	1.35	0.96	0.96	2.54	3.25
<u>T(s)</u>	0.37	0.7	0.19	0.19	0.3	0.31

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.96 g, periyot değerinin ise 0.19 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 1.86 g, 0.37 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise

yaklaşık 2 kat artış söz konusudur. Benzer şekilde yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.4 kat büyümektedir.

- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.54 g olup 0.30 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada benzer periyot değerinde daha yüksek spektral ivme değeri ile karşılaşmıştır. Ayrıca yer yüzünde ölçülen ivme değeri de benzerlik göstermektedir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.6 kat artarken periyot değeri de yaklaşık 1.5 kat artmaktadır. 2B mesafede de periyot değeri 1.5 kat artarken spektral ivme değeri yaklaşık 3.5 kat artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot ve spektral ivme değerlerinde artış gözlenmiş, PGA değerlerinde ise aynı kalmaktadır.



Şekil 4.14 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, RSN1121

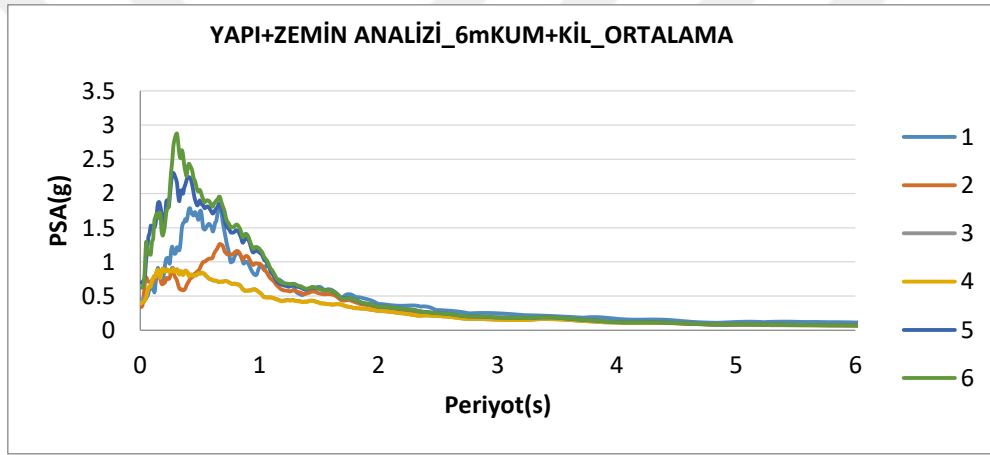
Tablo 4.9 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN1121

<u>RSN1121</u>	<u>YAPI+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.45	0.39	0.41	0.40	0.69	0.59
<u>PSA (g)</u>	1.85	1.47	0.94	0.94	2.49	2.57
<u>T(s)</u>	0.67	0.67	0.38	0.38	0.26	0.27

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.94 g, periyot değerinin ise 0.38 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde tabaka ortasında bu değerler 1.85 g, 0.67 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 2 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise

yaklaşık 1.7 kat artış söz konusudur. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.1 kat büyümektedir.

- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.49 g olup 0.26 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada daha yüksek periyot değerinde daha yüksek spektral ivme değeri ile karşılaşmıştır. Ancak yer yüzünde ölçülen ivme değeri B mesafede daha yüksektir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.6 kat artarken periyot değeri de yaklaşık 1.5 kat artmaktadır. 2B mesafede ise periyot değeri 1.5 kat artarken spektral ivme değeri yaklaşık 2.7 kat artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot ve spektral ivme değerlerinde artış gözlenmiş, PGA değerlerinde ise azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.15 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama

Tablo 4.10 1. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama

<u>ORTALAMA</u>	<u>YAPI+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(q)</u>	0.46	0.34	0.39	0.39	0.70	0.62
<u>PSA (q)</u>	1.89	1.26	0.90	0.90	2.30	2.88
<u>T(s)</u>	0.42	0.67	0.28	0.28	0.28	0.31

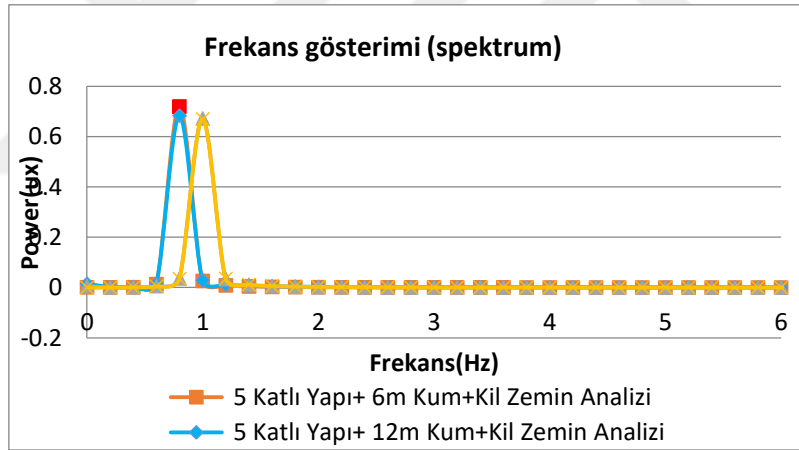
Ortalama değerlere göre yorumlanan kayadan etkitilen deprem kayıtlarının belirlenen noktalardaki değişimi aşağıda özetlenmiştir:

- Input kayıtlarındaki maksimum spektral ivme değerleri temel altında 2 katına çıkarken periyot değeri de yaklaşık olarak 1.5 katına çıkmıştır.

- Yapı temelinin orta noktasındaki elde edilen periyot değeri yapıdan B ve 2B uzaklaştıkça artmakta olup mertebe olarak büyük farklılıklar oluşmamaktadır. Maksimum yer ivmesi yapının yakınında daha yüksek elde edilirken maksimum spektral ivme değeri yapıdan uzaklaştıkça artmaktadır.
- Tabaka geçişinde elde edilen sonuçlar serbest saha analizi ile benzerlik göstermektedir.

4.3 1. Zemin Modeli Yapı+Kazık+Zemin Etkileşimi

Yapı+Zemin+Kazık sisteminin periyodunun belirlenmesi, yapı+zemin+kazık modeli Plaxis programında serbest titreşime maruz bırakılarak 5 katlı kazıklı yapının doğal frekansı belirlenmiştir. Analiz sonucunda Fourier spektrumundan doğal frekans belirlenmiş olup 1 Hz hesaplanmıştır. Periyodu ise $T=1/f = 1/1 = 1$ s olarak hesaplanmıştır.

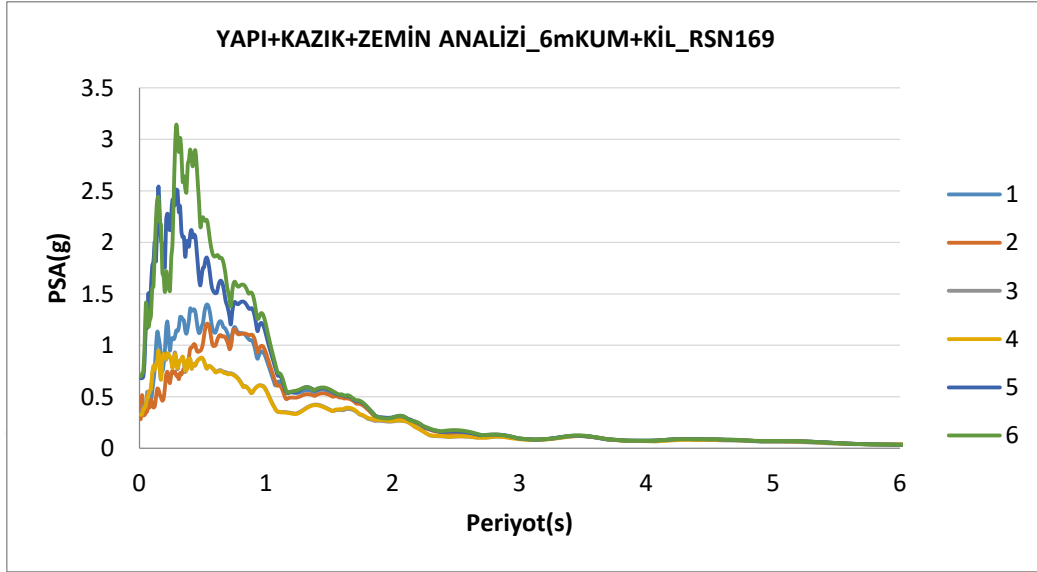


Şekil 4.16 Kazık + yapı sisteminin periyodunu belirlenmesi

Yapının periyodu bir önceki bölümde 0.762 s, Yapı+Zemin'in periyodu 1.25 s hesaplanırken, Yapı+kazık+zemin'in periyodu 1s olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerler incelendiğinde yapının yüksekliğine ve taşıyıcı sistemine göre değişken ile hesaplanan binanın hakim periyot değeri ile zemin ile etkileşimi sonucunda artmaktadır. Zemin+yapı+kazık etkileşiminde de periyot değeri artışı göstermekte olup kazıksız duruma göre daha az oluşmuştur.

Analizlerde üst yapı ve alt yapı beraber düşünülerek ortak sistem olarak davranış incelenmelidir. Birbirini etkileyen bu tarz sistemlerde yukarıda hesaplanan değerlerde de görüleceği üzere tekil ve sistemsel olarak farklılıklar oluşmaktadır.



Şekil 4.17 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN169

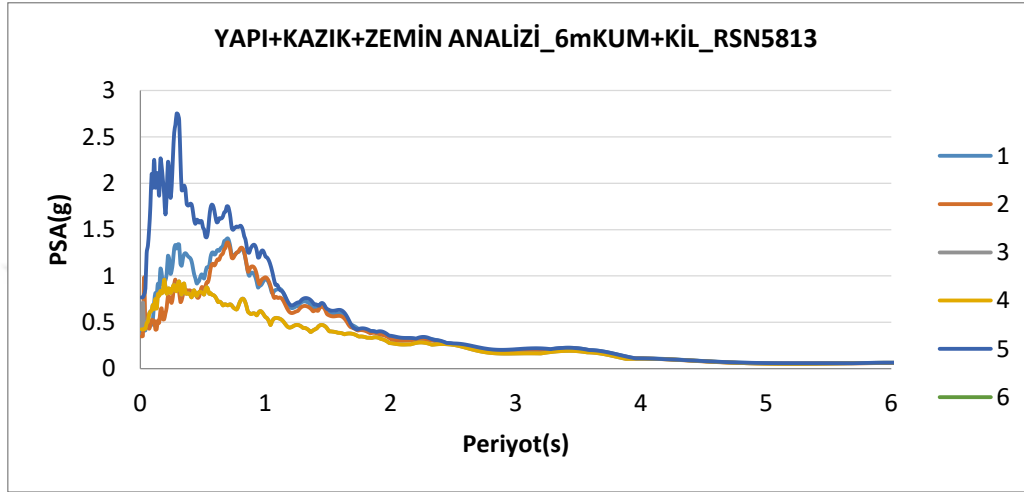
Tablo 4.11 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN169

<u>RSN169</u>	<u>YAPI+KAZIK+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA (g)</u>	0.38	0.28	0.34	0.33	0.68	0.70
<u>PSA (g)</u>	1.40	1.21	0.93	0.95	2.54	3.14
<u>T(s)</u>	0.53	0.53	0.28	0.15	0.15	0.29

- Anakayadan etkililen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.95 g, periyot değerinin ise 0.15 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde ortasında bu değerler 1.40 g, 0.53 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 3.5 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 1.5 kat artış söz konusudur. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.16 kat büyümektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.54 g olup 0.15 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada daha yüksek periyot değerinde daha yüksek spektral ivme değeri ile karşılaşmıştır. Ayrıca yer yüzünde ölçülen ivme değeri 2B mesafede daha yüksektir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.7 kat artarken periyot değeri aynı olmaktadır. 2B mesafede ise periyot

değeri 1.5 kat artarken spektral ivme değeri yaklaşık 3.3 kat artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot, spektral ivme ve PGA değerlerinde artış gözlenmiştir.

- Tabaka geçişindeki noktada(2) hesaplanan değerler ise input değerlerine göre artmaktadır. Periyot değerinde yaklaşık 3.5 kat fark gözlenirken ivme değerinde %30luk bir artış gözlenmemektedir.



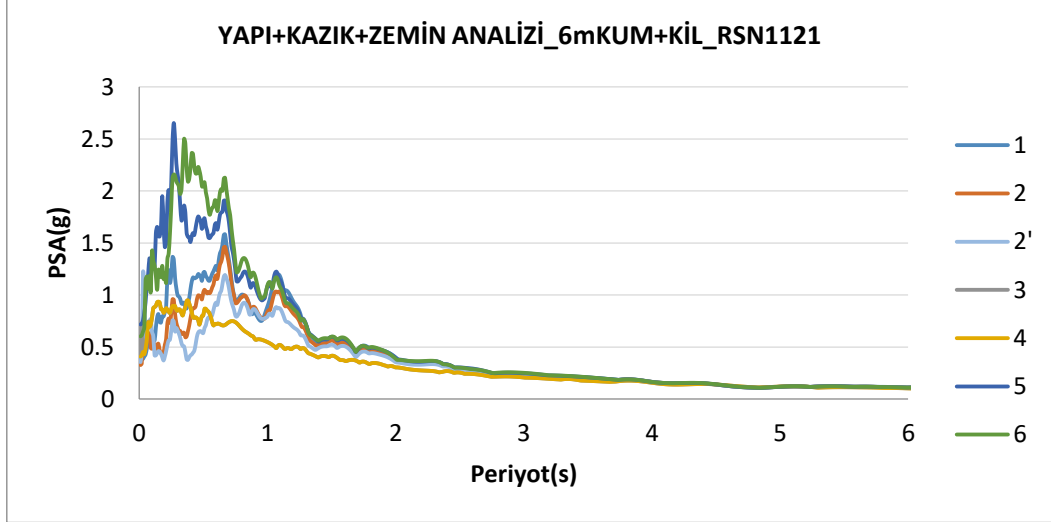
Şekil 4.18 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN5813

Tablo 4.12 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN5813

<u>RSN5813</u>	<u>YAPI+KAZIK+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA (g)</u>	0.40	0.35	0.42	0.42	0.77	0.74
<u>PSA (g)</u>	1.40	1.36	0.96	0.96	2.75	3.07
<u>T(s)</u>	0.70	0.70	0.19	0.19	0.29	0.31

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.96 g, periyot değerinin ise 0.19 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde ortasında bu değerler 1.40 g, 0.70 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 3.7 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 1.5 kat artış söz konusudur. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.05 kat küçülmektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.75 g olup 0.29 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada daha yüksek periyot değerinde daha yüksek spektral ivme değeri ile karşılaşmıştır. Ayrıca yer yüzünde ölçülen ivme değeri B mesafede daha

yüksektir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.9 kat artarken periyot değeri de 1.5 kat artmaktadır. 2B mesafede ise periyot değeri 1.6 kat artarken spektral ivme değeri yaklaşık 3.2 kat artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot ve spektral ivme değerlerinde artış gözlemlenirken, PGA değerlerinde 0.03 g azalma gözlenmiştir.



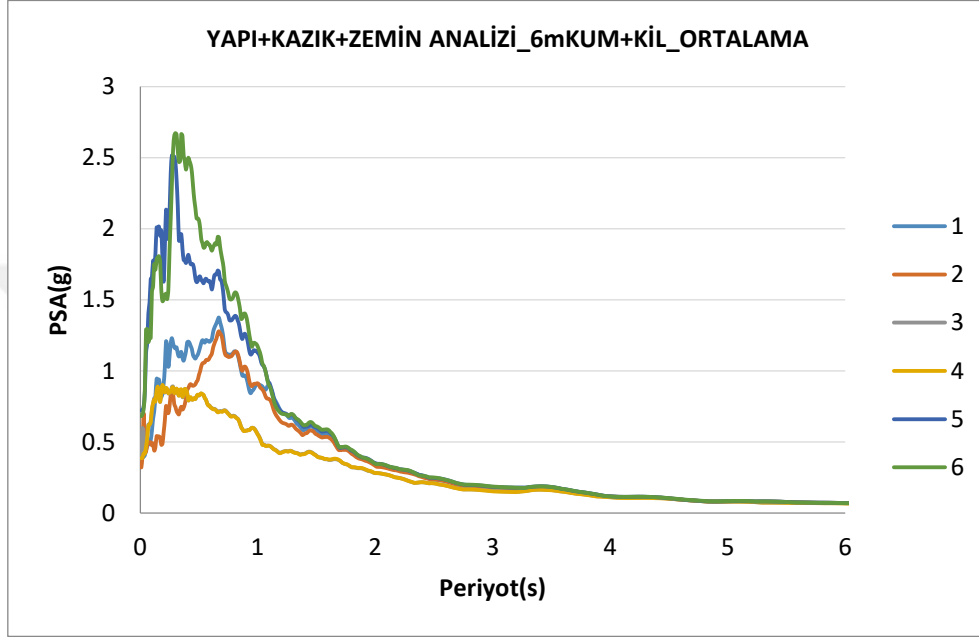
Şekil 4.19 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, RSN1121

Tablo 4.13 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, RSN1121

<u>RSN1121</u>	<u>YAPI+KAZIK+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA (g)</u>	0.38	0.33	0.42	0.41	0.72	0.60
<u>PSA (g)</u>	1.58	1.46	0.95	0.95	2.65	2.50
<u>T(s)</u>	0.67	0.67	0.38	0.38	0.27	0.35

- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin değeri 0.95 g, periyot değerinin ise 0.38 s olduğu tespit edilmiş olup yeryüzünde ortasında bu değerler 1.58 g, 0.67 s olarak gözlenmiştir. Periyot değerinde yaklaşık 1.8 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise yaklaşık 1.7 kat artış söz konusudur. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivmesi değeri de yaklaşık 1.08 kat küçülmektedir.
- Yeryüzünde tabaka ortasından B mesafede maksimum spektral ivme 2.65 g olup 0.27 s periyot değeri söz konusuyken 2B uzaklıktaki noktada daha yüksek periyot değerinde daha düşük spektral ivme değeri ile karşılaşılmıştır. Ayrıca yer yüzünde ölçülen ivme değeri B mesafede daha

yüksektir. Input değerine göre B mesafede maksimum spektral ivme 2.8 kat artarken periyot değeri de 1.4 kat azalmıştır. 2B mesafede ise periyot değeri benzerken spektral ivme değeri yaklaşık 2.6 kat artmaktadır. Binadan uzaklaştıkça periyot değerlerinde artış gözlemlenirken, maksimum spektral ivme değeri ve PGA değerlerinde ise azalma gözlenmiştir. PGA değerlerindeki azalma 0.08 g mertebesinde dir.



Şekil 4.20 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama

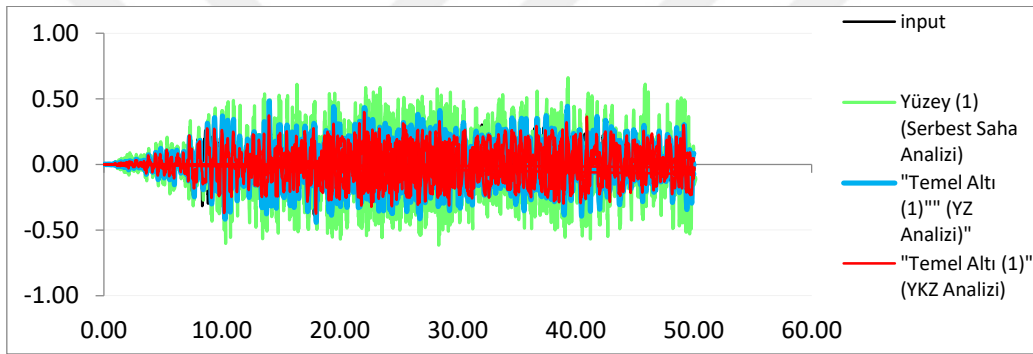
Tablo 4.14 1. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama

<u>ORTALAMA</u>	<u>YAPI+KAZIK+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA (g)</u>	0.39	0.32	0.39	0.39	0.72	0.68
<u>PSA (g)</u>	1.38	1.28	0.90	0.90	2.52	2.67
<u>T(s)</u>	0.67	0.67	0.19	0.19	0.27	0.3

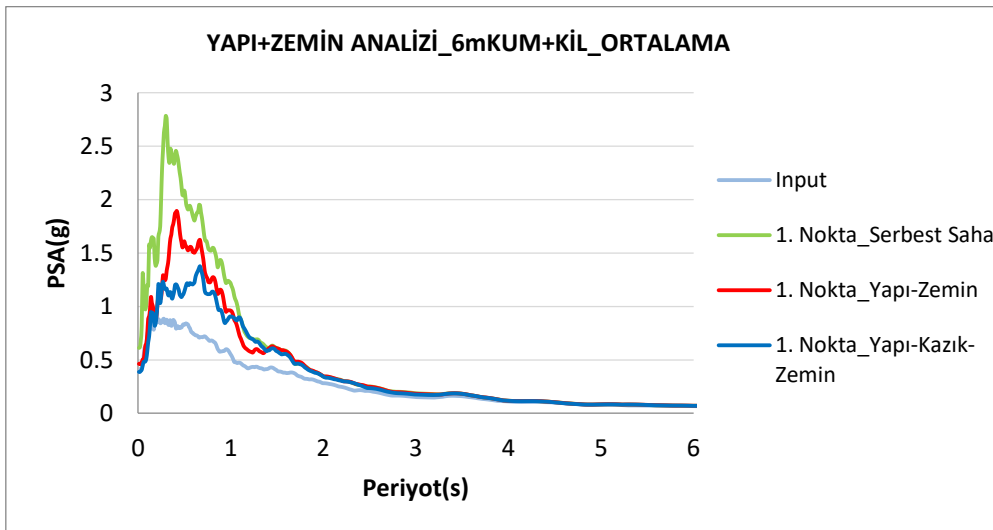
3 farklı deprem kaydının ortalama spektrum değerlerine göre ;

- Anakayadan etkililen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin oluştuğu periyot değeri ve ivme değerindeki değişim yeryüzündeki orta noktaya ulaştığında maksimum spektral ivme değeri 1.5 kat artarak 1.38 g, bu ivme değerinin oluştuğu periyot değeri ise 3.5 kat artarak 0.67 s olmaktadır. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivme değeri ise 0.38 g olarak sabit kaldığı gözlenmiştir.

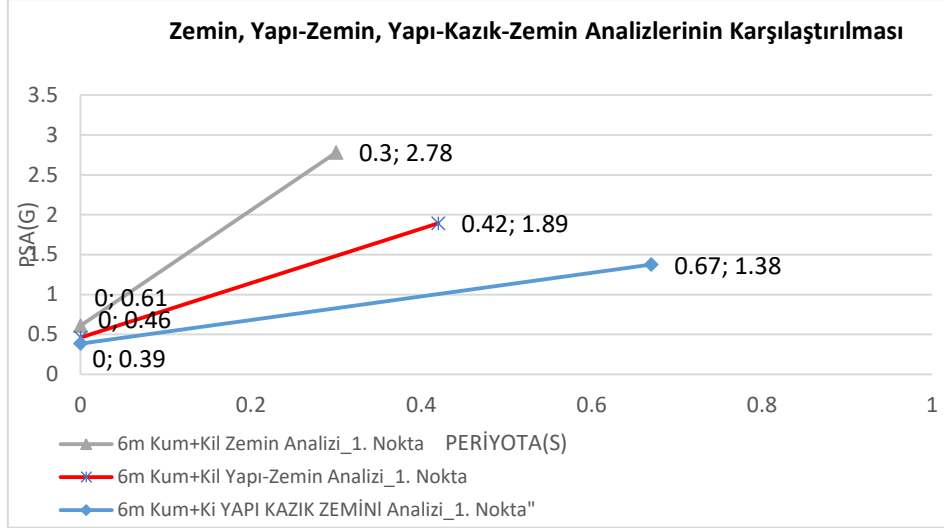
- Yapının temelinden B kadarmesafesinde belirlenen noktada input değerlere göre periyot değerinde 1.4 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise 2.8 kat artış söz konusudur. Maksimum yer ivmesi ise 1.8 kat büyüyerek 0.72 g gözlenmiştir. 2B uzaklıkta B mesafedeki davranış maksimum spektral ivme değerinde ve periyot dğerinde gözlemlenirken yr yüzünde oluşan maksimum ivme değerinde B mesafeye göre azalma oluşurken input değerine göre 1.7 kat büyütme söz konusudur.
- Kazıklı yapının temelinde, kazığın üstündeki davranış sistemden uzaklaştığında değiştiği tespit edilmiştir. Kazıklı imalat sistemin periyodunu arttırmış maksimum yer ivmesini sabit tutmuş, maksimum spektral ivmeyi ise 1.5 kat arttırmıştır. Ancak bu artış serbest saha yada kazıksız yapı için mertebe olarak en iyi yaklaşım olmuştur.



Şekil 4.21 1. Zemin modeli analizleri deprem kaydı karşılaştırmaları, 1. nokta



Şekil 4.22 1. Zemin modeli analizleri karşılaştırmaları, 1. nokta



Şekil 4.23 1. Zemin modeli maksimum değerlerin karşılaştırılması, 1. nokta

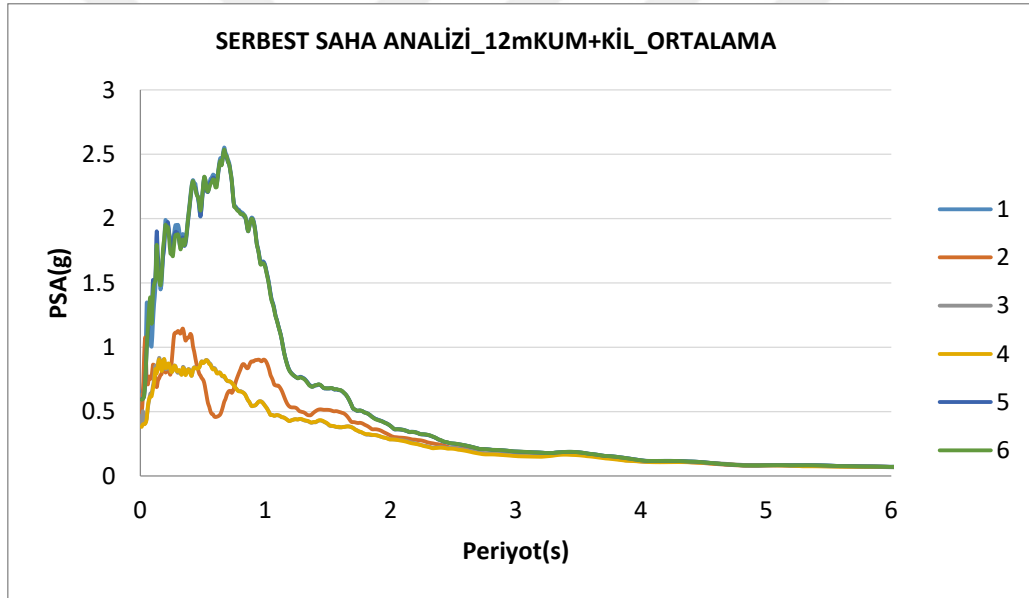
3 farklı analiz için ortalama değerlere göre elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Yapının periyodu bir önceki bölümde 0.762 s, Yapı+Zemin'in periyodu 1.25 s hesaplanırken, Yapı+kazık+zemin'in periyodu 1s olarak hesaplanmıştır.
- Analizlerdeki tepki spektrumları incelendiğinde maksimum yer ivmesi, maksimum spektral ivme ve olduğu periyot değerleri aşağıda sıralanmıştır.
 - Ortalama Deprem Kayıtları PGA=0.39 g, T=0.19s, PSA=0.90 g
 - Zemin(Serbest Saha) Analizi PGA=0.61g, T=0.3s, PSA=2.78 g
 - Yapı Zemin Analizi PGA=0.46g, T=0.42s, PSA=1.89 g
 - Yapı Kazık Zemin Analizi PGA=0.39g, T=0.67s, PSA=1.38 g
- Serbest saha analizinde PGA değerinde 1.6 kat büyütme oluşmuşken yapının söz konusu olduğu analizlerde 1.3 kat büyütme oluşmuş, kazıklı sistemde ise büyütme meydana gelmemektedir.
- Maksimum spektral ivme değeri değerleri yapı ve kazık yapılması durumunda azalmaktadır.
- Periyot değeri serbest saha analizinde 0.3 s iken yapı ve kazıklı yapı olduğu durumda artmaktadır. Söz konusu bu artışla yapıli analizde 0.42 s olurken kazıklı yapıda 0.67 s mertebesine çıkmaktadır. Yapının statik olarak periyodu 0.76 s hesaplanırken zemin ile etkileşimi ile 1.25 s hesaplanmaktadır. Kazıklı sistem de ise 1 s olarak hesaplanmıştır.

Maksimum spektral ivmenin oluştuğu bu periyot değerleri sistemin periyoduyla örtüşmemekte olup rezonans durumu söz konusu olmamaktadır.

4.4 2. Zemin Modeli Serbest Saha Analizi

Serbest Saha analizleri 1. Tabaka olan Kum birimin 6 m'den 12 m'ye arttırılması ile tekrarlanmış olup yeryüzüne yakın zayıf birimin artışında meydana gelen değişiklikler irdelenmek istenmiştir. Analiz sonucuna göre belirlenen noktalarda gözlenen davranışlar benzer olmuştur. Radikal farklılığın oluştuğu nokta, gevşek kum birimin tabaka kalınlığının arttırılması ile maksimum spektral ivmenin oluştuğu periyot değeri input değerine göre yaklaşık 4.5 kat artarak 0.67 s değeridir.

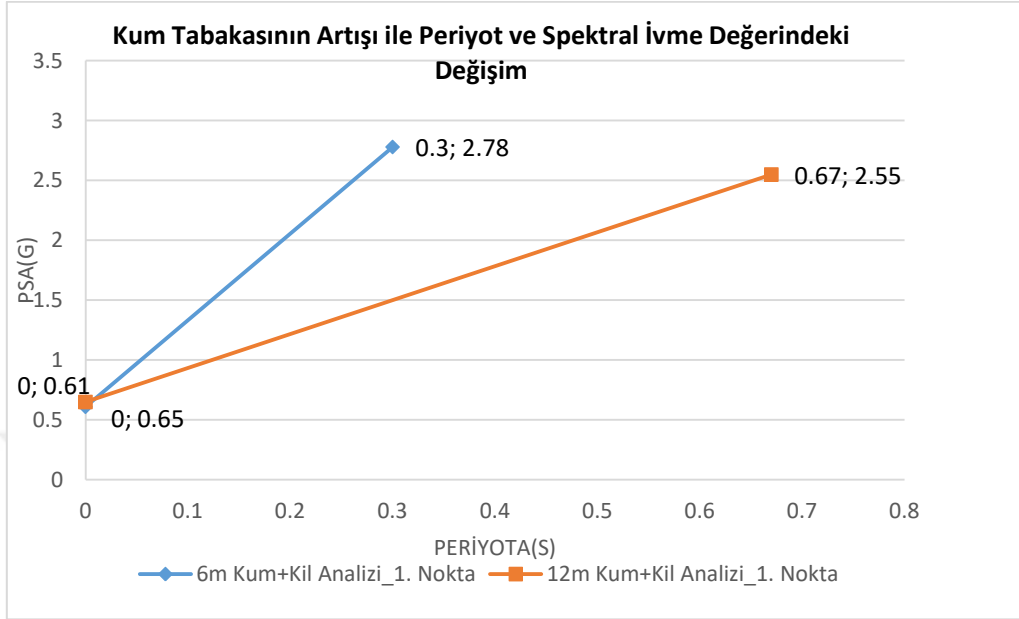


Şekil 4.24 2. Zemin modeli serbest saha analizi spektrumu, ortalama

Tablo 4.15 2. Zemin modeli serbest saha analizi maksimum değerler, ortalama

<u>ORTALAMA</u>	<u>ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.65	0.49	0.39	0.38	0.60	0.59
<u>PSA (g)</u>	2.55	1.14	0.92	0.91	2.53	2.54
<u>T(s)</u>	0.67	0.34	0.15	0.15	0.67	0.67

Tabaka kalınlığının artması ile maksimum ivmenin oluştuğu periyot değeri 2 kattan fazla artmış olup ivme değerinde az da olsa bir azalış gözlenmiştir. Maksimum yer ivmesi ise tabaka kalınlığının artması ile çok az da olsa artmıştır.

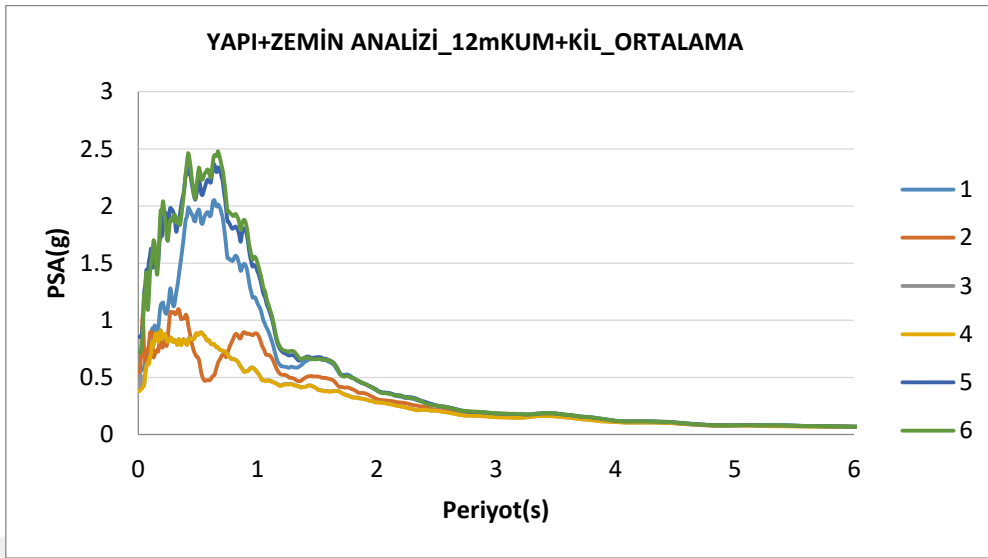


Şekil 4.25 Serbest saha analizi maksimum değerlerin karşılaştırılması

Yapı-zemin analizleri 1. Tabaka olan Kum birimin 6 m'den 12 m'ye arttırılması ile tekrarlanmış olup yeryüzüne yakın zayıf birimin artışında meydana gelen değişiklikler irdelenmek istenmiştir. Analiz sonucuna göre gevşek kum birimin tabaka kalınlığının arttırılması ile

- Input kayıtlarındaki maksimum spektral ivme değerleri temel altında 2.2 katına çıkarken periyot değeri de yaklaşık olarak 3.4 katına çıkmıştır.
- Yapı temelinin orta noktasındaki elde edilen periyot değeri yapıdan B ve 2B uzaklaştıkça artmakta olup mertebe olarak büyük farklılıklar oluşmamaktadır. Maksimum yer ivmesi yapının yakınında daha yüksek elde edilmiştir.
- Tabaka geçişinde elde edilen sonuçlar kum birim kalınlığı daha aken elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

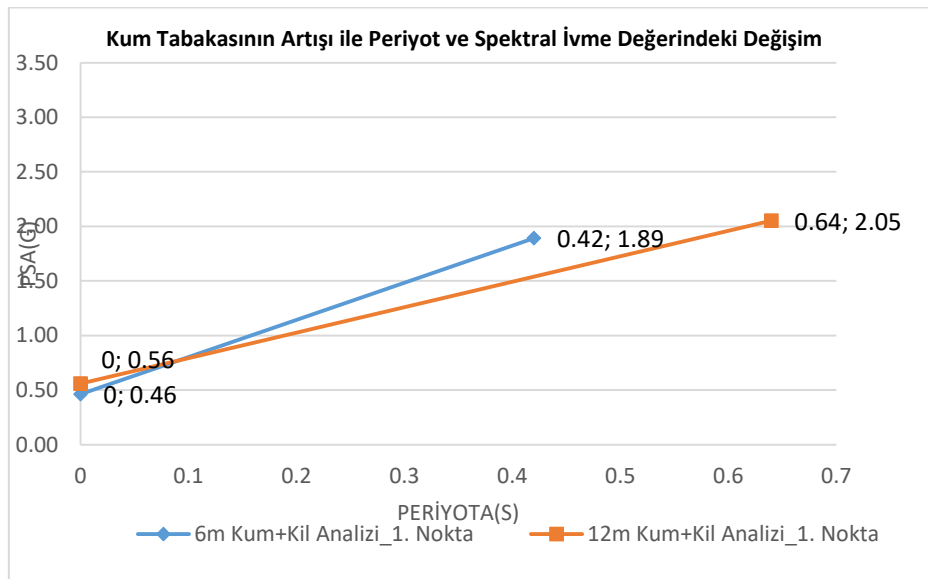
4.5 2. Zemin Modeli Yapı Zemin Analizi



Şekil 4.26 2. Zemin modeli zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama

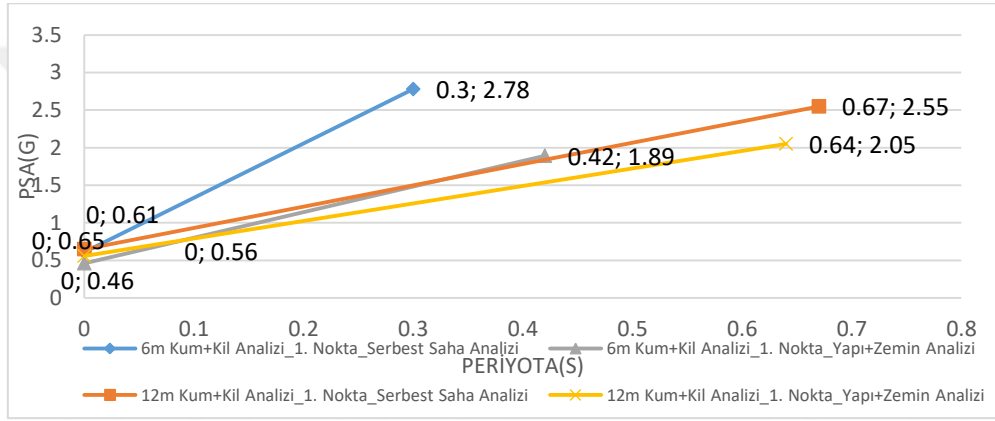
Tablo 4.16 2. Zemin modeli zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama

<u>ORTALAMA</u>	<u>YAPI+ZEMİN</u>					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA(g)</u>	0.56	0.48	0.39	0.38	0.85	0.72
<u>PSA (g)</u>	2.05	1.10	0.91	0.91	2.37	2.48
<u>T(s)</u>	0.64	0.34	0.19	0.19	0.64	0.67



Şekil 4.27 Zemin+yapı analiz maksimum değerlerin karşılaştırılması

İki farklı kum tabakası kalınlığına göre yapılan analizlerde hesaplanan değerlerde büyük farklılıklar temel altında oluşmaktadır. Temel altındaki nokta için yer yüzünde ölçülen maksimum ivme değeri tabaka kalınlığı 6 m iken 0.46 g iken tabaka kalınlığı 12 m'ye arttırıldığında 0.56 g değerine çıkmaktadır. Kum tabakasının kalınlığı arttırıldıkça büyütme değerinin arttığı gözlenmektedir. Maksimum spektral ivme değerinin oluştuğu periyot değerlerin ise 6 m iken 0.42 s, 12 m iken ise 0.64 s olmaktadır. Benzer şekilde bu periyot değerlerinde maksimum spektral ivme değeri de sırasıyla 1.89 g, 2.05 g olmaktadır. Yüzeye yakın bulunan gevşek kum tabakasının kalınlığı arttıkça maksimum spektral ivmenin değeri artmakta ve oluştuğu periyot değerinde de artış gözlenmektedir.

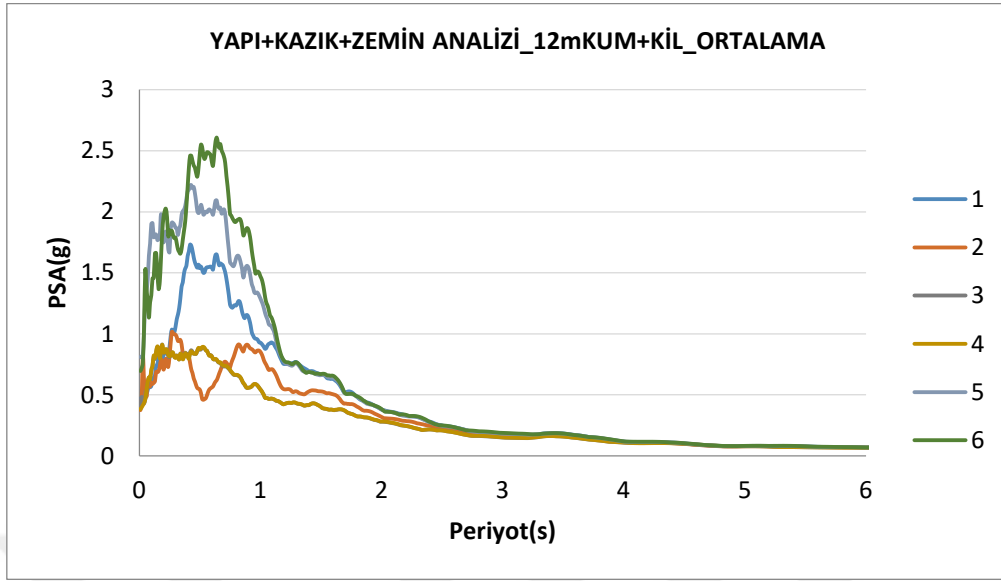


Şekil 4.28 Sserbest saha ve zemin+yapı analizleri karşılaştırılması

Yapı zemin etkileşimi ile serbest saha analizi karşılaştırıldığında ise Kum tabaka kalınlığı 6 m iken yapı ile zemin etkileşim hesabında serbest saha analizine göre daha yüksek periyot değerinde daha düşük spektral ivme değeri elde edilmiştir. Ayrıca maksimum yer ivme değeri yapının söz konusu olduğu analizde daha düşük hesaplanmıştır. Söz konusu bu azalma PGA değerinde 0.15 g iken, maksimum spektral ivme değerinde 0.89 g mertebesindedir. Periyot değeri ise 0.12 s artmaktadır.

Kum tabaka kalınlığı 12 m iken ise yapı ile zemin etkileşim hesabında serbest saha analizine göre daha düşük periyot değerinde daha düşük spektral ivme değeri elde edilmiştir. Ancak söz konusu bu periyot değerindeki fark 0.03 s olup göz ardı edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca maksimum yer ivme değeri, yapının söz konusu olduğu analizde daha düşük hesaplanmıştır. Söz konusu bu azalma PGA değerinde 0.09 g iken, maksimum spektral ivme değerinde 0.50 g mertebesindedir.

4.6 2. Zemin Modeli Yapı+Kazık+Zemin Etkileşimi



Şekil 4.29 2. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi spektrumu, ortalama

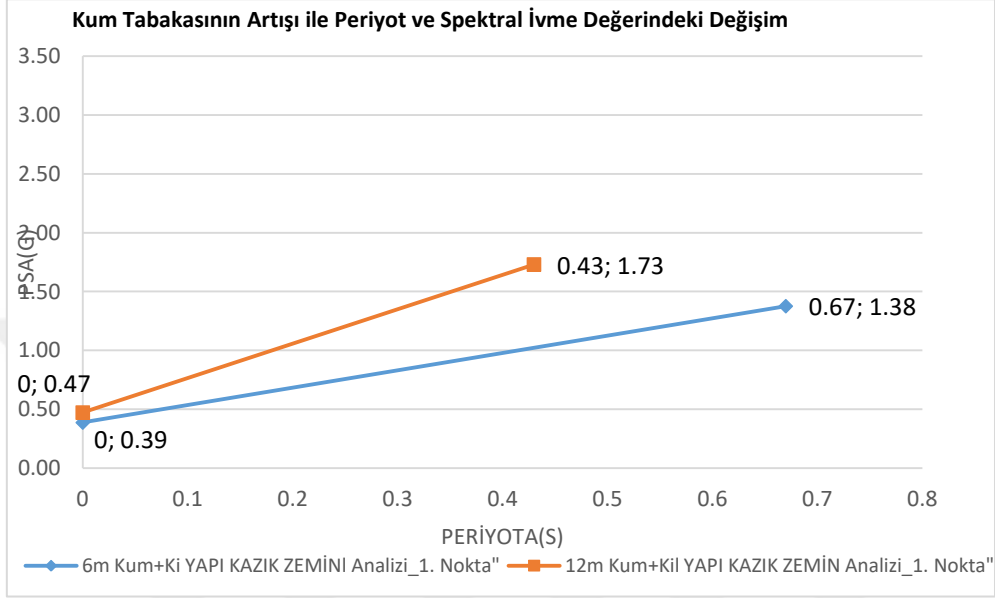
Tablo 4.17 2. Zemin modeli kazık + zemin + yapı analizi maksimum değerler, ortalama

ORTALAMA	YAPI+KAZIK+ZEMİN					
<u>NOKTA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<u>PGA (g)</u>	0.47	0.38	0.39	0.38	0.81	0.70
<u>PSA (g)</u>	1.73	1.02	0.91	0.91	2.22	2.61
<u>T(s)</u>	0.43	0.27	0.19	0.19	0.43	0.64

Kum tabakasının kalınlığı artırılması ile 3 farklı deprem kaydına ait analizler yapılmış olup ortalama spektrum değerlerine göre ;

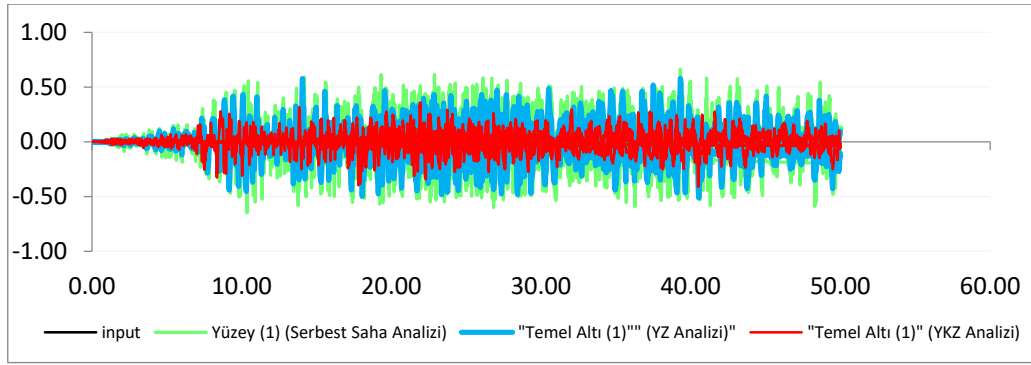
- Anakayadan etkitilen ivme kaydına ait maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değeri ve ivme değerindeki değişim yeryüzündeki orta noktaya ulaştığında maksimum spektral ivme değeri 1.9 kat artarak 1.73 g, bu ivme değerinin olduğu periyot değeri ise 2.3 kat artarak 0.43 s olmaktadır. Yer yüzünde ölçülen maksimum yer ivme değeri ise 1.2 kat artarak 0.47 g mertebesinde.
- Yapının temelinden B kadarmesafesinde belirlenen noktada input değerlere göre periyot değerinde 2.3 kat artış, maksimum spektral ivme değerinde ise 2.4 kat artış söz konusudur.

Maksimum yer ivmesi ise 2.1 kat büyüyerek 0.81 g gözlenmiştir. 2B uzaklıkta B mesafedeki davranış maksimum spektral ivme değerinde ve periyot değerinde gözlemlenirken yer yüzünde oluşan maksimum ivme değerinde B mesafeye göre azalma oluşurken input değerine göre 1.8 kat büyütme söz konusudur.

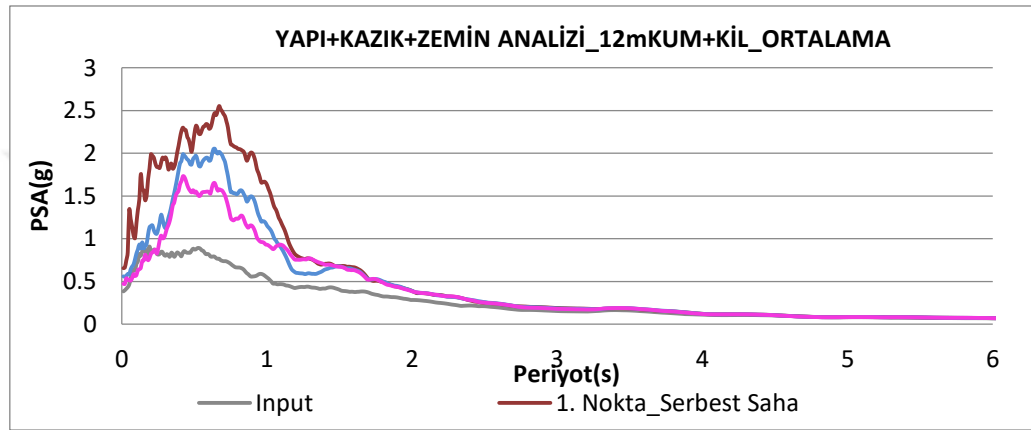


Şekil 4.30 Kazık + zemin+yapı analiz maksimum değerlerin karşılaştırılması

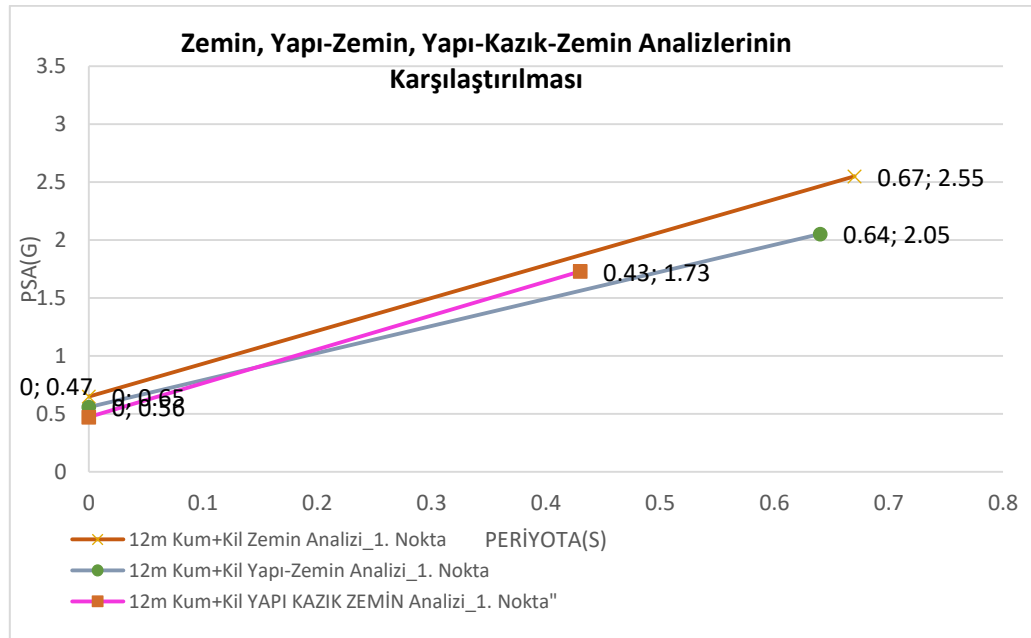
Temel altındaki nokta için yer yüzünde ölçülen maksimum ivme değeri tabaka kalınlığı 6 m iken 0.39 g iken tabaka kalınlığı 12 m'ye arttırıldığında 0.47 g değerine çıkmaktadır. Kum tabakasının kalınlığı arttırıldıkça büyütme değerinin arttığı gözlenmektedir. Maksimum spektral ivme değerinin olduğu periyot değerlerin ise 6 m iken 0.67 s, 12 m iken ise 0.43 s olmaktadır. Bu periyot değerlerinde oluşan maksimum spektral ivme değeri ise 6 m ve 12 m için sırasıyla 1.38g, 1.73 g olmaktadır. Yüzeye yakın bulunan gevşek kum tabakasının kalınlığı arttıkça maksimum spektral ivmenin değeri artmakta ve olduğu periyot değerinde ise azalma gözlenmektedir.



Şekil 4.31 2. Zemin modeli analizleri deprem kaydı karşılaştırmaları, 1. nokta



Şekil 4.32 2. Zemin modeli analizleri karşılaştırmaları, 1. nokta

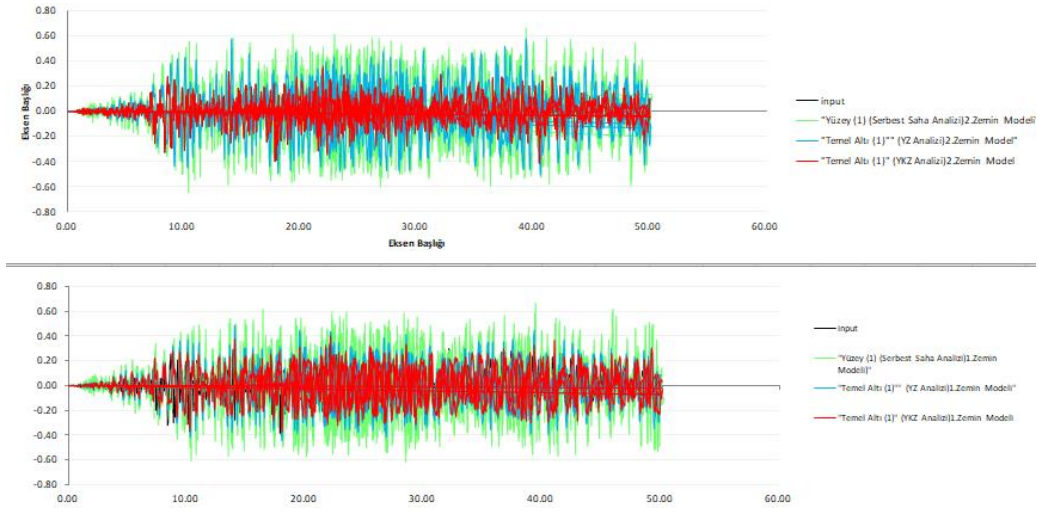


Şekil 4.33 2. Zemin modeli analizleri maksimum değerler karşılaştırmaları

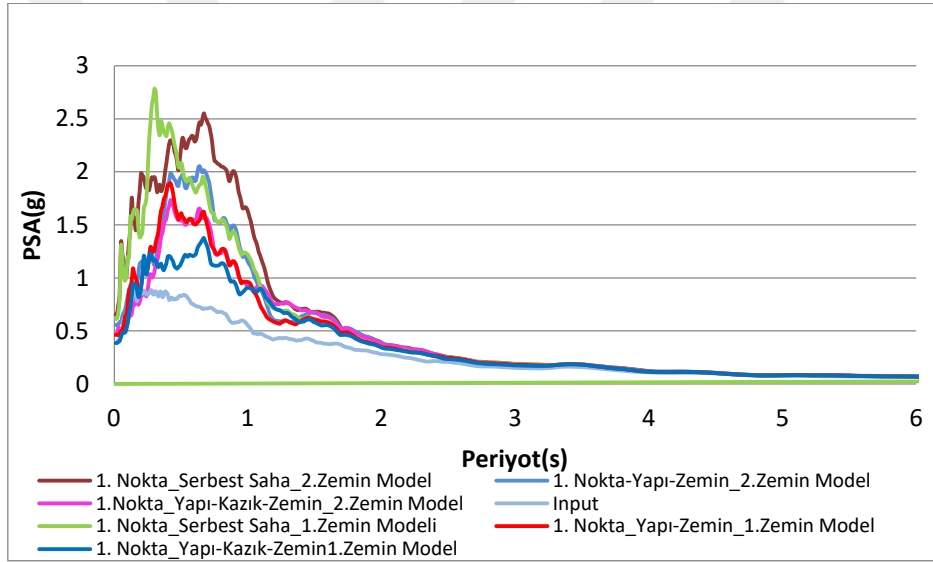
3 farklı analiz için ortalama değerlere göre elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Yapının periyodu bir önceki bölümde 0.762 s, Yapı+Zemin'in periyodu 1.25 s hesaplanırken, Yapı+kazık+zemin'in periyodu 1s olarak hesaplanmıştır.
- Analizlerdeki tepki spektrumları incelendiğinde maksimum yer ivmesi, maksimum spektral ivme ve oluştuğu periyot değerleri aşağıda sıralanmıştır.
 - Ortalama Deprem Kayıtları PGA=0.39 g, T=0.19s, PSA=0.90 g
 - Zemin(Serbest Saha) Analizi PGA=0.47 g, T=0.67s, PSA=2.55 g
 - Yapı Zemin Analizi PGA=0.65g, T=0.64s, PSA=2.05 g
 - Yapı Kazık Zemin Analizi PGA=0.56g, T=0.43, PSA=1.73 g
- Serbest saha analizinde PGA değerinde 1.2 kat büyütme oluşmuşken yapının söz konusu olduğu analizlerde 1.7 kat büyütme oluşmuş, kazıklı sistemde ise 1.4 kat büyütme meydana gelmektedir.
- Maksimum spektral ivme değeri değerleri yapı ve kazık yapılması durumunda azalmaktadır.
- Periyot değeri serbest saha analizinde 0.67 s iken yapı ve kazıklı yapı olduğu durumlarda azalmaktadır. Söz konusu bu artışla yapıli analizde az da olsa 0.64 s olurken kazıklı yapıda 0.43 s mertebesindedir.
- Yapının statik olarak periyodu 0.76 s hesaplanırken zemin ile etkileşimi ile 1.25 s hesaplanmaktadır. Kazıklı sistem de ise 1 s olarak hesaplanmıştır. Maksimum spktral ivmenin oluştuğu bu periyot değerleri sistemin periyoduyla örtüşmemekte olup rezonans durumu söz konusu olmamaktadır.

4.7 1. ve 2. Zemin Modeli Analiz Karşılaştırılması



Şekil 4.34 1. ve 2. Zemin modeli analizleri ivme zaman grafiği, 1. nokta



Şekil 4.35 1. ve 2. Zemin modeli analizleri karşılaştırmaları, 1. nokta

5

SONUÇ

Söz konusu bu tez 2 ana bölümden oluşmaktadır:

1. Bölümde DeepSoil programında yapılan 1 boyutlu analizlerin, Plaxis 2D programı ile yapılan 1 boyutlu analizlerle karşılaştırılması ve ikinci boyut etkisinden etkilenmeyen malzeme modeli, model sınırı ve genişliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Kil birim için yapılan 1 boyutlu analizlerde, DeepSoil ve Plaxis programlarında malzeme modeli drenajsız seçildiğinde benzerlik gözlemlenmiştir.
- Model sınırı Serbest alan (free field) seçildiği analizlerde, en doğru sonuçlar elde edilmiştir. Doğruluk, DeepSoil 1D, Plaxis 1D ve Plaxis 2D sonuçlarının kıyaslanmasıyla belirlenmiştir.
- Analizler sonucunda, model genişliğinin ikinci boyut etkisinin göz ardı edilebileceği genişlikte seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bu, analizlerdeki sınır koşullarının etkisini minimize etmek için önemlidir.
- Belirlenen zemin profillerine göre, maksimum spektral ivme, periyot ve maksimum yer ivmesi değerindeki farklılıklar zeminin cinsi ve mukavemet özelliklerinden kaynaklanmaktadır.
- Kil zemin profilinde maksimum spektral ivme 1.48 g iken kum zemin profilinde 2.76 g mertebesindedir. Yaklaşık iki kat fark gözlenmiş olup bu farkın, kum profilinin için gevşek nitelikte, kil profilinin ise orta sert itelikte kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır.
- DeepSoil kullanılarak gerçekleştirilen kum profilindeki analizlerde, maksimum spektral ivmenin meydana geldiği periyot genişlemiştir. Plaxis'te, benzer geniş periyot aralığında gözlemlenmiştir ancak maksimum spektral ivme tek bir periyot değerinde meydana gelmiştir. Bu farklılık, kum profillerinin analizinde periyot değerininin doğru seçilmesini zorlaştırmakta olup detaylı bir şekilde irdelenmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

- Kum profili üzerindeki analiz sonuçlarını incelediğimizde, Plaxis 2D'deki maksimum zemin ivmesi değeri DeepSoil'de bulunandan yaklaşık olarak iki kat daha fazladır. Kil profili üzerinde ise DeepSoil'de hesaplanan PGA'lar Plaxis'de elde edilen değerlerden daha yüksektir.

Analiz sonuçları, bir boyutlu ve iki boyutlu analizler arasında farklılıklar olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, 2D analiz modeli oluşturulurken model genişliği ve sınırların doğru seçiminin güvenilir sonuçlar elde edilmesinde önemli bir rol olmasını göstermektedir. Bir boyutlu analiz ile iki boyutlu analizlerde maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değerindeki davranışlar arasındaki benzerlik, ikinci boyut etkilerinden etkilenmeyen kriterlerin dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu, özellikle daha karmaşık zemin modelleri ve analizlerde son derece önemli olmaktadır. Söz konusu bu bölümde malzemenin modeline ve 2 boyutlu analiz için oluşturulan modelin sınır koşulu ve genişliği için tespitinin içermektedir. 2. bölümde gerçekleştirilen analizler 1. bölümün bulgularına göre devam etmektedir.

Yapılan çalışmaların literatürde yer alan çalışmalara göre karşılaştırılması konu konu ayrılarak aşağıda sunulmuştur.

- Malzeme Modeli ve Drenaj Koşulları:

DeepSoil ve Plaxis 2D'de drenajsız (undrained) koşullarda yapılan analizlerin benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, Kramer (1996) ve Çetin vd. (2004) çalışmalarında, farklı yazılımların drenajsız analizler için benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

- Model Sınırı ve Serbest Alan (Free Field):

Model sınırının serbest alan olarak seçilmesinin doğru sonuçlar verdiği bulgusu Joyner ve Chen (1975), Wang, Wu vd. (2009) çalışmalarında da serbest alan sınır koşullarının daha gerçekçi sonuçlar sağladığı vurgulanmıştır.

- Model Genişliği ve Sınır Koşulları:

Model genişliğinin ikinci boyut etkisinden etkilenmeyecek şekilde seçilmesi gerektiği bulgusu, literatürde yaygın olarak kabul edilen bir prensiptir. Örneğin, Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından yapılan çalışmalar, sınır koşullarının

model sonuçları üzerindeki etkisini minimize etmek için yeterli genişlikte bir model kullanmanın önemini vurgulamaktadır.

- Zemin Profilleri ve Spektral İvme:

Kil ve kum zemin profillerindeki maksimum spektral ivme değerlerindeki farklılığı irdelleyen Kumar ve Whittle (1996), çalışmasında farklı zemin türlerinin spektral ivme üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Kil için maksimum spektral ivme 1.2 g, kum için 2.5 g olup Kum zeminler daha yüksek spektral ivme göstermektedir.

- Periyot ve Spektral İvme İlişkisi:

Hashash ve Park (2001), farklı periyot aralıklarında maksimum spektral ivme değerlerinin nasıl değiştiğini analiz etmiş ve benzer bulgular elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada Kum profili için maksimum spektral ivme 2.7 g, periyot 0.5-1.5 saniye arasında değişmektedir

2. Bölümde ise malzeme model ve parametrelerine karar verilen 2 ayrı Kum ve Kil tabaka özellikleri kullanılarak 2 farklı zemin profilinde analizler gerçekleştirilmiştir. 1. Zemin modeli 6 m Gevşek Kum+ 24 m Orta Katı Kil Tabakalarından oluşurken, 2. Zemin modelinde 1. Tabaka olan gevşek kum tabakasının tabaka kalınlığı artırılıp 12 m Gevşek Kum+ 18 m Kil Tabakası söz konusudur. Belirlenen bu iki zemin modelinde serbest saha, yapı+zemin ve yapı+kazık+zemin etkileşim analizleri Plaxis 2D program ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonuçlarına göre serbest saha, yapı+zemin ve yapı+kazık+zemin etkileşimi irdelenmiş olup ortalama spektrum üzerinden periyot, PSA ve PGA değerleri kıyaslanmıştır.

Tablo 4.18 1. Zemin modeli analizlerindeki maksimum değerler

1. ZEMİN PROFİLİ									
	SERBEST SAHA ANALİZİ			ZEMİN+YAPI ANALİZİ			ZEMİN+KAZIK+YAPI ANALİZİ		
	T(S)	PSA(G)	PGA(G)	T(S)	PSA(G)	PGA(G)	T(S)	PSA(G)	PGA(G)
INPUT	0.19	0.9	0.39	0.19	0.9	0.39	0.19	0.9	0.39
2	0.67	1.25	0.35	0.67	1.26	0.34	0.67	1.28	0.32
1	0.30	2.78	0.61	0.42	1.89	0.46	0.67	1.38	0.39
5	0.30	2.65	0.52	0.28	2.30	0.70	0.27	2.52	0.72
6	0.31	2.75	0.59	0.31	2.88	0.62	0.30	2.67	0.68

Yeryüzündeki orta noktada (1) PGA değeri incelendiğinde, serbest saha analizinde maksimum değer olan 0.61g iken, zemin+yapı analizinde 0.46g ve zemin+kazık+yapı analizinde 0.39g mertebesindedir. Input olarak adlandırılan sistemlere etki edilen deprem kaydındaki PGA değerinin 0.39g olduğu düşünüldüğünde, serbest saha analizinde yaklaşık 1.56 kat, yapı inşa edildiği takdirde ise 1.18 kat artmaktadır. Kazıklı sistemde ise artış meydana gelmemektedir. Serbest saha analizinde input değerine göre daha uzun periyotta (0.30s) daha yüksek ivme değeri (2.78g) oluşmaktadır. Bu fark yaklaşık 3 kattır. Serbest saha analizlerine göre, yapı ve kazık+yapı analizlerinde ise daha uzun periyotlarda (sırasıyla 0.42s ve 0.67s) daha düşük ivme değerleri (sırasıyla 1.89g ve 1.38g) elde edilmektedir. Ancak, input değerlerine göre ayrı ayrı bakıldığında, daha uzun periyotlarda daha yüksek ivme değerleri oluşmaktadır.

Tabaka geçişindeki noktada (2) her üç analizde de periyot değerleri aynıdır (0.67s). Serbest saha ve zemin+yapı analizleri arasındaki PSA ve PGA değerleri oldukça benzerdir. Zemin+kazık+yapı analizinde biraz daha düşük PGA değeri elde edilmiştir. Bu durum, kazıklı sistemlerin sismik yükleri daha etkili bir şekilde dağıttığını ve yapısal titreşimleri azalttığını göstermektedir.

Yeryüzeyindeki orta noktadan B kadar uzaklıktaki noktada (5) serbest saha analizinde daha yüksek PSA değerleri gözlemlenmektedir (2.65g). Zemin+yapı ve zemin+kazık+yapı analizlerinde PSA değerlerinde hafif düşüşler vardır (sırasıyla 2.30g ve 2.52g), ancak PGA değerleri artmıştır (sırasıyla 0.70g ve 0.72g). Bu artış, yapının ve kazık sisteminin daha yüksek titreşimlere neden olabileceğini, ancak bu titreşimlerin enerjisini daha düşük periyotlarda yoğunlaştırabileceğini göstermektedir. Yapı ve kazık sistemi, zeminin doğal frekansını değiştirerek ve

enerjiyi daha düşük periyotlarda yoğunlaştırarak sismik yüklerin dağılımını değiştirmektedir.

Yeryüzeyindeki orta noktadan 3B kadar uzaklıktaki noktada (6) periyot değerleri her üç analizde de benzer olup, serbest saha analizinde PSA ve PGA değerleri diğer iki analizle benzerlik göstermektedir. Zemin+yapı analizinde PSA değeri biraz daha yüksektir (2.88g), bu da yapı etkisinin sismik dalgaların enerjisini artırabileceğini göstermektedir.

Yapılan analizlerde, serbest saha, zemin+yapı ve zemin+kazık+yapı sistemlerinin sismik davranışları incelenmiş ve belirli noktalar (1, 2, 5, 6) arasındaki değerler karşılaştırılmıştır. Serbest saha analizinde, 1. noktada en yüksek PGA değeri (0.61g) gözlemlenirken, zemin+yapı ve zemin+kazık+yapı sistemlerinde bu değerler sırasıyla 0.46g ve 0.39g'ye düşmüştür. 5. noktada, serbest saha analizinde PSA değeri en yüksek (2.65g) iken, zemin+yapı ve zemin+kazık+yapı analizlerinde PSA değerleri hafifçe düşmektedir (sırasıyla 2.30g ve 2.52g), ancak PGA değerleri artmaktadır (sırasıyla 0.70g ve 0.72g). Bu durum, yapının ve kazık sisteminin sismik yüklerin periyotlarını kısaltarak daha düşük periyotlarda enerjiyi yoğunlaştırdığını göstermektedir. 6. noktada, serbest saha analizinde PSA ve PGA değerleri yüksek (2.75g ve 0.59g) olup, zemin+yapı analizinde PSA değeri hafifçe artmakta (2.88g) ve PGA değeri biraz yükselmektedir (0.62g). Zemin+kazık+yapı analizinde ise PSA değeri hafifçe düşmekte (2.67g) ve PGA değeri yüksektir (0.68g). Bu sonuçlar, yapı ve kazık sisteminin sismik yüklerin dağılımını etkili bir şekilde değiştirdiğini ve yapısal titreşimleri azaltmada önemli olduğunu göstermektedir. 5. nokta ile 6. nokta arasındaki kıyaslamada, her iki noktanın da sismik yüklerin periyotları ve ivme değerleri üzerinde benzer etkilere sahip olduğu, ancak 6. noktada enerjinin daha yüksek periyotlarda yoğunlaştığı görülmektedir.

Elde edilen veriler, yapısal tasarım ve güvenlik açısından önemli ipuçları sağlamakta ve deprem mühendisliği alanında yenilikçi çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu durum, deprem sırasında yıkılma riskini azaltmak için kritik öneme sahiptir. Özellikle uzun periyotlarda daha düşük ivme değerlerinin elde edilmesi, yapıların sismik güvenliğini artırmak için önemli bir avantajdır.

Tablo 4.19 2. Zemin modeli analizlerindeki maksimum değerler

2. ZEMİN PROFİLİ									
	SERBEST SAHA ANALİZİ			ZEMİN+YAPI ANALİZİ			ZEMİN+KAZIK+YAPI ANALİZİ		
	T(S)	PSA(G)	PGA(G)	T(S)	PSA(G)	PGA(G)	T(S)	PSA(G)	PGA(G)
INPUT	0.15	0.91	0.39	0.19	0.91	0.38	0.19	0.91	0.38
2	0.34	1.14	0.49	0.34	1.1	0.48	0.27	1.02	0.38
1	0.67	2.55	0.65	0.64	2.05	0.56	0.43	1.73	0.47
5	0.67	2.53	0.59	0.64	2.37	0.85	0.43	2.22	0.81
6	0.67	2.53	0.59	0.67	2.48	0.72	0.64	2.61	0.7

Yeryüzündeki orta noktada (1) Serbest saha analizinde, PGA değeri maksimum 0.65g olarak belirlenmiştir. Zemin+yapı analizinde bu değeri 0.56g, zemin+kazık+yapı analizinde ise 0.47g'dir. Serbest saha analizinde yaklaşık 1.67 kat artış olurken, yapı inşa edildiğinde 1.44 kat artış, kazıklı sistemde ise artış 1.21 kat olarak gözlemlenmektedir. Bu, kazıklı sistemlerin daha etkili bir sismik enerji dağıtımını sağladığını göstermektedir. Serbest saha analizinde periyot 0.67s, PSA değeri 2.55g'dir. Yapı ve kazık+yapı analizlerinde periyotlar sırasıyla 0.64s ve 0.43s olarak belirlenmiş olup, PSA değerleri 2.05g ve 1.73g'dir. Yapı ve kazık sistemleri, daha düşük ivme değerleri sağlayarak titreşimleri azaltmaktadır.

Tabaka geçişindeki noktada (2) her üç analizde de periyot değerleri aynıdır (0.34s). Serbest saha analizinde PSA 1.14g, PGA 0.49g; zemin+yapı analizinde PSA 1.10g, PGA 0.48g; zemin+kazık+yapı analizinde PSA 1.02g, PGA 0.38g olarak gözlemlenmiştir. Kazıklı sistemde PGA değerinin düşmesi, sismik yüklerin daha etkili dağıtıldığını göstermektedir.

Yeryüzeyindeki orta noktadan B kadar uzaklıktaki noktada (5) Serbest saha analizinde PSA değeri 2.53g, PGA değeri 0.59g'dir. Zemin+yapı analizinde PSA 2.37g, PGA 0.85g; zemin+kazık+yapı analizinde PSA 2.22g, PGA 0.81g olarak belirlenmiştir. Bu, yapı ve kazık sistemlerinin yüksek periyotlarda daha yüksek titreşimlere neden olabileceğini, ancak titreşim enerjisini daha düşük periyotlarda yoğunlaştırabileceğini göstermektedir.

Yeryüzeyindeki orta noktadan 3B kadar uzaklıktaki noktada (6) Her üç analizde de periyot değerleri benzer olup, serbest saha analizinde PSA ve PGA değerleri sırasıyla 2.53g ve 0.59g'dir. Zemin+yapı analizinde PSA 2.48g, PGA 0.72g; zemin+kazık+yapı analizinde PSA 2.61g, PGA 0.70g olarak gözlemlenmiştir.

Yapı etkisi sismik dalgaların enerjisini artırabilirken, kazıklı sistemler bu etkileri azaltmaktadır. Serbest saha analizlerinde yüksek PSA ve PGA değerleri gözlemlenmektedir. Yapı ve kazık sistemleri eklendiğinde bu değerlerde belirgin düşüşler olmaktadır. Daha uzun periyotlarda yapı ve kazık sistemlerinin etkisiyle ivme değerlerinde düşüşler gözlemlenmektedir.

Kazık+Yapı analizleri, sismik yükleri daha etkin bir şekilde dağıtarak ivme değerlerini düşürmekte ve yapısal titreşimleri azaltmaktadır.

Her üç analiz yönteminde de periyotlar benzer olmasına rağmen, PSA ve PGA değerleri yapı ve kazık sistemlerinin varlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

- 1. ve 2. Zemin Profili Karşılaştırması

PGA Değerleri:

1. Zemin Profili: Serbest saha analizinde 0.61g, yapı inşa edildiğinde 0.46g, kazıklı sistemde 0.39g.

2. Zemin Profili: Serbest saha analizinde 0.65g, yapı inşa edildiğinde 0.56g, kazıklı sistemde 0.47g.

1. zemin profilinde, yapı ve kazık sistemlerinin etkisiyle PGA değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu, yapı ve kazık sistemlerinin zemin hareketlerini etkili bir şekilde sönümlediğini ve enerji dağılımını artırarak sismik ivmeleri azalttığını göstermektedir.

2. zemin profili, her durumda daha yüksek PGA değerleri göstermektedir. Bu, 2. zemin profilinin daha yüksek sismik ivmelere maruz kaldığını ve gevşek kum tabakasının daha kalın olmasının sismik dalgaların amplifikasyonunu artırarak daha yüksek PGA değerlerine neden olduğunu göstermektedir.

PSA Değerleri ve Periyotlar:

1. Zemin Profili: 0.30s, 0.42s ve 0.67s periyotlarında PSA değerleri sırasıyla 2.78g, 1.89g ve 1.38g.

2. Zemin Profili: 0.67s, 0.64s ve 0.43s periyotlarında PSA değerleri sırasıyla 2.55g, 2.05g ve 1.73g.

1. zemin profilinde, düşük periyotlarda (kısa süreli salınımlar) yüksek PSA değerleri gözlemlenmektedir.

Bu, zemin profilinin gevşek kum tabakası nedeniyle kısa periyotlu salınımlara duyarlı olduğunu ve yüksek sismik yanıt verdiğini göstermektedir. Kısa periyotlu salınımlar genellikle daha gevşek zeminlerde ve üst tabakalarda meydana gelir.

2. zemin profilinde, daha uzun periyotlarda (daha uzun süreli salınımlar) yüksek PSA değerleri gözlemlenmektedir. Bu, zemin profilinin daha kalın kum tabakası nedeniyle uzun periyotlu salınımlara duyarlı olduğunu ve yüksek sismik yanıt verdiğini göstermektedir. Uzun periyotlu salınımlar genellikle daha derin veya kalın zemin tabakalarında meydana gelir.

Her iki zemin profilinde de belirli periyotlarda yüksek PSA değerleri gözlemlenmiştir, ancak PSA değerlerinin periyotlarla ilişkisi farklılık göstermektedir. 1. Zemin Profili: Daha kısa periyotlarda yüksek PSA değerleri, gevşek kum tabakasının etkisini göstermektedir. 2. Zemin Profili: Daha uzun periyotlarda yüksek PSA değerleri, daha kalın kum tabakasının etkisini göstermektedir. Ancak, 2. zemin profili yapı inşa edildiğinde ve kazıklı sistemlerde daha yüksek PSA değerleri göstermektedir.

Zemin Profillerinin Davranışı:

1. Zemin Profili: Gevşek kum tabakası, düşük periyotlarda yüksek ivme değerlerine neden olmaktadır. Orta-katı kil tabakası, daha yüksek periyotlarda titreşimleri sönmölemektedir. Bu zemin profili, gevşek kum ve orta-katı kil tabakalarının kombinasyonu ile kısa periyotlarda yüksek ivme değerleri göstermektedir. Bu da, zemin profilinin kısa periyotlu (yüksek frekanslı) sismik dalgalara karşı hassas olduğunu belirtir.

2. Zemin Profili: Gevşek kum tabakası, yüksek periyotlarda yüksek ivme değerlerine neden olmaktadır. Orta-katı kil tabakası ise düşük periyotlarda titreşimleri sönmölemektedir. Bu zemin profili, kum ve kil tabakalarının kombinasyonu ile daha uzun periyotlarda yüksek ivme değerleri göstermektedir. Bu da, zemin profilinin uzun periyotlu (düşük frekanslı) sismik dalgalara karşı hassas olduğunu belirtir.

Her iki zemin profili de farklı periyotlarda farklı davranışlar sergilemektedir. 1. zemin profili, düşük periyotlarda yüksek ivme değerleri ile karakterize edilirken, 2. zemin profili yüksek periyotlarda yüksek ivme değerlerine sahiptir.

Yapı ve Kazık Sistemlerinin Etkisi:

1. Zemin Profili: Yapı ve kazık sistemleri, sismik yüklerin etkisini azaltarak ivme değerlerinde belirgin bir düşüş sağlamaktadır. 1. zemin profilinde, yapı ve kazık sistemlerinin sismik yükleri daha etkili bir şekilde dağıttığı ve titreşimleri azalttığı görülmektedir

2. Zemin Profili: Yapı ve kazık sistemleri de benzer şekilde ivme değerlerinde düşüş sağlamaktadır, ancak bu düşüş oranı 1. zemin profilindeki kadar belirgin değildir. 2. zemin profilinde yapı ve kazık sistemlerinin etkisiyle PGA değerlerinde düşüş görülsede, bu düşüş 1. zemin profiline kıyasla daha az belirgindir. Bu, 2. zemin profilinin daha kalın kum tabakası nedeniyle sismik dalgaların amplifikasyonunun arttığını göstermektedir.

1. zemin profili, gevşek kum ve orta-katı kil tabakalarının kombinasyonu ile kısa periyotlarda yüksek ivme değerleri gösterir ve yapı ile kazık sistemlerinin daha etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle, 1. zemin profilinde yapılacak yapısal tasarımlarda, düşük periyotlarda yüksek sismik ivmeleri azaltmak için yapı ve kazık sistemlerinin kullanımı önemlidir.

2. zemin profili ise daha uzun periyotlarda yüksek ivme değerleri ile karakterize edilir ve yapı ile kazık sistemlerinin etkisi daha az belirgindir. Bu durumda, yapısal tasarımlarda uzun periyotlu salınımları azaltmak için özel önlemler alınmalıdır. Örneğin, daha esnek yapı sistemleri veya sönümleme cihazları kullanarak sismik yüklerin etkisini azaltmak mümkün olabilir.

1. zemin profili, gevşek kum ve orta-katı kil tabakalarının kombinasyonu ile düşük periyotlarda yüksek ivme değerleri göstermekte, yapı ve kazık sistemlerinin daha etkili olduğu görülmektedir. 2. zemin profili ise daha uzun periyotlarda yüksek ivme değerleri ile karakterize edilmekte ve yapı ve kazık sistemlerinin etkisi daha az belirgin olmaktadır. Her iki zemin profili de farklı dinamik özellikler sergilediğinden, yapısal tasarımda belirlenen zemin profillerine göre özel olarak analizler gerekmektedir. belirlenmelidir.

Bu tez kapsamında yapılan analizler, mühendislerin farklı zemin profillerine uygun yapı ve kazık sistemleri tasarımlarına yardımcı olmakta ve deprem güvenliği açısından önemli veriler sunmaktadır.

Yapılan çalışmaların literatürde yer alan çalışmalara göre karşılaştırılması konu konu ayrılarak aşağıda sunulmuştur.

- PGA ve PSA Değerlerinin Düşüşü:

Literatürde yapılan birçok çalışma, yapı ve kazık sistemlerinin PGA ve PSA değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Örneğin (Kramer, 1996) tarafından yapılan çalışmada, zemin-yapı etkileşiminin serbest saha analizine göre PGA değerlerinde belirgin bir düşüşe neden olduğu belirtilmiştir.

Diğer bir çalışma olan Gazetas (1991), kazık sistemlerinin özellikle yumuşak zeminlerde sismik yükleri etkin bir şekilde dağıtarak ivme değerlerini azalttığını ortaya koymuştur.

- Periyot ve İvme İlişkisi:

Seed ve Idriss (1970), farklı zemin profilleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, gevşek kum tabakalarının düşük periyotlarda yüksek ivme değerlerine neden olduğunu, kil tabakalarının ise daha yüksek periyotlarda titreşimleri sönümlendiğini belirtmişlerdir. Bu bulgu, 1. zemin profilinde gözlemlenen davranışlarla uyumludur.

Ayrıca, Stewart ve Fenves (1998), zemin profillerinin periyot ve ivme değerleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve daha yüksek periyotlarda (0.6-0.8s) PSA değerlerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu, 2. zemin profilinde elde edilen bulgularla uyumludur.

- Zemin-Yapı ve Kazık Sistemlerinin Etkisi:

Dobry. vd. (2000), zemin-yapı etkileşiminin yapısal titreşimleri azalttığı ve kazık sistemlerinin sismik enerji dağıtımında önemli bir rol oynadığı belirtmiştir. Bu durum, her iki zemin profilinde de gözlemlenen trendlerle tutarlı olmaktadır.

Rodriguez-Marek ve Bray (1999), kazıklı sistemlerin, özellikle yüksek sismik aktiviteli bölgelerde yapıların sismik güvenliğini artırdığını ve PGA ile PSA değerlerinde düşüş sağladığını göstermiştir. Bu, kazıklı sistemlerin her iki zemin profilinde de benzer etkiler gösterdiği bulgularını desteklemektedir.

Söz konusu bu tez kapsamında yapılan analizler, literatürdeki diğer çalışmalarla büyük ölçüde uyum göstermektedir. Özellikle zemin-yapı ve kazık sistemlerinin sismik yükler üzerindeki etkileri, ivme değerlerinin düşmesi ve periyotlar üzerindeki etkiler, literatürde yer alan çalışmalarla benzerlik göstermektedir

Bu tez kapsamında yapılan analizler belirli zemin profili ve kısıtlı deprem kayıtlarına göre yapıldığı gözönünde bulundurulduğunda her proje özelinde etkileşim analizlerinin yapılması gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Kazıklı temel yapılması durumunda ivme değerlerinde karşılaşılan olumlu etkinin metrebesi her proje özelinde irdelenmelidir. Deprem kayıtları asgari miktar olan 11 adet ile yapılması analizlerin doğruluğunu sağlayacak olup daha güvenli sonuçları doğuracaktır.

Gelecekteki çalışmalarda, farklı zemin profillerinin daha geniş bir yelpazede incelenmesi ve farklı sismik koşullarda analizlerin yapılması, bu bulguların daha da doğrulanmasına ve zenginleştirilmesine yardımcı olabilir.

- Abrahamson, N. A. (1992). Non-stationary spectral matching. *Seismological research letters* Vol.63, 30.
- AFAD. (2019). *Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması*. Retrieved from <https://tdth.afad.gov.tr/>
- Akın, M. S. (2021). Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi. Kocaeli Üniversitesi.
- Alver, O., Sezen, A., & Eseller Bayat, E. E. (2021). TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zem* Etk*leş*mAnal*zler* . *Teknik Dergi*, 11197-11225.
- Bardet, J. P., Ichii, K., & Lin, C. H. (2020). EERA, A Computer Program for Equivalent Linear Earthquake Site Response Analysis of Layered Soils Deposits. *Open Journal of Earthquake Research*, Vol.7 No.2.
- Bentley. (2022). Plaxis 2D Reference Manual.
- Benz, T. (2007). *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart.
- Brinkgreve, R., Engin, E., & Swolfs, W. (2015). Manual Plaxis 2D / 3D. Plaxis BV, Delft.
- Brinkgreve, R., Kappert, M., & Bonnier, P. (2007). Hystereticdampinginasmall-strainstiffnessmodel. *NumericalModels in Geomechanics*, 737-742.
- Çetin, K. O., Seed, R. B., & Der Kiureghian, A. (2004). Probabilistic models for the initiation of seismic soil liquefaction. *Structural Safety*, 26(1), 53-74.
- Chopra, A. K. (2007). *Dynamic of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering 3rd Edition*. Prentice Hall, Upper Saddle Rive.
- Chu, D., & Truman, K. Z. (2004). EFFECTS OF PILE FOUNDATION CONFIGURATIONS IN SEISMIC. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, (p. Paper No. 1551). Vancouver, B.C., Canada.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures*.
- Dao, T. (2011). Validation of PLAXIS Embedded Piles For Lateral Loading.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. University of Texas at Austin.
- DeepSoil. (2022). 1-D Wave Propagation Analysis Program for Geotechnical Site Response Analysis of Deep Soil Deposits. *Version 7*.
- Dobry, R., Martin, G. R., & Parra, E. (2000). *Seismic response of piles and pile-supported structures*. Auckland, New Zealand: In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Gazetas, G. (1991). *Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations*. *Journal of Geotechnical Engineering* 117(9), 1363-1381. .

- GovindaRaju, L., Ramana, G. V., HanumanthaRao, C., & Sitharam, T. G. (2004). Site-specific ground response analysis. *Current Science*, Vol. 87, No. 10, 1354-1362 .
- Hashash, Y. M., & Park, D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. *Engineering Geology*, 62(1-3), 185-206.
- Hokmabadi, A. S., Fatahi, B., & Samali, B. (2014). Assessment of soil–pile–structure interaction influencing seismic. *Computers and Geotechnics*.
- Hudson, M., Idriss, I., & Beikae, M. (1994). QUAD4M - A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base.
- Idriss, I. M., & Sun, J. I. (1992). SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. University of California: Davis.
- İnce, G. Ç., & Yılmazoğlu, L. (2014). Investigating the influence of topographic irregularities and. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 1773-1788.
- Joyner, W. B., & Chen, A. T. (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), 1315-1336.
- Kale, Ö. (2017). Tasarım Spektrumu Parametreleri için Olasılıksal Sismik Tehlike Analizlerine Bağlı Bir Çalışma. *İMO Teknik Dergi*, 8077-8103.
- Kausel, E. (2010). Early History of Soil–Structure Interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9):822–832.
- Kausel, E., Whitman, R. V., Morray, J. P., & Elsabee, F. (1978). The spring method for embedded foundations. *Nuclear Engineering and Design*, 48 (2), 377-392.
- Keskin, E. (2018). Betonarme Çerçevesel Bir Yapıda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Kazık Tasarımı. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall Int. Series.
- Kumar, J., & Whittle, A. J. (1996). Analysis of seismic site response for soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 430-437.
- Kurt, D. (2019). Yüksek Katlı Yapılarda Yapı-Kazık-Zemin Dinamik Etkileşiminin İki Bouutlu Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Laera, A., & Brinkgreve, R. (2015). Ground response analysis in PLAXIS.
- Luo, C., Yang, X., Zhan, C., Jin, X., & Ding, Z. (2016). Nonlinear3D finiteelementanalysis of soil–pile–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 84, 145–156.
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics*, 95(4), 859-877.

- Maheshwari, B. K., Truman, K. Z., Naggar, M. H., & Gould, P. L. (2004). Three-dimensional nonlinear analysis for seismic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 343–356.
- NEHRP. (2011). *Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses*. Redwood City, California: National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) Consultants Joint Venture.
- Nguyen, Q. V., Fatahi, B., & Hokmabadi, A. S. (2017). Influence of Size and Load-Bearing Mechanism of Piles on. *International Journal of Geomechanics*.
- PEER. (2006). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Retrieved from PEER Strong Motion Database: <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- Rodriguez-Marek, A., & Bray, J. D. (1999). *Seismic site response including coupled soil-structure interaction.*, 125(7), 663-673. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Saraçoğlu, F. (2017. ,). Farklı Zeminlerde Üst Yapıya Etkiyen Deprem Yüğü Hesabı İçin Normalize Davranış Spektrumu Önerisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Schnabel, P. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. . Earthquake Engineering Research Center, University of California: Berkeley.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. University of California, Berkeley.: Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 70-10,.
- Seed, H., Ugas, C., & Lysmer, J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 66, pp. 221-243.
- Seifried, A. E., & Baker, J. W. (2014). Spectral variability and its relationship to structural response estimated from scaled and spectrum-matched ground motions. *Proceedings of the Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, Alas.
- SeismoMatch. (2022). *A computer program for spectrum matching of earthquake records*. Retrieved from <https://seismosoft.com>
- Siyahi, B., Çetin, K. Ö., & Bilge, T. H. (2015). Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 41-50.
- Sluis, J. (2012). Validation of Embedded Pile Row in PLAXIS 2D. Delft University of Technology, Delft.
- Stensløkken, A. (2016). Study of the Effect of Added Soil Mass on Earthquake Response of Subsea Structures on Closed Caisson Foundations. (Master of Science), NTNU,.
- Stewart, J. P., & Fenves, , G. (1998). *Seismic soil-structure interaction: Insight from a comparative study of recorded motions*. *Journal of Structural Engineering*.
- TBDY. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmi Gazete.

- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 117, Issue 1.
- Wang, Z., Wu, J., & Li, X. (2009). Comparison of different boundary conditions in numerical analysis of seismic site response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5), 2449-2460.
- Wolf, J. P. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. New Jersey: Printice Hall.
- Yiğit, M. A., Onur, M. İ., & Balaban, E. (2022). Investigation of soil pile interaction parameters in piled foundations. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 37:2, 625-639.
- Yu, H., Ntambakwa, E., & Mendes, B. (2020). Comparison of 1-D seismic site response analysis tools for layered liquefiable deposits at an offshore windfarm site . *E3S Web of Conferences, ICEGT 2020*, (pp. 205,12005).
- Zhang, L., Goh, S. H., & Liu, H. (2017). Seismic response of pile-raft-clay system subjected to a long-duration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 92, 488–502.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. CİVCİK ve SELÇUK (2023) “Investigating Response Spectra Obtained on the Surface by Nonlinear 1D and 2D Analyses on Single Layered Soil” 8th International Education and Innovative Sciences Congress, Ankara

