

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLI TEMELLERİN DAVRANIŞININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Sabahattin KAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DIYARBAKIR

Ocak – 2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana destek olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Salih KESKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi katkıları ile her zaman yanımda olan çok değerli babam, annem ve kardeşlerime teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VII
ŞEKİL LİSTESİ.....	VIII
KISALTMA VE SİMGELER.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Kazıklı Temeller.....	3
2.1.1. Yükleri Aktarma Biçimlerine Göre Kazıklar.....	4
2.1.2. İmal Edildikleri Malzemelere Göre Kazıklar.....	5
2.1.2.1. Ahşap Kazıklar.....	5
2.1.2.2. Betonarme Kazıklar.....	5
2.1.2.3. Çelik Kazıklar.....	7
2.1.3. İmalat Şekillerine Göre Kazıklar.....	7
2.1.3.1. Çakma Kazıklar.....	7
2.1.3.2. Yerinde Dökme (Fore) Kazıklar.....	7
2.2. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Kazıklı Temellerin Analizi.....	8
2.2.1. Kazıkların Düşey Taşıma Gücü.....	8
2.2.2. Kazıkları Yanal Taşıma Gücü.....	9
2.2.3. Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi.....	10
2.2.3.1. Ortak Sistem Yaklaşımı.....	10
2.2.3.2. Altsistem Yaklaşımı.....	10
2.2.4. Doğrusal Olmayan Serbest Zemin Modeli ve Deprem Analizi.....	14
2.3. Zemin Yayları (Yük Transfer Eğrileri).....	15
2.3.1. p-y Yayları.....	16

2.3.1.1. Kum Zeminde p-y Eğrileri.....	17
2.3.1.2. Yumuşak Kil Zeminde p-y Eğrileri.....	20
2.3.2. t-z ve q-z Yayları.....	23
2.3.2.1. Kohezyonsuz (Kum) Zeminlerde t-z ve q-z Eğrileri.....	24
2.3.2.2. Kohezyonlu (Kil) Zeminlerde t-z ve q-z Eğrileri.....	27
2.4. Zemin Davranış Analizi.....	28
2.4.1. Zeminlerin Dinamik Özellikleri ve Davranışı.....	30
2.4.1.1. Kayma Modülü ve Deformasyon Değişimi.....	31
2.4.1.2. Sönüm Oranı ve Deformasyon Değişimi.....	34
2.4.2. Tek Boyutlu Zemin Davranış Analizi.....	36
2.4.2.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Analizi.....	36
2.4.2.2. Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Modeli.....	37
2.4.2.3. Histeretik Yükleme-Boşaltma Eğrisi Formülasyonu.....	39
2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	39
2.6. Kaynak Özetleri.....	41
3. MATERYAL ve METOT.....	47
3.1. Materyal.....	47
3.1.1. Kazık Çapı Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	47
3.1.2. Kazık Uzunluğu Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	48
3.1.3. Grup Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	49
3.1.4. Deprem Datası Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	50
3.1.5. Anakaya Derinliği Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	50
3.1.6. Farklı Kil Zemin Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	52
3.1.7. Farklı Kum Zemin Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili.....	52
3.2. Metot.....	53
3.2.1. Zemin Yay Özelliklerinin Bulunması.....	53
3.2.1.1 P-y Yay Özelliklerinin Bulunması.....	54
3.2.1.2. T-z Yay Özelliklerinin Bulunması.....	57
3.2.1.3. Q-Z Yay Özelliklerinin Bulunması.....	59

3.2.2.	Zemin Yerdeşistirmelerinin Bulunması.....	61
3.2.2.1.	DEEPSOIL İle Tek Boyutlu Zemin Davranış Analizi.....	61
3.2.3.	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Kinematik Etkileşim Analizi.....	71
3.2.3.1.	SAP2000 İle Kinematik Etkileşim Analizi.....	72
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	91
4.1.	Kazık Çapı Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	91
4.2.	Kazık Uzunluğu Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	106
4.3.	Grup Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	117
4.4.	Deprem Datası Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	128
4.5.	Anakaya Derinliği Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	136
4.6.	Farklı Kil Zemin Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	144
4.7.	Farklı Kum Zemin Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları.....	153
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	161
6.	KAYNAKLAR.....	163
	ÖZGEÇMİŞ.....	167

ÖZET

KAZIKLI TEMELLERİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabahattin KAPLAN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

2019 yılı başında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğiyle temeli kazıklı olan binalarda kazıkların deprem etkisi altında analizi zorunlu hale getirilmiştir. Yönetmelikte Ortak sistem yaklaşımı ve Altsistem yaklaşımı olmak üzere iki yaklaşım benimsenmiştir. Ortak sistem yaklaşımında yapı-kazık-zemin bir bütün olarak analiz edilmektedir. Altsistem yaklaşımında ise kinematik etkileşim denilen temel-kazık-zemin sistemi için ayrı, eylemsizlik etkileşimi denilen temel-yapı sistemi ayrı olmak üzere iki aşamada analiz yapılmaktadır. Bu aşamalar için, zemin ve bina özelliklerine göre üç yöntem önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında, diğer iki yönetime göre deprem riski daha az olan koşullarda yapılması öngörülen ve daha çok Geoteknik anabilim dalı kapsamına giren Yöntem III-Kinematik Etkileşim analizleri işlenmektedir. Analizlerde, zemin yayları (yük transfer eğrileri) tespitleri *MS Excel* yazılımı ile, zemin davranış analizleri *DEEPSOIL* yazılımı ile, artımsal nonlinear statik analizler ise *SAP2000* yazılımı ile yapılmaktadır. Bu kapsamda, sabit ve belirli koşullar altında, kazık çapı değişiminin, kazık uzunluğu değişiminin, kazık grubunda grup etkisinin, farklı deprem datalarının, zemindeki anakaya derinliğinin, farklı kil ve kum zeminlerin sürtünme kazıklarından oluşan kazıklı temel davranışına etkisi, kinematik etkileşim analizleri sonucunda elde edilen kazık iç kuvvetleri ve deplasmanları üzerinden araştırılmaktadır.

Çalışma sonunda yukarıda sıralanan değişkenler üzerinden kazıklı temel davranışı, kazık normal kuvvetleri, momentleri, kesme kuvvetleri ve kazık başlığı deplasmanları belirlenerek yorumlanmaktadır. Analizler sonucunda, kinematik etkileşim analizlerinde deprem datası seçiminin çok önemli olduğu ve kazıklı temel davranışında en etkili veri olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Kazıklı Temel, Kinematik Etkileşim Analizi, Zemin Yayları, Zemin Davranış Analizi, Artımsal Nonlinear Statik Analiz, Kazık İç Kuvvetleri

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF PILED RAFT FOUNDATIONS WITH FINITE ELEMENT METHOD

MSc THESIS

Sabahattin KAPLAN

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2020

By Turkey Building Earthquake Regulation enacted at beginning of 2019, analysis of piled raft foundations under earthquake forces has been made compulsory. Two approaches adopted in the regulation, namely common system approach and subsystem approach. In the common system approach, the structure-pile-soil is analyzed as a whole. Subsystem approach, on the other hand, is analyzed in two stages: foundation-pile-soil system called kinematic interaction and foundation-structure system called inertial interaction. In the subsystem approach, three methods are proposed for these stages according to the soil and building characteristics.

In this thesis, Method III-Kinematic Interaction analysis, which is anticipated to be performed in conditions with less earthquake risk compared to the other two methods, and which is mostly within the scope of the Geotechnics department, is studied. In the analysis, soil springs (load transfer curves) are determined with *MS Excel* software, site response analyzes are performed with *DEEPSOIL* software and incremental nonlinear static analyzes performed with *SAP2000* software. In this context, under fixed and specific conditions, the effect of pile diameter variation, pile length variation, group effect in pile group, different earthquake data, bedrock depth in the soil, different clay and sand soils to the behavior of friction piled raft foundation has been investigated through pile internal forces and pile head displacement obtained as a result of kinematic interaction analysis.

At the end of the study, piled raft foundation behavior is interpreted determining pile normal forces, moments, shear forces and pile head displacements through the variables listed above. As a result of the analysis, it was concluded that the selection of earthquake data in kinematic interaction analysis is very important and it is the most effective data in piled raft foundation behavior.

Key Words : Piled Raft Foundation, Kinematic Interaction Analysis, Soil Springs, Site Response Analysis, Incremental Nonlinear Static Analysis, Pile Internal Forces

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1.	Yanal taşıma gücü yöntemi ve p-y eğrileri için kaynaklar	17
Çizelge 2.2.	Statik yükleme durumunda p-y eğrisi verileri (API, 2007)	21
Çizelge 2.3.	Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi verileri (API, 2007)	22
Çizelge 2.4.	Normal konsolide killeri için ε_{50} (ε_c) değerleri	23
Çizelge 2.5.	Kohezyonsuz zeminlerde tasarım parametreleri (API, 2002)	25
Çizelge 2.6.	Kohezyonsuz zeminlerde tasarım parametreleri (API, 2007)	26
Çizelge 2.7.	Kum zeminlerde t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri (API, 2007)	26
Çizelge 2.8.	Kil zeminlerde t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri (API, 2007)	28
Çizelge 4.1.	Model-3 yumuşak kil zeminde farklı kazık aralıkları için P-y eğrisi azaltma katsayıları	117
Çizelge 4.2.	Model-3 yumuşak kil zeminde kazık sıralarında oluşan iç kuvvetlerin maksimum değerleri	119
Çizelge 4.3.	Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık sıralarında oluşan iç kuvvetlerin maksimum değerleri	125
Çizelge 4.4.	Model-6 için kil zeminlerin özellikleri	144
Çizelge 4.5.	Model-7 için kum zeminlerin özellikleri	153

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Yüzeysel temel ve derin temel (Berilgen, 2013)	3
Şekil 2.2.	Yükleri aktarma biçimlerine göre kazıklar (Birand, 2007)	4
Şekil 2.3.	Ahşap çakma kazık uygulaması	5
Şekil 2.4.	Fore kazık imalat akışı (Yıldız, 2016)	6
Şekil 2.5.	Çelik kazık kesitleri (Bozkurt, 2011)	7
Şekil 2.6.	Ortak sistem yaklaşımı modeli (Aydınöglü, 2012)	11
Şekil 2.7.	Altsistem yaklaşımı modeli (Aydınöglü, 2012)	12
Şekil 2.8.	p-y, t-z ve Q-Z yayları	16
Şekil 2.9.	p-y yayları (Aydınöglü, 2012)	17
Şekil 2.10.	C_1 , C_2 , C_3 katsayıları grafiği (API, 2007)	18
Şekil 2.11.	Kum zeminde P-y eğrisi	19
Şekil 2.12.	k katsayıları grafiği (API, 2007)	19
Şekil 2.13.	Kısa süreli statik yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi (Matlock, 1970)	21
Şekil 2.14.	Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi	22
Şekil 2.15.	Kum zeminlerde t-z eğrisi (API, 2007)	26
Şekil 2.16.	Kum ve kil zeminlerde Q-Z eğrisi (API, 2007)	27
Şekil 2.17.	Kil zeminlerde t-z eğrisi (API, 2007)	28
Şekil 2.18.	Deprem kaynağı ve deprem dalgalarının yayılımı (Nar, 2016)	29
Şekil 2.19.	Zemin davranış analizi işleyiş adımları (Nar, 2016)	30
Şekil 2.20.	Tekrarlı yükleme altında zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı (histerisis ilmeği)	30
Şekil 2.21.	G kayma modülü ve ζ sönüm oranlarının birim şekil değiştirme (γ_c) ile ilişkisi	31
Şekil 2.22.	Maksimum ve sekant kayma modülü	32
Şekil 2.23.	Omurga eğrisi ve maksimum kayma modülü	32
Şekil 2.24.	Plastisitesi farklı ince daneli zeminlerin modül azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)	33

Şekil 2.25.	Kum zeminlerde modül azalım eğrileri (Seed ve Idriss, 1970)	34
Şekil 2.26.	Histeretik gerilme-şekil değiştirme davranışı ve sönüm oranı	34
Şekil 2.27.	Plastisite indisine sahip zeminlerde sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi (Vucetic ve Dobry, 1991)	35
Şekil 2.28.	Kum zeminlerde sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi (Seed ve Idriss, 1970)	35
Şekil 2.29.	Yatay olarak tabakalanmış zemin profilinin çoklu-serbestlik-dereceli toplu parametre modeli (Mert, 2018)	37
Şekil 2.30.	Doğrusal olmayan zemin davranış modeli (omurga eğrisi)	38
Şekil 2.31.	Bir, iki, üç boyutlu sonlu eleman örnekleri ve düğüm noktaları	40
Şekil 2.32.	Üçgen sonlu elemanlarla modelleme	40
Şekil 2.33.	Sonlu eleman modelleme örnekleri (Fahjan, 2008)	41
Şekil 2.34.	Zemin-kazık-yapı kinematik etkileşim modeli ve kazık momentleri (Bildik ve ark., 2017)	42
Şekil 2.35.	Kazık-zemin-yapı analiz modeli ve kazık tasarımı (Keskin, 2018)	43
Şekil 2.36.	Kazık-zemin-yapı analiz modeli (Naiboğlu, 2019)	44
Şekil 2.37.	Kazık-zemin-yapı sonlu farklar ve sonlu eleman analiz modeli (Erginağ ve ark., 2018)	45
Şekil 3.1.	Çap etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-1)	47
Şekil 3.2.	Uzunluk etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-2)	48
Şekil 3.3.	Grup etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-3)	49
Şekil 3.4.	Deprem datası etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-4)	50
Şekil 3.5.	Anakaya derinliği etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-5)	51
Şekil 3.6.	Kil zemin etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-6)	52
Şekil 3.7.	Kum zemin etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-7)	53
Şekil 3.8.	Yumuşak kil zeminde $X=1m$ için P-y eğrisi ($X < X_R$)	54
Şekil 3.9.	Yumuşak kil zeminde $X=6m$ için P-y eğrisi ($X > X_R$)	55
Şekil 3.10.	Kum zeminde $H=1m$ için P-y eğrisi ($p_u=p_{us}$)	56
Şekil 3.11.	Kum zeminde $H=8m$ için P-y eğrisi ($p_u=p_{ud}$)	56

Şekil 3.12.	Yumuşak kil zeminde $s=2m$ için grup etkisi altında $X=1m$ 'de P-y eğrisi ($X < X_R$)	57
Şekil 3.13.	Kum zeminde $s=4m$ için grup etkisi altında $H=1m$ 'de P-y eğrisi	57
Şekil 3.14.	Yumuşak kil zeminde $d=1m$ için T-z eğrisi ($\psi > 1$)	58
Şekil 3.15.	Yumuşak kil zeminde $d=6m$ için T-z eğrisi ($\psi < 1$)	58
Şekil 3.16.	Çok gevşek kum zeminde $d=1m$ için T-z eğrisi ($\delta=15$ ve $f_s < f_{s,max}=47.8$)	59
Şekil 3.17.	Gevşek kum zeminde $d=11m$ için T-z eğrisi ($\delta=20$ ve $f_s = f_{s,max}=67.0$)	59
Şekil 3.18.	Yumuşak kil zeminde $d=15m$ için Q-z eğrisi	60
Şekil 3.19.	Çok gevşek kum zeminde $d=15m$ için Q-z eğrisi ($q_u=q_{max}=1900$)	61
Şekil 3.20.	DEEPSOIL Analysis Step 1 Analysis Type Definition penceresi	62
Şekil 3.21.	DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Layer Properties penceresi	63
Şekil 3.22.	DEEPSOIL kil ve kum zeminler için modül azalım eğrisinin tanımlanması	64
Şekil 3.23.	DEEPSOIL modül azalım eğrileri grafiği	65
Şekil 3.24.	DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Halfspace Definition penceresi	65
Şekil 3.25.	DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Advanced Table Views penceresi	66
Şekil 3.26.	DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Soil Profile Plot penceresi	66
Şekil 3.27.	DEEPSOIL Analysis Step 3 Input Motion Selection penceresi	67
Şekil 3.28.	DEEPSOIL Analysis Step 4 Viscous/Small-Stain Damping Definition penceresi	68
Şekil 3.29.	DEEPSOIL Analysis Step 5 Analysis Control Definition penceresi	69
Şekil 3.30.	DEEPSOIL Analysis Results-Time History Plots penceresi ($z=0m$)	70
Şekil 3.31.	Zamana bağlı toplam yerdeğiştirmelerin bulunması ($z=0m$)	71
Şekil 3.32.	Toplam yerdeğiştirme zarfı	71
Şekil 3.33.	SAP2000 Define Materials penceresi	73
Şekil 3.34.	SAP2000 Material Property Data pencereleri (C30/37 ve C90/105)	73
Şekil 3.35.	SAP2000 Define Material penceresi (S420 çeliği)	74
Şekil 3.36.	SAP2000 Frame Properties penceresi	74
Şekil 3.37.	SAP2000 Circular Section penceresi (Kazık için)	75

Şekil 3.38.	<i>SAP2000 Rectangular Section</i> penceresi (Kiriş radye temel için)	75
Şekil 3.39.	<i>SAP2000 Link/Supports Properties</i> penceresi	76
Şekil 3.40.	<i>SAP2000 Link/Supports Property Data</i> penceresi	76
Şekil 3.41.	<i>SAP2000 Link/Support Directional Data</i> penceresi	77
Şekil 3.42.	<i>SAP2000 Coordinate/Grid Systems</i> penceresi	77
Şekil 3.43.	<i>SAP2000 Define Grid System Data</i> penceresi (X ve Z aks aralıkları=0.5m)	78
Şekil 3.44.	<i>SAP2000 Properties of Objects</i> pencereleri (Kazık ve Kiriş Radye Temel için)	78
Şekil 3.45.	<i>SAP2000</i> kazık–kiriş radye temel modeli çizimi	79
Şekil 3.46.	<i>SAP2000 Properties of Object</i> pencereleri (T-z 1m ve T-z 10m için)	79
Şekil 3.47.	<i>SAP2000</i> T-z nonlinear yayların çizilmesi	80
Şekil 3.48.	<i>SAP2000 Properties of Object</i> pencereleri (P-y 1m ve P-y 10m için)	80
Şekil 3.49.	<i>SAP2000</i> P-y nonlinear yayların çizilmesi	81
Şekil 3.50.	<i>SAP2000 Properties of Object</i> penceresi (Q-Z 15m için)	81
Şekil 3.51.	<i>SAP2000</i> Q-Z nonlinear yayların çizilmesi	81
Şekil 3.52.	<i>SAP2000 Assign Joint Restraints</i> penceresi	82
Şekil 3.53.	<i>SAP2000</i> Nonlinear yay uçlarının mesnetlenmesi	82
Şekil 3.54.	<i>SAP2000 Define Load Patterns</i> penceresi	83
Şekil 3.55.	<i>SAP2000 Assign Joint Forces</i> penceresi	83
Şekil 3.56.	<i>SAP2000</i> düşey yükün modele etki ettirilmesi	84
Şekil 3.57.	<i>SAP2000 Assign Joint Ground Displacements</i> penceresi	84
Şekil 3.58.	<i>SAP2000</i> yerdeğiştirme yükünün modele etki ettirilmesi	85
Şekil 3.59.	<i>SAP2000 Define Load Cases</i> penceresi	85
Şekil 3.60.	<i>SAP2000 Load Cases Data</i> penceresi (düşey yükleme durumu)	86
Şekil 3.61.	<i>SAP2000 Load Cases Data</i> penceresi (yerdeğiştirme yüklemesi durumu)	87
Şekil 3.62.	<i>SAP2000 Set Load Cases To Run</i> penceresi	87
Şekil 3.63.	<i>SAP2000 Display Deformed Shape</i> penceresi	88
Şekil 3.64.	<i>SAP2000</i> modelin deformasyona uğramış hali	88
Şekil 3.65.	<i>SAP2000 Display Frame Forces/Stresses</i> penceresi	89
Şekil 3.66.	<i>SAP2000</i> modelde oluşan iç kuvvet (moment)	90

Şekil 4.1.	Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri	91
Şekil 4.2.	Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri	94
Şekil 4.3.	Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için Q-z eğrileri	96
Şekil 4.4.	Model-1 yumuşak kil zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	97
Şekil 4.5.	Model-1 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	97
Şekil 4.6.	Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri	100
Şekil 4.7.	Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri	102
Şekil 4.8.	Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için Q-z eğrileri	103
Şekil 4.9.	Model-1 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	104
Şekil 4.10.	Model-1 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	104
Şekil 4.11.	Model-2 yumuşak kil zeminde 30m derinlik boyunca P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	107
Şekil 4.12.	Model-2 yumuşak kil zeminde farklı deprem etkileri altında yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	108
Şekil 4.13.	Model-2 yumuşak kil zeminde <i>RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g)</i> etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	109
Şekil 4.14.	Model-2 yumuşak kil zeminde <i>RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g)</i> etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	111
Şekil 4.15.	Model-2 çok gevşek kum zeminde 25 m derinlik boyunca P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	113
Şekil 4.16.	Model-2 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	114
Şekil 4.17.	Model-2 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	115
Şekil 4.18.	Model-3 yumuşak kil zeminde d=5m derinlikte farklı kazık aralıkları için P-y eğrileri	118
Şekil 4.19.	Model-3 yumuşak kil zeminde tüm kazık aralıkları ve sıraları için T-z ve Q-Z eğrileri	118
Şekil 4.20.	Model-3 yumuşak kil zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	119
Şekil 4.21.	Model-3 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	120
Şekil 4.22.	Model-3 çok gevşek kum zeminde H=5m'de farklı kazık aralıkları için P-y eğrileri	123
Şekil 4.23.	Model-3 çok gevşek kum zeminde tüm kazık aralıkları için T-z eğrileri	123
Şekil 4.24.	Model-3 çok gevşek kum zeminde tüm kazık aralıkları için Q-Z eğrisi	124

Şekil 4.25.	Model-3 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	124
Şekil 4.26.	Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	125
Şekil 4.27.	Model-4 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	128
Şekil 4.28.	Model-4 yumuşak kil zeminde farklı deprem dataları için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	130
Şekil 4.29.	Model-4 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	130
Şekil 4.30.	Model-4 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	132
Şekil 4.31.	Model-4 çok gevşek kum zeminde farklı deprem dataları için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	134
Şekil 4.32.	Model-4 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	135
Şekil 4.33.	Model-5 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	136
Şekil 4.34.	Model-5 yumuşak kil zeminde farklı anakaya derinlikleri için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	138
Şekil 4.35.	Model-5 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	138
Şekil 4.36.	Model-5 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri	140
Şekil 4.37.	Model-5 çok gevşek kum zeminde farklı anakaya derinlikleri için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	142
Şekil 4.38.	Model-5 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	142
Şekil 4.39.	Model-6 farklı kil zeminler için P-y eğrileri	145
Şekil 4.40.	Model-6 farklı kil zeminler için T-z eğrileri	147
Şekil 4.41.	Model-6 farklı kil zeminler için 15 m derinlikteki Q-Z eğrileri	149
Şekil 4.42.	Model-6 farklı kil zeminlerde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	150
Şekil 4.43.	Model-6 farklı kil zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	151
Şekil 4.44.	Model-7 farklı kum zeminler için P-y eğrileri	153
Şekil 4.45.	Model-7 farklı kum zeminler için T-z eğrileri	155
Şekil 4.46.	Model-7 farklı kum zeminler için 15 m derinlikteki Q-Z eğrileri	157
Şekil 4.47.	Model-7 farklı kum zeminlerde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi	158
Şekil 4.48.	Model-7 farklı kum zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları	159

KISALTMA VE SİMGELER

A	: Yanal yüklenme türüne bağlı katsayı
A_s	: Kazık yüzey alanı
A_u	: Kazık ucu kesit alanı
API	: American Petroleum Institute
c_u, c	: Drenajsız kayma mukavemeti (kohezyon)
C_1, C_2 ve C_3	: İçsel sürtünme açısına bağlı olarak grafikten okunan katsayılar
D	: Kazık çapı
f_s, t_{max}	: Kazık birim çevre sürtünmesi direnci
$F(\gamma_m)$	: İndirgeme faktörü
G	: Kayma modülü
G_{maks}	: Maksimum kayma modülü
G_{sek}	: Sekant kayma modülü
G_{tan}	: Tanjant kayma modülü
G_0	: Başlangıç kayma modülü
$G_{\gamma m}$	: Kayma modülü
H	: Kum zeminde zemin derinliği
J	: Kil zeminler için birimsiz ampirik katsayı
k	: İçsel sürtünme açısına bağlı olarak grafikten okunan katsayı
K	: Yatay toprak basıncı katsayısı
N_q	: Birimsiz taşıma gücü katsayısı
p	: Kazık-zemin arası yanal basıncı
p_o	: Düşey efektif zemin gerilmesi
p_u	: Kazık yanal taşıma gücü
p_{ud}	: Zeminin derin yerleri için kazık yanal taşıma gücü
p_{us}	: Zeminin sıg yerleri için kazık yanal taşıma gücü
P	: Kazığa etkiyen yanal kuvvet
P_{tv}	: Kazığa etkiye düşey tasarım kuvveti
P_{ty}	: Kazığa etkiyen yanal tasarım kuvveti
PI	: Plastisite indisi
p_1, p_2 ve p_3	: Boyutsuz parametreler

q	: Kazık uç basıncı
q_u	: Kazık birim uç direnci
Q	: Kazık ucunda oluşan kuvvet
Q_{ks}	: Kazık karakteristik çevre sürtünmesi direnci
Q_{ku}	: Kazık karakteristik uç direnci
Q_{ktv}	: Kazık karakteristik toplam taşıma gücü
Q_s	: Kazık çevre sürtünmesi direnci
Q_{tv}	: Kazığın düşey tasarım dayanımı
Q_u, Q_{max}	: Kazık uç direnci
Q_{ty}	: Kazığın yanal tasarım dayanımı
R	: Kazık eğilme momenti azaltma katsayısı
s	: Kazık sıraları ara uzaklığının kazık çapına oranı
s	: Kayma modülü azalım eğrisinin değeri
S	: Boyutsuz bir üs değeri
t	: Kazık-zemin arası sürtünme basıncı
T	: Kazık-zemin arası sürtünme kuvveti
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
$\ddot{u}_g$	: Zemin kolonunun tabanındaki ivme
V_s	: Kayma dalgası hızı
W_D	: Bir çevrimde kaybolan toplam enerji
W_s	: Maksimum birim kayma enerjisi
X	: Yumuşak kil zeminde zemin derinliği
X_R	: Kritik derinlik
y	: Kazık yanal ötelenmesi
y_{50}, y_c	: ϵ_{50} yer değiştirmesine tekabül eden kazık yer değiştirmesi
z	: Kazık lokal yer değiştirmesi
Z	: Kazık ucunda oluşan eksenel yer değiştirme
$[C]$	: Viskoz sönümlenme matrisi
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
$\{I\}$	: Birim vektör
$\{u\}$	: Nodal göreceli yer değiştirmeler vektörü

$\{\ddot{u}\}$	: Nodal göreceli ivme vektörü
$\{\dot{u}\}$	: Nodal göreceli hızların vektörü
α, ψ	: Boyutsuz katsayılar
β	: G/G_{maks} azalım eğrisinin değeri
β	: Birimsiz sürtünme direnci katsayısı
β_G	: Kazıklarda grup etkisi için ampirik azaltma katsayısı
β_{G1}	: Kazıklarda grup etkisi için kazık sırasına özgü katsayı
γ	: Efektif birim hacim ağırlık
γ_c, γ	: Kayma birim deformasyonu
γ_m	: Maksimum kayma birim deformasyonu
γ_r	: Referans kayma birim deformasyonu
γ_R	: Dayanım katsayısı
γ_{rev}	: Ters kayma birim deformasyonu
γ_{Rs}	: Kazık çevre sürtünmesi direnci dayanım katsayısı
γ_{Rt}	: Kazık toplam taşıma gücü (basınç) dayanım katsayısı
γ_{Ru}	: Kazık uç direnci dayanım katsayısı
δ	: Kazık-zemin arası sürtünme açısı
$\epsilon_{50}, \epsilon_c$	: Maksimum deviator gerilmeye tekabül eden deformasyonun yarısı
θ_τ	: Eğri ayarlama parametresi
ξ	: Sönüm oranı
ξ_{hys}	: Histeretik sönüm
ρ	: Zemin yoğunluğu
Φ	: İçsel sürtünme açısı
τ	: Kayma gerilmesi
τ_f	: Kayma dayanımı
τ_{max}	: Göçme anındaki kayma mukavemeti
τ_{rev}	: Ters kayma gerilmesi

1. GİRİŞ

Yapı sistemlerinde, üstyapıdan gelen yükü zemine aktaran elemanlara temel denmektedir. Temeller, yapı-zemin etkileşimi, temelin zemin içinde bulunduğu yer ve taşıma gücü açısından yüzeysel ve derin temeller olarak ikiye ayrılabilir. Yapının oturduğu zeminin, yapının taşıdığı yükleri karşılayabilecek kadar taşıma gücü varsa ve oturma miktarı limitler dahilinde ise tekil temel, sürekli temel, radye temel gibi yüzeysel temeller inşa edilebilir. Yapının oturduğu zeminin, yapının taşıdığı yükleri karşılayabilecek kadar taşıma gücü yoksa, oturma miktarı limitleri aşıyorsa ve zemin güçlendirilmesi yapılamıyor veya maliyetli ise kazıklı temel, keson temel gibi derin temeller yapılabilir. Bir derin temel sistemi olan kazıklı temeller, üstyapıdan gelen yükleri, uygun zemin derinliği boyunca sıralanan zemin katmanlarına taşıtmak amacıyla kullanılır.

Kazıklı temeller tasarlanırken, taşıma gücünün yeterli olduğu ve oturmaların belli bir sınırı geçmediği hesap ve analizlerle gösterilmelidir. Hesap ve analizler yapılırken belirli yöntemlerin izlenmesi gerekmektedir. Ülkemizde 2019 yılı başında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, kazıklı temellerin tasarımının iki yaklaşımdan birine göre yapılmasını öngörmektedir. Birinci yaklaşım Ortak Sistem yaklaşımı, ikinci yaklaşım Altsistem yaklaşımıdır. Altsistem yaklaşımı, belli zemin ve yapı koşullarına göre üç yöntemden birine göre yapılmaktadır. Yöntemlerin her biri iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama olan kinematik etkileşim analizi, temel-kazık-zemin arasındaki etkileşimi konu almakla beraber, çoğunlukla deprem kuvveti altında kazık davranışı üzerine odaklanmaktadır. İkinci aşama olan eylemsizlik etkileşim analizi ise temel-yapı etkileşimini konu almaktadır. Bu iki aşamadan çıkan analiz sonuçları birleştirilerek kazık tasarımı yapılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde önerilen Yöntem III'ün kinematik etkileşim hesabı hükümleri izlenerek belirli koşullar altında kazıklı temel davranışı analiz edilmiştir. Kazıklı temellerin kinematik etkileşim analizi genel olarak üç aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, zeminlerin sürtünme dayanımı, uç dayanımı ve yanallı tepki dayanımı literatürde bulunan yöntemler kullanılarak doğrusal olmayan yay olarak modellenmiştir. İkinci aşamada, belirlenen zemin profiline deprem kuvveti uygulanarak zemin davranış analizleri yapılmış ve zemin toplam yer

değiştirmeleri elde edilmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise birinci ve ikinci aşamada elde edilen veriler kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle kazık-temel-zemin modelinin artımsal nonlinear statik analizi yapılmıştır.

Tez kapsamında, kazıklı temel davranışında, kazık çapının etkisi, kazık uzunluğunun etkisi, grup etkisi, deprem verilerinin etkisi, anakaya derinliğinin etkisi, farklı kil zeminlerin etkisi ve farklı kum zeminlerin etkisi, belirli veriler ve zemin profilleri kullanarak analiz edilmiştir. Bu analizler yapılırken, hangi veri değişikliğinin kazıklı temel üzerindeki etkisi belirlenmek isteniyorsa sadece o veri değiştirilmiştir. Bu veri dışındaki verilerin sabit tutulmasına dikkat edilmiştir. Örneğin kazık çapının kazık davranışı üzerindeki etkisi belirlenirken beş farklı kazık çapı kullanarak analizler yapılmıştır. Kazık çapı dışındaki diğer tüm veriler sabit tutulmuştur. Analizlerde *SAP2000* ve *DEEPSOIL* yazılımları kullanılmıştır. Analiz sonucunda kazıklarda oluşan iç kuvvetler ve deplasmanlar grafik halinde sunulmuş olup kazık davranışı yorumlanmaya çalışılmıştır.

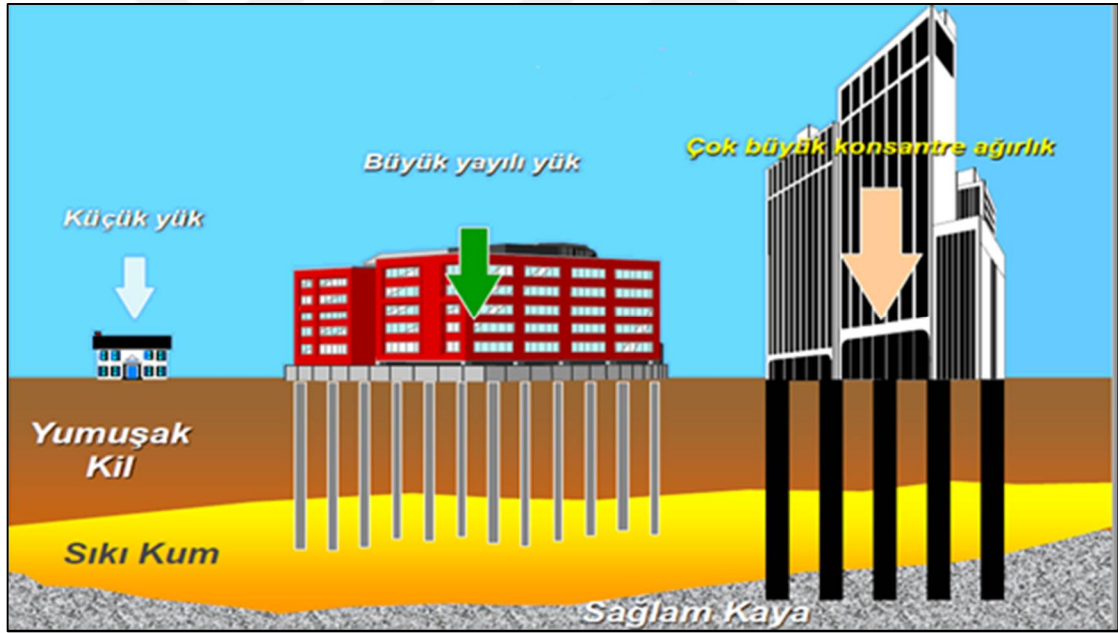
Bu tezin hazırlanmasının amacı, ülkemizde yeni yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğiyle zorunlu hale gelen, şimdiye kadar çok özel projeler dışında uygulaması pek görülmeyen ve kaynakları oldukça sınırlı olan kazıklı temellerin deprem etkisi altında analizi ile ilgili farkındalık oluşturmak ve uygulamacılara ilk adım mahiyetinde yol göstermektir. Ayrıca, kazıklı temel ve sonlu eleman yöntemi bir araya getirilerek, bilgisayarla tasarımın ve problem çözmenin temellerini oluşturan sonlu elemanlar yönteminin daha anlaşılır bir şekilde işlenmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle analizler yapılırken hangi yöntem ve yazılımların nasıl kullanıldığı adım adım ve açıklamalı şekilde anlatılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, kazıklı temellerin analizi yapılırken kullanılan yöntemler ile ilgili teorik bilgilere ve tez konusuna benzer konularda yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. Kazıklı Temeller

Temeller, üst yapı yüklerini temel zeminine aktaran yüzeysel ve derin olmak üzere iki türde inşa edilebilen yapı elemanlarıdır. Yapının oturduğu zemin, yapı yüklerini, göçmeden ve oturma limitlerini aşmadan taşıyabilecek bir yüzeysel temel yapımına uygun değilse derin temel yapılır (Şekil 2.1). Derin temellerin derinliğinin, plan görünümündeki genişliğinin 2.5 katından daha fazla olması gerekmektedir. Kazıklı temeller, yapı yüklerini zeminin derindeki sağlam tabakalarına taşıtmak amacı ile kullanılan, kazıklı radye temel veya sadece kazıklardan oluşabilen bir derin temel sistemidir.



Şekil 2.1. Yüzeysel temel ve derin temel (Berilgen, 2013)

Kazıklı temellerin tasarımı, yapılacakları zemine, üstyapı ve altyapıya gelecek yüklere bağlıdır. Kazıkların sayıları, boyutları, malzeme cinsleri ve yapım türleri zemin tabakalarının teknik parametrelerine ve buna bağlı olarak belirlenen zemine yük aktarma biçimlerine bağlıdır.

Kazıklar şu alanlarda kullanılmaktadır:

- Sağlam zeminin derinlerde olması durumunda.

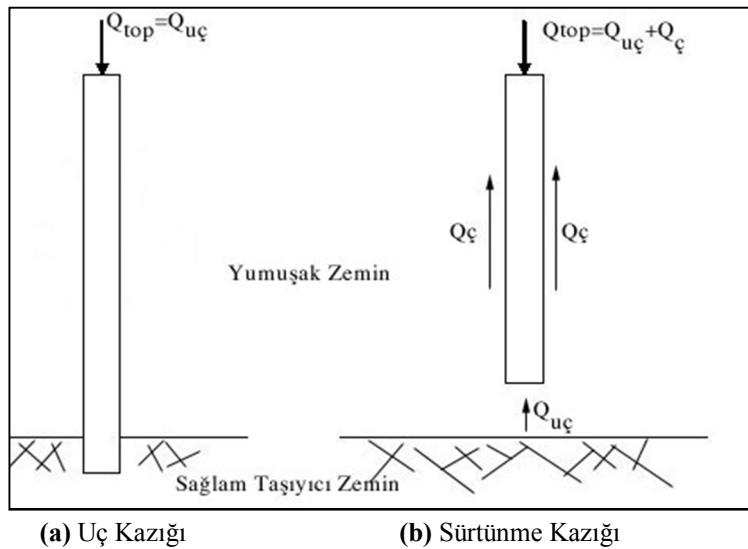
- Temel altındaki zeminin zayıf olması durumunda.
- Yapının farklı oturma yapma ihtimali olması durumunda.
- Şevlerin güçlendirilmesinde.
- Yatay zemin itkilerinin karşılanması.
- Granüler zeminlerin sıkılaştırılmasında.
- Su içinde yapılan köprü, liman gibi yapıların ayaklarında.

Kazıklar, aşağıda verildiği gibi sınıflandırılırlar.

- Yükleri aktarma biçimlerine göre: sürtünme ve uç kazığı.
- İmal edildikleri malzemeye göre: ahşap, betonarme ve çelik kazık.
- İmalat şekillerine göre: çakma kazık ve yerinde dökülen kazık (fore kazık).

2.1.1. Yükleri Aktarma Biçimlerine Göre Kazıklar

Derin temelleri, yüzeysel temellerden ayıran en önemli özellik, derin temellerin taşıma gücü hesabında kazığın yan yüzeyindeki sürtünmenin hesaba katılmasıdır. Kazığın taşıdığı yük, tabandaki uç direnci ile yan yüzeylerinde zemin ile kazık arasındaki sürtünme arasında paylaşılır. Yükü zayıf tabaka altındaki sağlam bir tabakaya kazık uç direnci yolu ile aktaran kazıklara uç kazıkları denir (Şekil 2.2a). Uç kazıklarında çevre sürtünmesi ihmal edilebilir. Yükün önemli bir kısmı veya tamamı kazığın etrafındaki çevre sürtünmesi ile taşınması durumunda bu tür kazıklara sürtünme kazığı denir (Şekil 2.2b). Sürtünme kazığına, uçları sağlam bir zemin tabakasına dayanmadan zemin içinde bulundukları için yüzen kazık da denir.



Şekil 2.2. Yükleri aktarma biçimlerine göre kazıklar (Birand, 2007)

Pratikte kullanılan kazıkların boyları genellikle çaplarının 15 ila 40 katı veya daha fazla olur. Zemin etütleri sonucunda, bu boylara karşı gelen derinliklerde sağlam zemin bulunursa uç kazıkları tercih edilir. Eksenel yük taşıyan uç kazıklarının, sağlam zemin içine genelde çaplarının 1.5 katı bir uzunlukta sokularak soketlenmesi adet olmuştur (Birand, 2007).

2.1.2. İmal Edildikleri Malzemelere Göre Kazıklar

2.1.2.1. Ahşap Kazıklar

Ahşap kazıklar, hafif olmaları, boylarının istendiği gibi ayarlanabilmesi, taşıma kolaylığı ve su altındaki uzun ömürleri gibi pozitif avantajlarından dolayı yüz yıllarca çeşitli yapılarda kullanılmıştır. Bu kazıklar, nitelikli bazı ağaçların gövdesi ve kollarının üzerindeki kabuklar sıyrılarak hazırlanan kerestelerden oluşturulurlar. Kerestelerin düzgün, sert ve darbelere dayanıklı olmaları gereklidir.

Ahşap kazıklar çakılarak uygulanır (Şekil 2.3). Yüzeylerinde meydana gelen yüksek sürtünme değerleri üst yapı yükünü zemine aktarır ve çakılma sırasında zeminde yer değiştirmeler yaparak daha sıkı bir zemin tabakası oluşturur. Özellikle kumlu, yumuşak veya katı kil zeminlerde tercih edilirler.



Şekil 2.3. Ahşap çakma kazık uygulaması

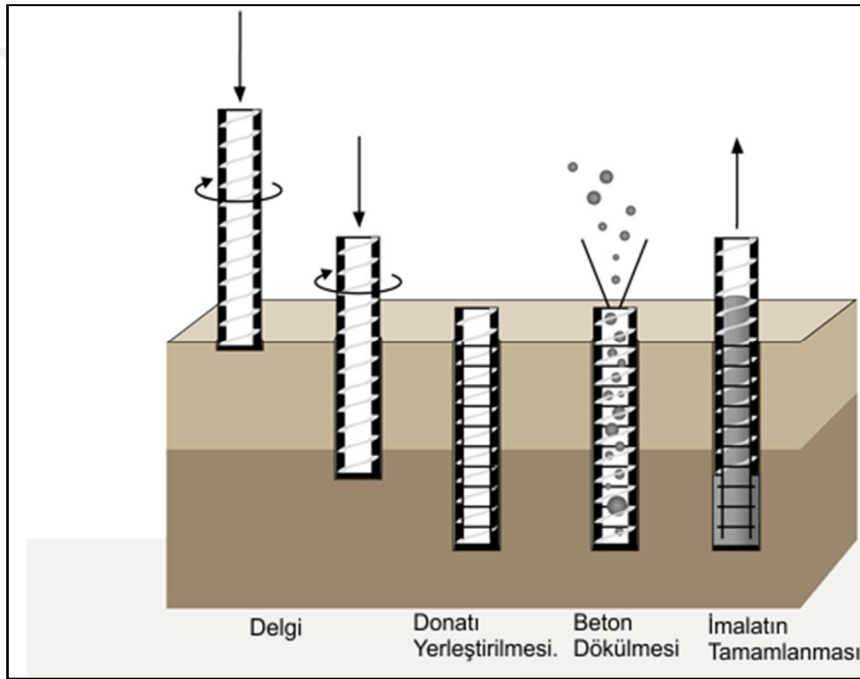
2.1.2.2. Betonarme Kazıklar

Uygulamada en çok kullanılan kazık tiplerinden olan betonarme kazıklar, yerinde dökme ve prekast kazıklar olarak ikiye ayrılabilir. Betonarme kazıklar, istenilen

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

boylarda ve donatılarda imal edilebilmeleri ve yer altı sularının etkilerine karşı dayanıklı olmaları nedeniyle diğer kazıklara göre daha çok tercih edilirler.

Yerinde dökülen betonarme kazıklar, yerinde dökme betonarme çakma kazıklar ve fore kazıklar olarak ikiye ayrılırlar. Betonarme çakma kazıklar, zemine boş bir boru çakılarak oluşturulan deliğin içine donatı konarak betonla doldurulması yolu ile imal edilen kazıklardır. Fore kazıklar ise, zeminde delme teknikleri kullanılarak kazık çapı ve boyuna göre uygun olarak açılan deliğe gerekli donatı yerleştirilip beton dökümü yapılarak oluşturulurlar (Şekil 2.4). Betonarme kazıklar, zemini sıkıştırarak zemin iyileştirme işlemini gerçekleştirmektedirler.



Şekil 2.4. Fore kazık imalat akışı (Yıldız, 2016)

Prekast betonarme kazıklar, kare, daire veya sekizgen kesitli olarak hazırlanıp gerekli kazık boyu, çapı ve dayanım özellikleri sağlayacak şekilde prefabrik olarak imal edilirler. Kazıklara, yerden kaldırılması, taşınması ve yere konulması gibi zorunlu fiziksel hareketler sırasında oluşan eğilme momentlerine de karşı öngerme uygulanabilir. Bu kazıkların uç kısmı çelik çarık, kazık başı da çelik yastıklarla korunarak çakma işlemi uygulanmaktadır. Genellikle sağlam tabakaların çok derinlerde olmadığı zeminlerde, özellikle kumlu zeminlerde tercih edilirler.

2.1.2.3. Çelik Kazıklar

Çelik kazıklar, yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uç kazıkları olarak kullanılırlar. H profili, I profili ve boru en kesitli çelik kazıklar uygulamada sıklıkla tercih edilir (Şekil 2.5). Boru en kesitli çelik kazıkların ucu kapalı veya açık olabilir ve genellikle içleri beton ile doldurulur. Ortalama boyları 12m~30m arasındadır. Çelik kazıkların boyları perçin, bulon veya kaynak yapılarak uzatılabilir. Açık deniz yapılarında uzun kazıklar elde edebilmek için bu işlem yapılmaktadır. Oksijen ve zararlı maddeler içeren yer altı suyu içinde inşa edilen çelik kazıklar korozyona, çürümeye uğrayabilir. Kazıkları dış etkilere karşı korumak için dış yüzeyleri bitümlü maddelerle kaplanabilir veya kazıklar beton gömlek içine alınabilir.



Şekil 2.5. Çelik kazık kesitleri (Bozkurt, 2011)

2.1.3. İmalat Şekillerine Göre Kazıklar

2.1.3.1. Çakma Kazıklar

Çakma kazıklar, kullanılan kazık malzemesine uygun sistemde serbest düşen mekanik çekiçlerin darbeleri ile veya titreşimler ile zemine çakılan kazıklardır. Çakma sırasında kazığın ucuna ve üst kısmına koruyucu bir başlık yapılmaktadır. Çakma işlemi, daha çok sürtünme kazıklarında kullanılan bir yöntemdir. Zeminde yer değiştirme hareketleri yaptırarak zeminin sıkışmasını sağlarlar. Bu işlem, gevşek zeminlerde mukavemeti arttırırken, kohezyonlu zeminlerde geçici bir kayma mukavemeti düşüşü yaratabilir. Çakma sırasında oluşan gürültü ve titreşim nedeniyle çakma kazıkların şehir içinde kullanımı genellikle tercih edilmez.

2.1.3.2. Yerinde Dökme (Fore) Kazıklar

Zeminde çeşitli tekniklerle açılan çukurların içine yerleştirilen donatı üzerine beton dökülerek inşa edilen kazıklardır. Fore kazıkların sürtünme özellikleri düşük olup uç kazığı olarak kabul edilebilirler. Bu tip kazıklar, yerleştirildikleri zemine göre kılıflı

veya kılıfsız imal edilebilirler. Eğer zemin gevşek veya yumuşaksa bir kılıf kullanılarak çukurun zeminle dolması engellenir. Zemin daha sağlam ve kendisini tutabiliyorsa kılıf kullanılmadan fore kazıklar yapılabilir. Fore kazıklar, ekonomik olması ve uygulama kolaylığı açısından çakma kazıklara göre daha sık tercih edilmektedirler. Çakmanın zor olduğu sert kil ve kaba taneler içeren zeminlerde, çakmadan dolayı oluşacak gürültü ve titreşimin sorun yaratacağı bölgelerde yapımları uygundur. Yer altı suyunun altında kalan yumuşak zeminlerde ve sağlam zemin tabakasının çok derinde olduğu zeminlerde fore kazık uygulamaları yapılmamalıdır.

2.2. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Kazıklı Temellerin Analizi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 18 Mart 2018 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanmış olup 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yapıların deprem yükleri altında tasarımıyla ilgili hükümler içeren yönetmelikle, kazıklı temellerin deprem etkisi altında analizi ve tasarımı zorunlu kılınmıştır. Yönetmelikte, ayrıca, statik yüklü kazıklı temellerle ilgili bazı hükümler yer almaktadır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, deprem etkisi altında binaların değerlendirilmesi ve tasarımı için bazı genel esaslar tanımlanmıştır. Deprem Yer Hareketi Düzeyi, Deprem Tasarım Sınıfı, Bina Kullanım Sınıfı, Bina Yükseklik Sınıfı ve Yerel Zemin Sınıfı gibi esaslar bina ve kazıklı temel analizleri için temel oluşturmaktadır ve bu esasların belirlenmesi gerekmektedir.

2.2.1. Kazıkların Düşey Taşıma Gücü

Kazık grubunun taşıma gücünü belirlenirken, tekil kazığın taşıma gücünün bilinmesi gerekmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde, taşıma gücü hesapları yapılırken üç yaklaşımdan birinin kullanılabileceği belirtilmektedir.

- Statik yükleme deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak.
- Zemin araştırmalarından elde edilen zemin özellikleri kullanılarak.
- Statik yükleme deneyleri ile geçerliliği sağlanmış dinamik yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, statik ve deprem etkisini içeren yükleme durumlarının her birinde (2.1)'deki eşitsizliğin sağlanması istenmektedir:

$$P_{tv} \leq Q_{tv} \quad (2.1)$$

(2.1) denklemindeki P_{tv} tekil kazığa etkiyen düşey tasarım kuvvetidir. Q_{tv} ise tekil kazığın düşey tasarım dayanımını göstermektedir ve (2.2) veya (2.3) ile tanımlanır.

$$Q_{tv} = Q_s + Q_u = \frac{Q_{ks}}{\gamma_{Rs}} + \frac{Q_{ku}}{\gamma_{Ru}} = \frac{Q_{ktv}}{\gamma_{Rt}} \quad (2.2)$$

$$Q_{ktv} = Q_{ks} + Q_{ku} = f_s A_s + q_u A_u \quad (2.3)$$

(2.2) ve (2.3) denklemlerindeki Q_{ks} ve Q_{ku} kazığın karakteristik çevre sürtünmesi direncini ve karakteristik uç direncini, Q_{ktv} ise karakteristik toplam kazık taşıma gücünü göstermektedir. Karakteristik çevre sürtünmesi ve karakteristik uç direnci hesaplarında, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde birim çevre direnci f_s ve birim uç dirençleri q_u için literatüre dayanan ve genel kabul görmüş bağıntılar kullanılır. Taşıma gücü hesabında kazık imalat yönteminin etkisi dikkate alınır. Tekil kazığın çevre sürtünmesi direnci Q_s ve uç direnci Q_u , yönetmelikte verilen dayanım katsayılarına (γ_R) bölünmesi ile bulunur.

Kazıklar, genellikle, birden fazla kazıktan oluşan gruplar halinde tasarlanırlar. Tek bir kazığın davranışı, kazık grubunun davranışından farklıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde, grup davranışı gösteren kazıklı temellerde taşıma gücü olarak, grup içinde bulunan her bir kazığın toplam taşıma gücü ile kazıklar arasında kalan zeminden oluşan bloğun taşıma gücü değerlerinden küçük olanının seçilmesi gerektiğini belirtilmektedir.

2.2.2. Kazıkların Yanal Taşıma Gücü

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, statik ve deprem etkisini içeren yükleme durumlarının her birinde (2.4)'teki eşitsizliğin sağlanması gerektiği belirtilmiştir.

$$P_{ty} \leq Q_{ty} \quad (2.4)$$

(2.4) denkleminde, P_{ty} kazığa etkiyen yanal tasarım kuvvetidir. Q_{ty} ise kazığın yanal tasarım dayanımını göstermektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme davranışı gösteren yanal yüklü kazıkların tasarımında sınır yer değiştirmelerin ve kazık kesitinin taşıma gücünün aşılmadığı hesapla gösterilmelidir.

2.2.3. Yapı–Kazık–Zemin Etkileşimi

Zayıf zeminlerde inşa edilen kazıklı temele sahip binalarda oluşan yapı–kazık–zemin etkileşimi, kazıkların deprem davranışını etkiler. Anakayadan gelen deprem dalgalarının etkisi ile kazıklar önemli şekil değiştirmelere ve zorlanmalara maruz kalırlar. Kazıklar, bina temelinde oluşan etkin temel hareketini de gerek genlik, gerekse frekans içeriği bakımından önemli ölçüde değişikliğe uğratabilirler. Üstyapının eylemsizlik özelliğinin göz önüne alınmadığı temel–kazık–zemin sistemindeki bu oluşuma kinematik etkileşim adı verilir. Kazıklar ayrıca eylemsizlik etkileşimi kapsamında titreşen üstyapıdan kazık-zemin ortamına geri dönen deprem dalgalarından ötürü ek zorlanmalara maruz kalırlar. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde, bu tasarımın yapılması için, “ortak sistem yaklaşımı” ve “altsistem yaklaşımı” olmak üzere iki yaklaşım belirlenmiştir.

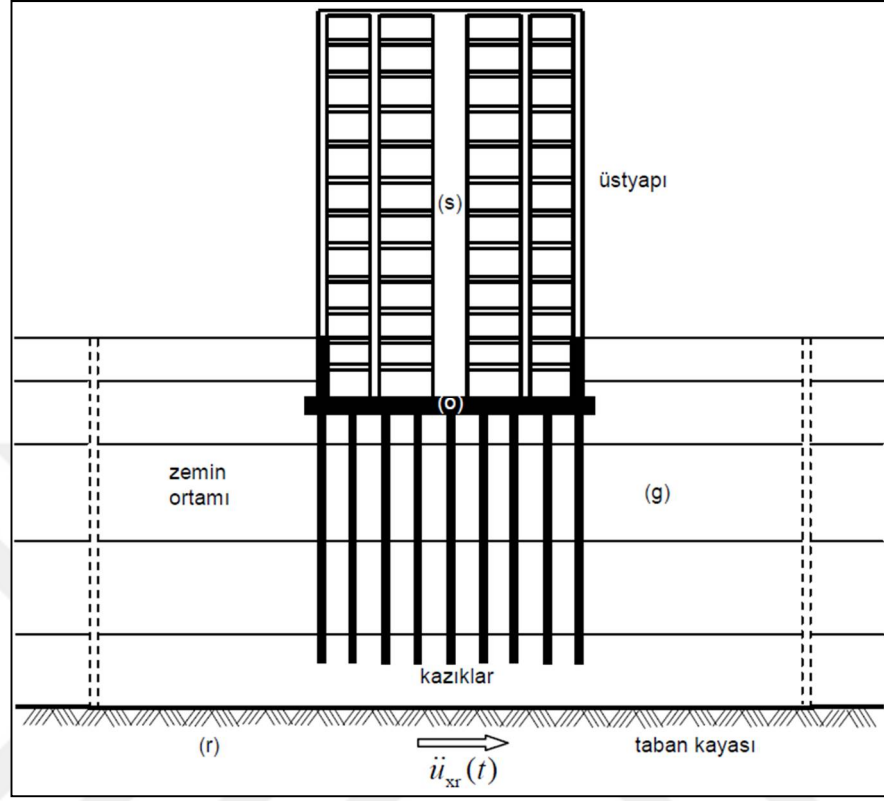
2.2.3.1. Ortak Sistem Yaklaşımı

Üstyapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu eleman modeli ile idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği bu yöntemde direkt (doğrudan) yöntem de denmektedir. Bu yöntemde, zemin ve üstyapıdaki tüm geometrik ve mekanik özellikler ile nonlineer davranış uygun bir biçimde göz önüne alınabilir. Zemin ortamının sonsuzluğunu ifade edebilmek için bu ortamın dış sınırlarına “geçirgen sınırlar” adı verilen yapay sınır koşulları uygulanır. Böylece temelden yansıyarak ve üstyapıdan geri dönerek zemin ortamı içinde dışa doğru yayılan deprem dalgalarının, sonlu eleman modelinin sınırlarından tekrar yansıyarak zemin ortamına geri dönmesi önlenmiş olur (Aydınoğlu, 2012) (Şekil 2.6).

2.2.3.2. Altsistem Yaklaşımı

Bu yaklaşımda, üstyapı–temel altsistemi ile temel–kazık–zemin altsisteminin ayrı ayrı modellenip birbirleri ile etkileşimi dikkate alınarak analiz yapılır. Altsistem Yaklaşımında, üstyapı altsistemi ile kazık–zemin altsisteminin arakesitindeki bina temeli ve eğer varsa bodrum katların dış perdeleri (bodrum kutusu) üç boyutlu sonsuz rijit bir eleman olarak modellenir. Altsistem Yöntemi çerçevesinde zemin–kazık altsisteminde, eğer varsa zemin iyileştirmesi (taş kolon, jet grout, vb) de göz önüne alınarak, tabakalı zeminin nonlineer dinamik özellikleri, temel geometrisi ve sınır koşulları ve eğer varsa kazıkların da nonlineer dinamik özellikleri dikkate alınır.

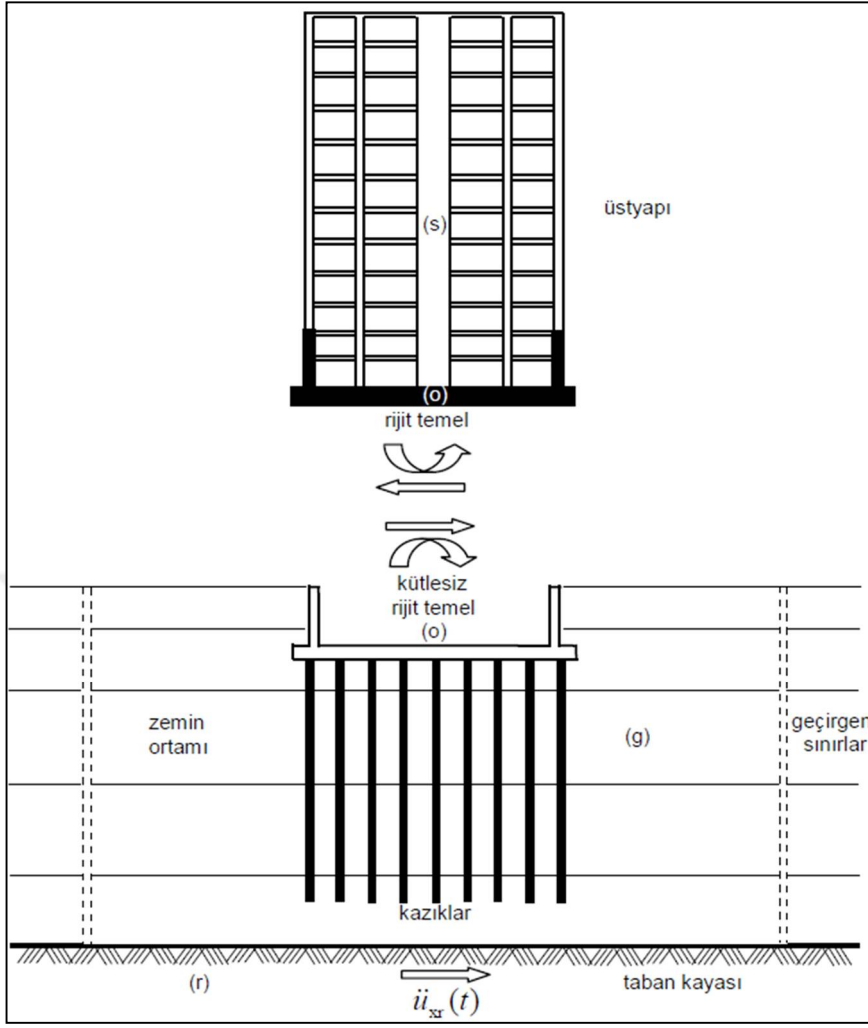
Temelin kütlesi göz önüne alınmaz ve modelin dış sınırları olarak geçirgen sınırlar kullanılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6. Ortak sistem yaklaşımı modeli (Aydinoğlu, 2012)

Altsistem yaklaşımında yapı–kazık–zemin etkileşimi iki aşamada ele alınır. Kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi olarak adlandırılan bu aşamaların ve bu aşamalar için kullanılabilecek hesap yöntemleri ile tasarım kurallarının ayrıntıları yönetmeliğin EK 16C kısmında verilmiştir. Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III olarak adlandırılan bu yöntemlerin uygulama alanları Yerel Zemin Sınıfına, Deprem Tasarım Sınıfına ve Bina Yükseklik Sınıfına bağlı olarak tanımlanmıştır.

Bu tez kapsamında, TBDY (2018)’de geçen Yöntem III’ün daha çok geoteknik mühendisliği alanına giren ve kazığın deprem etkisi altındaki davranışına odaklanan Kinematik Etkileşim Hesabı ele alınacak ve kazık davranış analizleri buna göre yapılacaktır.



Şekil 2.7. Altsistem yaklaşımı modeli (Aydinoğlu, 2012)

➤ Yöntem III – Kinematik Etkileşim Hesabı

Yöntem III'te, temel-kazık-zemin kinematik etkileşim hesabı modeli aşağıdaki şekilde oluşturulur.

1. Kazıklar, göz önüne alınan deprem doğrultusunda doğrusal davranış esas alınarak çubuk elemanlar olarak modellenir. Her bir kazık düğüm noktasında kazık ile zemin ortamı arasındaki göreceli kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, doğrusal olmayan p-y, t-z yayları ile, kazık ucunda ise Q-Z yayı ile modellenir. p-y yayları, her bir düğüm noktasında ve her iki doğrultuda birer çift sadece-basınç yayı olarak tanımlanır. Deprem hesabından önce t-z ve Q-Z yayları kullanılarak düşey yüklerden kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler hesaplanır. Kazıklarda grup etkisinin yaklaşık olarak göz önüne alınması için (2.5)'te verilen ampirik bağıntı ile hesaplanan azaltma katsayıları β_G , p-y

yayları için tanımlanan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin kuvvet (p) eksenine uygulanır.

$$\beta_G = 0.2[(1-\beta_{GI})s - (1-6\beta_{GI})] \quad (2.5)$$

Burada s , göz önüne alınan doğrultuda kazık sıraları ara uzaklığının kazık çapına oranını ($s \leq 6$), β_{GI} ise her bir kazık sırası için farklı olarak uygulanacak bir katsayıyı göstermektedir. Sadece-basınç yaylarına uygulanmak üzere yanal basınca maruz en öndeki kazık sırası için $\beta_{GI} = 0.7$, onun arkasındaki ikinci kazık sırası için $\beta_{GI} = 0.45$, üçüncü kazık sırası için $\beta_{GI} = 0.3$, dördüncü ve daha arkadaki kazık sıraları için ise $\beta_{GI} = 0.2$ alınacaktır. Ters yöndeki yer değiştirmeler için bu katsayılar aynı kazıklara ters sıra ile uygulanacaktır. $s > 6$ için $\beta_G = 1$ alınacaktır.

2. Bina temeli, bodrum katlarını da içermek üzere, kütlesiz, sonsuz rijit bir eleman olarak modellenir. Bodrum perdeleri ile zemin arasındaki yatay kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisini temsil etmek üzere, perde sonlu eleman düğüm noktalarında perdeye dik doğrultuda literatürden seçilmiş p-y benzeri doğrusal olmayan yaylar kullanılır.
3. Tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinde göz önüne alınan deprem doğrultusunda taban kayasından yatay doğrultuda etkililen depremlerden (on bir adet deprem kaydı) her biri için, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarında elde edilen toplam yer değiştirmelerin zamana göre maksimumlarının zarfı alınır. Toplam yerdeğiştirme zarfı, bir uçlarından kazık düğüm noktalarına bağlı olan doğrusal olmayan p-y yaylarının öteki uçlarına basınç yönünde sıfırdan başlayarak statik olarak artımsal şekilde uygulanır (statik artımsal yerdeğiştirme yüklemesi). Aynı yerdeğiştirme zarfı, bodrumlu binalarda bir uçları perde sonlu eleman düğüm noktalarına bağlı p-y benzeri yayların öteki uçlarına da basınç yönünde uygulanır ve böylece kinematik etkileşim modelinin yaklaşık artımsal statik hesabı yapılmış olur.
4. Yöntem III'te temel-kazık-zemin kinematik etkileşim analizi sonucunda, kazıklardaki iç kuvvet talepleri, her bir deprem doğrultusunda onbir deprem kaydı için ayrı ayrı yapılan analizlerin her birinden elde edilen sonuçların en

büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanır. Bu şekilde elde edilen kazık eğilme momentleri $R = 2.5$ katsayısına bölünerek azaltılır. Kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler için azaltma yapılmaz.

Yöntem III kinematik etkileşim hesabı hükümlerinden anlaşılacağı gibi kazıklı temel davranış analizi üç ana aşamada yapılmaktadır.

1. Kazık yatay ve düşey taşıma gücü hesaplarının yapılp zemini nonlinear yaylar olarak modelleyen yöntemler kullanılarak yayların özelliklerinin (p-y, t-z, Q-Z yük transfer eğrileri) belirlenmesi.
2. Seçilen deprem etkileri altında tek boyutlu serbest davranış analizinin yapılp toplam zemin yer değiştirmelerinin belirlenmesi.
3. Kazıkların çubuk model, temelin sonsuz rijit bir eleman, zeminin ise yaylar olarak modellenip birinci ve ikinci aşamada belirlenen veriler kullanılarak sonlu eleman yöntemiyle analiz yapılması ve kazık iç kuvvetlerinin ve yer değiştirmelerinin belirlenmesi.

2.2.4. Doğrusal Olmayan Serbest Zemin Modeli ve Deprem Analizi

TBDY (2018)'e göre kinematik etkileşim analizi yapılırken, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarındaki p-y yaylarına uygulanmak üzere, tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinin yapılarak aynı düğüm noktası hizalarındaki toplam yer değiştirmelerin bulunması gerekmektedir. Bunun için yönetmelikte “16.5.2. Doğrusal Olmayan Serbest Zemin Modeli ve Deprem Analizi” bölümünde geçen hükümler şöyledir:

- Sahaya özel zemin davranış modelinin oluşturulması amacı ile, yatay zemin tabakalarında kayma birim şekil değiştirmesine bağlı olarak kayma modüllerinin ve eşdeğer histeretik sönüm katsayılarının doğrusal olmayan değişimlerinin tanımlanması gereklidir. Bu parametreler, arazi ve laboratuvar deneylerine ve benzer zemin koşulları için literatürde yer alan ve genel kabul gören bilgilere göre tanımlanır.
- Zemin davranış analizleri, yatay tabakalı serbest zemin modeli çerçevesinde, taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketi altında, doğrusal olmayan dinamik zemin parametreleri esas alınarak aşağıdaki analiz yöntemlerinden biri ile yapılacaktır:

(a) Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz,

(b) Kayma birim şekil değiştirmesinin %1'i aşmaması koşulu ile, frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal hesap modeli kullanılarak ardışık yaklaşımla doğrusal olmayan analiz.

➤ Serbest zemin modeli aşağıdaki şekilde oluşturulacaktır:

(a) Yerel zemin sınıfı ZA veya ZB olarak tanımlanan zemin tabakası, depremin zemin profiline etki ettirileceği mühendislik taban kayası (anakaya) olarak alınacaktır. Bu şekilde tanımlanan mühendislik taban kayasının bina temelinden itibaren derinliği, en büyük bina genişliğinin üç katından ve kazıklı sistemlerde en uzun kazık boyundan daha az olmayacaktır. Bu durumda, tasarım deprem yer hareketini tanımlayan spektral büyüklükler, ZA veya ZB yerel sınıfı için verilen yerel zemin etki katsayıları göz önüne alınarak küçültülecektir.

(b) Ancak, taban kayasının yukarıda verilen alt sınıra oranla çok daha derinlerde olması durumunda tabakalı zemin modeli, yerel zemin sınıfı ZC veya ZD olan zemin tabakası ile sonlandırılabilir. Bu durumda deprem etkisi, taban kayası yerine bu tabakanın üstünde tanımlanacak ve tasarım deprem yer hareketini tanımlayan spektral büyüklükler ZC veya ZD yerel sınıfı için verilen yerel zemin etki katsayıları göz önüne alınarak büyütülecektir. Bu tabaka ve altındaki zemin ortamı, tek boyutlu zemin profili modelinde uygun geçirgen sınır koşulu kullanılarak idealleştirilecektir.

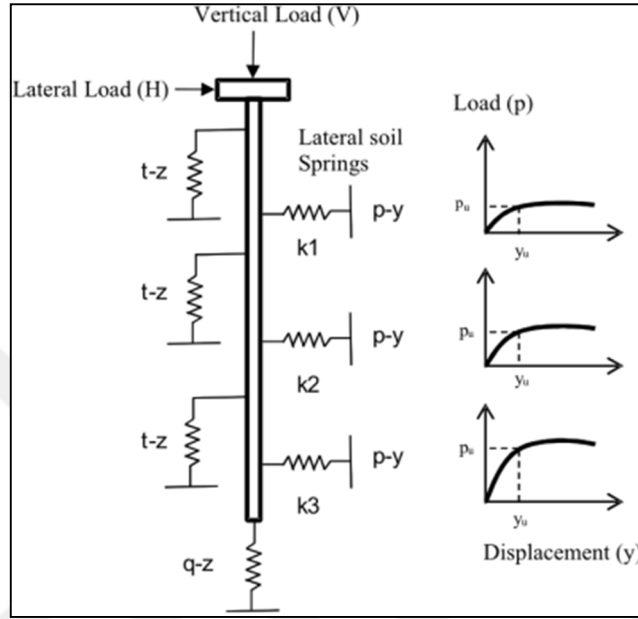
(c) Analizin hassasiyeti bakımından zemin tabakaları, yeteri kadar ince alt tabakalara ayrılacaktır. Zemin modelinin toplam derinliğine ilişkin belirsizlikler yanında, dinamik zemin parametrelerindeki belirsizlikler de uygun duyarlılık analizleri ile dikkate alınacaktır.

➤ Zemin modeli tabanından tek boyutlu tabakalı zemin modeline etki ettirilmek üzere, tanımlanan elastik ivme spektrumu ile uyumlu olarak en az onbir deprem kaydı tanımlanacaktır.

2.3. Zemin Yayları (Yük Transfer Eğrileri)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, Yöntem III'e göre zemin-kazık-yapı kinematik etkileşim analizi yapılırken birinci adım olarak zeminin yaylarla modellenmesi gerektiğinden bahsedilmektedir. Bu yaklaşımda zemin, kazık boyunca

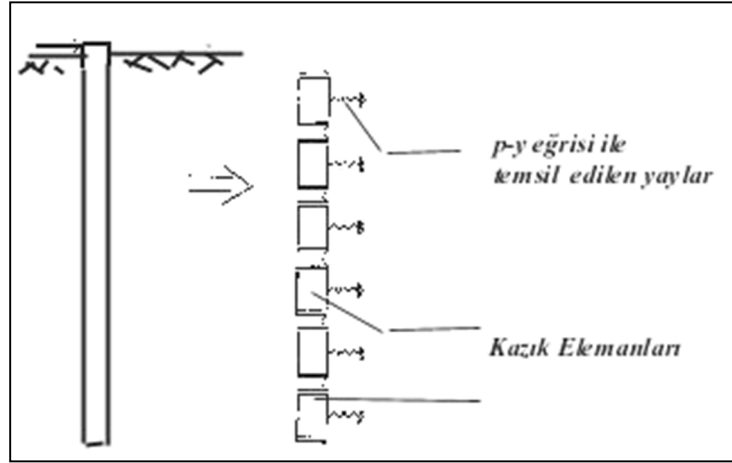
belirli aralıklarla yerleştirilen ve zemin türüne ve derinliğe göre değişen bir dizi doğrusal olmayan p-y, t-z ve Q-Z yayları ile temsil edilir. Zeminin yanal tepkisi için p-y yayları, çevresel sürtünme tepkisi için t-z yayları ve uç tepkisi için Q-Z yayları kullanılır (Şekil 2.8). Bu yayların rijitliği, yük transfer eğrisi denilen doğrusal olmayan eğrilerle temsil edilir.



Şekil 2.8. p-y, t-z ve Q-Z yayları

2.3.1. p-y Yayları

Yatay yüklü kazıklarda, zemin, “p-y eğrileri yöntemi” denilen yaklaşıma göre yaylarla modellenmektedir. Bu yaklaşımda, p kazık-zemin arası basıncını, y ise ötelenmeyi gösterir şekilde çizilen eğrilere p-y eğrileri denilmektedir. Bu eğriler nonlineer özelliklere sahiptir. p-y metodunun uygulamasında kazık belirli uzunlukta elemanlara bölünür (Şekil 2.9). Elemanlar arasında kesme kuvvetleri etki ettirilir. Zeminin tepkisi yaylarla gösterilir. Doğrusal olmayan bir davranışı sergileyen bu modelleme ile yay rijitliği, ötelenme ile değişiminin temsil edilmesi açısından p-y eğrileri ile gösterilmiş olurlar.



Şekil 2.9. p-y yayları (Aydınöğlu, 2012)

Değişik zeminler için önerilen çeşitli p-y eğrileri bulunmaktadır. Bunlar yumuşak killi zeminler, su seviyesi altında ve üstünde kalan katı killi zeminler, su seviyesi altındaki ve üstündeki granüler zeminler ve bu tür zeminlerin tekrarlı ve statik yükler altındaki davranışını yansıtan eğriler ile kaya zeminler için verilmişlerdir. Farklı zemin türleri için pratikte yaygın olarak kullanılan p-y eğrileri için geliştirilen ampirik eğrilerin bazılarının kaynakları Çizelge 2.1’de listelenmiştir. Yük transfer eğrileri bulunmadan önce taşıma gücü hesaplarının yapılması gerekmektedir. Çizelge 2.1’deki çalışmalarda taşıma gücü ile ilgili analiz ve formüllere de yer verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yanal taşıma gücü yöntemi ve p-y eğrileri için kaynaklar

Zemin Türü	Kaynak	Öneren Yönetmelik
Su içindeki ve dışındaki kum	O’Neill ve Murchinson (1983)	API 2007
	Reese, Cox ve Koop (1974)	TBDY 2018
Su içindeki yumuşak kil	Matlock (1970)	API 2007 ve TBDY 2018
Su içindeki katı kil	Reese, Cox ve Koop (1975)	API 2007 ve TBDY 2018
Su dışındaki katı kil	Welch ve Reese (1972)	TBDY 2018

Bu tez kapsamında, kum ve yumuşak kil zeminlerde statik ve tekrarlı yüklenme durumundaki p-y eğrileri incelenecektir.

2.3.1.1. Kum Zeminde p-y Eğrileri

Kum zeminde p-y eğrileri için, O’Neill ve Murchinson (1983) tarafından API için yapılan çalışmadan bahsedilecektir. Bu çalışmaya göre, yer altı su seviyesi altında veya üstündeki kumlu zeminlerde herhangi bir H (m) derinliğindeki yanal taşıma gücü p_u (kN/m), zeminin sıkı yerleri için p_{us} (kN/m) olarak (2.6)’da, derin yerleri için p_{ud}

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

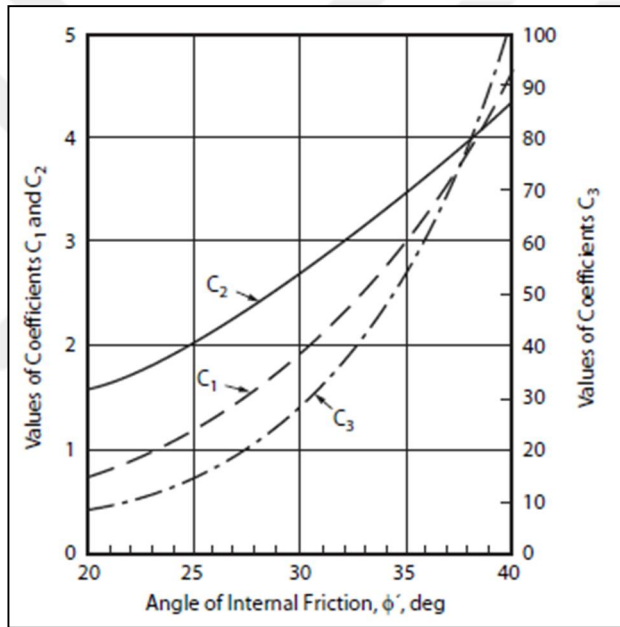
(kN/m) olarak (2.7)'de verilmiştir. Yanal taşıma gücü bu değerler arasında değişmekte olup, herhangi bir derinlikteki kazık yanal taşıma gücü olarak bunlardan küçük olanı alınmaktadır.

$$p_{us} = (C_1 H + C_2 D) \gamma H \quad (2.6)$$

$$p_{ud} = C_3 D \gamma H \quad (2.7)$$

$$p_u = \min(p_{us}, p_{ud}) \quad (2.8)$$

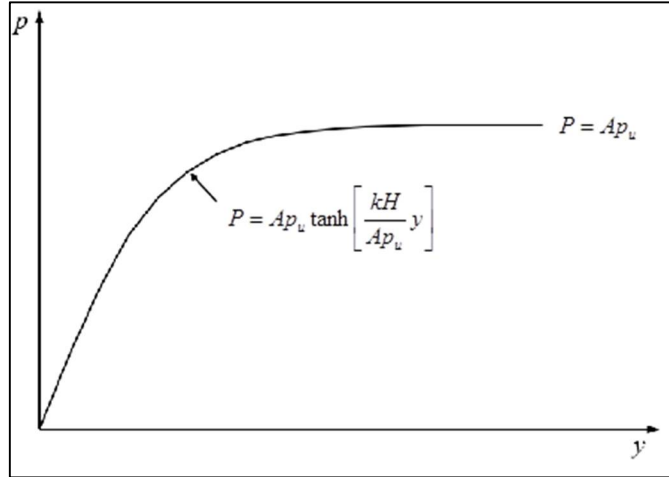
Burada, γ (kN/m³) efektif birim hacim ağırlığı, D (m) kazık çapını göstermektedir. C_1 , C_2 ve C_3 katsayıları içsel sürtünme açısına bağlı olarak Şekil 2.10'daki grafikten belirlenir.



Şekil 2.10. C_1 , C_2 , C_3 katsayıları grafiği (API, 2007)

Herhangi bir H derinliği için P - y yük transfer eğrisi ise (2.9)'da verilen formülle bulunur. Eğri, Şekil 2.11'de gösterilen eğriye benzer şekildedir.

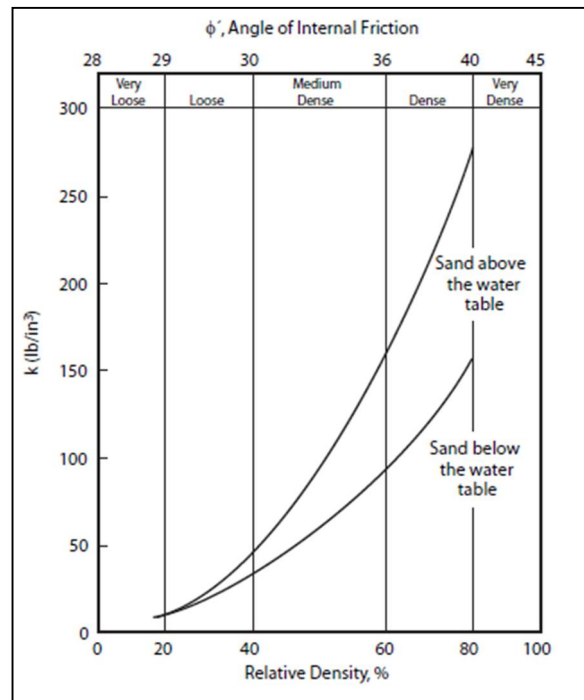
$$P = A p_u \tanh \left[\frac{kH}{A p_u} y \right] \quad (2.9)$$



Şekil 2.11. Kum zeminde P-y eğrisi

(2.9)'da, P (kN/m), zeminde oluşan yanıl tepki kuvvetidir. A yüklenme türünü belirleyen birimsiz bir katsayıdır. Tekrarlı (dinamik) yüklemelerde 0.9 alınır. Statik yüklemelerde ise (2.10)'daki formülle hesaplanır. Bu formüllerde p_u , (2.8)'de verilen formülle hesaplanır. k (kN/m³), içsel sürtünme açısı ve yer altı su seviyesinin durumuna bağılı olarak Şekil 2.12'deki grafikten bulunur. y (m) ise yanıl yer değıştirmeyi ifade etmektedir.

$$A = \left(3.0 - 0.8 \times \frac{H}{D} \right) \geq 0.9 \quad (2.10)$$

Şekil 2.12. k katsayıları grafiğı (API, 2007)

2.3.1.2. Yumuşak Kil Zeminde p-y Eğrileri

Yer altı su seviyesi altındaki yumuşak kil zeminde p-y eğrileri için, Matlock (1970) tarafından yapılan çalışmadan bahsedilecektir. Bu çalışmaya göre, statik yanal yükler altındaki yumuşak kil zeminin yanal taşıma gücü, minimum efektif gerilme nedeniyle farklı şekilde göçmenin olduğu sığ derinlikler hariç, $8c$ ile $12c$ arasında değişmektedir. Tekrarlı yanal yüklemelerde, zemin yanal taşıma gücünde azalma meydana gelmektedir. Su içindeki yumuşak kil zeminlerde, herhangi bir X (m) derinliğinde, zemin yanal taşıma gücü p_u (kPa), yanal taşıma gücü azalmasının başladığı kritik derinlik X_R (m)'nin durumuna göre (2.11) ve (2.12)'deki gibi hesaplanır. Kritik derinlik X_R (2.13)'teki formülle hesaplanır. (2.11) ve (2.12)'den anlaşılacağı gibi derinlik, sıfırdan kritik derinliğe doğru artarken, zemin yanal taşıma gücü $3c$ 'den $9c$ 'ye doğru artmaktadır.

$$X < X_R \Rightarrow p_u = 3c + \gamma X + J \frac{cX}{D} \quad (2.11)$$

$$X \geq X_R \Rightarrow p_u = 9c \quad (2.12)$$

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c} + J} \quad (2.13)$$

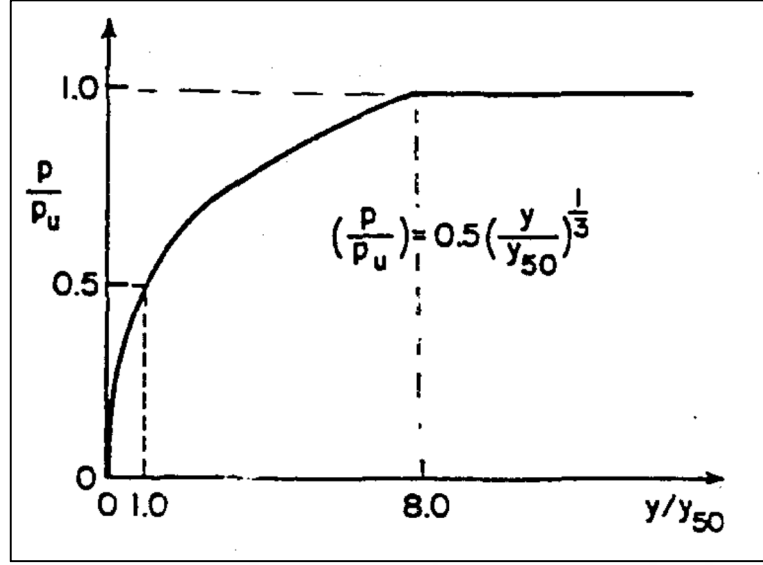
Burada, c (kPa) drenajsız kayma mukavemetini, D (m) kazık çapını, γ (kN/m³) efektif birim hacim ağırlığı ve J birimsiz ampirik katsayıyı (yumuşak killer için 0.5, orta katı killer için 0.25 alınabilir) göstermektedir.

Su içindeki yumuşak kil zeminler için kısa süreli statik yükleme durumunda p-y yük transfer eğrileri (2.14) ve (2.15)'teki eşitliklere göre belirlenir. Bu eşitliklere bağlı olarak yük transfer eğrisi Şekil 2.13'te verilmiştir. API (2007) tarafından eğrinin belirlenmesi için kullanılması önerilen veriler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

$$y < 8y_{50} \Rightarrow p = 0.5p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

$$y \geq 8y_{50} \Rightarrow p = p_u \quad (2.15)$$

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}D \quad (2.16)$$



Şekil 2.13. Kısa süreli statik yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi (Matlock, 1970)

Çizelge 2.2. Statik yükleme durumunda p-y eğrisi verileri (API, 2007)

p/p_u	y/y_{50}
0.00	0.0
0.23	0.1
0.33	0.3
0.50	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	∞

Su içindeki yumuşak kil zeminlerde tekrarlı yükleme durumunda p-y yük transfer eğrileri, kritik derinliğin durumuna göre (2.17), (2.18), (2.19), (2.20a) ve (2.20b)'deki denklemlere göre belirlenir. (2.20a) denklemiyle bulunan A(p,y) noktası ile (2.20b) denklemiyle bulunan B noktası bir doğruyla birleştirilir ve grafik tamamlanır (Şekil 2.14). Bu denklemlere bağlı olarak API (2007) tarafından eğrinin belirlenmesi için kullanılması önerilen veriler Çizelge 2.3'te verilmiştir. Yük transfer eğrisi ise Şekil 2.14'te verilmiştir. Bu eğride, tekrarlı yükleme nedeniyle yanal dirençte oluşan bozulma net olarak görülmektedir.

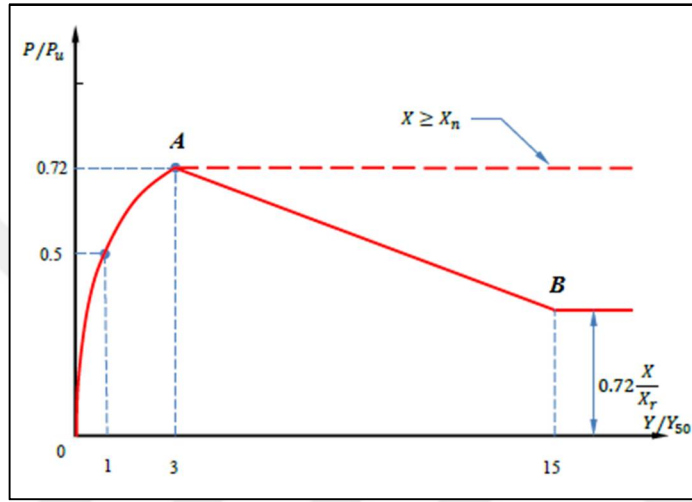
$$X \geq X_R \Rightarrow y < 3y_{50} \Rightarrow p = 0.5p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

$$X \geq X_R \Rightarrow y \geq 3y_{50} \Rightarrow p = 0.72p_u \quad (2.18)$$

$$X < X_R \Rightarrow y < 3y_{50} \Rightarrow p = 0.5p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.19)$$

$$X < X_R \Rightarrow y = 3y_{50} \Rightarrow p = 0.72p_u \quad (2.20a)$$

$$X < X_R \Rightarrow y \geq 15y_{50} \Rightarrow p = 0.72p_u \frac{X}{X_R} \quad (2.20b)$$



Şekil 2.14. Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi

Çizelge 2.3. Tekrarlı yükleme durumunda yumuşak kil p-y eğrisi verileri (API, 2007)

$X > X_R$		$X < X_R$	
p/p_u	y/y_{50}	p/p_u	y/y_{50}
0.00	0.0	0.00	0.0
0.23	0.1	0.23	0.1
0.33	0.3	0.33	0.3
0.50	1.0	0.50	1.0
0.72	3.0	0.72	3.0
0.72	∞	$0.72 X/X_R$	15.0
		$0.72 X/X_R$	∞

Yukarıdaki denklemlerde geçen ε_{50} , laboratuvarda örselenmemiş numuneler üzerinde drenajsız üç eksenli veya serbest basınç deneyi yapılarak elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin maksimum deviator gerilmeye veya serbest basınç direncine tekabül eden deformasyonun yarısını ifade etmektedir. Laboratuvar verisi bulunmaması durumunda, normal konsolide killer için Çizelge 2.4'teki verilerin kullanılması önerilir.

y_{50} (bazı kaynaklarda y_c olarak geçer) ise, ε_{50} yer değiştirmesine tekabül eden kazık yer değiştirmesini ifade etmektedir.

Çizelge 2.4. Normal konsolide killeri için ε_{50} (ε_c) değerleri

Kil Cinsi	Ortalama Drenajsız Kayma Mukavemeti (kPa)	ε_{50} (ε_c)
Yumuşak	< 48	0.020
Orta Katı	48 - 96	0.010
Katı	96 - 192	0.005

2.3.2. t-z ve Q-Z Yayları

Düşey yüklü kazıklarda, zeminin düşey direnci, kazık kenarı boyunca oluşan kazık-zemin sürtünmesinden ve kazık dibindeki uç direncinden oluşmaktadır. Kazık-zemin arasındaki sürtünmeyle oluşan yükün zemine aktarımına karşılık kazıkta oluşan yerel yer değiştirme t-z eğrileriyle tanımlanmaktadır. Aynı şekilde kazık dibindeki zeminde oluşan uç kuvvetine karşılık kazığın yaptığı eksenel yer değiştirme Q-Z eğrileriyle tanımlanmaktadır. t-z eğrilerinde, t harfi kazık-zemin arası sürtünmesini, z harfi ise lokal kazık yer değiştirmesini gösterir. Q-Z eğrilerinde, Q harfi kazık uç kuvveti, Z harfi ise kazık ucunda oluşan eksenel yer değiştirmeyi gösterir.

t-z yayları uygulamasında, kazık belirli uzunlukta elemanlara bölünür. Her bir kazık elemanına eksenel kuvvet etki ettirilir. Zeminin düşey tepkisi yaylarla gösterilir. Genellikle doğrusal olmayan bir davranış sergileyen bu düşey yer değiştirme ve yük mekanizmasında yay rijitliği, t-z eğrileri ile gösterilmiş olur. Her derinlik için farklı özelliklere sahip t-z yayı ve t-z eğrileri oluşturulur.

Q-Z yayları uygulamasında ise, kazık ucundaki zemin tepkisi bir adet yayla gösterilir. Genellikle doğrusal olmayan bir davranış sergileyen bu düşey yer değiştirme ve yük mekanizmasında yay rijitliği, Q-Z eğrileri ile gösterilmiş olur.

Yayların özelliklerinin (rijitliklerinin) oluşturulmasında, farklı zemin türleri için literatürde önerilen veya yükleme deneyleri yapılarak elde edilen yük transfer eğrilerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca, yük transfer eğrilerinin bulunması için öncelikle kazık taşıma gücünün belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, kazık taşıma gücü ve yük transfer eğrisi hesaplarında kullanılmak üzere, TBDY (2018) tarafından önerilen ve “American Petroleum Institute” tarafından yayınlanan “Recommended

Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design” adlı yönetmelikte geçen formüllerden ve verilerden bahsedilecektir.

American Petroleum Institute (API), ABD’nin petrol ve doğal gaz endüstrisinin tüm yönlerini temsil eden kar amacı gütmeyen ulusal ticaret birliğidir. API 1919 yılında bir standart belirleme kuruluşu olarak kurulmuştur. Tüm dünyada petrol ve doğalgaz sanayisinde API standartları kullanılmaktadır. Göz önüne alınacak yönetmelik ise sabit açık deniz platform tasarımı ve inşaatları için hazırlanan standartları içermektedir. Deniz platformları genellikle kazıklı yapılar olduğu için yönetmelikte kazık tasarımı ilgili çok sayıda standart bulunmaktadır.

2.3.2.1. Kohezyonsuz (Kum) Zeminlerde t-z ve Q-Z Eğrileri

Kohezyonsuz zeminlerde herhangi bir derinlikteki kazık birim sürtünme direnci f_s (kPa), (2.21)’de verilen formülle hesaplanır.

$$f_s = t_{max} = K \times p_o \times \tan \delta \quad (2.21)$$

Burada, K yatay toprak basıncı katsayısını, p_o (kPa) düşey efektif zemin gerilmesini ve δ kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısını göstermektedir. Açık uçlu boru şeklindeki kazıklar için K , 0.8 olarak alınabilir. Kapalı uçlu veya soketli kazıklar için K , 1.0 alınmaktadır. δ , veri bulunmaması durumunda kum zeminin sıkılığına göre Çizelge 2.5’ten alınabilir. (2.21)’de görüldüğü gibi kazık birim sürtünme direnci, derinlikle doğrusal olarak artmaktadır. Ancak, uzun kazıklar için birim kazık sürtünme direnci, düşey efektif gerilmeyle devamlı artmayabilir. Bu durumda kazık sürtünme direncini Çizelge 2.5’te verilen değerlerle sınırlandırmak uygun olacaktır (API, 2002).

Kohezyonsuz zeminlerde herhangi bir derinlikte kazık birim uç direnci q_u (kPa), (2.22)’de verildiği gibidir.

$$q_u = p_o \times N_q \quad (2.22)$$

Burada, p_o (kPa) düşey efektif zemin gerilmesini, N_q birimsiz taşıma gücü katsayısını göstermektedir. Önerilen taşıma gücü katsayıları Çizelge 2.5’te verilmektedir. Güvenli tarafta kalmak için birim uç direncini, Çizelge 2.5’te verilen değerlerle sınırlandırmak uygun olacaktır (API, 2002).

Çizelge 2.5. Kohezyonsuz zeminlerde tasarım parametreleri (API, 2002)

Sıklık	Zemin Tipi	Zemin-Kazık Sürtünme Açısı, δ	Maksimum Birim Sürtünme Direnci, f_s (kPa)	Birimsiz Taşıma Gücü Katsayısı, N_q	Maksimum Birim Uç Direnci, q_u (MPa)
Çok Gevşek	Kum	15	47.8	8	1.9
Gevşek	Kum-Silt				
Orta Sıkı	Silt				
Gevşek	Kum	20	67.0	12	2.9
Orta Sıkı	Kum-Silt				
Sıkı	Silt				
Orta Sıkı	Kum	25	81.3	20	4.8
Sıkı	Kum-Silt				
Sıkı	Kum	30	95.7	40	9.6
Çok Sıkı	Kum-Silt				
Sıkı	Çakıl	35	114.8	50	12.0
Çok Sıkı	Kum				

API'nin, 2007 yılında, aynı adla yayınladığı daha geliştirilmiş yönetmeliğe göre herhangi bir derinlikteki kazık birim sürtünme direnci f_s (kPa) (2.23)'te verildiği gibidir.

$$f_s = \beta \times p_o \quad (2.23)$$

Burada, β birimsiz sürtünmesi direnci katsayısını, p_o (kPa) düşey efektif zemin gerilmesini göstermektedir. β katsayıları, Çizelge 2.6'da verilmiştir. β katsayısı, açık uçlu soketlenmemiş çakma kazıklar için 1.0 alınabilir. Soketlenmiş kapalı uçlu çakma kazıklar için Çizelge 2.6'daki değerler %25 oranında artırılabilir. Maksimum kazık birim sürtünme direnci, Çizelge 2.6'da verildiği gibi değiştirilmiştir.

Aynı yönetmelikte, kohezyonsuz zeminlerde herhangi bir derinlikteki en büyük kazık birim uç direnci formülü aynı kalmış olmakla beraber, en büyük kazık birim uç direnci q_u ve birimsiz taşıma gücü katsayısı N_q Çizelge 2.6'da verildiği gibi değiştirilmiştir.

Kum zeminler için API (2007)'de geçen t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri Çizelge 2.7'de verildiği gibidir. Bu çizelgede t_{max} birim sürtünme direncini göstermektedir ve (2.21) veya (2.23)'teki bağıntıya göre hesaplanır. D (m) kazık çapını ifade etmektedir. Q_{max} (kN) maksimum uç direncini göstermektedir ve (2.22)'deki bağıntının kazık ucundaki kesit alanı ile çarpılmasıyla bulunur. Çizelge 2.7'deki verilere bağlı olarak t-z eğrisi Şekil 2.15'te, Q-Z eğrisi Şekil 2.16'da verilmiştir.

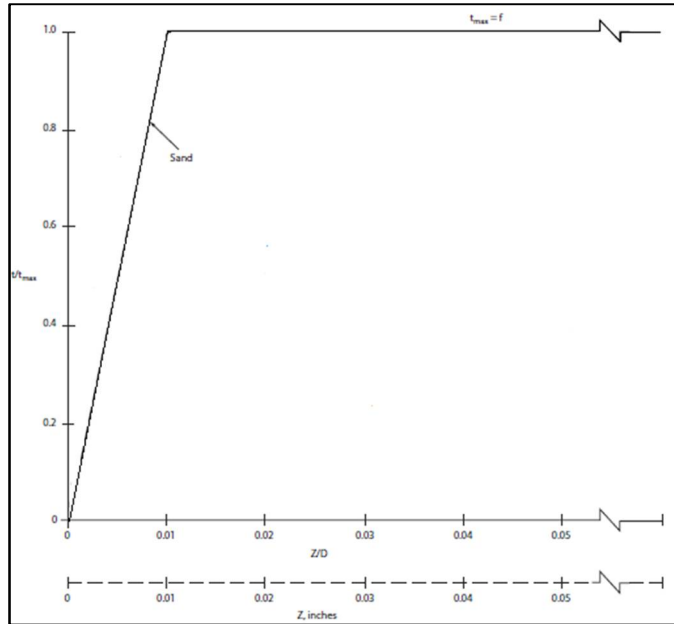
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çizelge 2.6. Kohezyonsuz zeminlerde tasarım parametreleri (API, 2007)

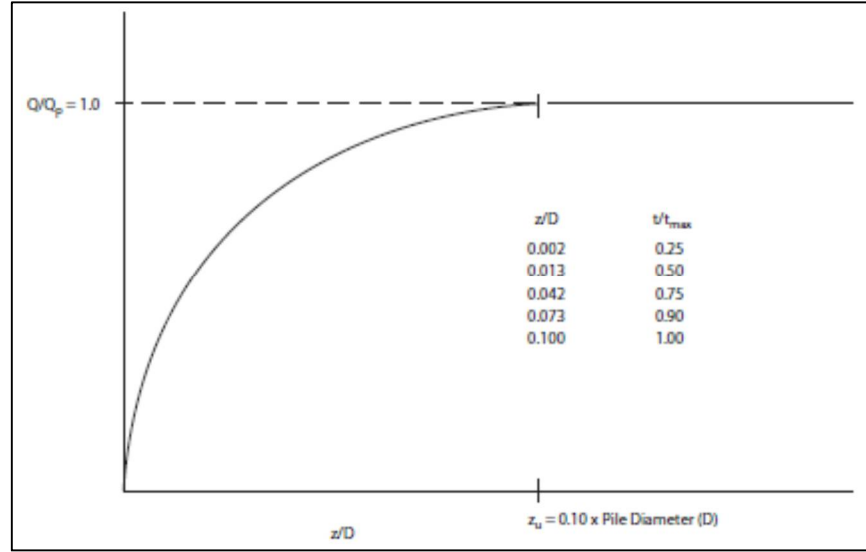
Rölatif Sıklık (%)	Zemin Tipi	Sürtünme Direnci Katsayısı, β	Maksimum Birim Sürtünme Direnci, f_s (kPa)	Birimsiz Taşıma Gücü Katsayısı, N_q	Maksimum Birim Uç Direnci, q_u (MPa)
Çok Gevşek (0-15)	Kum	Formülasyon Uygun Değildir	Formülasyon Uygun Değildir	Formülasyon Uygun Değildir	Formülasyon Uygun Değildir
Gevşek (15-35)	Kum				
Gevşek (15-35)	Kum-Silt				
Orta Sıkı (35-65)	Silt				
Sıkı (65-85)	Silt				
Orta Sıkı (35-65)	Kum-Silt	0.29	67	12	3
Orta Sıkı (35-65)	Kum	0.37	81	20	5
Sıkı (65-85)	Kum-Silt				
Sıkı (65-85)	Kum	0.46	96	40	10
Çok Sıkı (85-100)	Kum-Silt				
Çok Sıkı (85-100)	Kum	0.56	115	50	12

Çizelge 2.7. Kum zeminlerde t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri (API, 2007)

<i>t-z eğrisi</i>		<i>Q-Z eğrisi</i>	
<i>z (m)</i>	<i>t/t_{max}</i>	<i>z/D</i>	<i>Q/Q_{max}</i>
0.0000	0.0	0.002	0.25
0.0254	1.0	0.013	0.50
∞	1.0	0.042	0.75
		0.073	0.90
		0.100	1.00



Şekil 2.15. Kum zeminlerde t-z eğrisi (API, 2007)



Şekil 2.16. Kum ve kil zeminlerde Q-Z eğrisi (API, 2007)

2.3.2.2. Kohezyonlu (Kil) Zeminlerde t-z ve Q-Z Eğrileri

API (2007)'ya göre kohezyonlu zeminde herhangi bir derinlikteki kazık birim sürtünme direnci f_s (kPa) (2.24)'teki gibi hesaplanır.

$$f_s = t_{max} = \alpha \times c \quad (2.24)$$

Burada, α boyutsuz bir katsayı, c (kPa) drenajsız kayma mukavemetini göstermektedir. p_o (kPa) düşey efektif zemin gerilmesi olmak üzere, α katsayısı (2.25), (2.26) ve (2.27)'teki bağıntılara göre belirlenir.

$$\psi = c / p_o \text{ olmak üzere} \quad (2.25)$$

$$\alpha = 0.5 \times \psi^{-0.5} \text{ eğer } \psi \leq 1.0 \text{ ise} \quad (2.26)$$

$$\alpha = 0.5 \times \psi^{-0.25} \text{ eğer } \psi > 1.0 \text{ ise} \quad (2.27)$$

Kohezyonlu zeminlerde herhangi bir derinlikteki kazık birim uç direnci q_u (kPa) (2.28)'teki gibidir.

$$q_u = 9 \times c \quad (2.28)$$

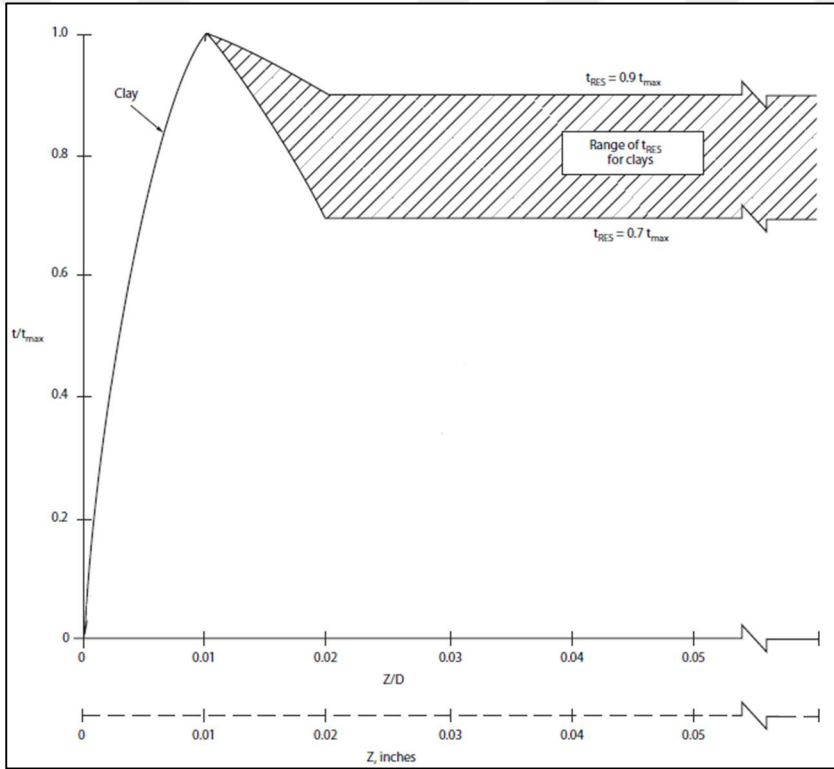
Kil zeminler için API (2007)'de geçen t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri Çizelge 2.8'de verildiği gibidir. Bu çizelgede t_{max} (kPa) birim sürtünme direncini göstermektedir ve (2.24)'teki bağıntıya göre hesaplanır. D (m) kazık çapını ifade etmektedir. Q_{max} (kN) maksimum uç direncini göstermektedir ve (2.28)'deki bağıntının kazık ucundaki kesit alanı ile çarpılmasıyla bulunur. Çizelge 2.8'deki verilere bağlı

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

olarak t-z eğrisi Şekil 2.17’de verilmiştir. API (2007)’ye göre kil ve kum zeminlerin Q-Z yük transfer eğrileri aynı özelliği gösterir.

Çizelge 2.8. Kil zeminlerde t-z ve Q-Z yük transfer eğrisi verileri (API, 2007)

<i>t-z eğrisi</i>		<i>Q-Z eğrisi</i>	
z/D	t/t_{max}	z/D	Q/Q_{max}
0.0016	0.30	0.002	0.25
0.0031	0.50	0.013	0.50
0.0057	0.75	0.042	0.75
0.0080	0.90	0.073	0.90
0.0100	1.00	0.100	1.00
0.0200	0.70 - 0.90		
∞	0.70 - 0.90		



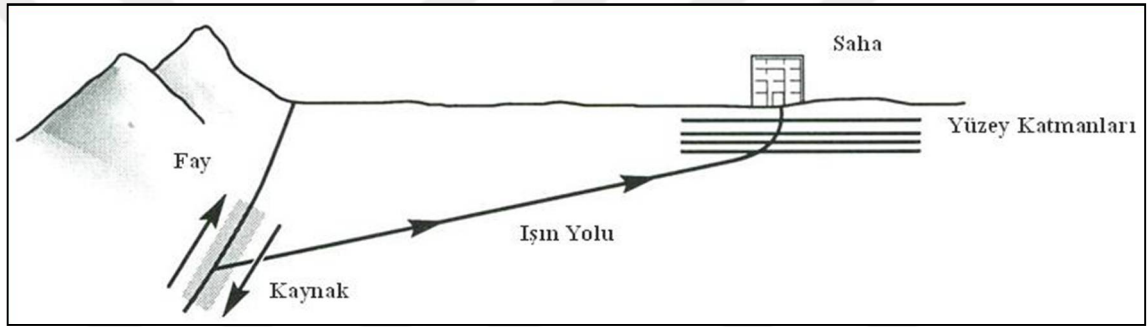
Şekil 2.17. Kil zeminlerde t-z eğrisi (API, 2007)

2.4. Zemin Davranış Analizi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, Yöntem III’e göre zemin–kazık–yapı etkileşim analizi yapılırken, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarındaki p-y yaylarına uygulanmak üzere, deprem etkisi altında tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinin yapılarak aynı düğüm noktası hizalarındaki toplam yer

değiştirmelerin bulunması gerektiğinden bahsedilmektedir. Bu bölümde zeminlerin dinamik özellikleri ve zemin davranış analizi ele alınacaktır.

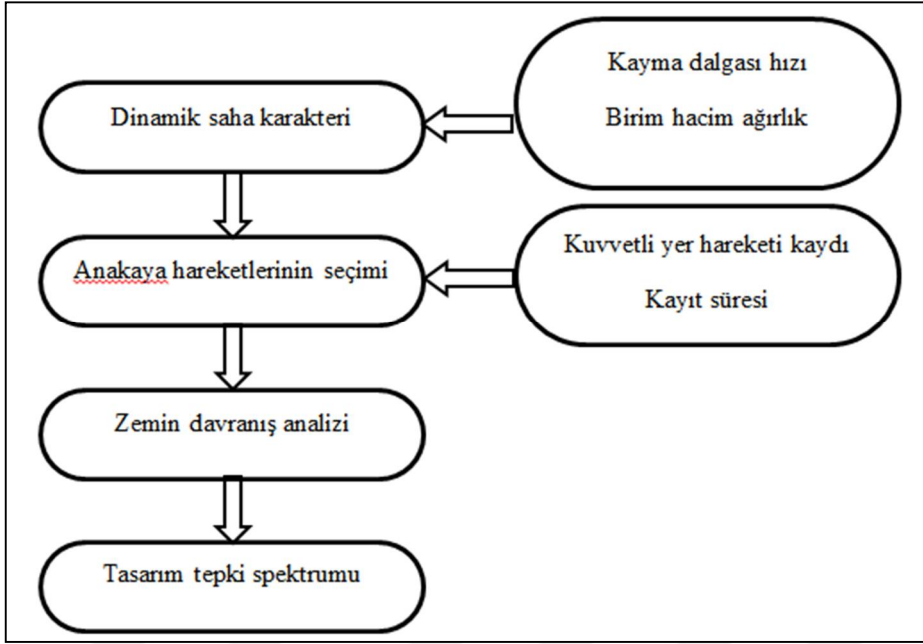
Zemin davranış analizlerinde, anakayadan yukarı doğru hareket ettiği varsayılan kayma dalgalarının yayılımı analiz edilir (Şekil 2.18). Bu analizlerde, deprem kaynağındaki yırtılma mekanizması ile oluşan gerilme dalgalarının yer içinden anakayanın tepesine ulaşması modellenir ve yer yüzeyindeki hareketin anakaya üzerindeki zeminler tarafından nasıl etkilendiği belirlenir. Yapıların deprem analizlerinde uygun tepki spektrumu bulunmasında, yer yüzeyi hareketlerinin belirlenmesinde, sıvılaşma analizlerinde, gerekli dinamik gerilme ve birim deformasyonları hesaplarında zemin davranış analizleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.18. Deprem kaynağı ve deprem dalgalarının yayılımı (Nar, 2016)

Zemin davranış analizlerinin yapılabilmesi için, deprem yer hareketinin, zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin ve dinamik analiz yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca anakaya derinliğine ve yer altı su seviyesinin yerine ihtiyaç duyulmaktadır. Zemin davranış analizinin işleyiş adımları Şekil 2.19’da verilmiştir.

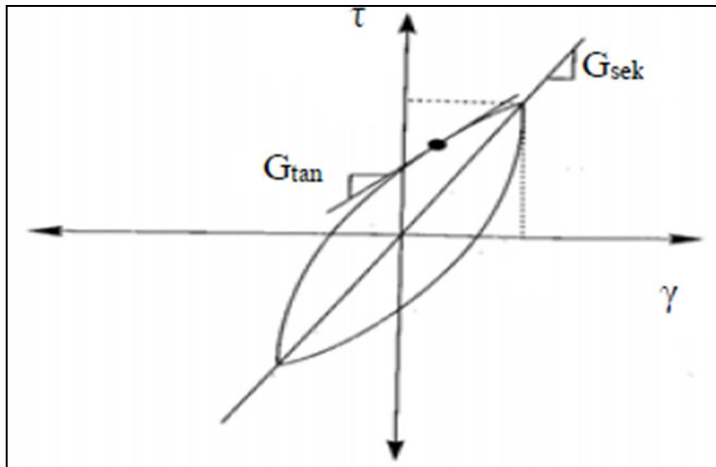
Zemin davranış analizi yapılırken zemin kayma dalgası hızı, birim hacim ağırlık ve zemin modeli seçilerek zeminin dinamik karakteri belirlenir. Tasarım yer hareketi, geçmişte benzer zemin koşullarına sahip bölgelerde kaydedilmiş kuvvetli deprem ivme kayıtlarından veya sismik tehlike analizlerinden faydalanılarak yapay olarak üretilmiş ivme kayıtlarından yararlanılarak elde edilir. Temel zeminini oluşturan tabakaların laboratuvar veya arazi deneyleri ile ampirik bağıntılardan G kayma modülü ve ζ sönüm oranlarının birim şekil değiştirme seviyesine (γ_c) göre değişimi belirlenir. Bu veriler kullanılarak anakayada oluşan yer hareketinin etkisi altında zemin tabakalarının davranışının zaman veya frekans tanım alanında analizi yapılır.



Şekil 2.19. Zemin davranış analizi işleyiş adımları (Nar, 2016)

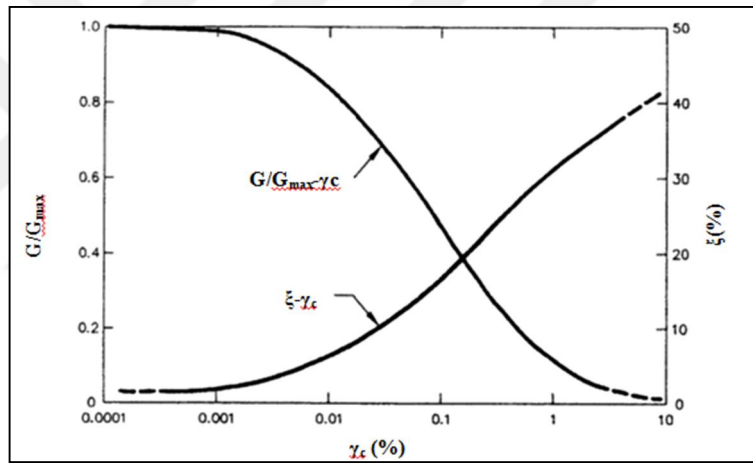
2.4.1. Zeminlerin Dinamik Özellikleri ve Davranışı

Zeminlerin dinamik yükler altındaki doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı, yapı ve zemin arasında depremlerden kaynaklı etkileşim açısından önemlidir. Zeminler, dinamik yük etkisindeyken yapısında meydana gelen kayma deformasyonu miktarına göre rijitlik kaybı yaşar ve böylelikle deprem dalgalarını sönmümlerler. Sahip oldukları bu özellikler nedeniyle zeminlerin tekrarlı yüklemeler altında gerilme-şekil değiştirme davranışı histerisis ilmeği ile ifade edilir (Şekil 2.20). Histerisis ilmeğinden yararlanılarak zeminlerin belirli kayma deformasyonlarında sahip olduğu kayma modülü ve sönmüm oranı hesaplanır.



Şekil 2.20. Tekrarlı yükleme altında zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı (histerisis ilmeği)

Zeminin dinamik özellikleri olan kayma modülü ve sönüm oranının gerçeğe en yakın değerlerde seçilip analizlerde kullanılması, yapılara ve temellerine etkiyen deprem kuvvetlerinin mümkün olan en az hasarı oluşturması açısından önemlidir. Dinamik özelliklerin araştırıldığı çalışmalarda zeminlerin kayma modüllerinin, artan deformasyon oranları ile birlikte azaldığı, sönüm oranlarının ise artan deformasyon oranları ile birlikte arttığı görülmüştür. Bu özelliklerin deprem analizlerinde kullanılabilmesi için çeşitli bilim insanları tarafından zemin cinslerine ve bu zemin tiplerinin ayırıcı özelliklerine göre artan deformasyonla azalan kayma modülü ve artan sönüm oranı eğrileri kullanımına sunulmuştur (Şekil 2.21). Kil, silt gibi ince daneli zeminlerin sahip oldukları dinamik özellikler plastisiteyle değişmektedir. Kum, çakıl gibi zeminler ve düşük plastisiteli zeminlerde ise yerçekimi kuvveti ve zemin daneleri arasındaki sürtünme kuvvetleri, yük altındaki davranışı belirleyen faktörlerdir.



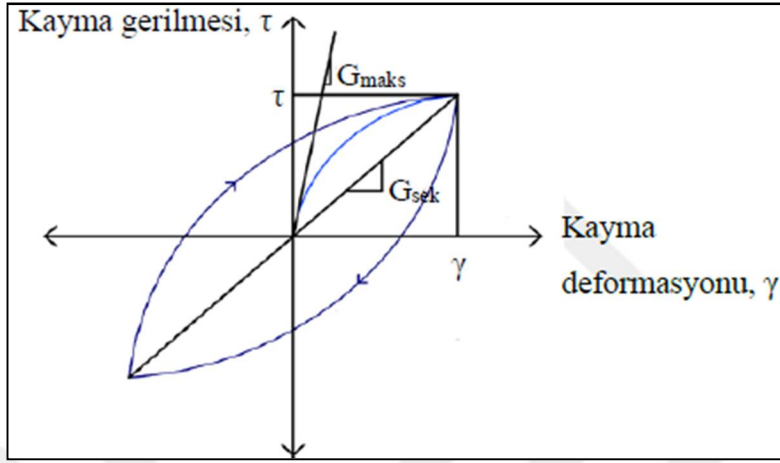
Şekil 2.21. G kayma modülü ve ζ sönüm oranlarının birim şekil değiştirme (γ_c) ile ilişkisi

2.4.1.1. Kayma Modülü ve Deformasyon Değişimi

Histeretik zemin davranışın en önemli özelliklerinden ilmeğin sahip olduğu eğimlerdir. Zeminin rijitliğinin göstergesi olan tanjant kayma modülü G_{tan} ilmeğin herhangi bir noktasındaki eğim olarak tanımlanır. Zeminin kayma modülünün, tekrarlı yüklemeler altında sabit kalmaması nedeniyle kayma modülü değerleri, maksimum kayma modülü ve sekant kayma modülü olarak ifade edilmiştir. Şekil 2.22'den görüleceği gibi düşük kayma deformasyon seviyelerinde kayma modülü maksimum değerini (G_{maks}) alırken, herhangi bir çevrimin ortalama eğimi ise ilgili kayma deformasyonuna ait sekant kayma modülü (G_{sek}) ile ifade edilir. Zeminlerin, dinamik

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

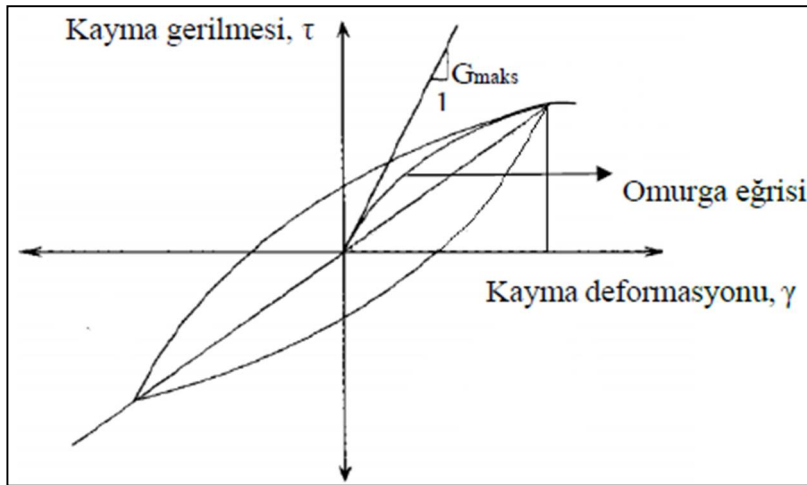
etkiler altında, düşük deformasyon seviyelerinde doğrusal, yüksek deformasyon seviyelerinde ise doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.22. Maksimum ve sekant kayma modülü

Zeminin doğrusal davranış gösterdiği kayma deformasyonlarındaki rijitliğini ifade eden ve sabit bir değer olan maksimum kayma modülü G_{maks} , farklı deformasyon seviyelerine ait histeresis ilmeklerinin uç noktalarının birleştirilmesiyle oluşturulan omurga eğrisinin orijininden geçen teğetin eğimidir (Şekil 2.23). Maksimum kayma modülü, zeminlerin deprem yükleri altındaki davranışını bulmak için kullanılır. Maksimum kayma modülü elde edilmesini sağlayan bağıntı (2.29)'de verilmiştir. Bağıntıdaki ρ zeminin yoğunluğu, V_s ise kayma dalgası hızıdır. TBDY (2018)'de, (2.29) bağıntısının maksimum kayma modülü tespitinde kullanılması önerilmektedir.

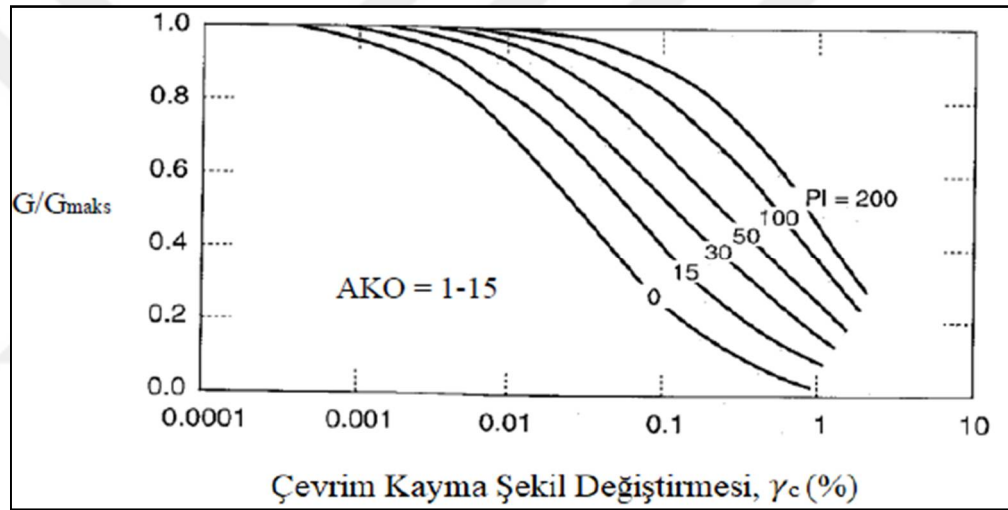
$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (2.29)$$



Şekil 2.23. Omurga eğrisi ve maksimum kayma modülü

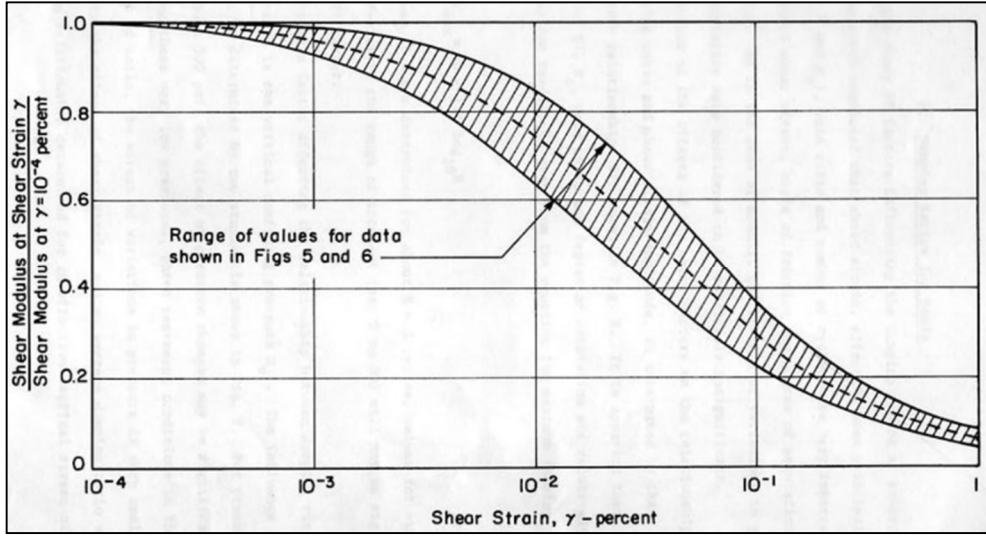
Yapılan çalışmalar sonucunda, G_{sek}/G_{maks} oranının ilgili kayma deformasyonu ile ilişkisini gösteren daha sade ve anlaşılır bir özellik olan kayma modülü azalım eğrileri literatüre sunulmuştur. *DEEPSOIL* ve *SHAKE* gibi zemin davranış analizleri için kullanılan yazılımlarda zemin cinsine ve özelliklerine bağlı olarak bu eğriler kullanılmaktadır.

Dinamik özellik eğrilerinden biri olan azalım eğrilerini belirlemek için yapılan bir çalışmada deney sonuçlarından hareketle killerin kayma modülü-şekil değiştirme ilişkisinde plastisite indisinin davranışı etkileyen ana faktör olduğu ortaya konmuştur (Vucetic ve Dobry, 1991). Şekil 2.24'te gösterilen azalım eğrileri bu araştırmacılar tarafından uygulamada kullanılması önerilen eğrilerdir.



Şekil 2.24. Plastisitesi farklı ince daneli zeminlerin modül azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)

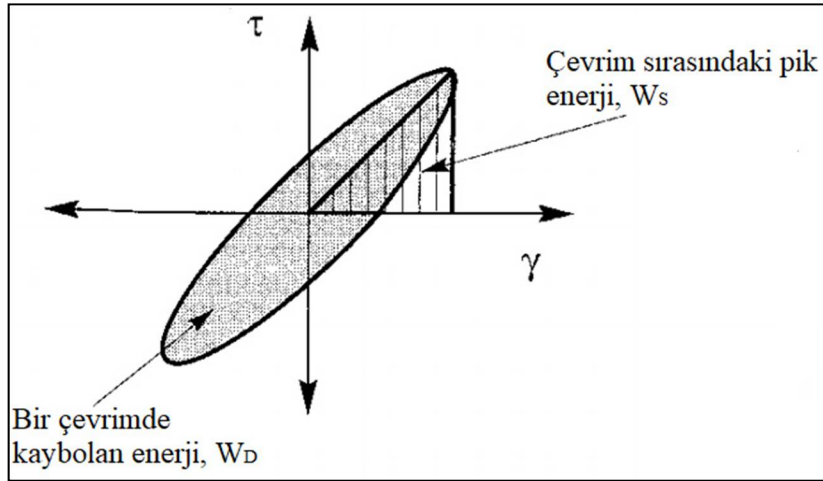
Seed ve Idriss (1970) tarafından kum zeminlerde yapılan çalışmada maksimum deformasyon, boşluk oranı, efektif gerilme gibi değişkenlerin etkisi araştırılarak bulunan kayma modülü-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.25'te verilmiştir. Çalışmada, bulunan en büyük değerler üst limit, en küçük değerler alt limit kabul edilmiştir ve bu değerlere göre eğriler çizilmiştir. Ayrıca, grafikte, üst limit ve alt limit değerlerinin ortalaması kabul edilen üçüncü bir eğri bulunmaktadır.



Şekil 2.25. Kum zeminlerde modül azalım eğrileri (Seed ve Idriss, 1970)

2.4.1.2. Sönüm Oranı ve Deformasyon Değişimi

Tekrarlı yüklemeler altındaki zeminlerde artan deformasyonlarla oluşan enerji kaybı sönüm oranı olarak ifade edilir. Zeminlerin sahip olduğu histeretik gerilme-şekil değiştirme davranışı yardımıyla hesaplanan sönüm oranı çevrim sırasında yutulan enerjiyi ifade eder. Tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı Şekil 2.26'daki gibi olan bir zemin için histeretik sönüm oranı denklem (2.30)'daki gibi hesaplanmaktadır.

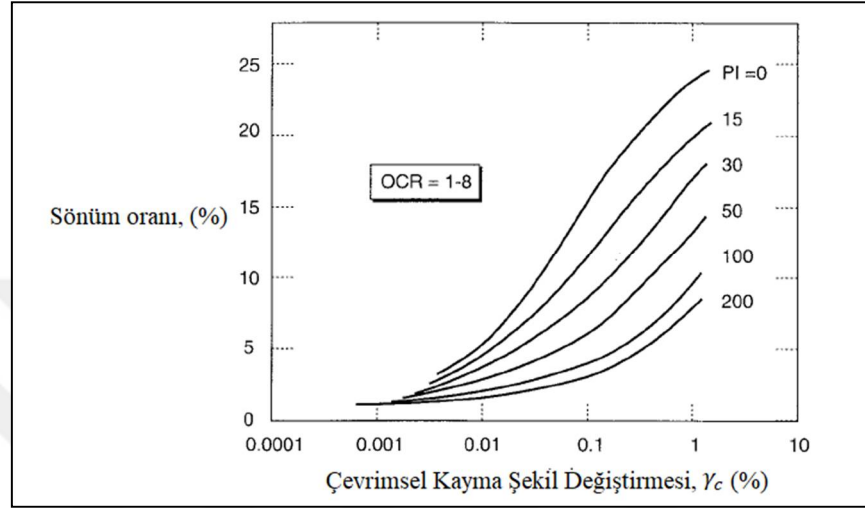


Şekil 2.26. Histeretik gerilme-şekil değiştirme davranışı ve sönüm oranı

$$\xi_{hys} = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (2.30)$$

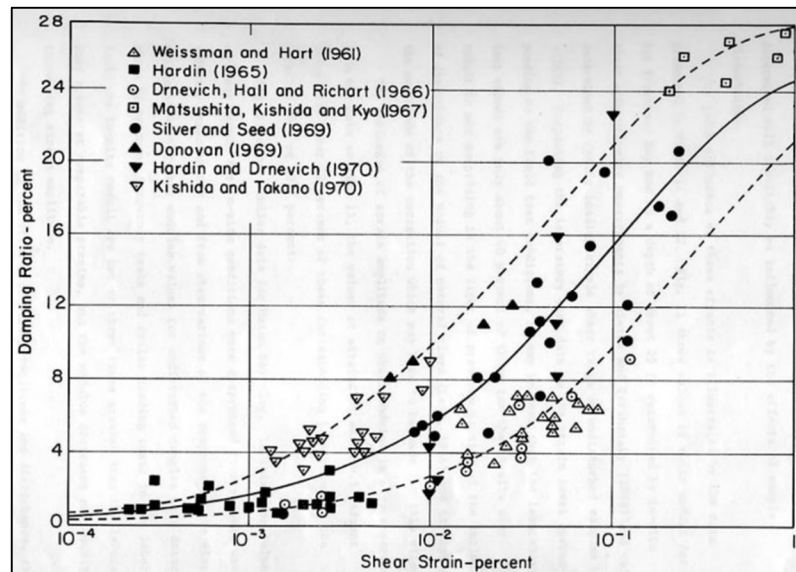
Denklemden ξ_{hys} histeretik sönüm, W_D bir çevrimde kaybolan toplam enerji, W_S ise maksimum birim kayma enerjisi olarak tanımlanmıştır.

Sönüm davranışını incelemek üzere yapılan çalışmalarda aşırı konsolidasyon oranları 1-15 arasında değişen farklı plastisite indislerine sahip zeminlerin araştırıldığı 16 çalışma incelenmiş ve zeminin sönüm davranışını etkileyen ana faktörün plastisite indisi olduğu ifade edilmiştir (Vucetic ve Dobry, 1991). Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.27'deki gibidir.



Şekil 2.27. Plastisite indisine sahip zeminlerde sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi (Vucetic ve Dobry, 1991)

Seed ve Idriss (1970) tarafından kum zeminlerde yapılan çalışmalarda, sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisini etkileyen en büyük değişkenin efektif gerilme olduğu ortaya çıkarılmıştır. Çok sayıda çalışmayla karşılaştırılarak elde edilen modül azalım eğrisi Şekil 2.28'de verilmiştir.



Şekil 2.28. Kum zeminlerde sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi (Seed ve Idriss, 1970)

2.4.2. Tek Boyutlu Zemin Davranış Analizi

Tek boyutlu zemin davranış analizinde aşağıda belirtilen kabuller yapılır:

- Tüm zemin tabakaları birbirine paralel ve yatay konumdadır.
- Anakayadan düşey yönde yayılan dalgalar zeminin tepkisine neden olur.
- Zemin ve anakaya yüzeyleri üçüncü boyutta sonsuz uzanımlıdır.

Tek boyutlu zemin davranış analizinde zemin için farklı modeller geliştirilmiştir. Bunlar zeminin basit olarak modellendiği doğrusal (lineer elastik) model, zeminin karmaşık yapısının hesaplara dahil edildiği doğrusal olmayan (nonlineer) model ve doğrusal olmayan modele göre daha basit, doğrusal modele göre zemin davranışının gerçeğe daha yakın modellendiği eşdeğer doğrusal model olarak sıralanabilir. Zeminin doğrusal davranışında her bir zemin tabakası için sabit kayma modülü ve sönüm oranı belirlenir. Doğrusal olmayan zemin davranışında gerilme-deformasyon ilişkisine göre kayma modülü ve sönüm oranı sürekli değişmektedir.

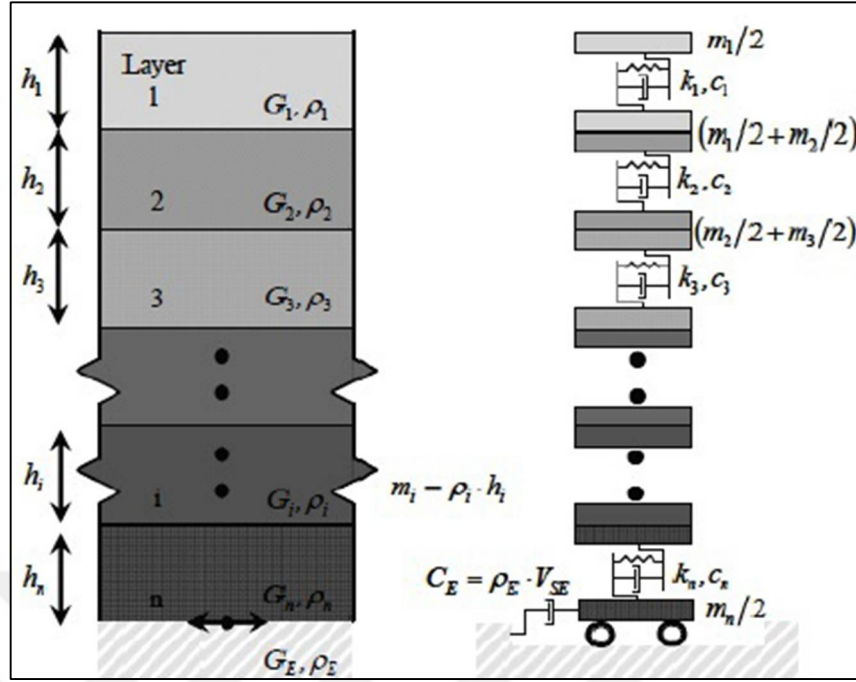
Bu tez kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde öngörüldüğü için zaman tanım alanında doğrusal olmayan yaklaşım ele alınacaktır.

2.4.2.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Analizi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, her tabakaya ait kayma modülü ve sönüm oranının zemin profilini doğru bir şekilde temsil edemediği durumlarda, kayma modülü ve sönüm oranı değişimini göstermek için kullanılmaktadır.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde zemin kolonu, Şekil 2.29'da görüldüğü gibi çoklu serbestlik dereceli toplu parametre modeli veya sonlu elemanlar kullanılarak ayırık tabakalara ayrılmaktadır. Her bir tabaka; bir kütle, doğrusal olmayan bir yay ve viskoz sönümleme için bir sönümleyici ile temsil edilmektedir. Ardışık iki tabakayı temsil eden kütlelerin her birinin yarısının, iki tabakanın ortak sınırında bir araya gelmesiyle kütle matrisi $[M]$ oluşturulmaktadır. Rijitlik matrisi $[K]$, zeminin doğrusalsızlığını birleştirmek için her bir zaman artışında güncellenmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde hareket denklemi denklem (2.31) kullanılarak elde edilmektedir (Mert, 2018).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad (2.31)$$



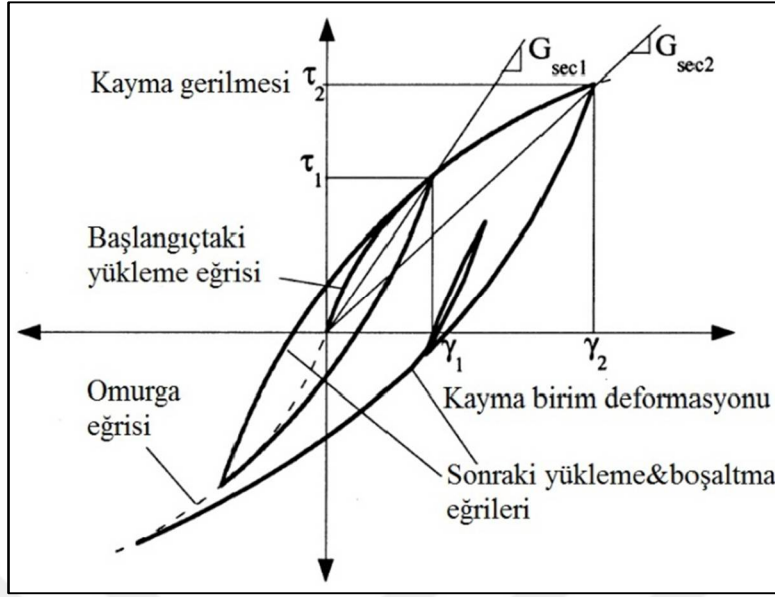
Şekil 2.29. Yatay olarak tabakalanmış zemin profilinin çoklu serbestlik dereceli toplu parametre modeli (Mert, 2018)

(2.31) denkleminde, $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ viskoz sönümlenme matrisi, $[K]$ rijitlik matrisi, $\{\ddot{u}\}$ nodal göreceli ivme vektörü, $\{\dot{u}\}$ nodal göreceli hızların vektörü ve $\{u\}$ nodal göreceli yer değiştirmeler vektörüdür. $\ddot{u}_g$ zemin kolonunun tabanındaki ivme ve $\{I\}$ birim vektördür.

2.4.2.2. Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Modeli (Omurga Eğrisi)

Zeminlerde oluşan tekrarlı yüklemeler nedeniyle kayma şekil değiştirmelerine bağlı olarak doğrusal olmayan modellerle incelenmesine gerek vardır. Bu modellerin kullanılmasıyla zeminin deprem dalgalarının etkisi altındaki rijitlik kaybı ve sönümü hem deformasyon hem de zamana bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda birçok tekrarlı doğrusal olmayan model geliştirilmiştir. Bu modellerin ortak özelliği omurga eğrisini, boşaltma yükleme hareketini, rijitlik azalımını ve diğer etkileri içinde barındıran bir dizi kurallar olmasıdır (Şekil 2.30).

Doğrusal olmayan zemin davranış modelini ifade eden omurga eğrisini elde edebilmek için kullanılan hesap yöntemlerinden biri olan *Modifiye Kondner-Zelasko (MKZ)* olarak adlandırılan modele göre başlangıç yüklemesi ve kayma modülü azalım eğrisi sırasıyla (2.32) ve denklem (2.33)'te gösterilmiştir (Matasovic ve Vucetic, 1995).



Şekil 2.30. Doğrusal olmayan zemin davranış modeli (omurga eğrisi)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \beta \left(\frac{G_0 \gamma}{\tau_f} \right)^s} = \frac{1}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (2.32)$$

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_0 \gamma}{\tau_f} \right)^s} = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (2.33)$$

Burada τ kayma gerilmesini, γ kayma birim deformasyonu, G_0 başlangıç kayma modülü değerini, τ_f kayma dayanımı, γ_r referans kayma deformasyonu, s kayma modülü azalım eğrisinin küçük kayma şekil değiştirme değerlerinde de doğru bir sonuç elde edilmesini sağlayan değeri, β ise G/G_{maks} azalım eğrisinin gerçeğe daha uygun çizilmesini sağlayan değeri ifade eder.

Doğrusal olmayan zemin davranış modelini ifade eden omurga eğrisini elde edebilmek için kullanılan hesap yöntemlerinden biri diğeri ise, genelleştirilmiş ikinci dereceden bir hiperbolik model (GQ/H)'dir (Hashash ve ark., 2018). Bu modelde omurga eğrisi denklem (2.34) ile ifade edilmektedir.

$$\tau = \tau_{\max} \left[\frac{1}{\theta_\tau} \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4\theta_\tau \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad (2.34)$$

Bu eşitlikte; τ kayma gerilmesi, τ_{max} göçme anındaki kayma mukavemeti, γ kayma birim deformasyonu, γ_r referans kayma birim deformasyonu ve θ_r eğri ayarlama parametresidir.

2.4.2.3. Histeretik Yükleme-Boşaltma Eğrisi Formülasyonu

Hashash ve ark. (2018) tarafından önerilen Non-Masing modeline göre boşaltma-yükleme denklemi (2.35) ile ifade edilmektedir.

$$\tau = F(\gamma_m) \left[2 \frac{G_0((\gamma - \gamma_{rev})/2)}{1 + \beta \left(\frac{(\gamma - \gamma_{rev})}{2\gamma_r} \right)} - \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^S} \right] + \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta(\gamma_m - \gamma_r)^S} + \tau_{rev} \quad (2.35)$$

Bu denklemde, γ kayma birim deformasyonu, γ_r referans kayma birim deformasyonu, β boyutsuz bir faktör, S boyutsuz bir üs, γ_{rev} ters kayma birim deformasyonu, τ_{rev} ters kayma gerilmesi, γ_m maksimum kayma birim deformasyonu, $F(\gamma_m)$ indirgeme faktörü ve G_0 başlangıç kayma modülüdür. $F(\gamma_m)$ indirgeme faktörü (2.36) ile ifade edilmektedir.

$$F(\gamma_m) = p_1 - p_2 \left(1 - \frac{G_{\gamma_m}}{G_0} \right)^{p_3} \quad (2.36)$$

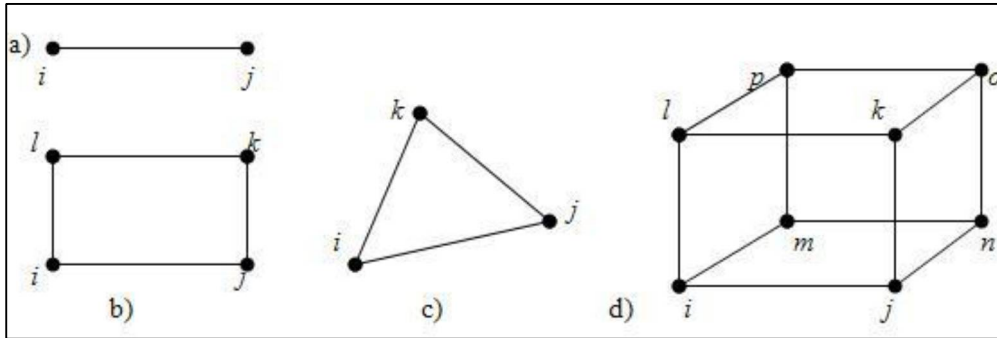
(2.35) denkleminde, G_{γ_m} kayma modülü, G_0 başlangıç kayma modülü, p_1 , p_2 ve p_3 hedeflenen sönümlleme eğrisi ile mümkün olan en iyi uyumu elde etmek için seçilen boyutsal olmayan parametrelerdir.

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

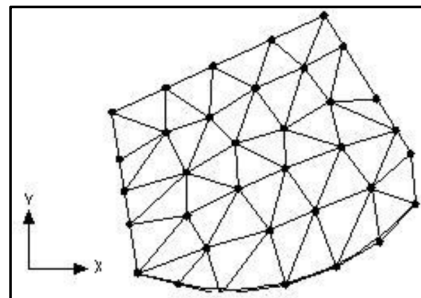
Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda bilgisayar ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak geliştirilen, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm bulan çağdaş bir sayısal hesap yöntemidir. Bu sayısal yaklaşım yöntemi, yapı sistemleri için geliştirilmiş ise de dayandığı esaslar nedeniyle pek çok alandaki mühendislik probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Örneğin çözüm bölgesinin karmaşık ve düzensiz bir geometriye sahip olması, karışık ve süreksiz sınır koşullarının olması, yüklemenin düzgün yayılı olmaması, malzemenin heterojen

olması, doğrusal olmayan malzeme davranışı olması gibi nedenlerle normalde çözümü zor olan problemlerde sonlu elemanlar yöntemi ile kolaylıkla çözüm bulunabilmektedir.

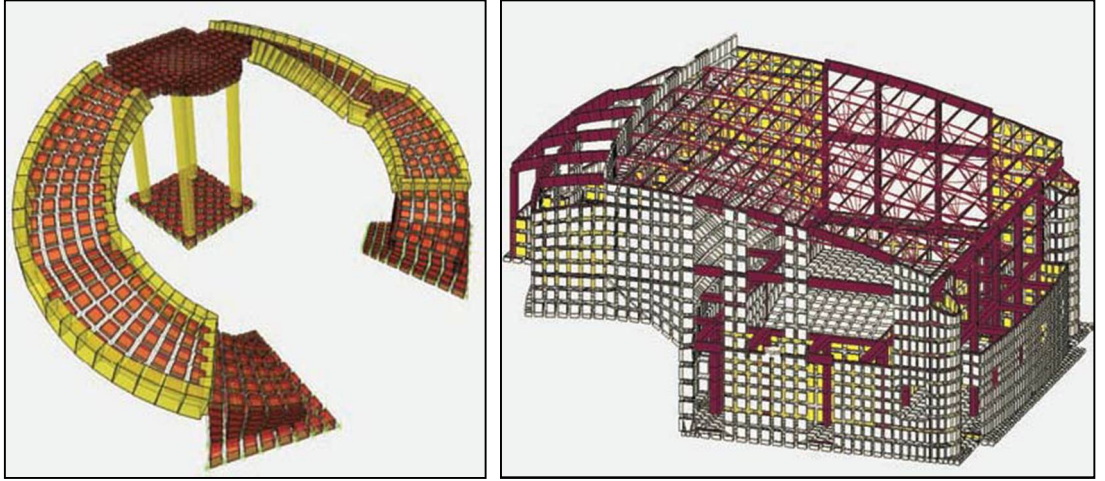
Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Bu fiziksel sistem, alt parçalara ayrılabilen, malzeme özelliklerine ve uygulanabilir sınır şartlarına sahip bir sistemdir. Bu yöntemde esas olarak, çözüm aranan yapı veya bölge, çok sayıda küçük sonlu elemanlara bölünür. Bir, iki veya üç boyutlu olabilen bu elemanlar düğüm noktası adı verilen noktalarla birbirlerine bağlanır (Şekil 2.31). Yapılan bu işlemlere ayrıklaştırma denmektedir. Şekil 2.32’de düzensiz ve karmaşık bir geometriye sahip bir levhanın üçgen sonlu elemanlarla ayrıklaştırılması görülmektedir. Bu modelin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü sonucunda aranan büyüklüklerin düğüm noktalarındaki sayısal değerleri (düğüm nokta serbestlikleri) elde edilir. Bulunması istenen büyüklüğün eleman içindeki değişimi için problemin fiziği ile uyumlu şekil fonksiyonları seçilmektedir. Çözüm yapıp düğüm noktalarındaki bilinmeyenler elde edildikten sonra eleman içindeki değişim belirlenir. Bu işlemler sonlu eleman ağı içerisindeki her sonlu eleman için yapılır. Sonlu eleman ağı içinde davranışı iyi bir şekilde temsil eden fonksiyonlar yardımıyla oluşturulan elemanlara ait özellikler orijinal yapı için bir araya getirilir (Şekil 2.33). Böylece orijinal yapı için bulunması istenen büyüklük elde edilmiş olur.



Şekil 2.31. Bir, iki, üç boyutlu sonlu eleman örnekleri ve düğüm noktaları



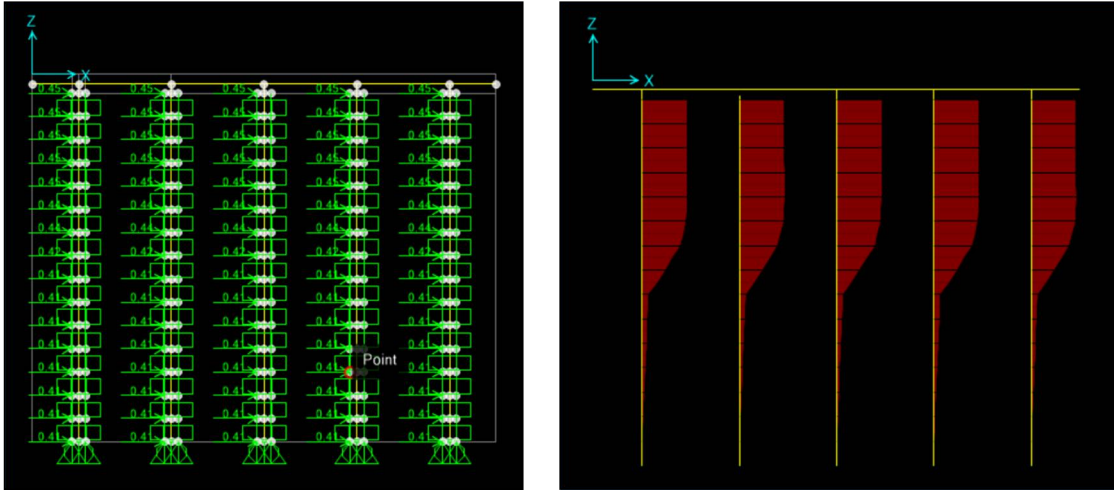
Şekil 2.32. Üçgen sonlu elemanlarla modelleme



Şekil 2.33. Sonlu eleman modelleme örnekleri (Fahjan, 2008)

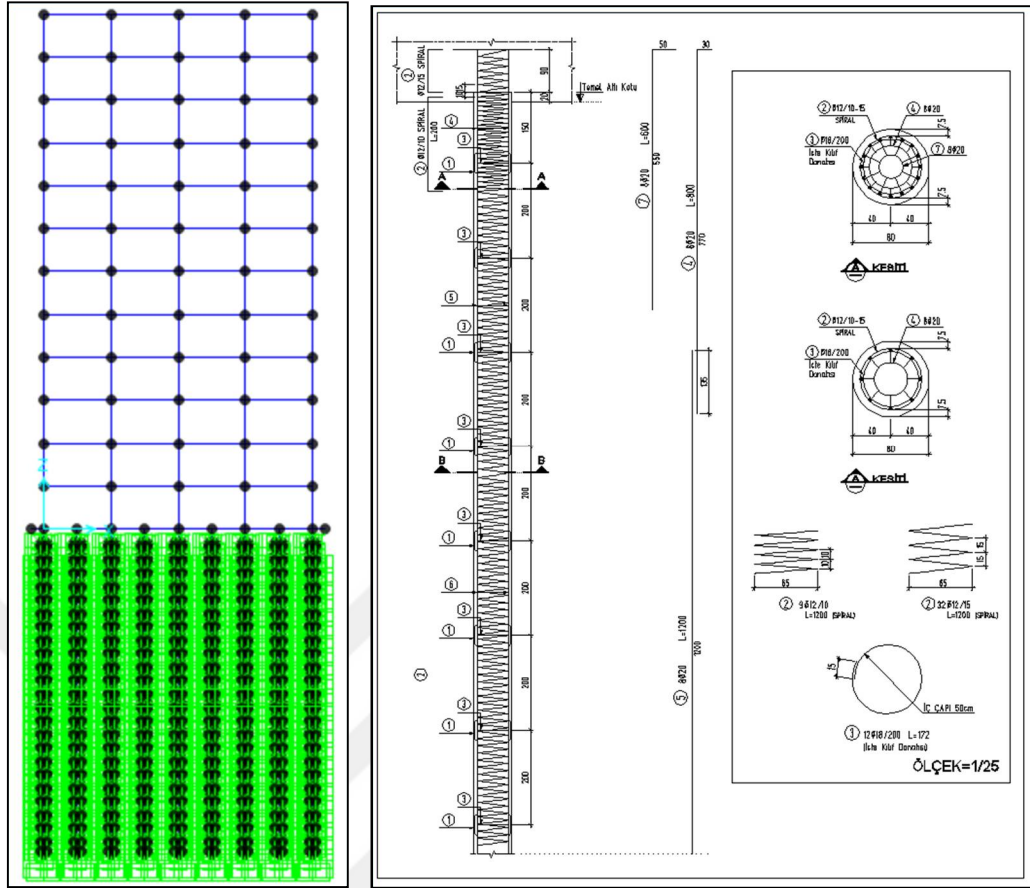
2.6. Kaynak Özetleri

Bildik ve ark. (2017), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de geçen yapı-kazık-zemin etkileşimi analiz yöntemini ele almışlardır. Çalışmada, İstanbul’da yapılması planlanan bir caminin kazık sisteminin kinematik etkileşim analizi Yöntem-III ile yapılmıştır. Binanın oturacağı zeminde farklı kalınlıklarda zayıf kil birimler yer almakta ve kil zemin altında ayrılmış kaya bulunmaktadır. Kazıklar API (Amerika Petrol Enstitüsü) yöntemi ile statik olarak analiz edilip, statik hesaplamalar sonucu elde edilen kazık karelağı için dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analizlerde kullanılan deprem verileri parsele özel olarak elde edilmiştir. Tek boyutlu doğrusal olmayan zemin davranış analizleri *DEEPSOIL* programı ile yapılmış olup, p-y yayları literatürde mevcut olan yöntemlerle belirlenmiştir. SAP2000 yazılımı kullanılarak zemin-kazık kinematik etkileşim analizi yapılmıştır (Şekil 2.34). Analizler sonucunda, kazık elemanların kil-zayıf kaya geçiş bölgelerinde zorlandığı, sahaya özel ve sahaya uyumlu deprem verisi kullanılması gerektiği, zayıf zemin tabaka kalınlığının artmasıyla kazık başlıklarındaki rölatif deplasmanların arttığı, dinamik davranışın statik davranıştan farklı olduğu, zayıf zeminin bulunduğu yerdeki kazık iç kuvvetlerin daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.



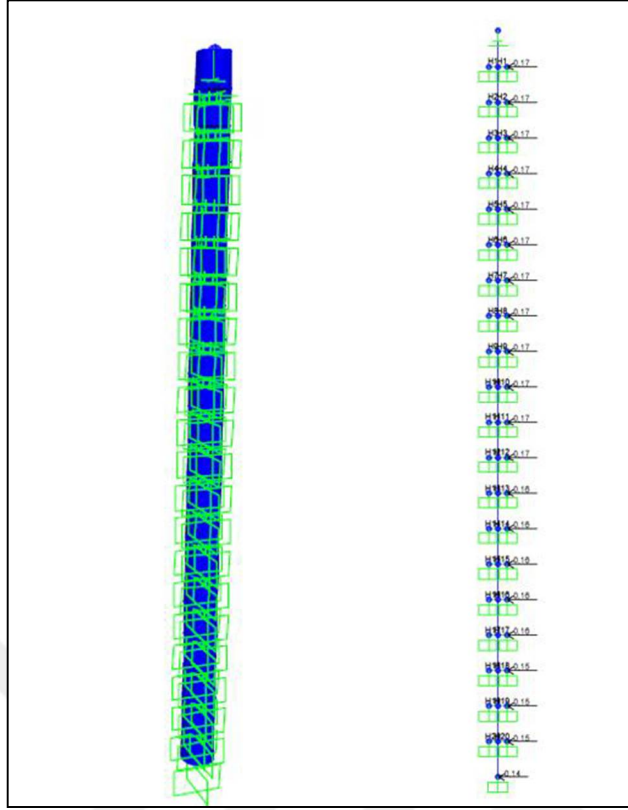
Şekil 2.34. Zemin-kazık-yapı kinematik etkileşim modeli ve kazık momentleri (Bildik ve ark., 2017)

Keskin (2018), tez çalışmasında, TBDY (2018)'de yer alan Yöntem-III kazık-zemin-yapı etkileşim analizi ve tek boyutlu zemin davranış analizi hesap yöntemlerini kullanarak iki ayrı zeminde kazık tasarımı yapmıştır. Kazık düğüm noktalarında kazık ile zemin ortamı arasında göreceli kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, API'da (Amerikan Petrol Enstitüsü) yer alan yöntemle göre doğrusal olmayan P-y, T-z ve Q-Z yayları ile modellenmiştir. 11 adet deprem verisi için, *DEEPSOIL* yazılımı kullanılarak zemin davranış analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda zemin tepki spektrumları ve zemin toplam yerdeğiştirmeleri bulunmuştur. Elde edilen veriler kullanılarak yapı-kazık-zemin sistemi *SAP2000* yazılımında modellenmiştir (Şekil 2.35). Kinematik etkileşim analizi ve eylemsizlik etkileşim analizi sonucunda iki ayrı zemin için TBDY (2018) esasları doğrultusunda kazık tasarımı yapılmıştır. İki farklı zemin türü için yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılarak anakayada tanımlanan deprem hareketinden oluşan ve zemin ortamı içinde yayılan deprem dalgalarının kazıkları etkilediği ve kazıkların bina temelinde oluşan etkin temel hareketini de gerek genlik gerekse frekans içeriği bakımından önemli değişikliğe uğratabildiği sonucuna varılmıştır.



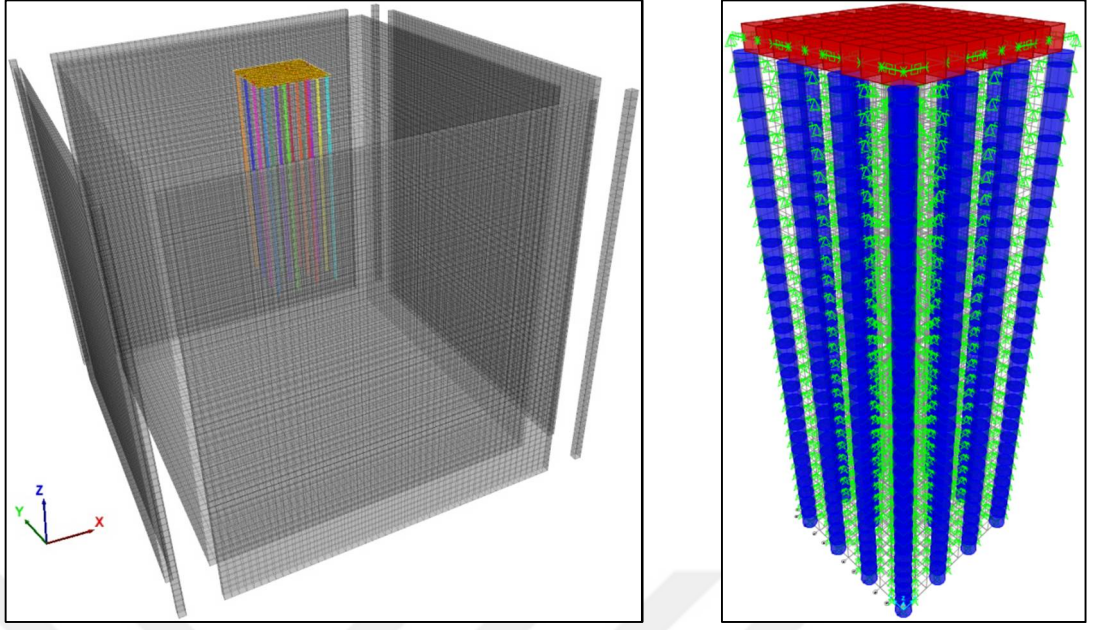
Şekil 2.35. Kazık-zemin-yapı analiz modeli ve kazık tasarımı (Keskin, 2018)

Naiboğlu (2019), tez çalışmasında yapı-zemin-kazık etkileşimini TBDY (2018)'de önerilen Yöntem-III'e göre incelenmiştir. Zemin ve kazık arasındaki kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi nonlinear yaylarla modellenmiş olup API'da yer alan yöntem kullanılmıştır. Farklı kum ve kil zemin örnekleri için zemin davranış analizleri zaman tanım alanında tek boyutlu olarak yapılmış olup farklı deprem verilerine göre toplam yerdeğiştirmeler bulunmuştur. Nonlinear yaylar ve toplam yerdeğiştirmeler kullanılarak başlıksız (konsol çalışan) tekil kazık için yapı-zemin-kazık modeli oluşturulmuş ve modele nonlinear itme analizi yapılmıştır (Şekil 2.36). Sonuç olarak, analiz yapılan koşullar altında, dinamik etkiler nedeniyle oluşan deplasmanların önemli mertebelerde arttığı, kil zeminlerde kohezyonun artmasıyla birlikte oluşan kazık deformasyonunun azaldığı, deprem düzeyinin DD2'den DD1'e çıkması durumunda kesit tesirlerinin iki kat mertebesinde arttığı görülmüştür.



Şekil 2.36. Kazık-zemin-yapı analiz modeli (Naiboğlu, 2019)

Erginağ ve ark (2018), çalışmalarında, çok tabakalı derin alüvyon zeminde, rijit başlıkla birbirine bağlı bir kazık grubunun, zaman tanım alanında kinematik etkileşim analizleri için iki farklı hesap yöntemiyle yapmıştır. İlk yöntemde kazık grubu davranışı için zeminin üç boyutlu sürekli ortam olarak temsil edildiği sonlu farklar yaklaşımından yararlanılmıştır. İkinci yöntemde, zeminin doğrusal olmayan p-y ile ele alındığı sonlu elemanlar hesap yönetimi kullanılmıştır (Şekil 2.37). Her iki yaklaşımda kazıklar çubuk eleman olarak modellenmiştir. P-y yaylarının kullanıldığı yöntemde; p-y eğrilerinde grup etkisi göz önüne alınmıştır. Her iki yöntemin analiz sonuçları, dış köşedeki ve merkez kazıklarda elde edilen değerler üzerinden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkından dolayı kazık eğilme momentlerinde artış iki yaklaşımda da gözlemlenmiştir. En yüksek eğilme momentleri kazık grubundaki köşe kazıklarda ve genellikle başlık seviyesinde meydana gelmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar analizi ile bulunan eğilme momentlerinin sonlu farklar analizinde bulunanlardan daha yüksek olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.37. Kazık-zemin-yapı sonlu farklar ve sonlu eleman analiz modeli (Erginağ ve ark., 2018)

Yiğit (2019), tez çalışmasında, zemin-kazık etkileşimini, TBDY (2018)'de yer alan Yöntem-III'ün hesap adımlarını uygulayarak irdemiştir. Yeraltı su seviyesi altındaki kum, kil ve tabakalı zeminlerde tekil kazık için, kil zeminde ise kazık grubu için analizler yapılmıştır. Analizlerde kazık çapı, kazık boyu, kazık elastisite modülü ve zemin türü değişken parametreler olarak seçilmiştir. Kazık grubu analizlerinde grup etkisi göz önüne alınmıştır. Zemin davranış analizleri *DEEPSOIL*, kinematik etkileşim analizleri ise *ANSYS* yazılımıyla yapılmıştır. Sonuç olarak, kazık boyu, kazık çapı ve kazık elastisite modülü arttıkça kazık moment değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkının doğrudan kazık iç kuvvetlerine etki ettiği görülmüştür. Kazıkların grup olarak analiz edilmesi durumunda tekil kazıklara göre kinematik etkilerin azaldığı gözlemlenmiştir.



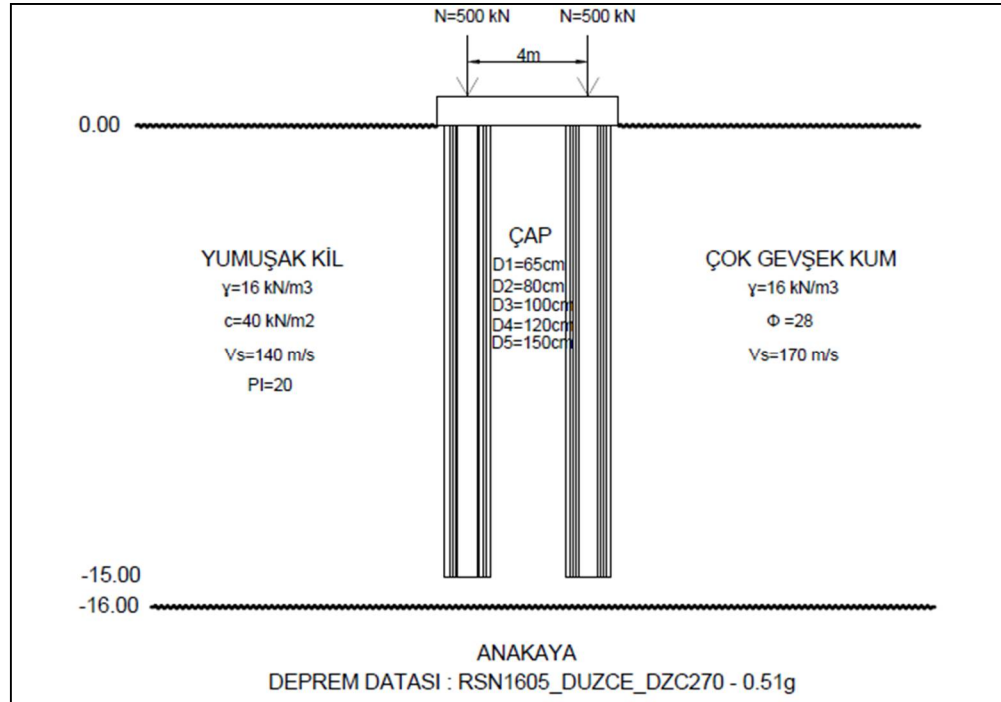
3. MATERİYAL VE METOT

Tez kapsamında, farklı kazık çaplarının, farklı kazık uzunluklarının, kazık grubunun, farklı deprem datalarının, farklı anakaya derinliklerinin, farklı kil zeminlerin ve farklı kum zeminlerin, sürtünme kazıklarından oluşan kazıklı temel davranışına etkisi incelenmiştir. Bu bölümde davranış analizleri yapılırken kullanılan zemin türleri, kazıklı temel modeli ve yazılımlardan bahsedilecektir.

3.1. Materyal

3.1.1. Kazık Çapı Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

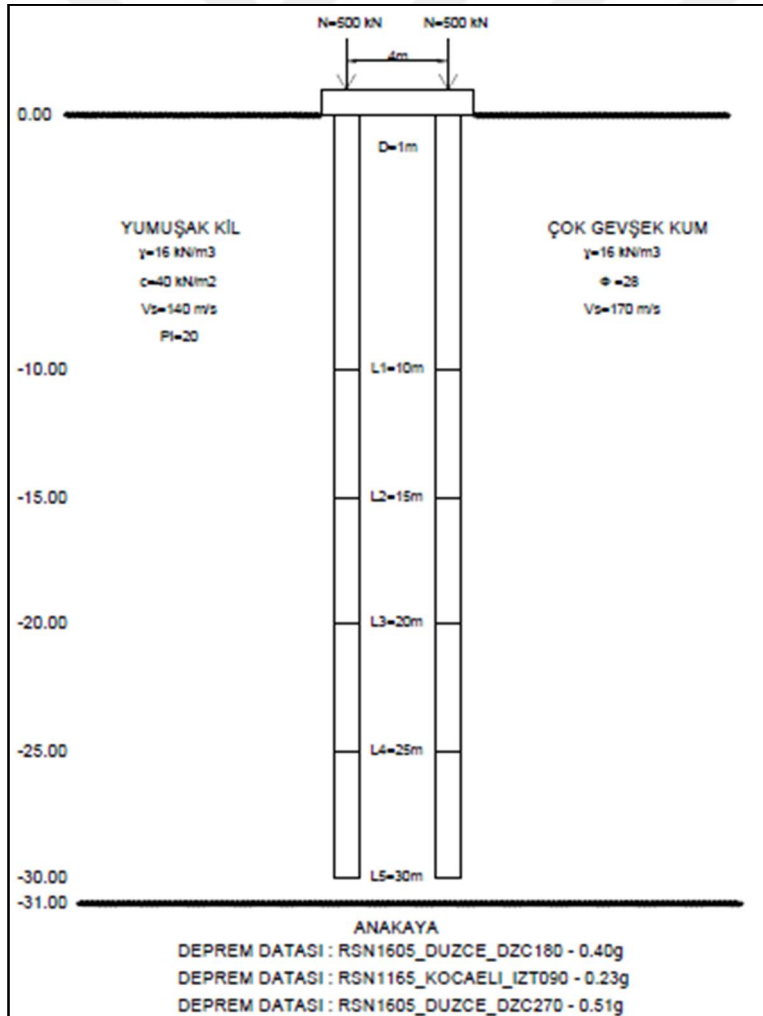
Farklı kazık çaplarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-1) Şekil 3.1’de verilmiştir. Anakaya, -16.00 kotundadır. İki adet 15m uzunluğunda sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye temele, kazıkların doğrultusunda 500 kN’luk kolon yükleri etki etmektedir. Kazıklar arası mesafe 4 metredir. Yumuşak kil zeminde 65cm, 80cm, 100cm, 120cm ve 150cm çapa sahip kazıklar, çok gevşek kum zeminde 65cm, 80cm ve 100cm çapa sahip kazıklar kullanılmış olup her bir çap değeri için ayrı ayrı olarak *RSN1605_DUZCE_DZC270* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Çap etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-1)

3.1.2. Kazık Uzunluğu Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

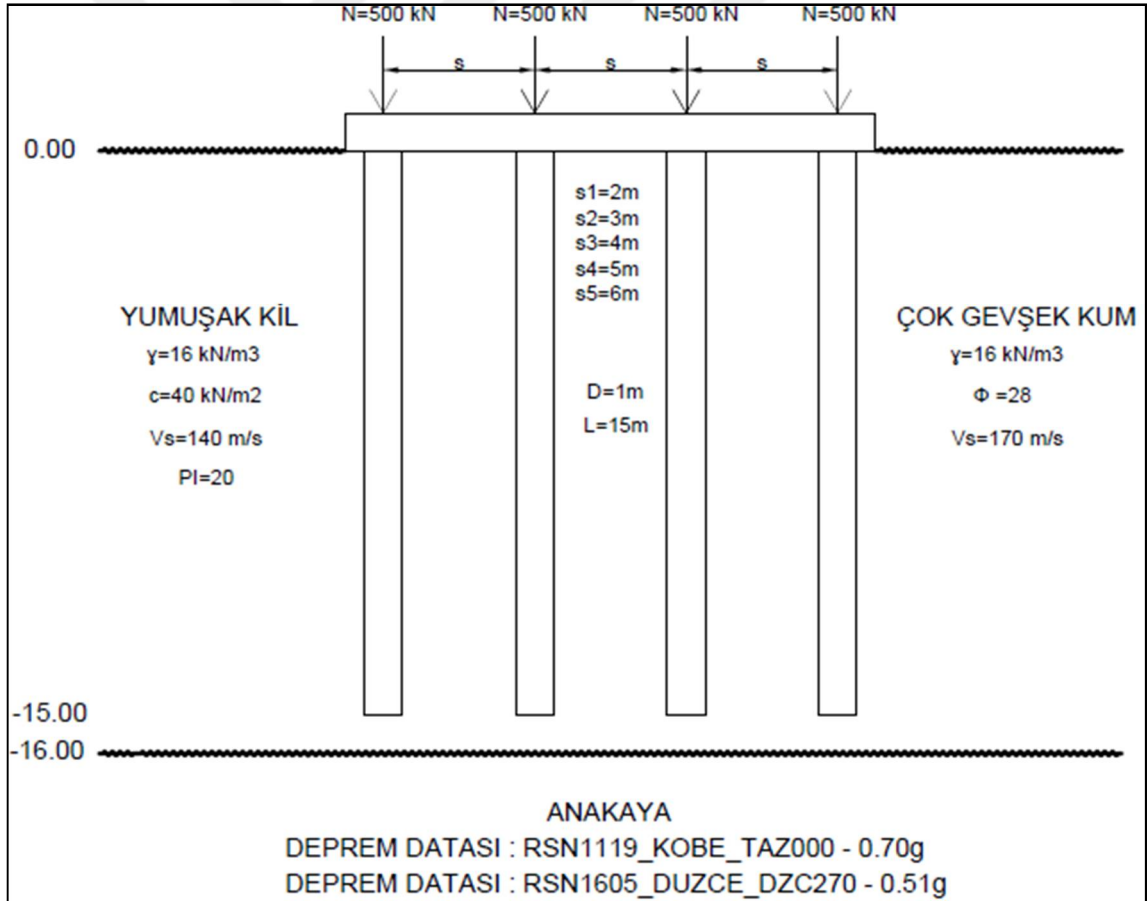
Farklı kazık uzunluklarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-2) Şekil 3.2’de verilmiştir. Anakaya, -31.00 kotundadır. İki adet 1m çapında sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN’luk kolon yükleri etki etmektedir. Kazıklar arası mesafe 4 metredir. Yumuşak kil zeminde 10m, 15m, 20m, 25m ve 30m uzunluğa sahip kazıklar kullanılmış olup her biri için ayrı ayrı olarak *RSN1605_DUZCE_DZC180* ve *RSN1165_KOCAELI_IZT090* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır. Çok gevşek kum zeminde ise 10m, 15m, 20m ve 25m uzunluğa sahip kazıklar kullanılmış olup her biri için ayrı ayrı olarak *RSN1605_DUZCE_DZC270* deprem datası etkisi altında davranış analizi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Uzunluk etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-2)

3.1.3. Grup Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

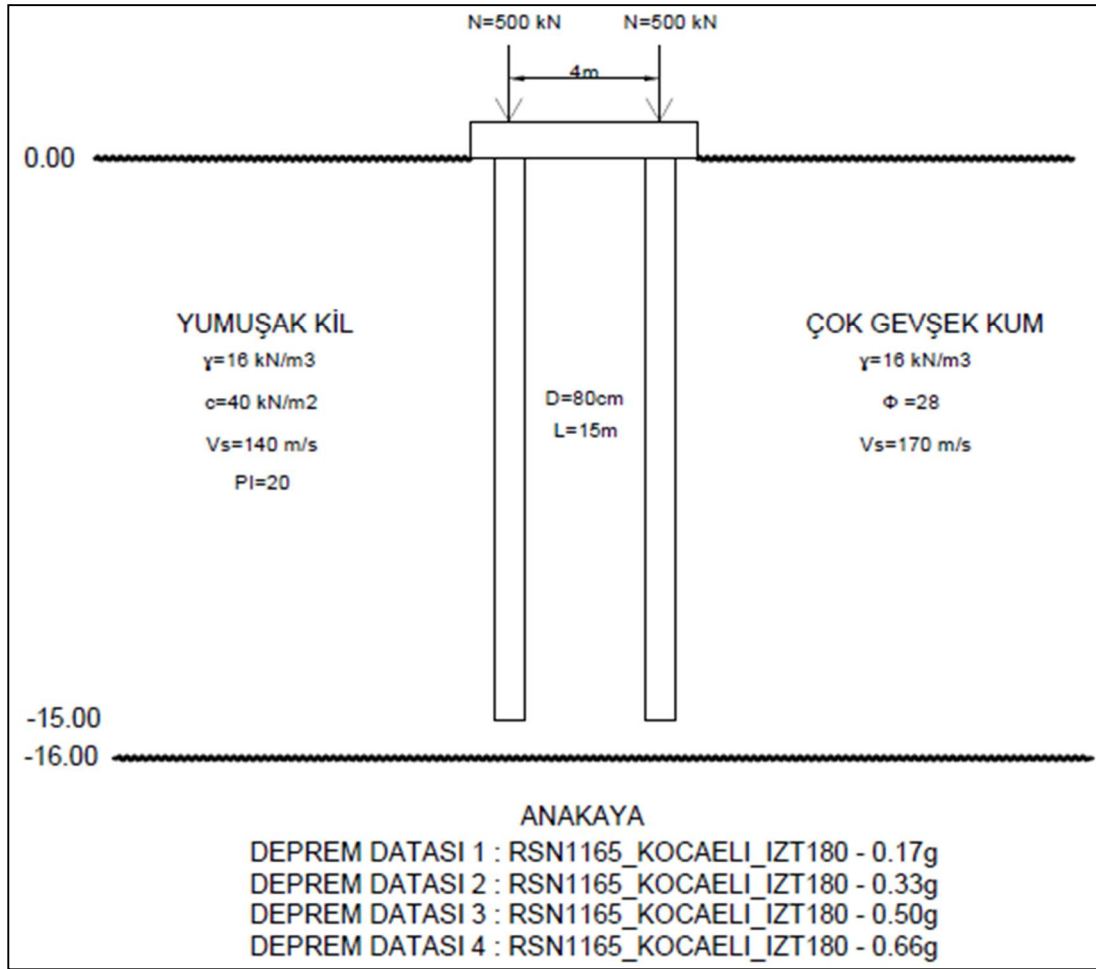
Farklı kazık aralıklarıyla oluşan grup etkisinin kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-3) Şekil 3.3'te verilmiştir. Anakaya, -16.00 kotundadır. Dört adet 1m çapında ve 15m uzunluğunda sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN'luk kolon yükleri etki etmektedir. Yumuşak kil zeminde 2m, 3m, 4m, 5m ve 6m kazık aralıklarına sahip kazıklar kullanılmış olup her biri için ayrı ayrı olarak *RSN1119_KOBE_TAZ000* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranışı analizi yapılmıştır. Çok gevşek kum zeminde ise 2m, 3m, 4m, 5m ve 6m kazık aralıklarına sahip kazıklar kullanılmış olup her biri için ayrı ayrı olarak *RSN105_DUZCE_DZC270* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Grup etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-3)

3.1.4. Deprem Datası Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

Farklı deprem datalarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-4) Şekil 3.4'te verilmiştir. Anakaya, -16.00 kotundadır. 80cm çapında, 15m uzunluğunda, 4m aralıklı iki adet sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN'luk kolon yükleri etki etmektedir. Yumuşak kil ve çok gevşek kum zeminlerde *RSN1165_KOCAELI_IZT180* deprem datasının farklı *PGA* değerlerine (0.33g, 0.50g, 0.66g) ölçeklendirilmiş deprem datalarının her biri için ayrı ayrı olarak kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.

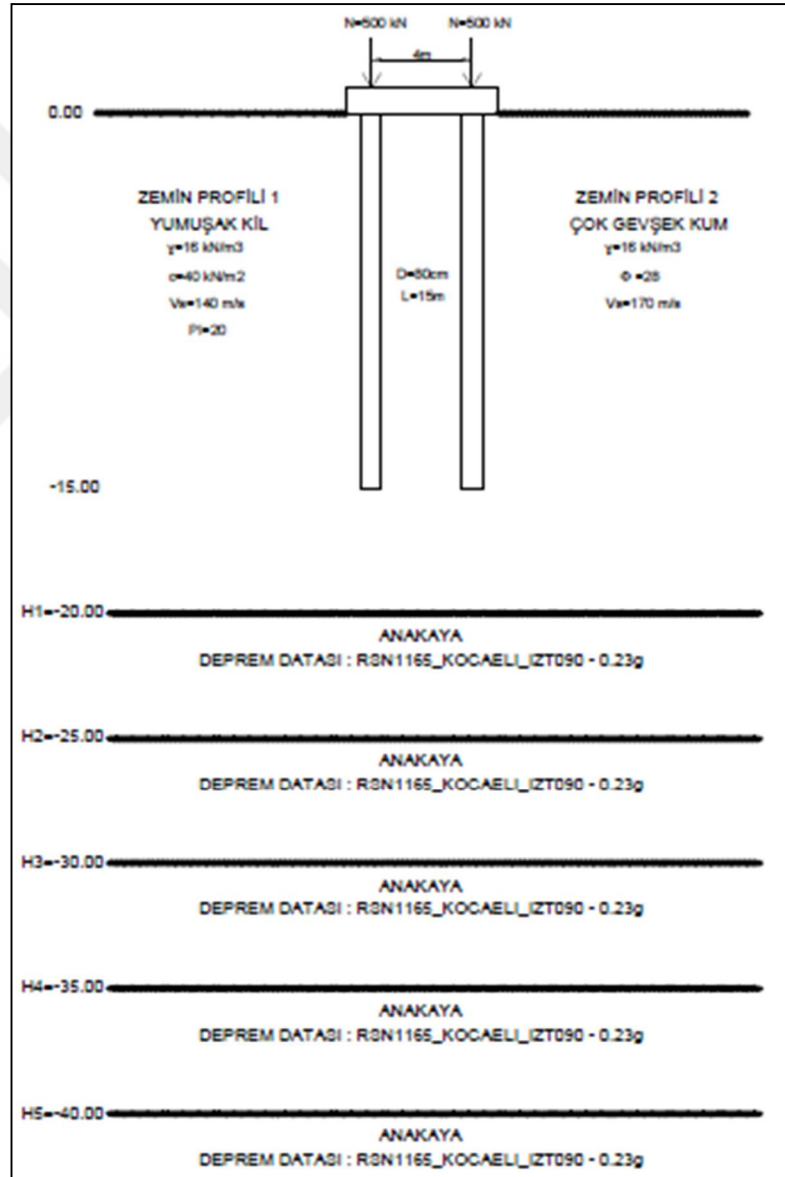


Şekil 3.4. Deprem datası etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-4)

3.1.5. Anakaya Derinliği Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

Farklı anakaya derinliklerinin kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-5) Şekil 3.5'te verilmiştir. 80cm

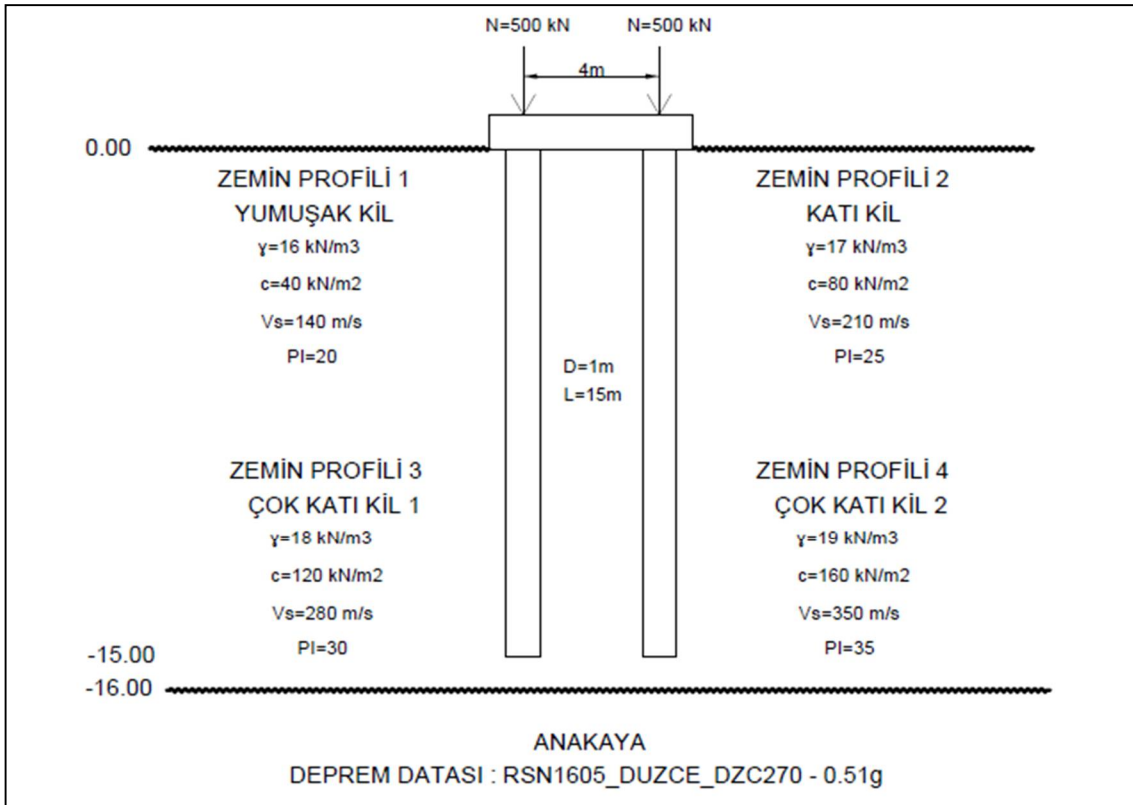
apında, 15m uzunluğunda, 4m aralıklı iki adet sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN'luk kolon yükleri etki etmektedir. Yumuşak kil zeminde, -25, -30, -35 ve -40 kotlarındaki anakaya derinliklerinde ayrı ayrı olarak *RSN1165_KOCAELI_IZT090* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır. Çok gevşek kum zeminde ise, -20, -25, -30, -35 ve -40 kotlarındaki anakaya derinliklerinde ayrı ayrı olarak *RSN1165_KOCAELI_IZT090* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.



şekil 3.5. Anakaya derinliği etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-5)

3.1.6. Farklı Kil Zemin Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

Farklı kil zemin türlerinin kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-6) Şekil 3.6'da verilmiştir. Anakaya -16.00 kotundadır. 1m çapında, 15m uzunluğunda, 4m aralıklı iki adet sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN'luk kolon yükleri etki etmektedir. Farklı özelliklere sahip dört adet kil zeminde ayrı ayrı olarak *RSN1605_DUZCE_DZC270* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.

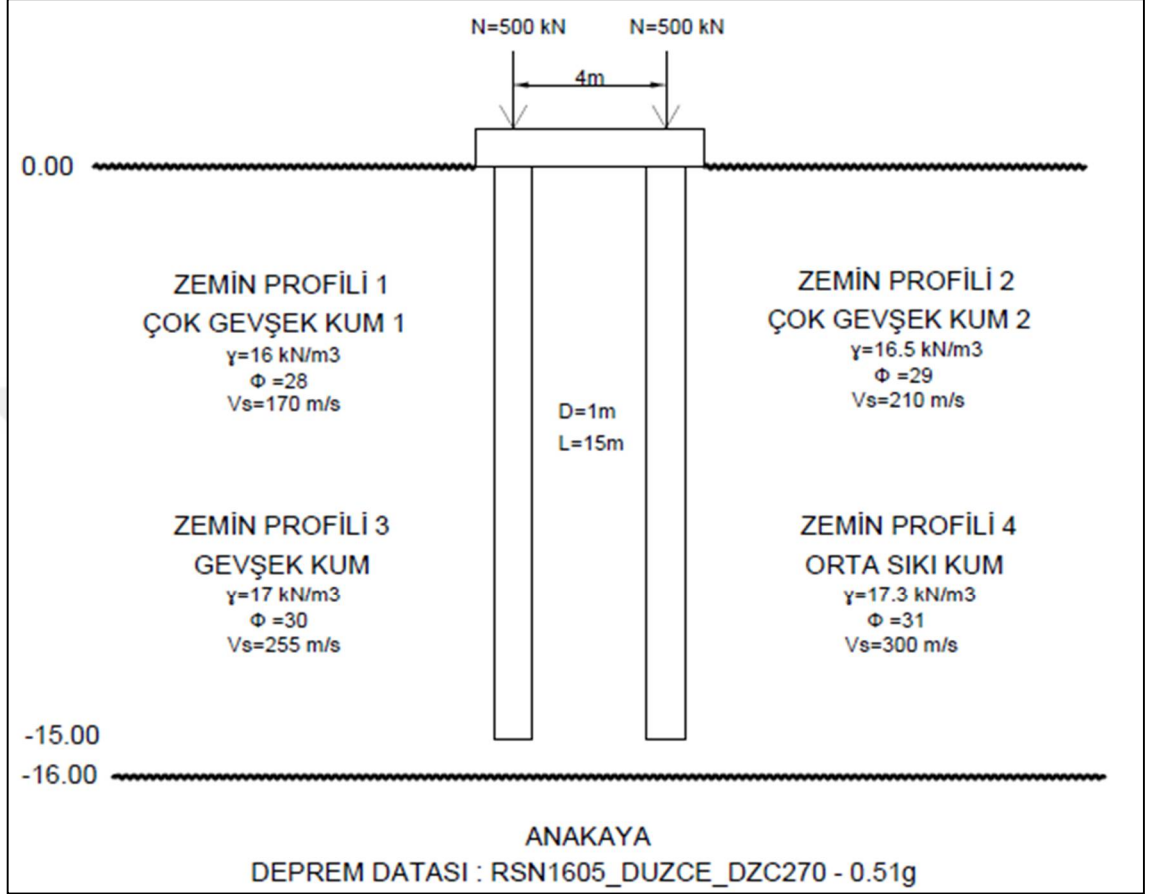


Şekil 3.6. Kil zemin etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-6)

3.1.7. Farklı Kum Zemin Etkisi İçin Kazıklı Temel Modeli ve Zemin Profili

Farklı kum zemin türlerinin kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için kullanılan zemin türleri ve kazıklı temel modeli (Model-7) Şekil 3.7'de verilmiştir. Anakaya -16.00 kotundadır. 1m çapında, 15m uzunluğunda, 4m aralıklı iki adet sürtünme kazığı ve kiriş radye temelden oluşan kazıklı temel modeli ele alınmıştır. Radye teme, kazıkların doğrultusunda 500 kN'luk kolon yükleri etki etmektedir.

Farklı özelliklere sahip dört adet kum zeminde ayrı ayrı olarak *RSN1605_DUZCE_DZC270* deprem datası etkisi altında kazıklı temel davranış analizi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Kum zemin etkisi analizi için zemin profili ve kazıklı temel modeli (Model-7)

3.2. Metot

3.2.1. Zemin Yay Özelliklerinin Bulunması

Zemin yay özelliklerinin bulunması geliştirilmiş bazı yazılımlar bulunmaktadır. *ALLPile*, *LPILE* bunlardan bazılarıdır. Bu yazılımlarda, literatürde bulunan yöntemler kullanılarak, farklı durumlar için kazık davranış analizleri yapılabilmekte ve yük transfer eğrileri çizilebilmektedir.

Bu tez kapsamında, zemin yay özellikleri, ikinci bölümde belirtilen yöntem ve formüllerin doğrudan kullanılmasının gösterilmesi amacıyla *MS Excel* yazılımı kullanılarak bulunmuştur.

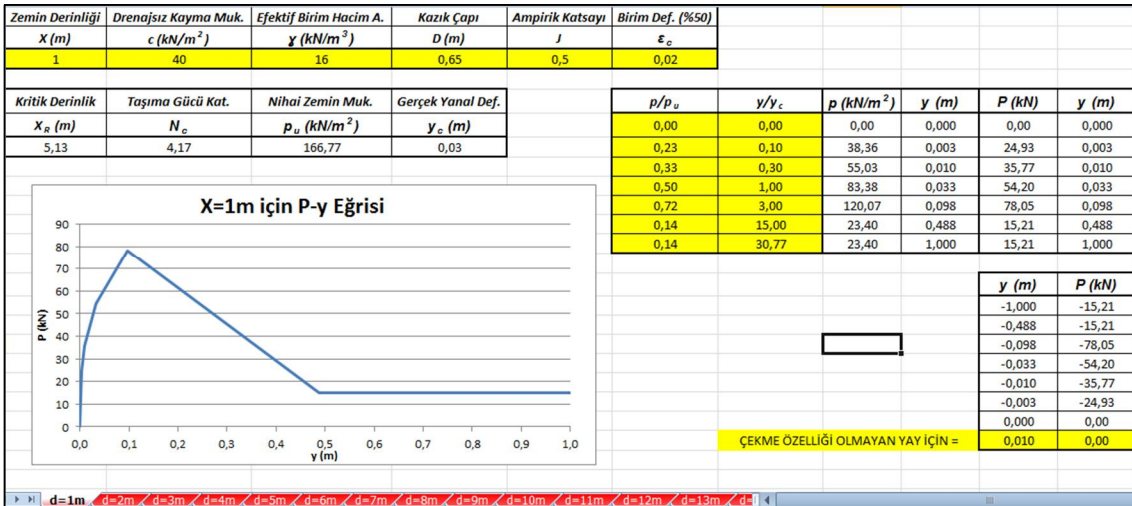
3.2.1.1. P-y Yay Özelliklerinin Bulunması

P-y yay özellikleri bulunması için yapılan işlemler ve izlenen yol şöyledir:

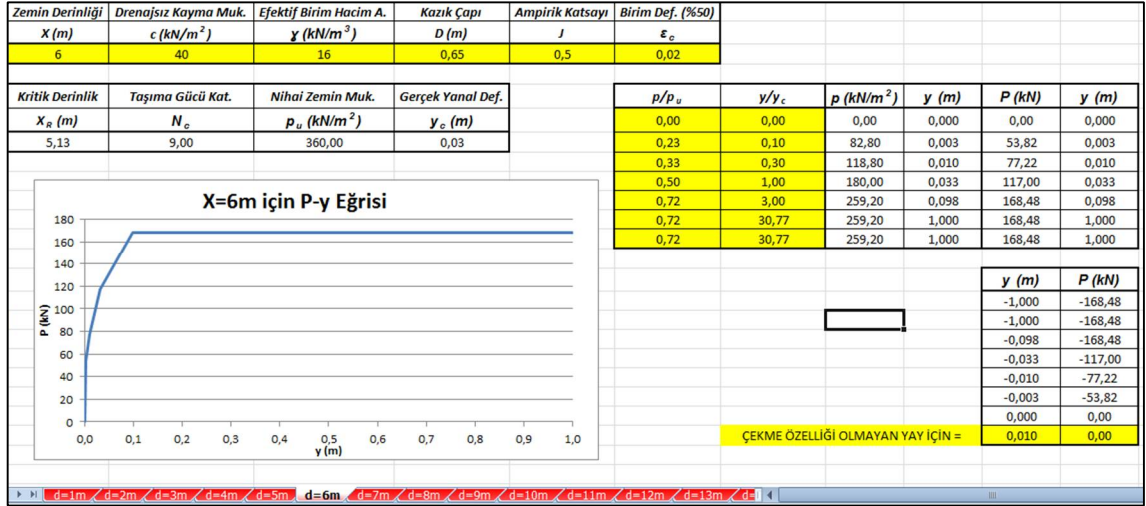
1) Kum ve kil zeminlerde, tekrarlı yükleme durumu için yay özellikleri bulunmuştur.

2) Zemin-kazık modeli, kazık uzunluğu boyunca birer metreye bölünmüştür. Her derinlik için ayrı ayrı P-y eğrileri elde edilmiştir.

3) Kil zemin için zemin derinliği, drenajsız kayma mukavemeti, efektif birim hacim ağırlık ve kazık çapı belirlenmiştir. J ampirik katsayısı tüm killeri için 0.5 olarak alınmıştır. Bu veriler ve (2.13) formülü kullanılarak kritik derinlik X_R hesaplanmıştır. Kritik derinliğin, yay özelliği bulunmak istenen derinlik olan X 'ten büyük olması durumunda (2.11) formülü kullanılarak zemin yanal taşıma gücü p_u bulunmuştur. Ters durumda ise (2.12) formülü kullanılarak zemin yanal taşıma gücü bulunmuştur. ε_c (ε_{50}) deformasyonu için Çizelge 2.4'teki değerler kullanılmıştır. ε_c (ε_{50}) deformasyonuna tekabül eden y_c (y_{50}) deformasyonu (2.16) formülü kullanılarak hesaplanmıştır. p ve y değerlerinin bulunması için, p_u , y_c ve Çizelge 2.3'teki p/p_u ve y/y_{50} verileri kullanılmıştır. p (kN/m^2) değerlerinin kazık çapı değeriyle çarpılmasıyla bulunan P (kN) değerleri ve y verileri kullanılarak eğri çizilmiştir. Farklı derinlikler için P-y eğrilerinin hesap modeli Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

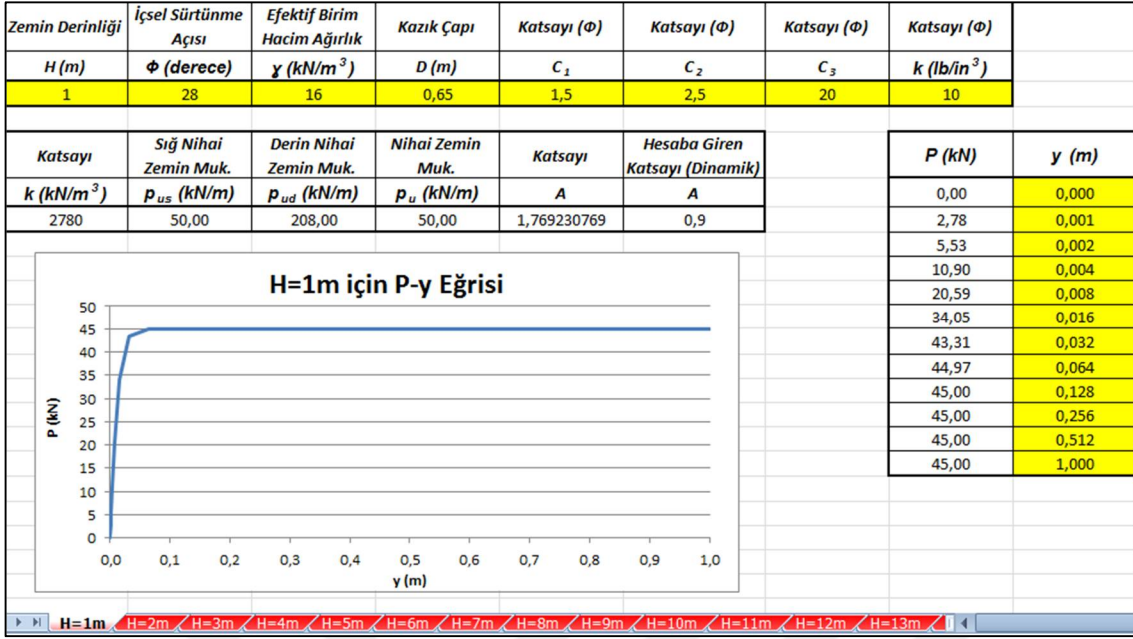


Şekil 3.8. Yumuşak kil zeminde $X=1m$ için P-y eğrisi ($X < X_R$)

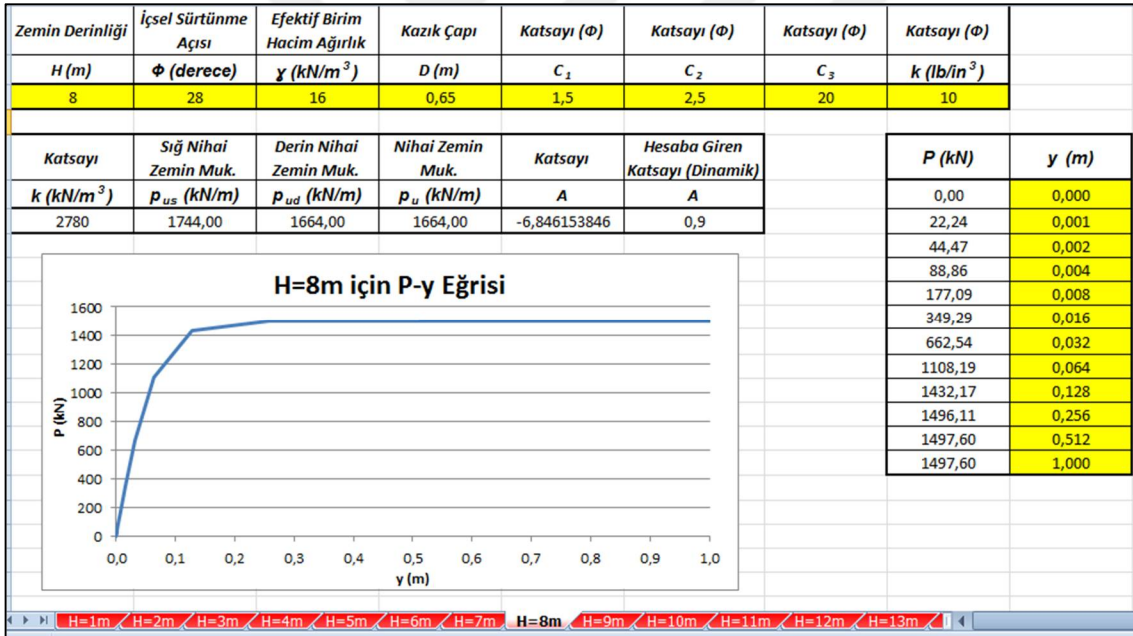
Şekil 3.9. Yumuşak kil zeminde $X=6m$ için P-y eğrisi ($X > X_R$)

4) Kum zemin için zemin derinliği, içsel sürtünme açısı, efektif birim hacim ağırlık ve kazık çapı belirlenmiştir. İçsel sürtünme açısı ve Şekil 2.10'daki grafik kullanılarak C_1 , C_2 ve C_3 katsayıları bulunmuştur. (2.6) ve (2.7) formülleri kullanılarak zeminin sıg yanal taşıma gücü p_{us} ve derin yanal taşıma gücü p_{ud} hesaplanmıştır. Zemin yanal taşıma gücü p_u olarak bunlardan küçük olanı alınmıştır. İçsel Sürtünme açısı ve Şekil 2.12'deki grafik kullanılarak k katsayısı elde edilmiştir. A katsayısı devamlı olarak 0.9 alınmıştır. Elde edilen tüm veriler kullanılarak (2.9) formülünde yerine konulmuş ve farklı y değerleri için P değerleri bulunmuştur. P ve y değerleri kullanılarak P-y eğrisi çizilmiştir. Farklı derinlikler için P-y eğrilerinin hesap modeli Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT



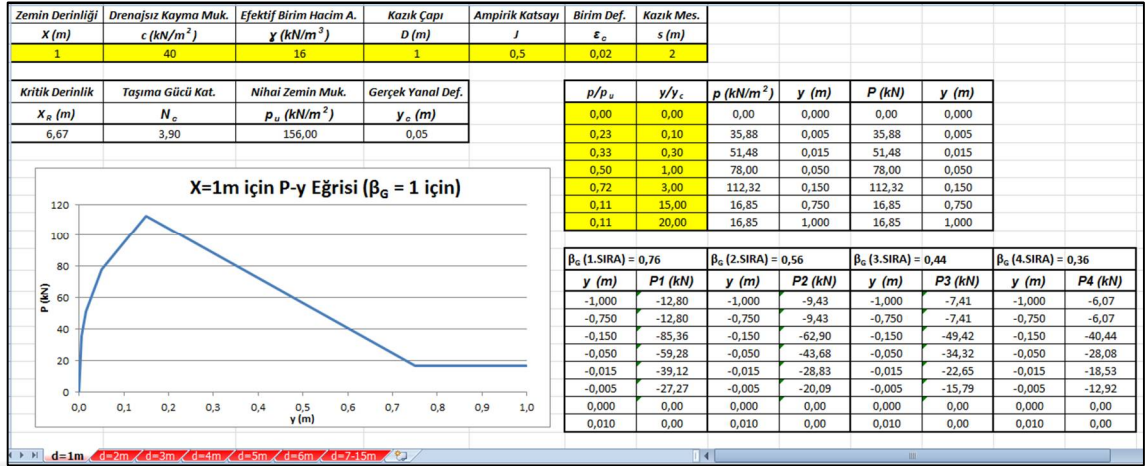
Şekil 3.10. Kum zeminde $H=1m$ için P-y eğrisi ($p_u=p_{us}$)



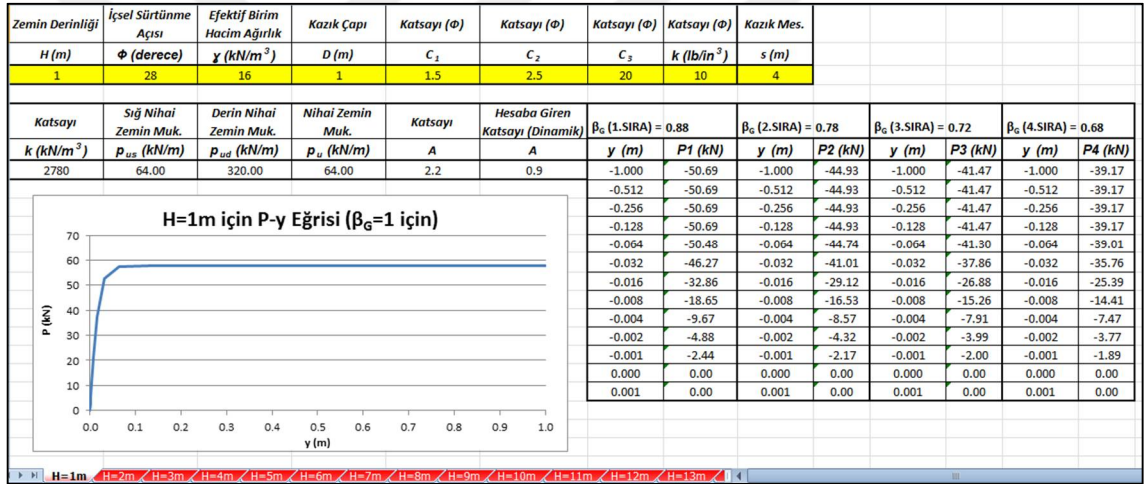
Şekil 3.11. Kum zeminde $H=8m$ için P-y eğrisi ($p_u=p_{ud}$)

5) Farklı kazık mesafelerinin (grup etkisi) kazıklı temel davranışına etkisi incelenirken (2.5) formülü kullanılarak kazık sırasına göre β_G azaltma katsayısı hesaplanmış ve yük transfer eğrilerinin kuvvet (P) eksenini bu katsayı ile çarpılarak azaltılmıştır. 2 m aralıklı 4 kazıklı kazık grubu için $X=1m$ derinlikteki kil zeminde, grup etkisi altında P-y eğrisi hesap modeli Şekil 3.12'de verilmiştir. Aynı kazık grubu için

$X=1m$ derinlikteki kum zeminde grup etkisi altında P-y eğrisi hesap modeli ise Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.12. Yumuşak kil zeminde $s=2m$ için grup etkisi altında $X=1m$ 'de P-y eğrisi ($X < X_R$)



Şekil 3.13. Kum zeminde $s=4m$ için grup etkisi altında $H=1m$ 'de P-y eğrisi

3.2.1.2. T-z Yay Özelliklerinin Bulunması

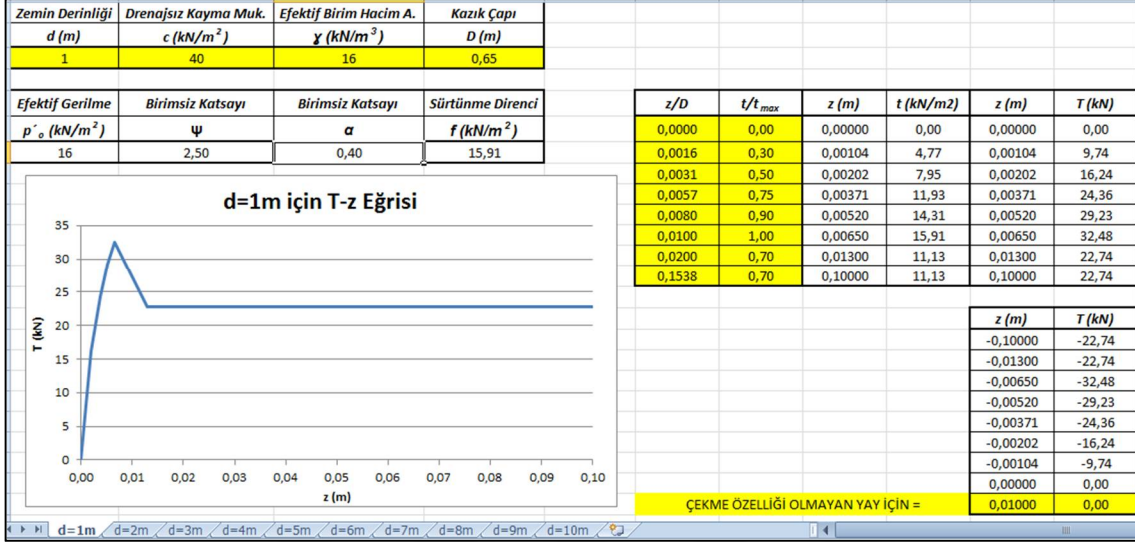
T-z yay özellikleri bulunması için yapılan işlemler ve izlenen yol şöyledir:

1) Zemin-kazık modeli, kazık uzunluğu boyunca birer metreye bölünmüştür. Her derinlik için ayrı ayrı T-z eğrileri elde edilmiştir.

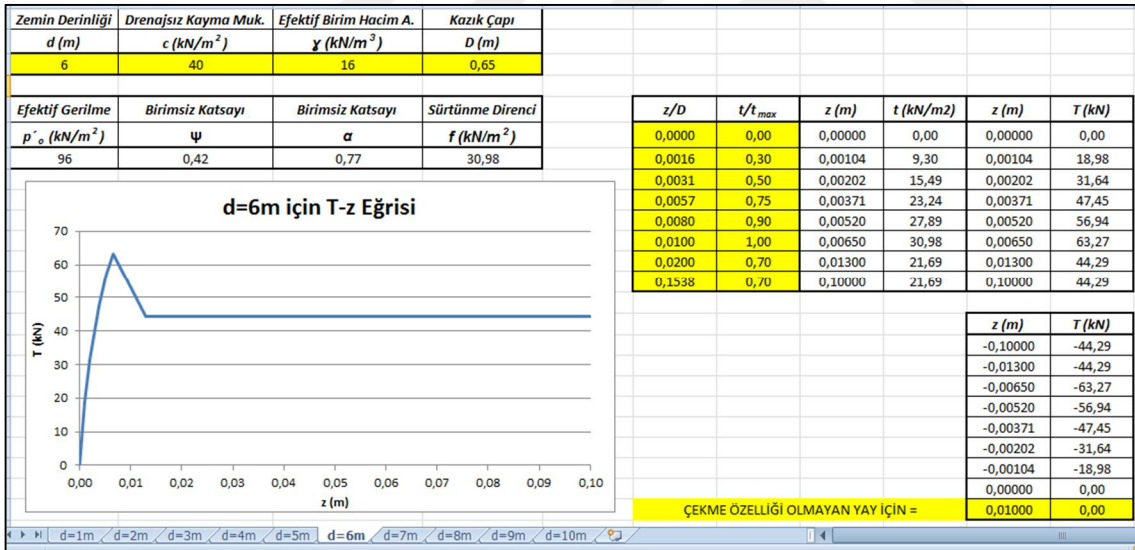
2) Kil zemin için zemin derinliği, drenajsız kayma mukavemeti, efektif birim hacim ağırlık ve kazık çapı belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak istenilen derinlikte efektif gerilme p_o bulunmuştur. Bu verilerle ve (2.24), (2.25), (2.26) ve (2.7) formülleri kullanılarak birim sürtünme direnci f_s bulunmuştur. t ve z değerlerinin bulunması için, f_s ($=t_{max}$), D ve Çizelge 2.8'deki z/D ve t/t_{max} ($t_{RES}=0.7t_{max}$) verileri kullanılmıştır. t

3. MATERYAL VE METOT

(kN/m^2) değerlerinin kazık çevresi değeriyle çarpılmasıyla bulunan T (kN) değerleri ve z değerleri kullanılarak T - z eğrileri çizilmiştir. Farklı derinlikler için T - z eğrilerinin hesap modeli Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.



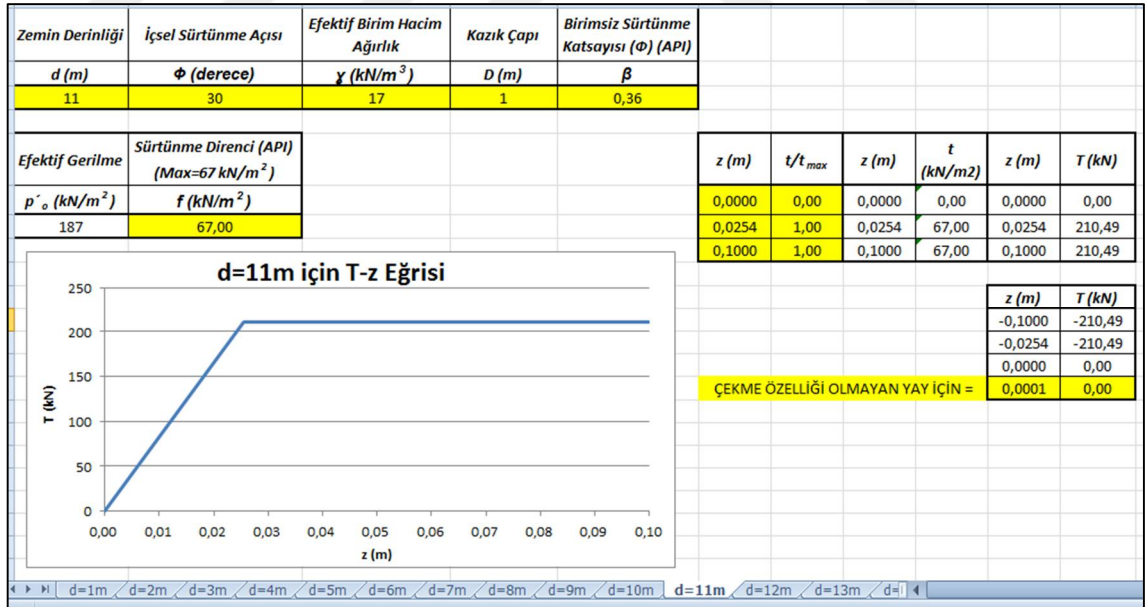
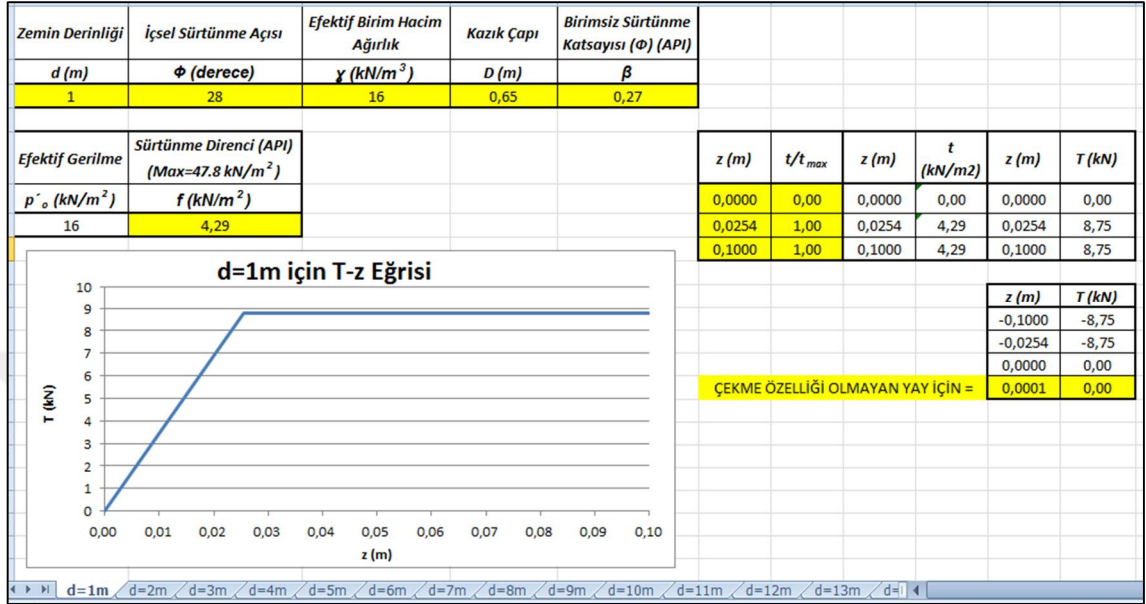
Şekil 3.14. Yumuşak kil zeminde $d=1m$ için T - z eğrisi ($\psi > I$)



Şekil 3.15. Yumuşak kil zeminde $d=6m$ için T - z eğrisi ($\psi < I$)

3) Kum zemin için zemin derinliği, içsel sürtünme açısı, efektif birim hacim ağırlık ve kazık çapı belirlenmiştir. İstenilen derinlikte efektif gerilme p_o bulunmuştur. β ($=K \tan \delta$) katsayısı bulunurken K katsayısı 1 alınmıştır ve δ sürtünme açısı olarak Çizelge 2.5'teki veriler kullanılmıştır. Tüm bu veriler ve (2.21) formülü kullanılarak birim sürtünme direnci f_s bulunmuştur. Hesaplanan f_s değerinin Çizelge 2.5'teki maksimum değeri aşması durumunda çizelgedeki değer kullanılmıştır. t değerlerinin

bulunması için, $f_s (=t_{max})$ ve Çizelge 2.7'deki t/t_{max} verileri kullanılmıştır. t değerlerinin kazık çevresi değeriyle çarpılmasıyla bulunan T (kN) değerleri ve Çizelge 2.7'deki z değerleri kullanılarak T-z eğrileri çizilmiştir. Farklı derinlikler için T-z eğrilerinin hesap modeli Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir.

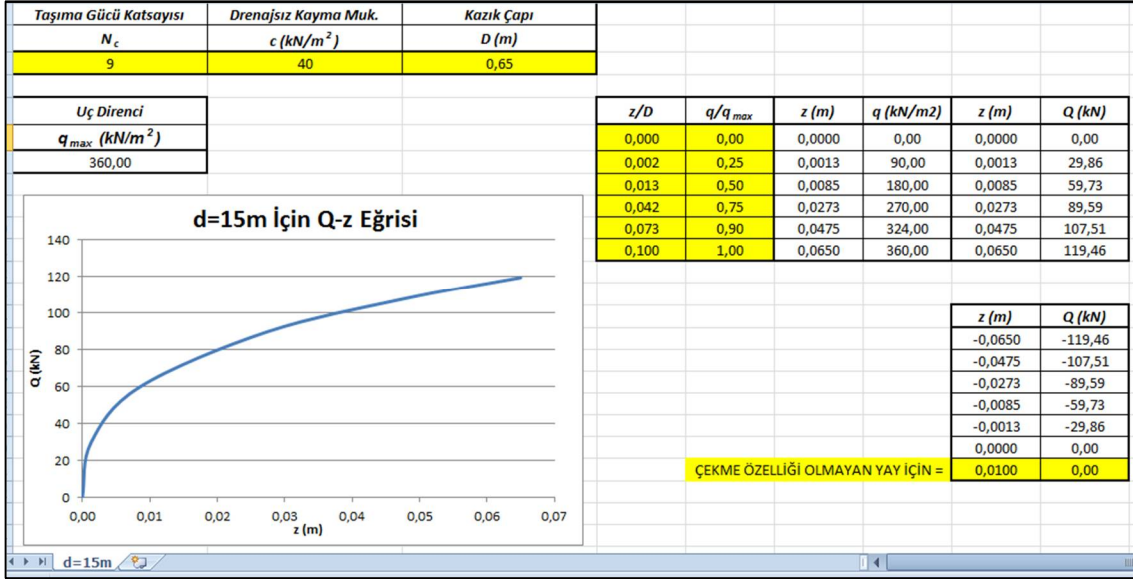


3.2.1.3. Q-Z Yay Özelliklerinin Bulunması

Q-Z yay özellikleri bulunması için yapılan işlemler ve izlenen yol şöyledir:

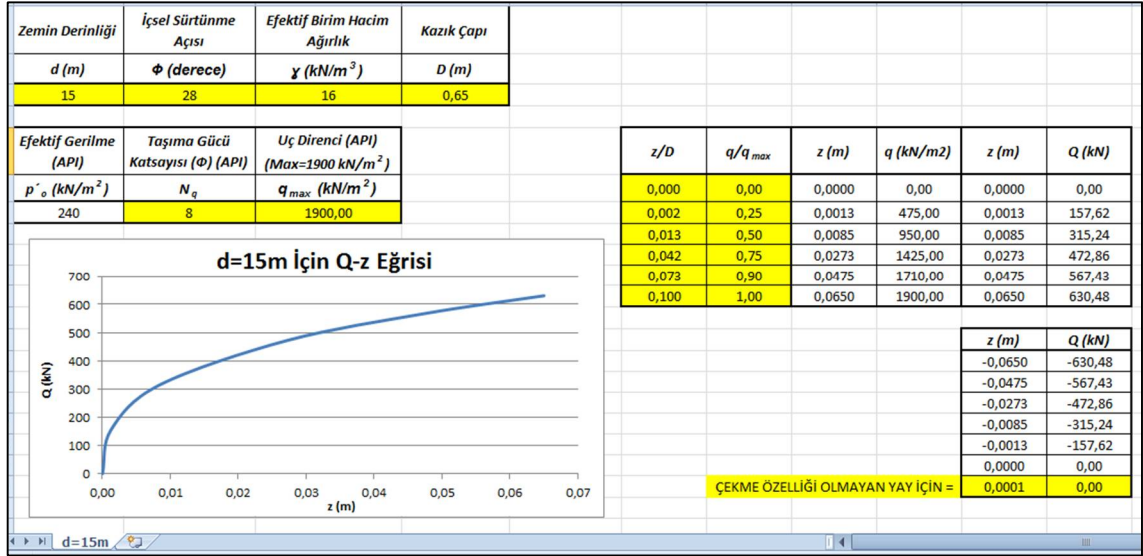
3. MATERYAL VE METOT

1) Kil zemin için drenajsız kayma mukavemeti ve kazık çapı belirlenmiştir. Bu veriler ve (2.28) formülü kullanılarak birim uç direnci q_u bulunmuştur. q ve z değerlerinin bulunması için, $q_u (=q_{max})$, D ve Çizelge 2.8'deki z/D ve Q/Q_{max} verileri kullanılmıştır. q (kN/m^2) değerlerinin kazık ucu kesit alanı ile çarpılmasıyla bulunan Q (kN) değerleri ve z değerleri kullanılarak Q-Z eğrileri çizilmiştir. Örnek bir Q-Z eğrisi hesap modeli Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Yumuşak kil zeminde $d=15m$ için Q-Z eğrisi

2) Kum zemin için zemin derinliği, içsel sürtünme açısı, efektif birim hacim ağırlık ve kazık çapı belirlenmiştir. İstenilen derinlikte efektif gerilme p_o bulunmuştur. N_q katsayısı için zeminin durumuna göre Çizelge 2.5'teki veriler kullanılmıştır. Bu veriler ve (2.22) formülü kullanılarak birim uç direnci q_u bulunmuştur. Hesaplanan q_u değerinin Çizelge 2.5'teki maksimum değerini aşması durumunda çizelgedeki değer kullanılmıştır. q ve z değerlerinin bulunması için, $q_u (=t_{max})$, D ve Çizelge 2.7'deki z/D ve q/q_{max} verileri kullanılmıştır. q (kN/m^2) değerlerinin kazık ucu kesit alanı ile çarpılmasıyla bulunan Q (kN) değerleri ve z değerleri kullanılarak Q-Z eğrileri çizilmiştir. Örnek bir Q-Z eğrisi hesap modeli Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Çok gevşek kum zeminde $d=15m$ için Q-Z eğrisi ($q_u=q_{max}=1900$)

3.2.2. Zemin Yerdeğiştirmelerinin Bulunması

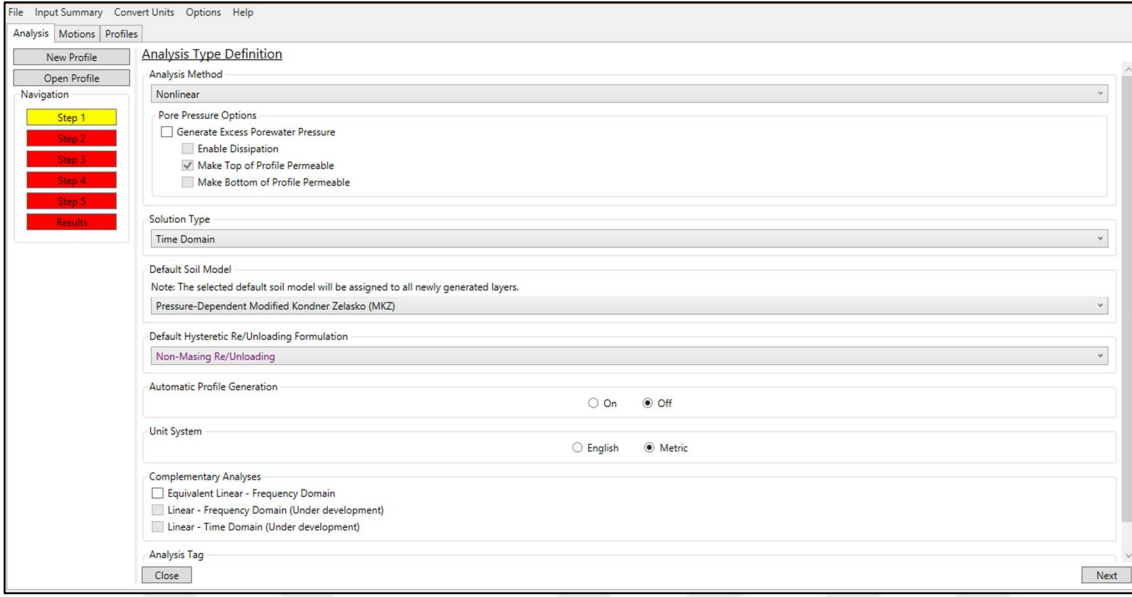
Tek boyutlu zemin davranış analizi için geliştirilmiş bazı yazılımlar bulunmaktadır. *SHAKE* ve *DEEPSOIL* bunlardan bazılarıdır. Bu yazılımlarda, literatürde bulunan yöntemler kullanılarak, farklı deprem etkileri altında zemin davranış analizleri yapılabilmekte ve zemin yerdeğiştirmeleri bulunabilmektedir.

Bu tez kapsamında, zemin yay uçlarına etki ettirilecek zemin toplam yerdeğiştirmeleri *DEEPSOIL* yazılımı kullanılarak bulunmuştur.

3.2.2.1. *DEEPSOIL* İle Tek Boyutlu Zemin Davranış Analizi

DEEPSOIL, yatay tabakalı zeminlerin zemin davranış analizi için geliştirilmiş bir yazılımdır. Yazılım, Illinois Üniversitesi'ndeki Prof. Youssef Hashash başkanlığında lisans ve lisansüstü öğrencilerin çalışması sonucu geliştirilmiştir. Bu yazılımla, frekans tanım alanında hem doğrusal hem de eşdeğer doğrusal analizler, zaman tanım alanında ise hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir. *DEEPSOIL* yazılımında zaman tanım alanında doğrusal olmayan tek boyutlu zemin davranış analiz özellikleri ve aşamaları aşağıdaki gibidir.

1) Yazılım açıldığında *New Profile* tuşuna basıldıktan sonra *Analysis* penceresi açılır (Şekil 3.20). Bu pencere, analiz girdilerin girildiği pencereleri içerir ve veriler beş adımda yazılıma girilir.



Şekil 3.20. DEEPSOIL Analysis Step 1 Analysis Type Definition penceresi

2) *Analysis Method* kısmında analizin türü seçilir. Doğrusal olmayan zemin davranış analizi yapılacağı için *Nonlinear* seçeneği seçilmiştir (Şekil 3.20).

3) *Pore Pressure Options* kısmında, doğrusal olmayan analizde yer altı suyunun etkisi suyun drene edilme durumuna göre hesaba katılabilmektedir. Tez kapsamında yapılan zemin davranış analizlerinde yer altı suyu bulunmadığı varsayılmıştır ve etkisi hesaba katılmamıştır (Şekil 3.20).

4) *Solution Type* kısmında analizin, frekans tanım aralığında veya zaman tanım aralığında yapılacağı ile ilgili seçim yapılır. Yazılım, doğrusal olmayan analizi sadece zaman tanım alanında yapmaktadır. Bunun için *Time Domain* seçilmiştir (Şekil 3.20).

5) *Default Soil Model* kısmında, zemin modeli (omurga eğrisi) seçilir. Yazılım dört adet zemin modeli sunmaktadır ve *GQ/H* modelini önermektedir. Tez kapsamında, ikinci bölümde anlatılan, (2.32) ve (2.33) denklemleriyle modellenen *Pressure-Dependant Modified Kondner Zelasko* zemin modeli (omurga eğrisi) seçilmiştir (Şekil 3.20).

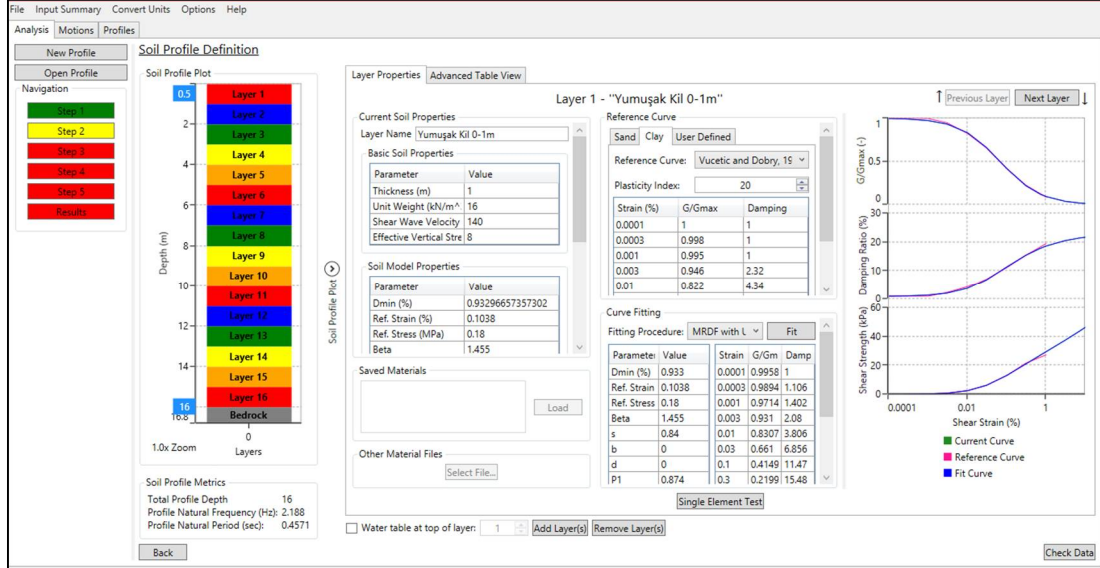
6) *Default Hysteretic Re/Unloading Formulation* kısmında, yazılım tarafından sunulan histeretik yükleme-boşaltma eğrisi modellerinden birisi seçilir. Yazılım, *Masing* ve *Non-Masing* olmak üzere iki seçenek sunmaktadır ve *Non-Masing* modelini önermektedir. Tez kapsamında, ikinci bölümde anlatılan, *Non-Masing* eğrisi modeli seçilmiştir (Şekil 3.20).

7) *Automatic Profile Generation* kısmında, girilen bazı verilere göre, zemin profilindeki tabaka kalınlıkları ve referans eğrileri yazılım tarafından belirlenebilir. Tez kapsamında zemin profili 1 metre kalınlıklara bölüneceği için bu seçenek tercih edilmemiştir (Şekil 3.20).

8) *Unit System* kısmında, veri girişlerinde ve analiz sonuçlarında hangi birim sisteminin kullanılacağına seçimi yapılır. Tez kapsamında *Metric* birim sistem kullanılmıştır (Şekil 3.20).

9) *Complementary Analyses* kısmında yapılan analizlere ek olarak frekans tanım aralığında eşdeğer doğrusal analizlerin yapıp yapılmaması ile ilgili seçim yapılır. Tez kapsamında eşdeğer doğrusal analizler yapılmamıştır (Şekil 3.20). *Next* tuşuna basılarak sonraki adıma geçilir.

10) *Layer Properties* penceresinde *Add Layer* tuşuna basılır. İstenilen sayıda zemin tabakası yazılıma eklenir. Örnek olarak, her biri 1m kalınlıkta 15 adet zemin tabakasının yazılıma eklenmiş hali Şekil 3.21'de verilmiştir. *Remove Layer* tuşuna basılarak mevcut bir tabaka silinebilir.

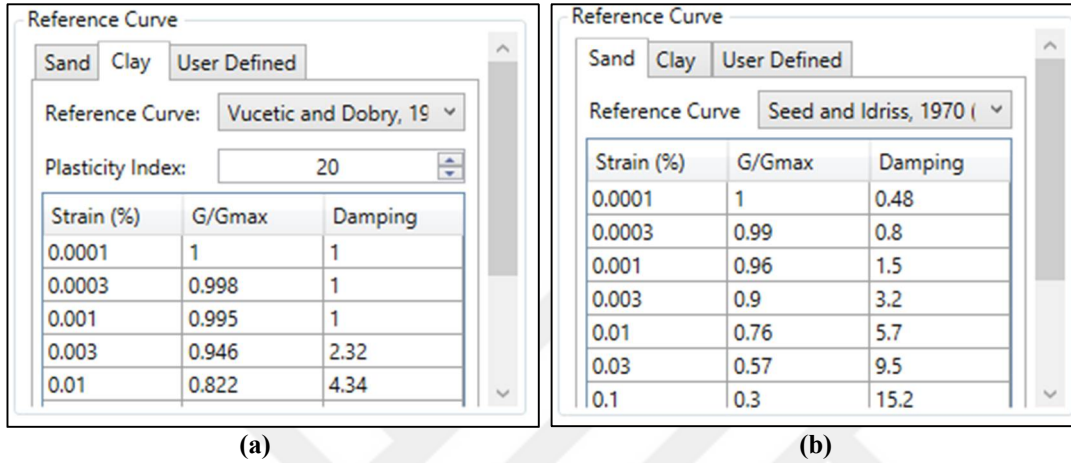


Şekil 3.21. DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Layer Properties penceresi

11) *Current Soil Properties* kısmında zemine ait kalınlık, birim hacim ağırlık ve kayma dalgası hızı verileri yazılıma girilir (Şekil 3.21).

12) *Reference Curve* kısmında, zemine ait modül azalım eğrisinin çizilmesi için kayma şekil değiştirmesi, G/G_{max} ve sönüm oranı verileri girilir. Kullanıcı isterse

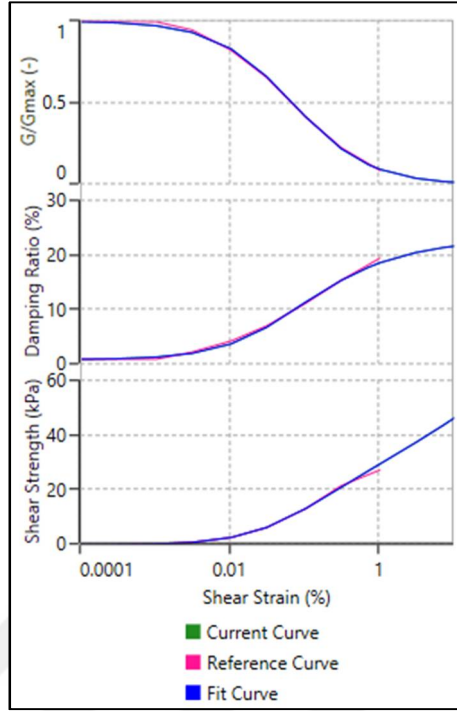
yazılımdaki *Clay* ve *Sand* kısımlarında sunulan modül azalım eğrilerini kullanabilir. Tez kapsamında, kil zeminler için ikinci bölümde anlatılan Vucetic ve Dobry (1991) modeli, zemine ait plastisite indisi verisi yazılıma girilerek kullanılmıştır (Şekil 3.22a). Kum zeminler için ise ikinci bölümde anlatılan Seed ve Idriss (1970) modelinin ortalama değerleri (Mean) kullanılmıştır (Şekil 3.22b).



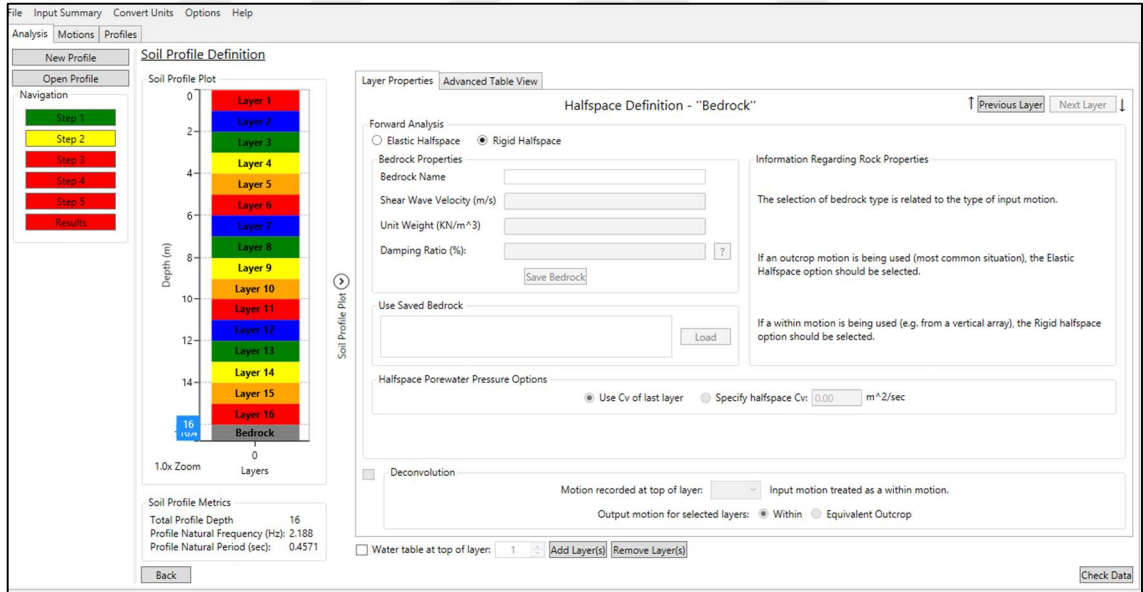
Şekil 3.22. DEEPSOIL kil ve kum zeminler için modül azalım eğrisinin tanımlanması

13) *Curve Fitting* kısmında histeretik yükleme-boşaltma eğrisi redaksiyonu yapılır. Yazılım iki redaksiyon yöntemi önermektedir. Tez kapsamında, ikinci bölümde anlatılan ve (2.36) denkleminin yazılımdaki karşılığı olan *MRDF with UIUC Reduction Factor* seçilerek redaksiyon yapılmıştır. *Use Fit* tuşuna basılarak modül azalım eğrisi özellikleri tabakaya atanır. Bu işlemler yapıldıktan sonra yazılım, aynı grafikte 3 adet modül azalım eğrileri çizer (Şekil 3.23). *Reference Curve* (kırmızı eğri), modellemeye referans alınan eğridir. *Fit Curve* (mavi eğri), referans eğri üzerinde redaksiyon yapılması sonucu elde edilen eğridir. Son olarak *Current Curve* tabakanın sahip olduğu (tabakaya atanan) eğridir. *Use Fit* yapıldıktan sonra *Current Curve* ile *Fit Curve* aynı eğri olur.

14) Yazılıma girilen her tabakaya veri girişi için *Next Layer* tuşuna basılır ve 11-13 adımları tekrar edilir. En son anakayanın kayma dalgası hızı, birim hacim ağırlığı ve sönüm oranı verileri girilir. Kullanıcı, anakaya özelliklerinin bulunmaması durumunda, anakayayı, özelliklerinin yazılım tarafından belirlendiği *Rigid Halfspace* olarak seçebilir. Tez kapsamında anakaya *Rigid Halfspace* olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.23. DEEPSOIL modül azalım eğrileri grafiği

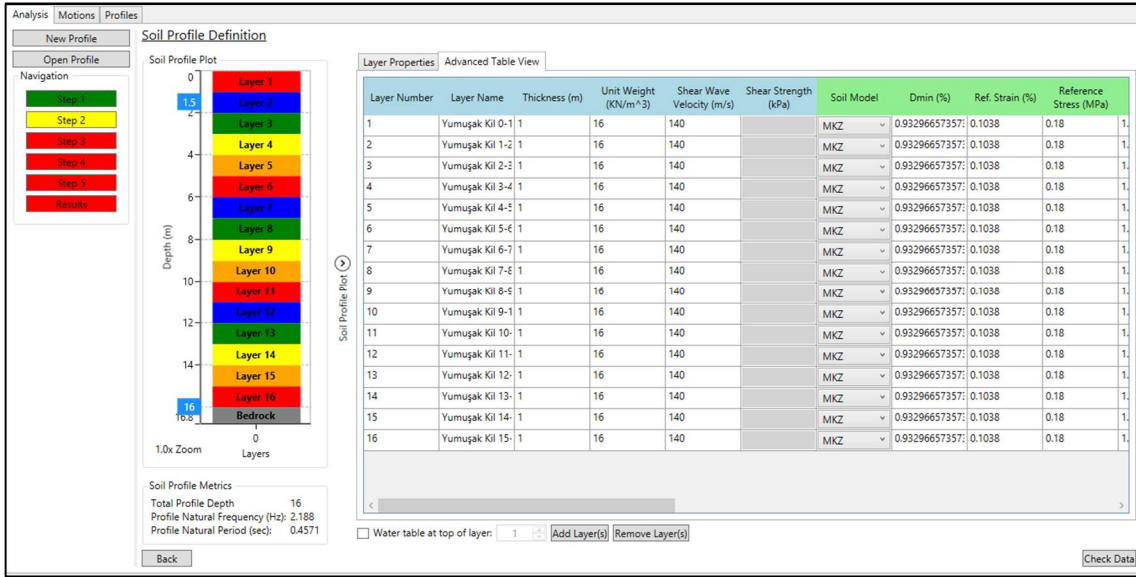


Şekil 3.24. DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Halfspace Definition penceresi

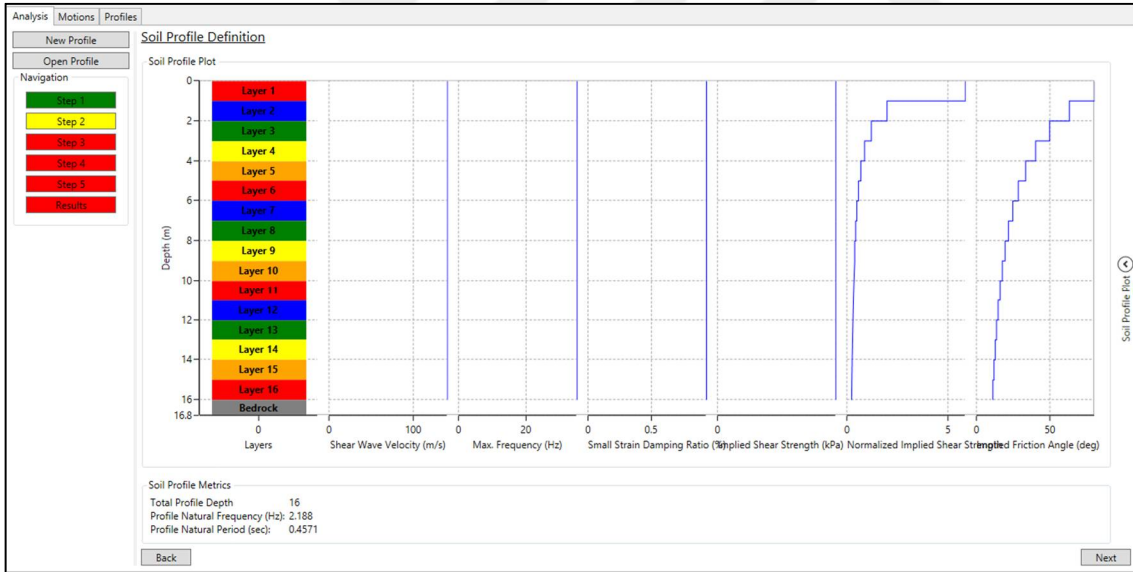
15) *Advanced Table Views* kısmında tüm zemin tabakalarının ismi, girilen ve aktarılan veriler görülebilmektedir (Şekil 3.25). Veri girişleri tamamladıktan sonra *Check Data* yapılır ve veriler kontrol edilir. Eksik veri varsa yazılım burada uyarı verir. Eksik veri yoksa, girilen ve hesaplanan bazı verilerin zemin derinliği boyunca

3. MATERYAL VE METOT

değişiminin görüldüğü grafiklerin bulunduğu pencere açılır (Şekil 3.26). Grafikler kontrol edildikten sonra *Next* tuşuna basılır.



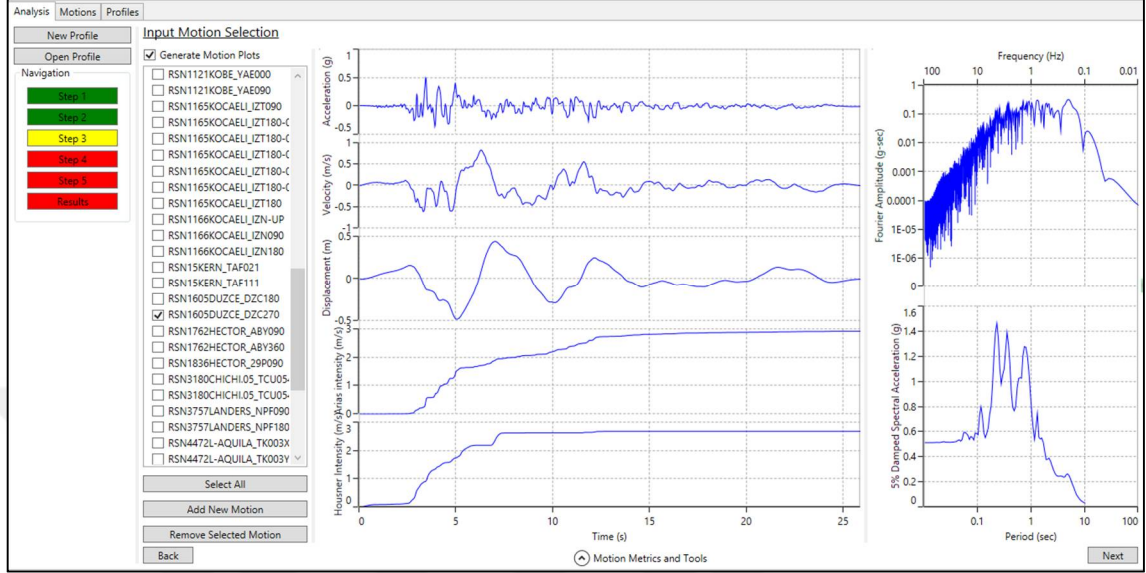
Şekil 3.25. DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Advanced Table Views penceresi



Şekil 3.26. DEEPSOIL Analysis Step 2 Soil Profile Definition – Soil Profile Plot penceresi

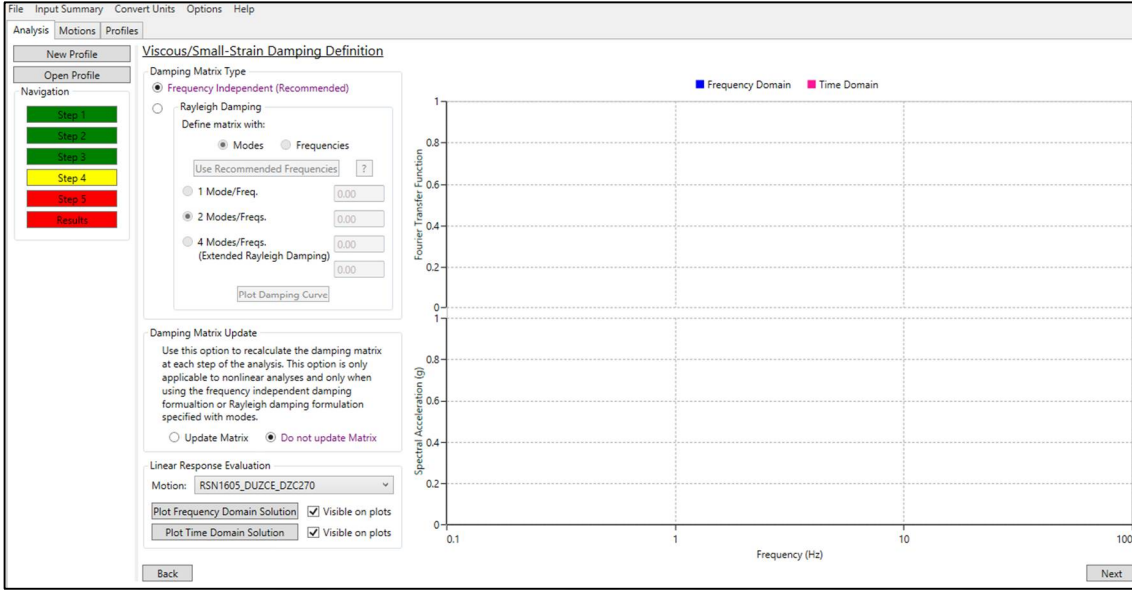
16) *Input Motion Selection* kısmında analizi yapılmak istenen deprem verisinin seçimi yapılır (Şekil 3.27). Burada, yazılım bünyesinde bulunan deprem verileri kullanılabilir. İstenmesi durumunda, *Add New Motion* tuşuna basılarak yeni deprem verilerinin tanıtımı veya girişi yapılabilir. Tez kapsamında analizler için kullanılan deprem verileri *PEER Ground Motion Database*'den alınıp yazılıma tanıtılmıştır. Deprem verisi seçildikten sonra aynı pencerede depreme ait ivme-zaman, hız-zaman,

deplasman-zaman grafiği çizilir. *Motion Metrics and Tools* kısmında depreme ait veriler ve maksimum değerler incelenebilir. Giriş ve kontroller yapıldıktan sonra *Next* tuşuna basılır ve sonraki adıma geçilir.



Şekil 3.27. DEEPSOIL Analysis Step 3 Input Motion Selection penceresi

17) *Viscous/Small-Strain Damping Definition* kısmında viskoz sönümleme formülasyonu seçilir (Şekil 3.28). Yazılımda, sönümleme matrisinin kullanıldığı iki tür viskoz sönümleme formülasyonu bulunmaktadır. *Frequency Independent* olarak geçen Frekanstan Bağımsız Sönümleme Formülasyonu, herhangi bir mod veya frekans özelliklerine ihtiyaç duymaksızın, sönümleme matrisinin öz değerlerini ve öz vektörlerini çözmektedir. Bu formülasyon, gerek Rayleigh Sönümlemesinin kısıtlamalarını ortadan kaldırması gerekse analiz süresini önemli ölçüde arttırmaması nedeniyle, yazılım tarafından tercih edilmektedir. Tez kapsamında yapılan tüm analizlerde frekanstan bağımsız sönümleme formülasyonu tercih edilmiştir. Yazılımda diğer seçenek olan Rayleigh Sönümlemesi tercihinin yapılması durumunda viskoz sönümlemeyi tanımlamak için *Rayleigh Damping* kısmında mod veya frekans özelliklerinin yazılıma girilmesi gerekmektedir.



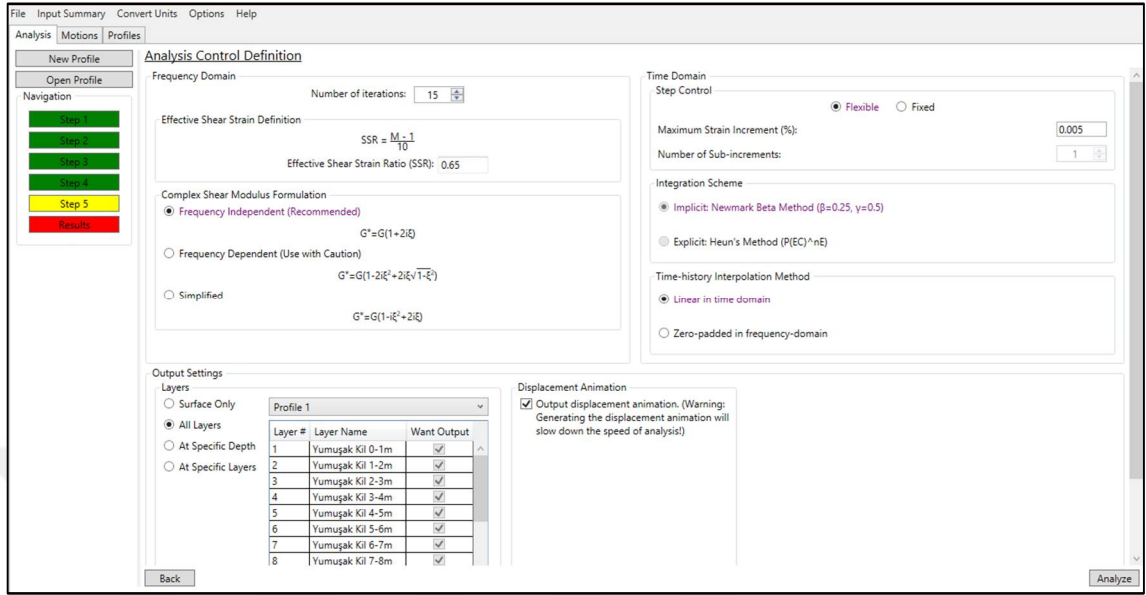
Şekil 3.28. DEEPSOIL Analysis Step 4 Viscous/Small-Strain Damping Definition penceresi

18) Viskoz sönümleme formülasyonu seçildikten sonra, *Damping Matrix Update* kısmında, analizin her adımında sönümleme matrisinin yeniden hesaplanmasının istenmesi durumunda *Update Matrix* yapılır. Aksi durumda *Do not update Matrix* seçeneği seçilir. Tez kapsamında sönümleme matrisi güncellemesi yapılmamıştır. Giriş ve kontroller yapıldıktan sonra *Next* tuşuna basılır ve sonraki adıma geçilir.

19) *Analysis Control Definiton* kısmında zemin davranış analizi için kontrol parametreleri belirlenir (Şekil 3.29). Frekans tanım aralığında eşdeğer doğrusal analiz yapılması durumunda, analizde gerçekleştirilecek yineleme sayısı *Number of iterations* kısmında, yineleme sayısına bağlı olarak efektif kayma birim deformasyon oranı *Effective Shear Strain Ratio* kısmında girilir ve *Complex Shear Modulus Formulation* kısmında frekanstan bağımsız, frekansa bağımlı ve basitleştirilmiş olmak üzere 3 seçenekten biri kompleks kayma modülü olarak seçilir. Tez kapsamında frekans tanım aralığında eşdeğer doğrusal analiz yapılmadığı için bu veriler girildiği kutular kapalıdır.

20) Zaman tanım aralığında yapılan analizlerde, Time Domain kısmında, *Flexible* ve *Fixed* olmak üzere iki tür zaman adımı seçeneği bulunmaktadır. Zeminde hesaplanan birim deformasyonların belirlenmiş bir maksimum birim deformasyonu aşması durumunda, *Flexible* seçeneği kullanılarak zaman artışı alt bölümlere ayrılmaktadır. Varsayılan maksimum birim deformasyon artış değeri 0,005'tir. *Fixed* seçeneğinin seçilmesi durumunda ise, tüm zaman adımları kullanıcı tarafından *Number of Sub-increments* kısmında tanımlanan sayıda alt artışlarla alt bölümlere ayrılmaktadır.

Tez kapsamında, yazılım tarafından tavsiye edilen *Flexible* seçeneği seçilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. DEEPSOIL Analysis Step 5 Analysis Control Definition penceresi

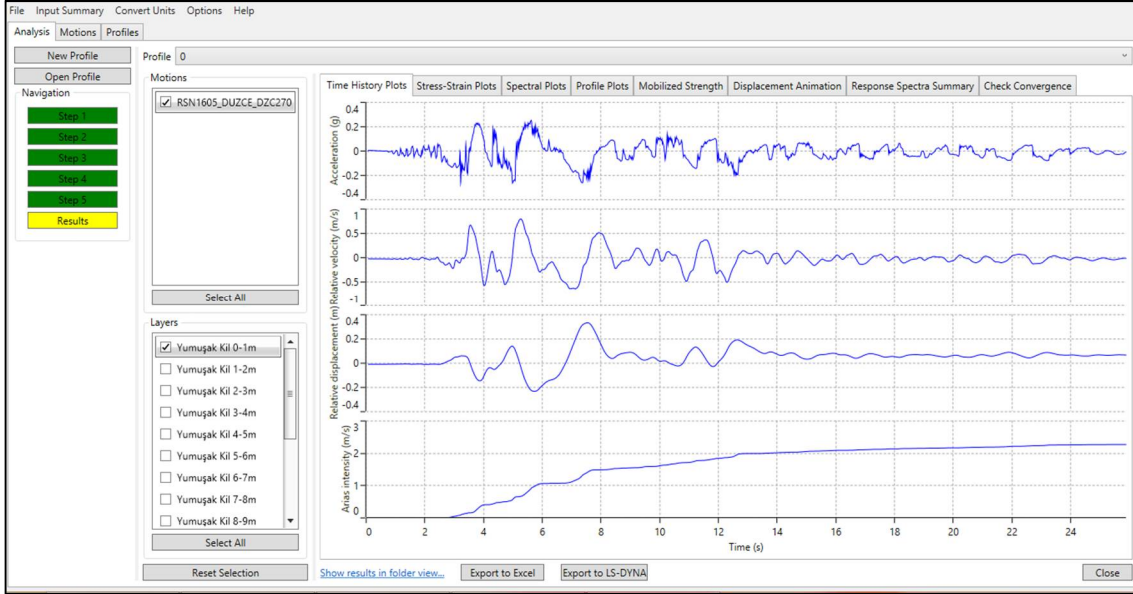
21) Zaman tanım aralığında yapılan analizlerde, bir zaman adımının alt bölümlere ayrılması sırasında, ivmelerin ara noktalarda hesaplanması gerekmektedir. *Flexible* seçeneği aktif iken gerçekleştirilen bu işlem için iki tür interpolasyon yöntemi kullanılmaktadır. *Linear time domain* seçeneği, ivmenin değişiminin basitçe eşit artışlara bölündüğü interpolasyon yöntemidir. *Zero-padded frequency-domain interpolation* seçeneğinin seçilmesi durumunda ise çıktı hareketinde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Tez kapsamında, yazılım tarafından tavsiye edilen *Linear time domain* seçeneği seçilmiştir (Şekil 3.29).

22) *Output Settings* kısmında zeminin belirli derinliklerinde analiz çıktılarının alınması sağlanmaktadır. Tez kapsamında, *All Layers* seçilerek zeminin tüm tabakalarındaki analiz çıktıları yazılımdan talep edilmiştir. Giriş ve kontroller yapıldıktan sonra *Analyze* tuşuna basılarak yazılıma girilen ve seçilen verilere göre tek boyutlu zemin davranış analizi yapılması sağlanır.

23) Yazılım analiz yaptıktan Şekil 3.30'daki *Results* penceresi açılır. *Time History Plots* kısmında, zeminin her derinliği için rölatif hız, rölatif yerdeğiştirme ve ivme gibi verilerin zamana göre değişim grafiği bulunmaktadır. *Displacement Animation* kısmında ise maksimum rölatif yerdeğiştirmelerin derinlikle değişim grafiği

3. MATERYAL VE METOT

bulunmaktadır. *Export to Excel* fonksiyonu kullanılarak analiz sonucunda bulunan tüm veri ve grafikler Excel dosyasına aktarılabilir.

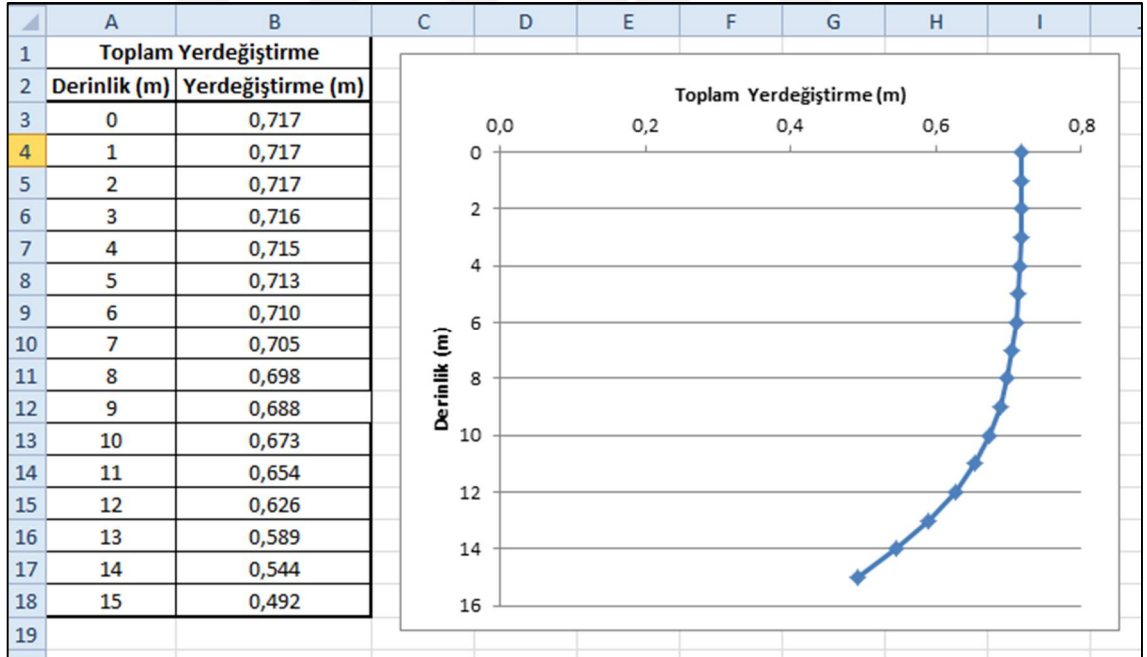


Şekil 3.30. DEEPSOIL Analysis Results-Time History Plots penceresi (z=0m)

24) Yazılımın *Time History Plots* penceresinin *Layers* kısmında zeminin her derinliği için bulunan zamana bağlı rölatif yerdeğiştirme değerleri, aynı zamandaki anakaya hareketi yerdeğiştirmeleri ile toplanarak toplam yerdeğiştirmeler bulunur. Bulunan toplam yerdeğiştirmelerin en büyüğü her derinlik için ayrı ayrı not edilir (Şekil 3.31).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Derinlik z = 0 m					z = 0 m				
2	ZAMAN (sn)	YERDEĞİŞTİRME (m)				YERDEĞİŞTİRME (m)				
3		RÖLATİF	ANAKAYA	TOPLAM		MAKSİMUM				
4	0	0	0	0		0,717				
5	0,005	1,31E-09	1,76329E-06	1,7646E-06						
6	0,01	9,63E-09	7,04966E-06	7,05929E-06						
7	0,015	3,19E-08	1,58521E-05	1,58841E-05						
8	0,02	7,51E-08	2,81638E-05	2,82389E-05						
9	0,025	1,46E-07	4,39776E-05	4,41237E-05						
10	0,03	2,52E-07	6,32867E-05	6,35386E-05						
11	0,035	3,99E-07	8,6084E-05	8,64834E-05						
12	0,04	5,96E-07	0,000112362	0,000112958						
13	0,045	8,50E-07	0,000142113	0,000142963						
14	0,05	1,17E-06	0,000175329	0,000176497						
15	0,055	1,56E-06	0,000212002	0,000213561						
16	0,06	2,03E-06	0,000252124	0,000254155						
17	0,065	2,59E-06	0,000295685	0,000298279						
18	0,07	3,25E-06	0,000342677	0,000345932						
19	0,075	4,02E-06	0,000393089	0,000397114						
20	0,08	4,91E-06	0,000446911	0,000451825						
21	0,085	5,94E-06	0,000504129	0,000510065						
22	0,09	7,10E-06	0,000564735	0,000571835						
23	0,095	8,41E-06	0,000628718	0,000637133						
24	0,1	9,89E-06	0,000696072	0,000705959						

Şekil 3.31. Zamana bağlı toplam yerdeğıştirmelerin bulunması (z=0m)



Şekil 3.32. Toplam yerdeğıştirme zarfı

3.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Kinematik Etkileşim Analizi

Sonlu elemanları yöntemini kullanarak yapısal analiz yapan yazılımlar bulunmaktadır. *SAP2000*, *ETABS*, *ANSYS* bunlardan bazılarıdır. Bu yazılımlarda,

literatürde bulunan yöntemler kullanılarak, farklı yüklenme durumları için yapısal iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler hesaplanıp tasarım yapılabilir.

Bu tez kapsamında, kinematik etkileşim analizleri için *SAP2000* yazılımı kullanılmıştır.

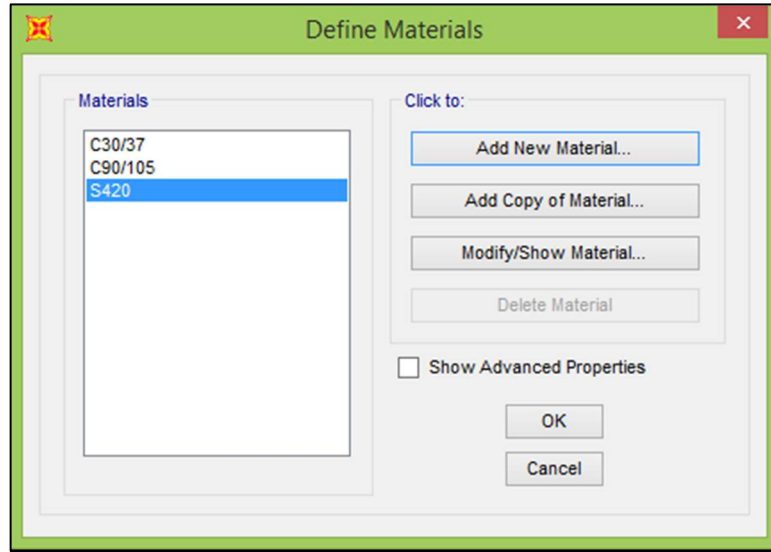
3.2.3.1. *SAP2000* İle Kinematik Etkileşim Analizi

SAP2000, yapı sistemlerinde genel amaçlı sonlu elemanların statik veya dinamik, doğrusal veya doğrusal olmayan analizini yapan yazılımdır. *Computers & Structures Inc.* şirketi tarafından geliştirilen programda, basitten karmaşığa bir çok yapı sisteminin analiz ve tasarımı yapılabilir.

SAP2000 yazılımında karmaşık geometriler sonlu sayıda elemana bölünerek her birinin ayrı ayrı gerilme analizi yapılır. Analizlerde çıkan sonuçlar birleştirilerek tek bir seferde gerilme analizinin mümkün olmadığı parçaların analizinin doğru bir şekilde yapılması sağlanır.

Tez kapsamında, yazılımda kazıklı temel modellenip kinematik etkileşim analizi yapılmıştır. Kazıklar ve radye temel çubuk model, zemin ise nonlinear yaylar olarak modellenmiştir. Radye temele, üstyapıdan gelen yükleri temsilen, kazık doğrultusunda düşey tekil yükler etki ettirilmiştir. Nonlinear yay uçlarına ise tek boyutlu zemin davranış analizinden elde edilen toplam yerdeğiştirmeler deplasman yükü olarak etki ettirilmiştir. Yapısal analizlerden sonra kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları bulunmuştur. Bu işlemlerin yapıldığı adımlar aşağıdaki gibidir:

1) Modellemeye, kazık ve radye temelde kullanılacak beton ve çelik cinsi belirlenerek başlanmıştır. Bunun için yazılımın *Define* → *Materials* kısmında kullanılacak materyaller belirlenmiştir (Şekil 3.33). Kazıklar için *C30/37* betonu, radye temel için ise rijitliğinin fazla olması için *C90/105* betonu kullanılmak üzere seçilmiştir (Şekil 3.34a-b). Kazıklarda kullanılacak çelik cinsi için ise *S420* çeliği seçilmiştir. Seçilen beton türlerinin karakteristik özellikleri yazılım bünyesinde bulunmaktadır. Çelik türünün özellikleri yazılım bünyesinde bulunmadığı için *Material Property Data* penceresinde çelik karakteristik özellikleri yazılıma girilmiştir (Şekil 3.35). Tüm analizlerde aynı beton ve çelik cinsi kullanılmıştır.



Şekil 3.33. SAP2000 Define Materials penceresi

(a)

(b)

Şekil 3.34. SAP2000 Material Property Data pencereleri (C30/37 ve C90/105)

3. MATERYAL VE METOT

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for S420 steel. The 'General Data' section includes 'Material Name and Display Color' (S420), 'Material Type' (Rebar), 'Material Grade' (empty), and 'Material Notes' (empty). The 'Weight and Mass' section has 'Weight per Unit Volume' (0) and 'Mass per Unit Volume' (0). The 'Units' section shows 'KN, m, C'. The 'Uniaxial Property Data' section includes 'Modulus Of Elasticity, E' (2,000E+08), 'Poisson, U' (0), 'Coefficient Of Thermal Expansion, A' (1,200E-05), and 'Shear Modulus, G' (empty). The 'Other Properties For Rebar Materials' section includes 'Minimum Yield Stress, Fy' (420000), 'Minimum Tensile Stress, Fu' (500000), 'Expected Yield Stress, Fye' (365220), and 'Expected Tensile Stress, Fue' (434783). There is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

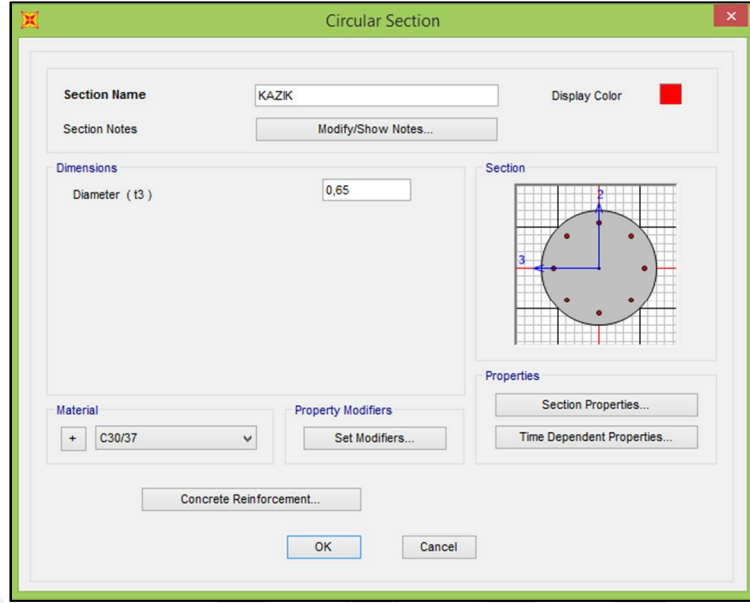
Şekil 3.35. SAP2000 Define Material penceresi (S420 çeliği)

2) Modellemede kullanılacak radye temel ve kazıkların kesit özellikleri belirlenir. Bunun için *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections* kısmında kesit özellikleri belirlenir (Şekil 3.36).

The screenshot shows the 'Frame Properties' dialog box. The 'Properties' section has a list box with 'KAZIK' selected. The 'Click to:' section includes buttons for 'Import New Property...', 'Add New Property...', 'Add Copy of Property...', 'Modify/Show Property...', and 'Delete Property'. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

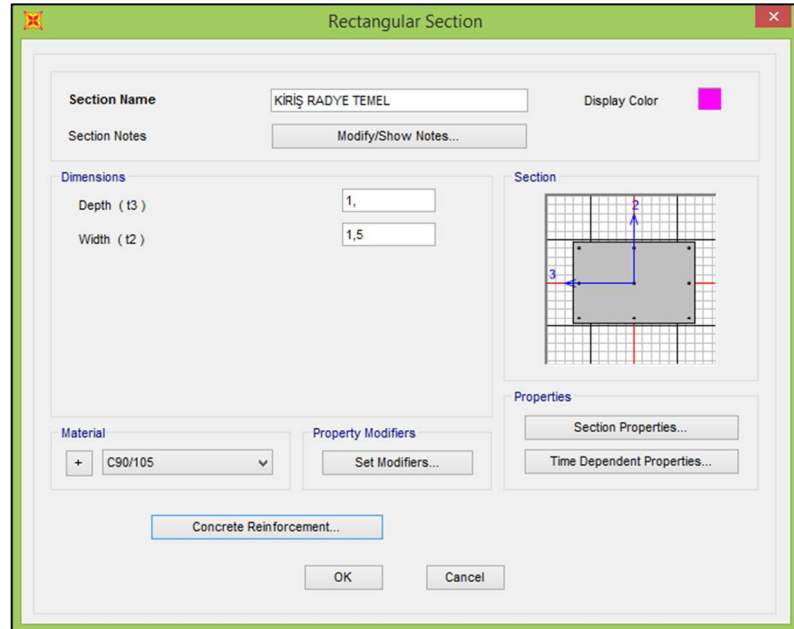
Şekil 3.36. SAP2000 Frame Properties penceresi

Kazık için yuvarlak kesit seçilmiş olup çap bilgisi, C30/37 beton cinsi ve S420 çeliğinden boyuna 8 adet donatı bilgisi kesit özelliklerine atanmıştır (Şekil 3.37).



Şekil 3.37. SAP2000 Circular Section penceresi (Kazık için)

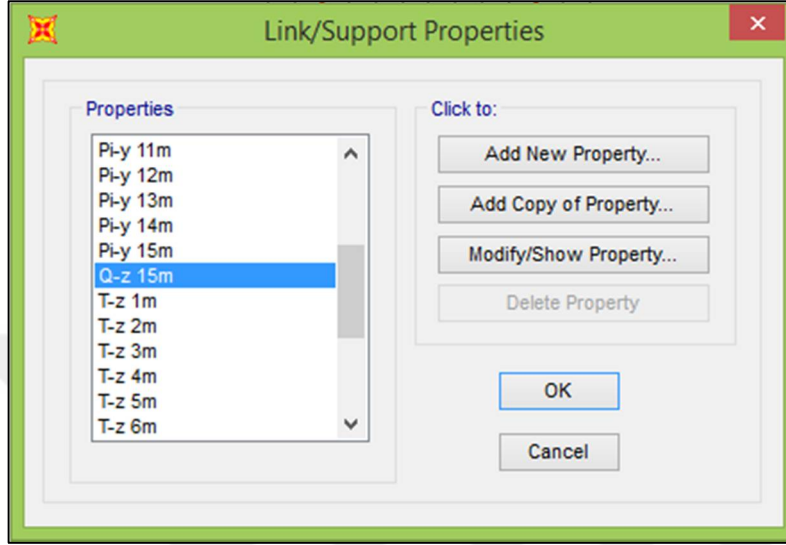
Farklı çaplar için analizler yapılırken çap bilgileri bu kısımda değiştirilmiştir. Radye temel ise dikdörtgen kiriş şeklinde modellenmiş olup derinlik, genişlik, C90/105 beton cinsi kesit özelliklerine atanmıştır (Şekil 3.38). Kiriş radye temel için genişlik 1.5 m, derinlik 1 m olarak belirlenmiştir ve bu kesit özellikleri tüm analizlerde aynı kalmıştır.



Şekil 3.38. SAP2000 Rectangular Section penceresi (Kiriş radye temel için)

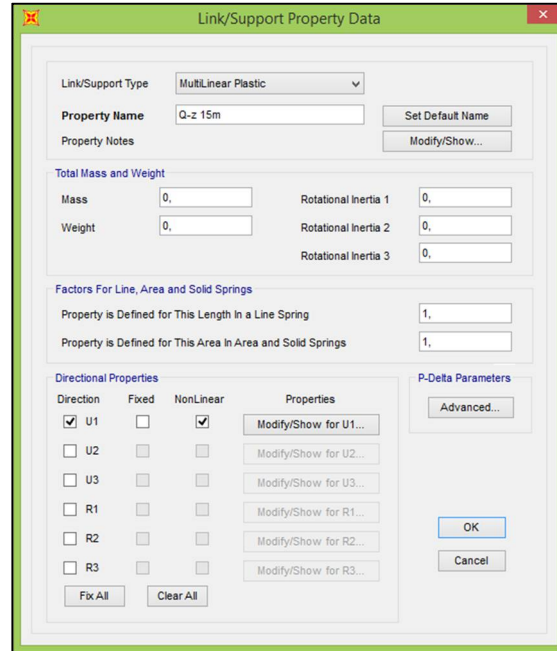
3. MATERYAL VE METOT

3) Modellemede kullanılacak nonlinear yayların özellikleri belirlenir. Bunun için *Define* → *Section Properties* → *Link/Supports Properties* kısmında, zeminin farklı derinlikleri için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z nonlinear yayların karakteristik özellikleri her bir derinlik değeri için ayrı ayrı girilir (Şekil 3.39).



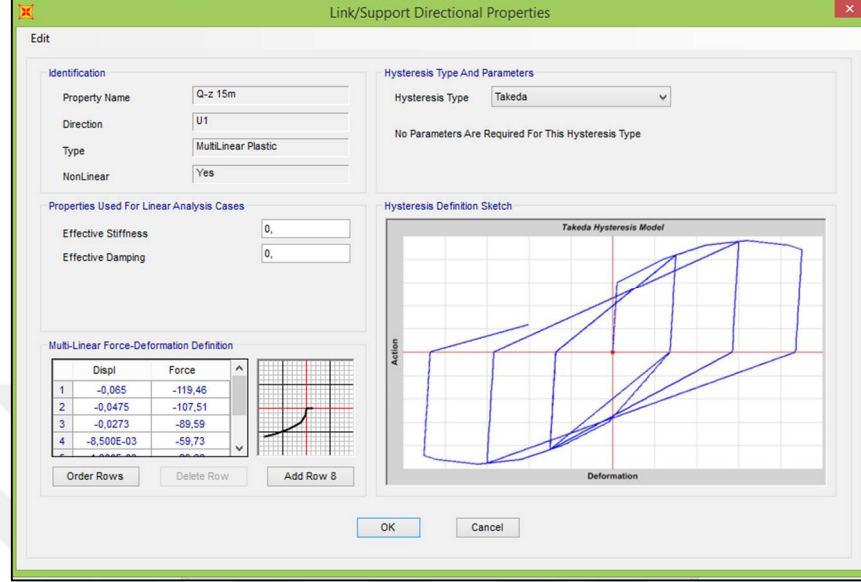
Şekil 3.39. SAP2000 Link/Supports Properties penceresi

Link/Support Property Data penceresinde, nonlinear zemin cinsini temsil etmek üzere yay tipi *Multilinear Plastic* ve *Nonlinear* seçilir (Şekil 3.40).



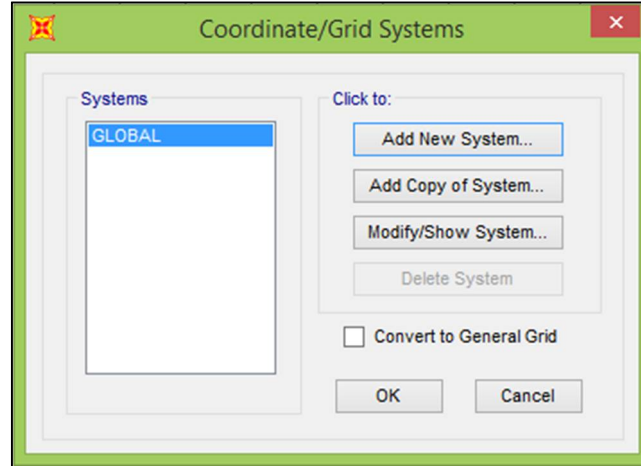
Şekil 3.40. SAP2000 Link/Supports Property Data penceresi

Link/Support Directional Properties penceresinde zeminin her derinliğine özgü yerdeğiştirme-kuvvet verileri girilir ve yayların sadece basınç yönünde çalışmasını sağlamak için histeretik özellik *Takeda* seçilir (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. SAP2000 Link/Support Directional Data penceresi

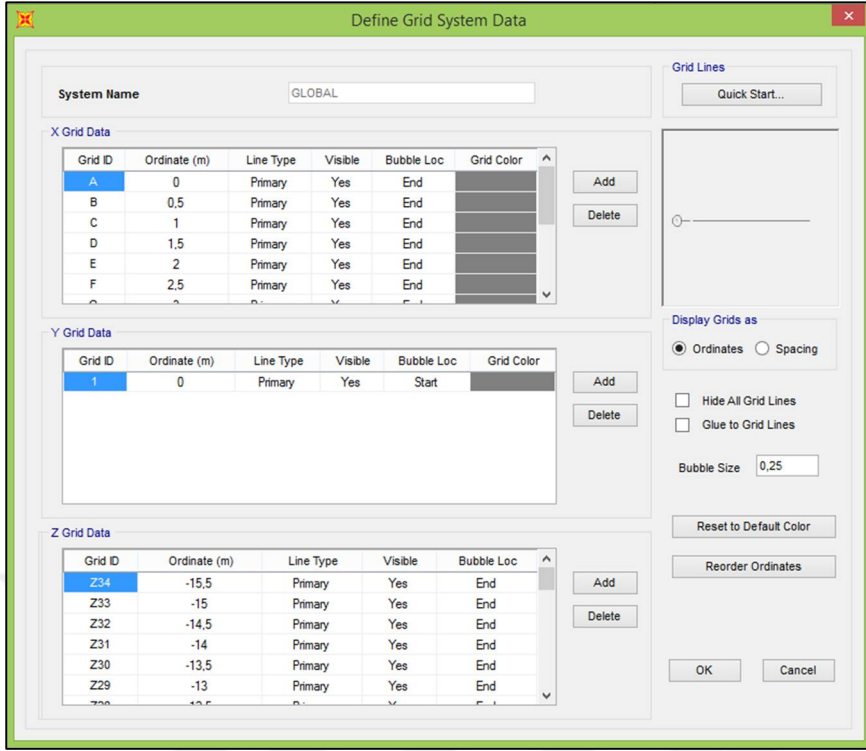
4) Model çizimi yapılmadan önce model elemanlarını boyutlarına uygun olarak çizmek ve çizimi kolaylaştırmak için Grid Sistemi belirlenir. Bunun için *Define* → *Coordinate Systems/Grids* penceresinde, Grid Sisteminin ayarlanması ile model çiziminin yapılacağı alan, belirli aralıklı çizgilerle (aks) bölünür (Şekil 3.42).



Şekil 3.42. SAP2000 Coordinate/Grid Systems penceresi

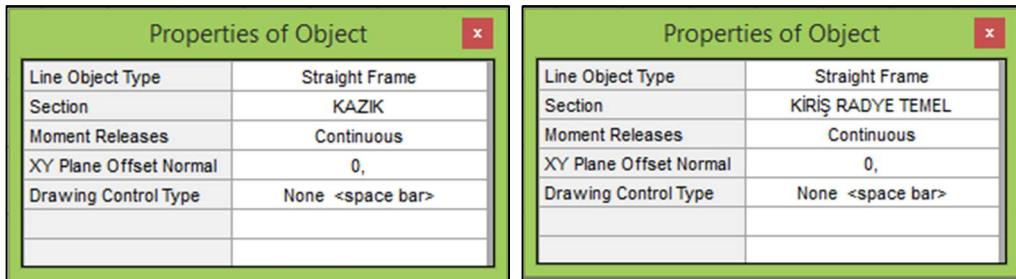
Define Grid System Data penceresinde çalışma alanı, X ve Z eksenleri yönünde istenilen sayıda ve mesafede bölünür. Tez kapsamında X ve Z eksenleri 0.5 m aralıklara bölünmüştür. (Şekil 3.43).

3. MATERYAL VE METOT

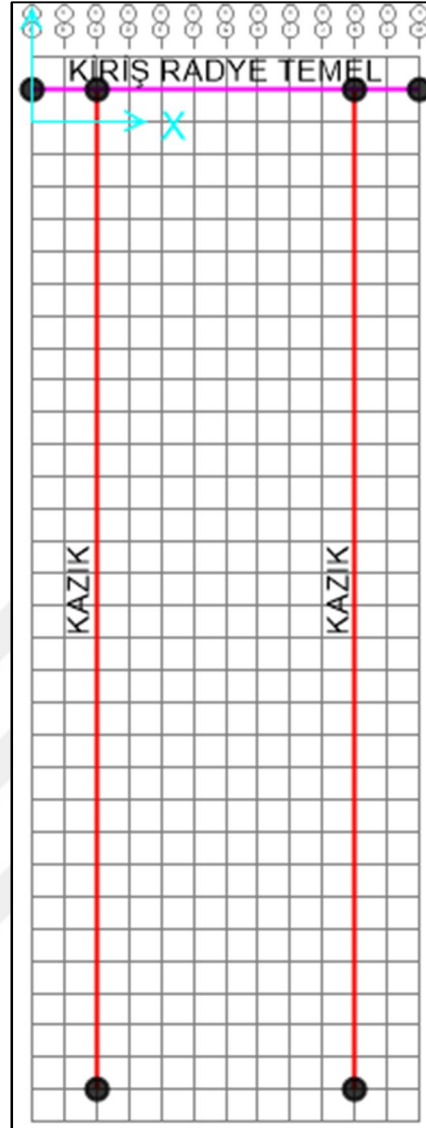


Şekil 3.43. SAP2000 Define Grid System Data penceresi (X ve Z aks aralıkları = 0.5m)

5) Kazık, kiriş radye temel ve nonlinear yay modellemesinin çizimi yapılır. Kazık ve kiriş radye temel için çubuk eleman, nonlinear yaylar için nonlinear link eleman kullanılır. Kazık ve kiriş radye temel çizimi için *Draw → Frame/Cable/Tendon* komutu kullanılır. *Properties of Object* penceresinin *Section* kısmında, özellikleri daha önce belirlenmiş olan kesit isimleri bulunmaktadır (Şekil 3.44). Burada, çizilmek istenen elemana göre seçim yapılır ve grid sistemin köşe noktaları kullanılarak çizim yapılır (Şekil 3.45).



Şekil 3.44. SAP2000 Properties of Objects pencereleri (Kazık ve Kiriş Radye Temel için)

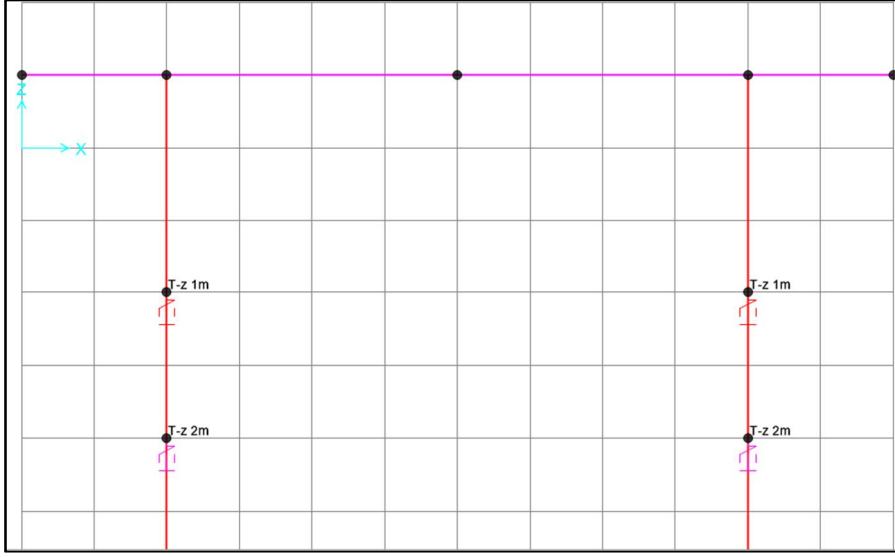


Şekil 3.45. SAP2000 kazık-kiriş radye temel modeli çizimi

Nonlinear yay elemanlardan T-z yayları çizimi için *Draw* → *1 Point Link* komutu kullanılır. *Properties of Object* penceresinin *Property* kısmında, belirli zemin derinlikleri için özellikleri daha önce belirlenmiş olan kesit isimleri bulunmaktadır (Şekil 3.46). Burada, çizilmek istenen zemin derinliğine göre seçim yapılır ve grid sistemin köşe noktaları kullanılarak yay yeri belirlenir (Şekil 3.47).

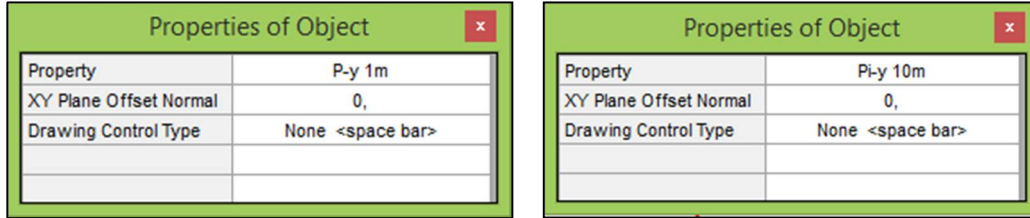


Şekil 3.46. SAP2000 *Properties of Object* pencereleri (T-z 1m ve T-z 10m için)



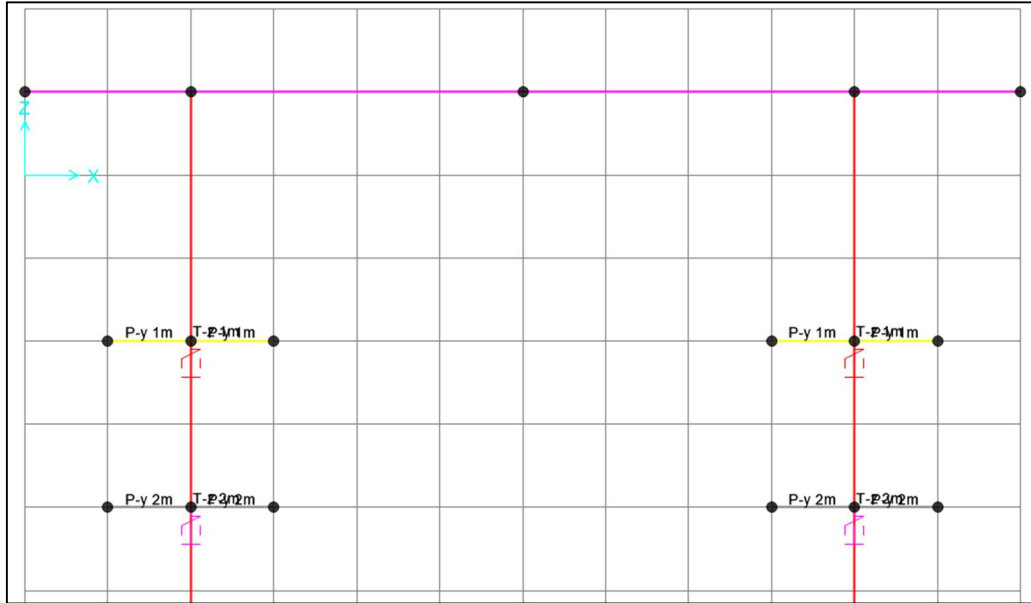
Şekil 3.47. SAP2000 T-z nonlinear yayların çizilmesi

Nonlinear yay elemanlardan P-y yaylarının çizimi için *Draw → 2 Point Link* komutu kullanılır. *Properties of Object* penceresinin *Property* kısmında, belirli zemin derinlikleri için özellikleri daha önce belirlenmiş olan kesit isimleri bulunmaktadır (Şekil 3.48). Burada, çizilmek istenen zemin derinliğine göre seçim yapılır ve grid sistemin köşe noktaları kullanılarak yay yeri belirlenir. Her derinlikte, P-y yayları kazığın iki tarafına uzanacak şekilde iki adet çizilir (Şekil 3.49).

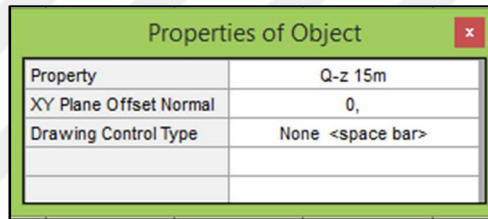


Şekil 3.48. SAP2000 *Properties of Object* pencereleri (P-y 1m ve P-y 10m için)

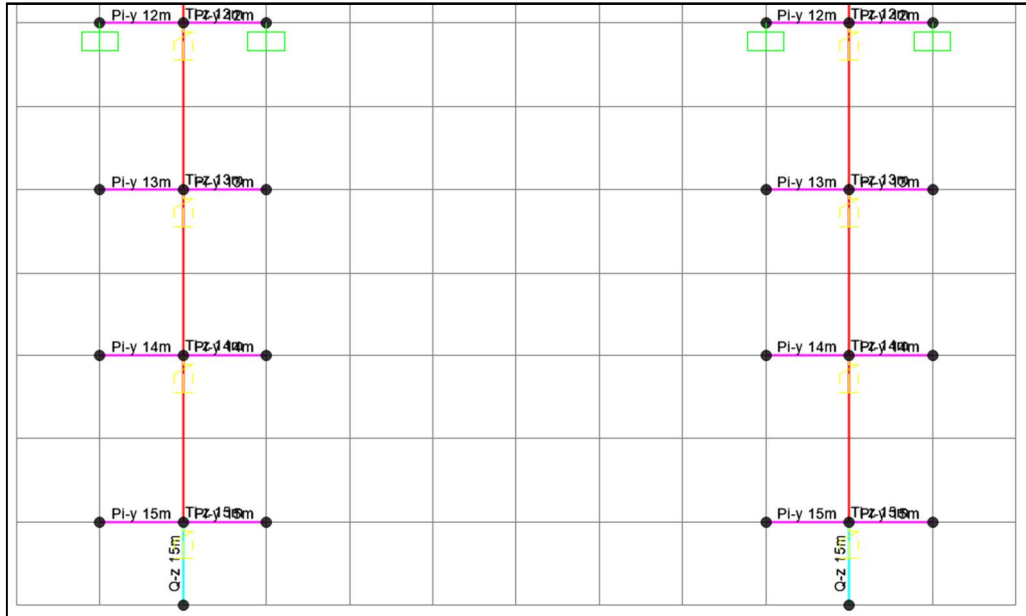
Nonlinear yay elemanlardan Q-Z yaylarının çizimi için *Draw → 2 Point Link* komutu kullanılır. *Properties of Object* penceresinin *Property* kısmında, kazık ucu derinliği için özellikleri daha önce belirlenmiş olan kesit ismi bulunmaktadır ve bu derinlik seçilir (Şekil 3.50). Grid sistemin köşe noktaları kullanılarak yay yeri belirlenir. Q-Z yay elemanı, kazık ucundan, herhangi bir grid köşe noktasına doğru dikey yönde çizilir (Şekil 3.51).



Şekil 3.49. SAP2000 P-y nonlineer yayların çizilmesi

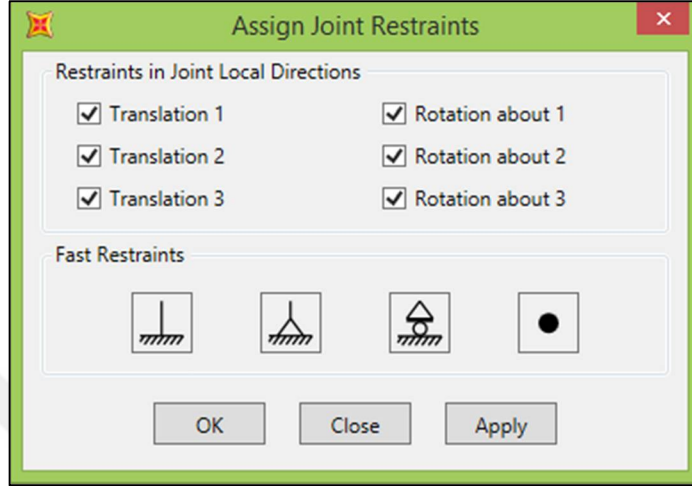


Şekil 3.50. SAP2000 Properties of Object penceresi (Q-Z 15m için)



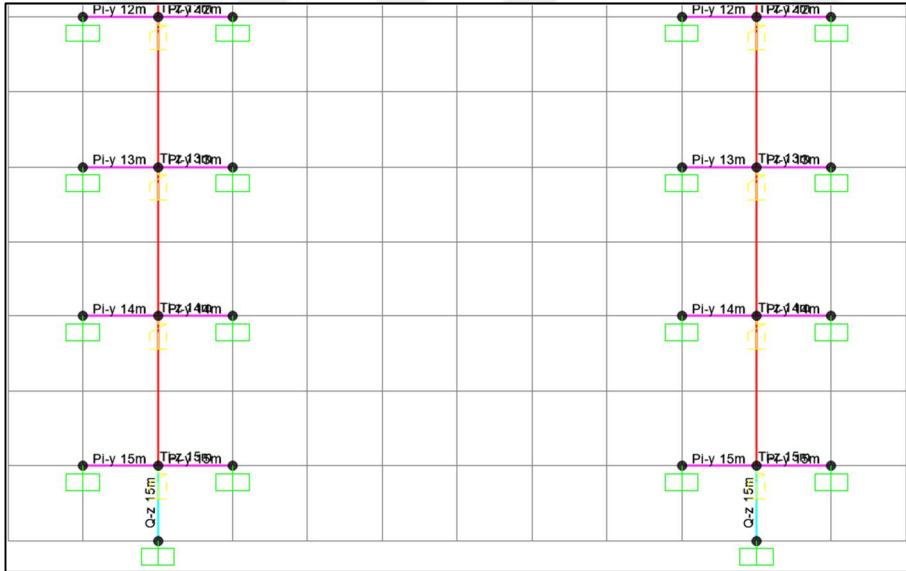
Şekil 3.51. SAP2000 Q-Z nonlineer yayların çizilmesi

6) Modelleme yapıldıktan sonra mesnet koşulları belirlenir. P-y ve Q-Z yaylarının serbest uçları sabit olacak şekilde mesnetlenir. Bunun için *Assign* → *Joint* → *Restraints* komutu seçilir. *Assign Joint Restraints* penceresinden tüm yerdeğiştirme ve dönme kısıtlamaları seçilir ve noktalara uygulanır (Şekil 3.52).



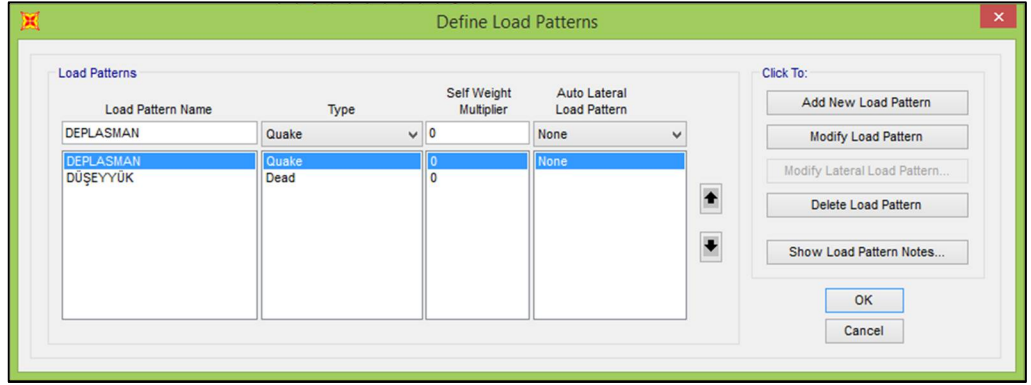
Şekil 3.52. SAP2000 Assign Joint Restraints penceresi

Mesnetlenme sonrası kazık, kiriş radye temel ve nonlinear yay modelinin görünümü Şekil 3.53'teki gibidir.



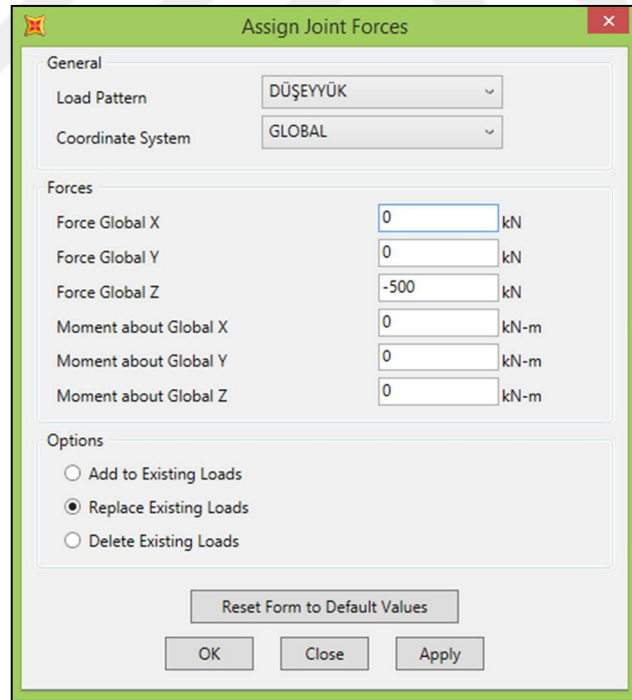
Şekil 3.53. SAP2000 Nonlinear yay uçlarının mesnetlenmesi

7) Modele etki eden yükler yazılıma tanıtılır. Modele, yatayda nonlinear yay uçlarına etki eden deplasman (yerdeğiştirme) yükleri, düşeyde ise üstyapı yükü etkimektedir. Yüklerin yazılıma tanıtılması için *Define* → *Load Patterns* komutuyla açılan *Define Load Patterns* penceresinde yükler tanıtılır (Şekil 3.54).

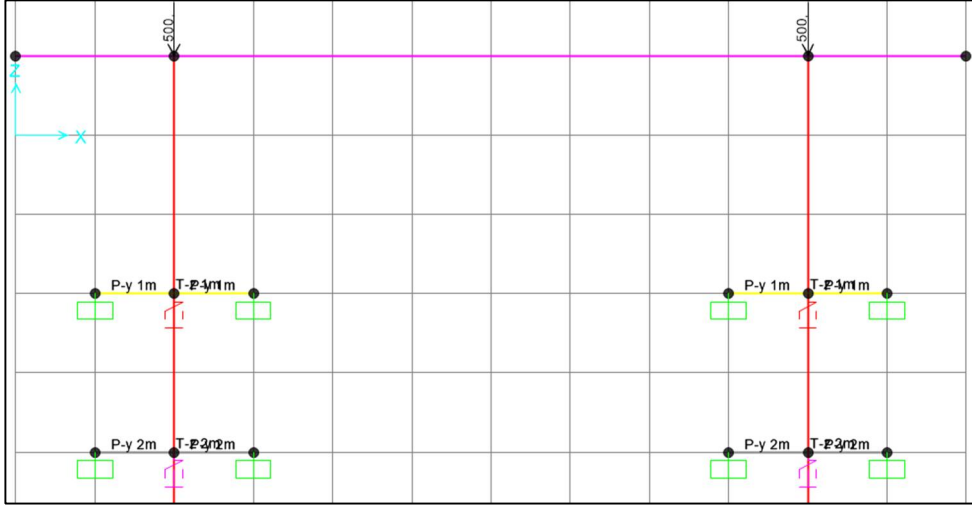


Şekil 3.54. SAP2000 Define Load Patterns penceresi

Yükler yazılıma tanıtıldıktan sonra, yüklerin model üzerinde nerede ve nasıl etki ettirileceği ve değerinin ne olacağı belirlenir. Düşey yük için model üzerinde etki ettirilmesi istenen nokta seçilir. *Assign* → *Joint Loads* → *Forces* komutuyla açılan *Assign Joint Forces* penceresinde yükün yönü, değeri ve hangi yük ismi altında olacağı seçilir (Şekil 3.55). Burada, yük isminin düşey yük olarak seçilmesi gerekmektedir. Bilgiler girilip onaylandıktan sonra model üzerinde yükün ettirildiği görülebilir (Şekil 3.56).

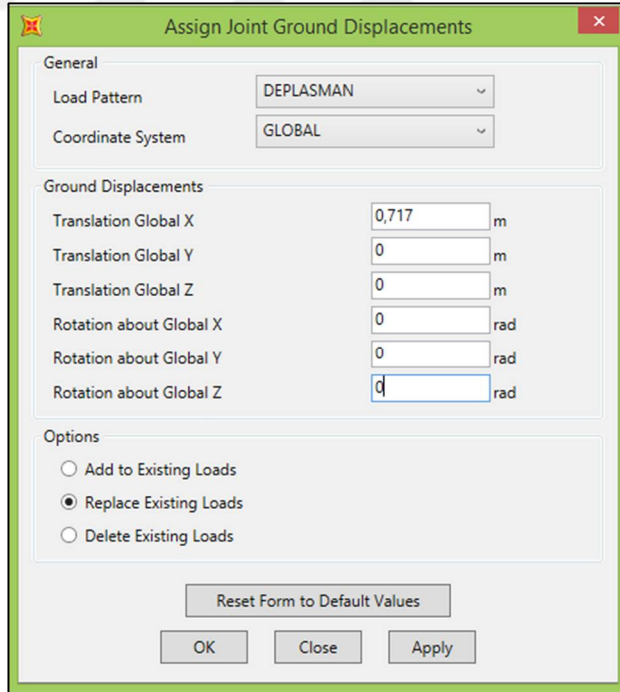


Şekil 3.55. SAP2000 Assign Joint Forces penceresi

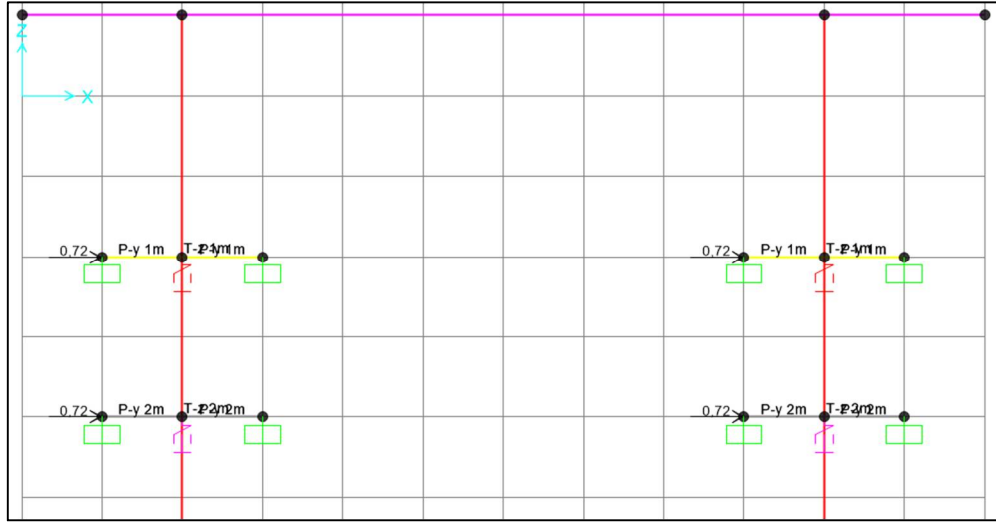


Şekil 3.56. SAP2000 düşey yükün modele etki ettirilmesi

Yatay yerdeğiştirme yüklerinin yaylara uygulanması için model üzerinde p-y yayları ucundaki nokta seçilir. *Assign* → *Joint Loads* → *Displacements* komutuyla açılan *Assign Joint Ground Displacements* penceresinde yükün yönü, değeri ve hangi yük ismi altında olacağı seçilir (Şekil 3.57). Burada, yük isminin deplasman olarak seçilmesi gerekmektedir. Bilgiler girilip onaylandıktan sonra model üzerinde yükün etki ettirildiği görülebilir (Şekil 3.58).

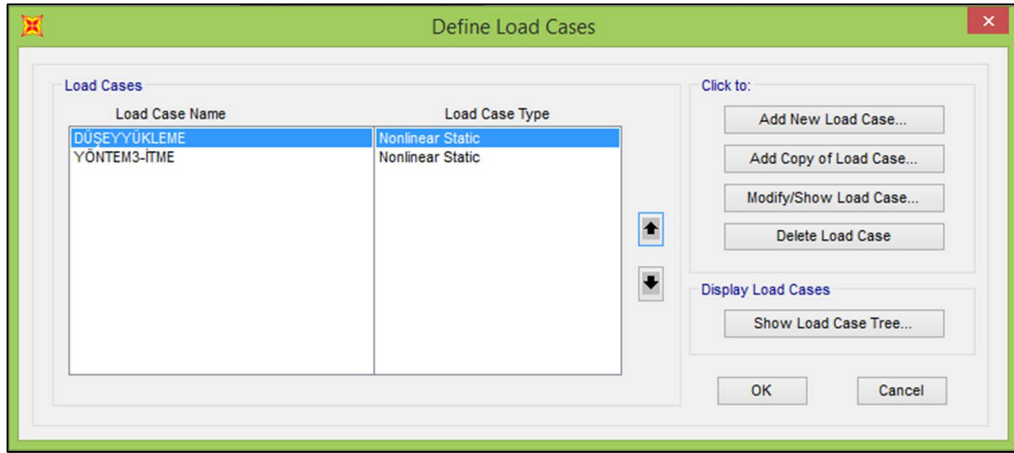


Şekil 3.57. SAP2000 *Assign Joint Ground Displacements* penceresi



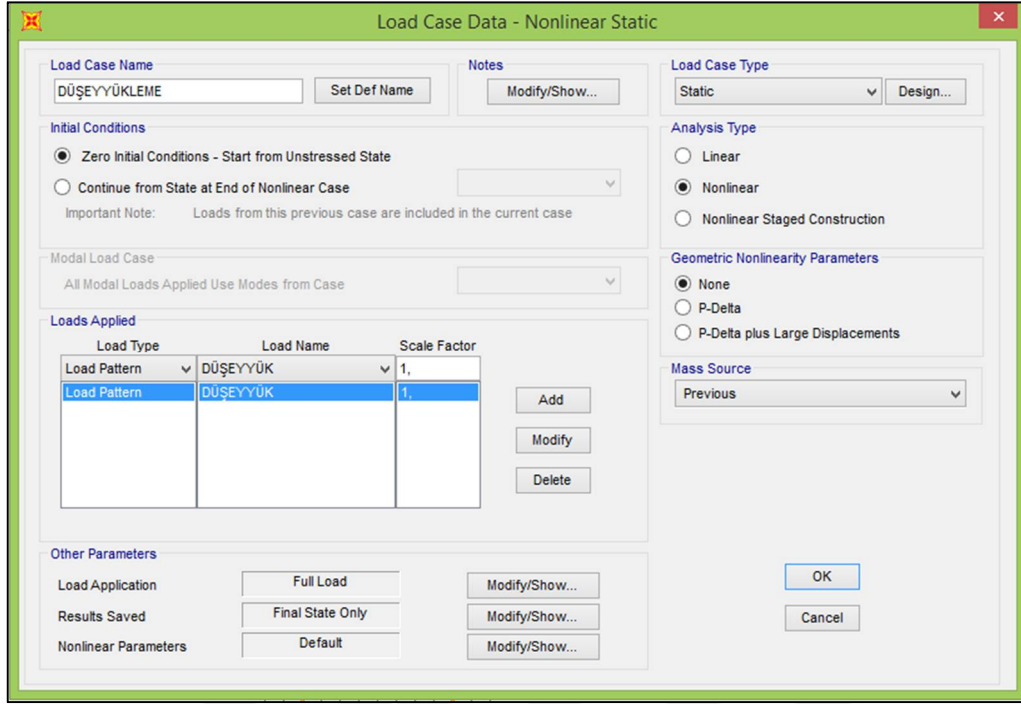
Şekil 3.58. SAP2000 yerdeğiştirme yükünün modele etki ettirilmesi

8) Yükleme durumları yazılıma tanıtılır. Modele önce üstyapı yükü etkisi altında statik nonlinear analiz yapılır. Analizin bittiği yerde, düşey yük etkisi altındaki modele yerdeğiştirme yükleri artımsal şekilde etki ettirilerek statik nonlinear analiz yapılır. Böylece kinematik etkileşim gerçekleştirilmiş olur. Bu kapsamda, yazılıma iki tür yükleme durumu tanıtılacaktır. Bunun için *Define* → *Load Cases* komutuyla açılan *Define Load Cases* penceresinde iki yükleme durumu yazılıma tanıtılır (Şekil 3.59).



Şekil 3.59. SAP2000 Define Load Cases penceresi

Yükleme durumlarının karakteristik özellikleri *Load Cases Data* penceresinde düzenlenir. Düşey yüklemede modele etki ettirilecek yükün 6.maddede yazılıma tanıtılan düşey yük olması gerekmektedir. Ayrıca analiz tipinin nonlinear olması gerekmektedir (Şekil 3.60).



Şekil 3.60. SAP2000 Load Cases Data penceresi (düşey yükleme durumu)

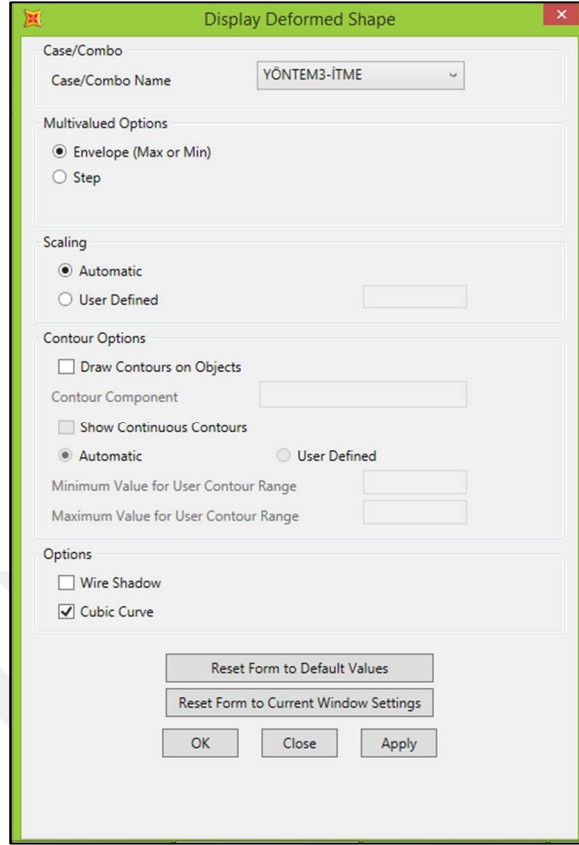
Yatay yerdeğiştirme yükleme durumunda ise modele etki ettirilecek yükün 6.maddede yazılıma tanıtılan deplasman yükü olması, analiz tipinin nonlineer olması gerekmektedir. Ayrıca, analizin düşey yüklenme durumunun bitiminde başlaması uygun olacaktır. TBDY (2018)'de yatay deplasman yüklerinin sıfırdan başlanıp artımsal şekilde uygulanması öngörülmektedir. Bunun için *Result Saved* kısmı, *Multiple States* yapılmalıdır. Bu tez kapsamında yatay yerdeğiştirme yükü, sisteme 11 adımda artımlı olarak uygulanmıştır. Yani her adımda yaklaşık olarak yerdeğiştirme yükü %10 oranında artırılmıştır. (Şekil 3.61).

9) Analiz yapılır. Bunun için, *Analysis* → *Run Analysis* komutuyla açılan *Set Load Cases To Run* penceresinde tüm yüklenme durumları için analiz yapılması sağlanır (Şekil 3.62). *Run Now* komutuyla analiz yapılır.

Şekil 3.61. SAP2000 Load Cases Data penceresi (yerdeğiştirme yüklemesi durumu)

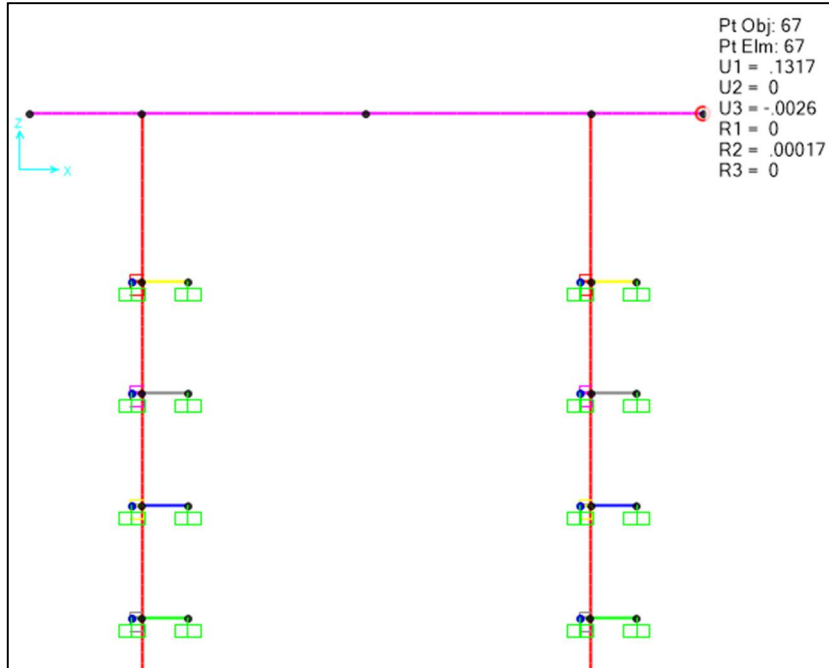
Şekil 3.62. SAP2000 Set Load Cases To Run penceresi

10) Analiz yapıldıktan sonra modelin yaptığı düşey veya yatay yerdeğiştirmeler, *Display* → *Show Deformed Shape* komutuyla açılan *Display Deformed Shape* penceresinde yüklenme durumu seçilerek okunabilir (Şekil 3.63). Sistemde artımlı yüklenmeler esnasında oluşan maksimum ve minimum yerdeğiştirmeleri okumak için *Envelope* seçilmelidir.



Şekil 3.63. SAP2000 Display Deformed Shape penceresi

Seçimden sonra açılan, yük etkileri altında deforme olmuş modelin üzerinde nokta seçilerek yerdeğiştirmeler okunabilir (Şekil 3.64).

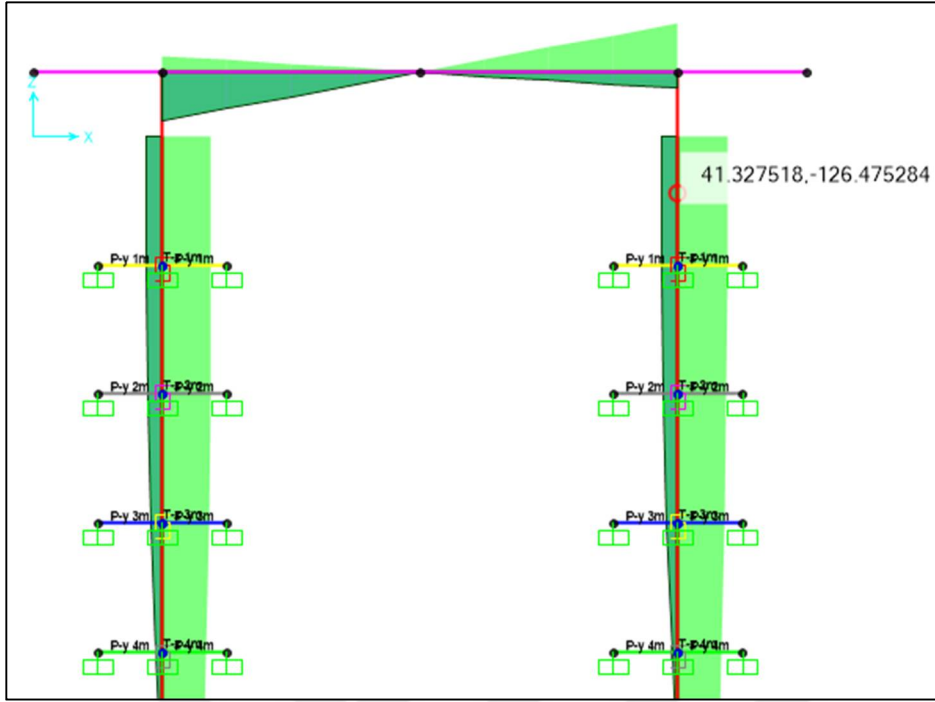


Şekil 3.64. SAP2000 modelin deformasyona uğramış hali

Yüklenme durumları sonucunda modelde oluşan iç kuvvetlerin okunması için *Display* → *Show Forces/Stresses* menüsü altında açılan model elemanlarından biri (çerçeve eleman, düğüm noktası veya nonlinear yay) seçilir. Açılan *Display Frame Forces/Stresses* penceresinde yüklenme durumu ve iç kuvvet türü seçilir. Artımlı analiz sonucunda modelde oluşan maksimum iç kuvvetleri okumak için pencerede *Envelope* seçilir (Şekil 3.65). Seçimler yapıldıktan sonra açılan model üzerinde oluşan iç kuvvet grafikleri kullanılarak iç kuvvet okumaları yapılabilir (Şekil 3.66).

The image shows the 'Display Frame Forces/Stresses' dialog box in SAP2000. The 'Case/Combo' dropdown is set to 'YÖNTEM3-İTME'. Under 'Multivalued Options', 'Envelope (Max or Min)' is selected. In the 'Display Type' section, 'Force' is selected. The 'Component' section has 'Moment 3-3' selected. For 'Scaling for Diagram', 'Automatic' is chosen. Under 'Options for Diagram', 'Fill Diagram' is selected. The bottom of the dialog features buttons for 'Reset Form to Default Values', 'Reset Form to Current Window Settings', 'OK', 'Close', and 'Apply'.

Şekil 3.65. SAP2000 Display Frame Forces/Stresses penceresi



Şekil 3.66. SAP2000 modelde oluşan iç kuvvet (moment)

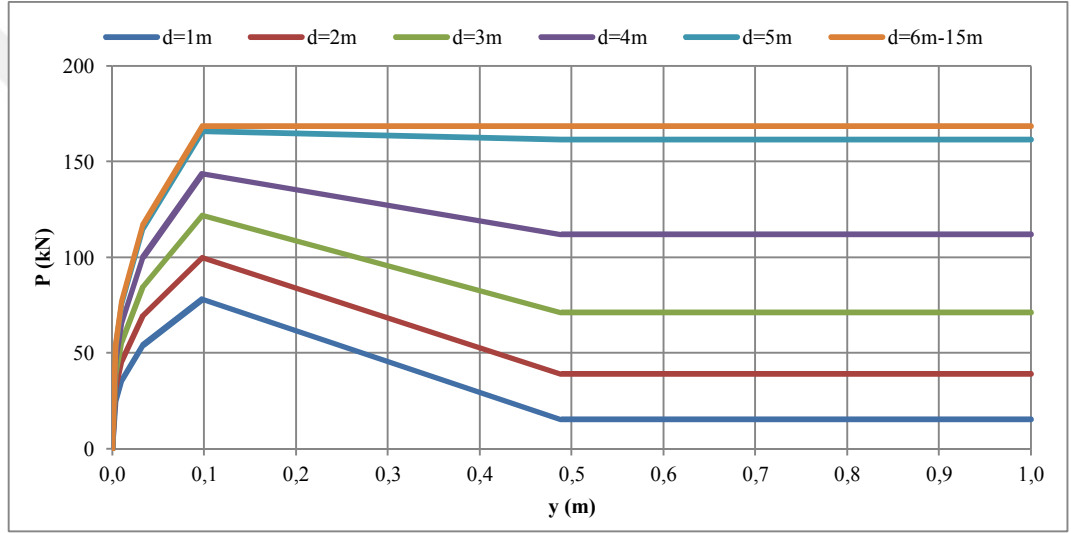
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kazık Çapı Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

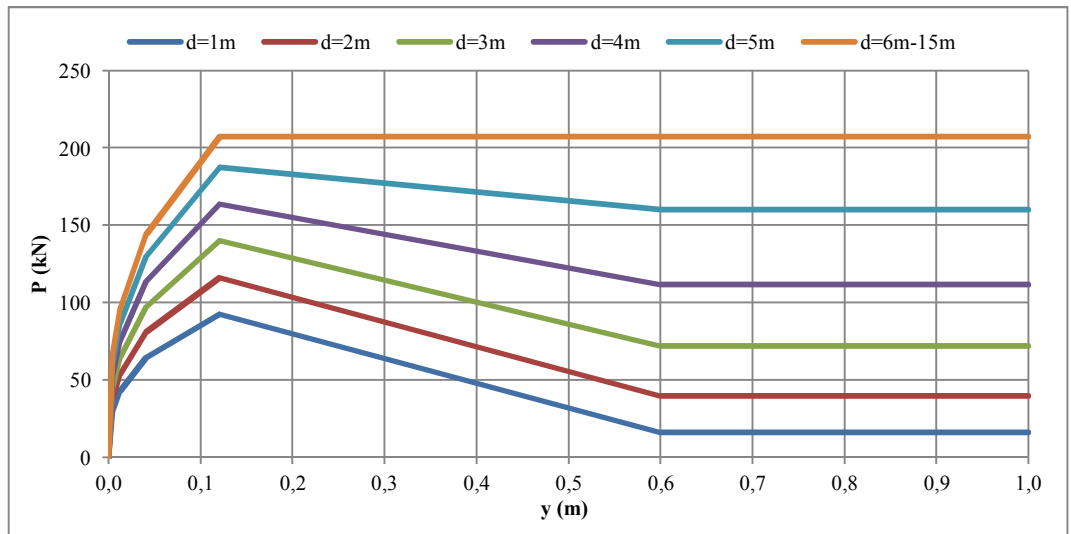
Farklı kazık çaplarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için Şekil 3.1’de verilen koşullar (Model-1) kullanılmıştır.

➤ Yumuşak Kil Zeminde ($c=40 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=140 \text{ m/s}$, $PI=20$)

Yumuşak kil zemin için P-y eğrileri, API (2007)’deki dinamik yükleme koşulları göz önüne alınarak elde edilmiştir. 65, 80, 100, 120 ve 150 cm kazık çapı için elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir.

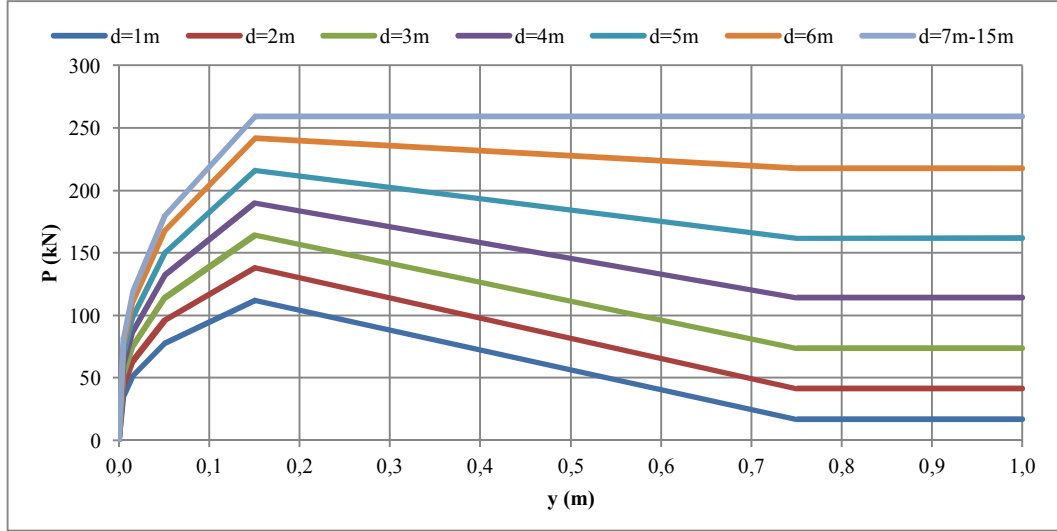


(a) 65 cm kazık çapı için P-y eğrileri

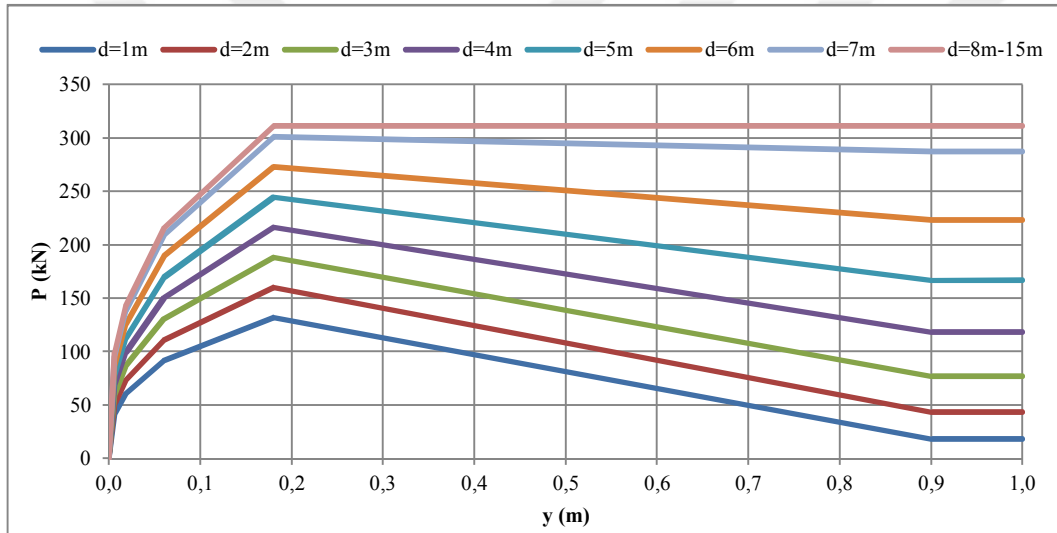


(b) 80 cm kazık çapı için P-y eğrileri

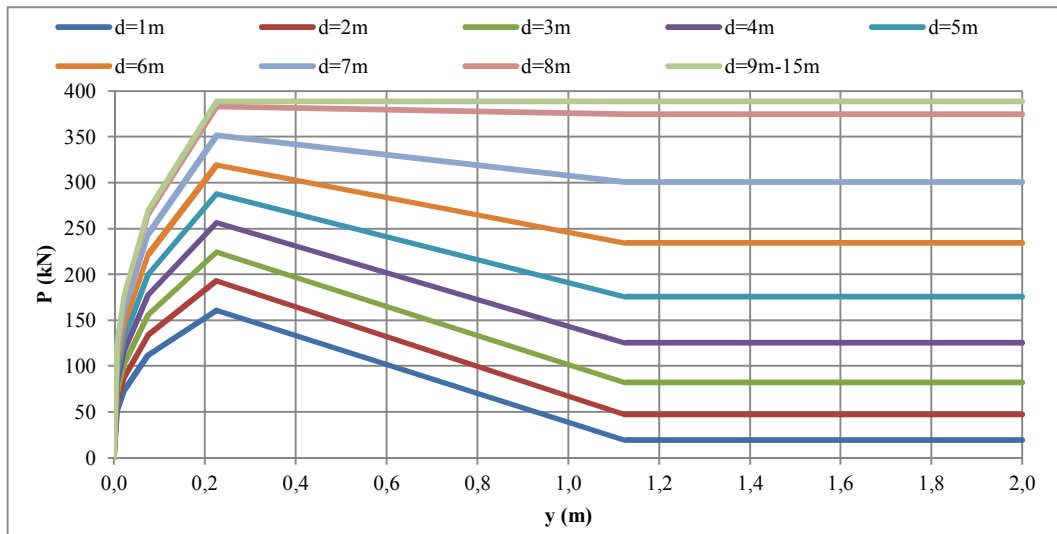
Şekil 4.1. Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri



(c) 100 cm kazık çapı için $P-y$ eğrileri

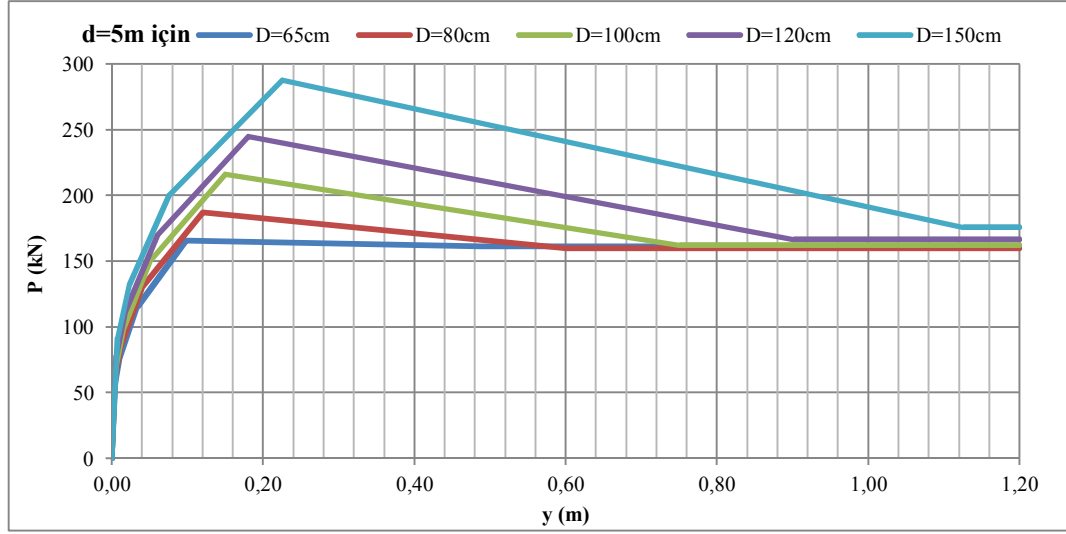


(d) 120 cm kazık çapı için $P-y$ eğrileri



(e) 150 cm kazık çapı için $P-y$ eğrileri

Şekil 4.1. Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için $P-y$ eğrileri (devamı)



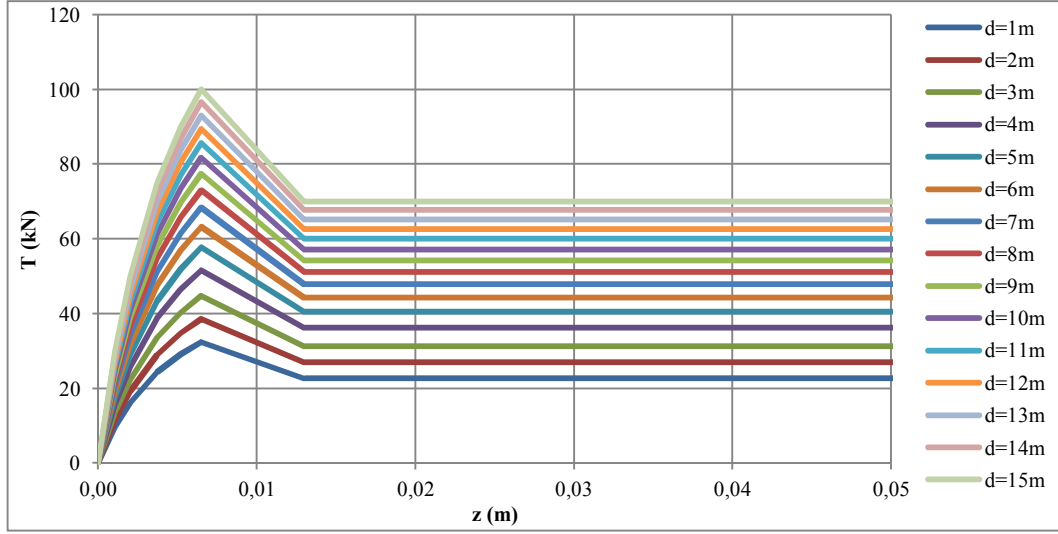
(f) d=5m’de farklı kazık çapları için P-y eğrileri

Şekil 4.1. Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri (devamı)

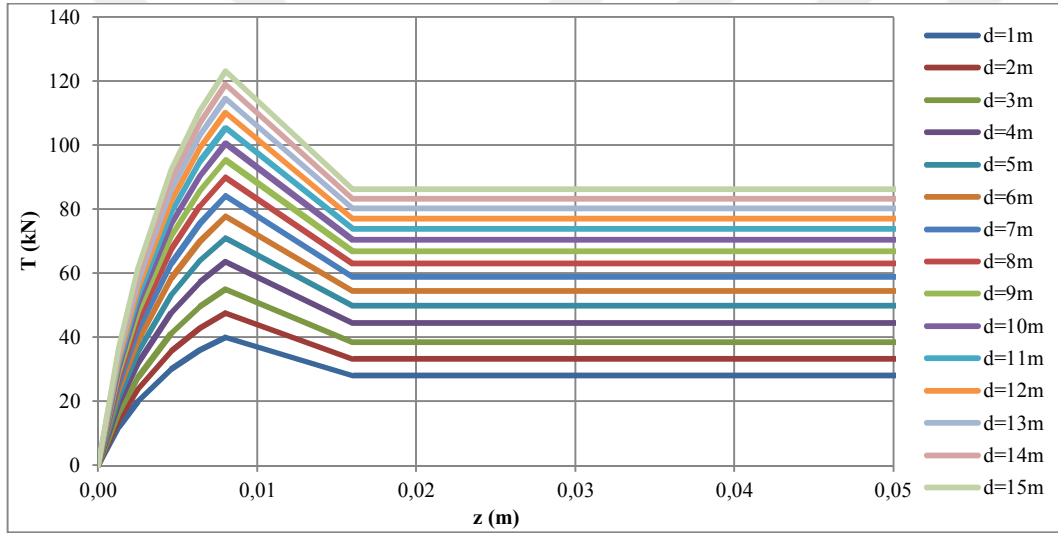
Şekil 4.1’deki P-y eğrileri incelendiğinde, kazık çapı arttığı zaman zemin kritik derinliğiyle beraber zeminin elastik davrandığı deplasman ve yük aralığının arttığı görülecektir (Şekil 4.1f). Kritik derinlikten sonraki derinliklerde yumuşak kil yay özellikleri değişmemektedir ve statik yükleme koşulları geçerlidir. Kritik derinlikten önceki derinliklerde ise dinamik yükleme koşullarını geçerlidir.

Yumuşak kil zemin için T-z eğrileri, API (2007)’deki koşullar göz önüne alınarak $t_{res}=0,7t_{max}$ olacak şekilde elde edilmiştir. 65, 80, 100, 120 ve 150 cm kazık çapı için elde edilen T-z eğrileri Şekil 4.2’de verilmiştir. Kazık çapı arttıkça kazığın zemine sürtündüğü alan arttığı için kazığın yerel deplasman yapması için daha fazla yük gerekmektedir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi çap arttıkça aynı derinlikte kazığın aynı deplasmanı yapması için gereken yük artmaktadır. Ayrıca kazık çapının artmasıyla kazığın güvenli şekilde yapabileceği yerel deplasman artmaktadır (Şekil 4.2f).

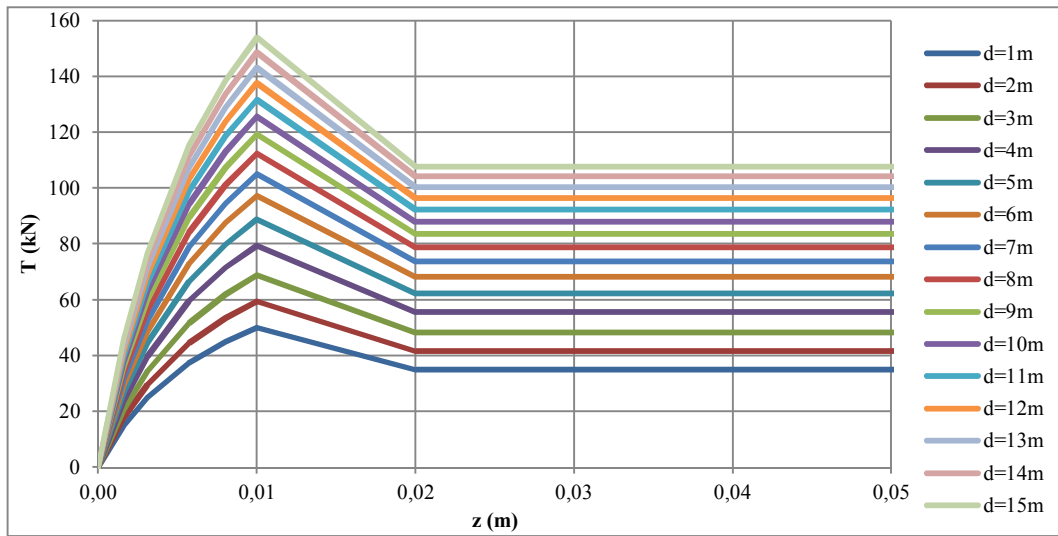
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(a) 65 cm kazık çapı için T-z eğrileri

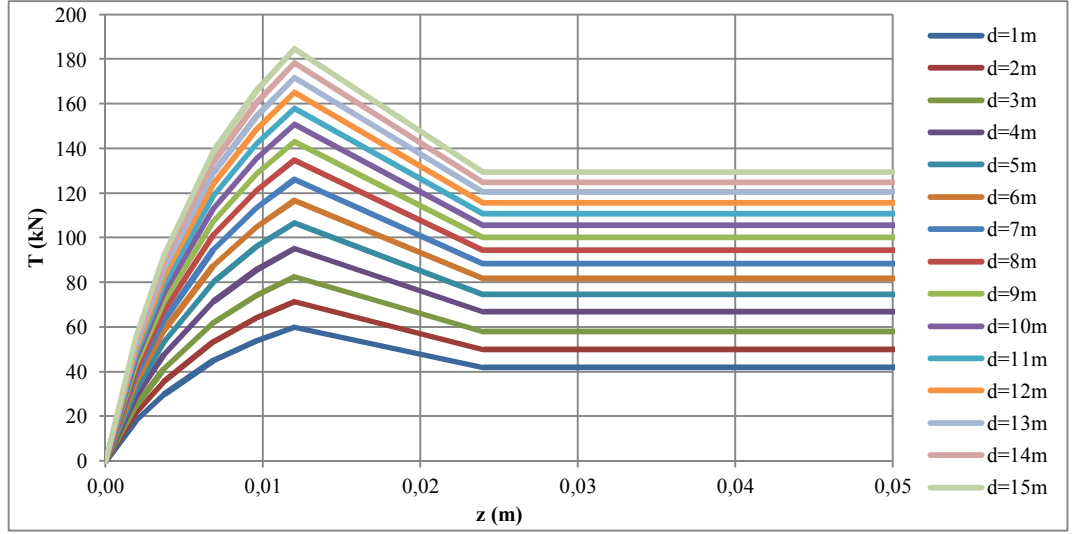


(b) 80 cm kazık çapı için T-z eğrileri

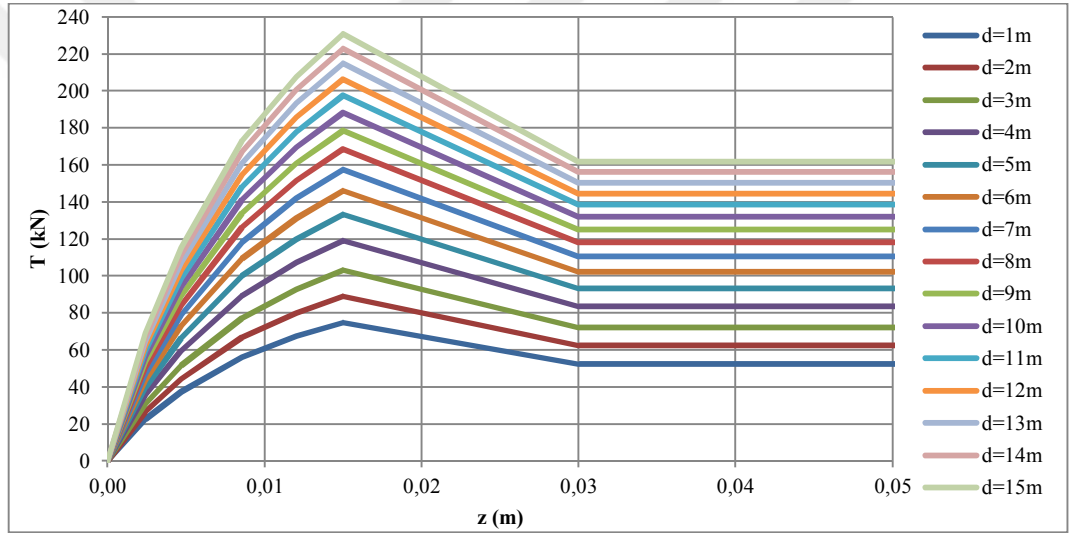


(c) 100 cm kazık çapı için T-z eğrileri

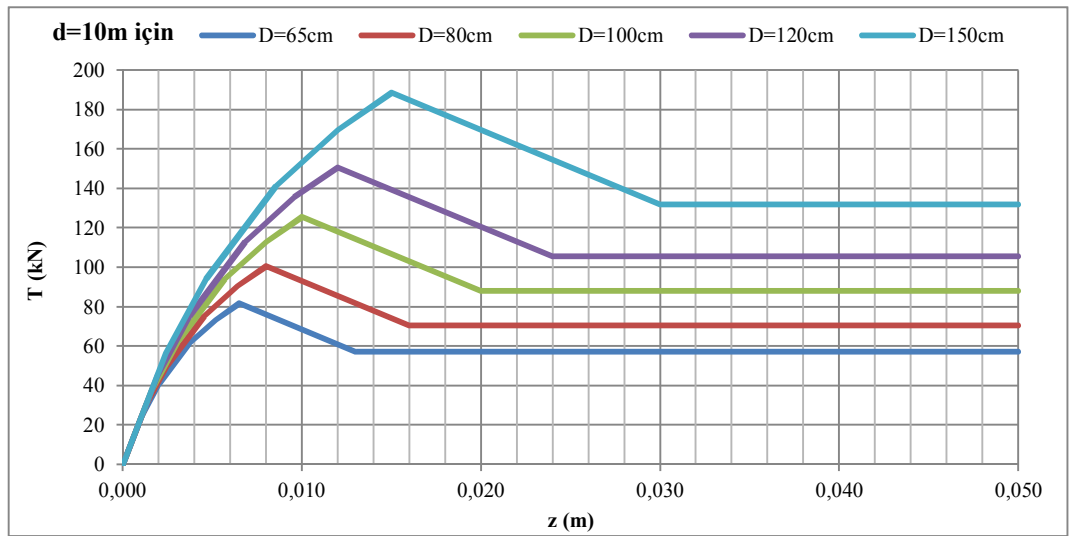
Şekil 4.2. Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri



(d) 120 cm kazık çapı için T-z eğrileri



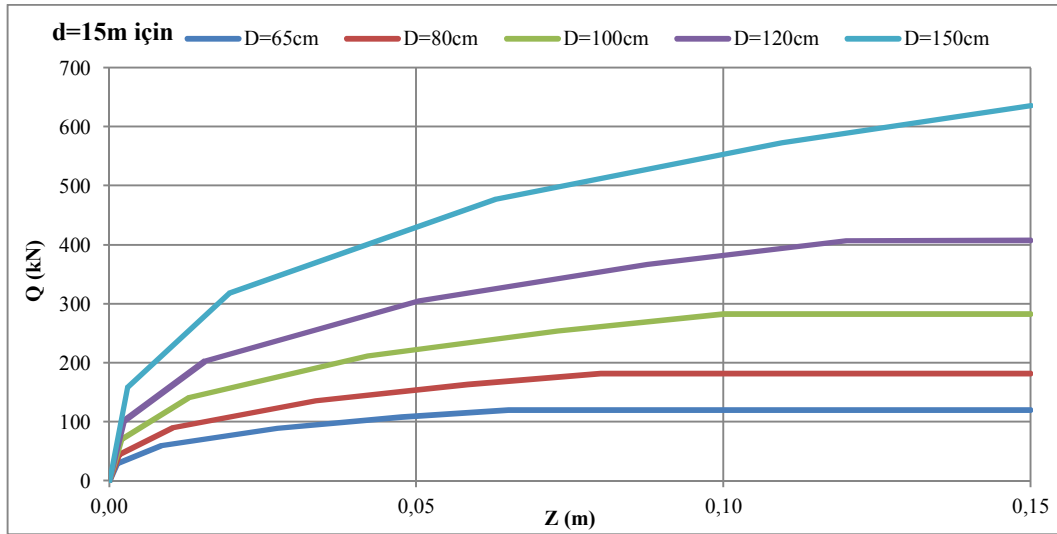
(e) 150 cm kazık çapı için T-z eğrileri



(f) d=10m'de farklı kazık çapları için T-z eğrileri

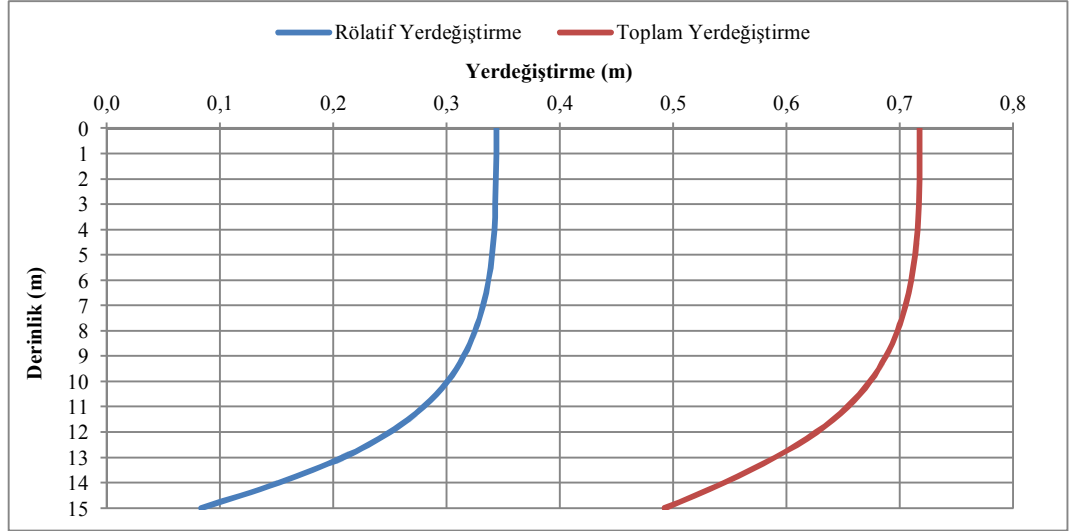
Şekil 4.2. Model-1 yumuşak kil zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri (devamı)

Yumuşak kil zeminde 15 m derinliği için Q-Z eğrileri, API (2007)'deki koşullar göz önüne alınarak 65, 80, 100, 120 ve 150 cm kazık çapları için elde edilen Q-Z eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir. Kazık çapı arttıkça kazık kesit alanı arttığı için kazığın yerel deplasman yapması için daha fazla yük gerekmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi çap arttıkça aynı derinlikte kazığın aynı deplasmanı yapması için gereken yük artmaktadır. Ayrıca kazık çapının artmasıyla kazığın güvenli şekilde yapabileceği yerel deplasman artmaktadır.



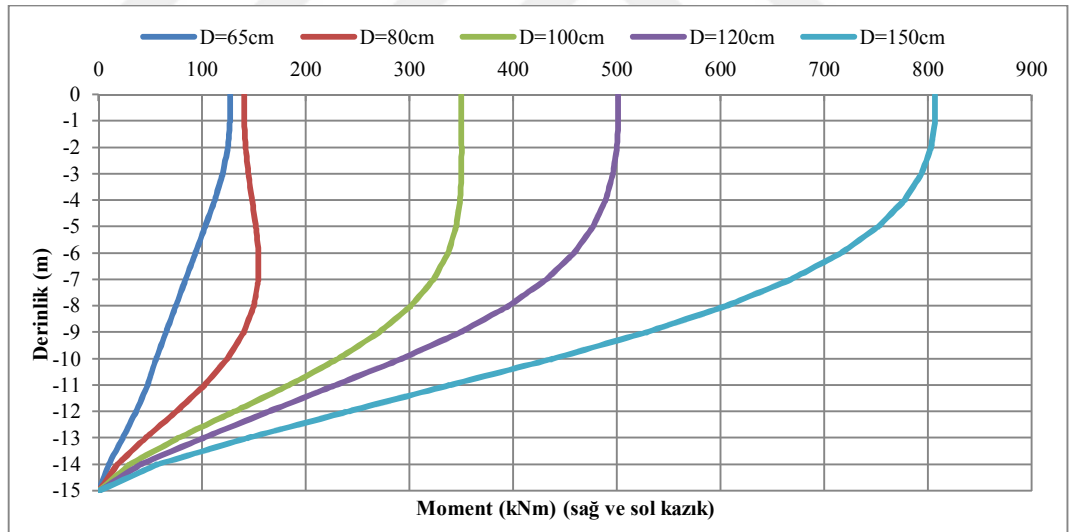
Şekil 4.3. Model-1 yumuşak kil zeminde d=15m'de farklı kazık çapları için Q-Z eğrileri

Zemin nonlineer yay özellikleri bulunduğundan sonra *RSN1605_DUZCE_DZC270* (0.51g) deprem datası kullanılarak Şekil 3.1'de verilen zemin profili (Model-1) için *DEEPSOIL* ile zemin davranış analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Buna göre, zeminin yüzeye yakın derinliklerinde birbirine yakın değerlerde rölatif deplasman oluşmuştur. Zemin derinliği artarken rölatif deplasman da azalmaktadır.



Şekil 4.4. Model-1 yumuşak kil zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

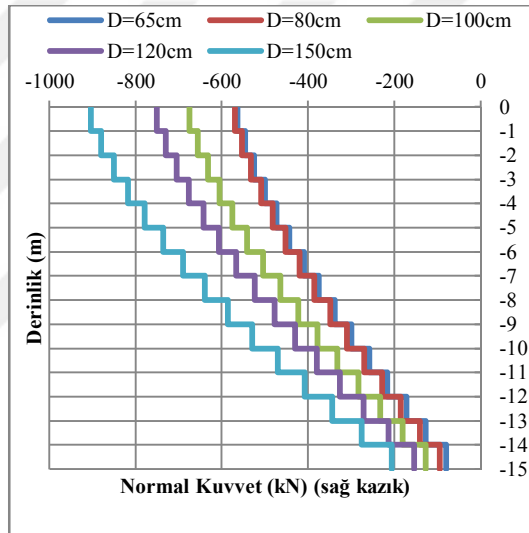
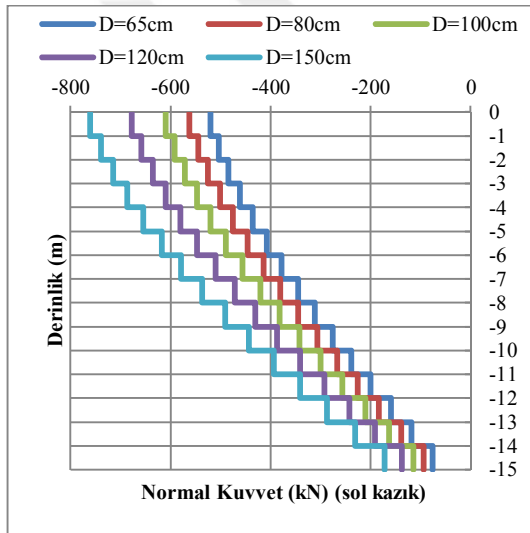
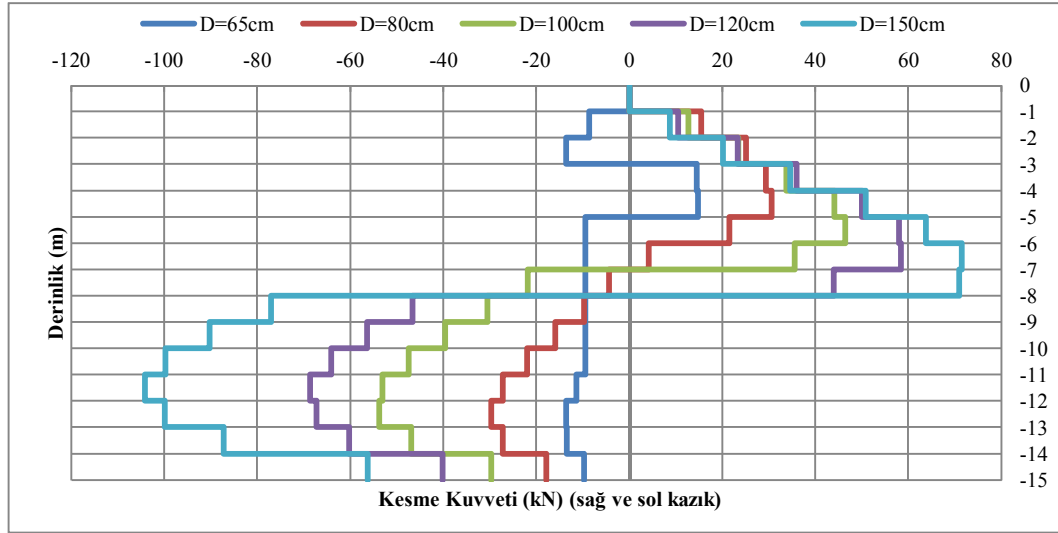
Toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak Model-1 *SAP2000*'de modellenmiştir. Toplam yerdeğiştirmeler tüm P-y yaylarına uygulanmıştır. Yapılan artımlı nonlinear analiz sonucunda kazıklarda oluşan maksimum iç kuvvetler ve maksimum deplasman değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir.



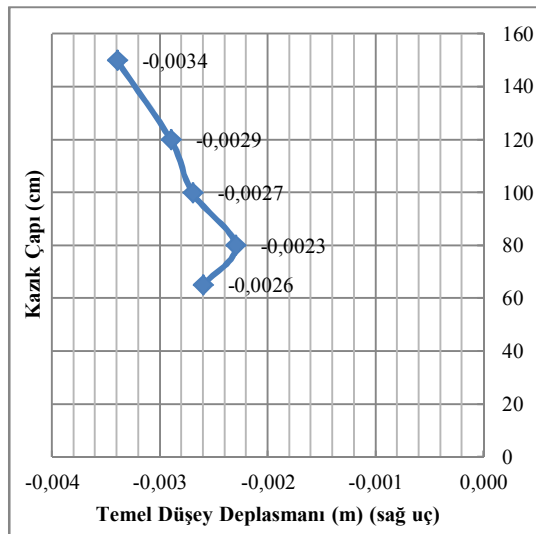
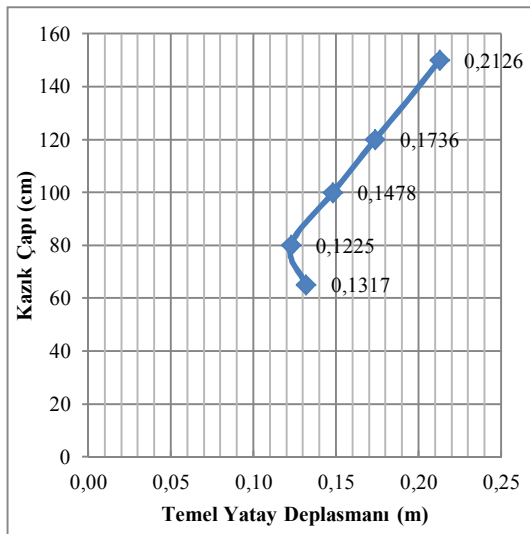
(a) Moment – derinlik ilişkisi

Şekil 4.5. Model-1 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



(d) Temel deplasmanları – kazık çapı ilişkisi

Şekil 4.5. Model-1 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

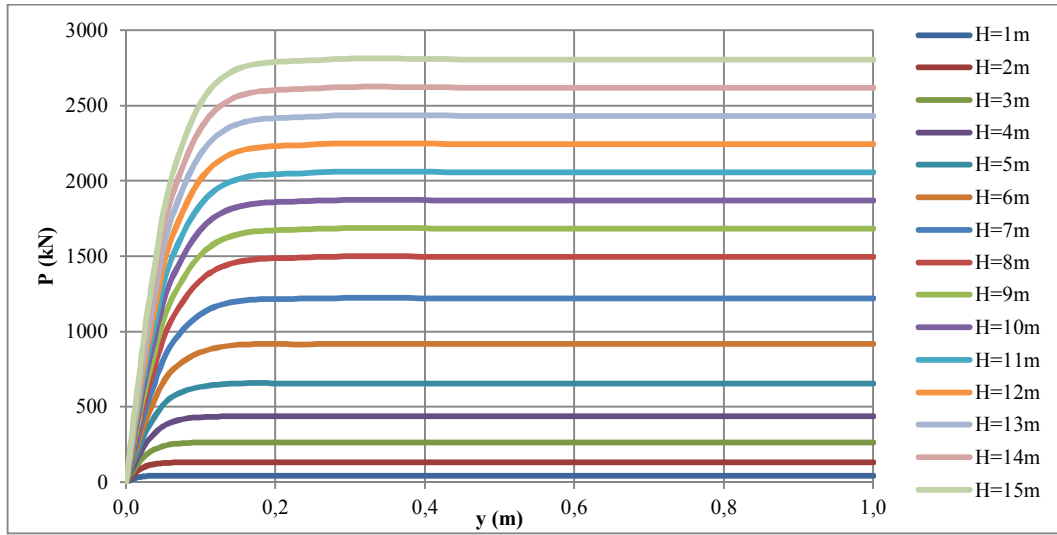
Kazıklara üstyapıdan gelen yükler tekil ve aynı değerde ve kazık sayısı iki olduğu için kazıklarda aynı moment ve kesme kuvveti değerleri oluşmuştur. Kazık çapı arttıkça yay rijitliği artmaktadır. Bu durumda yaya etki eden aynı deplasman yükü için, kazıklara daha çok yatay kuvvet etki edecektir. Dolayısıyla modele etki eden yatay yükün artmasıyla kazıklarda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri artmaktadır. Kazık çapı 2 katına çıkarken maksimum moment değeri 6 katına, maksimum kesme kuvveti 7 katına çıkmıştır. Kritik derinliğin davranış üzerinde çapa göre farklı etkisi bulunmaktadır. Maksimum momentler kritik derinliğin üstünde oluşmaktadır. Kesme kuvvetleri kritik derinlikten sonra yön değiştirmektedir. Kritik derinlikten sonra kesme kuvvetlerinin farklı yönde oluşması momenti azaltmakla birlikte moment azalış hızları çapa göre farklı olmaktadır.

Modele yatay yük etki ettiği için normal kuvvet değerleri iki kazıkta farklıdır. Kazık çapı arttıkça yatay yük arttığı için kazık maksimum normal kuvvetleri arasındaki fark artmaktadır. 65 cm kazık çapları için iki kazığın maksimum normal kuvveti arasındaki fark yaklaşık 40 kN iken, kazık çapları 150 cm olduğunda fark yaklaşık 140 kN olmaktadır.

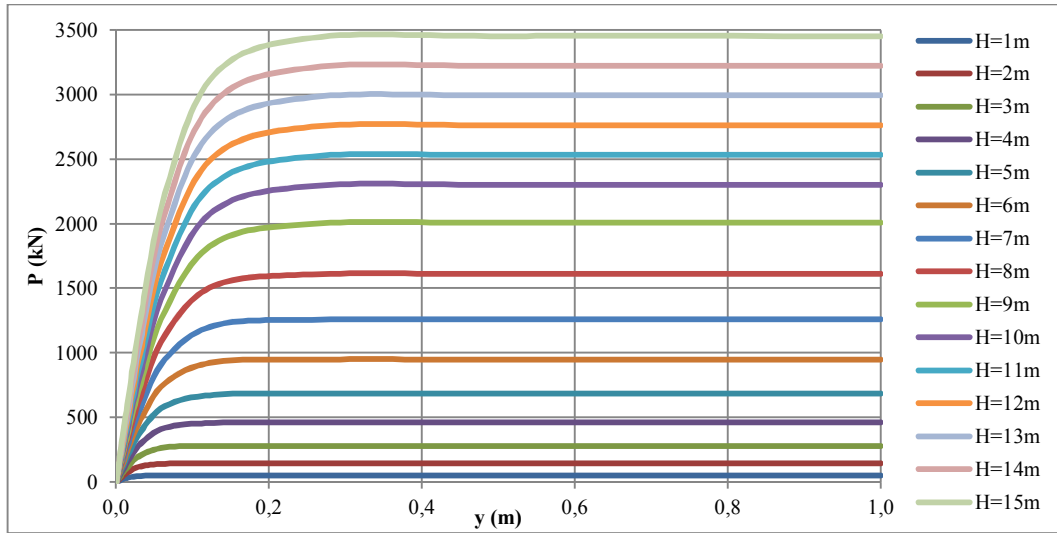
+x yönünde yüklenen modelin temeli +x yönünde yatay deplasman yapmaktadır. Model, yüklenme sonucunda saat yönünde dönmeye zorlanmakta ve maksimum düşey deplasman temelin sağ ucunda oluşmaktadır. Kazık başlığı yani radye temelin yaptığı maksimum yatay deplasman kazık çapı arttıkça artmaktadır. Kazık çapları arttıkça aynı zemin yerdeğiştirme yükünde kazıklara daha fazla yük etki ettiği ve kritik derinlik arttığı için yatay deplasman artmaktadır. Kazık çapı 2 katına çıkarken kazık başlığı yatay deplasmanı yaklaşık olarak 2 katına çıkmaktadır. Kazık çapının artmasıyla düşey deplasmanın azalması gerektiği düşünülebilir. Çünkü düşey yük değişmemektedir ve düşey yayların (T-z, Q-Z) rijitliği çap arttıkça artmaktadır. Ancak, yanal yük artışının etkisi daha fazla olduğu için temel sağ ucundaki düşey deplasman artmaktadır. Kazık çapı 2 katına çıkarken düşey deplasman %30 oranında artmaktadır. Kazık çapı 65 cm'den 80 cm'ye çıkarken deplasmanların azalması tümüyle yay rijitlikleri ile yatay yerdeğiştirme yüklerinin birbirini dengelemesi ve nonlinear yüklenme durumu ile ilgilidir.

➤ Çok Gevşek Kum Zeminde ($\Phi=28$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=170 \text{ m/s}$)

Çok gevşek kum zemin için P-y eğrileri, API (2007)'deki dinamik yükleme koşulları göz önüne alınarak elde edilmiştir. 65, 80 ve 100 cm kazık çapları için elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.6'da verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, aynı derinlikte kazık çapı arttıkça zeminin elastik davrandığı yük aralığı artmaktadır (Şekil 4.6d). Yani kazık çapı artarken zeminin yanal yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Kum zeminlerde derinliğin artmasıyla beraber yay rijitliği kil zeminlere göre oldukça fazla artmaktadır. Şekil 4.6'daki grafikler incelendiğinde herhangi bir kazık çapı değeri için 1m derinliğindeki yay rijitliği 15m derinliğindeki yay rijitliğinin yaklaşık 70 katıdır.

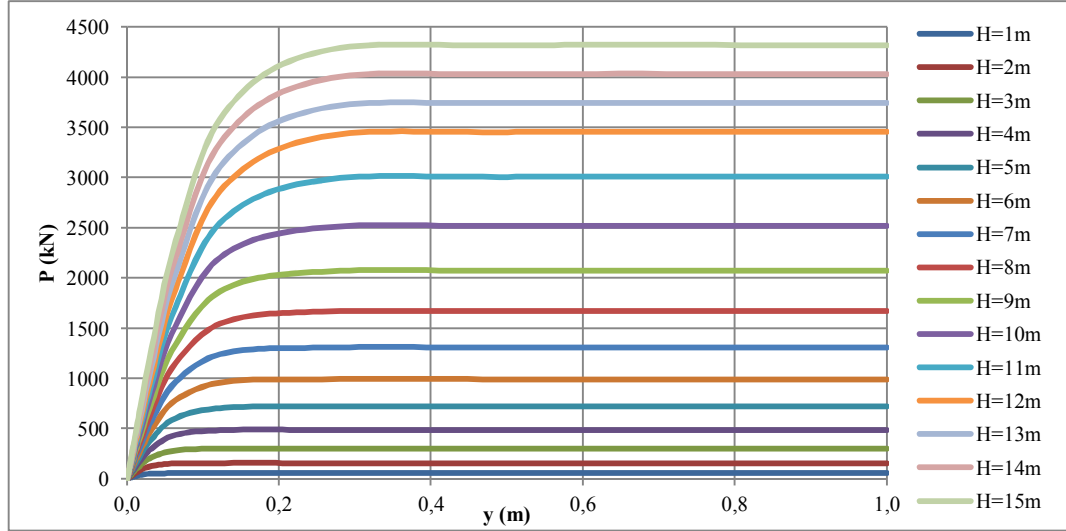


(a) 65 cm kazık çapı için P-y eğrileri

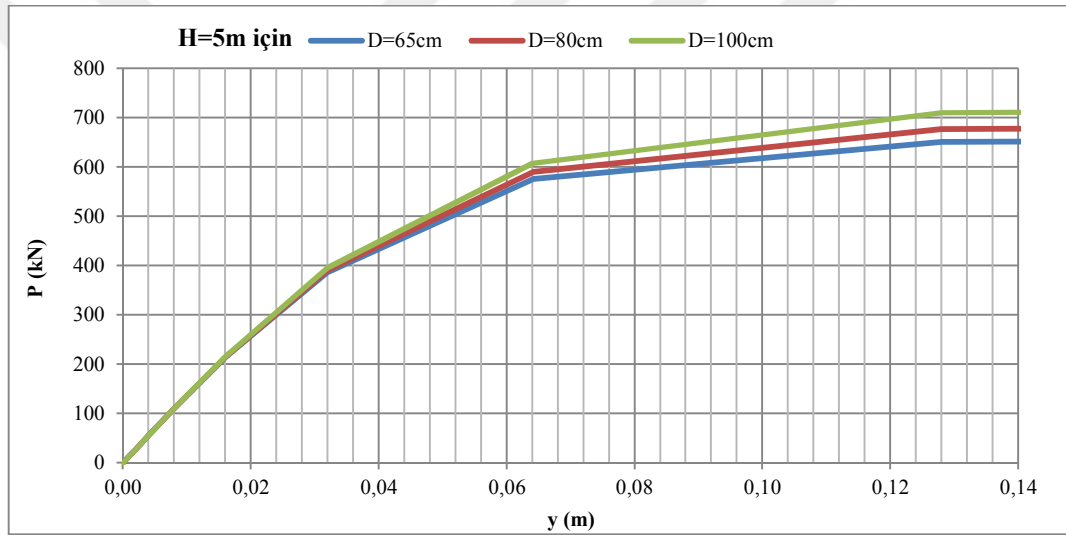


(b) 80 cm kazık çapı için P-y eğrileri

Şekil 4.6. Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri



(c) 100 cm kazık çapı için P-y eğrileri

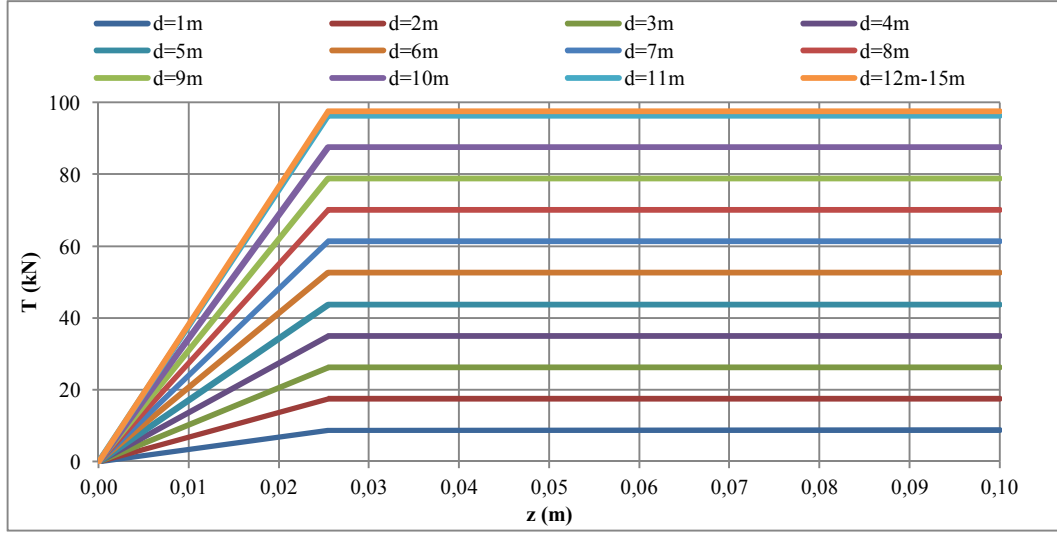


(d) H=5m'de farklı kazık çapları için P-y eğrileri

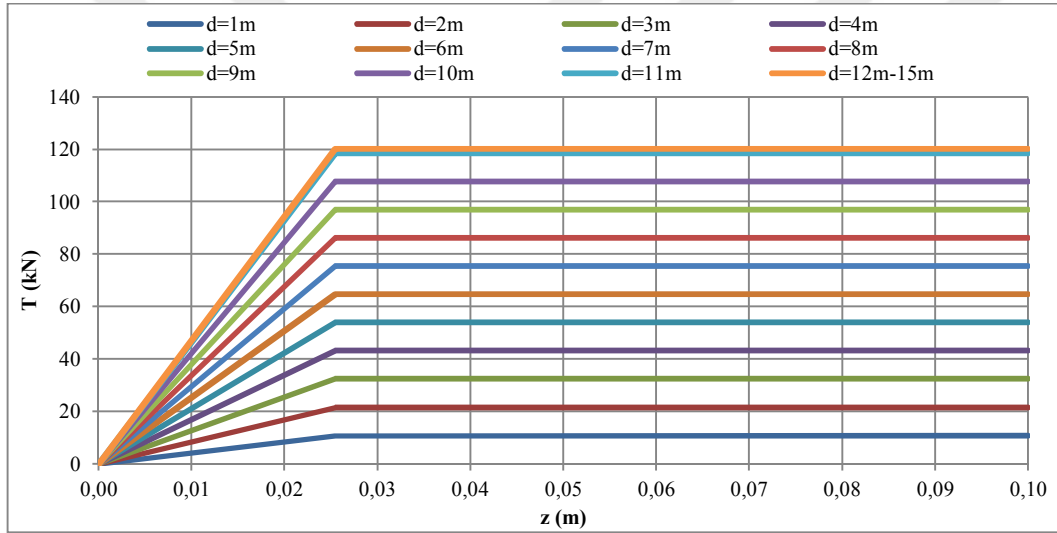
Şekil 4.6. Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için P-y eğrileri (devamı)

Çok gevşek kum zemin için T-z eğrileri, API (2002)'deki veriler göz önüne alınarak elde edilmiştir. 65, 80 ve 100 cm kazık çapı için elde edilen T-z eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir. Kazık çapı arttıkça, kazığın aynı yerel deplasmanı yapması için gereken yük aralığı artmaktadır (Şekil 4.7d). Derinliğin artmasıyla zemin rijitliği artmaktadır. Grafikler incelendiğinde herhangi bir kazık çapı için 1m derinlikteki yay rijitliği, 15 m derinliğindeki yay rijitliğinin yaklaşık 9 katı olduğu görülecektir. API (2002)'deki maksimum birim sürtünme direnci ($t_{max}=47.8$ kPa) sınırı ve T-z eğrilerinin çapa bağlı olmamasından dolayı 12. metreden sonra T-z eğrileri değişmemektedir.

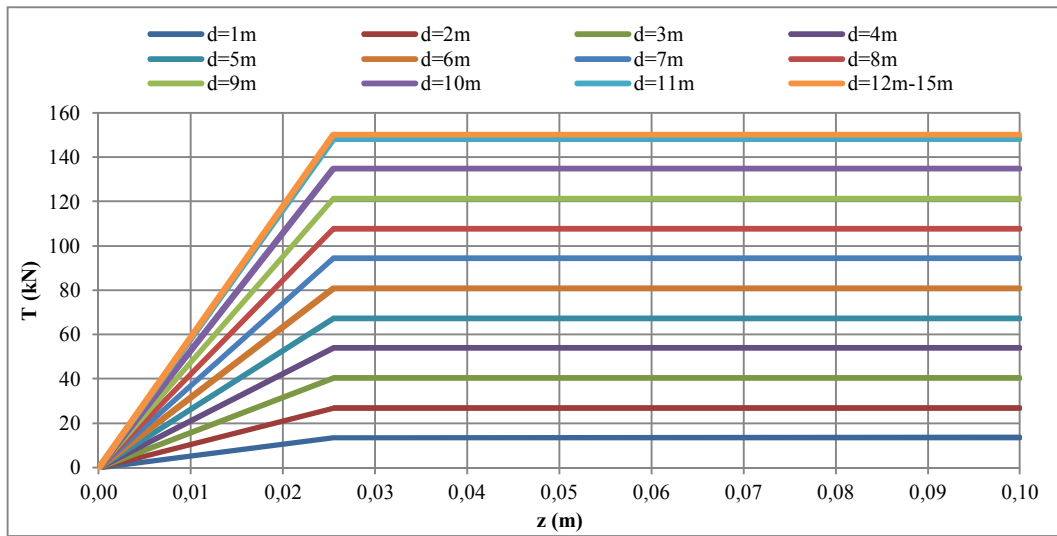
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(a) 65 cm kazık çapı için T-z eğrileri

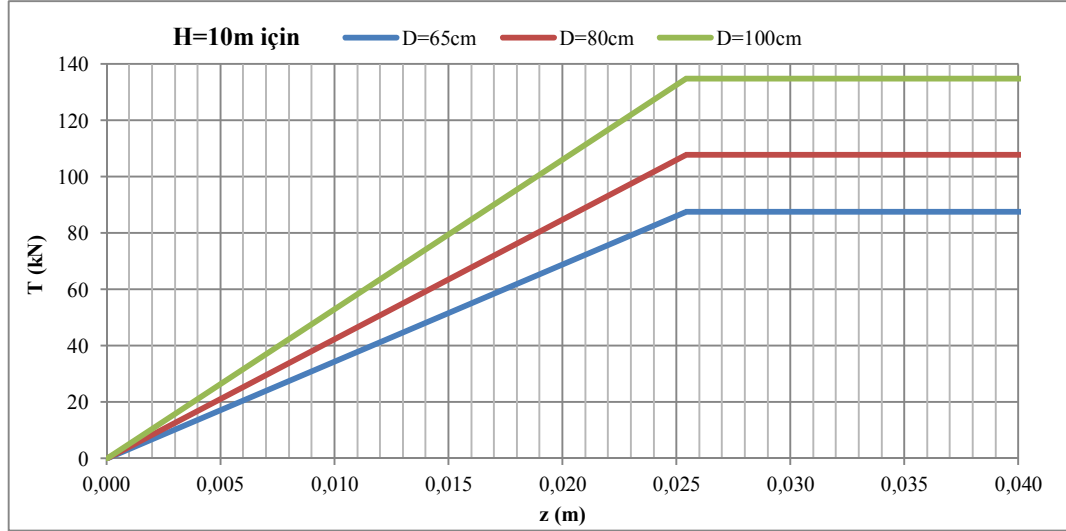


(b) 80 cm kazık çapı için T-z eğrileri



(c) 100 cm kazık çapı için T-z eğrileri

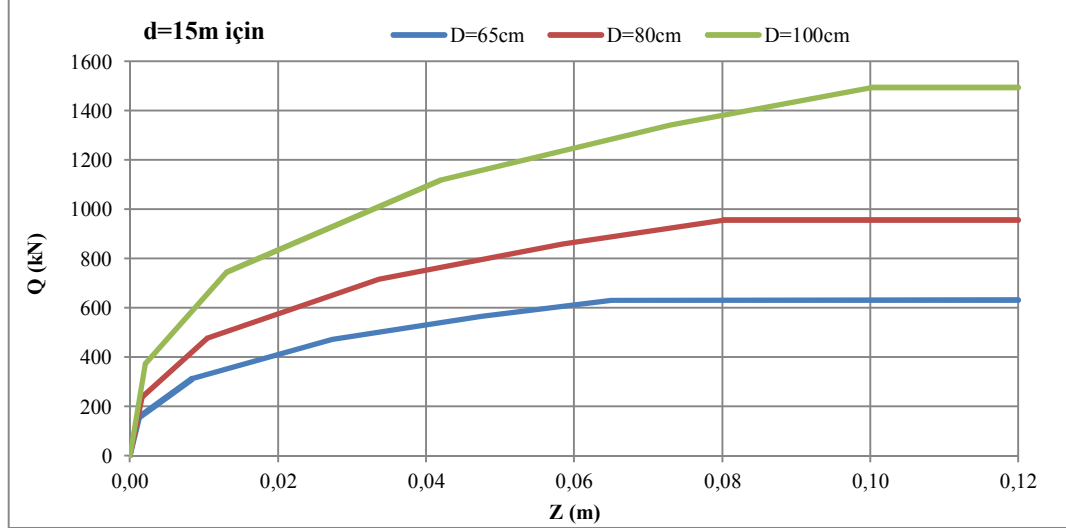
Şekil 4.7. Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri



(d) H=10m’de farklı kazık çapları için T-z eğrileri

Şekil 4.7. Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için T-z eğrileri (devamı)

Çok gevşek zeminde 15 m derinliğindeki Q-Z eğrileri, API (2002)’deki koşullar göz önüne alınarak elde edilmiştir. 65, 80 ve 100 cm kazık çapları için elde edilen Q-Z eğrileri Şekil 4.8’de verilmiştir. Buna göre, kazık çapı 65’ten 100 cm’ye çıktığında yay rijitliği 2.5 katına çıkmaktadır.

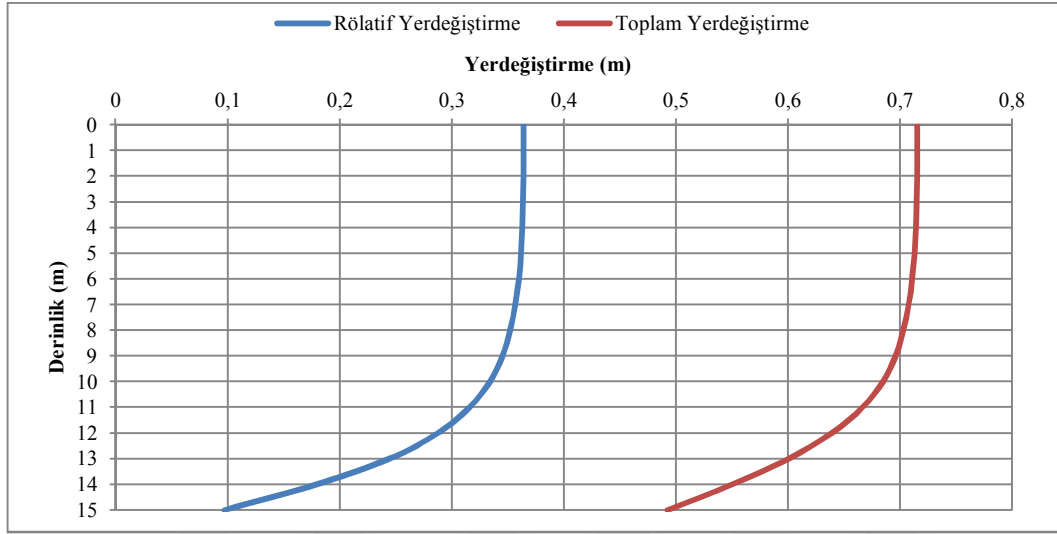


Şekil 4.8. Model-1 çok gevşek kum zeminde farklı kazık çapları için Q-Z eğrileri

RSN1605_DUZCE_DZC270 (0.51g) deprem datası kullanılarak Şekil 3.1’de verilen zemin profili (Model-1) için *DEEPSOIL* ile zemin davranış analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Çok gevşek kum zemin ile yumuşak kil

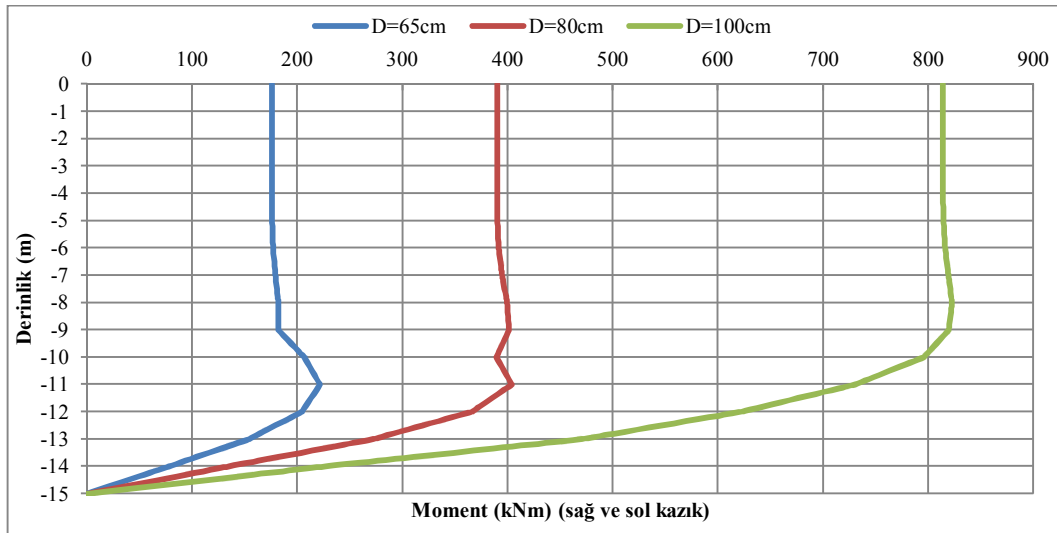
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

zeminin birim hacim ağırlık ve kayma dalgası hızı birbirine yakın olduğu için yerdeğiştirme değerleri de birbirine yakındır.



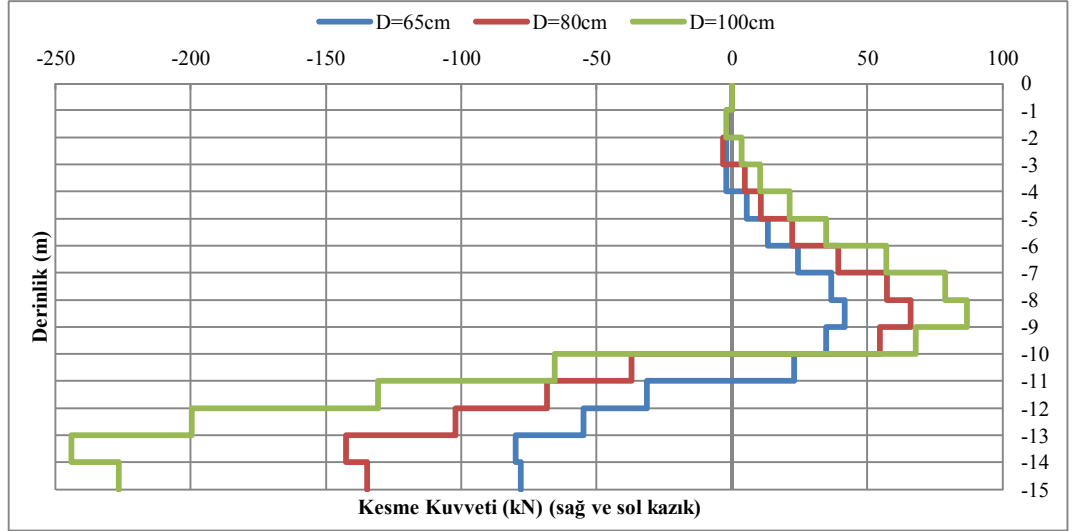
Şekil 4.9. Model-1 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak Model-1 *SAP2000*'de modellenmiştir. Yapılan artımlı nonlinear analizden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir.

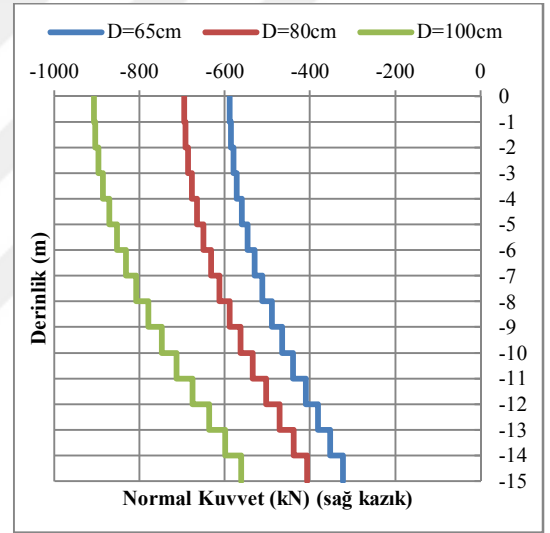
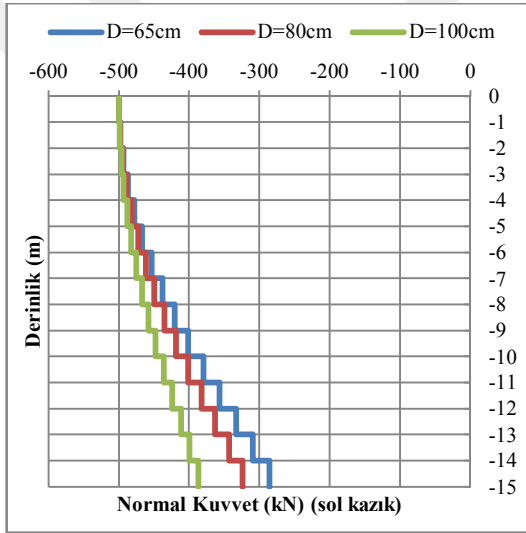


(a) Moment – derinlik ilişkisi

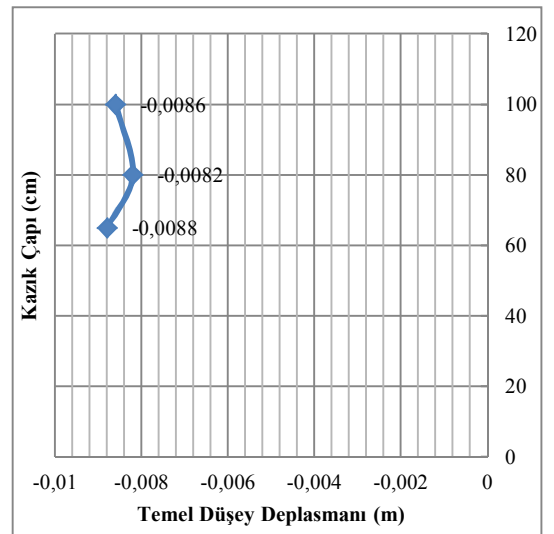
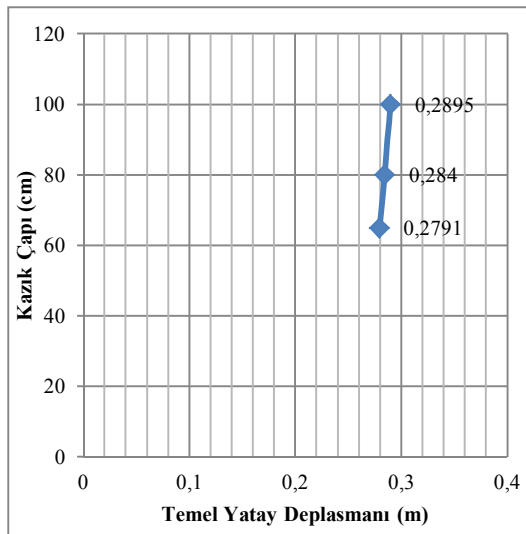
Şekil 4.10. Model-1 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



(d) Temel deplasmanları – kazık çapı ilişkisi

Şekil 4.10. Model-1 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Kazıklara üstyapıdan gelen yükler tekil ve aynı değerde olduğu ve kazık sayısı az olduğu için kazıklarda aynı moment ve kesme kuvveti değerleri oluşmuştur. Kazık çapı arttıkça yay rijitliği ve yatay yükün artmasıyla kazıklarda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri artmaktadır. Kazık çapı 65 cm'den 100 cm'ye çıkarken maksimum moment 4 katına, maksimum kesme kuvveti 3 katına çıkmıştır. Kazık çapı arttıkça yatay yük arttığı için modelin stabilitesi bozulmaktadır. Her kazık çapı için sol kazıktaki maksimum normal kuvvet, düşey yüklenme esnasında oluşmaktadır ve 500 kN'dur. Yanal yük arttığında sol kazıktaki normal kuvvet azalmakta, sağ kazıktaki normal kuvvet artmaktadır.

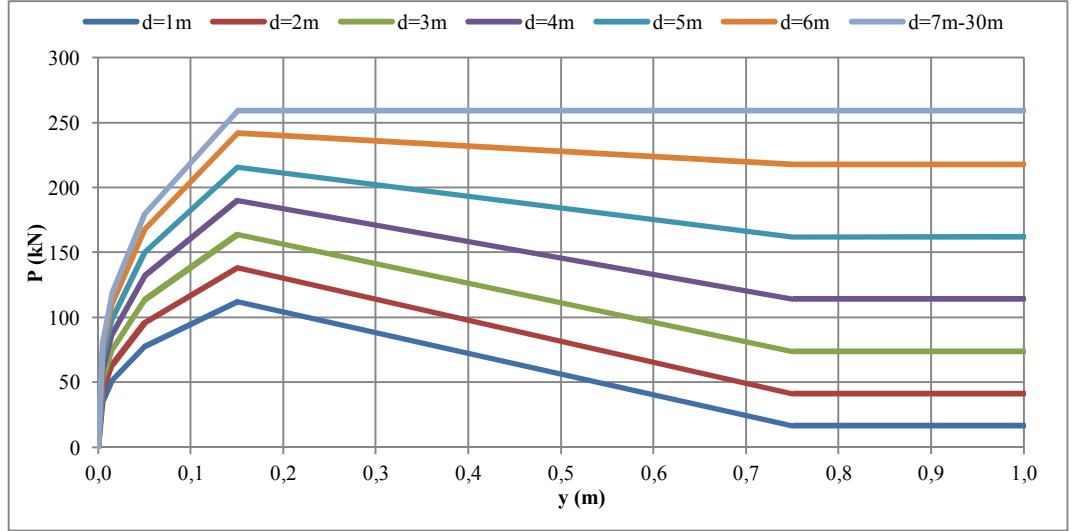
Yanal yüke maruz kalan model, +x yönünde yanal deplasman, -z yönünde düşey deplasman yapmaktadır. Kazık çapı arttıkça yay rijitlikleri zemin derinliği boyunca dengeli bir şekilde arttığı için yatay ve düşey deplasmanlar yaklaşık olarak aynı kalmaktadır.

4.2. Kazık Uzunluğu Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

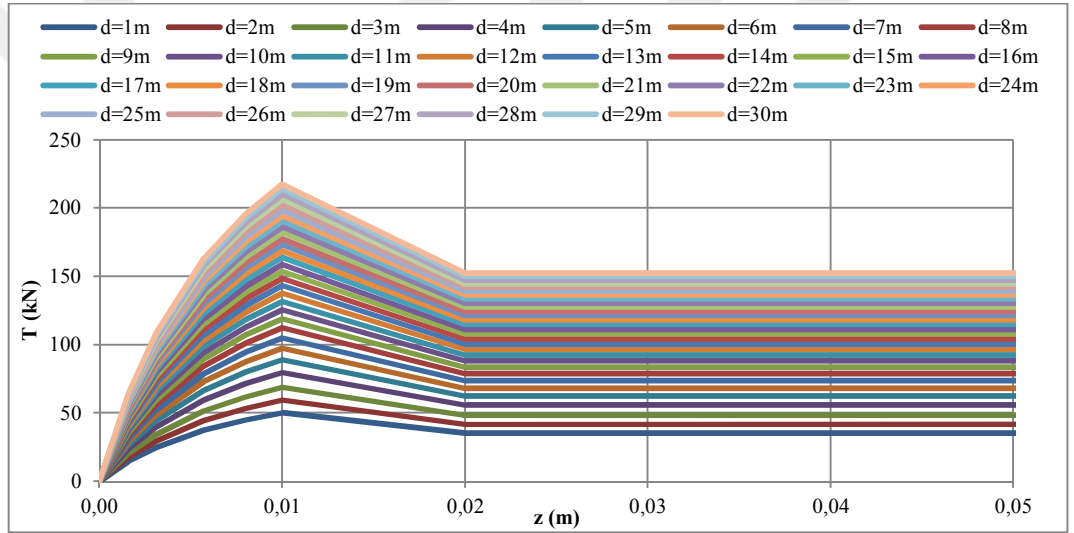
Farklı kazık uzunluklarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için Şekil 3.2'de verilen koşullar (Model-2) kullanılmıştır.

➤ Yumuşak Kil Zeminde ($c=40 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=140 \text{ m/s}$, $PI=20$)

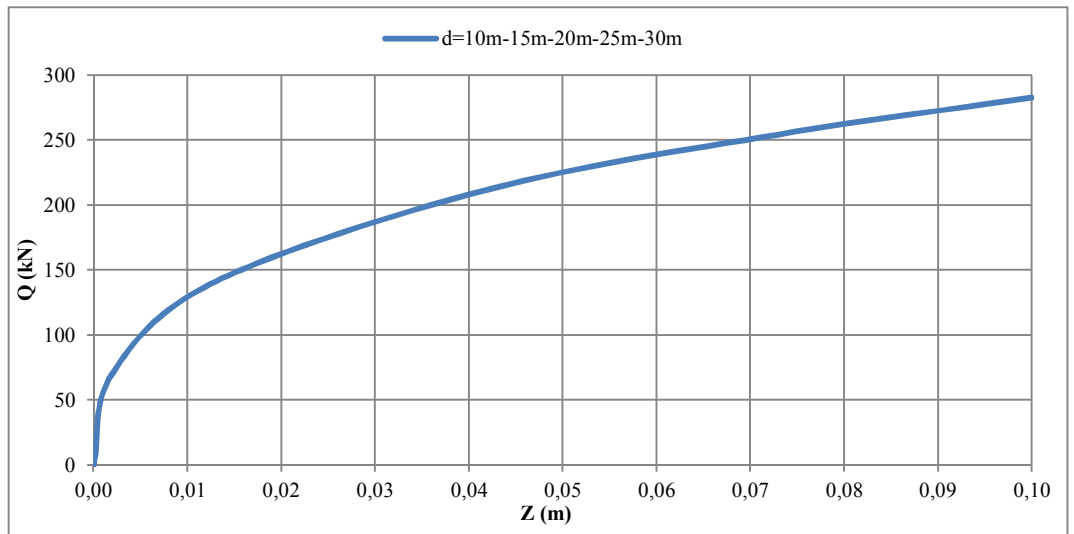
Yumuşak kil zemin için P-y eğrileri, API (2007)'deki dinamik yükleme koşulları göz önüne alınarak elde edilmiştir. Aynı çaplı ($D=1\text{m}$) 10, 15, 20, 25 ve 30 m kazık uzunlukları için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Kritik derinlik 7m civarındadır ve 7 metreden sonra P-y eğrileri aynı kalmaktadır. Yumuşak killerde kazık uç dayanımı derinlikle değişmediği için aynı kazık çapı için Q-Z eğrileri de aynı olmaktadır. T-z eğrileri ise efektif gerilmeye bağlı olduğu için her derinlikte farklıdır.



(a) 10, 15, 20, 25 ve 30m kazık uzunlukları boyunca için P-y eğrileri



(b) 10, 15, 20, 25 ve 30m kazık uzunlukları boyunca için T-z eğrileri

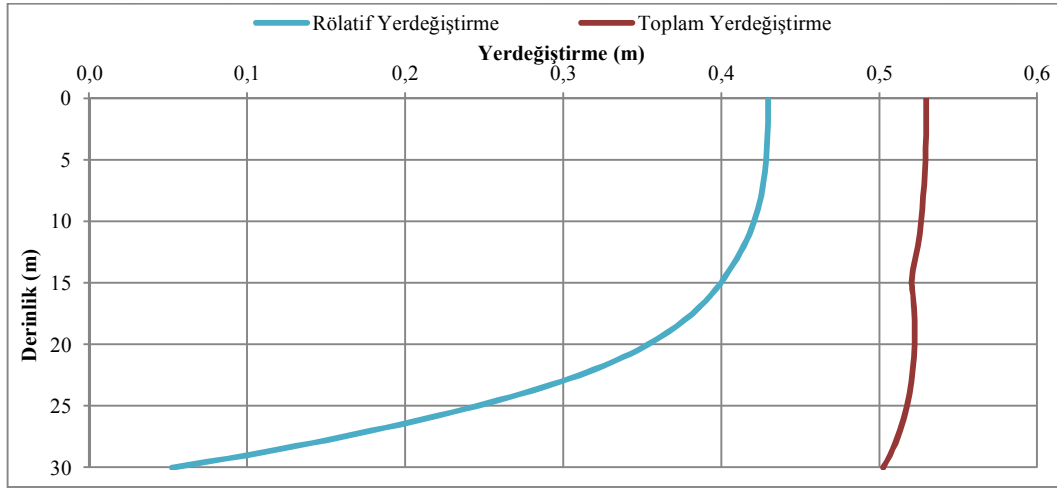


(c) 10m, 15m, 20m, 25m ve 30m'deki Q-Z eğrisi

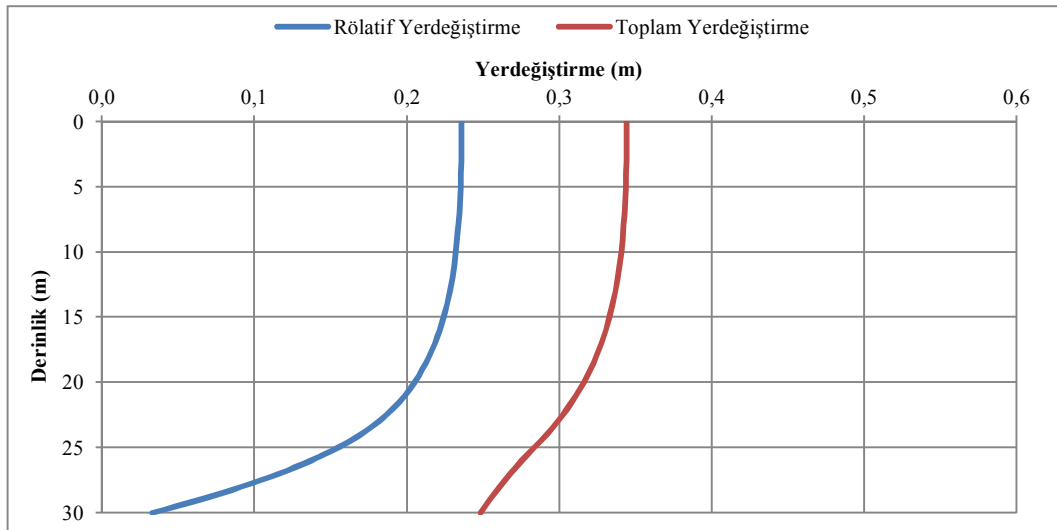
Şekil 4.11. Model-2 yumuşak kil zeminde 30m derinlik boyunca P-y, T-z ve Q-Z eğrileri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g) ve *RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g)* deprem dataları etkisi altında Şekil 3.2’de verilen zemin profilinde (Model-2) yumuşak kil için zemin davranış analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Yerdeğiştirmeler incelendiğinde, maksimum yer ivmesi (*PGA*) büyük olan deprem datasının yerdeğiştirme değerlerinin daha büyük olduğu görülecektir. Şekil 4.12a’da görülen depremde karakteristik olarak zemin derinliği boyunca toplam yerdeğiştirmelerde kayda değer bir değişme olmamaktadır. Şekil 4.12b’de görülen depremde ise toplam yerdeğiştirmelerde 20. metreden sonra ani bir azalma olmaktadır. Toplam yerdeğiştirmeler, derinlik boyunca %30 oranında azalmaktadır.



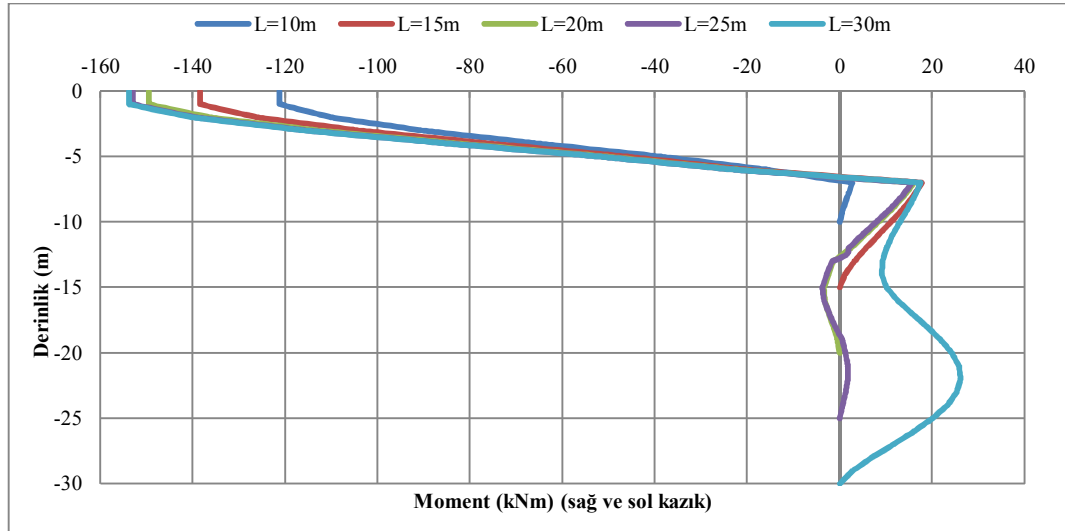
(a) *RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g)* deprem etkisi altında



(b) *RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g)* deprem etkisi altında

Şekil 4.12. Model-2 yumuşak kil zeminde farklı deprem etkileri altında yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

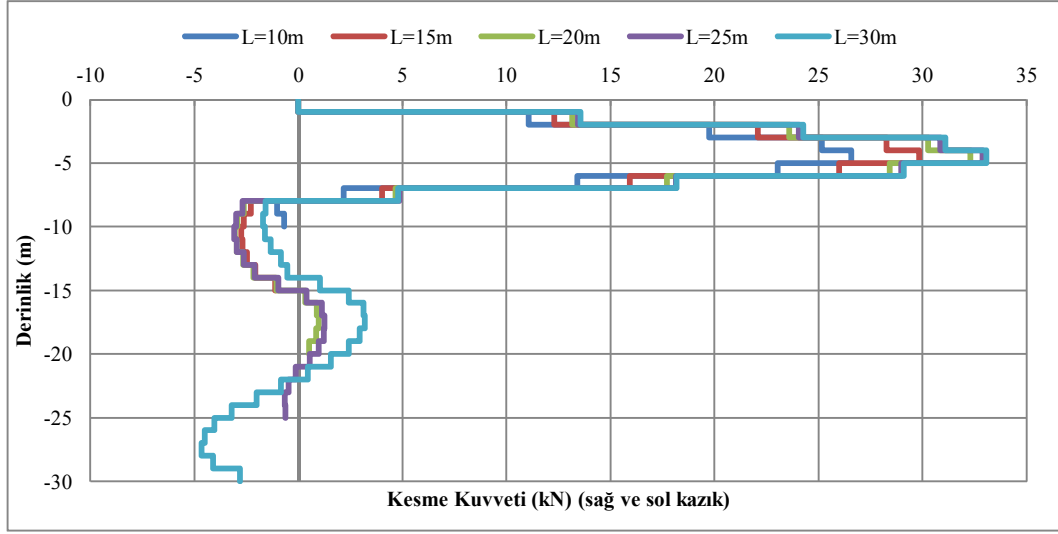
RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g) deprem datası etkisiyle zemin derinliği boyunca oluşan toplam yerdeğiştirmeler ve yumuşak kil yay özellikleri kullanılarak Model-2’de her kazık uzunluğu için ayrı ayrı yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen iç kuvvetler ve temel yatay deplasmanları şekil 4.13’te verilmiştir. Toplam yerdeğiştirmelerin derinlik boyunca az değişkenlik göstermesi, P-y yay rijitliklerinin ve kritik derinliğin ($d=7m$) değişmemesi nedeniyle kritik derinlikten sonra kazıkta büyük i kuvvet oluşmamıştır. Her kazık uzunluğu için maksimum moment ve kesme kuvveti diyagramı kritik derinlikle beraber doğrultu değiştirmekte ve maksimum değerler kritik derinliğin üstünde oluşmaktadır. Kritik derinliğin st kısmında oluşan iç kuvvetler ve temel yatay deplasmanı her kazık uzunluğu için birbirine yakındır. Temel düşey deplasmanı, moment değerleriyle uyumlu olarak temel sol ucunda maksimum değerini almaktadır. Kazık uzunluğu ile beraber artan düşey T-z yaylarının etkisiyle düşey deplasman azalmaktadır. Kazık uzunluğu 3 kat artarken düşey deplasman %75 oranında azalmaktadır. Kazıklarda oluşan normal kuvvetler birbirine yakın olmakla birlikte, sol kazıkta oluşan normal kuvvet sağ kazığa göre daha fazladır. Dolayısıyla model daha stabildir ve temel yatay yerdeğiştirmeleri azdır. Bu göstergeler, yumuşak kil zeminde seçilen deprem datasının karakteristik özelliği nedeniyle artan kazık uzunluklarının modelin davranışına etkisinin fazla olmadığını göstermektedir.



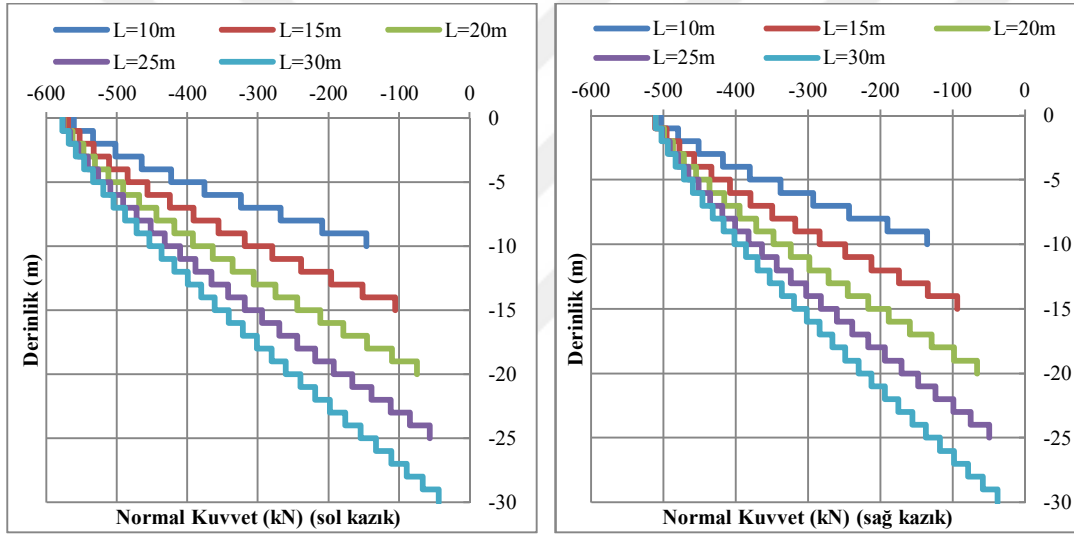
(a) Moment – derinlik ilişkisi

şekil 4.13. Model-2 yumuşak kil zeminde *RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g)* etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

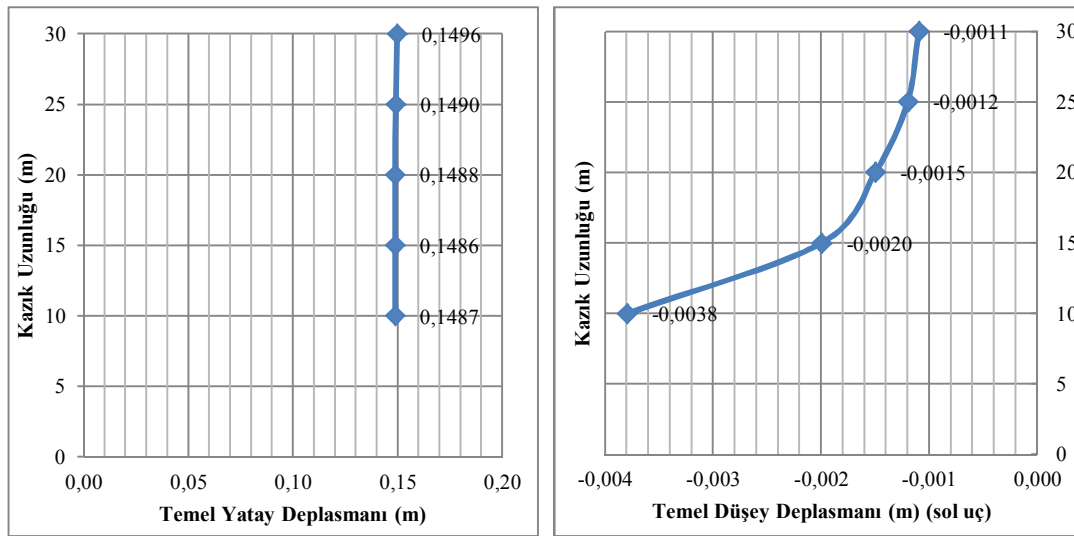
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi

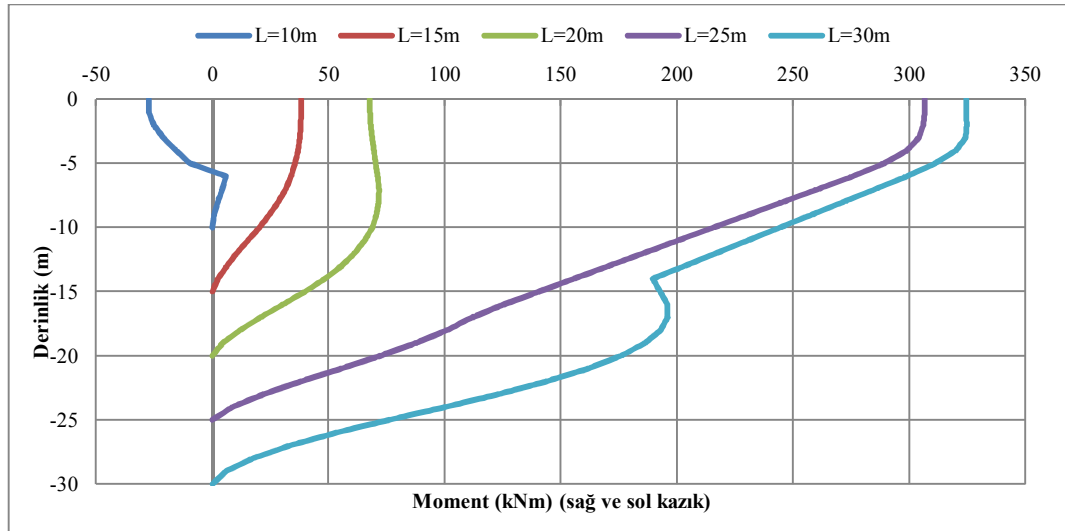


(d) Temel deplasmanları – kazık uzunluğu ilişkisi

Şekil 4.13. Model-2 yumuşak kil zeminde *RSN1605_DUZCE_DZC180 (0.40g)* etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Model-2’de aynı yay özellikleri ve *RSN1165_KOCAELI_IZT090* (0.23g) depremi etkisiyle zeminde oluşan toplam yerdeğiştirmeler kullanılarak yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum iç kuvvetler ve temel deplasmanları Şekil 4.14’te verilmiştir. Zemin toplam yerdeğiştirmelerinin 20. metreye kadar ciddi bir değişkenlik göstermemesi ve P-y yay rijitliklerinin kritik derinlikten ($d=7\text{m}$) sonra değişmemesi nedeniyle 10, 15 ve 20 metre uzunluğundaki kazıklarda iç kuvvetler ve temel yatay deplasmanı oldukça azdır ve birbirine yakındır. Kazık uzunluğu 20 metreden daha uzun olduğunda kazıklar, 20. metreden sonraki ani toplam yerdeğiştirme azalmasının etkisine girmekte ve modelin stabilitesi bozulmaktadır. Bu durum, kazıkta ciddi iç kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Normal kuvvet açısından sağ kazık daha fazla zorlanmakla beraber, iki kazık arasındaki fark açılmaktadır. Maksimum kazık momenti 12 katına, kesme kuvvet 4 katına çıkmaktadır. Temel yatay deplasmanı %25 oranında artmaktadır. Temel düşey deplasmanı ise artan düşey yayların etkisiyle %45 oranında azalmaktadır.

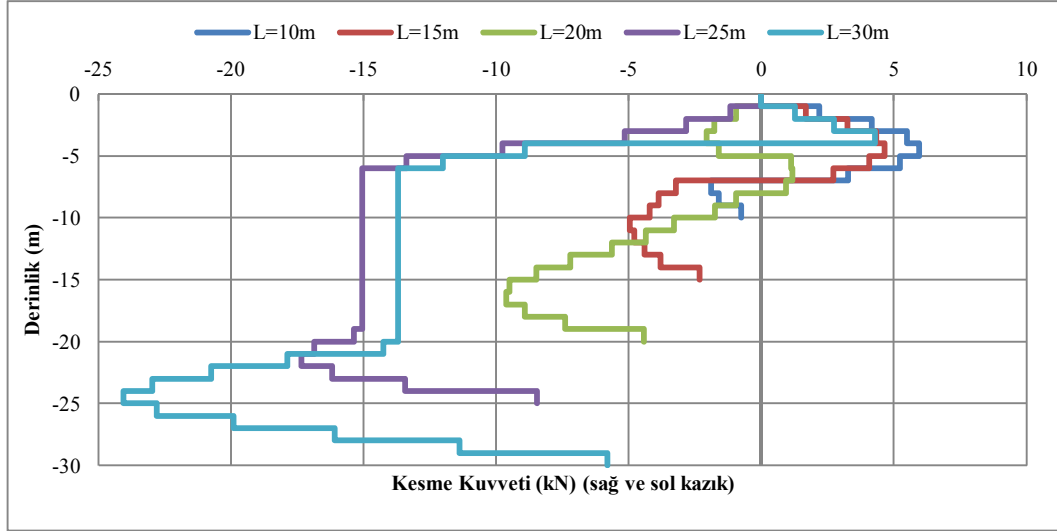
Farklı iki deprem datası etkisinde elde edilen sonuçlar, kazık uzunluklarının kazıklı temel davranışına doğrudan etkisinin olmadığını, deprem etkisi ve zemin profilinin ise davranış üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir.



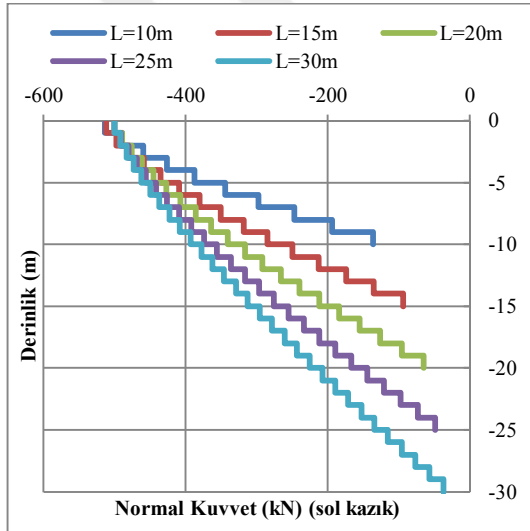
(a) Moment – derinlik ilişkisi

Şekil 4.14. Model-2 yumuşak kil zeminde *RSN1165_KOCAELI_IZT090* (0.23g) etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

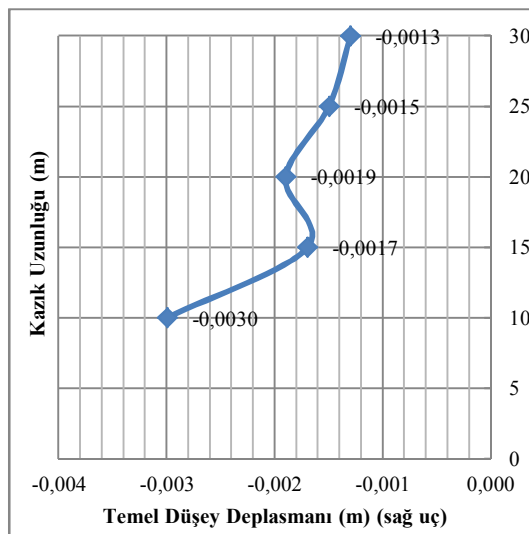
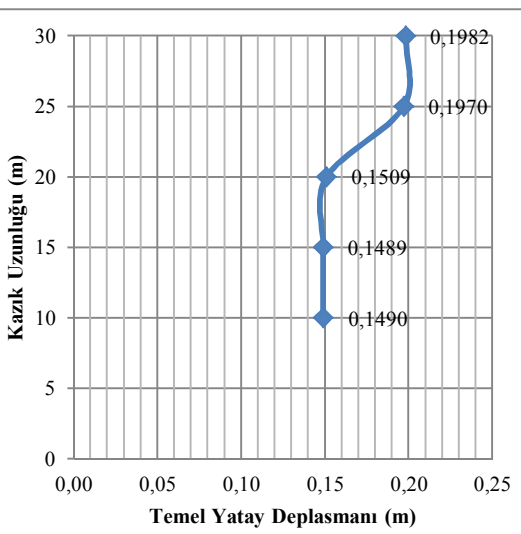
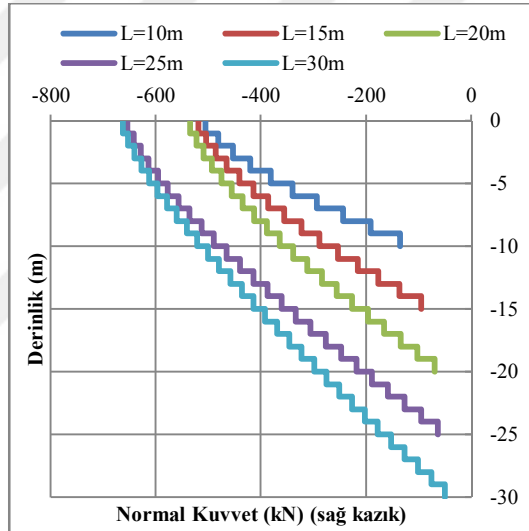
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi

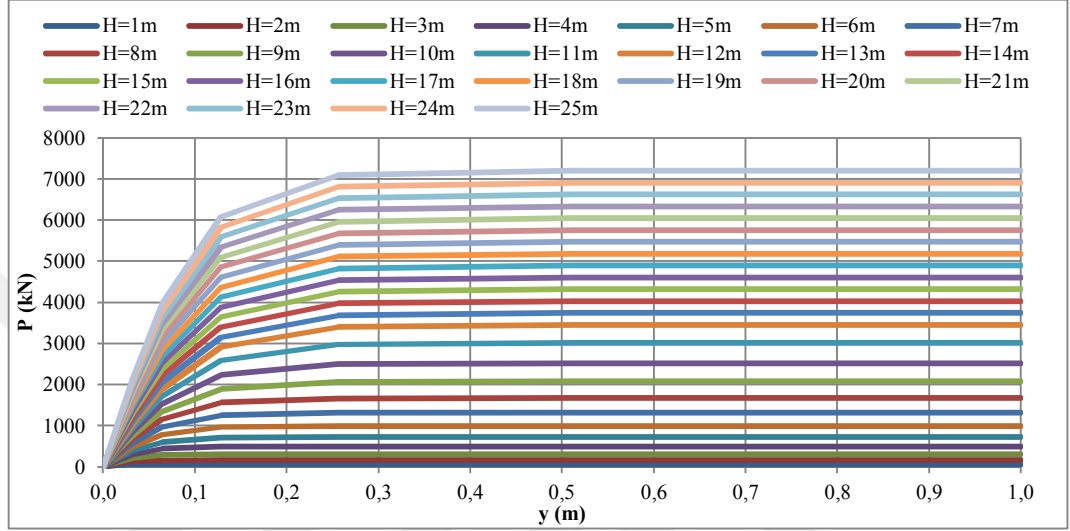


(d) Temel deplasmanları – kazık uzunluğu ilişkisi

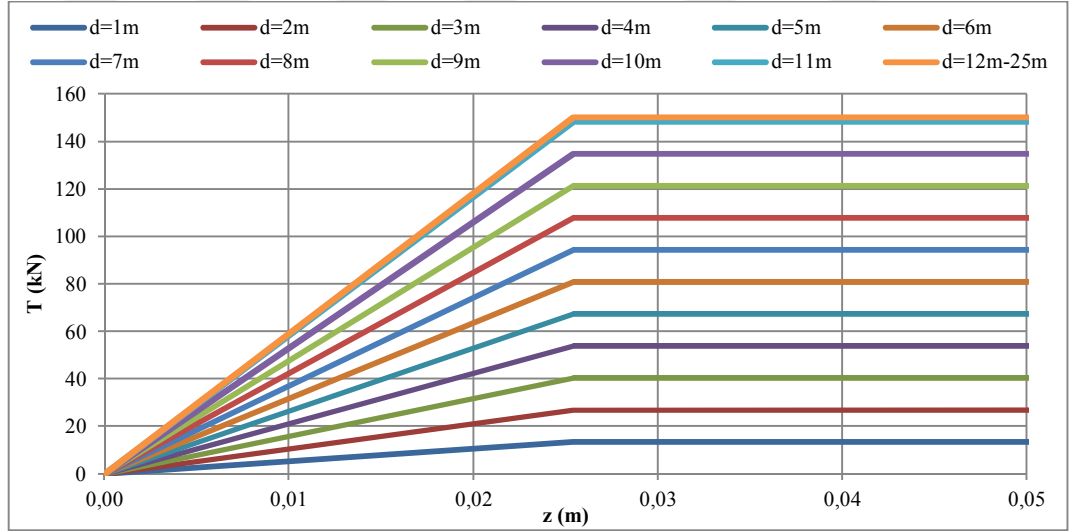
Şekil 4.14. Model-2 yumuşak kil zeminde RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g) etkisi altında kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

➤ Çok Gevşek Kum Zeminde ($\Phi=28$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=170 \text{ m/s}$)

Çok gevşek zeminde 10, 15, 20, ve 25 m kazık uzunlukları için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.15'te verilmiştir. API (2002)'deki maksimum birim uç direnci sınırı ($q_{max}=1.9 \text{ MPa}$) ve çapın değişmemesi nedeniyle 15. metreden sonraki Q-Z eğrileri aynı olmaktadır.

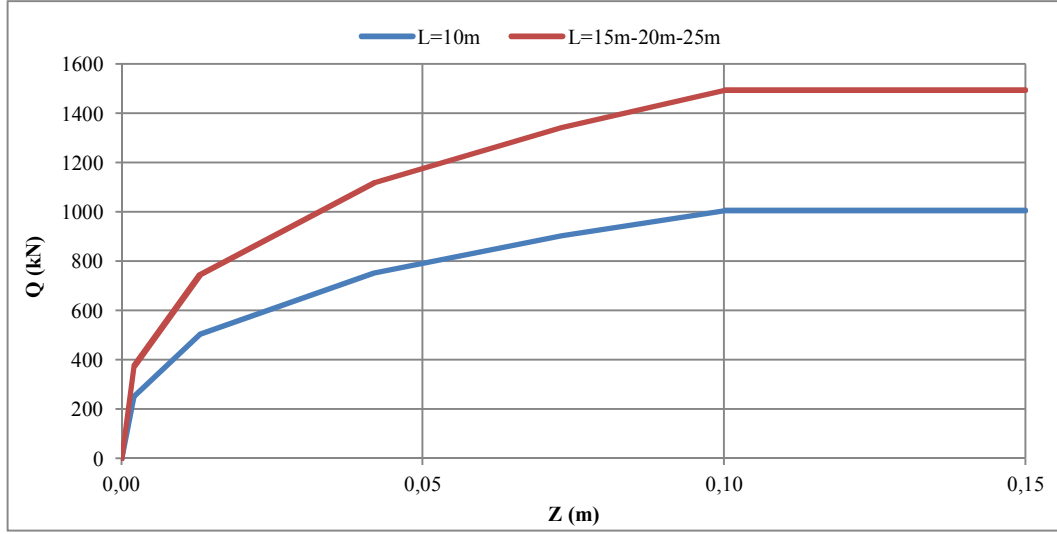


(a) 10, 15, 20 ve 25 m kazık uzunlukları boyunca için P-y eğrileri



(b) 10, 15, 20 ve 25 m kazık uzunlukları boyunca için T-z eğrileri

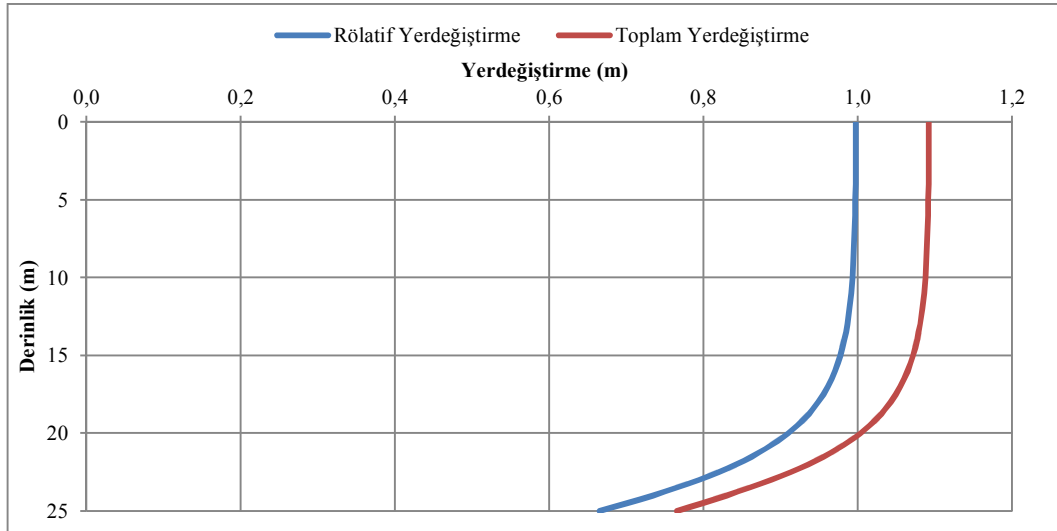
Şekil 4.15. Model-2 çok gevşek kum zeminde 25 m derinlik boyunca P-y, T-z ve Q-Z eğrileri



(c) 10m, 15m, 20m ve 25m'deki Q-Z eğrileri

Şekil 4.15. Model-2 çok gevşek kum zeminde 25 m derinlik boyunca P-y, T-z ve Q-Z eğrileri (devamı)

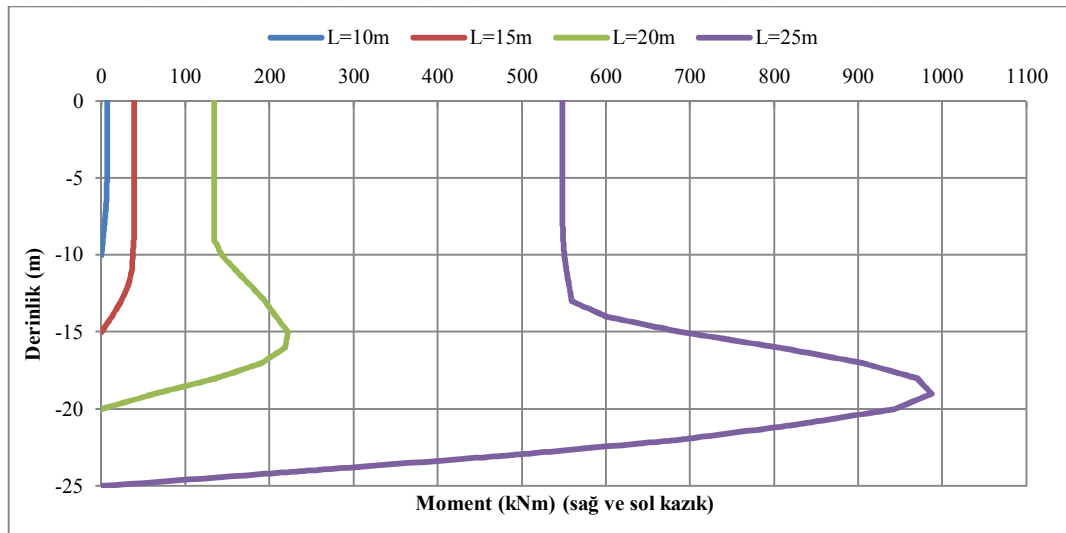
Çok gevşek kum için *RSN1605_DUZCE_DZC270 (0.51g)* deprem datası etkisi altında Şekil 3.2'de (Model-2) verilen zemin profilinde zemin davranış analizi yapılmıştır. 25 metre derinlik için elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Değişim grafiğine göre toplam yerdeğiştirmeler 15. metreye kadar değişmemekle beraber, 20. metreden sonra aniden azalmaktadır.



Şekil 4.16. Model-2 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Model-2'de çok gevşek kum için elde edilen nonlinear yay rijitlikleri *RSN1605_DUZCE_DZC270 (0.51g)* depremi etkisiyle zeminde oluşan toplam

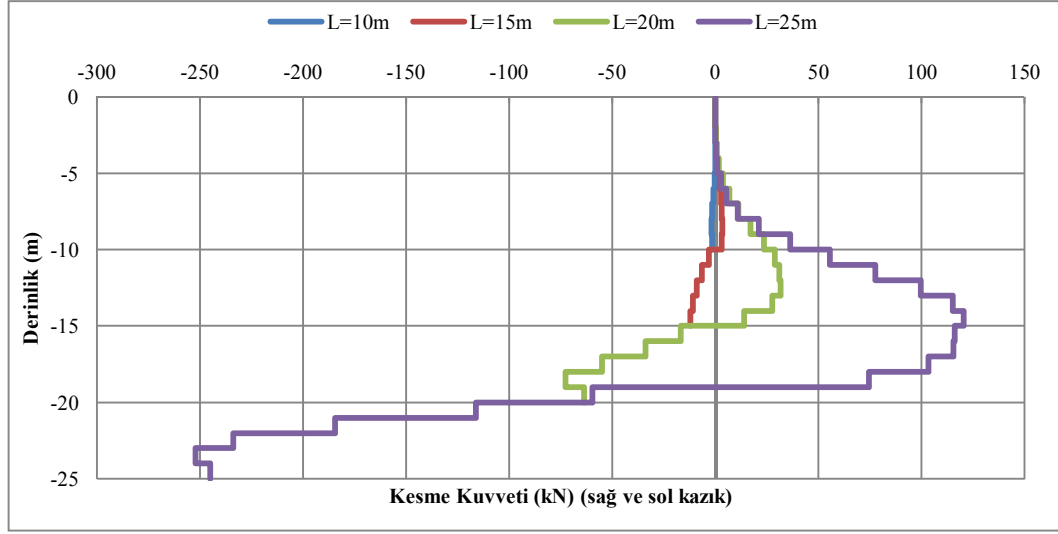
yerdeğiştirmeler kullanılarak yapılan nonlineer yapısal analizlerden elde edilen maksimum iç kuvvetler ve temel deplasmanları Şekil 4.17’de verilmiştir. Toplam yerdeğiştirmelerin 15. metreye kadar değişmemesi nedeniyle 10 ve 15 metrelik kazıklarda büyük moment ve kesme kuvveti oluşmamıştır. Sağ ve sol kazıktaki normal kuvvetler ise birbirine yakındır. 20 m uzunluğundaki kazıklarda, toplam yerdeğiştirmelerin değişmesine bağlı olarak moment ve kesme kuvveti artmaya başlamıştır. 25 m’lik kazıklarda ise toplam yerdeğiştirmelerin aniden azalmasına bağlı olarak büyük moment ve kesme kuvveti oluşmuştur. Kazık uzunluğunun 15 metre artmasıyla kazıklarda oluşan maksimum moment 140 katına, kesme kuvveti ise 130 katına çıkmaktadır. Moment ve kesme kuvveti artışına bağlı olarak kazık normal kuvvetleri arasındaki fark artmaktadır. Her kazık uzunluğu için sol kazıktaki maksimum momentler düşey yükleme esnasında oluşmaktadır. Kazık uzunluğuna artmasına bağlı olarak sağ kazıktaki normal kuvvet artmakta, sol kazıktaki normal kuvvet azalmaktadır. Temel yatay deplasmanları, 10, 15 ve 20 metrelik kazıklarda aynı olmakla beraber, 25 metrelik kazıklarda zorlanmaya bağlı olarak artmıştır. Düşey deplasmanlar ise, kazık uzunluğunun 10 m’den 20 m’ye çıkmasıyla %55 oranında azalmakta, 20 m’den 25 m’ye çıkmasıyla aşırı yanal yüklenmeye bağlı olarak %50 oranında artmaktadır.



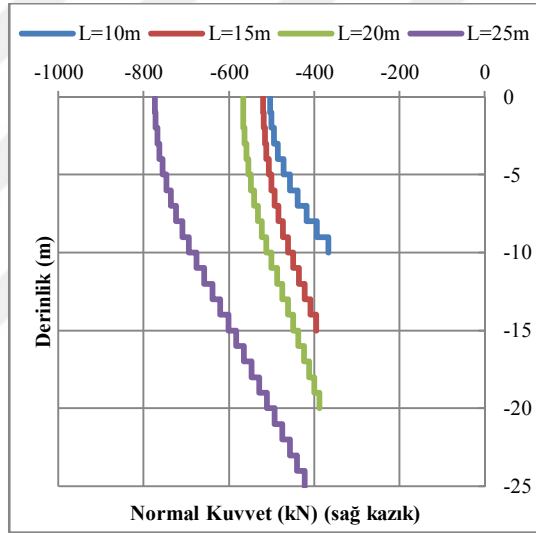
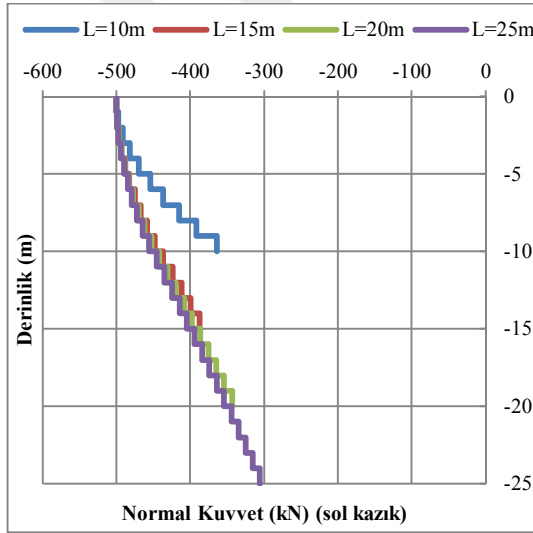
(a) Moment – derinlik ilişkisi

Şekil 4.17. Model-2 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

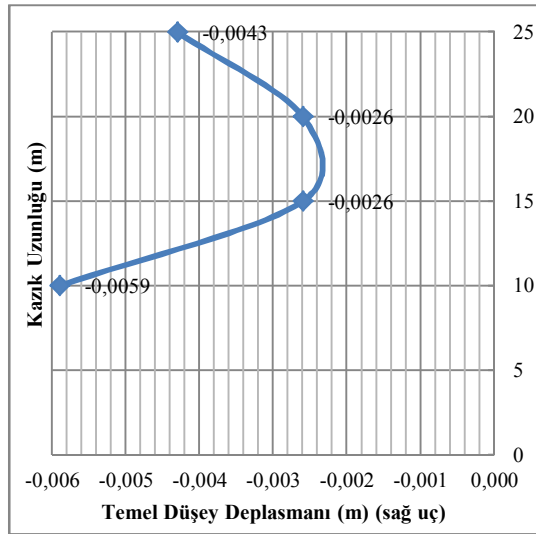
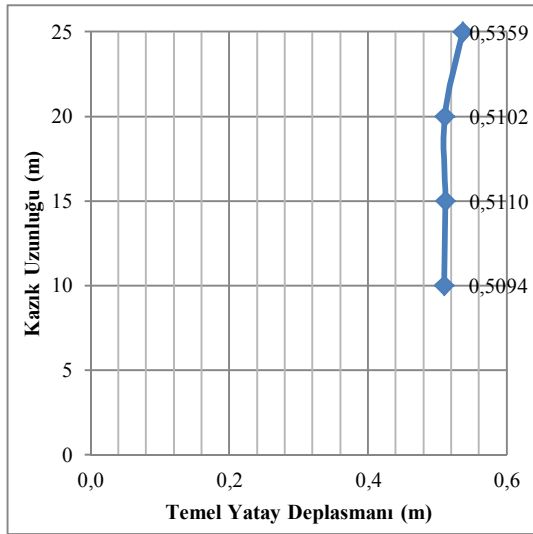
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



(d) Temel deplasmanları – kazık uzunluğu ilişkisi

Şekil 4.17. Model-2 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

4.3. Grup Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

Kazık grubunun ve kazık aralıklarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için Şekil 3.3’de verilen zemin profili (Model-3) kullanılmıştır.

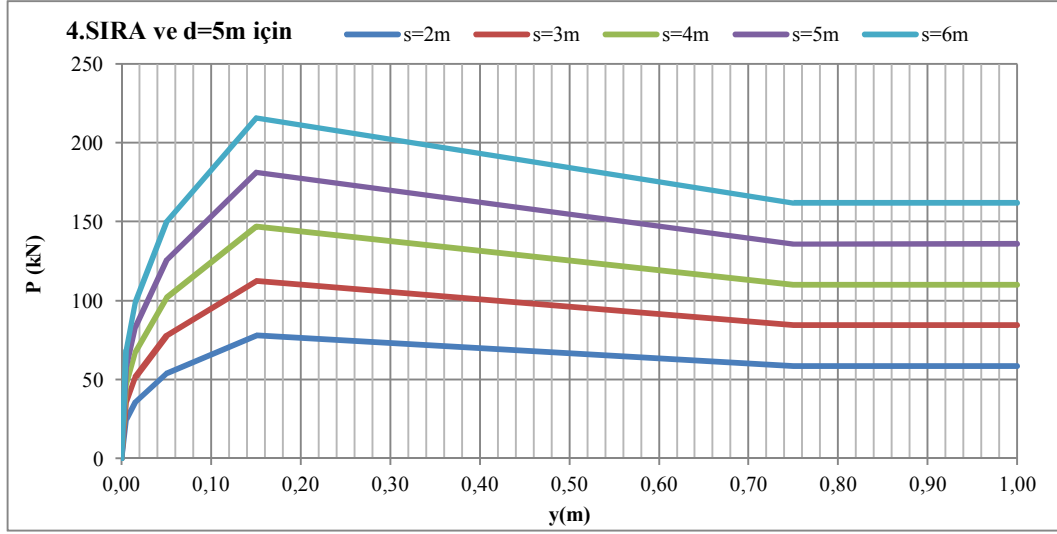
➤ **Yumuşak Kil Zeminde ($c=40 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=140 \text{ m/s}$, $PI=20$)**

Yumuşak kil zemin için P-y eğrileri, 100cm çap ve 15 m uzunluğa sahip kazıklar için, API (2007)’deki dinamik yükleme koşulları ve TBDY (2018)’deki P-y azaltma katsayısı bağıntısı (2.5) kullanılarak elde edilmiştir. 2, 3, 4 ve 5 m aralıklı kazık grubu modelinin her bir kazık sırası için bulunan azaltma katsayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgeye göre, kazıklar arası mesafe artarken grup etkisi azalmaktadır. Ayrıca depremin yönüne göre kazık grubunun 1. sırasındaki kazıklar grup etkisinden en az etkilenmektedir. Bu katsayılar, her bir kazık sırasına ait P-y eğrilerinin P eksenine uygulanmıştır. 6 metrelik kazık aralığı için grup etkisi göz önüne alınmamıştır. Örnek olarak, d=5m derinlikte, 4.sıradaki kazıklar için farklı kazık aralığında elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.18’de verilmiştir.

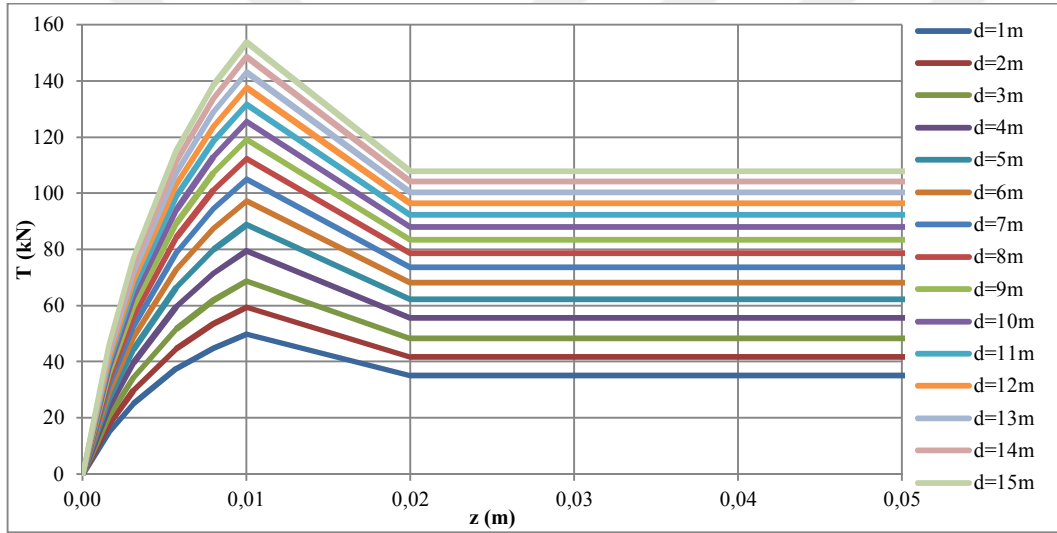
Çizelge 4.1. Model-3 yumuşak kil zeminde farklı kazık aralıkları için P-y eğrisi azaltma katsayıları

AZALTMA KATSAYILARI, β_G		KAZIK ARALIKLARI ve "s" KATSAYILARI (ÇAP=1m)				
		2m	3m	4m	5m	6m
		s=2	s=3	s=4	s=5	s=6 (Grup Etkisi Yok)
KAZIK SIRASI	1. SIRA ($\beta_{GI}=0.70$)	0,76	0,82	0,88	0,94	1,00
	2. SIRA ($\beta_{GI}=0.45$)	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00
	3. SIRA ($\beta_{GI}=0.30$)	0,44	0,58	0,72	0,86	1,00
	4. SIRA ($\beta_{GI}=0.20$)	0,36	0,52	0,68	0,84	1,00

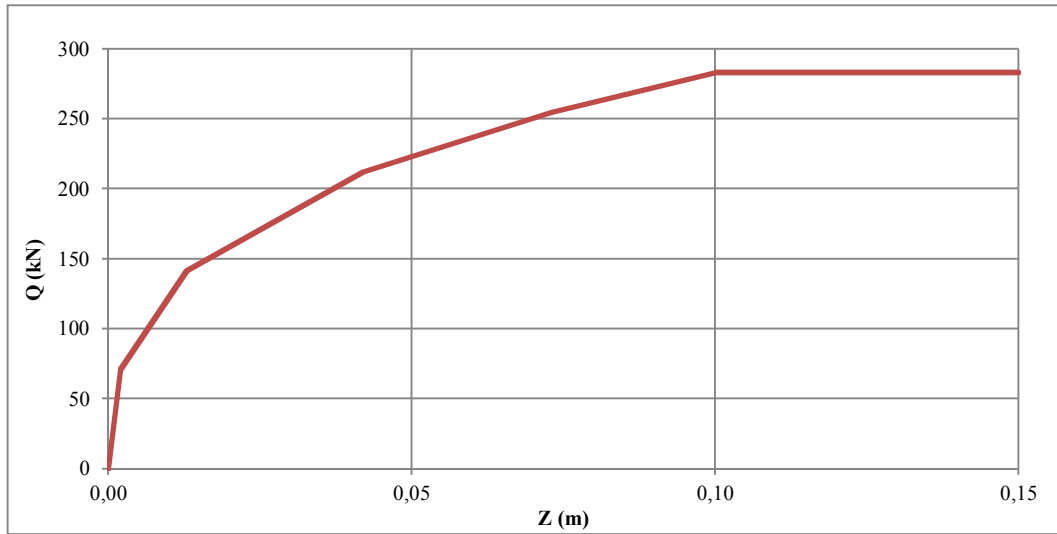
Model-3’te farklı kazık aralıklı kazık grupları için T-z eğrileri ve 15m derinlik için Q-Z eğrisi Şekil 4.19’da verilmiştir. Bu eğriler, grup etkisi öngörülmediği tüm kazık sırası ve kazık aralıkları için aynıdır.



Şekil 4.18. Model-3 yumuşak kil zeminde d=5m derinlikte farklı kazık aralıkları için P-y eğrileri



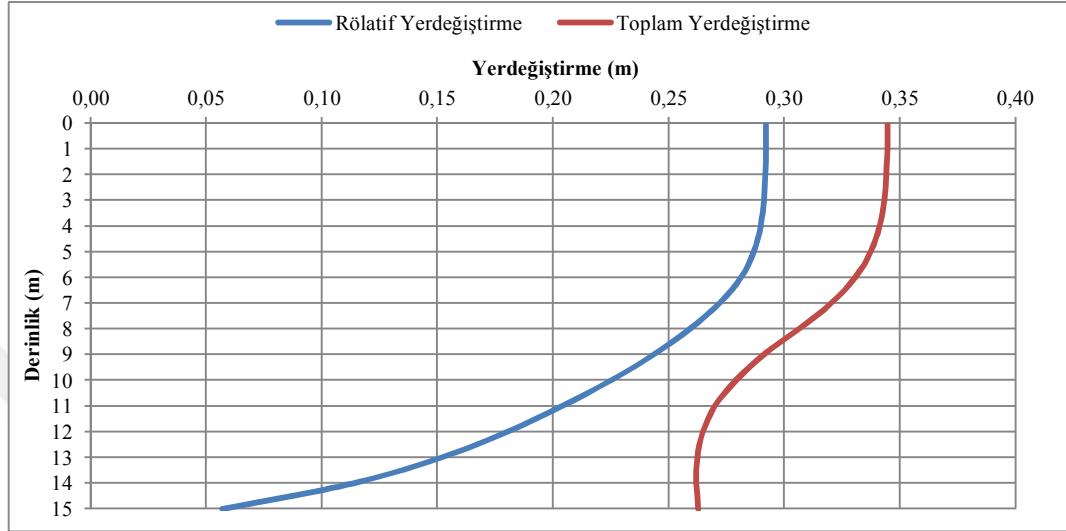
(a) T-z eğrileri



(b) Q-Z eğrisi (d=15m)

Şekil 4.19. Model-3 yumuşak kil zeminde tüm kazık aralıkları ve sıraları için T-z ve Q-Z eğrileri

Zemin nonlinear yay özellikleri bulunduktan sonra *RSN1119_KOBE_TAZ000* (0.70g) deprem datası kullanılarak Şekil 3.3'te verilen zemin profilinde (Model-3) zemin davranış analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.20'de verilmiştir.



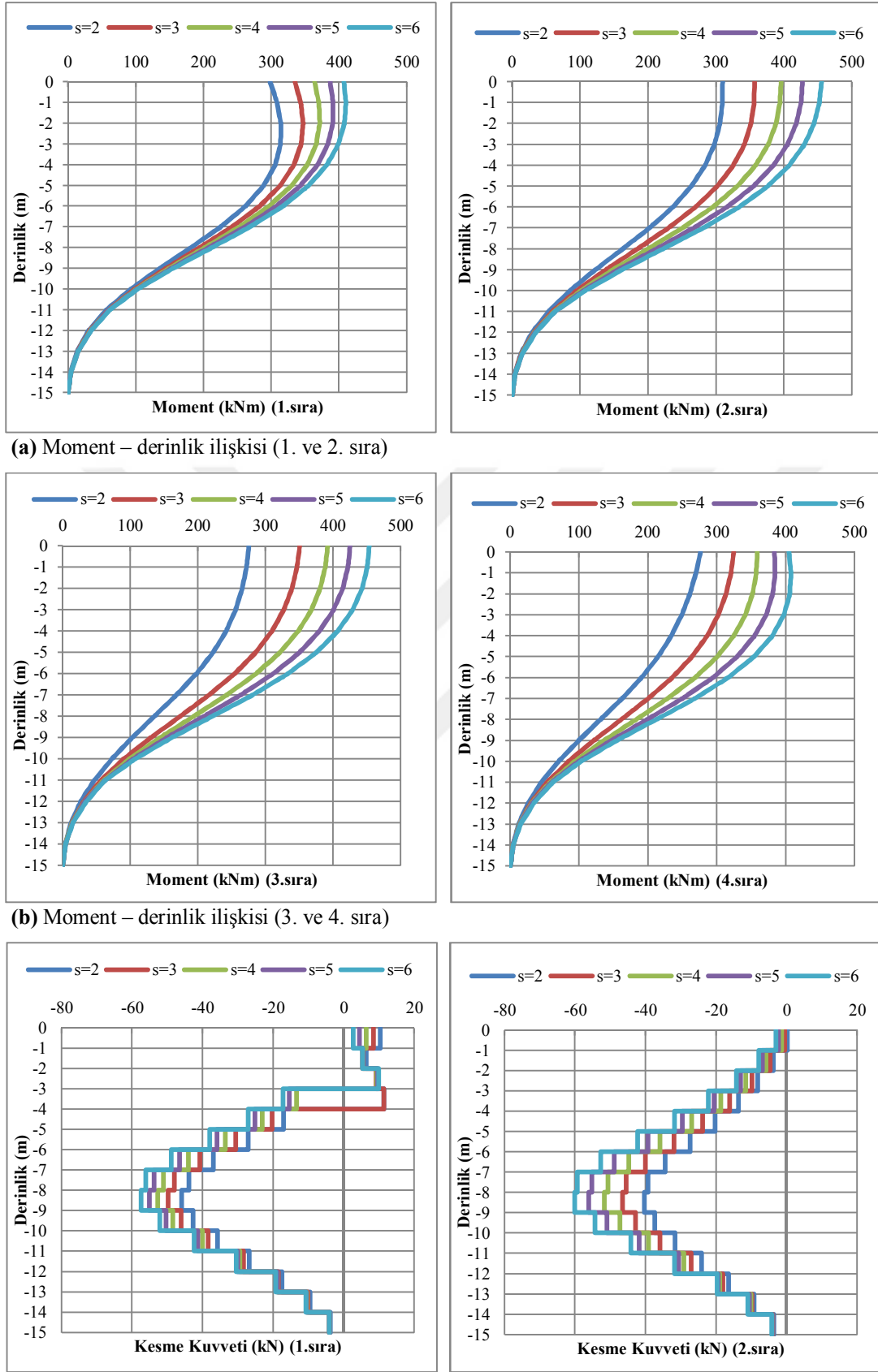
Şekil 4.20. Model-3 yumuşak kil zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak 4 kazıktan oluşan kazık grubu, her bir kazık mesafesi için ayrı ayrı *SAP2000*'de modellenmiştir. Yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Farklı kazık mesafesine göre kazık uzunluğu boyunca oluşan maksimum iç kuvvetlerin diyagramı ve temel deplasmanları Şekil 4.21'de verilmiştir.

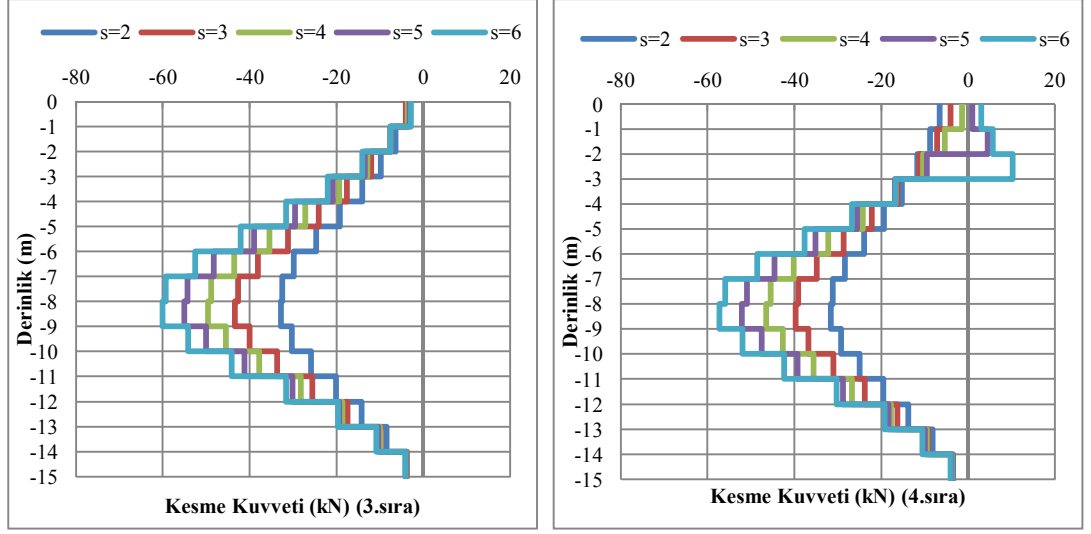
Çizelge 4.2. Model-3 yumuşak kil zeminde kazık sıralarında oluşan iç kuvvetlerin maksimum değerleri

KAZIK MES. (m)	N1 (kN)	K1 (kN)	M1 (kNm)	N2 (kN)	K2 (kN)	M2 (kNm)	N3 (kN)	K3 (kN)	M3 (kNm)	N4 (kN)	K4 (kN)	M4 (kNm)
2	500	46	314	500	40	309	564	33	275	666	32	276
3	500	50	347	500	46	356	543	43	350	634	40	324
4	500	53	372	500	52	395	525	50	392	616	46	358
5	500	55	391	500	56	427	510	55	425	604	52	384
6	500	57	410	504	60	455	502	60	453	595	57	407

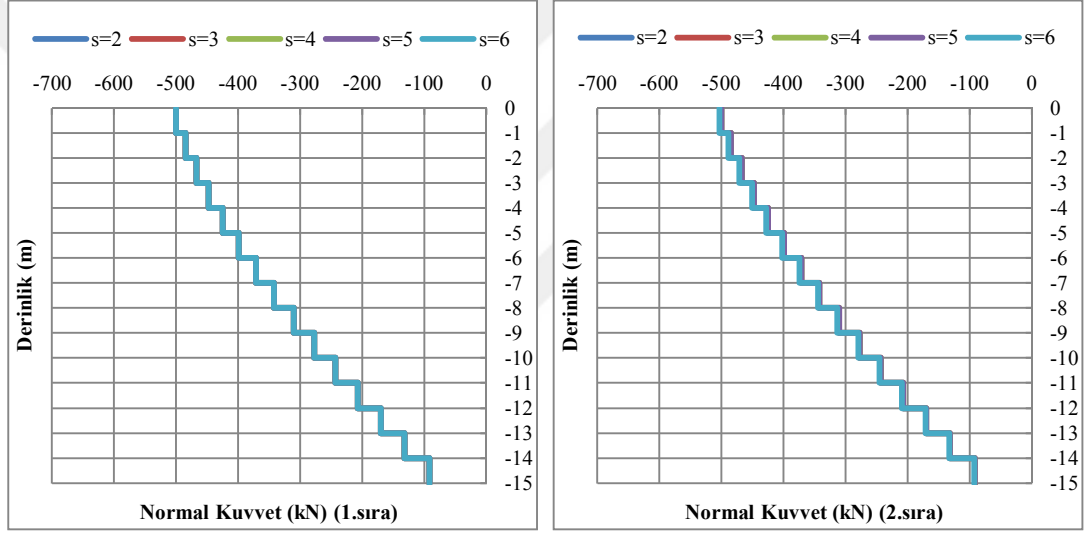
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



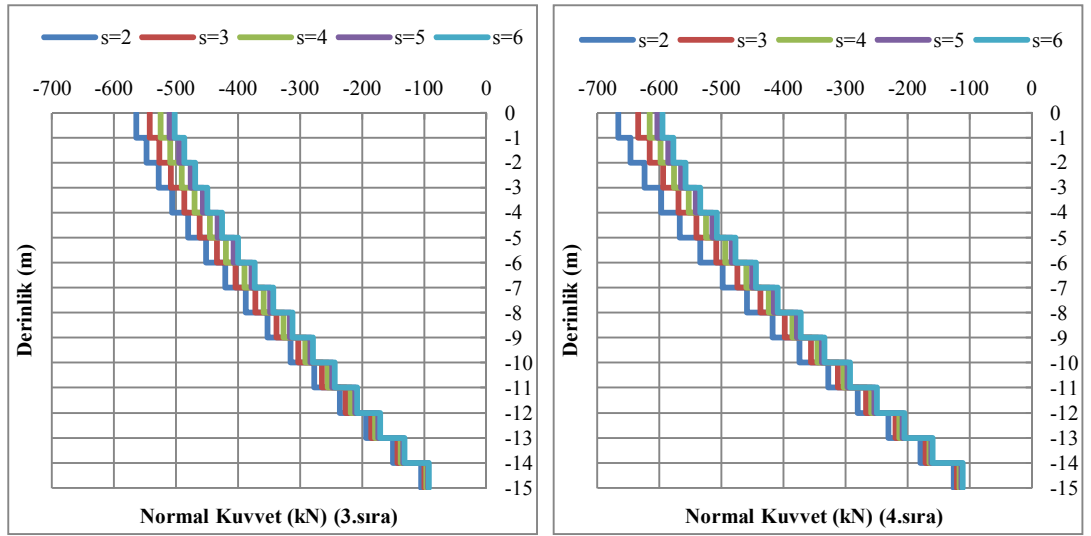
Şekil 4.21. Model-3 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(d) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi (3. ve 4. sıra)

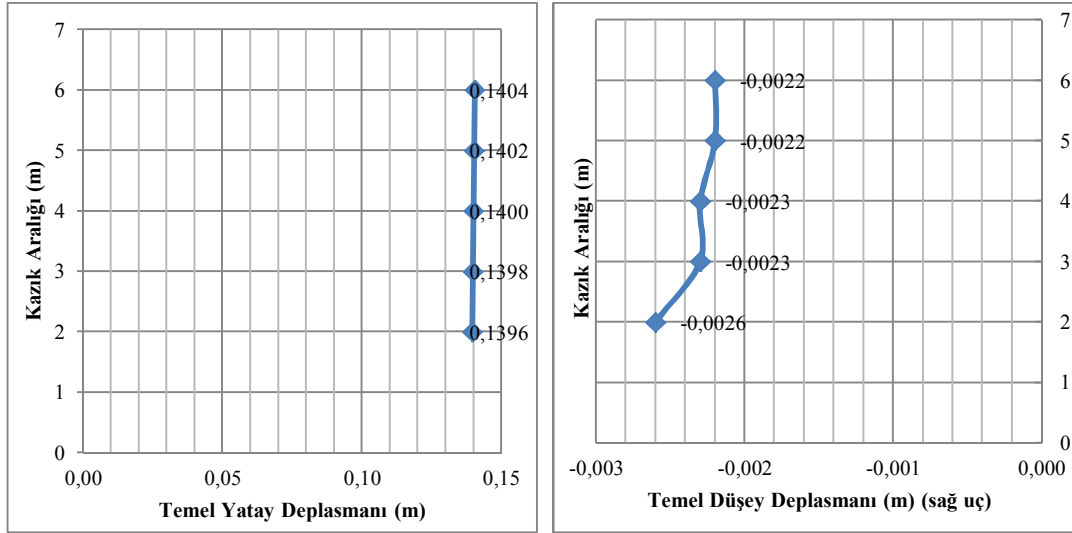


(e) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi (1. ve 2. sıra)



(f) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi (3. ve 4. sıra)

Şekil 4.21. Model-3 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)



(g) Temel deplasmanları – kazık aralığı ilişkisi

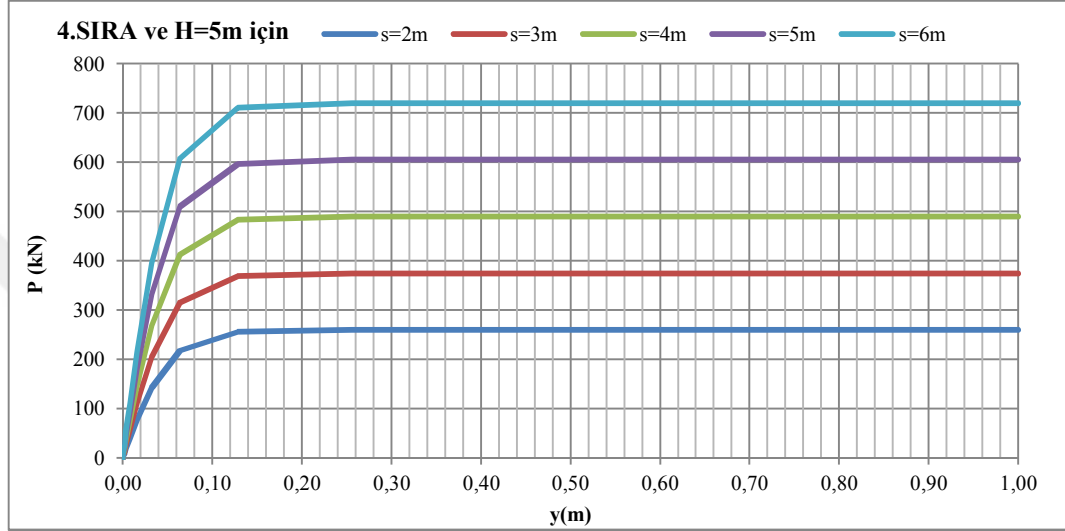
Şekil 4.21. Model-3 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Şekil 4.21'deki grafiklerden anlaşılabileceği gibi, grup etkisinden en çok etkilenen kazık sırası 3. sıra, en az etkilenen kazık sırası 1. sıradır. Azaltma katsayılarıyla yay rijitlikleri azaltılan modelde kazıkların moment ve kesme kuvvetleri de azalmaktadır. Kazık mesafesi 6 m'den 2 m'ye düşürüldüğünde, grup etkisi arttığı için 1.sıradaki kazıklarda maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri %23 ve %19, 2. sıradakiler %32 ve %33, 3. sıradakiler %39 ve %45, 4. sıradakiler %32 ve %44 oranında azalmaktadır. Her kazık aralığı için 1. ve 2. Sıradaki kazıklar, en büyük normal kuvvetini düşey yüklemede almaktadır. Kazık mesafesi azalırken 3. ve 4. sıradaki kazıklarda normal kuvvetler artmakta, 1. ve 2. sıradaki kazıklarda azalmaktadır. Grup etkisinin olmadığı 6 m aralıklı kazık grubunda 1. ve 4. sıradaki kazıkların iç kuvvetleri birbirine en yakındır. Aynı durum 2. ve 3. sıradaki kazıklar için de geçerlidir. Kazık mesafesi azalırken, yay rijitliklerine bağlı olarak yatay kuvvet azaldığı için temel yatay deplasmanları çok az miktarda azalmıştır. Temel düşey deplasmanı, çok az değişmekle beraber, kazık grubu stabilitesinin en fazla olduğu yani iç kuvvetlerin kazıklara dengeli şekilde dağıldığı 6 m kazık aralıklı modelde en az miktarda oluşmuştur.

➤ Çok Gevşek Kum Zeminde ($\Phi=28$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=170 \text{ m/s}$)

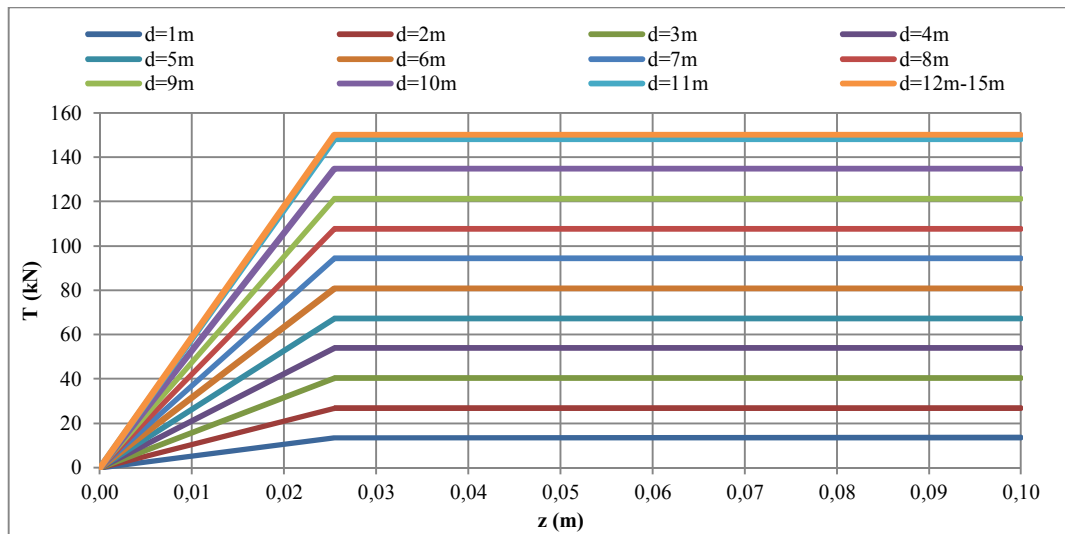
Çok gevşek kum zeminde, 100 cm çapa ve 15 m uzunluğa sahip 4 adet kazıktan oluşan kazık grubunun her sırası için ayrı ayrı P-y eğrileri elde edilmiştir. 2, 3, 4 ve 5 m aralıklı kazık grubu modelinin her bir kazık sırası için azaltma katsayıları, çap ve kazık

mesafeleri değiştirilmediği için daha önce yumuşak kil için verilen Çizelge 4.1'deki verilerin aynısıdır. Her bir kazık sırasına ait P-y eğrileri, grup etkisi olmadan elde edilen eğrilerin P eksenine ilgili kazık sırasına ait azaltma katsayıları uygulanarak bulunmuştur. 6 m kazık aralıklı kazık grubu için grup etkisi göz önüne alınmamıştır. Örnek olarak farklı kazık aralıklı kazık gruplarının 4.sıradaki kazığı için elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.22'de verilmiştir.

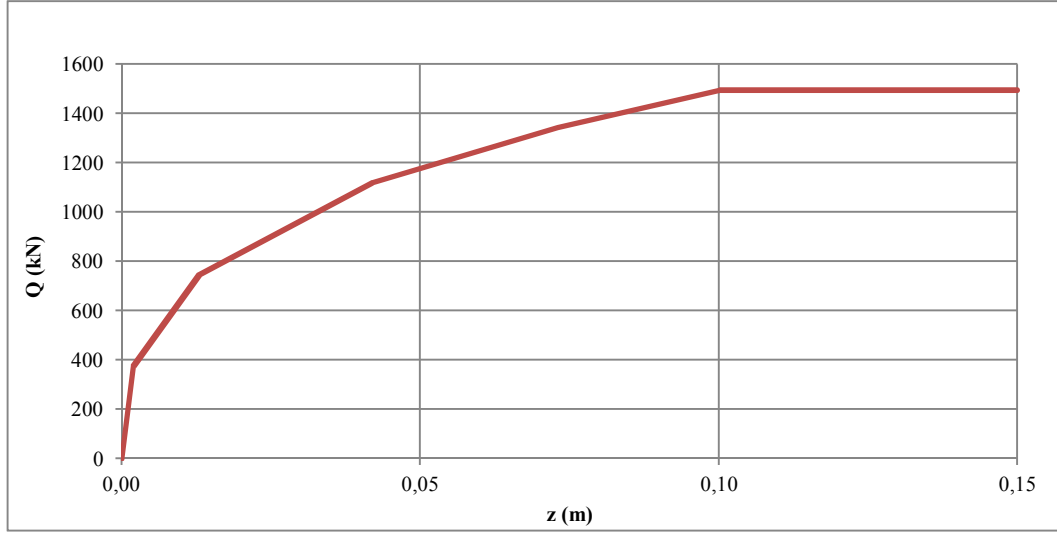


Şekil 4.22. Model-3 çok gevşek kum zeminde H=5m'de farklı kazık aralıkları için P-y eğrileri

Model-3'te farklı kazık aralıklı kazık grupları için bulunan T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir. Bu eğriler, grup etkisi öngörülmediği tüm kazık sırası ve kazık aralıkları için aynıdır.

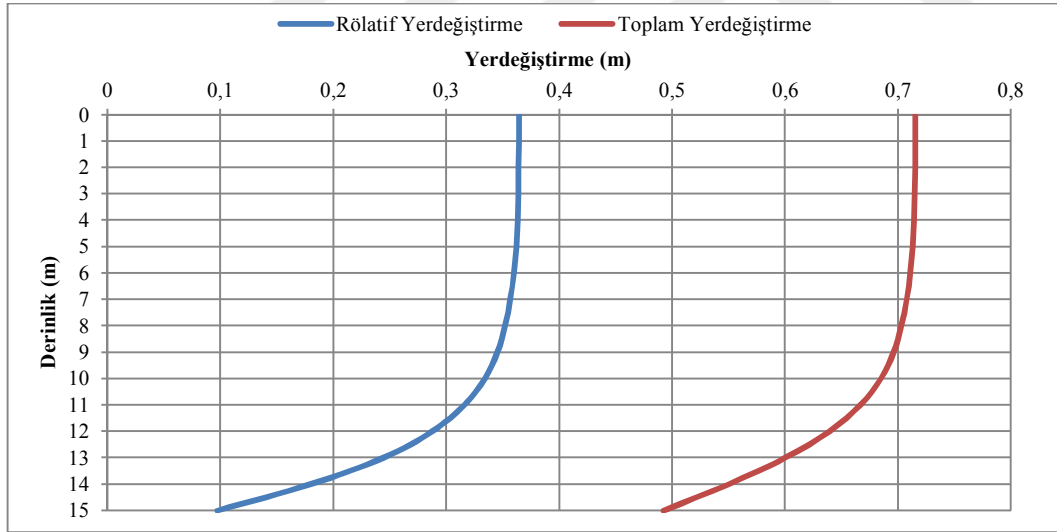


Şekil 4.23. Model-3 çok gevşek kum zeminde tüm kazık aralıkları için T-z eğrileri



Şekil 4.24. Model-3 çok gevşek kum zeminde tüm kazık aralıkları için Q-Z eğrisi (d=15m)

Model-3 çok gevşek kum zeminde *RSN105_DUZCE_DZC270 (0.51g)* deprem datası kullanılarak zemin davranış analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir.

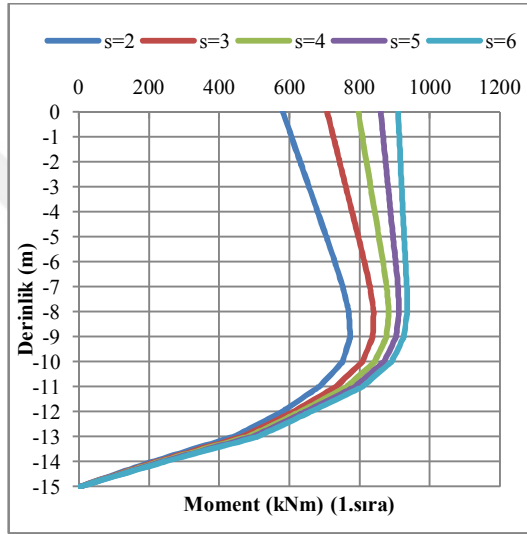


Şekil 4.25. Model-3 çok gevşek kum zeminde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

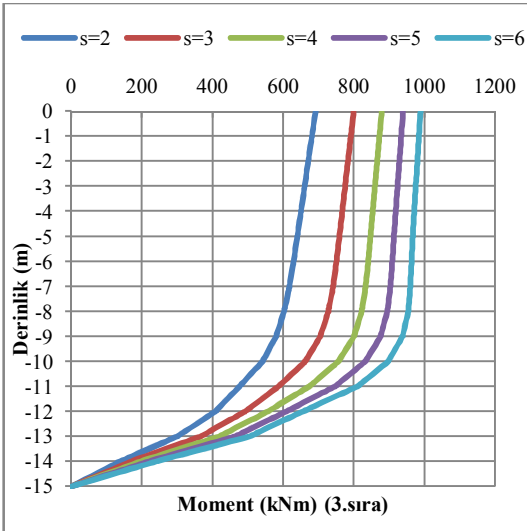
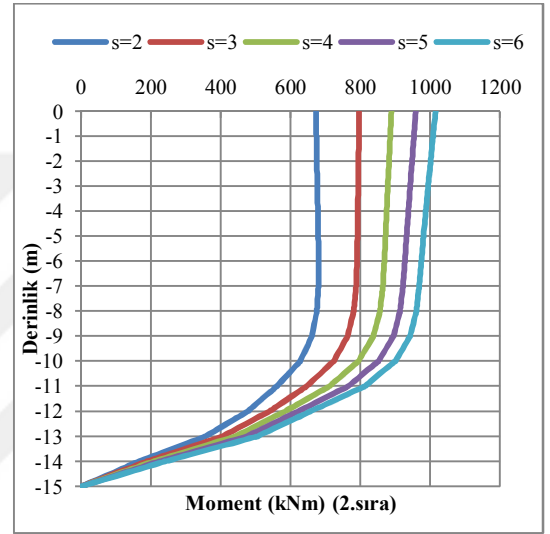
Toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak 4 kazıktan oluşan kazık grubu, farklı mesafeli olarak ayrı ayrı *SAP2000*'de modellenmiştir. Yapılan artımlı nonlinear yapısal analizler sonucunda kazık sıralarında oluşan iç kuvvetlerin maksimum değerleri kazık mesafesine göre Çizelge 4.3'te verilmiştir. Maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman grafikleri ise Şekil 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.3. Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık sıralarında oluşan iç kuvvetlerin maksimum değerleri

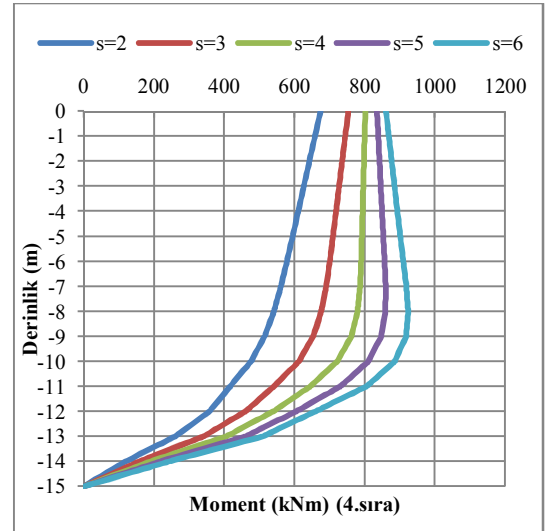
KAZIK MES. (m)	N1 (kN)	K1 (kN)	M1 (kNm)	N2 (kN)	K2 (kN)	M2 (kNm)	N3 (kN)	K3 (kN)	M3 (kNm)	N4 (kN)	K4 (kN)	M4 (kNm)
2	500	233	773	529	190	680	655	162	691	847	141	674
3	500	245	839	517	215	796	611	196	799	778	183	753
4	500	253	882	509	234	888	580	223	878	736	216	801
5	500	260	912	504	249	958	555	245	939	707	243	859
6	500	266	935	501	264	1015	535	265	988	687	267	923



(a) Moment – derinlik ilişkisi (1. ve 2. sıra)

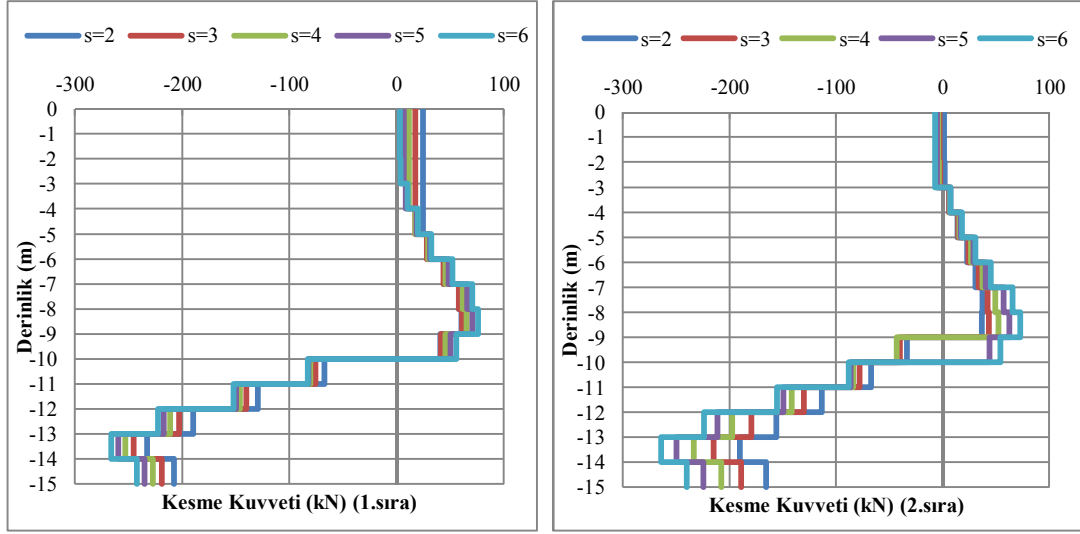


(b) Moment – derinlik ilişkisi (3. ve 4. sıra)

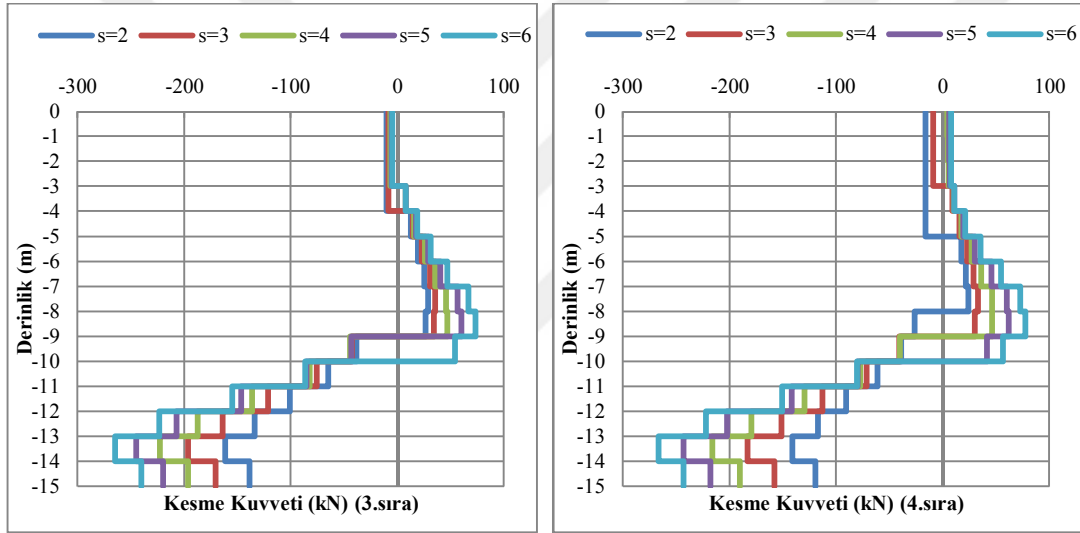


Şekil 4.26. Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

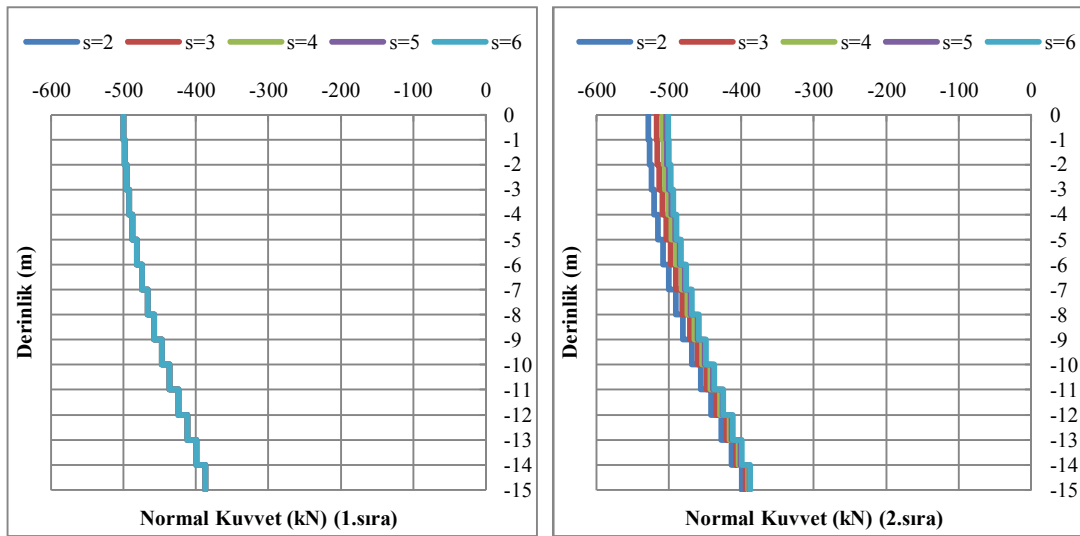
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(c) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi (1. ve 2. sıra)

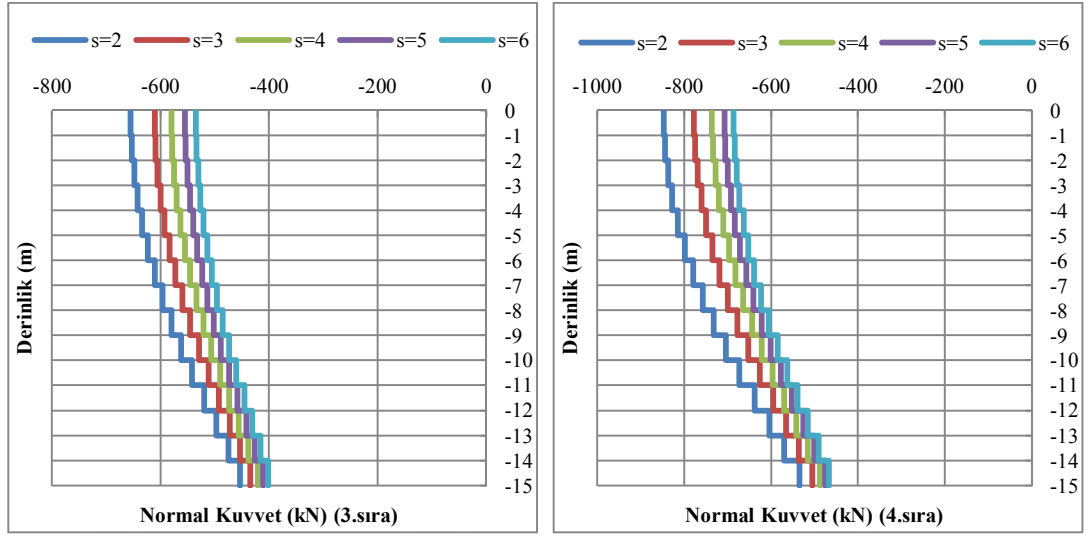


(d) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi (3. ve 4. sıra)

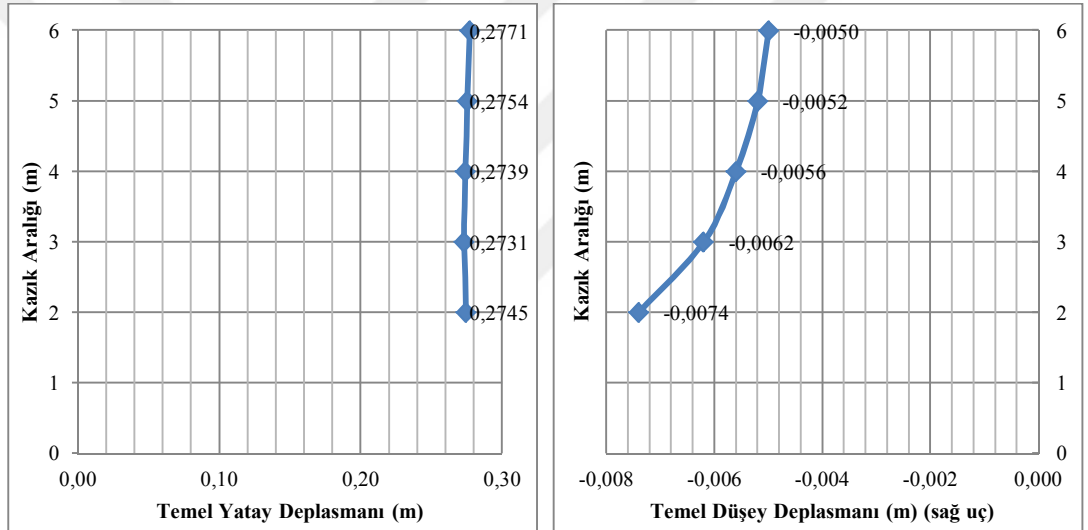


(e) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi (1. ve 2. sıra)

Şekil 4.26. Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)



(f) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi (3. ve 4. sıra)



(g) Temel deplasmanları – kazık aralığı ilişkisi

Şekil 4.26. Model-3 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Çizelge 4.1'deki azaltma katsayılarının azaltılması yani yay rijitliklerinin azaltılması dolayısıyla grup etkisinin artmasıyla moment ve kesme kuvveti değerlerinin azaldığı Şekil 4.26'daki grafiklerden görülebilmektedir. Katsayılarla uyumlu olarak grup etkisinden en az etkilenen kazık sırası 1.sıradaki, en fazla etkilenen kazık sırası 4. sıradakilerdir. Kazık mesafesi 6 m'den 2 m'ye indiğinde, 1.sıradaki kazıklarda maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri %17 ve %12, 2. sıradakiler %33 ve %28, 3. sıradakiler %30 ve %39, 4. sıradakiler %27 ve %47 oranında azalmıştır. Her kazık aralığı için 1. sıradaki kazıklar, en büyük normal kuvvetini düşey yüklemede almaktadır. Kazık mesafesi azalırken 2. 3. ve 4. sıradaki kazıklarda normal kuvvetler az

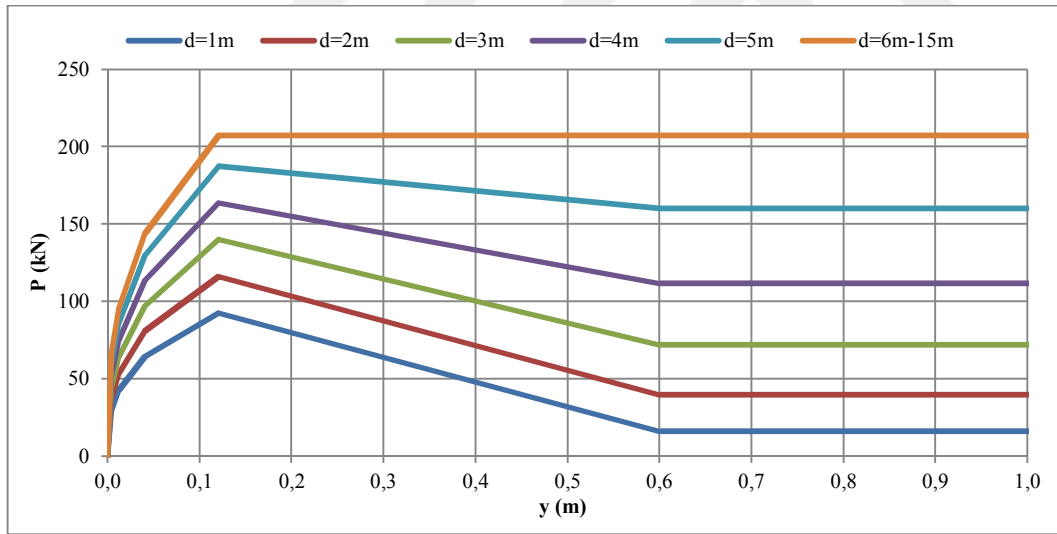
miktarda artmaktadır. Grup etkisinin olmadığı 6 m aralıklı kazık grubunda tüm kazıkların yay rijitlikleri aynı olduğu için kazıkların iç kuvvetleri birbirine en yakındır. Kazık mesafesi azalırken, P-y yay rijitliklerinin azalmasına bağlı olarak yatay kuvvet azaldığı için temel yatay deplasmanları çok az miktarda azalmaktadır. Temel düşey deplasmanı ise her kazık aralığı için maksimum değerlerini modelin sağ ucunda almakla beraber yatay yay rijitlikleri arasındaki farkın artması nedeniyle %50 oranında artmaktadır.

4.4. Deprem Datası Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

Farklı deprem datalarının kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için Şekil 3.4'te verilen koşullar (Model-4) kullanılmıştır.

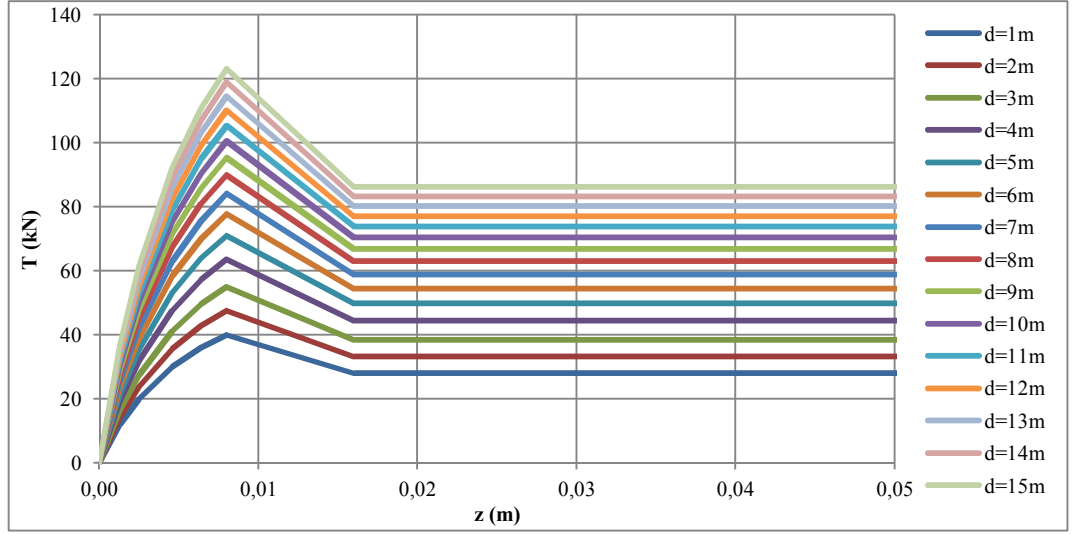
➤ Yumuşak Kil Zeminde ($c=40 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=140 \text{ m/s}$, $PI=20$)

Yumuşak kil zeminde, 80 cm çap ve 15 m uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.27'de verilmiştir.

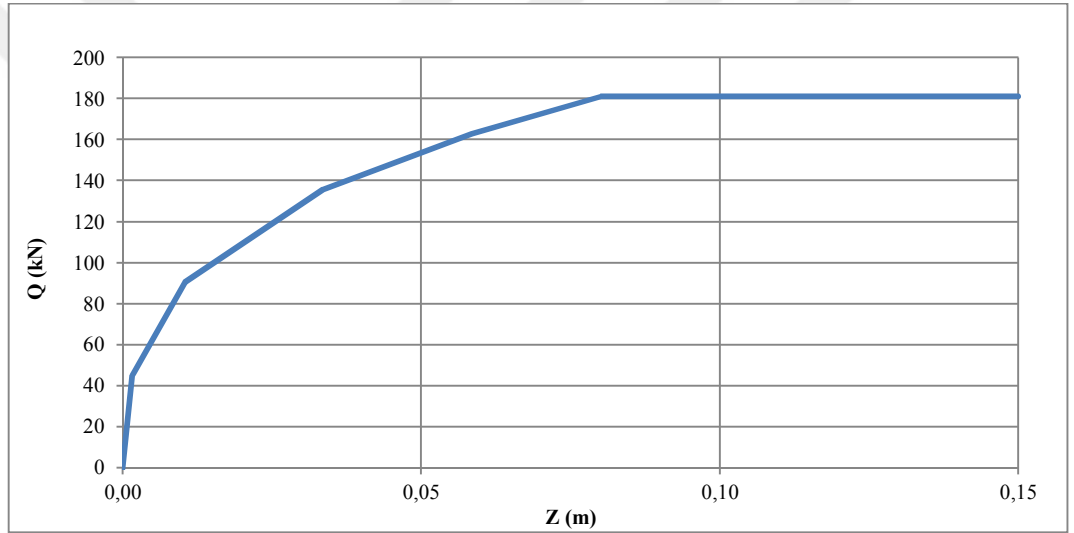


(a) P-y eğrileri

Şekil 4.27. Model-4 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri



(b) T-z eğrileri

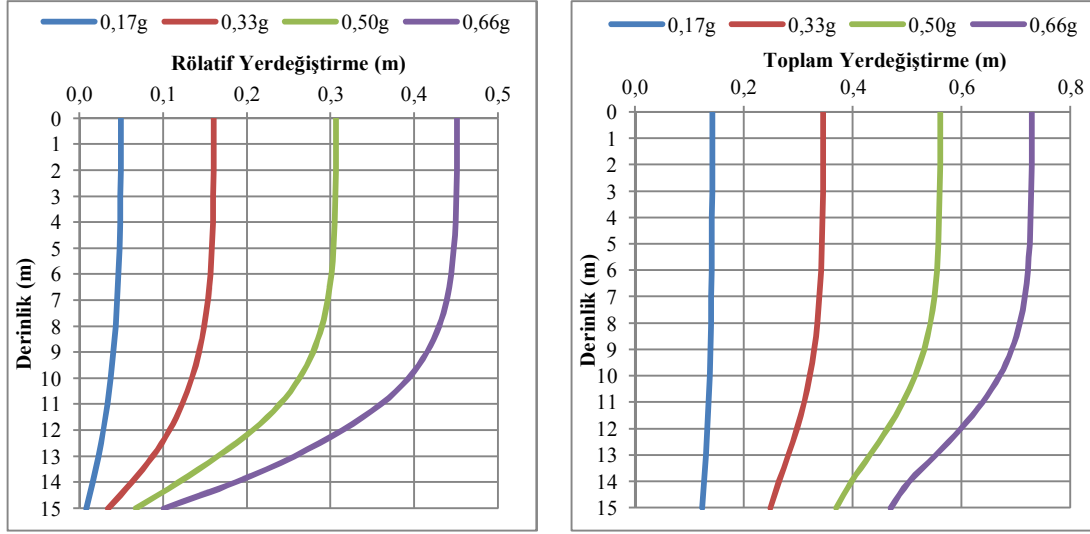


(c) Q-Z eğrisi (d=15m)

Şekil 4.27. Model-4 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri (devamı)

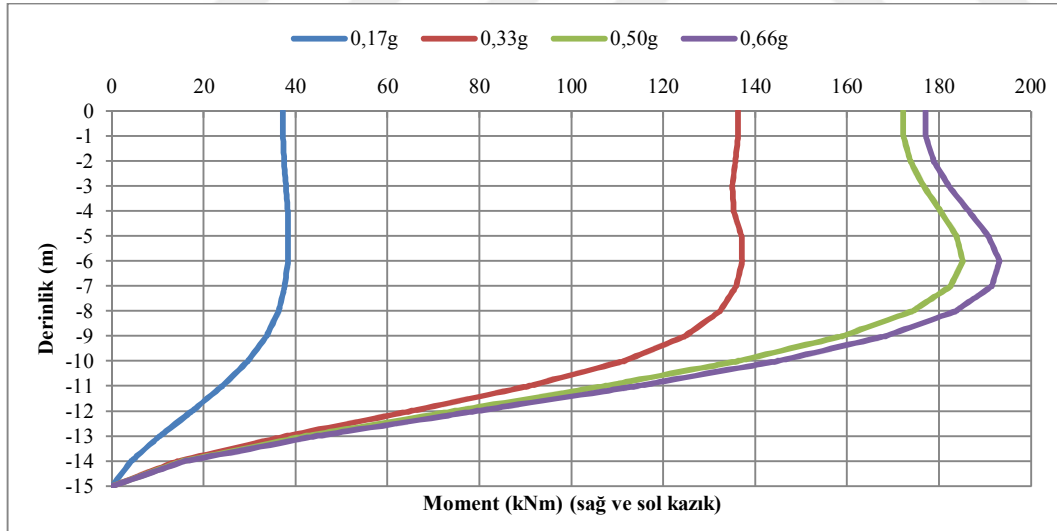
Zemin davranış analizinde, *RSN1165_KOCAELİ_IZT180* ($0.17g$) deprem datasının *DEEPSOIL* yazılımında farklı maksimum yer ivmelerine (PGA) ölçeklendirilmiş dataları kullanılmıştır. Karakteristik olarak $0.17g$ PGA 'ya sahip olan deprem datası, $0.33g$, $0.50g$ ve $0.66g$ olacak şekilde ölçeklendirilerek her deprem datası etkisi altında ayrı ayrı zemin davranış analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.28'de verilmiştir. Bu grafiklere göre, PGA artınca, yüzey ile 15 m derinlikte oluşan yerdeğiştirmeler arasındaki fark artmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA



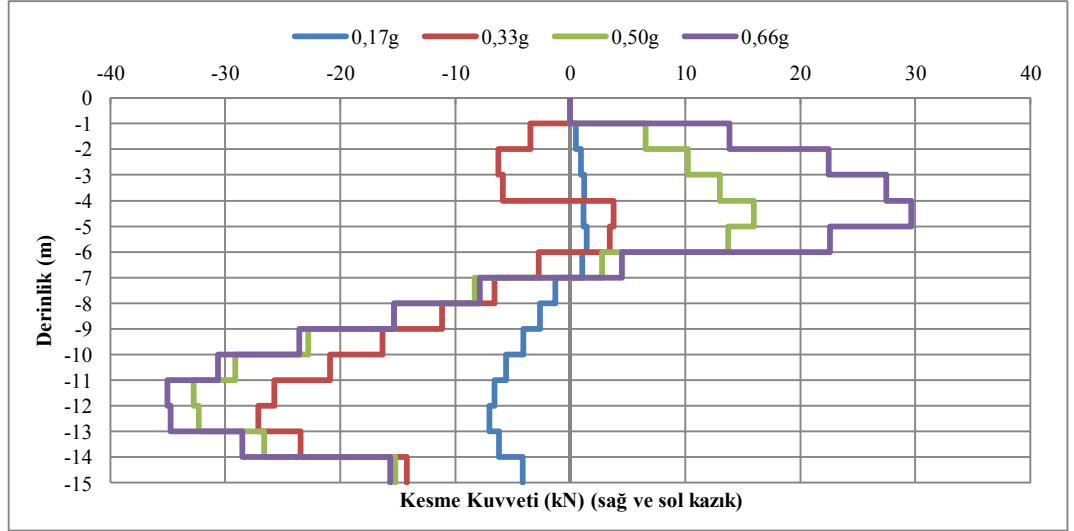
Şekil 4.28. Model-4 yumuşak kil zeminde farklı deprem dataları için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Farklı deprem dataları için elde edilen toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak yumuşak kil zemin-kazık ortamı (Model-4) *SAP2000*'de modellenmiştir. Her bir deprem datası için ayrı ayrı yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman değerleri Şekil 4.29'da verilmiştir.

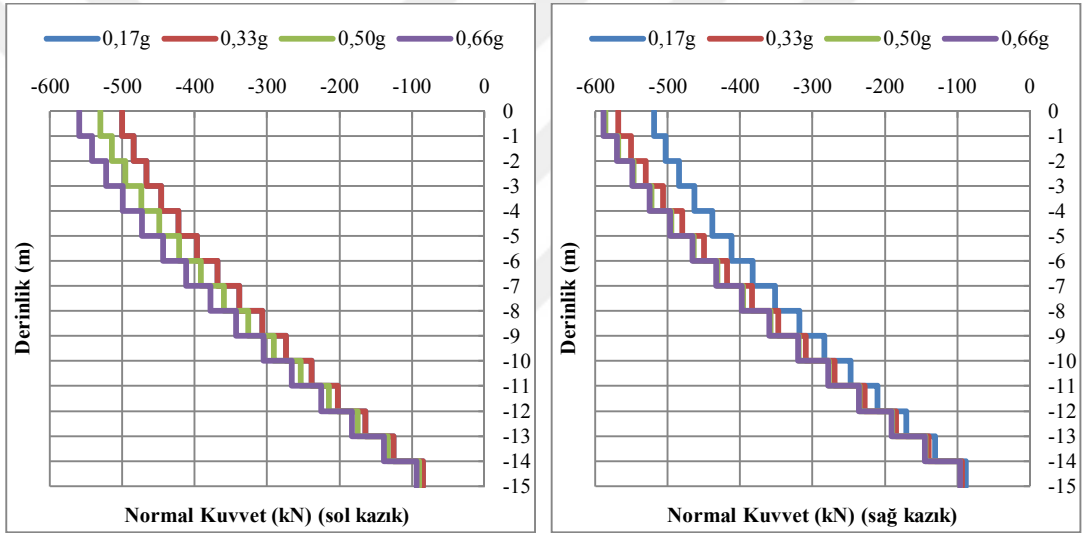


(a) Moment – derinlik ilişkisi

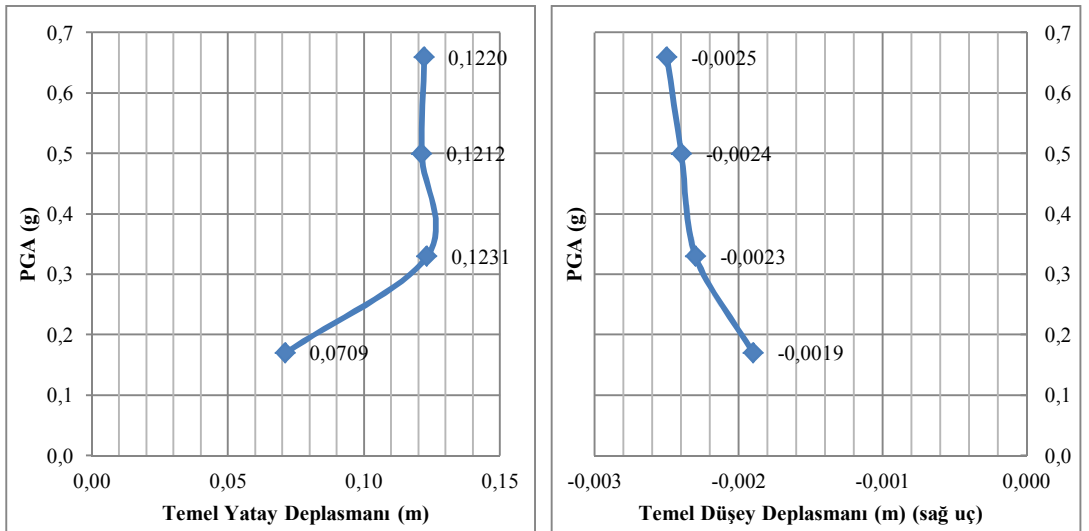
Şekil 4.29. Model-4 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



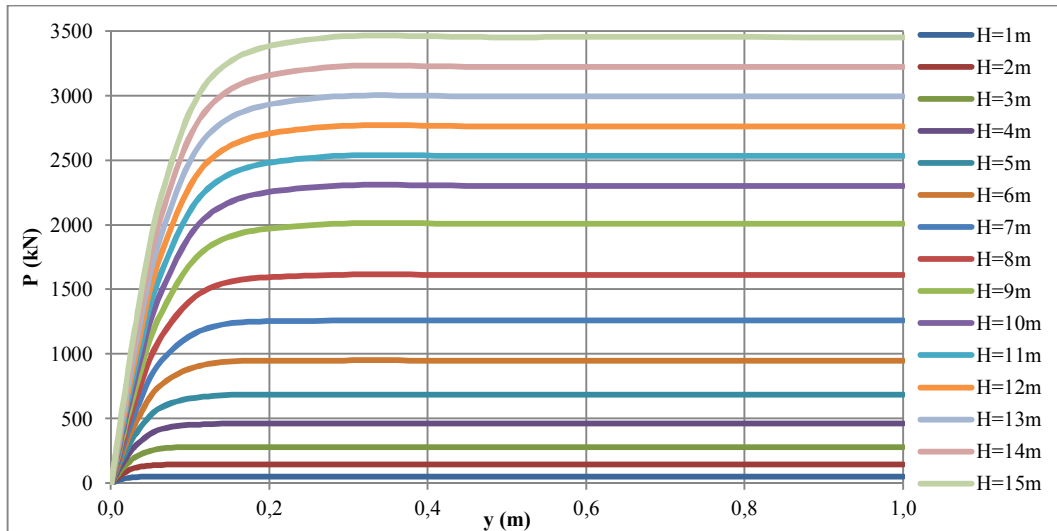
(d) Temel deplasmanları – PGA ilişkisi

Şekil 4.29. Model-4 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Şekil 4.29'daki grafiklerden anlaşılabacağı gibi, maksimum yer ivmesi artınca her iki kazıkta kesme kuvveti ve moment değerleri artmaktadır. $0.17g$ 'den $0.33g$ 'ye çıkan deprem etkisiyle iç kuvvetler 3 kat artarken, $0.33g$ 'den $0.50g$ 'ye çıkan deprem etkisiyle iç kuvvetler %35 oranında artmıştır. $0.50g$ 'den $0.66g$ 'ye çıkan deprem etkisi ise kazıklarda yüksek miktarda iç kuvvet artışı oluşturmamıştır. Bunun nedeni, artan ivmeyle oluşan toplam zemin yerdeğiştirmeleri artışının, P-y nonlineer yaylarının karakteristik özelliği nedeniyle yüksek yatay kuvvet oluşturmamasıdır. Kazıklarda moment ve kesme kuvveti değişimleri kritik derinlik olan 6 m'de oluşmuştur. Maksimum moment değerleri kritik derinlikte oluşurken, maksimum kesme kuvvetleri kritik derinliğin altında oluşmuştur. Maksimum yer ivmesinin $0.17g$ 'den $0.66g$ 'ye çıkmasıyla kazıklarda oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri 5 katına çıkmıştır. Deprem etkisi yani yatay kuvvet artınca, kazıklardaki normal kuvvetler artmaktadır. $0.17g$ ve $0.33g$ deprem etkisindeki sol kazıklar, düşey yüklemede en büyük normal kuvvet değerini almıştır. Temel yatay deplasmanı, artan deprem etkisi nedeniyle %70 oranında artmıştır. Temel düşey deplasmanı ise artan deprem etkisinin oluşturduğu stabilite bozulması nedeniyle %20 oranında artmıştır.

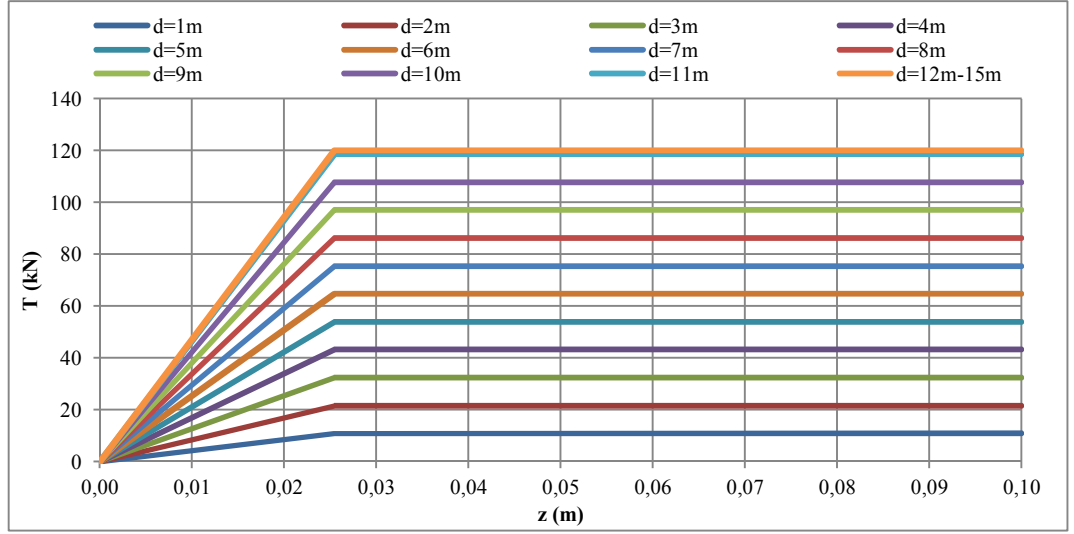
➤ **Çok Gevşek Kum Zeminde ($\Phi=28$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=170 \text{ m/s}$)**

Çok gevşek kum zeminde, 80 cm çap ve 15 m uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.30'da verilmiştir.

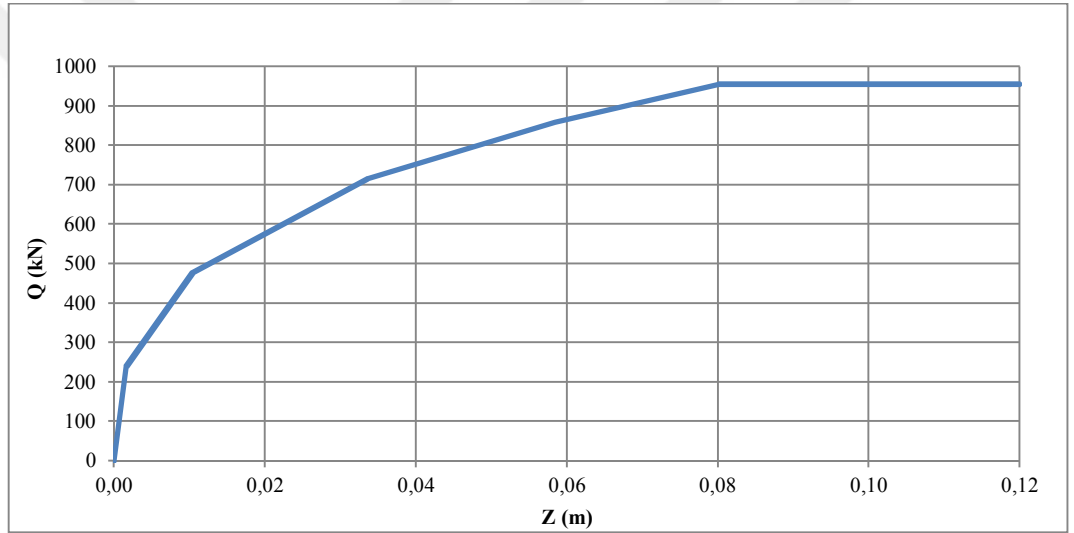


(a) P-y eğrileri

Şekil 4.30. Model-4 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri



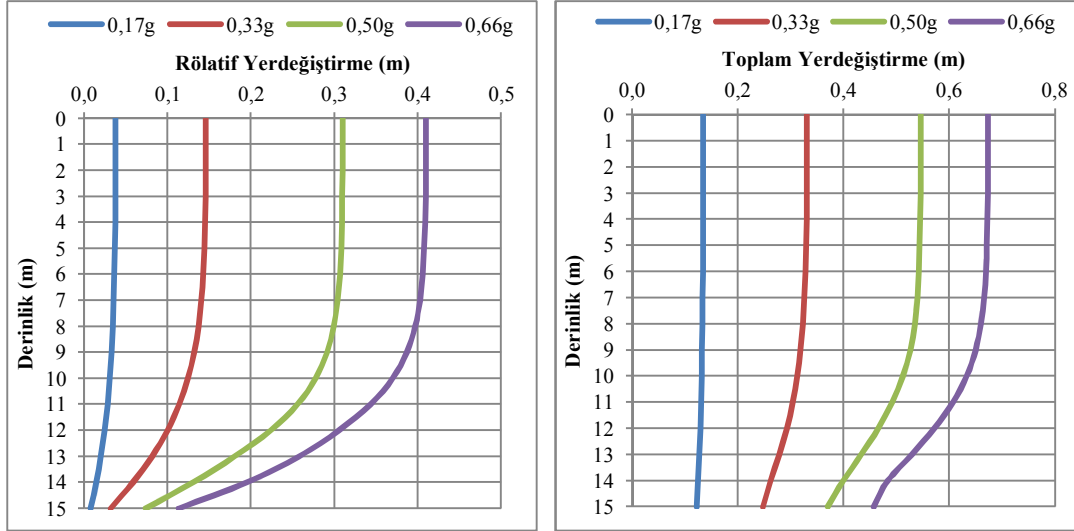
(b) T-z eğrileri



(c) Q-Z eğrisi

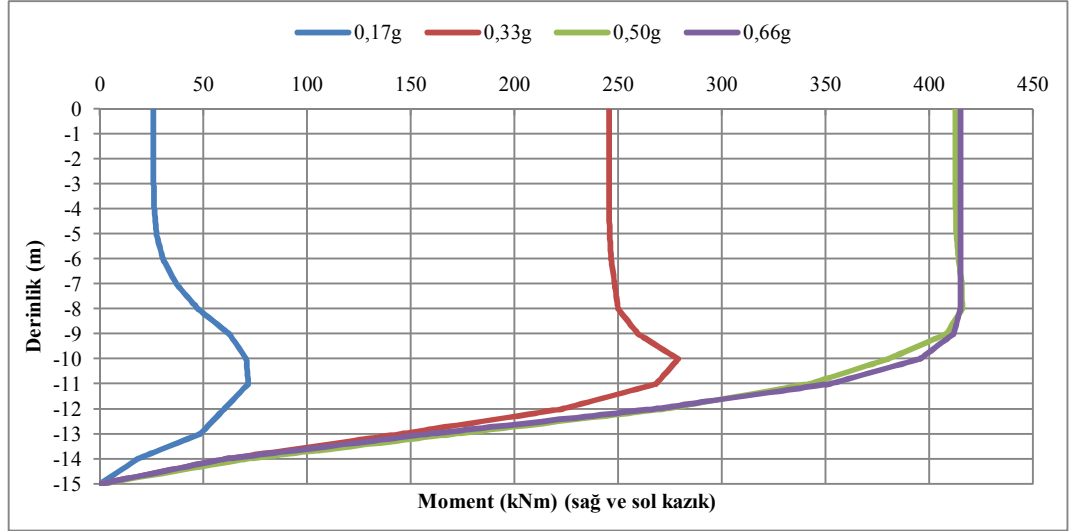
Şekil 4.30. Model-4 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri (devamı)

Model-4 çok gevşek kum ortamında, *RSN1165_KOCAELİ_IZT180* (0.17g) deprem datası 0.33g, 0.50g ve 0.66g'ye ölçeklendirilmiş ve her deprem datası etkisi altında ayrı ayrı zemin davranış analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 4.31'de verilmiştir. Bu grafiklere göre, *PGA*'nın 0.17g'den 0.66g'ye çıkmasıyla zemin yüzeyinde yerdeğiştirmeler 5 katına, 15 m derinlikteki yerdeğiştirmeler 3.5 katına çıkmıştır.

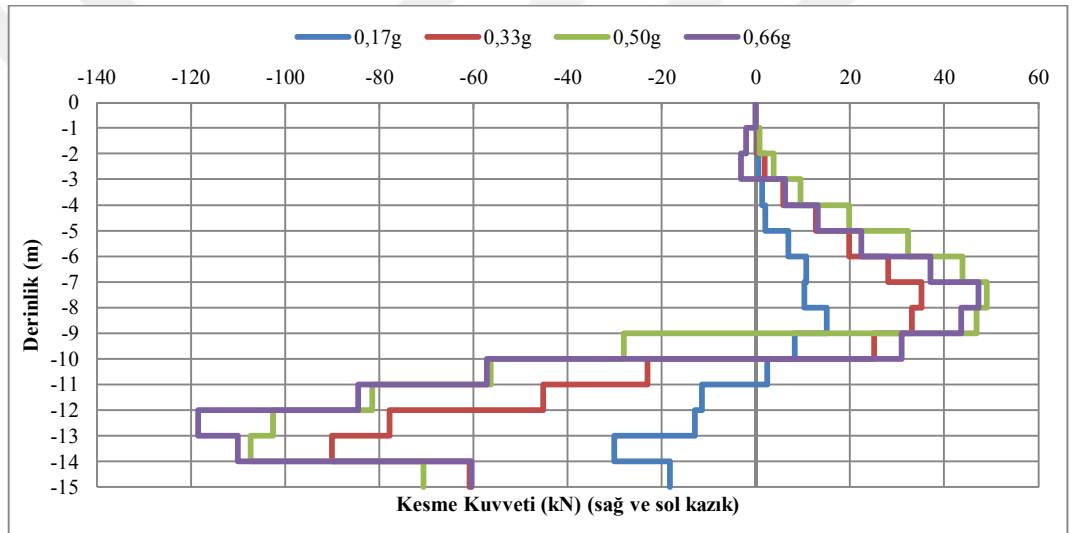


Şekil 4.31. Model-4 çok gevşek kum zeminde farklı deprem dataları için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

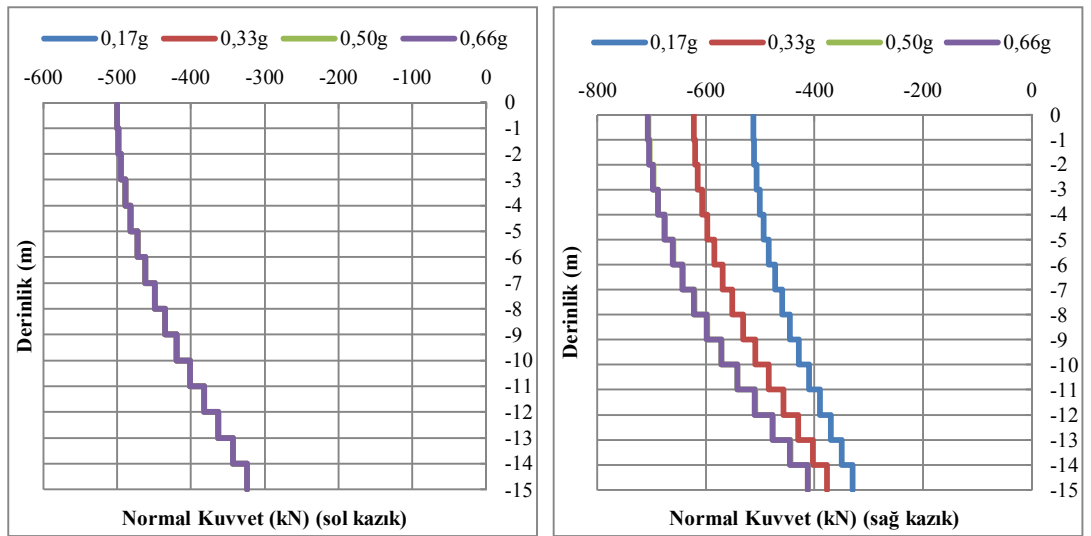
Farklı deprem dataları kullanılarak çok gevşek kum zemin-kazık ortamı (Model-4) *SAP2000*'de modellenmiştir. Her bir deprem datası için ayrı ayrı yapılan nonlineer yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman değerleri Şekil 4.32'de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabileceği gibi, maksimum yer ivmesi artınca her iki kazıkta kesme kuvveti değerleri, moment değerleri ve iki kazık arasındaki normal kuvvet farkı artmaktadır. Maksimum yer ivmesinin 0.17g'den 0.66g'ye çıkmasıyla kazıklarda oluşan maksimum moment değerleri 6 katına, kesme kuvveti değerleri 5 katına çıkmıştır. Her yüklenme durumu için sol kazıkta en büyük normal kuvvet değeri düşey yükleme esnasında oluşmakta, modele yatay etkidiğinde normal kuvvet azalmaktadır. Deprem etkisi artarken sağ kazıkta normal kuvvet artmaktadır. Temel yatay deplasmanı, artan deprem etkisi nedeniyle 4 katına, temel düşey deplasmanı %80 oranında artmıştır.



(a) Moment – derinlik ilişkisi

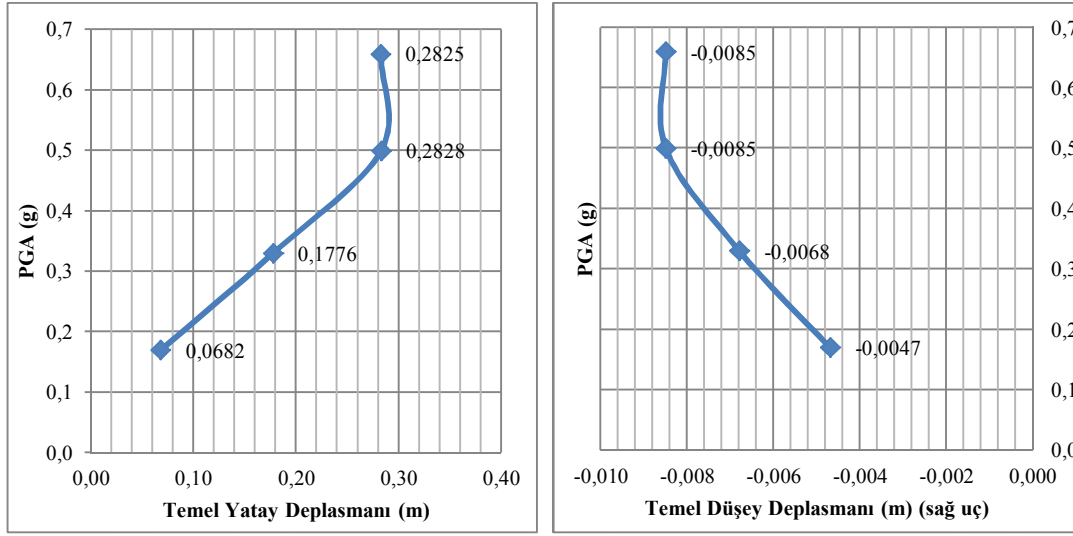


(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi

Şekil 4.32. Model-4 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(d) Temel deplasmanları – PGA ilişkisi

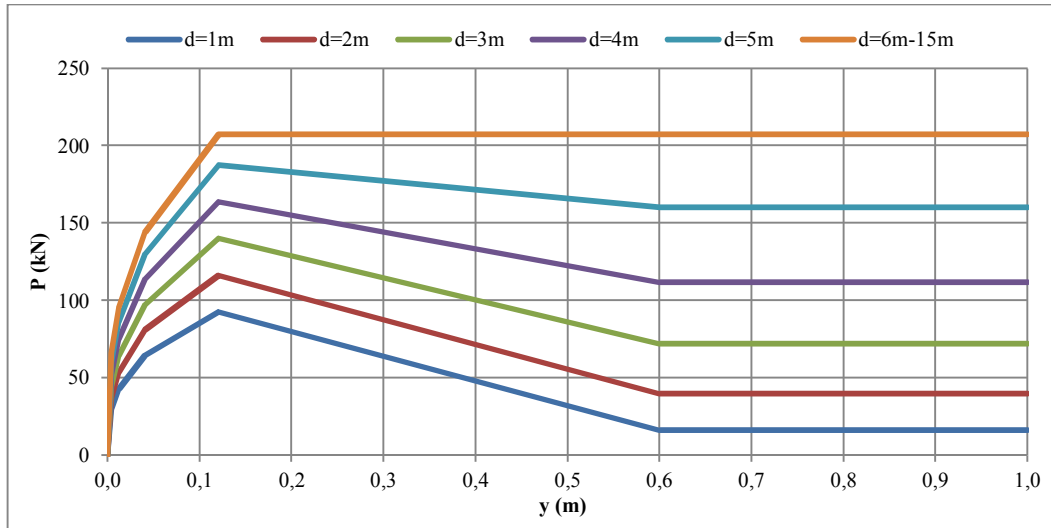
Şekil 4.32. Model-4 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

4.5. Anakaya Derinliği Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

Zemin profilinde farklı anakaya derinliklerinin kazıklı temel davranışına etkisini incelemek için Şekil 3.5’te verilen koşullar (Model-5) kullanılmıştır.

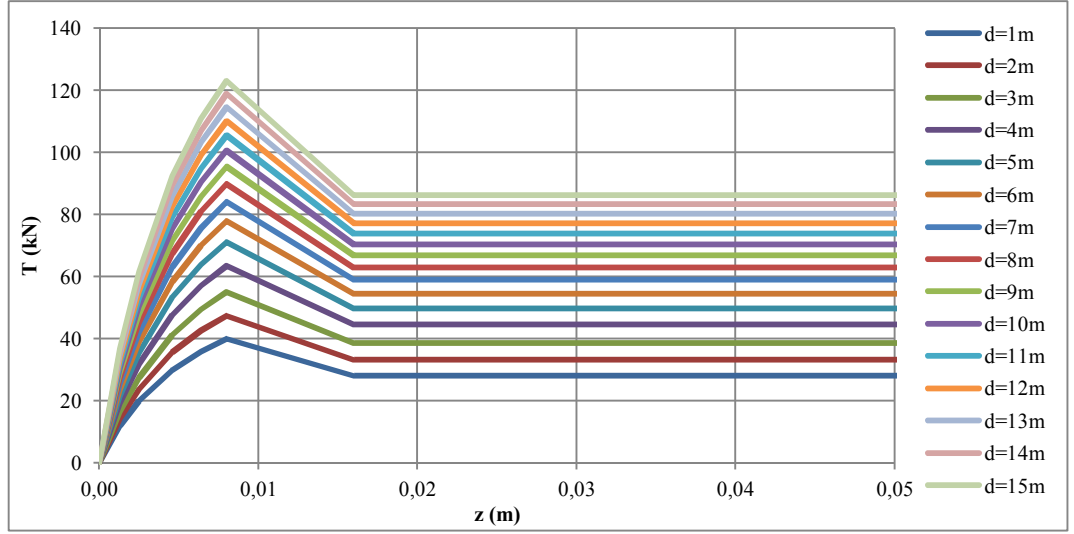
➤ Yumuşak Kil Zeminde ($c=40 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=140 \text{ m/s}$, $PI=20$)

Yumuşak kil zeminde, 80 cm çap ve 15 uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.33’te verilmiştir.

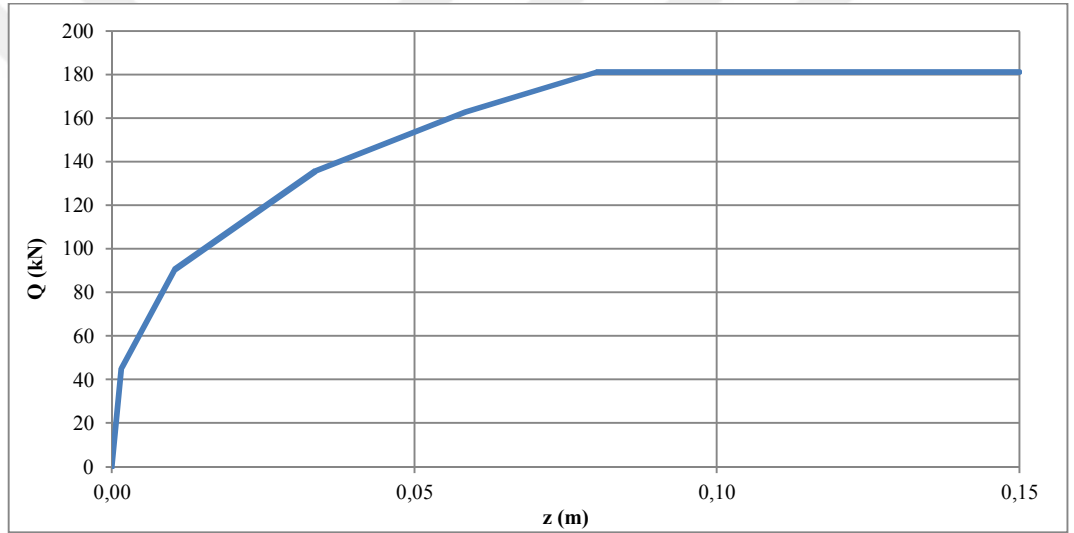


(a) P-y eğrileri

Şekil 4.33. Model-5 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri



(b) T-z eğrileri

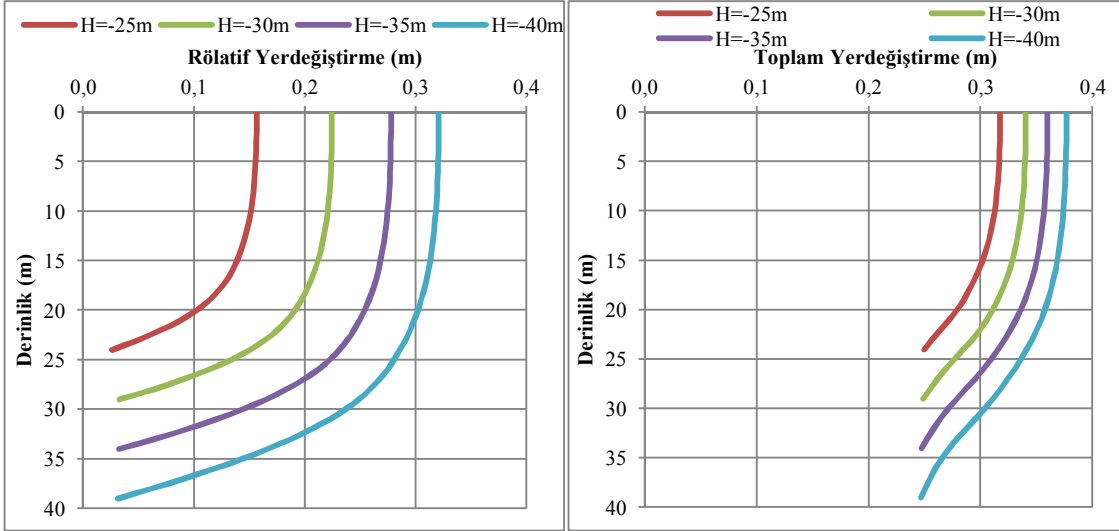


(c) Q-Z eğrisi (d=15m)

Şekil 4.33. Model-5 yumuşak kil zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri (devamı)

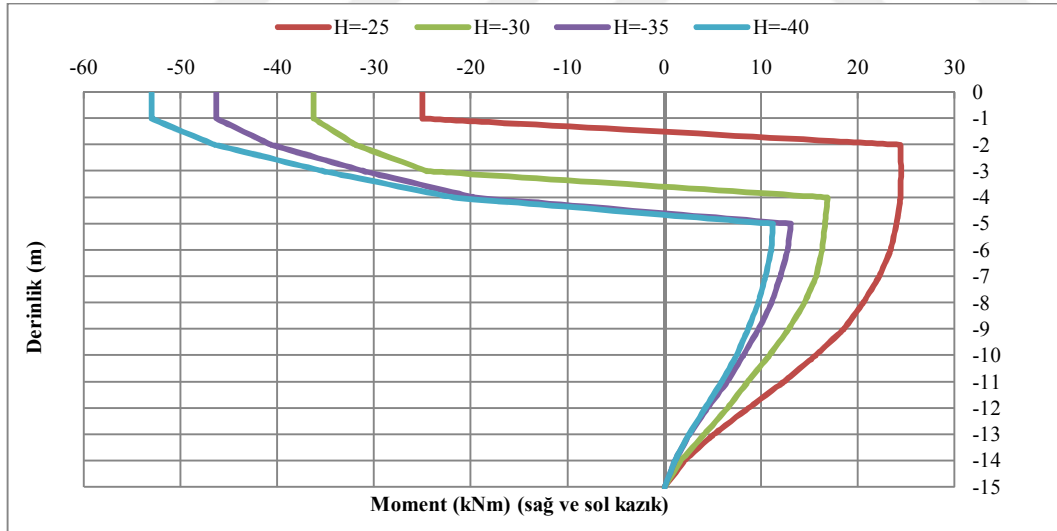
Zemin davranış analizinde, anakaya derinliğinin -25m, -30, -35 ve -40 m derinliğinde olması durumuna göre ayrı ayrı *RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g)* deprem datası kullanılmıştır. Analiz sonucunda zemin derinliği boyunca elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmeler Şekil 4.34'te verilmiştir. Bu grafiklere göre, anakaya derinliği artınca, rölatif ve toplam yerdeğiştirmeler artmaktadır. Anakaya derinliği 25m'den 40m'ye çıkınca, yüzeydeki ve 15 m derinlikte rölatif yerdeğiştirmeler 2 katına çıkarken, toplam yerdeğiştirmeler %20 oranında artmaktadır. Anakaya derinliği artarken rölatif yerdeğiştirme ile toplam yerdeğiştirme arasındaki fark azalmaktadır. Ayrıca, anakaya derinliği artarken yüzeydeki ve 15 m derinliğindeki yerdeğiştirmeler arasındaki fark kapanmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA



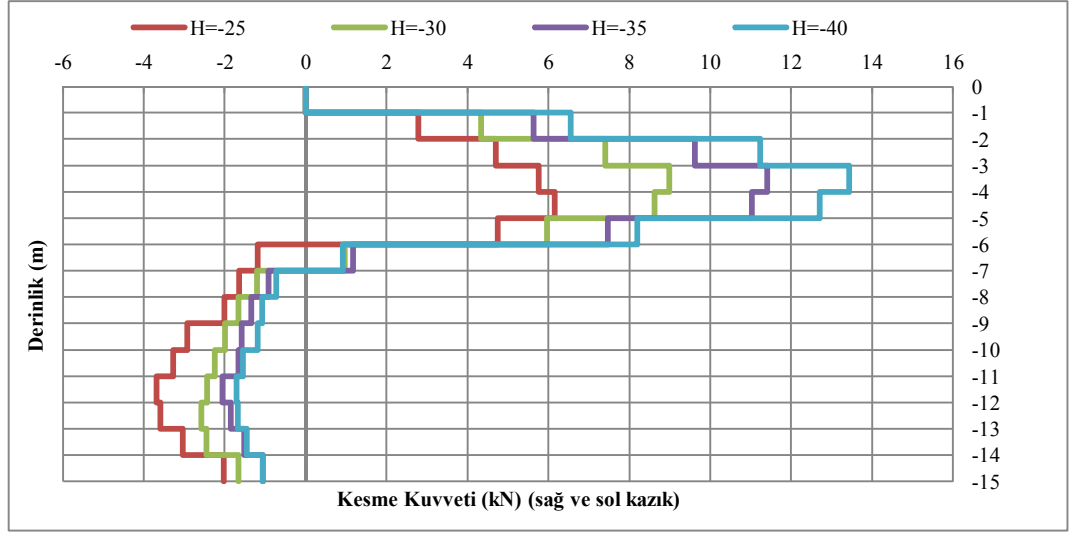
Şekil 4.34. Model-5 yumuşak kil zeminde farklı anakaya derinlikleri için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Aynı deprem etkisindeki farklı anakaya derinlikleri için elde edilen toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak yumuşak kil zemin-kazık ortamı (Model-5) *SAP2000*'de modellenmiştir. Yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman değerleri Şekil 4.35'te verilmiştir.

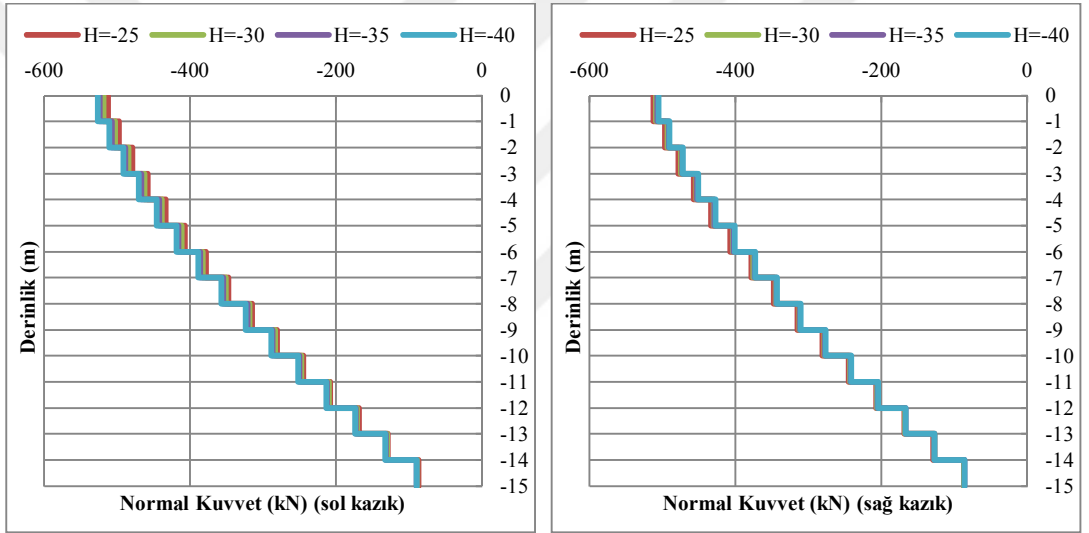


(a) Moment – derinlik ilişkisi

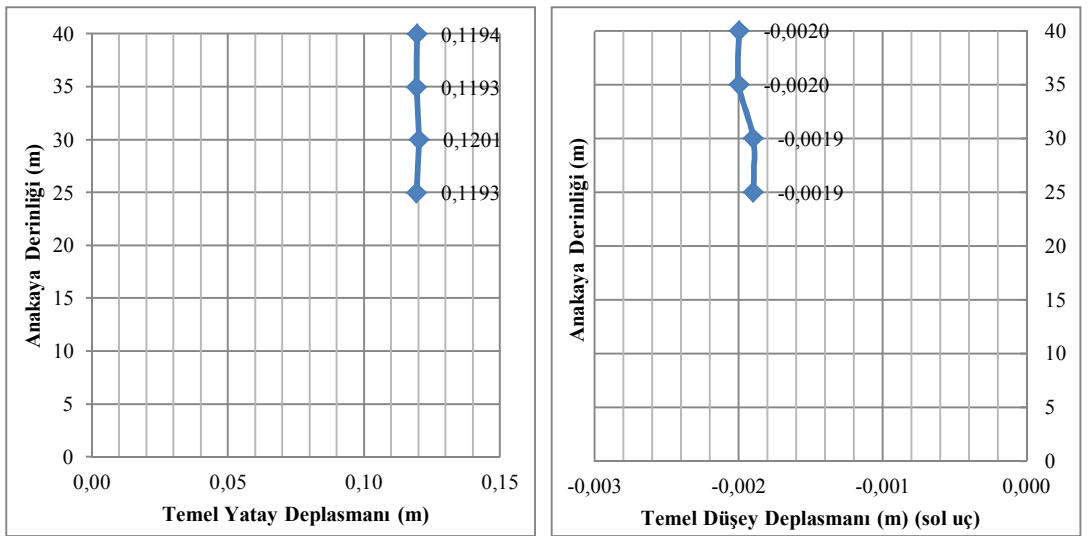
Şekil 4.35. Model-5 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



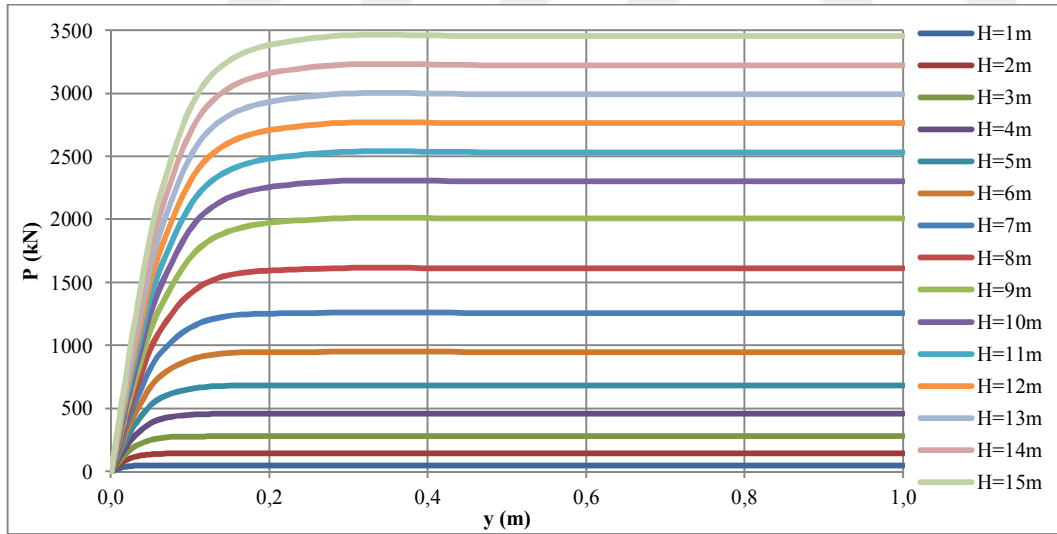
(d) Temel deplasmanları – anakaya derinliği ilişkisi

Şekil 4.35. Model-5 yumuşak kil zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Şekil 4.35'deki grafiklerden anlaşılabacağı gibi, modele uygulanan deprem datasının düşük büyüklükte olması nedeniyle kazıklarda büyük yatay iç kuvvet oluşmamıştır. Buna bağlı olarak, her iki kazıkta oluşan normal kuvvetler birbirine çok yakındır. Anakaya derinliği artınca toplam yerdeğiştirmelerin artmasına bağlı olarak her iki kazıkta da kesme kuvveti ve moment değerleri artmaktadır. Kazıklarda iç kuvvet değişimleri özellikle kritik derinlik olan 6 m'nin üzerinde oluşmuştur. Anakaya derinliğinin 15 m daha derine inmesiyle, kazıklarda oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri 2 katına çıkmıştır. Temel yatay ve düşey deplasman değerleri, her anakaya derinliği için nonlineer yay özelliklerinin aynı kalması ve zemin toplam yerdeğiştirmelerinde büyük değişim olmaması nedeniyle aynı kalmıştır. Maksimum momentlerin olduğu yönle uyumlu olarak maksimum düşey deplasman temelin sol ucunda oluşmuştur.

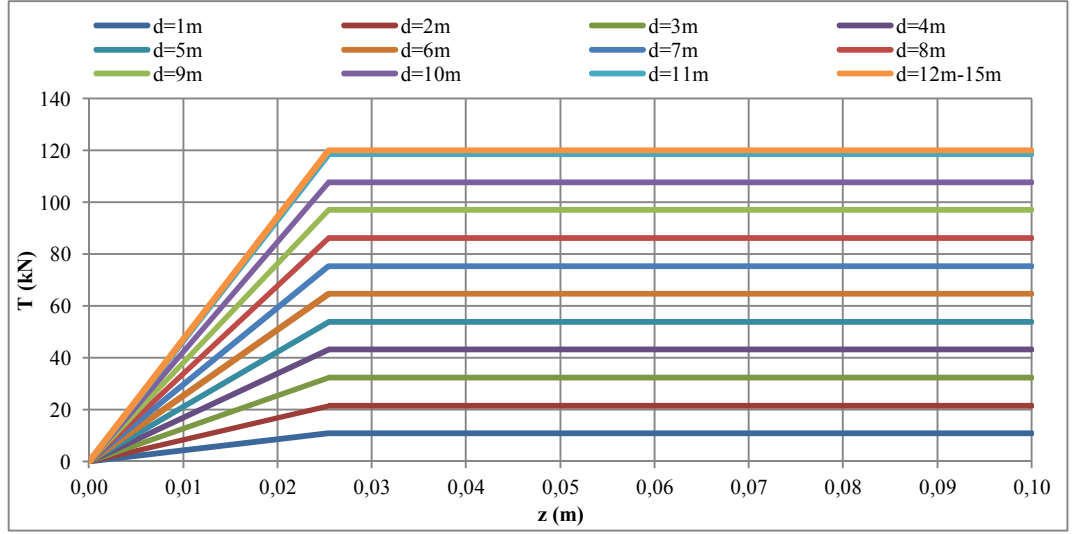
➤ **Çok Gevşek Kum Zeminde ($\Phi=28$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $V_s=170 \text{ m/s}$)**

Çok gevşek kum zeminde, 80 cm çap ve 15 uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y, T-z ve Q-Z eğrileri Şekil 4.36'da verilmiştir.

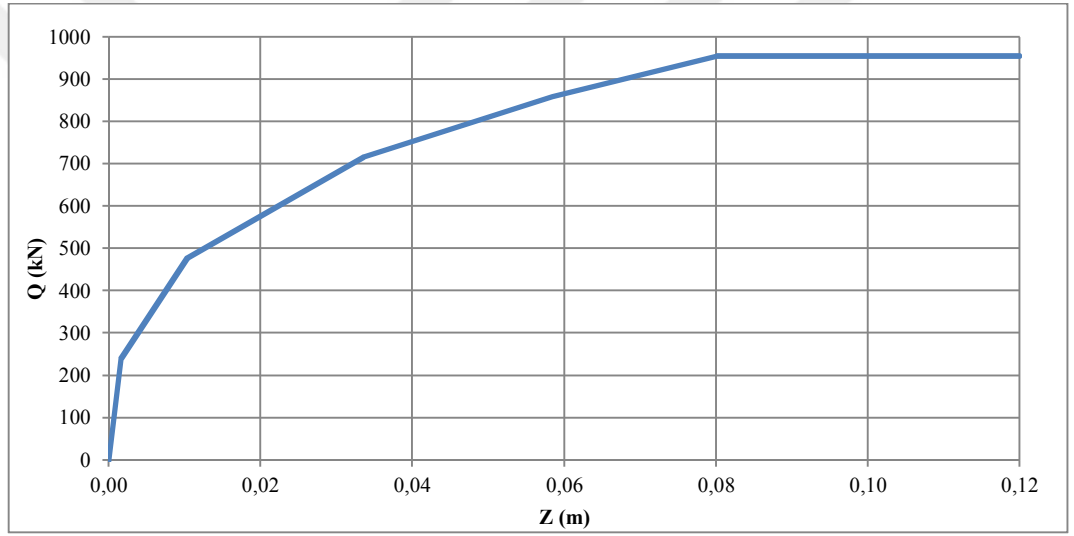


(a) P-y eğrileri

Şekil 4.36. Model-5 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri



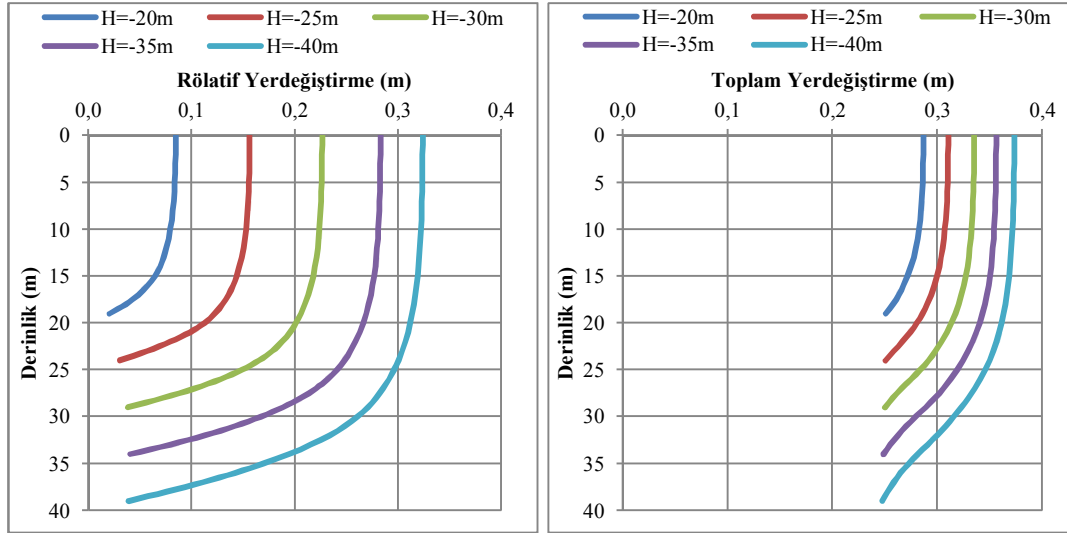
(b) T-z eğrileri



(c) Q-Z eğrisi (d=15m)

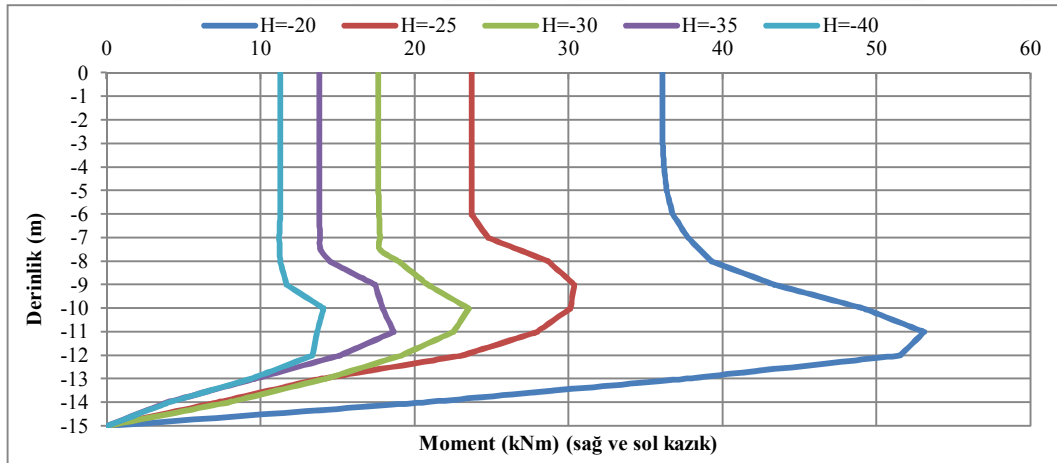
Şekil 4.36. Model-5 çok gevşek kum zeminde P-y, T-z ve Q-Z eğrileri (devamı)

Zemin davranış analizinde, anakaya derinliğinin -20, -25m, -30, -35 ve -40 m derinliğinde olması durumuna göre ayrı ayrı *RSN1165_KOCAELI_IZT090 (0.23g)* deprem datası kullanılmıştır. Analizlerde, kayma dalgası hızlarının birbirine yakın olması ve birim hacim ağırlıklarının aynı olması nedeniyle yumuşak kilde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir.



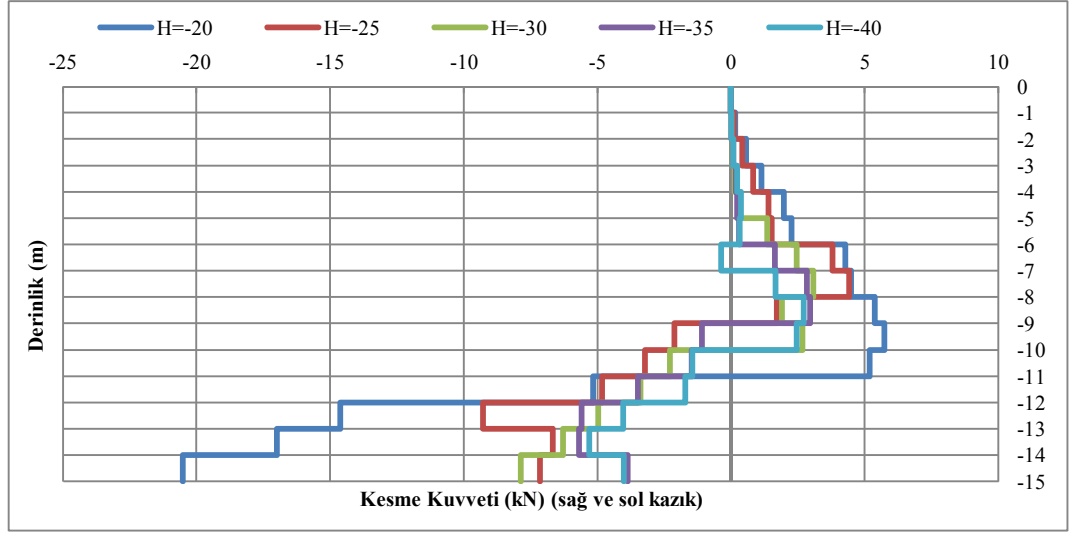
Şekil 4.37. Model-5 çok gevşek kum zeminde farklı anakaya derinlikleri için yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Aynı deprem etkisindeki farklı anakaya derinlikleri için elde edilen toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak yumuşak kil zemin-kazık ortamı (Model-5) *SAP2000*'de modellenmiştir. Yapılan nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve deplasman değerleri Şekil 4.38'de verilmiştir.

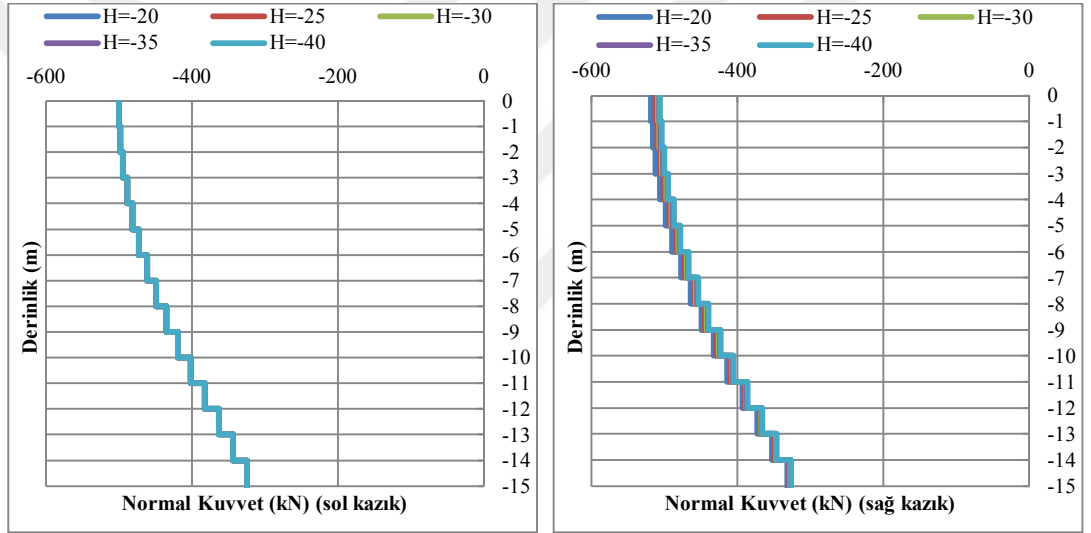


(a) Moment – derinlik ilişkisi

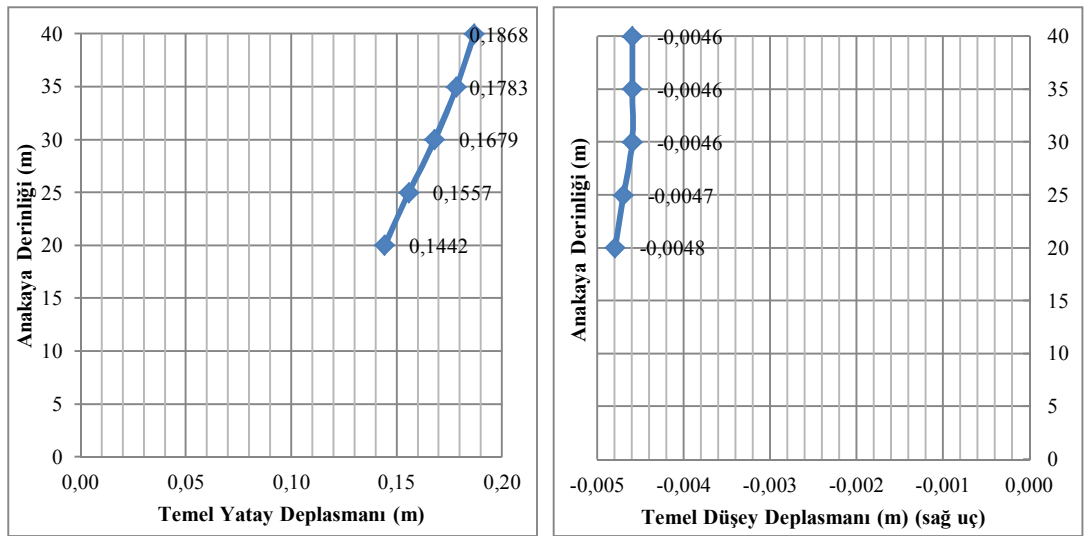
Şekil 4.38. Model-5 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



(d) Temel deplasmanları – anakaya derinliği ilişkisi

Şekil 4.38. Model-5 çok gevşek kum zeminde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

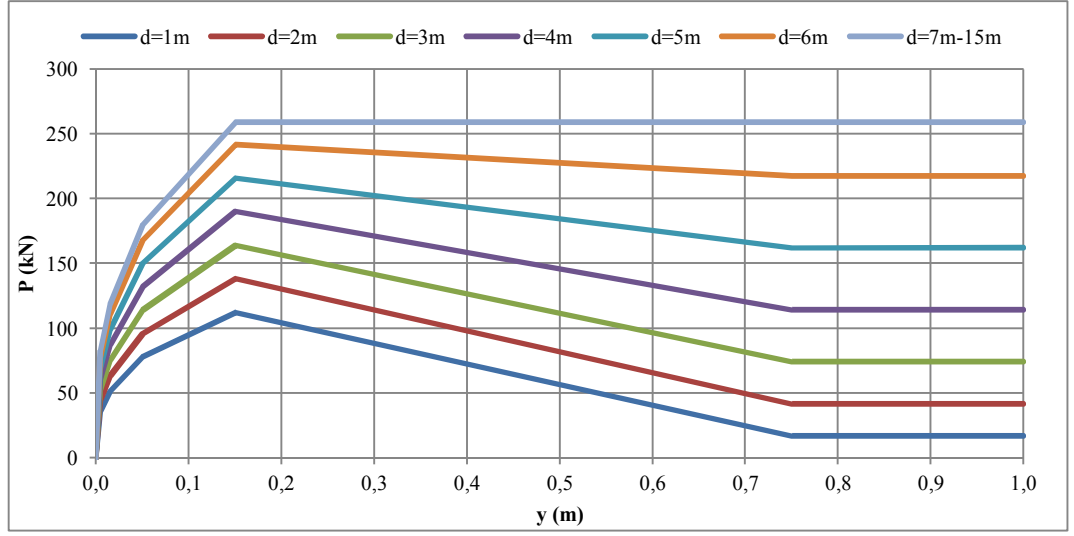
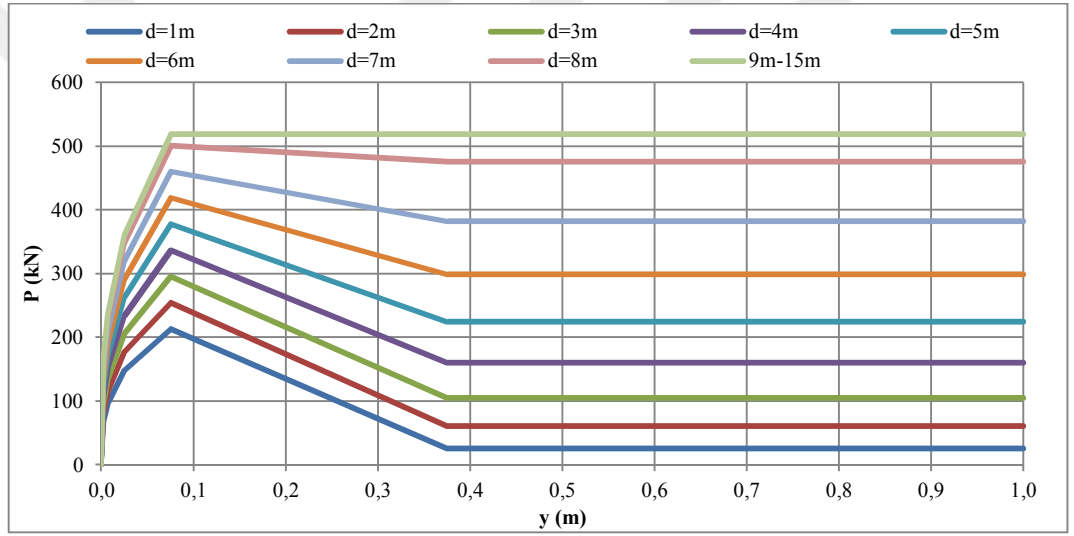
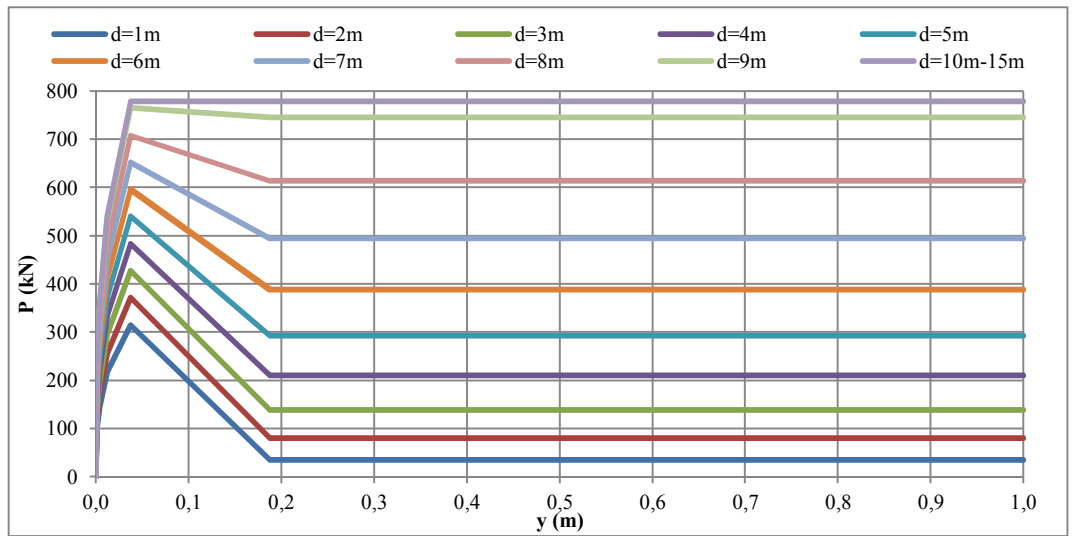
Modele uygulanan deprem dasetının düşük büyüklükte olması nedeniyle kazıklarda büyük yatay iç kuvvet oluşmamıştır. Yatay kuvvet arttıkça sağ kazıktaki normal kuvvet azalıp sol kazıktaki normal kuvvet artmaktadır. Sol kazıkta en büyük normal kuvvet düşey yükleme esnasında oluşmaktadır. Anakaya derinliğinin 20 m'den 40 m'ye inmesiyle kazıklarda oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti %70 oranında azalmaktadır. Bunun nedeni anakaya derinliğinin artmasıyla yüzeydeki zemin toplam yerdeğiştirme değeri ile 15 derinliğindeki zemin toplam yerdeğiştirmesi arasındaki farkın azalmasıdır. Yani anakaya derinliği artınca zeminin ilk 15 metrelik derinliği için deprem etkisi azalmaktadır. Bu durum kum zeminde, kil zeminlere göre farklı etki oluşturmaktadır. Anakaya derinliği 2 katına çıkınca modele uygulanan zemin toplam yerdeğiştirmelerinin artmasına bağlı olarak temel yatay deplasman %30 oranında artmaktadır. İç kuvvetlerin azalmasına bağlı olarak temel düşey deplasmanı çok az miktarda azalmıştır.

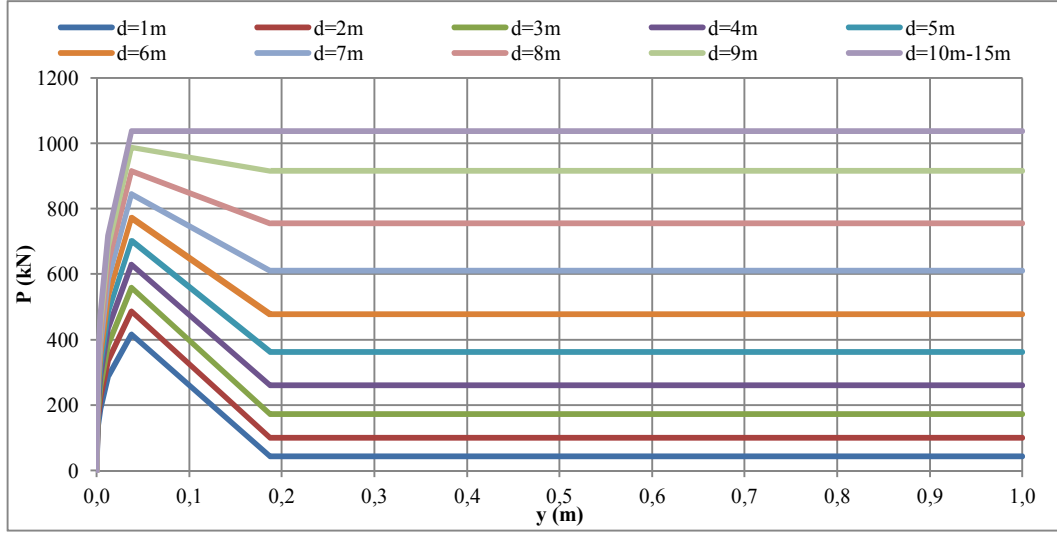
4.6. Farklı Kil Zemin Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

Farklı özellikleri olan kil zeminlerde kazıklı temel davranışını incelemek için Şekil 3.6'te verilen koşullar (Model-6) kullanılmıştır. Kil zeminlerin özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu zeminlerde, 100 cm çap ve 15 m uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.39'da verilmiştir. Katı kil ve çok katı kil zeminler için P-y eğrileri belirlenirken API (2007)'de yumuşak kil zeminler için önerilen yöntem kullanılmıştır.

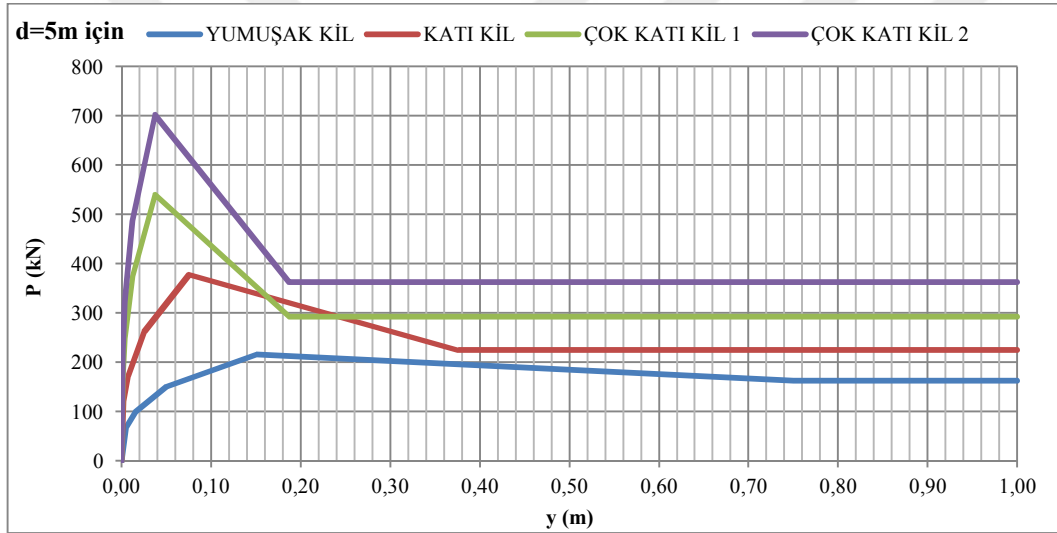
Çizelge 4.4. Model-6 için kil zeminlerin özellikleri

Zemin Türü	Drenajsız Kayma Muk. c (kN/m ²)	Efektif Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m ³)	Kayma Dalgası Hızı V_s (m/s)	Plastisite İndeksi PI	Birim Def. (%50) ϵ_c
Yumuşak Kil	40	16	140	20	0.020
Katı Kil	80	17	210	25	0.010
Çok Katı Kil 1	120	18	280	30	0.005
Çok Katı Kil 2	160	19	350	35	0.005

(a) Yumuşak Kil için $P-y$ eğrileri(b) Kıta Kil için $P-y$ eğrileri(c) Çok Kıta Kil 1 için $P-y$ eğrileriŞekil 4.39. Model-6 farklı kil zeminler için $P-y$ eğrileri



(d) Çok Katı Kil 2 için P-y eğrileri



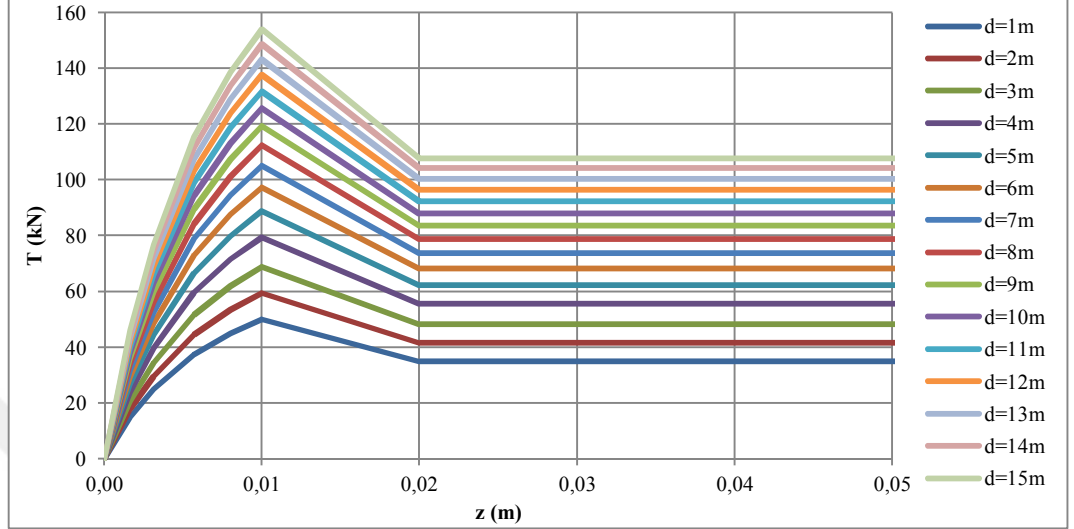
(e) d=5m’de farklı kil zeminler için P-y eğrileri

Şekil 4.39. Model-6 farklı kil zeminler için P-y eğrileri (devamı)

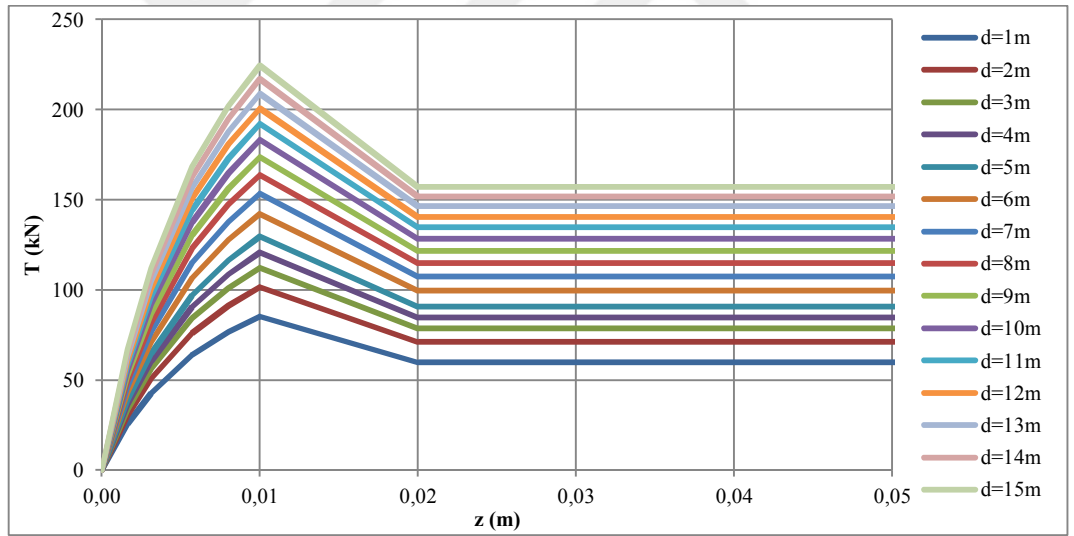
Şekil 4.39’daki P-y eğrileri incelendiğinde, drenajsız kayma mukavemeti yani zemin rijitliği arttığı zaman zemin kritik derinliğinin arttığı, aynı deplasman aralığı için zeminin karşılayabileceği yükün arttığı, zeminin elastik davrandığı deplasman aralığının azaldığı görülecektir. Kritik derinlikten sonraki derinliklerde yumuşak kil yay özellikleri değişmemektedir.

Model-6’da farklı kil zeminler için elde edilen T-z eğrileri Şekil 4.40’ta verilmiştir. T-z eğrileri, API (2007)’deki koşullar göz önüne alınarak $t_{res}=0,7t_{max}$ olacak şekilde elde edilmiştir. Bu grafiklere göre, zemin rijitliği yani drenajsız kayma mukavemeti ve birim hacim ağırlık arttıkça zeminin sürtünme direnci arttığı için

zeminin düşeyde yerel deplasman yapması için daha fazla yük gerekmektedir. Dolayısıyla zeminin düşey yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Bu durum, Şekil 4.40e’de aynı derinlikte ($d=10\text{m}$) tüm zeminler için elde edilen T-z eğrilerinde görülebilmektedir.



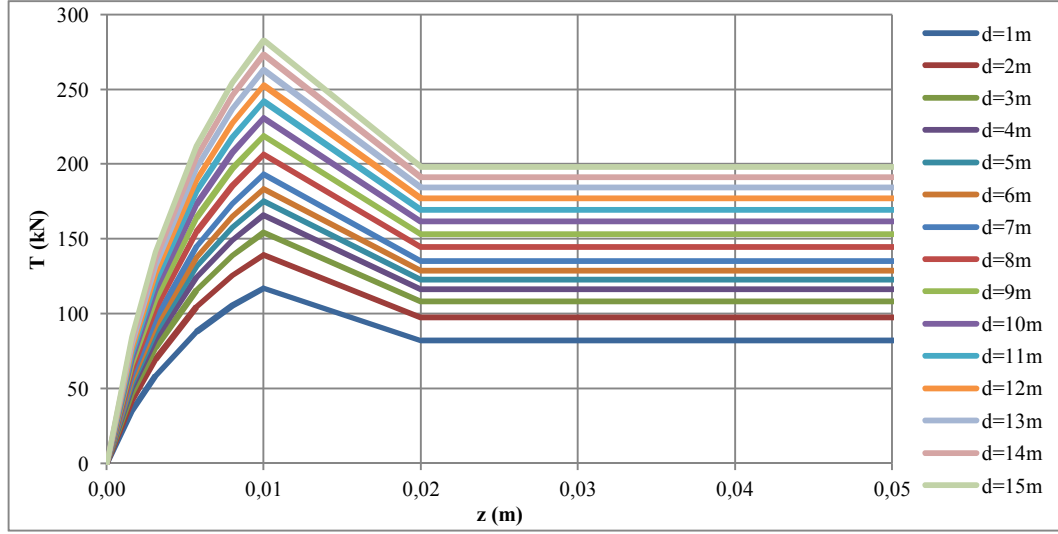
(a) Yumuşak Kil için T-z eğrileri



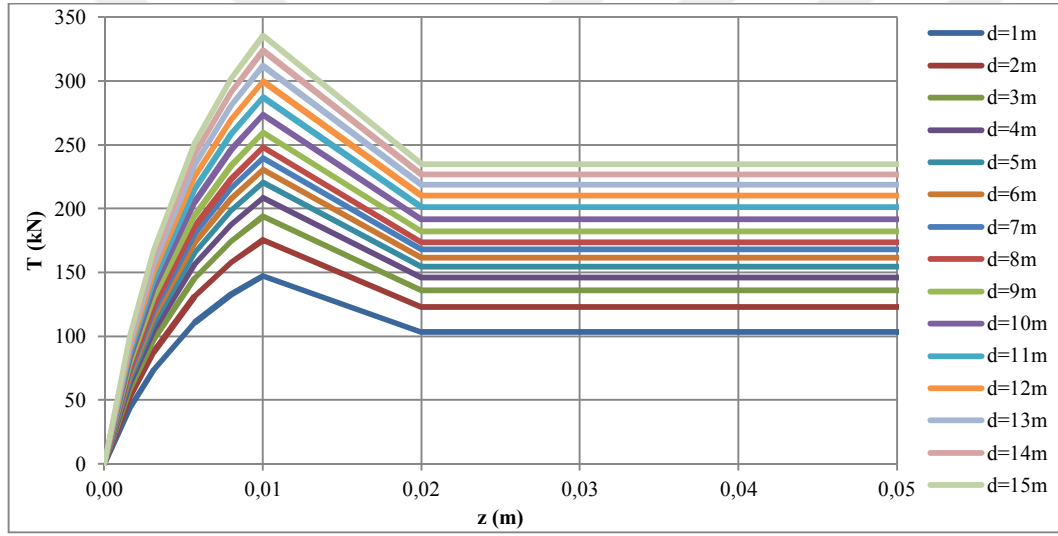
(b) Kıy Kil için T-z eğrileri

Şekil 4.40. Model-6 farklı kil zeminler için T-z eğrileri

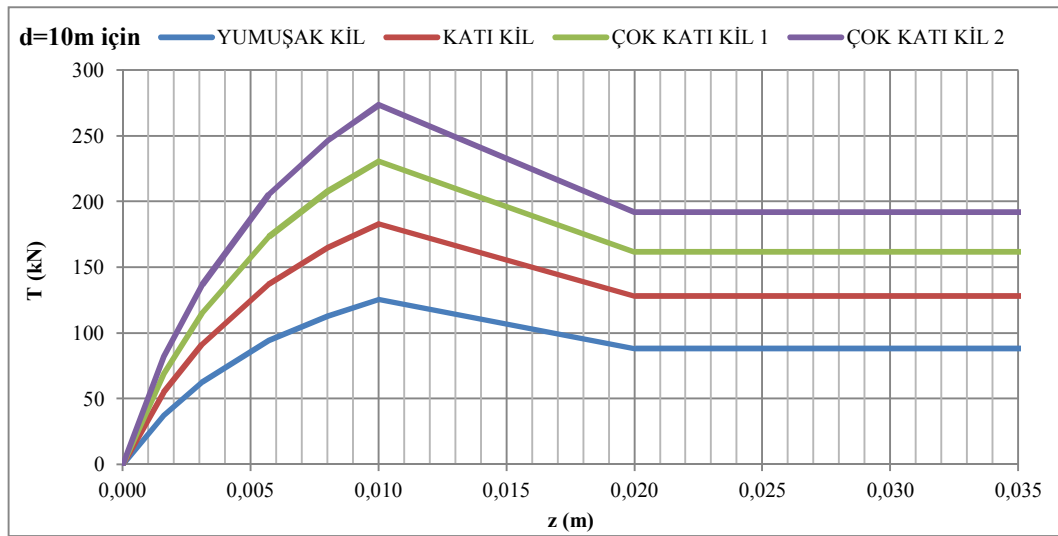
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(c) Çok Katı Kıl 1 için T-z eğrileri



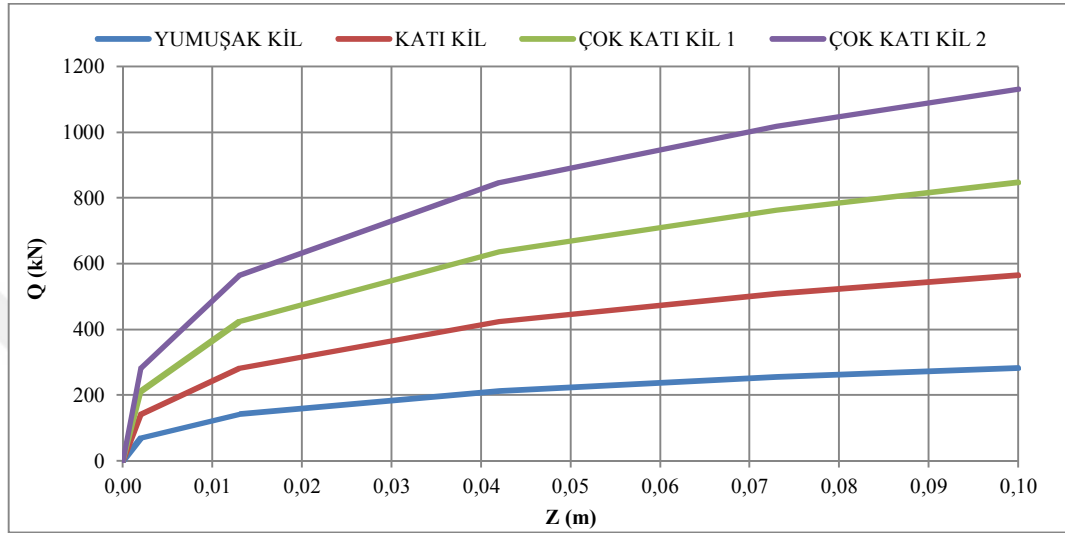
(d) Çok Katı Kıl 2 için T-z eğrileri



(e) $d = 10\text{m}$ derinlikte farklı kıl zeminler için T-z eğrileri

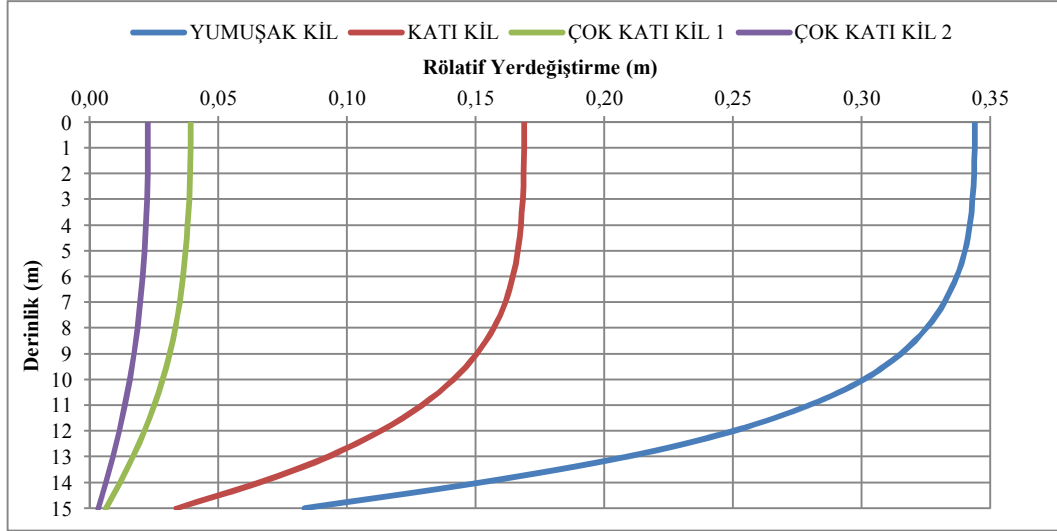
Şekil 4.40. Model-6 farklı kıl zeminler için T-z eğrileri (devamı)

Farklı kil zeminlerde, API (2007)'deki koşullar göz önüne alınarak elde edilen 15 m derinlikteki Q-Z eğrileri Şekil 4.41'te verilmiştir. Bu eğrilere göre, drenajsız kayma mukavemeti arttığında kazığın birim uç direnci arttığı için kazığın yerel deplasman yapması için daha fazla yük gerekmektedir. Dolayısıyla zemin rijitliği artarken zeminin düşey yük taşıma kapasitesi ve yay rijitliği artmaktadır.

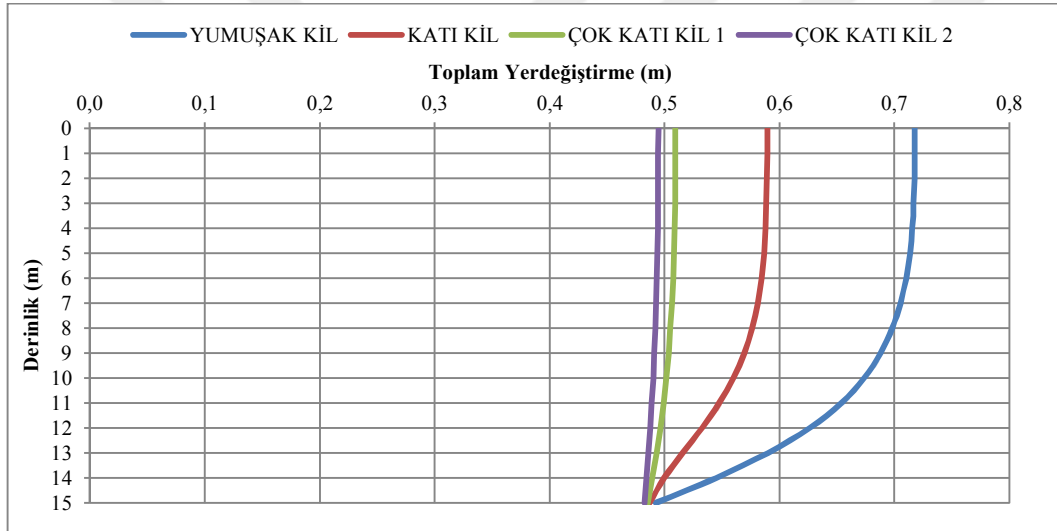


Şekil 4.41. Model-6 farklı kil zeminler için 15 m derinlikteki Q-Z eğrileri

Model-6 profilinde her kil zemin için ayrı ayrı *RSN1605_DUZCE_DZC270* (0.51g) deprem datası etkisinde zemin davranış analizi yapıldığında zemin derinliği boyunca elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmeler Şekil 4.42'te verilmiştir. Bu grafiklere göre, zemin rijitliği yani birim hacim ağırlık ve kayma dalgası hızı artarken, rölatif ve toplam yerdeğiştirmeler azalmaktadır. Kayma dalgası hızı 2.5 katına çıkarken, yüzeydeki ve 15 m derinlikte rölatif yerdeğiştirmeler %95 oranında azalmıştır. Toplam yerdeğiştirmeler ise yüzeyde %30 oranında azalırken, 15 m derinlikte %3 oranında azalmıştır. Ayrıca zemin yüzeyi ile kazık ucu seviyesindeki yerdeğiştirmeler arasındaki fark azalmaktadır. Dolayısıyla zemin rijitliği artarken depremin zemin üzerindeki etkisi azalmaktadır.



(a) Rölatif yerdeğiştirme – derinlik ilişkisi



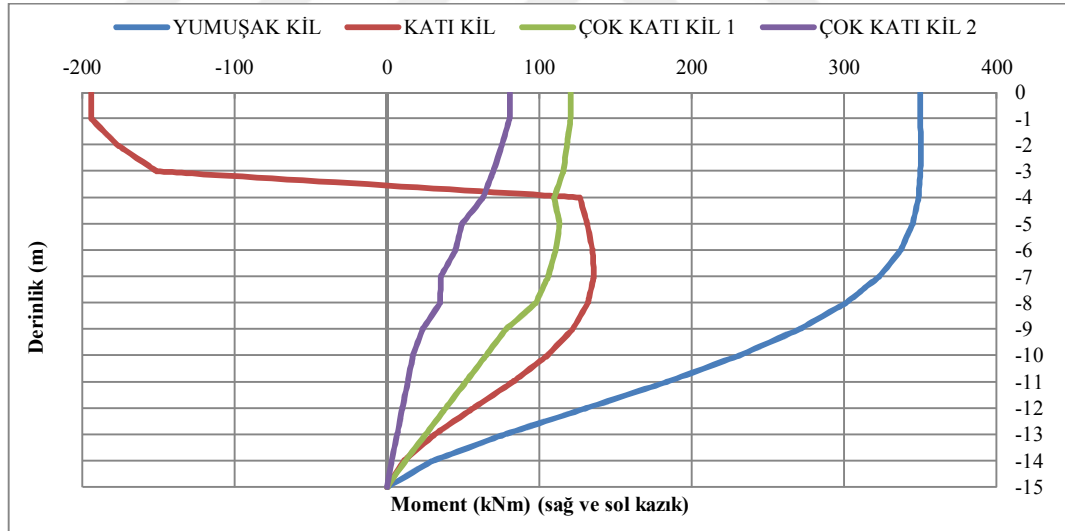
(b) Toplam yerdeğiştirme – derinlik ilişkisi

Şekil 4.42. Model-6 farklı kil zeminlerde yerdeğiştirme-derinlik ilişkisi

Aynı deprem etkisindeki farklı kil zeminler için elde edilen toplam yerdeğiştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak Model-6, *SAP2000*'de modellenmiştir. Her bir kil zemin için ayrı ayrı yapılan artımsal nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve temel deplasman değerleri Şekil 4.43'te verilmiştir.

Şekil 4.43'teki grafiklerden anlaşılabacağı gibi, modele uygulanan zemin yerdeğiştirmelerinin yüksek büyüklükte olması nedeniyle özellikle yumuşak kildeki kazıklarda büyük yatay iç kuvvet oluşmuştur. Kil zemin özellikleri iyileşirken zemin toplam yerdeğiştirmelerinin azalmasına ve deprem etkime karakteristiğinin değişmesine

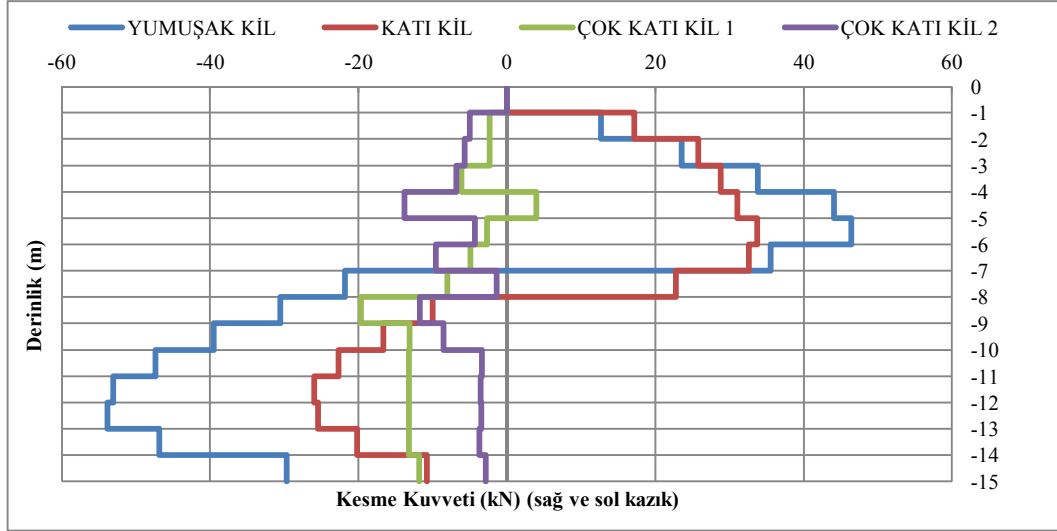
bağlı olarak her iki kazıkta da kesme kuvveti ve moment değerleri azalmaktadır. Drenajsız kayma mukavemeti 4 katına çıkarken, kazıklarda oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri %75 oranında azalmıştır. Katı kil zeminde kazıklarda oluşan maksimum momentler kritik derinlik üstünde yön değiştirmektedir. Dolayısıyla, katı kil zeminde kazık davranışının belirlenmesinde kritik derinlik etkili olmuştur. Her iki kazıkta oluşan normal kuvvetler zemin rijitliği artarken birbirine yaklaşmaktadır. Çok katı kil zeminlerde, sol kazıkta deprem etkisiyle oluşan normal kuvvet azalmaktadır. Dolayısıyla, en büyük normal kuvvet değeri düşey yüklemde oluşmaktadır. Temel yatay deplasman değerleri, zemin rijitliğinin artmasına bağlı olarak %30 oranında azalmıştır. Burada yay rijitlikleri arttığı için temel yatay deplasmanının artması gerektiği düşünülebilir. Ancak yay rijitliği artarken deprem etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla buradan, temel yatay deplasmanı üzerinde deprem etkisinin daha fazla olduğu sonucu çıkarılabilir. Maksimum momentin olduğu yönle uyumlu olarak katı kilde yatay deplasman daha azdır. Temel düşey deplasmanları ise zeminlerin iyileşmesi yani T-z ve Q-Z yay rijitliklerinin artması ile %70 oranında azalmıştır.



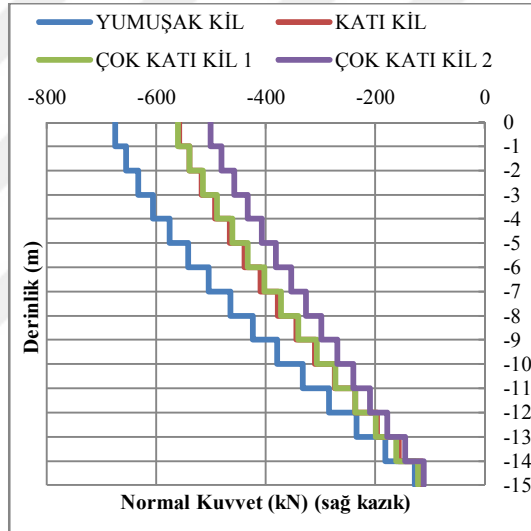
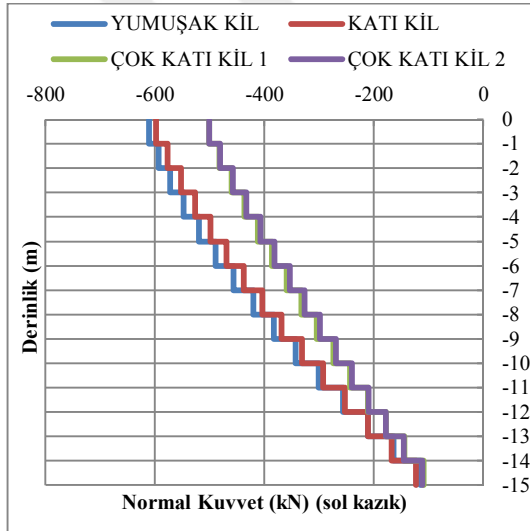
(a) Moment – derinlik ilişkisi

Şekil 4.43. Model-6 farklı kil zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları

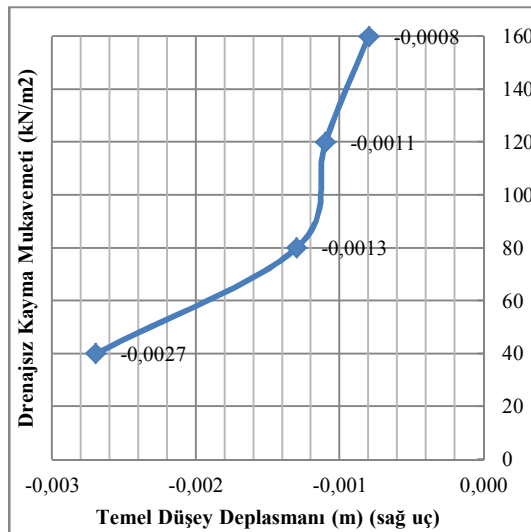
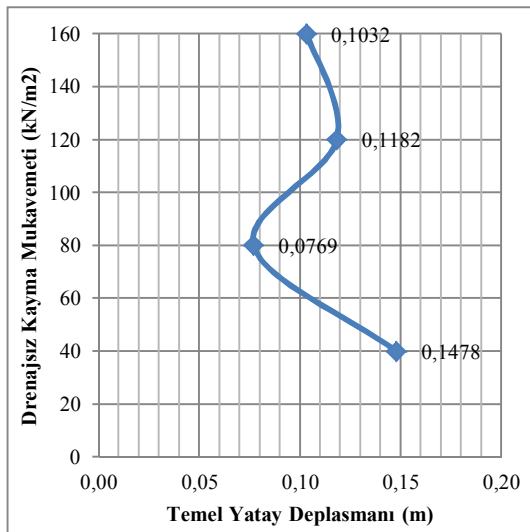
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi



(d) Temel deplasmanları – drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi

Şekil 4.43. Model-6 farklı kil zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

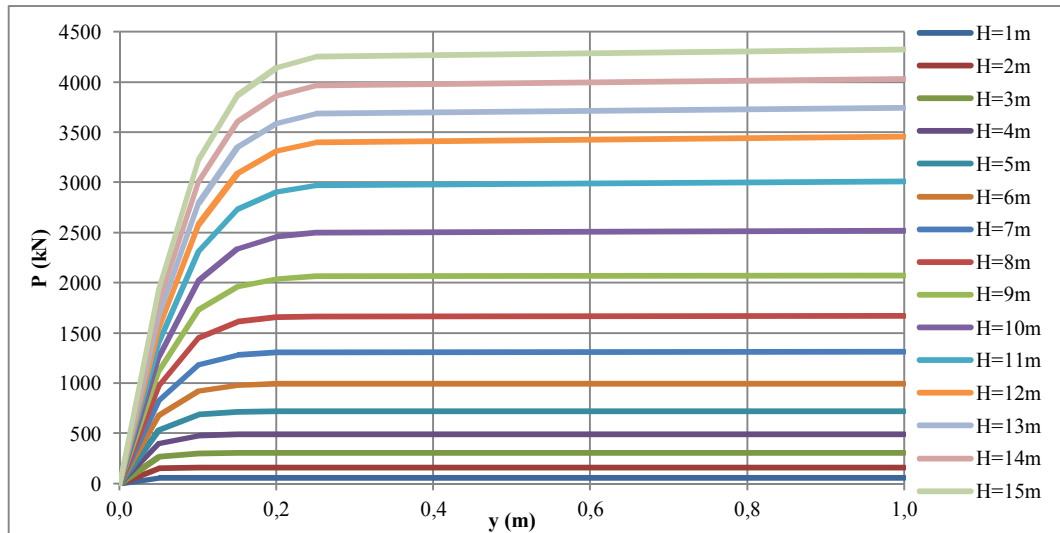
4.6. Farklı Kum Zemin Etkisi İçin Yapılan Davranış Analizi Sonuçları

Farklı özellikleri olan kum zeminlerde kazıklı temel davranışını incelemek için Şekil 3.7’te verilen koşullar (Model-7) kullanılmıştır. Kum zeminlerin özellikleri Çizelge 4.5’te verilmiştir. Bu zeminlerde, 100 cm çap ve 15 m uzunluğa sahip kazıklar için elde edilen P-y eğrileri Şekil 4.44’te verilmiştir. P-y eğrileri bulunurken API (2002)’de kum zeminler için önerilen yöntem kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Model-7 için farklı kum zeminlerin özellikleri

Zemin Türü	İçsel Sürtünme Açısı	Efektif Birim Hacim Ağırlık	Kayma Dalgası Hızı
	Φ (derece)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)
Çok Gevşek Kum 1	28	16	170
Çok Gevşek Kum 2	29	16.5	210
Gevşek Kum	30	17	255
Orta Sıkı Kum	31	17.3	300

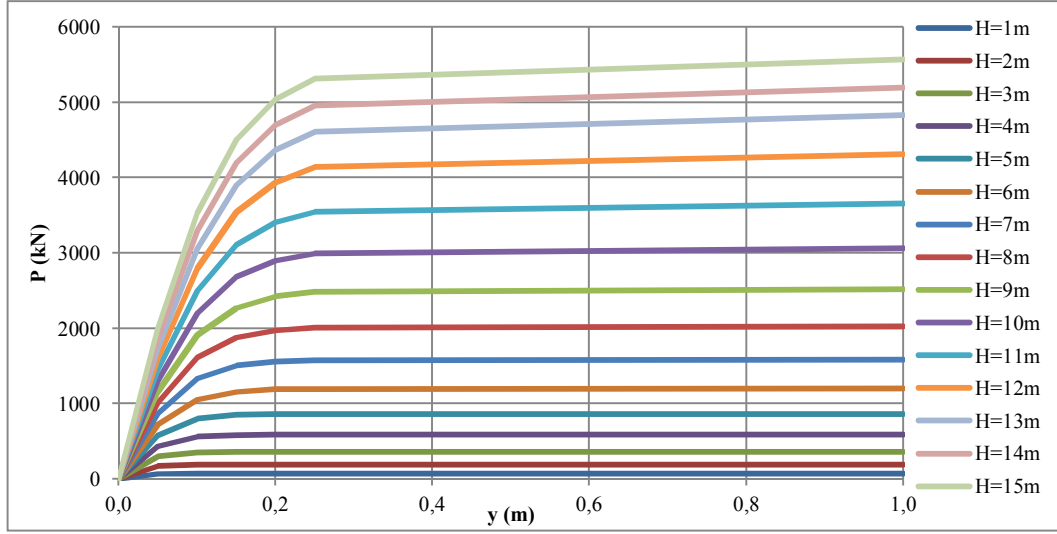
Şekil 4.44’teki P-y eğrileri incelendiğinde, aynı derinlik ve kazık çapı için zemin rijitliği yani içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık arttığında zeminin elastik davrandığı yük aralığı artarken, elastik davrandığı yerel deplasman aralığı azalmaktadır. Yani rijitlik artarken zeminin güvenle karşılayabileceği yük kapasitesi artmaktadır. Rijitlik artarken, derinliğin artmasıyla rijitlik artış oranı da artmaktadır. Örneğin çok gevşek kum zeminlerde 1 m ile 15 m derinlikteki yay rijitlik oranı 1/70’tir. Orta sıkı kumda ise bu oran 1/90’dır.



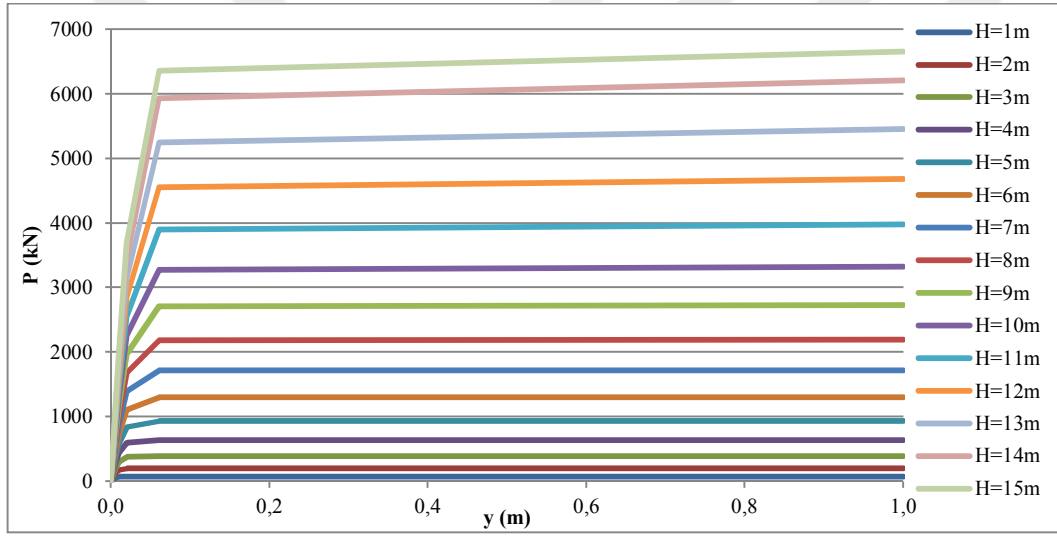
(a) Çok Gevşek Kum 1 için P-y eğrileri

Şekil 4.44. Model-7 farklı kum zeminler için P-y eğrileri

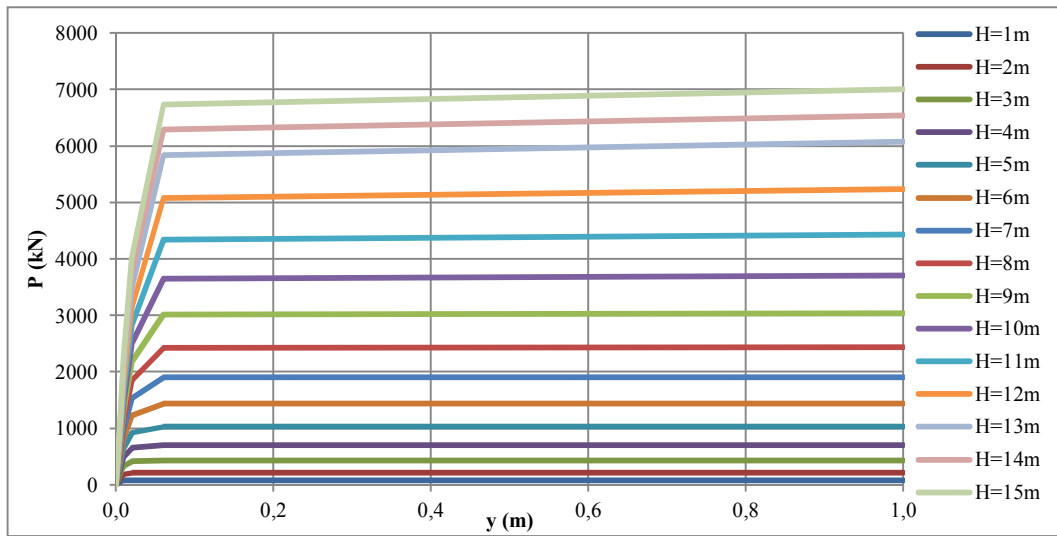
4. BULGULAR VE TARTIŞMA



(b) Çok Gevşek Kum 2 için P-y eğrileri

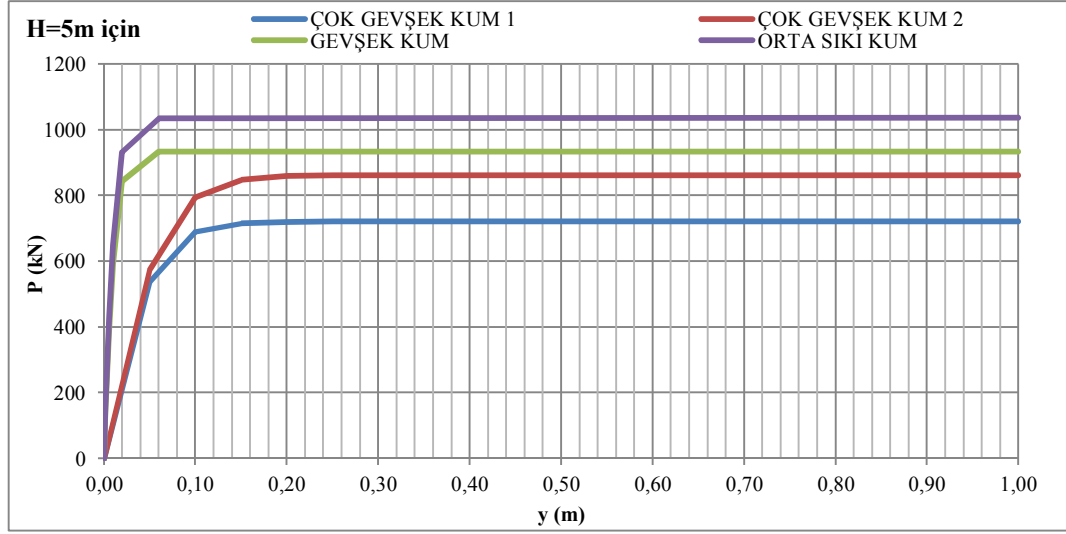


(c) Gevşek Kum için P-y eğrileri



(d) Orta Sıkı Kum için P-y eğrileri

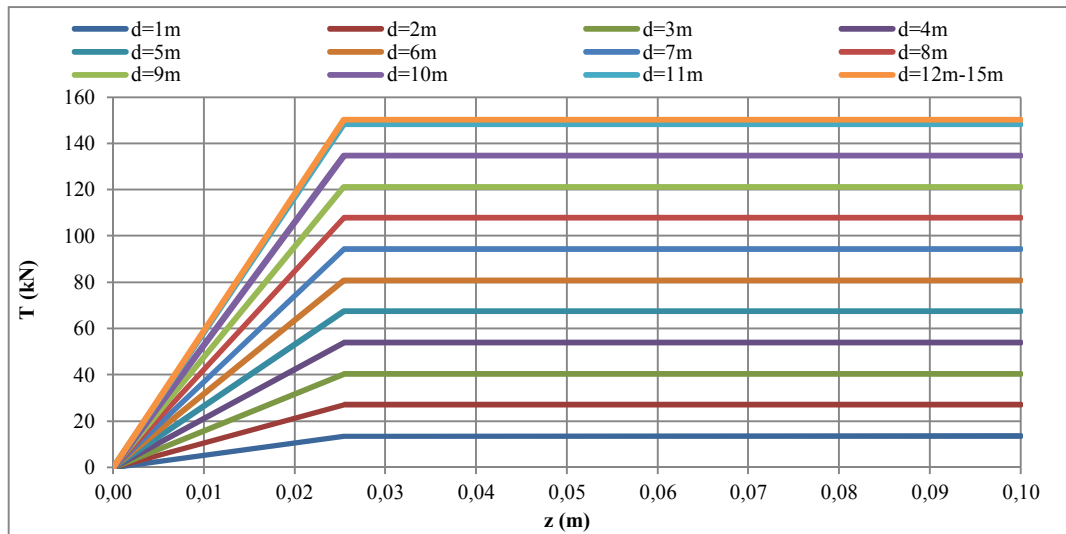
Şekil 4.44. Model-7 farklı kum zeminler için P-y eğrileri (devamı)



(e) $H=5\text{m}$ 'de farklı kum zeminler için P-y eğrileri

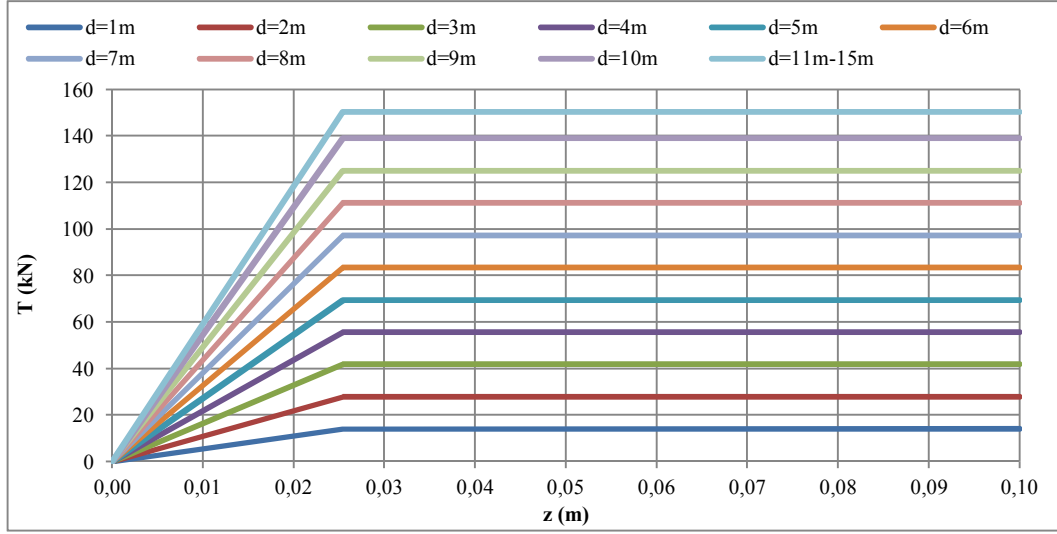
Şekil 4.44. Model-7 farklı kum zeminler için P-y eğrileri (devamı)

Farklı kum zeminler için, API (2002)'deki veriler göz önüne alınarak elde edilen T-z eğrileri Şekil 4.45'te verilmiştir. Bu eğrilere göre, zemin rijitliği artarken düşey yayın yerelde yaptığı düşey deplasman için gereken yük artmaktadır. Dolayısıyla yayların rijitliği artmaktadır. Bununla beraber, *Çok Gevşek Kum 1* zeminde sürtünme direnci sınırına ($f_{max}=47.8\text{ kPa}$) 12 m'de ulaşılırken, *Çok Gevşek Kum 2* zeminde birim hacim ağırlık daha fazla olduğu için aynı sınıra 11 m'de ulaşılmıştır. *Gevşek Kum* zeminde sürtünme direnci sınırına ($f_{max}=67.0\text{ kPa}$) 11 m'de ulaşılırken, *Orta Sıkı Kum* zeminde artan sürtünme direnci sınırına ($f_{max}=81.3\text{ kPa}$) yine 11 m'de ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu derinliklerden sonra T-z eğrileri ve yay rijitlikleri değişmemiştir.

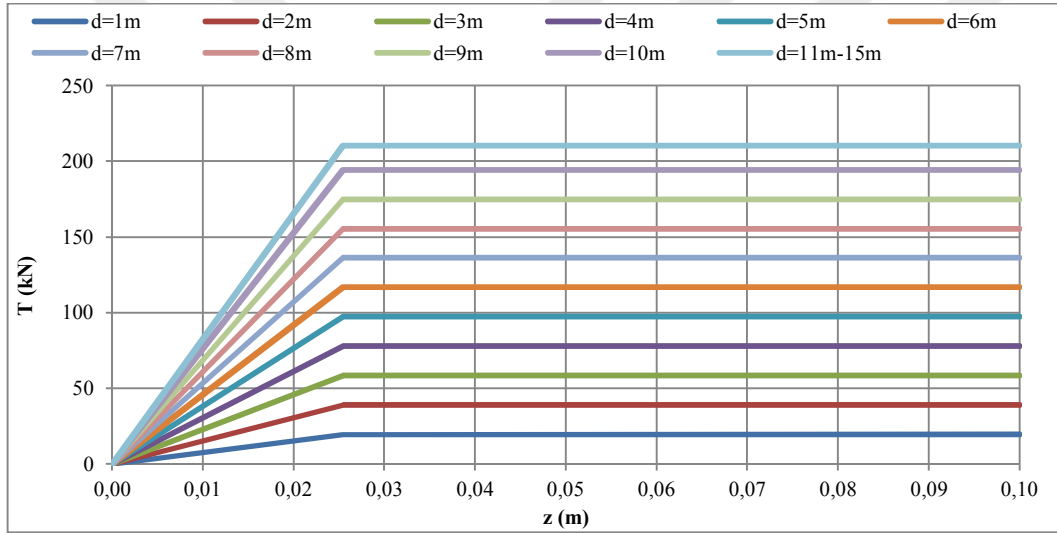


(a) Çok Gevşek Kum 1 için T-z eğrileri

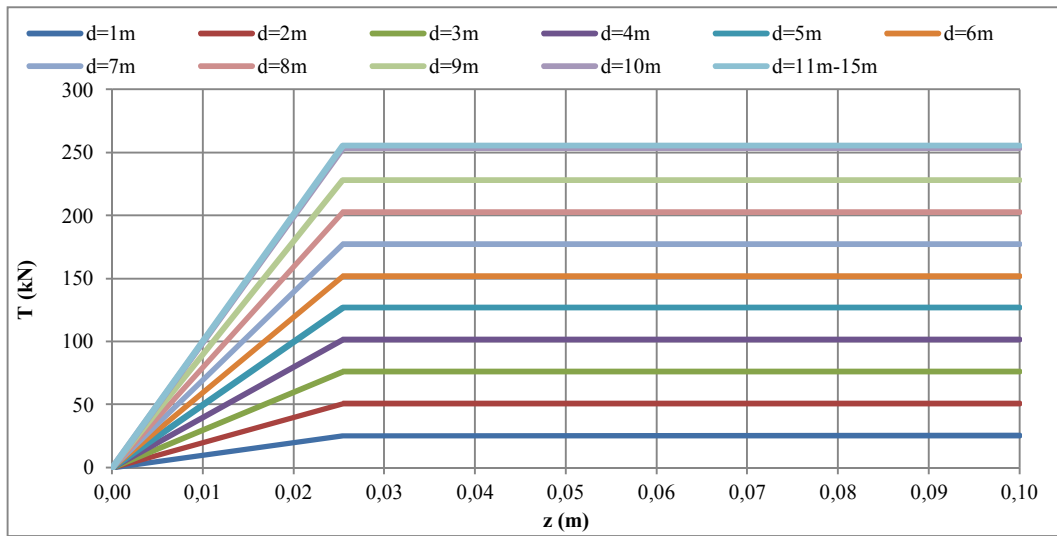
Şekil 4.45. Model-7 farklı kum zeminler için T-z eğrileri



(b) Çok Gevşek Kum 2 için T-z eğrileri

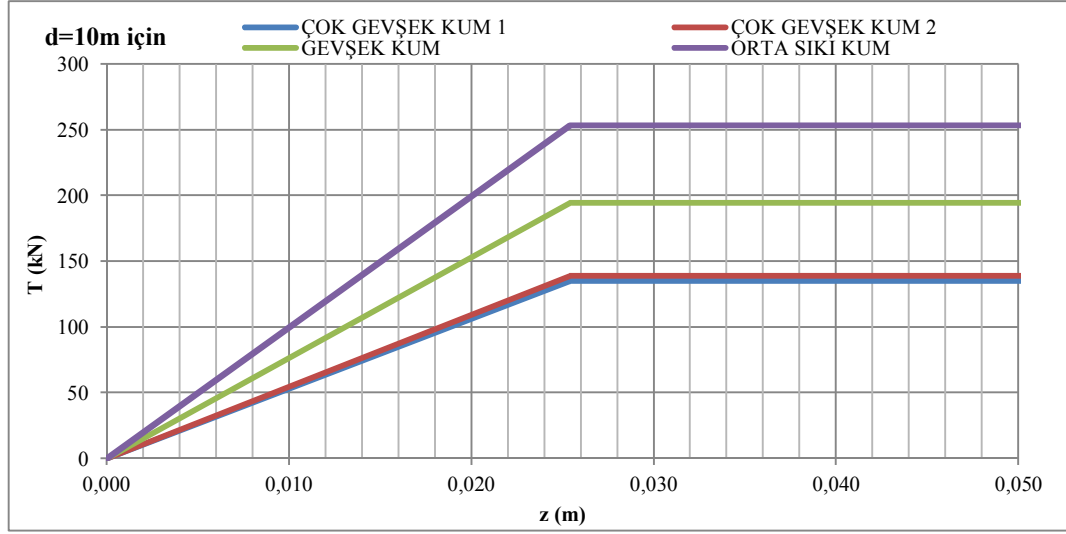


(c) Gevşek Kum için T-z eğrileri



(d) Orta Sıkı Kum için T-z eğrileri

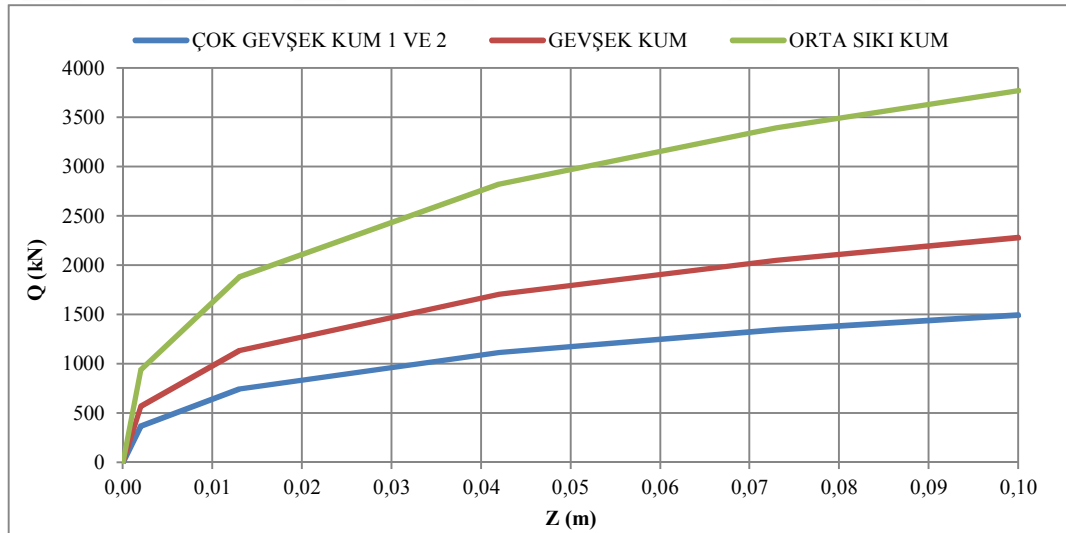
Şekil 4.45. Model-7 farklı kum zeminler için T-z eğrileri (devamı)



(e) $d=10\text{m}$ 'de farklı kum zeminler için T-z eğrileri

Şekil 4.45. Model-7 farklı kum zeminler için T-z eğrileri (devamı)

Farklı kum zeminler için API (2002)'deki koşullar göz önüne alınarak elde edilen 15 m derinliğindeki Q-Z eğrileri Şekil 4.46'da verilmiştir. Buna göre, birim hacim ağırlık artarken yay rijitlikleri artmaktadır. Hesaplarda efektif gerilmelerle hesaplanan kazık uç direnci Çizelge 2.5'te verilen uç direnci sınırlarından yüksek olduğu için sınır değerler kullanılmıştır.

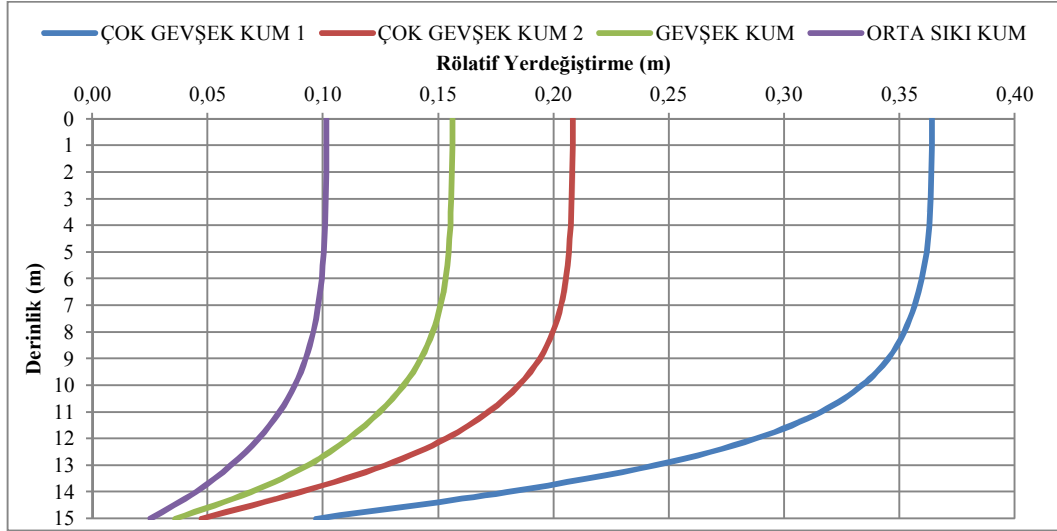


Şekil 4.46. Model-7 farklı kum zeminler için 15 m derinlikteki Q-Z eğrileri

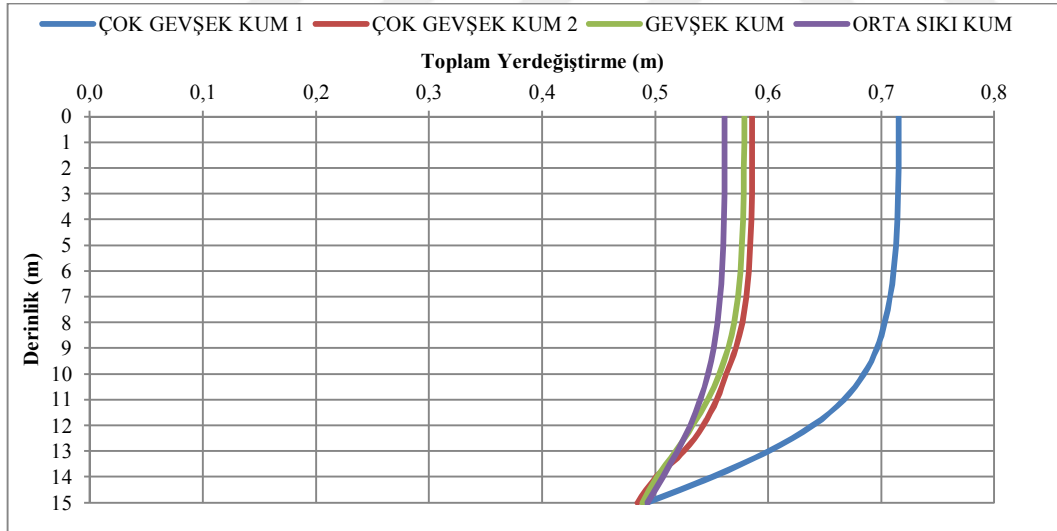
Her kum zeminini için Model-7 profilinde ayrı ayrı *RSN1605_DUZCE_DZC270* (0.51g) deprem datası etkisinde zemin davranış analizi yapıldığında zemin derinliği boyunca elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve toplam yerdeğiştirmeler Şekil 4.47'de verilmiştir. Bu grafiklere göre, zemin rijitliği yani birim hacim ağırlık ve kayma dalgası

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

hızı artarken, rölatif ve toplam yerdeğıştirmeler azalmaktadır. Kayma dalgası hızı 2 katına çıkarken, yüzeydeki ve 15 m derinlikte rölatif yerdeğıştirmeler %70 oranında azalmıştır. Toplam yerdeğıştirmeler ise yüzeyde %20 oranında azalırken, 15 m derinlikte değışmemiştir. Bununla beraber, zemin rijitliğı artarken yerdeğıştirme eğrisinin eğriliğı azalmaktadır. Yani depremin zemin üzerindeki etkisi azalmaktadır.



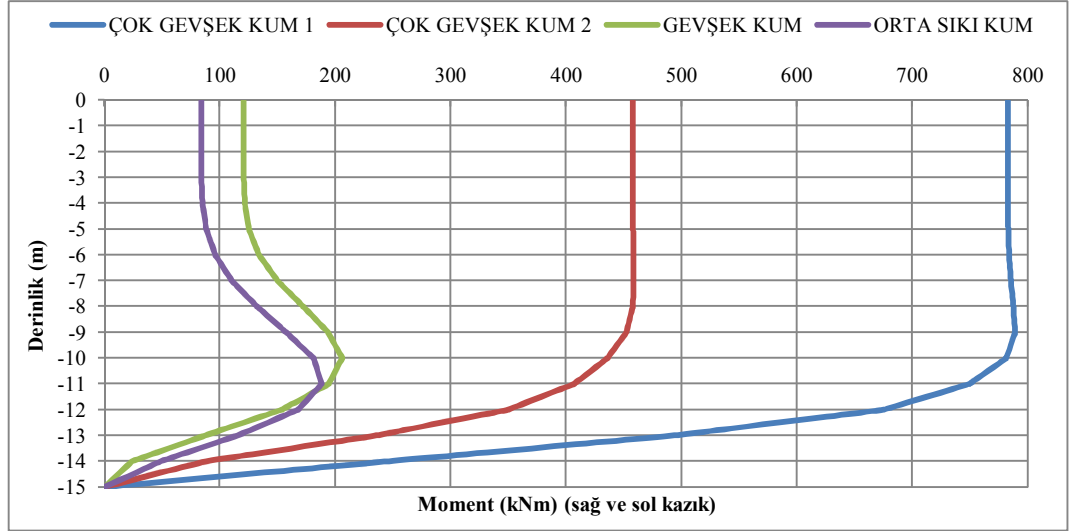
(a) Rölatif yerdeğıştirme – derinlik ilişkisi



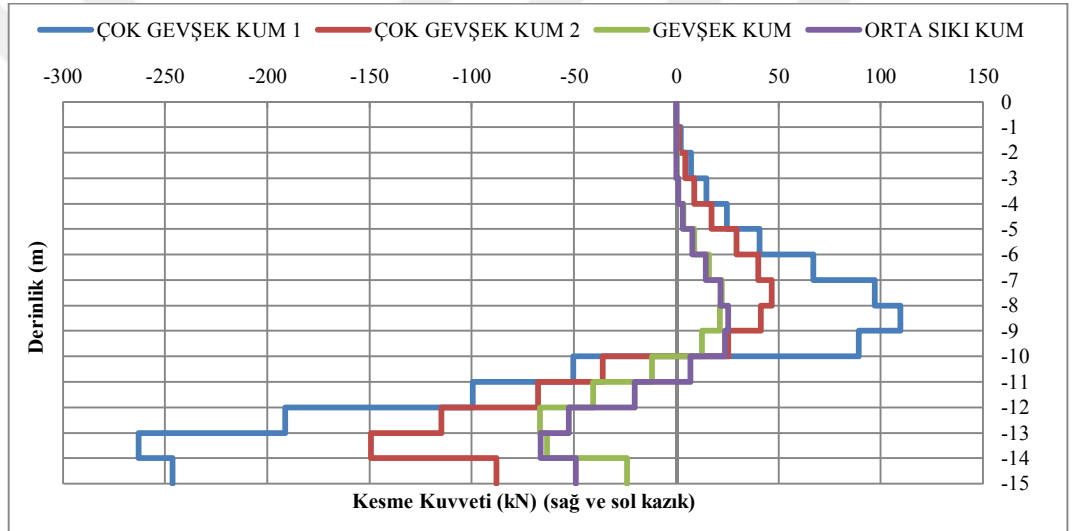
(b) Toplam yerdeğıştirme – derinlik ilişkisi

Şekil 4.47. Model-7 farklı kum zeminlerde yerdeğıştirme-derinlik ilişkisi

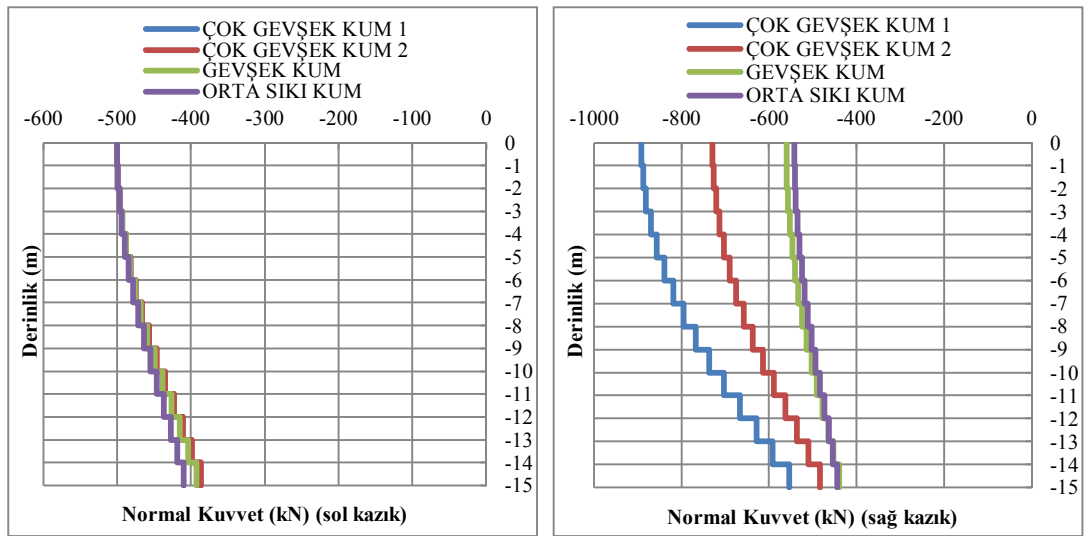
Aynı deprem etkisindeki farklı kum zeminler için elde edilen toplam yerdeğıştirmeler ve nonlinear yay özellikleri kullanılarak Model-7 *SAP2000*'de modellenmiştir. Her bir kum zemin için ayrı ayrı yapılan artımsal nonlinear yapısal analizlerden elde edilen maksimum moment, kesme kuvveti, normal kuvvet ve temel deplasman değıerleri Şekil 4.48'te verilmiştir.



(a) Moment – derinlik ilişkisi

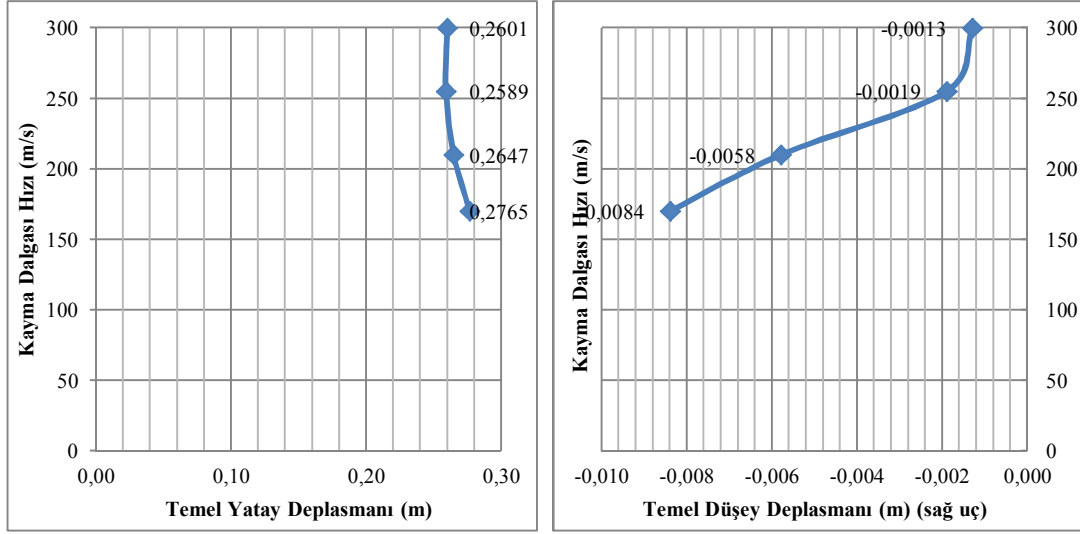


(b) Kesme kuvveti – derinlik ilişkisi



(c) Normal kuvvet – derinlik ilişkisi

Şekil 4.48. Model-7 farklı kum zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları



(d) Temel deplasmanları – kayma dalgası hız ilişkisi

Şekil 4.48. Model-7 farklı kum zeminlerde kazık iç kuvvetleri ve temel deplasmanları (devamı)

Bu grafiklere göre, kum zemin özellikleri iyileşirken zemin toplam yerdeğiştirmeleri ve deprem etkisinin azalması nedeniyle her iki kazıkta da kesme kuvveti ve moment değerleri azalmaktadır. Kayma dalgası hızı 4 katına, içsel sürtünme açısı 28'den 31'e çıkarken kazıklarda oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri %75 oranında azalmıştır. Her iki kazıkta oluşan düşey normal kuvvetler zemin rijitliği artarken yani moment azalırken birbirine yaklaşmaktadır. Sağ kazıkta en büyük normal kuvvet değeri *Çok Gevşek Kum 1* zemininde oluşmaktadır. Tüm zeminlerde sol kazıkta, en büyük normal kuvvet değeri düşey yüklemede oluşmaktadır. Temel yatay deplasman değerleri, zemin rijitliğinin artmasına bağlı olarak çok az miktarda azalmıştır. Temel düşey deplasmanları ise zeminlerin iyileşmesi yani T-z ve Q-Z yay rijitliklerinin artması ile %85 oranında azalmıştır. Dolayısıyla zemin iyileşmesinin düşey deplasman üzerindeki etkisi fazla olmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, TBDY (2018)'de önerilen Yöntem III'ün kinematik etkileşim hesabı adımları izlenerek sürtünme kazıklarından oluşan kazıklı temel davranışında, kazık çapının etkisi, kazık uzunluğunun etkisi, kazık grubunun etkisi, deprem verilerinin etkisi, anakaya derinliğinin etkisi, kil zeminlerin etkisi ve kum zeminlerin etkisi, belirli veriler ve zemin profilleri kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, bu konuyla ilgili çalışma yapacak uygulamacılara ilk adım mahiyetinde yol göstermek amacıyla ,analizler yapılırken kullanılan yazılım ve yöntemler adım adım ve açıklamalı şekilde anlatılmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar ve analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Zayıf zeminlerde, deprem etkilerine maruz kalan kazıklarda oluşan zorlanmalar ve şekil değiştirmeler ancak kinematik etkileşim analizi ile hesaplanabilmektedir. Deprem bölgelerinde, zayıf zeminler üzerinde temeli kazıklı olarak inşa edilen binalarda, deprem hesabının yapı-kazık-zemin etkileşim analizi olarak yapılması gerekmektedir.
- Kazık çapının artması, kazık grubunda kazık mesafelerinin artması veya zemin karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesi, zemin nonlineer yaylarının rijitliklerinin artmasına neden olmaktadır. P-y yaylarında rijitliğin artması, kazığa gelen deprem yükünün artması demektir. T-z ve Q-Z yaylarında rijitliğin artması ise kazık düşey deplasmanı üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Özellikle kum zeminlerde P-y yay rijitliklerinin artması, deprem yükünün kazığa aktarılması açısından oldukça etkilidir.
- Aynı anakaya derinliği için, kayma dalgası hızı ve birim hacim ağırlığı birbirine yakın değerlerde olan kum veya kil zeminlerin deprem etkisi altındaki yerdeğiştirmeleri de birbirine yakın olmaktadır.
- Aynı depremin maksimum yer ivmesinin ölçekli şekilde artması, aynı zemin için anakaya derinliğinin artması veya zeminin tabaka kalınlığının artmasıyla deprem etkisi altında zemin yerdeğiştirmeleri artmaktadır. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesiyle deprem etkisinde oluşan zemin yerdeğiştirmeleri azalmaktadır.
- Analizlerde seçilen deprem kayıtları, zeminde meydana gelen yer değiştirmeleri ve buna bağlı olarak kinematik etkileşim analiz sonuçlarını

doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla seçilen deprem kayıtları bölge koşullarına ve depremselliğine uygun seçilmelidir.

- Sabit koşullarda kazık çapının artırılması, kazığa gelen deprem yükünün artmasına dolayısıyla kazıkta daha fazla zorlanma ve deplasmanlara neden olmaktadır. Çok gevşek kum zeminde kazık çapının artması, karakteristik özellikleri birbirine benzer olan yumuşak kile göre çok daha fazla zorlanmalara neden olmaktadır.
- Kazık uzunluğunun artırılmasıyla kazıkta oluşabilecek zorlanmalar, deprem etkisine doğrudan bağlıdır. Yumuşak kil zeminde, karakteristiği farklı olan iki deprem etkisi için birinde kazıklar fazla zorlanmazken, diğerinde zorlanmalar olduğu tespit edilmiştir. Çok gevşek kum zeminde ise kazık uzunluklarının artmasıyla kazıklarda oluşan zorlanmalar büyük miktarda olmuştur.
- Kazık grubunda kazıklar arası mesafenin artmasıyla grup etkisinin azaldığı dolayısıyla kazıklardaki zorlanmalar arttığı tespit edilmiştir.
- Aynı depremin maksimum yer ivmesinin ölçekli şekilde artırılması, özellikle çok gevşek kum zeminde kazık zorlanmalarının artmasına neden olmuştur.
- Zemin tabaka kalınlıklarının artması veya aynı zeminde anakaya derinliğinin artmasıyla kazık iç kuvvetlerinin yumuşak kil zeminde çok az miktarda arttığı, çok gevşek kum zeminde çok az miktarda azaldığı tespit edilmiştir. Burada, farklı etkinin oluşmasında deprem karakteristiğinin ve yay rijitliklerinin etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.
- Gerek kum gerekse kil zeminin karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesiyle kazık zorlanmalarının önemli mertebede azaldığı tespit edilmiştir.
- Zemin rijitliğinin yani P-y yay rijitliklerinin yüksek olduğu zeminin derin bölgelerinde kazık momentlerinin yüzeye göre da az olduğu görülmüştür.
- Bu tez kapsamında yapılan analizler belirlenen koşullara bağlı sonuçları içermektedir. Her proje için projeye özel girdilerin belirlenerek analiz yapılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adhikary, S. 2014. Nonlinear Modelling/Analysis of Pile Using SAP2000. Research Scholar, Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Roorke.
- Akgül, F. 2017. Kazıklarla Güçlendirilmiş Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 35-38.
- Aydın, C. 2018. Dinamik Özellikleri Belirlenen Sıkıştırılmış Killi Kalın Bir Zemin Tabakasının Tek Boyutlu Sismik Yer Tepki Analizleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydınoğlu, M. N. 2011. Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Yapı – Kazık – Zemin Etkileşimi İçin Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Rapor No. 2011/1, İstanbul.
- Aydınoğlu, M. N. 2013. Deprem Etkisi Altında Yapı – Kazık – Zemin Etkileşimi (Sunum). İleri Mühendislik Uygulamaları ve Sorunları Konferansı, 8 Kasım 2013, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara.
- Aydoğan, M. Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi (Sunum). İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Bayar, T. 2011. Kazıklı Temel Sistemlerinin Sonlu Elemanlarla Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Berilgen, M. 2013. Temel Tasarımı ve Geoteknik Parametreler (Sunum), İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Bilal, O., Fahjan, Y., Önen, Y. H. 2014. Kazık-Zemin Arayüzeyi Parametrelerinin Dinamik Deprem Analizi Açısından Değerlendirmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Bildik, S., Savaşeri, K., Polat, Ş.Ş., Laman, M. 2017. Bir Vaka Analizinde Kazıkların Davranışının Kinematik Etkileşim Yöntemi İle İrdelenmesi. 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-23-24 Kasım 2017, İstanbul.
- Birand, A. 2007. Kazıklı Temeller. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bozkurt, H. 2011. Suya Doygun Kil Zeminlerde Kazıklı Temellere Etki Eden Dinamik Yüklerin Statik Yükler Cinsinden Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 3-12.

Civiltech Software, 2017. Allpile Version 7 User's Manual Volume 1 and 2, USA.

SAP2000 CSI Analysis Reference Manual 2020 Web Site, <https://wiki.csiamerica.com/display/doc/CSI+Analysis+Reference+Manual>,

Duman, A. 2014. Öngerilmeli Prekast Betonarme Kazıklı İskelenin Doğrusal Olmayan Performans Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Erdemir, N.S. 2010. Sismik Yükler Altında Kazıkların Grup Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Erginağ, U. C., Özden, G. 2018. Kazık Grubunun Dinamik Etki Altındaki Davranışının İncelenmesi (2018 TBDY'ye göre). Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, 26-28 Eylül 2018, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Find A Pile Web Site, <http://www.findapile.com>

Fahjan, Y. 2008. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SAP2000 Uygulaması) (Sunum), İnşaat Mühendisleri Odası Gebze Temsilciliği.

Gör, M. 2019. Kazıklı Radye Temellerin Statik Düşey Yükler Etkisi Altında Modellenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Hashash, Y.M.A., Phillips, C., Groholski, D. 2010. Recent Advances in Non-linear Site Response Analysis. Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California.

Hashash, Y.M.A., Park, D. 2001. ***Non-linear One-dimensional Seismic Ground Motion Propagation in the Mississippi Embayment***. Engineering Geology, Vol.62, No.1-3, 185-206.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. 2017. DEEPSOIL 7.0, User Manual. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.

Ilgaç, M., Can, G., Çetin, K. Ö. 2017. Vaka Analizi: Bir Metro İstasyonu Viyadük Geçiş Projesinin Sismik Zemin - Kazıklı Radye Temel Etkileşimi Değerlendirmesi. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Kadioğlu, Z. 2015. Kazıklı Kıyı Yapılarının Doğrusal Olmayan Davranışı ve Şekil Değiştirmeye Göre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

- Kale, P. 2008. Yerel Zemin Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizlerle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keskin, E. 2018. Betonarme Çerçevesel Bir Yapıda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Kazık Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keleşoğlu, M. K. 1999. Yatay Yüklü Kazıkların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle 3 Boyutlu Nonlinear Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Korkmaz, Ş. 2012. Düşey ve/veya Eğik Kazıklı İskele Yapılarında Zemin-Yapı Etkileşimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Matasovic, N., Vucetic, M. 1995. **Generalized cyclic-degradation-pore-pressure generation model for clays**, Journal of Geotechnical Engineering 121(1).
- Maviş, S. 2013. Düşey ve Eğik Kazıklı İskele Yapılarında Zemin-Kazık Etkileşiminin Detaylı ve Basitleştirilmiş Modeller İle İrdelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mert, M. 2018. Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Naiboğlu, H. 2019. Farklı Zemin Koşullarında Kazık-Zemin-Yapı Etkileşiminin Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Nar, D. 2016. Kocaeli Gölçük İlçesi Çöküntü Bölgesi Yerel Zemin Özelliklerinin Sismolojik ve Bir Boyutlu Zemin Davranış Analizleri İle Karşılaştırmalı Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Önalp, A., Sert, S. 2016. Geoteknik Bilgisi III – Bina Temelleri, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Özmen, G., Orakdoğan, E., Darılmaz, K. 2018. Örneklerle SAP2000 V20, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- PEER Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- Phillips, C., Hashash, Y. 2009. Damping Formulation for Non linear 1D Site Response Analyses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v.29, p.1143–1158.
- Pyke, R.M. 1979. **Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loadings**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(GT6), 715-726.

Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design 2002, American Petroleum Institute.

Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design 2007, American Petroleum Institute.

RSPile Axially Loaded Piles Theory Manual, Rocscience 2018.

RSPile Laterally Loaded Pile Theory Manual, Rocscience 2018.

Seed H. B., Idriss I. M. 1970. Soil Moduli and Damping factors for Dynamic Response analyses. Report EERC 70-10, Earthquake Research Centre, University of California, Berkeley.

Siyahi, B., Çetin, K. Ö., Bilge, T. 2015. Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış. Türkiye Mühendislik Haberleri, Yıl:60/2015-1, Sayı:484, Sayfa:41-50.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Vucetic, M. 1990. *Normalized Behavior of Clay Under Irregular Cyclic Loading*. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 29-46.

Vucetic M., Dobry R. 1991. Effects of Soil Plasticity on Cyclic Response, J. Geotech Eng, ASCE 117 (1).

Yıldız, R. 2016. Resimlerle Fore Kazık Uygulamaları, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Sunumu, İzmir.

Yiğit, M. A. 2019. Kazıklı Temelerde Zemin Kazık Etkileşimi Parametrelerinin Ortaya Konulması. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.

Yüksel Proje, 2007. Geoteknik Tasarım Esasları, T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Ankara, 103-107.