

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUM ZEMİNLERDE, YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARIN
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat OKAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

EKİM 2018

**KUM ZEMİNLERDE, YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARIN
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat OKAR
501111324**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMUR

EKİM 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111324 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Murat OKAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KUM ZEMİNLERDE, YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARIN DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMUR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nil TAYLAN KUTLU
Maltepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12 Aralık 2018
Savunma Tarihi : 8 Ekim 2018





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımda, bilgi ve tecrübelerinde faydalandığım tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMUR'a, çalışmalarda benden yardımını esirgemeyen arkadaşım Sayın Ahmet KANAN'a, ve beni her zaman koşulsuz destekleyen aile üyelerime teşekkürü borç bilir, şükranlarımı sunarım.

Aralık 2018

Murat Okar
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAZIKLI TEMELLER	3
2.1 Kazıklı Temel Türleri.....	4
2.2 Baret Kazıklı Temeller	6
3. YATAY YÜKLÜ KAZIKLAR	9
3.1 Kullanılma Amaçları	9
3.2 Yanal Yük Etkisi Altındaki Kazıkların Tasarımı	10
3.3 Yatak Katsayısı Kullanılarak Hesap Yapılması	10
3.3.1 Yatak katsayısı kazık boyunca sabitken tasarım.....	11
3.3.2 Yatak katsayısı kazık boyunca lineer olarak artması halinde tasarım	11
3.4 Broms Yöntemi	12
3.4.1 Killi Zeminlerde Broms Yöntemi	12
3.4.1.1 Yerdeğiştirme	12
3.4.1.2 Kazığın yanal direnci	14
3.4.2 Kum Zeminlerde Broms Yöntemi.....	20
3.4.2.1 Yerdeğiştirme	22
3.4.2.2 Kazığın yanal direnci	23
3.5 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	29
3.5.1 Kum zeminlerde yanal yüklü baret temellerinin davranışı	29
3.5.2 Kum zeminlerde model kazıkların tekrarlı yüklenmesi	32
3.5.3 Kum zeminlerde yanal yüklü model baret temellerin davranışı	45
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
4.1 Kum Zemin	49
4.1.1 Endeks deneyleri	49
4.1.1.1 Elek analizi.....	49
4.1.1.2 Piknometre deneyi.....	51
4.1.1.3 Rölatif sıkılık deneyi.....	52
4.1.2 Kayma mukavemeti deneyleri	54
4.2 Laboratuvarında Oluşturulan Deney Düzeneği	58
4.2.1 Deney kutusu.....	58
4.2.2 Model kazıklar	61
4.2.3 Yükleme düzeneği.....	63

4.2.4	Yük hücresi	64
4.2.5	Deplasman ölçme cihazı.....	65
4.2.6	Birim deformasyon ölçer (strain gauge).....	66
4.2.6.1	Birim deformasyon ölçer (strain gauge) yerleştirilmesi.....	68
4.2.6.2	Birim deformasyon ölçümlerinin momente çevrilmesi.....	73
4.2.7	Veri kaydetme ünitesi.....	74
4.3	Kullanılan Ekipmanların Kalibrasyonu.....	76
4.3.1	Yük hücresi kontrolü.....	76
4.3.2	Deplasman ölçer kalibrasyonu	77
4.3.3	Birim deformasyon ölçer (strain gauge) kalibrasyonu.....	78
4.4	Baret Kazık Yatay Yükleme Deneyi Yapılışı	79
5.	SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANALİZ	83
5.1	Sonlu Elemanlar Yöntemi	83
5.2	Zeminin Davranışının Modellenmesi	85
5.2.1	Mohr Coulomb Modeli (MC).....	86
5.2.2	Pekleşen Zemin Modeli (HC)	87
6.	YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARDA DENEY SONUÇLARI VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	91
6.1	Plaxis 3D Programı ile Yatay Yüklü Baret Kazıkların Analizi.....	91
6.1.1	%20 rölatif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D sonuçları	94
6.1.2	%70 rölatif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D sonuçları	96
6.1.3	%20 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D sonuçları	98
6.1.4	%70 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D sonuçları	100
6.1.5	%20 rölatif sıkılıkta kare profil için Plaxis 3D sonuçları.....	102
6.1.6	%70 rölatif sıkılıkta kare profil için Plaxis 3D sonuçları.....	104
6.2	Model Deney Sonuçları	106
6.2.1	%20 rölatif sıkılıkta I profil için deney sonuçları	106
6.2.2	%70 rölatif sıkılıkta I profil için deney sonuçları	106
6.2.3	%20 rölatif sıkılıkta + profil için deney sonuçları	108
6.2.4	%70 rölatif sıkılıkta + profil için deney sonuçları	108
6.2.5	%20 rölatif sıkılıkta kare profil için deney sonuçları.....	110
6.2.6	%70 rölatif sıkılıkta kare profil için deney sonuçları.....	110
6.3	Model Deney İle Plaxis 3D Programının Birbiriyle Karşılaştırılması.....	111
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
	KAYNAKLAR.....	119
	ÖZGEÇMİŞ.....	121

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials

USCS : Unified Soil Classification System





SEMBOLLER

c	: Kohezyon
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi
$\{U\}$	: Deplasman vektörü
$\{F\}$	: Sistem vektörü
c_c	: Derecenlenme katsayısı
c_u	: Uniformluk katsayısı
D	: Kazık çapı
D_r	: Rölatif Sıkılık
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
E_p	: Kazığın deformasyon modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
I	: Atalet Momenti
I_p	: Plastisite indisi
k	: Hassasiyet faktörü
k_h	: Yatay yatak katsayısı
K_p	: Pasif toprak basıncı katsayısı
L	: Kazık boyu
l_c	: Kritik uzunluk
M	: Moment
M_{akma}	: Akma momenti
n	: Grupta kazık etkisi
P	: Yatay yük
P_n	: Nihai yük
R	: Direnç
σ	: Gerilme
σ_a	: Akma gerilmesi
s_u	: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

W_e	: Eğime mukavemeti
y	: Kazık başının yanal yerdeğiştirmesi
z	: Derinlik
β	: Sürtünme katsayısı
γ	: Birim hacim ağırlığı
γ_d	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
ν	: Poisson oranı
τ	: Kayma gerilmesi
τ_f	: Kayma mukavemeti
ψ	: Dilatasyon açısı
ε	: Birim uzama

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yatay yatak katsayısı değerleri (Davisson, 1970).	20
Çizelge 3.2 : Nihai yanal yük karşılaştırması (Ananthanathan ve diğ, 2008).	32
Çizelge 3.3 : Deney detayları (Qin ve Guo, 2007).	35
Çizelge 3.4 : Model kazığının davranışı (Qin ve Guo, 2007).	43
Çizelge 3.5 : Model kazığının davranışı (Qin ve Guo, 2007).	47
Çizelge 4.1 : Elek analizi sonucu.	50
Çizelge 4.2 : Rölatif sıkılık deneyi sonuçları.	53
Çizelge 4.3 : Rölatif sıkılığa göre boşluk oranları.	53
Çizelge 4.4 : Deney düzeneği elemanları.	59
Çizelge 6.1 : %20 rölatif sıkılıktaki kum için Plaxis 3D bilgileri.	92
Çizelge 6.2 : %70 rölatif sıkılıktaki kum için Plaxis 3D bilgileri.	92
Çizelge 6.3 : I profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.	93
Çizelge 6.4 : + profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.	93
Çizelge 6.5 : Kare profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.	93
Çizelge 6.6 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta I profil için sonuçların karşılaştırılması	112
Çizelge 6.7 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta + profil için sonuçların karşılaştırılması.	113
Çizelge 6.8 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta kare profil için sonuçların karşılaştırılması.	115



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kazıklı temellerin kullanım alanları (Bowles, 1996).	5
Şekil 2.2 : Kazıklı temellerin malzemeye göre sınıflandırılması (Uzuner, 2006)	5
Şekil 2.3 : Baret kazık kesitleri.....	6
Şekil 2.4 : Baret kazık-fore kazık sistemi karşılaştırması.....	8
Şekil 3.1 : Killi zeminlerde kazığın yanal yerdeğiştirilmesi (Broms, 1964a).....	13
Şekil 3.2 : Killi zeminde kısa kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).....	16
Şekil 3.3 : Killi zeminde uzun kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).	17
Şekil 3.4 : Killi zeminde rijit başlıklı kısa kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a). 18	
Şekil 3.5 : Killi zeminde rijit başlıklı orta boy kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).	19
Şekil 3.6 : Killi zeminde rijit başlıklı kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).....	20
Şekil 3.7 : Killi zeminlerde kısa kazık nihai yanal yük grafiği (Broms, 1964a)..	21
Şekil 3.8 : Killi zeminlerde uzun kazık nihai yanal yük grafiği (Broms, 1964a).	21
Şekil 3.9 : Kum zeminlerde kazığın yer değiştirmesi grafiği (Broms, 1964a).	23
Şekil 3.10 : Kum zeminlerde kısa kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).	24
Şekil 3.11: Kum zeminlerde uzun kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).....	25
Şekil 3.12 : Kum zeminlerde kısa kazığın nihai yanal yükü grafiği (Broms, 1964b).26	
Şekil 3.13 : Kum zeminlerde uzun kazığın nihai yanal yükü grafiği (Broms, 1964b)....	26
Şekil 3.14 : Kum zeminlerde kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).	27
Şekil 3.15 : Kum zeminlerde kısa kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).....	28
Şekil 3.16 : Kum zeminlerde uzun kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).....	28
Şekil 3.17 : Deney düzeneği (Ananthanathan ve diğ, 2008).	30
Şekil 3.18 : Deney sonrası (Ananthanathan ve diğ, 2008).	30
Şekil 3.19 : Lineer yük-eğilme davranışı (Ananthanathan ve diğ, 2008).	31
Şekil 3.20 : Non-lineer yük-eğilme davranışı (Ananthanathan ve diğ, 2008).	31
Şekil 3.21 : Nihai yanal yük karşılaştırması grafiği (Ananthanathan ve diğ, 2008)..	32
Şekil 3.22 : Deney düzeneği (Qin ve Guo, 2007).	33
Şekil 3.23 : Deney şeması (Qin ve Guo, 2007).	33
Şekil 3.24 : Model kazığın birim deformasyon ölçer yerleşim şeması ve ölçüleri (Qin ve Guo, 2007).	34
Şekil 3.25 : Deney 1 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).	36
Şekil 3.26 : Deney 1 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	36
Şekil 3.27 : Deney 1 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	37
Şekil 3.28 : Deney 1 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	37
Şekil 3.29 : Deney 2 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).	38
Şekil 3.30 : Deney 2 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	39
Şekil 3.31 : Deney 2 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	39
Şekil 3.32 : Deney 2 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	40
Şekil 3.33 : Deney 2 için model kazık etrafındaki deplasman (Qin ve Guo, 2007)..	40
Şekil 3.34 : Deney 3 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	41

Şekil 3.35 : Deney 3 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	41
Şekil 3.36 : Deney 3 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	42
Şekil 3.37 : Deney 3 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	42
Şekil 3.38 : Deney 2 ve deney 3 için maksimum eğilme momenti-yüklemeye tekrarı sayısı karşılaştırma grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	44
Şekil 3.39 : Deney 2 ve deney 3 için maksimum toplam deplasman-yüklemeye tekrarı sayısı karşılaştırma grafiği (Qin ve Guo, 2007).....	44
Şekil 3.40 : Deney düzeneği (El Wakil ve Nazir, 2013).....	46
Şekil 3.41 : Deney şeması (El Wakil ve Nazir, 2013).	46
Şekil 4.1 : Kum zeminin dane çapı dağılımı eğrisi.....	50
Şekil 4.2 : Piknometre deneyi	51
Şekil 4.3 : Piknometre deneyinde yapılan tartma işlemi	51
Şekil 4.4 : Rölatif sıklık deneyi	54
Şekil 4.5 : Rölatif sıklık deneyinde yapılan tartma işlemi.....	54
Şekil 4.6 : Gevşek kum zeminde kayma gerilmesi-deplasman eğrileri.....	55
Şekil 4.7 : Gevşek kum zeminde kesme kutusu deney sonucu.....	56
Şekil 4.8 : Sıkı kum zeminde kayma gerilmesi-deplasman eğrileri.	56
Şekil 4.9 : Sıkı kum zeminde kesme kutusu deney sonucu.	57
Şekil 4.10 : Kesme kutusu deneyi.....	57
Şekil 4.11 : Deney düzeneği şeması.	58
Şekil 4.12 : Deney düzeneği yandan görünüşü.....	59
Şekil 4.13 : Deney düzeneği arkadan görünüşü.....	60
Şekil 4.14 : Deney düzeneği üstten görünüşü.....	60
Şekil 4.15 : Deney düzeneği.	61
Şekil 4.16 : Profilin delinme aşaması	61
Şekil 4.17 : Baret kazık kesitleri.	62
Şekil 4.18 : Deneylerde kullanılan baret model kazıkları.....	62
Şekil 4.19 : Yükleme düzeneği.	63
Şekil 4.20 : Yükleme düzeneği	64
Şekil 4.21 : Yük hücresi.....	64
Şekil 4.22 : Yük hücresinin sistemde görünüşü.....	65
Şekil 4.23 : Deplasman ölçme cihazı.....	66
Şekil 4.24 : Deplasman ölçme cihazının sistemde görünüşü.....	66
Şekil 4.25 : Yaprak tipi birim deformasyon ölçer (Koç, ve diğ, 2012).	67
Şekil 4.26 : Model kazık üzerindeki birim deformasyon ölçer.....	67
Şekil 4.27 : Birim deformasyon ölçer.....	68
Şekil 4.28 : Yüzey boyasının sökülmesi.....	69
Şekil 4.29 : Yüzeyin ince zımpara ile zımparalanması.....	69
Şekil 4.30 : Yüzeyin temizliği.	70
Şekil 4.31 : Birim deformasyon ölçerin yerinin işaretlenmesi.	70
Şekil 4.32 : Birim deformasyon ölçerin yapıştırılması.	71
Şekil 4.33 : Birim deformasyon ölçerin bağlantı şeması (çeyrek köprülül).	71
Şekil 4.34 : Birim deformasyon ölçerin bağlanması (çeyrek köprülül).....	72
Şekil 4.35 : Birim deformasyon ölçerin kısa devre kontrolü.....	72
Şekil 4.36 : Birim deformasyon ölçerin kurulumu.	73
Şekil 4.37 : Eğme yüküne maruz kalmış çubuktaki birim deformasyon ölçer (Koç, ve diğ, 2012).	74
Şekil 4.38 : Veri kaydetme ünitesi.....	75
Şekil 4.39 : Testlab Programı.	75
Şekil 4.40 : Yük hücresi testi.	76

Şekil 4.41 : Yük hücresi testi.....	76
Şekil 4.42 : Yük hücresi testi.....	77
Şekil 4.43 : Yük hücresi testi grafiği.	78
Şekil 4.44 : Potansiyometre kalibrasyonu.	78
Şekil 4.45 : Birim deformasyon ölçer kalibrasyonu.	79
Şekil 4.46 : Su terazisi ile profil başı yataylığının kontrolü.	80
Şekil 4.47 : Sıkıştırma işlemi.....	80
Şekil 4.48 : Deney düzeneği.	81
Şekil 5.1 : Sonlu eleman ve düğüm noktası (Uncuoğlu, 2009).	83
Şekil 5.2 : Üç boyutlu sonlu elemanlar (Potts ve Zdravkovic, 1999)	84
Şekil 5.3 : Elasto-plastik malzeme için gerilme-deformasyon ilişkisi (Johnson ve diğ, 2006).	85
Şekil 5.4 : İdealize gerilme ve deformasyon ilişkisi (Johnson ve diğ, 2006).....	86
Şekil 5.5 : Elastisite modüllerinin (E_0 ve E_{50}) tanımlanması (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007)	87
Şekil 5.6 : Kohezyonsuz zeminlerde sünme yüzeyinin asal gerilme eksenlerinde gösterimi (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007)	88
Şekil 5.7 : Pekleşen zemin modelinde elastik ve plastik bölgeleri ayıran sünme yüzeyi ile plastik potansiyel fonksiyonun gösterimi (Wood, 2004)	88
Şekil 5.8 : Farklı sertleşme parametrelerine göre sünme yüzeyi değişimi (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007)	89
Şekil 6.1 : Plaxis 3D modellemesi.....	91
Şekil 6.2 : %20 sıklıkta I profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.....	94
Şekil 6.3 : %20 sıklıkta I profil için Plaxis 3D moment davranışı.	95
Şekil 6.4 : %20 sıklıkta I profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.	95
Şekil 6.5 : %70 sıklıkta I profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.....	96
Şekil 6.6 : %70 sıklıkta I profil için Plaxis 3D moment davranışı.	97
Şekil 6.7 : %70 sıklıkta I profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.	97
Şekil 6.8 : %20 sıklıkta + profil için Plaxis 3D yük deplasman eğrisi.	98
Şekil 6.9 : %20 sıklıkta + profil için Plaxis 3D moment davranışı.	99
Şekil 6.10 : %20 sıklıkta + profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.	99
Şekil 6.11 : %70 sıklıkta + profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.....	100
Şekil 6.12 : %70 sıklıkta + profil için Plaxis 3D moment davranışı.	101
Şekil 6.13 : %70 sıklıkta + profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.	101
Şekil 6.14 : %20 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.	102
Şekil 6.15 : %20 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D moment davranışı.	103
Şekil 6.16 : %20 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.....	103
Şekil 6.17 : %70 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.	104
Şekil 6.18 : %70 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D moment davranışı.	105
Şekil 6.19 : %70 sıklıkta kare profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.....	105
Şekil 6.20 : %20 sıklıkta I profil model deneyi yük-deplasman grafiği.....	106
Şekil 6.21 : %70 sıklıkta I profil model deneyi yük-deplasman grafiği.....	107
Şekil 6.22 : %20 sıklıkta + profil model deneyi yük-deplasman grafiği.....	108
Şekil 6.23 : %70 sıklıkta + profil model deneyi yük-deplasman grafiği.....	109
Şekil 6.24 : %20 sıklıkta kare profil model deneyi yük-deplasman grafiği.	110
Şekil 6.25 : %70 sıklıkta kare profil model deneyi yük-deplasman grafiği.	111
Şekil 6.26 : %20 sıklıkta I profi yük-deplasman karşılaştırılması.....	112
Şekil 6.27 : %70 sıklıkta I profil yük-deplasman karşılaştırılması.	113
Şekil 6.28 : %20 sıklıkta + profil yük-deplasman karşılaştırılması.....	114
Şekil 6.29 : %70 sıklıkta + profil yük-deplasman karşılaştırılması.....	114

Şekil 6.30 : %20 sıkılıkta kare profil yük-deplasman karşılaştırılması.	115
Şekil 6.31 : %70 sıkılıkta kare profil yük-deplasman karşılaştırılması.	116



KUM ZEMİNLERDE, YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARIN DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Yapı temellerinin, genel olarak iki koşulu sağlaması gereklidir. Birinci koşul, temelin göçmeden yapı yüklerini taşımasıdır (taşıma gücü koşulu). İkinci koşul, temelin yapı yüklerini aşırı oturmalarla maruz kalmadan taşımasıdır (oturma koşulu). Yapı yüklerinin büyüklüğü ve zemin özelliklerinin elverişli olması durumunda, yüzeysel temel oluşturulur. Zeminin, yapısal yüklerden gelen gerilmelerini göçmeden ve aşırı oturmalar meydana gelmeden taşıyamaması durumunda, derin temeller tercih edilir.

Baret temeller, yapı yüklerini zeminin derin tabakalarına taşıtmak için kullanılan bir derin temel türüdür. Baret temellerin tasarımı derin temel çeşidi olan kazıklı temellerle aynıdır. Baret temel, özel kesitlere sahip olan fore kazık olarak düşünülebilir. Tasarımda, göçmeye karşı güvenliğin bulunduğu, ayrıca servis yüklerinin meydana getireceği oturmaların kabul edilebilir bir sınırı aşmadığı gösterilmelidir.

Günümüzde, yüksek yapılar, geniş açıklıklı köprüler, metro inşaatları, havalimanları, deniz limanları, stadyumlar gibi büyük yapıların inşaatlarına ihtiyaç gittikçe artmaktadır. Bu yapılarda, zemine aktarılan yükler oldukça yüksek mertebelerdedir. Bu durum, derin temel ihtiyacını arttırmıştır.

Baret temeller fore kazıklara benzeyen fakat daha avantajlı olan derin temel tipidir. Aynı miktarda malzeme ile (demir ve beton) daha çok taşıma kapasitesi elde edilir.

Yapılardan gelen eksenel yüklerin yanı sıra, yanal yüklerin etkileri de araştırılmalıdır. Baret temeller, yapıdan kaynaklanan eğik yükler, rüzgar, toprak basıncı, su basıncı, deprem, gemi çarpması gibi yanal yükleri taşımak üzere teşkil edilir. Yapılan deneylerle, eksenel ve yatay yük etkisiyle ilgili çok sayıda önemli bilgi elde edilmiştir. Bu güne kadar eksenel yük altındaki kazıklı temellerin davranışı, yanal yük altındaki kazıklı temellere göre daha geniş şekilde incelenmiştir. Yanal yüklü kazıklı temel davranışını anlamak için daha fazla incelemeye gereksinim vardır.

Bu tezde, kazıklı temeller ile ilgili bilgi verildikten sonra, tezin konusu olan baret temeller anlatılmıştır. Daha sonra tasarım yöntemi ile ilgili bilgi verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş ve bunlardan bazıları anlatılmıştır. Yapılan çalışmaların deney düzenekleri ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır. Deneyde kullanılacak kum için yapılan laboratuvar deneyleri ile zeminin özellikleri belirlenmiştir. Baret kazık modelinin yanal yüklenmesi için deney düzeneği tasarlanmış ve tasarlanan deney düzeneğinin parçaları ve amaçları detaylı olarak anlatılmıştır.

Bu çalışmada, baret temellere etki eden yanal yükün etkisi, sıkı kum ve gevşek kum zeminde incelenmiştir. Üç tip kazık tipi için deneyler tekrar edilmiştir. Deneyde kuru kum kullanılmıştır.

Deplasman ölçer, birim deformasyon ölçer, ve yük hücresi kullanılarak, model kazığın deplasman miktarı, birim deformasyon miktarı ve kazığa gelen yük miktarı, bilgisayara aktarılmıştır. Veri kaydetme ünitesi (data logger) ile veriler bilgisayarda kaydedilmiştir. Bu cihazlar deney yapılmadan önce kontrol ve kalibre edilmiştir.

Model kazığın üzerine yerleştirilen üç adet birim deformasyon ölçer ile elde edilen birim deformasyon miktarlarından momentler hesaplanmıştır. Böylece deney sırasında oluşan maksimum momentler elde edilmiştir.

Deney, Plaxis 3D programı ile modellenmiştir. Deneylerle elde edilen zemin ve profil özellikleri, program için kullanılmış ve analiz edilmiştir.

Plaxis 3D sonuçları ile model deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Yük-deformasyon davranışının Plaxis 3D ile bulunan sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak Plaxis 3D programı ile elde edilen değerler daha yüksektir. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, bilgisayar analizleri kullanılarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel taşıma kapasitesi değerlerinden daha büyüktür.

Yapılan deneysel çalışmalar ve gerçekleştirilen üç boyutlu non-lineer sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar yanal yük taşıma kapasitelerinin kazık en kesit geometrisinden etkilendiğini göstermektedir.

Model kare kesit profil, fore kazık boyutlarına yakın seçilmiştir, diğer iki profil tipi baret temel kesitlidir. Sonuçta görülmüştür ki hem Plaxis 3D, hem laboratuvar deneylerinde baret kesitli modellerin taşıma kapasitesi ve moment kapasitesi + profil için daha yüksektir. Kare kesitli ve dikdörtgen kesitli model profillerde sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.

Yanal yüklü baret kazıklı temellerde, kumun rölatif sıkılığının taşıma gücüne etkisi, kazığın rijitliğinin taşıma gücüne etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür.

DETERMINATION OF BEHAVIOUR OF BARRETTE PILES UNDER LATERAL LOAD IN SAND

SUMMARY

Generally, foundations should meet two conditions. First condition is that the foundations must carry structural loads without failure (ultimate bearing capacity). Foundation must be safe against overall shear failure. Second condition is that the foundation must carry the structural loads without excessive displacements. If the magnitude of structural forces and the soil properties are favorable, shallow foundation can be chosen. If shallow foundations cannot perform these two conditions, then deep foundations are preferred instead. Deep foundations are structural elements which transfer loads through compressible soil and weak soil to underlying stronger layers.

Barrettes are a type of deep foundation used to transport structural loads to deeper layers of soil. The design of barrettes are the same as deep foundation design. Basically, barrette piles can be considered as bored piles. While designing barrettes, it should be shown that barrette is safe against overall shear failure in the soil that supports it and barrettes should not undergo excessive settlements.

At the present time, there is a growing need for the construction of large scale, such as high towers, wide bridges, subway constructions, airports, seaports, stadiums. In these structures, structural loads can be high. This situation increased the need for deep foundations.

Barrettes are similar to bored piles. However, they have more advantages with the same amount of material (rebar and concrete) more bearing capacity is achieved.

Resistance of lateral stress and bending moments is better than circular piles of the same section and easily connecting to structures, so that one single pile is sufficient under each column or bearing unit. Another advantage is that barrettes have better mobilization of lateral friction than a circular pile of the same section. Besides, barrettes are preferred because of the ease of application.

In addition to the vertical loads from the structures, the effects of lateral loads must also be investigated. Barrettes are formed to carry lateral loads such as wind, earth pressure, water pressure, earthquake, ship impact.

Many important information about vertical and lateral load effects were obtained by experiments. To this day, the behaviour of pile foundation under vertical loads have been investigated more broadly than piled foundations under lateral loads. Further investigation is needed to understand the behaviour of lateral loaded piles.

In this thesis, after giving information about pile foundation, barrettes which are the subject of the thesis, were explained. Then, brief information about design method was given. Testing apparatus and experimental results of studies are explained. Properties of soil which is used in experiment, were determined by the laboratory

experiments. The test set-up for the lateral loaded barrette model piles has been designed and the parts of the system were described in detail.

In this study, the effect of lateral load on the barrettes were investigated on 20% and 70% relative density. Experiments were repeated for three types of model piles. Sand was dried for the experiment. The experimental set-up is designed and manufactured.

The profiles are manufactured as close as possible to dimensions obtained by reducing the actual pile sections by 1/40. After each model pile placed in the test box, sand placed as loose and dense. For this propose, a device is designed and provided for fixing the profiles in the loading system. Profiles are drilled about 14 mm thickness to the point where they are held and through this hole the shaft of the loading system passes.

Sand is filled in the test box every 5 cm by sprinkler method. To do this, inside of the test box and glass are marked at every 5 cm. The weight of sand in each 5 cm layer is calculated, filled and compacted accordingly. After sand filling has been completed, the potentiometer is placed.

Potentiometer, strain gauge and load cell are used for measuring displacement amount of unit deformation and the amount of load. These data were transferred and recorded by the data logger. These all devices were checked and calibrated before main experiments. Moment values were calculated from the strains obtained by three strain gauges placed on the model pile. Thus, maximum moments during the experiment were obtained.

The experiment was modelled with Plaxis 3D program. Plaxis 3D is a finite element software for three-dimensional analysis of deformation and stability in geotechnical engineering and rock mechanics. This software can be used for excavations, embankments, foundations, tunneling and mining. In recent years, the finite element modeling has been widely used in the design and analysis of soil mechanics and foundation engineering problems.

The finite element modeling is a calculation method that can analyze a system's behavior by considering many factors that may affect its behaviour. The main advantage of this method, non-linear stress-deformation behaviour of the soil and this characteristic can be taken into account with material models defining non-linear behaviour characteristic. In this study, Mohr-Coulomb modelling was used for sand in Plaxis 3D. The Mohr-Coulomb model (MC) is a linear elastic and fully plastic model with failure criterion. While modelling sand, model parameters should be found by laboratory tests and should be able to be explained the material behaviour for the stress and deformation properties of the model. Soil and profile properties obtained by the experiments were used in the software and analyzed.

Plaxis 3D results were compared with the model experiment results. It was observed that the load-deformation behaviour is consistent with Plaxis 3D. However, the values obtained with Plaxis 3D software are higher. In the case of both loose and dense sand, the lateral bearing capacity values obtained by using computer analysis are greater than the experimental values.

The results from experimented studies and three dimensional non-linear finite element are affected by pile cross sections.

Model square cross-section profile is selected close to bored pile dimensions. Other two profiles represent barrette pile. As a result, it has been seen that both bearing

capacity and moment bearing capacity of the barrette section models are higher for ‘+’ profile both in Plaxis 3D and laboratory experiments. The results are similar in square sections and rectangular section. The effect of relative density on the bearing capacity is higher than the effect of stiffness of the pile on bearing capacity.





1. GİRİŞ

Yüzeysel temellerin, yetersiz kaldığı durumlarda derin temeller kullanılmaktadır. Derin temel tipleri içinde en çok kullanılan tip, kazıklı temellerdir. Kazıklı temeller, üst yapı yüklerini, alt zemin tabakalarına aktaran yapı elemanlarıdır. Zemin yüzeyine yakın tabakalarda, yapı yüklerini göçmeden ve aşırı oturmalar oluşmadan taşıyacak bir yüzeysel temel imalatı uygun değilse, derin temeller ve derin temel çeşidi olan kazıklı temeller kullanılır.

Kazıklı temeller sayesinde yükler, zayıf ve çok sıkışabilme özelliklerine sahip zemin tabakalarının altındaki daha sağlam tabakalara aktarılır. Sıvılaşma nedeniyle oluşabilecek problemler yine bu şekilde önlenmiş olur. Bunlara ek olarak kazıklı temeller, kaldırma, döndürme kuvvetlerine karşı ve zeminde oluşabilecek büzülme, şişmelere karşı kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında incelenen baret kazıklı temeller, kazıklı temellerin özel kesitlere sahip olan bir çeşididir. Baret kazıklı temeller basit olarak, dikdörtgen kesitli fore kazık olarak tanımlanabilir ancak sadece dikdörtgen kesitli değildir. Çeşitli kesitlerde imal edilebilirler. Fore kazıklara göre bir çok avantajı olan bu temel tipi, şekil ve kazı yöntemi farklılık gösterir ve betonarme olarak imal edilir. Bu avantajlardan bazıları, baret kazığının kesit özelliklerinden dolayı, daha fazla sürtünme yüzeyine sahip olmasıdır. Bu da, baret kazıklı temelleri daha ekonomik yapar. Kazı ve imalat açısından daha kolay oluşu, baret kazıklı temelleri tercih sebebi yapar. Bu nedenlerle yapı yüklerinin çok büyük olduğu durumlarda, bu tip temeller tercih edilir.

Kazıklı temeller, hem düşey hem de yatay yüklerin taşınmasında yaygın olarak kullanılır. Yapılan önceki çalışmalarda, eksenel yük altındaki kazıklı temeller yanal yük altındaki kazıklı temellere göre daha iyi anlaşılmıştır. Çünkü eksenel yüklü kazıklı temellerin aksine, yanal yüklü kazıklı temelleri anlamak için daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak gün geçtikçe yanal yük altındaki kazıklı temellerin araştırılmasının önemi daha çok artmıştır.

Deprem, rüzgar, statik yükler, toprak basıncı, su basıncı, gemi çarpma veya çekme durumu, dalga ve fren kuvvetleri gibi etkiler yanal yükleri oluşturur. Bu durumda baret kazıklı temelin taşıyabileceği yük, zemin özelliklerine, kazık kesitine, kazık malzeme özelliklerine ve kazık başlığının bağlanma şekline bağlıdır. Baret kazıklı temelin yapısal tasarımında, kazık boyunca kesme kuvveti ve moment dağılımının tespit edilmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur.

Son yıllarda, yatay yüklere maruz kazıkların davranışı anlayabilmek için çok sayıda çalışmalar yapılmış ve yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları, santrifüj modelleme tekniği ve sonlu elemanlar yöntemidir. Santrifüj modelleme tekniği, arazi deneylerine göre daha ekonomik olmasına karşın, çok yaygın değildir. Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntem, bir mühendislik problemin çözülmesinde, birçok değişkeni göz önüne alarak gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir. Yatay yüke maruz baret kazıkların davranışı non-lineer ve üç boyutlu olduğu için, çok sayıda parametrenin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu yüzden, yapılan çok sayıda çalışma ve yaklaşıma rağmen hala kesin sonuç veren bir genel çözüm mevcut değildir.

Bu çalışmada; kum zemin içerisinde bulunan, yatay yüklenmiş baret kazıkların davranışı incelenmiştir. Farklı kesitlerdeki baret kazıklar Plaxis 3D programında modellenip analiz edilmiştir. Kum zemin içerisinde, baret kazıklı temelin, 1/40 ölçekli laboratuvar deneyi için, kum kutusu, yükleme düzeneği ve model kazıklar tasarlanıp, imal edilmiştir. Deney için silis kumu tedarik edilip, kurutulmuştur. Plaxis 3D programı ile yapılan deneyler karşılaştırılıp, birbirleriyle uyumlu olup olmadığı gözlenmiştir.

2. KAZIKLI TEMELLER

Yumuşak ve yumuşağa yakın kohezyonlu zeminler ile gevşek ve gevşeye yakın kohezyonsuz zeminlerde, zeminin taşıma gücü ve oturma şartlarını yerine getirememesi durumunda, derin temeller kullanılır. Buna ek olarak dinamik yükler, suya doymun iri daneli zeminlerde sıvılaşmaya sebep olur. Bu tip zeminlerde, dinamik yük etkisiyle, zemin sıvı gibi davranış gösterir. Sıvılaşan zeminde taşıma gücü sıfıra yaklaşır. Bu durumda sıvılaşan zemin uzaklaştırılıp, yerine sıkıştırılarak, iyi derecelendirilmiş çakıl yerleştirilebilir. Diğer bir yöntem ise derin temel imalatıdır. Derin temeller, yapıdan gelen yükleri daha derindeki sağlam tabakalara aktaran temel türüdür. Bu temel türünün en çok kullanılan çeşidi ise kazıklı temellerdir (Uzuner, 2006).

Kazıklı temellerde uygulama ile ilgili zorluklar mevcuttur. Sahada bu işin başındaki mühendisin bilgisi ve tecrübesi sayesinde başarılı bir uygulama gerçekleştirilebilir. Zeminin her tabakası aynı sertlikte ve özellikte değildir. Bunun için uygulamadan önce zeminin özellikleri tespit edilmelidir. Zeminin kıvam, mukavemet, konsolidasyon gibi özellikleri belirlenmelidir. Yapılan zemin incelemelerinin, doğru ve kapsamlı olması gerekir. Bu incelemeye göre, taşıma gücü ve oturma şartlarını sağlayan zeminde, ekonomik kazık tipi seçilir. Bu seçimde göz önüne alınan bazı etkenler aşağıdaki gibidir (Toğrol ve Tan, 2009):

- Zemin özellikleri,
- Yeraltı su seviyesi,
- Çevre yapılarının durumu,
- Zeminin tabakalaşma şartları,
- Çalışma serbest yüksekliği,
- İmalat aşamasında oluşacak titreşim ve gürültü,
- İmalatın maaliyeti,
- Şantiyeye ulaşım,

- Çevre şartları

Kazıklı temeller, çeşitli amaçlarla kullanılabilir (Köpüklü, 2015):

- Deprem, rüzgar yükü gibi yanal yüklerin karşılanması amacı ile kullanılır.
- Aktif zon denilen, su ile karşılaştığında çöken ve kabaran zemin tipinde, üst yapının yükünü bu bölgenin altına aktarmak için kazık temeller kullanılır.
- Kaldırma kuvvetinin etkisi altındaki yapılarda, veya üst yapıya gelen yanal yükler nedeniyle oluşan momentlerin etkisini karşılamak için kazıklı temeller kullanılır.
- Temellerin altına oyulması riskine karşı, kazıklı temeller kullanılabilir.
- Zeminin hareketlerinin kontrol altına alınmasında ve iri daneli zeminlerde, zeminleri sıkıştırmak için de kazıklı temel kullanılabilir.

2.1 Kazıklı Temel Türleri

Kazıklar taşıma gücü açısından, iki başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar uç kazıkları ve sürtünme kazıklarıdır. Uç kazığı, yapıdan gelen yükü doğrudan derindeki taşıma gücü iyi olan tabakaya aktarır. Denklem 2.1’de uç kazığı için taşıma gücü formülü görülmektedir.

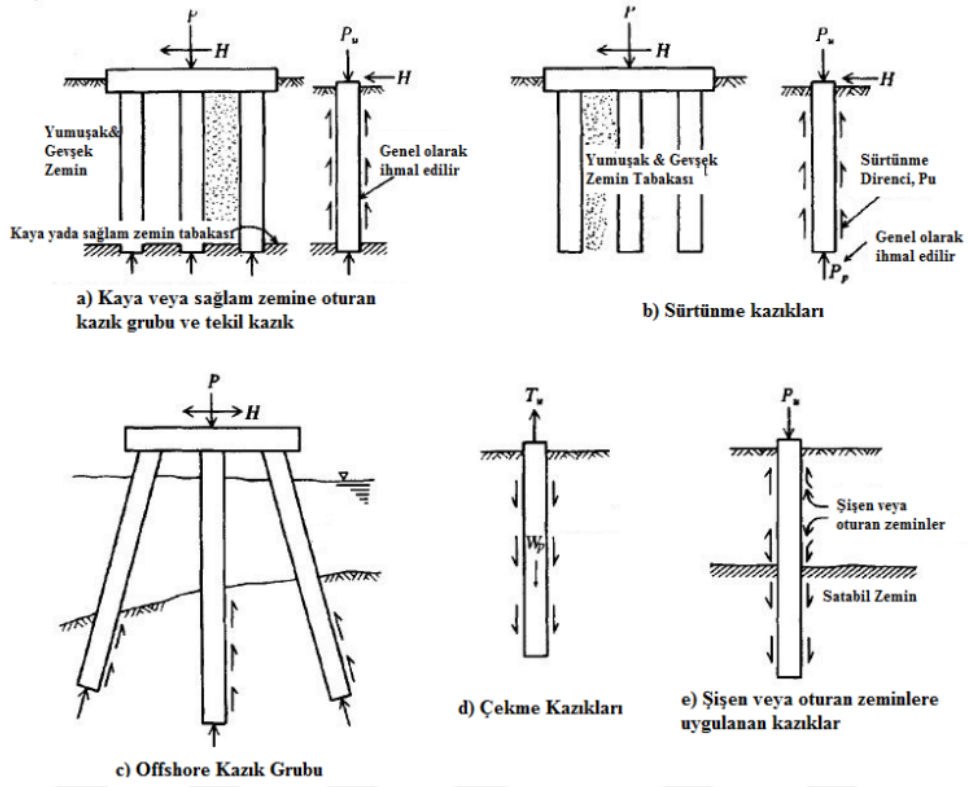
$$Q = Q_{uç} = q_{uç} \cdot A_{uç} \quad (2.1)$$

Yapıdan gelen yükü, yan yüzeylerindeki sürtünmeden oluşan gerilmeyle, kısmen veya tamamen zemine aktaran kazıklara, sürtünme kazığı adı verilir. Taşıma gücünü, hem uç basıncı (q_u), hem de kazığın yüzeyindeki sürtünme geriliminden (q_{yan}) alır (Uzuner, 2006). Denkem 2.2’de sürtünme kazığı için taşıma gücü formülü görülmektedir.

$$Q = Q_{uç} + Q_{yan} = q_{uç} \cdot A_{uç} + q_{yan} \cdot A_{yan} \quad (2.2)$$

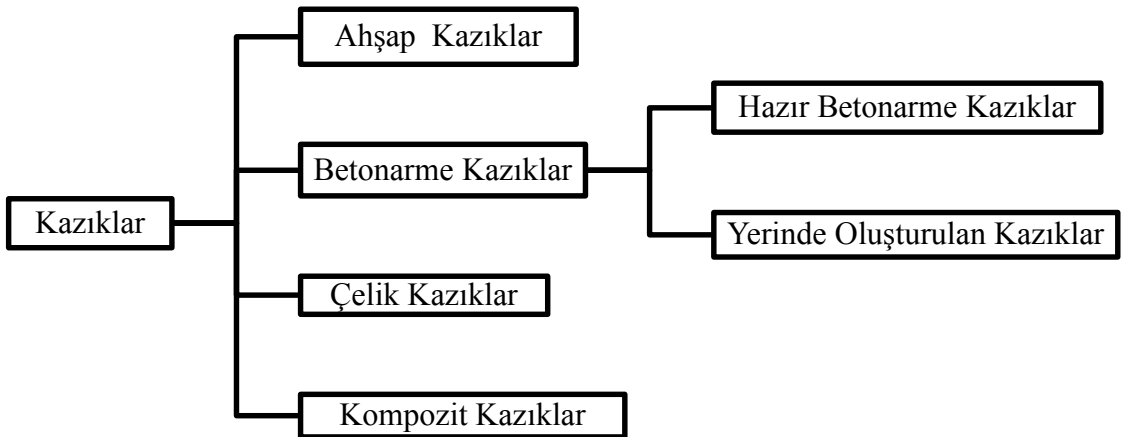
Kazıklar, basınç kazığı, çekme kazığı ve yanal yüklü kazıklar gibi taşıdıkları yüklere göre de sınıflandırılabilir. Kaldırma kuvvetinin etkisi altındaki yapılarda, üst yapıya gelen yanal yükler nedeniyle oluşan momentlerin etkisini karşılayan kazıklara çekme kazıkları denir. Eğik yükler, rüzgar, toprak basıncı, su basıncı, deprem, gemi

arpması gibi yanal yükleri taşımak üzere teşkil edilen kazıklar, yanal yüklü kazıklardır. şekil 2.1’da çeşitli kazık tipleri görülmektedir.



şekil 2.1 : Kazıklı temellerin kullanım alanları (Bowles, 1996).

Kazıklar yapıldıkları malzeme özelliğine göre de sınıflandırılır. elik, ahşap, betonarme ve kompozit olmak üzere imal edilir. Bu sınıflandırma şekil 2.2’de gösterilmiştir.

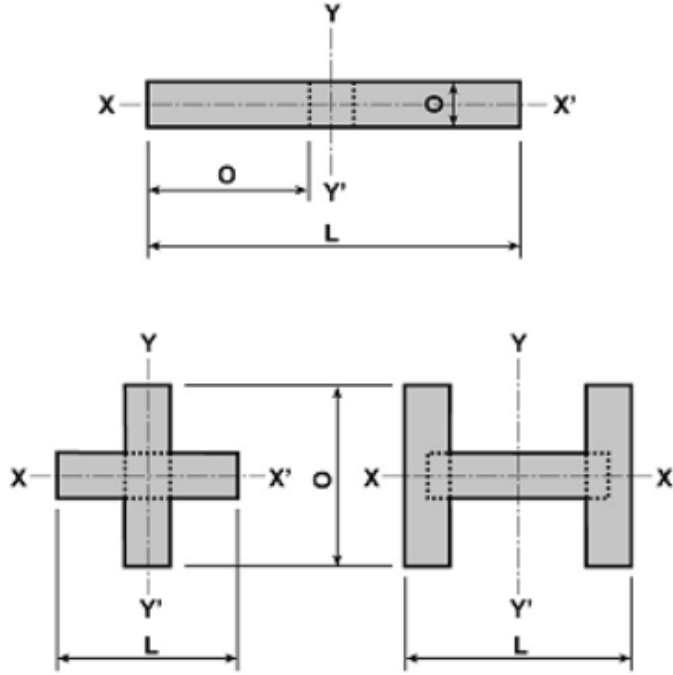


şekil 2.2 : Kazıklı temellerin malzemeye göre sınıflandırılması (Uzuner, 2006).

Bunlara ek olarak, kazıklar imalat yöntemine göre çakma kazıklar ve sondaj kazıkları olarak ikiye ayrılır. Çakma kazıklar, zemine çakılarak imal edilen, kendi hacmi kadar zemini yanlara iterek zeminin sıkıştırılmasını sağlayan kazık türüdür. Sondaj kazıkları ise zeminin kazılarak, kazığın hacmi kadar zeminin boşaltılmasıyla imal edilir.

2.2 Baret Kazıklı Temeller

Baret kazıklı temeller, bir çeşit fore kazık olarak düşünülebilir. Fore kazıklardan, şekil ve kazı yöntemi olarak farklılık gösterir. Genellikle dikdörtgen kesitlerde imal edilen baret kazıklı temeller, proje şartlarına göre, H, +, I, T, II gibi şekillerde de imal edilebilir. Şekil 2.3’de bazı baret kazıklı temel tipleri görülmektedir.



Şekil 2.3 : Baret kazık kesitleri.

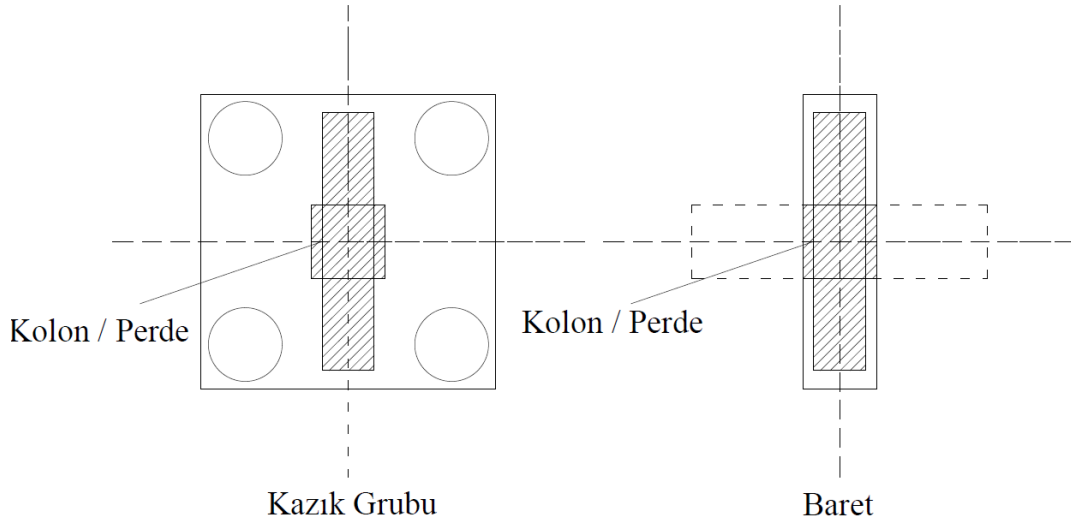
Baret kazıklı temellerin kazıklardan önemli farklarından biri de, kazı yönteminin farklı olmasıdır. ‘Grab’ veya ‘Cutter’ denilen, ekipmanla kazı yapılır. Ekipman özellikleri, yapılacak olan baretin genişliklerine (60, 80, 100, 120 cm) ve uzunluklarına bağlı olarak seçilir.

Baret kazıklı temeller, tasarım esasları açısından fore kazıklarla aynıdır ve özel kesitli fore kazıklar gibi düşünülebilir. Kazısı yapılan bir kuyunun donatılarının yerleştirilip, beton dökülmesiyle imal edilir. Baret kazıklı temeller, çakma kazıklar

gibi ahşap ve çelik malzemelerden imal edilmez, sadece betonarme olarak imal edilir (Yıldız, 2011).

Baret kazıklı temellerin, fore kazıklı temellere göre çeşitli avantajları mevcuttur:

- Baret kazıklı temel ile aynı kesit alanına sahip bir dairesel kazığın sürtünme yüzeyleri karşılaştırıldığında, baret kazıklı temellerin, daha fazla yüzey alanına sahip olduğu görülür. Bu, aynı miktarda malzeme (demir ve beton) ile imal edilen baret kazıklı temelin, daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu anlamına gelir. Yani baret kazıklı temel daha ekonomiktir.
- Baret kazıklı temeller, yük doğrultusunda imal edilebileceği için depremsellik yönünden daha avantajlıdır. Yanal yük taşıma kapasiteleri, fore kazıklara göre daha yüksektir.
- Proje şartlarına göre farklı geometrik kesitlerde (H, +, I, T, Π v.b.) imal edilebilirler.
- Uç kazığı imal edileceği derin kazı gerektiren durumlarda, kazı ve imalat yöntemi, fore kazıklara göre daha kolaydır. Uç mukavemetini arttırmak için kazık ucunda iyileştirme yapılabilir.
- İmalat aşamasında, kazığın hasar görme olasılığı daha azdır.
- Konsolide killerde, kabarma gerçekleşmeden yapılabilir. Her türlü zemin koşulunda imal edilebilir.
- Çok büyük yapı yüklerini taşıyacak şekilde, büyük kesitlerde ve uzunluklarda imal edilebilir.
- İmalat sırasında, kalite kontrol testlerinin yapılması diğer kazık tiplerine göre daha kolaydır.
- İmalat sırasında daha az titreşim ve gürültü oluşur.
- Baret kazıklı temeller, yapısal bütünlük yönünden, kazık gruplarına göre daha verimlidir. Şekil 2.4’de, bir taşıyıcı kolon veya perde altındaki, kazık grubu ile baret kazıklı temelin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.4 : Baret kazık-fore kazık Sistemi karşılaştırması.

Bir kazıklı temelin, imalat aşaması kazığın sürekliliği ve kalitesini etkilemektedir. İmalat aşamasındaki bu hususlar (Yıldız, 2011):

- Beton dökümü sırasında, beton prizini almadan muhafaza borusunun çekilmesi, betonla zeminin karışmasına neden olabilir.
- İmalat sırasında, betonun serbest düşüşü, segregasyona neden olabilir.

Baret kazıklı temelin alt seviyelerinde, yetersiz ters basınç sebebiyle oluşan göçmeler, istenen mukavemette betona ulaşamamasına neden olabilir.

3. YATAY YÜKLÜ KAZIKLAR

Kazıkların yatay yük taşıma kapasitesi ile ilgili çeşitli analitik çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde; kum zeminde yer alan yanal yüke maruz baret kazıkların karşılayacağı yüklerin ve momentlerin, deneysel olarak tespit edilmesi konusu araştırılmıştır. Bu nedenle, yanal yük taşıma kapasitesini tahmin etmeye yarayan analitik çalışmalar da incelenmiştir.

Kazıklara gelen eksenel yükler, yanal yüke göre daha çok araştırılmıştır. Ancak yanal yüklü kazıkların davranışının anlaşılması daha karmaşıktır. Bu problem üç boyutlu ve nonlinear davranış gösteren bir problemdir. Zemin ile yapı arasındaki etkileşim çok önemlidir. Kazığın özellikleri (boyutları, elastisite modülü) ile zeminin özellikleri (zemin rijitliği, kayma mukavemeti) kazığın yanal yük altındaki davranışını etkilemektedir. Buna ek olarak, zemin ile kazığın ara yüzeyi, kazığın taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkiler.

Kazıkları tasarlarken, yanal yükü karşılamak için belirli noktalara dikkat edilmelidir (Yıldız, 2011):

- Kazığın karşıladığı yanal yük nedeni ile oluşan moment, kazığın moment taşıma gücünden az olmalıdır.
- Kazığın karşıladığı yanal yük, zeminin maksimum yanal taşıma gücünü geçmemelidir.
- Kazığın yapacağı yanal deplasman miktarı, üst yapının yapabileceği maksimum deplasman miktarından küçük olmalıdır.

3.1 Kullanım Amaçları

Kazıklı temeller, yapıdan gelen deprem, toprak basıncı, su basıncı, eğik yükler, rüzgar gibi etkiler nedeniyle oluşan yatay yükleri de taşımak için tasarlanmaktadır. Kazıklı temellerde, kazığın cinsi, zeminin özellikleri ve kazık başlığının durumu,

kazığın taşıyabileceği maksimum yükün hesaplanmasında etkilidir (Toğrol ve Tan, 2009).

Toğrol ve Tan (2009)'a göre kazık rijit bir başlığa sahip ise kazık başlığına gelen yatay yükün tamamını zemin almaktadır. Kısa kazıklarda, kazık serbest başlığa sahip ise yanal yükler büyüdükçe, kazık ötelenir. Uzun kazıklarda ise yatay yük arttıkça kazığın üst kısmı yer değiştirir, alt kısmı da düşey olarak kalır. Yumuşak kil ve siltli zeminlerde, zeminin kazığın yanal direncine etkisi azdır.

3.2 Yanal Yük Etkisindeki Kazıkların Tasarımı

Yanal yük etkisi altındaki kazıklar tasarlanırken, kazığın nihai direnci ile eğilmesi araştırılmalıdır. Kazığın yerdeğiştirmesi kesin olarak hesaplanamayacağı için belirli kabuller yapılarak hesaplanır.

Bu hesaplama yönteminde, zemin ideal elastik bir cisim gibi kabul edilir veya zemin için bir yatak katsayısı oluşturulabilir. Yatak katsayısı yönteminde, bir noktadaki zemin direnci ile meydana gelen deplasman ilişkisi tanımlanır. Yatak katsayısı fiziksel bir özellik olduğu için, teorik olarak belirlenmesi zordur.

Yaklaşık bir çözüm için, kazık elastik bir cisim, zemin ise izotrop yarı elastik ve homojen bir ortam olarak kabul edilebilir. Bu yöntemle zemin davranışı, uniform killi zeminler için, elastik sabitlerle temsil edilebilir (Toğrol ve Tan, 2009).

3.3 Yatak Katsayısı Kullanılarak Hesap Yapılması

Yatak katsayısı yönteminde, zemin bir seri yay olarak tanımlanır. Bu yaylar zeminin, yatay yüklere karşı koymasını temsil eder. Yatay yatak katsayısı ' k_h ', kazığın birim boyunda birim yerdeğiştirme oluşturan yanal gerilme olarak tanımlanır (Toğrol ve Tan, 2009).

Yatay yatak katsayısı zemin üstündeki kirişin bir noktasındaki gerilme ile yerdeğiştirmenin oranıyla hesaplanır ($k = p/y$). Bu tanımda, kirişte sadece belirli bir noktadaki yerdeğiştirme ile yine aynı noktadaki gerilme esas alınır Terzaghi (1955). Yatak katsayısı tanımında, kazıkları, düşey kirişler olarak varsayılmıştır (Toğrol ve Tan, 2009).

Killi zeminlerde, serbest basınç mukavemeti, yatak katsayısı ile orantılıdır. Ayrıca kil, silt ve normal konsolide olmuş zeminlerde, mukavemet derinlikle doğrusal arttığı için yatak katsayısı da derinlikle artar. Yükler nedeniyle aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatak katsayısı derinlikle değişmez, ancak zemin kuruma nedeniyle aşırı konsolide olmuşsa yatak katsayısı değişiklik gösterebilir.

3.3.1 Yatak katsayısı kazık boyunca sabitken tasarım

Bu tasarım yönteminde, yatak katsayısı, kazık boyunca sabit kabul edilir. Buna göre deplasmanlar, kesme kuvveti ve momentler hesaplanabilir. Kritik uzunluk l_c , denklem 3.1’de görüldüğü üzere hesaplanır. Burada E_p , elastisite modülü, I_p , atalet momenti, k_h , yatak katsayısıdır.

$$l_c = 4 \times \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k_h}} \quad (3.1)$$

Burada hesaplanan uzunluk, kazığın uzun veya kısa kazık olup olmadığını belirler. Boyu kritik uzunluktan fazla ise kazık uzun kazıktır. Böyle kazıklarda, yatay yükün etkisi belirli bir derinliğe kadardır. Aşağıdaki denklem 3.2’de ve denklem 3.3’de, kazık başının yer değişmesi y_0 ve dönme miktarı θ olarak gösterilmiştir. Burada P yatay yükü, M momenti temsil eder.

$$y_0 = \sqrt{2} \left(\frac{P}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^2 \right. + 1.62 \left(\frac{M}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 \right. \quad (3.2)$$

$$\theta = 1.62 \left(\frac{P}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 \right. + 1.73 \left(\frac{M}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^4 \right. \quad (3.3)$$

3.3.2 Yatak katsayısı kazık boyunca lineer olarak artması halinde tasarım

Kazığın kritik uzunluğu, yatak katsayısının kazık boyunca doğrusal arttığı koşulda, denklem 3.4’de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$l_c = 4 \times \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n}} \quad (3.4)$$

Buna göre denklem 3.5 ve denklem 3.6'da gösterildiği üzere, deplasman ve dönme hesaplanır.

$$y_0 = 2.43 \left(\frac{P}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^2 \right. + 1.62 \left(\frac{M}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 \right. \quad (3.5)$$

$$\theta = 1.62 \left(\frac{P}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 \right. + 1.73 \left(\frac{M}{n} \right) \left/ \left(\frac{l_c}{4} \right)^4 \right. \quad (3.6)$$

3.4 Broms Yöntemi

Broms (1964a,b) yatay kuvvetlerin etkisini, ince ve iri daneli zeminler için incelemiştir.

3.4.1 Killi zeminlerde Broms Yöntemi

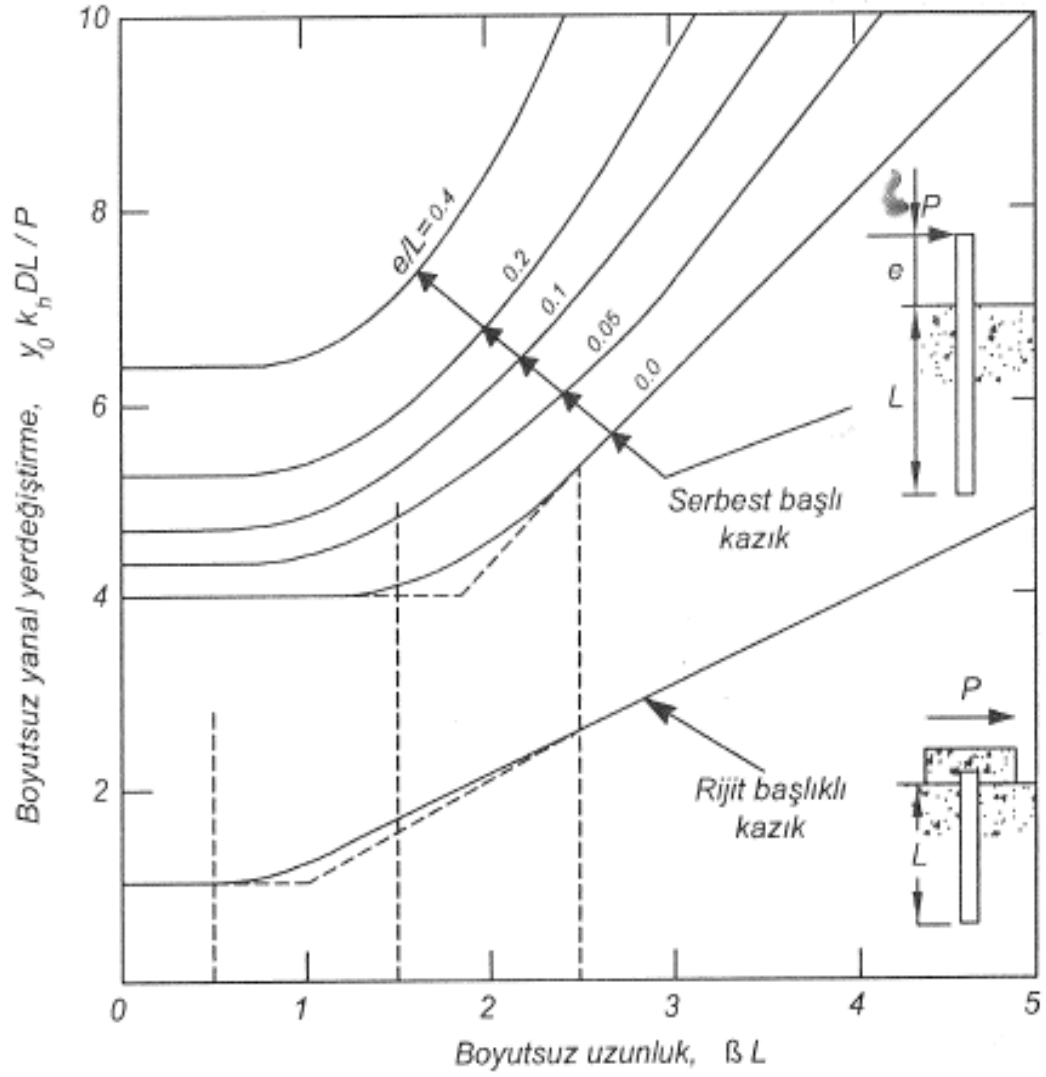
Broms (1964a), killi zeminleri yatak katsayısı ile tanımlamış ve de ideal elastik katı cisme benzeterek hesaplamıştır.

3.4.1.1 Yerdeğiştirme

Boyutsuz olan βL değeri, denklem 3.7'de görüldüğü gibi hesaplanır. Killi zeminleri yatak katsayısı ile ideal elastik katı cisme benzetilerek hesaplanmıştır. Killi zeminlerde, zemin reaksiyonları, deplasmanlar ve momentler bu değere bağlıdır.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4E_p I_p}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde L kazığın boyu, D kazığın çapıdır. Yerdeğiştirme kazığın başlığının serbest, rijit veya kazığın sonsuz sayılabilecek uzunlukta oluşuna göre hesaplanır. Şekil 3.1'de killi zeminlerde kazığın yer değiştirmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Killi zeminlerde kazığın yanal yerdeğiştirmesi (Broms, 1964a).

Yerdeğiştirme rijit başlıklı ve serbest başlıklı kazıklar için aşağıdaki 3.8 ve 3.9 eşitliklerinde verildiği gibi hesaplanabilir (Toğrol ve Tan, 2009).

$$\beta L < 0.5 \text{ ise } y_0 = \frac{P}{k_h DL} \quad (3.8)$$

$$\beta L < 1.5 \text{ ise } y_0 = \frac{4P \left(1 + \frac{1.5e}{L} \right)}{k_h DL} \quad (3.9)$$

Sonsuz uzunlukta sayılabilecek kazıklar ise, 3.10 ve 3.11 eşitliklerinde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\beta L > 1.5 \text{ ise } y_0 = \frac{P\beta}{k_h D} \quad (3.10)$$

$$\beta L > 2.5 \text{ ise } y_0 = \frac{2P\beta(e\beta + 1)}{k_h D} \quad (3.11)$$

Toğrol ve Tan (2009)'a göre kısa kazıklar için, kazık boyu arttıkça, kazığın zemin yüzeyinde yaptığı deplasman azalır. Ancak kazık rijitliğinin etkisi yoktur. Rijit başlıklı kazık ile serbest başlıklı kazıklar karşılaştırıldığında, rijit başlıklı kazıkların yanal deplasman miktarı, serbest başlıklı kazıklara göre dörtte bir kadar veya daha da azdır.

Rijit başlıklı ve kısa kazıklarda boyutsuz βL değeri 1'den büyük, serbest başlıklı ve uzun kazıklarda boyutsuz βL değeri 2'den büyük ise kazık başının yerdeğiştirmesi y_0 , zeminin ve kazığın özelliklerinden bağımsızdır.

3.4.1.2 Kazığın yanal direnci

Yanal yük miktarı, kazığın taşıyabileceği nihai yüke yaklaştığında, kazığın yanal deplasman miktarı hızlı bir şekilde artar. Kazığın yanal direnci, kazığın akma gerilmesi, kayma direnci ve kazığın kırılma mekanizmasına bağlıdır. Broms (1964a, b) kazığın yanal direncini incelemiştir. Buna göre kazığın en fazla zorlandığı noktalar plastik mafsallik olarak kabul edilmiştir. Bu sayede plastik mafsallik olarak kabul edilen noktalarda moment sabit kalacağı için, statik belirsizlikler ortadan kalkmaktadır (Toğrol ve Tan, 2009).

Yanal direnci hesaplamak için, kazık başlığı rijit ve serbest olarak ikiye ayırmak gerekmektedir. Broms (1964a), kazık çapının 1.5 katı derinlik için zemin direncini yok kabul eder. Bu derinliğin altında sabit bir s_u değerine eşit kabul edilmiştir. Burada s_u zeminin drenajsız kayma mukavemetidir. Ayrıca, kazıkların kırılma biçimi, kazık boyuna ve başlığın rijit veya serbest olmasına göre 5 şekilde

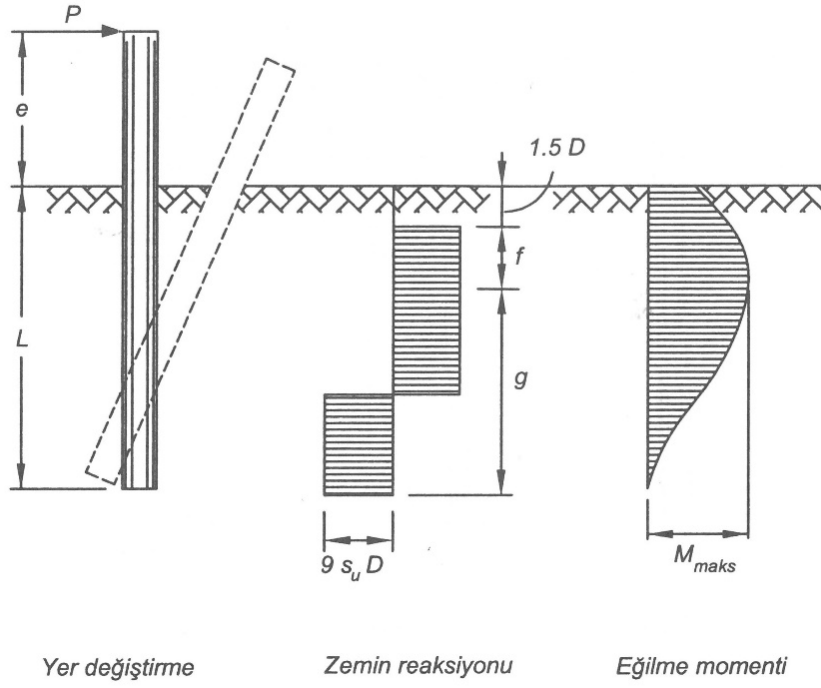
incelenmiştir. Kayma mukavemeti aşağıdaki bağıntı 3.12’de Coulomb ifadesi ile gösterilmiştir.

$$s = c + \tan \phi \quad (3.12)$$

Bu ifadede kayma mukavemeti s , c ve ϕ Mohr-Coulomb zarfının, ordinat eksenini kestiği noktayı ve eğimini gösterir. Suyu doymun killerde drenajsız kayma mukavemeti için yapılan üç eksenli deneylerde, $s_u = c_u$, kumların ve normal konsolide olmuş killer için drenajlı kayma mukavemeti, $s = c' + \sigma'_n \tan \phi'$ dir. Serbest başlı kazıklar için, kısa kazıklar ve uzun kazıklar olmak üzere ikiye ayrılarak incelenebilir. Kısa kazık için yanal direnç, zemin direncine bağlıdır. Uzun kazıkta ise kazık kesiti esas alınır. Bu iki tip kazığı birbirinden ayırmak için, kazıklara etkiyen en büyük momentler hesaplanır, kazığın akma mometinden küçük olup olmadığı incelenir. Maksimum momentin olduğu kesitte, kesme kuvveti sıfır olur. Bu nedenle, maksimum momentin olduğu derinlik denklem 3.13’deki gibi hesaplanır.

$$f = \frac{P_n}{9s_u D} \quad (3.13)$$

Burada f maksimum momentin bulunduğu derinliği, P_n nihai yanal kuvveti, s_u kohezyonu (üç eksenli basınç deneyinden bulunan), D kazık çapını ifade eder. Şekil 3.1’de killi zeminlerdeki kısa kazıkların yanal direnci gösterilmektedir.



şekil 3.2 : Killi zeminde kısa kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).

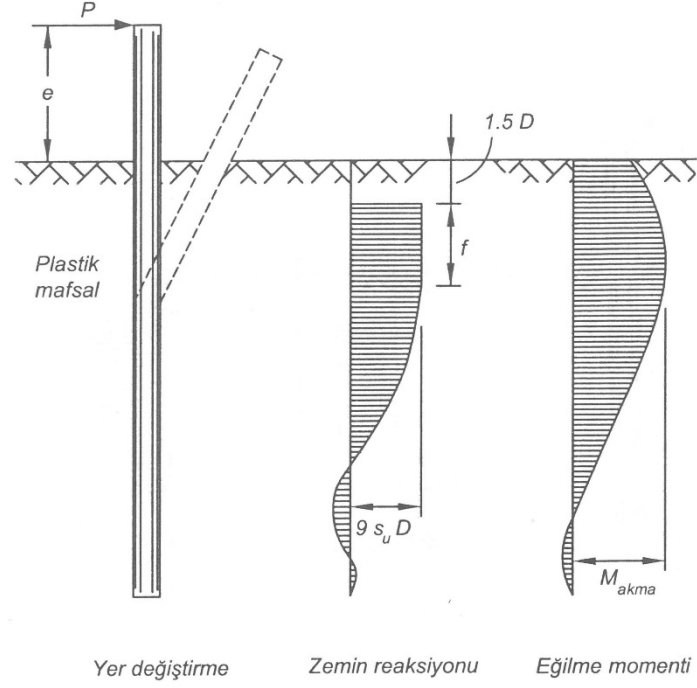
Kısa kazık için , moment aşağıdaki 3.14 eşitliğinde verilmiştir.

$$M_{maks} = 2,25 D g^2 s_u = P(e + 1.5 D + 0.5 f) \quad (3.14)$$

Kazık boyu ise 3.15 eşitliğindeki gibidir.

$$L = 1.5 D + f + g \quad (3.15)$$

Bu bağıntılar kullanılarak P_n için çözümler elde edilir.



Şekil 3.3 : Killi zeminde uzun kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).

Uzun kazık için 3.16'daki eşitlik yazılabileceği için, denklem 3.13 ile 3.14'ün ikinci kısmı kullanılarak yanal yük hesaplanır.

$$M_{maks} = M_{akma} \quad (3.16)$$

Bir kazıkta, kesitin her yerindeki gerilmenin akma gerilmesine eşit olması durumunda, akma momenti aşağıdaki 3.17 bağıntısı ile hesaplanır.

$$M_{akma} = \sigma_a Z \quad (3.17)$$

Burada σ_a akma gerilmesi, Z plastik mukavemet momentidir. Aşağıdaki bağıntı 3.18'de plastik mukavemet momentini verilmiştir. Burada h yükseklik, dikdörtgen kesitin genişliği b olarak ifade edilir.

$$Z = \frac{bh^2}{4} \quad (3.18)$$

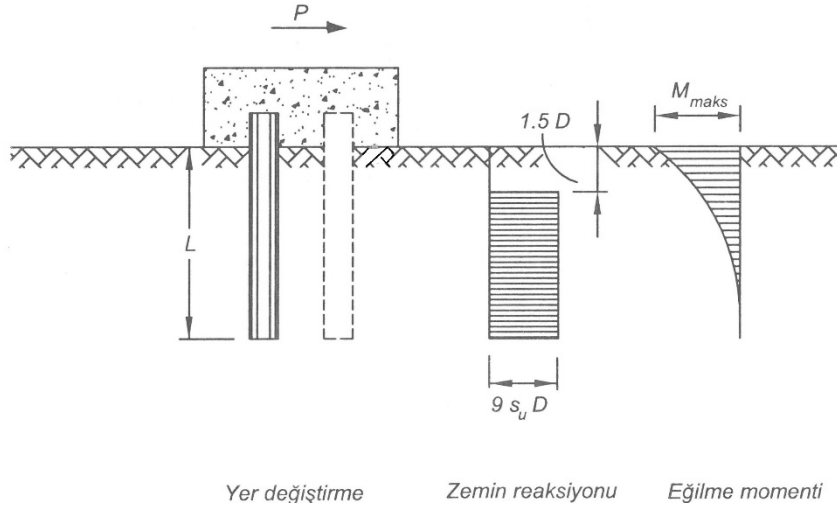
Rijit başlıklı kazıklarda da, kazıktaki maksimum momentin, kazığın akma momentine eşitliğinden yola çıkılarak belirlenir. Kısa kazık için nihai yük ve

maksimum yükleri veren denklemler aşağıda denklem 3.19 ve denklem 3.20’de gösterilmektedir.

$$P_n = 9s_u D(L - 1.5D) \quad (3.19)$$

$$M_{maks} = P_n (0.5L + 0.5D) \leq M_{akma} \quad (3.20)$$

Kısa kazıkta, yanal kuvvet kazığı ötelemektedir. Şekil 3.4’de killi zeminde, rijit başlıklı kısa kazığın yanal direnci gösterilmektedir.

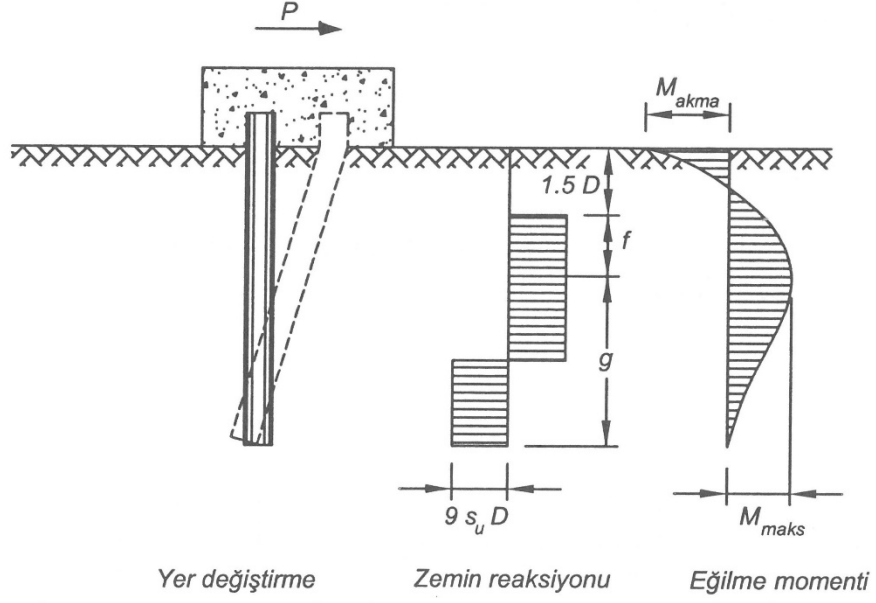


Şekil 3.4 : Killi zeminde rijit başlıklı kısa kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).

3.13’deki denklemde, uzun kazık için kırılma hali gösterilmiştir. Aşağıdaki denklem 3.21’de zemin seviyesindeki ve kazık eksenini üzerinde bir noktaya göre moment alınmıştır.

$$M_{akma} = 9s_u Dg(0.75g + f + 1.5D) - 9s_u D(f + 0.5g)(0.5f + 0.25g + 1.5D) \quad (3.21)$$

Bu ifade ve denklem 3.15 kullanılarak, nihai yanal yük hesaplanır. Şekil 3.5’de orta boy kazıkta, 1.5D+f derinliği için , maksimum momentin, kazığın akma momentinden küçük olması gerekmektedir. Aksi durumda, Şekil 3.6’daki uzun kazık hali oluşur.



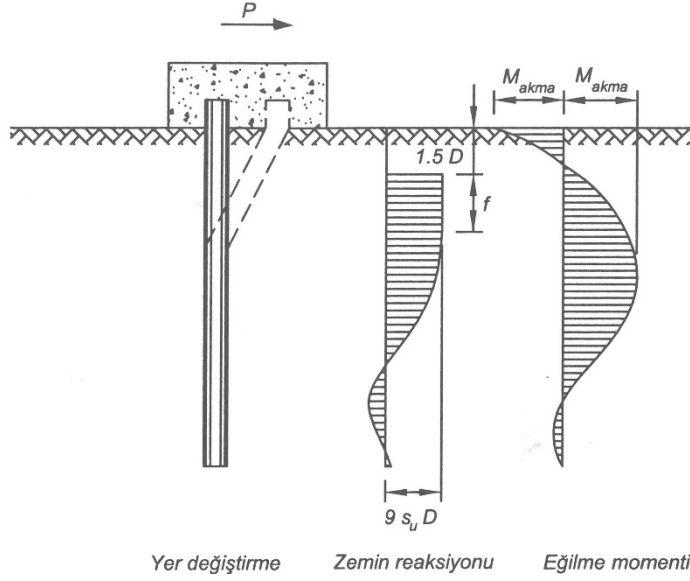
Şekil 3.5 : Killi zeminde rijit başlıklı orta boy kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).

Rijit başlıklı uzun kazık durumunda nihai yük, denklem 3.22'den hesaplanır.

$$P_n = \frac{2M_{aks}}{1.5D + 0.5f} \quad (3.22)$$

Denklem 3.13 kullanılarak denklem 3.23 elde edilir. Killi zemin için serbest başlı ve rijit başlıklı kazıkların nihai yükleri, şekil 3.7 ve şekil 3.8'deki grafiklerden bulunabilir. Şekil 3.6'da killi zemin için rijit başlıklı kazıkların yanal direnci gösterilmektedir.

$$P_n^2 + 27s_u D^2 P_n - 36s_u D M_{aks} = 0 \quad (3.23)$$



şekil 3.6 : Killi zeminde rijit başlıklı kazıkların yanal direnci (Broms, 1964a).

3.4.2 Kum zeminlerde Broms Yöntemi

Kum zeminlerde, derinlikle birlikte yatay yatak katsayısı derinlikle artmaktadır. Aşağıdaki bağıntı 3.24’de görölmektedir.

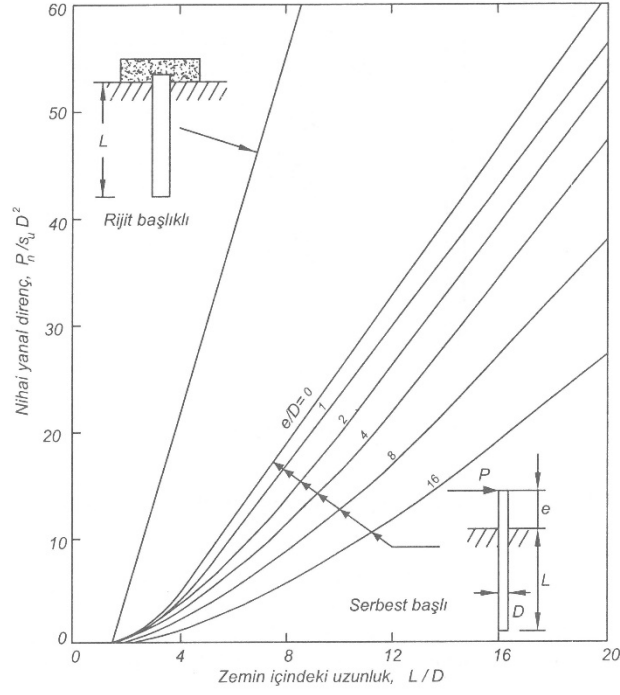
$$k_h = \frac{n_h z}{D} \quad (3.24)$$

şerit şeklinde zemin karşısında birim genişlik için yatay yatak katsayıları (n_h birim genişlikte) çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yatay yatak katsayısı değerleri (Davisson, 1970).

Zemin cinsi	Yatay yatak katsayısı
Kum zemin	$n_h = 0.5 - 50 \text{ MN/m}^3$ arasında değişir, çoğu kez $3 - 30 \text{ MN/m}^3$ arasındadır.
Normal konsidile organik silt	$n_h = 0.1 - 0.8 \text{ MN/m}^3$
Turba	$n_h \approx 0.05 \text{ MN/m}^3$
Killi zeminler	$k_h \approx 67 s_u$

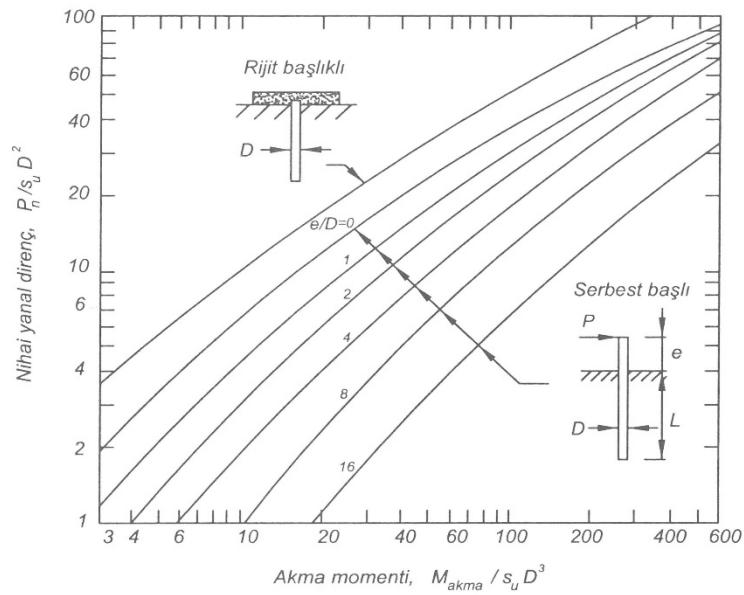
şekil 3.7’de killi zeminde kısa kazıkların nihai yükünün bulunması için kullanılan grafik, şekil 3.8’de ise yine killi zeminde uzun kazıkların nihai yükünün bulunması için kullanılan grafik gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Killi zeminlerde kısa kazık nihai yanıl yük grafiği (Broms, 1964a).

Aşağıdaki denklem 3.25’de η değeri hesaplanır. ηL boyutsuz derinlik olarak yazılır.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_p I_p}} \quad (3.25)$$



Şekil 3.8 : Killi zeminlerde uzun kazık nihai yanıl yük grafiği (Broms, 1964a).

3.4.2.1 Yerdeşiştirmeler

Kum ve çakıl gibi iri daneli zeminlerde, kazık başlığının yanal yerdeğiştirmesi, şekil 3.9'daki grafikte verilen ifadelerle bulunur. Rijit kazıklar için denklem 3.26 denklemini, rijit başlıklı ve $\eta L > 4.0$ durumunda denklem 3.27 kullanılır. Serbest başlıklı ve $\eta L > 2.0$ olan kazıklarda denklem 3.28, serbest başlıklı ve $\eta L > 4.0$ için denklem 3.29 kullanılır.

Rijit başlıklı kısa kazık için

$$y_0 = \frac{2P}{L^2 n_h} \quad (3.26)$$

Rijit başlıklı ve $\eta L > 4.0$ kazık için

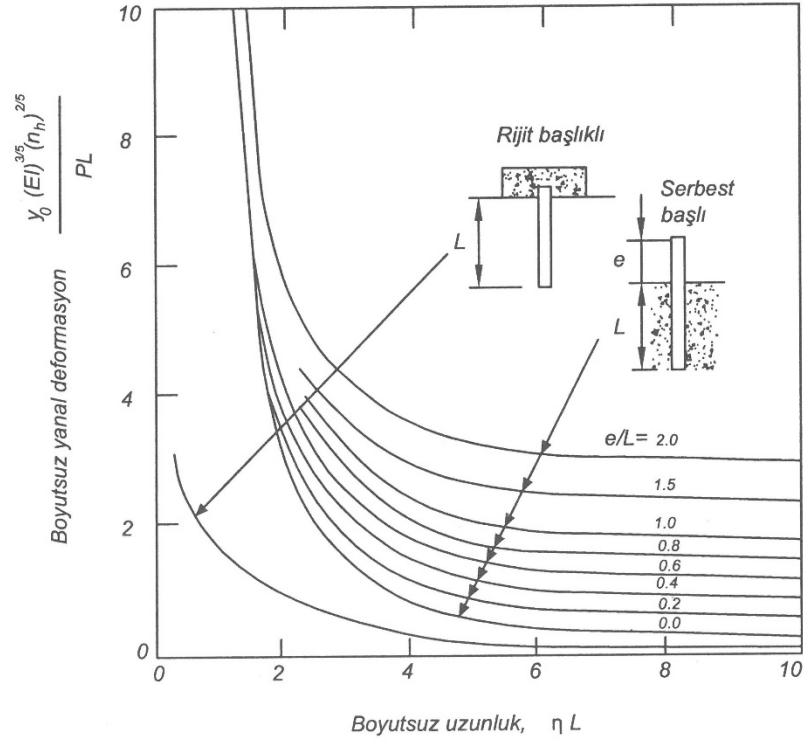
$$y_0 = \frac{0.93P}{\sqrt[5]{n_h^3 E_p^2 I_p^2}} \quad (3.27)$$

Serbest başlıklı ve $\eta L > 2.0$ kazık için

$$y_0 = \frac{18P(1 + \frac{4e}{3L})}{L^2 n_h} \quad (3.28)$$

Serbest başlıklı ve $\eta L > 4.0$ kazık için

$$y_0 = \frac{2.4P}{\sqrt[5]{n_h^3 E_p^2 I_p^2}} \quad (3.29)$$



Şekil 3.9 : Kum zeminlerde kazığın yer değiştirmesi grafiği (Broms, 1964a).

3.4.2.2 Kazığın yanal direnci

İri daneli zeminlerde, kazığın yanal direnci, kazığın akma gerilmesi, zeminin kayma mukavemeti ve kazığın kırılma mekanizmasına bağlıdır. Yanal yük miktarı kazığın taşıyabileceği nihai yüke yaklaştığında, kazığın yanal deplasman miktarı hızlı bir şekilde artar (Toğrol ve Tan, 2009).

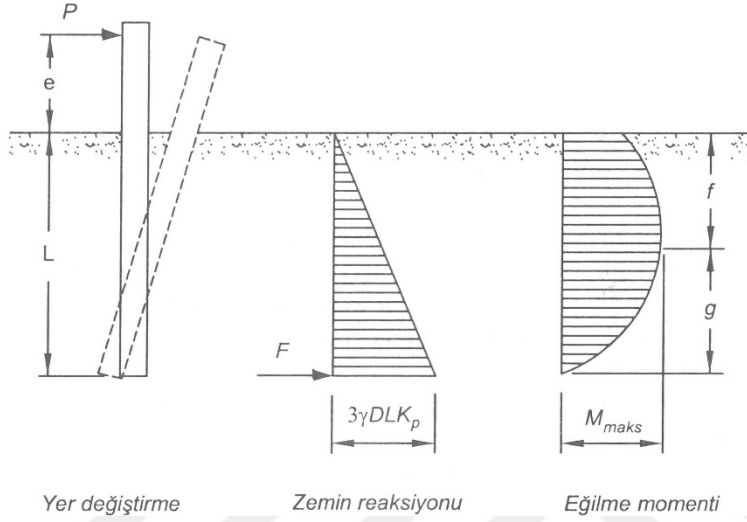
İri daneli zeminlerde, yanal direnci hesaplayabilmek için, kazığın arkasındaki aktif itki ihmal edilir. Kazığın önündeki pasif basınç, Rankie plastik denge durumuna göre bulunan değer 3 katıdır. Yanal direnç ve toprak basıncı dağılımı, kazık kesitinden bağımsızdır. Hesaplanan yerdeğiştirme için, yanal direncin tamamı uygulanmalıdır. Denklem 3.30'da z derinliği için P yanal toprak basıncı gösterilmektedir. Bu denklemde, K_p pasif toprak basıncı katsayısıdır.

$$P = 3D\gamma zK_p \quad (3.30)$$

Denklem 3.31'de K_p değeri için bağıntı gösterilmektedir. Burada ϕ' kayma mukavemeti açısıdır.

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (3.31)$$

İri daneli zeminler için serbest başlıklı kazıkların yanal yük direnci şekil 3.10'da ve şekil 3.11'de gösterildiği gibidir. Burada zemin reaksiyonu ve kazığa etkiyen moment dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Kum zeminlerde kısa kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).

Kazıkta oluşan moment, kazığın akma momentinden küçük ise Şekil 3.10'daki gibi kısa kazıktır. Bu durumda taşıyabileceği maksimum yanal yük, denklem 3.32'de gösterildiği gibi hesaplanır.

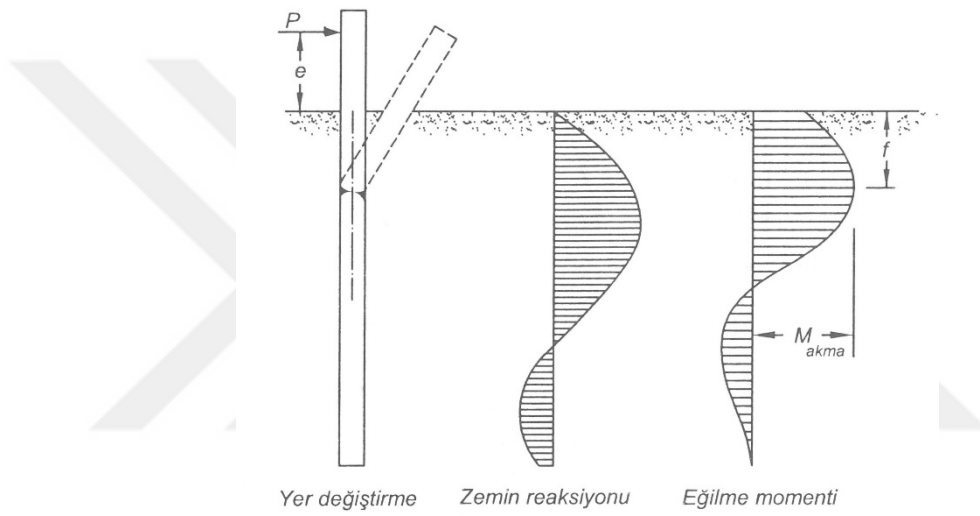
$$P_n = \frac{0.5\gamma DL^3 K_p}{3 + L} \quad (3.32)$$

Maksimum momentin oluştuğu noktada, kesme kuvveti sıfır olacağı için, maksimum momentin oluştuğu f derinliği aşağıdaki bağıntı 3.33 ile hesaplanabilir. Maksimum moment denklem 3.34'deki gibi hesaplanabilir.

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{P}{\gamma D K_p}} \quad (3.33)$$

$$M_{maks} = P \left[e + \left(\frac{2f}{3} \right) \right] \quad (3.34)$$

Eğer denklem 3.34’de bulunan maksimum moment değeri, kazık kesitinin akma momentinden daha büyük ise, kazık uzun kazık biçiminde davranış gösterir. f derinliğinde plastik mafsal oluşur, nihai yanal direnç, denklem 3.33 ve 3.34’de gösterildiği üzere hesaplanır. Şekil 3.11’de uzun kazıklara gelecek toprak basıncı ve kazığa etkiyen moment grafiği gösterilmiştir. Şekil 3.12 ve 3.13’deki grafikler yardımıyla hesaplanır.



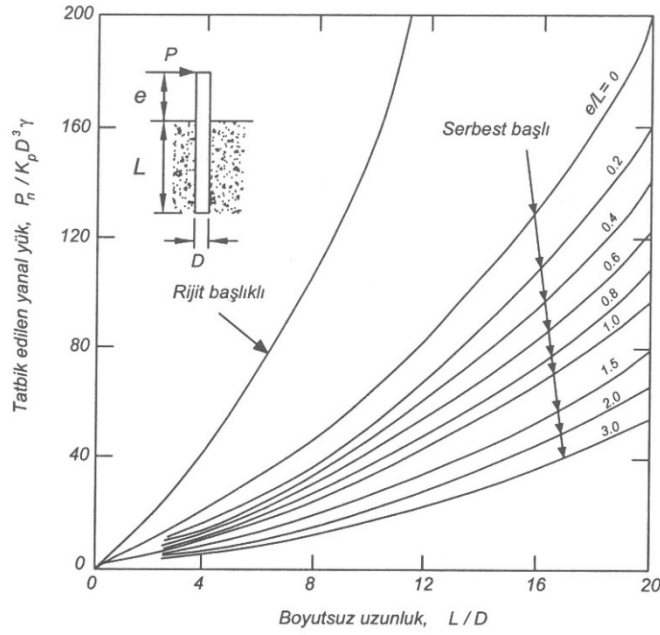
Şekil 3.11 : Kum zeminlerde uzun kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).

Rijit kazıklar için, kısa kazıklar, orta boy kazıklar ve uzun kazıklar ayrı ayrı incelenmelidir. Kısa kazıklar için maksimum moment başlığın altındadır. Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Bu yüzden maksimum yük, zeminin pasif direnciyle aynı büyüklüktedir. Denklem 3.35 ile yanal direnç hesaplanır. Maksimum moment için denklem 3.36 kullanılır.

$$P_n = 1.5 \gamma L^2 DK_p \quad (3.35)$$

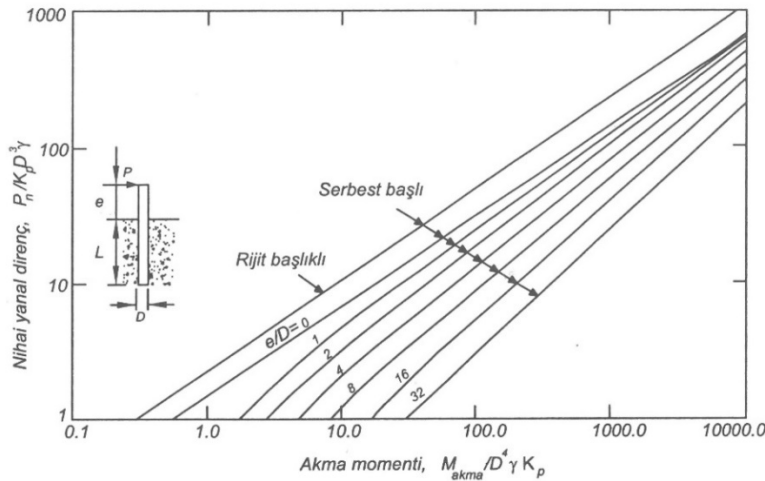
$$M_{maks} = \frac{2PL}{3} \quad (3.36)$$

İri daneli zeminler için, kısa kazıklar ve kısa kazıkların nihai yanal yükü bulunmasında kullanılan grafikler şekil 3.12 ve şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Kum zeminlerde kısa kazığın nihai yanal yükü grafiği (Broms, 1964b).

Maksimum moment ile kesitin akma momentinin eşit olduğu durumda, kazık orta boy kazıktır. Plastik mafsal başlığın hemen altında oluşur ve kazığın dönmesi nedeniyle ortaya çıkan pasif toprak direnci yerine geçen bir F kuvveti denklem 3.37’deki gibi hesaplanır.



Şekil 3.13 : Kum zeminlerde uzun kazığın nihai yanal yükü grafiği (Broms, 1964b).

$$F = \left(\frac{3}{2}\right)\gamma DL^2 K_p - P \quad (3.37)$$

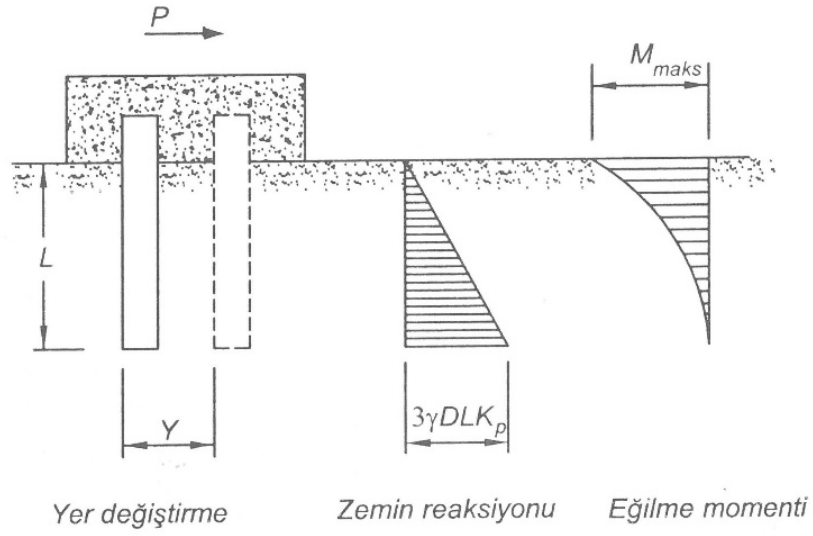
Moment, başlığın hemen altındaki noktaya göre alınıp, F yerine konularak aşağıdaki denklem 3.38 elde edilir.

$$M_{akma} = 0.5\gamma DL^3 K_p - P_n L \quad (3.38)$$

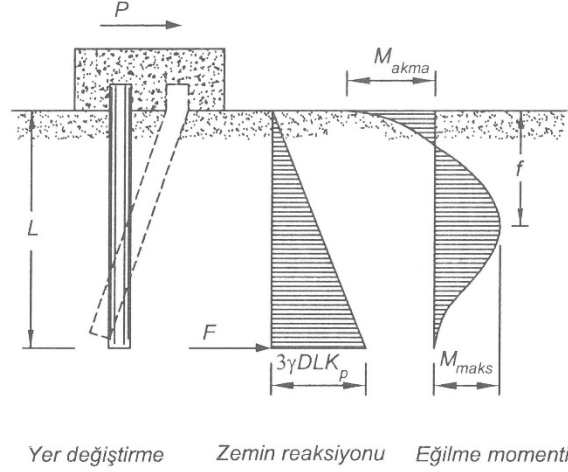
Bulunan değerler, denklem 3.39’da yerine konularak nihai yanal yük hesaplanır.

$$P_n = \frac{M_{akma} - 0.5\gamma DL^3 K_p}{L} \quad (3.39)$$

Şekil 3.14 ve şekil 3.15’de iri daneli zeminlerde, rijit başlıklı kazıklar için yanal direnci, zemin reaksiyon ve eğilme moment diyagramları gösterilmiştir.

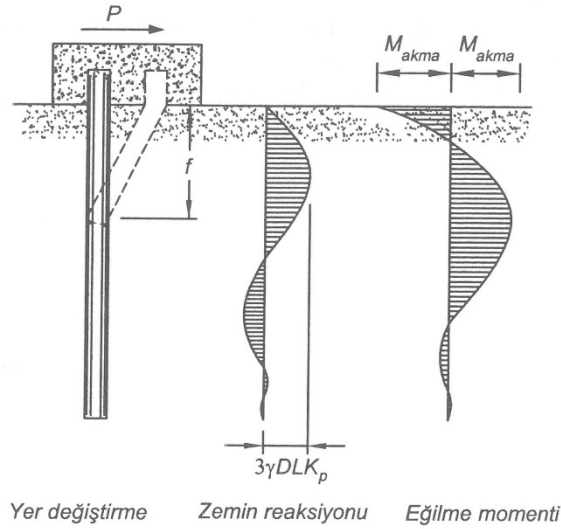


Şekil 3.14 : Kum zeminlerde kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).



şekil 3.15 : Kum zeminlerde kısa kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).

şekil 3.16’da iri daneli zeminlerde, rijit başlıklı uzun kazıkların yanal direnci, zemin reaksiyon ve eğilme momenti diyagramları gösterilmiştir.



şekil 3.16 : Kum zeminlerde uzun kazığın yanal direnci (Broms, 1964b).

Herhangi bir derinlikteki kazığın akma momenti, eğilme momentinden küçük ise orta boy kazıktan uzun kazık durumuna geçilmiş olur. Bu durumda f derinliğinde ikinci bir mafsal oluşur. Bu durumda denklem 3.40 ile nihai yük hesaplanır. Hem kısa, hem uzun kazıklar için ise şekil 3.12 ve şekil 3.14’deki grafikler kullanılarak nihai yük hesaplanabilir.

$$P_n = \left[e + \frac{2}{3} f \right] = 2M_{akma} \quad (3.40)$$

3.5 Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

3.5.1 Kum zeminlerde yanal yüklü kazıkların davranışı

Ananthanathan ve diğ. (2008) yaptığı çalışmada model kazık, iyi derecelendirilmiş kum zemin içine yerleştirilmiştir. Kazıkları yanal yüklemiş ve yük–şekil değiştirme ilişkisini gözlemişlerdir. Laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreleri, lineer ve non-lineer analizlerde kullanmışlardır ve buna göre de model kazığın davranışını incelemişlerdir. Teorik analizlerden elde edilen sonuçlarla, model kazıkların yanal yüklendiği deneylerin sonuçları karşılaştırıldığında, nihai yanal yük elde edilmiş ancak deplasman ile ilgili tatmin edici bir sonuç elde edilememiştir.

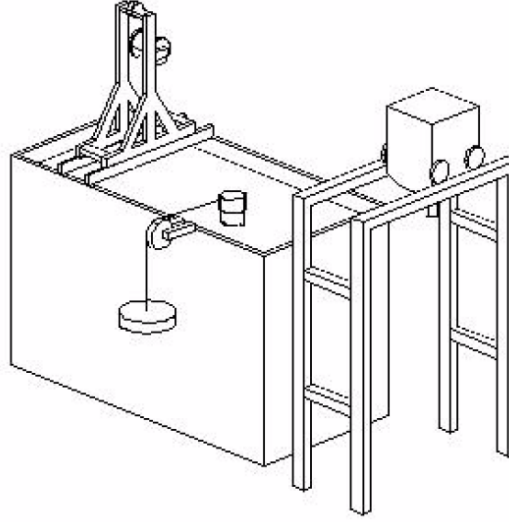
Ananthanathan ve diğ. (2008) zemin parametrelerini, laboratuvar deneyleri ile belirlemişlerdir. Bunun için piknometre ve elek analizi deneylerini yapmışlardır. Kayma mukavemeti açısını bulmak için ise kesme kutusu deneyi yapmışlardır. Kumun elastisite modülünü ise üç eksenli basınç deneyi ile belirlemişlerdir.

Deneylerde 50 mm ve 75 mm çaplarında 600 mm ve 900 mm uzunluğunda beton silindir model kazıklar kullanmışlardır. Model kazıklar boyutlarının elverdiği şekilde donatılandırılmaya çalışılmıştır. 75 mm çapındaki silindir model kazığa, 30 mm aralıkla, 4 adet 6 mm çapında demir çubuk yerleştirmişlerdir. Sisteme etki eden yanal yükü sağlayabilmek için 2 mm çapında çelik kablo kullanmışlardır.

50 mm çapındaki silindir model kazık için ise sadece 1 adet demir çubuk kullanmışlardır. Bu demir çubuğu, silindir model kazığın merkezine yerleştirmişlerdir. Yine bu model kazıkta da yanal yükü sağlayabilmek için 2 mm çapında çelik kablo kullanmışlardır.

Model kazıkların başlıklarını deney aşamasında uygulanacak yanal yükten dolayı zarar görmesin diye, çelik başlıklar ile koruma altına almışlardır. Yanal yükü uygulamak için gereken 2 mm kabloyu, bu başlığa takmışlardır. Model kazıkları, betondan ürettikleri için, dayanımını alana kadar 28 gün su içinde bekletmişlerdir. Bu deney için 3x1.8x1,5 m boyutlarında, metal bir kutu kullanmışlardır. Deney kutusu kum zeminle uniform bir şekilde doldurulmak için yağmurlama makinesi (hopper

device) kullanılarak doldurulmuştur. Kazığı yerleştirmek için ise kazığı sabit tutan, ve kazığı kum doldurulduktan sonra yerleştirmeye yarayan bir yerleştirme ünitesi kullanılmıştır. Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Deney düzeneği (Ananthanathan ve diğ, 2008).

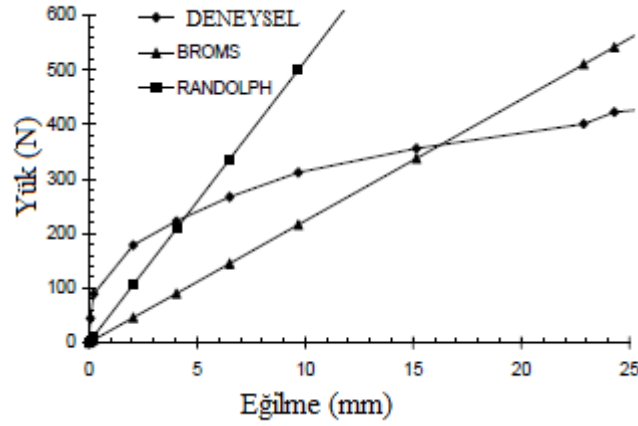
Yükleme için makaralı bir düzenek kullanmışlardır. Deneylerde kazıkların yerleşimini ve deneyin yapıldıktan sonra görünüşünü şekil 3.18’de gösterilmiştir.



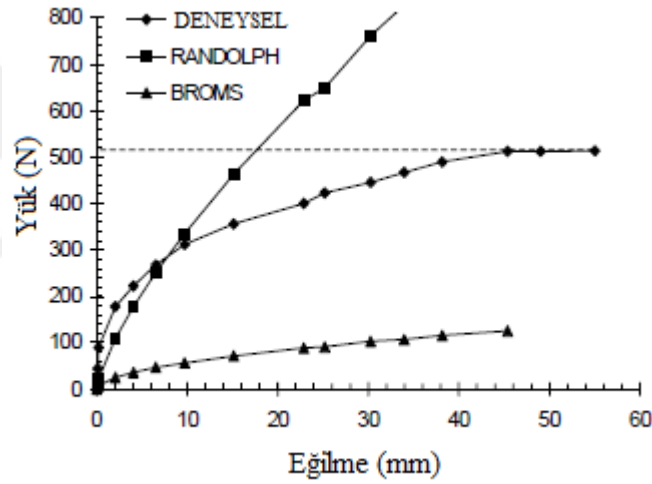
Şekil 3.18 : Deney sonrası (Ananthanathan ve diğ, 2008).

Her bir kazık için yük-eğilme davranışı grafiklerle ayrı ayrı gösterilmiştir. Aynı grafikte, Broms metodu ve Randolph metodu ile elde edilen tahmini davranışlar karşılaştırılmış, lineer ve nonlineer analiz olarak iki grafiğe ayrılmıştır. Şekil 3.19’da

ve şekil 3.20’de model kazığın her iki durumu için davranışları sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Lineer yük-eğilme davranışı (Ananthanathan ve diğ, 2008).



Şekil 3.20 : Non-linear yük-eğilme davranışı (Ananthanathan ve diğ, 2008).

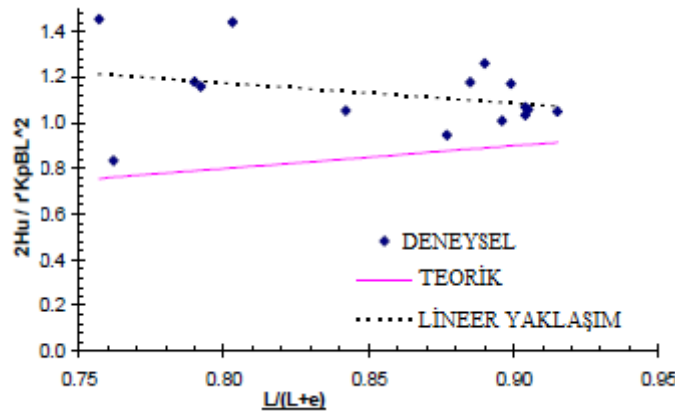
Grafiklerde görüldüğü üzere, model deneyin yük-eğilme davranışı, rijitliğin azalması ve yükün artması ile doğrusal olmayan davranıştır. Teorik ve deneysel yöntem karşılaştırıldığında, Randolph yöntemi hem lineer, hem de non-linear durum için, en iyi sonucu vermiştir. Deneysel sonuçlar, Randolph metodundaki sonuçlara daha yakın çıkmıştır. Brooms yönteminde sonuçlar daha uzaktır ve sadece lineer davranış için kabul edilebilir sonuç vermiştir.

Davis ve Poulos (1980) tarafından verilen teorik nihai yük değerleri, deneylerde bulunan nihai yük değerinden daha küçüktür. Çizelge 3.2’de kesit özelliklerine göre

teorik ve deneysel nihai yükler gösterilmiştir. Şekil 3.21’de verilen değerler grafikte karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.2 : Nihai yanal yük karşılaştırması (Ananthanathan ve diğ, 2008).

Kazık No	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Nihai Yanal Yük (N)	
			Deneysel	Teorik
1	660	75	890	779
2	770	75	1380	1037
3	480	50	320	256
4	640	50	511	473
5	780	50	810	719



Şekil 3.21 : Nihai yanal yük karşılaştırması grafiği (Ananthanathan ve diğ, 2008).

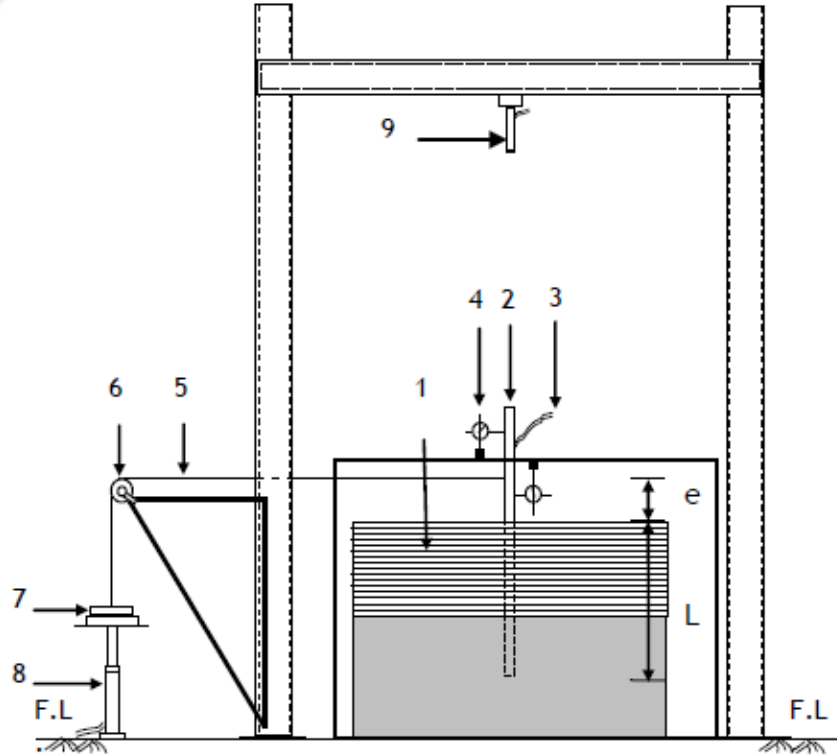
Deney sonuçları ve teorik analizlerin karşılaştırılması sonucunda, teorik analizlerin eksik ve güçlü yanlarını gözlemlemişlerdir. Broms yönteminin yetersiz olduğunu gözlemişlerdir. Non-linear davranış için, Randolph yönteminin, Broms yöntemine göre çok daha iyi olduğu görülmüştür. Yük değeri düşük olduğu durumda, teorik değerlerin, deneysel değerlere yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Yük miktarı arttıkça teorik değerler ile deneysel değerlerin daha çok farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

3.5.2 Kum zeminlerde model kazıkların tekrarlı yüklenmesi

Qin ve Guo (2007) yaptığı çalışmada, model kazıklarda deneysel olarak yanal yüklerin etkisi incelemişler ve deney yapmışlardır. Üç tip test uygulanmıştır. Statik ve tekrarlı olarak, iki şekilde yük uygulamışlardır. Şekil 3.22’de araştırmacıların kullandığı sistem fotoğrafı, Şekil 3.23’de sistem şeması mevcuttur.



Şekil 3.22 : Deney düzeneği (Qin ve Guo, 2007).



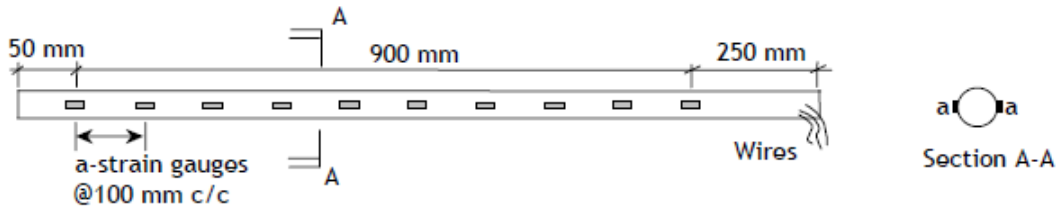
Şekil 3.23 : Deney şeması (Qin ve Guo, 2007).

Qin ve Guo, (2007)'nin kullandığı deney düzeneği:

1-Deney kutusu, 2-Model Kazık, 3-Birim deformasyon ölçer kabloları, 4-Deplasman Ölçer, 5-Çelik kablo, 6-Makara, 7-Ağırlık, 8-Hidrolik krika, 9-Dikey hidrolik krika

Deney kutusunun boyutları 1x1x0.8 m dir. Deney kutusunun üst kısmını 25 mm'lik, kare kesitli alüminyum çerçevelerden imal etmişlerdir ve 400 mm boyunca bu çerçeveleri yerleştirmişlerdir. Kutunun üst kısmına dikey bir krika bağlamışlardır. Bu sistemle model kazıkları kum içerisine yerleştirmişlerdir. Yanal yükü ise ağırlık ve krika sisteminin birlikte olduğu, makaralı bir sistem kurarak düzenlemişlerdir.

Deney başlangıcında, ağırlıklar hidrolik krika tarafından taşınmaktadır. Bu ağırlıkları kazığın başına çelik bir kablo ile bağlamışlardır. Hidrolik krika, içindeki havanın boşaltılmasıyla, yavaş yavaş yükü serbest bırakır. Böylece çarpışma etkisi olmadan, dikkatlice yük serbest bırakılarak yanal yük uygulanmış olur. Şekil 3.23'de model kazığın şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.24 : Model kazığın birim deformasyon ölçer yerleşim şeması ve ölçüleri (Qin ve Guo, 2007).

Qin ve Guo, (2007) model kazıkları alüminyumdan üretmişlerdir. Kazığın boyu 1200 mm ve dış çapının büyüklüğü 32 mm'dir. Kalınlığı ise 1,5 mm'dir. Model kazığın üzerinde toplam on çift, yani 20 adet birim deformasyon ölçer bulunmaktadır. Bunları 100 mm aralıklarla yerleştirmişlerdir. Her bir noktada bir çift birim deformasyon ölçer olmasının nedeni, bu devrelerinin yarım köprülü olmasıdır. Bu sistem çeyrek köprülü devreye göre daha hassas sonuç vermektedir.

Deney başlamadan önce, ilk olarak birim deformasyon ölçerleri tek tek kalibre etmişlerdir. Birim deformasyon ölçerler hassas oldukları için, üzerlerini epoksi ile kapatıp, korumaya almışlardır. Öncelikle deney kutusu yağmurlama mekanizmasının altına getirilmiştir. Kum, 600 mm yükseklikten yağmurlama yöntemiyle yerleştirmişlerdir. Bu işlem bittikten sonra, deney kutusunu eski yerine dikkatlice taşıyıp, model kazığı dikey krika kullanarak yerine çakmışlardır.

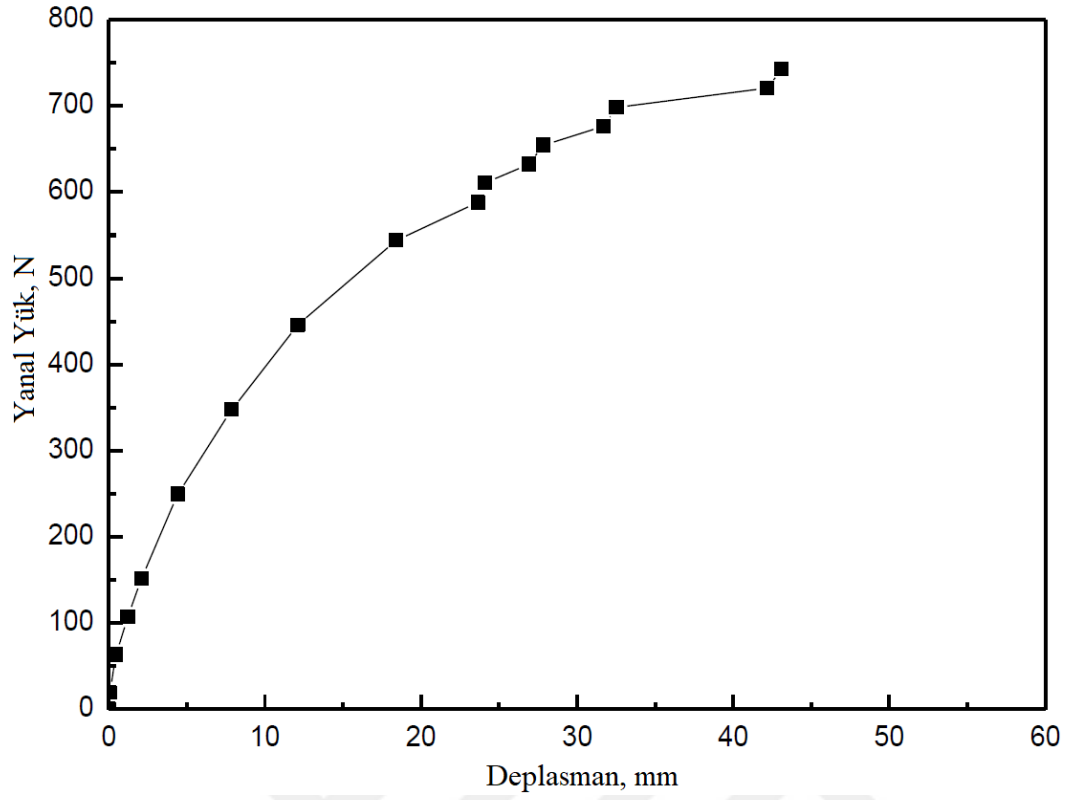
Daha sonra makara sistemini ve yükün bağlanacağı üçgen karkası sisteme dahil etmişlerdir. Yatay yük uygulama elemanlarını, ağırlık ve hidrolik kriko monte etmişlerdir. Her bir deney bitiminde, kumu tamamen boşaltarak aynı prosedüre yeniden başlamışlardır.

Kum içindeki 500 mm uzunluğundaki ve 115 mm dış merkezli model kazıklarda, üç tip deney yapmışlardır. Çizelge 3.3’de gösterilmektedir. Model kazık sadece kum tarafından tutulu, yani başlık kısmı serbesttir. Sadece yanal yük etkisindedir. Birinci deney için yükü, göçme gerçekleşene kadar, aşama aşama arttırmışlardır. İkinci deney için yüklemeyi tek doğrultuda tekrarlı olarak uygulamışlardır. Örnek vermek gerekirse, yanal yük minimum $P_{\min} = 0$ ’dan, maksimum $P_{\max} = 215$ N’a çıkarılmış ardından da minimum $P_{\min} = 0$ ’a geri dönmüştür. Bu deneyi 50 defa tekrarlamışlardır. Ardından model kazığı bir defa, göçme gerçekleşene kadar yüklemişlerdir. Üçüncü deney için aynı prosedürü tekrarlamışlardır.

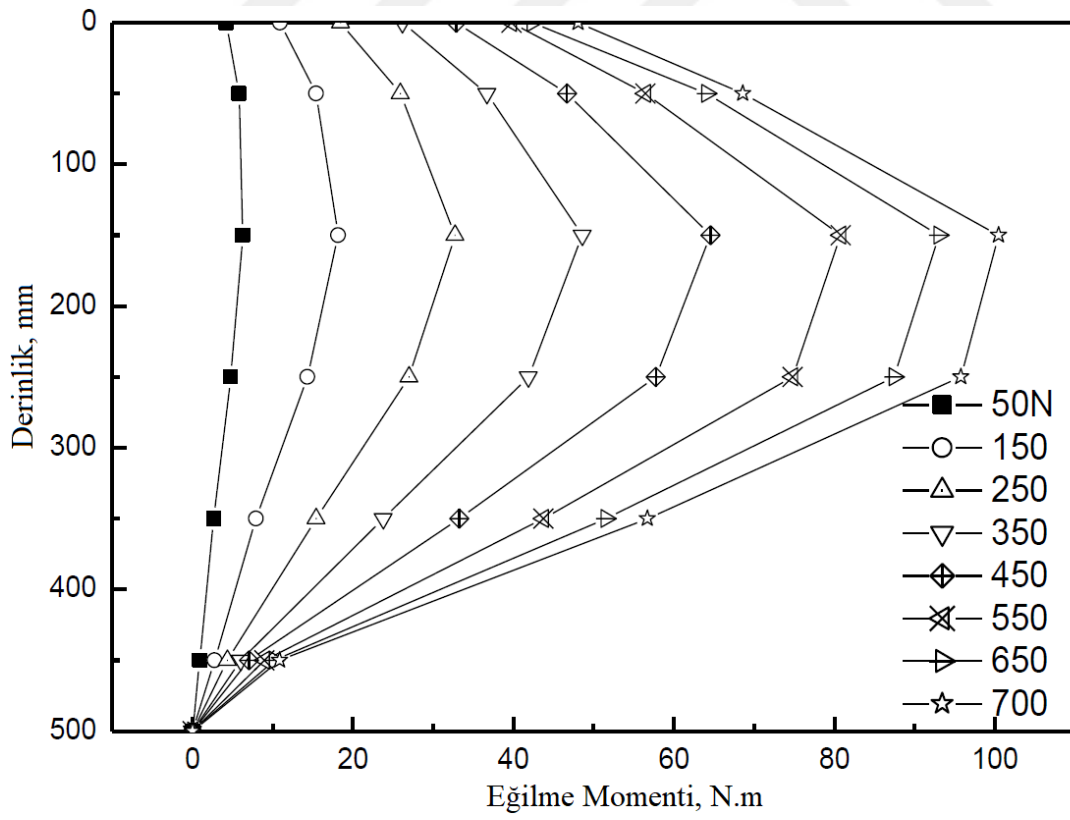
Çizelge 3.3 : Deney detayları (Qin ve Guo, 2007).

Deney No	Yükleme	Maksimum Yük, $P_{\max}$, N	Minimum Yük, $P_{\min}$, N	Uzunluk L, mm	Dış merkezlilik, e, mm
1	Tekil	720		500	115
2	Tekrarlı	215	0	500	115
3	Tekrarlı	430	0	500	115

Birinci deneyi model kazığın nihai taşıma kapasitesini bulmak için gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.25’de yanal yük ile yüzeydeki deplasman ilişkisi gösterilmektedir. Bu hiperbolik grafikte, nihai taşıma gücünü 740 N olarak hesaplamışlardır. Şekil 3.26 model kazık boyunca eğilme momenti dağılımını göstermektedir.

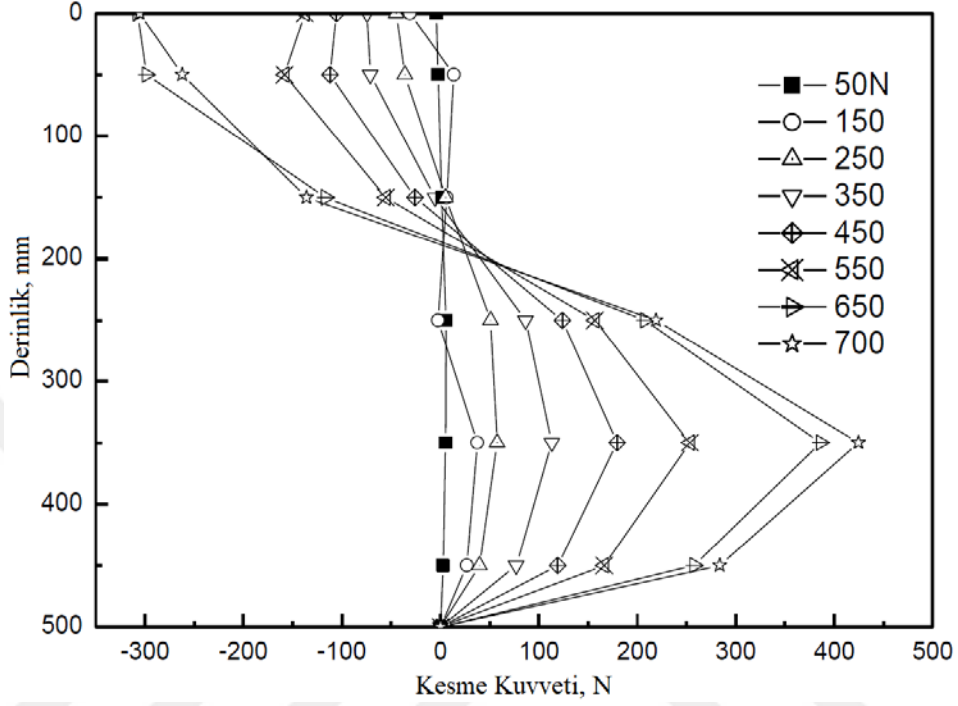


Şekil 3.25 : Deney 1 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).

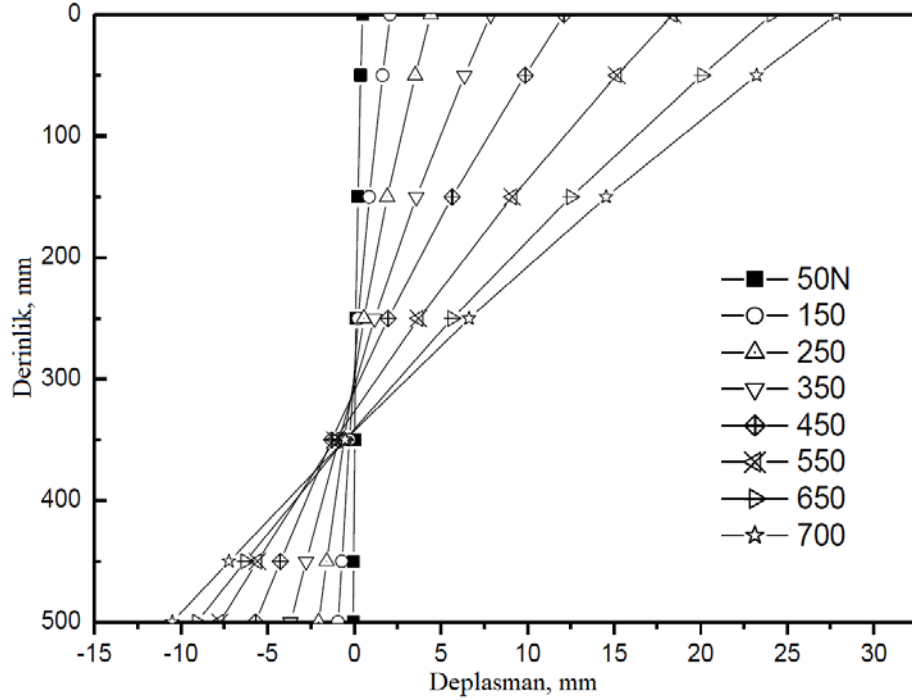


Şekil 3.26 : Deney 1 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).

Eğilme momenti, yanal yük arttıkça artmaktadır. Örneğin, zemin yüzeyinden 160 mm derinlikte yanal yük 700 N iken, maksimum eğilme momenti 100,5 Nm'dir. Şekil 3.27'de derinlik ve kesme kuvveti grafiği gösterilmektedir. Şekil 3.28'de derinlik ve deplasman grafiği yüklere göre gösterilmektedir.

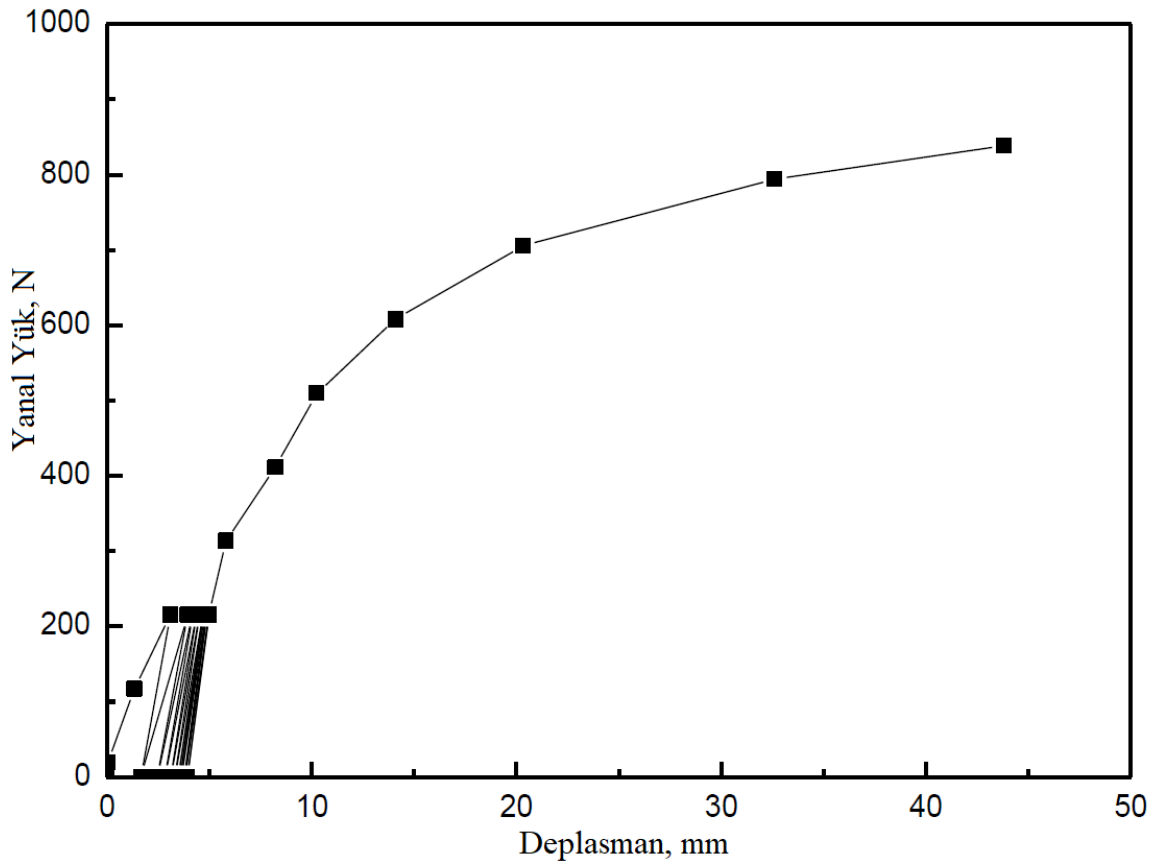


Şekil 3.27 : Deney 1 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).

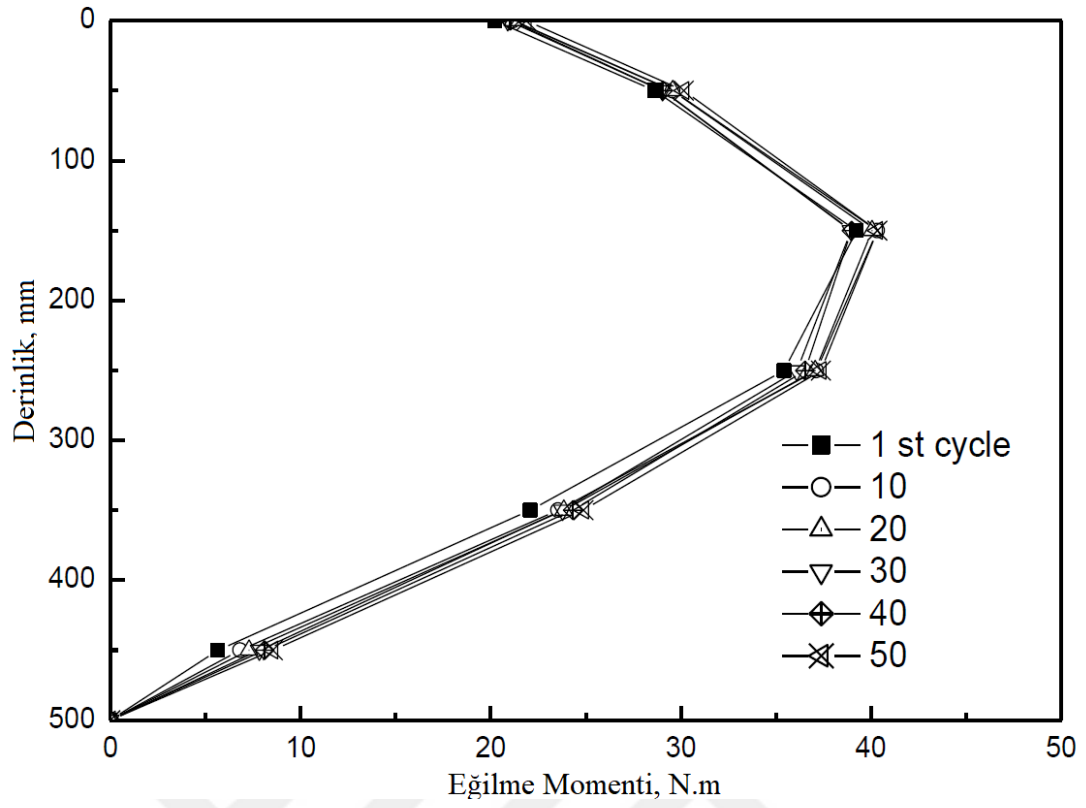


Şekil 3.28 : Deney 1 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).

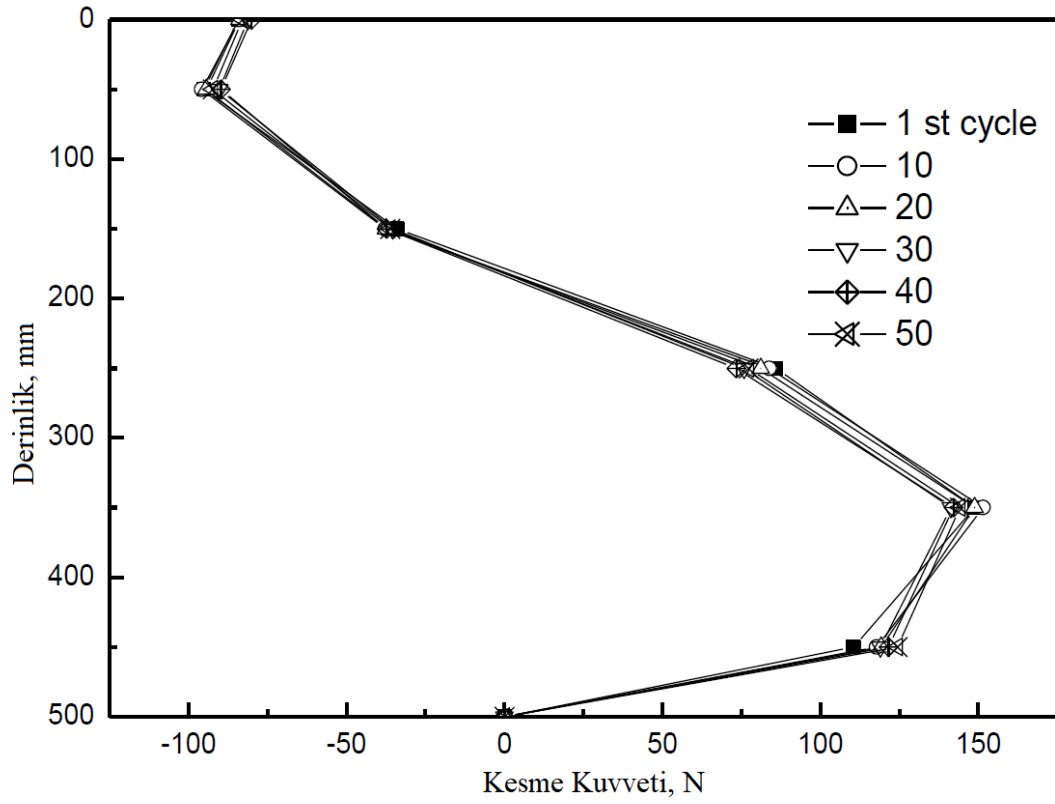
Deney 2 için, Şekil 3.29, 3.30, 3.31 ve 3.32’de model kazığın davranışları gösterilmektedir. İlk beş tekrarlı yükleme için, birim deformasyon ölçer ve deplasman ölçer ölçümleri kaydedilmiştir ve her beşinci yükleme sonrası grafiklerde gösterilmiştir. Deney 3 için de aynı durum geçerlidir. Tekrarlı yükün, yükleme sayısı arttıkça toplam yanal deplasman miktarı artmıştır. Yükleme sayısı arttığında, model kazık boyunca oluşan eğilme momentinde ufak artışlar gerçekleşmiştir. Zemin yüzeyindeki, ilk ve ellinci yanal yükleme için toplam yanal deplasman 3,1 mm ve 4,9 mm’dir.



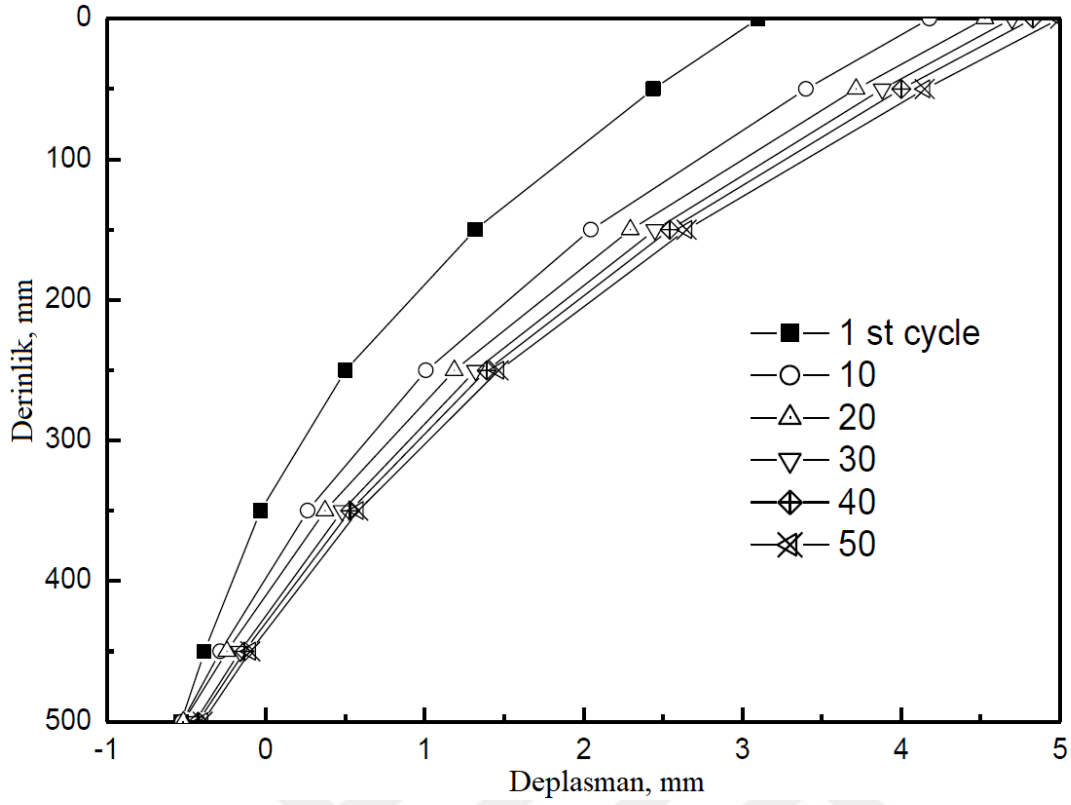
Şekil 3.29 : Deney 2 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).



Şekil 3.30 : Deney 2 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).

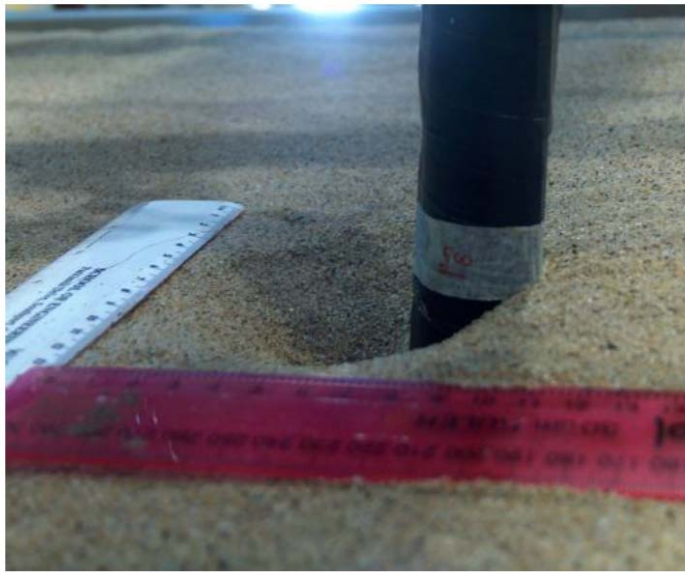


Şekil 3.31 : Deney 2 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).



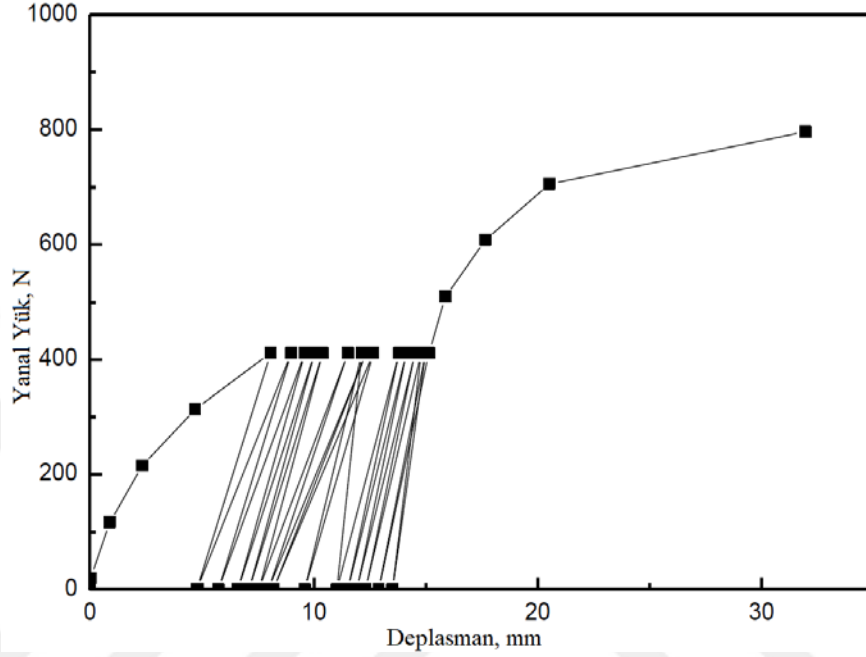
Şekil 3.32 : Deney 2 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).

Şekil 3.33'de model kazık etrafında plastik deformasyon gösterilmektedir. Tekrarlı yük altında, model kazık ve kum arasındaki ayrışma, boşluk oluşturmıştır. Yükleme tekrarının sayısı arttıkça, göçme bölgesinin genişliğinin ve boşluğun derinliğinin arttığı farkedilmiştir. Oluşan boşluğun derinliği, ellinci yüklemeden sonra yaklaşık 24 mm'dir.

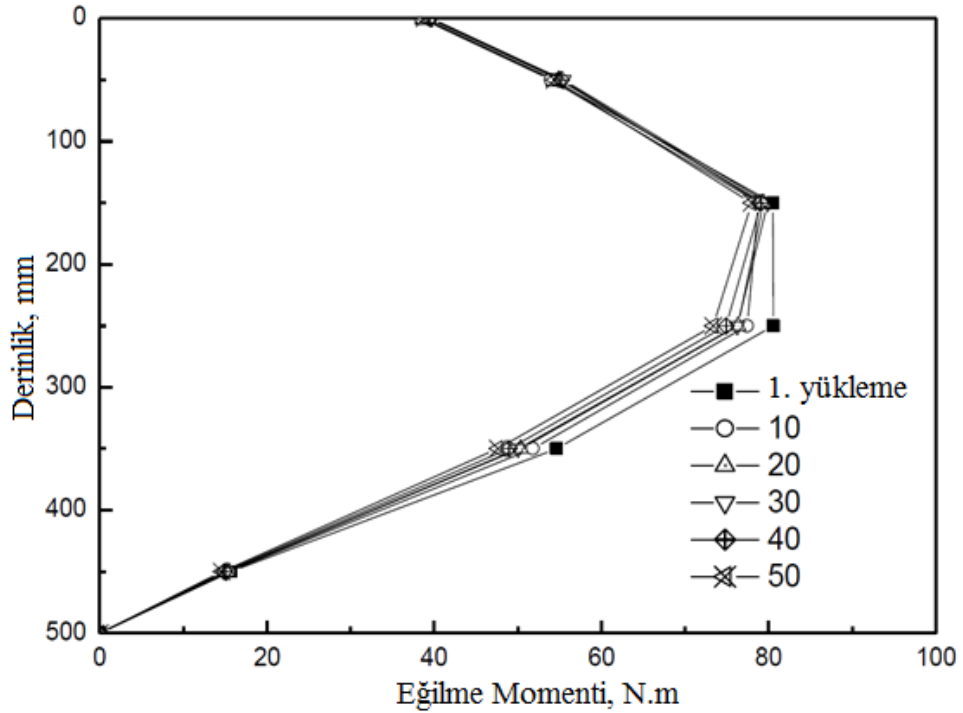


Şekil 3.33 : Deney 2 için model kazık etrafındaki deplasman (Qin ve Guo, 2007).

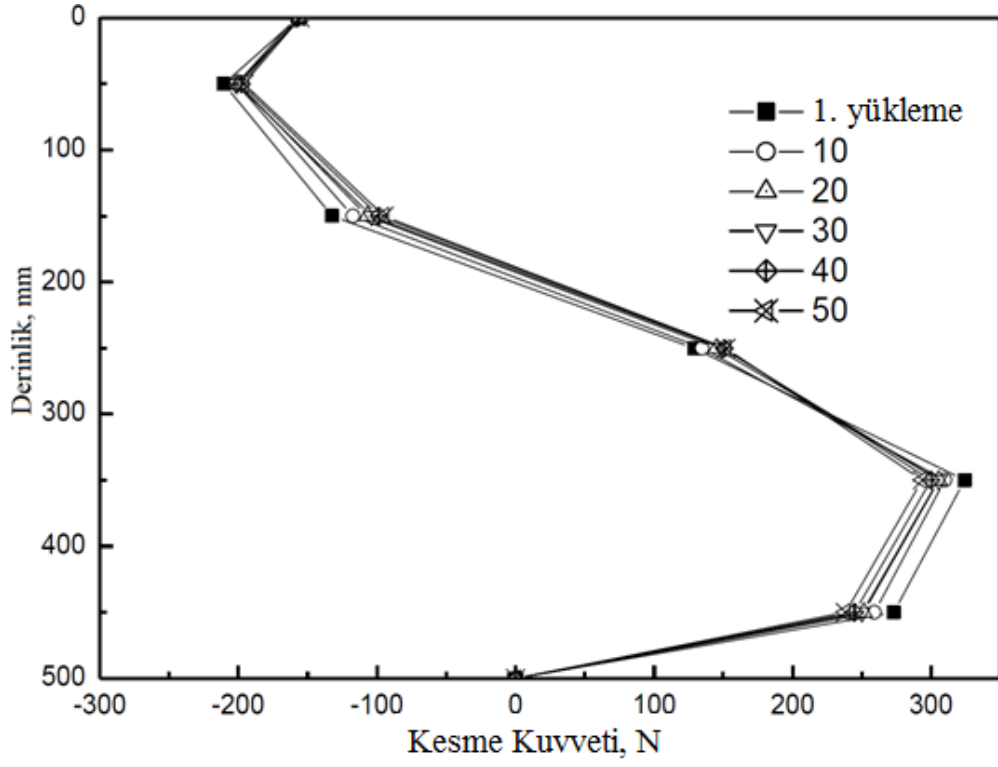
Deney 3'ü, deney 2 ile aynı koşullar altında gerçekleştirmişlerdir. Ancak tekrarlı yükün miktarını 430 N'na yükseltmişlerdir. Bu değer, ilk deneyde elde edilen nihai taşıma kapasitesi, 740 N'nun %60'ına tekabül eder. Bu şekilde, model kazık davranışında, yük miktarının etkisini incelemişlerdir. Şekil 3.34, 3.35, 3.36, 3.37'de deney sırasında model kazık davranışı grafiklerle gösterilmiştir.



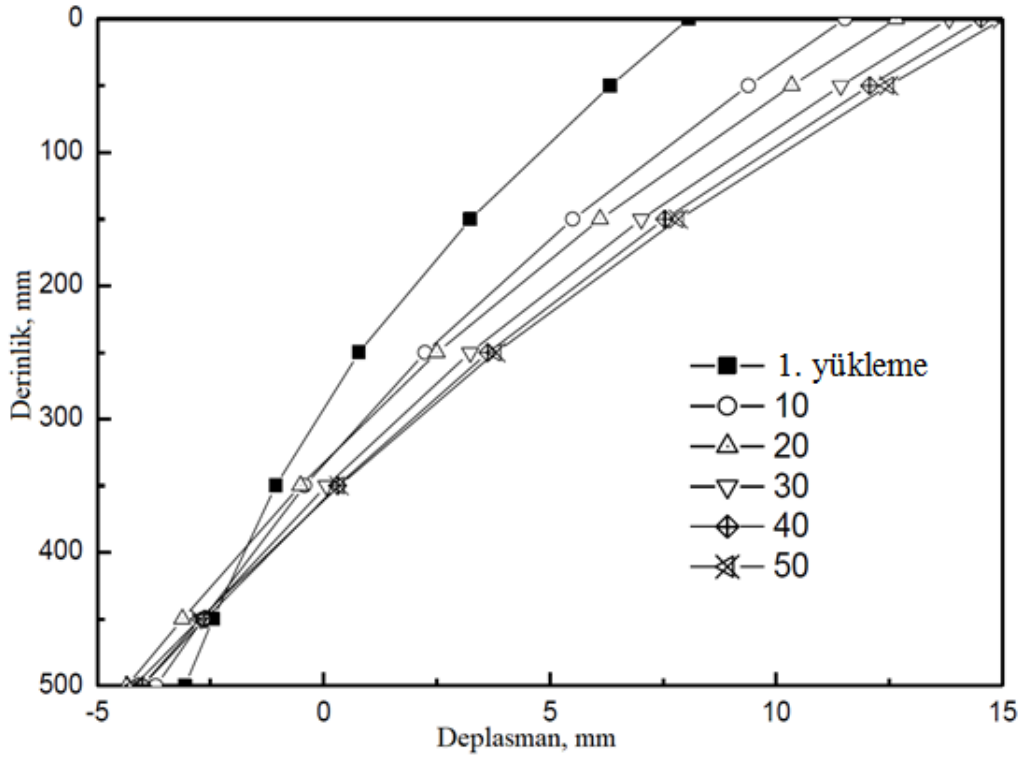
Şekil 3.34 : Deney 3 için yanal yük-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).



Şekil 3.35 : Deney 3 için derinlik-eğilme momenti grafiği (Qin ve Guo, 2007).



Şekil 3.36 : Deney 3 için derinlik-kesme kuvveti grafiği (Qin ve Guo, 2007).



Şekil 3.37 : Deney 3 için derinlik-deplasman grafiği (Qin ve Guo, 2007).

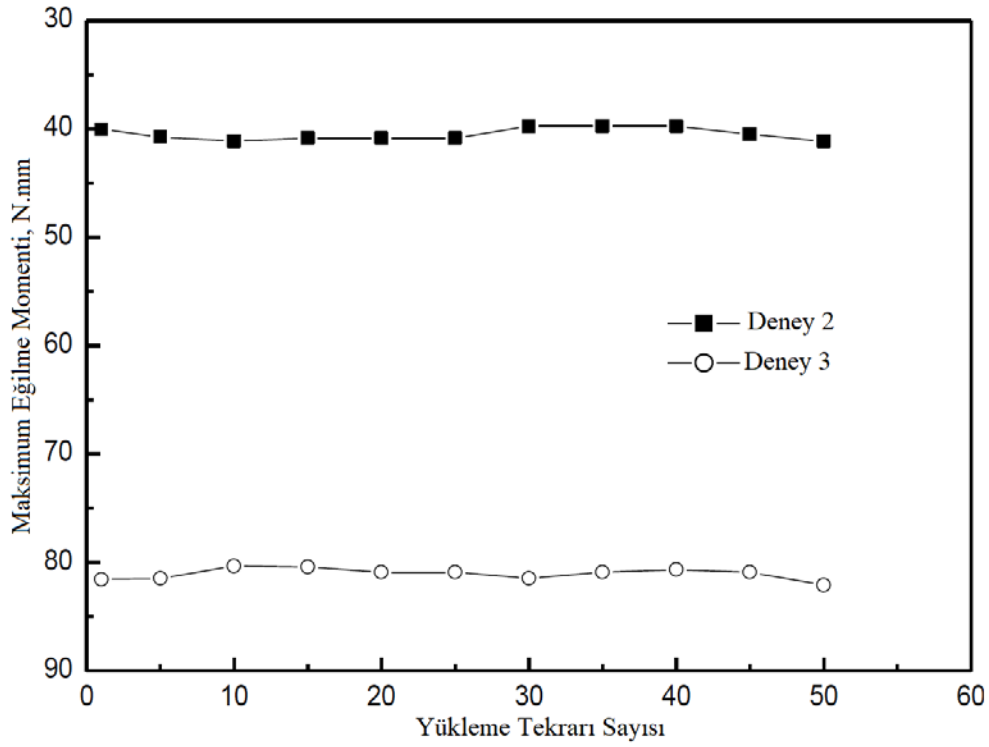
Deney 3'te yanal yük ile deplasman ilişkisi, deney 2 ile benzerdir. Ancak maksimum eğilme momenti ellinci yüklemeden %4 daha düşüktür. Plastik deformasyon bölgesi de deney 2'ye göre daha büyük olup, oluşan boşluk ellinci yükleme tekrarında 33,4 mm'ye ulaşmıştır. Çizelge 3.4'de kritik, model kazık davranışları özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 : Model kazığın davranışı (Qin ve Guo, 2007).

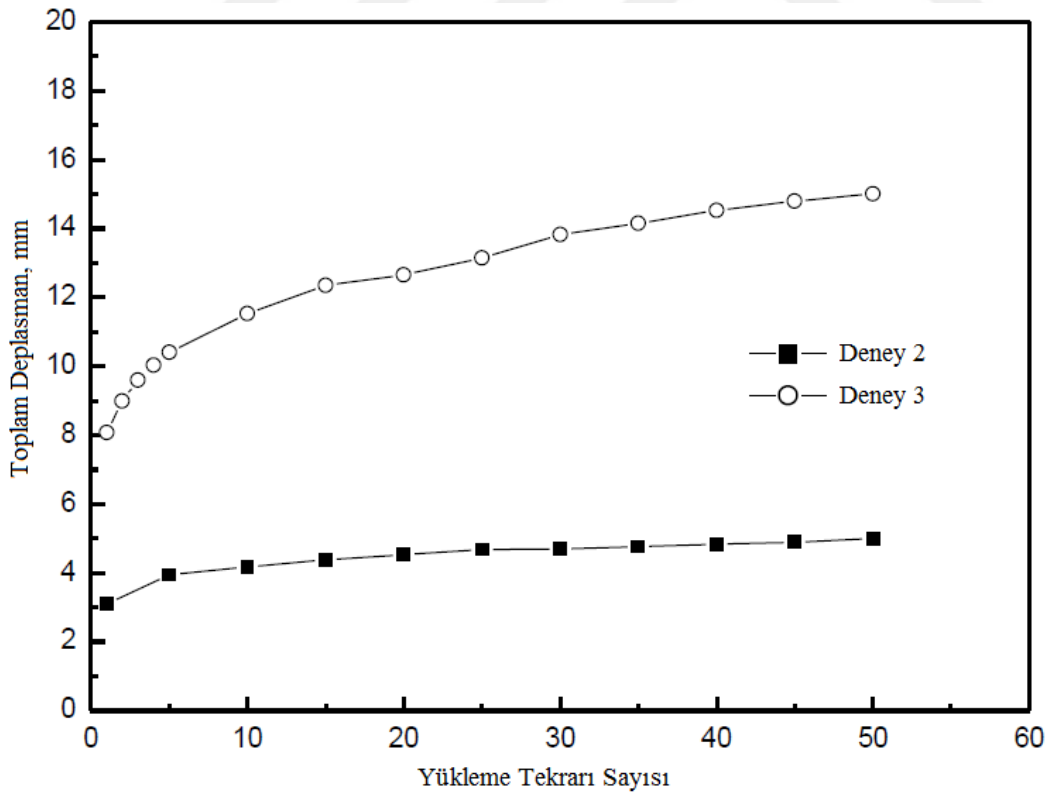
Deney	Yükleme Tekrarı Sayısı	M_{maks} , N.m	V_{maks} , N	X_m , mm	y_g , mm	P_u , N
Deney 2	1	40.1	144	160	3.1	810
	50	41.3	148	160	4.9	
Deney 3	1	81.5	324	220	8.1	820
	50	78.5	293	220	14.9	
Deney 1	Sabit	100.5	424	160	27.8	740

Burada M_{maks} , maksimum moment, V_{maks} kesme kuvveti, X_m model kazıkta maksimum momentin olduğu derinlik, y_g model kazığın zemin yüzeyinde yaptığı yanal deplasman miktarını temsil eder.

Şekil 3.38'de, deney 2 ve deney 3 için, maksimum moment ve yanal deplasman, yükleme sayısına göre gösterilmektedir. İlk 10 yükleme, ardından gelen yüklemelere göre daha etkilidir. Toplam yanal yük miktarı birinci yüklemeden ellinci yüklemeye kadar hep artmıştır ancak her adımda artış miktarları azalmıştır. Yükleme adımlarının artışının maksimum momente etkisi kısıtlı olmuştur. Şekil 3.39'da deney 2 ve 3'de yükleme tekrarlarının moment ve deplasman üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Burada görülmektedir ki, yük miktarı, yükleme sayısı miktarından çok daha fazla etkilidir. Yük büyüklüğü 215 N'dan 2 katı 430 N'a çıkarıldığında, daha birinci yüklemeye yanal deplasman 2.6 katına çıkmıştır. 50. yükleme tekrarında ise 3 katına gelmiştir.



Şekil 3.38 : Deney 2 ve deney 3 için maksimum eğilme momenti-yükleme tekrarı sayısı karşılaştırma grafiği (Qin ve Guo, 2007).



Şekil 3.39 : Deney 2 ve deney 3 için maksimum toplam deplasman-yükleme tekrarı sayısı karşılaştırma grafiği (Qin ve Guo, 2007).

Qin ve Guo, (2007) yaptığı çalışmada, üç tip deney yapılmıştır. Tekrarlı yanal yükler altındaki model kazık davranışını, statik yükleme ile karşılaştırmışlardır.

Sonuçta görmüşlerdir ki, model kazığın davranışı, tekrarlı yük sayısından çok, yükün büyüklüğüne bağlıdır. Ancak bu büyüklüğün etkisini daha iyi anlamak için daha çok çalışma yapmak gerektiği de belirlemişlerdir (Qin ve Guo, 2007).

3.5.3 Kum zeminlerde yanal yüklü model baret temellerin davranışı

El Wakil ve Nazir, (2013) yaptığı çalışmada, kum zeminlerdeki dikdörtgen kesitli model baret temellerin karşılayabileceği yanal yükü incelemişlerdir. Bunun için yirmi sekiz adet model baret temeli, farklı sıklıktaki kum zeminde denemişlerdir. Buna ek olarak en boy oranlarının etkisini, yüklemenin yönünü ve eksantriklik etkilerini incelenmişlerdir.

El Wakil ve Nazir, (2013) kum zeminlerde baret temellerin davranışını anlayabilmek için, küçük ölçekli bir dizi deney yapmışlardır. 3 tip model baret temel kesiti seçip kullanmışlardır. Bunların kesitleri 50x50 mm, 50x100 mm ve 50x150 mm boyutlarındadır. Bu model baret temeller kalınlıkları 3 mm olan çelik plakalardan elde edilmiştir. Uzunlukları 710 mm'dir.

Yanal yük karşısındaki baret temelin davranışını anlamak için yirmi sekiz adet laboratuvar deneyi yapmışlardır. Model baret temelleri yanal yüklemişlerdir. Bunun için çelik bir tel kullanmışlardır. Bu teli sürtünmesiz, makara sistemiyle baretin üst ucuna monte etmişlerdir. Yükleme için standart ağırlıklar kullanmışlardır. İki adet deplasman ölçme cihazını, yanal olarak, model baret temelin üst ucuna yerleştirmişlerdir. Bu şekilde, yanal yer değiştirme ölçülebilmektedir.

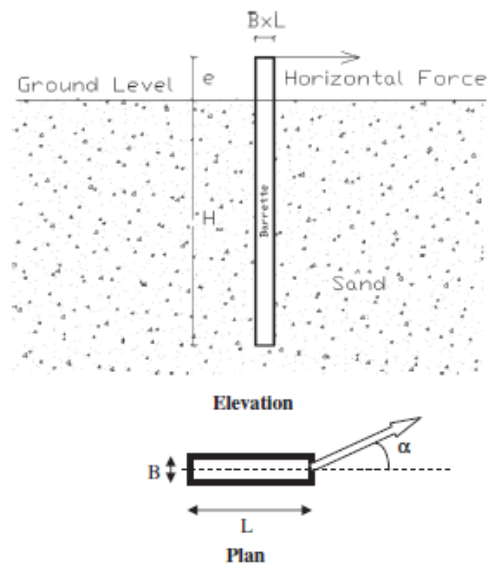
Deney kutusu iki adet çelik dairesel çerçeveden oluşmaktadır. Bu çelik bölümlerin her biri, 300 mm yüksekliğinde 750 mm çapındadır. Bu parçaları sonradan birleştirmişlerdir. Böylece 600 mm toplam derinlik elde edilmiştir. Bu parçaları, birleştirildikten sonra, etrafını çelik plakalarla güçlendirmişlerdir ve çelik vidalarla sabitlemişlerdir. Böylece, deney kutusunda deformasyonu engellemişlerdir. Buna ek olarak dikey çelik bağlar kaynaklamışlardır. Deney kutusunu ise yere sabitlemişlerdir. Şekil 3.40'da deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.40 : Deney düzeneği (El Wakil ve Nazir, 2013).

Model baret temelleri dik olarak çelik silindirik deney kutusunun merkezine yerleştirmişlerdir. Kum zemini, her 50 mm yükseklikte, sıkıştırarak deney kutusunun içine yerleştirmişlerdir. %35, %65 ve %90 rölatif sıkılıkları elde ederek deneyi yapmışlardır.

Çizelge 3.5 ve Şekil 3.41’de çalışılan parametrelerle ilgili tablo ve şekil bulunmaktadır.



Şekil 3.41 : Deney şeması (El Wakil ve Nazir, 2013).

Çizelge 3.5 : Deney değerleri (El Wakil ve Nazir, 2013).

Sıra	Sabit Değerler					Değişken Değerler	
	Dr (%)	H/B	e/B	α	L/B	L/B	α
1	35	12	2	90		1,2 ve 3	
2	65	12	2	90		1,2 ve 3	
3	90	12	2	90		1,2 ve 3	
4	35	12	2	0		1,2 ve 3	
5	65	12	2	0		1,2 ve 3	
6	90	12	2	0		1,2 ve 3	
7	65	12	2		2		0, 30, 60, 90
8	65	12	0	0		1,2 ve 3	
9	65	12	1	0		1,2 ve 3	
10	65	12	0	90		1,2 ve 3	
11	65	12	1	90		1,2 ve 3	

Çizelge 3.5’de Dr , rölatif sıkılığı, H , kazığın gömülü boyunu, α , yükün eğiklik açısını, B , kesitin genişliği, L , kazık kesitinin uzunluğunu, e ise dış merkezliliği göstermektedir.

El Wakil ve Nazir, (2013) kum zeminin üst yüzeyini çelik bir plaka ile düzleştirmişlerdir. Yükü arttırarak uygulanmaya başlamışlardır. Her bir yük arttırımında şekil değişikliği olana kadar beklemişlerdir. Sonuç olarak; baret temellerde yanal yük direncinin, büyük aksta, küçük akstaki dirence göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir.

Kumun rölatif sıkılığının, baret temellerin yanal yük kapasitesi için çok büyük önem taşıdığını ve daha yüksek rölatif sıkılıktaki zeminlerde, yanal yük kapasitesinin de daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Eksantrikliğin çoğalmasının, baret temelin yanal yüke karşı verdiği tepkiyi büyük ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

En büyük yükün, eksantrikliğin sıfır olduğu noktada oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Baret temel kesitinde, yük yönündeki rijitliğin artmasının, baretin üst kısmında, yer değiştirmenin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, kum zemin içerisinde değişik şekillerde teşkil edilen baret kazıklar yatay olarak yüklenmiştir. Kum zemin, sıkı ve gevşek olmak üzere iki farklı rölatif sıkılıkta hazırlanmıştır. Taşıma kapasitesini tespit etmek amacıyla çelik malzemeden üretilmiş, 1 mm kalınlığında model baret kazık kullanılmıştır. Model kazık 1/40 oranında hazırlanmıştır. Gerçek boyutlardaki standart baret kazıkların boyutlarının değerlerinin kırkta biri boyutlara yaklaşılmaya çalışılmıştır. Üç tip baret kazık tipi kullanılmıştır. Deneyler gevşek ve sıkı kum zeminde düzenlenmiştir. Yanal yük zeminin yüzeyinden belirli bir yükseklikte uygulanmıştır. Kazığın üst deplasmanı, kazık üstündeki gerilmeler ve kazığa etki eden yük ölçülmüştür.

Bu bölümde; deney sistemi, yükleme düzeneği, deneyde kullanılan kumun özellikleri, deneysel çalışmanın yöntemi anlatılmaktadır.

4.1 Kum Zemin

Deneysel çalışmada boyut etkilerinden dolayı daha ince daneli kum tercih edilmiştir. İstanbul Şile ilçesinde bulunan silis kumu kullanılmıştır. Kum etüvde kurutulduktan sonra kullanılmıştır. Kurutulan kum malzeme plastik sandıklarda muhafaza edilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan kumun endeks ve kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarında bir seri deney yapılmıştır.

4.1.1 Endeks özellikleri

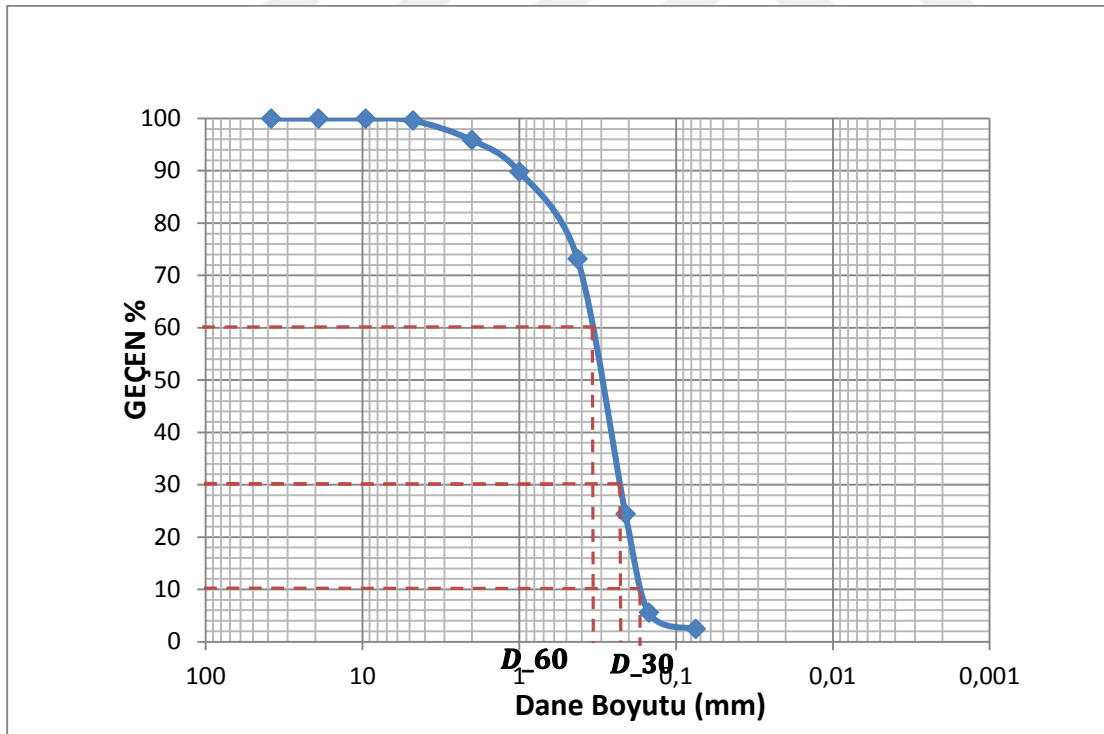
4.1.1.1 Elek analizi

Elek analizi deneyi (ASTM standartlarına göre) yapılmıştır. Şekil 4.1’de elek analizi sonucunda elde edilen dane çapı dağılımı eğrisi gösterilmektedir. Bu eğriden yararlanarak kum zeminin sınıfı belirlenmiştir.

Zemin sınıfı belirlenirken, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılma Sistemi (USCS) kullanılmıştır. Buna göre zemin kötü derecelendirilmiş SP olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.1 de sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Elek analizi sonucu.

Zemin Parametreleri	Değer
D_{60}	0,34 mm
D_{30}	0,23 mm
Efektif Dane Çapı D_{10}	0,18 mm
Üniformluk, C_u	1,88
Derecelenme Katsayısı, C_c	0,86
Zemin Sınıfı	SP



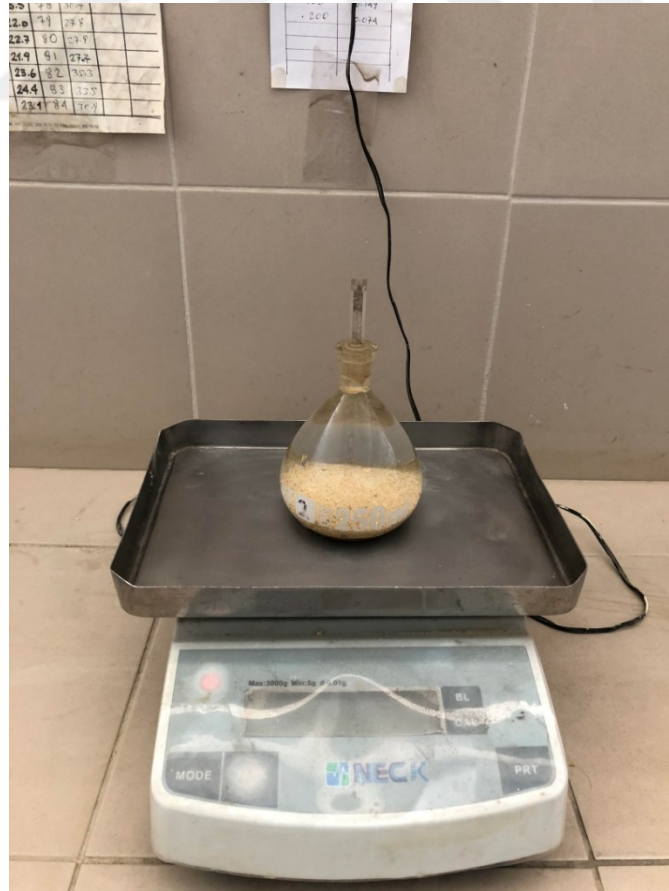
Şekil 4.1 : Kum zeminin dane çapı dağılımı eğrisi.

4.1.1.2 Piknometre deneyi

Dane birim hacim ağırlığını belirlenmek için piknometre deneyleri yapılmış ve $\gamma_s=2.65 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2 ve Şekil. 4.3). Deney üç kez tekrarlanmıştır.



Şekil 4.2 : Piknometre deneyi.



Şekil 4.3 : Piknometre deneyinde yapılan tartma işlemi.

4.1.1.3 Rölatif sıklık deneyi

Rölatif sıklık deneyi, kumun gevşek ve sıkı haldeki birim hacim ağırlığını belirlemek için yapılmıştır. 50 mm çapında ve 130 mm yüksekliğinde, deney aparatı kullanılmıştır.

Gevşek haldeki birim hacim ağırlık için, kap içerisine kum doldurulmuştur. Bu doldurma işlemi sırasında, herhangi bir sıkıştırma uygulanmamıştır. Ardından, zemin yüzeyi düz bir metal ile dikkatlice düzeltilmiştir. Düzeltilen yüzey su terazisi ile kontrol edilmiştir. Ölçüleri bilinen deney aparatının hacmi hesaplanmıştır. Ağırlığı ise önceden tartılarak belirlenmiştir. Sıkı tırılmamı  olan zemin, aparat ile birlikte tartılarak, kumun ağırlığı tespit edilmiştir. Böylece kumun gevşek birim hacim ağırlığı belirlenmiş olur.

Aynı deney sıkı haldeki birim hacim ağırlığı bulmak için tekrar edilmiştir. Ancak bu sefer zemin 3 tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her bir tabaka yerleştirildikten sonra sıkı tırılmı tır. Sıkıştırma miktarı her tabakada eşit olmalıdır. Son tabaka sıkı tırıldıktan sonra zemin yüzeyi düz bir metal ile dikkatlice düzeltilmiştir. Düzeltilen yüzey su terazisi ile kontrol edilmiştir. Aynı şekilde ölçüleri bilinen deney aparatının hacmi hesaplanmıştır. Ağırlığı ise önceden tartılarak belirlenmiştir. Sıkı tırılmamı  olan zemin, aparat ile birlikte tartılarak, kumun ağırlığı tespit edilmiştir. Böylece sıkı kumun birim hacim ağırlığı belirlenmiş olur.

Deneyler sıkı ve gevşek durumlarda 3'er kez tekrarlanmış ve elde edilen ağırlıkların sıkı durum için en büyük değeri, gevşek durum için en küçük ağırlık değeri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar  izelge 4.2 ve 4.3'de sunulmuştur. Şekil 4.4 ve  ekil 4.5'de deneyin yapı ışını göstermektedir.

Çizlege 4.2 : Rölâtif sıklık deneyi sonuçları.

Parametreler	Değer
Dane birim hacim ağırlığı, γ_s	2.65 gr/cm ³
Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlık, γ_{k-min}	1.42 gr/cm ³
Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlık, γ_{k-maks}	1.69 gr/cm ³
Gevşek haldeki boşluk oranı, $e_{gevşek}$	0.86
Sıkı haldeki boşluk oranı, $e_{sıkı}$	0.56

Çizlege 4.3 : Rölâtif sıklığa göre boşluk oranları.

Dr (%)	e
0	0.86
10	0.83
20	0.8
30	0.77
40	0.74
50	0.71
60	0.68
70	0.65
80	0.62
90	0.59



Şekil 4.4 : Rölatif sıklık deneyi.



Şekil 4.5 : Rölatif sıklık deneyinde yapılan tartma işlemi.

4.1.2 Kayma mukavemeti deneyleri

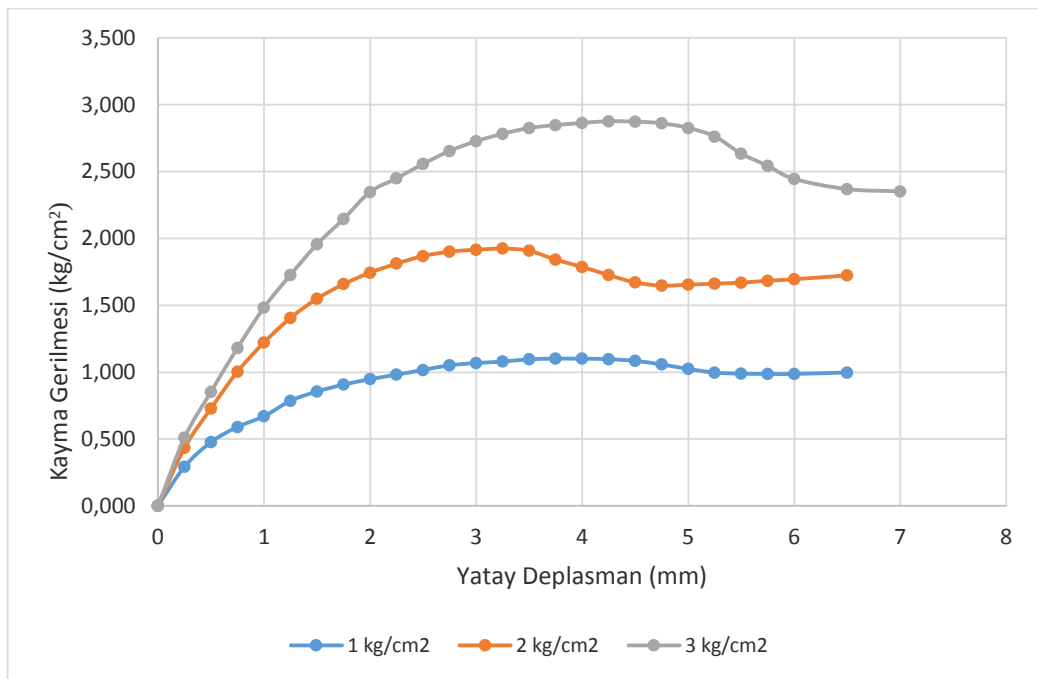
Deneyde kullanılan kumun kayma mukavemetini belirlemek için sıkı ve gevşek olmak üzere, %20 ve %70 rölatif sıklıkta kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Kesme kutusu deneyi

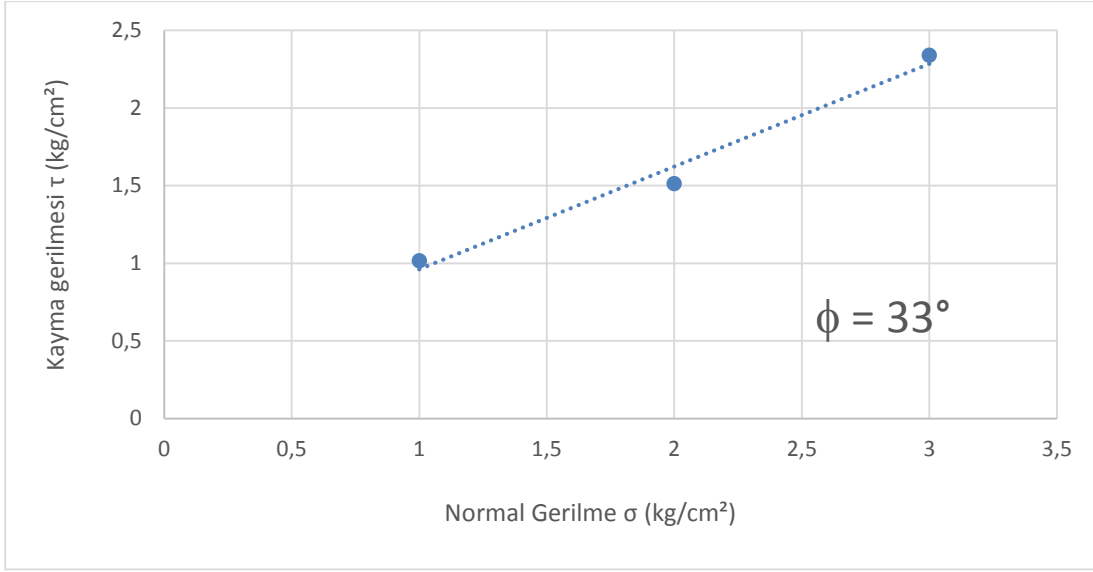
Kurutulmuş kum zemin ile kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Gevşek kum zemin için %20 rölatif sıkılık seçilmiştir. Kesme kutusu deneyinde, 60x60 mm boyutlarında ve 20 mm yüksekliğinde kare kesitli kesme kutusu kullanılmıştır. Bu kutuya önce %20 rölatif sıkılıkta gevşek kum yerleştirilmiştir. Hacmi belirli olan kutunun içine, %20 sıkılıktaki kumun birim hacim ağırlığı hesaplanıp, dikkatlice kesme kutusunun içine doldurulur. Kumun yüzeyi metal ile düzleştirilir.

Aynı şekilde kutuya önce %70 rölatif sıkılıkta sıkı kum yerleştirilmiştir. Yine hacmi belirli olan kutunun içine, %70 rölatif sıkılıktaki kumun birim hacim ağırlığı hesaplanıp, dikkatlice kesme kutusunun içine doldurulur. Kumun yüzeyi metal ile düzleştirilir.

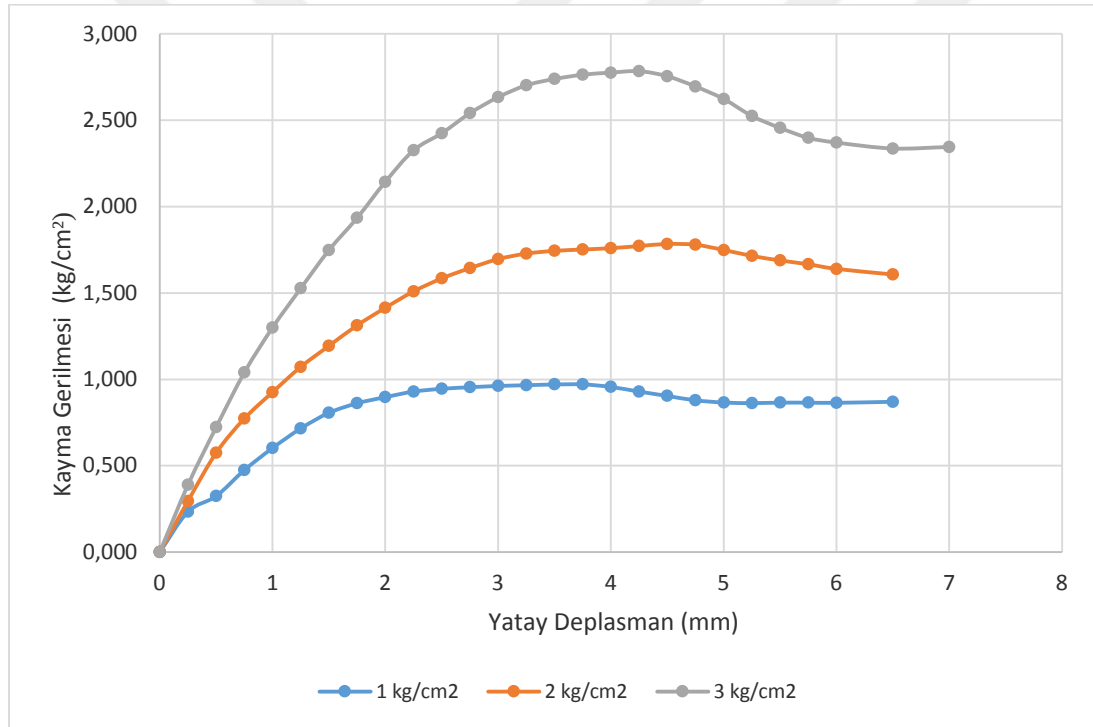
Hem gevşek hem de sıkı durumdaki kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde numuneler, $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$, 2 kg/cm^2 ve 3 kg/cm^2 değerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabii tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda elde edilmiş olan kırılma zarfları gevşek kum zemin için Şekil 4.6'de ve Şekil 4.7'de, sıkı kum zemin için de, Şekil 4.8'de ve 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.10'da kesme kutusu cihazı gösterilmiştir.



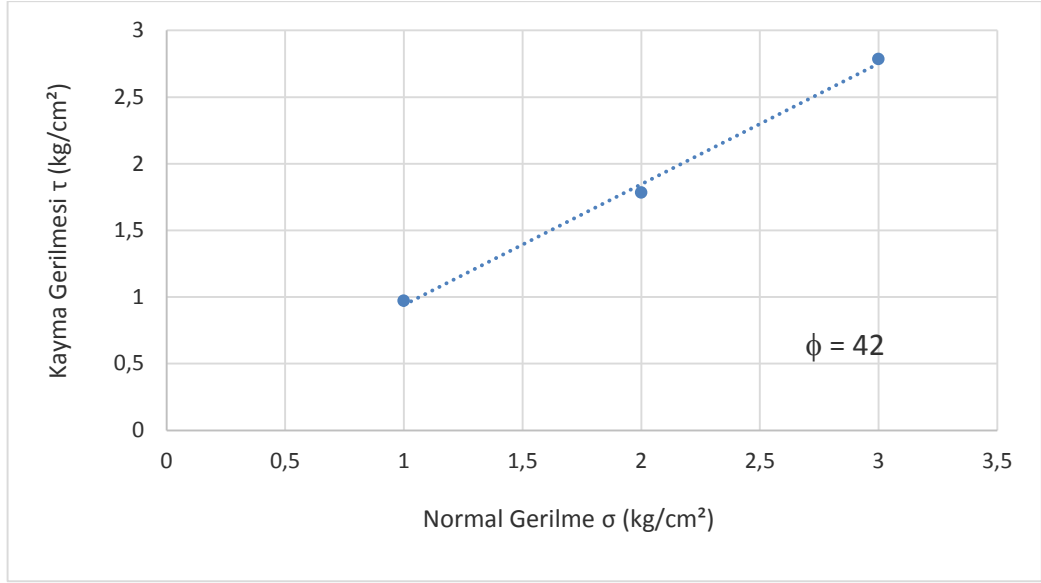
Şekil 4.6 : Gevşek kum zeminde kayma gerilmesi – deplasman eğrileri.



Şekil 4.7 : Gevşek kum zeminde kesme kutusu deney sonucu.



Şekil 4.8 : Sıkı kum zeminde kayma gerilmesi–deplasman eğrileri.



Şekil 4.9 : Sıkı kum zeminde kesme kutusu deney sonucu.

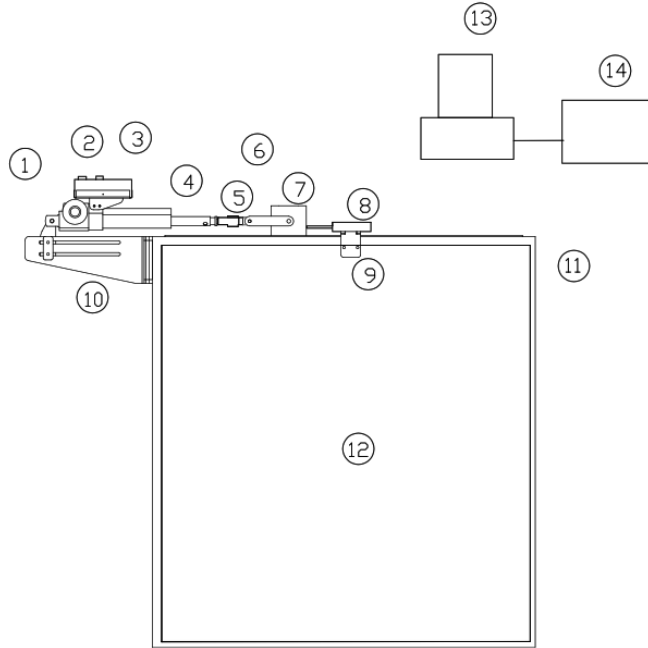


Şekil 4.10 : Kesme kutusu deneyi.

4.2 Laboratuvarda Oluşturulan Deney Düzeneği

4.2.1 Deney kutusu

Bu deney için özel üretilen, bir yüzü 8 mm kalınlığında cam olan, 1000x500x1000 mm (uzunlukxgenişlikxyükseklik) olan dikdörtgen kesitli kutu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deney modeli, gerçeğin 1/40 olmasına rağmen, baret kazıkların boylarının uzun olması nedeniyle, bu boyutlar elde edilmiştir. Deney kasası yaklaşık olarak 1 ton kum alacağından dolayı, boşaltma kolaylığı için, kutunun ön yüzeyinde sürgülü bir kapak tasarlanmıştır. Cam yüzey, deneyler sırasında zeminde oluşabilecek deformasyonların izlenmesine imkan sağlamaktadır. Diğer metal yüzeyler ve kapak ise 2 mm kalınlığında çelikten yapılmıştır. Buna ek olarak deneyin, kutunun istenildiği bölgesinde yapılabilmesi için, motoru taşıyan metal sistem üç düzlemde hareket edebilecek şekilde tasarlanmış ve deney kutusuna monte edilmiştir. Şekil 4.11’de deney düzeneği şeması verilmiştir. Çizelge 4.4’de deney düzeneğinin elemanları listelenmiştir.



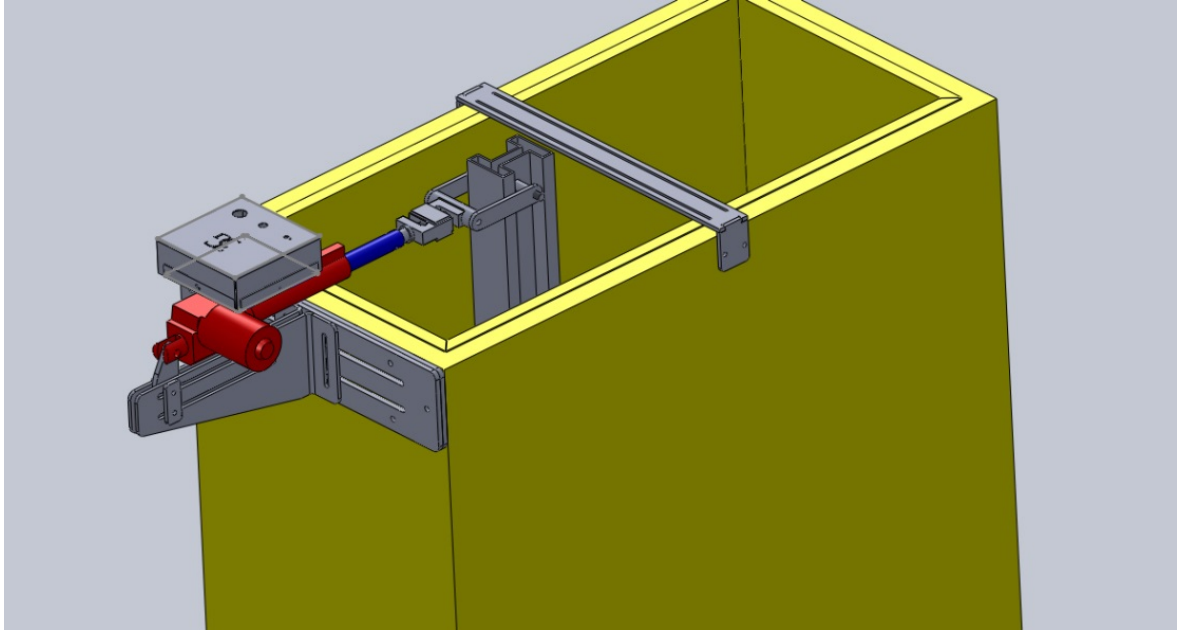
Şekil 4.11 : Deney düzeneği şeması.

Çizelge 4.4 : Deney düzeneği elamanları.

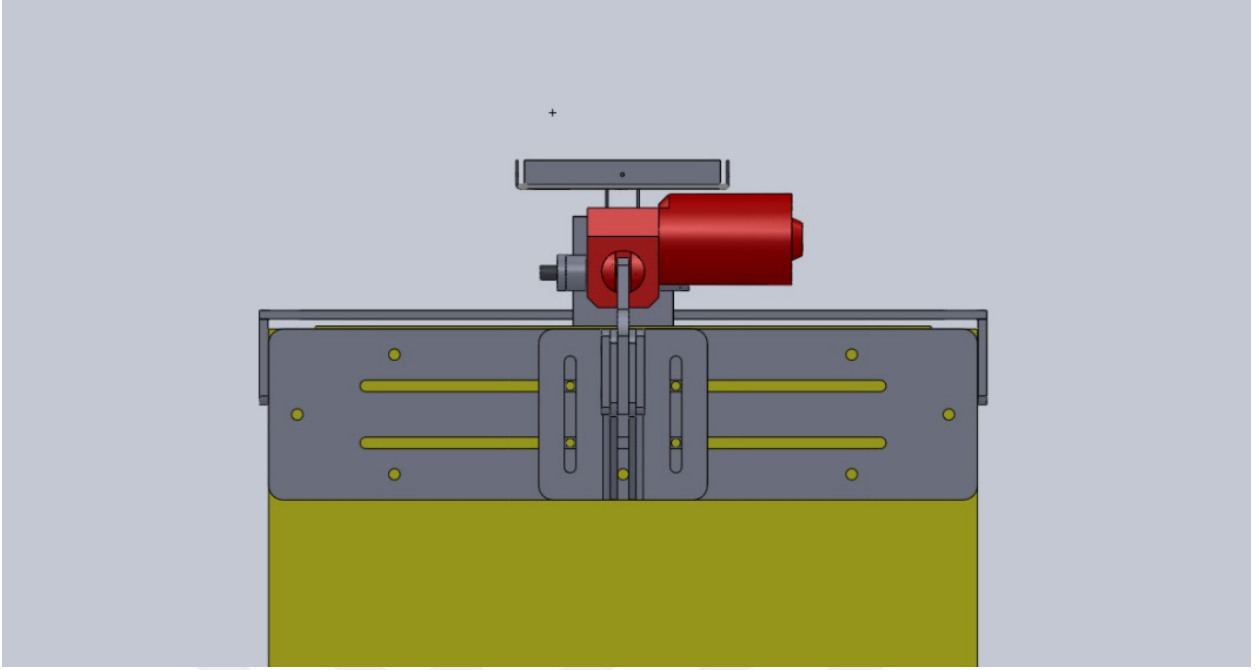
Deney düzeneği eleman listesi

1. Motor
 2. Yükleme Yönü Belirleme Düğmesi
 3. Yükleme hızı
 4. Kontrol Paneli
 5. Yük Hücresi
 6. Profil Sabitleyici Kolları
 7. Çelik Profil
 8. Deplasman Ölçer
 9. Deplasman Ölçer Platformu
 10. Motor ve Panel Platformu
 11. Kapak
 12. Cam
 13. Bilgisayar
 14. Data Logger
-

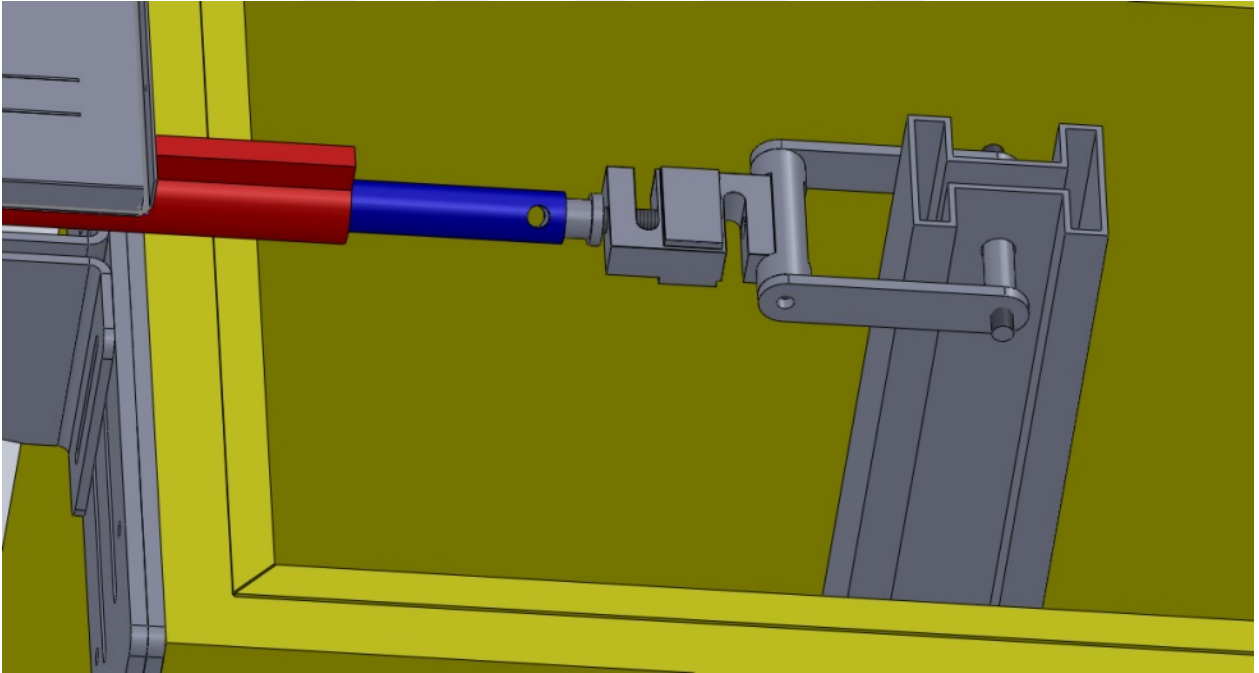
Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14’de, Solidworks programında üç boyutlu tasarlanan, deney düzeneğinin, programdan alınmış görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 4.12 : Deney düzeneğinin yandan görünüşü.



Şekil 4.13 : Deney düzeneğinin arkadan görünüşü.



Şekil 4.14 : Deney düzeneğinin üstten görünüşü.

Deney kutusu boyutları, baret kazıkların geometrilerine göre sınır etkisi oluşturmayacak büyüklükte seçilmiştir. Şekil 4.15’de laboratuvarı kurulan düzenek görülmektedir.



Şekil 4.15 : Deney düzeneği.

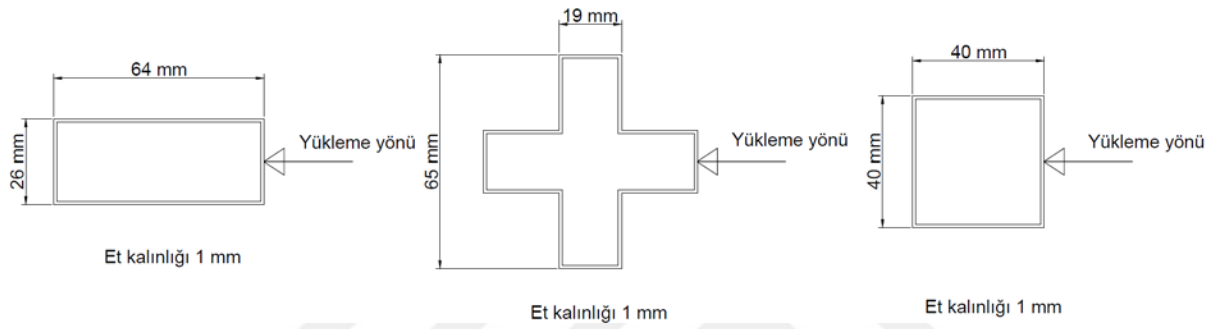
4.2.2 Model kazıklar

Deneyde çelik malzemeden imal edilen model kazıklar kullanılmıştır. Model kazıklar, yükün uygulacağı noktadan, 14 mm çapında delinmiştir. Böylece buradan geçen metal çubukla yükleme sistemine rijit olarak bağlanmıştır. Şekil 4.16'da profilin delinme işlemi gösterilmiştir.

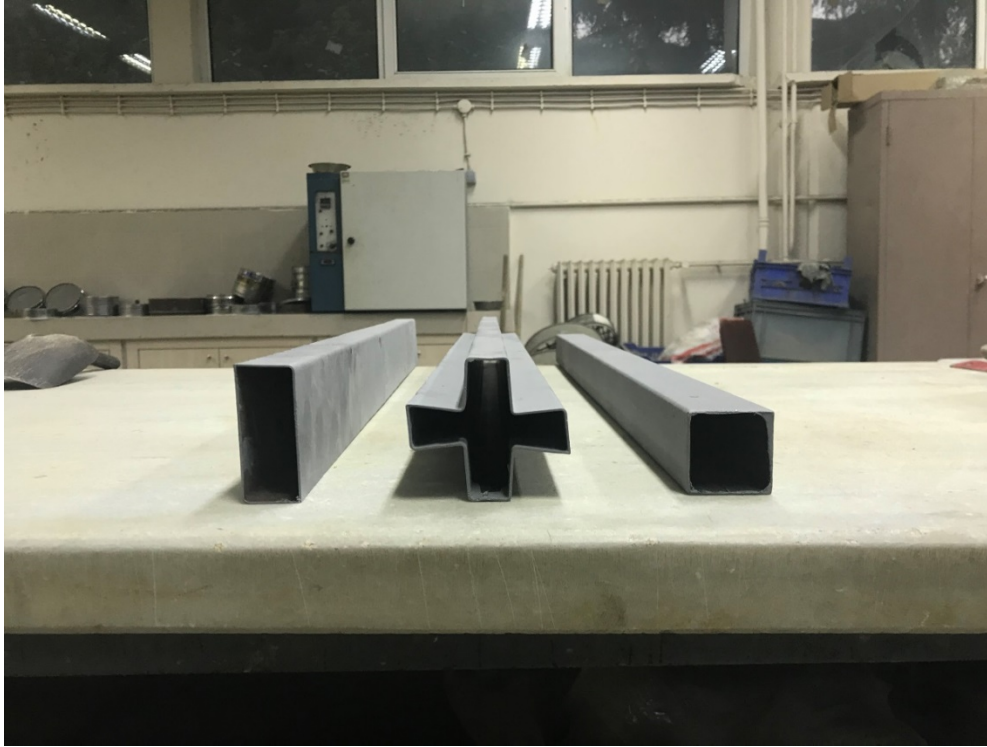


Şekil 4.16 : Profilin delinme aşaması.

Model kazıkların birincisi 26x64x780 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli ve 1 mm kalınlığında özel üretim profil kullanılmıştır. İkinci model kazık, artı (+) şeklinde olup, 65 mm ve 19 mm boyutlarında, 780 mm boyunda ve yine 1 mm kalınlığında özel üretim profildir. Üçüncü profil ise 40x40x780 mm boyutlarında, kalınlığı 1 mm hazır profilden seçilmiştir. Profiller aşağıda gerçek kazık kesitlerinin 1/40 oranında küçültülmesiyle elde edilen boyutlara mümkün olduğunca yakın değerlerde imal edilmiştir. Şekil 4.17’de ise model çelik baret kazıkların boyutları gösterilmiştir. Şekil 4.18’de kullanılan baret model kazıklar görülmektedir.



Şekil 4.17 : Baret kazık kesitleri.

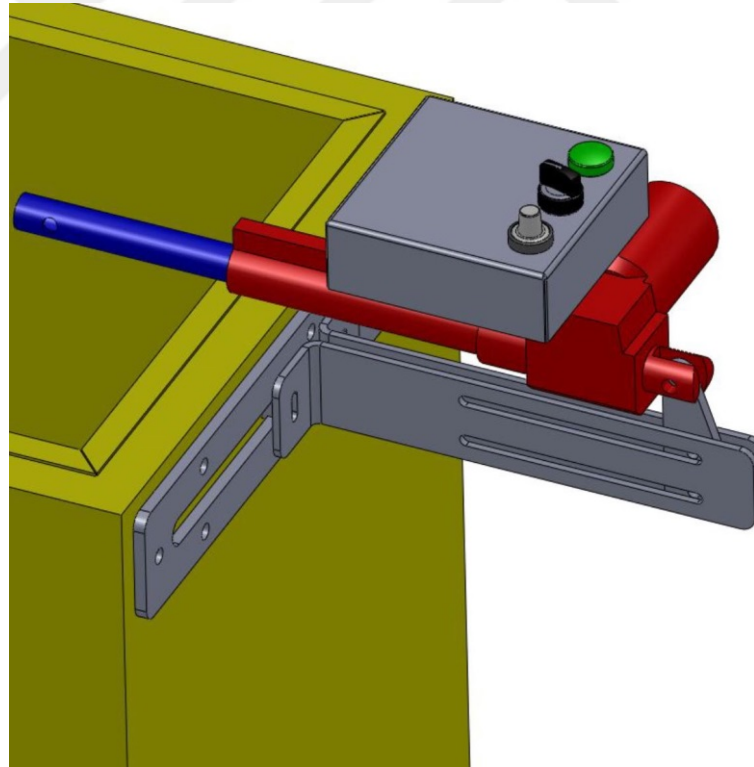


Şekil 4.18 : Deneylerde kullanılan baret model kazıklar.

4.2.3 Yükleme düzeneği

Yükleme düzeneği, 6000 kN gücünde lineer DC motorun sisteme monte edilmesiyle oluşturulmuştur. Bu motora, sistemi açıp kapamaya, yüklemenin hızını kontrol etmeye ve yüklemenin yönünü değiştirmeye yarayan düğmeler içeren bir kontrol paneli eklenmiştir. Motor 10 mm kalınlığında, x, y ve z doğrultularında hareket edebilen, metal bir sisteme, bu sistem ise deney kutusuna bağlıdır. Yükleme düzeneğinde, yanal yükün kum zemin üzerinden minimum yükseklikte etki etmesine zen gösterilmiştir. Bu yüzden  yönde hareket edebilen bu sistem, z ekseninde en uygun konuma getirilir.

Kutunun etrafı, üst kısmında ve cam etrafında elik metal çerçevelerle güçlendirilmiştir. Yükleme düzeneği önce tasarlanıp, üç boyutlu olarak Solid Works programında çizilmiştir. Daha sonra bu çizimle, sistem elik malzemeden lazer kesim yöntemiyle imal edilmiştir. şekil 4.19'da bilgisayar programında, yükleme düzeneği gösterilmiştir. şekil 4.20'de sistemin gerçek görünüşü gösterilmiştir.



şekil 4.19 : Yükleme düzeneği.



Şekil 4.20 : Yükleme düzeneği.

Yükleme düzeneğinde motor, yük hücresi ile rijit bir biçimde bağlıdır.

4.2.4 Yük hücresi

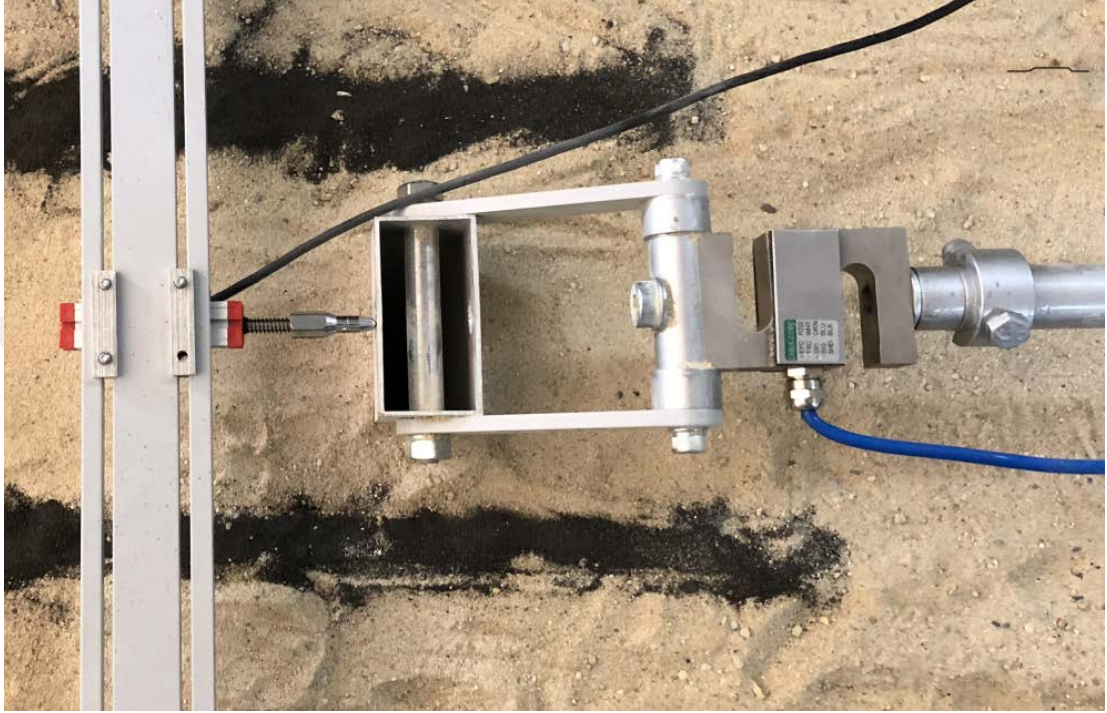
Deney sırasında baret kazık modellerine etki eden yük değerini tespit etmek için, CAS firması tarafında üretilen, hem çekme kuvveti hem de basınç kuvvetine çalışabilen, S tipi yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinin kapasitesi 500 kg ve SBA-500L modelidir.

Yük hücresi, ölçtüğü değerleri direk kabloyla bağlı olduğu veri toplama cihazına aktarır. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de yük hücresi tek olarak ve sistem üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Yük hücresi.

Yük hücresi sisteme entegre edilmeden önce, çeşitli ağırlıklarla yüklenerek kontrol edilmiştir. Yük hücresi model kazıklara rijit bir şekilde bağlıdır. Yük hücresinin model kazıklarla bağlantısı önce tasarlanıp, sonra üç boyutlu olarak Solid Works programında çizilmiştir. Daha sonra bu çizimle, sistem çelik malzemedan, lazer kesim yöntemiyle imal edilmiştir.



Şekil 4.22 : Yük hücresinin sistemde görünüşü.

4.2.5 Deplasman ölçme cihazı

Deneyde, model baret kazıkların, yanal yük altındaki hareketini belirleyebilmek için, yükün uygulandığı doğrultuda, deplasman ölçme cihazı yerleştirilmiştir. Bu sebeple, deney kutusunun iki kenarından destek alacak ve istenildiğinde de çıkarılıp yeri değiştirilebilecek bir platform tasarlanmıştır. Deplasman ölçme cihazı, Opkon firması tarafından Türkiye’de üretilmiş lineer potansiyometredir. Şekil 4.23 ve 4.24’de deplasman ölçme cihazı, tekil ve sistemin üzerinde olmak üzere gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : Deplasman ölçme cihazı.



Şekil 4.24 : Deplasman ölçme cihazının sistemde görünüşü.

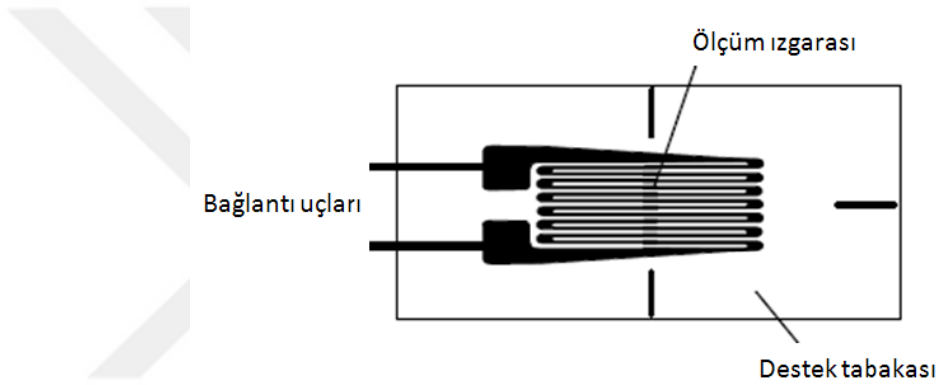
4.2.6 Birim deformasyon ölçer (strain gauge)

Birim deformasyon ölçer (strain gauge), yerleştirildiği yüzeydeki birim deformasyonu ölçen bir sensör tipidir. Üzerinde çok ince sarmal tel bulunan ve çok hassas bir yapıda olan cihazlardır. Alt kısmında çok ince bir alüminyum tabaka mevcuttur. Bu tabaka, metal yüzeye çok dikkatlice ve çok iyi bir şekilde yapıştırılmalıdır. Bunun için belirli yöntemler mevcuttur.

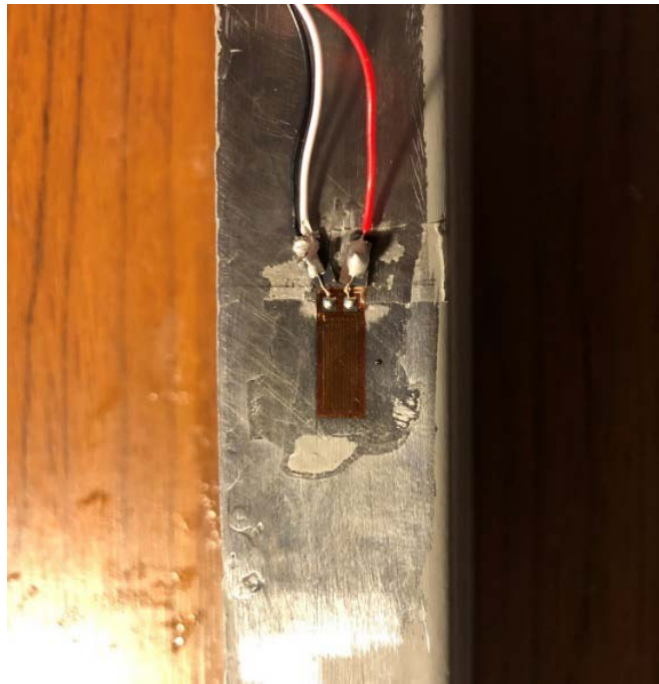
Metal yüzey kuvvete maruz kaldığında ve gerilme oluştuğunda, birim deformasyon ölçerin (strain gauge) bunu en iyi şekilde yansıtmaları gerekir.

Deformasyon gerçekleştiğinde, birim deformasyon ölçer üzerindeki ince uzun sarmal tel, uzar ya da kısalır. Birim deformasyon ölçerin üzerinden belirli bir akım geçer. Bu akımın voltaj değeri uzama veya kısalma durumunda azalır veya artar. Voltajdaki bu değişim miktarı bize deformasyon miktarını verir. Şekil 4.25’de yaprak tipi birim deformasyon ölçer gösterilmiştir.

Deney esnasında her bir profile boyları boyunca üçer adet birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Şekil 4.26’de yerleştirilmiş bir birim deformasyon ölçer gösterilmiştir.

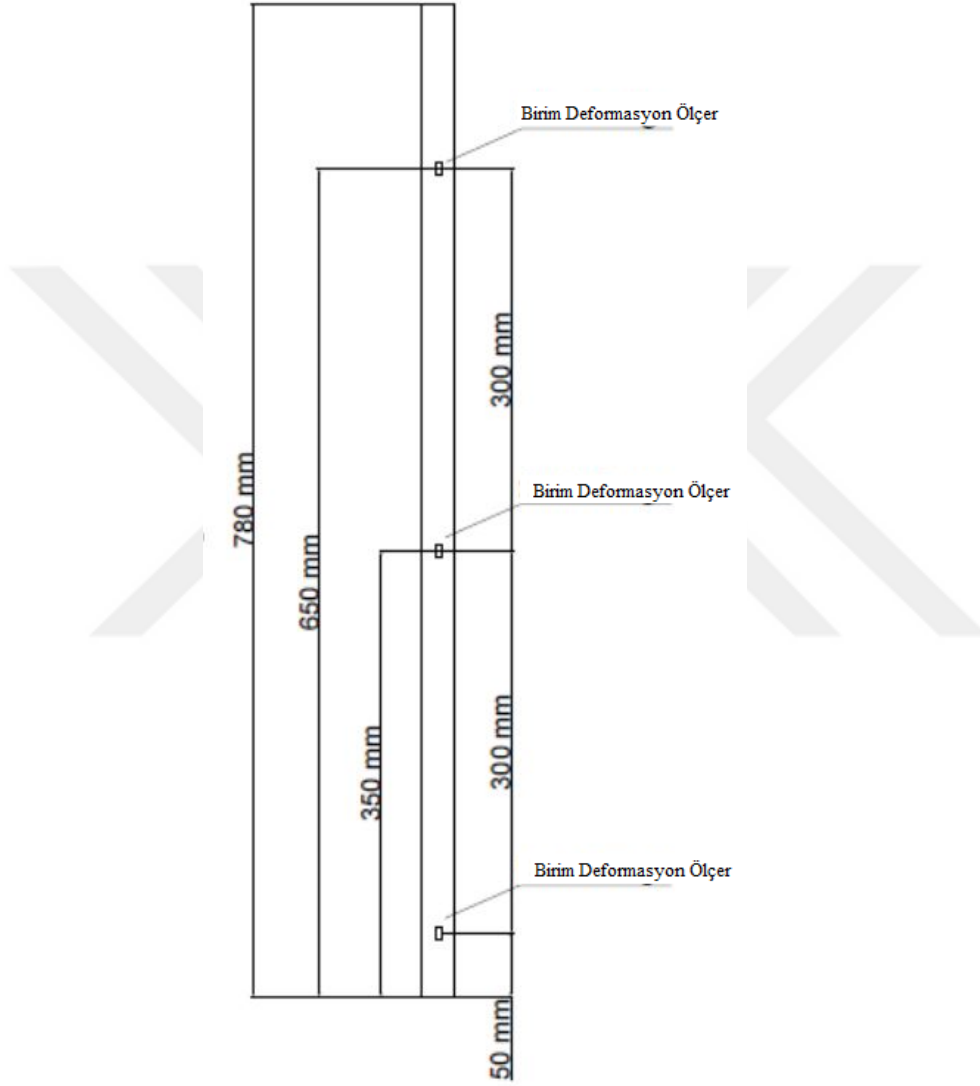


Şekil 4.25 : Yaprak tipi birim deformasyon ölçer (Koç ve diğ, 2012).



Şekil 4.26 : Model kazık üzerindeki birim deformasyon ölçer.

Bu deneyde 78 cm'lik profilde 70 cm'lik kısım kum içinde kalacaktır. Bu 70 cm'lik kısma 3'er adet birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Bunlar en altta, alt ucun 5 cm üstünde, ortada, yani alt ucun 35 cm üstünde, ve en üstte, yani alt ucun 65 cm üstünde bulunmaktadır. Birim deformasyon ölçeri yerleştirmek için bazı işlemler uygulanmıştır. Şekil 4.27'de birim deformasyon ölçer yerleşim şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : Birim deformasyon ölçer yerleşim şeması.

4.2.6.1 Birim deformasyon ölçer (strain gauge) yerleştirilmesi

Birim deformasyon ölçerleri yerleştirilirken, yüzeyi ile yerleştirilen metal yüzeyin çok iyi şekilde temas etmesi ve yekpare olması sağlanmalıdır. Bunun için öncelikle metal yüzey, boyalarından arındırılmalıdır. Yüzeyin pürüzsüz olması gerekmektedir. Bu yüzden yüzey ince zımpara ile iyice zımparalanır. Zımparalanan yüzey önce su

ile, daha sonra çözücü madde ile temizlenir. Yüzey tortulardan ve demir parçacıklarından çok iyi şekilde arındırılmalıdır. Şekil 4.28’de yüzeyin boyası sökülmemektedir. Ardından Şekil 4.29’de ince zımparalama işlemi gösterilmektedir. Şekil 4.30’da, yüzey çözücü madde ile dikkatlice temizlenmektedir.



Şekil 4.28 : Yüzey boyasının sökülmesi.



Şekil 4.29 : Yüzeyin ince zımpara ile zımparalanması.



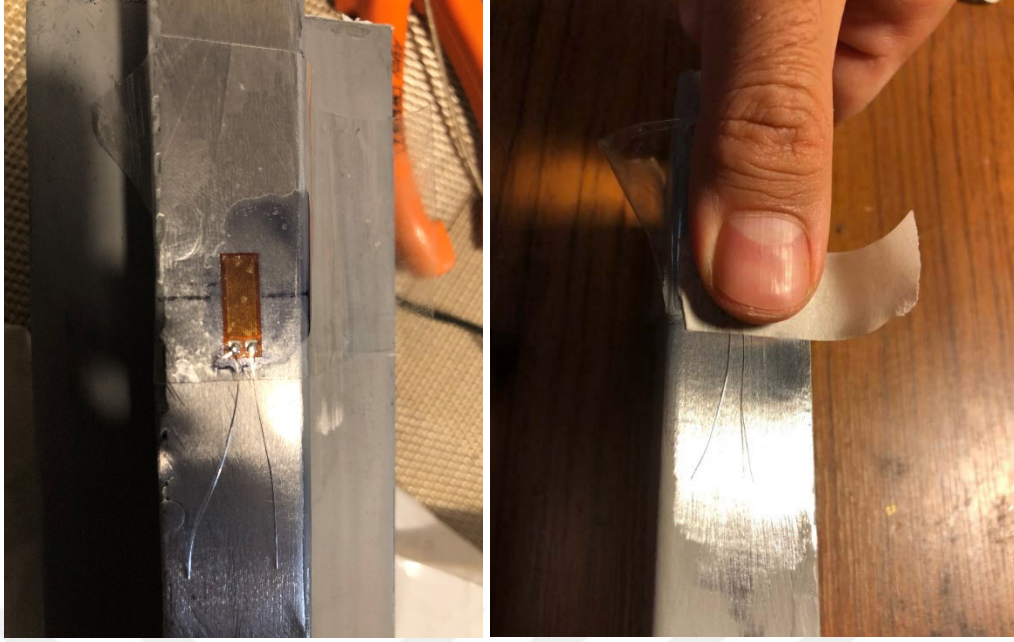
Şekil 4.30 : Yüzeyin temizliği.

Pürüzsüz ve temiz hale gelen yüzeyde birim deformasyon ölçerin konulacağı yer belirlenmeli ve işaretlenmelidir. Ardından bir bant yardımıyla birim deformasyon ölçer buraya getirilir. Bant profile yapıştırılarak sabitlenir.

Birim deformasyon ölçerin özel yapıştırıcısı kullanılır ve altına yapıştırıcı yayılır. Bant yardımıyla birim deformasyon ölçer yerine yapıştırılır. Bundan sonra bant üzerinden parmakla baskı yapılarak, yapıştırıcının kuruması için iki, üç dakika beklenir. Şekil 4.31 ve 4.32’de bu aşamalar gösterilmiştir.

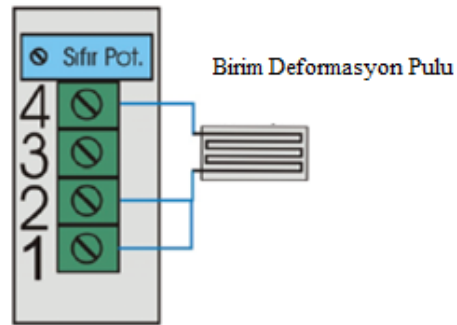


Şekil 4.31 : Birim deformasyon ölçerin yerinin işaretlenmesi.



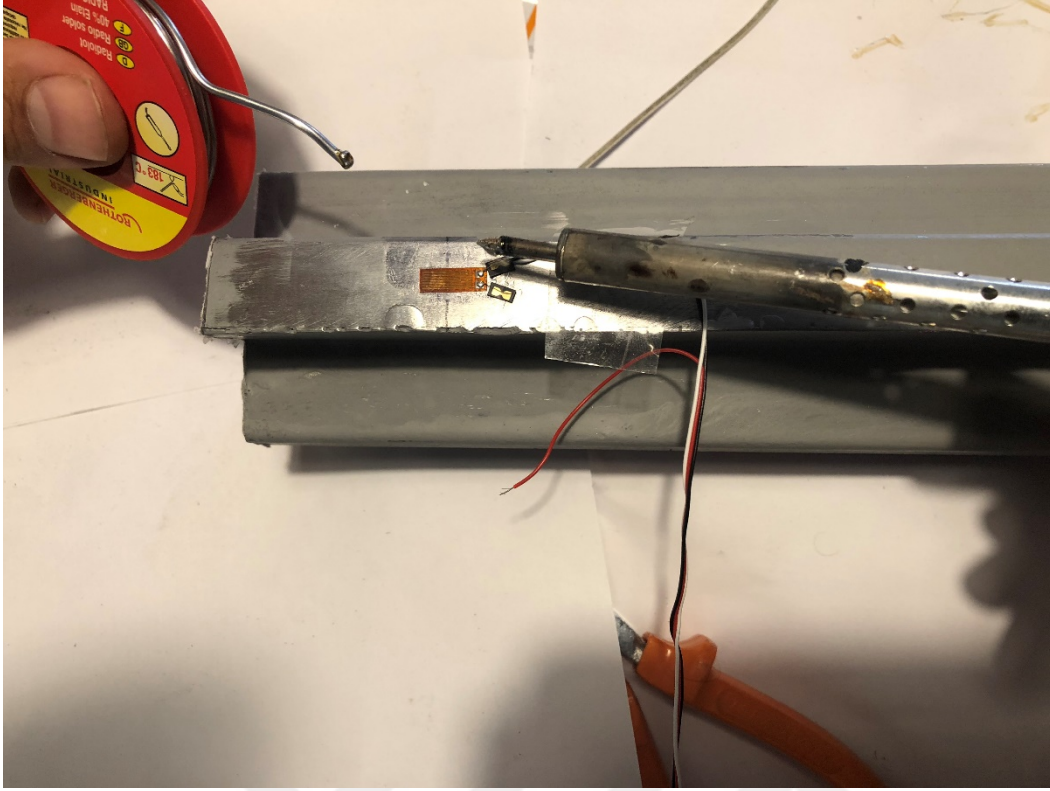
Şekil 4.32 : Birim deformasyon ölçerin yapıştırılması.

Bu işlem ardından kablolar bağlanmalıdır. Bu deneyde çeyrek köprülü devre kullanılmıştır. Şekil 4.33’de bağlantı şekli gösterilmiştir.

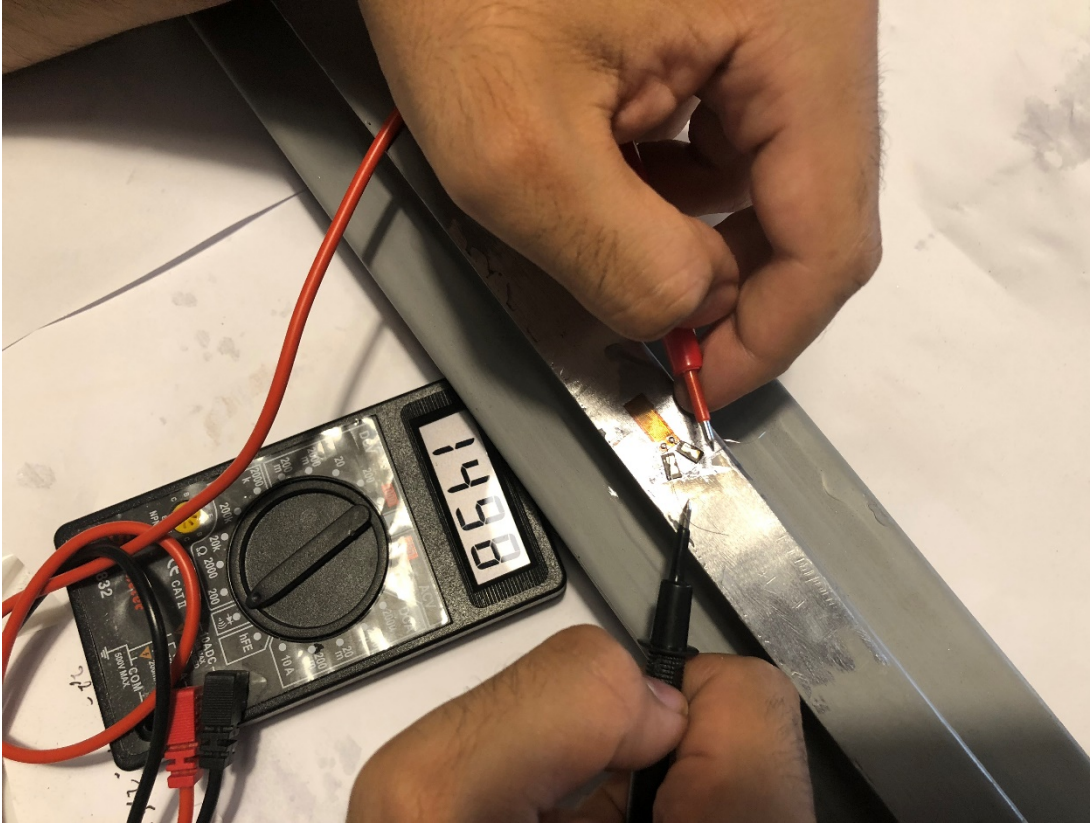


Şekil 4.33 : Birim deformasyon ölçer bağlantı şeması (çeyrek köprülü).

Bu bağlantıları sağlamak için kablolar birbirlerine lehimlenmiştir. Lehim bittikten sonra ampermetre ile bağlantılarda kısa devre olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de bağlantı yöntemi gösterilmiştir. Bütün işlem bittikten sonra, birim deformasyon ölçerlerin yüzeylerinin korunması için, silikon malzeme ile üzerleri kapatılmıştır. Şekil 4.36’da ise profil üzerinde yerleştirilmiş birim deformasyon ölçer düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.34 : Birim deformasyon ölçer bağlanması (çeyrek köprülü devre).



Şekil 4.35 : Birim deformasyon ölçer kısa devre kontrolü.



Şekil 4.36 : Birim deformasyon ölçer kurulumu.

4.2.6.2 Birim deformasyon ölçümlerinin momente çevrilmesi

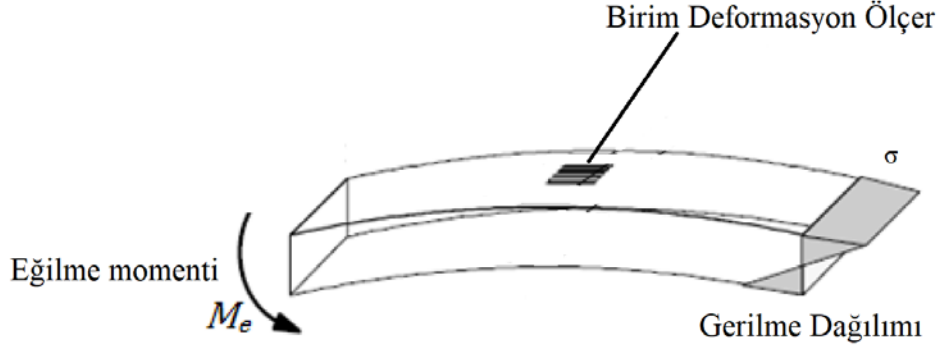
Bütün birim deformasyon ölçme cihazları için, şekil değiştirme ile direnç arasındaki uyumu sağlayan bir gage faktörü (k) bulunmaktadır. Denklem 4.1’de gage faktörü (hassasiyet faktörü) k için formül görülmektedir.

$$k = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Burada ε = birim uzama, R_0 başlangıç anındaki direnç $\Omega(\text{ohm})$, ΔR =Yük uygulandıktan sonra direnç değişim miktarı $\Omega(\text{ohm})$. Tabanı metal olan birim deformasyon ölçerlerin, hassasiyet katsayısı genellikle 2’dir. Bu deneyde kullanılan birim deformasyon ölçerler için de 2 değeri kullanılmıştır. Bu değer Testlab programında sisteme girilmiş ve doğrudan birim uzama (şekil değiştirme) değeri ε , elde edilmiştir. Ölçülen birim uzama (ε) değeri ile elastisite modülü E (N/mm^2) çarpılarak gerilme σ (N/mm^2) elde edilir (Koç, ve diğ, 2012). Denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (4.2)$$

Şekil 4.37’de eğme yüküne maruz kalmış bir çubukta, gerilme dağılımı ve birim deformasyon ölçerin konumu gösterilmiştir.



Şekil 4.37 : Eğme yüküne maruz kalmış çubuktaki birim deformasyon ölçer (Koç, ve diğ, 2012).

Denklem 4.3’de çubukta oluşan gerilmenin eşitliği verilmiştir.

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W_e} \quad (4.3)$$

Burada σ_e eğilme çubuğunda yüzeyinde oluşan gerilme, W_e eğilme mukavemet momenti, M_e eğilme momentidir. Dikdörtgen kesitli bir malzeme için W_e , denklem 4.4’de gösterildiği gibi hesaplanır. Bu denklemde b genişlik, h yüksekliktir. Bu denklemler kullanılarak M_e hesaplanmıştır.

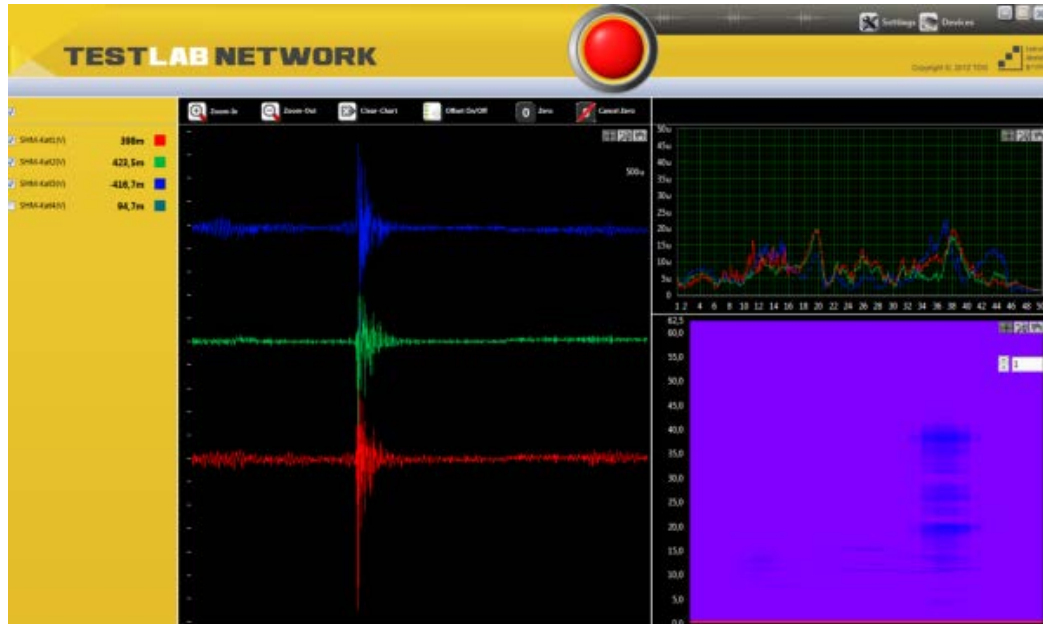
$$W_e = \frac{b.h^2}{6} \quad (4.4)$$

4.2.7 Veri kaydetme ünitesi (data logger)

Deney sırasında, yük hücresi, deplasman ölçme cihazı ve birim deformasyon ölçer, onaltı kanallı veri kaydetme ünitesine (data logger) bağlanmıştır. Bu veriler Testlab Network Programı ile sayısal verilere dönüştürülmüştür. Şekil 4.38’de veri kaydetme ünitesi, Şekil 4.39’da Testlab Programı gösterilmiştir.



Şekil 4.38 : Veri kaydetme ünitesi.



Şekil 4.39 : Testlab Programı

Beş adet kanal, deplasman ölçer, yük hücresi ve alt, üst, orta olmak üzere üç adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Bu sistem ethernet kablosu ile bilgisayara

bağlanmıştır. Veriler excel formatında alınır. Testlab programında bütün cihazlar için detaylı ayarlar yapıp, cihazlar denenerek doğruluğu test edilmiştir.

4.3 Kullanılan Ekipmanların Kalibrasyonu

4.3.1 Yük hücresi kontrolü

Yük hücresi veri toplama ünitesine direkt olarak bağlıdır. Yük hücresinin kalibrasyon doğruluğu kontrol edilmiştir. Bunun için çeşitli ağırlıklarla yüklemeler yapıp kontrol edilmiştir. Çeşitli kilolar ile deneme yapılmış ve doğru sonuçlar okunmuştur. Aşağıda Şekil 4.40 Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de çeşitli kilolarla yapılan denemeler gösterilmiştir.



Şekil 4.40 : Yük hücresi testi.

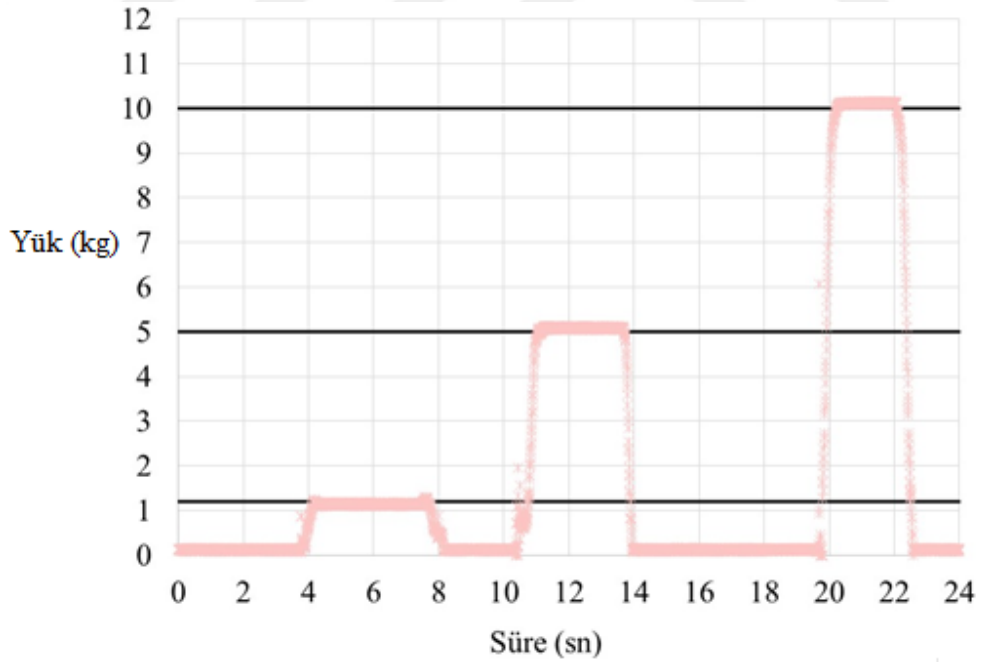


Şekil 4.41 : Yük hücresi testi.



Şekil 4.42 : Yük hücresi testi.

Şekil 4.43’de, yapılan yükleme deneyi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.43 : Yük hücresi test grafiği.

4.3.2 Deplasman ölçer kalibrasyonu

Deplasman ölçerin ölçtüğü aralık 28,5 mm’dir. Sisteme bağlanan ölçme cihazları veri kaydetme ünitesinden gelen akım ile çalışmaktadır. Deplasman ölçer için bu

değerin her seferinde farklı olabileceği gözlenmiştir. Bu yüzden deplasman ölçer, her seferinde denenmelidir. Ölçüleri bilinen malzemelerle, ölçümler alınır. Bu ölçümlerde oluşan voltajlar Testlab Programı'nda, kalibrasyon bölümüne girilir. Böylece hangi voltaj için ne kadar deplasman oluşacağı belirlenmiş olur. Şekil 4.44'de kalibrasyon aşamasından bir kare gösterilmiştir.



Şekil 4.44 : Potansiyometre kalibrasyonu.

4.3.3 Birim deformasyon ölçer (strain gauge) kalibrasyonu

Birim deformasyon ölçer kalibrasyonunda, bir seri deneyler yapılmıştır. Profillere yerleştirilmiş bu cihazlar deney öncesi test edilir ve elde edilen değerler, teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Bunun için, profiller yatay çubuk olarak uçlara 1 cm uzaklıklarda mesnetlenmiştir. Şekil 4.45'de gösterilmiştir.



Şekil 4.45 : Birim deformasyon ölçerin kalibrasyonu.

Karşılaştırmalar sonucu, her bir birim deformasyon ölçer için ayrı ayrı bir katsayı bulunmuştur. Bu katsayılar nihai deneyde bulunan birim deformasyon değerleri ile çarpılarak, gerçek değerler tespit edilmiştir.

4.4 Baret Kazık Yatay Yükleme Deneyi Yapılışı

Deney, her bir kazık modelin, deney kasasına yerleştirildikten sonra, kumun %20 ve %70 rölatif sıklıkta yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Bunun için yükleme sisteminde profilleri sabitlemek için bir düzenek tasarlanmıştır. Profiller tutulacakları noktadan 14 mm kalınlığında delinir ve bu delikten düzeneğin mili geçer.

Daha sonra su terazisi yardımıyla, profil kontrol edilip düzenek sabitlenir. Su terazisi kontrolü, kumun doldurulması süresince devam eder. Şekil 4.46'de su terazisi ile yapılan kontrol gösterilmiştir.



Şekil 4.46 : Su terazisi ile profil başı yataylığının kontrolü.

Kumun dolumu için yaklaşık 1 ton kum deney öncesi etüvde kurutulmuştur. Kum deney kutusuna, her 5 cm’de bir yağmurlama yöntemiyle doldurulur. Bunun için deney kutusunun içi ve cam, 5 cm’de bir işaretlenmiştir. Kumun % 20 ve % 70 rölatif sıklıkta kuru birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. 5 cm’lik yükseklikteki hacimler hesaplanır ve bu hacmi doldurulacak kuru kum ağırlıkları hesaplanır. Kum tartıldıktan sonra, istenilen miktar yağmurlama sistemiyle konulur ve 5 cm’lik yüksekliğe sıkıştırılır. Böylece %20 ve %70’lik rölatif sıklıklar elde edilir. Kum dolumu bittikten sonra, potansiyometre yerleştirilir. Şekil 4.47’de sıkıştırma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.47 : Sıkıştırma işlemi.

Kum dolum süreci boyunca yüzeyin düzlüğü ve profilin sabitliği, su terazisi kullanılarak kontrol edilmiştir. Dolum bittikten sonra kablolar bağlanır. Birim deformasyon ölçerin değerleri minimum seviyeye kalibre edilir. Potansiyometre tekrar kalibre edilip, sistem hazır hale getirilir.

Buna ek olarak sistemin bağlantı noktaları çok iyi bir şekilde sıkılmalıdır. Çünkü en ufak bir kayma, deneyin tekrarına neden olacaktır. Deney hazırlandıktan sonra, sistem çalıştırılır ve veri kaydetme ünitesi tarafından ölçümler alınır.

Deney bitiminde önce bağlantılar, sonra profil çıkartılır. Ardından kum tamamen boşatılır ve yeni deneye geçilir. Şekil 4.48’de deneye hazır sistem gösterilmiştir.



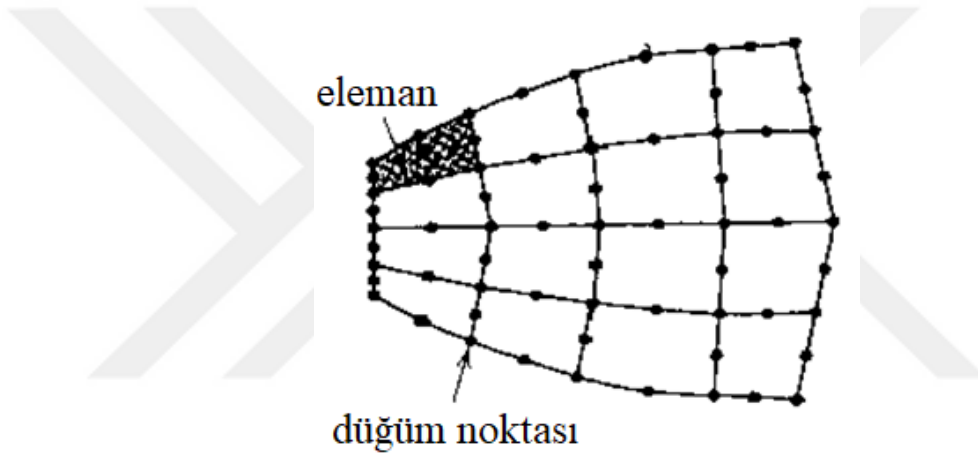
Şekil 4.48 : Deney Düzeneği.



5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANALİZ

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi ile ortam belirli sayıda elemanlara ayrılır. Bu elemanlar birbirlerine n sayıda düğüm noktası ile bağlıdır (Koçak, 2013). Bu elemanların oluşturduğu ağı, sonlu elemanlar ağı (mesh) adı verilir. Şekil 5.1’de sonlu elemanlar ve düğüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Sonlu eleman ve düğüm noktası (Uncuoğlu, 2009).

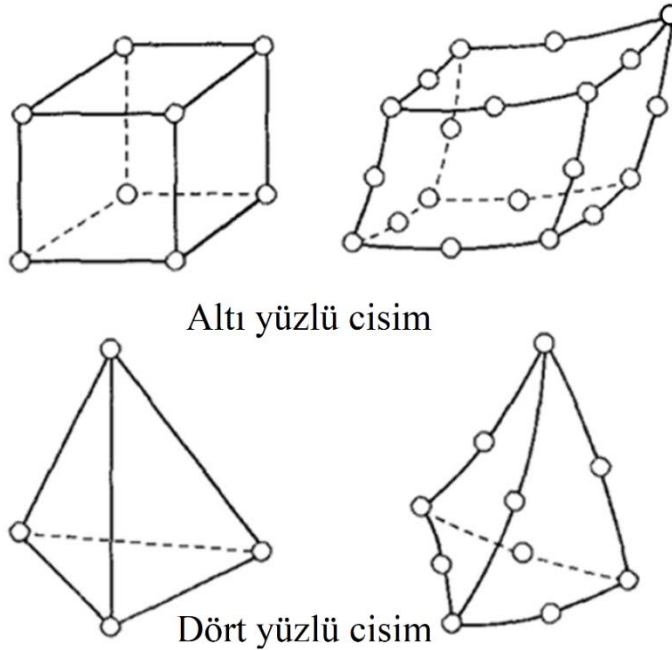
Bu tezde incelenen yatay yüklü baret kazıklar problemi, non-lineer ve üç boyutlu bir problemdir. Bu problemde, baret temelin taşıma kapasitesinde, zemin ile baret temel arasındaki etkileşim esastır. Zeminin gerilme-deformasyon davranışı, baret temelin rijitliği, geometrisi ve kazık ile zeminin ara yüzeyi, bu problemdeki önemli parametrelerdir. Bir elemanın deformasyonunu hesaplamak için, düğüm noktalarında oluşan deformasyonlar esas alınır. Deplasman fonsiyonları kullanılarak oluşturulan uyumluluk fonsiyonları ile bir eleman içinde oluşan şekil değiştirmeler hesaplanır. (Koçak, 2013). Şekil değiştirmeler hesaplandıktan sonra bu değerlere göre gerilmeler hesaplanır. Eleman özellikleri, malzeme özellikleri ve geometrik özellikleri girilerek, eleman rijitlik matrisi elde edilir. Eleman rijitlik matrisleri, birlikte sistem rijitlik matrisi $[K]$ 'ı oluşturur. Düğüm noktalarına etkiyen kuvvetler bir araya getirilir ve sistem yük vektörü elde edilir. Sınır şartları uygulanır ve düğüm noktalarındaki

deplasman değerlerinin elde edilmesi için $[K] \{U\} = \{F\}$ matrisi çözülür. Sonuç olarak, deplasman belirlenmiş olur ve bununla birim şekil değiştirmeler ve gerilmeler hesaplanır.

Matematiksel denklemler ile oluşturulan teorik modeller ile malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı açıklanmaktadır (Plaxis Material Manual, 2012). Bu teorik zemin modelleri, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli teorik modeller oluşturulabilir. Bunların başlıcaları; Mohr-Coulomb modeli, Hoek-Brown modeli, elastik sertleşen plastik modeller, yumuşak zemin modeli ve cam killi modelleridir (Koçak, 2013).

Bu tez için, üç boyutlu sonlu eleman analizi Plaxis 3D programı kullanılarak, kum zemin için Mohr-Coulomb modellemesi kullanılmıştır.

Üç boyutlu analizler, iki boyutlu analizlere göre daha fazla işlem sayısına sahiptir. Sürekli ortam belirli sayıda üç boyutlu elemana ayrılır. Bu elemanlarda, her düğüm noktasında, üç adet serbestlik derecesi bulunur. Üç boyutlu model için sistem rijitlik matrisinin oluşturulması, iki boyutlu modele göre daha zordur. Üç boyutlu modellerde, en çok kullanılan elemanlar altı yüzlü ve dört yüzlü cisimlerdir. (Şekil 5.2) Oluşturulan elemanların özellikleri, düğüm noktalarının koordinatları ile belirlenmektedir (Koçak, 2013).

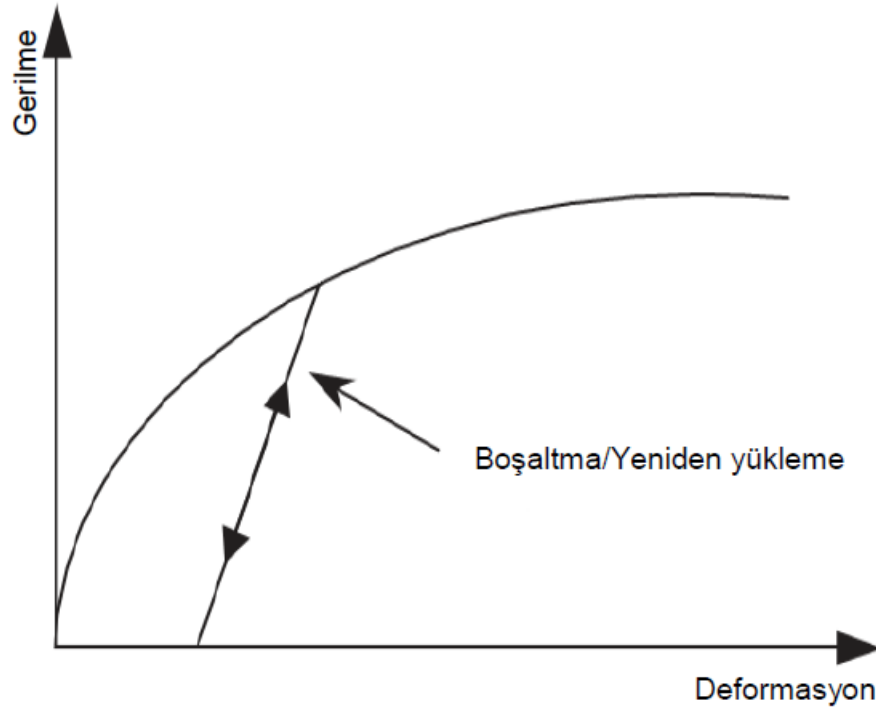


Şekil 5.2 : Üç boyutlu sonlu elemanlar (Potts ve Zdravkovic, 1999).

Global elemanlar, izoparametrik elemanların kullanıldığı modellerde doğal koordinat sisteminde tanımlanmış ancak eşit sayıda düğüm noktasında ana elemandan üretilir. Şekil fonksiyonlarından yararlanılarak düğüm noktalarında meydana gelen yerdeğiştirmeler hesaplanır. Hesaplanan bu yerdeğiştirmelerden gerilme-deformasyon değerleri hesaplanır. Bu değerlerle eleman rijitlik matrisi oluşturulur (Koçak, 2013).

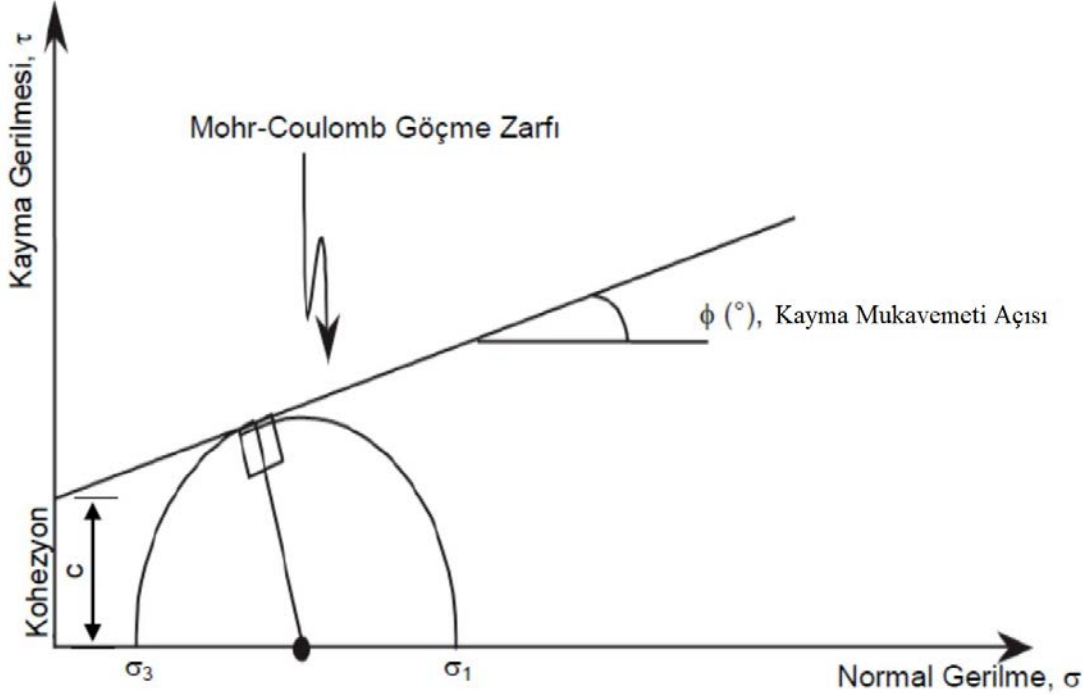
5.2 Zemin Davranışının Modellenmesi

Malzeme modelinde, model parametreleri, malzeme deneyleri ile tanımlanmalıdır ve modelin gerilme ve deformasyon özellikleri için malzeme davranışını açıklayabilmelidir (Uncuoğlu, 2009). Gerilme ve deformasyonlarda değişiklik olduğunda, malzemenin fiziksel tepkisi belirlenmelidir. Gerilme deformasyon ilişkisinde, elastik ve plastik bölge mevcuttur. Elastik bölgede gerilme-deformasyon grafiği doğrusaldır. Grafiğin yenilme noktasına ulaşmasıyla plastik bölge başlar. Yapılan araştırmalar sonucu, kum zeminlerin elasto-plastik bir davranış sergilediği görülmüştür. Şekil 5.3’de kum zemin için gerilme deformasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.3 : Elasto-plastik malzeme için gerilme-deformasyon ilişkisi (Johnson ve diğ, 2006).

Deformasyon, plastik noktaya gelene kadar geri dönülebilir deplasman oluşur. Plastik bölgede kalıcı deplasmanlar oluşur. Bu yüzden elastik modellerde, plastik deformasyon gerilmelerinin tanımlanması için, göçme kriteri tanımlanması gereklidir. Şekil 5.4’de Mohr-Coulomb göçme yüzeyi gösterilmiştir.



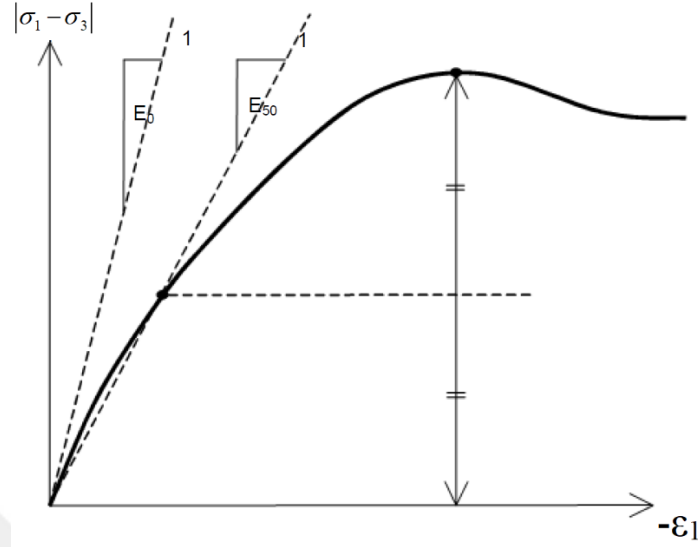
Şekil 5.4 : İdealize gerilme ve deformasyon ilişkisi (Johnson ve diğ, 2006).

Mohr-Coulomb göçme zarfı, büyük ve küçük asal gerilmelere bağlıdır. Üç boyutlu sistemde, Mohr-Coulomb kriteri altıgen bir piramit şeklini alır. Bu piramit zeminin yük etkisi altında göçme-yenilme zarfını temsil etmektedir. Gerilme dairesi göçme zarfına ulaşırsa, malzeme plastik davranışta. Gerilme noktaları bu zarfın içindeyse, malzeme elastik özelliktedir (Uncuoğlu, 2009).

5.2.1 Mohr-Coulomb modeli (MC)

Mohr-Coulomb modeli (MC), kırılma kriteriyle lineer elastik ve tam plastik bir modeldir. Model beş adet parametre gerektirmektedir. Young modülü (E), poisson oranı (ν), kayma mukavemeti açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı (ψ). Malzeme parametrelerini tanımlarken, elastisite modülü için iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisi E_0 ; üç eksenli deney sonucunda hesaplanan elastisite modülüdür. Diğeri ise sekant elastisite modülü olan E_{50} ; $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 'ün maksimum değerinin yarısına karşılık gelir. Kum zeminler için, elastisite modülü E_{50} olarak kabul edilir. Şekil 5.5’de E_0 ve E_{50} için grafik gösterilmektedir. Mohr-

Coulomb malzeme modeli için, elastisite modülünün değeri her derinlikte aynı kabul edilir (Uncuoğlu, 2009).



Şekil 5.5 : Elastisite modüllerinin (E_0 ve E_{50}) tanımlanması (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007).

Mohr-Coulomb modeli oldukça yaygındır. Az sayıda parametre gerektirdiği ve bu parametrelerin temel zemin mekaniği deneyleri ile kolayca bulunabileceği için, tercih sebebi olmuştur. Buna ek olarak, literatürde yapılmış olan çalışmalarda görülmüştür ki, sonuçlar yeterli doğruluktadır.

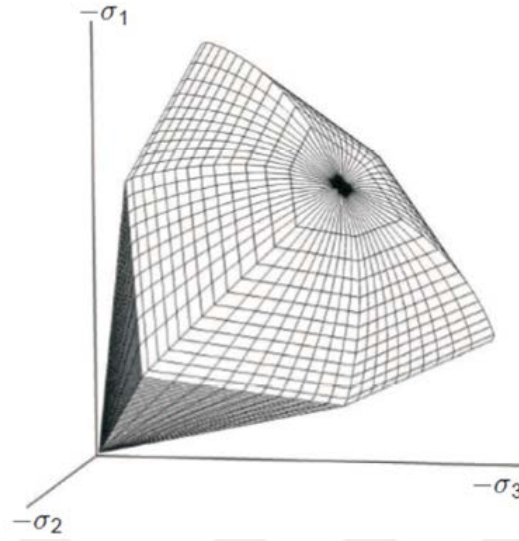
5.2.2 Pekleşen zemin modeli (HC)

Pekleşen zemin modeli, çeşitli zemin tipleri için geliştirilmiştir. Pekleşen zemin modelinde plastisite teorisi kullanılır, zemin dilatasyonu göz önünde bulundurulur ve sünme yüzeyi hesaplanır (Plaxis Material Manual, 2012).

Bu zemin modeli, daha gelişmiş bir model olup bütün zemin tiplerine uygundur. Pekleşen zemin modeli, tam plastik zemin modelidir. Sünme fonksiyonu sadece gerilmeye bağlı değildir. Pekleşme parametresi de, sünme fonksiyonunu etkiler ve sünme yüzeyi boyutları etkilenir. Plastik şekil değişimlere bağlı olarak pekleşme parametresi değişir.

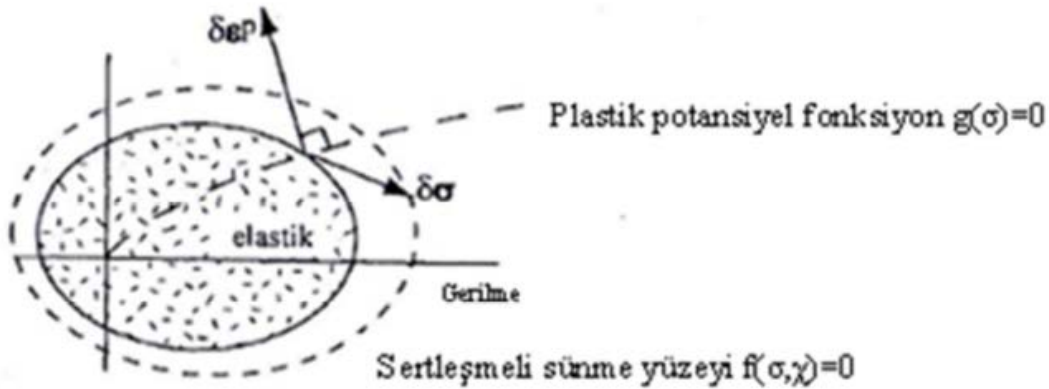
Pekleşen zemin modelinde, elastik şekil değiştirmeler, gerilmelerin değişmesi sonucu oluşur. Elastik bölgenin sınırları, gerilme düzlemindedir. Sünme kriteri; plastik deformasyon ve sünme oluşma durumu verir. Sünme kriteri, zeminin gerilme tarihçesine bağlıdır. Mevcut, sünme yüzeyini aşamaz, ancak sünme yüzeyi boyutu da

sabit değildir. Şekil 5.6’da pekleşen zemin modeli için plastik potansiyel fonksiyon-sünme yüzeyi ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Kohezyonsuz zeminlerde sünme yüzeyinin asal gerilme eksenlerinde gösterimi (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007).

Akma kuralına göre şekil değiştirme bileşenleri oranı ve plastik potansiyel fonksiyon belirlenir ve plastik şekil değiştirmenin, sünme yüzeyine olaşturan gerilme artışıyla değil, sünme esnasında bulunan gerilme değerinin etkisiyle oluştuğu görülür. Şekil 5.7’de pekleşen zemin modelinde elastik ve plastik bölgeleri ayıran sünme yüzeyi ile plastik potansiyel fonksiyonu gösterilmiştir.



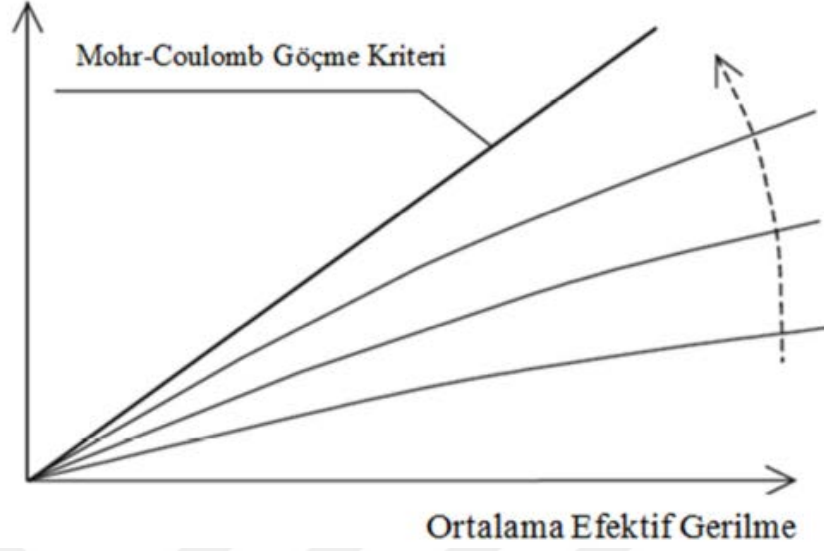
Şekil 5.7 : Pekleşen zemin modelinde elastik ve plastik bölgeleri ayıran sünme yüzeyi ile plastik potansiyel fonksiyonun gösterimi (Wood, 2004).

Sertleşme kuralı, plastik şekil değiştirmelerin sünme yüzeyinin boyutuna etkisini belirlemek için kullanılır (Wood, 2004). Şekil 5.8’de farklı sertleşme parametrelerine göre sünme yüzeyi değişimi gösterilmiştir.

Deviatör Gerilme

$$|\sigma_1 - \sigma_3|$$

Mohr-Coulomb Göçme Kriteri



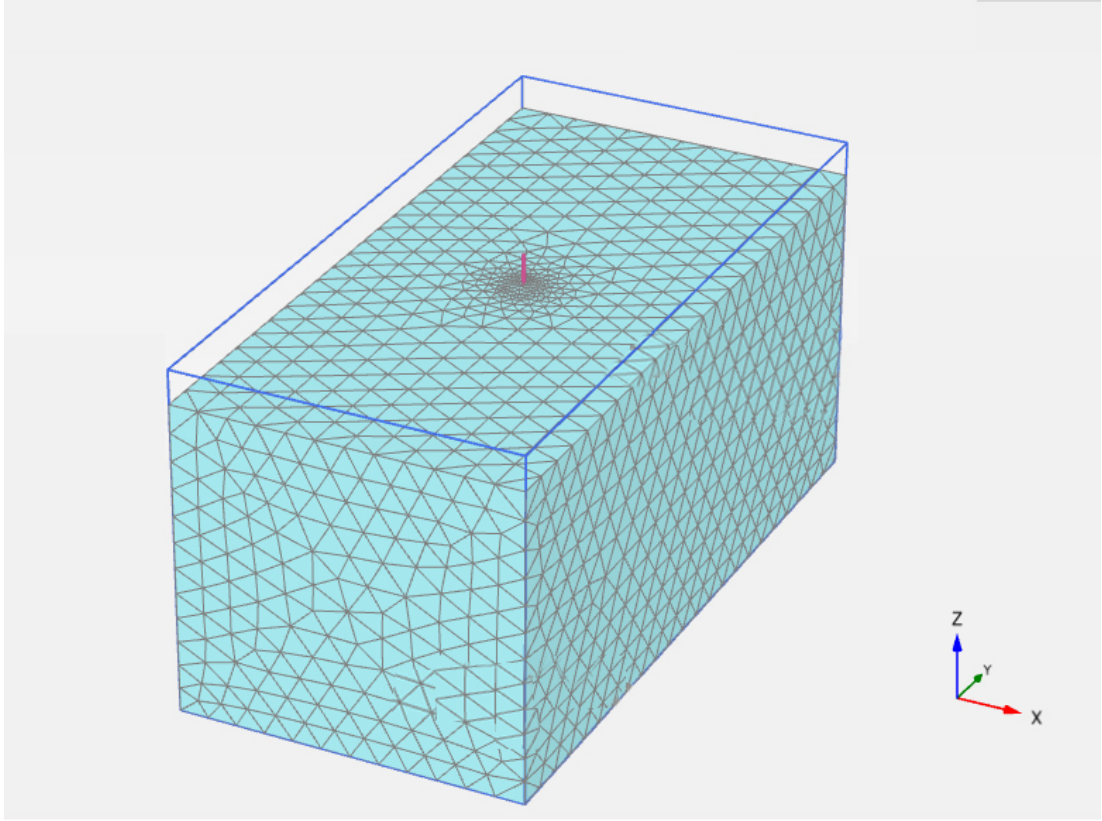
Şekil 5.8 : Farklı sertleşme parametrelerine göre sünme yüzeyi değişimi (Plaxis 3D Foundation V2 Material Manual, 2007).



6. YATAY YÜKLÜ BARET KAZIKLARDA DENEY SONUÇLARININ VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Plaxis 3D Programı ile Yatay Yüklü Baret Kazıkların Analizi

Plaxis 3D programında model boyutundaki baret kazık analizleri yapılmıştır. Burada alınan sonuçlar, model deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerin bulunduğu derinliklerdeki maksimum moment değerleri ve kazığa gelen maksimum yükler ölçülmüştür. Şekil 6.1’de yapılan Plaxis 3D modellemesi görülmektedir.



Şekil 6.1 : Plaxis 3D modellemesi.

Plaxis 3D analizini yaparken, malzemeyi tanımlamak için malzeme özellikleri girilmiştir. Bunlar için profillerin atalet momentleri hesaplanmıştır. Zemin deney sonuçları, Plaxis 3D programında kullanılmıştır. Profilin özellikleri tespit edilip, Plaxis 3D programına tanımlanmıştır.

Analiz yöntemi olarak Mohr-Cloumb yöntemi kullanılmıştır. Zemin için aşağıdaki Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de gösterilen tablodaki değerler girilmiştir. Profiller için girilen değerler de Çizelge 6.3, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’de (I profil, artı profil, ve kare profil için) verilmiştir.

Çizelge 6.1 : %20 rölatif sıkılıktaki kum için Plaxis 3D bilgileri.

Kum Dr:%20	
γ_k	15 kN/m ³
γ_d	15 kN/m ³
E	5000 kN/m ²
ν (nu)	0,3
ϕ	33
ψ	33

Çizelge 6.2 : %70 rölatif sıkılıktaki kum için Plaxis 3D bilgileri.

Kum Dr:%70	
γ_k	16 kN/m ³
γ_d	16 kN/m ³
E	30000 kN/m ²
ν (nu)	0,3
ϕ	42
ψ	12

Çizelge 6.3 : I profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.

I PROFİL	
E	2,10E+08 kN/m ²
γ	7,85E+01 kN/m ³
A	1,76E-04 m ²
I ₃	1,36E-08 m ⁴
I ₂	1,00E-07 m ⁴
Yüzey direnci	Lineer

Çizelge 6.4 : + profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.

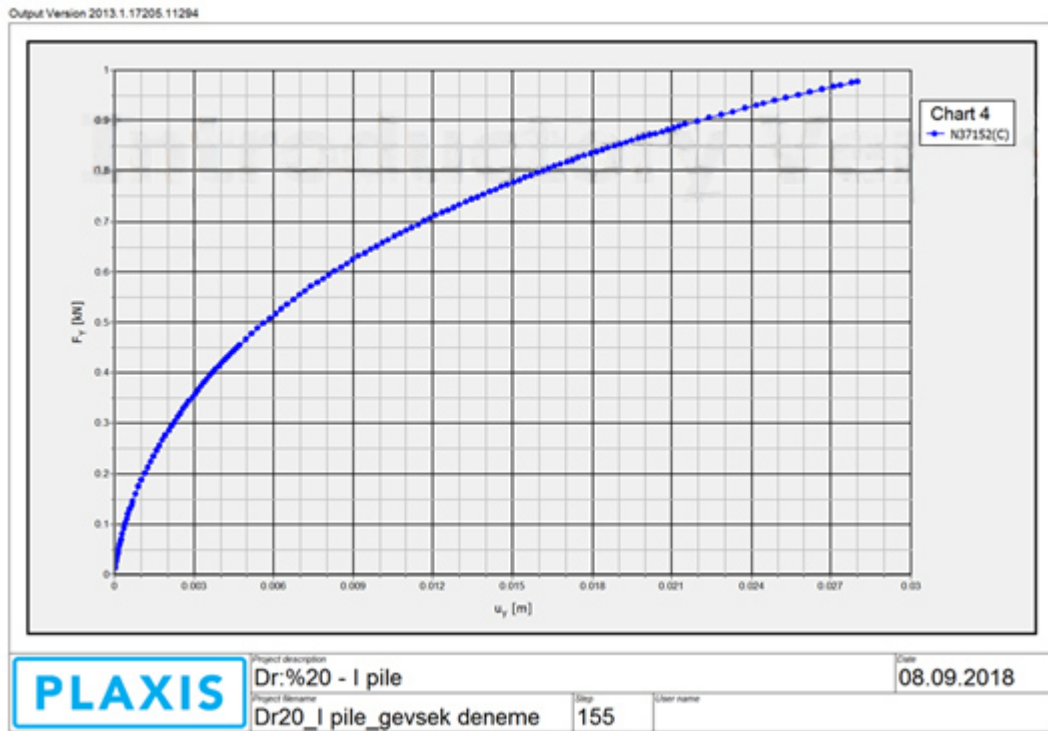
"+" PROFİL	
E	2,10E+08 kN/m ²
γ	7,85E+01 kN/m ³
A	2,52E-04 m ²
I ₃	8,48E-08 m ⁴
I ₂	8,48E-08 m ⁴
Yüzey direnci	Lineer

Çizelge 6.5 : Kare profil için Plaxis 3D malzeme bilgileri.

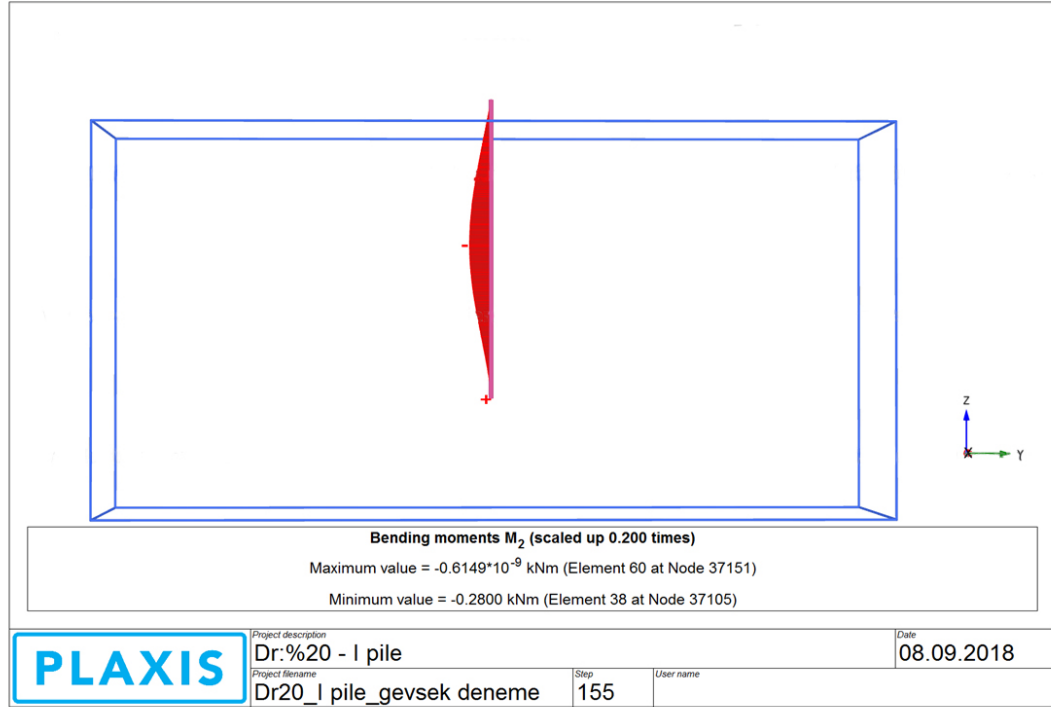
KARE PROFİL	
E	2,10E+08 kN/m ²
γ	7,85E+01 kN/m ³
A	1,56E-04 m ²
I ₃	3,95E-08 m ⁴
I ₂	3,95E-08 m ⁴
Yüzey direnci	Lineer

6.1.1 %20 rölâtif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D sonuçları

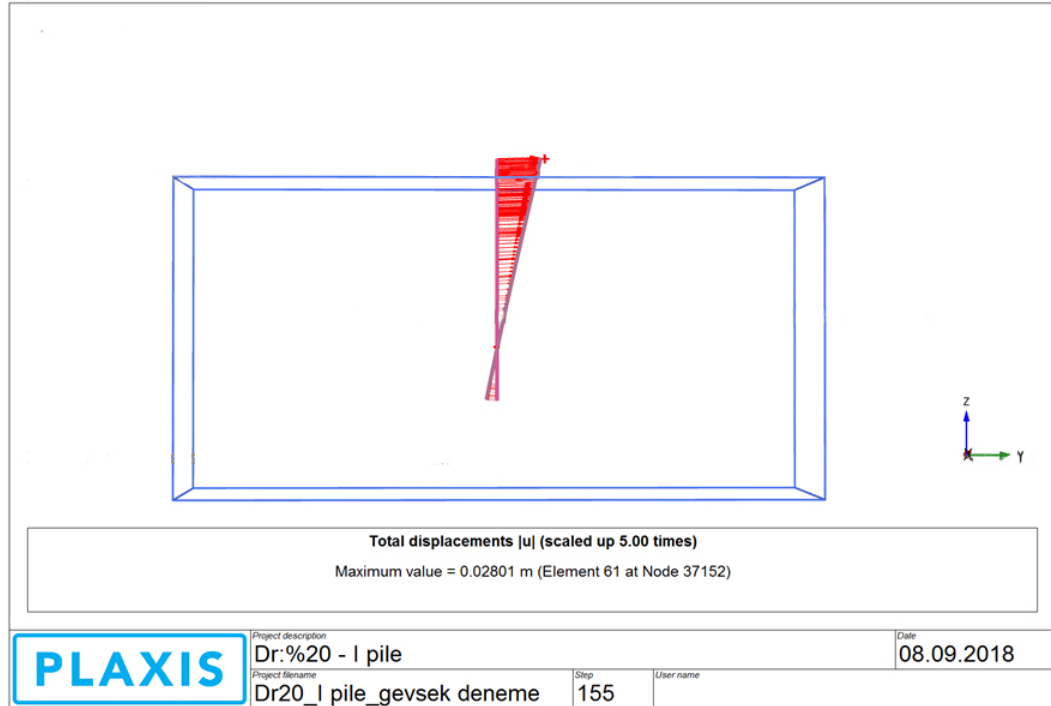
%20 rölâtif sıkılık için, I profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları şekil 6.2, şekil 6.3 ve şekil 6.4'deki grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığı gelen maksimum yük 0,98 kN'dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,024 kNm, orta noktada 0,273 kNm ve üst noktada 0,126 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum moment değeri 0,273 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.2 : %20 rölâtif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



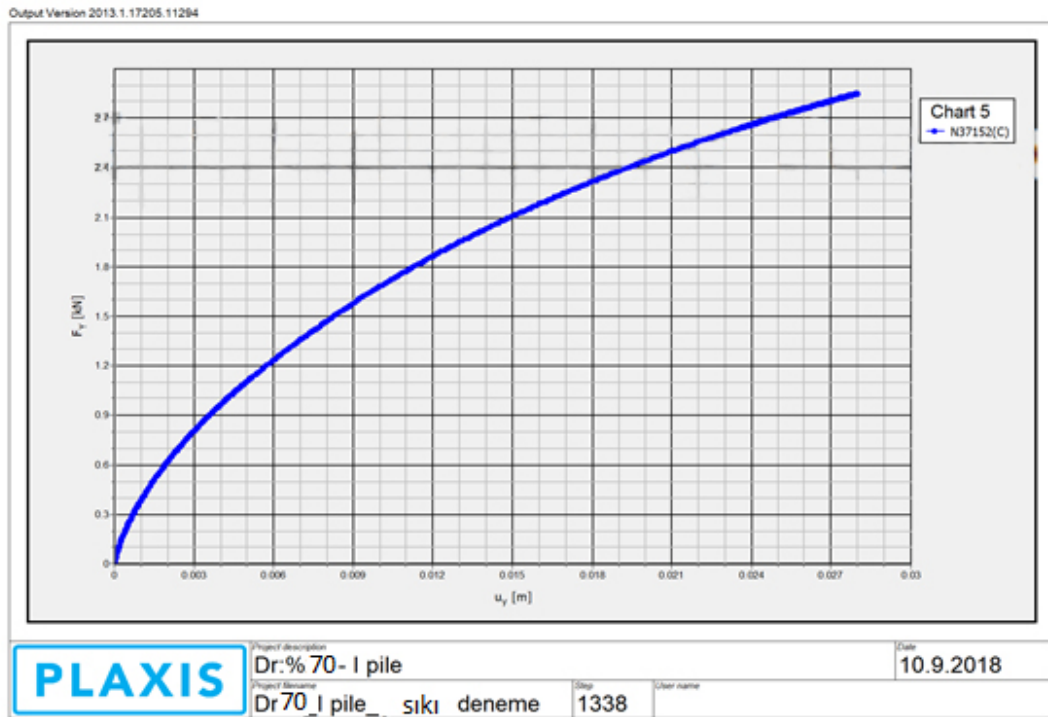
Şekil 6.3 : %20 rölatif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D moment davranışı.



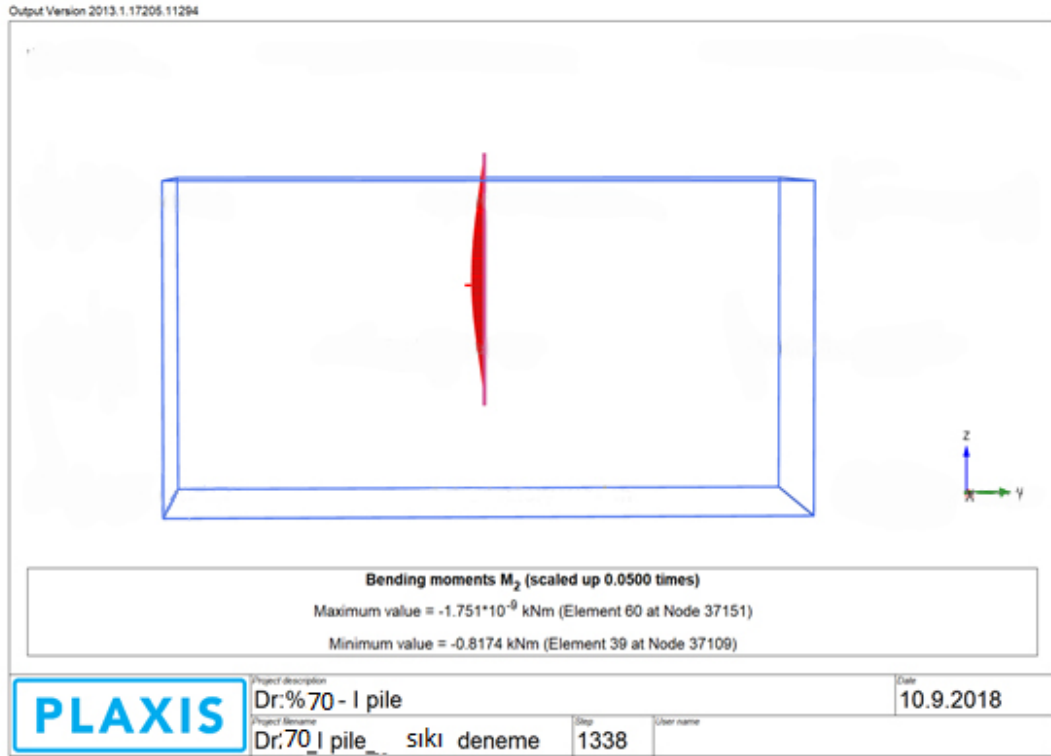
Şekil 6.4 : %20 rölatif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.1.2 %70 rölâtif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D sonuçları

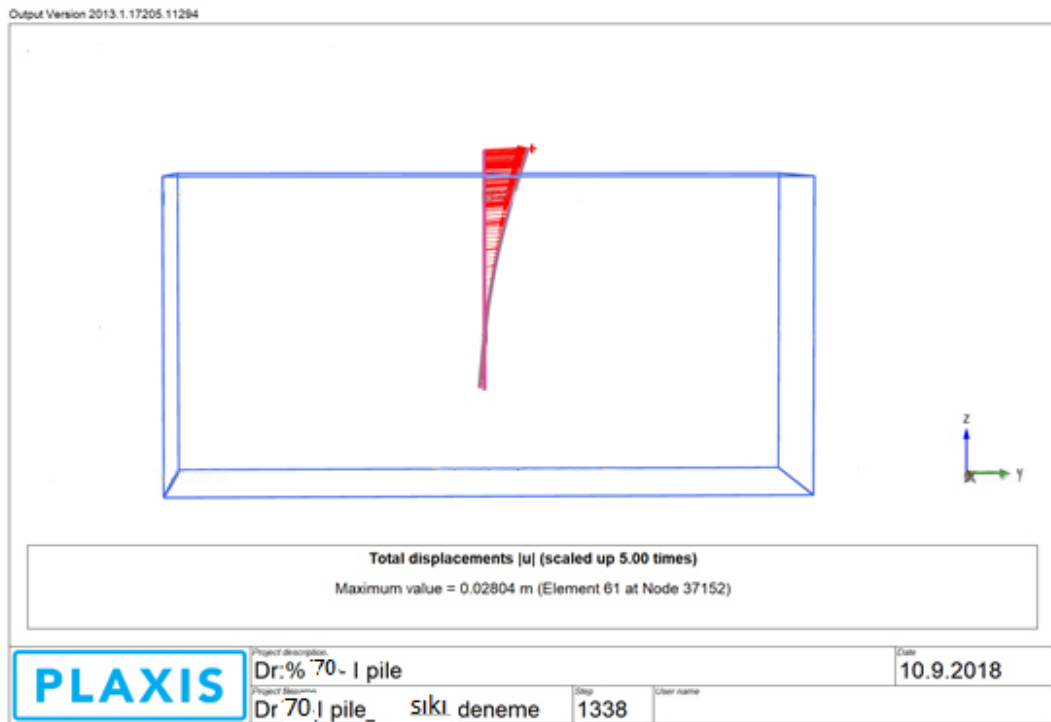
%70 rölâtif sıkılık için, I profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları aşağıdaki şekil 6.5, şekil 6.6 ve şekil 6.7'deki grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 2,58 kN'dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,0498 kNm, orta noktada 0,807 kNm ve üst noktada 0,348 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum moment değeri 0,807 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.5 : %70 rölâtif sıkılıkta I profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



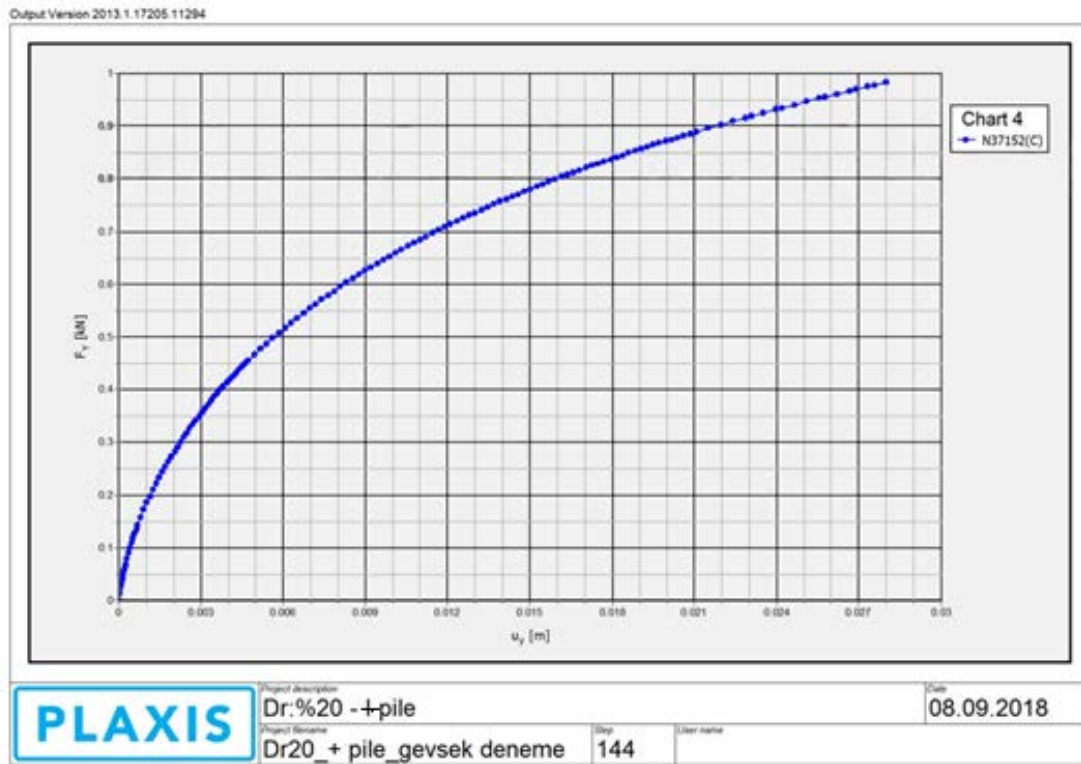
Şekil 6.6 : %70 rölatif sıklıkta I profil için Plaxis 3D moment davranışı.



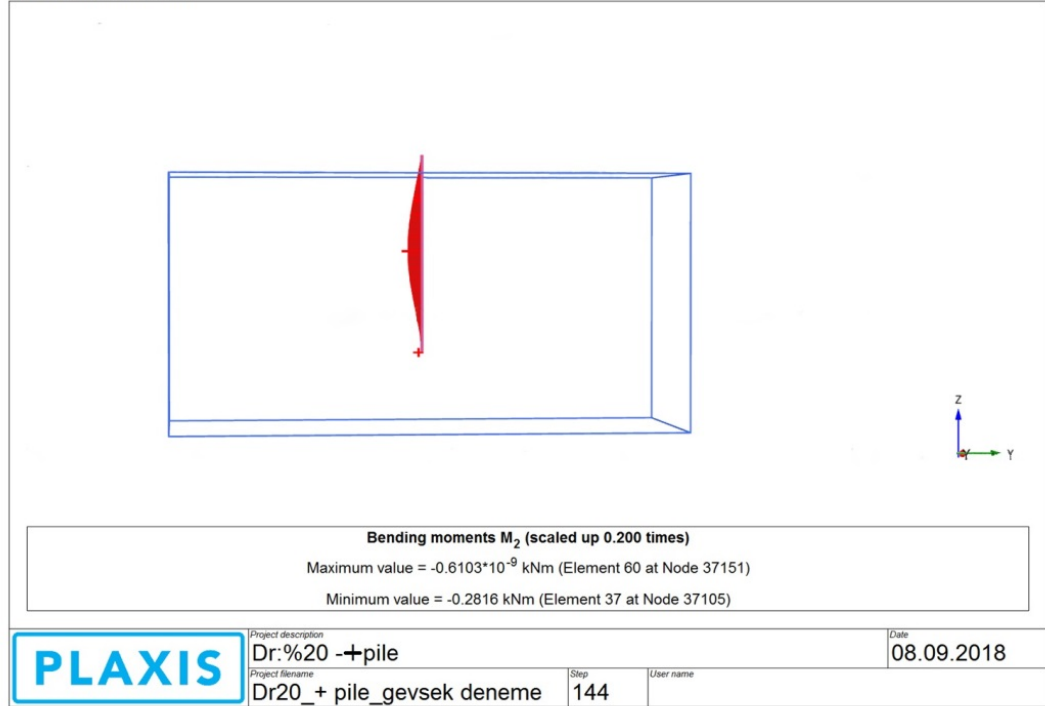
Şekil 6.7 : %70 rölatif sıklıkta I profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.1.3 %20 rölâtif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D sonuçları

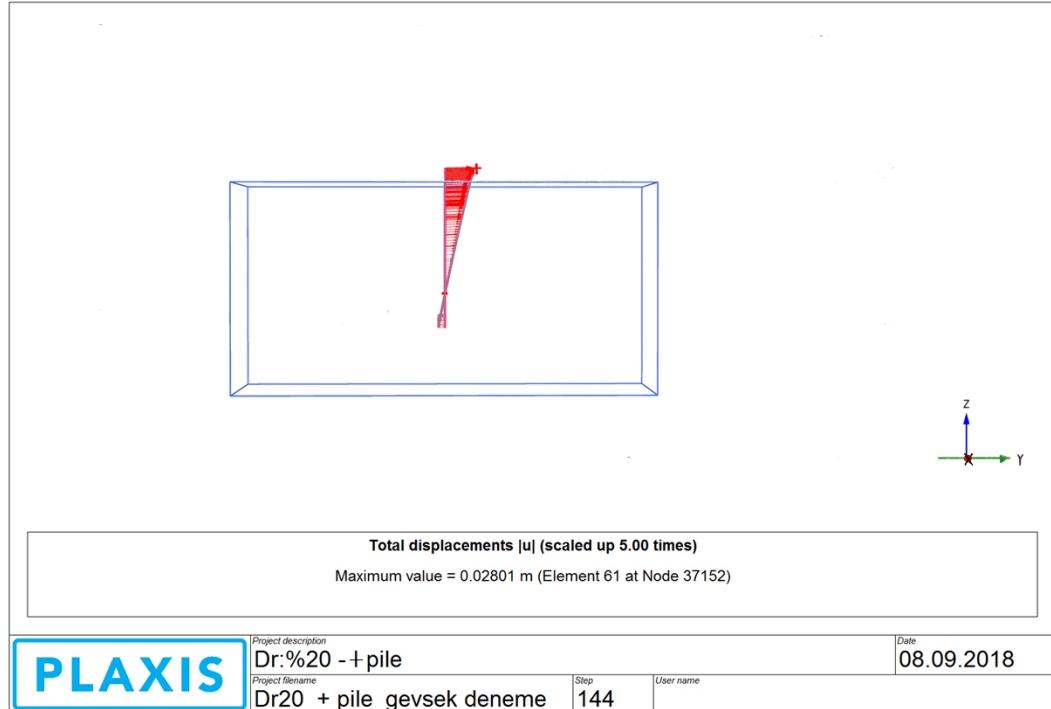
%20 rölâtif sıkılık için, + profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları aşağıdaki şekil 6.8, şekil 6.9 ve şekil 6.10'daki grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 0,983 kN dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,036 kNm, orta noktada 0,274 kNm ve üst noktada 0,127 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum elde edilen moment değeri 0,274 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.8 : %20 rölâtif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



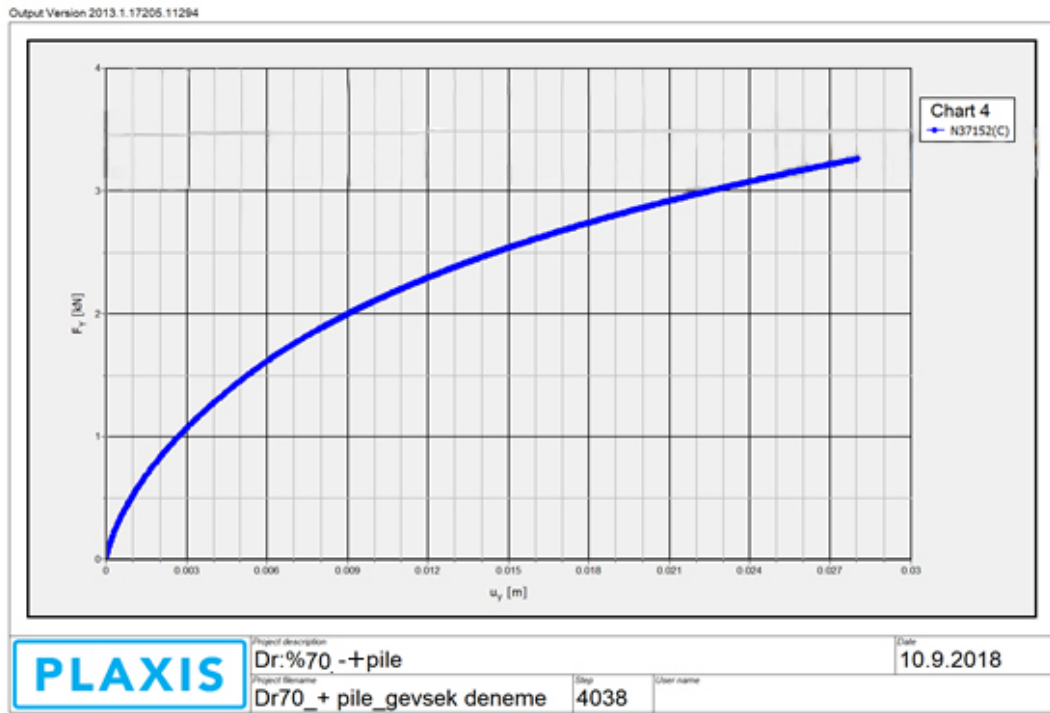
Şekil 6.9 : %20 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D moment davranışı.



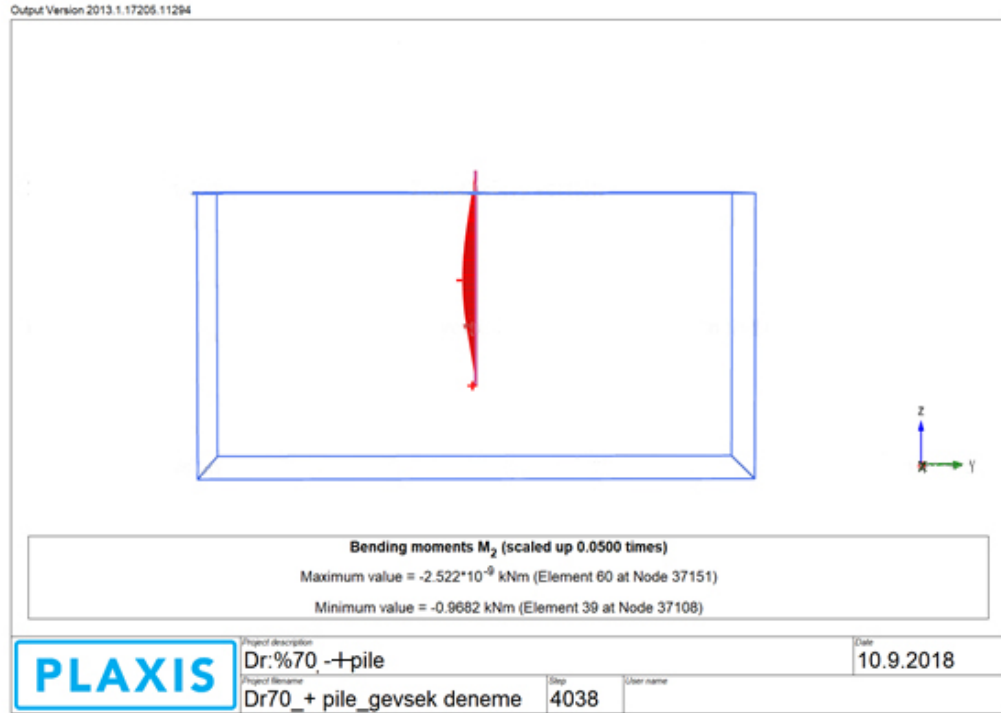
Şekil 6.10 : %20 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.1.4 %70 rölâtif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D sonuçları

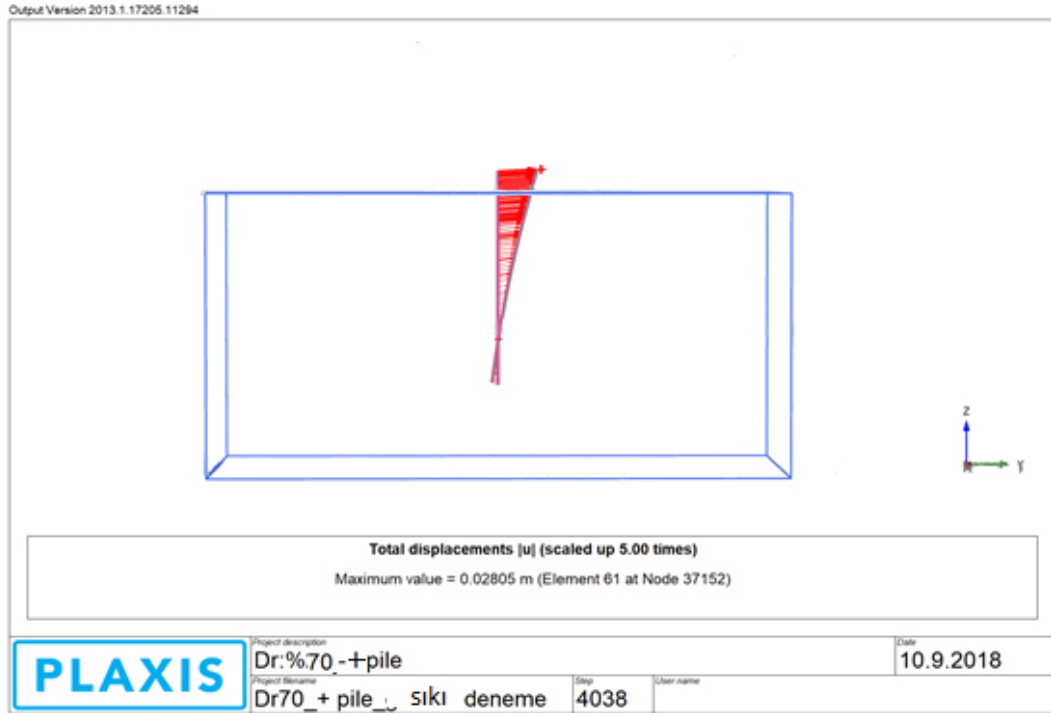
%70 rölâtif sıkılık için, + profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları aşağıdaki şekil 6.11, şekil 6.12 ve şekil 6.13'deki grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 3,26 kN'dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,097 kNm, orta noktada 0,92 kNm ve üst noktada 0,39 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum moment değeri 0,92 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.11 : %70 rölâtif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



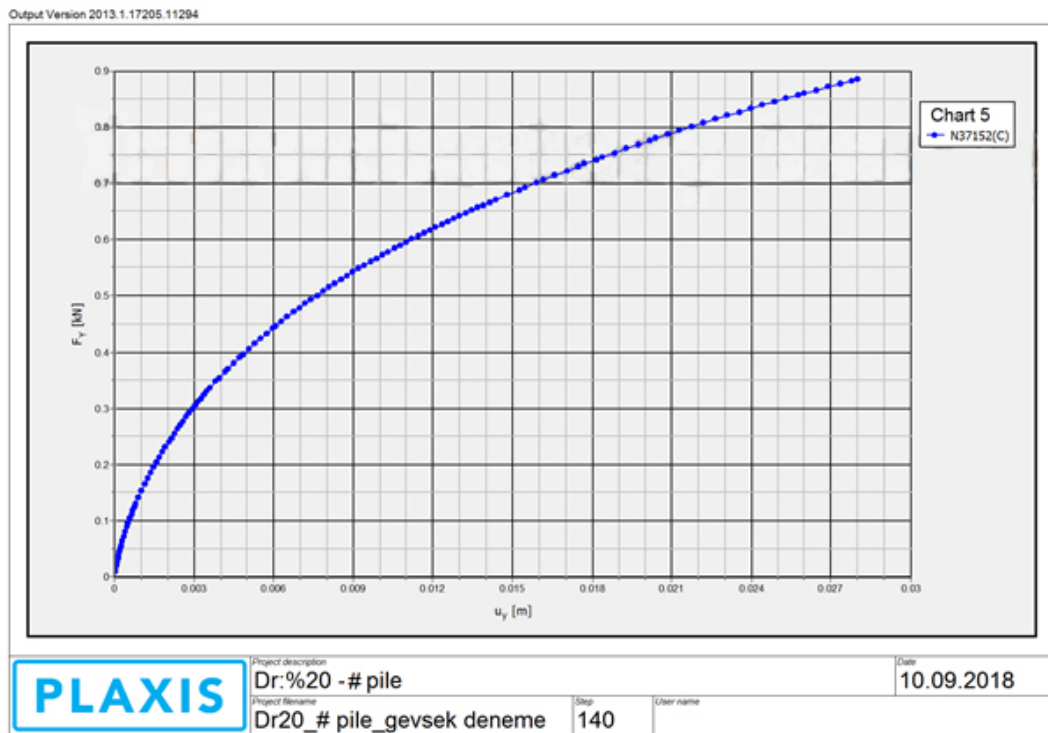
Şekil 6.12 : %70 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D moment davranışı.



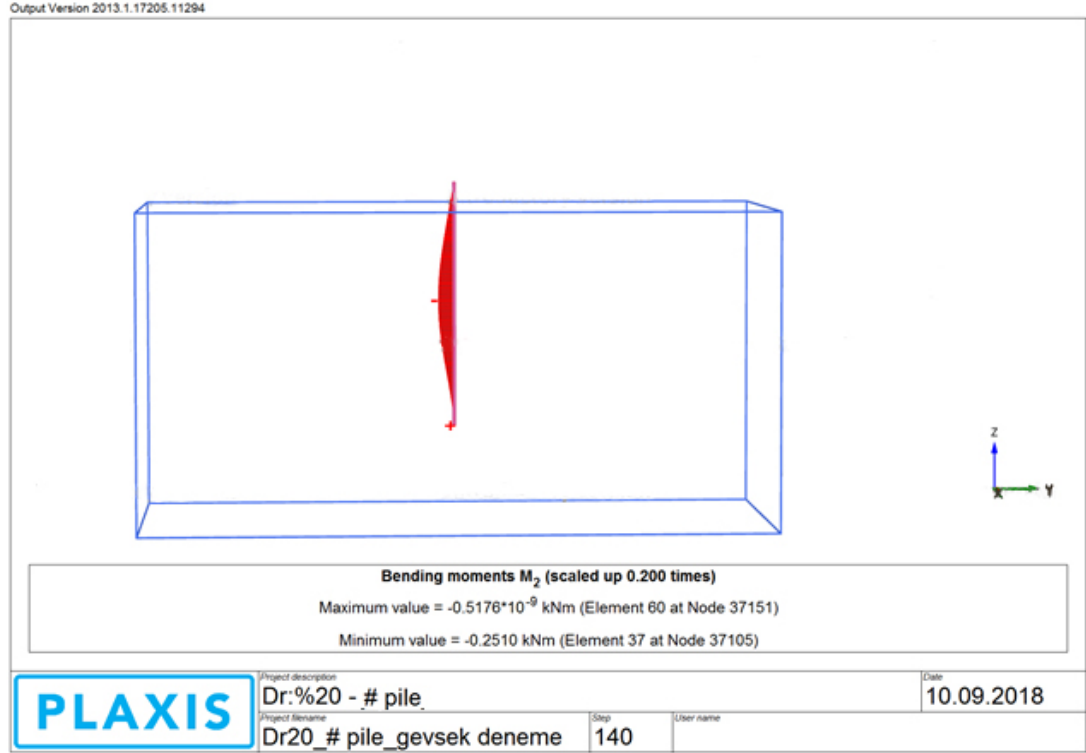
Şekil 6.13 : %70 rölatif sıkılıkta + profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.1.5 %20 rölâtif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D sonuçları

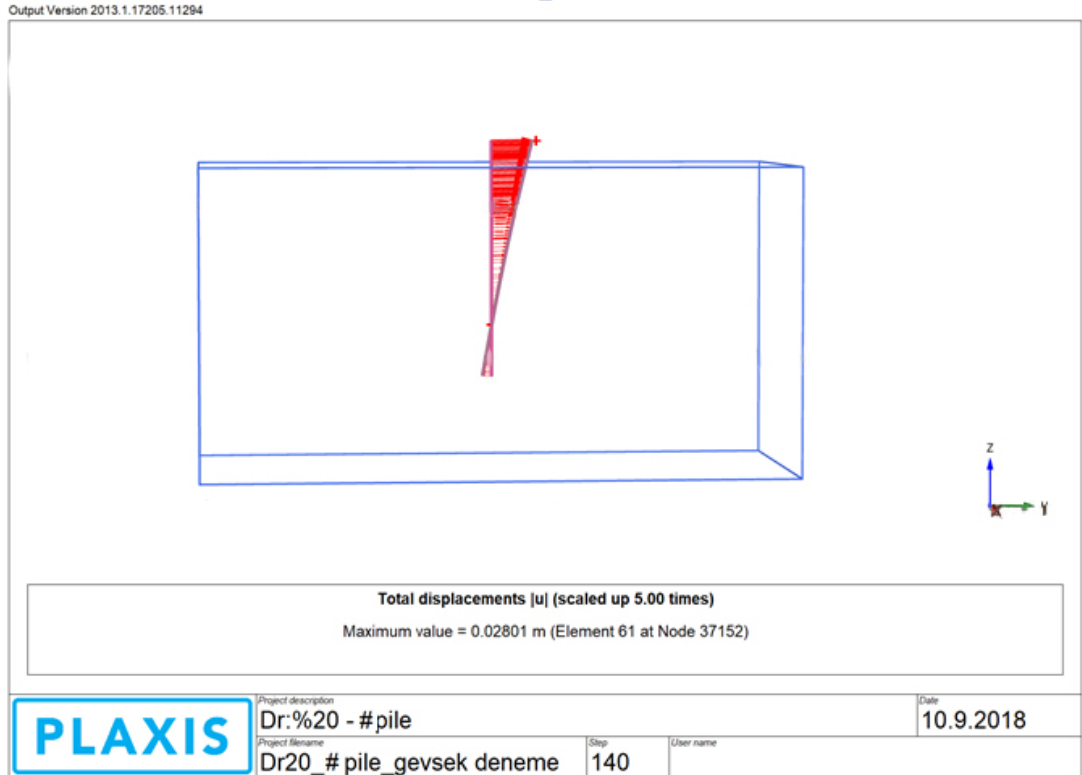
%20 rölâtif sıkılık için, kutu profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları aşağıdaki şekil 6.14, şekil 6.15 ve şekil 6.16'daki grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 0,886 kN'dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,021 kNm, orta noktada 0,246 kNm ve üst noktada 0,114 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum moment değeri 0,886 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.14 : %20 rölâtif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



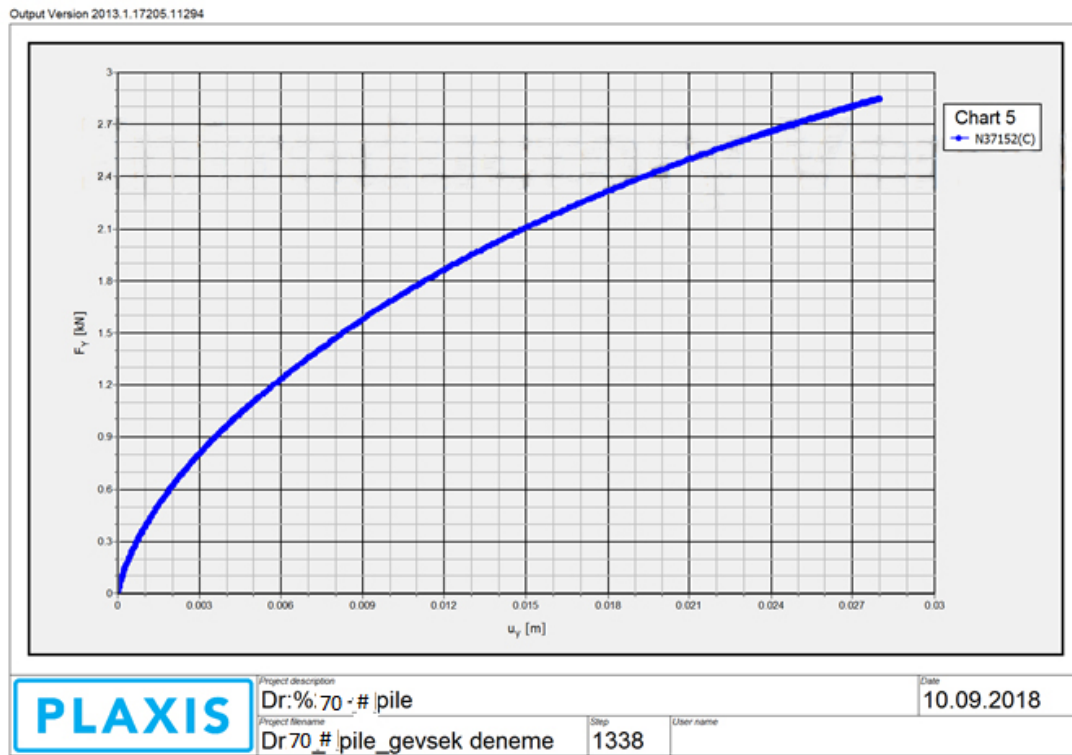
Şekil 6.15 : %20 rölatif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D moment davranışı.



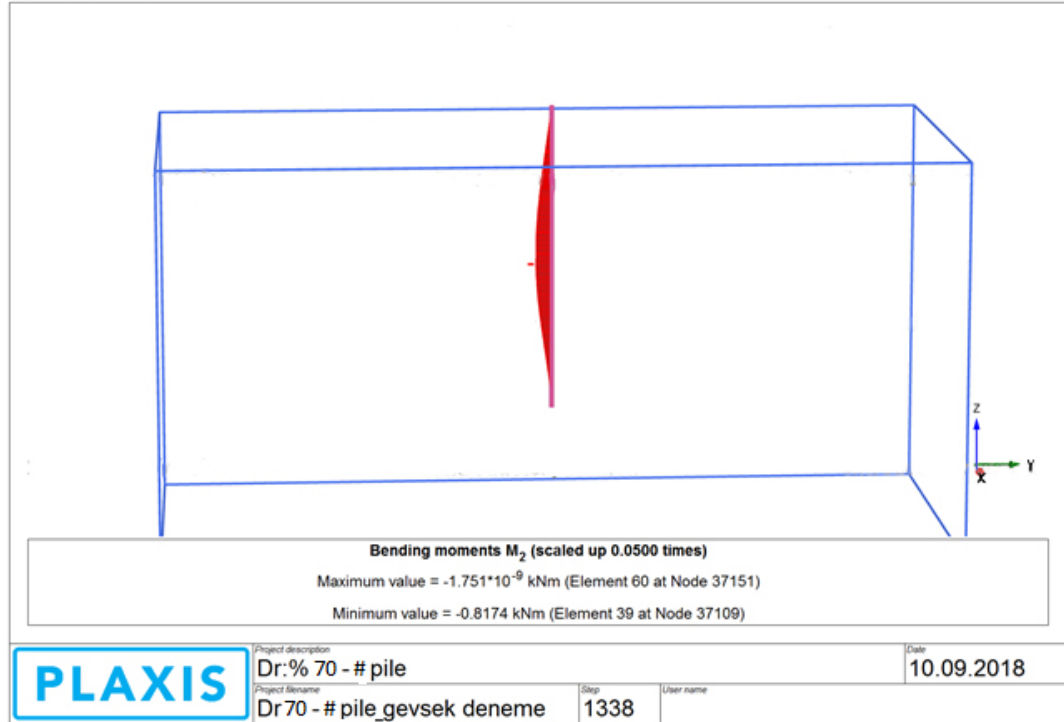
Şekil 6.16 : %20 rölatif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.1.6 %70 rölâtif sıklıkta kutu profil için Plaxis 3D sonuçları

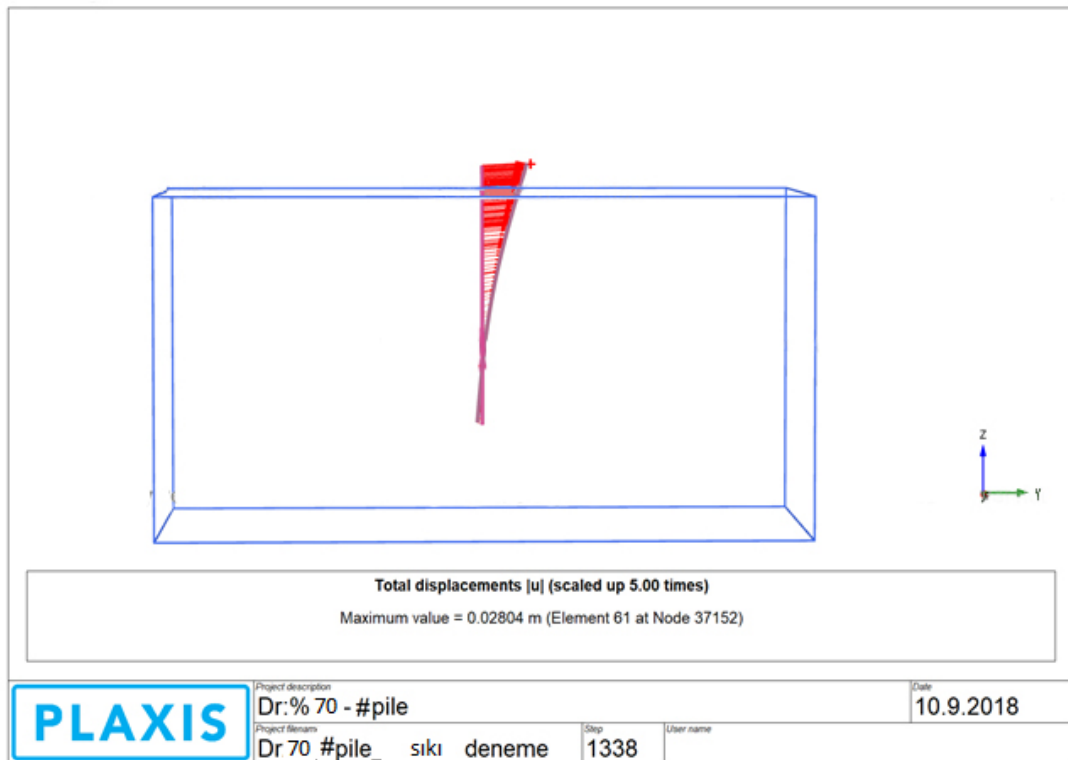
%70 rölâtif sıklık için, kutu profilde yapılan Plaxis 3D sonuçları aşağıdaki şekil 6.17, şekil 6.18 ve şekil 6.19’da grafiklerde gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 2,86 kN’dur. Alt noktadaki maksimum moment değeri için 0,0716 kNm, orta noktada 0,807 kNm ve üst noktada 0,348 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum moment değeri 0,807 kNm olarak elde edilmiştir. Programda maksimum deplasman 0,028 m olarak tanımlanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 6.17 : %70 rölâtif sıklıkta kutu profil için Plaxis 3D yük-deplasman eğrisi.



Şekil 6.18 : %70 rölatif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D moment davranışı.

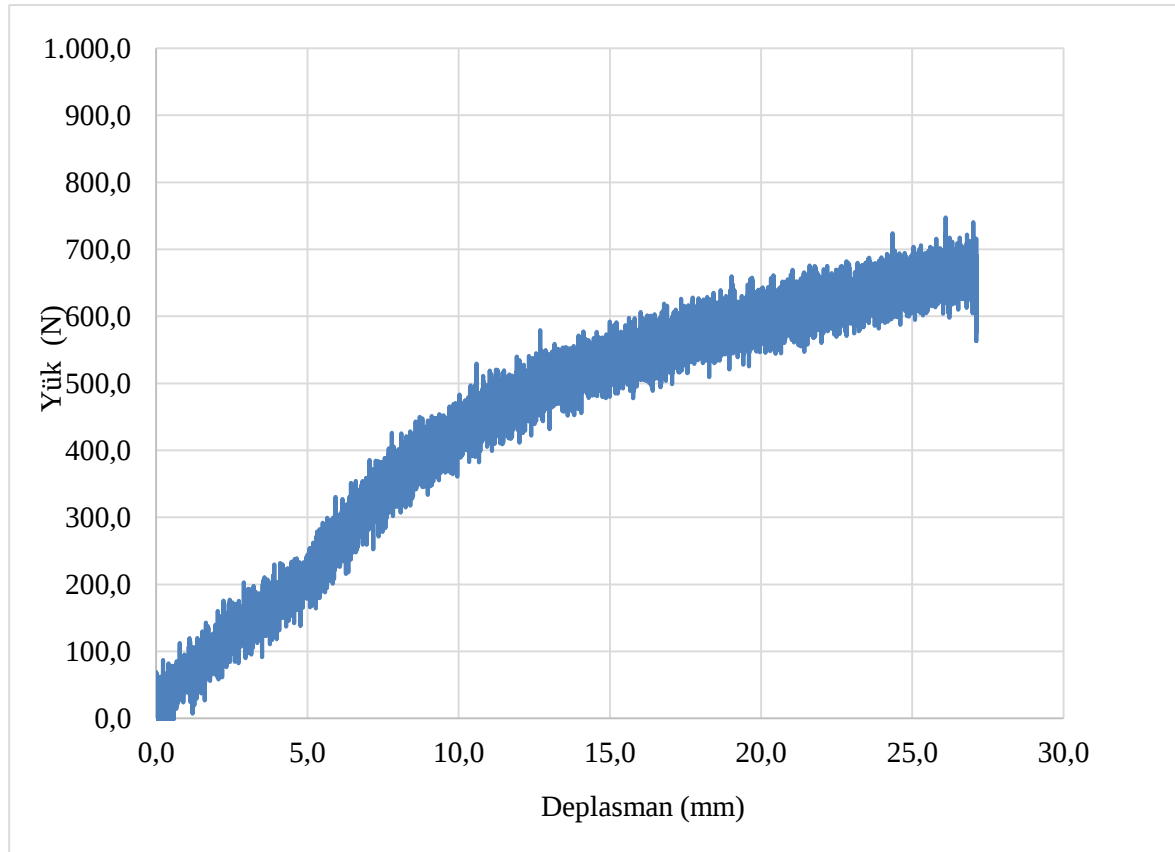


Şekil 6.19 : %70 rölatif sıkılıkta kutu profil için Plaxis 3D deplasman grafiği.

6.2 Model Deney Sonuçları

6.2.1 %20 rölatif sıkılıkta I profil için deney sonuçları

%20 rölatif sıkılık için, I profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.20’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 0,75 kN’dur. Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,02 kNm, orta noktada 0,216 kNm ve üst noktada 0,119 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m’dir. Maksimum moment değeri 0,216 kNm’dir.

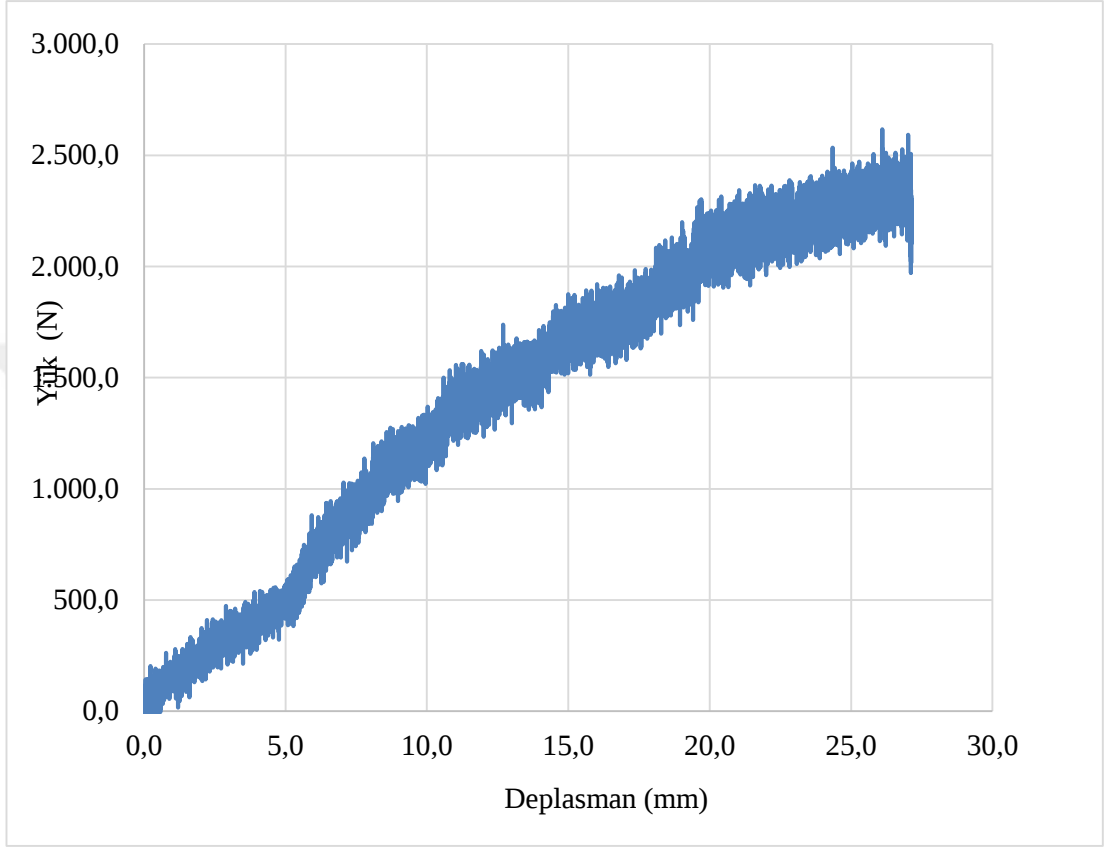


Şekil 6.20 : %20 rölatif sıkılıkta I profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

6.2.2 %70 rölatif sıkılıkta I profil için deney sonuçları

%20 rölatif sıkılık için, I profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.21’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 2,58 kN’dur. Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,0498 kNm, orta noktada 0,789 kNm ve üst

noktada 0,321 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m'dir. Maksimum moment değeri 0,789 kNm'dir.

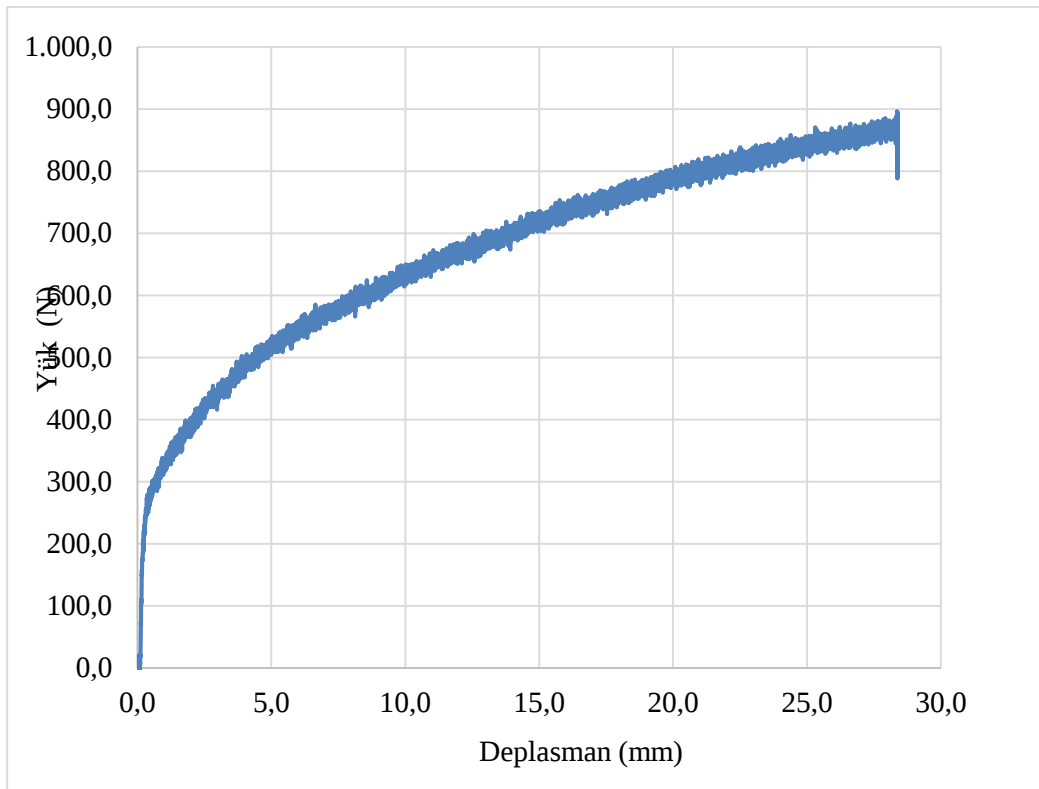


Şekil 6.21 : %70 rölatif sıkılıkta I profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

6.2.3 %20 rölatif sıklıkta + profil için deney sonuçları

%20 rölatif sıklık için, + profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.22’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 0,91 kN dur.

Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,034 kNm, orta noktada 0,248 kNm ve üst noktada 0,12 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m’dir. Maksimum moment değeri 0,248 kNm’dir.

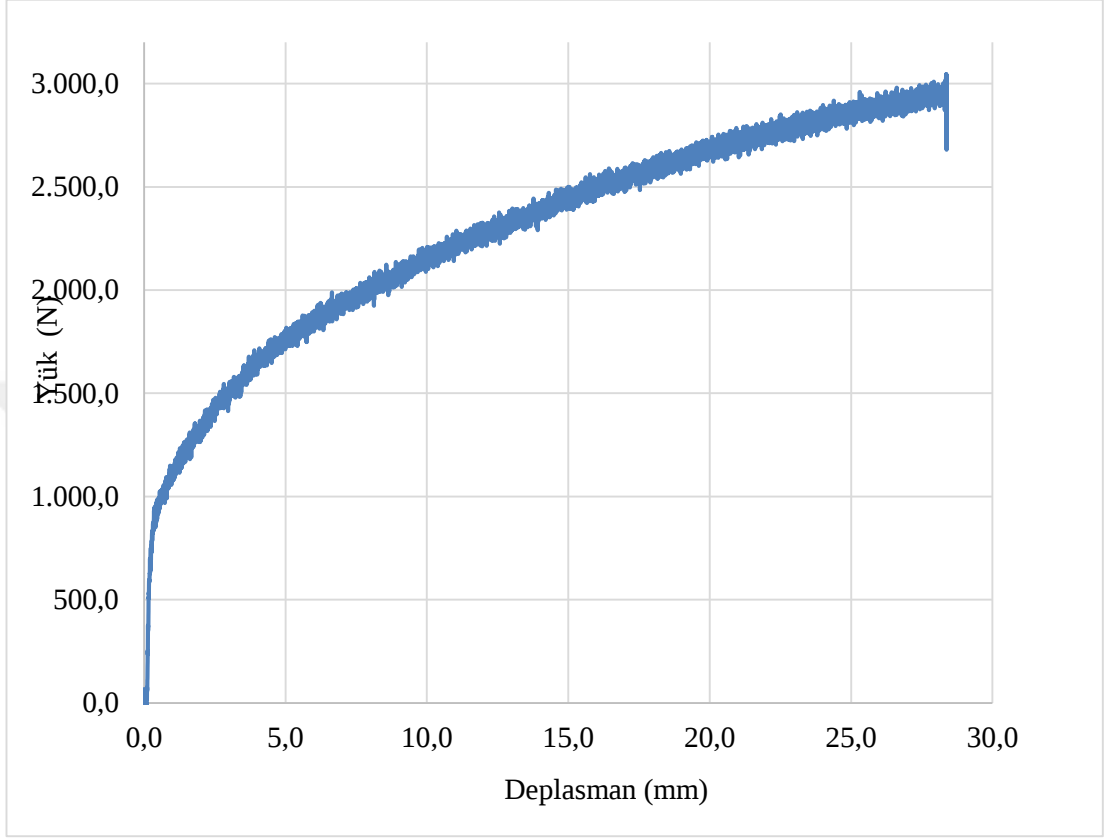


Şekil 6.22 : %20 rölatif sıklıkta + profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

6.2.4 %70 rölatif sıklıkta + profil için deney sonuçları

%20 rölatif sıklık için, + profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.23’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 3,1 kNm’dir. Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,088 kNm, orta noktada 0,88 kNm ve üst noktada 0,36 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman

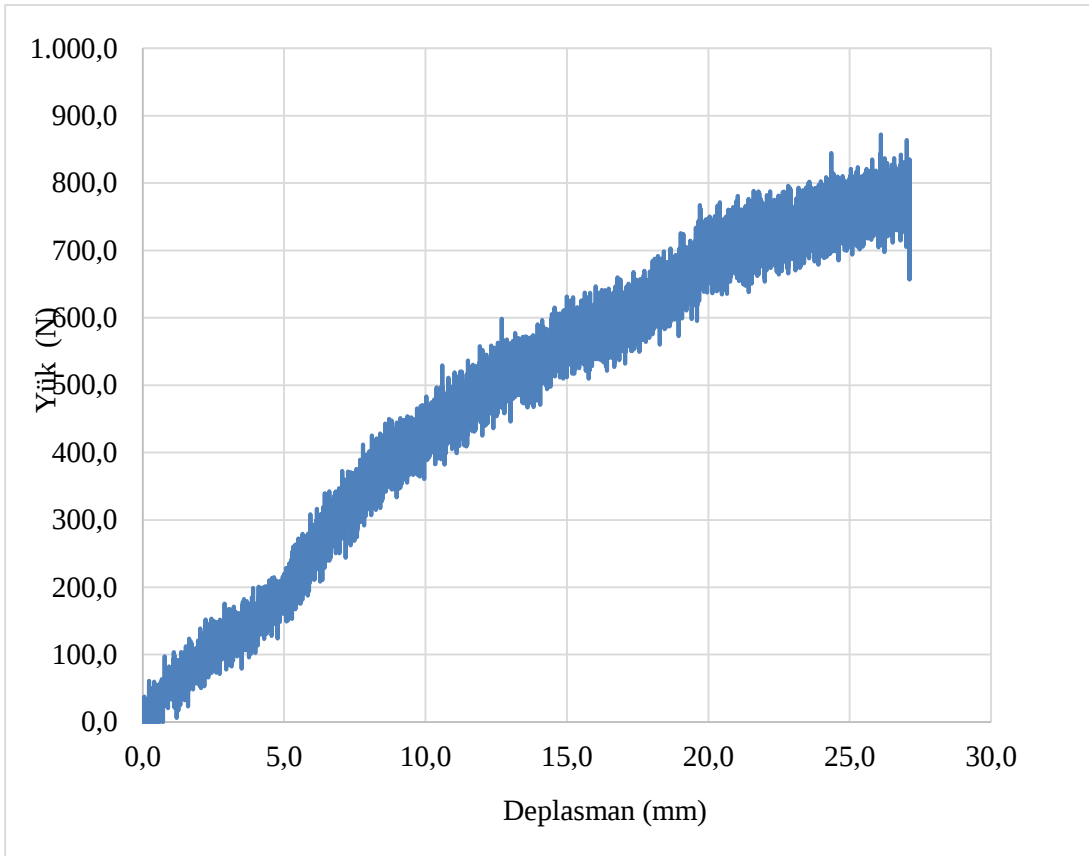
ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m'dir. Maksimum moment değeri 0,88 kNm'dir.



Şekil 6.23 : %70 rölatif sıklıkta + profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

6.2.5 %20 rölatif sıklıkta kutu profil için deney sonuçları

%20 rölatif sıklık için, kutu profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.24’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 0,86 kN’dur. Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,019 kNm, orta noktada 0,239 kNm ve üst noktada 0,11 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m’dir. Maksimum moment değeri 0,239 kNm’dir.

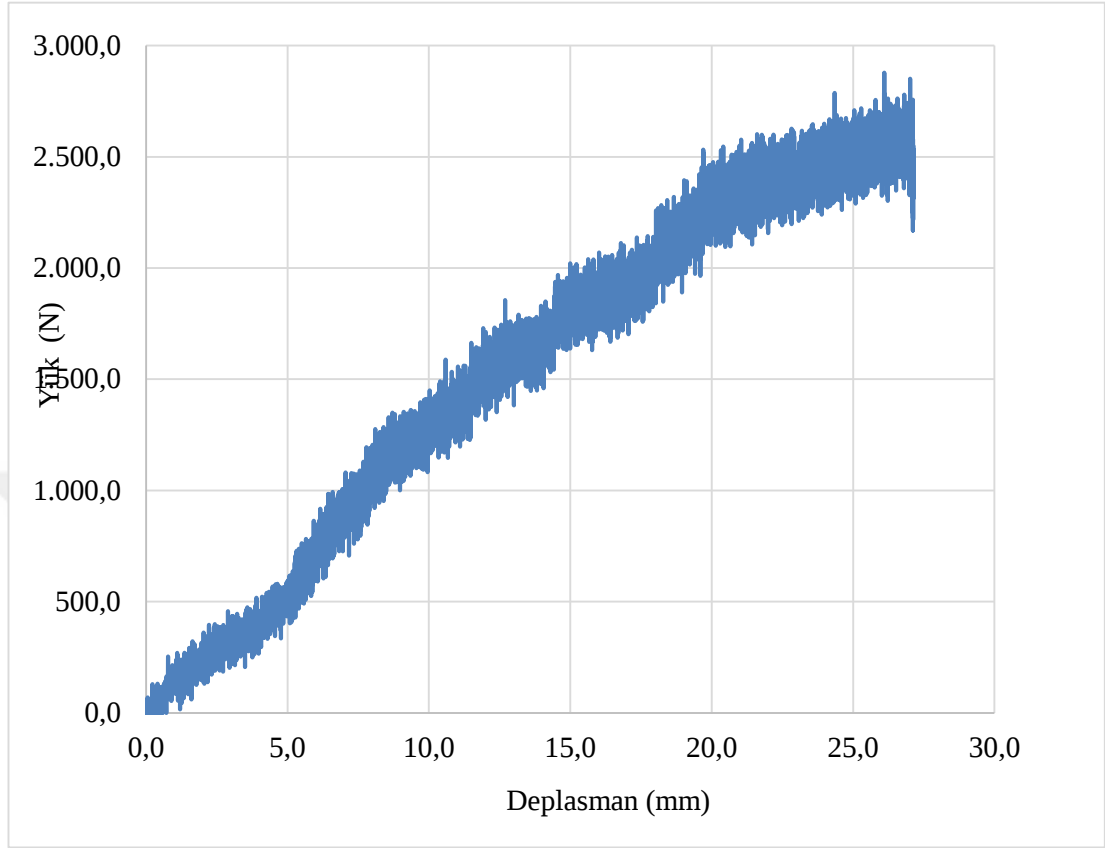


Şekil 6.24 : %20 rölatif sıklıkta kutu profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

6.2.6 %70 rölatif sıklıkta kutu profil için deney sonuçları

%70 rölatif sıklık için, kutu profilde yapılan deneylerdeki sonuçlar aşağıdaki şekil 6.25’de grafikte gösterilmektedir. Baret kazığa gelen maksimum 2,82 kN’dur. Birim deformasyon ölçer ile yapılan hesaplamalardan elde edilen moment değerleri için, alt noktadaki maksimum moment değeri 0,0662 kNm, orta noktada 0,786 kNm ve üst noktada 0,329 kNm sonuçları elde edilmiştir. Maksimum deplasman, deplasman

ölçerin ölçebileceği maksimum değer olan, 0,028 m'dir. Maksimum moment değeri 0,786 kNm'dir.



Şekil 6.25 : %70 rölatif sıkılıkta kutu profil model deneyi yük-deplasman grafiği.

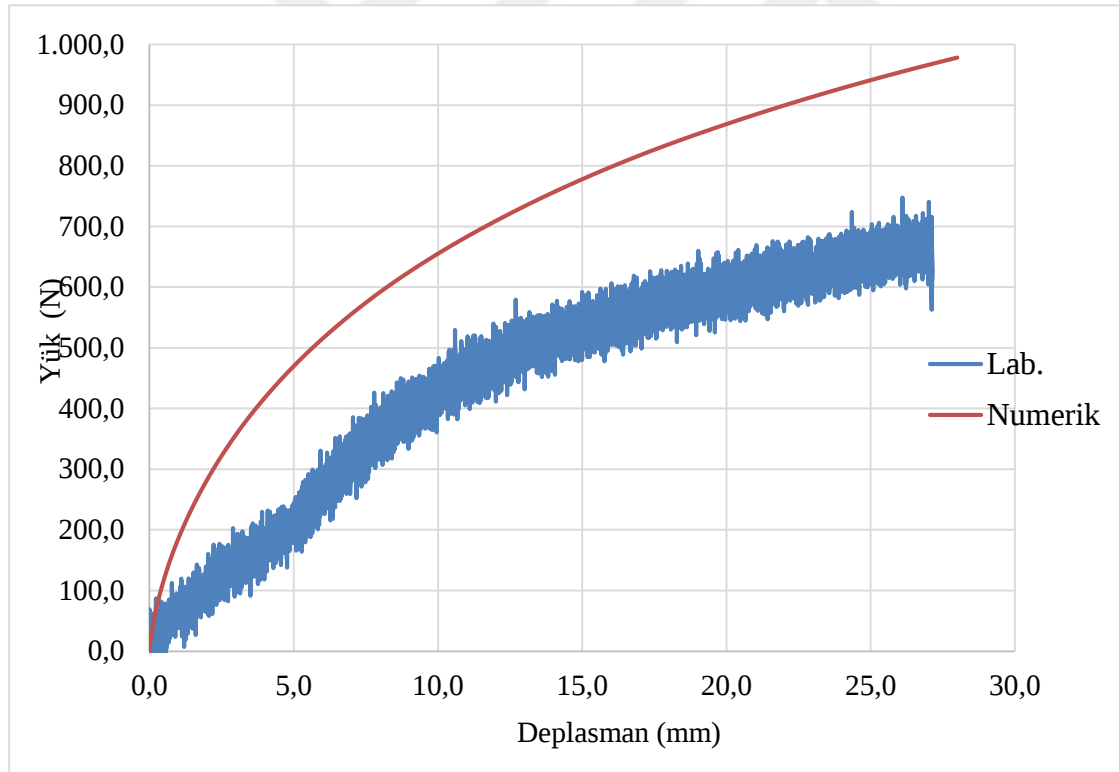
6.3 Model Deney ile Plaxis 3D Programının Birbiriyle Karşılaştırılması

Aşağıdaki tablolarda her bir deney için, model deney ve Plaxis 3D analizinden alınan sonuçlar, alt, üst ve orta moment değerleri ve maksimum yük değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.6'da, %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için Plaxis 3D ve model deney değerlerinin karşılaştırıldığı tablo gösterilmiştir. Tabloda, oran sütununda, Plaxis 3D ile deney sonuçlarının ne kadar oranda benzerlik gösterdiği belirtilmiştir.

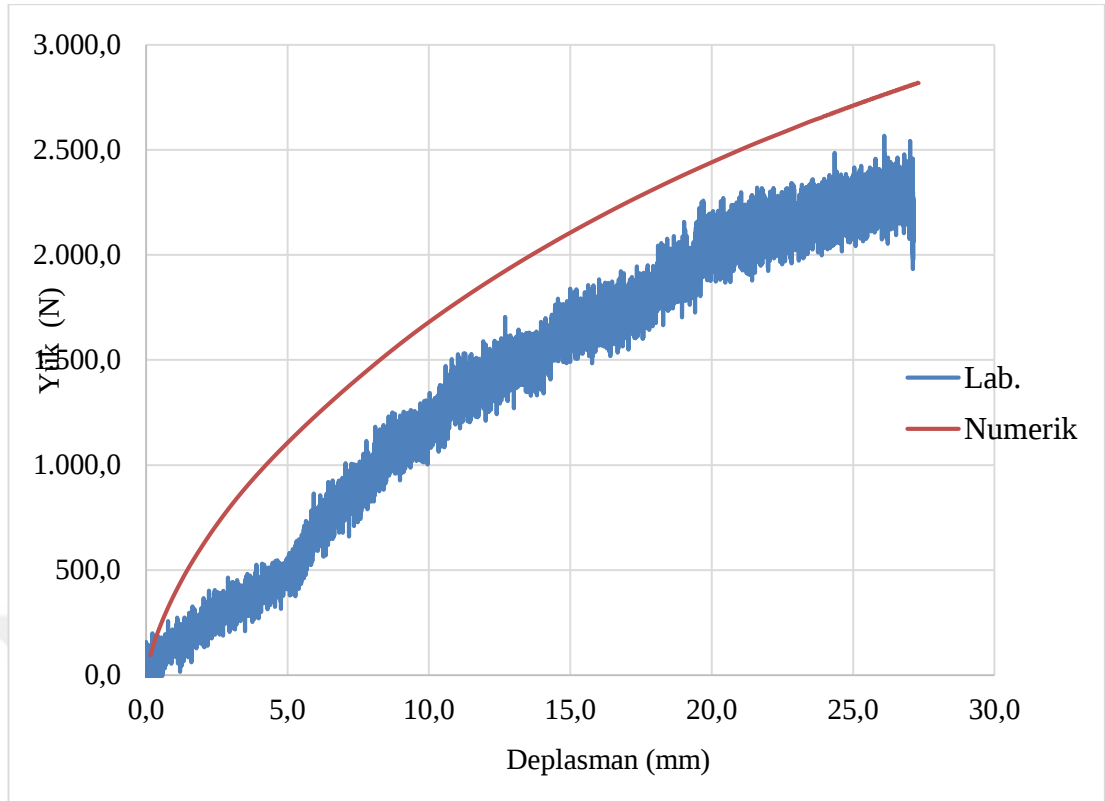
Çizelge 6.6 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta I profil için sonuçların karşılaştırılması.

	Plaxis 3D Değerleri		Model Deney Değerleri		Oran (%)	
	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta
Maksimum Yatay Yük (kg) (28 mm'de)	99	291	76	263	76	90
Üst Noktada Moment (kNm)	0,126	0,348	0,119	0,322	94	93
Orta Noktada Moment (kNm)	0,273	0,807	0,236	0,768	86	95
Alt Noktada Moment (kNm)	0,024	0,054	0,02	0,043	83	78

Şekil 6.26 ve 6.27’de %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 6.26 : %20 rölatif sıkılıkta I profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.



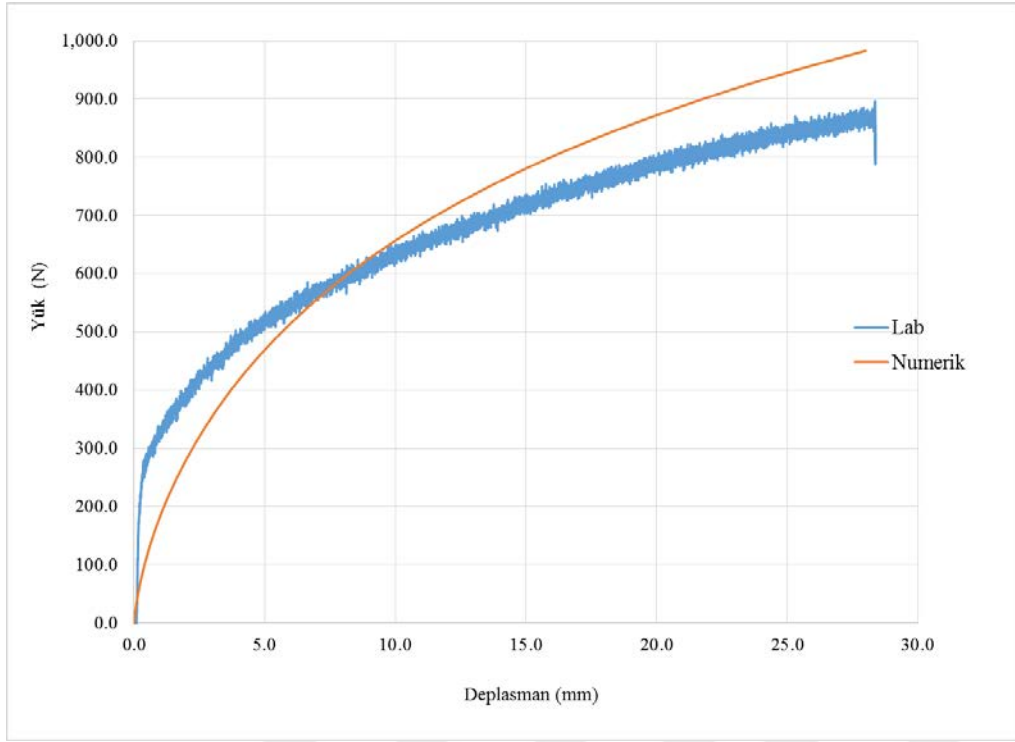
Şekil 6.27 : %70 rölatif sıkılıkta I profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.7’da, %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için Plaxis 3D ve model deney değerlerinin karşılaştırıldığı tablo gösterilmiştir. Tabloda, oran sütununda, Plaxis 3D ile deney sonuçlarının ne kadar oranda benzerlik gösterdiği belirtilmiştir.

Çizelge 6.7 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta + profil İçin sonuçların karşılaştırılması.

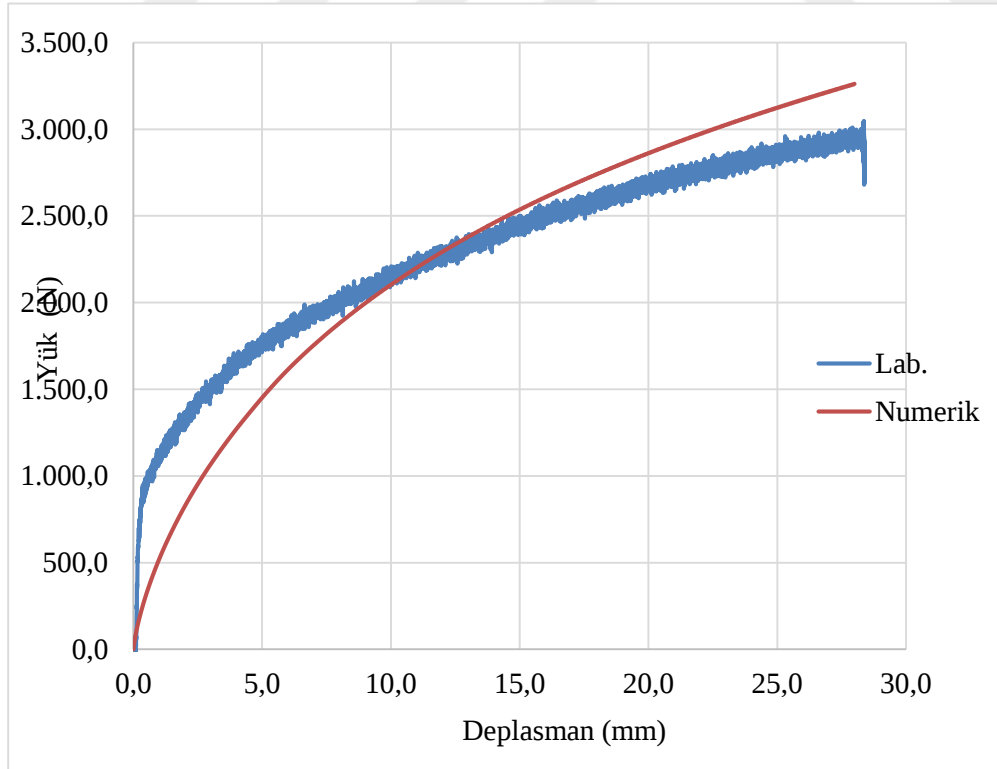
	Plaxis 3D Değerleri		Model Deney Değerleri		Oran (%)	
	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta
Maksimum Yatay Yük (kg) (28 mm'de)	100	332	93	315	93	95
Üst Nuktada Moment (KNm)	0,127	0,39	0,12	0,36	94	92
Orta Nuktada Moment (KNm)	0,274	0,92	0,25	0,88	86	96
Alt Nuktada Moment (KNm)	0,036	0,097	0,034	0,089	83	91

Şekil 6.28 ve 6.29’da %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil

6.28 : %20 rölatif sıkılıkta + profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.



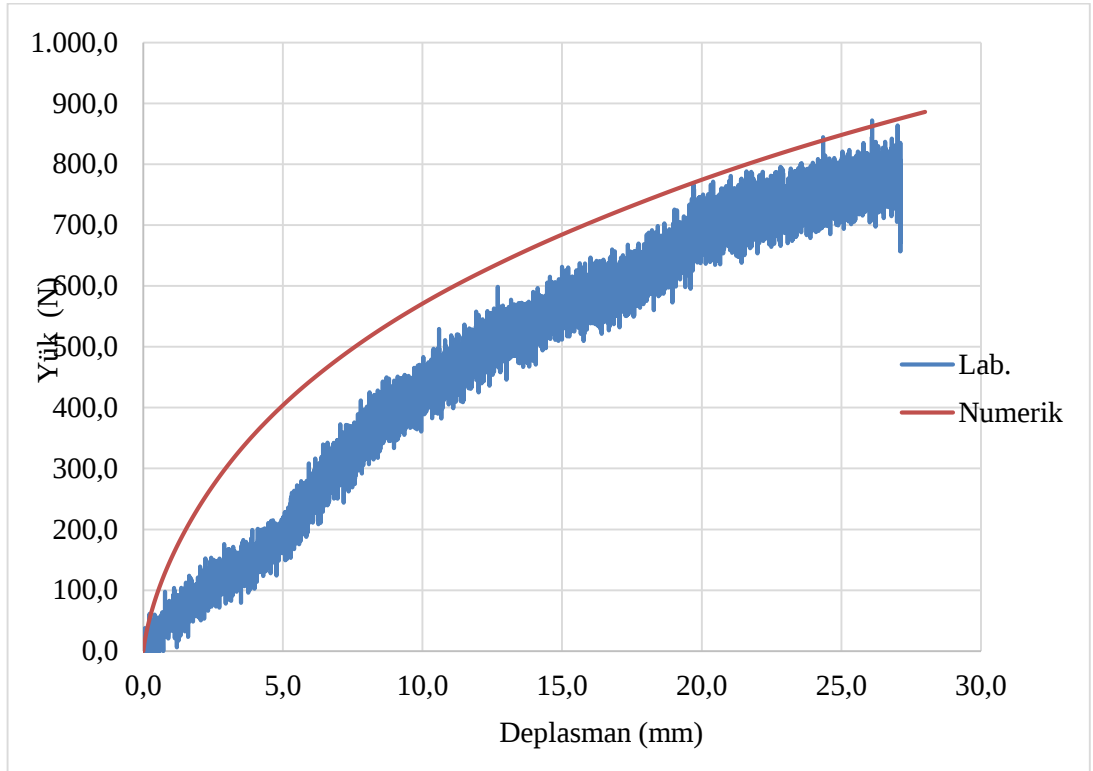
Şekil 6.29 : %70 rölatif sıkılıkta + profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.8’de, %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için Plaxis 3D ve model deney değerlerinin karşılaştırıldığı tablo gösterilmiştir. Tabloda, oran sütununda, Plaxis 3D ile deney sonuçlarının ne kadar oranda benzerlik gösterdiği belirtilmiştir.

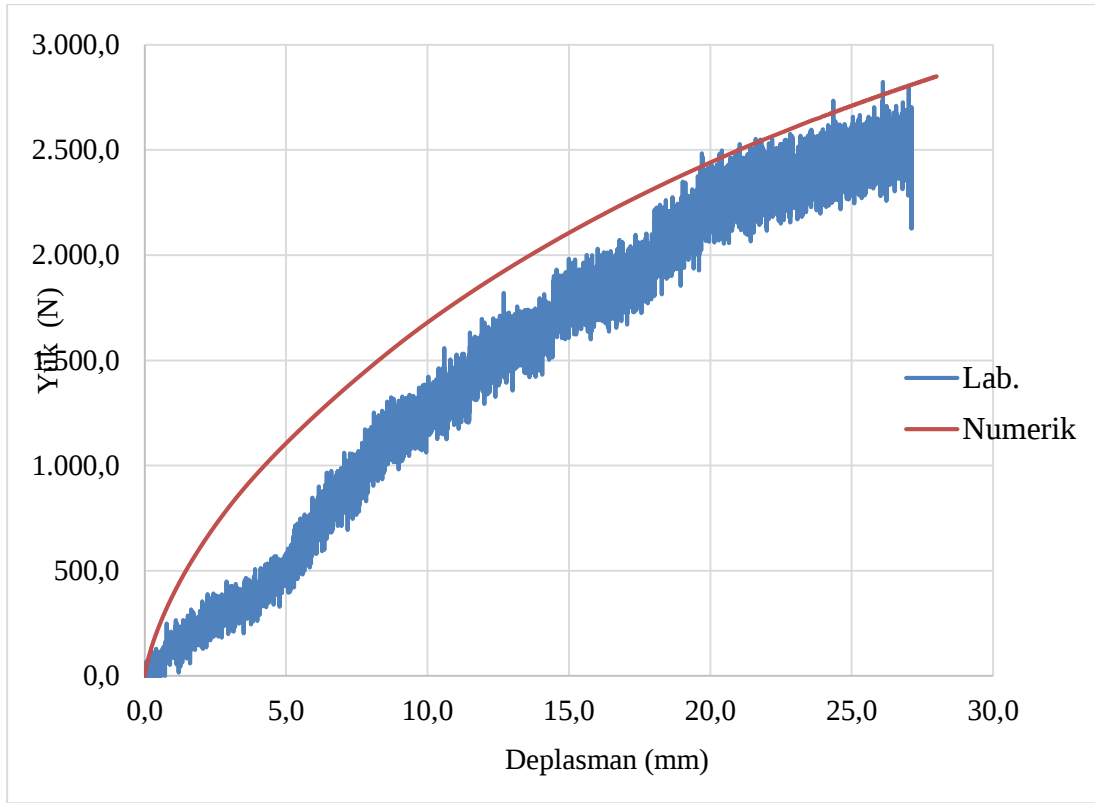
Çizelge 6.8 : %20 ve %70 rölatif sıkılıkta kare profil İçin sonuçların karşılaştırılması.

	Plaxis 3D Değerleri		Model Deney Değerleri		Oran (%)	
	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta	% 20 Sıkılıkta	%70 Sıkılıkta
Maksimum Yatay Yük (kg) (28 mm’de)	90	292	87	288	97	99
Üst Noktada Moment (KNm)	0,114	0,348	0,11	0,339	96	95
Orta Noktada Moment (KNm)	0,246	0,807	0,239	0,786	97	95
Alt Noktada Moment (KNm)	0,021	0,716	0,019	0,019	90	92

Şekil 6.30 ve 6.31’de %20 ve %70 rölatif sıkılıklar için, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 6.30 : %20 Sıkılıkta kare profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.31 : %70 Sıklıkta kare profil yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan rijit baret kazıkların zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte etkiyen yanal yük etkisi altındaki davranışları, yapılan küçük ölçekli model deneyleri ile incelenmiştir. Daha önce yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş, bu çalışmalar göz önüne alınarak deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar programı (Plaxis 3D) kullanılarak modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan kazık tiplerinin deney sonuçları ve analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada kullanılan kumun, deney sisteminin tasarımı ve profillerin özellikleri açıklanmıştır. Yanal yüklü baret kazıkların incelenmesi için, çelik kesitli üç modelde, kum zeminin %20 ve %70 rölatif sıkılıklarında, toplam 6 adet deney yapılmıştır.

Deney sırasında yük hücresi, birim deformasyon ölçer ve deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerle elde edilen değerlerden, momentler hesaplanmıştır. Daha önce kalibrasyon ile bulunan katsayı ile değerler çarpılmıştır. Sonuçta alt, üst ve orta seviyede olmak üzere, her bir profil için üç adet moment değeri elde edilmiştir.

28 mm deplasman için ölçülen yük değerleri ile yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca yapılan deneyler Plaxis 3D Programı ile de analiz edilmiştir. Yük-deformasyon davranışı Plaxis 3D ile bulunan sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir ancak Plaxis 3D ile elde edilen değerler daha yüksektir.

Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, Plaxis 3D sonlu elemanlar programı analizleri kullanılarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel taşıma kapasitesi değerlerinden daha büyüktür.

Yapılan deneysel çalışmalar ve gerçekleştirilen üç boyutlu non-lineer sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar yanal yük taşıma kapasitelerinin kazık en kesit geometrisinden etkilendiğini göstermektedir.

Model kare kesit profil, fore kazık boyutlarına yakın seçilmiştir, diğer iki profil tipi baret temel kesitlidir. Hem Plaxis 3D, hem de laboratuvar deneylerinde baret kesitli modellerin taşıma kapasitesi ve moment değerleri + profil için daha yüksektir. Kare kesitli ve dikdörtgen kesitli model profillerde sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.

Baret kazık modelinin rijitliği arttıkça, uygulanan aynı yükteki deplasman miktarının azaldığı görülmüştür. Baret kazık modellere gelen yüklerde, kum zeminin rölatif sıkılığının etkisi, baret kazıkların rijitliğinin etkisinden çok daha fazladır.

Deneysel çalışmalar, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal maksimum yük değerleri karşılaştırıldığında rölatif sıkılığın yanal maksimum yükü artırıcı etkiye sahip olduğu görülmektedir. Gevşek kum zemin ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında, sıkı kum zemin durumunda elde edilen yanal yük değerinin, gevşek kum zemindekini 3,5 katı civarında olduğu görülmüştür. Benzer oran Plaxis 3D analizi sonucunda da elde edilmiştir.

Yanal yüklü baret kazıkların davranışının incelenmesi; model deneyleri, nümerik hesapların yanı sıra, saha deneyleri ile de araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ananthanathan, P. J., Gajan, S., Kanagalingman, T., & Seneviratne, H. N.** (2008). Behaviour of Laterally Loaded Piles. *Engineering Beyond 200* (s. 103-106). University of Peradeniya, Sri Lanka
- Bowles, J. E.** (1996). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Company, New York, USA
- Broms, B. B.** (1964a). Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journ. Soil. Mech. Found. Div., ASCE*, s. 27-64.
- Broms, B. B.** (1964b). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journ. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, s. 123-156.
- Davis, E. H., & Poulos, H. G.** (1980). *Pile foundation analysis and design*. Wiley, New York.
- Davisson, M. T.** (1970). Lateral Load Capacity of Piles. *Highway Res. Rec.*, 333, s. 104-122.
- El Wakil, A. Z., & Nazir, A. K.** (2013). Behavior of Laterally Loaded Small Scale Barrettes in Sand. *Ain Shams Engineering Journal*, s. 343-350.
- Johnson, K., Lemcke, P., Karunasena, W., & Savikugan, N.** (2006). Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading. *Environmental Modeling and Software*, 21, s. 1375-1380.
- Koç, E., Keleş, İ., & Yıldızlı, K.** (2012, Ekim). Strain Gage Deney Föyü. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun.
- Koçak, B.** (2013). *Kum zeminlerde imal edilen baret kazıklarda grup taşıma faktörünün sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köpüklü, H.** (2015). *Baret kazıklı temellerle ilgili hesap yöntemleri, imalat ve kalite kontrol esasları*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Plaxis Material Manual.** (2012). *Delft University of Technology & Plaxis bv*, Delft, Netherlands.
- Plaxis 3D. Foundation V2 Material Manual.** (2007). *Delft University of Technology & Plaxis bv*, Delft, Netherlands.
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L.** (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. Thomas Telford, Londra.
- Qin, H., & Guo, W. D.** (2007). An Experimental Study on Cyclic Loading of Piles in Sand. Australia .

- Terzaghi, K.** (1955). Elevation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Geotechnique*, Vol.5, No.4, s. 297-326
- Toğrol, E., & Tan, O.** (2009). Kazıklı Temeller, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Uncuoğlu, E.** (2009). *Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıkların yatay yük ve moment etkisi altındaki davranışlarının analizi*. (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uzuner, B. A.** (2006). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitapevi, Trabzon.
- Wood, D. M.** (2004). *Geotechnical Modeling*. Spoon Press, Oxfordshire.
- Yıldız, K.** (2011). *Baret kazıklı temellerin taşıma kapasitesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksel Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Murat Okar
Doğum Tarihi ve Yeri :02/01/1987 Mersin

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM

- 2010-2018 yılları arasında İstanbul ve birçok farklı ülkede Şantiye Mühendisliği yapmıştır.