

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

178571

YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARIN
LABORATUVAR KOŞULLARINDA MODELLENMESİ
VE
HESAP ESASLARI

TE. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İnş. Müh. Sami GÜLTEKİN

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM

İSTANBUL, 2001

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ÖNSÖZ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ	1
2. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARIN TASARIM VE ANALİZİ	5
2.1 Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler.....	5
2.2 Yatay Yükler Altındaki Düşey Kazıkların Davranış Esasları	7
2.3 Yatay Yüklü Düşey Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri ...	13
3. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARDA SON TAŞIMA GÜCÜNÜN BULUNUŞU	15
3.1 Yatak Katsayısının Tanımı ve Değerleri.....	15
3.2 Geleneksel Statik Yaklaşım (Brinch Hansen Yöntemi).....	18
3.3 Broms Yöntemi.....	24
3.3.1 Broms Yöntemi İle Kohezyonsuz Zeminlerde Kazık Yanal Direncinin Tahmini. 24	
3.3.1.1 Serbest Başlıklı Kısa ve Uzun Kazıklar	25
3.3.1.2 Rijit Başlıklı Kısa, Orta ve Uzun Kazıklar	27
3.3.2 Broms Yöntemi İle Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Yanal Direncinin Tahmini... 31	
3.3.2.1 Serbest Başlıklı Kısa ve Uzun Kazıklar	32
3.3.2.2 Rijit Başlıklı Kısa, Orta ve Uzun Kazıklar	33
3.3.3 Broms Yönteminin Doğruluğu	36
4. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARDA DEPLASMANLARIN TAHMİNİ. 37	
4.1 Giriş.....	37
4.2 Broms Yöntemi İle Zemin Yüzeyindeki Deplasmanların Tahmini.....	37
4.2.1 Kohezyonsuz Zeminlerde, Zemin Yüzeyindeki Kazık Deplasmanının Tahmini.. 37	
4.2.2 Kohezyonlu Zeminlerde, Zemin Yüzeyindeki Kazık Deplasmanlarının Tahmini 39	
4.3 Yatak Katsayısı Yaklaşımı	41
4.3.1 Kohezyonsuz Zeminler İçin Yatak Katsayısı Yaklaşımı	42
4.3.2 Diferansiyel Eşitlikler	50
4.3.3 Kohezyonlu Zeminler İçin Yatay Katsayısı Yaklaşımı.....	51
4.4 Elastik Ortam Yaklaşımı	53
4.4.1 Kohezyonsuz Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı.....	55
4.4.2 Kohezyonlu Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı.....	59
4.5 p-y Analiz Yöntemi.....	65
4.5.1 Giriş.....	65
4.5.2 Kohezyonsuz Zeminler İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması.....	69

1.5.3	Kohezyonlu Zeminler İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması	73
1.5.3.1	Yumuşak-Orta Katı Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması.....	73
1.5.3.2	Katı Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması.....	76
1.5.3.3	Katı Aşırı Konsolide Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması	78
1.5.4	p-y Eğrileriyle Yatay Yüklü Kazık Analizi.....	78
1.5.5	p-y Analiz Yönteminin Doğruluğu	80
4.6	Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)	81
4.6.1	CLM Yönteminin Doğruluğu	85
5.	YATAY KAZIK TAŞIMA GÜCÜNÜN ARTIRILMASI VE YATAY YÜKLÜ KAZIKLARLA İLGİLİ DİĞER ÇALIŞMALAR.....	86
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	89
6.1	Giriş.....	89
6.2	Zemin Özellikleri.....	89
6.3	Kazık Malzemesinin Özellikleri	91
6.3.1	Kazık Malzemesinin Seçimi.....	91
6.3.2	Model Kazık Akma Momentinin Belirlenmesi	92
6.3.3	Model Kazık ve Kazık Başlığı.....	93
6.4	Kalibrasyon Deneyi.....	95
6.5	Deney Düzeneğine Ait Bilgiler	98
6.5.1	Model Deney Tankı	98
6.5.2	Yağmurlama Düzeneği.....	98
6.5.3	Yükleme Düzeneği.....	100
6.5.4	Kullanılan Ölçüm Aygıtları.....	102
6.6	Deneylerin Yapılışı	103
6.7	Deney Sonuçları.....	104
7.	MODEL KAZIK VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	120
7.1	Model Kazık ve Zemine Ait Hesap Parametreleri.....	120
7.2	Broms Yöntemi İle Model Kazık Taşıma Gücü ve Deplasman Hesabı.....	121
7.3	Yatak Katsayısı Yaklaşımı İle Model Kazığa Ait Hesaplar.....	123
7.4	Deney Sonuçlarından Deplasman ve Eğilme Momentinin Belirlenmesi.....	127
7.4.1	Teori.....	127
7.4.2	Tahmin Edilen Deplasman ve Eğilme Momentleri	129
7.5	Deney Sonuçlarından Kazık Boyunca Zemin Reaksiyonu Dağılımının Belirlenmesi.....	137
7.6	Broms Yöntemine Göre Zemin Reaksiyonunun Hesaplanması	140
7.7	Deney Sonuçlarının, Hesapların Değerlendirmesi.....	140
7.7.1	Göçme Yükünün Tespiti	141
7.7.2	Hesaplanan ve Ölçülen Zemin Reaksiyonu Dağılımının Karşılaştırılması.....	141
7.7.3	Hesaplanan ve Ölçülen f Derinliğinin Karşılaştırılması	143
7.7.4	Hesaplanan ve Ölçülen Yatay Deplasmanların Karşılaştırılması.....	143
7.7.5	Hesaplanan ve Ölçülen Eğilme Momentlerinin Karşılaştırılması	144
7.7.6	Yükleme-Boşaltma Eğrilerinin ve Deplasmanların Değerlendirmesi	144
8.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	146
	KAYNAKLAR.....	149
	ÖZGEÇMİŞ.....	153

SİMGE LİSTESİ

$A_{y, M, S, V, P}$	Kohezyonsuz zeminlerdeki serbest başlı kazıkta yatay yük için yerdeğiştirme, moment, eğim, keme kuvveti ve zemin reaksiyonu katsayıları
b	Kazık kısa kenar uzunluğu
$B_{y, M, S, V, P}$	Kohezyonsuz zeminlerdeki serbest başlı kazıkta moment için yerdeğiştirme, moment, eğim, keme kuvveti ve zemin reaksiyonu katsayıları
c	Kohezyon
c_a	Adhezyon
C_m	Kohezyonsuz zeminlerdeki tutulu başlı kazıkta moment katsayısı
C_p	Kohezyonsuz zeminlerdeki tutulu başlı kazıkta zemin reaksiyonu katsayısı
c_u	Drenajsız kayma mukavemeti
c_u^1	Drenajlı deneyden elde edilen kayma mukavemeti
C_y	Kohezyonsuz zeminlerdeki tutulu başlı kazıkta yerdeğiştirme katsayısı
D	Kazık çapı
dx	Zemin reaksiyonu hesabının yapıldığı birim yükseklik
e	Kazığa etkiyen yükün zemin seviyesine olan uzaklığı
E	Kazık malzemesinin elastisite modülü
E_{50}	Broms (1964a)'a göre drenajsız koşullarda son gerilmenin yarısındaki secant modülü
f	Maksimum momentin oluştuğu derinlik
F	Kısa kazıklarda kazık ucunda etkidiği varsayılan kuvvet
g	L-f-1.5D değerine karşılık gelen uzunluk
I	Kazık kesitinin atalet momenti
K_c	Yatay direnç katsayısı
k_h	Kohezyonlu zeminlerde yatak katsayısı
K_p	Pasif toprak basınç katsayısı
K_q	Yatay direnç katsayısı
k_x	Palmer ve Thompson (1948)'a göre yatak katsayısı
k_x	Terzaghi (1955)'ye göre yatak katsayısı tanımında kullanılan bir sabit
L	Kazık gömülü boyu
M	Kazığa etkiyen moment
M_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan moment
M_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan moment
M_{akma}	Kazık kesiti akma momenti
M_u	Kazık son moment taşıma gücü

M_g	Yatak katsayısı yaklaşımında kazık başına uygulanan moment
n	Palmer ve Thompson (1948), Davisson ve Prakash (1963)'e göre yatak katsayısı tanımında yer alan sıfırdan büyük veya eşit bir sabit.
n_h	Yatak katsayısı sabiti
p	Birim uzunluktaki zemin reaksiyonu
p_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan zemin reaksiyonu
p_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan zemin reaksiyonu
p_L	Kazık ucundaki zemin reaksiyonu
p_u	Birim uzunluktaki son zemin reaksiyonu
p_u	Birim uzunluktaki son zemin reaksiyonu
p_{xu}	Her hangi bir derinlikteki zemin reaksiyonu
p_0	Kazığın zemin yüzeyi seviyesindeki zemin reaksiyonu
P	Kazığa etkileyen aşağı yöndeki yük
P_{ul}	Kazığa etkileyen çekme yükü
R	Kohezyonlu zeminler için fiktif rijitlik boyu
S	Eğim
S_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan eğim
S_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan eğim
q^1	Düşey efektif gerilme
q_u	Zeminin serbest basınç direnci
Q	Kazığa etkileyen yatay yük
Q_g	Yatak katsayısı yaklaşımında kazık başına uygulanan yatay yük
Q_u	Kazık son yatay taşıma gücü
T	Granüler zeminler için fiktif rijitlik boyu
x	Kazık boyunca herhangi bir derinlik
x_r	Kazık dönme noktasının zemin yüzeyinden derinliği
V	Kesme kuvveti
V_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan kesme kuvveti
V_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan kesme kuvveti
W	Kazık kesiti mukavemet momenti
y	Kazık deformasyonu
y_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan yerdeğiştirme
y_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan yerdeğiştirme
y_0	Kazığın zemin yüzeyi seviyesindeki yatay deplasmanı
z	Zemin yüzeyinden derinlik

Z	Derinlik katsayısı
Z_{\max}	Maksimum derinlik katsayısı
ΣF_y	Kazığa etkiyen yatay yöndeki kuvvetlerin toplamı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ^1	Efektif içsel sürtünme açısı
$\phi_{(x)}$	Zemin modülü fonksiyonu
β	Kohezyonlu zeminlerde yatak katsayısı, kazık çapı ve kazık rijitliğine bağlı parametre
θ	Kazığın dönme miktarı
θ_A	Q_g yatay yükü nedeniyle x derinliğinde oluşan dönme
θ_B	M_g momenti nedeniyle x derinliğinde oluşan dönme
η	Kohezyonsuz zeminlerde yatak katsayısı sabit ve kazık rijitliğine bağlı parametre
σ_a	Kazık malzemesinin akma gerilmesi
σ_v^1	Düşey efektif gerilme
γ	Zeminin doğal birim hacim ağırlığı

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1 Kazıkların farklı amaçlarla kullanılışı a) uç kazığı b) sürtünme kazığı c) çekme yüklerine çalışan kazıklar d) yatay yük etkisindeki düşey ve eğik kazıklar e) eğik kazıklar (Prakash ve Sharma, 1989) 3
- Şekil 1.2 Derin temelerde yük durumları a) aksenal yük, aşağı yönde (basınç) veya yukarı yönde (çekme) b) moment ve/veya kesme kuvveti, (Coduto, 1994)..... 4
- Şekil 2.1 Yatay yüklere karşı inşa edilen kazıklar, a) dayanma yapıları b) köprü ayakları c) iskeleler d) palplanjlı dayanma yapıları, (Tomlinson, 1994). 6
- Şekil 2.2 Yatay yük etkisindeki kazıklar, a) yatay ve düşey yük altında serbest başlıklı kazık, b) yatay, düşey ve moment etkisindeki serbest başlıklı kazık, c) yatay, düşey ve moment etkisindeki tutulu başlıklı kazık, (Prakash ve Sharma 1989)..... 8
- Şekil 2.3 Yatay yük altında kısa kazık göçmesi a) serbest başlı b) tutulu başlı kazık, (Tomlinson,1994). 10
- Şekil 2.4 Yatay yük altında uzun kazık göçmesi a) serbest başlı b) tutulu başlı kazık, (Tomlinson,1994). 10
- Şekil 3.1 Yatak katsayısının derinlikle değişimi a) aşırı konsolide kohezyonlu zemin b) granüler zemin ve normal konsolide silt ve killer c) kurumuş normal konsolide kil d) yumuşak yüzey tabakaları (Davisson, 1963). 16
- Şekil 3.2 Serbest başlı yatay yüklü rijit kazıkta yatay direncin mobilize olma biçimi (Prakash ve Sharma, 1989)..... 19
- Şekil 3.3 Serbest başlı rijit kazıkta son yatay direnç, (Poulos ve Davis, 1980). 20
- Şekil 3.4 Serbest başlı rijit kazıkta son yatay direnç, (Poulos ve Davis, 1980). 21
- Şekil 3.5 Kohezyonlu zeminlerde yüzey ve adhezyon oranı ile yatay direnç katsayısı arasındaki ilişki, (Poulos ve Davis, 1980)..... 22
- Şekil 3.6 K_q ve K_c yatay direnç katsayıları (Brinch Hansen, 1961). 23
- Şekil 3.7 Zemin yüzeyinde ve sonsuz derinlikteki K_q ve K_c yatay direnç katsayıları, (Brinch Hansen, 1961)..... 24
- Şekil 3.8 Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı (a) kısa (b) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms 1964 b)..... 26
- Şekil 3.9 Kohezyonsuz zeminlerde tutulu başlı (a) kısa (b) orta (c) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms 1964 b)..... 28
- Şekil 3.10 Kohezyonsuz zeminlerde a) kısa kazıklarda, gömülü kazık boyuna bağlı olarak, b) uzun kazıklarda, akma dayanımına bağlı olarak son yatay taşıma gücü (Broms 1964 b)..... 29
- Şekil 3.11 Kohezyonlu zeminlerde a) yerdeğiştirme b) olası zemin reaksiyonu dağılımı, (Poulos ve Davis, 1980)..... 31
- Şekil 3.12 Kohezyonlu zeminlerde serbest başlı a) kısa b) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms, 1964a)..... 32
- Şekil 3.13 Kohezyonlu zeminlerde tutulu başlı a) kısa b) orta c) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri (Broms, 1964 a)..... 34
- Şekil 3.14 Kohezyonlu zeminlerdeki a) kısa kazıkların gömülü kazık boyuna b) uzun kazıkların kazık akma dayanımına bağlı olarak son yatay taşıma gücü (Broms, 1964 a)..... 35
- Şekil 3.15 Broms yöntemi ile hesaplanan son zemin kapasitesi ve maksimum moment değerlerinin ölçülen değerlerle ilişkisi. Grafikteki orta düşey çizgiler ilgili birime ait ortalama değerleri göstermektedir, (Coduto, 1994)..... 36
- Şekil 4.1 Kohezyonsuz zeminlerde kazık yanal yerdeğiştirmesi (Broms, 1964b) 39
- Şekil 4.2 Kohezyonlu zeminlerde kazık yanal yerdeğiştirmesi (Broms, 1964a)..... 40
- Şekil 4.3 Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı a) elastik zemine oturan kiriş b) Winkler idealizasyonu c) zeminde yatay yüklü kazık d) yatay yüklü kazık yaylı ortam, (Prakash ve Sharma, 1989)..... 41
- Şekil 4.4 Tamamen gömülü bir kazıkta Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde a) deplasman,

y, b) eğim $,dy/dx$, c) moment, $EI(d^2y/dx^2)$, d) kesme kuvveti, $EI(d^3y/dx^3)$, e) zemin reaksiyonu, $EI(d^4y/dx^4)$ (Reese ve Matlock, 1956).....	43
Şekil 4.5 Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için A_y , B_y , A_m ve B_m katsayıları, (Reese ve Matlock, 1956).....	47
Şekil 4.6 Kohezyonsuz zeminlerde tutulu başlı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için a) yerdeğiştirme C_y b) moment C_m c) zemin reaksiyonu katsayıları, (Reese ve Matlock, 1956).	49
Şekil 4.7 Serbest başlıklı, zemin modülünün derinlikle değişmediği zeminde a) kazığa yatay kuvvet ve sıfır moment etkimesi b) kazığa sıfır yatay yük ve moment etkimesi durumunda yerdeğiştirme ve moment katsayıları, (Davisson ve Gill, 1963)	52
Şekil 4.8 Gerilme etkisi a) kazığa b) kazıktan, kazık çevresindeki zemine, (Poulos, 1971a)..	54
Şekil 4.9 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I_{\rho H}^1$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).	56
Şekil 4.10 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I_{\rho M}^1$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).	56
Şekil 4.11 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için F_p^1 değerleri (Poulos ve Davis, 1980).	57
Şekil 4.12 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için maksimum moment (Poulos ve Davis, 1980).	57
Şekil 4.13 Tutulu başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için a) $I_{\rho F}^1$ b) $F_{\rho F}^1$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).	58
Şekil 4.14 Tutulu başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için kazık başındaki tutululuk momenti (Poulos ve Davis, 1980).....	59
Şekil 4.15 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için a) $I_{\rho H}$ değerleri b) $I_{\rho M}$ ve $I_{\theta H}$ (Poulos, 1971a).....	61
Şekil 4.16 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için $I_{\theta M}$ değerleri (Poulos, 1971a)...	63
Şekil 4.17 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için maksimum moment, (Poulos, 1971a).....	63
Şekil 4.18 Tutulu başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için $I_{\rho F}$ değerleri (Poulos, 1971a). ...	64
Şekil 4.19 Tutulu başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için kazık başındaki tutululuk momenti (Poulos, 1971a).	64
Şekil 4.20 a) Yatay yük etkisindeki bir kazık b) yatay yüklenmeden önce zemin reaksiyonunun dağılışı, b) yatay yüklenmeden sonra zemin reaksiyonunun dağılışı.	65
Şekil 4.21 Yatay yüklü kazıklar için p-y eğrileri a) zemin yüzeyinin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri b) p-y eğrilerinin X-Y eksenleri üzerinde gösterimi c) yerdeğiştirmelerin kazık boyunca gösterimi, (Matlock, 1970).	68
Şekil 4.22 p-y eğrileri a) yumuşak kil b) katı kil c) kumlar (Mazurkiewicz, 1987).....	68
Şekil 4.23 Tipik p-y eğrileri, (Coduto, 1994).....	69
Şekil 4.24 Kohezyonsuz zeminler için a) p_{cr} ve p_{cd} eğrilerinin kesişme noktalarından x_r kritik derinliğinin bulunması, b) p-y eğrisinin oluşturulması (Prakash, Sharma, 1989)...	71
Şekil 4.25 Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrisinin oluşturulması, (Prakash ve Sharma, 1989)	75
Şekil 4.26 p-y Yönteminde iterasyon işleminin yapılışı, (Reese ve Impe, 2001).	80
Şekil 4.27 Hesaplanan yatay deplasman ve eğilme momenti p-y yöntemi ile %90 lık bir uyum içindedir. Grafikteki düşey çizgi ortalama tahmin değerini göstermektedir, (Reese ve Wang, 1986).	80
Şekil 4.28 CLM Yöntemiyle yatay yük nedeniyle oluşan ötelenmeler, (Duncan vd, 1994)....	82
Şekil 4.29 CLM Yöntemiyle moment nedeniyle oluşan ötelenmeler, (Duncan vd, 1994).	83
Şekil 4.30 Yük-moment eğrileri, (Duncan vd 1994)	83
Şekil 5.1 Yatay kazık direncinin artırılma yöntemleri, (Broms 1972).....	86
Şekil 6.1 Kumun dane çapı dağılımı (Berilgen, 1996).....	90
Şekil 6.2 Kumun kesme kutusu deneyinde davranışı, (Berilgen, 1996).	90

Şekil 6.3 Kumun üç eksenli basınç deneyinde davranışı, (Berilgen, 1996).....	91
Şekil 6.4 Model kazık ayrıntıları.....	94
Şekil 6.5 Model kazık başlığı ayrıntıları.	95
Şekil 6.6 Kalibrasyon deneyi ayrıntıları.....	95
Şekil 6.7 Kalibrasyon deneyinde ölçülen eksenel yöndeki şekil değiştirmeler.....	96
Şekil 6.8 Kalibrasyon deneyinde ölçülen yatay yöndeki şekil değiştirmeler.....	97
Şekil 6.9 Yatay yöndeki şekil değiştirmelerin ortalama eğrisi.....	97
Şekil 6.10 Yağmurlama düzeneği ve deney tankı ayrıntıları.....	99
Şekil 6.11 Yağmurlama düzeneği ve deney tankı resmi.	100
Şekil 6.12 Yük uygulama düzeneğine ait ayrıntılar.....	101
Şekil 6.13 Yük uygulama düzeneği resmi.....	102
Şekil 6.14 Deneyde kullanılan ölçüm aygıtları ve düzeneğe yerleştirilme durumu.	103
Şekil 6.15 0.01 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	105
Şekil 6.16 0.02 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	106
Şekil 6.17 0.05 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	106
Şekil 6.18 0.09 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	107
Şekil 6.19 0.12 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	107
Şekil 6.20 0.15 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen eksenel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).....	108
Şekil 6.21 0.01 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	108
Şekil 6.22 0.02 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	109
Şekil 6.23 0.05 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	109
Şekil 6.24 0.09 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	110
Şekil 6.25 0.12 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	110
Şekil 6.26 0.15 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).....	111
Şekil 6.27 Model deneyin her yük kademesinde kazık boyunca ölçülen düşey, ez yöndeki şekil değiştirmelerin derinlikle değişimi.....	111
Şekil 6.28 Model deneyin her yük kademesinde kazık boyunca ölçülen yatay, ϵ_θ yöndeki şekil değiştirmelerin derinlikle değişimi.....	112
Şekil 6.29 Kazık boyunca her şekil değiştirme ölçerden elde edilen yatay, ϵ_θ yöndeki yük- şekil değiştirme ilişkisi.....	112
Şekil 6.30 Kazık boyunca her şekil değiştirme ölçerden elde edilen düşey , ez yöndeki yük- şekil değiştirme ilişkisi.....	113
Şekil 6.31 Deneyin yük boşaltması aşamasında düşey yönde ölçülen şekil değiştirmeler.	114
Şekil 6.32 Deneyin yük boşaltması aşamasında yatay yönde ölçülen şekil değiştirmeler.....	114
Şekil 6.33 0.03 kN luk yükte, düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.115	
Şekil 6.34 0.06 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.115	
Şekil 6.35 0.09 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.116	
Şekil 6.36 0.12 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.116	
Şekil 6.37 0.03 kN luk yükte, yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.117	

Şekil 6.38 0.06 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.	117
Şekil 6.39 0.09 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.	118
Şekil 6.40 0.12 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.	118
Şekil 6.41 Model kazık üzerinde yapılan yüklemelerde deplasman saatlerinde elde edilen sonuçlar.	119
Şekil 7.1 Model kazığa $Q_g = 0.15$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b)kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	124
Şekil 7.2 Model kazığa $Q_g = 0.01$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b)kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	125
Şekil 7.3 Model kazığa $Q_g = 0.05$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b)kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	125
Şekil 7.4 Model kazığa $Q_g = 0.09$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b)kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	126
Şekil 7.5 Model kazığa $Q_g = 0.12$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b)kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	126
Şekil 7.6 0.01 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	129
Şekil 7.7 0.02 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	130
Şekil 7.8 0.05 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	130
Şekil 7.9 0.09 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	131
Şekil 7.10 0.12 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	131
Şekil 7.11 0.15 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	132
Şekil 7.12 Her yük kademesi için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.	132
Şekil 7.13 0.01 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	133
Şekil 7.14 0.02 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	134
Şekil 7.15 0.05 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	134
Şekil 7.16 0.09 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	135
Şekil 7.17 0.12 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	135
Şekil 7.18 0.15 kN lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	136
Şekil 7.19 Her yük kademesinde tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.	136
Şekil 7.20 0.01 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı	137
Şekil 7.21 0.02 kN lık yük için zemin reaksiyonu dağılımı	137
Şekil 7.22 0.05 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı	138
Şekil 7.23 0.09 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı	138
Şekil 7.24 0.12 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı	139
Şekil 7.25 0.15 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı	139
Şekil 7.26 Her yük kademesi için zemin reaksiyonu dağılımı	140
Şekil 7.27 Deney verilerinden göçme yükünün tahmini	142

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Düşey kazıklar için izin verilebilir yatay yükler (McNulty, 1956).	13
Çizelge 3.1 Farklı göreceli sıkılıktaki kumlar için n_h (kN/m ³) değerleri (Terzaghi, 1955).	17
Çizelge 3.2 Kohezyonlu zeminler için farklı araştırmacılar tarafından önerilen n_h (kN/m ³) değerleri.	17
Çizelge 3.3 Farklı kıvamdaki killer için k_1 katsayısının değerleri.	18
Çizelge 4.1 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{max} \geq 5$) elastik çözümü için A katsayıları, (Matlock ve Reese, 1961, 1962).	45
Çizelge 4.2 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{max} \geq 5$) elastik çözümü için B katsayıları, (Matlock ve Reese, 1961, 1962).	46
Çizelge 4.3 Kazık bükülebilirlik faktörünün K_R farklı zemin ve kazık türleri için değerleri (Poulos ve Davis, 1980).	62
Çizelge 4.4 Kohezyonlu zeminler için statik ve dinamik yük koşulları için A_1 ve B_1 katsayıları (Reese vd, 1974).	72
Çizelge 4.5 CLM Yöntemi için minimum uzunluklar	84
Çizelge 6.1 Kumun indeks özellikleri (Berilgen, 1996)	89
Çizelge 6.2 Kumda yapılan kesme kutusu deney sonuçları, (Berilgen, 1996).	91
Çizelge 6.3 Kumda yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları, (Berilgen, 1996).	91
Çizelge 6.4 Model kazık çekme deneyi sonuçları.	93
Çizelge 7.1 Model kazığa $Q_g = 0.15$ kN yükünün uygulanması durumunda, kazık boyunca oluşan deplasman ve eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.	124

ÖNSÖZ

Kazıklı temeller, yapı yüklerinin daha derinlere aktarılması için çok eski tarihlerden beri kullanılmaktadır. Son 50 yıl içinde kazıklar ve kazık grupları üzerinde, güvenilir tasarım yöntemleri geliştirmek için çok yoğun ve kapsamlı analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Analitik çalışmalar, düşey yük altında kazık taşıma gücünün, yatay yük altında kazık yer değiştirmesinin tahmini, dinamik yükler altında kazığın reaksiyonu ve sürekli don etkisi altında kazık davranışının anlaşılmasına yöneliktir. Nümerik yöntemler sonlu farklar ve sonlu elemanlar tekniklerini ve uygulamalarını içermektedir. Yapılan çok sayıdaki model ve gerçek deneylerden de önemli bilgiler elde edilmiştir. Bunlardan elde edilen bilgiler farklı zemin türlerinde, farklı yükleme koşullarında ve farklı çevre koşullarında tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır (Prakash ve Sharma, 1989).

Bu tez çalışmasında ise, kohezyonsuz zeminlerde imal edilen yatay yük etkisindeki düşey kazıkların incelenmesi amacı ile laboratuvar koşullarında bir model deney çalışması yapılmıştır. Bu amaçla 0.022 m çapında, 0.75 m uzunluğunda boru kesitli bir alüminyumdan oluşturulmuş model kazık, bir kum tankına yerleştirilerek uygulanan yatay yükler altında oluşan şekil değiştirmeler ve deplasmanlardan kazık davranışı ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, teorik hesaplarla karşılaştırılarak aralarındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Kazığın uygulanan yükler altındaki davranışı, kazık boyunca belirli derinliklere yerleştirilmiş şekil değiştirme ölçerlerle belirlenen yerdeğiştirme sonuçlarının değerlendirilmesiyle analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın Giriş Bölümünde kazıklarla ilgili genel bir bilgi aktarılmıştır. Bölüm 2’de, kazıklara etkiyen yatay kuvvetler ve bunların özelliklerine yer verilerek, yatay yük etkisindeki kazıkların analiz yöntemleri hakkında genel bilgi sunularak yöntemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. 3. Bölüm’de yatay yük etkisindeki kazıkların son taşıma gücünün hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin ayrıntıları anlatılmıştır. 4. Bölüm’de ise yatay yük etkisindeki düşey kazıklarda deplasmanların tahmin yöntemleri anlatılmıştır. Bölüm 5’de yatay yük etkisindeki kazıkların son taşıma gücünün artırılması yöntemlerine ve model deneylerin yapılmasında yararlanılan benzer çalışmalara kısaca yer verilmiştir. 6. Bölüm’de ise model kazık ve deney düzeneği ile deneylerin yapılmasına ve elde edilen sonuçlara ayrıntılı şekilde verilmiştir. 7. Bölüm’de ise model kazık ile ilgili hesaplamalara ve deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırma ve değerlendirmeleri aktarılmıştır. Yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, Sonuç ve Öneriler başlığı altında Bölüm 8’de sunulmuştur.

Yaptığım çalışmaların bütün aşamalarında beni sabırla destekleyen, büyük bir titizlikle çalışmalarımı yönlendiren ve her yönden iyi bir çalışma yapmam için olumlu ve olumsuz eleştirileri ile yol gösteren tez yürütücüm Sayın Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM’a çok teşekkür ederim. Özellikle deneysel çalışmalarımın yapılması aşamasında deneyimlerinden yararlandığım başta Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN’e ve Öğr. Görevlisi Doç. Dr. Şükrü ÖZÇOBAN’a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Erol GÜLER’e teşekkür ederim. Deneylerin yapılmasında her zaman yanımda olan İnş.Müh. Hüseyin GÖÇEK’e çok teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını aldığım Araştırma Görevlileri Pelin Tohumcu ve Murat Toranoğlu’na teşekkür ederim. Ayrıca deneylerin yapılmasının her aşamasında benim yardım isteklerimi büyük bir özveriyle cevaplandıran tüm geoteknik laboratuvarı personeline teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında benden destek ve katkılarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Umut Osmanoğlu, İnş. Müh. Adem Çolak’a ve diğer mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu çalışmamın yapılmasında bana her zaman özveri ile destek olan başta Annem olmak üzere tüm aile üyelerime çok teşekkür ederim.

ÖZET

Kazıklar ve kazıklı temeller yüzyıllardan beri insan oğlu tarafından yapı yüklerinin zemine güvenle taşıtılmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Kazıklar, düşey basınç, düşey çekme ve yatay yündeki yükleri karşılamak amacı ile inşa edilmektedir. Son 50 yıl içinde kazıklar ve kazık grupları üzerinde, güvenilir tasarım yöntemleri geliştirmek için çok yoğun ve kapsamlı analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çok sayıdaki model ve gerçek deneylerden kazık zemin davranışının analizi açısından önemli bilgiler elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise, kohezyonsuz zeminlerde imal edilen yatay yük etkisindeki düşey kazıkların incelenmesi amacı ile laboratuvar koşullarında bir model deney çalışması yapılmıştır. Bu amaçla 0.022 m çapında, 0.75 m uzunluğunda boru kesitli bir alüminyumdan oluşturulan model kazık, bir kum tankına yerleştirilerek uygulanan yatay yükler altında oluşan şekil değiştirmeler ve deplasmanlardan kazık davranışı ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, teorik hesaplarla karşılaştırılarak aralarındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Kazığın uygulanan yükler altındaki davranışı, kazık boyunca belirli derinliklere yerleştirilmiş olan şekil değiştirme ölçerlerden ve kazığın zemin dışında kalan kısmına yerleştirilmiş olan deformasyon saatlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yatay yüklü düşey kazıklar, kazıkların laboratuvar koşullarında modellenmesi, yatay yüklü kazıkların analiz yöntemleri, yatay yerdeğiştirme, eğilme momenti.

ABSTRACT

Piles and piled foundations are being used for centuries by the human being, in cases in which structural loads can't be carried safely by the soil. Piles are constructed to carry vertical compression and tension loads as well as lateral loads. Especially in the last 50 years, intensive and comprehensive analytical and experimental studies are carried out in order to improve reliable design methods. Important and valuable informations about pile-soil interaction are obtained by many model and full scale tests.

A laboratory model test, which is carried out in order to study the laterally loaded vertical piles in cohesionless soils, is the subject of this MSc. Thesis. For this purpose, an aluminium model pile with a tubular cross section of 0.022 m diameter and 0.75 m length, was installed in a sand tank. By measuring the deformations and deflections under the applied lateral loads, some evaluations were made concerning the pile behaviour. The results obtained from the laboratory test are compared with the theoretical calculations, and the relations between them was tried to be determined. The behaviour of the pile under applied loads was observed by the strain-gauges located at certain depths of pile and the deformation watches located at the upper part (the part outside the sand) of the pile.

Key words: Laterally loaded vertical piles, piles modeling in laboratory condition, laterally loaded piles analysis methods, horizontal deflection, bending moment.

1. GİRİŞ

Kazıklar ve kazıklı temeller çok eski tarihlerden beri kullanılmaktadır. İsviçre’de cilalı taş devri insanları sığ göllerinin üstteki yumuşak kısmına 12000 yıl önce ahşap kazıklar çakıp, evlerini onların üzerine inşa etmişlerdir (Sowers, 1979). Venedik İtalyanları Doğu Avrupa’nın istila saldırılarından korumak için Po Irmağı’nın bataklık deltasına ahşap kazıklar inşa etmiştir. Venezuela’da Hintli’ler Maracaibo gölü kıyılarına inşa ettikleri kazıklarla desteklenen kulubeler üzerinde yaşamışlardır. Bugün, kazıklı temeller yine benzer amaçlarla yani; zemin koşullarının yüzeysel temel yapmaya elverişsiz olduğu yerlerde yapı inşasını olanaklı yapmak için kullanılmaktadır.

Kazıklar, yapı yüklerinin zayıf tabakadan geçerek daha sağlam tabakalara veya kaya tabakalarına aktararak yüksek taşıma gücüne gerek duyulan durumlarda kullanılır. Ayrıca zemine yukarı doğru çekme kuvvetlerinin etkidiği durumlarda ve zayıf zemin koşullarında yatay yükleri karşılamak amacıyla da kullanılır.

Kazıklı temellere şu nedenlerle gerek duyulmaktadır.

- Üstyapı yükünün çok fazla olduğu durumlarda zayıf zemin üzerine temel yapılması gerektiğinde çok büyük temel boyutlarına gereksinim olmaktadır, bu da çoğu zaman olanaklı değildir.
- Yapı temelinin oturduğu üst zemin tabakalarının su akıntısı nedeniyle oyulması söz konusu olabilmektedir.
- Rıhtım yapıları gibi, yapı temelini sudan geçerek zemine oturtulması gerektiği durumlar söz konusudur.
- Mevcut bir yapının bitişiğinde inşa edilecek temelini kazısı mevcut yapı temelini zarar verebilir.

Tüm bu gereksinimleri karşılamak amacı ile üstyapı yüklerini daha derinlerdeki zeminlere aktarmak amacı ile kazıklı temeller kullanılır. İnşa edilecek kazık boyları, gerekli olan yükü güvenli şekilde taşıyabilecek, deplasman ve oturma kriterlerini sağlayacak şekilde belirlenir. Kötü zemin koşulları ve yüksek üstyapı yükleri nedeniyle 45 m ye varan uzunlukta kazıklara gerek duyulabilmekte ve inşa edilebilmektedir. Hatta bazı petrol kuyu platformlarında daha uzun kazıklar kullanılmaktadır.

Kazıklar yük aktarma şekline, imalat yöntemine, inşa edildikleri malzemeye, karşı kaldıkları yüklere, yük aktarma biçimlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar şu şekildedir.

İnşa edilme şekillerine göre kazıkların sınıflandırılması.

1. Hazır çakma kazık
2. Yerinde dökme çakma kazık
3. Yerinde dökme delme kazık
4. Vidalanarak zemine yerleştirilenler
5. Su jeti ile yerleştirilenler
6. Kazarak yerleştirilenler
7. Kriko ile yerleştirilenler

Yukarıda ki üç kazık grubu deplasman kazığı olarak adlandırılır. Bu grup kazıklar inşa edilirken zeminde deplasmana neden olmaktadır. Delme kazıklarda ise önce zemin kazılarak kuyu dışına çıkartılır daha sonra kuyu içine gerekli donatı ve beton veya çelik boru yerleştirilerek inşa edilirler. Bu temel fark kazığın yük etkisi altındaki davranışını ve dolayısıyla yük taşıma gücüne önemli derecede etkileyen bir unsurdur (Prakash ve Sharma, 1989).

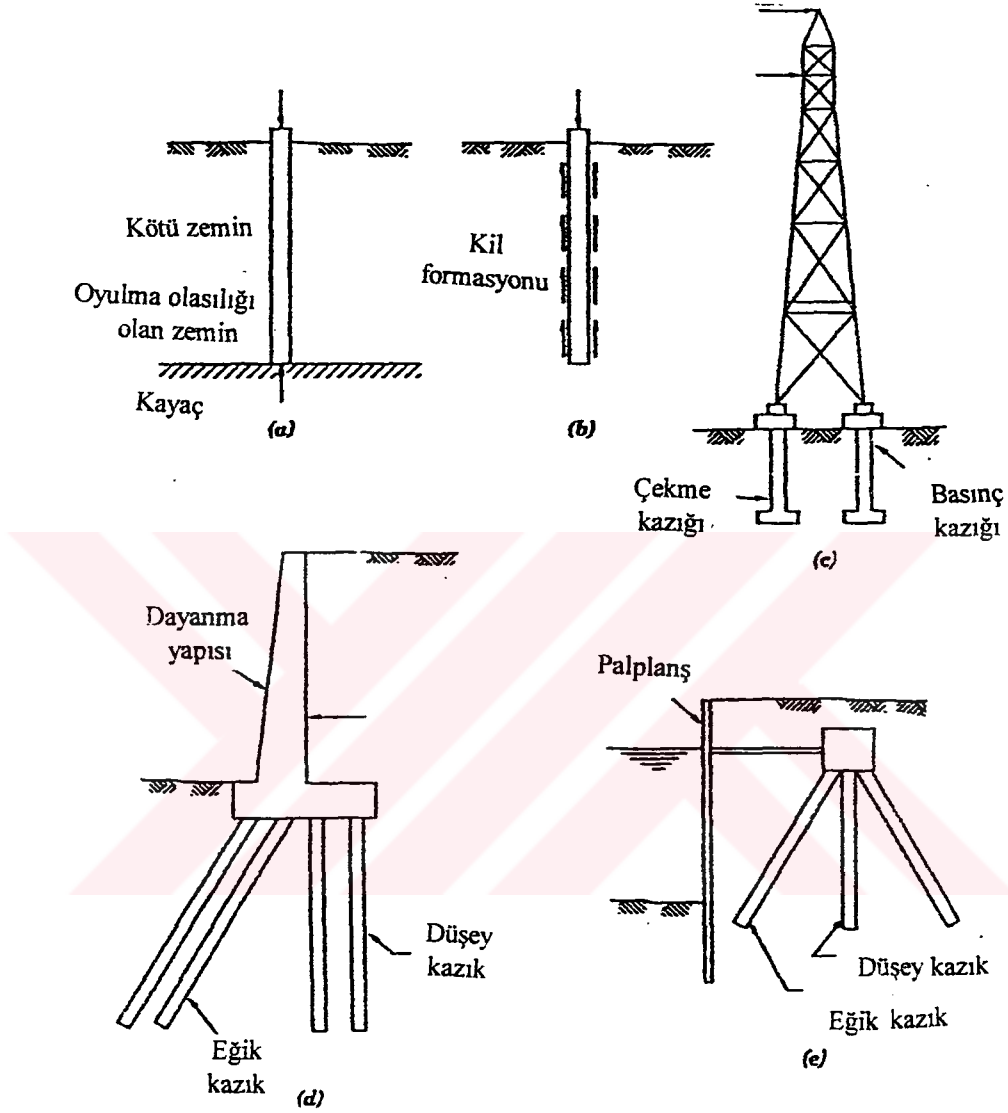
Kazıklar karşıladıkları yüklere göre üç gruba ayrılır.

1. Basınç kazığı,
2. Çekme kazığı,
3. Yatay yüke çalışan kazıklar (düşey ve eğik kazıklar)

Çekme kazıkları, yüksek yapıların momentlerini ve yapıyı yukarı doğru hareket ettirmeye çalışan kuvvetleri karşılamak için kullanılır (Şekil 1.1.c) (Prakash, 1989)

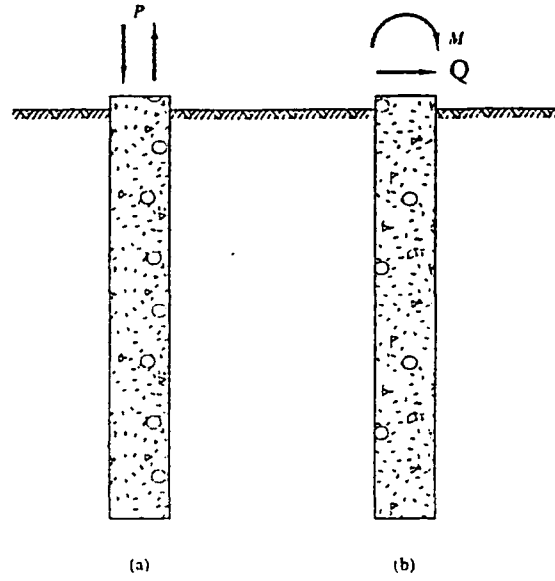
Kazığın düşey doğrultuya göre belli bir açı ile inşa edildiği kazıklara *eğik kazık* denir (Şekil 1.1.d) (Prakash, 1989).

İnşa edildiği malzemelere göre de kazıklar çelik, betonarme, ahşap ve kompozit kazıklar olarak sınıflandırılır.



Şekil 1.1 Kazıkların farklı amaçlarla kullanılışı a) uç kazığı b) sürtünme kazığı c) çekme yüklerine çalışan kazıklar d) yatay yük etkisindeki düşey ve eğik kazıklar e) eğik kazıklar (Prakash ve Sharma, 1989)

Kazıklı temeller tasarlanırken, kazığa etkiyen kuvvetler iki kategoriye ayrılır; düşey ve yatay yükler. Düşey yükler kazık aksına paralel olarak etkir. Yatay yükler kazık aksına dik yönde etkir. Bununla birlikte, yapıdan kazığa aktarılan kesme ve moment kuvvetleri de yatay yükler oluşturur, Şekil 1.2, (Coduto, 1994).



Şekil 1.2 Derin temellerde yük durumları a) aksenal yük, aşağı yönde (basınç) veya yukarı yönde (çekme) b) moment ve/veya kesme kuvveti, (Coduto, 1994).

Kazıkların en yaygın fonksiyonu; sığ derinliklerin, yapıdan aktarılan yükü karşılamak için yetersiz kaldığı durumlarda, yükün gerekli desteği sağlayacak derinliklere aktarılmasıdır. Bu amaçla inşa edilen düşey yük altındaki kazığın, zayıf mukavemetli tabakayı geçerek daha sağlam tabaka içine bir miktar soketlendiği kazıklara *uç kazığı* denir (Şekil 1.1.a). Sağlam tabakanın derinlerde olduğu durumlarda, yükün büyük oranda kazık çevresinde sürtünmeyle karşılandığı kazıklara *sürtünme kazığı* veya *yüzen kazık* denilmektedir (Şekil 1.1.b). Çoğu zaman, kazık yük taşıma gücü uç direnci ve yüzey sürtünmesinin birleşimi ile karşılanır.

Yatay yük etkisindeki düşey kazıklarda da benzer bir mantıkla kazığın uzun-kısa kriteri önemli olmaktadır. Ayrıca kazık başlığının serbest veya tutulu olması da bu tür kazıkların davranış ve yük aktarma mekanizması açısından önemli hususlardan biridir. Düşey yük altındaki bir kazığın, etkiyen yükleri hem zemin olarak, hem de kazık malzemesi olarak güvenli bir şekilde taşıması gerekmektedir. Ayrıca bu yükler altında oluşan deplasmanların kabul edilebilir sınırlar içinde olması gerekir. Bu çalışmanın diğer bölümlerinde yatay yük altındaki düşey kazıklarla ilgili hesap ve analiz yöntemleri ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

2. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARIN TASARIM VE ANALİZİ

Bu bölümde kazıklara etkiyen yükler ve bu yüklerin özellikleri anlatılmış, yatay yük etkisindeki düşey kazıkların hesap ve analiz yöntemlerine kısaca değinilmiştir. Yatay yüklü kazıklardaki, yatay yük ve deplasman limitleri de anlatılmıştır.

2.1 Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler

Kazıklara düşey yüklere ek olarak yatay yük ve moment kuvvetleri de etkiyebilmektedir. Bu nedenle kazıkların sadece etkiyen düşey yükleri değil yatay ve moment kuvvetlerini de güvenli bir şekilde zemine aktarması ve kazık malzemesi olarak bu yükleri güvenli bir şekilde taşıması gerekmektedir. Yatay yükler aşağıdaki nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

1. Rüzgar yükleri,
2. Deprem kuvvetleri,
3. Toprak basınçları,
4. Gemi çarpma kuvvetleri,
5. Gemi bağlama kuvvetleri,
6. Dalga kuvvetleri,
7. Kolonlardaki düşey eksantrik yükler,
8. Akarsu akıntılarının köprü ayaklarında oluşturduğu yatay kuvvetler,
9. Elektrik direklerindeki kablo kuvvetleri,
10. Köprülerde araçların fren ve ilerleme hareketleri.

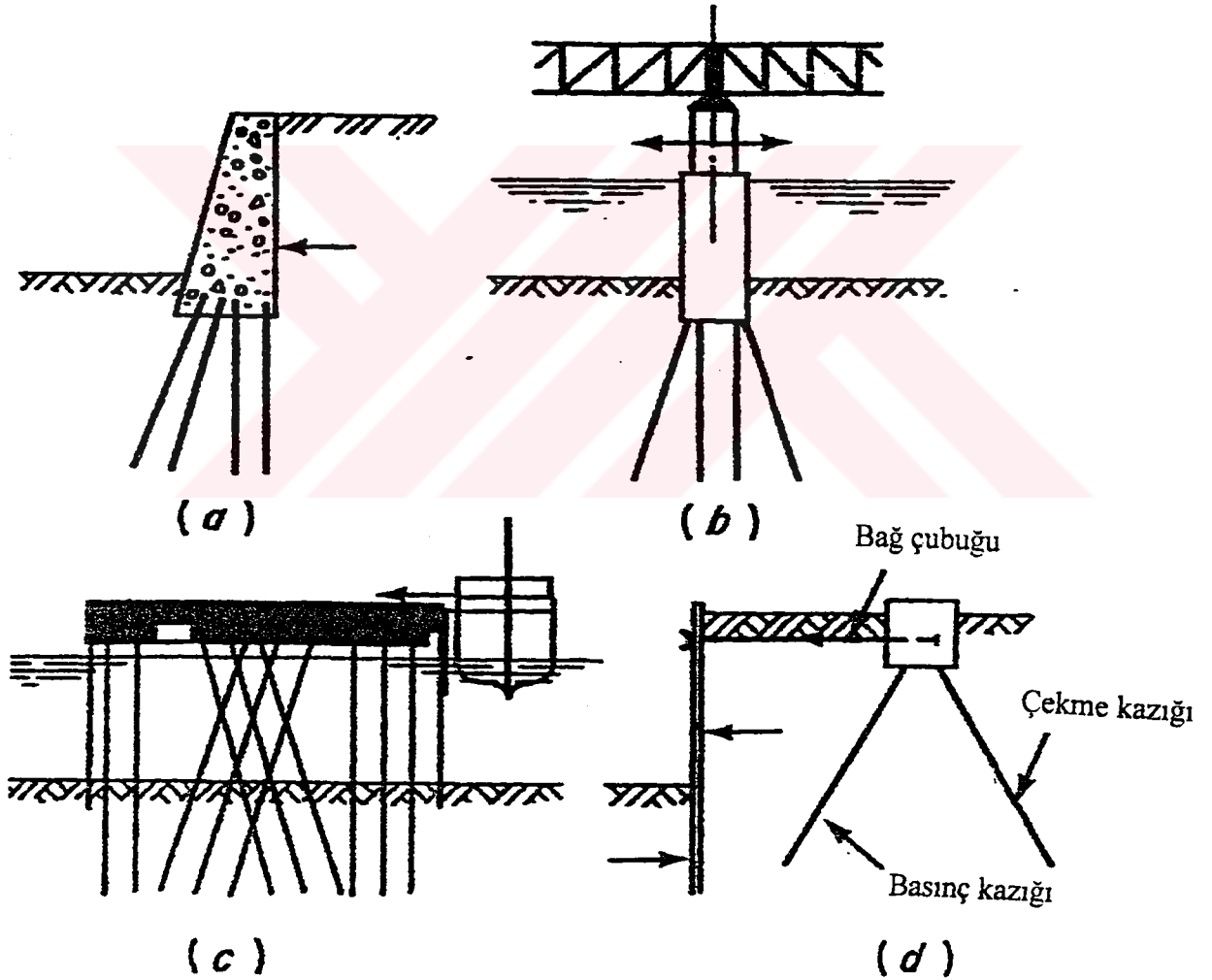
Kazıklara etkiyen bu yükler, aktif ve pasif yükler olarak ikiye ayrılmaktadır, (De Beer, 1977). Aktif yükler, zamanla değişen ve hareketli yüklerdir. Rüzgar, dalga, trafik, gemi çarpma ve gemi bağlama yükleri aktif yüklerdir. Toprak basıncı ve kemer köprülerdeki ölü yükler ise pasif yüklerdir (Reese ve Impe, 2001).

Yukarıda sıralanan nedenlerle üst yapıdan temellere yatay yükler aktarılmaktadır.

Üstyapı yükü yatay bileşeninin, küçük olduğu durumlarda, yükler düşey kazıklarla güvenle taşınabilmektedir. Bununla birlikte rıhtım ve dalgakıranların kazıkları, köprü ayaklarının kazıklı temelleri, petrol arama kule ve vinçlerinin kazıklı temelleri, yüksek baca yapılarının temelleri ve dayanma yapıları gibi yapıların kazıklı temelleri oldukça yüksek mertebelerdeki

yatay yük bileşenleri etkisinde kalabilmektedir. Bu yükler gözönüne alınmaksızın tasarlanıp, inşa edilen düşey kazıklar üst yapı yüklerini güvenli şekilde taşımaları olanaksızdır. Bu durumda yatay yükler gözönüne alınarak tasarlanan düşey kazıklarla veya bu kazıkların da taşıma gücü açısından yetersiz kaldığı durumlarda ise eğik kazıklar inşa edilerek yüksek yatay taşıma gücü sağlanabilmektedir. Şekil 2.1'de bu tür kazıkların kullanıldığı yerler gösterilmiştir.

Dayanma yapılarında (Şekil 2.1.a) toprak basıncı her zaman aynı yönde, yani duvar arkasından duvar yönünde etkir. Duvar altına inşa edilecek düşey kazıklar hem duvar kendi



Şekil 2.1 Yatay yüklere karşı inşa edilen kazıklar, a) dayanma yapıları b) köprü ayakları c) iskeleler d) palplanjlı dayanma yapıları, (Tomlinson, 1994).

ağırlığını hem de yatay kuvvetleri karşılayacak şekilde tasarlanır. Ancak yeterli taşıma gücü sağlanamaması durumunda Şekil 2.1.a'da gösterildiği şekilde eğik kazıklar inşa edilir. Şekil 2.1.b'deki köprü ayağında fren ve araç trafiğinin çekme kuvveti yatay yüke neden olmaktadır. Bu durumda kuvvetler iki yönde de etkimektedir. Bu durumda da önce bu yükler gözönüne alınarak tasarlanan düşey kazıklar veya eğik kazıklar Şekil 2.1.b'de gösterilen şekilde tasarlanması uygun olmaktadır. Köprü ayaklarının derin olduğu durumlarda su akıntısı yönünde ek yükler de söz konusu olmaktadır. Deniz yapılarında gemi çarpma ve dalga kuvvetleri önemli yatay yükler oluşturmaktadır. Bu yükleri karşılamak amacıyla yapılabilecek kazık tasarımı Şekil 2.1.c' de gösterilmiştir. Şekil 2.1.c'de gösterilen perde dayanma yapısında yatay yükler yine eğik kazıklarla karşılanabilmektedir.

2.2 Yatay Yükler Altındaki Düşey Kazıkların Davranış Esasları

Bir kazıklı temelde izin verilebilecek yanal yük, kazık cinsine, zemin durumuna ve kazık başlığının kazığa bağlanma şekline bağlıdır (Toğrol, 1970).

Kazık zemin arasındaki etkileşimde en önemli etkenlerden biri kazık uzunluğudur. Bu kazık deplasman mertebesini ve göçme biçiminin dönme, ötelenme veya kırılma şeklinde olmasını etkiler. Uzun ve kısa kazıkların yük altında davranışlarının farklılık göstermesi nedeniyle, kazık uzunluk-kısalığı önemli bir kriterdir. Bir kazığın kısa veya uzun olduğu şu şekilde belirlenmektedir.

Kısa rijit kazıklarda $L/T \leq 2$ veya $L/R \leq 2$,

Uzun bükülebilir kazıklarda $L/T \geq 4$ veya $L/R \geq 3.5$ olarak uygulanır.

Burada;

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad \text{Granüler zeminler için fiktif rijitlik boyu} \quad (2.1)$$

$$R = \left(\frac{EI}{k_h} \right)^{1/4} \quad \text{Kohezyonlu zeminler için fiktif rijitlik boyu} \quad (2.2)$$

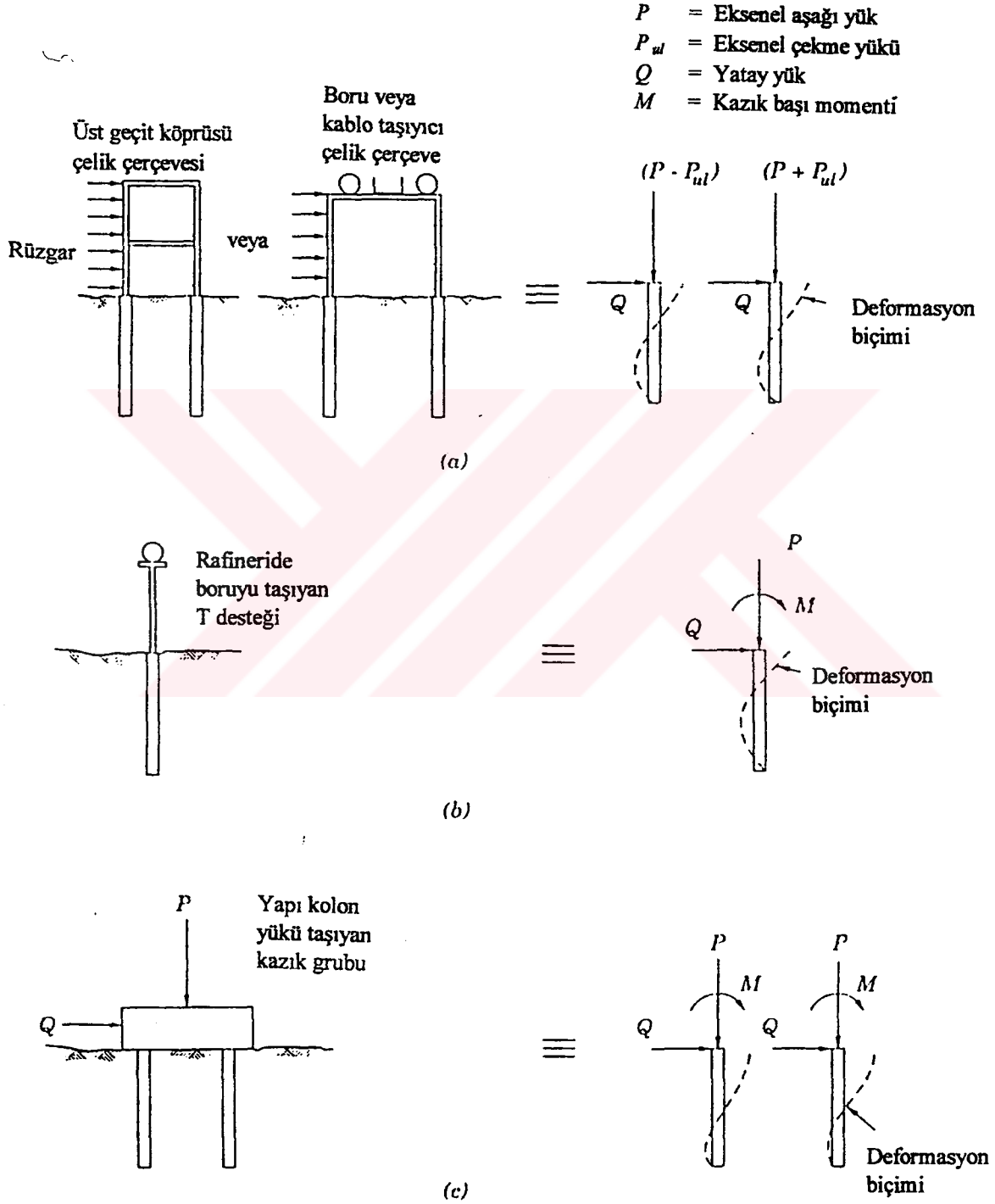
E = kazık malzemesinin elastisite modülü,

I = kazık kesitinin atalet momenti,

$k_h = k_s B$, kohezyonlu zeminlerde derinlikle değişmeyen k_h zemin yatak katsayısına eşittir.

n_h = yatak katsayısı sabiti,

Yatay yüklü kazıklar, kazık başlığının serbestlik durumuna göre ikiye ayrılır, bunlardan ilki serbest başlı kazık, ikincisi tutulu başlı kazık dır. Bir kazığın tutulu başlı olması sadece dönmeye karşı tutulu olması anlamına gelmektedir, kazığa etkiyen yükler zemine aynen aktarılmaktadır. Düşey, yatay ve moment kuvvetlerinin ortaya çıktığı durumlar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Şekil 2.2.a'daki örnekte kazıklara yatay ve düşey yükler etkimekte olup



Şekil 2.2 Yatay yük etkisindeki kazıklar, a) yatay ve düşey yük altında serbest başlıklı kazık, b) yatay, düşey ve moment etkisindeki serbest başlıklı kazık, c) yatay, düşey ve moment etkisindeki tutulu başlıklı kazık, (Prakash ve Sharma 1989).

kazıklar serbest başlıdır. Burada aşağı doğru etkiyen yükler, yapıların kendi ağırlıkları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Eksenel çekme yükü, yatay yük ve moment yükleri genellikle rüzgar, dalga ve deprem nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.2.b'deki kazıklar düşey, yatay ve moment kuvvetleri etkisindedir ve kazıklar serbest başlıdır, Şekil 2.2.c'deki kazıklar benzer yükler etkisinde olup tutulu başlıdır. Kazık başlığının serbest yada tutulu olması kazık ve kazık başlığının rijitliğine, kazık başlığının bağlantı özelliklerine bağlıdır. Şekil 2.2'de kazıkların deformasyon durumları kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

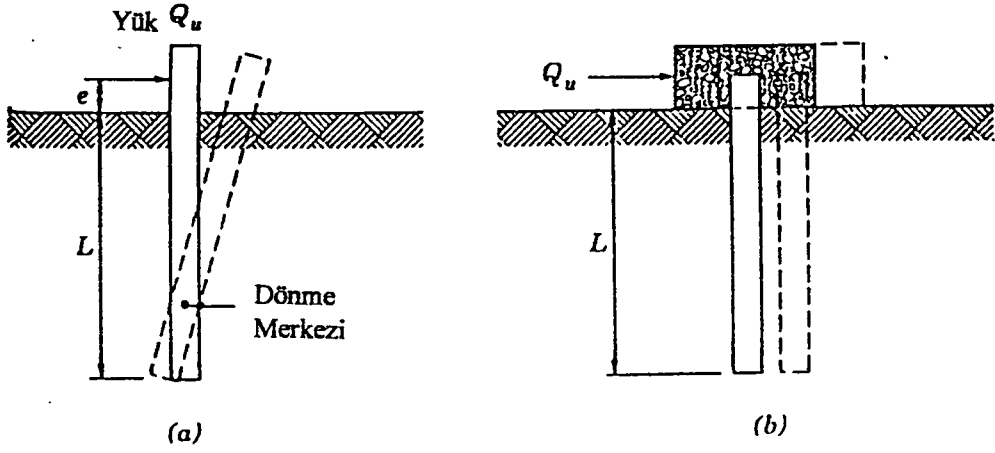
Serbest başlıklı bir düşey kazığın başına yatay yük uygulandığında yük ilk olarak yüzeye yakın bölgedeki zemin tarafından karşılanmaktadır. Bununla birlikte zemin elastik olarak sıkışmakta ve yükün bir kısmı daha derinlerdeki zemine aktarılmaktadır. Yatay yük, zemin plastik akma mertebelerine kadar arttığında ise yük kazık en dip noktasına kadar aktarılmaktadır. Serbest başlı bir kazığın yatay yük mobilize olma biçimi Şekil 2.3'de sunulmaktadır.

Şekil 2.4.a'da serbest başlıklı bir kısa rijit kazığın göçme biçimi gösterilmektedir. Uygulanan yük etkisiyle kazık dönmekte ve yükün uygulandığı aynı yüzey tarafının kazık ucunda pasif direnç oluşmaktadır. Bu yöndeki pasif dirence ek olarak kazık tam ters yüzünde yüzeye yakın bölgede pasif direnç oluşmaktadır. Kazık başına yakın bölgedeki ve kazık ucundaki direnç aşıldığında dönme şeklinde bir göçme oluşmaktadır.

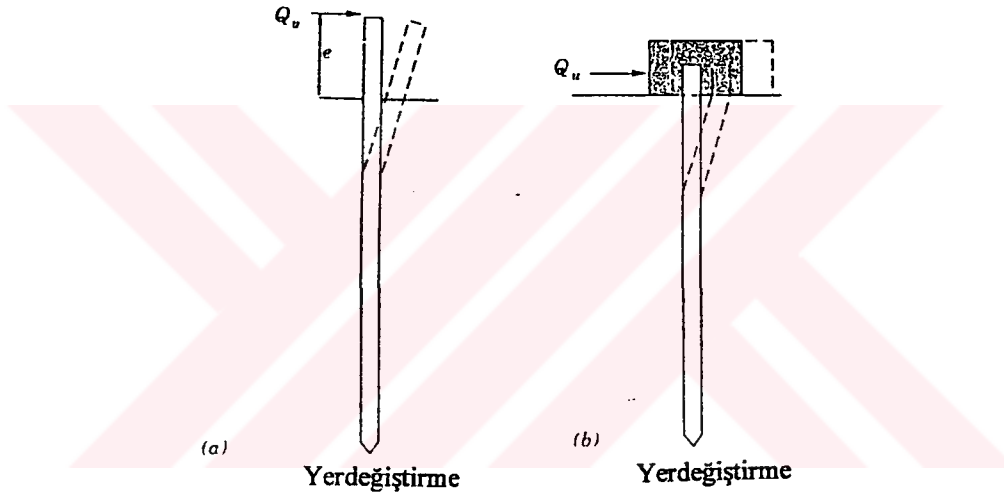
Tutulu başlı rijit kısa kazıklarda ise ötelenme şeklinde bir göçme oluşmaktadır. Bu durum Şekil 2.4.b'de gösterilmiştir.

Uzun kazıkların, kazık alt bölgesinin pasif direncinin fazla olduğu durumlarda göçme biçimi değişmektedir. Kazıkta dönme şeklinde göçme oluşmamaktadır. Göçme maksimum eğilme momentinin olduğu yerde kırılma şeklinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.5.a, Şekil 2.5.b).

Yatay yüklü kazığın baş kısmında dönme veya kırılma şeklinde göçme oluşmadan önce önemli hareket oluşabilmektedir. Kazığın taşıyabileceği maksimum yüke erişilirken yük arttırımına tekabül eden yerdeğiştirmeler hızla artmaktadır. Bu yüzden yatay yük altında göçmeye karşı yeterli güvenlik sayısı yanında hesaplanan deplasmanların izin verilebilir limitleri içinde olması gerekmektedir.



Şekil 2.3 Yatay yük altında kısa kazık göçmesi a) serbest başlı b) tutulu başlı kazık, (Tomlinson,1994).



Şekil 2.4 Yatay yük altında uzun kazık göçmesi a) serbest başlı b) tutulu başlı kazık, (Tomlinson,1994).

Kazığın yanal direnci, kazığın kırılma biçimine (mekanizmasına) bağlı olarak zeminin kayma direnci veya kazığın akma gerilmesi ile belirlidir.

Kazığın son yanal direncinin hesaplanabilmesi için olası kırılma biçimleri gözönüne alınabilir. Kırılma biçimi, kazık boyu, kazık başlığının rijitliği ve zeminin cinsine bağlıdır. Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de sırasıyla kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı, kohezyonsuz zeminlerde tutulu başlı, kohezyonlu zeminlerde serbest başlı ve kohezyonlu zeminlerde tutulu başlı kazık durumları ait kırılma biçimi, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri gösterilmiştir.

Kazıklarda izin verilebilir yatay yük aşağıdaki iki kritere göre belirlenir:

1. İzin verilebilir yatay yük, son (göçme) taşıma yükü yeterli güvenlik sayısına bölünerek elde edilir.
2. İzin verilebilir yatay yük etkisinde oluşan deplasman kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır.

Yukarıdaki iki koşulu sağlayan değer tasarım yatay yükü olarak uygulanır. Yatay yüklü düşey kazıklarda genellikle deplasmanlar, kazık son yatay taşıma gücünden daha kritik olmaktadır.

Düşey kazıkların yatay direncinin hesaplanması için kullanılan yöntemler iki kategoriye ayrılabilir:

1. Son yatay direncin hesaplanması yöntemleri.
2. Yatay çalışma yükü altında kabul edilebilir deplasmanların hesaplanması yöntemleri.

Bu hesap yöntemlerinin olumlu, olumsuz yanları ve uygulanabildikleri koşullar aşağıda sıralanmıştır.

Düşey Kazıkların Yatay Dirençlerinin Hesap Yöntemleri

A. Brinch Hansen Yöntemi (1961): Bu yöntem toprak basıncı teorisine dayanmaktadır ve olumlu yanları şunlardır.

1. $c-\phi$ zeminler için uygulanabilir.
2. Tabakalı zeminler için uygulanabilir.

Brinch Hansen yönteminin olumsuz yanları:

1. Yalnız kısa kazıklar için uygulanabilmektedir.
2. Dönme noktasının belirlenmesinde deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır.

B. Broms Yöntemi (1964 a, b): Bu yöntem de toprak basınç teorisine dayanmakta olup, kazık boyunca son zemin direncinin dağılımı için basitleştirici varsayımlar yapılmaktadır.

Bu yöntemin olumlu yanları:

1. Uzun ve kısa kazıklar için uygulanabilir.
2. Tümüyle kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için uygulanır.
3. Serbest ve tutulu başlı kazıklar ayrı ayrı analiz edilebilmektedir.

Broms yönteminin olumsuz yanları:

1. Tabakalı zeminler için uygulanamamaktadır.
2. $c-\phi$ zeminler için uygulanamamaktadır.

Düsey Kazıklarda Kabul Edilebilir Deplasmanlarının Hesap Yöntemleri

A. Yatak Katsayısı Yaklaşımı (Reese ve Matlock, 1956):

Bu yöntemde zeminin birbirinden bağımsız lineer elastik yaylar şeklinde davrandığı varsayılmaktadır. Bu yöntemin olumlu yanları:

1. Oldukça basit bir yöntemdir.
2. Tabakalı sistem, yatak katsayısının derinlikle değişimi ve lineer olmayan durumlar birleştirilebilmektedir.
3. Pratikte uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Pratikte karşılaşılan problemlerde uzun zamandan beri kullanılması nedeniyle önemli deneyimler elde edilmiştir.

Bununla birlikte yatak katsayısı yönteminin olumsuz yanları şunlardır.

1. Zemin sürekliliğini önemsememektedir.
2. Yatak katsayısı sadece zemin özelliği olmayıp, temel boyutları ve deplasmanlara bağlıdır.

B. Elastik Yaklaşım (Poulos, 1971a ve b):

Bu yöntemde zeminin sürekli elastik ortam olduğu varsayılmaktadır. Yöntemin olumlu yanları:

1. Teorik olarak daha gerçekçi bir yaklaşımdır.
2. Derinlikle değişen farklı modüller için ve tabakalı sistemler için çözüm elde edilebilmektedir.

Yöntemin olumsuz yanları:

1. Arazi problemlerinde birim deformasyonların ve zemin modülünün belirlenmesinde güçlükler vardır.

C. p-y Eğrileri Yaklaşımı (Matlock, 1970; Reese vd, 1974; Reese ve Welch, 1975; Bhushan vd 1979):

p-y yaklaşımının olumlu yanları;

1. Zeminin lineer olmayan davranışlarını da gözönüne alan bir yaklaşımdır.
2. Kohezyonlu, kohezyonsuz, tabakalı, $c-\phi$ zeminler ve kayada inşa edilen kazıklar için uygulanabilir.
3. p-y yöntemi daha sonra geliştirilerek arazi deneylerine (SPT, CPT ve presiyometre deneyi) bağlı olarak hesap yapılabilir.

4. Gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilmektedir.

p-y yaklaşımının olumsuz yanları;

1. Hesapların yapılabilmesi için bilgisayar ortamına gerek vardır. Aslında bilgisayar kullanımının hızla yaygınlaşması nedeni ile bu olumsuzluk biraz daha azalmıştır.
2. Hesapların yapılabilmesi için veri hazırlanması ve hesap aşaması uzun zaman alabilmektedir.

D. CLM, Karakteristik Yük Yöntemi (Duncan vd, 1994):

CLM yönteminin olumlu yanları;

1. Zeminin lineer olmayan davranışlarını da gözönüne alan bir yaklaşımdır.
2. p-y yöntemine göre hesabı daha pratik dir.

CLM yönteminin olumsuz yanları;

Gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir, ancak bu p-y yöntemi kadar hassas olmamaktadır.

Tüm bu yöntemlerin ayrıntıları bu tez çalışması kapsamında anlatılmıştır.

2.3 Yatay Yüklü Düşey Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri

Kazığın başlık düzeyinde izin verilebilecek yatay yerdeğiştirmesi, kabaca, binalarda 6 mm, geniş binalarda 12 mm alınabilir. İzin verilebilecek yanal yükler için McNulty (1956) tarafından deneylere dayanılarak Çizelge 1'deki değerler verilmiştir.

Çizelge 2.1 Düşey kazıklar için izin verilebilir yatay yükler (McNulty, 1956).

Kazık cinsi	Kazık başlığı	Zemin cinsi	İzin verilebilir (ton)
Ahşap (30 cm. çapında)	Mafsal	Kum	0.7
		Orta kil	0.7
	Ankastre*	Kum	2.0
		Orta kil	1.8
Beton (40 cm çapında)	Mafsal veya ankastre	Orta kum	3.2
		İnce kum	2.5
		Orta kil	2.3

*) Ankastrelik kazık başlığının en az 60 cm. betona sokulması ile sağlanacaktır.

Yumuşak kil veya silt içinde düşey olarak inşa edilmiş kazıkların yanal direncine zemin katkısı azdır. Bu yüzden böyle zeminlerde, inşa edilmiş yanal yük alan kazıklara eğilme dirençlerini arttıracak şekilde donatı konulmalıdır.

İshii vd (1960), kazıkların yanal direnci için killi zeminlerde en çok 5 ton, üst 2 m. si kazılıp kum doldurulmuş killi zeminler için en çok 7 ton ve kumlu zeminler için en çok 10 ton değerlerinin Japonya için standart olduğunu bildirmektedirler. Bu yükler için kazık başının yerdeğiştirmesinin 5-10 cm. mertebesinde olacağı da belirtilmektedir. Kazık gruplarının direnci ise her kazığın direncinin toplamı olacaktır.

Genellikle, şartnamelerde düşey kazıkların taşıyabilecekleri yatay yükler hakkında ayrıntılı kayıtlar bulunmamaktadır. Almanya'da, kazık grubunu oluşturan kazıklara gelen düşey yükün %3'ü (maksimu %5'i kadar) bir yanal kuvvete izin verilmektedir. Yanal yük izin verilen değerden fazla ise eğik kazıklar çakılması zorunludur, (Toğrol, 1970).

Bazı yapılarda yatay yüklü derin temellerin tasarımı Bölüm 3'de anlatılan son kazık yatay taşıma gücü açısından yeterli olmaktadır. Bununla birlikte bazı yapılarda yatay zemin gücünün mobilize olması için büyük deplasmanların oluşmasına izin verilmemektedir. Mesela bazı köprü ve benzeri yapılarda 6-18 mm den fazla deplasmana izin verilmemektedir. Bu yüzden izin verilebilir yatay deplasman için belli sınırlar var ise yük-deformasyon analizi yapılarak yatay yüke karşı deplasman değerleri belirlenmelidir, (Coduto, 1994).

3. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARDA SON TAŞIMA GÜCÜNÜN BULUNUŞU

Kazıkların yanal direnç, deplasman ve eğilme momentlerinin tahmini için en yaygın kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin esas prensipleri Bölüm 2’de kısaca anlatılmış olup bu bölümde yanal direnç hesap yöntemleri ayrıntılı şekilde anlatılacaktır. Deplasman ve eğilme momenti hesap yöntemlerinin ayrıntıları ise Bölüm 4’de anlatılmıştır.

Bu bölümde önce uç direnci ihmal edilebilecek mertebedeki narin yüzen kazıklarda son yatay direncin tahmininde kullanılan Geleneksel Statik Yaklaşım (Brinch Hansen) ve Broms yöntemleri ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Yatay yüklü kazık hesaplarında sık kullanılması nedeni ile ayrıca yatak katsayısının tanımı ve belirlenmesi de ayrı bir bölüm olarak incelenmiştir.

Broms, kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için, kazık başlığının serbest ve tutulu başlı; kazığın, kısa ve uzun olması durumlarını ayrı ayrı gözönüne alarak geliştirmiş olduğu hesap yöntemi bu bölümde anlatılmıştır. Brinch Hansen Yöntemi’nin $c-\phi$ zeminler için aynı yaklaşımı içermesi nedeniyle tek başlık altında incelenmiştir.

3.1 Yatak Katsayısının Tanımı ve Değerleri

Zemin üstündeki bir kirişin herhangi bir noktasında gerilme (p) ile o noktanın yerdeğiştirmesi (y) yani çökmesi arasındaki orana yatak katsayısı denir,

$$k_h = \frac{P}{y} \quad (3.1)$$

burada

p = birim uzunluktaki zemin reaksiyonu

y = kazık deformasyonudur.

Bu tanımlama, kirişin herhangi bir noktasının çökmesinin yalnızca o noktadaki gerilme etkisinde oluştuğunu varsaymaktadır. Terzaghi (1955) kazıkları düşey kirişler gibi düşünerek bir yatak katsayısı (k_h) tanımlamıştır. Bu katsayı kohezyonlu zeminlerde, zeminin serbest basınç direnci (q_u) ile kabaca orantılıdır. Öte yandan, normal konsolide olmuş killerin ve

siltlerin serbest basınç direnci derinlikle lineer olarak arttığı için, böyle zeminlerde, yatak katsayısının da derinlikle büyüdüğü söylenebilir. Üzerindeki buzulların kalkması, v.s. gibi nedenlerle aşırı konsolide olmuş killerde yatak katsayısı derinlikle değişmez. Buna karşılık kuruma ile aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatak katsayısı derinlikle azalabilir. Şekil 3.1'de yatak katsayısının farklı zemin ve yük koşulları için değişimi grafik olarak verilmiştir.

Palmer ve Thompson (1948), yatay yatak katsayısını aşağıdaki formda açıklamışlardır;

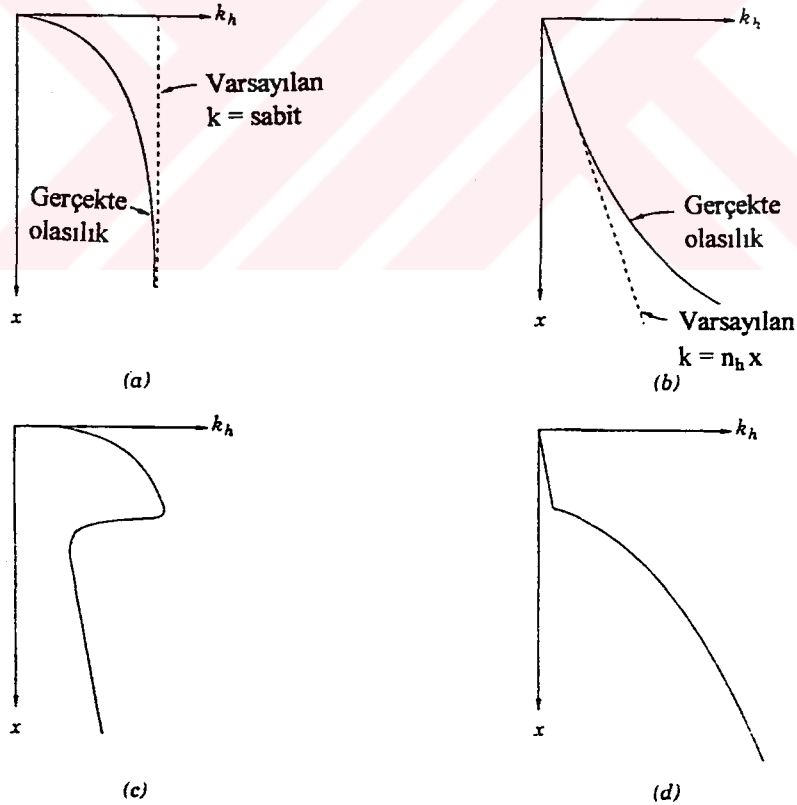
$$k_x = k_h \left(\frac{x}{L} \right)^n \quad (3.2)$$

burada

k_h = kazık ucunda veya $x = L$ derinliğindeki k_x değeridir

x = kazık boyunca herhangi bir nokta

n = sıfırdan büyük veya eşit bir sabittir.



Şekil 3.1 Yatak katsayısının derinlikle değişimi a) aşırı konsolide kohezyonlu zemin b) granüler zemin ve normal konsolide silt ve killer c) kurumuş normal konsolide kil d) yumuşak yüzey tabakaları (Davisson, 1963).

Kumlar ve normal konsolide killer için uzun dönem yüklemelerinde “n” genellikle bir değerini almaktadır. Aşırı konsolide killer için “n” sıfır alınır. Davisson ve Prakash (1963), drenajsız koşullarda kumlar için $n = 1.5$ ve killer için $n = 0.15$ değerini önermektedirler. $n = 1$ değeri için k_h ın derinlikle değişimi

$$k_h = n_h x \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir. Burada n_h yatak katsayısı sabitidir ve kumlu ve kohezyonlu zeminler için aldığı değerler sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1 Farklı göreceli sıklıktaki kumlar için n_h (kN/m^3) değerleri (Terzaghi, 1955).

Kumun relatif sıklığı	Gevşek	Orta	Sıkı
Kuru veya nemli kumda	2400	7100	18000
Su altındaki kumda	1500	4500	11000

Çizelge 3.2 Kohezyonlu zeminler için farklı araştırmacılar tarafından önerilen n_h (kN/m^3) değerleri.

Zemin Türü	n_h	Referans
Normal konsolide yumuşak kil	166-3515	Reese ve Matlock, 1956
	276-555	Davisson ve Prakash, 1963
Normal konsolide organik kil	110-276	Peck ve Davisson, 1962
	110-830	Davisson, 1970
Turba	55	Davisson, 1970
	28-110	Wilson ve Hiltz, 1967
Lös	8000-11000	Bowles, 1968

Yatak katsayısı kohezyonsuz zeminlerde derinlikte arttığı için,

$$k_h = n_h \frac{z}{D} \quad (3.4)$$

yazılır. Burada,

n_h = yatak katsayısı sabiti

z = derinlik

D = kazık çapıdır.

Yatay yatak katsayısının hesaplanması için araştırmacılar tarafından geliştirilen ampirik yöntemlerin bir kısmı aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir.

Terzaghi (1955) yatay yatak katsayısı, k_h , killerde,

$$k_h = \frac{k_1}{1.5D} \quad (3.5)$$

ifadesi ile hesaplanabileceğini belirtmiştir. Farklı kıvamdaki killer için k_1 sayısının değerleri Çizelge 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.3 Farklı kıvamdaki killer için k_1 katsayısının değerleri

	Zemin Türü			
	Yumuşak kil	Katı kil	Çok katı kil	Sert kil
k_1 (kN/m ³)	0-15000	25000	50000	100000

Broms (1964 a) drenajsız koşullarda son gerilmenin yarısındaki E_{50} secant modülüne bağlı olarak yatay yatak katsayısının,

$$k_h = 1.67E_{50}/D \quad (3.6)$$

ile hesaplanabileceğini önermektedir. Davisson (1970) yatay yatak katsayısının tutucu bir yaklaşımla,

$$k_h = 67c_u/D \quad (3.7)$$

ile hesaplanmasını önermektedir. Burada c_u , drenajsız kayma mukavemetidir ve eşitliklerin tümünde D , kazık çapını ifade etmektedir.

3.2 Geleneksel Statik Yaklaşım (Brinch Hansen Yöntemi)

Serbest başlı yüzen bir kazığın son yatay direncinin en basit tahmin yöntemi ve etkiyen yüklere karşı son zemin direncinin mobilize olma biçimi Şekil 3.2'de sunulmuştur. Burada kazığa, Q yatay yükü M momenti etkimekte ve herhangi bir x derinliğindeki son zemin direnci p_u dur. Son yatay direnç, Q_u ve moment, M_u , son zemin direnci p_u ile ifade edilebilir. Kazığın rijit olduğu varsayılarak yatay kuvvetler ve moment denge denklemlerinden aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

Yatay yöndeki kuvvetlerin toplamı = $\Sigma F_y = 0$

$$Q_u - \int_{x=0}^{x=x_r} p_{xu} dx + \int_{x=x_r}^{x=L} p_{xu} dx = 0 \quad (3.8)$$

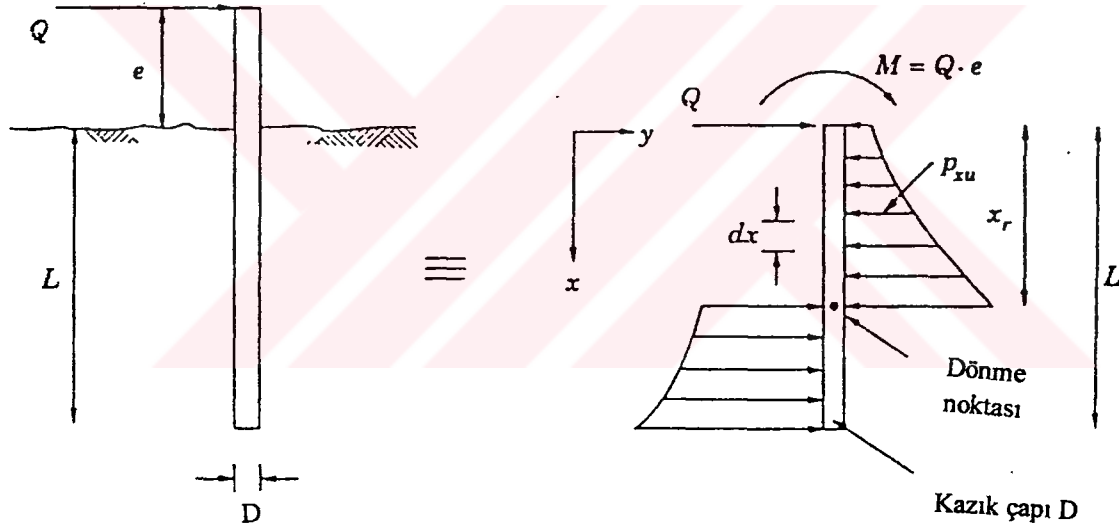
$\Sigma_{\text{Moment}} = 0$

$$Q_u e + \int_{x=0}^{x=x_r} p_{xu} dx dx - \int_{x=x_r}^{x=L} p_{xu} dx dx = 0 \quad (3.9)$$

Burada ,

D = kazık çapı

x_r = dönme noktası derinliğidir.



Şekil 3.2 Serbest başlı yatay yüklü rijit kazıkta yatay direncin mobilize olma biçimi (Prakash ve Sharma, 1989).

Eğer birim son zemin direncinin p_{xu} derinlikle x değişimi biliniyor ise x_r , Q_u (son yatay direnç) (3.1) ve (3.2) eşitliklerinden elde edilebilir. Bu temel eşitlikler Brinch Hansen ve Broms tarafından da yatay yüklü düşey kazıkların son yatay direncinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Zemin direncinin tüm kazık boyunca derinlikle değişimi üniform dağılım gösteriyor ise $p_o = p_L = p_u$ dur. $p_o = p_L = p_u$ ilgili derinlikteki zemin reaksiyonu olup grafiklerde gösterilen p_u ise son zemin direncidir. Bu değerlere göre yukarıdaki eşitliklerin çözümünden x_r kritik derinlik

ve son yatay yük Q_u aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$x_r = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_u}{p_u d} + L \right) \quad (3.10)$$

$$\frac{M_u}{p_u d L^2} = \frac{Q_u e}{p_u d L^2} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{2Q_u}{p_u d L} \right) - \left(\frac{Q_u}{p_u d L} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

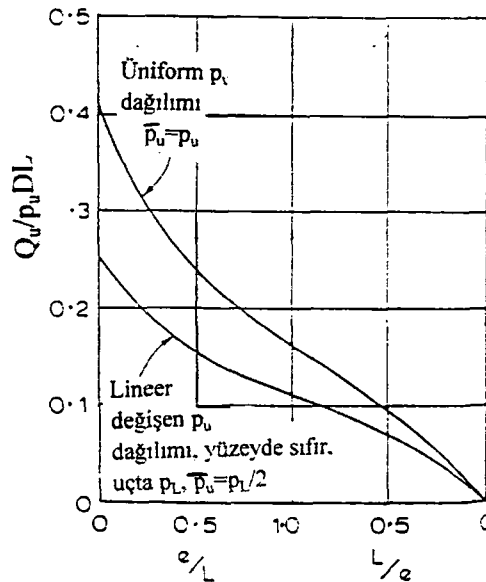
$$\frac{Q_u e}{p_u d L^2} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{2Q_u}{p_u d L} \right) - \left(\frac{Q_u}{p_u d L} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Bu çözümü daha da basitleştirmek amacı ile $\frac{Q_u}{p_u d L}$ ye karşılık e/L arasında elde edilen grafikler Şekil 3.3'de sunulmuştur.

Zemin direncinin derinlikle lineer değişmesi durumunda zemin yüzeyindeki p_o dan kazık ucundaki p_L yardımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

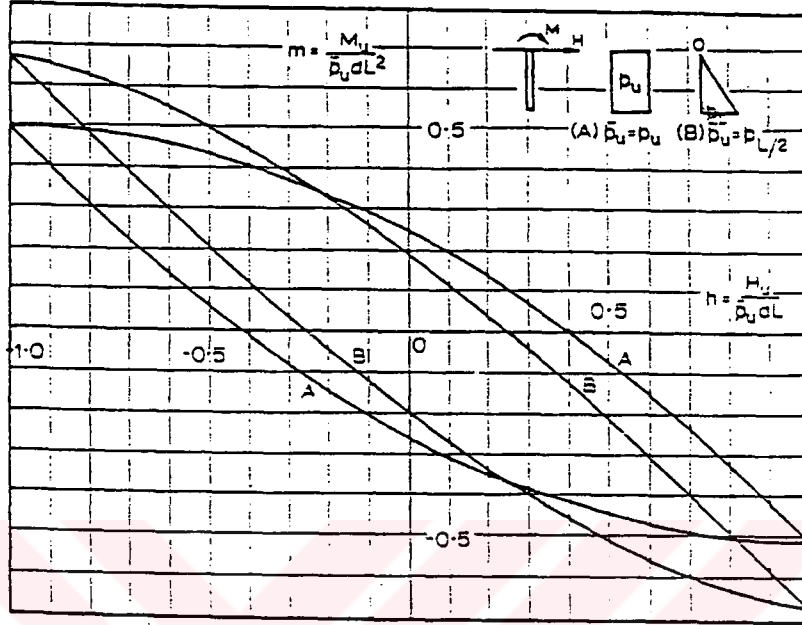
$$4 \left(\frac{x_r}{L} \right)^3 + 6 \left(\frac{x_r}{L} \right)^2 \left(\frac{e}{L} + \frac{p_o}{p_L - p_o} \right) + \left(\frac{12p_o}{p_L - p_o} \right) \frac{e x_r}{L} - \frac{3e p_o + p_L}{L p_L - p_o} - \frac{2p_L + p_o}{p_L - p_o} = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{Q_u e}{p_u d L} = \left(1 - \frac{p_o}{p_L} \right) \left(\frac{x_r}{L} \right)^2 + \left(2 \frac{p_o}{p_L} \right) \left(\frac{x_r}{L} \right) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{p_o}{p_L} \right) \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 Serbest başlı rijit kazıkta son yatay direnç, (Poulos ve Davis, 1980).

Bu çözümlü de basitleştirmek amacı ile $p_o=0$ için $\frac{Q_u}{p_u dL}$ ye karşılık e/L arasında elde edilen grafikler Şekil 3.3'de sunulmuştur. Serbest başlı, kısa, rijit, kazıklar için, göçme yükü ve buna karşılık gelen momente ait genel çözüm Şekil 3.4'de sunulmuştur.



Şekil 3.4 Serbest başlı rijit kazıkta son yatay direnç, (Poulos ve Davis, 1980).

Yukarıdaki eşitliklerdeki p_u yatay zemin direnci aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$p_u = qK_q + cK_c \quad (3.15)$$

Burada,

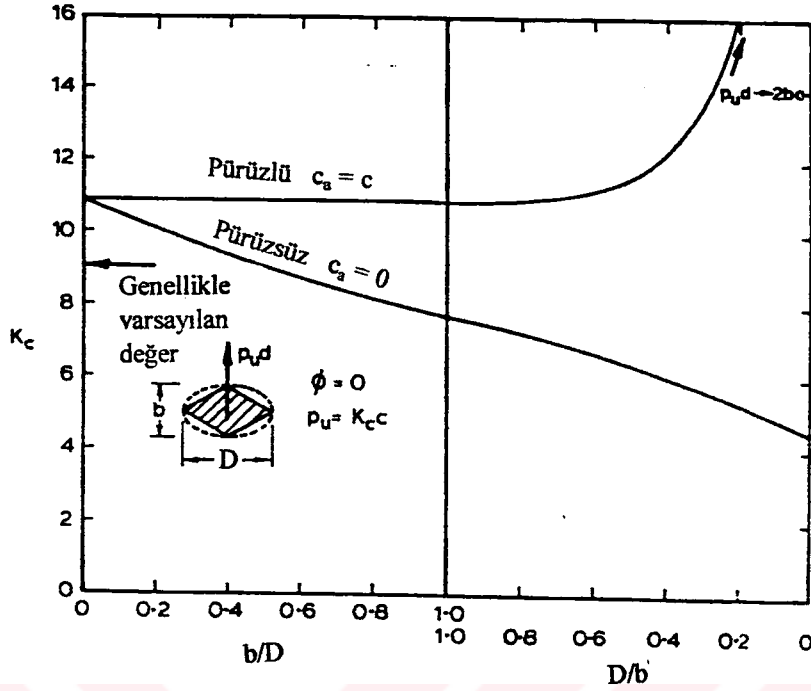
q = düşey efektif gerilme,

c = kohezyon

K_q, K_c = yatay direnç katsayılarıdır.

(3.15) eşitliği ile kısa süreli analizler için c ve ϕ drenajsız parametreleri kullanılmalıdır. Mesela dalga ve gemi çarpma yüklerine karşı tasarımlar bu gruba girmektedir. Toprak basıncı gibi sürekli yüklere karşı tasarımlarda ise uzun süreli c' ve ϕ' drenajlı mukavemet parametreleri kullanılmalıdır. Uzun süreli, drenajlı parametrelere göre analiz yapılırken, yapının inşa aşamasındaki kısa süreli yüklere karşıda güvenli olduğundan drenajsız parametreler kullanılarak yapılacak analizlerle emin olunmalıdır.

(3.15) eşitliği kohezyonlu zeminler için $p_u = cK_c$ şeklinde olmaktadır. Bu durumda K_c yatay direnç katsayısı adhezyonun kohezyona oranına c_a/c , kazık kesitinin şekline ve önemli oranda



Şekil 3.5 Kohezyonlu zeminlerde yüzey ve adhezyon oranı ile yatay direnç katsayısı arasındaki ilişki, (Poulos ve Davis, 1980).

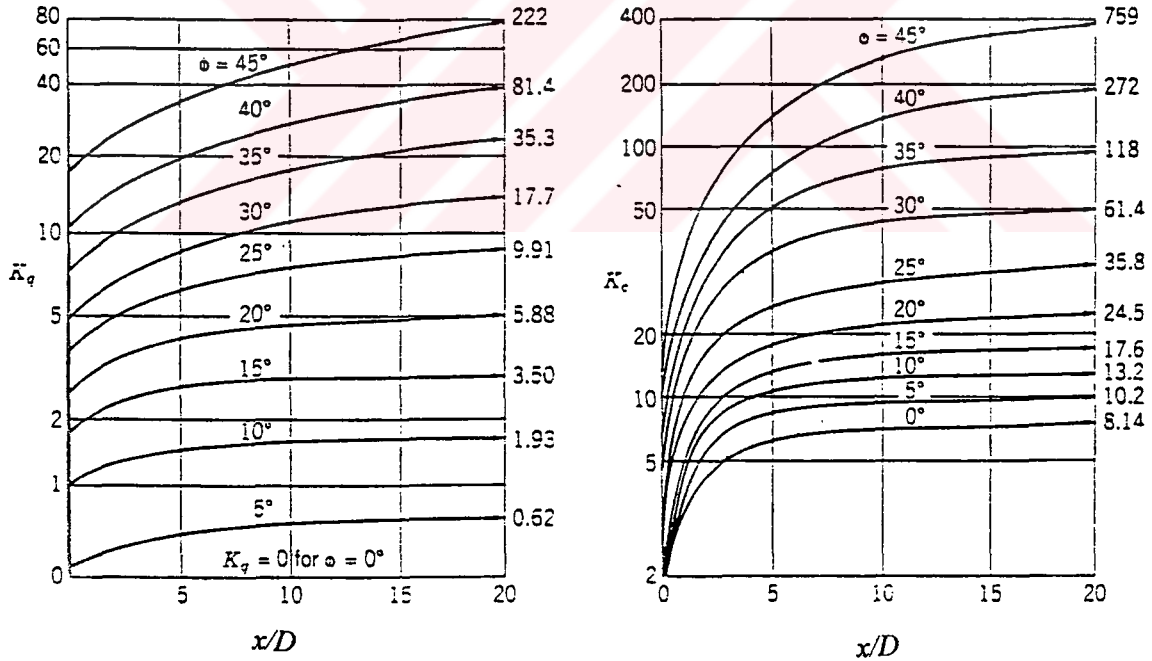
yüzey oranı D/b na bağlıdır. $c_a/c = 1$ ve $c_a/c = 0$ değerleri için yüzey oranına bağlı K_c değerleri Şekil 3.5'de sunulmuştur. c_a/c nin ara değerleri için grafikteki iki eğri arasında lineer enterpolasyon yapılarak gerekli hassasiyette değerler elde edilebilir.

Yukarıda anlatılan yöntemde kazığın rijit olduğu varsayılmaktadır ve zemin göçmesi kazığın kendisinin göçmesinden önce oluşmaktadır. Bununla birlikte göreceli olarak daha uzun kazıklarda, son yatay direnç kazık akma momentine göre belirlenir. Bu durumda göçme, zemin direncinin tamamının mobilize olmasından önce oluşabilir. Maksimum moment (serbest başlı kazıkta kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktada ortaya çıkar) yukarıda anlatıldığı şekilde, zemin direncinin tamamının mobilize olacağı varsayılarak hesaplanır. Maksimum momentin kazık kesitinin akma momentini aşmadığı durumda son yatay direnç aşağıdaki iki koşuldan küçük olanından daha düşük değerde olacaktır.

1. Tüm kazık uzunluğu boyunca zemin göçmesine neden olan yük (kazığın esas olarak rijit olduğu ve kapasitenin zemin direnci ile sağlandığı durum).
2. Kazık kesitinin akma momentine eşit olan momenti oluşturan yatay yük (kazığın esas olarak uzun kazık gibi davrandığı ve kapasitenin kazık özellikleri ile sağlandığı durum).

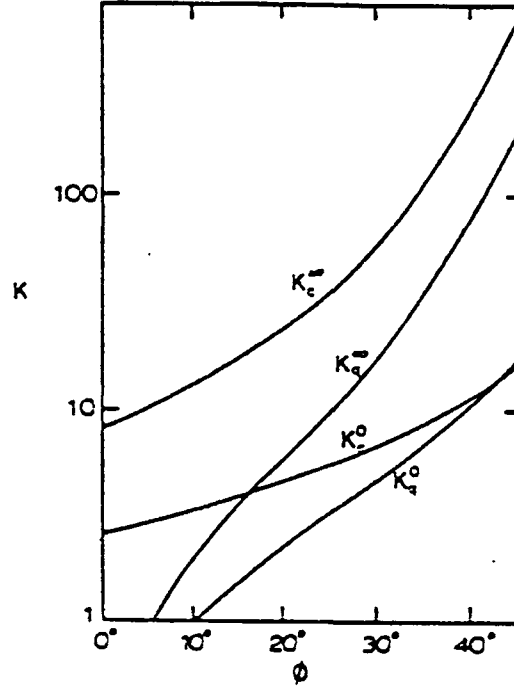
Brinch Hansen $c-\phi$ zeminlerin son yatay direncinin belirlenmesi için toprak basınç teorisine dayanan alternatif bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem tabakalı zeminler için de elverişli olup sadece kısa rijit kazıklarda uygulanabilir. Bu yöntemde zemin direncinin kazık boyunca derinlikle değişimi gözönüne alınmaktadır. Herhangi bir x derinliğindeki son direnç yukarıdaki (3.8) eşitliğinden hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte kullanılan K_q ve K_c yatay direnç katsayıları ϕ ve x/D 'ye bağlı olarak Şekil 3.6'da sunulmuştur.

Zemin direncinin derinlikle değişiminin genel dağılımı için Brinch Hansen yöntemi uygundur. Bu yöntem da dönme noktası deneme yanılma ile belirlenmektedir. Yükün uygulandığı noktaya göre moment alınır ve bu noktada son moment sıfırdır. Dönme noktası belirlendikten sonra yatay denge denklemlerinden son yatay direnç belirlenir. Kısa süreli yükleme koşulları için drenajsız c_u ve ϕ parametleri kullanılabilir. Uzun süreli yükleme koşulları için drenajlı c' ve ϕ' mukavemet parametreleri kullanılır.



Şekil 3.6 K_q ve K_c yatay direnç katsayıları (Brinch Hansen, 1961).

Ayrıca zemin yüzeyinde ve sonsuz derinlikteki yatay direnç katsayıları Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.7 Zemin yüzeyinde ve sonsuz derinlikteki K_q ve K_c yatay direnç katsayıları, (Brinch Hansen, 1961).

3.3 Broms Yöntemi

Broms yöntemi sadece tam kohezyonsuz ve tam kohezyonlu zeminler için uygulanmak ta olup c , ϕ zeminlere uygulanmamaktadır. Broms serbest ve tutulu başlı kazıkların, kısa ve uzun durumlarını gözönüne alarak ayrı ayrı hesap yöntemi geliştirmiştir. Bu bölümde Broms yönteminin kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için uygulanaşı ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

3.3.1 Broms Yöntemi İle Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazık Yanal Direncinin Tahmini

Kohezyonsuz zeminlerde kazığın yan al direncini hesaplamak için Broms şu varsayımları yapmaktadır:

1. Kazığın arkasından etkiyen aktif itki ihmal edilmektedir,
2. Kazığın önündeki pasif basıncın kazık boyunca dağılımı Rankine'nin plastik denge durumuna göre hesaplanan değerin üç katı alınmaktadır,
3. Kazık kesitinin şekli son yan al direnç veya toprak basıncı dağılımını etkilememektedir,
4. Gözönüne alınan yerdeğıştirmelerin olabilmesi için yan al direncin tümü kullanılmaktadır.

İkinci varsayıma göre, z derinliğindeki zemin reaksiyonu,

$$P_u = 3\sigma_v' K_p = 3D\gamma' zK_p \quad (3.16)$$

ifadesi ile verilebilir.

Burada,

σ_v' = düşey efektif gerilme

D = kazık çapı

γ' = zeminin doğal birim hacim ağırlığı

K_p = pasif toprak-basınç katsayısıdır ve,

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi_d}{1 - \sin \phi_d} \quad (3.17)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. ϕ_d ; drenajlı deneyle bulunan kayma direnci açısıdır.

3.3.1.1 Serbest Başlıklı Kısa ve Uzun Kazıklar

Kohezyonsuz zeminlerdeki serbest başlı, kısa ve uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Kısa Kazıklar;

Kazıkta oluşan maksimum moment, kazık kesitinin akma momentinden küçükse kazık, kısa kazıktır. Kısa kazık olmanın diğer koşulu $L/T \leq 2$ dir. Şekil 3.8'de kısa kazıkta, dönmenin kazık ucuna yakın bir yerde oluşacağı varsayılarak ve bu noktada yüksek zemin etkisi oluşacağından bu etki kazık ucuna etkiyen tek bir F kuvveti olarak düşünülmüştür. Bu durumda kazık ucuna göre moment alınırsa, kısa kazıkların taşıyabileceği maksimum yanal kuvvet,

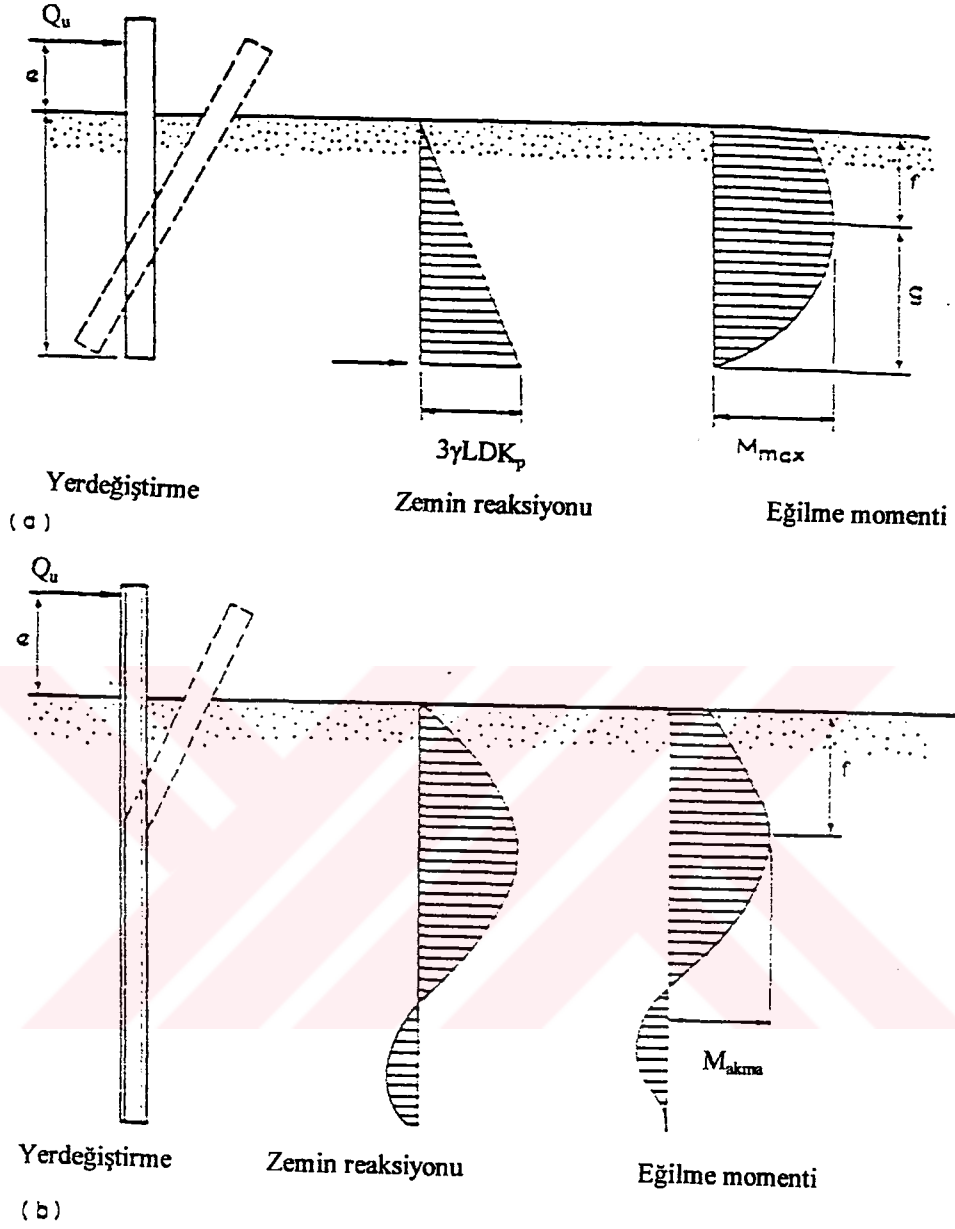
$$Q_u = \frac{0.5DL^3 K_p}{e + L} \quad (3.18)$$

olarak bulunur. Burada,

e = yatay yükün uygulandığı yerin zemin yüzeyinden yüksekliği,

L = kazık gömülü boyudur.

Maksimum moment zemin yüzünden f derinliğinde oluşacaktır. Burada kesme kuvveti sıfır olacağından,



Şekil 3.8 Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı (a) kısa (b) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms 1964 b).

$$Q_u = \frac{3}{2} \gamma D K_p f^2 \quad (3.19)$$

den,

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma D K_p}} \quad (3.20)$$

yazılabilir. Maksimum moment ise,

$$M_{\max} = Q(e + \frac{2}{3}f) \quad (3.21)$$

olur.

Uzun Kazıklar;

Eğer 3.18 denkleminde hesaplanan Q_u ile bulunan moment kazık kesitinin akma momentinden büyük ise uzun kazık durumu geçerlidir. Uzun kazık olmanın diğer koşulu $L/T > 4$ dir. Bu durumda $M_{\max} = M_{akma}$ olur, (3.19) eşitliğinden Q_u bulunmalıdır. Maksimum eğilme momenti, sıfır kesme momentinin olduğu yerde olacağından kısa kazıklar için geçerli olan aynı (3.20) eşitliği yardımıyla maksimum momentin olduğu yer bulunabilir. f derinliğinde bir plastik mafsal söz konusudur. Buradan serbest başlıklı uzun kazık son taşıma gücü,

$$M_{\max} = Q_u(e + \frac{2}{3}f) = M_u \quad (3.22)$$

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma' DK_p}}} \quad (3.23)$$

ifadelerinden hesaplanır. Burada M_u kazık son moment kapasitesidir.

Broms (1964b) tarafından kısa kazıkların hesabı için, L/D ve $Q_u/(K_p \gamma D^3)$ boyutsuz katsayılarını kullanarak; uzun kazıkların hesabı için ise $Q_u/(K_p \gamma D^3)$ ve $M_{akma}/(D^4 \gamma K_p)$ katsayılarını kullanarak hesabı için hazırlanan diyagramlar sırasıyla Şekil 3.9.a ve Şekil 3.9.b'de gösterilmektedir.

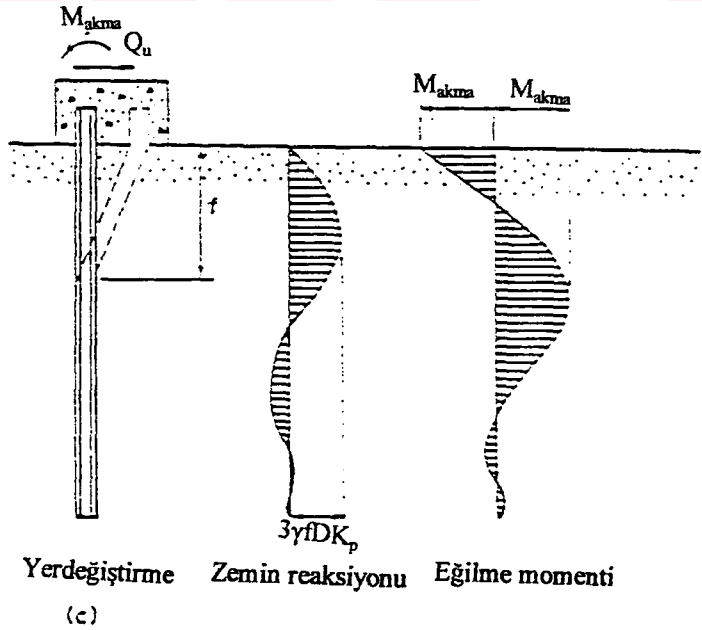
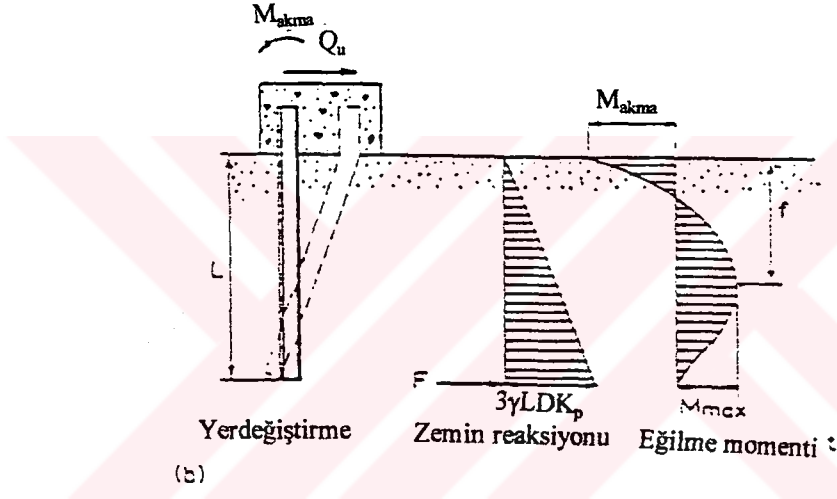
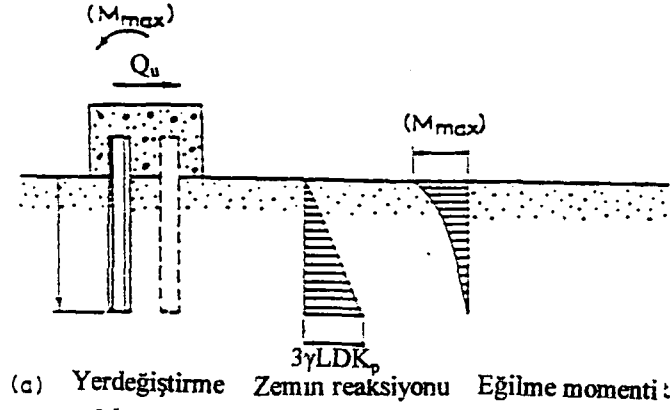
3.3.1.2 Rijit Başlıklı Kısa, Orta ve Uzun Kazıklar

Kohezyonsuz zeminlerdeki tutulu başlı kazıkların yanal direnci hesaplanırken, kısa, orta ve uzun kazık olmak üzere üç durum söz konusudur. Bu durumlara ait göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

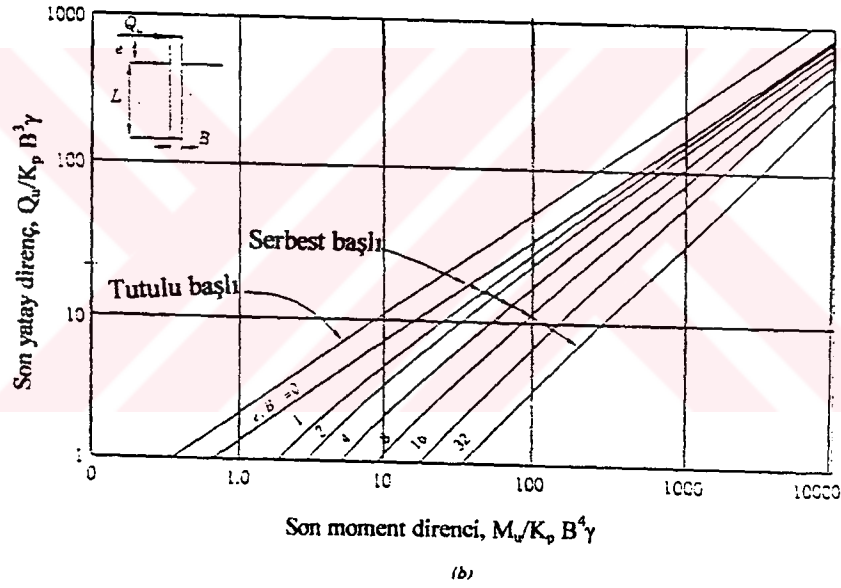
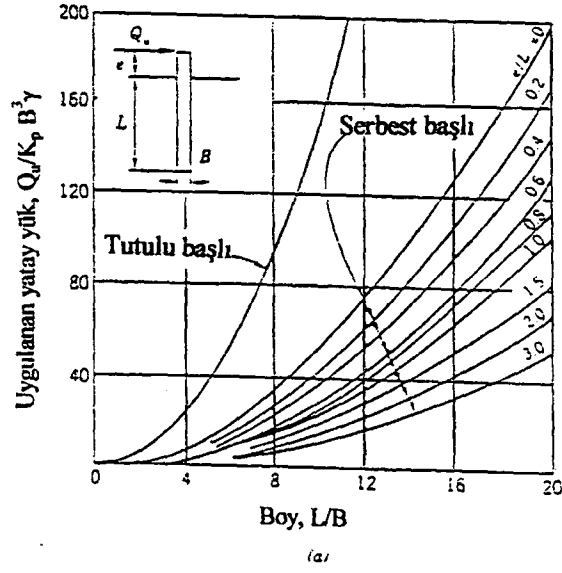
Kısa Kazıklar;

Tutulu başlı kısa kazıkların göçme biçimi, son zemin direnci ve eğilme momenti Şekil

3.8.a'da gösterilmektedir. Kısa kazık olarak adlandırılan biçimde maksimum moment, başlığın hemen altında oluşmaktadır (Şekil 3.8.a). Yatay denge durumundan, son yanal direnç doğrudan doğruya zeminin pasif direncine eşit olmaktadır:



Şekil 3.9 Kohezyonsuz zeminlerde tutulu başlı (a) kısa (b) orta (c) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms 1964 b).



Şekil 3.10 Kohezyonsuz zeminlerde a) kısa kazıklarda, gömülü kazık boyuna bağlı olarak, b) uzun kazıklarda, akma dayanımına bağlı olarak son yatay taşıma gücü (Broms 1964 b).

$$Q_u = 1.5\gamma L^2 DK_p \quad (3.24)$$

Maksimum moment,

$$M_{\max} = \frac{2}{3} QL \quad (3.25)$$

ile hesaplanabilir.

Orta Boy Kazıklar;

Maksimum momentin değeri kesitin akma momentine ulaşırsa orta boy kazık haline varılmış olur, Şekil (3.8.b). Artık rijit başlığın hemen altında bir plastik mafsal oluşmuştur. Kazığın dönmelerinden dolayı ortaya çıkan pasif toprak direnci yerine kazık alt ucuna bir F kuvveti konulur. Kuvvetlerin yatay izdüşümlerinden,

$$F = \frac{3}{2} \gamma DL^2 K_p - Q \quad (3.26)$$

yazılır. Başlığın hemen altındaki noktaya göre moment alınır ve F'nin yerine eşiti konacak olursa,

$$M_{akma} = 0.5 \gamma DL^3 K_p - Q_u L \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Son direnç 3.27 denkleminde

$$Q_u = \frac{M_{akma} - 0.5 \gamma DL^3 K_p}{L} \quad (3.28)$$

olarak bulunur.

Orta boy kazık hali, zemin yüzünden herhangi bir f derinliğinde eğilme momentinin kazığın akma momentinden küçük kalabildiği sürece geçerlidir.

Uzun Kazıklar;

Kohezyonsuz zeminlerdeki tutulu başlı uzun kazıkların göçme biçimi, son zemin direnci ve eğilme moment Şekil 3.8.c'de gösterilmektedir. f derinliğinde ikinci plastik mafsalın oluşması ile uzun kazık durumu ortaya çıkar. Bu durumda son yükü aşağıdaki ifade ile verebilir.

$$Q_u = \frac{2M_u}{e + 0.67f} \quad (3.29)$$

Maksimum momentin oluştuğu derinlik;

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma DK_p}} \quad (3.30)$$

ve maksimum moment;

$$M_{\max} = Q(e + 0.67f) \quad (3.31)$$

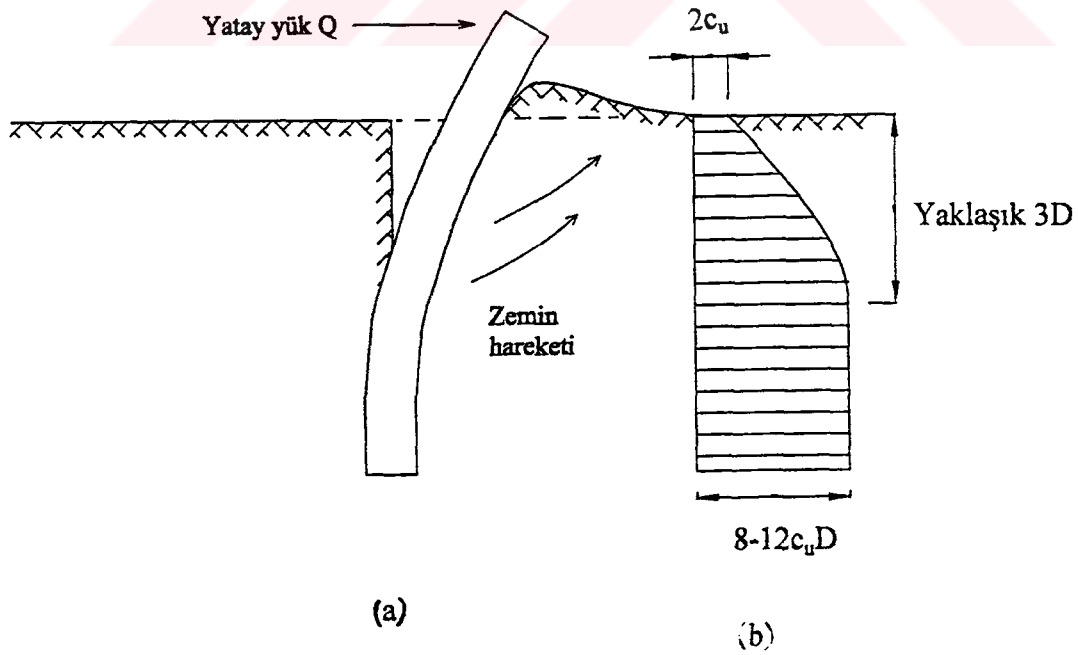
dir.

Broms tarafından kısa kazıkların hesabı için, L/D ve $Q_u/(K_p\gamma D^3)$ boyutsuz katsayılarına, uzun kazıkların hesabı için ise $Q_u/(K_p\gamma D^3)$ ve $M_{\text{akma}}/(D^4\gamma K_p)$ katsayılarına bağlı olarak hazırlanan diyagramlar Şekil 3.9'da sunulmaktadır.

3.3.2 Broms Yöntemi İle Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazık Yanal Direncinin Tahmini

Kohezyonlu zeminlerdeki tek bir kazığın son yatay direnci Broms (1964a), tarafından geliştirilmiş olan yöntemle belirlenebilir. Bu bölümde, bu yöntemin kohezyonlu zeminler için uygulaması anlatılmıştır.

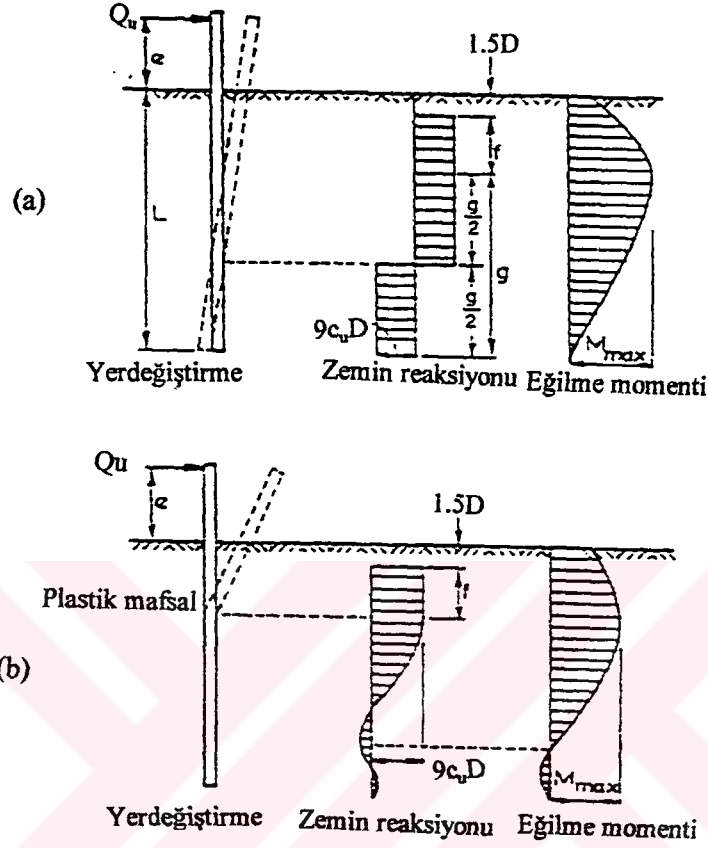
Deneysel ve teorik çalışmalar, kohezyonlu zeminlerde inşa edilen yanal yüklenmiş bir kazığa karşı zemin direncinin, zemin yüzeyinde $2c_u$ değerinde olduğunu ve 3D derinlikte ise 8 ila $12c_u$ değerine ulaştığını göstermiştir, Şekil 3.11. Bu yüzden, Broms (1964 a), kazık çapının 1.5 katı derinlik için zemin direncinin sıfır, bu derinliğin altında sabit bir $9c_u$ değerine eşit varsaymıştır. Broms yatay yüklü kazıkları serbest, tutulu başlı kazıklar ve kısa, uzun kazıklar olarak ayrı ayrı analiz etmiştir.



Şekil 3.11 Kohezyonlu zeminlerde a) yerdeğiştirme b) olası zemin reaksiyonu dağılımı, (Poulos ve Davis, 1980)

3.3.2.1 Serbest Başlıklı Kısa ve Uzun Kazıklar

Kohezyonlu zeminlerdeki serbest başlı, kısa ve uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Kohezyonlu zeminlerde serbest başlı a) kısa b) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri, (Broms, 1964a).

Kısa Kazıklar;

Serbest başlıklı kısa ve uzun kazıklar için olası kırılma modelleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momenti Şekil 3.11.a ve Şekil 3.11.b'de gösterilmektedir. Kısa kazık halinde yanal direnç zeminin direnci ile karşılanır. Maksimum moment oluşan kesitte kesme kuvveti sıfır olduğundan f uzunluğu

$$f = \frac{Q_u}{9c_u D} \quad (3.32)$$

olarak yazılabilir. Burada Q_u kazığın taşıyabileceği son yanal kuvveti, c_u drenajsız üç eksenli basınç deneyi ile bulunan kohezyonu, D kazık çapını göstermektedir. Maksimum momentin oluştuğu noktaya göre moment alınır;

$$M_{max} = 2.2.5D(L - f)^2 c_u = Q_u (e + 1.5D + 0.5f) \quad (3.33)$$

elde edilir. (3.32) ve (3.33) denklemlerinin çözümünden Q_u son yatay taşıma gücü elde edilir. Broms'un, kısa kazığın son yatay taşıma gücünün hesabını kolaylaştırmak amacı ile boyutsuz L/D ve $Q_u/c_u D^2$ oranlarına bağlı olarak hazırladığı grafik Şekil 3.13'de verilmiştir.

Uzun Kazıklar;

Uzun kazıkların yatay kapasitesi kazık kapasitesinin akma momentine bağlıdır. Bu nedenle hesaplarda akma momentini esas almak gerekir, (Şekil 3.11.b). Uzun kazık halinde,

$$M_{\max} = M_{\text{akma}} \quad (3.34)$$

yazılabileceğinden, (3.32) ve (3.33) ifadesinin ikinci kısmı kullanılarak son yanal yük için bir çözüm elde edilir. Buradaki M_{akma} bir kesitin *akma momenti* dir. Bir kesitin her noktasında gerilmenin malzemenin akma gerilmesine (σ_a) erişmesi halinde,

$$M_{\text{akma}} = \sigma_a W \quad (3.35)$$

olarak hesaplanır. Burada W mukavemet momentidir.

Broms'un, uzun kazığın son yatay taşıma gücünün hesabını kolaylaştırmak amacı ile boyutsuz $Q_u/c_u D^2$ ve $M_{\text{akma}}/c_u D^3$ oranlarına bağlı olarak hazırladığı grafik Şekil 3.13'de verilmiştir.

3.3.2.2 Rijit Başlıklı Kısa, Orta ve Uzun Kazıklar

Kohezyonlu zeminlerdeki tutulu başlı, kısa, orta ve uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri Şekil 3.12'de gösterilmektedir.

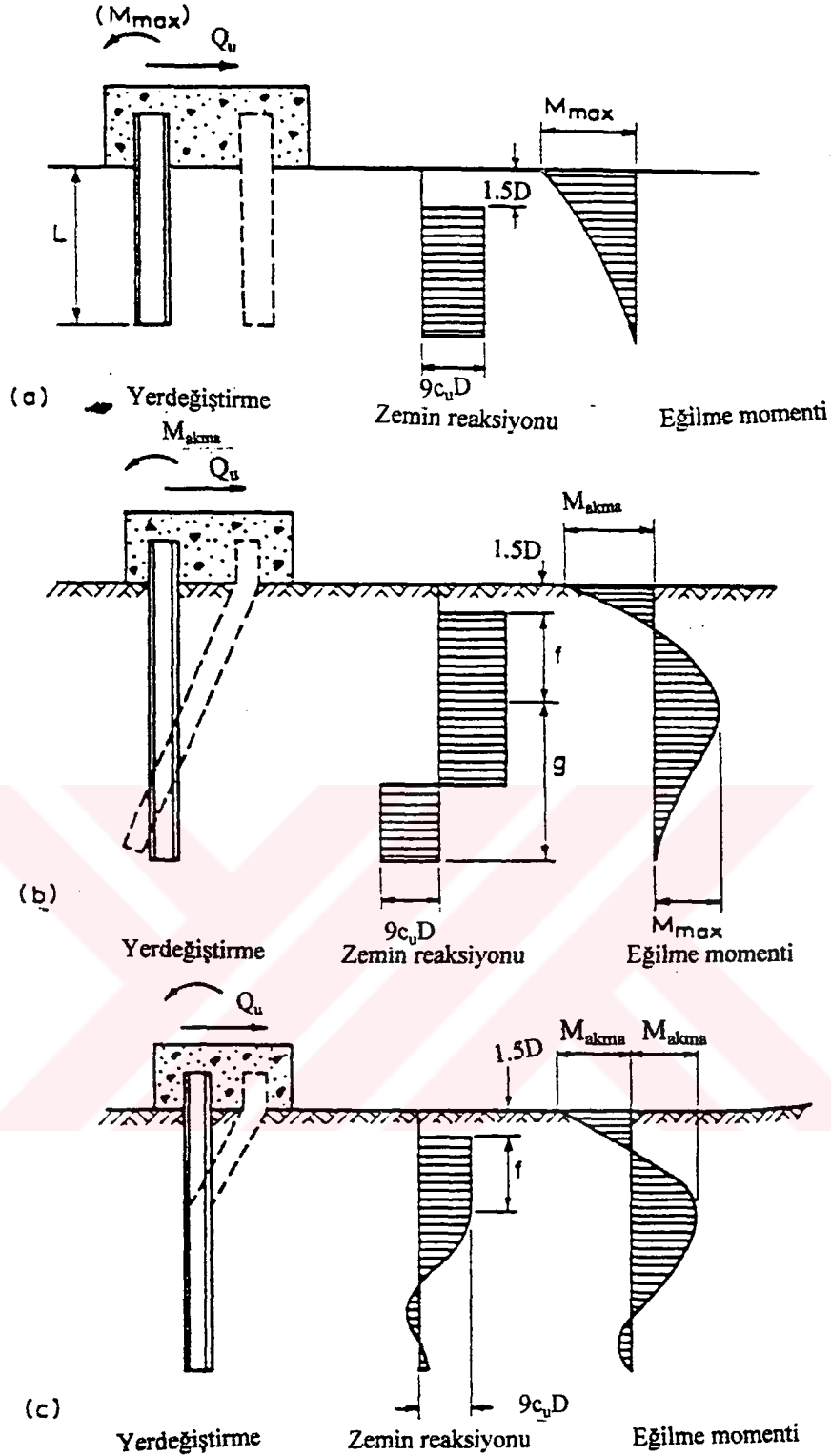
Kısa Kazıklar:

Kısa kazıklarda, yanal kuvvet kazığın ötelenmesine neden olmaktadır (Şekil 3.12.a). Son yanal yük ve maksimum moment şöyle yazılabilir:

$$Q_u = 9c_u D(L - 1.5D) \quad (3.37)$$

$$M_{\max} = Q_u (0,5L + 0,5D) \quad (3.38)$$

Son yük boyutsuz eksenlere göre düzenlenmiş Şekil 3.13'deki diyagramdan da hesaplanabilir.



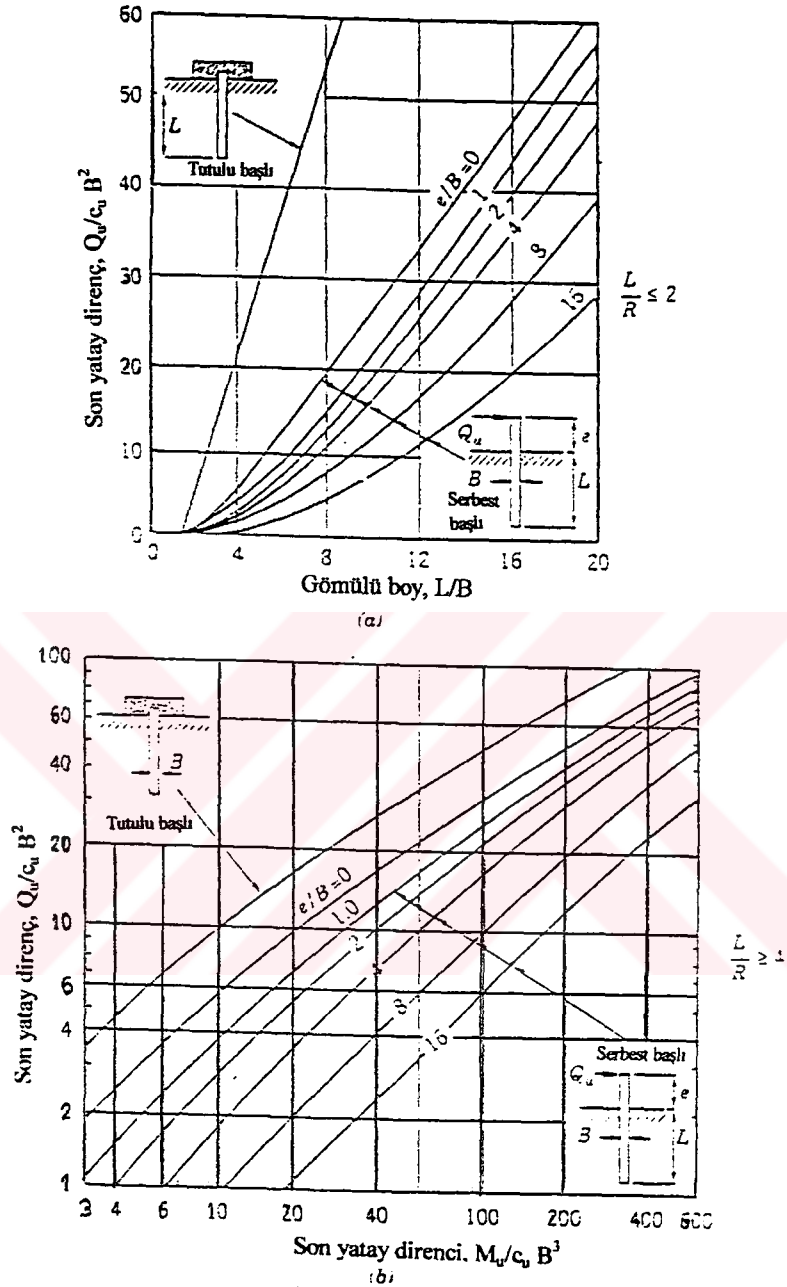
Şekil 3.13 Kohezyonlu zeminlerde tutulu başlı a) kısa b) orta c) uzun kazıkların göçme biçimleri, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri (Broms, 1964 a)

Orta Boy Kazıklar:

Orta boy kazıklar için Şekil 3.12.b'de kırılma biçimi ve (3.32) ifadesi geçerlidir. Zemin düzeyi kazık eksenini üzerinde bir noktaya göre moment alırsak

$$M_{akma} = 9c_u Dg(0.75g + f + 1.5D) - 9c_u D(f + 0.5g)(0.5f + 0.25g + 1.5D) \quad (3.39)$$

bulunur.



Şekil 3.14 Kohezyonlu zeminlerdeki a) kısa kazıkların gömülü kazık boyuna b) uzun kazıkların kazık akma dayanımına bağlı olarak son yatay taşıma gücü (Broms, 1964 a)

Şekil 3.12.b'de görülen orta boy kazık halinin söz konusu olabilmesi için, $1.5D+f$ derinliğinde oluşan maksimum momentin kazığın akma momentinden daha küçük olması gereklidir. Aksi halde Şekil 3.12.c'de gösterilen uzun kazık hali oluşur.

Uzun Kazıklar:

Rijit başlıklı uzun kazık halinde son yük,

$$Q_u = \frac{2M_{akma}}{(1.5D + 0.5f)} \quad (3.40)$$

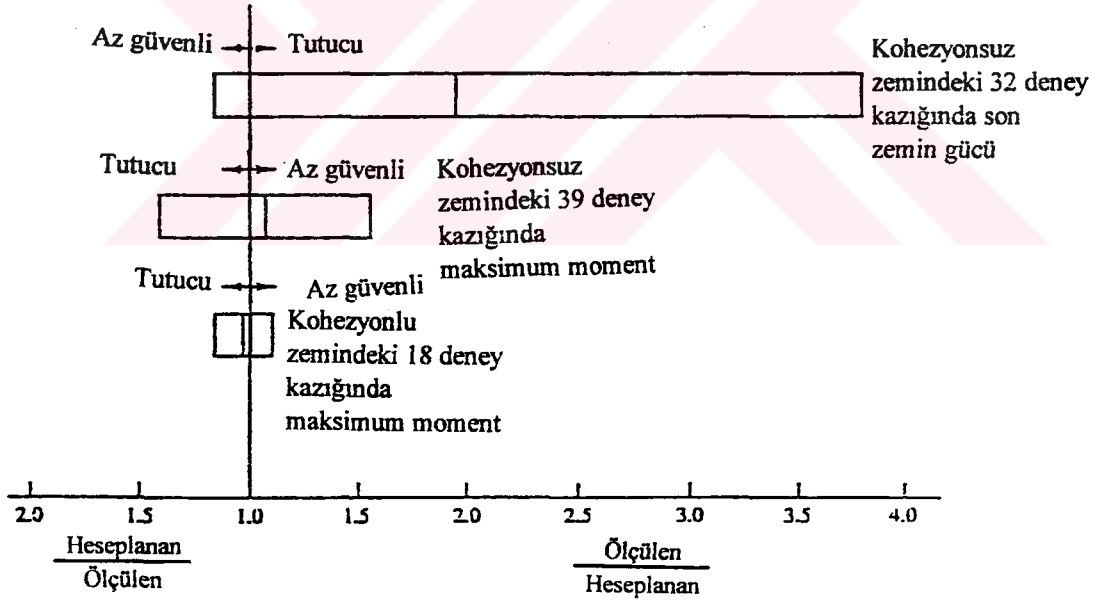
ifadesi ile verilebilir. (3.32) ifadesini kullanarak

$$Q_u^2 + 27c_u D^2 Q_u - 36c_u DM_{akma} = 0 \quad (3.41)$$

bulunur. Son kazık taşıma gücünün hesabını kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiş olan boyutsuz eksnelere göre hazırlanmış diyagram Şekil 3.13'de verilmiştir.

3.3.3 Broms Yönteminin Doğruluğu

Broms yönteminin uzun yıllardan beri kullanılan bir yöntem olması nedeniyle pek çok tasarımda kullanılmış ve sonuçları kontrol edilerek önemli tecrübeler elde edilmiştir. Şekil 3.15'de Broms yöntemi ile hesaplanan son zemin kapasitesi ve maksimum momentin %90 lık bir doğruluk payının olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte model kazıklardan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, hesaplanan moment değerleri gerçeğe çok yakın ancak zemin kapasitesinin genelde tutucu sonuç verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 3.15 Broms yöntemi ile hesaplanan son zemin kapasitesi ve maksimum moment değerlerinin ölçülen değerlerle ilişkisi. Grafikteki orta düşey çizgiler ilgili birime ait ortalama değerleri göstermektedir, (Coduto, 1994).

Kısa kazıklar için, Broms varsayımlarıyla bulunan son yük, Bölüm 3.1 de anlatılan klasik yöntemle bulunan son yük değerinden daha büyüktür. Örneğin; $L/D=4$ ve $e/L=0$ için Broms yöntemiyle bulunan yük basitleştirilmiş yöntemle bulunan yükten %33 daha fazladır (Poulos ve Davis, 1980).

4. YATAY YÜKLÜ DÜŞEY KAZIKLARDA DEPLASMANLARIN TAHMİNİ

4.1 Giriş

Yatay yüklü kazıkların tasarımında iki kriter vardır, bunlardan ilki kazık son yatay taşıma gücü, Bölüm 3’de farklı zemin türleri için son taşıma gücünün hesap yöntemleri ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. İkinci kriter ise uygulanan yükler altında kazığın yaptığı deplasmanların hesaplanmasıdır. Bu bölümde kazıklarda oluşan deplasmanların hesaplanması için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Uygulanan yükler nedeniyle kazık kesitinde oluşan momentlerin hesabı da bu bölümde anlatılmıştır. Ayrıca yatay yük etkisindeki kazıkların yük-deplasman davranışlarının analiz yöntemleri de anlatılmıştır.

Yatay yüklü kazık problemi, elastik zemine oturan kiriş problemine benzer bir şekilde açıklanabilir. Aradaki fark, elastik zemine oturan kirişte dış yükler kiriş boyunca çeşitli noktalardan etkirken, kazık için Q yatay yükü yada M momenti, kazık başında etkimektedir. Bununla beraber, zeminin lineer olmayan özellikleri için, bir hesap yöntemi olan, elastik zemine oturan kiriş teorisi, zemin kazık ilişkisi için yanal yüklü kazıklarda daha gerçekçi çözümler elde etmek amacıyla, genişletilmiştir. Bu da zeminin lineer olmayan yük-deformasyon özellikleri gözönüne alınmasıyla olabilir ve zeminin plastik deformasyonlarının da hesaba katılmasıyla yapılmıştır. Zemin içindeki bir kazığın x derinliğindeki p gerilmesi nedeniyle yaptığı y yerdeğiştirmesini gösteren, p - y eğrilerinden yararlanılmıştır. Kazık davranışını analiz etmek amacıyla kullanılan, yatak katsayısı yaklaşımı ve elastik analiz yöntemleri de ayrıntılı bir şekilde bu bölümde anlatılmıştır. Ayrıca CLM karakteristik yük yöntemine de yer verilmiştir.

Bu bölümde ayrıca Broms tarafından uygulanan yatay yükler altında, kazık zemin yüzeyi seviyesinde oluşan deplasmanların hesaplanması için önerdiği yöntem anlatılacaktır.

4.2 Broms Yöntemi İle Zemin Yüzeyindeki Deplasmanların Tahmini

4.2.1 Kohezyonsuz Zeminlerde, Zemin Yüzeyindeki Kazık Deplasmanının Tahmini

Yatak katsayısı kohezyonsuz zeminlerde derinlikte arttığı için, $k_h = n_h Z/D$ eşitliğinin yazılabileceği Bölüm 3.1 de açıklanmıştır. n_h in farklı relatif sıklık ve farklı suya doygunluk koşulları için aldığı değerler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu durumda boyutsuz derinlik ηL olarak yazılır. η nın değeri

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (4.1)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burdan kazığın zemin seviyesindeki yerdeğiştirmesi Broms tarafından önerilen $y_0(EI)^{3/5}(n_h)^{2/5}/QL$ ile boyutsuz ηL arasındaki ilişkiyle Şekil 4.1'deki grafikten hesaplanabilir.

Uygulanan yatay yükler nedeniyle oluşan deplasman ve dönmeler yine Broms tarafından serbest ve tutulu başlı kazıkların uzun ve kısa olma durumlarını ayrı ayrı gözönünde bulundurarak önerdiği (4.1)–(4.7) eşitliklerinden hesaplanabilir.

Serbest başlı kazıklarda deplasman ve dönmeler aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir.

$$\text{Kısa kazık } (\eta L > 2.0) \text{ ise } y_0 = \frac{18Q(1 + \frac{4}{3}e/L)}{L^2 n_h} \quad (4.2)$$

$$\theta = \frac{24Q(1 + 1.5e/L)}{L^3 n_h} \quad (4.3)$$

$$\text{Uzun kazık } (\eta L > 4.0) \text{ ise } y_0 = \frac{2.4Q}{n_h^{3/5}(EI)^{2/5}} + \frac{1.6Qe}{n_h^{2/5}(EI)^{3/5}} \quad (4.4)$$

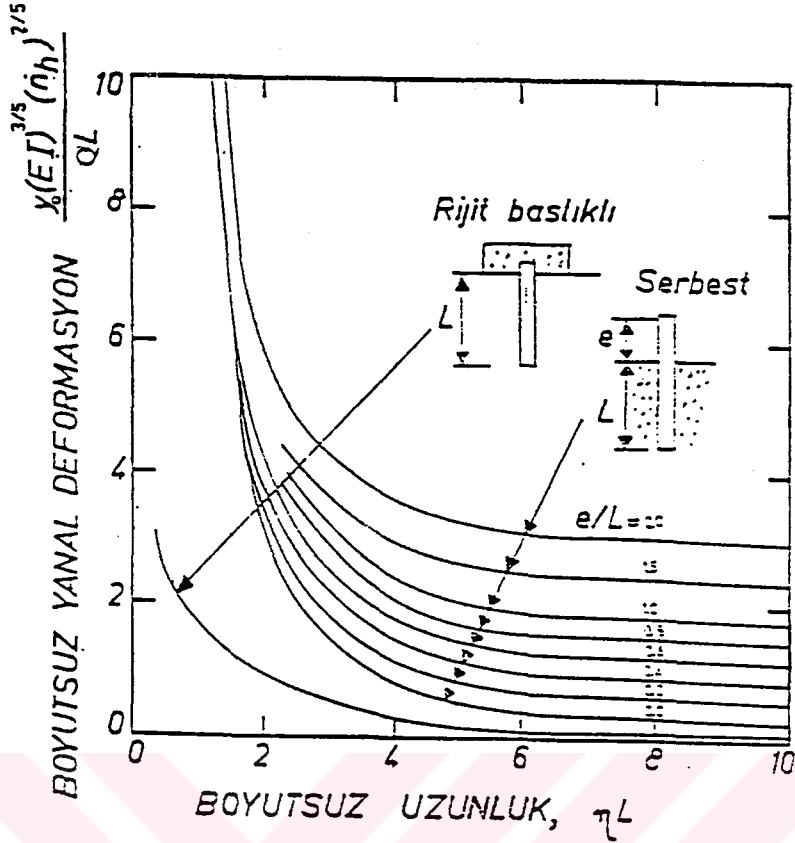
$$\theta = \frac{1.6Q}{n_h^{2/5}(EI)^{3/5}} + \frac{1.74Qe}{n_h^{1/5}(EI)^{4/5}} \quad (4.5)$$

Tutulu başlı kazıklarda deplasmanlar aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir.

$$\text{Kısa kazık } (\eta L > 2.0) \text{ ise } y_0 = \frac{2Q}{L^2 n_h} \quad (4.6)$$

$$\text{Uzun kazık } (\eta L > 4.0) \text{ ise } y_0 = \frac{0.93Q}{n_h^{3/5}(EI)^{2/5}} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde E, kazık elastisite modülü, I, kazık kesitinin atalet momentidir.



Şekil 4.1 Kohezyonsuz zeminlerde kazık yanal yerdeğiştirmesi (Broms, 1964b)

4.2.2 Kohezyonlu Zeminlerde, Zemin Yüzeyindeki Kazık Deplasmanlarının Tahmini

Broms (1964 a) zemin davranışının yatak katsayısı ile iyi bir şekilde temsil edildiği varsayılmaktadır. Yerdeğiştirmeler, eğilme momentleri ve zemin reaksiyonu boyutsuz bir βL uzunluğuna bağlıdır,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4EI}} \quad (4.8)$$

burada L kazık boyu, k_h yatak katsayısı, D kazığın çapı, E ve I kazığın elastisite modülü ve atalet momentidir. Buradan kazığın zemin seviyesindeki yerdeğiştirmesi Broms tarafından önerilen $y_0 k_h D L / Q$ ile boyutsuz βL arasındaki ilişkiyle Şekil 4.2'deki grafikten hesaplanabilir.

Uygulanan yatay yükler nedeniyle oluşan deplasman ve dönmeler yine Broms tarafından serbest ve tutulu başlı kazıkların uzun ve kısa olma durumlarını ayrı ayrı gözönüne alarak önerdiği (4.9) – (4.14) eşitliklerinden hesaplanabilir.

Serbest başlı kazıklarda deplasman ve dönmeler aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir.

$$\text{Kısa kazık } (\beta L < 1.5) \text{ ise } y_0 = \frac{4Q(1+1.5e/L)}{k_h DL} \quad (4.9)$$

$$\theta = \frac{6Q(1+2e/L)}{k_h DL^2} \quad (4.10)$$

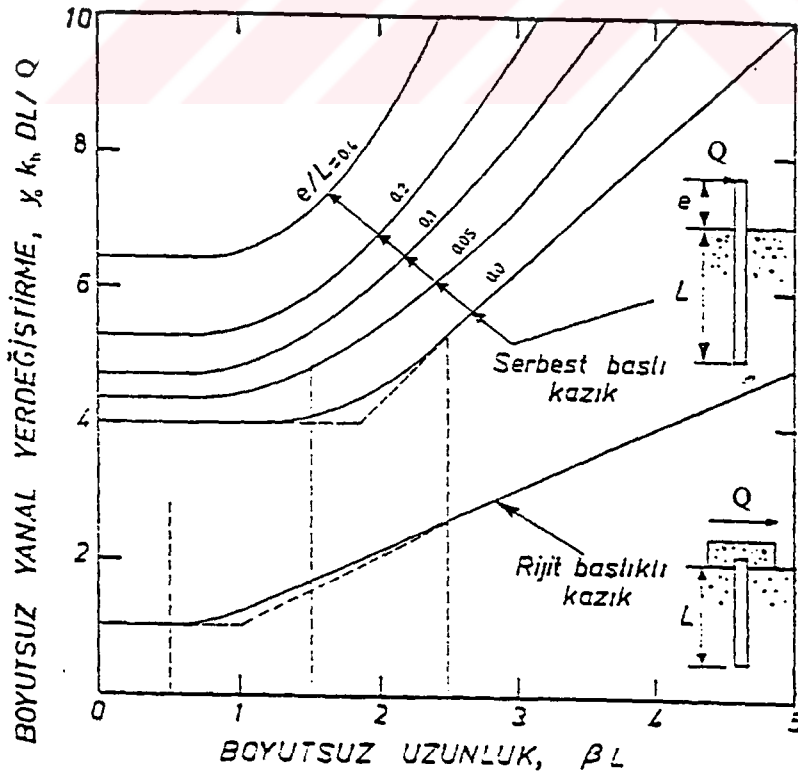
$$\text{Uzun kazık } (\beta L > 2.5) \text{ ise } y_0 = \frac{2Q\beta(E\beta+1)}{k_h D} \quad (4.11)$$

$$\theta = \frac{2Q\beta^2(2E\beta+1)}{k_h D} \quad (4.12)$$

Tutulu başlı kazıklarda deplasmanlar aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir.

$$\text{Kısa kazık } (\beta L < 0.5) \text{ ise } y_0 = \frac{Q}{k_h DL} \quad (4.13)$$

$$\text{Uzun kazık } (\beta L > 1.5) \text{ ise } y_0 = \frac{Q\beta}{k_h D} \quad (4.14)$$



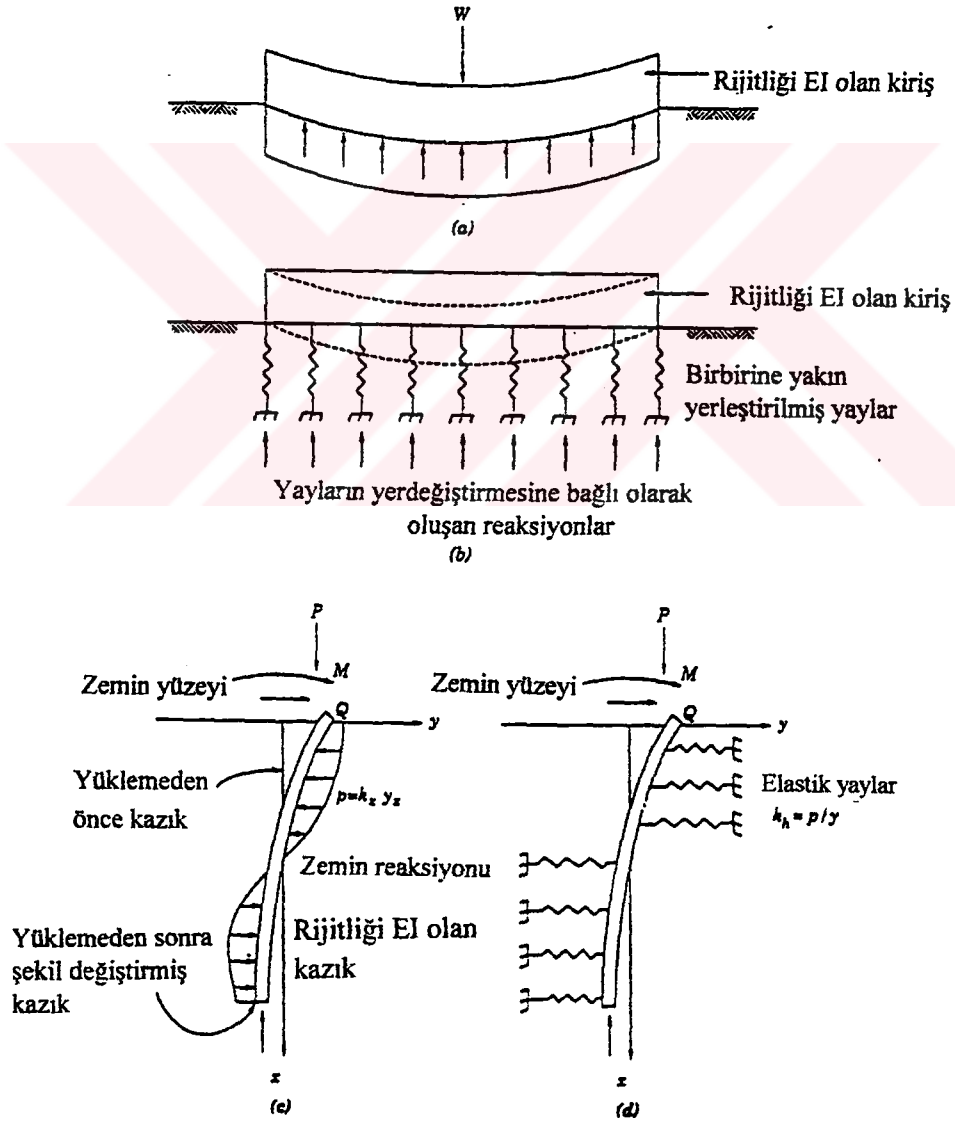
Şekil 4.2 Kohezyonlu zeminlerde kazık yanal yerdeğiştirmesi (Broms, 1964a)

Kısa kazıklarda kazık boyunun artması, zemin yüzü seviyesindeki kazık yerdeğiştirmesini büyük ölçüde azaltır. Buna karşılık kazığın rijitliğinin etkisi yoktur. Rijit başlıklı kısa kazıkların zemin seviyesindeki yanal yerdeğiştirmeleri, serbest başlıklı kazıklarınkinin teorik olarak dörtte biri kadar veya daha azdır (Toğrol, 1970).

Uzun kazıklarda, βL değerinin serbest başlıklı kazıklarda iki ve rijit başlıklı kazıklarda bir den büyük değerleri için, kazığın veya zeminin özelliklerinin y_0 ın hesaplanmasında önemi yoktur.

4.3 Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Yatak katsayısı yaklaşımında yatay yüklü kazık elastik zemine oturan kiriş gibi düşünülür,



Şekil 4.3 Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı a) elastik zemine oturan kiriş b) Winkler idealizasyonu c) zeminde yatay yüklü kazık d) yatay yüklü kazık yaylı ortam, (Prakash ve Sharma, 1989).

(Şekil 4.3.c). Kiriş Winkler zemin modelinde olduğu gibi elastik zemin ortamı ile desteklenmez ve sonsuz sayıda yerleştirilen bağımsız yaylarla modellenmektedir.

Bu yayların sıklıkları k_h Broms yöntemi bölümünde anlatılan yatak katsayısı $k_h = p/y$ olarak tanımlanmaktadır.

4.3.1 Kohezyonsuz Zeminler İçin Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Serbest Başlı Kazık

Şekil 4.4'de Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisindeki serbest başlı bir kazıkta kazık deplasmanı y , deplasmanların kazık boyunca değişimi $S = dy/dx$, moment M , kesme kuvveti V ve zemin reaksiyonunun kazık boyunca değişimi gösterilmektedir. Kazık davranışı,

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (4.15)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Bu eşitliğin çözümü

$$y = f(x, T, L, k_h, EI, Q_g, M_g) \quad (4.16)$$

şeklinde olacaktır. Burada,

x = zemin yüzeyinden derinlik

T = relatif sıklık faktörü

L = kazık boyu

$k_h = n_h x$ yatay yatak katsayısı modülü

n_h = yatak katsayısı sabiti

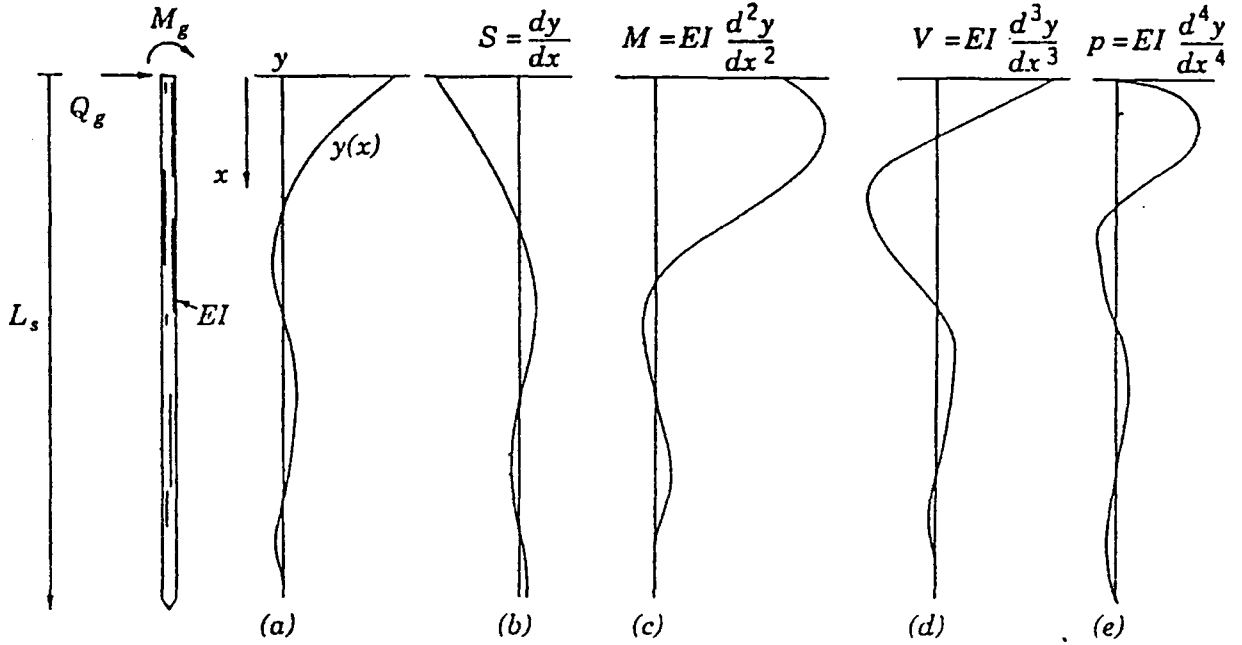
B = kazık çapı veya genişliği

EI = kazık rijitliği

Q_g = kazık başına uygulanan yatay yük

M_g = kazık başına uygulanan momentdir.

Elastik davranışın, kazık boyutlarına göre küçük deplasmanlar için geçerli olduğu varsayılmaktadır ve süperpozisyon ilkesi geçerlidir. Daha büyük deformasyonlar için iler ki bölümlerde anlatılan p-y yöntemi kullanılarak analiz yapılabilir.



Şekil 4.4 Tamamen gömülü bir kazıkta Q_g yatay yükü ve M_g momentinin etkisinde a) deplasman, b) eğim, dy/dx , c) moment, $EI(d^2y/dx^2)$, d) kesme kuvveti, $EI(d^3y/dx^3)$, e) zemin reaksiyonu, $EI(d^4y/dx^4)$ (Reese ve Matlock, 1956)

Q_g yatay kuvvetinden dolayı x derinliğinde oluşan yerdeğiştirme y_A , ve M_g momentinden dolayı aynı derinlikte oluşan yerdeğiştirmeyi y_B ayrı ayrı hesaplanıp süperpoze edildiğinde x derinliğinde oluşan toplam yerdeğiştirme;

$$y = y_A + y_B \quad (4.17)$$

dir. Burada

$$\frac{y_A}{Q_g} = f_1(x, T, L, k_h, EI) \quad (4.18)$$

ve

$$\frac{y_B}{M_g} = f_2(x, T, L, k_h, EI) \quad (4.19)$$

dir. f_1 ve f_2 aynı terimlerin farklı iki fonksiyonunu göstermektedir. Her durum altı terim ve iki boyut (kuvvet ve uzunluk) içermektedir. Sonuçta boyutsuz büyüklükler aşağıdaki ifadelerle açıklanmıştır.

$$\frac{y_A EI}{Q_g T^3}, \frac{x}{L}, \frac{k_h T^4}{EI} \quad (4.20)$$

$$\frac{y_B EI}{M_g T^2}, \frac{x}{L}, \frac{L}{T}, \frac{k_h T^4}{EI} \quad (4.21)$$

Uygun benzerlik durumları için her bir gruptaki benzer modeller eşitlendiğinde, aşağıdaki boyutsuz terimler elde edilir;

$$\text{Derinlik katsayısı; } Z = \frac{X}{T} \quad (4.22)$$

$$\text{Maksimum derinlik katsayısı; } Z_{\max} = \frac{X}{T} \quad (4.23)$$

$$\text{Zemin modülü fonksiyonu; } \phi_{(x)} = \frac{k_h T^4}{EI} \quad (4.24)$$

$$\text{Yatay yük için yerdeğiştirme katsayısı; } A_y = \frac{y_A EI}{Q_g T^3} \quad (4.25)$$

$$\text{Moment için yerdeğiştirme katsayısı; } B_y = \frac{y_B EI}{M_g T^2} \quad (4.26)$$

Sonuç olarak boyutsuz analiz yöntemi ile yatay yüklü bir kazığın y yerdeğiştirmesi, θ dönmesi, M momenti, V kesme kuvveti ve p zemin reaksiyonu için aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir.

$$y = y_A + y_B = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI} \quad (4.27)$$

$$\theta = \theta_A + \theta_B = A_\theta \frac{Q_g T^2}{EI} + B_\theta \frac{M_g T}{EI} \quad (4.28)$$

$$M = M_A + M_B = A_M Q_g T + B_M \frac{M_g}{T} \quad (4.29)$$

$$S = S_A + S_B = A_s \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \frac{M_g T}{EI} \quad (4.30)$$

$$V = V_A + V_B = A_V Q_g + B_V \frac{M_g}{T} \quad (4.31)$$

$$P = P_A + P_B = A_P \frac{Q_g}{T} + B_P \frac{M_g}{T^2} \quad (4.32)$$

Matlock ve Reese'in bu boyutsuz analiz sonucu, A ve B katsayıları için elde ettiği çözümler Şekil 4.5'de diyagram, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de çizelge halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{\max} \geq 5$) elastik çözümü için A katsayıları, (Matlock ve Reese, 1961, 1962).

Z	A _y	A _s	A _m	A _v	A _p
0,0	2,435	- 1,623	0,000	1,000	0,000
0,1	2,273	- 1,618	0,100	0,989	- 0,227
0,2	2,112	- 1,603	0,198	0,956	- 0,422
0,3	1,952	- 1,578	0,291	0,906	- 0,586
0,4	1,796	- 1,545	0,379	0,840	- 0,718
0,5	1,644	- 1,503	0,459	0,764	- 0,822
0,6	1,496	- 1,454	0,532	0,677	- 0,897
0,7	1,353	- 1,397	0,595	0,585	- 0,947
0,8	1,216	- 1,335	0,649	0,489	- 0,973
0,9	1,086	- 1,268	0,693	0,392	- 0,977
1,0	0,962	- 1,197	0,727	0,295	- 0,962
1,2	0,738	- 1,047	0,767	0,109	- 0,885
1,4	0,544	- 0,893	0,772	- 0,056	- 0,761
1,6	0,381	- 0,741	0,746	- 0,193	- 0,609
1,8	0,247	- 0,596	0,696	- 0,298	- 0,445
2,0	0,142	- 0,464	0,628	- 0,371	- 0,283
3,0	- 0,075	- 0,040	0,225	- 0,349	0,226
4,0	- 0,050	0,052	0,000	- 0,106	0,201
5,0	- 0,009	0,025	- 0,033	0,103	0,046

$Z_{\max} = 2$ için kazık deformasyonlarının rijit kazıklarinkine benzer şekilde olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle $Z_{\max} \leq 2$ için kazık, kısa kazık davranışı gösterir. Ayrıca $Z_{\max} = 5$ ve 10 için deplasman katsayıları aynıdır. Bu yüzden $Z_{\max} > 5$ ise deplasman değişmemektedir.

Çizelge 4.2 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{\max} \geq 5$) elastik çözümü için B katsayıları, (Matlock ve Reese, 1961, 1962).

Z	B_y	B_s	B_m	B_v	B_p
0,0	1,623	- 1,750	1,000	-	0,000
0,1	1,453	- 1,650	1,000	- 0,007	- 0,145
0,2	1,293	- 1,550	0,999	- 0,028	- 0,259
0,3	1,143	- 1,450	0,994	- 0,058	- 0,343
0,4	1,003	- 1,351	0,987	- 0,095	- 0,401
0,5	0,873	- 1,253	0,976	- 0,137	- 0,436
0,6	0,752	- 1,156	0,960	- 0,181	- 0,451
0,7	0,642	- 1,061	0,939	- 0,226	- 0,449
0,8	0,540	- 0,968	0,914	- 0,270	- 0,432
0,9	0,448	- 0,878	0,885	- 0,312	- 0,403
1,0	0,364	- 0,792	0,852	- 0,350	- 0,364
1,2	0,223	- 0,629	0,775	- 0,414	- 0,268
1,4	0,112	- 0,482	0,688	- 0,456	- 0,157
1,6	0,029	- 0,354	0,594	- 0,477	- 0,047
1,8	- 0,030	- 0,245	0,498	- 0,476	0,054
2,0	- 0,070	- 0,155	0,404	- 0,456	0,140
3,0	- 0,089	0,057	0,059	- 0,213	0,268
4,0	- 0,028	0,049	-0,042	0,017	0,112
5,0	-	0,011	- 0,026	0,029	- 0,002

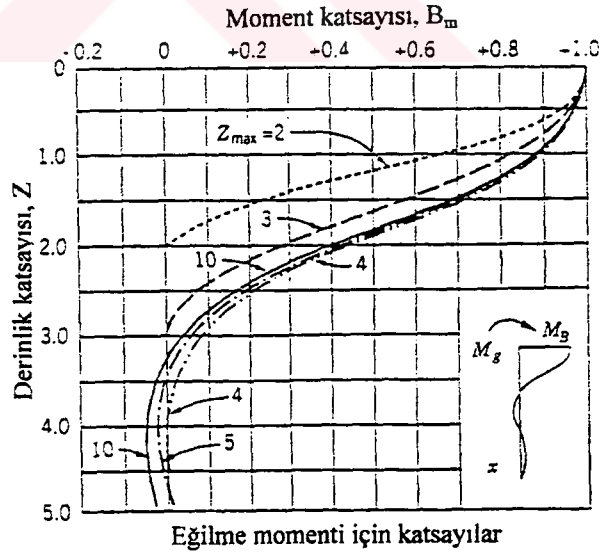
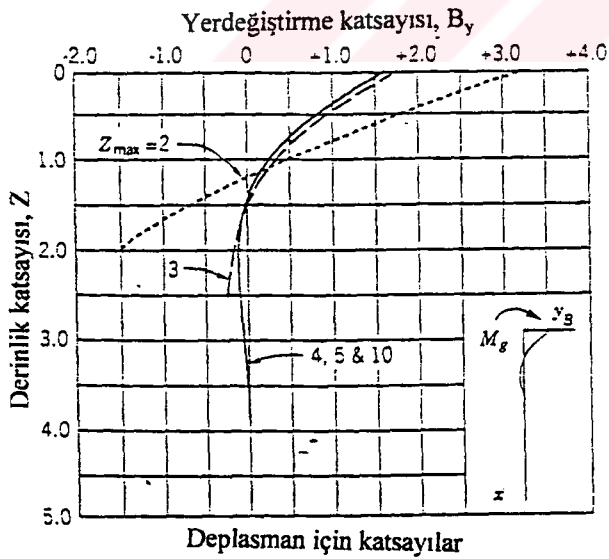
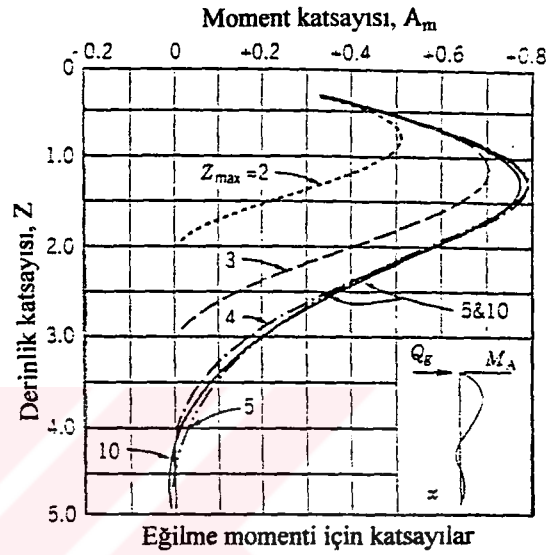
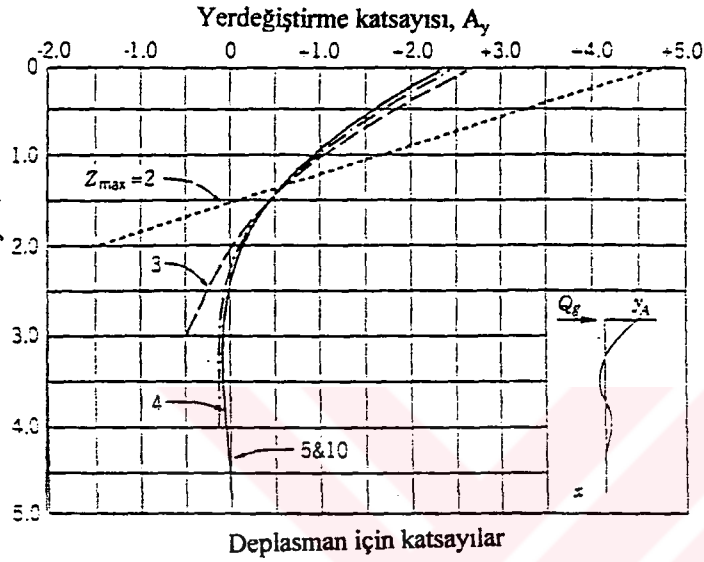
Tutulu Başlı Kazık

Tutulu başlı kazık için, zemin yüzeyindeki eğim S sıfırdır. Bu yüzden 4.30 eşitliği şu şekilde yazılabilir,

$$S = S_A + S_B = A_s \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \frac{M_g T}{EI} = 0 \quad (4.33)$$

buradan,

$x = 0$ zemin yüzeyinde $\frac{M_g T}{Q_g T} = -\frac{A_s}{B_s}$



Şekil 4.5 Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için A_y , B_y , A_m ve B_m katsayıları, (Reese v eMatlock, 1956).

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 den $Z = x/T = 0$ için.

$$\frac{A_s}{B_s} = \frac{-1.623}{1.75} = -0.93$$

Bu yüzden, $M_g/Q_gT = -0.93$. M_g/Q_gT terimi Praksh (1962) tarafından boyutsuz tutululuk faktörü olarak tanımlanmıştır. Tutulu başlı kazık için deplasman ve moment eşitlikleri yeniden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$y = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI}$$

yukarıdaki eşitlikde $M_g = -0.93Q_gT$ konulursa,

$$y = (A_y - 0.93B_y) \frac{Q_g T^3}{EI} \quad (4.34)$$

veya

$$y = C_y \frac{Q_g T^3}{EI} \quad (4.35)$$

benzer bir şekilde,

$$M = C_m Q_g T \quad (4.36)$$

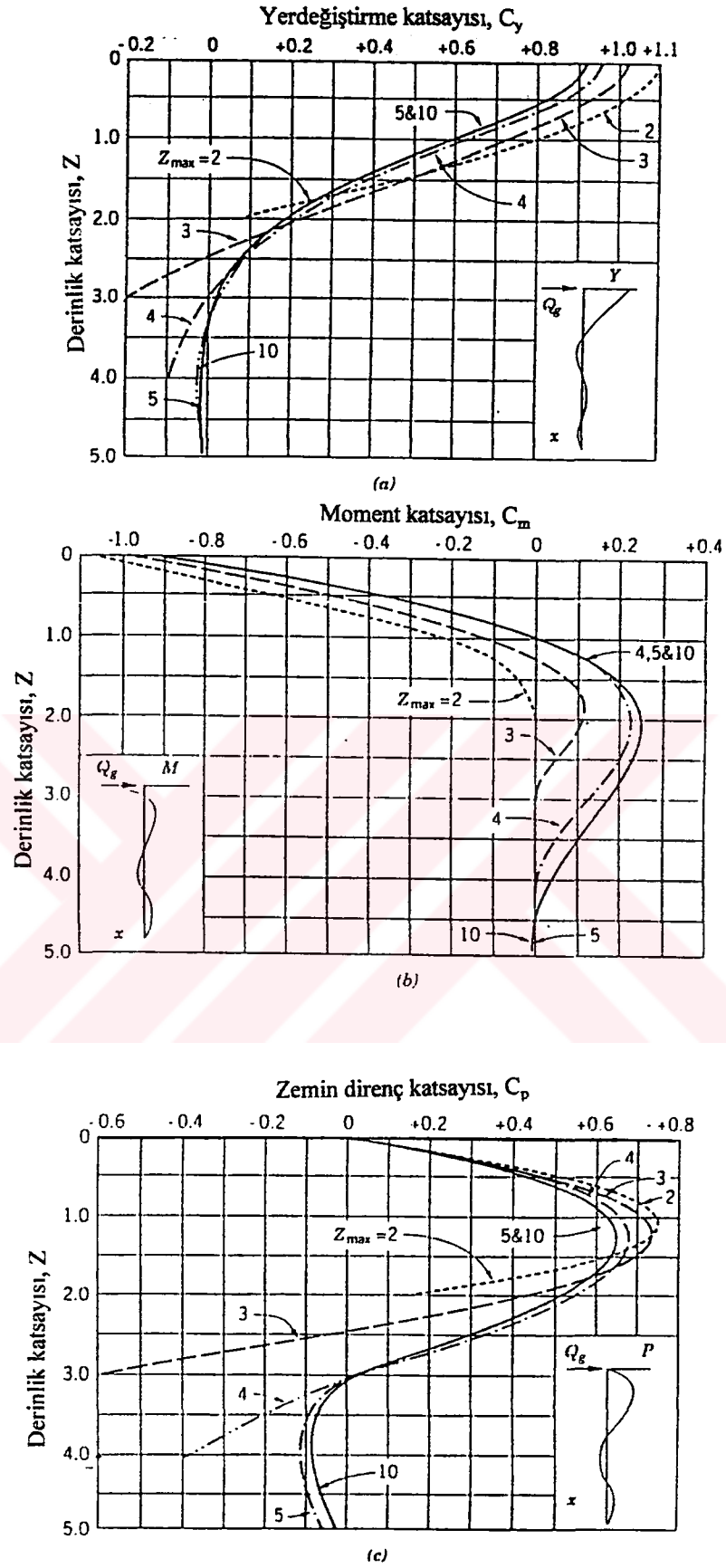
elde edilir. C_y ve C_m değerleri Şekil 4.6'dan alınabilir.

Kısmen Tutulu Başlı Kazıklar

Bazı durumlarda kazıklar kazık başında ve kazık başlığının birleşim yerlerinde bir miktar dönme kuvveti etkisinde kalmaktadırlar. Bu durumda yukarıdaki eşitliklerin kullanılabilmesi için gerekli olan C katsayısı şu şekilde düzenlenebilir.

$$C_y = (A_y - 0.93\lambda B_y) \quad (4.37)$$

$$C_m = (A_m - 0.93\lambda B_m) \quad (4.38)$$



Şekil 4.6 Kohezyonsuz zeminlerde tutulu başlı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için a) yerdeğiştirme C_y b) moment C_m c) zemin reaksiyonu katsayıları, (Reese ve Matlock, 1956).

buradaki λ tutululuk yüzdesidir. %100 tutululuk durumu için $\lambda = 1$, tamamen serbest başlı kazık için $\lambda = 0$ dir. %25 tutululuk durumu için $\lambda = 0.25$ ve %50 tutululuk durumu için $\lambda = 0.50$ dir.

4.3.2 Diferansiyel Eşitlikler

Yanal yüklü kazık için uygulanan elastik zemine oturan kiriş denklemi;

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad (4.39)$$

dir. Burada;

$$p = -k_h y \quad (4.40)$$

dir. Yatay yüklü kazıklar için 4.23 denklemi,

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h}{EI} y = 0 \quad (4.41)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Q_g yatay yükü ve M_g momentinin etkisi ayrı ayrı gözönüne alınarak, yatay yük için bu ifade;

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y_A = 0 \quad (4.42)$$

dir. Aynı ifade moment etkimesi durumunda;

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y_B = 0 \quad (4.43)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Yatay yük ve moment için yazılan bu eşitlikler boyutsuz büyüklükler cinsinden;

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \phi_{(z)} A_Y = 0 \quad (4.44)$$

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \phi_{(z)} B_Y = 0 \quad (4.45)$$

olarak ifade edilmiştir.

Kohezyonsuz zeminler

Kohezyonsuz zeminler için zemin modülünün derinlikle lineer arttığı varsayılmaktadır. Yani $k_h = n_h x$ ve $\phi(x)$, $Z = x/T$ 'e eşitlenebilir. Buradan (4.24) eşitliği

$$\frac{n_h x T^4}{EI} = \frac{x}{T} \quad (4.46)$$

formuna dönüşecektir. Buradan,

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (4.47)$$

elde edilecektir. (4.28) ve (4.29) eşitlikleri Reese ve Matlock (1956) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenerek yukarıda grafik ve Çizelge halinde sunulan $Z = X/T$ ye karşılık A_y , A_s , A_M , A_v , A_p , B_y , B_s , B_M , B_v ve B_p değerleri elde edilmiştir.

Kohezyonlu zeminler

Kohezyonlu zeminler için (4.24) eşitliğinde $k_h = k$ ve $\phi(x) = 1$, T yerine de R yazılıp ve $Z = x/R$ 'ye eşitlenebilir. Buradan (4.24) eşitliği

$$\frac{kR^4}{EI} = 1 \quad (4.48)$$

formuna dönüşecektir. Buradan,

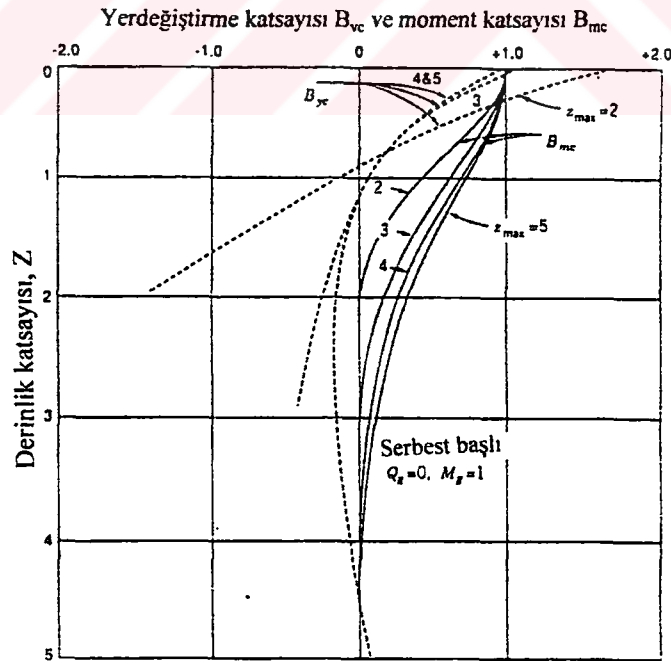
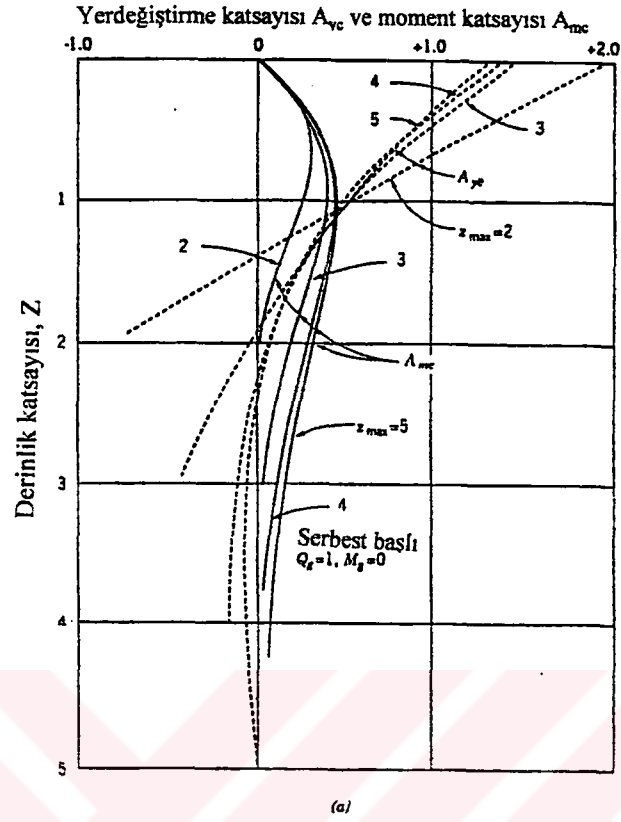
$$R = \left(\frac{EI}{k} \right)^{1/4} \quad (4.49)$$

$$Z = \frac{x}{R} \quad (4.50)$$

elde edilecektir. (4.28) ve (4.29) eşitlikleri Reese ve Matlock (1956) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenerek Bölüm 4.3.3'de $Z = X/R$ ye karşılık A_{yc} , A_{mc} , B_{vc} ve B_{mc} değerleri elde edilmiştir.

4.3.3 Kohezyonlu Zeminler İçin Yatay Katsayısı Yaklaşımı

Normal konsolide killerde yatak katsayısı derinlikle lineer olarak artmaktadır. Bu yüzden bu tür killerde Bölüm 4.3.1'de anlatılan yöntem uygulanabilir. Aşırı konsolide killerde ise yatak katsayısı derinlikle değişmemektedir. Bu tür killer için yerdeğiştirme katsayıları,



Şekil 4.7 Serbest başlıklı, zemin modülünün derinlikle değişmediği zeminler için a) kazığa yatay kuvvet ve sıfır moment etkimesi durumu b) kazığa sıfır yatay yük ve moment etkimesi durumunda yerdeğiştirme ve moment katsayıları, (Davisson ve Gill, 1963)

$$A_{yc} = \frac{y_A EI}{Q_g R^3} \quad (4.51)$$

$$B_{yc} = \frac{y_b EI}{M_g R^2} \quad (4.52)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A_{yc} ve B_{yc} , uygulanan yatay yük Q_g ve moment için M_g yerdeğiştirme katsayılarıdır. (4.27) eşitliği herhangi bir derinlikteki y yerdeğiştirmesi için

$$y = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad (4.53)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer şekilde herhangi bir derinlikteki M moment,

$$M = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad (4.54)$$

olacaktır. A ve B katsayıları Davisson ve Gill (1963) tarafından Bölüm 4.3.1'de kohezyonsuz zeminler için çözümde anlatıldığı şekilde $Z = x/R$ 'ye bağlı olarak çözülmüştür. A_{yc} , A_{mc} , B_{yc} ve B_{mc} , katsayıları boyutsuz z ye bağlı olarak Şekil 4.7'deki grafikten alınabilir. Şekil 4.7 deki katsayılar uzun ve kısa kazıklar için kullanılabilir. $z_{max} (=L/R) \leq 2$ ise kazık kısa kazık gibi davranır. $z_{max} (=L/R) \geq 4$ ise kazık uzun kazık gibi davranır.

4.4 Elastik Ortam Yaklaşımı

Yatay yük etkisindeki kazıklarda yerdeğiştirme ve momentin yatak katsayısı yaklaşımı ile belirlenmesi, zemin sürekliliğinin gözönüne alınmaması nedeniyle konunun gerçek analizi açısından yetersiz kalmaktadır. Yatay yüklü kazık davranışı, Poulos (1971 a ve b) tarafından zeminin elastik ortam olarak incelenmiştir. Kazık etrafındaki zeminin elastik ortam olarak varsayılması teorik olarak daha gerçekçi bir yöntemdir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın güvenle kullanılabilmesi için daha fazla arazi doğrulamalarına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca zemin modülünün E_s doğru şekilde belirlenme güçlüğü vardır. Elastik ortam yaklaşımında, kazık etrafındaki zemin ise sürekli ortam olarak varsayılmaktadır.

Yatay yüklü kazık davranışının, elastik ortam yaklaşımı ile çözümü aşağıdaki varsayımlar ile yapılmaktadır.

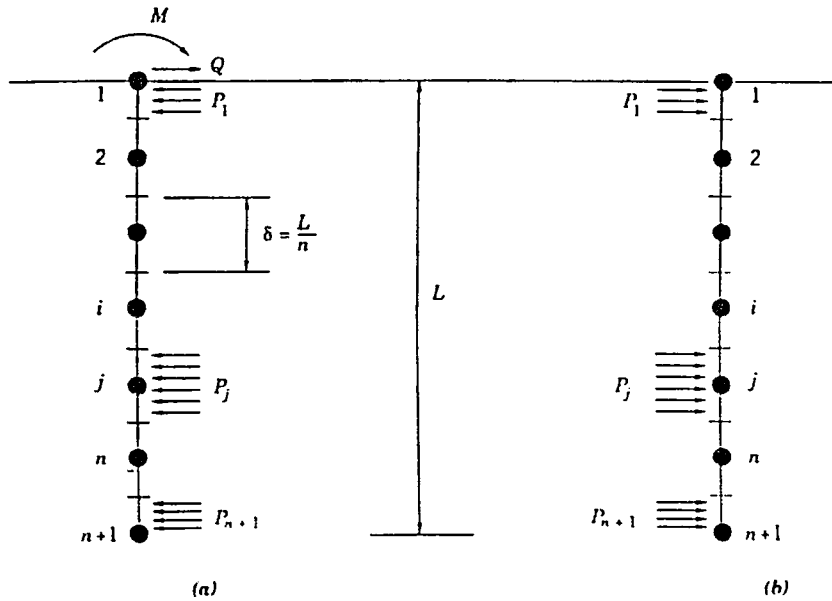
1. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi kazık B genişliğinde, L uzunluğunda ve EI sabit rijitliğinde ince, uzun ve düşey dikdörtgen olarak varsaymaktadır (Dairesel kazıklarda B genişliği

kazık çapı olarak alınmalıdır). Kazık, kazık başı ve dibi hariç $(n+1)$ sayıda eşit uzunluktaki parçaya ayrılmaktadır. Bu uzunluk $(\delta/2)$ dir.

2. Analizi kolaylaştırmak için, zemin ile kazık çevresinde oluşabilecek yatay kesme gerilmeleri ihmal edilmiştir.
3. Her elemana üniform yatay P yükünün etki ettiği varsayılmaktadır.
4. Zemin ideal, homojen, izotropik, yarı sonsuz elastik malzeme, Young modülü E_s , Poisson oranı ν_s olan ve kazık özelliklerinden etkilenmediği varsayılmaktadır.
5. Kazığın arka yüzeyine yakın yerdeki zeminin kazığa yapıştığı varsayılmaktadır.

Tam elastik koşullardaki zeminlerde, kazık boyunca kazık ve zemin yerdeğiştirmeleri eşittir. Poulos birim elemanların merkezinde kazık ve zemin yerdeğiştirmelerini eşitlemektedir. Uç ve üstteki iki eleman için yerdeğiştirmeler hesaplanmaktadır. Her üniform aralıklı noktada kazık boyunca kazık ve zemin yerdeğiştirmeleri uygun denge koşulları kullanılarak eşitlenmektedir. Buradan her elemanın yatay yerdeğiştirmesi elde edilmektedir.

Bu yaklaşımda, zemin yerdeğiştirmesi yarı sonsuz ortamda yatay yükler için Mindlin eşitliklerinden ve kazık yerdeğiştirmeleri elastik zemine oturan kiriş yaklaşımından elde edilmektedir. Yatay yerdeğiştirmeler ve maksimum moment için çözümlerde zemin modülünün E_s derinlikle lineer olarak arttığı varsayılmaktadır. Zemin modülü;



Şekil 4.8 Gerilme etkisi a) kazığa b) kazıktan, kazık çevresindeki zemine, (Poulos, 1971a).

$$E_s = N_h x \quad (4.55)$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Burada, N_h , n_h benzeri, yatak katsayısı yaklaşımındaki benzeri bir katsayıdır. Eğer E_s ve k_h m derinlikle aynı oranda arttığı varsayılır ise $N_h = n_h$ dir.

4.4.1 Kohezyonsuz Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı

Serbest Başlı Kazık

Poulos ve Davis (1980) e göre serbest başlı kazıkta yerdeğiştirme;

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L^2} \left(I'_{\rho H} + \frac{e}{L} I'_{\rho M} \right) \frac{1}{F'_{\rho}} \quad (4.56)$$

eşitliğinden hesaplanır. Buradaki, $I'_{\rho H}$, $I'_{\rho M}$ ve F'_{ρ} katsayıları Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11 deki grafiklerde K_N e bağlı olarak verilmektedir. F'_{ρ} nin belirlenmesi için gerekli olan Q_u Broms yöntemi ile elde edilecektir. Maksimum moment ise Şekil 4.12'den elde edilecektir. L ise kazık boyunu göstermektedir. Buradaki K_N kazık rijitlik faktörü olup,

$$K_N = \frac{E_p I_p}{N_h L^5} \quad (4.57)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada,

E_p = kazık elastise modülü

I_p = kazık kesitinin atalet momenti

N_h = yatak katsayısı

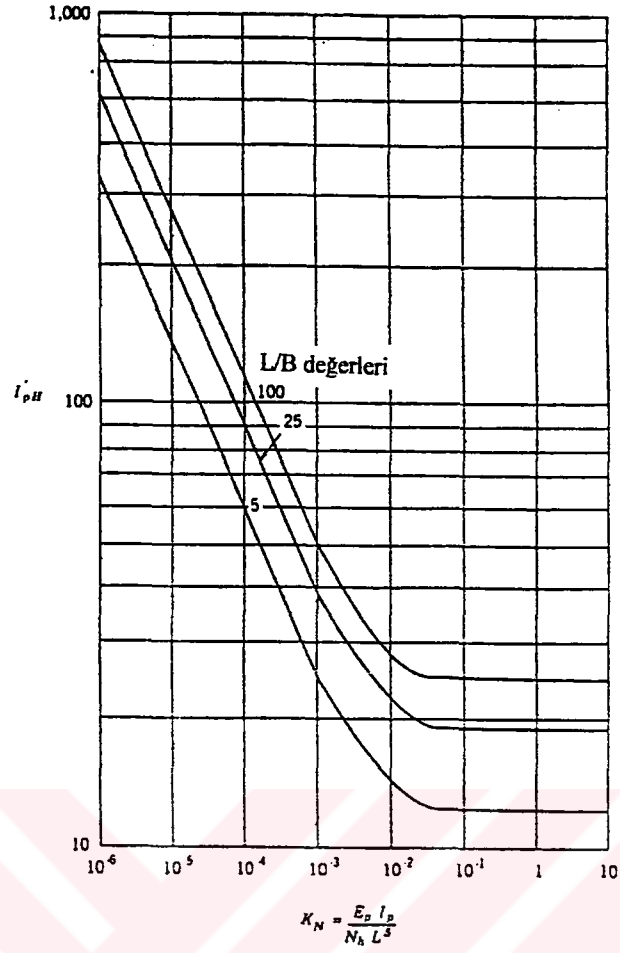
L = kazık uzunluğudur.

Tutulu Başlı Kazık

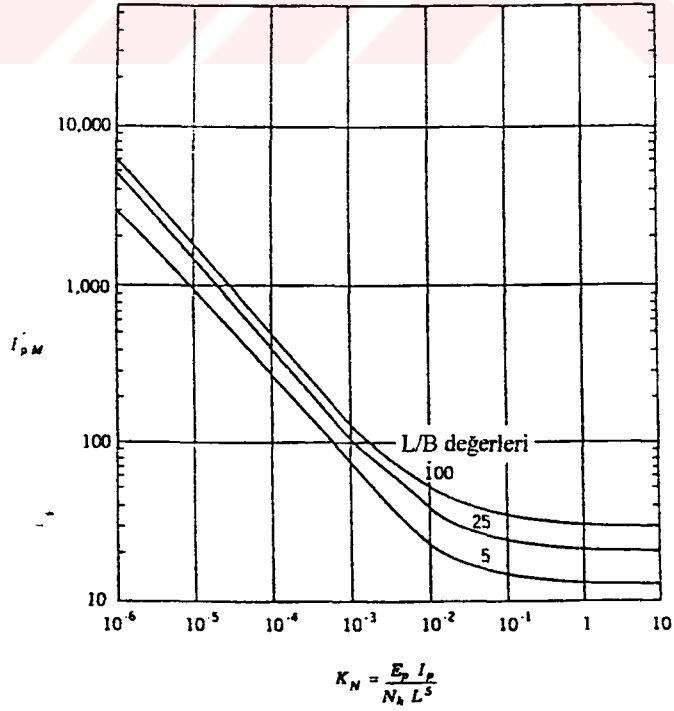
Tutulu başlı kazıkta yerdeğiştirme;

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L^2} \frac{I'_{\rho F}}{F'_{\rho F}} \quad (4.58)$$

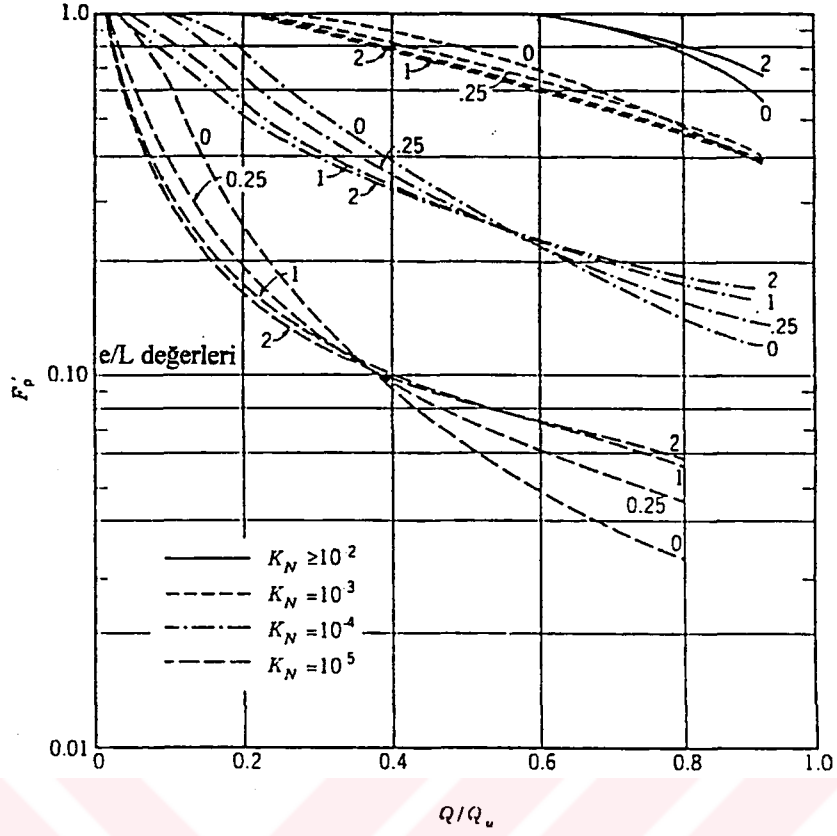
eşitliğinden hesaplanır. Buradaki, $I'_{\rho F}$ ve $F'_{\rho F}$ katsayıları Şekil 4.13 deki grafiklerde verilmektedir. Kazık başındaki tutululuk momenti M_f ise Şekil 4.14 den alınacaktır.



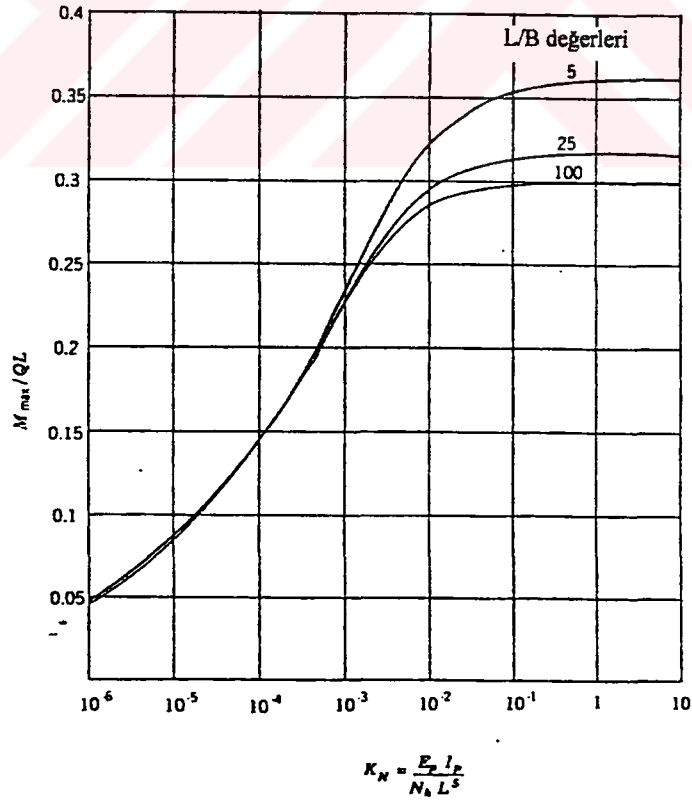
Şekil 4.9 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'_{\rho H}$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).



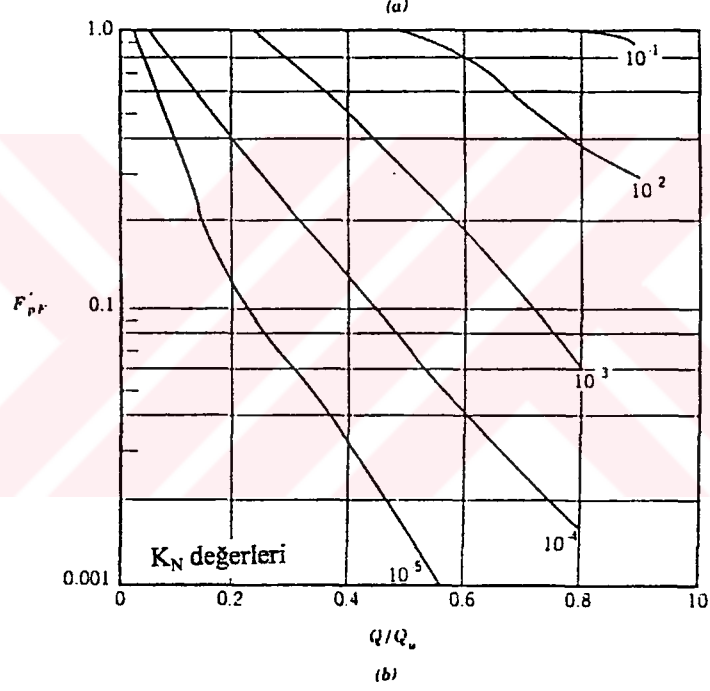
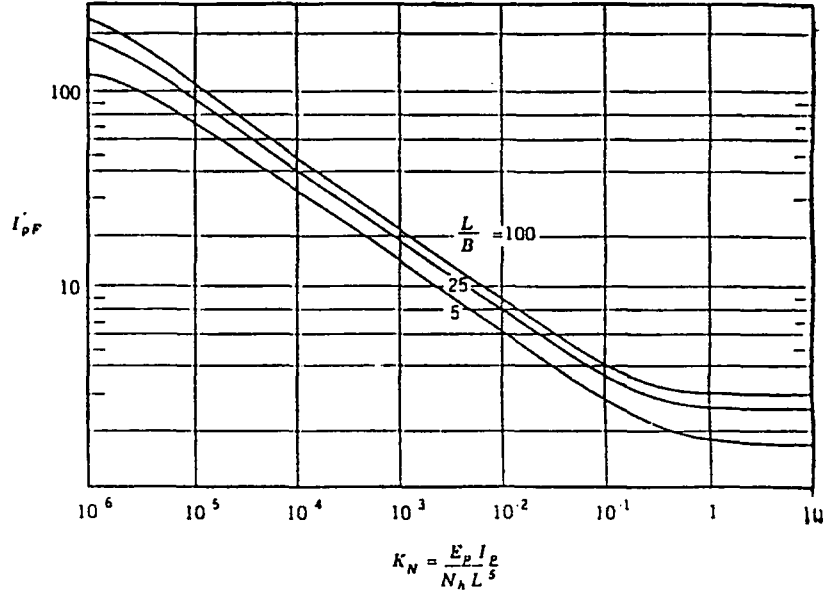
Şekil 4.10 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'_{\rho M}$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).



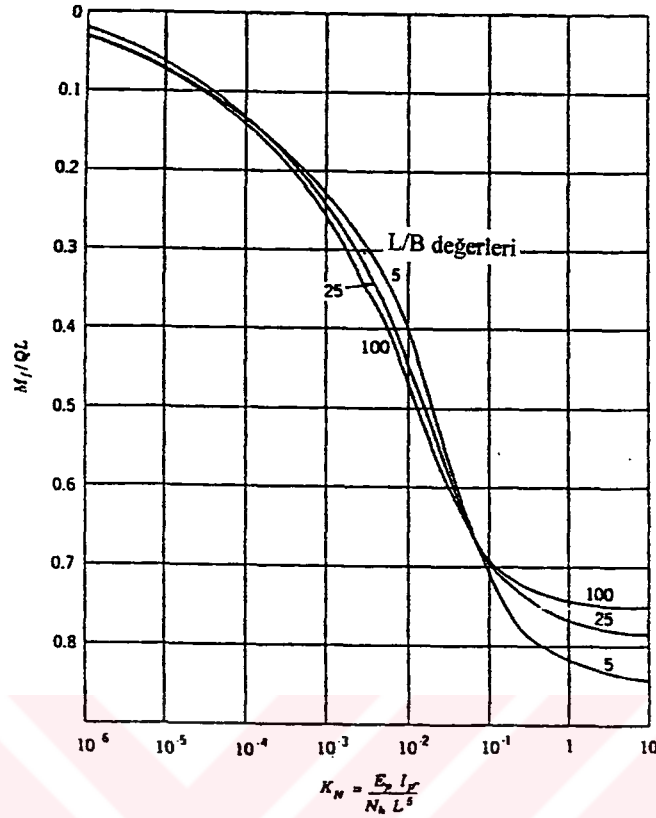
Şekil 4.11 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için F_p^1 değerleri (Poulos ve Davis, 1980)



Şekil 4.12 Serbest başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için maksimum moment (Poulos ve Davis, 1980).



Şekil 4.13 Tutulu başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için a) $I'_{\rho F}$ b) $F'_{\rho F}$ değerleri (Poulos ve Davis, 1980).



Şekil 4.14 Tutulu başlı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için kazık başındaki tutululuk momenti (Poulos ve Davis, 1980).

4.4.2 Kohezyonlu Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı

Normal konsolide killerde zemin modülü, kohezyonsuz zeminlerdeki gibi derinlikle artmaktadır. Bu nedenle normal konsolide killerde, yatay yük ve moment etkisindeki kazıklarda yerdeğiştirme ve momentin elastik yaklaşımla belirlenmesinde, Bölüm 4.4.1 de kohezyonsuz zeminler için anlatılan yöntem benzer bir yaklaşımla uygulanabilir.

Poulos ve Madhav (1971), zemin modülünün derinlikle değişmediği aşırı konsolide killer için yatay yük ve moment etkisindeki, serbest ve tutulu başlı kazıkta yerdeğiştirme ve moment hesabı için bir çözüm geliştirmiştir. Yöntemin ayrıntıları aşağıda sunulmuştur.

Serbest Başlı Kazık

Serbest başlı kazıkta yerdeğiştirme;

$$y = I_{\rho H} \frac{Q_g}{E_s L} + I_{\rho M} \frac{M_g}{E_s L^2}$$

(4.59)

eşitliğinden hesaplanır. Buradaki, $I_{\rho H}$ ve $I_{\rho M}$ katsayıları Şekil 4.15'deki grafikte K_R ye bağlı olarak verilmektedir. L ise kazık boyunu göstermektedir. Benzer şekilde serbest başlı kazıkta zemin yüzeyindeki dönme;

$$\theta = I_{\theta H} \frac{Q_g}{E_s L^2} + I_{\theta M} \frac{M_g}{E_s L^2} \quad (4.60)$$

eşitliğinden hesaplanır. Buradaki, $I_{\theta H}$ ve $I_{\theta M}$ katsayıları Şekil 4.15'deki grafikte K_R e bağlı olarak verilmektedir. $I_{\rho H}$, $I_{\rho M}$, $I_{\theta H}$ ve $I_{\theta M}$ faktörleri grafiklerde de görüldüğü gibi K_R bükülebilirlik faktörünün fonksiyonu olup bu değer;

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \quad (4.61)$$

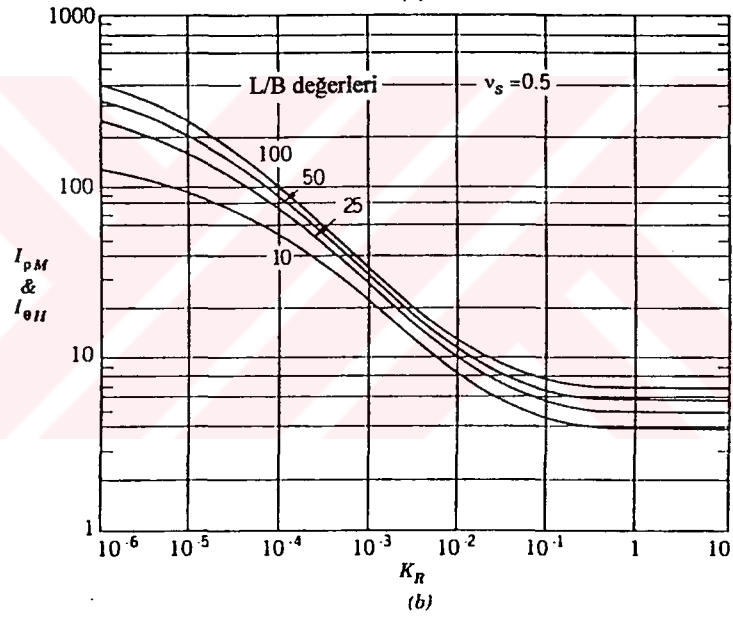
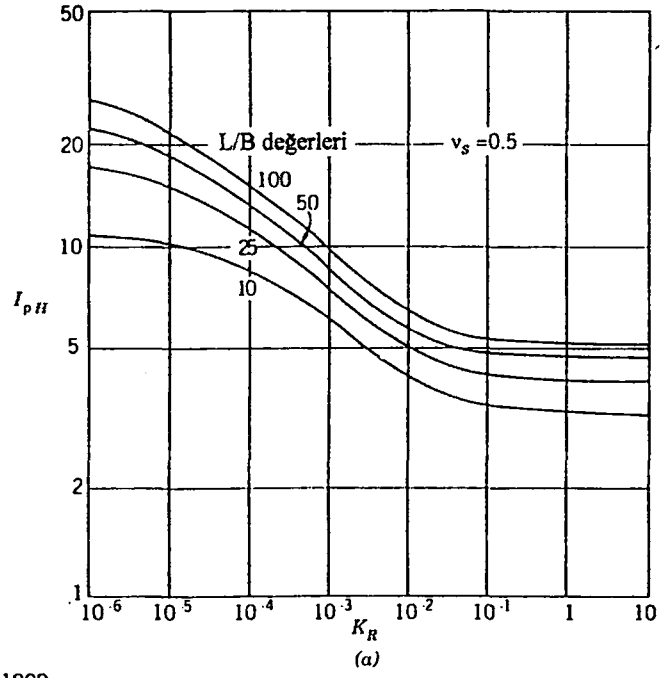
olarak tanımlanmaktadır. Kazık bükülebilirlik faktörü K_R nin kazık türü ve farklı zeminler için alacağı tipik değerler Çizelge 4.3'de verilmektedir. K_R hesaplanmasında kullanılan E_s ampirik olarak $E_s = 40c_u$ (Poulos ve Madhav, 1971) eşitliğinden hesaplanabilir. Buradaki c_u , zemin drenajsız kayma mukavemetidir. Maksimum moment ise Şekil 4.17'den elde edilecektir

Tutulu Başlı Kazık

Tutulu başlı kazıkta yerdeğiştirme;

$$y_g = I_{\rho F} \frac{Q_g}{E_s L} \quad (4.62)$$

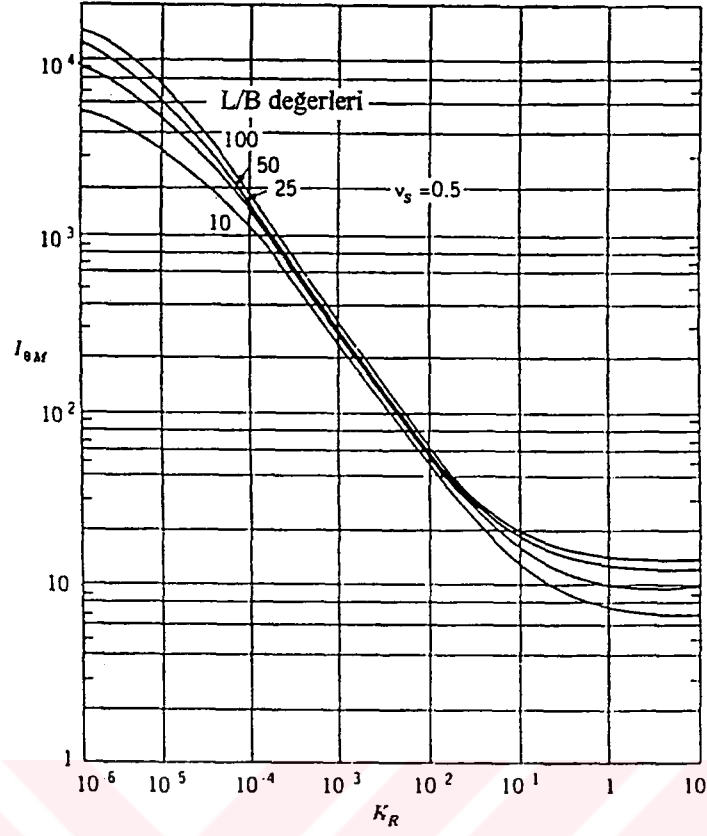
eşitliğinden hesaplanır. Buradaki, $I_{\rho F}$ katsayısı Şekil 4.18 deki grafikte verilmektedir. Kazık başındaki tutululuk momenti M_f ise Şekil 4.19 den alınacaktır.



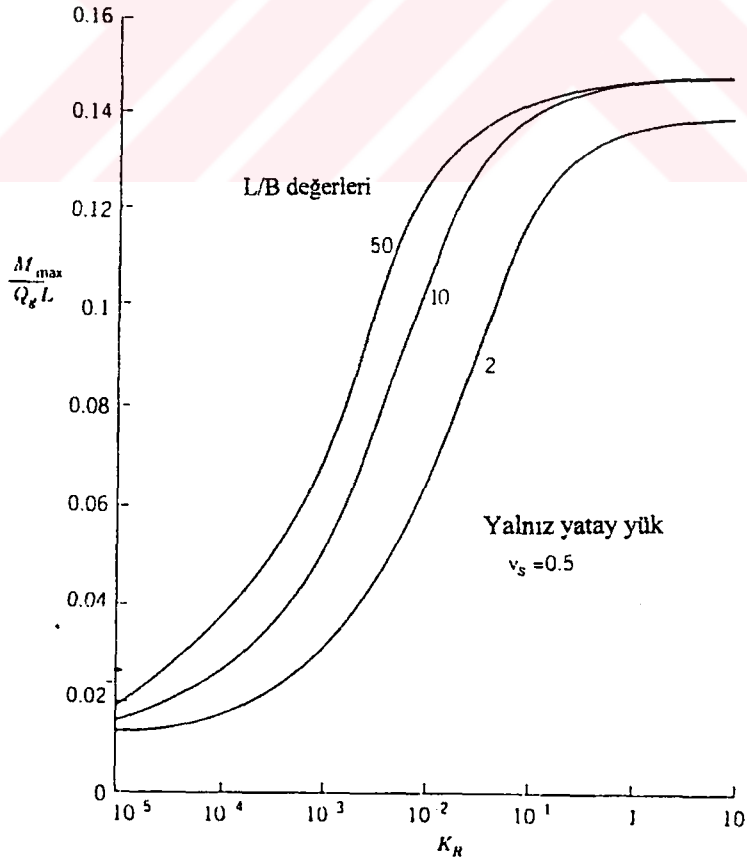
Şekil 4.15 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için a) I_{pH} değerleri b) I_{pM} ve I_{pH} (Poulos, 1971a).

Çizelge 4.3 Kazık bükülebilirlik faktörünün K_R farklı zemin ve kazık türleri için değerleri (Poulos ve Davis, 1980).

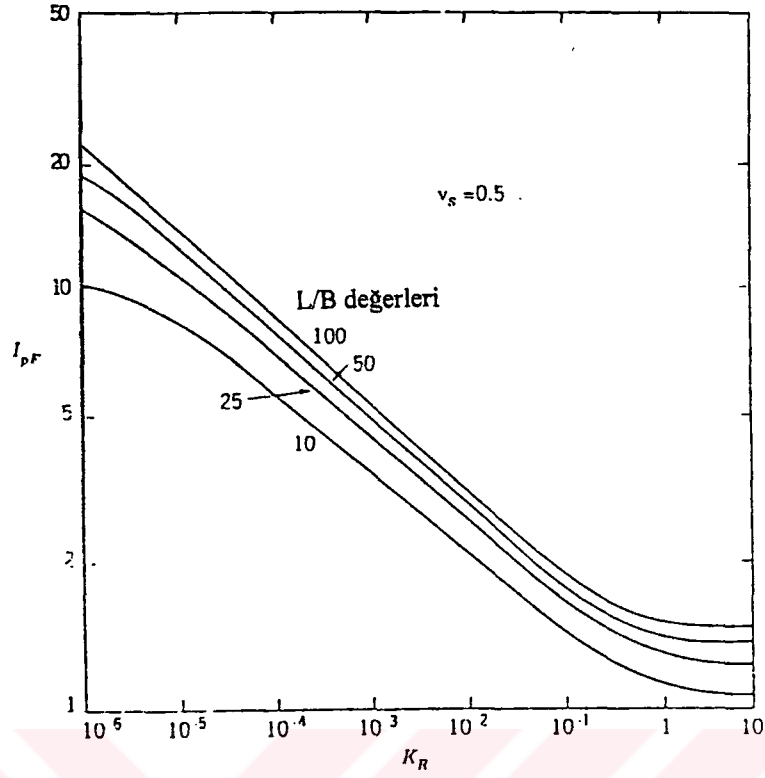
Kazık Türü	Yumuşak kil		Orta katı kil		Katı kil		Gevşek kum		Sıki kum	
	6,0	15,2	6,0	15,2	6,0	15,2	6,0	15,2	6,0	15,2
	Kazık uzunluğu (m)									
30 cm çaplı beton kazık	6,2E-03	1,6E-04	3,1E-03	8,0E-05	1,2E-03	3,1E-05	3,7E-03	9,5E-05	9,2E-04	2,4E-05
90 cm çaplı beton kazık	5,0E-01	1,3E-02	2,5E-01	6,4E-03	9,4E-02	2,4E-03	3,0E-01	7,7E-03	7,5E-02	1,9E-03
30 cm çaplı ahşap kazık	3,1E-03	7,9E-05	1,5E-03	3,8E-05	6,0E-04	1,5E-05	1,8E-03	4,6E-05	4,7E-04	1,2E-05
35.6 cm x 35.6 cm x 0.53 kN H kesitli çelik kazık	2,7E-02	6,9E-04	1,3E-02	3,4E-04	5,0E-03	1,3E-04	1,6E-02	4,1E-04	4,0E-03	1,0E-04



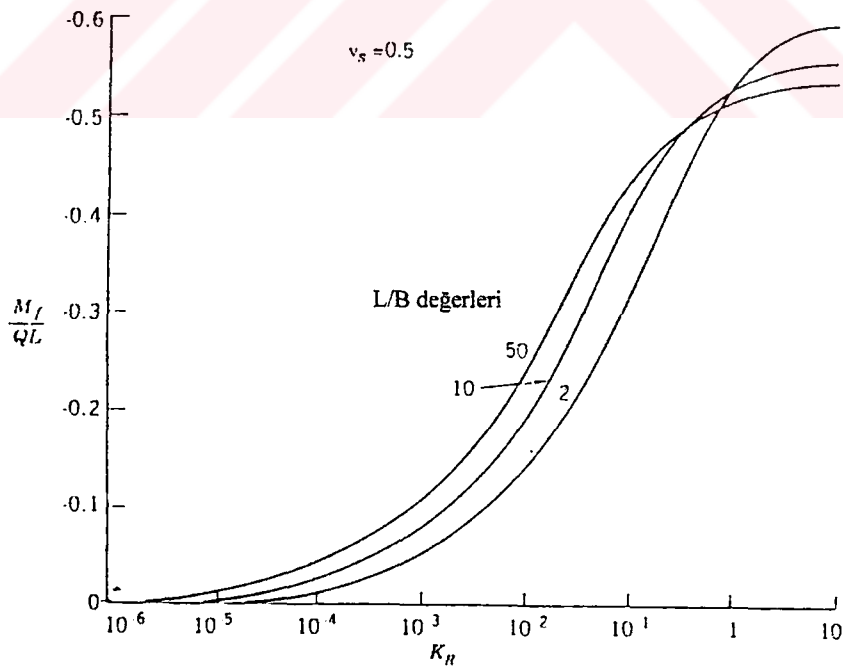
Şekil 4.16 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için $I_{\theta M}$ değerleri (Poulos, 1971a).



Şekil 4.17 Serbest başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için maksimum moment, (Poulos, 1971a).



Şekil 4.18 Tutulu başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için I_{pF} değerleri (Poulos, 1971a).

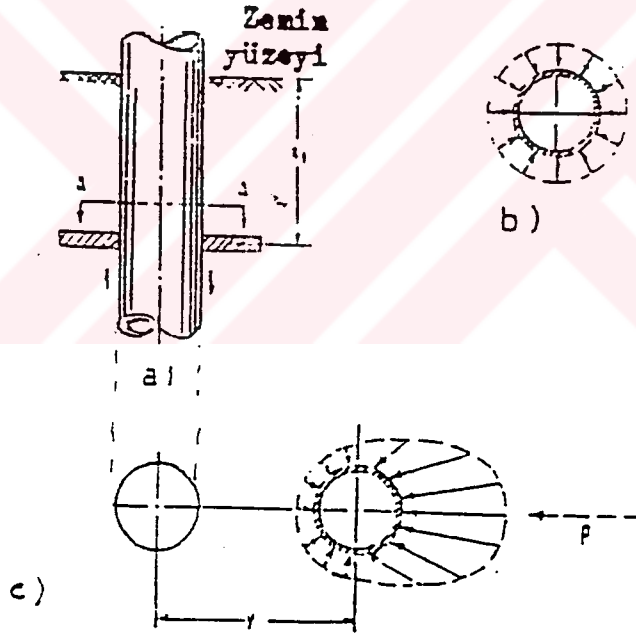


Şekil 4.19 Tutulu başlı kazıklarda, sabit zemin modülü için kazık başındaki tutululuk momentini (Poulos, 1971a).

4.5 p-y Analiz Yöntemi

4.5.1 Giriş

Bundan önceki bölümlerde yatay yüklü düşey bir kazığın elastik teoriye göre, boyutsuz büyüklükler cinsinden ve analizi anlatılmıştı. Reese, Matlock, Davisson ve Gill tarafından elde edilen sonuçlar da önceki bölümde zemin elastisite modülünün çeşitli fonksiyonları için verilmişti. Elastik analiz yöntemi zeminin plastik davranışlarını da içerecek şekilde genişletilebilir. Buda ancak p-y eğrilerini kullanmak suretiyle yapılabilir. Ayrıca yatak katsayısı yaklaşımı ile hesaplanan kazık yatay kapasitesi elastik davranışın ötesinde plastik davranışın söz konusu olduğu durumda geçerli olabilir. Bu, Matlock, (19709, Reese vd, (1974) Reese ve Welch, (1975), ve Brushan vd, (1979) tarafından geliştirilen p-y eğrilerinin oluşturulması ile olanaklıdır. Bu bölümde önce p-y eğrileri yaklaşımının teorisi, kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için p-y eğrilerinin oluşturulması ve yatay yük altındaki kazıklar için aşama aşama tasarım yöntemi anlatılacaktır.



Şekil 4.20 a) Yatay yük etkisindeki bir kazık b) yatay yüklemeye önce zemin reaksiyonunun dağılışı, b) yatay yüklemeye sonra zemin reaksiyonunun dağılışı.

Şekil 4.20.a'da zemin içerisindeki dairesel kesitli bir kazık gösterilmiştir. Yatay yüklemeye önce kazık etrafındaki zemin reaksiyonu dağılışı Şekil 4.20.b'de görüldüğü gibi olmaktadır ve birim gerilme üniform şekilde dağılım göstermektedir. Kazığın y yerdeğiştirmesi yapması durumunda, kazık arkasındaki gerilme azalmakta, ön kısmında artmaktadır, (Şekil 4.20.c). Bu durumda kazığın birim uzunluğu için p kuvveti oluşur. Bu kuşullar altında kazıkta içten bir

kesme ve eğilme momenti oluşacaktır. Burada gösterilen “p” ve “y” parametreleri yatay yükleme açısından şu anlama gelmektedir. “y”, kazığın, yanal yüklenmesiyle yatay yönde oluşan yanal yerdeğiştirme. “p” kazığın yerdeğiştirmesi sonucu kazığa karşı zeminde ortaya çıkan ve kazık birim uzunluğuna etkileyen reaksiyon kuvvetidir.

Yatay yüklü kazıkların, lineer elastik kiriş gibi davrandığı varsayımının yapıldığı durumun diferansiyel denklemi aşağıdaki gibidir:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (4.63)$$

Burada;

EI = kazığın rijitliği,

y = x derinliğindeki kazık yatay yerdeğiştirme,

P = kazık düşey eksenel yükü

p = birim uzunluk için zemin reaksiyonudur:

$$p = ky \quad (4.64)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada k, zemin modülüdür. (4.63) eşitliğinin integrasyonundan (4.65) eşitliği, bunun üzerinden bir integrasyon daha alındığında (4.66) eşitliği üçüncü integrasyonda ise (4.67) eşitliği elde edilir.

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} + P \frac{dy}{dx} = V \quad (4.65)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (4.66)$$

$$\frac{dy}{dx} = S \quad (4.67)$$

Burada,

V = kesme kuvveti

M = kazık eğilme momenti

S = elastik eğrinin eğimidir.

Zemin modülü, x ve y ye bağlı olarak (4.63) eşitliğinin çözümünden elde edilebilir. Zemin

modülünün nümerik açıklaması, en iyi şekilde p zemin reaksiyonunun y yerdeğiştirmesinin fonksiyonu olarak eğrilerle olanaklıdır (Reese ve Welch, 1975). Bu eğriler genellikle lineer değillerdir ve derinlik, zemin mukavemet parametresi ve yük tekrar sayısı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu yüzden yatay yüklü kazık probleminin çözümü için p-y eğrilerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Eğer bu eğriler oluşturulabilir ise (4.63) ve (4.64) eşitlikleri kolayca çözülür ve buna bağlı olarak kazık yerdeğiştirmesi, dönmesi, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu kolaylıkla belirlenebilir.

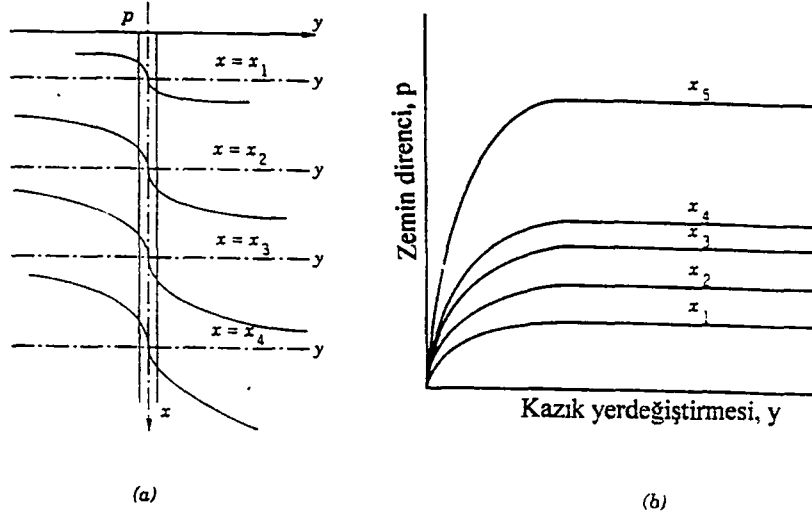
p-y analizlerinde, p-y ilişkisinin Şekil 4.21.b'de olduğu gibi derinlikle değişim gösterdiği gözönüne alınmalıdır. p-y eğrilerinin karakteristikleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Bu eğriler oluşturulurken şu varsayımlar yapılmaktadır.

1. p-y eğrileri uygulanan yatay yük altında zemin yatay deformasyonlarının, herhangi bir derinlikteki kazık kesiti ile denkliliğini gösterir.
2. Eğriler kazık şekil ve rijitliğinden bağımsız olup zemin kesit alanının denkleştiği derinliğin altında ve üstünde yüklemekten etkilenmemektedir. Bu varsayım tam olarak doğru değildir ancak, konuyla ilgili tecrübeler göstermiştir ki, pratik amaçlar için, p-y eğrileri esasen sadece söz konusu derinlikteki zemin reaksiyonuna bağlıdır. Böylece, zemin Şekil 4.21.b'de olduğu gibi p-y karakteristiklerine denk gelecek şekilde tekrar yerleştirilebilir.

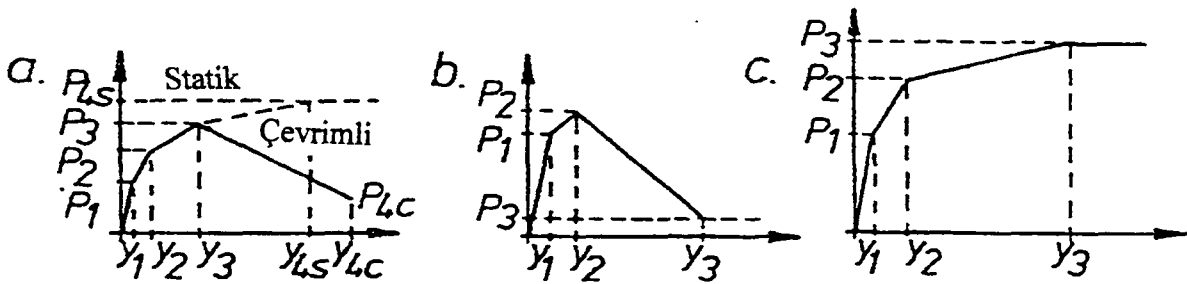
p-y analiz yöntemiyle bir kazığa ait hesaplanan yerdeğiştirmelerin elastik yaklaşımla hesaplanan yerdeğiştirme ile uyum içinde olması gerekir.

Zemin deformasyonlarının, yatay basıncın sıfırdan zemin akma gerilmesine kadar ki değişim aralığında alacağı değerler p-y eğrileriyle Şekil 4.21.a'daki gibi sunulabilir. Bu şekil, Şekil 4.21.c'de olduğu gibi kazık şeklinin yerdeğiştirmesi olarak ve x-y grafiği olarak Şekil 4.21.b.'deki gibi gösterilebilir. Dolayısıyla, zemin yüzeyinden herhangi bir x derinliğindeki p gerilmesi ile y yerdeğiştirmesi arasındaki ilişki tek bir eğri ile çizilebilir.

p-y analiz yöntemi, yatay yüklü kazığın lineer olmayan davranışını gözönünde bulundurması nedeniyle oldukça gerçekçi bir analiz yöntemidir. Bununla birlikte gerekli hesapların yapılabilmesi için bilgisayar ortamına gerek vardır ve hesapların yapılması uzun zaman alabilmektedir.



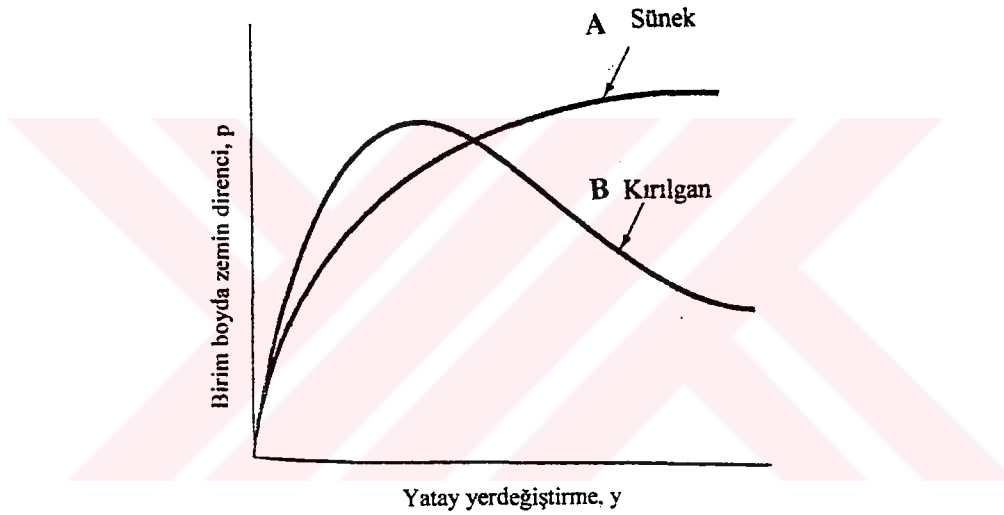
Şekil 4.21 Yatay yüklü kazıklar için p-y eğrileri a) zemin yüzeyinin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri b) p-y eğrilerinin X-Y eksenleri üzerinde gösterimi c) yerdeğistirmelerin kazık boyunca gösterimi, (Matlock, 1970).



Şekil 4.22 p-y eğrileri a) yumuşak kil b) katı kil c) kumlar (Mazurkiewicz, 1987)

Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için p-y eğrilerinin oluşturulması yöntemleri aşağıda ayrıntılı şekilde anlatılmış olup farklı zemin türleri için p-y eğrilerinin genel formu Şekil 4.22'de sunulmuştur.

Bazı p-y eğrileri sünek (Şekil 4.23 A eğrisi), bazıları ise kırılğan karakteristiktir (Şekil 4.23 B eğrisi). Sünek eğriler belirli deplasmanda maksimum dirence p_{max} ulaşmaktadır. Kırılğan eğrilerde ise büyük deplasmanlarda p azalmaya başlamaktadır. Kırılğan davranış özellikle dinamik yük etkisindeki katı killerde ortaya çıkmaktadır. Statik yük etkisindeki yumuşak killerde ve kumlarda kırılğan davranış oluşmaktadır. Kırılğan eğriler daha fazla problem oluştururlar. Çünkü bunlar büyük deplasman potansiyeline sahiptirler (Coduto, 1994).



Şekil 4.23 Tipik p-y eğrileri, (Coduto, 1994).

Bu bölümde kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için p-y eğrilerinin oluşturulması anlatılmıştır. Bölüm 4.5.2 ve 4.5.3'de anlatılan yöntemlerle kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için p-y eğrileri elde edildikten sonra iteratif bir yaklaşımla bu eğrilerin nasıl kullanılacağı Bölüm 4.5.4'de anlatılmıştır.

4.5.2 Kohezyonsuz Zeminler İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

Kohezyonsuz zeminlerdeki yatay yüklü kazıkların p-y yaklaşımı ile analizi için p-y eğrilerinin oluşturulması gerekir. Aşağıda sıralanan hesap adımları takip edilerek iteratif bir yöntemle problem çözülebilir

1. Arazi ve laboratuvar deneylerinden γ zemin birim hacim ağırlığı ve ϕ zemin içsel sürtünme açısı, ve gerekli olan D kazık çapı belirlenir.

2. Aşağıdaki parametreler hesaplanır.

$$\alpha = \frac{1}{2}\phi \quad (4.68)$$

$$\beta = 45 + \alpha \quad (4.69)$$

$$K_o = 0.4 \quad (4.70)$$

$$K_A = \tan^2\left(45 - \frac{1}{2}\phi\right) \quad (4.71)$$

$$p_{cr} = \gamma x \left[\frac{K_o x \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (D + x \tan \beta \tan \alpha) \right] + K_o x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_A D \quad (4.72)$$

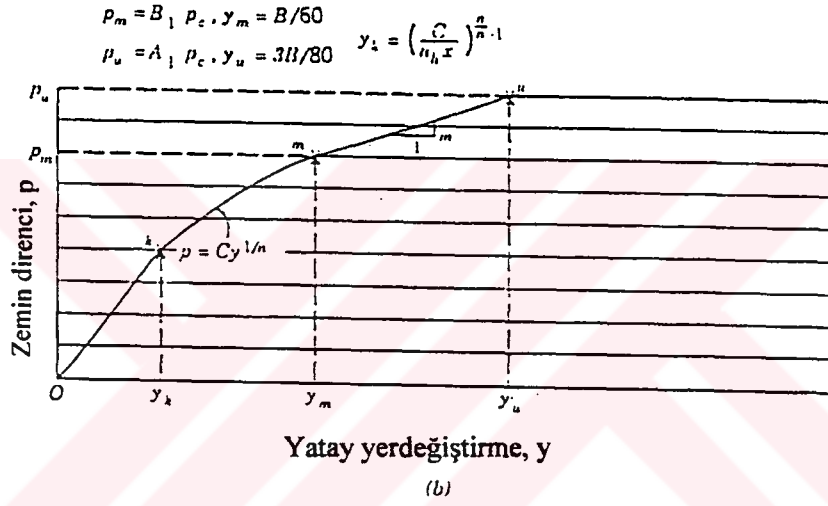
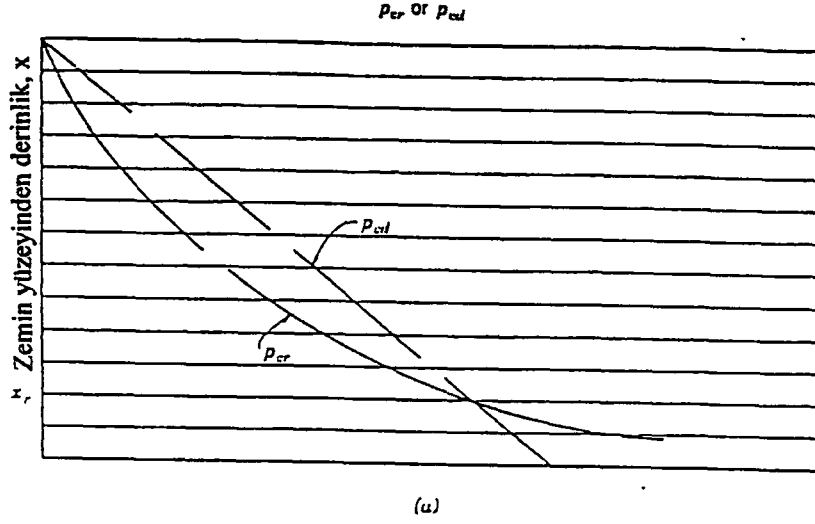
$$p_{cd} = K_A D \gamma x (\tan^8 \beta - 1) + K_o D \gamma x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (4.73)$$

Burada p_{cr} , zemin yüzeyinden x_r kritik zemin derinliğine kadarki bölgede, p_{cd} ise kritik derinliğin altında kalan bölgede yanal yüklemeye dolaylı olarak ortaya çıkan son zemin reaksiyonudur. Şekil 4.24.a'da görüldüğü gibi x e karşılık p_{cr} ve p_{cd} eğrilerinin çiziminden, bu iki eğrinin kesiştiği nokta, x_r kritik derinlik olarak elde edilir.

3. Seçilen belirli derinlikler için p_{cr} veya p_{cd} eğrilerinden uygun olanı kullanılarak p_c değerleri hesaplanır.

4. Söz konusu zemin için n_h seçilir. Aşağıdaki parametreler hesaplanır.

$$p_m = B_1 p_c \quad (4.74)$$



Şekil 4.24 Kohezyonsuz zeminler için a) p_{cr} ve p_{cd} eğrilerinin kesişme noktalarından x_r kritik derinliğinin elde edilmesi, b) p - y eğrisinin oluşturulması (Prakash, Sharma, 1989).

$$y_m = \frac{D}{60} \quad (4.75)$$

$$p_u = A_1 p_c \quad (4.76)$$

$$y_u = \frac{3D}{80} \quad (4.77)$$

Çizelge 4.4 Kohezyonlu zeminler için statik ve dinamik yük koşulları için A_1 ve B_1 katsayıları (Reese vd, 1974).

x/D	A ₁		B ₁	
	Statik	Dinamik	Statik	Dinamik
0,0	2,85	0,77	2,18	0,50
0,2	2,72	0,85	2,02	0,60
0,4	2,60	0,93	1,90	0,70
0,6	2,42	0,98	1,80	0,78
0,8	2,20	1,02	1,70	0,80
1,0	2,10	1,08	1,56	0,84
1,2	1,96	1,10	1,46	0,86
1,4	1,85	1,11	1,38	0,86
1,6	1,74	1,08	1,24	0,86
1,8	1,62	1,06	1,15	0,84
2,0	1,50	1,05	1,04	0,83
2,2	1,40	1,02	0,96	0,82
2,4	1,32	1,00	0,88	0,81
2,6	1,22	0,97	0,85	0,80
2,8	1,15	0,96	0,80	0,78
3,0	1,05	0,95	0,75	0,72
3,2	1,00	0,93	0,68	0,68
3,4	0,95	0,92	0,64	0,64
3,6	0,94	0,91	0,61	0,62
3,8	0,91	0,90	0,56	0,60
4,0	0,90	0,90	0,53	0,58
4,2	0,89	0,89	0,52	0,57
4,4-4,8	0,89	0,89	0,51	0,56
>5	0,88	0,88	0,50	0,55

$$m = \frac{P_u - P_m}{y_u - y_m}$$

(4.78)

$$n = \frac{P_m}{my_m} \quad (4.79)$$

$$C = \frac{P_m}{(y_m)^{1/n}} \quad (4.80)$$

$$y_k = \left(\frac{C}{n_h x} \right)^{n/(n-1)} \quad (4.81)$$

$$p_k = Cy_k^{1/n} \quad (4.82)$$

hesaplarda kullanılan A_1 ve B_1 katsayıları statik veya dinamik yükleme koşullarına göre Çizelge 4.4'den alınır.

5. i) "4." adımda elde edilen y_k ve p_k değerleri Şekil 4.24.b'de gösterildiği şekilde işaretlenerek k noktası elde edilir. k noktası orijin ile birleştirilerek OK doğrusu elde edilir.

ii) "4." adımda elde edilen y_m ve p_m değerleri Şekil 4.24.b'de gösterildiği şekilde işaretlenerek m noktası elde edilir. m noktası k noktası ile birleştirilir.

iii) "4." adımda elde edilen y_u ve p_u değerleri Şekil 4.24.b'de gösterildiği şekilde işaretlenerek u noktası elde edilir. u noktası m noktası ile birleştirilerek seçilen bir derinlik için p-y eğrisi elde edilmiş olur. Bu işlem seçilen her derinlik için tekrarlanarak zemin yüzeyinden itibaren belirli derinlikler için p-y eğrileri elde edilmiş olur.

4.5.3 Kohezyonlu Zeminler İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

Matlock (1970), kohezyonlu zeminlerde p-y eğrilerinin oluşturulması için arazi ölçümleri ve model deneylere dayanarak aşağıdaki önerileri getirmektedir.

4.5.3.1 Yumuşak-Orta Katı Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

Yumuşak ve orta katı killerde p-y eğrileri aşağıda sıralanan hesap adımları takip edilerek oluşturulabilir.

1. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile zemin c_u drenajsız kayma mukavemeti ve γ birim hacim ağırlığı belirlenir.

2. Kritik derinlik

$$x_r = \frac{6B}{\frac{\gamma B}{c_u} + j} \quad (4.83)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada;

γ = zemin birim hacim ağırlığı

c_u = kilin drenajsız kayma mukavemeti

J = ampirik faktör

B = kazık çapıdır.

Matlock yaptığı deneysel çalışmalar sonunda yumuşak killer için $J=0.5$ ve katı killer için $j=0.25$ değerinin alınmasının uygun olacağını belirtmektedir. Taşıma gücü katsayısı N_c kritik derinliğe bağlı olarak (4.84) ve (4.85) eşitliklerinden alınır.

$$x < x_r \text{ için } N_c = 3 + \frac{\gamma x}{c_u} + \frac{jx}{B} \quad (4.84)$$

$$x \geq x_r \text{ için } N_c = 9 \quad (4.85)$$

burada, x , p - y eğrisinin çizildiği yüzeyden itibaren ki derinliktir.

3. Hesap yapılan x derinliği için,

$$P_u = N_c c_u B \quad (4.86)$$

hesaplanır. Burada p_u kazık birim boyu için son zemin direncidir.

4. Drenajsız laboratuvar deneyinde maksimum gerilme için elde edilen ϵ_c birim deformasyona göre p_u ya karşılık gelen y_c deplasmanı

$$y_c = 2.5 \epsilon_c B \quad (4.87)$$

olarak hesaplanacaktır. Laboratuvar deney sonuçları yok ise ϵ_c için hassas ve kırılğan killerde

2. $x_1 < x_r$: B ve C noktalarını bir doğru ile birleştir ve yatay şekilde uzat (Şekil 4.25, c eğrisi). C noktasındaki $y=15y_c$ ve $p=0.72p_u x_1/x_r$ dir.
3. $x_1=0$: B noktasını $y=15y_c$ değeri ile birleştir (Şekil 4.25, d eğrisi). $y \geq 15y_c$ de zemin direncinin sıfır olduğu varsayılmaktadır.

4.5.3.2 Katı Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

Reese ve Welch (1975), katı kilerdeki yatay yüklü kazıklara ait p-y eğrilerinin aşağıda anlatılan hesap adımları takip edilerek oluşturulabileceğini belirtmişlerdir.

Kısa Süreli Statik Yükleme Durumu

1. Laboratuvar ve arazi deneyleri ile c_u drenajsız kayma mukavemeti, γ zemin birim hacim ağırlığı ve deviatör gerilmenin yarısına karşılık gelen ε_{50} değeri uygun şekilde belirlenir. Eğer deney sonucu yok ise ε_{50} için 0.005 ile 0.01 aralığından uygun değer alınabilir.
2. (4.89) ve (4.90) eşitliklerinden birim uzunluk için hesaplanan iki son zemin direnci p_u değerlerinden küçüğü son zemin direnci olarak seçilir.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma' x}{c_u} + 0.5 \frac{x}{B} \right) c_u B \quad (4.89)$$

$$p_u = 9c_u B \quad (4.90)$$

burada,

γ' = zemin yüzeyinden x derinliğine kadar ki zeminin ortalama efektif birim hacim ağırlığı

c_u = zemin yüzeyinden x derinliğine kadar ki zeminin ortalama drenajsız kayma mukavemeti

B = kazık genişliğidir.

3. Son zemin direncinin yarısına karşılık gelen deplasman

$$y_{50} = 2.5B\varepsilon_{50} \quad (4.91)$$

eşitliğinden hesaplanır.

4. p-y eğrisinin biçimi

$$p = 0.5p_u \left(y / y_{50} \right)^{1/4} \quad (4.92)$$

eşitliğinden belirlenir. $y > y_{50}$ olması durumunda $p = p_u$ alınır.

Tekrarlı Yükleme Durumu

1. Statik durum için p-y eğrileri elde edilir.
2. Yatay yükün kaç kez uygulanacağı tahmin edilir.
3. Değişik p/p_u değerleri için labortuvar deneylerine ait sonuçlardan C_1 ve C_2 belirlenir.

$$C_2 = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_i}{\varepsilon_{50} \log N} \quad \text{laboratuvar deneyinden} \quad (4.93)$$

burada,

$\varepsilon_c = N$ çevriminden sonra ölçülen birim deformasyon

$\varepsilon_i =$ çevrimden önce ölçülen birim deformasyon

C_1 ise (4.94) eşitliğinden alınır.

Eğer laboratuvar bilgisi yok ise

$$C_1 = C_2 = C = 9.6R^4 \quad (4.94)$$

alınır. Burada

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}} \quad (4.95)$$

eşitliği ile hesaplanan gerilme oranıdır.

4. 3. adımda seçilen p/p_u değerlerine karşılık gelen p değerlerinde tekrarlı yükleme için yeni y değerleri

$$y_c = y_s + y_{50} C_1 \log N \quad (4.96)$$

eşitliğinden hesaplanacaktır. Burada

$y_c = N$ çevriminde oluşan deplasman

$y_s =$ başlangıçta yükleme sonrasında oluşan deplasmandır.

5. Elde edilen $p-y_c$ eğrisi N çevriminden sonraki zemin direncini göstermektedir.

4.5.3.3 Katı Aşırı Konsolide Killer İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

Yukarıda anlatılan normal konsolide killer ve granuler zeminler için zemin modülü derinlikle lineer olarak artmaktadır. Aşırı konsolide killerde ise zemin modülü derinlikle sabittir. Bu tür zeminlerde p-y eğrilerinin oluşturulması için çok sınırlı sayıda deneysel çalışmalar mevcuttur.

Bhushan vd (1979) yükleme deneyleri ve analizler sonucunda Reese ve Welch (1975) tarafından katı kildeki kazıklar için önerilen yöntemin aşağıdaki şekilde değişiklik yapılarak aşırı konsolide katı killer için uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma' x}{c_u} + 2 \frac{x}{B} \right) c_u B \quad (4.97)$$

$$y_{50} = 2B\varepsilon_{50} \quad (4.98)$$

$$p = 0.5 p_u (y / y_{50})^{1/2} \quad (4.99)$$

Bu yöntem sadece tek bir kazık tasarımı için kullanılır. Grup kazıklarına uygulanabilirliğine ilişkin araştırmalar halen devam etmektedir.

Buraya kadar kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için p-y eğrilerinin nasıl elde edileceği anlatılmıştır. Bundan sonraki bölümde, p-y eğrilerini kullanarak yanal yüklü kazıkların analizinin nasıl yapılacağı anlatılacaktır.

4.5.4 p-y Eğrileriyle Yatay Yüklü Kazık Analizi

Burada anlatılan p-y (elasto-plastik davranışın gözönünde bulundurulduğu yöntem) analizi, elastik analizden elde edilen yerdeğiştirmelerin p-y eğrileriyle uygunluğunu sağlamaktan başka bir şey değildir. p-y eğrileri normal olarak lineer olmadıklarından, belirli bir zemin içindeki, boyutları belli olan bir kazığın elasto-plastik analiz yöntemiyle davranışını belirlemek için, aşağıda anlatılan iteratif bir çözüm yapılmalıdır.

1. Zeminin cinsine göre ve kazık özelliklerinden aynı zamanda yükleme durumuna da bakarak, kazık boyunca p-y eğrileri elde edilir. Bölüm 4.5.3 ve Bölüm 4.5.4'de sırasıyla, kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için p-y eğrilerinin oluşturulması ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

2. R ya da T fiktif rijitlik boyu hesaplanır. Fiktif rijitlik boyu hesabında kullanılacak uygun k_h ya da n_h değerleri seçilir. T, kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killer için, R, aşırı konsolide killer için uygulanır.
3. Hesaplanan fiktif rijitlik boyu ve kazığa etkiyen yatay yük ve moment kullanılarak, elastik analiz yöntemlerinden uygun olanı yardımıyla, kazık boyunca belirli aralıklarla y kazık yerdeğiştirmesi belirlenir.
4. “3.” adımda hesaplanan yatay yerdeğiştirmelere karşılık gelen p yatay zemin gerilmesi, “1.” adımda belirlenmiş olan p-y eğrileri kullanılarak, belirlenir.
5. Elde edilen p ve y değerleri yardımıyla, yeni zemin modülü ve R veya T fiktif rijitlik boyu,

$$k = E_s = \frac{P}{y}$$

$$a) n_h = \frac{k}{x}, \quad T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \text{ zemin modülünün derinlikle artması durumu için.}$$

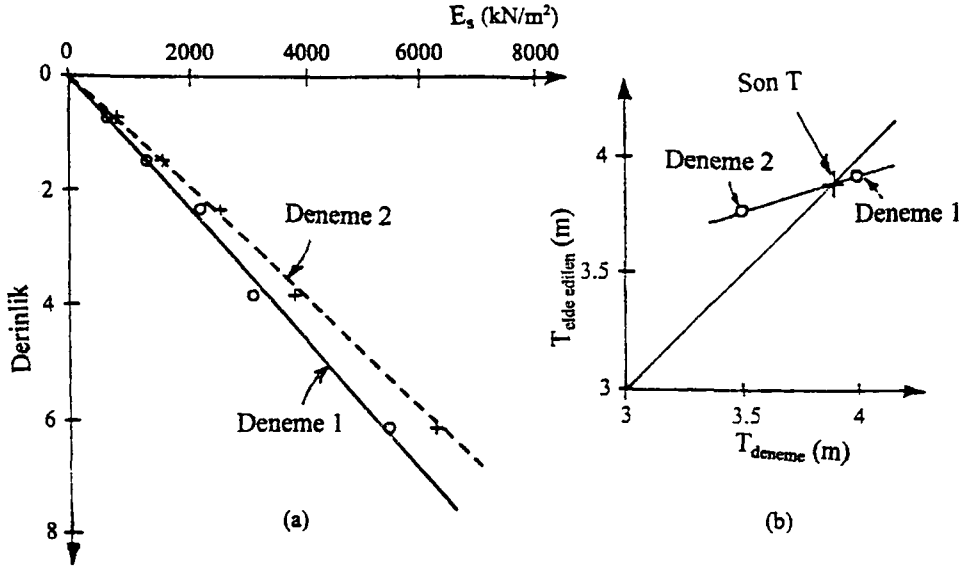
$$b) k_1 = k, \quad R = \left(\frac{EI}{k} \right)^{1/4} \text{ zemin modülünün derinlikle sabit olması durumu için.}$$

eşitliklerinden hesaplanır. Elde edilen değerler, “2.” adımda bulunan değerlerle karşılaştırılır. Eğer bu değerler örtüşmüyor ise “6.” adımdan işleme iterasyonla devam edilir. Eğer örtüşüyor ise “7.” adımla işlem tamamlanır.

6. “5.” adımdaki k veya n_h a yakın yeni değerler seçilir ve “3.” Adımdan başlanarak işlemler tekrarlanır ve yeni R veya T elde edilir. Vrsayılan ve hesaplanan R veya T değerleri örtüşene kadar işleme devam edilir.

Buradaki iterasyon işlemi, Şekil 4.26.a ve Şekil 4.26.b’deki, grafiklerde gösterilen şekilde de yapılabilir. Bunun için 5. adımda hesaplanan zemin modülü Şekil 4.26.a’daki gibi işaretlenir. Bulunan yeni zemin modülüne bağlı olarak bulunan T, rijitlik faktörü Şekil 4.26.b’deki şekilde işaretlenir. Bu işleme eşitlik doğrusunun üzerinde bir nokta elde edinceye kadar yeni değerler kullanılarak devam edilir. Ya da eşitlik doğrusunun her iki yanında bir

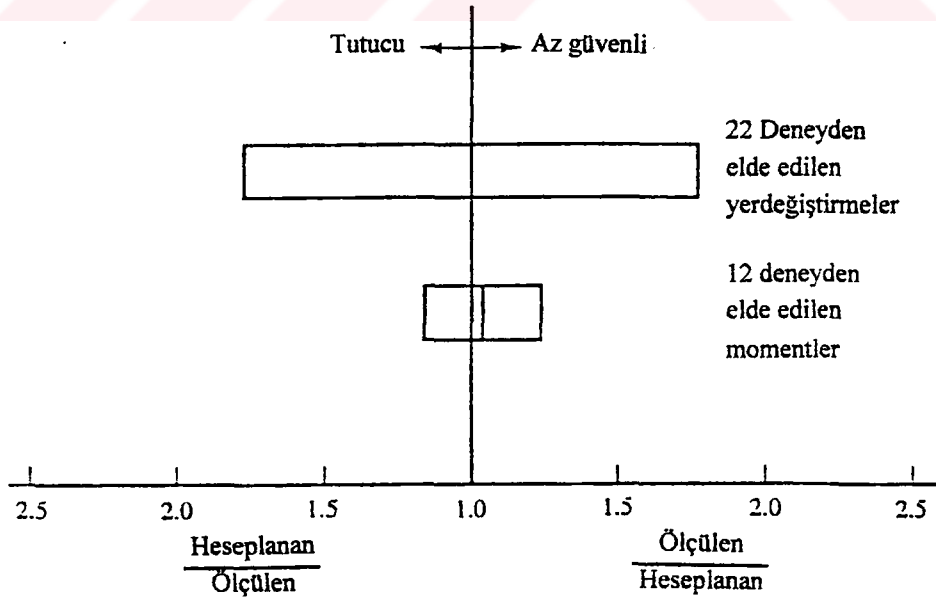
nokta elde edilip, bu iki noktanın eşitlik doğrusunun kestiği noktadan son fiktif rijitlik boyu belirlenir.



Şekil 4.26 p-y Yönteminde iterasyon işleminin yapılışı, (Reese ve Impe, 2001).

7. Bulunan son R veya T değerleri kullanılarak kazık boyunca oluşan yatay deplasmanlar, eğilme momenti ve zemin reaksiyonu dağılımı uygun eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

4.5.5 p-y Analiz Yönteminin Doğruluğu



Şekil 4.27 Hesaplanan yatay deplasman ve eğilme momenti p-y yöntemi ile %90 lık bir uyum içindedir. Grafikteki düşey çizgi ortalama tahmin değerini göstermektedir, (Reese ve Wang, 1986).

Reese ve Wang (1986) 22 arazi yatay yükleme deney sonuçlarını tahmin edilen deplasman değerleriyle karşılaştırmışlardır. Bu deneylerden 12 si için ölçülen ve hesaplanan moment karşılaştırması da yapılmıştır. Şekil 4.27'de gösterilen karşılaştırma sonuçları p-y analiz yönteminin hesaplanan deplasmanlar için iyi momentler için ise çok daha büyük bir uyum içinde olduğu ve tasarımlar için güvenilir bir aralıkta değişim gösterdiği anlaşılmaktadır.

4.6 Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)

p-y yönteminin arazi yükleme deneyleri ile uyum göstermesi tek kazığın yanal yüklemesi için iyi bir referans oluşturmaktadır. Yöntemin veri hazırlama ve hesaplamada uzun zaman alışı bazı projelerde kullanılmasını kısıtlanmakta olup Duncan vd (1994) tarafından CLM yöntemi buna iyi bir alternatif oluşturmaktadır (Yıldırım, 1995).

Yöntemde kazığın çap ve eğilme rijitliği ile zemin mukavemet ve gerilme-gerinim davranışı özelliklerini içeren karakteristik bir yük ve karakteristik bir moment tanımlanmaktadır. Karakteristik yük;

$$\text{kilde } P_c = 7.34B^2(E_p R_I) \left(\frac{S_u}{E_p R_I} \right)^{0.68} \quad (4.100)$$

$$\text{kumda } P_c = 1.57B^2(E_p R_I) \left(\frac{\gamma^I B \Phi^I K_p S_u}{E_p R_I} \right)^{0.57} \quad (4.101)$$

ve karakteristik moment;

$$\text{kilde } M_c = 3.86B^3(E_p R_I) \left(\frac{S_u}{E_p R_I} \right)^{0.46} \quad (4.102)$$

$$\text{kumda } M_c = 1.33B^3(E_p R_I) \left(\frac{\gamma^I B \Phi^I K_p S_u}{E_p R_I} \right)^{0.40} \quad (4.103)$$

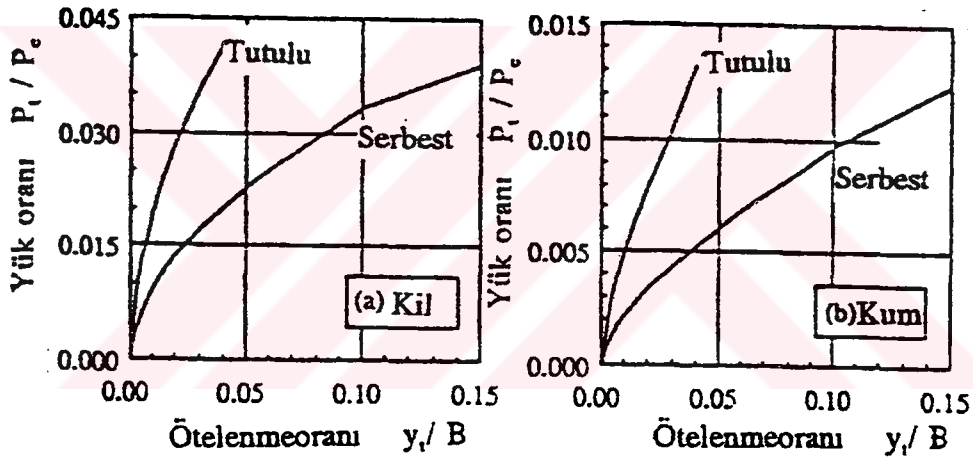
olarak tanımlanmaktadır. Burada R_I atalet momenti oranı olup,

$$R_I = \frac{I_p}{I_{daire}} \quad (4.104)$$

şeklinde verilemektedir. Burada I_p kazık atalet momenti, I_{daire} ise dolu dairesel kesit atalet

momentini göstermektedir. γ için yeraltı suyu altında su altındaki, yeraltı suyu üzerinde toplam birim hacim ağırlığı alınacaktır. K_p Rankine pasif itki katsayısıdır. Drenajsız kayma mukavemeti S_U nun arazi veyn veya üç eksenli basınç deneyleriyle, ϕ nin ise arazi deneyleri ile bulunması önerilmektedir. Yatay yük etkisinde kazık başı civarının davranışı önemli olduğundan zemin yüzeyinden itibaren $8b$ derinliğe kadar ortalama S_U ve ϕ almak yeterlidir. Donatılı kazıklarda eğilme rijitliği $E_p I_p$ nin kesit tesirlerinin çatlama yaratacak büyüklükte olması halinde azaltılmalıdır. Azaltılmanın miktarı, hesaplanan maksimum momentin son moment kapasitesi veya çatlak yaratacak momente oranına göre alınmalıdır.

Duncan vd tarafından killi ve kumlu zeminlerde hem tutulu hem serbest başlı kazıklar için zemin yüzünde etkiyen yatay yük ve moment nedeni ile oluşacak ötelenmeler boyutsuz olarak eğriler şeklinde verilmektedir.

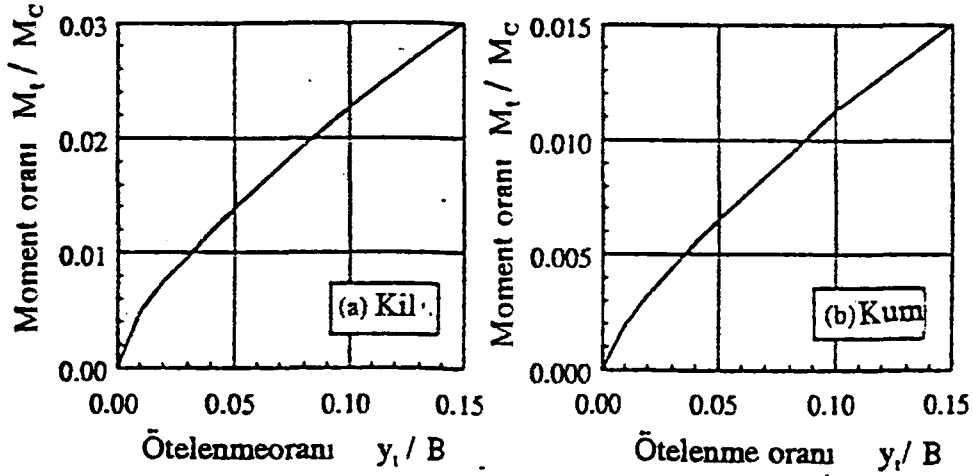


Şekil 4.28 CLM Yöntemiyle yatay yük nedeniyle oluşan ötelenmeler, (Duncan vd, 1994).

Eğriler verilen bir yük nedeni ile ötelenmeleri tahmin etmekte kullanıldığı gibi izin verilebilir bir ötelenme için, yükü sınırlandırma türü çözümlerde de kullanılabilir. Eğrilerden kazık başı tutuluğunun deplasmana olan büyük etkisi görülmektedir. Pratikte kazıkların kazık başlıklarına yeterince gömülüp moment transferi için gerekli donatı yerleştirilen durumlarda kazık başının tutulu olduğu varsayılır. Kazık başında moment etkimesi halinde yatay ötelenmeler yine boyutsuz formda Şekil 4.29'dan tahmin edilebilir.

Eğer yatay kuvvet zemin yüzeyinden yukarıda etkiyorsa, bu zemin yüzeyine bir yatay kuvvet ve bir moment olarak indirgenir. Kazıkların yük ve moment etkisinde davranışı lineer olmadığından lineer bir süperpozisyon yerine aşağıda belirtilen yolla lineer olmayan bir

süperpozisyon önerilmektedir.

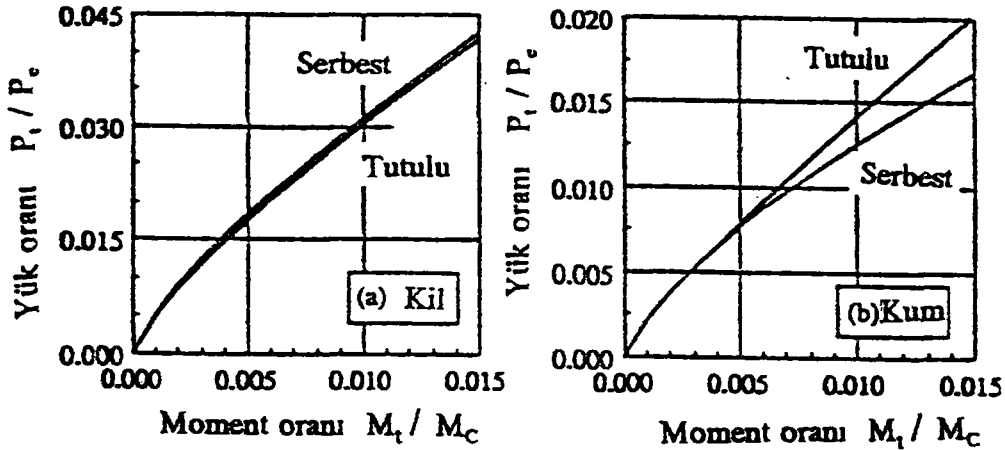


Şekil 4.29 CLM Yöntemiyle moment nedeniyle oluşan ötelenmeler, (Duncan vd, 1994).

1. Yalnız başına yük etkimesi halinde ötelenme Y_{tp} ile, yalnız moment etkimesi halinde Y_{tm} yukarıdaki eğrilerden bulunur.
2. Momentin doğuracağı ötelenmeyi yaratacak yük P_m ile yükün yaratacağı ötelenmeyi verecek moment M_p yine eğrilerden ters işlemle bulunur.
3. $P_t + P_m$ ile $M_t + M_p$ yük ve momentlerine karşılık gelen Y_{tpm} ve Y_{tmp} deplasmanları bulunur.
4. Zemin yüzünden yukarıda etkileyen yük için beklenen ötelenme

$$Y_{\text{birleşik}} = 0.5(Y_{tpm} + Y_{tmp}) \quad (4.105)$$

olacaktır. Tutulu başlı kazıklarda maksimum momentin kazık tepesinde oluşacağı bilinmektedir. Maksimum moment için Şekil 4.30'daki grafikler kullanılabilir.



Şekil 4.30 Yük-moment eğrileri, (Duncan vd 1994)

Serbest başlı kazıklarda ise maksimum moment, zemin yüzeyinden derinde oluşmaktadır. Bunun yeri ve büyüklüğü derinlikle artan yatak katsayısı varsayımı ile tahmin edilebilir (Matlock ve Reese, 1961). Zemin yüzeyindeki ötelenme CLM ile tahmin edildikten sonra ,

$$Y_{birleşik} = \frac{2.43P_t}{E_p I_p} T^3 + \frac{1.62M_t}{E_p I_p} T^2 \quad (4.106)$$

yazılabilir. Eşitlikteki 2.43 ve 1.62 değerleri “yatak katsayısı yaklaşımında” anlatılan A_y ve B_y katsayılarıdır. Bu eşitlikten T karakteristik uzunluğu çekilirse,

$$M_Z = A_m P_t T + B_m M_t \quad (4.107)$$

momentin derinlikle değişimi bulunabilir. A_m ve B_m “yatak katsayısı yaklaşımında” anlatılan katsayılarıdır. Maksimum momentin $Z = 0$ ile $Z = 1.3T$ arasında yerleşeceği anlaşılmaktadır.

Duncan vd. CLM yönteminin uygulanabilmesi için kazık uzunluklarının kazık davranışlarında etkili olmayacak kadar yeterli olması gerektiğini ve bunun için minimum derinliğin kazıkla zeminin göreceli rijitlikleri oranının bir fonksiyonu olarak belirlenebileceğini belirtmektedirler. Minimum derinlikler için öneriler Çizelde 4.5’de sunulmuştur.

Çizelge 4.5 CLM Yöntemi için minimum uzunluklar

Zemin Türü	Kriter	Minimum uzunluk	
Kil	$E_p R_f / S_u$	100,000	6B
		300,000	10B
		1,000,000	14B
		3,000,000	18B
Kum	$E_p R_f / \gamma' D \phi' K_p$	10,000	8B
		40,000	11B
		200,000	14B

Minimum önerilen boydan daha kısa kazıklarda ötelenmelerin CLM ile hesaplanandan daha fazla, momentlerin daha az olması beklenmektedir.

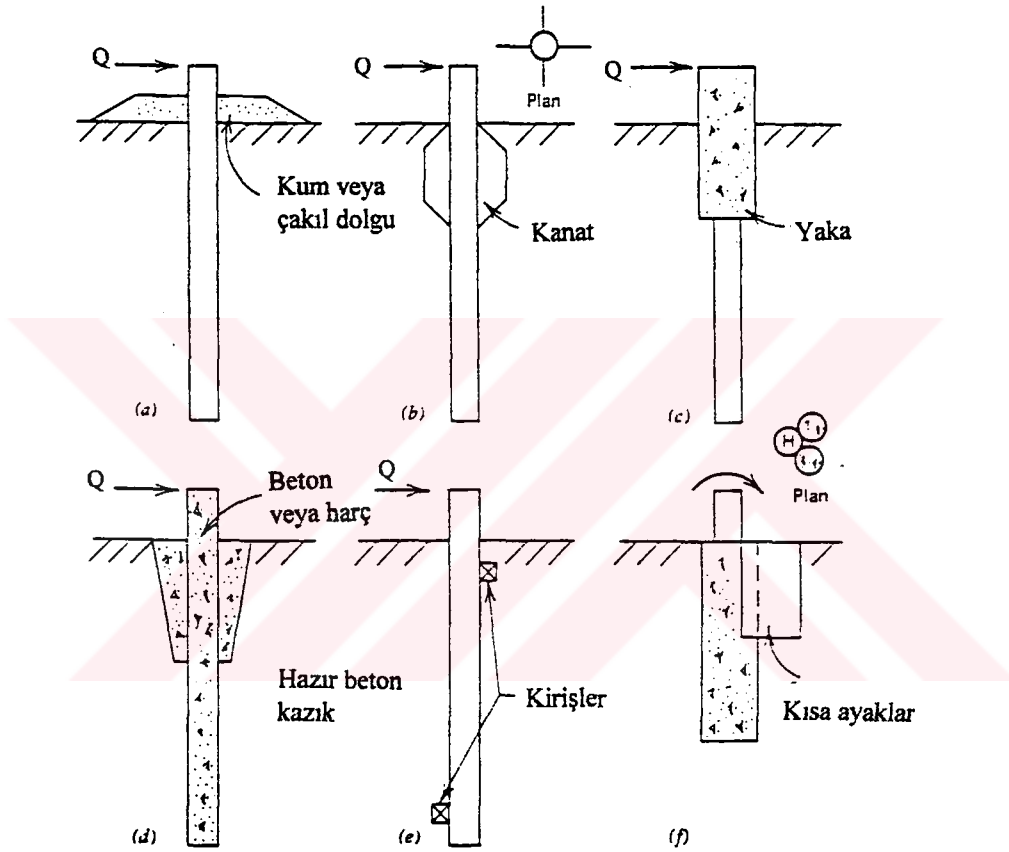
4.6.1 CLM Yönteminin Doğruluğu

Yöntem Reese vd. (1975) in gerçekleştirdiği yatay yükleme sonuçlarına uygulandığında killi zeminde tahmin edilen ötelenme ölçülenden %70 kadar daha fazla olmuşken, ölçülen ve tahmin edilen momentler uyum içinde bulunmuştur. Kumlu zeminlerde ise hesaplanan ve ölçülen ötelenmeler yalnızca %10 farketmiş, momentler ise birbirine çok yakın bulunmuştur.



5. YATAY KAZIK TAŞIMA GÜCÜNÜN ARTIRILMASI VE YATAY YÜKLÜ KAZIKLARLA İLGİLİ DİĞER ÇALIŞMALAR.

Eğer hesaplanan yatay kazık direnci yeterli değil ise genellikle kazık çapı artırılarak veya kazık atalet momenti artırılarak gerekli olan kapasiteye ulaşılmaktadır. Ancak Broms tarafından tanımlanan birkaç yöntem ile bunun daha etkili bir şekilde sağlanması da olanaklıdır. Bu yöntemler Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1 Yatay kazık direncinin artırılma yöntemleri, (Broms 1972).

Bu yöntemlerden Şekil 5.1a.’da gösterilen kazık etrafının kum veya çakıl ile doldurulması kolay bir şekilde uygulanabilir. Özellikle yumuşak kilerdeki tekrarlı yükler altındaki kazıklar için etkili olmaktadır.

Yatay yüklü kazıklar pek çok araştırmacı tarafından model deney çalışmaları ve arazide yapılan yükleme deneyleri ile incelenmiştir.

Nalçakan (1999), heyelan iyileştirici kazıkların kohezyonlu zeminlerdeki grup davranışını laboratuvar koşullarında bir model deney ile incelemiştir. Modelleme büyük bir kesme kutusu ve bilgisayar kontrollü veri sistemi oluşturularak yapılmıştır. Deneylerde 10 mm çapında, 30 cm uzunluğunda pirinçten yapılmış model kazıklar kullanılmıştır. Kazıklara gelen yükler, elektronik çekme yük okuyucuları kullanılarak ölçülmüştür.

Dinçer (1986), kohezyonsuz zeminlerdeki düşey kazıkların statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek amacı ile 2.08x0.98 boyutlarındaki U kesitli alüminyum profilleri, dikdörtgen kesit oluşturacak şekilde birleştirilerek bir model deney çalışması yapmıştır. Deneyde kullanılan kum, bir yağmurlama düzeneği ile kum tankına yerleştirilerek yapılan deneylerde, kazık dış yüzeyine yapıştırılan şekil değiştirme ölçerler kullanılmıştır. Deneyler farklı sıklıktaki kum içine, boyları 41 cm ile 75 cm arasında değişen model kazıklar yerleştirilerek yapılmıştır.

Rollins vd (1998), kazık-zemin etkileşimini incelemek amacı gerçek kazıklar ve kazık grupları üzerinde statik yatay yükleme deneyi yapmıştır. Kazıklara inklinometre ve şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Her kazığa taşınan yük ölçülmüştür. Kazık grubundaki kazıklarla karşılaştırma yapılabilmesi için tek kazık üzerinde de deney yapılmıştır. Deneyler, 0.305 m. çaplı 9.5 mm et kalınlıklı, ucu kapalı, 9.1 m uzunluğundaki çelik kazıklar üzerinde yapılmıştır. Yatay kazık yükleme deneyi yapılmadan önce inklinometre borusu ve şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Kazık grubuna yük 150 ton kapasiteli hidrolik krika ile uygulanmıştır. Deney sırasında kazık grubunun deplasmanın ölçülmesi için altı adet transduser kullanılmıştır. İnklinometre okumaları yapıldıktan sonra yeni yük artışına geçilmiştir. İnklinometre okumalarının elde edilebilmesi için genellikle 20-30 dakika geçmesine gerek duyulmuştur.

Rao ve Raju (1996), kohezyonlu zeminlerdeki kazıkların davranışını incelemek amacı ile farklı kıvamlardaki kil içine yerleştirilmiş olan 21.5 mm çapında, 1100 mm uzunluğunda yumuşak çelikten model kazıklar kullanmıştır. Serbest başlı, tutulu başlı ve kazık gruplarını modellemek amacı ile, kazık dış yüzeyine şekil değiştirme ölçer yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneylerde deplasman transduseri de kullanılmıştır.

Chen ve Poulos (1997), farklı sıklıktaki kohezyonsuz zemine yerleştirilmiş olan, 1 m uzunluğunda, 25 mm çapında ve 1.2 mm et kalınlığındaki alüminyum model kazıklar

üzerinde deneyler yapmıştır. Deneylerde şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır.

Ruesta ve Townsend, (1997), kazık ve kazık gruplarının yatay yükler etkisindeki davranışını incelemek amacı ile yer altı su seviyesi altındaki farklı sıklık ve çimentolanma özelliklerindeki kumlu tabakaların söz konusu olduğu bir sahada yatay yükleme deney çalışmaları yapmışlardır. Söz konusu sahada standart penetrasyon deneyi SPT, konik penetrasyon deneyi CPT ve presiyometre deneyleri de yapılmıştır. Deney yapılan kazıkların içine inklinometre borusu yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yukarıda belirtilen arazi deneylerine bağlı olarak p-y eğrileri oluşturularak, lineer olmayan kazık davranışı incelenmiştir. Kazıklar yaklaşık üst 2 m'si su içinde, 14 m'si kum zemin içinde kalacak şekilde toplam 16 m boyundadır.

Wakai vd (1999), kohezyonsuz zeminde, serbest ve tutulu başlı kazık ve kazık grupları üzerinde model deneyleri yapmışlardır. 1500 mm uzunluğunda, 50 mm çapında ve 1.5 mm et kalınlığındaki model kazığın iki yüzeyine de şekil değiştirme ölçer yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler ayrıca kazık başlığının deplasmanını ölçmek amacı ile deplasman saati kullanılmıştır.

Gandhi ve Selvam (1997), kohezyonsuz zeminlerdeki tek ve grup halindeki çakma ve delme kazıkların yatay yükler altındaki davranışını incelemek amacı ile bir model deney çalışması yapmıştır. Deneyler, %60 göreceli sıklıkta bir tanka yerleştirilen kuma 18.2 mm çapında, 0.75 mm et kalınlığında, 500 mm uzunluğunda kazıklar çakılarak veya delinerek yerleştirilmiştir. Deneylerde şekil değiştirme ölçer ve deplasman saatleri kullanılmıştır.

. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

.1 Giriş

Bu çalışmada, granüler zeminlerde yatay yüklü kazıkların laboratuvar koşullarında modellenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle laboratuvarda kazıkların yatay yüklenmesi için bir model geliştirilmiş ve bu model deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. Ayrıca model kazık üzerinde yatay yükleme yapılmadan önce kalibrasyon deneyi de yapılmıştır. Bu bölümde model deneylerde kullanılan kum zeminin özellikleri, model kazık özellikleri, yükleme düzeneği, kalibrasyon deneyinin yapılışı, model kazık üzerinde yatay yüklemenin yapılışı, kalibrasyon ve yatay yükleme sonucunda elde edilen deney sonuçları anlatılmıştır.

.2 Zemin Özellikleri

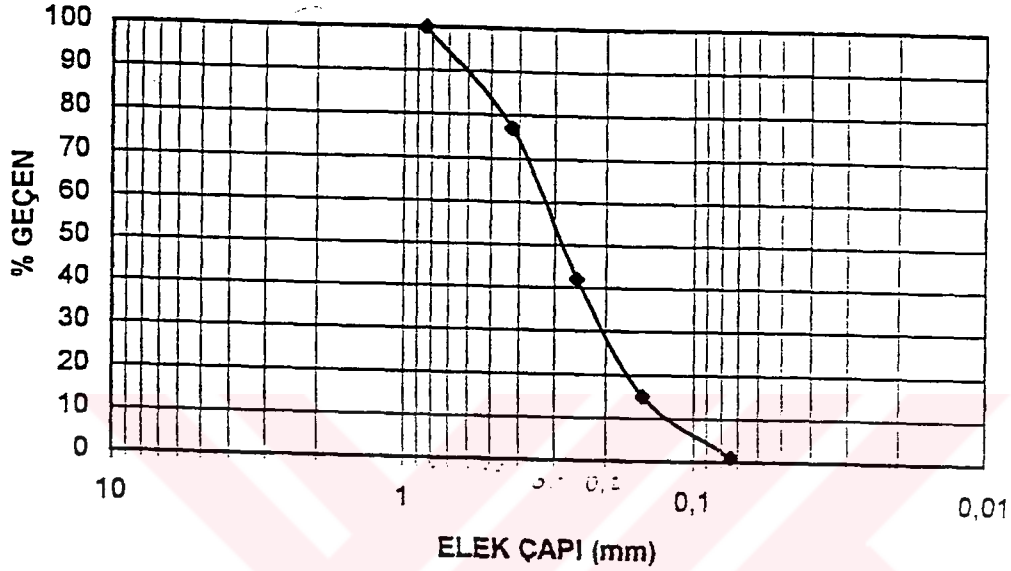
Model deneyde, Berilgen (1996) tarafından ankrajlı perde modellenmesinde kullanılan aynı kum kullanılmıştır. Model deneylerde kullanılmak üzere kum bir zemin tercih edilmiş olup, bu kumun maksimum ve minimum dane çapları 0.5 ~ 0.05 mm arasında değişmektedir. İçerisinde kuvars danelerinin fazla olduğu bu kum, Şile yöresinden alınmıştır. Dane çapı ortalığı, kullanılan kum yağmurlama düzeneğinin verimli çalışmasına göre seçilmiştir. Kumun dane çapı dağılımı Şekil 6.1'de verilmiştir. Buradan görüleceği üzere kullanılan kum üniform bir kum olup USC (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması)'ye göre kötü derecelenmiş bir kumdur (SP). Bu kuma ait diğer indeks özellikleri ise Çizelge 6.1'de görülmektedir.

Çizelge 6.1 Kumun indeks özellikleri (Berilgen, 1996)

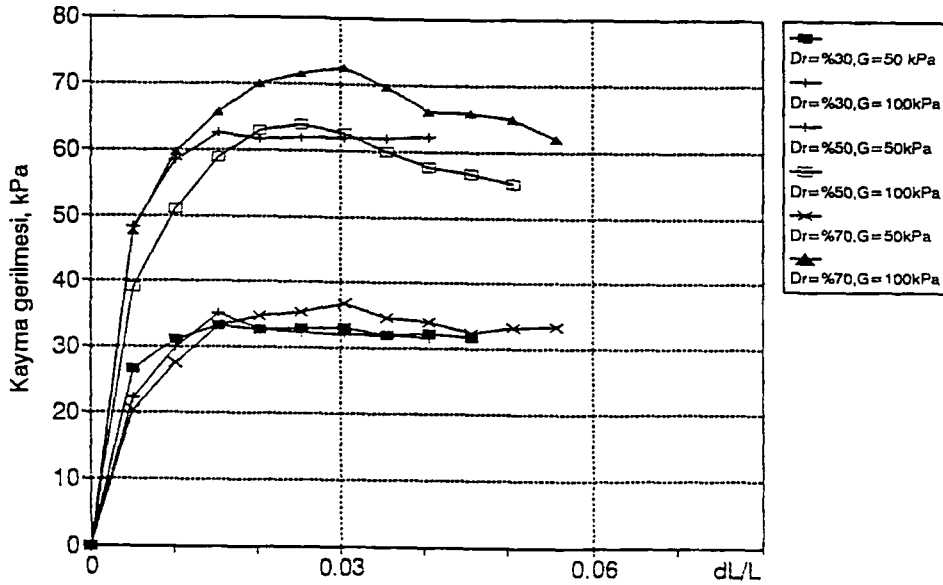
C_u	3
C_c	1.33
G_s	2.65
e_{max}	0.8
e_{min}	0.5

Bu çalışmada kullanılan kum örneğinin kayma mukavemetini bulmak için kum üzerinde direk kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Kesme kutusu deneylerinde üç farklı sıklıkta, gevşek (%30), orta sıkı (%50) ve sıkı (%70) örnekler hazırlanarak 50 ve 100 kPa normal düşey basınç altında kesilmişlerdir. Deneylerden elde edilen kayma gerilmesi ile yatay deformasyonun değişimi Şekil 6.2 de görülmektedir. Kesme kutusu deneyinden farklı sıklık değerleri için bulunan kayma mukavemeti açısı değerleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Üç

ksenli basınç deneyleri iki farklı sıklıkta (%30 ve %70) yapılmıştır. Hazırlanan örnekler 100 ve 200 kPa çevre basıncı altında kuru olarak kesilmiştir. Kumun farklı sıklık dereceleri için çevre basıncı altında düşey gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) ve deformasyon değişimi veren grafik Şekil 6.3 de görülmektedir. Üç eksenli basınç deneyinden farklı sıklık değerleri için bulunan kayma mukavemeti açısı değerleri Çizelge 6.3'de sunulmuştur.



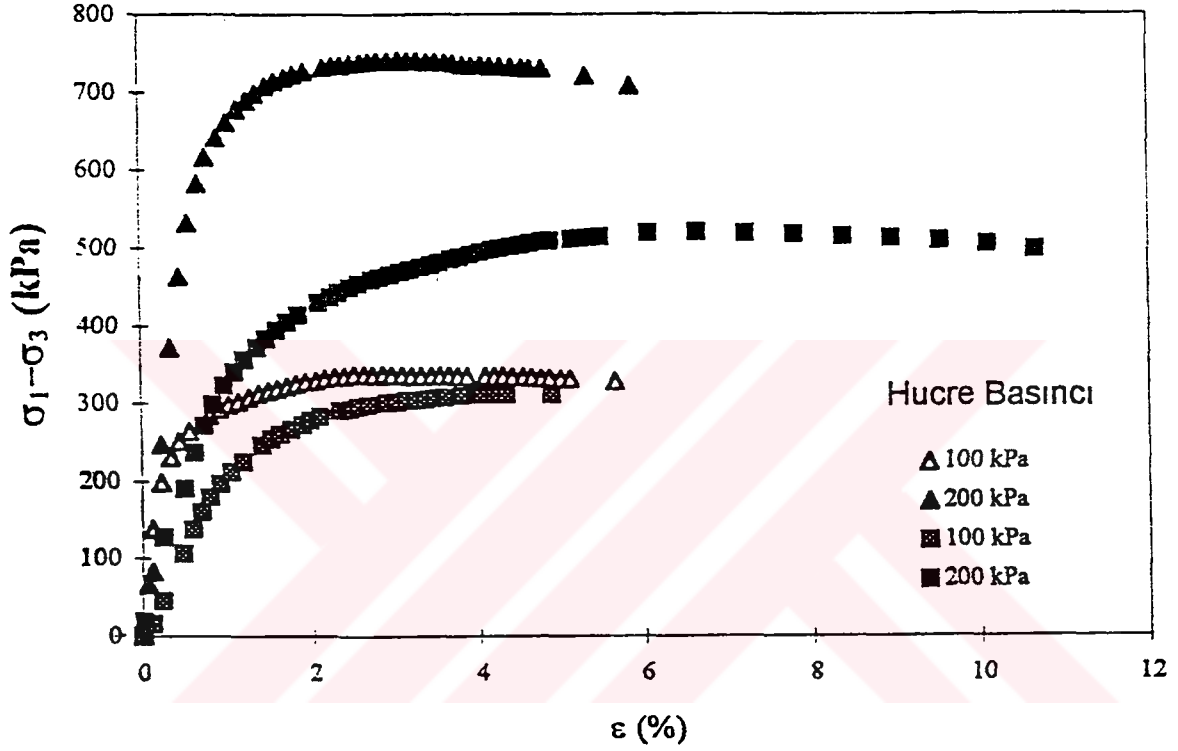
Şekil 6.1 Kumun dane çapı dağılımı (Berilgen, 1996)



Şekil 6.2 Kumun kesme kutusu deneyinde davranışı, (Berilgen, 1996).

Çizelge 6.2 Kumda yapılan kesme kutusu deney sonuçları, (Berilgen, 1996).

Relatif Sıklık D_r (%)	Kayma Mukavemeti Açısı ϕ
30	33.5
50	35.0
70	36.0



Şekil 6.3 Kumun üç eksenli basınç deneyinde davranışı, (Berilgen, 1996).

Çizelge 6.3 Kumda yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları, (Berilgen, 1996).

Relatif Sıklık D_r (%)	Kayma Mukavemeti Açısı ϕ
30	34
70	40

6.3 Kazık Malzemesinin Özellikleri

6.3.1 Kazık Malzemesinin Seçimi

Model kazık olarak, elde ediliş, model deney için uygunluğu ve Bölüm 5’de anlatılan kaynak

lışmalarında da tercih edilmesi gözönüne alınarak alüminyum malzemedен kazık ışturulmuştur. Yine kaynaklardakine benzer model deneylerde de tercih durumu ve üzerine plasman ölçer yerleştirilmesinin kolaylığı gözönüne alınarak 22 mm çapında ve 1.25 mm et lnlığında alüminyum boru seçilmiştir. Model kazık boyu ise mevcut tank boyutları ve yük gulanabilirliğine göre 75 cm uzunluğunda seçilmiştir. Model kazığa ait ayrıntılar şekil 1'de görölmektedir.

3.2 Model Kazık Akma Momentinin Belirlenmesi

odel kazık üzerinde yapılan deneylerden elde edilen yatay deplasman, eğilme momenti, min reaksiyonu değerleri kaynaklardaki hesap yöntemleriyle karşılaştırılmıştır (Bölüm 7.5). ırılaştırmalardan bazılarının (Broms yöntemi) yapılabilmesi için hesaplarda gerekli olan zık akma momenti değeri, model kazık üzerinde, laboratuarda yapılan çekme deneyinden le edilen akma gerilmesi değerii yardımıyla hesaplanmıştır. Bu amaçla model kazık olarak çilen alüminyum borudan 30 cm uzunluğunda üç deney örneği hazırlanmış ve oratuvarında çekme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen akma yanımıları ve,

$$M_u = \sigma_a \times W \quad (6.1)$$

itliğii ile yapılan hesap sonucunda elde edilen akma momenti değerleri Çizelge 6.4'de nulmuştur.

ırada,

M_u = malzeme akma momenti,

σ_a = malzeme akma gerilmesi,

W = mukavemet momenti ve değerii $\pi(D^4 - D_1^4)/(32D)$ dir.

deney sonucunda elde edilen akma gerilmesi değerleri kaynaklardaki değerlerle de rşılaştırılmış ve alüminyum malzemelerin kaynaklardaki değerleriyle uyumlu olduğu laşılmıştır. Elde edilen sonuç çeliğin akma dayanımı ile de uyumludur. Örneğin BÇ-III (a) ıfı beton çeliğinin minumum akma dayanımı 420,000 kN/m² dir.

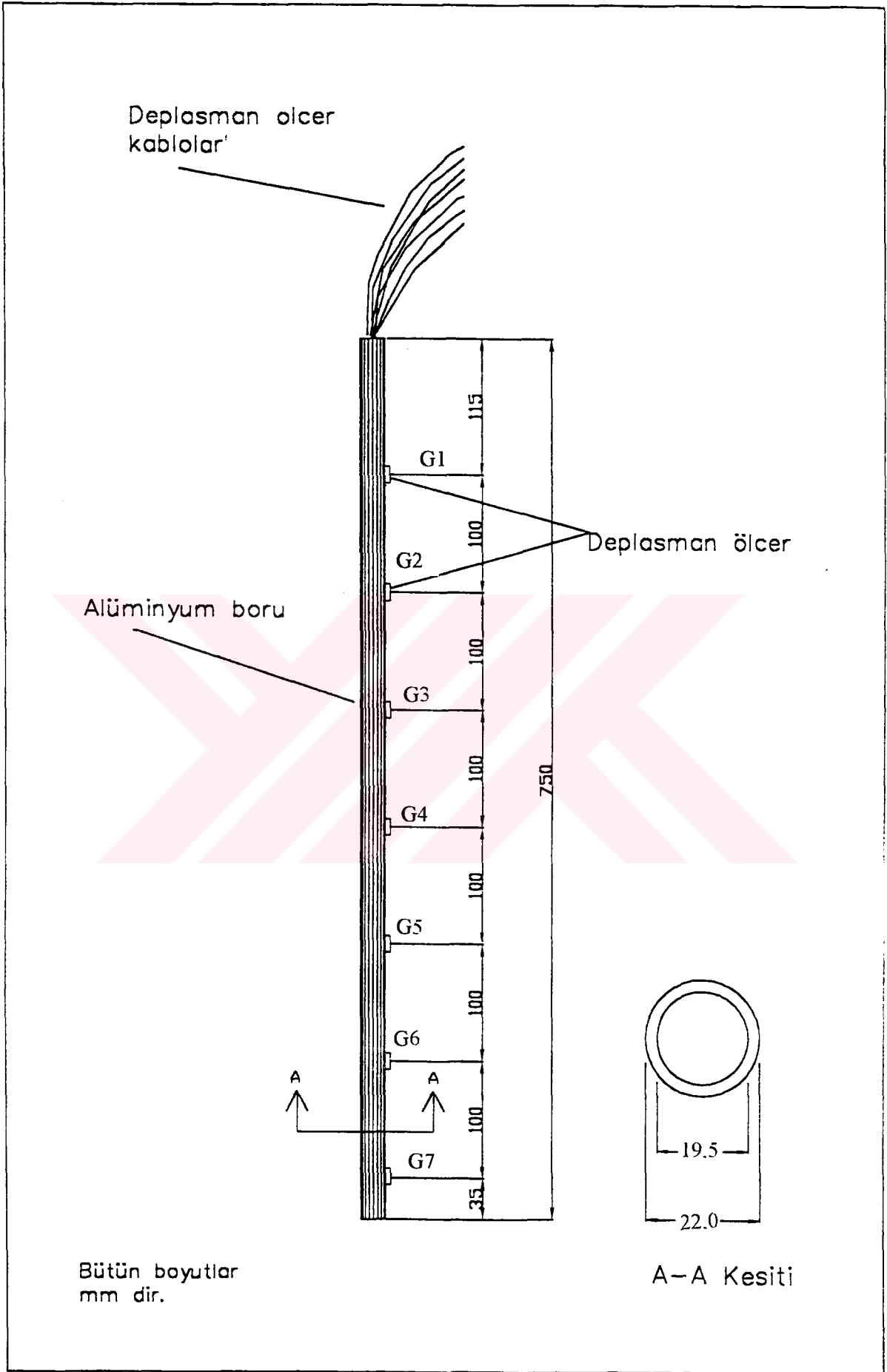
Çizelge 6.4 Model kazık çekme deneyi sonuçları

Deney No	Akma Yüğü (kN)	Akma Gerilmesi (kN/m ²)	Akma Momenti (kN m)
1	13.8	169000	6.77 x 10 ⁻²
2	12.6	154000	6.16 x 10 ⁻²
3	12.8	157000	6.28 x 10 ⁻²

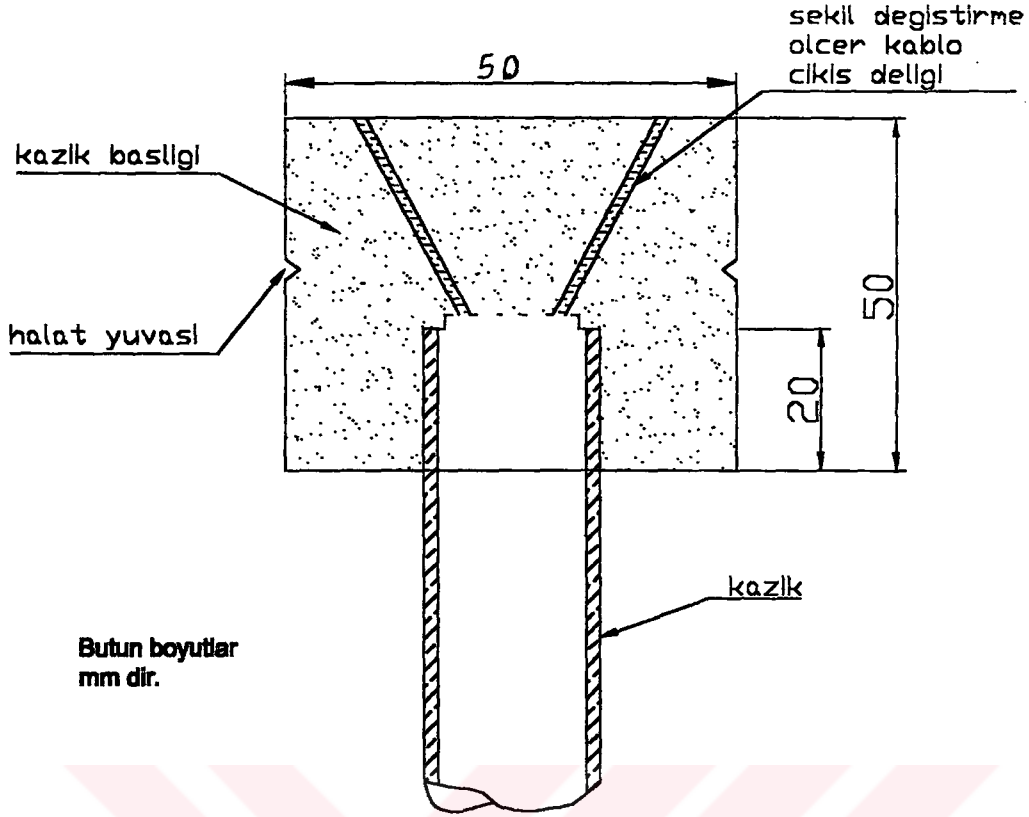
6.3 Model Kazık ve Kazık Başlığı

Deneylerde 22 mm çapında iç boş kesitli alüminyum boru kullanılmış olup et kalınlığı 1.25 mm'dir. Model kazık boyu 75 cm'dir. Yükleme sırasında oluşan şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla kazık dış yüzeyine yedi adet şekil değiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Model kazığın alt ucu çelik bir kapak ile kapatılmıştır. Böylelikle yüklemeler sırasında uygulanan yüklerin etkisi ile kumun kazık ucundan içeriye girmesi ve zeminin yağmurlama sırasındaki kumun bozulması ve dolayısıyla hatalı sonuçlar ortaya çıkması engellenmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerin kabloları, kumun yağmurlanması ve yükleme sırasında zeminde oluşacak hareketlerden etkilenmemesi için kazık dışından değil alüminyum boru içinden geçirilerek kum tankı dışına uzatılmıştır. Bu amaçla kablolar, alüminyum borunun üzerinde bulunan 3 mm çaplı deliklerden boru içine alınmış ve kabloların uçları kazık üst kısmından dışarı alınmıştır. Şekil değiştirme ölçerler alüminyum boru üzerinde eksenel (z) ve teğetsel (θ) doğrultuda oluşan şekil değiştirmeleri ölçmeye olanak tanımaktadır. Bunlar tek sıra halinde kazık üzerine tümü de aynı yöne bakacak şekilde yani tümü aynı düşey çizgi üzerine gelecek şekilde alttan başlayarak ilki kazık ucundan 3.5 cm yukarıda ve diğer altı tanesi 10 cm aralıkla kazık başına doğru yerleştirilmiştir. Model kazığa ait ayrıntılar Şekil 6.4'de sunulmaktadır. Model kazık kum tankına yerleştirilmeden önce yüzeyine kum yapıştırılarak pürüzlülük sağlanmıştır.

Bu çalışmada yatay yük etkisindeki tutulu başlı düşey kazık modellemesi yapılmıştır. Tutulu başlı model kazık oluşturulmasında, ayrıntıları Şekil 6.5'de verilen, alüminyum malzemeden üretilmiş, model kazık başlığından yararlanılmıştır. Kazık başlığı daire kesitlidir. Yükün kazığa uygulanabilmesi için kazık başlığı üzerinde halat yuvası açılmıştır. Halat bu yuvadan geçirilip kazık başlığının etrafında dolandırılıp daha sonra bir klamens yardımı ile tutuşturulmuştur. Şekil değiştirme ölçer kabloları, kazık başlığında eğik olarak açılan deliklerden kazık dışına alınmıştır.



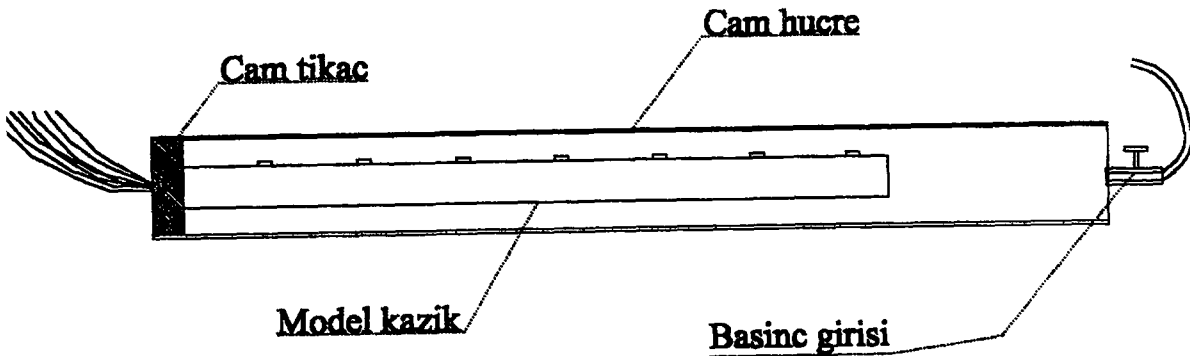
Şekil 6.4 Model kazık ayrıntıları



Şekil 6.5 Model kazık başlığı ayrıntıları.

4 Kalibrasyon Deneyi

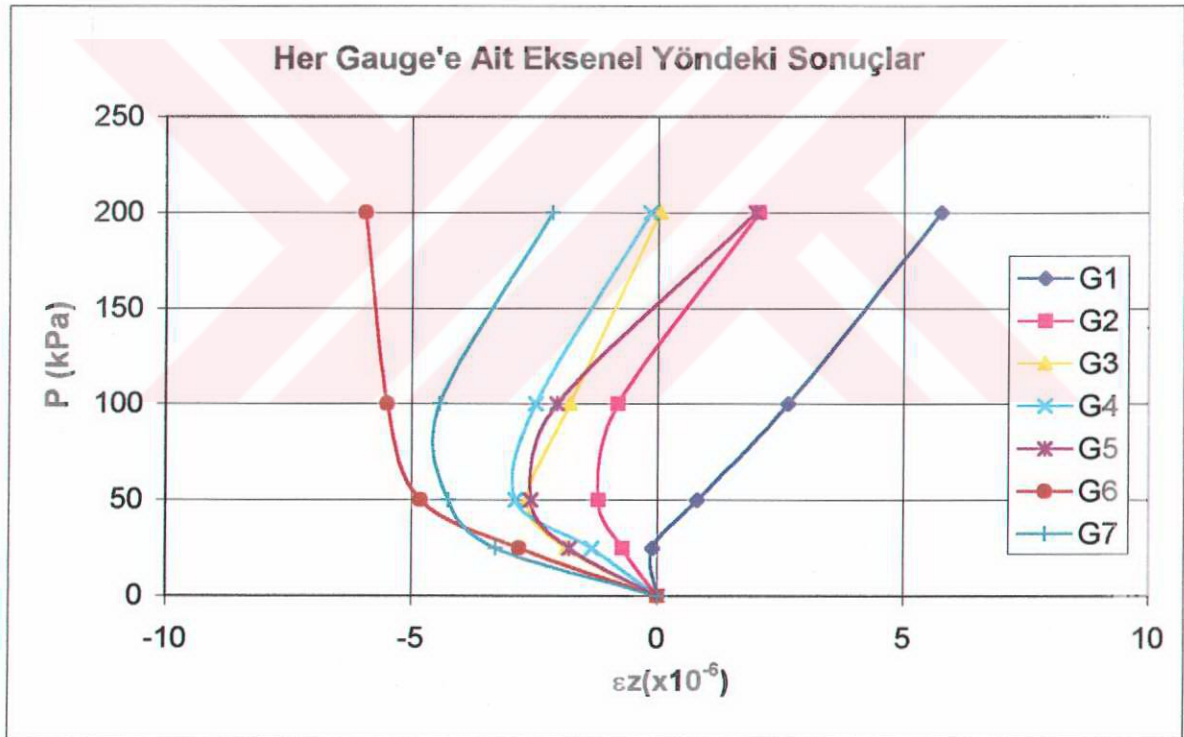
Model kazık (Şekil 6.4) üzerinde, yatay yükleme yapılmadan önce kalibrasyon deneyi yapılmıştır. Kalibrasyon deneyi, daire kesitli, iki ucunda da basınç sızmaları engelenecek kilde kapatılarak hazırlanmış olan cam hücre içine yapılmıştır (Şekil 6.6). Kazığın bir ucu cam hücreye sabitlenip, daha sonra basınç uygulanarak şekil değiştirme ölçerlerden her basınç değişimine ait aksenal ve yatay yöndeki şekil değiştirmeler okunmuştur. Cam hücre, 60 mm çapında, 1200 mm boyutlarındadır.



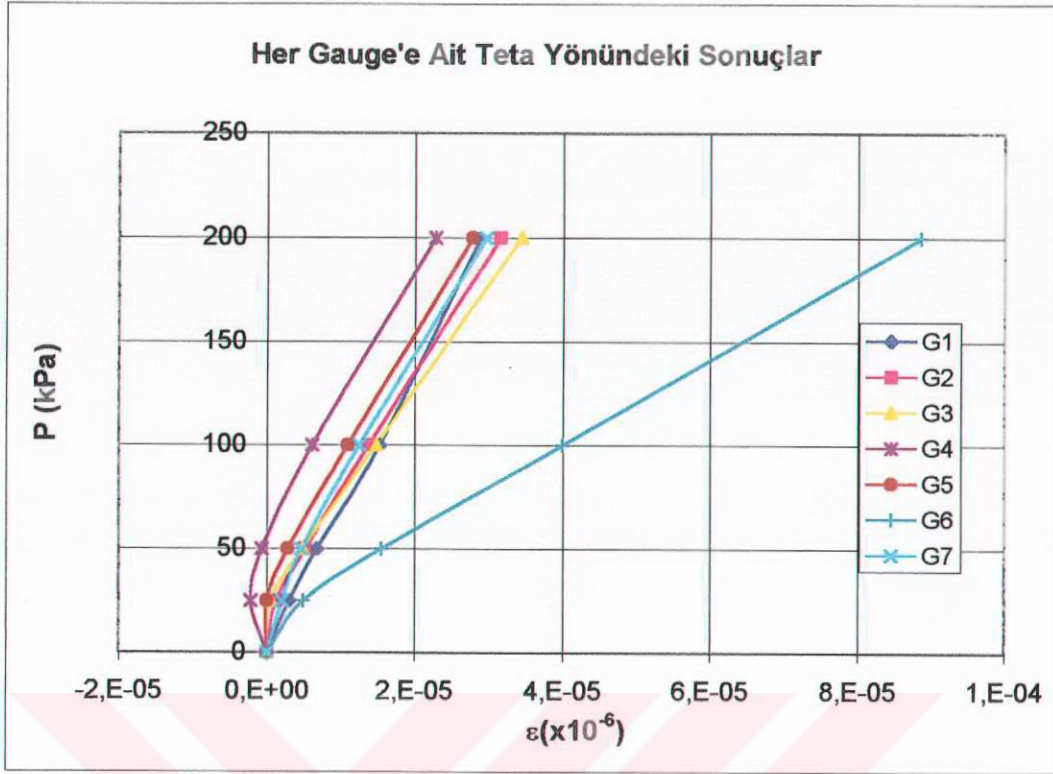
Şekil 6.6 Kalibrasyon deneyi ayrıntıları.

Kalibrasyon deneyi , 0, 25, 50, 100, 200 kPa basınçları uygulanarak yapılmıştır. Elde edilen aksenal ve yatay yöndeki şekil değiştirmeler sırası ile Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir. Kalibrasyon deneyleri, gerçek yüklemelerden elde edilen sonuçlardan zemin reaksiyonu dağılımının elde edilmesi için kullanılmıştır. Yatay yüklemeler için yatay şekil değiştirmeler kullanılmıştır.

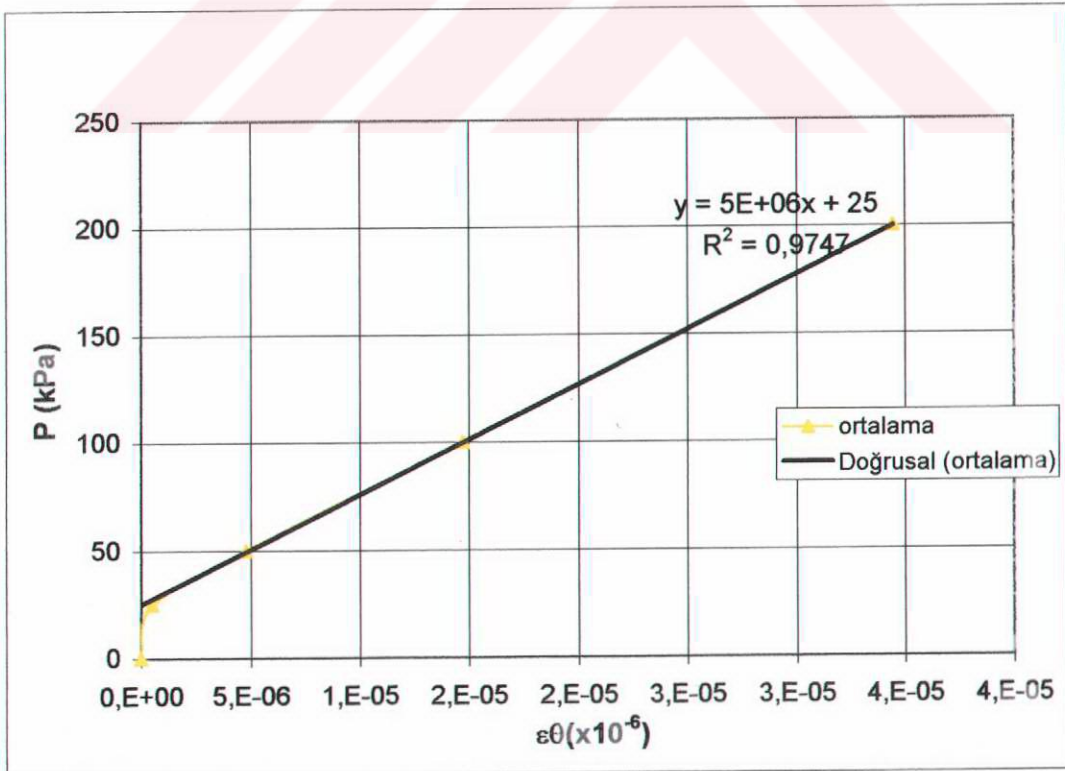
Yapılan kalibrasyon deneylerinde yatay yöndeki şekil değiştirmeler altı numaralı şekil değiştirme ölçer hariç, bir birine çok yakın çıkmıştır. Bu eğrilerin ortalama eğimini almak sonucu fazla değiştirmeyeceği düşünülerek, ortalama eğrinin denklemi Şekil 6.10’da gösterildiği gibi belirlenmiştir. Ortalama eğrinin denklemi $\sigma = \epsilon \times 5 \times 10^6 + 25$ dir.



Şekil 6.7 Kalibrasyon deneyinde ölçülen aksenal yöndeki şekil değiştirmeler.



Şekil 6.8 Kalibrasyon deneyinde ölçülen yatay yöndeki şekil değiştirmeler.



Şekil 6.9 Yatay yöndeki şekil değiştirmelerin ortalama eğrisi.

5 Deney Düzenegine Ait Bilgiler

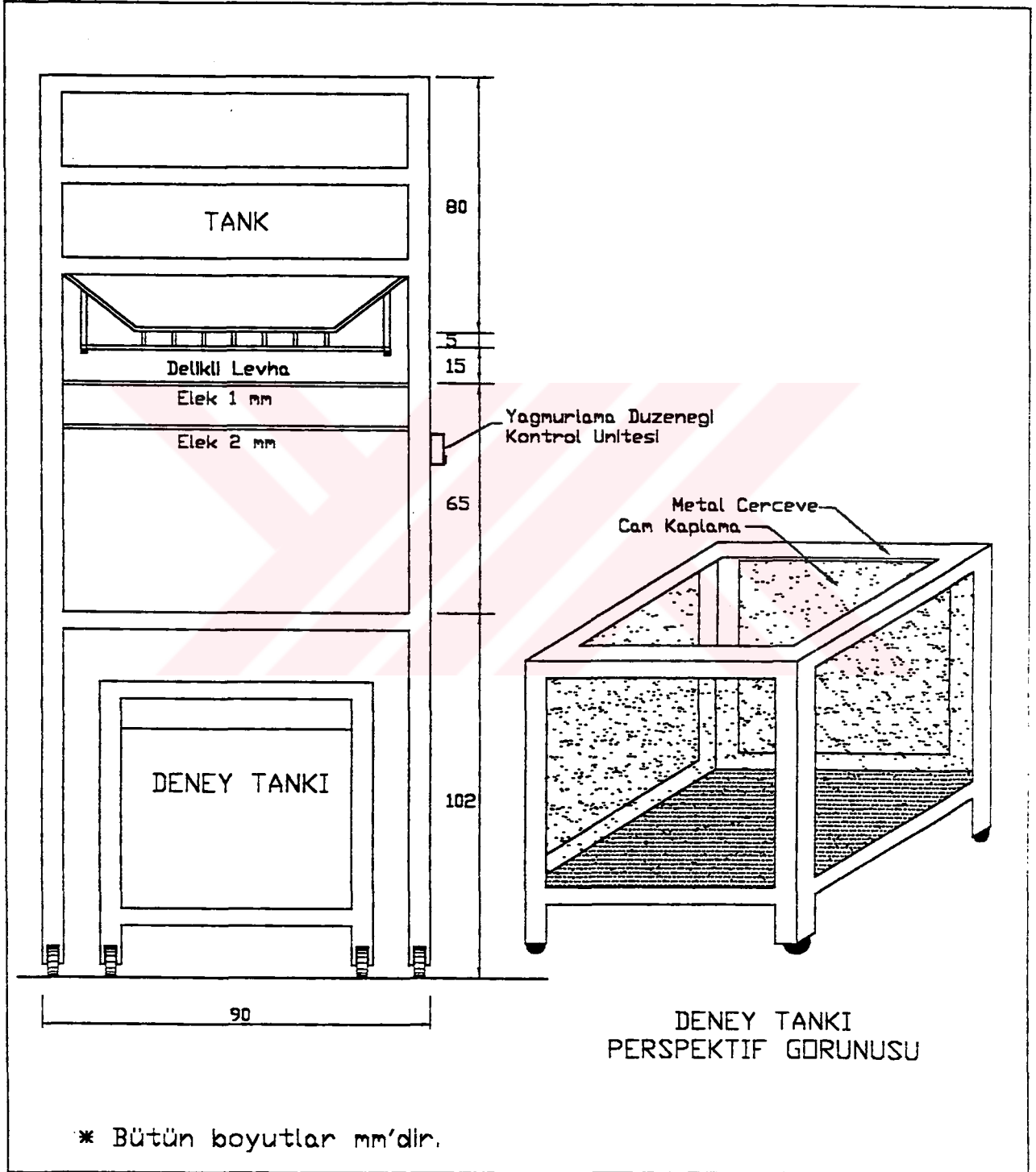
1 çalışmada düşey kazıkların yatay yükleme durumundaki davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle laboratuarda benzer bir çalışma için daha önce geliştirilen, kum akı ve yağmurlama düzenegi, yatay kazık yüklemesi yapılabilmesi için yeniden düzenlenmiştir. Bu alt bölümde deney düzeneginin ayrıntıları anlatılmıştır.

5.1 Model Deney Tankı

Model deneyler 70 cm x 95 cm x 75 cm (genişlik x uzunluk x yükseklik) boyutlarında bir model tankı içerisinde yapılmıştır. Model tankı, çelik profiller ile imal edilmiş olup kenarları kaplıdır. Böylece hem kenar sürtünmeleri azaltılmış hem de kumun yerleştirilmesi ve deney sırasında hareketi gözlenebilen bir düzenek elde edilmiştir. Deney tankına ait çizim Şekil 6.10'de ve tanka ait resim Şekil 6.11'de sunulmuştur.

5.2 Yağmurlama Düzenegi:

Kum, tank içerisine bir yağmurlama düzenegi yardımıyla yerleştirilmiştir (Şekil 6.10 ve Şekil 6.11). Bu işlemin amacı tüm deneylerde aynı boşluk oranına sahip ve tank içinde üniform olarak yerleştirilmiş bir kum yatağı elde etmektir. Tank içine kum yerleştirilmesi için deney tanklarında yer alan bir çok kum serme tekniğinden en uygun olarak yağmurlama tekniği kullanılmaktadır (Steenfelt, 1973). Bu yüzden bu tez çalışması sırasında, Danimarka Geoteknik Enstitüsü tarafından geliştirilen bir kum yağmurlama düzenegi örnek alınmış ve ülke koşullarına göre gerekli değişiklikler yapılarak imal edilmiş olan yağmurlama düzenegi kullanılmıştır. Yağmurlama düzenegi Şekil 6.10'da görüldüğü gibi 90 cm x 100 cm 80 cm (genişlik x uzunluk x yükseklik) boyutlarında ve zeminden 210 cm yükseklikte tekerlekli bir stand üzerine yerleştirilmiş bir tank, bu tankın altında yer alan ve bir elektrik motoru yardımıyla açılıp kapanan iki delikli plakadan ve bunların altında 15 cm aralıklarla yerleştirilmiş iki elekten oluşmaktadır. Bu eleklerin aralıkları 1 mm olup kumun bunlar yardımıyla saçılması (yağmurlanması) sağlanmaktadır. Bu eleklerden altta olanın model tankı üstünden yüksekliği 80 cm dir. Ayrıca yağmurlama işlemi sırasında oluşan hava akımının yağmurlama işlemi bozmasını önlemek için düzenek çevresi bir örtüyle kaplanmıştır (Berilgen, 1996).



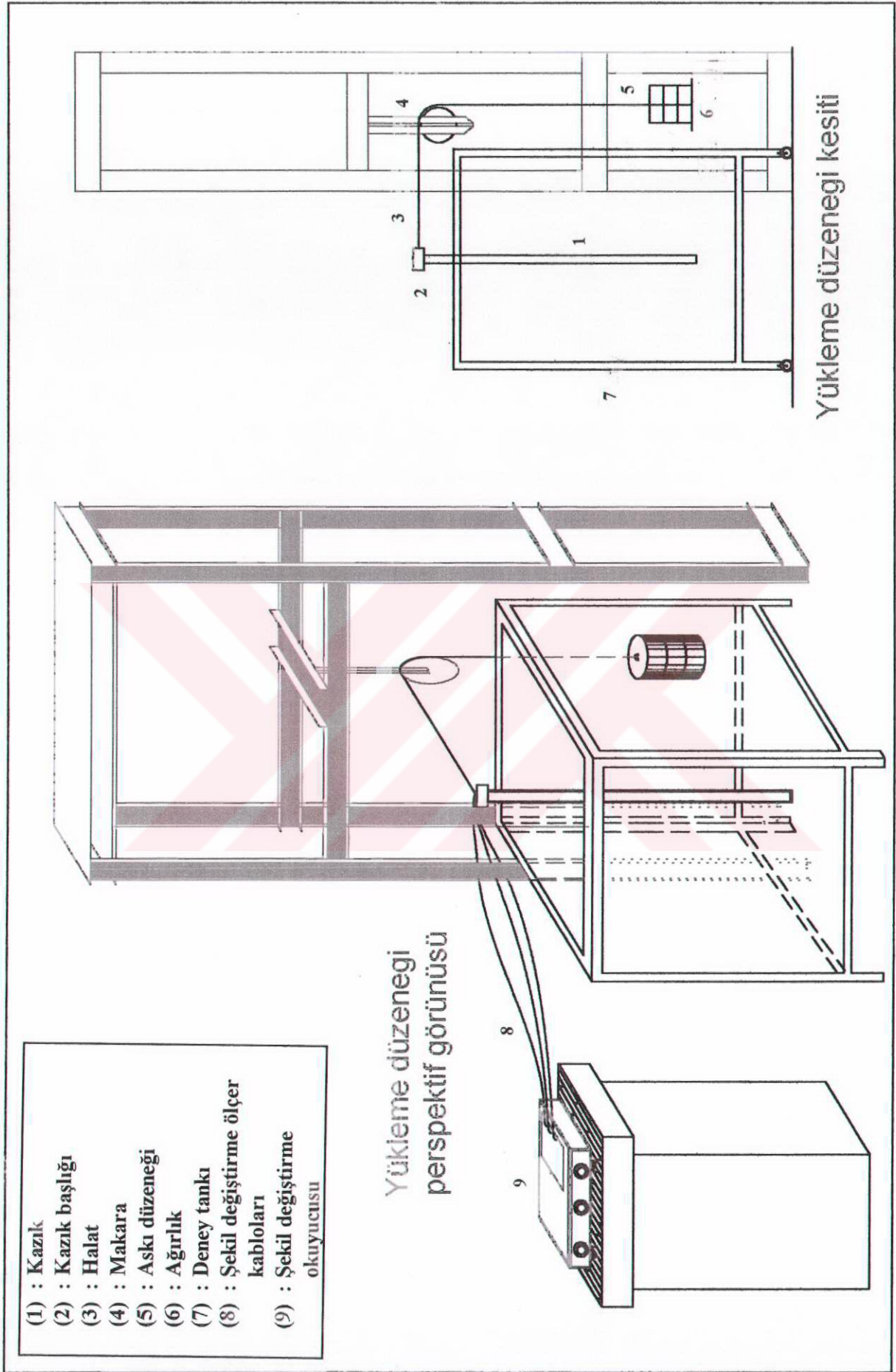
Şekil 6.10 Yağmurlama düzeneği ve deney tankı ayrıntıları.



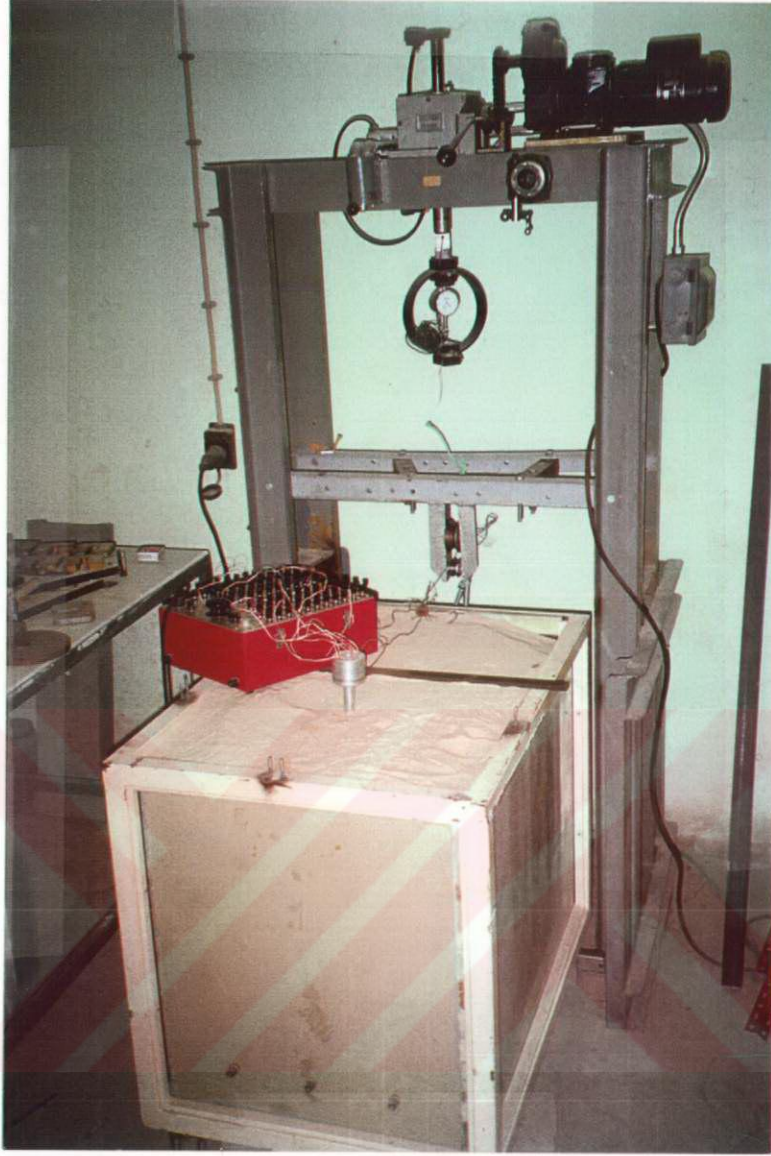
Şekil 6.11 Yağmurlama düzeneği ve deney tankı resmi.

6.5.3 Yükleme Düzeneği

Yatay yük, kazık başlığına bağlanan çelik halatın bir makaradan geçirilerek halatın diğer ucuna yük askısı yerleştirilerek uygulanmıştır, (Şekil 6.12 ve Şekil 6.13). Makara sistemi profillerden oluşturulan bir düzeneğe sabitlenmiştir. Hem profil çerçevesinin hem de makaranın uygulanan yük etkisiyle hareket etmemesi sağlanmıştır. Yatay yük, yük askısına konulan yükün, makara yardımı ile düşey yönden yatay yöne dönüştürülerek kazık başlığına uygulanmıştır.



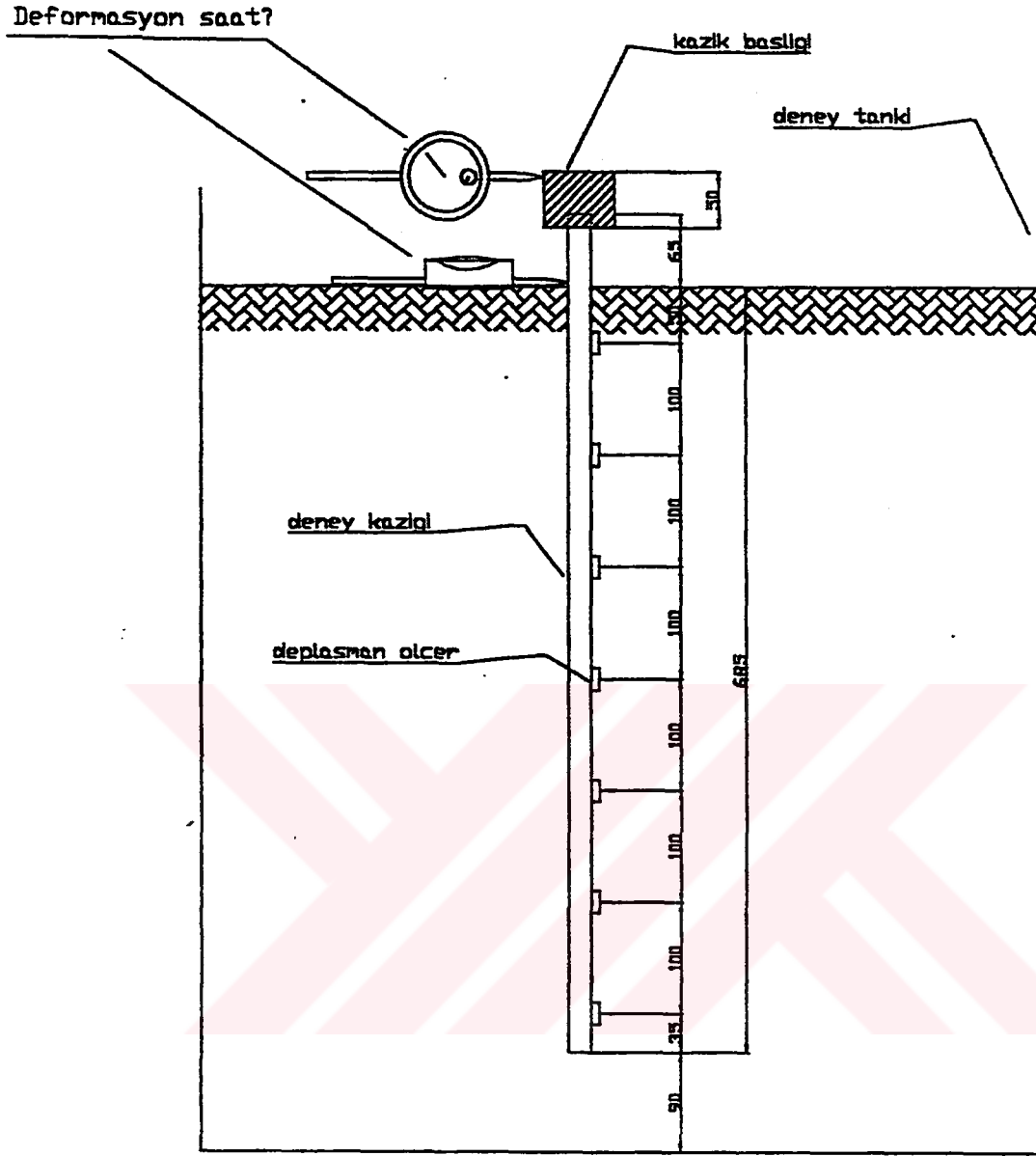
Şekil 6.12 Yük uygulama düzenegine ait ayrıntılar.



Şekil 6.13 Yük uygulama düzeneği resmi.

6.5.4 Kullanılan Ölçüm Aygıtları

Yukarda da anlatıldığı gibi kazık dış yüzeyine yedi adet şekil değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Deplasman ölçerler, uygulanan yükler altında kazık da oluşan birim şekil değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla yerleştirilmiştir. Kazığın zemin dışında kalan kısmında oluşan yerdeğiştirmeleri belirlemek amacı ile kazığın zemin yüzeyi dışında kalan iki noktasına deformasyon saatleri yerleştirilerek bu noktalardaki deplasmanlar ölçülmüştür. Deformasyon saatleri deney düzeneği ve okumaların sağlıklı alınabilmesi amacı ile kazık arka yüzüne dokundurulmuştur. Bu ölçüm aygıtları, Şekil 6.14'de gösterildiği gibi biri zemin yüzeyine ve diğeri kazık başlığı üstüne yerleştirilmiştir.



Şekil 6.9 Deneyde kullanılan ölçüm aygıtları ve düzeneğe yerleştirilme durumu.

6 Deneylerin Yapılışı

Deneylerin yapılışı aşağıda aşamalar halinde anlatılmaktadır.

Deneyde kullanılan kum, kovalar yardımı ile yağmurlama düzeneğine doldurulmuştur.

Model alüminyum kazık yüzeyi, deneyde kullanılan kum yapıştırılarak kaplanmıştır.

Kazık deney tankı içine bir merkezleyici aracılığı ile düşey olarak, alttan istenilen boşluk kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu merkezleyici kazığın hem altında kalması gereken boşluğun istenilen şekilde sağlanması, hem de kazığın düşeyden sapmasına engel olmak amacıyla geliştirilmiş ve düzeneğe sökülüp takılan bir sistem olarak yerleştirilmiştir.

Merkezleyici, yağmurlama işlemi sona erdiğinde sökülmeindedir. Merkezleyici boyutları ve yerleştirilme durumu, kumun tanka yerleştirilmesinde her hangi bir üniformsuzluğa neden olmayacak şekilde seçilmiştir ve bunun sağlandığı yağmurlama sırasında gözlenmiştir.

Model kazığın tanka yerleştirilmesinde, şekil değiştirme ölçerlerin, yükün uygulandığı doğrultuda olmasına dikkat edilmiştir. Yani şekil değiştirme ölçerler kazık pasif doğrultusuna yerleştirilmiştir.

Üzerine kazık yerleştirilmiş olan deney tankı, yağmurlama düzeneğinin altına Şekil 6.10 'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.

Yağmurlama sırasında ortaya çıkan hava akımını engellemek için düzenek etrafı yağmurlamadan önce kapatılır. Yağmurlama düzeneğinin delikleri, kumanda ünitesinden açılır ve kum deney tankına yerleştirilmiş olur.

Daha sonra deney tankı önceden hazırlanmış olan deney yerine itilerek taşınmıştır.

Kazık başlığı yerleştirildikten sonra çelik halatın bir ucu kazık başlığına diğer ucu yük askısına bağlanmıştır.

Yük kazık başlığına 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.12, 0.09, 0.06, 0.03 ve 0 kN olarak yükleme ve boşaltma şeklinde 0.01 kN luk eşit yük artırımları ile uygulanmıştır.

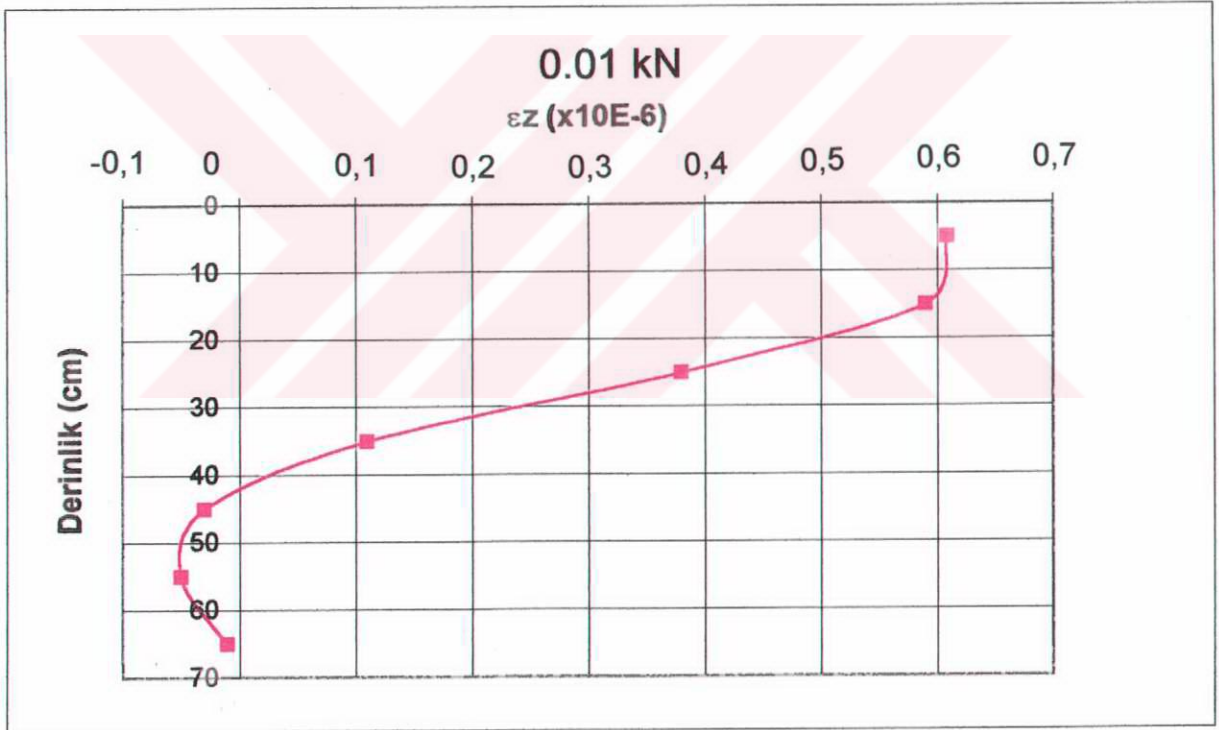
Uygulanan her yük artırımında kazığın dışında kalan kısmına yerleştirilmiş olan deplasman saatlerinden ve kazığın zemin içindeki kısmına yerleştirilmiş olan deplasman ölçerlere ait okumalar yapılmıştır. Daha sonra bir üst kademe yüklemesine geçilmiştir. Yapılan deneme yüklemelerindeki gözlemlerden her yükleme de beş dakika beklemenin yeterli olacağı anlaşılmıştır. Bu sürenin son bir dakikasında hem deplasman saatlerinde hem de deplasman ölçerlerde hiçbir hareket olmadığı gözlenmiştir.

Yükleme kademeleri tamamlandıktan sonra yatay yük 0.03 kN luk boşaltmalar şeklinde yapılmış ve burada da beş dakikalık bir süre beklenerek diğer yük azaltma kademesine geçilmiş ve gerekli okumalar alınarak deney tamamlanmıştır.

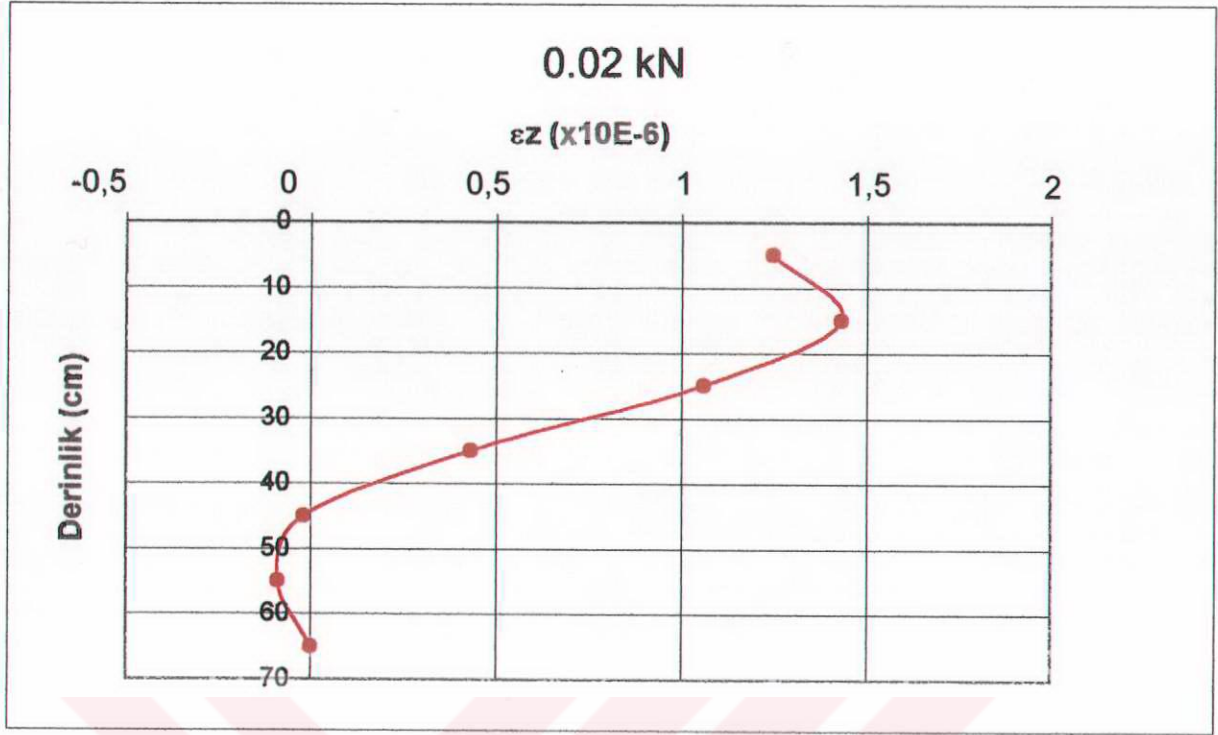
7 Deney Sonuçları

Yapılan deneylerde her yük kademesi için zemin yüzeyinden itibaren 0.5, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 ve 0.65 m derinliklerde şekil değiştirmeler ve kazığın zemin dışında kalan kısmına yerleştirilen deplasman saatlerinden deplasmanlar okunmuştur. Şekil değiştirme ölçerler ile yatay ($\epsilon\theta$) ve düşey (ϵz) yöndeki birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçlarının grafik gösteriminde karışıklık olmaması için sadece 0.01, 0.02, 0.05, 0.09, 0.12 ve 0.15 kN'luk yük kademelerine ait sonuçlar verilmiştir. Sunulan deney sonuçları, diğer yük

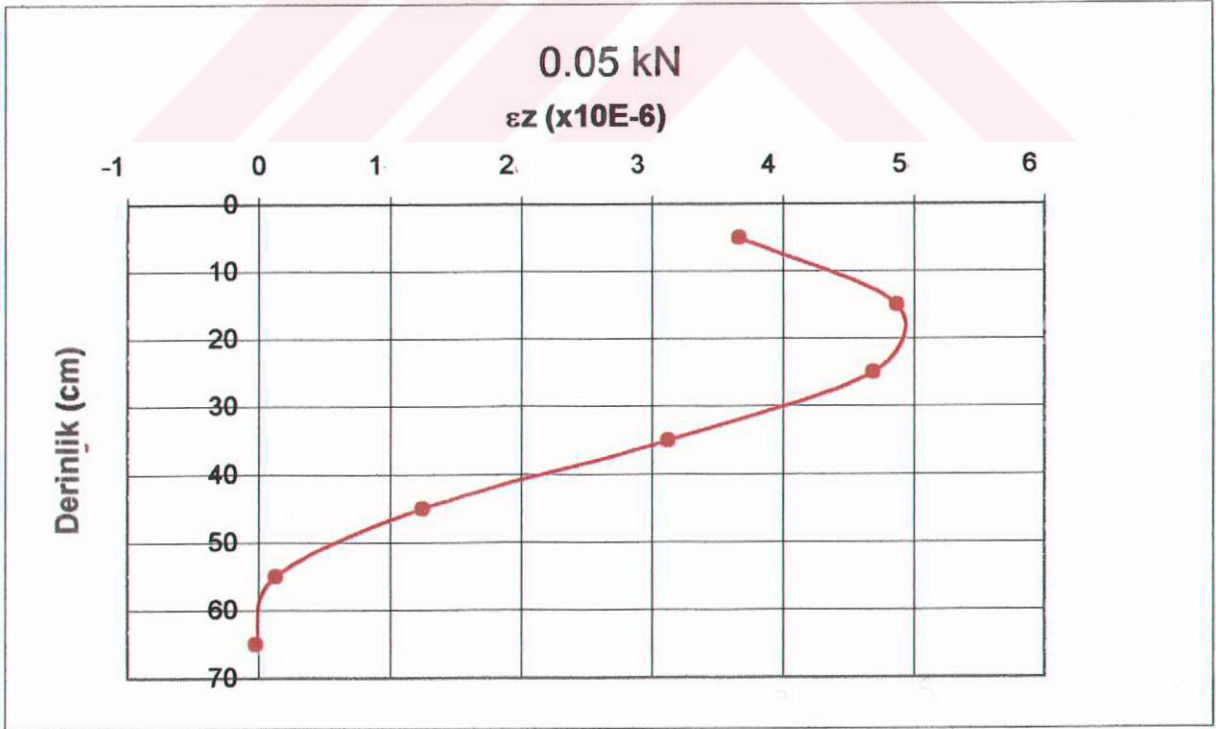
kademelerine ait sonuçlar ile uyum içindedir ve deney sonuçlarını temsil edebilecek karakteristiktir. Kazık başlığına etkitilen 1, 2, 5, 9, 12 ve 15 kg lık yükler için kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z), sırası ile Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmiştir. Yine aynı yükler altında kazık boyunca yatay yönde ölçülen birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ) sırası ile Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, ve Şekil 6.23 de verilmiştir. Her yük kademesinde ölçülen derinlikle-şekil değiştirme arasındaki ilişki aksenal, ϵ_z ve yatay, ϵ_θ yönler için sırası ile Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'de sunulmuştur. Deney sonucunda elde edilen sonuçların her derinlik için yük-şekil değiştirme ilişkisi ise aksenal, ϵ_z ve yatay, ϵ_θ yönler için sırası ile Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de sunulmuştur.



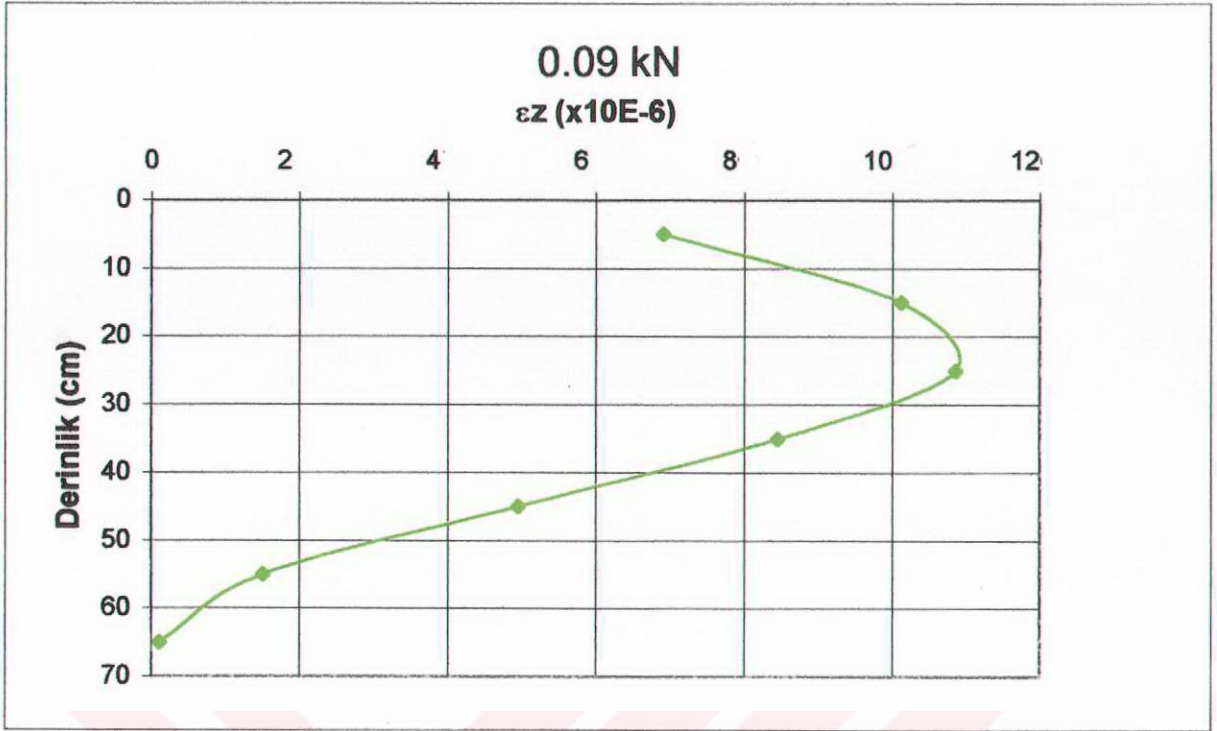
Şekil 6.12 0.01 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



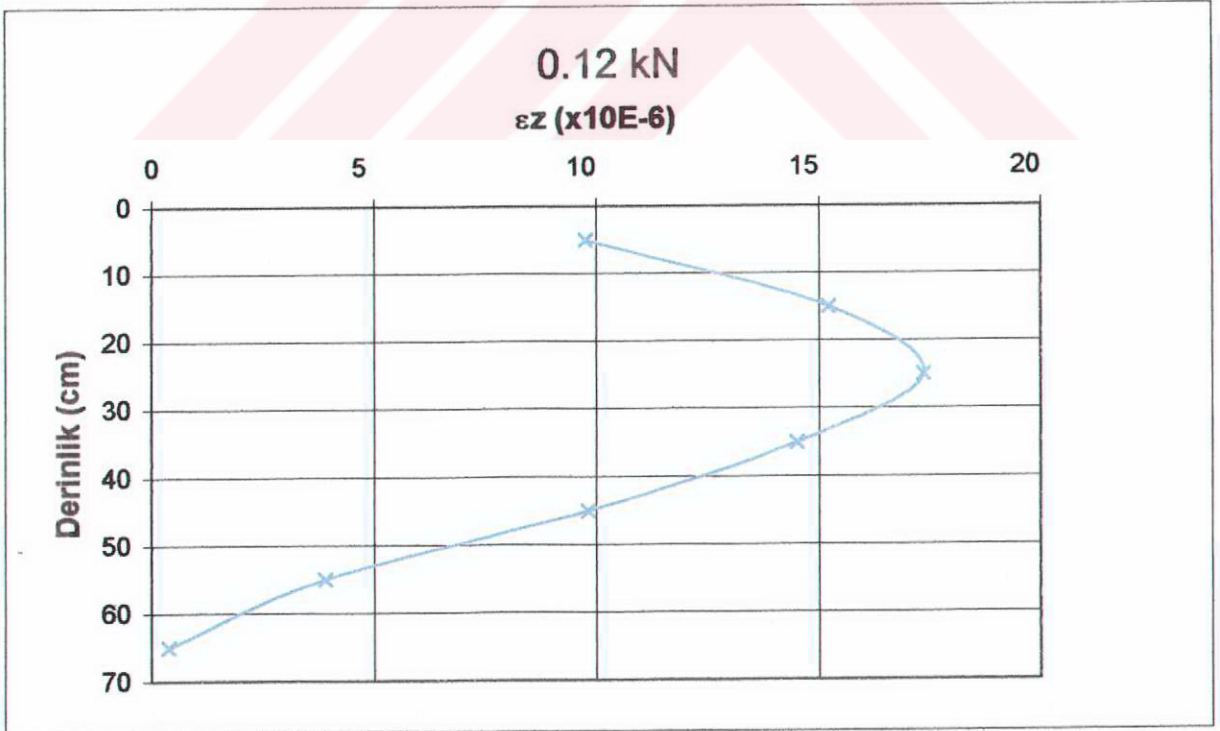
Şekil 6.13 0.02 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



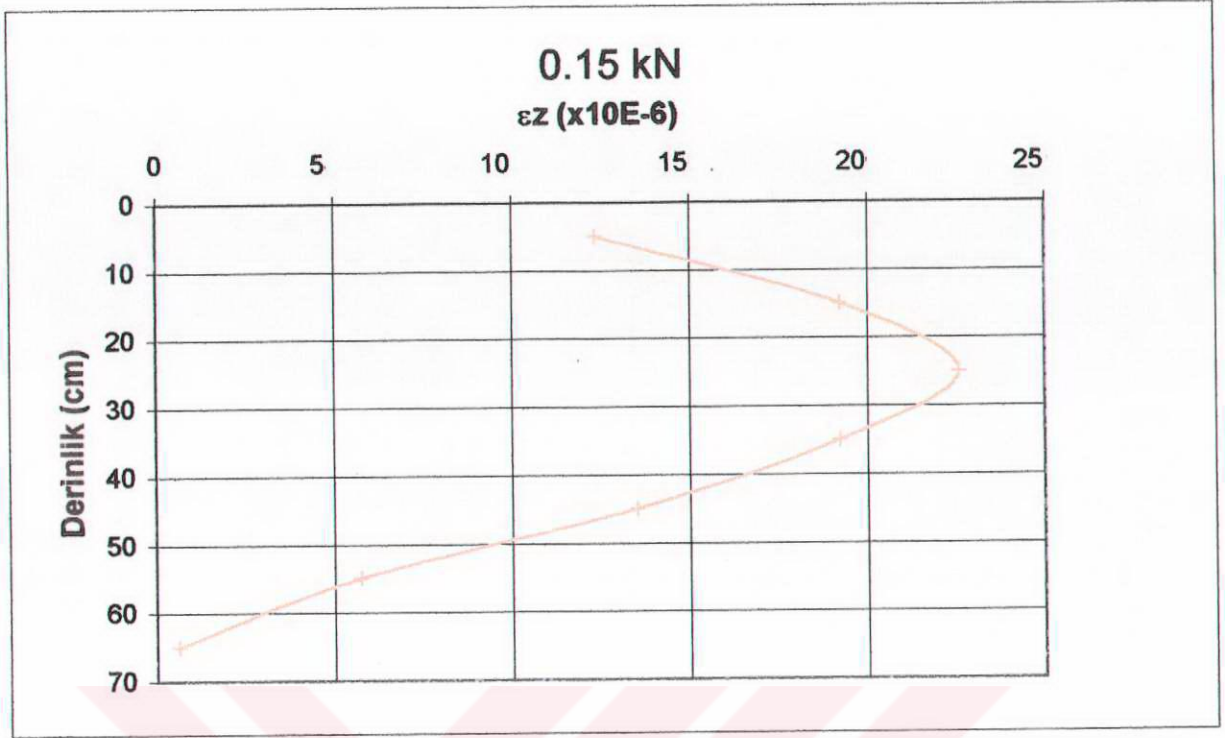
Şekil 6.14 0.05 kN lık yük altında kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



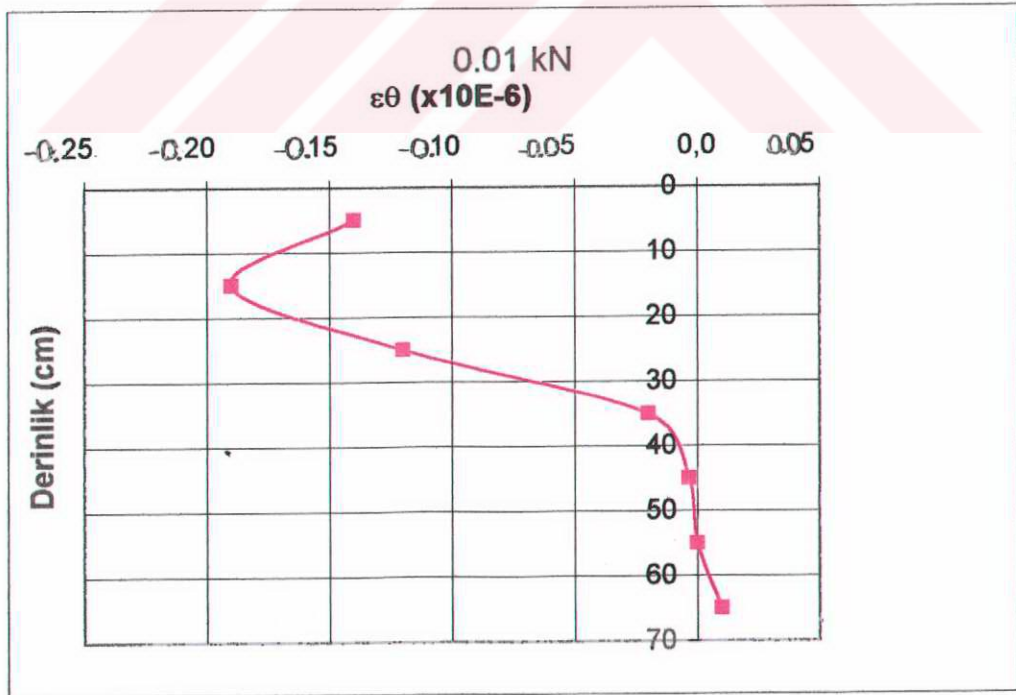
Şekil 6.15 0.09 kN lık yük altında kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



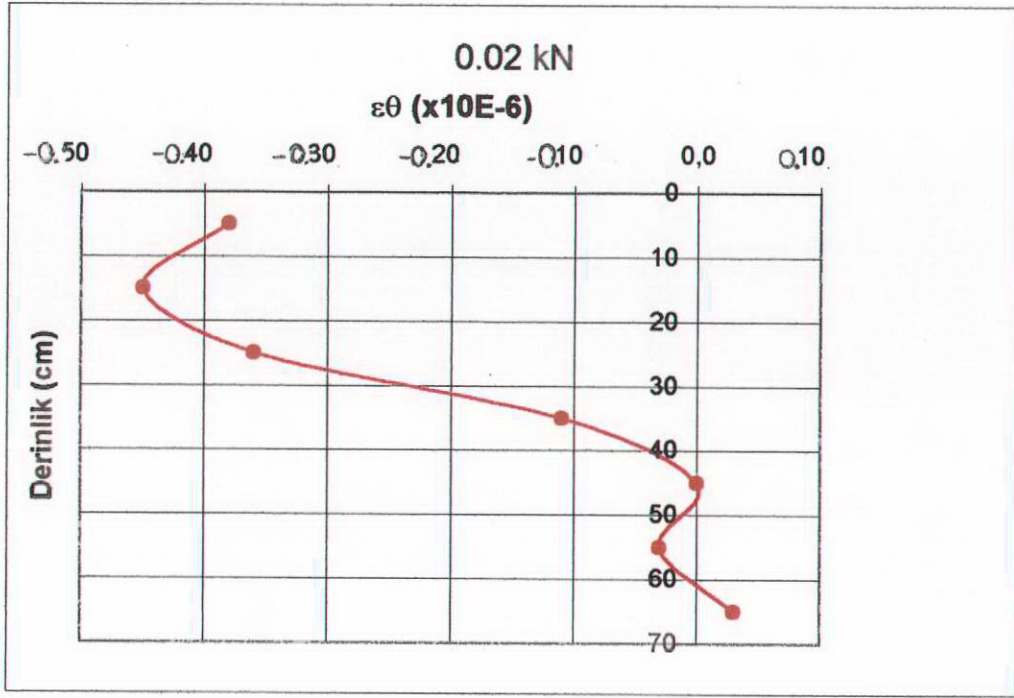
Şekil 6.16 0.12 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen aksenal yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



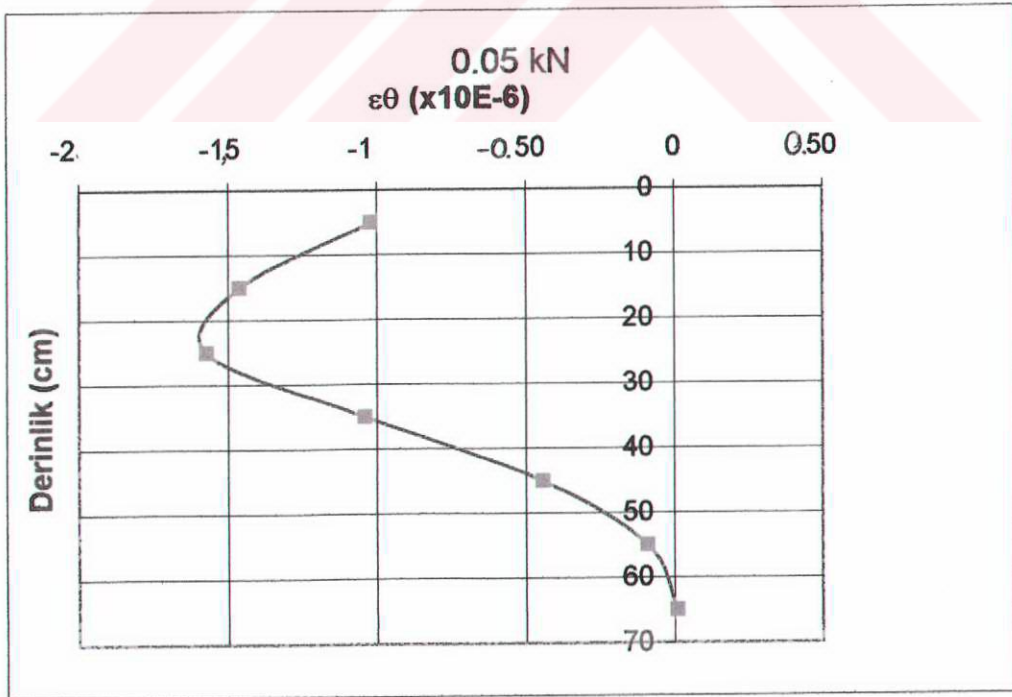
Şekil 6.17 0.15 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen aksel yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_z).



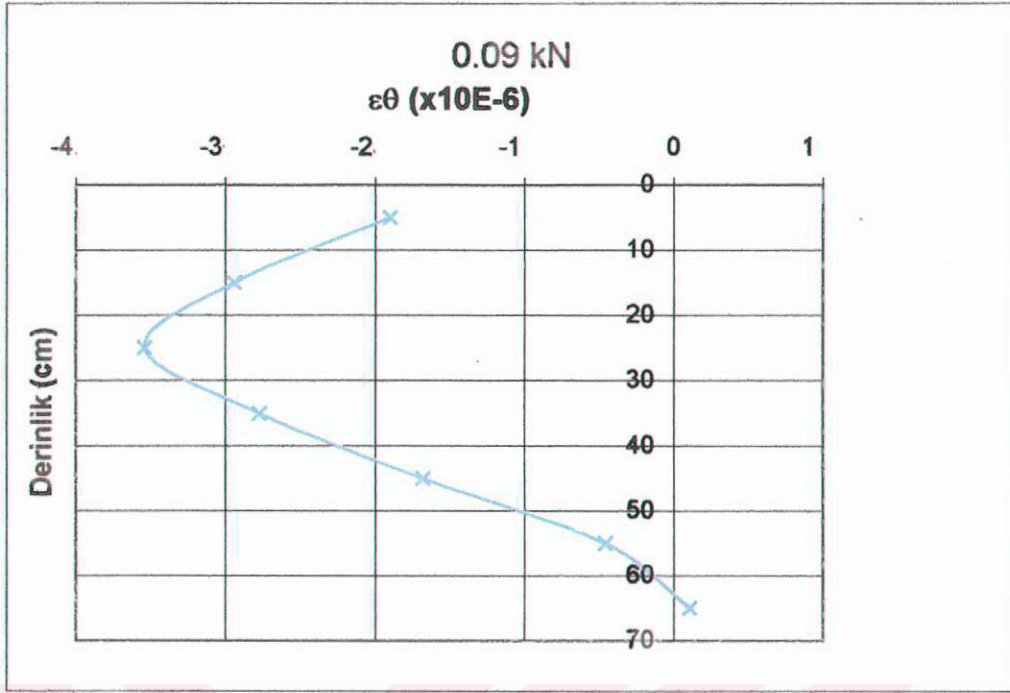
Şekil 6.18 0.01 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler (ϵ_θ).



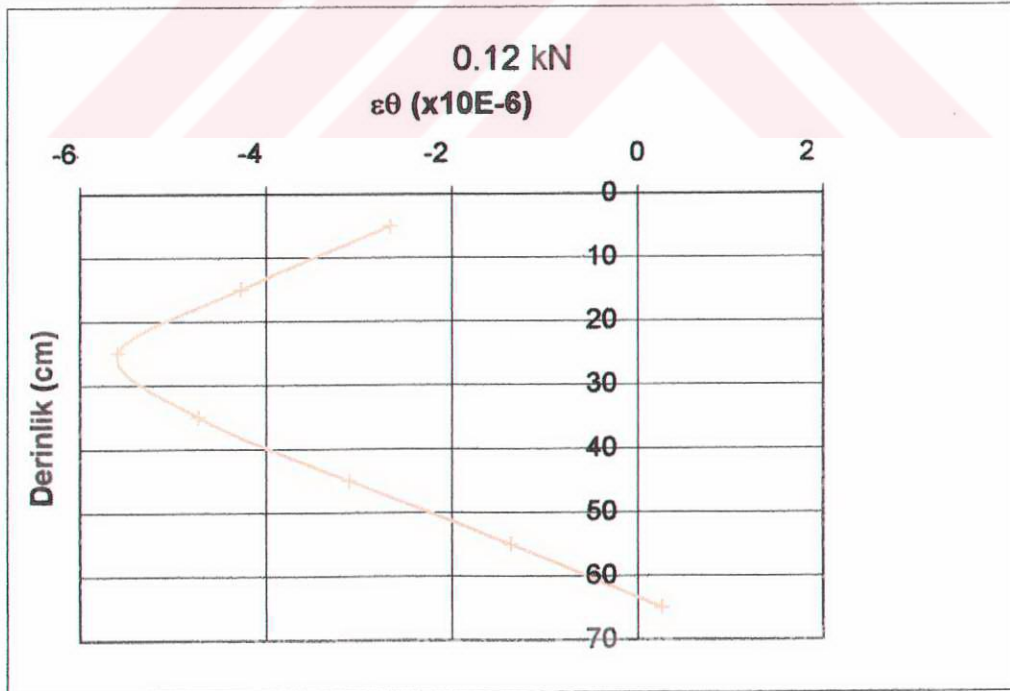
Şekil 6.19 0.02 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler ($\epsilon\theta$).



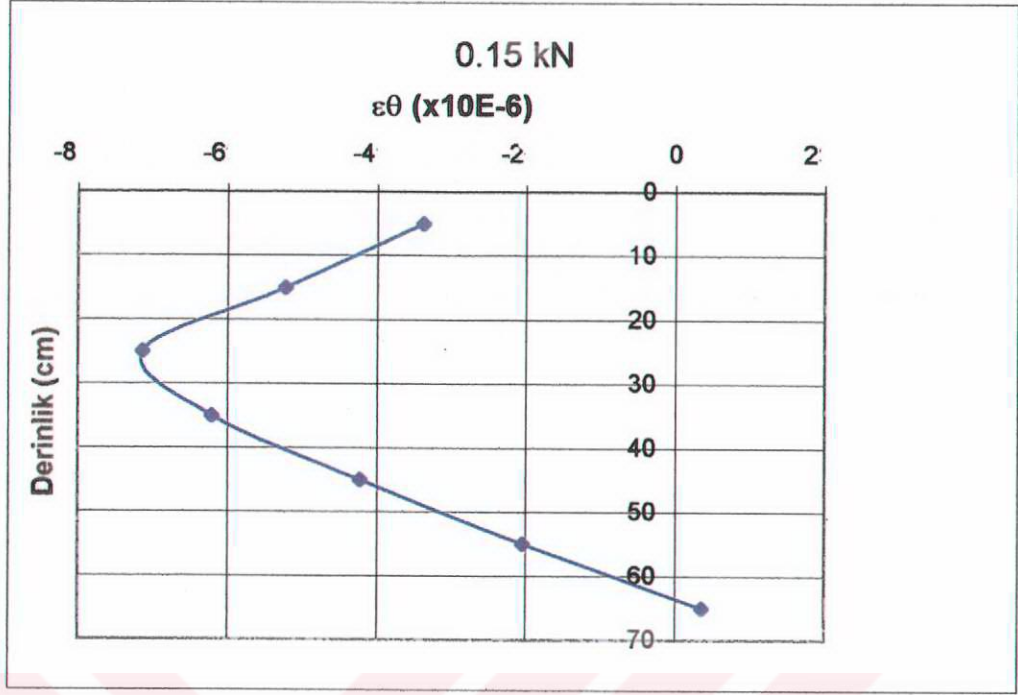
Şekil 6.20 0.05 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler ($\epsilon\theta$).



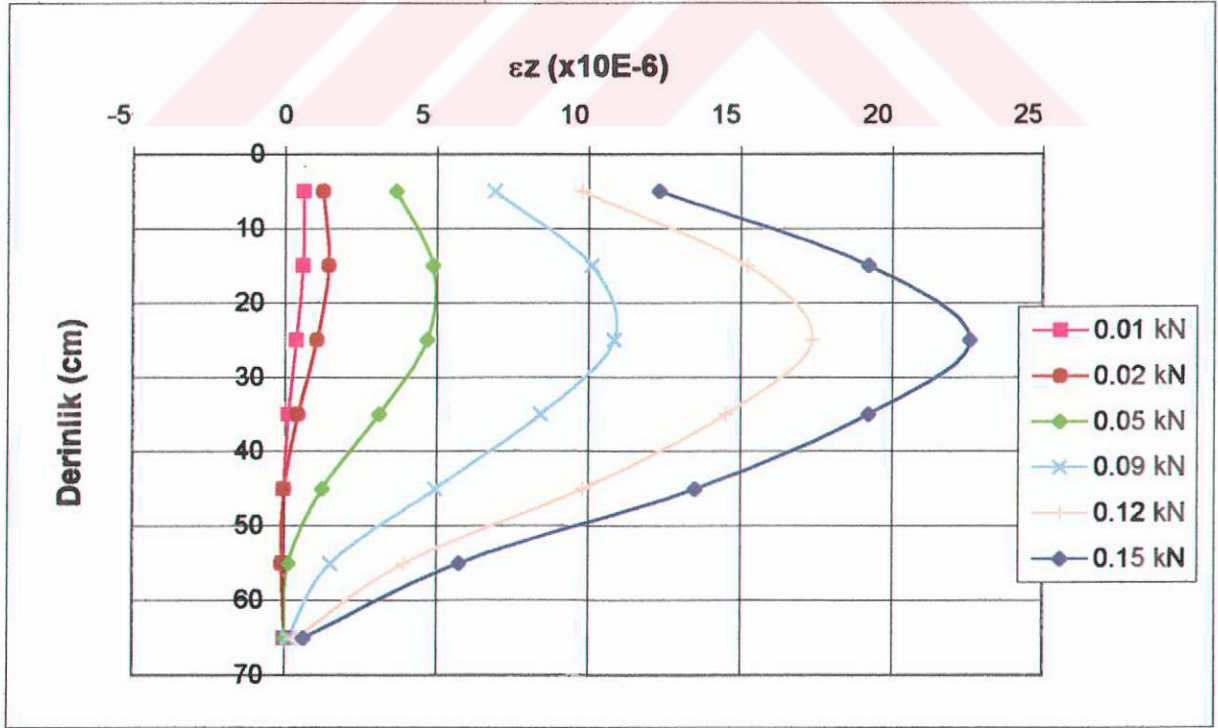
Şekil 6.21 0.09 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler ($\epsilon\theta$).



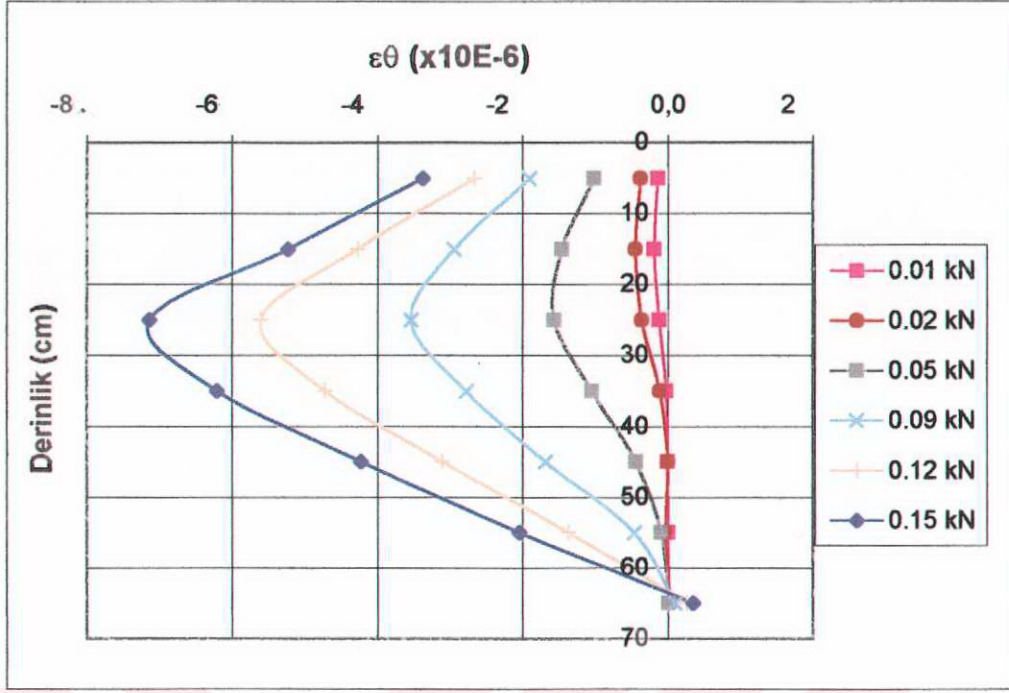
Şekil 6.22 0.12 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler ($\epsilon\theta$).



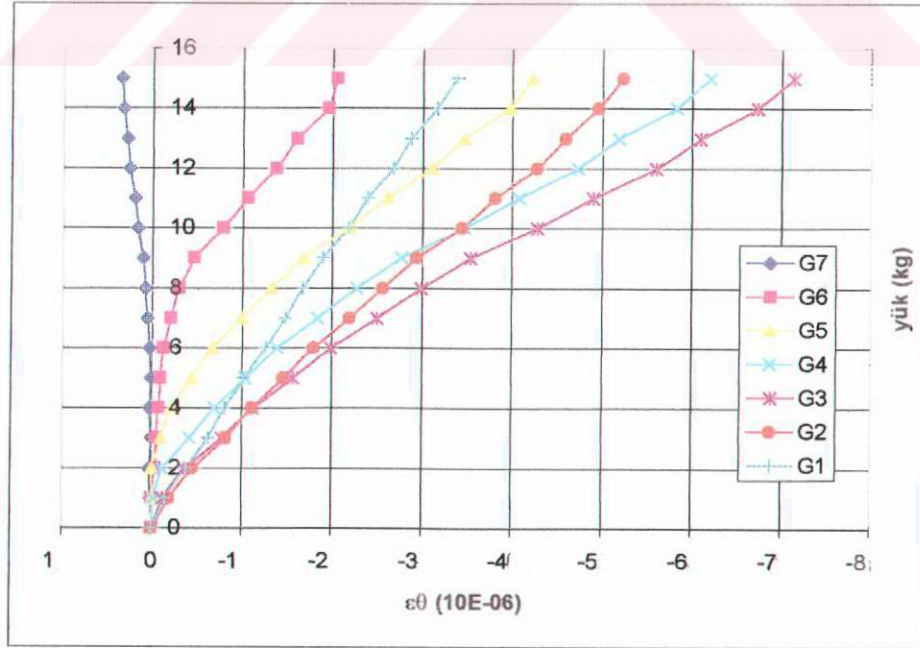
Şekil 6.23 0.15 kN luk yük altında kazık boyunca ölçülen yatay yöndeki birim şekil değiştirmeler ($\epsilon\theta$).



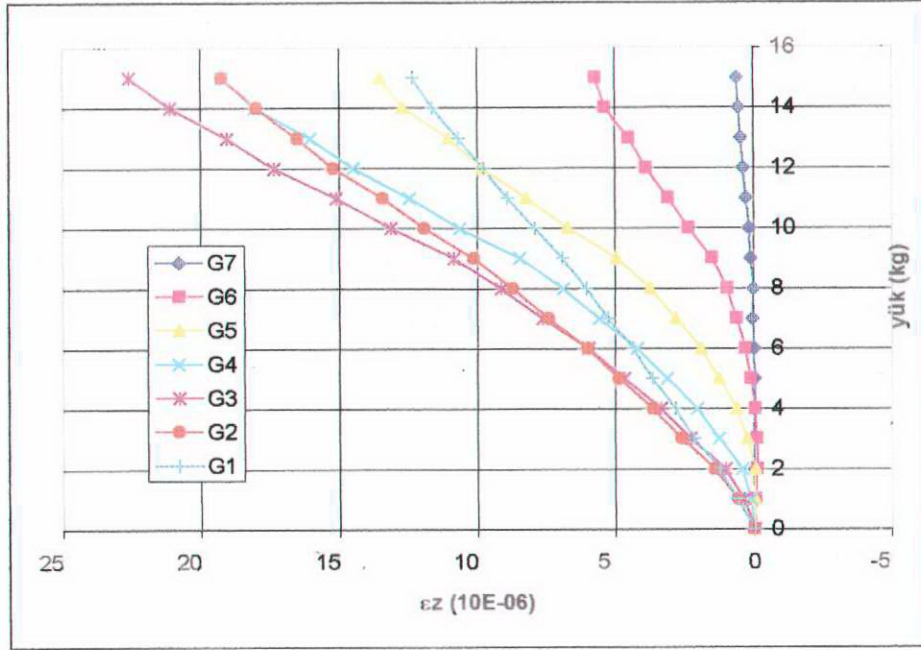
Şekil 6.24 Model deneyin her yük kademesinde kazık boyunca ölçülen düşey, ez yöndeki şekil değiştirmelerin derinlikle değişimi.



Şekil 6.25 Model deneyin her yük kademesinde kazık boyunca ölçülen yatay, ϵ_{θ} yönündeki şekil değiştirmelerin derinlikle değişimi.



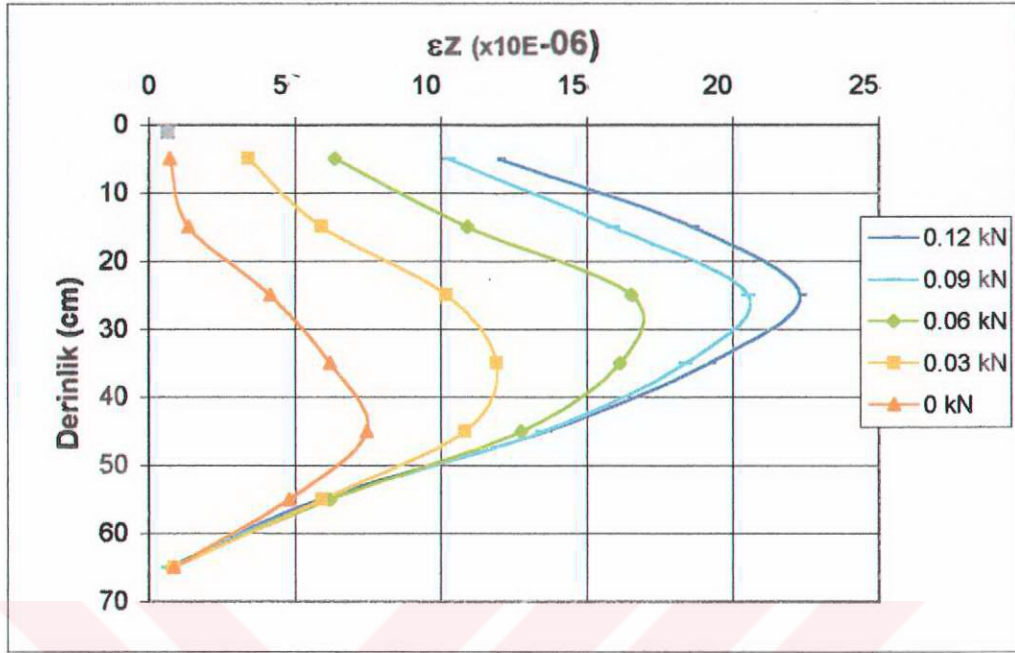
Şekil 6.26 Kazık boyunca her şekil değiştirme ölçerinden elde edilen yatay, ϵ_{θ} yönündeki yük-şekil değiştirme ilişkisi.



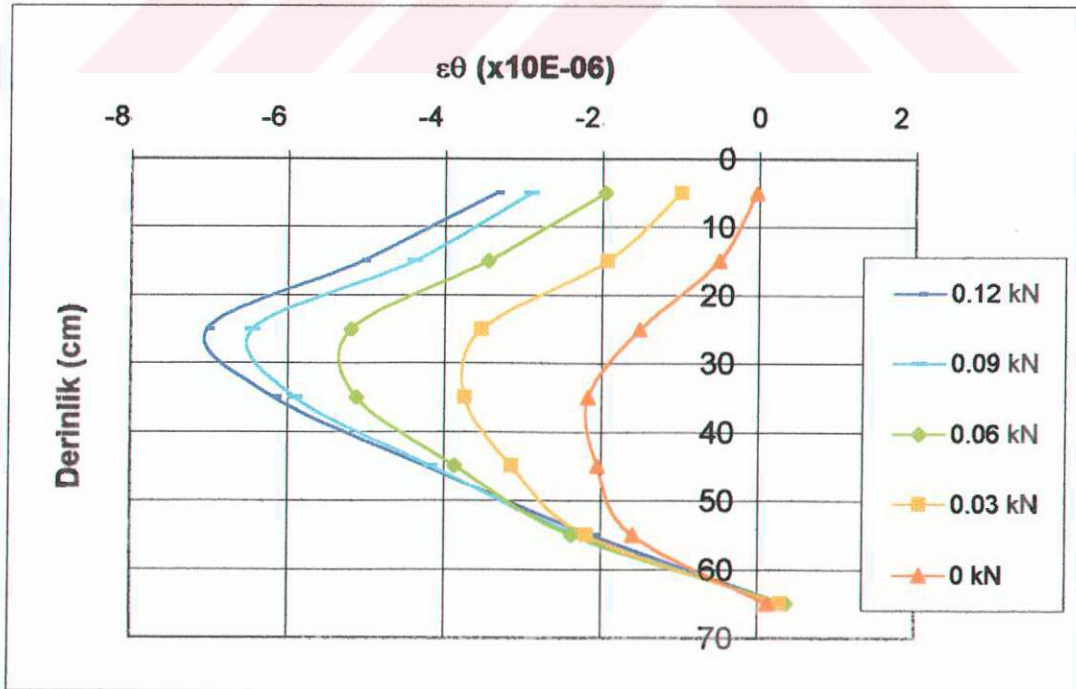
Şekil 6.27 Kazık boyunca her şekil değiştirme ölçerden elde edilen düşey , ez yöndeki yük-şekil değiştirme ilişkisi.

Yapılan deneyler sırasında maksimum yüke çıkıldıktan sonra, 0.03 kN luk yük azaltmaları yapılarak 0.12, 0.09, 0.06 ve 0.03 kN luk yük kademelerinde boşaltma işlemi ile şekil değiştirme ölçümleri de yapılmıştır. Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da boşaltma işlemi sırasında, sırası ile düşey ve yatay yönde okunan şekil değiştirmeler sunulmaktadır. Ayrıca yatay yükleme sırasında 0.03, 0.06, 0.09 ve 0.12 kN yük kademelerinde elde edilen şekil değiştirmeler, aynı yük kademelerine ait boşaltma şekil değiştirmeleri ile aynı grafikte sunulmaktadır (Şekil 30, Şekil 31, Şekil 32, Şekil 33)..

Yüklemeler sırasında, kazığın zemin seviyesinde ve kazık başında ölçülen deplasmanlar Şekil 6.38'de sunulmuştur.



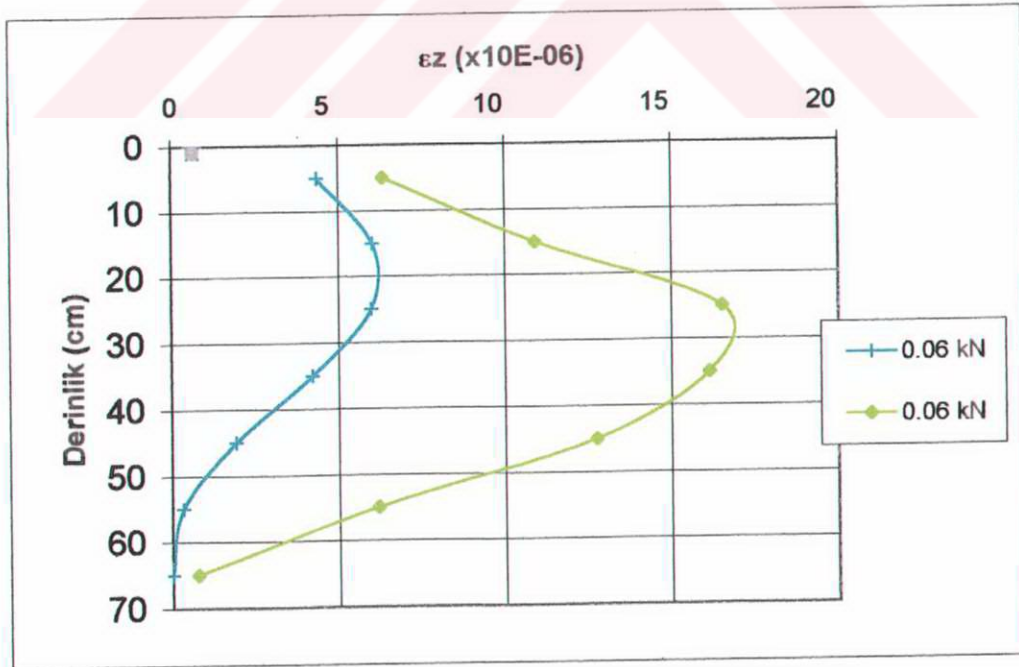
Şekil 6.28 Deneyin yük boşaltması aşamasında düşey yönde ölçülen şekil değiştirmeler.



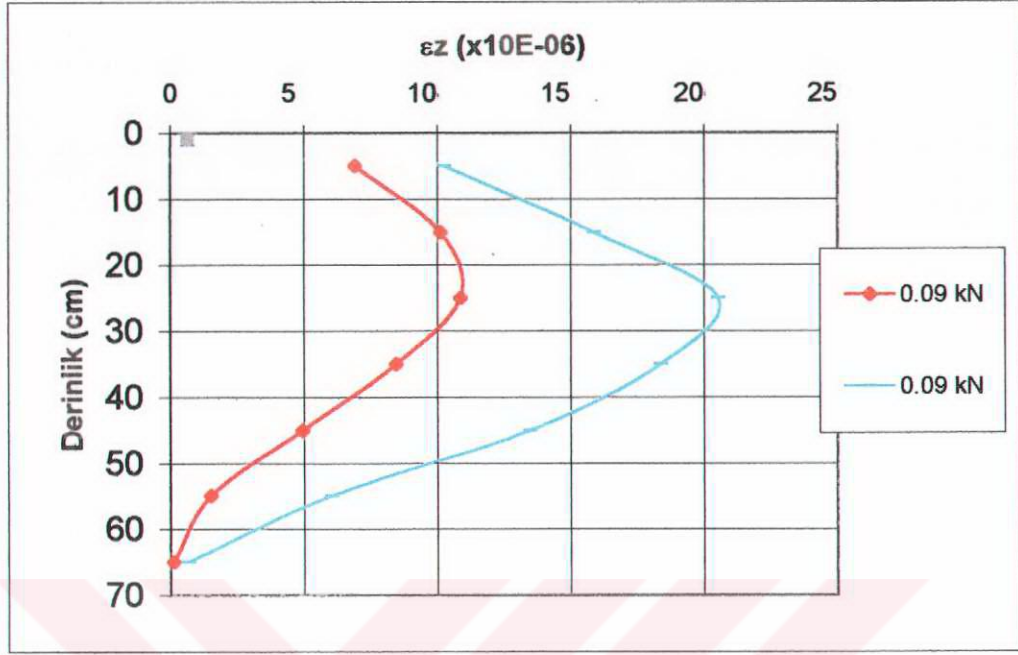
Şekil 6.29 Deneyin yük boşaltması aşamasında yatay yönde ölçülen şekil değiştirmeler.



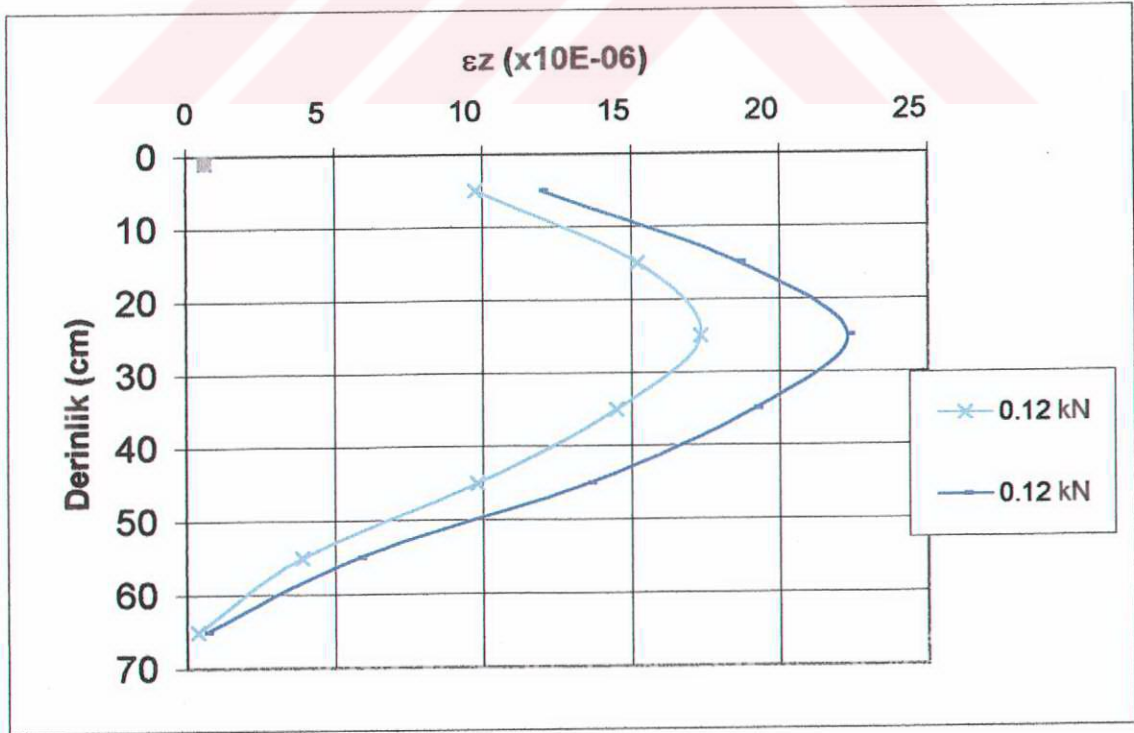
Şekil 6.30 0.03 kN luk yükte, düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



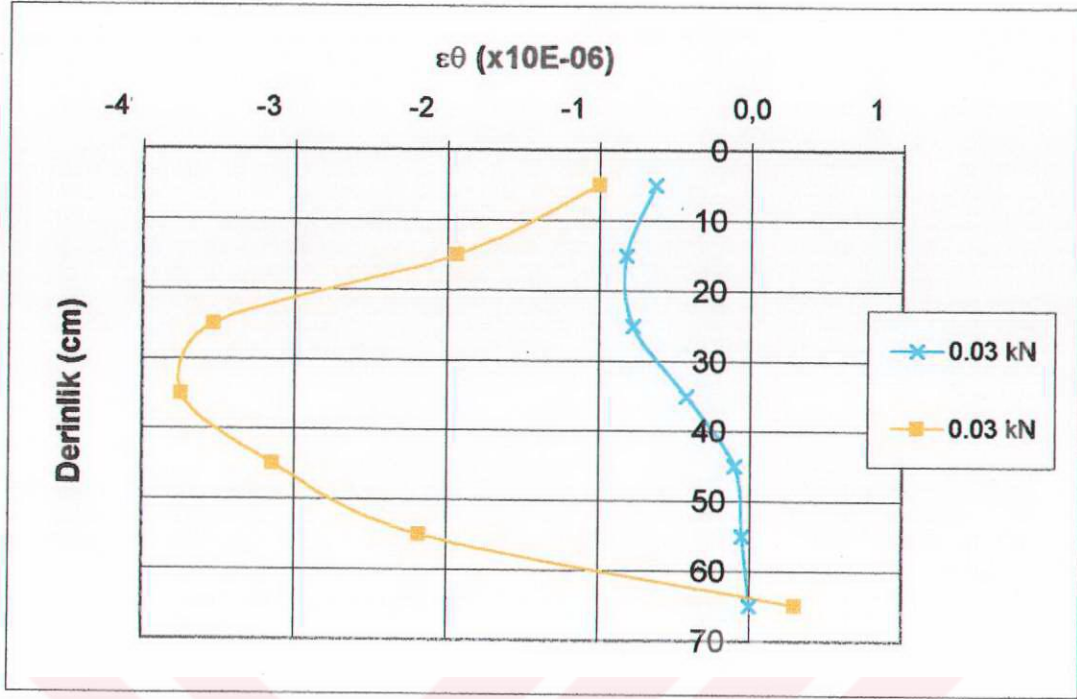
Şekil 6.31 0.06 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



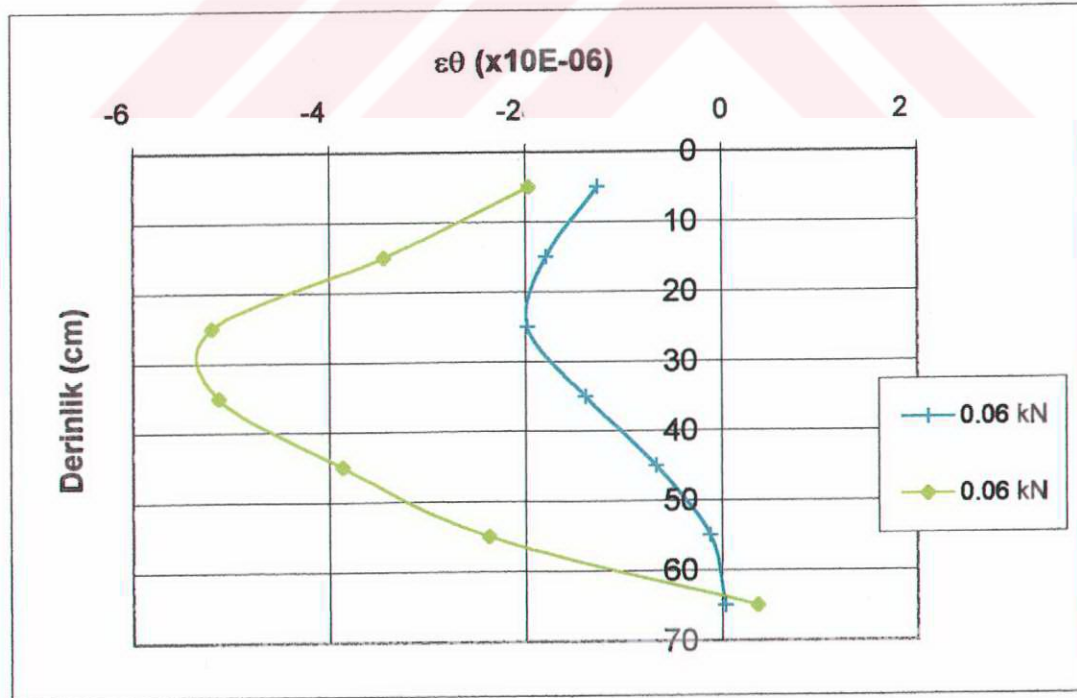
Şekil 6.32 0.09 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



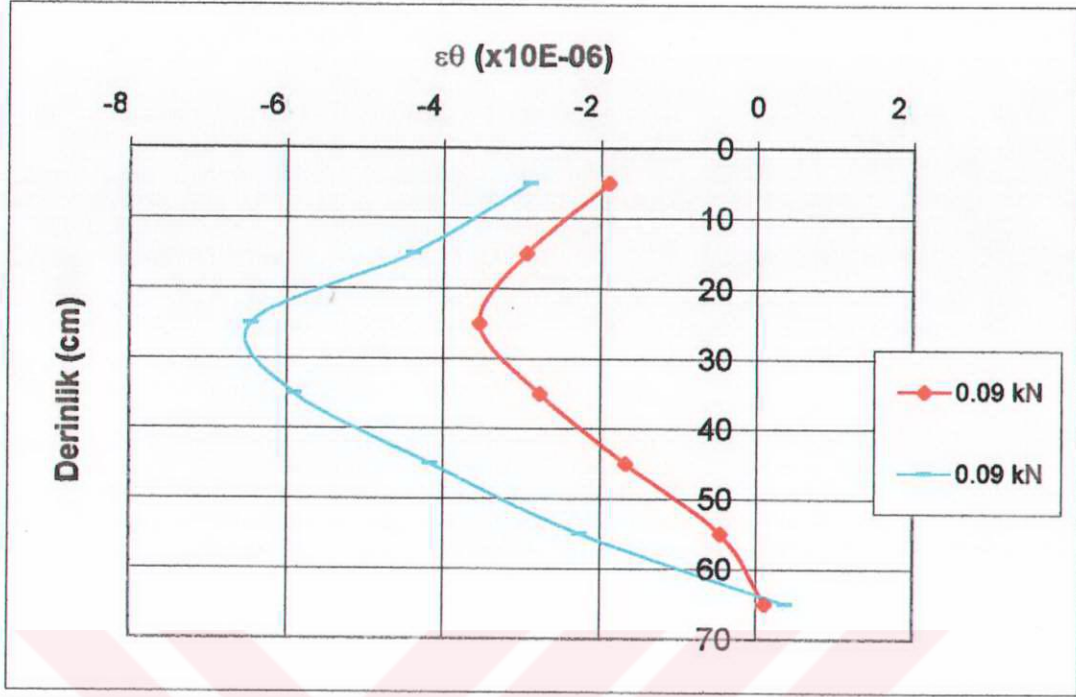
Şekil 6.33 0.12 kN luk yükte düşey yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



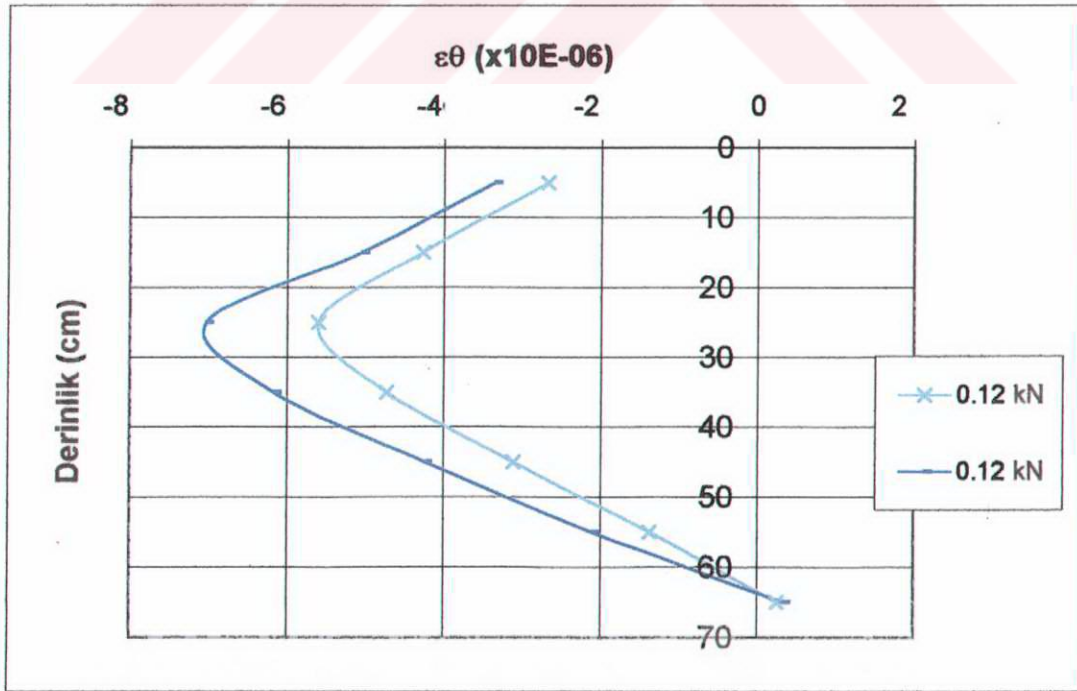
Şekil 6.34 0.03 kN luk yükte, yatay yönde ölçülen yüklenme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



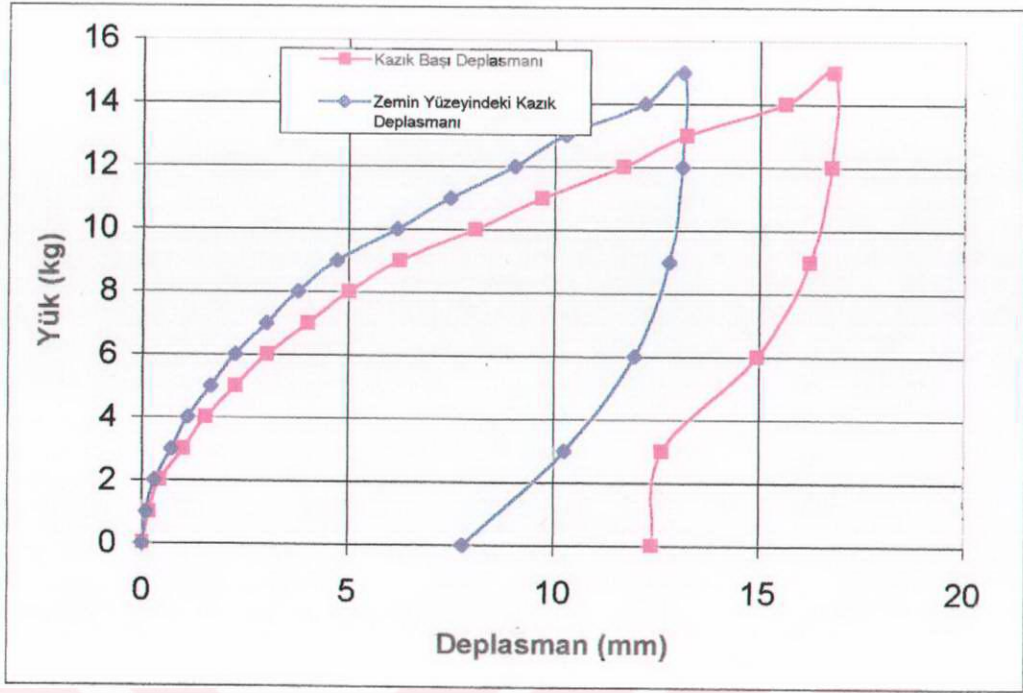
Şekil 6.35 0.06 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yüklenme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



Şekil 6.36 0.09 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



Şekil 6.37 0.12 kN luk yükte yatay yönde ölçülen yükleme ve boşaltma şekil değiştirmeleri.



Şekil 6.38 Model kazık üzerinde yapılan yüklemelerde deplasman saatlerinde elde edilen sonuçlar.

7. MODEL KAZIK VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde model kazık üzerinde yapılan yüklemelerden elde edilen sonuçların, kaynaklardaki tasarım yöntemleriyle karşılaştırılabilmesi için yapılan değerlendirmeler sunulmuştur. Deneylerde elde edilen şekil değiştirmelerden kazık boyunca zemin basıncının değişimi belirlenmiştir. Zemin basıncının belirlenmesinde kalibrasyon deneyleri kullanılmıştır. Şekil değiştirmelerden kaynaklardaki yöntemler yardımı ile kazık boyunca yatay deplasmanlar elde edilmiş ve sonlu farklar yöntemi ile kazık boyunca moment değişimi elde edilmiştir. Broms yöntemi kullanılarak kazık son taşıma gücü ve kazığın zemin seviyesindeki yatay deplasman hesaplanmıştır. Ayrıca yatak katsayısı yaklaşımı ile kazık boyunca deplasman ve eğilme momenti değişimi de hesaplanarak, sunulmuştur.

7.1 Model Kazık ve Zemine Ait Hesap Parametreleri

Kaynaklardaki hesap yöntemleriyle model deneyden elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için hesaplar yapılmış olup kazık ve zemine ait hesap parametreleri aşağıdadır.

Kazık bilgileri:

Kazık malzemesi = içi boş kesitli alüminyum

$$E_{\text{kazık}} = 6.9 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$D = \text{dış çap} = 0.022 \text{ m}$$

$$t = \text{kazık et kalınlığı} = 0.00125 \text{ m}$$

$$L = \text{kazık gömülü boyu} = 0.685 \text{ m (kazık toplam boyu}=0.75 \text{ m)}$$

$$e = \text{yatay yükün uygulandığı yerin zemin yüzeyine uzaklığı} = 0.055 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{akma}} = \text{kazık akma gerilmesi} = 1.6 \times 10^5 \text{ kPa}$$

Zemin bilgileri:

$$\Phi_d = 40^\circ \text{ (Berilgen 1996'dan)}$$

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$n_b = 10000 \text{ kN/m}^3 \text{ (kaynaklardan zemin sıklığına göre önerilen değer)}$$

Kazık kırılma biçiminin saptanması:

Kazık kesit alanı;

$$A = \frac{\pi \times (D^2 - D_1^2)}{4} = \frac{3.14 \times (0.022^2 - 0.0195^2)}{4} = 8.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Kazık atalet momenti:

$$I = \frac{\pi \times (D^4 - D_1^4)}{64} = \frac{3.14 \times (0.022^4 - 0.0195^4)}{64} = 4.4 \times 10^{-9} m^4$$

$$EI = 6.9 \times 10^7 \times 4.4 \times 10^{-9} = 0.3$$

Kazık mukavemet momenti:

$$W = \frac{\pi \times (D^4 - D_1^4)}{32 \times D} = \frac{3.14 \times (0.022^4 - 0.0195^4)}{32 \times 0.021} = 4 \times 10^{-7} m^3$$

Zemin pasif toprak-basınç katsayısı:

$$K_p = \frac{1 + \sin \Phi_d}{1 - \sin \Phi_d} = \frac{1 + \sin 40}{1 - \sin 40} = 4.59$$

Kazık akma momenti:

$$M_{akma} = Mu = \sigma_{akma} \times W = 1.6 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-7} = 6.4 \times 10^{-2} \text{ kNm}$$

Kazığın kırılma biçiminin belirlenmesi amacıyla önce model kazığın kısa ve uzunluk kriteri kontrol edilmiştir. Granüler zeminlerde uzunluk

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} = \sqrt[5]{\frac{0.3}{10000}} = 0.124$$

$$\frac{L}{T} = \frac{0.685}{0.124} = 5.5 > 4 \quad \text{olduğundan model kazık bükülebilir uzun kazık grubuna girmektedir.}$$

7.2 Broms Yöntemi İle Model Kazık Taşıma Gücü ve Deplasman Hesabı

Model deney çalışmasında tutulu başlı bir kazık modellenmekle birlikte, kazığın serbest başlı olması durumunda nasıl bir davranış göstereceğini de anlayabilmek için Broms teorisine göre serbest ve tutulu başlı durumları için son taşıma gücü ve deplasman tahmini hesapları yapılmıştır.

Tutulu Başlı Model Kazık İçin Hesaplar

Taşına bilecek son yatay yük:

Şekil 3.10.b'den son yatay yükü hesaplamak için;

$$\frac{M_u}{D^4 \gamma' K_p} = \frac{0.064}{0.022^4 \times 21 \times 4.59} = 3132$$

$$e/D = 0.0055/0.022 = 0.25$$

Şekil 3.10.b'den $Q_u/K_p D^3 \gamma = 570$ buradan $Q_u = 0.53 \text{ kN} = 53 \text{ kg}$

Maksimum yük altında kazık başlığında oluşması beklenen maksimum deplasman:

Şekil 4.1'den yatay deplasmanı hesaplamak için;

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} = \sqrt[5]{\frac{10000}{0.3}} = 8.027$$

$$\eta L = 8.027 \times 0.685 = 5.66$$

$$e/L = 0.055/0.685 = 0.08$$

Şekil 4.1'den $y_o(EI)^{3/5} n_h^{2/5} / Q_u L = 0.13$ buradan $y_o = 0.0025 \text{ m}$

Model deneyde uygulanan maksimum yük $Q = 0.15 \text{ kN}$ yük için

$$y_o = 0.00069 \text{ m}$$

Maksimum momentin oluştuğu derinlik:

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma D K_p}} = 0.82 \sqrt{\frac{0.15}{21 \times 0.022 \times 4.59}} = 0.23 \text{ m}$$

Serbest Başlı Model Kazık İçin Hesaplar

Taşınabilecek nihai yatay yük:

Şekil 3.10.b'den nihai yatay yükü hesaplamak için;

$$\frac{M_u}{D^4 \gamma' K_p} = \frac{0.03}{0.022^4 \times 21 \times 4.59} = 3132$$

Şekil 3.10.b'den $Q_u/K_p D^3 \gamma = 400$ buradan $Q_u = 0.35 \text{ kN} = 35 \text{ kg}$

Maksimum yük altında kazık başlığında meydana gelmesi beklenen maksimum deplasman:

Şekil 4.1'den $y_o(EI)^{3/5} n_h^{2/5} / Q_u L = 0.38$ buradan $y_o = 0.47 \text{ cm}$

Model deneyde uygulanan maksimum yük $Q = 0.15 \text{ kN}$ yük için

$$y_o = 0.002 \text{ m}$$

7.3 Yatak Katsayısı Yaklaşımı İle Model Kazığa Ait Hesaplar

Bölüm 4.3'de anlatılan yatak katsayısı yöntemi kullanılarak model kazığa 0.01, 0.05, 0.09, 0.12 ve 0.15 kN luk yatay yük etkidiğinde oluşan deplasman ve eğilme momenti hesaplanıp aşağıda sunulmuştur (Model deney sonuçları ile yatak katsayısı yaklaşımından elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için model deneyde kazığa uygulanan yük kademeleri için hesaplar yapılmıştır).

Deplasman ve eğilme momenti hesapları, model deneylerden elde edilen sonuçlarla daha kolay karşılaştırılabilmesi için deplasman ölçerlerin yerleştirildiği 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 m derinlikleri için yapılmıştır.

$Q_g = 0.15$ kN yatay yük etkisinde, $X = 0.25$ m derinliğinde oluşan deplasman ve eğilme momenti hesabı aşağıda yapılmış olup, diğer derinliklere ait hesaplar Çizelge 7.1. de çizelge halinde hesaplanmış ve sunulmuştur. Hesaplara ait sonuçların grafik gösterimi ise Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5. de sunulmuştur.

$$\text{Kazık fiktif rijitlik boyu, } T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} = \sqrt[5]{\frac{6.9 \times 10^7 \times 4.4 \times 10^{-9}}{10000}} = 0.124$$

$$X = 0.25 \text{ m derinliği için } Z = \frac{X}{T} = \frac{0.25}{0.124} = 2.005$$

$$Z_{\max} = \frac{L}{T} = \frac{0.685}{0.124} = 5.52$$

Deplasman Hesabı

$Z_{\max} = 5.52$ ve $Z = 2$ için Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'den $A_y = 0.142$ $B_y = -0.07$

$$C_y = (A_y - 0.93 \times B_y) = 0.207$$

olarak hesaplanır ve Şekil 4.6'dan $C_y = 0.195$ bu iki değer de birbirine çok yakın olup, hesaplarda elde edilen $C_y = 0.207$ değeri kullanılmıştır.

$$4.35 \text{ eşitliğinden } y_x = C_y \frac{Q_g T^3}{EI} = 0.207 \frac{0.15 \times 0.124^3}{0.3} = 2E - 04m \text{ olarak bulunur.}$$

Eğilme Momenti Hesabı

$Z_{\max} = 5.52$ ve $Z = 2$ için Çizelge 4.1'den $A_m = 0.628$ $B_m = 0.404$

$$C_m = (A_m - 0.93 \times B_m) = 0.252$$

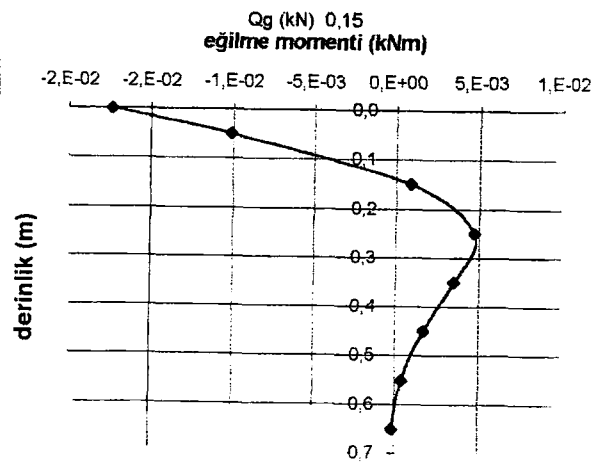
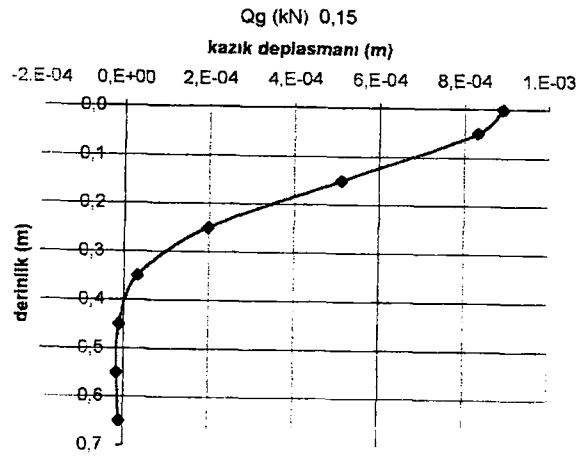
olarak hesaplanır. Şekil 4.35'den $C_m = 0.25$ bu iki değer de birbirine çok yakın olup, hesaplarda

elde edilen $C_m=0.252$ değeri kullanılmıştır.

4.36 eşitliğinden $M_x = C_m Q_g T = 0.252 \times 0.15 \times 0.124 = 4.72E - 03 \text{ kNm}$ olarak bulunur.

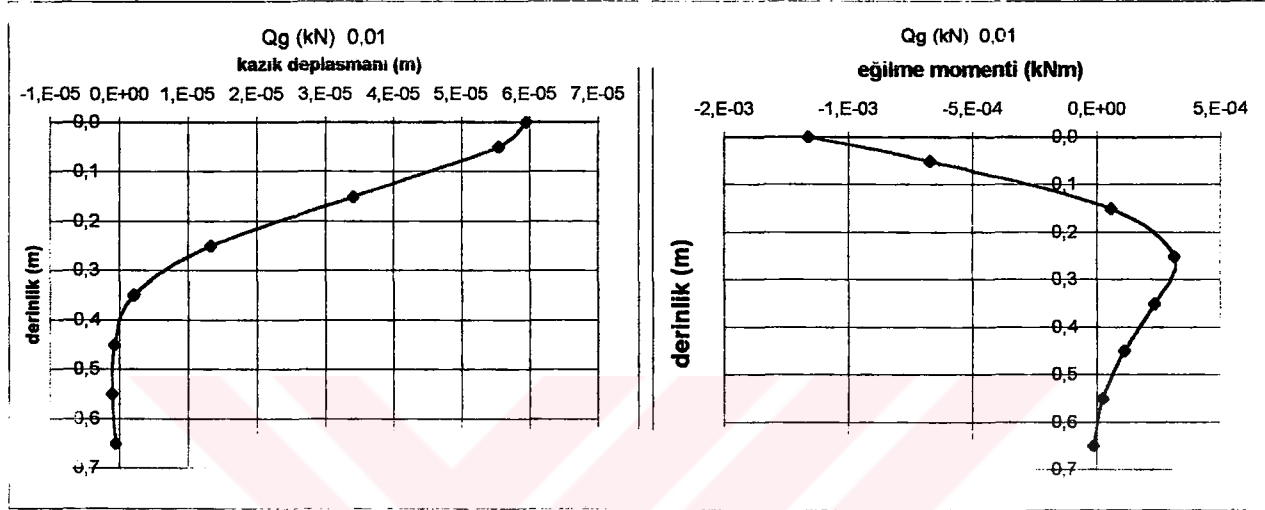
Çizelge 7.1 Model kazığa $Q_g = 0.15 \text{ kN}$ yükünün uygulanması durumunda, kazık boyunca oluşan deplasman ve eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.

		Deplasmanların Hesabı				Moment Hesabı			
X (m)	Z=X/T	A_y	B_y	C_y	y (m)	A_m	B_m	C_m	M (kNm)
0	0	2,435	1,623	0,926	0,000892	0,000	1,000	-0,930	-0,0174
0,05	0,4	1,796	1,003	0,863	0,000832	0,379	0,987	-0,539	-0,0101
0,15	1,2	0,738	0,223	0,531	0,000511	0,767	0,775	0,046	0,0009
0,25	2,0	0,142	-0,070	0,207	0,000200	0,628	0,404	0,252	0,0047
0,35	2,8			0,033	0,000032	0,306	0,128	0,187	0,0035
0,45	3,6	-0,060	-0,052	-0,011	-0,000011	0,090	-0,002	0,091	0,0017
0,55	4,4	-0,030	-0,014	-0,017	-0,000016	-0,013	-0,036	0,020	0,0004
0,65	5,2	-0,009	0,000	-0,009	-0,000009	-0,033	-0,026	-0,009	-0,0002

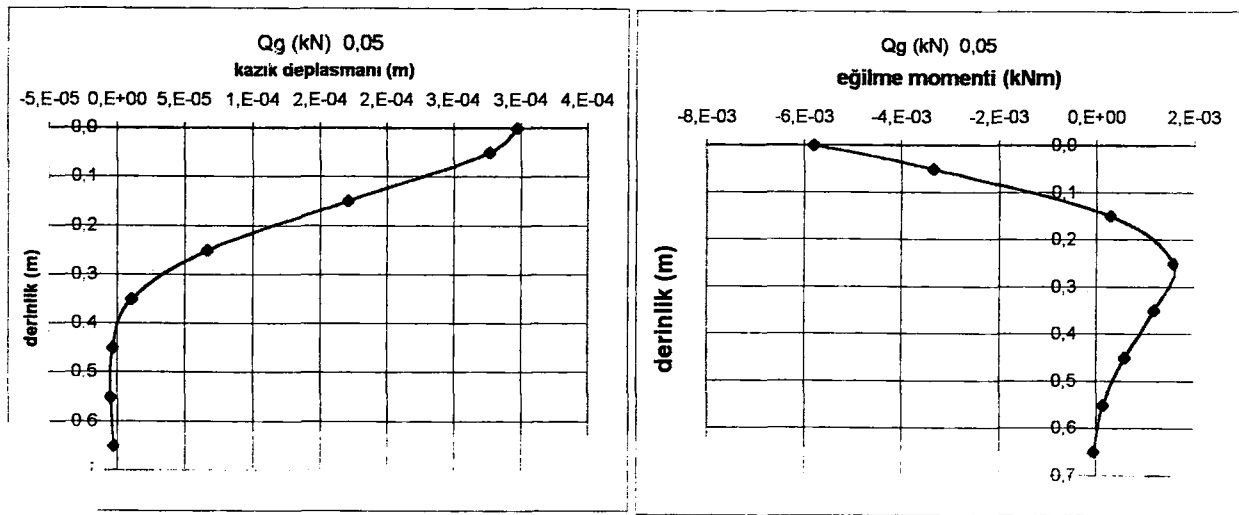


Şekil 7.1 Model kazığa $Q_g = 0.15 \text{ kN}$ yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b) kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.

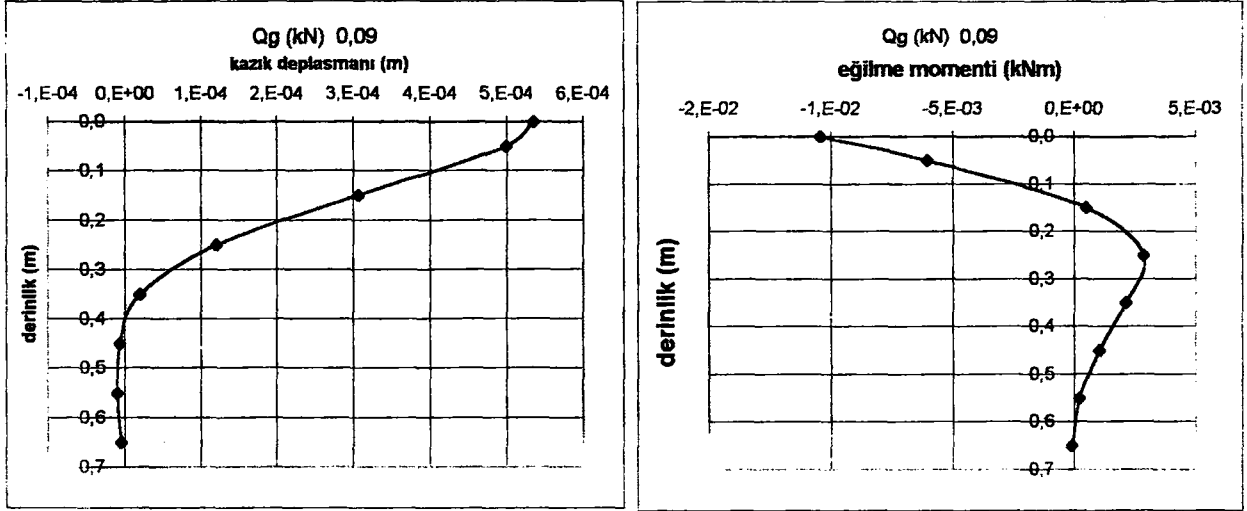
$Q_g = 0.01, 0.05, 0.09$ ve 0.12 kN yük kademelerinde kazık boyunca hesaplanan deplasman ve eğilme momenti değerleri sırasıyla Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5'de grafik halinde sunulmuştur.



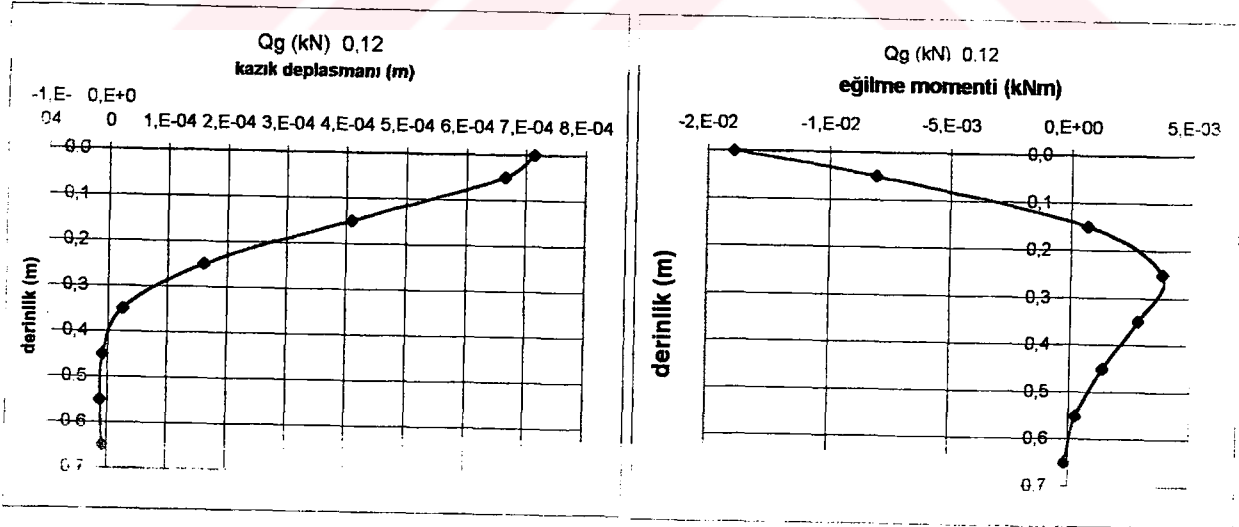
Şekil 7.2 Model kazığa $Q_g = 0.01$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b) kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.



Şekil 7.3 Model kazığa $Q_g = 0.05$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b) kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.



Şekil 7.4 Model kazığa $Q_g = 0.09$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b) kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.



Şekil 7.5 Model kazığa $Q_g = 0.12$ kN yükünün etkimesi durumunda a) kazık boyunca oluşan deplasman b) kazık boyunca oluşan eğilme momentinin yatak katsayısı yöntemi ile hesabı.

7.4 Deney Sonuçlarından Deplasman ve Eğilme Momentinin Belirlenmesi

Bu alt bölümde deneylerden elde edilen veriler yardımı ile kazık boyunca yatay deplasman ve eğilme momentinin nasıl hesaplanacağına dair teorik bilgiler sunulmuştur. Sunulan yöntemler kullanılarak deplasman ve eğilme momenti belirlenmiştir.

7.4.1 Teori

p-y eğrileri kavramından ilk olarak sözeden çalışmalardan biri McClelland ve Forcht (1958), tarafından yapılmıştır. Kohezyonlu zeminde imal edilmiş kazıklar üzerinde, kazıklara ölçüm aygıtları yerleştirilerek yaptıkları tam ölçekli, yatay yüklü kazık deneyleri ile p-y eğrilerini elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda aşağıdaki eşitlikler yardımı ile p-y eğrilerinin oluşturulabileceğini belirtmişlerdir.

$$p = 5.5D\Delta\sigma \quad (7.1)$$

$$y = 0.5D\varepsilon \quad (7.2)$$

burada,

D = kazık çapı

$\Delta\sigma$ = gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen deviatör gerilme

ε = şekil değiştirmedir.

Konu ile ilgili olarak Skempton (1951)'un yine kohezyonlu zeminler için yaptığı çalışmalar sonucunda yukardaki formda, ama merteye olarak farklı olan aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

$$p = 4.5\Delta\sigma \quad (7.3)$$

$$y = 2.5D\varepsilon \quad (7.4)$$

Skempton yaklaşımı daha sonra Matlock (1970) ve Prakash (1996) tarafından kohezyonsuz zeminde inşa edilen kazıkların, lineer olmayan davranışının analizinde kullanılmıştır.

Ashour vd (1998) kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlere çakılı kazıkların yatay yükler altındaki davranışının analizi için yaptıkları ampirik çalışmalar sonucunda aşağıdaki eşitlik

yardımı ile deplasmanların hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Bu yaklaşımda kazık tabakalara ayrılmakta ve her tabaka için yatay deplasmanlar hesaplanmakta ve deplasmanlar alttan üstte doğru toplanarak hem deplasmanın derinlikle değişimi hem de kazık başındaki deplasman elde edilmektedir.

$$y_i = H_i \frac{\varepsilon}{\Psi_s} \quad (7.5)$$

burada,

H_i = deplasmanın hesaplandığı tabaka kalınlığı

y_i = H_i kalınlığındaki deplasman

ε = şekil değiştirmeler

Ψ_s = sabit bir katsayı olup farklı zeminler için farklı değerler almaktadır. Bu katsayı kumlarda 1.81 ile 1.74 arasında değişmekte olup ortalama değeri 1.77 dir. Kohezyonlu zeminlerde ise 1.47 ile 1.33 arasına değişmektedir ve ortalama değeri 1.4 dür.

Kazık başlığındaki deplasmanın ise,

$$y_o = \sum y_i \quad i = 1 \text{ den } n' \text{ e kadar} \quad (7.6)$$

eşitliği ile hesaplanması önerilmektedir. Burada, i ve n = tabaka sayısıdır.

Bu yöntemle yapılan hesaplar, Reese vd (1974) ve Cox vd (1974) nin kohezyonsuz zeminler için yaptıkları çalışmalar ile kohezyonlu zeminlerde ise Reuss (1992) un yaptığı full-scale deneylerdeki sonuçlar ile karşılaştırılmasından çok büyük bir uyum olduğu anlaşılmıştır.

Sonuç olarak model deneyden elde edilen şekil değiştirmelerden deplasmanların elde edilmesinde 7.5 ve 7.6 eşitlikleri kullanılmıştır.

Yatay deplasmandan eğilme momentinin belirlenmesi, (4.66) eşitliğindeki diferansiyel denklemin ($M=EI d^2y/dx^2$) çözümü ile olanaklıdır. Bu eşitliğin sonlu farklar yöntemi ile çözümü,

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} = EI \frac{y_{k+1} - 2y_k + y_{k-1}}{H^2} \quad (7.7)$$

şeklinde olacaktır (Reese ve Impe, 2001), (İnan, 2000). Burada,

M = ilgili kesitteki moment değeri,

E = kazık elastisite modülü

I = kazık hareket yönündeki atalet momenti

y_k = ilgili kesitteki deplasman değeri

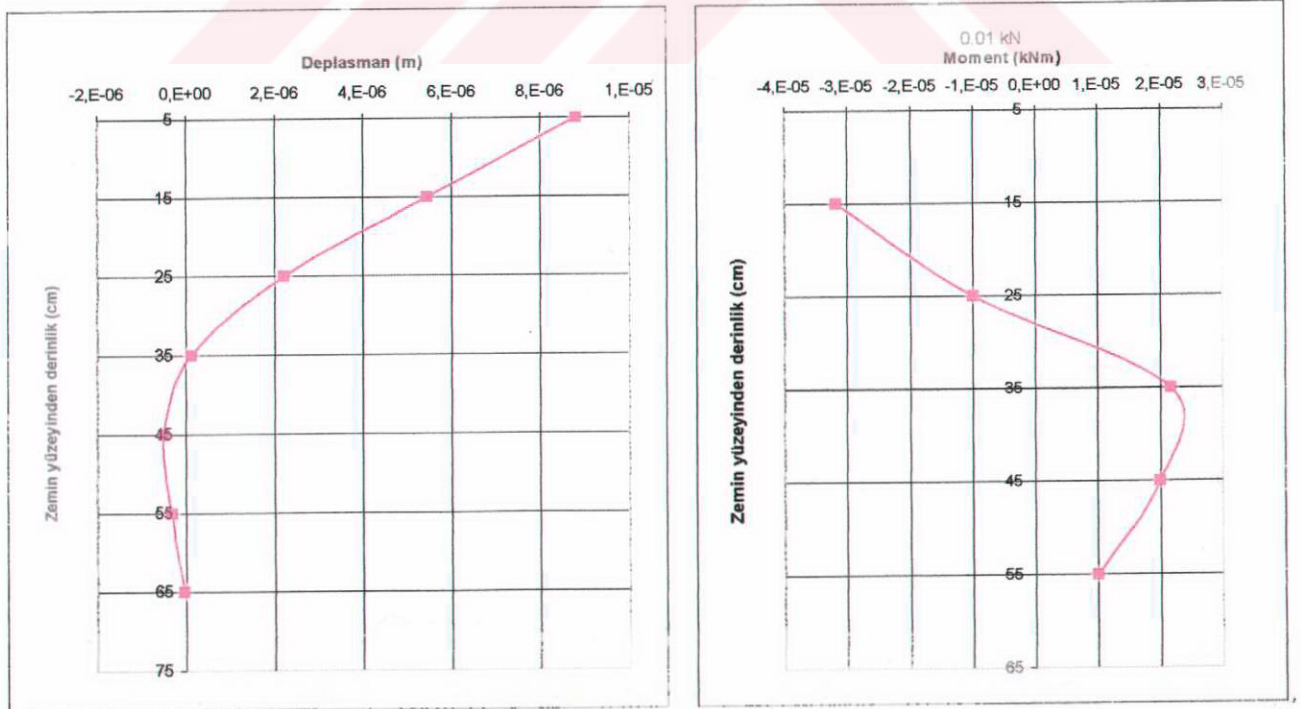
y_{k-1} = ilgili kesitten bir önceki deplasman değeri

y_{k+1} = ilgili kesitten bir sonrakideplasman değeri

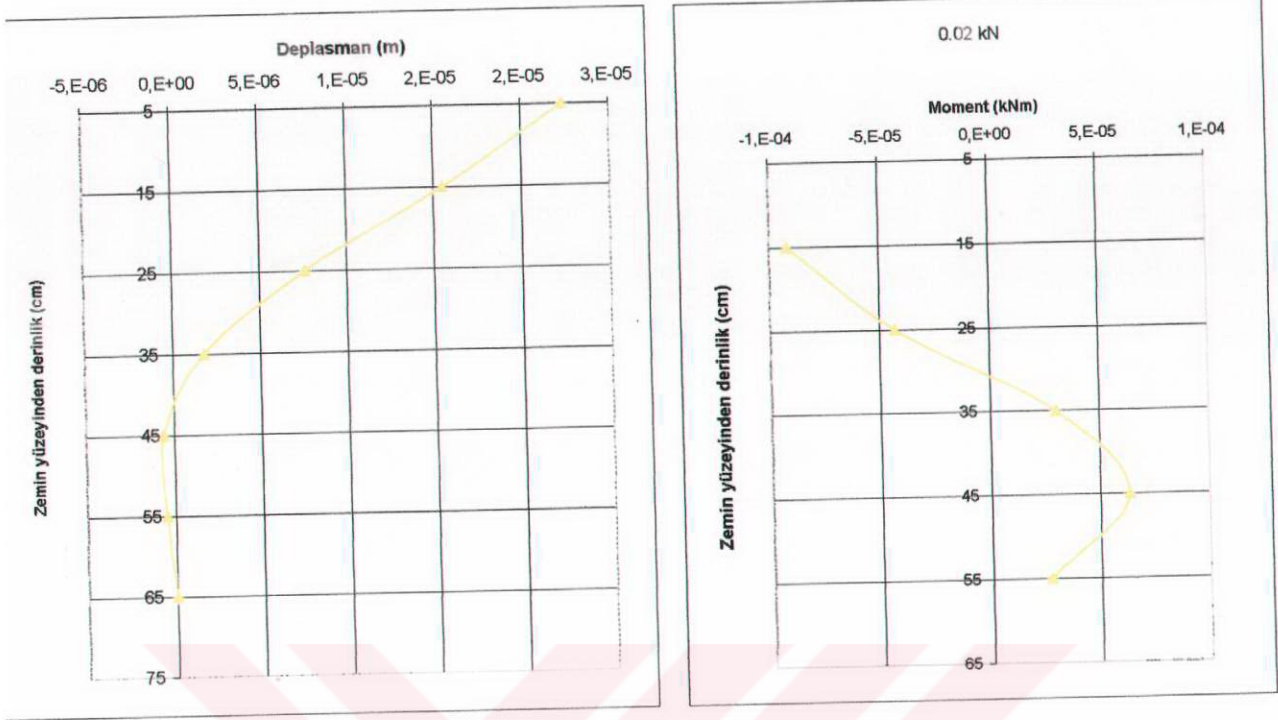
H = tabaka kalınlığıdır.

7.4.2 Tahmin Edilen Deplasman ve Eğilme Momentleri

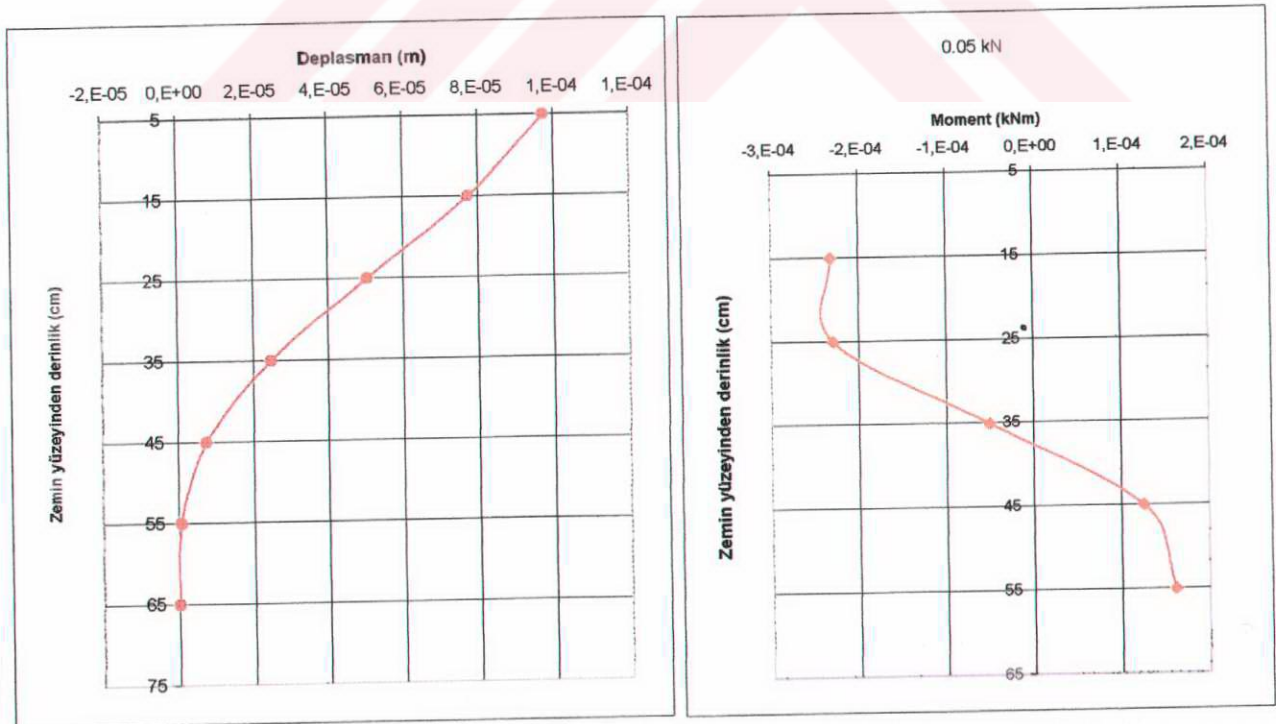
7.5, 7.6 ve 7.7 eşitlikleri kullanılarak 1, 2, 5, 9, 12 ve 15 kg lık yükler için kazık boyunca deplasman ve eğilme momenti değişimi elde edilmiş olup sonuçlar sırası ile Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de, her yük basamağı için deplasman ve eğilme momenti dağılımı Şekil 7.12 de sunulmaktadır.



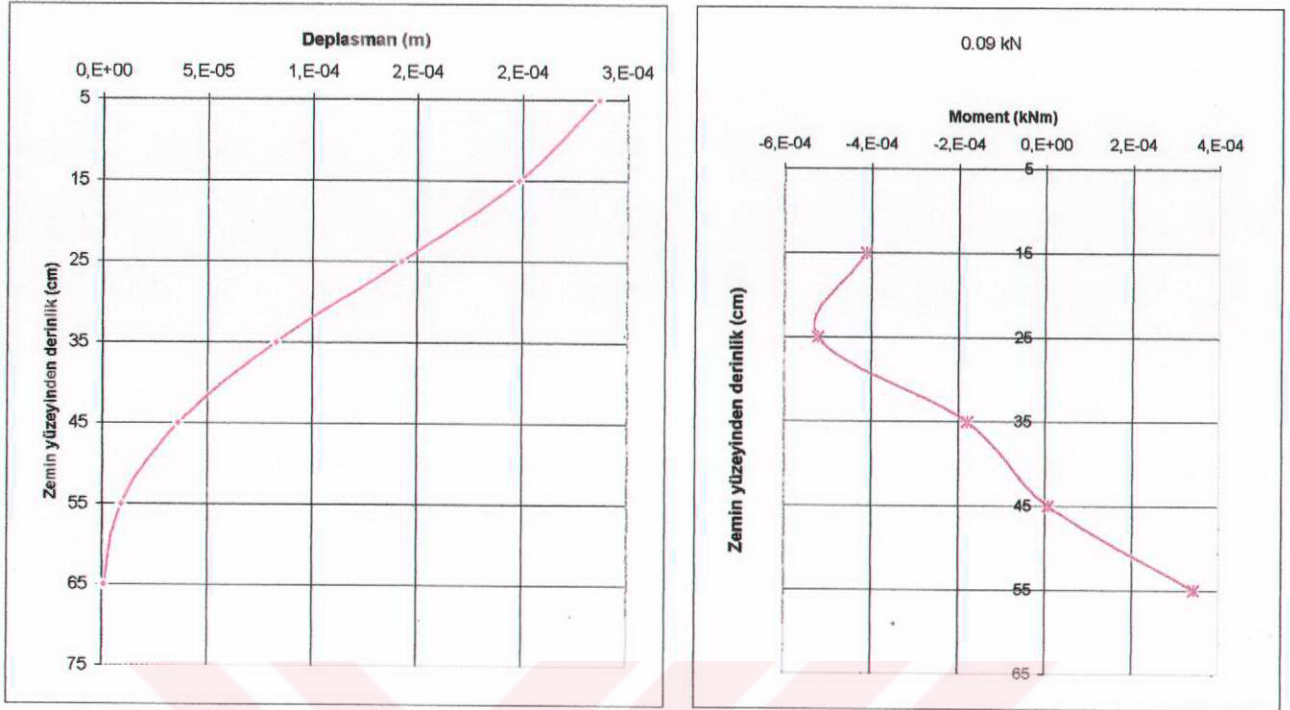
Şekil 7.6 0.01 kN yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.



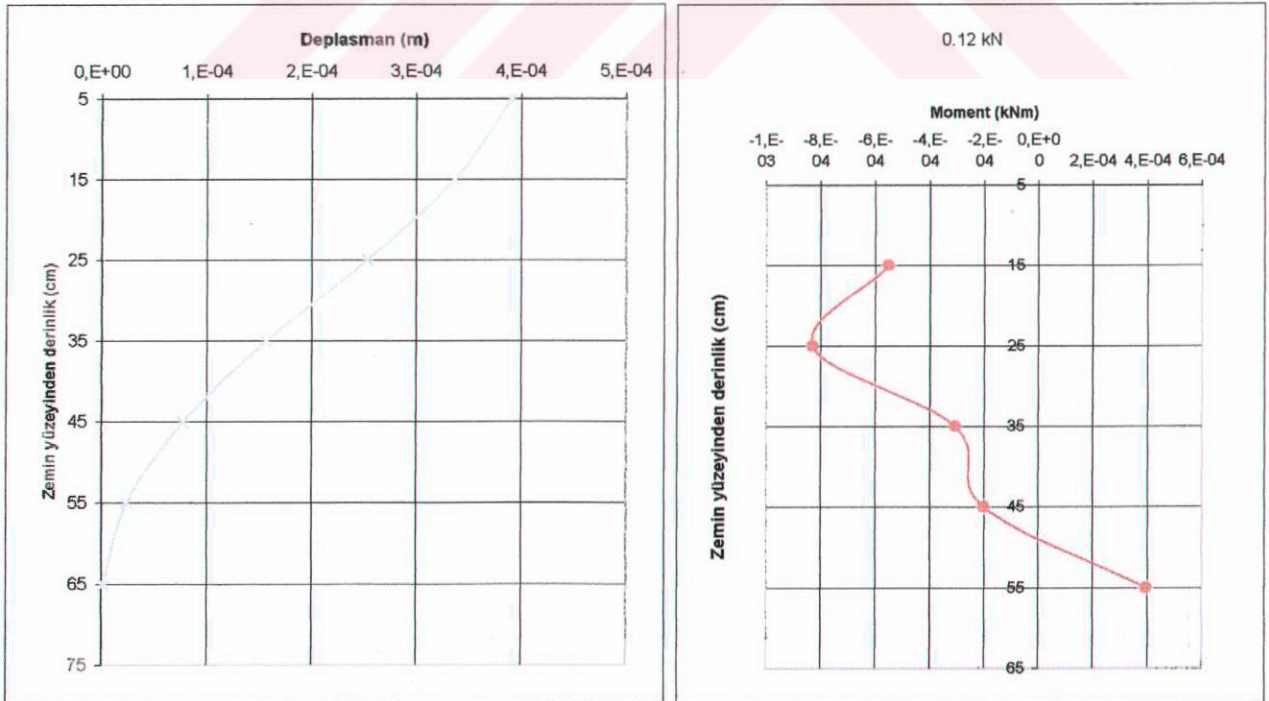
Şekil 7.7 2 kg yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.



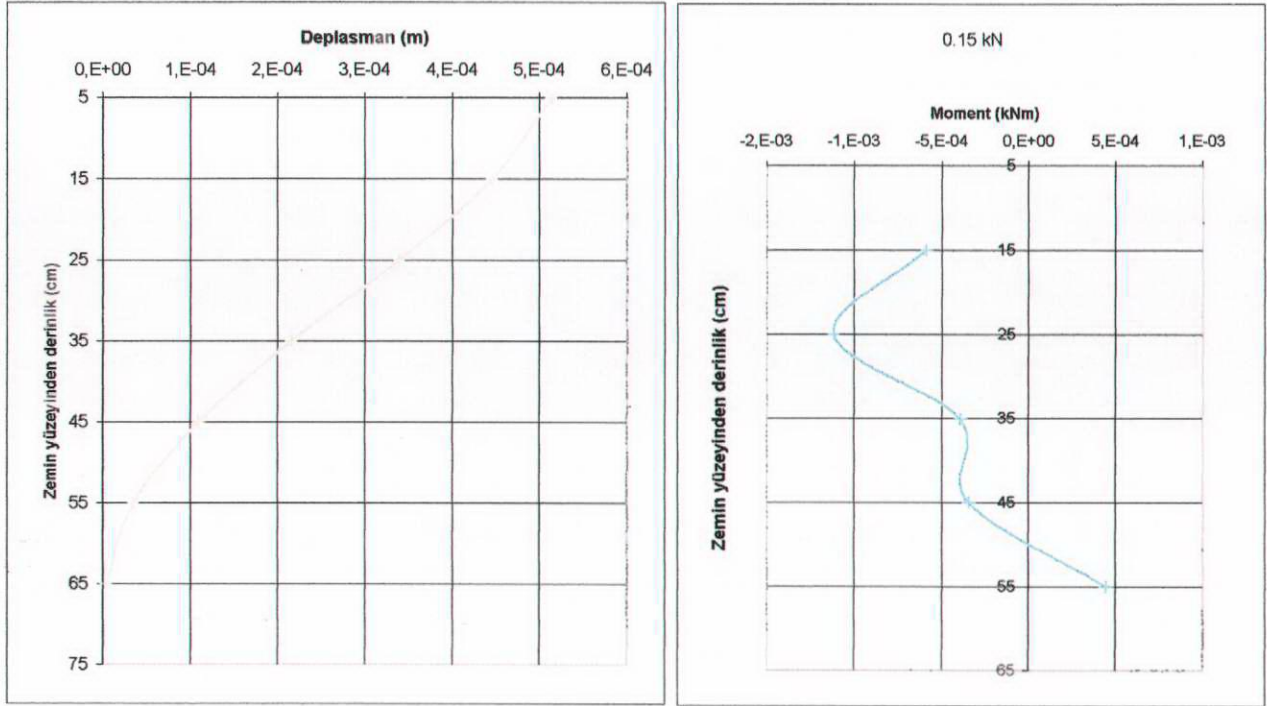
Şekil 7.8 5 kg yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.



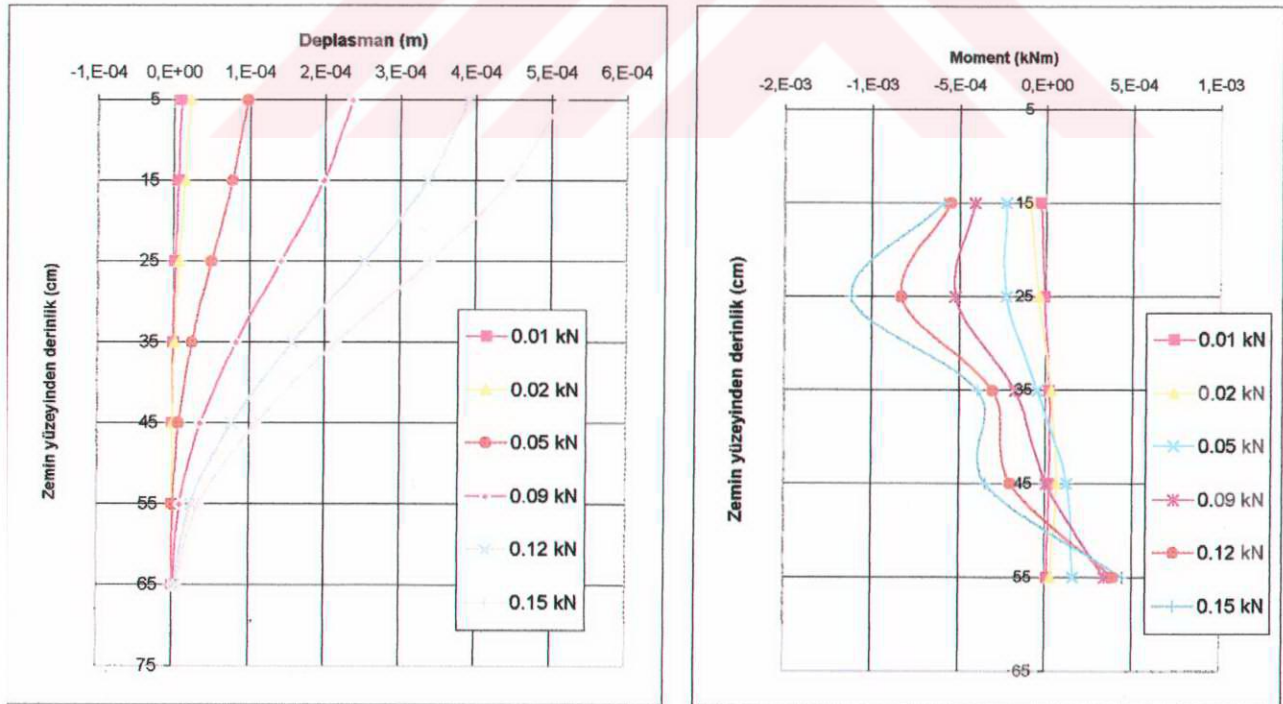
Şekil 7.9 9 kg yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.



Şekil 7.10 12 kg yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.

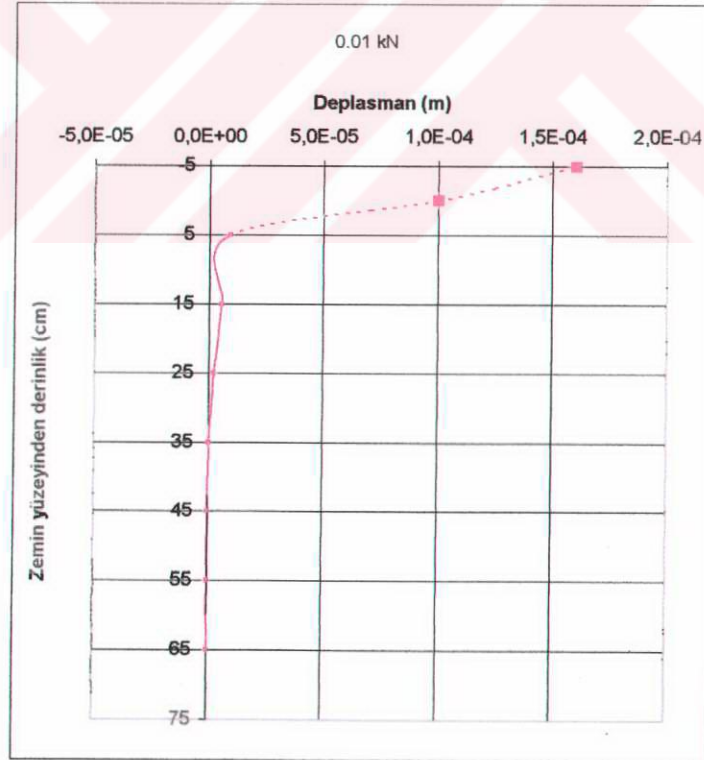


Şekil 7.11 15 kg yük için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.

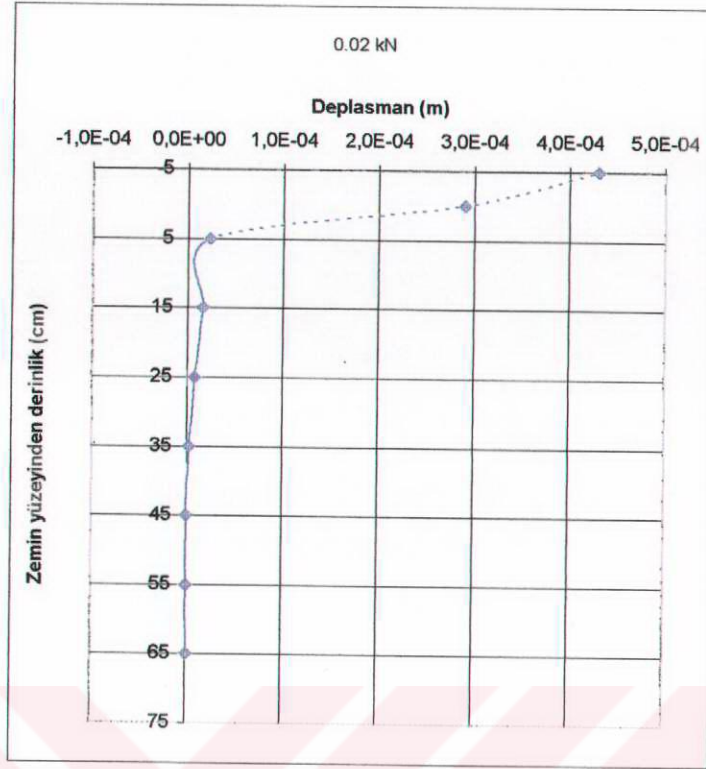


Şekil 7.12 Her yük kademesi için deneyden hesaplanan deplasman ve eğilme momentleri.

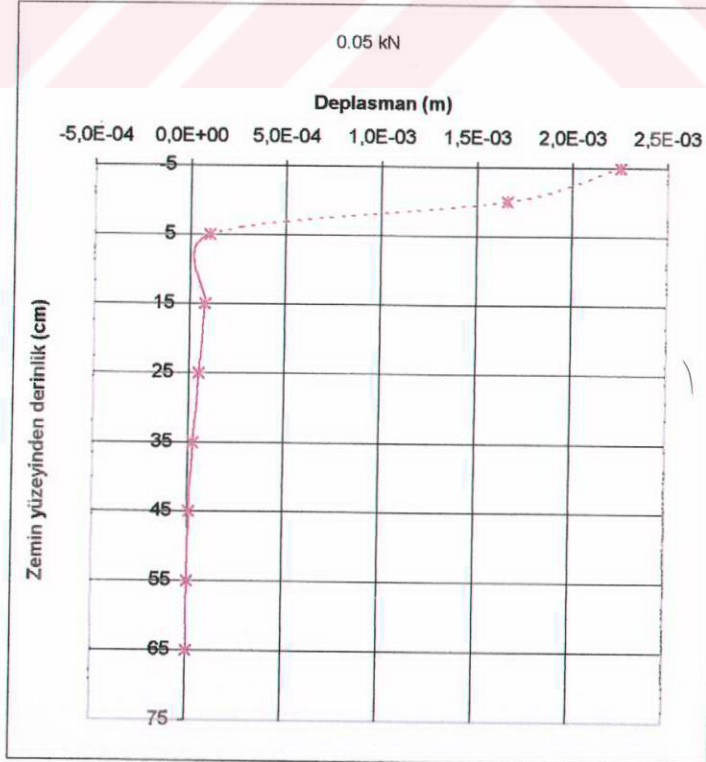
Yapılan deneylerde kazığın zemin içinde kalan kısmında şekil değiştirmeler ölçülmüş, dışında kalan kısmında ise deplasmanlar ölçülmüştür. Yukarıda açıklanan yaklaşım ile deneylerden elde edilen şekil değiştirmelerden, kazığın zemin içinde kalan kısmı için deplasmanlar hesaplanmıştır. Şekil 6.28'de verilen kazığın dışında kalan kısmına ait deplasman değerleri Şekil 7.6-Şekil 7.12 grafiklerindeki verilere ilave edilerek her yük kademesi için kazık boyunca belirlenen tüm deplasmanlar Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de sunulmuştur. Şekil 7.13-Şekil 7.18'deki veriler toplu olarak Şekil 7.19'da verilmiştir. Grafiklerde kesik çizgi ile gösterilen veriler deplasman saatinden okunan değerlerdir.



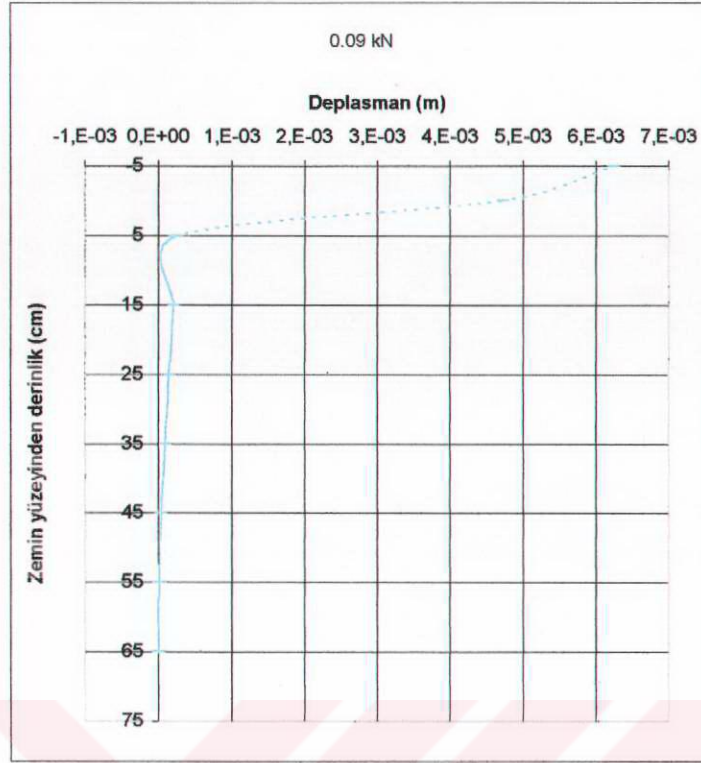
Şekil 7.13 1 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



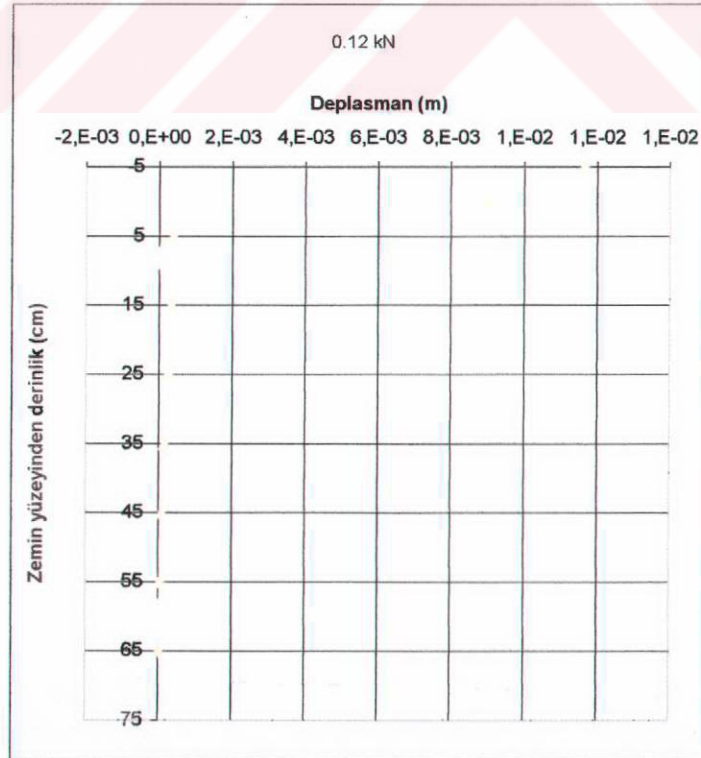
Şekil 7.14 2 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



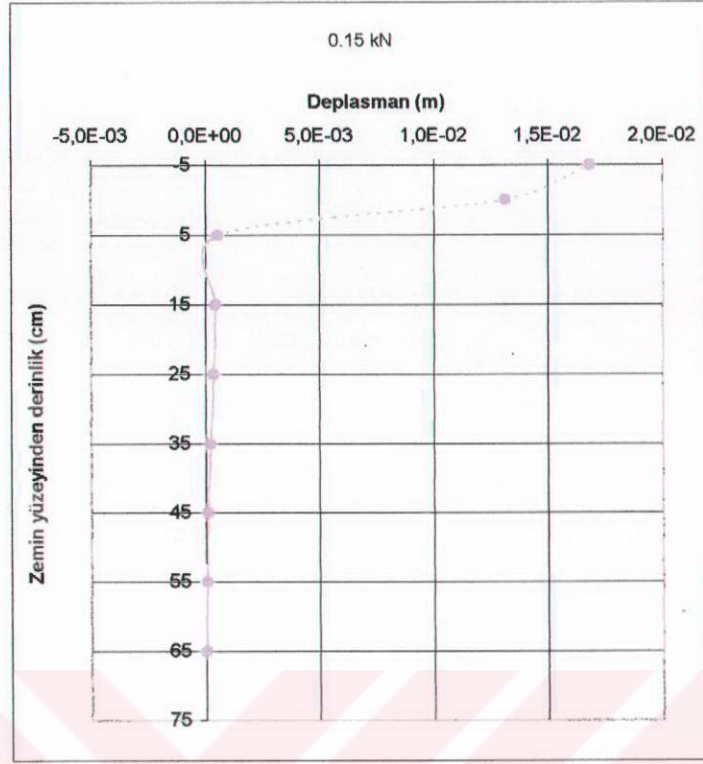
Şekil 7.15 5 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



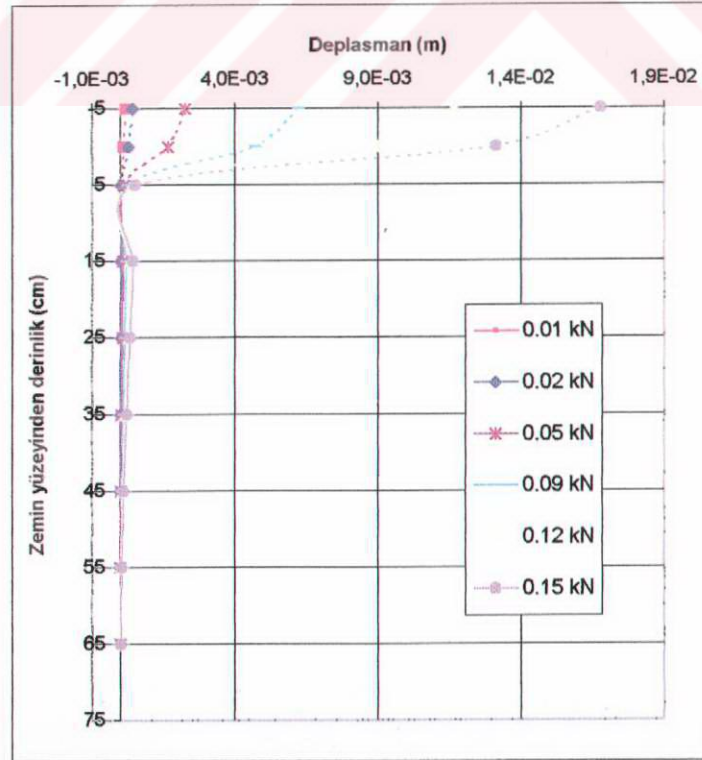
Şekil 7.16 9 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



Şekil 7.17 12 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



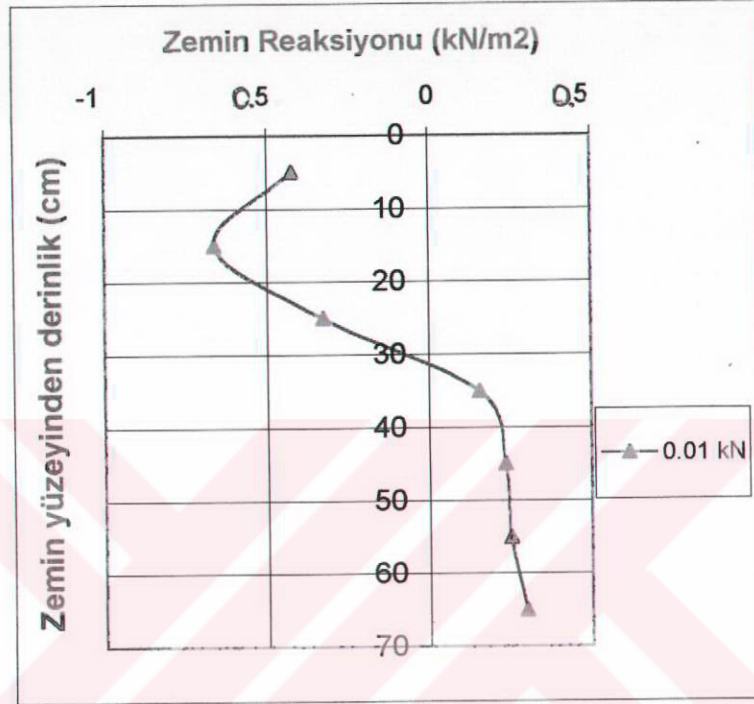
Şekil 7.18 15 kg lık yük altında tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.



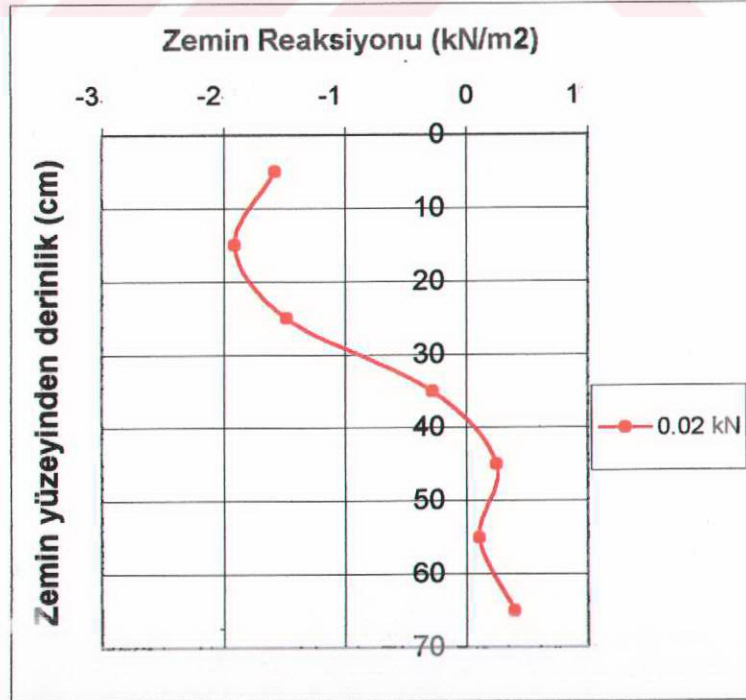
Şekil 7.19 Her yük kademesinde tüm kazık boyunca ölçülen yatay deplasmanlar.

7.5 Deney Sonuçlarından Kazık Boyunca Zemin Reaksiyonu Dağılımının Belirlenmesi

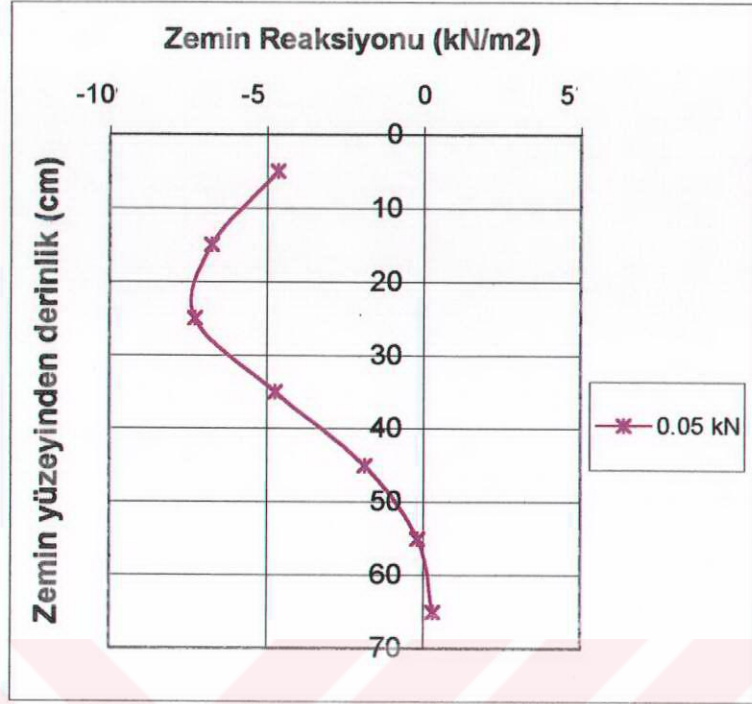
Deneylerden elde edilen düşey yöndeki şekil değiştirmeler kalibrasyon değerleri kullanılarak kazık boyunca zemin reaksiyonu dağılımı belirlenmiştir. Elde edilen zemin reaksiyonu dağılımı 1, 2, 5, 9, 12 ve 15 kg'lık yük kademeleri için sırası ile Şekil 7.20, Şekil 7.21, Şekil 7.22, Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'de, zemin basıncı dağılımının tüm yük kademeleri için dağılımı Şekil 7.26'da verilmektedir.



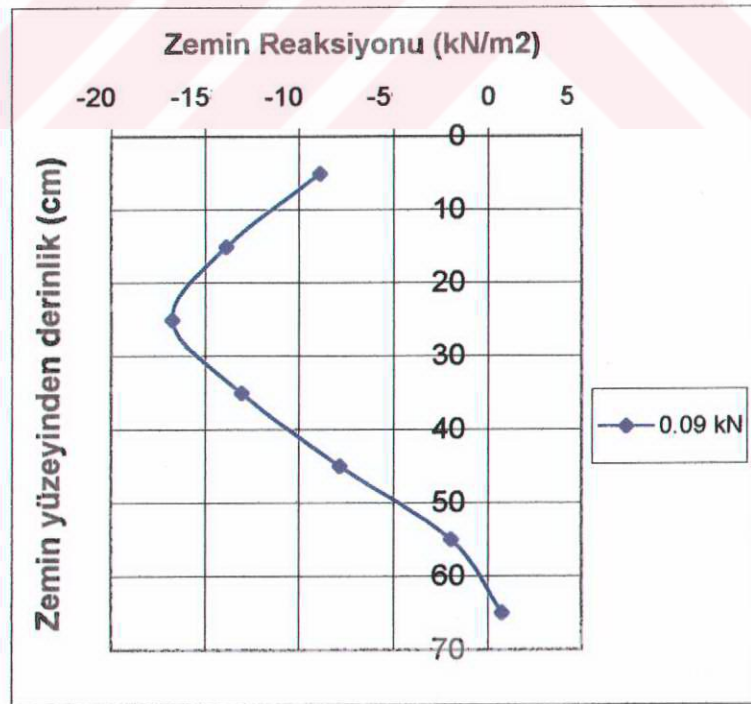
Şekil 7.20 0.01 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı



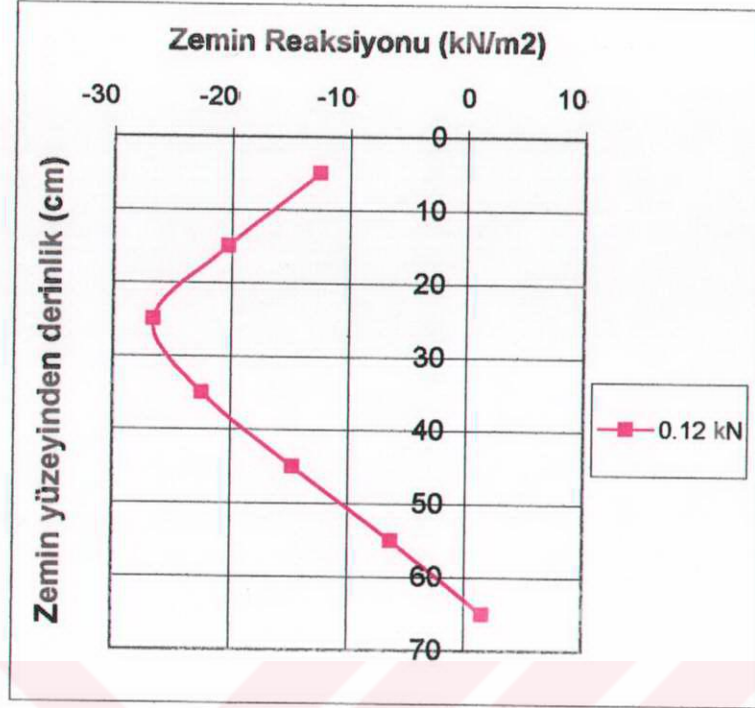
Şekil 7.21 0.02 kN lık yük için zemin reaksiyonu dağılımı



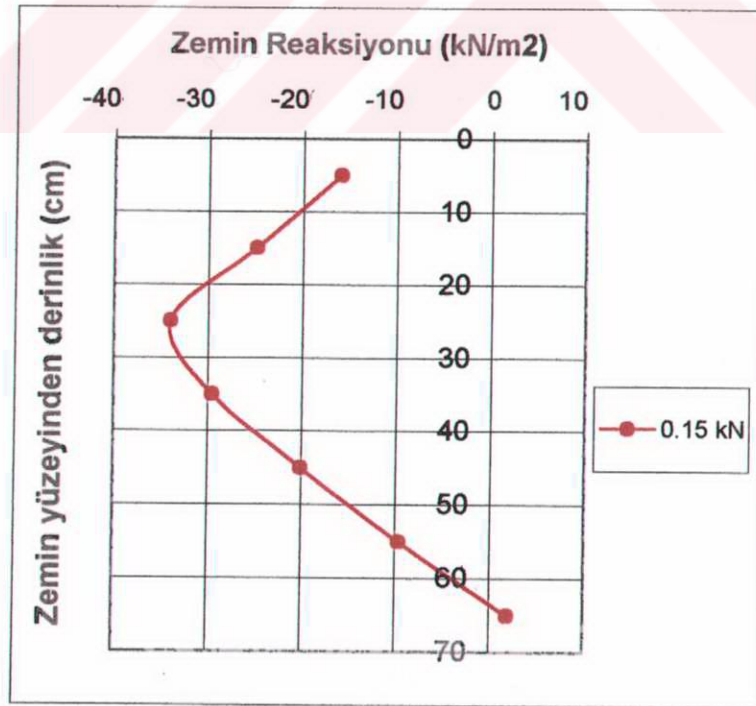
Şekil 7.22 0.05 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı



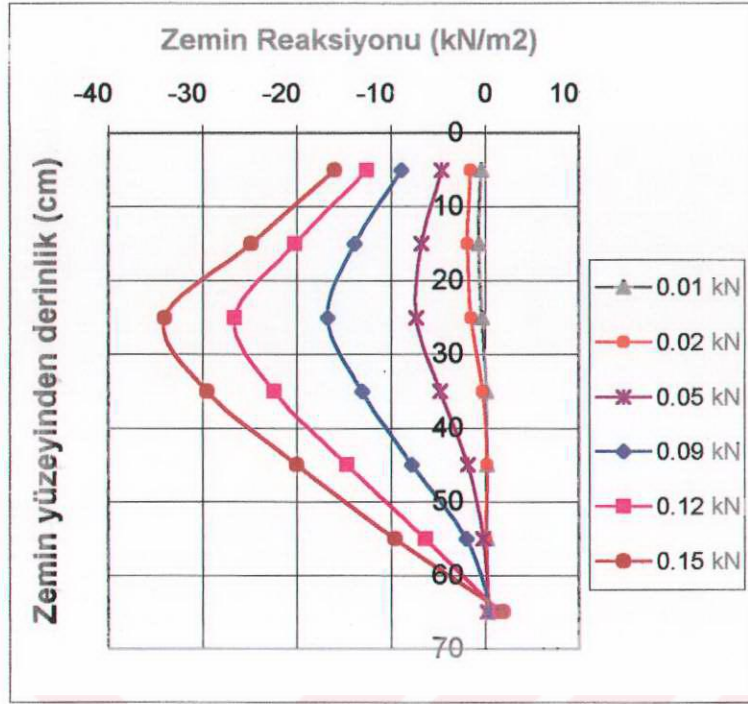
Şekil 7.23 0.09 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı



Şekil 7.24 0.12 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı



Şekil 7.25 0.15 kN luk yük için zemin reaksiyonu dağılımı



Şekil 7.26 Her yük kademesi için zemin reaksiyonu dağılımı

7.6 Broms Yöntemine Göre Zemin Reaksiyonunun Hesaplanması

Broms Yöntemine göre Şekil 3.9.c'de de görüldüğü gibi zemin reaksiyonu maksimum değeri,

$$p = 3\gamma f K_p$$

dir. Burada, f , Broms yöntemine göre hesaplanan yukarıda hesaplanmış olan maksimum momentin oluştuğu derinliktir ve 0.23 m olarak bulunmuştur. Bu durumda anılan değer

$$p = 3 \times 21 \times 0,23 \times 4,6 = 67 \text{ kPa} \text{ olması beklenmektedir.}$$

7.7 Deney Sonuçlarının, Hesapların Değerlendirmesi

Yapılan deneylerin hem yükleme hem de boşaltma aşamasında, ölçülen düşey ve yatay şekil değiştirmelerin birbirine oranı 0.31 ile 0.39 arasında değişim göstermektedir. Alüminyum malzemesinin poisson oranı ise 0.33 dür. Bu iki değer birbirine çok yakın oluşu nedeni ile, deneyden elde edilen düşey ve yatay yöndeki şekil değiştirmelerin uyumu açısından önemli bir hususdur.

7.7.1 Göçme Yükünün Tespiti

Broms yöntemi ile tutulu başlı kazık için yapılan hesapta kazık son taşıma gücü 0.53 kN, serbest başlı kazık durumunda ise 0.35 kN olarak tahmin edilmiştir.

Deney sırasında kazığın daha sonraki yükleme aşamalarında zarar görmeden kullanılabilmesi için 0.15 kN'dan daha büyük yük basmaklarına çıkılmamıştır. Deneyden elde edilen zemin yüzeyindeki ve kazık başlığındaki deplasmanlar (Şekil 6.38) Şekil 7.27'de gösterildiği şekilde uzatılabilir (kesikli çizgi). Buradan kazığın yaklaşık 0.28 kN'da göçeceği tahmin edilmektedir.

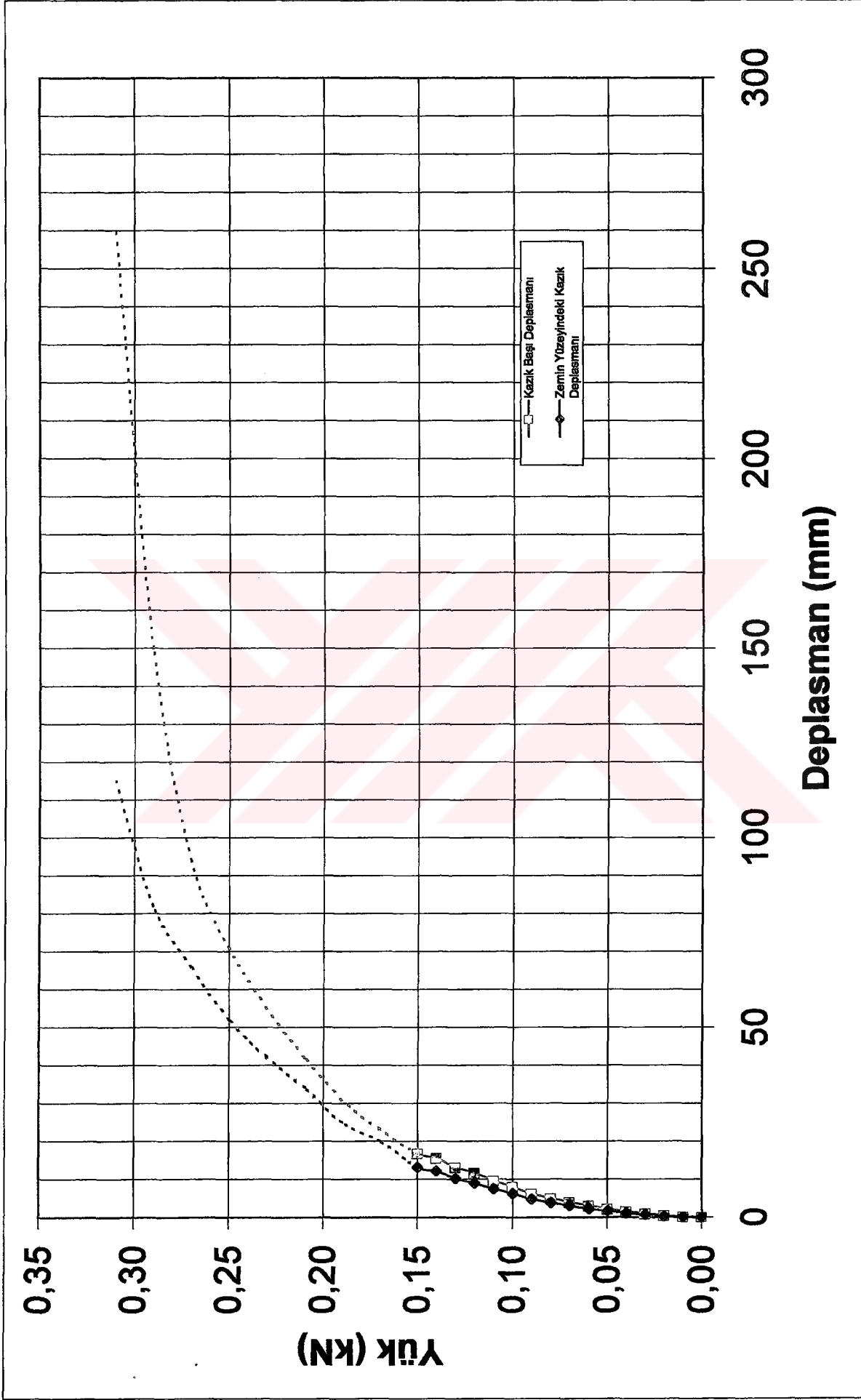
7.7.2 Hesaplanan ve Ölçülen Zemin Reaksiyonu Dağılımının Karşılaştırılması

Broms'a teorisi kohezyonsuz zeminlerde inşa edilen yatay yük etkisindeki kazıklarda zemin reaksiyonunun, maksimum momentin olduğu f derinliğinden daha küçük derinliklere kadar artacağını daha fazla derinliklerde ise azalacağını belirtmektedir. Bu durum Şekil 3.9.c'de açıkça görülmektedir. Zemin reaksiyonunun alacağı maksimum değer ise 67 kPa olarak tahmin edilmiştir.

Deneyin 0.15 kN luk yük kademesinden elde edilen maksimum zemin reaksiyonu değeri ise (Şekil 7.25) 37 kPa dır.

Buradan uygulanan maksimum yükte kazık zemin reaksiyonunun henüz %56 sının mobilize olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan deneylerden ve kalibrasyon deneyleri kullanılarak her yük kademesi için yapılan hesaplara ait grafikler Şekil 7.21-Şekil 7.27'de gösterilmektedir. Özellikle 0.05, 0.09, 0.012 ve 0.15 kN luk yük kademeleri olmak üzere tüm yük kademelerinde zemin reaksiyonunun kazık boyunca dağılımı yukarıda ifade edilen forma uymaktadır. Yani $f = 0.23$ m den daha küçük derinliklerde zemin reaksiyonu artmaktadır. Bu derinlikten sonra ise azalmaya başlamaktadır. Zemin reaksiyonu 0.01, 0.02, 0.05, 0.09, 0.12 ve 0.15 kN luk yüklerde sırası ile yaklaşık olarak 0.14, 0.15, 0.22, 0.23, 0.24 ve 0.25 m derinliğe kadar lineer olarak artış göstermektedir. Dolayısı ile zemin reaksiyonunun artışı, yük artıkça devam etmekte ancak daha yavaş bir zemin reaksiyonu artışı ortaya çıkmaktadır. Bu, yük etkisi ile kazığın temas ettiği bölgedeki zeminin özelliklerini değiştiriyor olmasından kaynaklanabilir. Yük artıkça zemin reaksiyonu artış hızı düşmekte ancak yük artıkça zemin reaksiyonu artmaya devam etmektedir.



Şekil 7.27 Deneysel verilerden göçme yükünün tahmini

7.7.3 Hesaplanan ve Ölçülen f Derinliğinin Karşılaştırılması

Hem Broms yöntemi ile yapılan hesaplarda 0.15 kN luk yük için maksimum momentin oluşacağı derinlik $f = 0.23$ olarak bulunmuştur.

Yatak katsayısı yönteminden de 0.15 kN luk yük için $f = 0.25$ m olarak (Şekil 7.1) tahmin edilmiştir.

Broms teorisine göre, maksimum momentin oluşacağı derinliğin zemin reaksiyonunun maksimumuna ulaştığı derinlikten daha fazla olması beklenmektedir. Zemin reaksiyonu dağılımında 0.15 kN luk yük için maksimum değere 0.25 m'de ulaşılmıştır. Dolayısı ile zemin reaksiyonu dağılımından maksimum momentin oluşacağı derinliğin 0.25 m'den daha fazla olması beklenmekte olup şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak yapılan eğilme momenti hesaplarından (Şekil 11) bu değer 0.25 m olduğu anlaşılmıştır.

Buradan Broms ve yatak katsayısı yöntemleri ile tahmin edilen maksimum momentin oluştuğu derinlik ile deneyden elde edilen maksimum momentin oluşacağı derinlik arasında oldukça uyumlu sonuç elde edilmiş olup deney sonucundan elde edilen değer bir miktar daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

7.7.4 Hesaplanan ve Ölçülen Yatay Deplasmanların Karşılaştırılması

Broms yöntemine göre 0.15 kN yük altında tutulu başlı kazık için yapılan hesaplarda kazığın zemin yüzeyi düzeyinde 7×10^{-4} m lik, serbest başlı kazık durumunda ise 2×10^{-3} m lik deplasman oluşacağı tahmin edilmiştir.

Yatak katsayısı yöntemi ile yapılan hesapta ise 0.15 kN yük altında yine aynı noktada 9×10^{-4} m lik bir deplasman oluşacağı tahmin edilmiştir.

Bölüm 7.4'de anlatılan yöntemle 0.15 kN'luk yükten elde edilen şekil değiştirmeler kullanılarak yapılan hesapta ise 5.2×10^{-4} m lik bir deplasman oluşacağı tahmin edilmiştir. Deney sırasında kazık zemin düzeyi ve kazık başlığından ölçülen deplasmanlar ise sırası ile 1.3×10^{-2} m ve 1.7×10^{-2} m'dir.

Elde edilen tüm deplasman verilerinin değerlendirmesinden, Bölüm 7.4'de anlatılan yaklaşımla bulunan deplasmanlar beklenenin çok altında bir deplasman sonucu vermiştir.

Broms ve yatak katsayısı yöntemlerinden tutulu başlı kazık durumu için elde edilen sonuçlar arasında da fark vardır ancak bu fark biraz daha azdır, bu yöntemlerde kazık başlığının genellikle zemine oturtulacağı varsayılmaktadır. Broms yöntemine göre serbest başlı kazık durumu varsayılarak yapılan hesap sonucu deneyden elde edilen sonuca daha çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Model deneyde ise kazık başlığı ile zemin seviyesi arasında bir miktar mesafe söz konusudur. Bu mesafede kazığın deplasmanına karşı direnen zemin bulunmaması deplasmanların artmasına sebep olmaktadır, hatta kazığın bir miktar serbest başlı kazık gibi davranmasına sebep olmaktadır. 0.15 kN maksimum yükte kazık başlığında meydana gelen deplasmanın, zemin düzeyindeki kazık deplasmanından %30 daha fazla oluşu bu sonucu doğrular niteliktedir. Kazık başlığı ile zemin yüzeyi arasındaki mesafe arttıkça kazık başlığı deplasmanın artacağı ve serbest başlı kazık davranışına benzer bir davranış göstermeye başladığı elde edilen bulgulardan biridir.

7.7.5 Hesaplanan ve Ölçülen Eğilme Momentlerinin Karşılaştırılması

Yatak katsayısı yaklaşımı ile yapılan hesaplarda 0.15 kN luk yük için eğilme momenti 5×10^{-3} kNm olarak tahmin edilmiştir.

Bölüm 7.4'de anlatılan yöntemle 0.15 kN'luk yükten elde edilen şekil değiştirmeler kullanılarak yapılan hesapta ise 1.3×10^{-3} kNm lik bir eğilme momenti oluşacağı tahmin edilmiştir.

Yatak katsayısı yaklaşımı ile hesaplanan moment değerleri ile deneyden elde edilen şekil değiştirmeler kullanılarak yapılan hesaplardan belirlenen eğilme momentleri arasında değer olarak beklenen uyumlu sonuçlar elde edilmemiş olup beklenen eğilme momenti formu açısından uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Esas itibari ile yatay yüklü model kazık çalışmalarında eğilme momentinin belirlenmesi için genellikle kalibrasyon deneyi yapılmaktadır. Benzer çalışmalarda eğilme kalibrasyonunun yapılması uygun olacaktır.

7.7.6 Yükleme-Boşaltma Eğrilerinin ve Deplasmanların Değerlendirmesi

Yükleme ve boşaltma olarak yapılan deneylerde 0.15 kN luk yük kademesinde ölçülen düşey yöndeki birim şekil değiştirme 22.5×10^{-6} iken yükün tamamen kaldırılması durumunda ölçülen birim şekil değiştirme 7.5×10^{-6} dir. Buradan meydana gelen yatay deplasmanın %67 sinin elastik deformasyon olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısı ile uygulanan maksimum 0.15 kN'luk yükün göçme yükünden henüz oldukça düşük seviyede olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan deneylerde uygulanan maksimum yükte yaklaşık kazık çapının 0.8 katı deplasman meydana gelmesine rağmen kazıkta göçme olmamıştır. Kazığın yaklaşık 65 mm deplasman yaptığıında göçmesi beklenmektedir. Bu da kazık çapının yaklaşık üç katına eş değer bir deplasmandır. Yapıların çoğunda bu mertebede deplasmanlara müsaade edilmemektedir. Sonuç olarak yatay yüklü kazık probleminde daha kritik olarak görülen deplasman limitleri model deneyde de gözlenmiştir



8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Broms yöntemi ile yapılan hesapta tutulu başlı kazık için son taşıma gücü 0.53 kN olarak tahmin edilmiştir. serbest başlı kazık durumunda ise 0.35 kN olarak tahmin edilmiştir. Deneyden elde edilen zemin yüzeyindeki ve kazık başlığındaki deplasmanlardan kazığın yaklaşık 0.28 kN'da göçeceği tahmin edilmektedir.

Broms teorisi kohezyonsuz zeminlerde inşa edilen yatay yük etkisindeki kazıklarda zemin reaksiyonunun, maksimum momentin oluştuğu f derinliğinden daha küçük derinliklere kadar artacağını daha fazla derinliklerde ise azalacağını belirtmektedir. Bu durum Şekil 3.9.c'de açıkça görülmektedir. Zemin reaksiyonunun alacağı maksimum değer ise 67 kPa olarak tahmin edilmiştir. Deneyin 0.15 kN luk yük kademesinden elde edilen maksimum zemin reaksiyonu değeri ise 37 kPa dır. Buradan uygulanan maksimum yükte kazık zemin reaksiyonunun henüz %56 sının mobilize olduğu anlaşılmaktadır.

Deneyden elde edilen zemin reaksiyonunun kazık boyunca dağılımı Broms teorisin tanımlanan forma uymaktadır. Broms teorisi ve yatak katsayısı yöntemine göre maksimum momentin oluşacağı derinlik sırası ile 0.23 m ve 0.25 m olarak tahmin edilmiştir. Bu derinlikten daha küçük derinliklerde zemin reaksiyonu artmaktadır. Bu derinlikten sonra ise azalmaya başlamaktadır. Yapılan deneylerde zemin reaksiyonu 0.01, 0.02, 0.05, 0.09, 0.12 ve 0.15 kN luk yüklerde sırası ile yaklaşık olarak 0.14, 0.15, 0.22, 0.23, 0.24 ve 0.25 m derinliğe kadar lineer olarak artış göstermektedir. Dolayısı ile zemin reaksiyonun artışı, yük artıkça devam etmekte, ancak daha yavaş bir zemin reaksiyonu artışı ortaya çıkmaktadır. Bu, yük etkisi ile kazığın temas ettiği bölgedeki zeminin özelliklerini değiştiriyor olmasından kaynaklanabilir. Yük artıkça zemin reaksiyonu artış hızı düşmekte ancak yük artıkça zemin reaksiyonu artmaya devam etmektedir.

Broms ve yatak katsayısı yöntemleri ile tahmin edilen maksimum momentin oluştuğu derinlik ile deneyden elde edilen maksimum momentin oluşacağı derinlik arasında oldukça uyumlu sonuç elde edilmiş olup deney sonucundan elde edilen değer, bir miktar daha fazla olduğu anlaşılmaktadır veya Broms ve yatak katsayısı yaklaşımından tahmin edilen f derinliği deney sonuçlarına göre bir miktar daha az çıkmıştır.

Elde edilen tüm deplasman verilerinin değerlendirmesinden, Bölüm 7.4’de anlatılan yaklaşımla bulunan deplasmanlar Broms ve yatak katsayısı yaklaşımı ile tutulu başlı kazık durumu için yapılan hesaptan, beklenenin çok altında bir deplasman sonucu vermiştir. Broms ve yatak katsayısı yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile deneyden elde edilen arasında da fark vardır, ancak bu fark biraz daha azdır. Bu fark kazığın serbest başlı kazık gibi davrandığı kabul edildiğinde daha da azalmaktadır. Broms ve yatak katsayısı yöntemlerinde kazık başlığının genellikle zemine oturtulacağı varsayılmaktadır. Model deneyde ise kazık başlığı ile zemin seviyesi arasında bir miktar mesafe söz konusudur. Bu mesafede kazığın deplasmanına karşı direnen zemin bulunmaması deplasmanların artmasına sebep olmaktadır. 0.15 kN maksimum yükte kazık başlığında meydana gelen deplasmanın, zemin düzeyindeki kazık deplasmanından %30 daha fazla oluşu bu sonucu doğrular niteliktedir. Kazık başlığı ile zemin yüzeyi arasındaki mesafe arttıkça kazık başlığı deplasmanının artacağı da elde edilen bulgulardan biridir. Ayrıca serbest başlı kazık gibi davranmaya başlayacağı anlaşılmaktadır.

Yatak katsayısı yaklaşımı ile hesaplanan moment değerleri ile deneyden elde edilen şekil değiştirmeler kullanılarak yapılan hesaplardan belirlenen eğilme momentleri arasında değer olarak beklenen uyumlu sonuçlar elde edilememiş olup beklenen eğilme momenti formu açısından uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Esas itibari ile yatay yüklü model kazık, bu çalışmada yapıldığı gibi, bir hücrede eşit hücre sel basınç altında kalibrasyonu yerine, eğilme momentinin belirlenmesi için genellikle, kazığın bir kiriş gibi yüklendiğı kalibrasyon deneyleri yapılması daha doğru olacağı bilinmektedir

Yükleme ve boşaltma olarak yapılan deneylerde 0.15 kN luk yük kademesinde ölçülen düşey yöndeki birim şekil değiştirme 22.5×10^{-6} iken yükün tamamen kaldırılması durumunda ölçülen birim şekil değiştirme 7.5×10^{-6} dir. Buradan meydana gelen yatay deplasmanın %67 sinin elastik deformasyon olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısı ile uygulanan maksimum 0.15 kN’luk yükün göçme yükünden henüz oldukça düşük seviyede olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan deneylerde uygulanan maksimum yükte yaklaşık kazık çapının 0.8 katı deplasman meydana gelmesine rağmen kazıkta göçme olmamıştır. Kazığın yaklaşık 65 mm deplasman yaptığıında göçmesi beklenmektedir. Bu da kazık çapının iki katından fazla bir deplasmandır. Yapıların çoğunda bu mertebede deplasmanlara müsaade edilmemektedir. Sonuç olarak yatay

yüklü kazık probleminde taşıma gücü aşılmasından daha çok deplasman limitlerinin sağlanması gerektiği model deney çalışmasından da doğrulanmaktadır

Yapılan tüm literatür çalışmaları esnasında p-y analiz yönteminin son yıllarda artan bir hızda, yatay yük etkisindeki düşey kazık davranışının analizinde kullanıldığı anlaşılmaktadır. p-y yönteminin bu kadar önem kazanmasında iki faktör etken olmuştur. Birincisi, zeminin lineer olamayan davranışının gözönünde bulunduruluyor oluşu, diğeri ise arazi de yapılan gözlem ve deneylerden, tahmin edilen ve ölçülen deplasman ve taşıma güçlerinin birbiriyle oldukça uyumlu sonuçlar vermesidir.

Model deney ve arazideki birebir boyutlardaki gerçek kazıklar üzerinde yapılan yükleme deneyi çalışmaları yatay yük etkisindeki kazık davranışının analizinde ve anlaşılmasında önem kazanmaktadır. Model deney çalışmaları bazen küçük boyutları nedeni ile gerçekçi sonuç vermeyebilmektedir. Gerçek ve model deney çalışmaları bir bütün olarak düşünülüp bu tür çalışmalara daha fazla yer verilmesi uygun olacaktır.

Ayrıca Bölüm 5'de anlatılan yatay kazık kapasitesinin artırılması yöntemleri de kazık tasarımlarında gözönünde bulundurulabilir. Özellikle kazık başlığının etrafında kum ve çakıldan dolgu yapılması kazık deplasmanlarını sınırlayıcı yönde etki yapması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Ashour, M., Norris, G., and Pilling, P., "(1998), "Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using The Strain Wedge Model, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 303-315, April.

Berilgen, M.M., (1996), Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (yayınlanmamış).

Bhushan, K., Haley, S. C., and Fong, P. T., (1979), "Lateral Load Tests on Drilled Piers in Stiff Clays", J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 105, No. GT8, pp. 969-985.

Brinch Hansen, J., (1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Danish Geotechnical Enstitute (Geoteknisk Institut) Bull. No. 12, Copenhagen.

Broms, B. B., (1964 a) "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63.

Broms, B. B., (1964 b) "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156.

Broms, B. B., (1972), "Stability of Flexible Structures Piles and Piles Groups", Proc. 5th Eur. Conf. Soil. Mech. Fndn. Eng., Vol. 2, pp. 239-269, Madrid.

Chen, L. T., and Poulos, H. G., (1997), "Piles Subjected to Lateral Soil Movements", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 802-811, September.

Coduto, D. P., (1994), Foundation Design Principles and Practices, Prentice-Hall Inc, New Jersey.

Cox, W. R., Reese, L. C., and Grubbs, B. R., (1974), "Field Testing of Laterally Loaded Piles in Sand", Proc., S_xth Annual Offshore Technol. Conf., OTC, pp. 459-472, Houston.

Davisson, M. T., (1963), "Estimating Buckling Loads for Piles", Proceedings of the Secant Pan American Conference on Sil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 351-369.

Davisson, M. T., (1970), "Lateral Load Capacity of Piles", High. Res. Rec., No. 333, pp. 104-112.

Davisson, m. T., Gill, H. L., (1963), "Laterally-Loaded Piles in a Layered Soil System", J. Soil. Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 89, No. SM3, pp. 63-94.

Davisson, M. T., and Prakash, S., (1963), "A Review of Soil-Pile Behavior", High Res. Rec., No. 39, pp. 25-48.

De Beer, E. E., (1977), "Piles Subjected to Lateral Loads" State of the Art Report, Proceedings of Specialty Session10-IX Internatıal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo.

Dinçer, E., (1986), Yatay Yük Etkisindeki Model Kazıkların Davranışı, Doktora Tezi,

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (yayımlanmamış).

Duncan, J. M., Evans, Jr, L. T., and Ooi, S. K., (1994), "Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts", J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 20, No. 5, pp. 1018-1033.

Gandhi, S. R., and Selvam, S., (1997), "Group Effect on Driven Piles Under Lateral Load", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 702-709, August.

Ishii, Y., Hayashi, S., and KoichiKubo, (1960), "Review on the Current Procedures and Research Activities on the Aseismic Design of Quaywalls in Japan", Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures and Foundations in Japan, The Japan Society of Civil Engineering, pp. 39-56.

Matlock, H., (1970), "Correlation for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay", Proceeding Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 1204, Houston.

Matlock, H., and Reese, L. C., (1961), "Foundation Analysis of Offshore Pile Supported Structures", Proceeding Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 91-97, Paris.

Matlock, H., and Reese, L. C., (1962), "Generalized Solutions for Laterally Loaded piles", Transactions of the American Society of Civil Engineering, Vol. 127, part 1, pp. 1220-1247.

Mazurkiewicz, B. K., (1987), Offshore Platforms and Pipelines, Trans Tech Publications, Germany.

McClelland, B., and Focht, J. A. Jr., (1958), "Soil Moduls for Laterally Loaded Piles", Transactions, ASCE 123, pp. 1049-1086.

McNulty, J. F., (1956), "Thrust Loading on Piles" Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, SM2, pp. 1-25.

Nalçakan, M. S., (1999), Stabilization of Landslides By Piles In Cohesive Soils With Special Reference To Group Action Reduction, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara (yayımlanmamış).

İnan, Ö., (2000), Destekli Derin Kazılarda İnklinometrik Gözlem, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (yayımlanmamış).

Palmer, L. A., and Thompson, j. B., (1948), "The Earth Pressure and Deflection Along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrusts", Proc. 2nd Int. Conf. S. M. and F. E., Rotterdam, Vol. 5, pp. 156-161.

Peck, R. B., and Davission, M. T., (1962), Discussion. Trans., ASCE, Vol. 127, pt. 4:143.

Poulos, H. G., (1971 a) "Behavior of Laterally Loaded Piles: I- Single Piles", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, No SM5, pp. 711-731.

Poulos, H. G., (1971 b) "Behavior of Laterally Loaded Piles: II- Pile Groups", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, No SM 5, pp. 733-751.

Poulos, H.G. and Davis, E.H., (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, John Willey and Sons Inc., New York.

Poulos, H. G., and Madhav, M. R., (1971), "Analaysis of the Movement of Battered Piles" Proceedings 1st Austrilian-New Zealand Confrence on Geomechanics, pp. 268-275, Melbourne, Australia.

Prakash, S., (1962), "Behavior of Pile Groups Subjected to Lateral Loads", Ph. D. Thesis, University of Illinois, Urbana.

Prakash, S., (1996), "Nonlinear Laterl Pile Deflection Prediction in Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvarimental Engineering*, pp. 130-138, February.

Prakash, S. and Sharma,H., (1989), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Willey and Sons Inc., New York.

Rao, S. N., and Raju, G. B., (1996), "Behavior of Pile-Supported Dolphins in Marine Clay Under Lateral Loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvarimental Engineering*, pp. 607-612, August.

Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., (1974), "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", *Proceedings Offshore Technology Conference*, Paper No. OTC 2080, pp. 473-48, Houston.

Reese, L. C., Impe, W. F. V., (2001), *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*, A. A. Balkema, Rotterdam.

Reese, L. C., Matlock, H., (1956), "Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth", *Proceeding 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, p:1-45.

Reese, L. C., and Wang, S. T., (1986) , *Method of Analysis of Piles Under Lateral Loading, Marine Geotechnlogy and Nearshore/Offshore Structure*, ASTM STP 923, R. C. Chaney and H. Y. Fang, Ed., pp. 199-211.

Reese, L. C., and Welch, R. C., (1975),"Laterally Loading of Deep Foundatins in Stiff Clay", *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 101, No. GT7, pp. 633-649.

Rollins, K. B., Peterson, K. T., and Weaver, T. J., (1998), "Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvarimental Engineering*, pp. 468-478, June.

Reuss, R., Wang, S. T., Reese, I. C., (1992), "Tests of Piles under Lateral Loading at the Pyramid Building, Memphis, Tennessee", *Geotech News*, Vancouver, 10(4), pp. 44-49, Canada.

Ruesta, P. F., and Townsend, F. C., (1997), "Evaluation of Laterally Loaded Pile Group at Roosevelt Bridge", *Journal of Geotechnical and Geoenvarimental Engineering*, pp. 1153-1161, December.

Skempton, A. W., (1951), "The Bearing Capacity of Clays", Proceedings, Building Research Congress, Division 1, London, England.

Sowers, G. F., (1979), *Introductory Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Macmillan Publishing Co., Newyork.

Steenfelt, J. S., (1973), "Sand Laying Techniques", Technical Report, Danish Geotechnical Institute.

Terzaghi, K., (1955), "Evaluation of Coefficients of Sub-grade Reaction", *Geot.*, Vol. 5,

Toğrol, E., (1970), *Kazıklı Temeller, Temel Araştırma Yayınları No:1, İstanbul.*

Tomlinson, M.J., (1994), *Foundation Design and Construction*, Longman, Great Britain.

Vakai, A., Gose, S., and Ugai, K., (1999), "3-D Elasto-Plastic Finite Element Analyses of Pile Foundations Subjected to Lateral Loading", *Soils and Foundations Japanese Geotechnical Society*, Vol. 39, No. 1, pp. 97-111.

Wilson, S. D., and Hilts, D. E., (1967), "How to Determine Lateral Load Capacity of Piles" in *Pile Foundation Know-How (41-45)*, Amer. Wood. Pres. Inst., Washington.

Yıldırım, S., (1995), *Kazıklı Temellerin Tasarımı*, 1995.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 11.07.1972

Doğum yeri Diyarbakır

Lise 1986-1988 Elazığ Lisesi,
1988-1989 Bursa Yıldırım Beyazıt Lisesi

Lisans 1991-1995 İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik
Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1999-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Geoteknik
Anabilimdalı

Çalıştığı kurumlar

1996-1997 Zemin İnşaat LTD ŞTİ
1997- Devam ediyor ELC Group LTD ŞTİ

