

**YATAY YÜKLÜ TEK VE GRUP KAZIKLARININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ÜÇ BOYUTLU NONLİNEER ANALİZİ**

104786

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Erkan BORAN

(501980153011)

104186

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ocak 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Şubat 2001

Tez Danışmanı : Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Bülent ÖZÜER (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)

[Handwritten signatures of the thesis advisor and jury members]

ŞUBAT 2001

104186

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. M. Tuğrul Özkan'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Analizler sırasında kullandığım sonlu elemanlar programının öğrenilmesinde yardımcı olan B.Ü. Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsünden İnş. Yük. Müh. Hafez Keypour'a ve İ.Ü. Mühendislik Fakültesinden Araş. Gör. M. Kubilay Keleşoğlu'na, tez çalışmalarım sırasında yardımını esirgemeyen İ.T.Ü. İnşaat Fakültesinden Araş. Gör. Gökhan Çevikbilen'e teşekkürlerimi sunarım. Bütün öğrenimim boyunca olduğu gibi tez çalışmalarımda da gösterdikleri destek ve yardımlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Şubat, 2001

İSTANBUL

Erkan BORAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. KAZIK-ZEMİN-KAZIK ETKİLEŞİMİ	2
2.1. Kazıklar	2
2.1.1. Tarihçe	2
2.1.2. Kazık Türleri	3
2.1.3. Kazık Seçiminde Etkiyen Etkenler	4
2.1.4. Kazıklı Temeller	5
2.2. Yatay Yüklü Tekil Kazığın Davranışı	6
2.3. Yatay Yüklü Kazık Grubunun Davranışı	8
2.4. Kazık Gruplarında Yapılan Model Deneylerin Sonuçları	11
2.4.1. Zemin Hareket Yönüne Dik Olan Kazıklar	12
2.4.2. Zemin Hareket Yönüne Paralel Olan Kazıklar	14
2.4.3. Kare Dizilişteki Kazık Grupları	17
3. YATAY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN ANALİZİ	18
3.1. Giriş	18
3.2. Kazıkların Yanal Olarak Taşıyabilecekleri Nihai Yükün Bulunuşu	18
3.2.1. Brinch Hansen (1961) Yöntemi	18
3.2.2. Broms (1964) Yöntemi	19
3.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Broms Metodu	23
3.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Broms Metodu	26
3.3. Çalışma Yükünde Yatay Ötelenme	29
3.3.1. Kohezyonsuz Zeminde Yatay Ötelenmeler	29
3.3.1.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı	29

3.3.1.2. Elastik Ortam Yaklaşımı	29
3.3.2. Kohezyonlu Zeminlerde Yatay Ötelenmeler	30
3.3.2.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı	30
3.3.2.2. Elastik Ortam Yaklaşımı	31
3.4. P-y Eğrileri Yardımı İle Yanal Yükleme Analizi	32
3.4.1. Kohezyonsuz Zeminde p-y Eğrileri Teşkili	34
3.4.2. Kohezyonlu Zeminde p-y Eğrileri Teşkili	35
3.4.2.1. Yumuşak-Orta Katı Killer	36
3.4.2.2. Katı Killerde p-y Teşkili	37
3.4.2.3. Katı Aşırı Konsolide Killerde p-y Teşkili	38
3.5. Karakteristik Yük Yöntemi	39
4. YATAY YÜK ETKİSİNDE KAZIK GRUPLARININ ANALİZİ	42
4.1. Giriş	42
4.2. Sürekli Ortam Yöntemleri	43
4.3. Winkler Etkileşim Modeli	48
4.4. Değiştirilmiş Birim Yük Transferi Yöntemi	48
4.5. Ampirik Rijitlik Modeli	49
4.6. Grup Azaltma Faktörü Yöntemi	49
4.7. Birleştirme Modeli	51
4.8. Grup Büyütme Yöntemi, Ooi ve Duncan (1994)	52
4.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi	54
4.9.1. A. Muqtadir ve C. S. Desai Tarafından Yapılan Çalışma	55
4.9.2. A. Wakai, S. Gose ve K. Ugai Tarafından Yapılan Çalışma	58
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PROGRAM ÖZELLİKLERİ	65
5.1. Giriş	65
5.2. Kullanılan Kavramlar	66
5.3. Lusas Programının Özellikleri	70
5.3.1. Programın Sistem Özellikleri	70
5.3.2. LUSAS Programının kullanım Esasları	72
5.3.3. Data Dosyasının Hazırlanması	73
6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER	76
6.1. Yatay Yüklü Kazıkların Modellenmesi	76

6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı	76
6.1.2 Kullanılan Elemanlar	77
6.1.3. Malzeme Parametreleri	80
6.1.4. Kullanılan Yapısal Modeller	81
6.2. Wakai ve Diğ. (1999) Tarafından Yapılan Çalışmanın Lusas ile Analizi	83
6.3. Lusas ile Yapılan Yatay Yüklü Tek ve Grup Kazık Analizleri	87
6.3.1. Başlık Çevresindeki Ortamın Değişimi	92
6.3.2. Kazık Çapının Değişimi	94
6.3.3. Kazık Boyunun Değişimi	95
6.3.4. Tek ve Grup Kazık Davranışı	97
7. SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	108
EKLER	110
ÖZGEÇMİŞ	122

SEMBOL LİSTESİ

A	: Katsayı	(4.8 bağıntısı)
A_{mc}	: Katsayı	(3.28.b bağıntısı)
A_{yc}	: Katsayı	(3.27 bağıntısı)
A_1, B_1	: Katsayılar	(Tablo 3.1)
B	: Katsayı	(4.8 bağıntısı)
B	: Kazık genişliği, ara yüzey eleman genişliği	
B_{mc}	: Katsayı	(3.28.b bağıntısı)
B_{yc}	: Katsayı	(3.27 bağıntısı)
c	: Kohezyon	
c_u	: Drenajsız kohezyon	
c'	: Drenajlı efektif kohezyon	
C	: Katsayı	(3.40.b bağıntısı)
C	: Katsayı	(4.8 bağıntısı)
C_1, C_2	: katsayılar	
C_y, C_m	: Ötelenme ve moment büyütme faktörü	
$D=d$	: Kazık çapı	
D	: Derinlik	
D_{85}	: Ağırlık olarak danelerin % 85'nin küçük olduğu çap	
D_{50}	: Ağırlık olarak danelerin % 50'sinin küçük olduğu çap	
D_{10}	: Ağırlık olarak danelerin % 10'unun küçük olduğu çap	
e	: Kazık başının zemin yüzeyinin üzerindeki kısmının uzunluğu	
E	: Elastisite (Young) modülü	
EI	: Kazık eğilme rijitliği	
E_{50}	: Sekant elastisite modülü	
E_p	: Kazığın elastisite modülü	
E_{in}	: Ara yüzeyin kayma doğrultusundaki başlangıç elastisite modülü	
E_{out}	: Ara yüzeyin kayma düzlemine dik doğrult. başlangıç elastisite modülü	
E_s	: Zeminin elastisite modülü	
F^m	: Maksimum pozitif eğilme momentine göre grup faktörü	
F_g	: Katsayı	(3.25 bağıntısı)
F_{gF}	: Katsayı	(3.26 bağıntısı)
G	: Kayma modülü	

G_e	: Grup etkinlik faktörü	
G_{in}	: Ara yüzeyin kayma doğrultusundaki kayma modülü	
G_{out}	: Ara yüzeyin kayma düzlemine dik doğrultusundaki kayma modülü	
H_G	: Kazık grubuna etkiyen toplam yük	
H_j	: j kazığındaki yük	
I_1, I_2, I_3	: Deformasyon invariantları	
I	: Atalet momenti	
I_{daire}	: Dolu dairesel kesit atalet momentini	
I_{gH}, I_{gM}	: Katsayılar	(3.29 bağıntısı)
$I_{\theta H}, I_{\theta M}$	: Katsayılar	(3.30 bağıntısı)
I_{gH}, I_{Gm}	: Katsayılar	(3.25 bağıntısı)
I_{pF}	: Katsayı	(3.26 bağıntısı)
I_p	: Kazığın atalet momenti	
J	: Ampirik bir faktör	(3.42 bağıntısı)
J_1, J_2, J_3	: Gerilme invariantları	
k	: Elastik yay katsayısı	
$[k]$	: Rijitlik matrisi	
K	: Deformasyon pekleşme parametresi	
K_A	: Aktif toprak basıncı katsayısı	
k_h	: Yatay yatak katsayısı	
K_o	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı	
K_R	: Kazık bükülebilirlik faktörü	
K_c, K_q	: ϕ 'ye ve x/D oranına bağlı katsayılar	(Şekil 3.2)
K_p	: Rankine pasif toprak basıncı katsayısı	
L	: Kazık boyu	
M	: Moment	
M_c	: Karakteristik moment	
M_g	: Gruptaki kazıkta oluşan maksimum moment	
M_{maks}	: Maksimum eğilme momenti	
$M_{maks i}$	: Gruptaki i nolu kazığın maksimum pozitif eğilme momenti	
$M_{maks s}$	: Tekil kazığın maksimum eğilme momentidir	
M_{-maks}	: Maksimum negatif eğilme momenti	
M_{+maks}	: Maksimum pozitif eğilme momenti	

M_s	: Tek kazıkta maksimum moment
M_u	: Kazığın taşıyabileceği maksimum moment
n	: Katsayı (4.10 ve 4.11 bağıntıları)
n	: Gruptaki kazık sayısı
n_h	: Yatay yatak katsayısı sabiti
N	: Çevrimli yüklemede çevrim sayısı
N_h	: E_s 'nin derinlikle artış oranı
$N_{kazık}$	: Gruptaki kazık sayısı
p	: Zemin direnci
p	: Başlangıç ortalama çevre basıncı
p	: Birim zemin direnci
P_c	: Karakteristik yük
P_{cr}	: Kritik derinliğe $k(x_r)$ adar olan zemin reaksiyonu
P_{cd}	: Kritik derinlikten (x_r) sonraki zemin reaksiyonu
P_s	: Bir kazığa gelen ortalama yük (toplam yük/kazık sayısı)
p_u	: Kazığın birim boyu için nihai zemin direnci
P_x	: Kazıkta eksenel yük
P_{xu}	: Nihai yatay zemin direncinin
$\{q\}$	: Deplasman vektörü
$\{Q\}$	: Düğüm noktası vektörü
Q_u	: Kazığın taşıyabileceği maksimum yatay yük
r_m	: Maksimum negatif ve pozitif eğilme momentlerinin karşılaştıran oran faktörü
$\{r\}$	: düğüm noktası deplasman vektör
$\{R\}$	: toplam yük vektörü
R	: Rijitlik faktörü
R	: Gerilme oranı
R_i	: Atalet momenti oranı
R_R, R_p	: Grup azaltma faktörleri
R_{R0H}	: Yatay yükün neden olduğu deplasman için grup azaltma faktörü
R_{R0M}	: Uygulanan momentin neden olduğu deplasman için grup azaltma faktörü
R_{R0H}	: Yatay yükün neden olduğu dönme için grup azaltma faktörü
R_{R0M}	: Uygulanan momentin neden olduğu dönme için grup azaltma faktörü
R_{R0F}	: Tutulu başlı kazıklar için grup azaltma faktörü

s	: Kazık aralığı
s	: Yatay deplasmanın derinlikle değişimi
S_h	: Zemin hareketine dik yönde olan kazık aralığı
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
S_v	: Zemin hareketine paralel yönde olan kazık aralığı
t	: Ara yüzeyin kalınlığı
T	: Rijitlik faktörü
V	: Kesme kuvveti
x	: Zemin yüzeyinden itibaren derinlik
x_o	: Maksimum momentin zemin yüzeyine uzaklığı
x_r	: Zemin yüzeyinden dönme noktası arasındaki derinlik
y	: Yatay yer değiştirme
y_{50}	: Nihai direncin yarısına karşılık gelen deplasman
y_c	: N çevrim sonra deplasman
y_g	: Serbest başlı kazıkta deplasman
y_g	: Kazık grubunun yatay deplasmanı
y_{ldf}	: Akma gerilmesi
y_s	: Başlangıçta yükleme sonrası oluşan deplasman
y_s	: Tek kazığın yatay deplasmanı
z	: Derinlik
Z_{maks}	: Maksimum derinlik katsayısı
α	: Şev eğimi
α_{pHkj}	: İki kazık için α_{pH} değeri
α_{pH}	: Deplasmanının oranı
β	: Duvarın yatayla yaptığı açı
$\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z$	: Normal deformasyon
ϵ_c	: Drenajsız üç eksenli basınç deneyinden deneyinde maksimum gerilme için elde edilen birim deformasyon
ϵ_{50}	: Deviator gerilmenin yarısına karşılık gelen birim deformasyonu
ϵ_i	: İlk birim deformasyon
ϵ_c	: N çevrim sonra ölçülen birim deformasyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı

ϕ'	: Drenajlı efektif içsel sürtünme açısı
γ'	: Zeminin efektif birim hacim ağırlığı
$\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}$	: Kayma deformasyon
ψ	: Genleşme Açısı
$\bar{\rho}$	: Birim referans deplasmanı
ρ_G	: Grup deplasmanı
ρ_k	: k kazığındaki deplasman
$\bar{\rho}_H$	: Birim referans deplasmanı yani birim yatay yük altındaki serbest başlı tekil kazığın deplasmanı
σ	: Ara yüzey elemanın çekme mukavemeti
σ_{vx}'	: Düşey efektif gerilme
σ_v'	: Efektif düşey gerilme
σ_n	: Normal gerilme
$\sigma_x \sigma_y \sigma_z$	: Normal gerilme bileşenleri
θ	: Kazığın dönme miktarı
τ	: Kayma mukavemeti
$\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}$	: Kayma gerilmesi bileşenleri
ν	: Poisson Oranı
ν_{in}	: Ara yüzeyin kayma doğrultusundaki poisson oranları
ν_{out}	: Ara yüzeyin kayma düzlemine dik doğrultusundaki poisson oranları

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.a : Yatay yüklü kazığın etrafındaki varsayılan göçme yüzeyleri, Zemin yüzeyine yakın derinlikler	7
Şekil 2.1.b : Yatay yüklü kazığın etrafındaki varsayılan göçme yüzeyleri, Zemin yüzeyinden daha uzak derinlikler.....	7
Şekil 2.2.a : Kazık grubundaki çakışan gerilme bölgeleri, Plan.....	9
Şekil 2.2.b : Kazık grubundaki çakışan gerilme bölgeleri, Kesit.....	9
Şekil 2.3.a : Boyut etkisi, Plaka.....	10
Şekil 2.3.b : Boyut etkisi, Plakanın 3/2'si.....	10
Şekil 2.3.c : Boyut etkisi, Plakanın 1/3'ü.....	10
Şekil 2.4 : Ön ve arka kazıktaki gerilme zonları.....	10
Şekil 2.5 : Yanal yük etkisinde kazık grubunun göçmesi.....	11
Şekil 2.6.a : Zemin hareket yönüne dik olan kazıkların davranışı, 2 serbest başlı kazık bulunması halinde eğilme momenti profilleri.....	13
Şekil 2.6.b : Zemin hareket yönüne dik olan kazıkların davranışı, 2 kazık bulunması durumunda F^m ve S_H/d ilişkisi.....	13
Şekil 2.6.c : Zemin hareket yönüne dik olan kazıkların davranışı, Kazık sayısının artışının kazık davranışına etkisi.....	13
Şekil 2.7.a : Yükleme yönündeki serbest başlı iki kazığın eğilme momenti, $S_v/d=2.5$ için moment - derinlik ilişkisi	15
Şekil 2.7.b : Yükleme yönündeki serbest başlı iki kazığın eğilme momenti, $M_{maks} - S_v/d$ ilişki.....	15
Şekil 2.8.a : Yükleme yönündeki tutulu başlı iki kazığın eğilme momenti, $S_v/d=7.5$ için moment - derinlik ilişkisi.....	15
Şekil 2.8.b : Yükleme yönündeki tutulu başlı iki kazığın eğilme momenti, $M_{maks} - S_v/d$ ilişkisi.....	15
Şekil 2.9.a : Yükleme yönündeki kazıkların F^m ve r^m ilişkisi, $F^m - S_v/d$	

	ilişkisi.....	16
Şekil 2.9.b	: Yükleme yönündeki kazıkların F^m ve r^m ilişkisi, $r^m - S_v/d$ ilişkisi.....	16
Şekil 3.1	: Brinch Hansen Yöntemi.....	19
Şekil 3.2	: K_q ve K_c katsayıları.....	19
Şekil 3.3.(a,b)	: Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre deformasyonu.....	21
Şekil 3.3.(c,d)	: Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre kohezyonlu zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılımı	21
Şekil 3.3.(e,f)	: Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre kohezyonsuz zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılımı.....	21
Şekil 3.4.(a,b)	: Uzun elastik kazıklarda dönme ve ötelenme hareketleri, kohezyonlu zeminlerde	22
Şekil 3.4.(c,d)	: Uzun elastik kazıklarda dönme ve ötelenme hareketleri, kohezyonsuz zeminlerde.....	22
Şekil 3.5.a	: Kohezyonsuz zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması, kısa kazıklar.....	25
Şekil 3.5.b	: Kohezyonsuz zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması, uzun kazıklar.....	25
Şekil 3.6.a	: Kohezyonlu zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması, kısa kazıklar.....	28
Şekil 3.6.b	: Kohezyonlu zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması, uzun kazıklar.....	28
Şekil 3.7.a	: Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı, Deplasman.....	29
Şekil 3.7.b	: Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı, dy/dx	29
Şekil 3.7.c	: Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı, Moment	29
Şekil 3.7.d	: Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı, Kesme kuvveti	29
Şekil 3.7.e	: Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı, Zemin direnci	29
Şekil 3.8	: Kazıkta p-y kavramı	33

Şekil 3.9	: Kohezyonsuz zeminde p-y teşkili.....	35
Şekil 3.10	: Yumuşak-orta katı kilde p-y teşkili.....	37
Şekil 4.1.a	: $R_{R\phi F}$ ve R_R 'nin kazık aralığı ile değişimi, Kazık rijitliğinin $R_{R\phi F}$ 'e etkisi	46
Şekil 4.1.b	: $R_{R\phi F}$ ve R_R 'nin kazık aralığı ile değişimi, L/d 'nin $R_{R\phi F}$ 'e etkisi ..	46
Şekil 4.1.c	: $R_{R\phi F}$ ve R_R 'nin kazık aralığı ile değişimi, Başlık durumunun R_R 'e etkisi.....	46
Şekil 4.2	: Tutulu başlı kazık gruplarında çeşitli durumlarda yatay yük paylaşımları.....	47
Şekil 4.3	: Kazık grubunun boyutları ve yükler.....	56
Şekil 4.4	: Sonlu elemanlar ağı	57
Şekil 4.5	: A noktasında (Şekil 4.3) kazık başlığının yanal deplasmanı.....	57
Şekil 4.6	: Yükler uygulandıktan sonra deforme olmuş kazık grubu.....	58
Şekil 4.7	: 3 boyutlu sonlu elemanlar ağı.....	60
Şekil 4.8.a	: Her durum için yük-deplasman eğrileri.....	62
Şekil 4.8.b	: Tutulu başlı kazık grubunda başlığın dönmesi.....	62
Şekil 4.9	: Kazıkların adlandırılması.....	63
Şekil 4.10	: 3x3'lük kazık grubunda yük dağılım oranları.....	64
Şekil 6.1	: 2x2 kazık grubu modelinin üç boyutlu sonlu elemanlar ağı.....	77
Şekil 6.2	: Ara yüzey elemanı.....	78
Şekil 6.3.a	: Modelde kullanılan elemanlar, 3D katı sürekli ortam elemanlar..	79
Şekil 6.3.b	: Modelde kullanılan elemanlar, Kabuk elemanlar.....	79
Şekil 6.3.c	: Modelde kullanılan elemanlar, Ara (joint) elemanlar.....	79
Şekil 6.4.a	: Pozitif gerilme yönleri, 3D katı sürekli ortam elemanlardaki durum.....	80
Şekil 6.4.b	: Pozitif gerilme yönleri, 3D katı sürekli ortam elemanlardaki durum.....	80
Şekil 6.5	: Üç boyutlu ara yüzey elemanının in ve out eksenleri.....	81
Şekil 6.6	: Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager akma kriterleri.....	82
Şekil 6.7.a	: Lusas ile yapılan sonlu eleman ağı, Tek kazık.....	86
Şekil 6.7.b	: Lusas ile yapılan sonlu eleman ağı, Kullanılan elemanların detayı.....	86
Şekil 6.7.c	: Lusas ile yapılan sonlu eleman ağı, 3x3'lük kazık grubu.....	86

Şekil 6.8	: Lusas tarafından yapılan Tek ve 3x3'lük grup kazık analizinden elde edilen toplam yatay yük/kazık sayısı- yatay deplasman eğrileri.....	87
Şekil 6.9.a	: Analizlerde kullanılan zemin profili, Kazık başlığı çevresinde orta sıkı kum veya yumuşak kil olması.....	90
Şekil 6.9.b	: Analizlerde kullanılan zemin profili, kazık başlığı çevresinin boş olması.....	90
Şekil 6.10.a	: Üç boyutlu sonlu elemanlar ağı, Elemanların plandaki görünümü.....	91
Şekil 6.10.b	: Üç boyutlu sonlu elemanlar ağı, Kazık başlığının yan yüzeyinden yapılan üniform yükleme	91
Şekil 6.10.c	: Üç boyutlu sonlu elemanlar ağı, 2x2 kazık grubunun sonlu elemanlar ağı.....	91
Şekil 6.11	: Tek kazıklı durumunda çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri.....	93
Şekil 6.12	: 2x2'lik kazık grubunda çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri.....	93
Şekil 6.13	: 20 m. kazık boyu ve başlık çevresi orta sıkı kum olan 2x2 kazık grubunda farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri.....	94
Şekil 6.14	: 20 m. kazık uzunluğu ve başlık çevresi orta sıkı kum olan tek kazıkta farklı kazık çaplarında yatay deplasman-derinlik eğrileri.....	95
Şekil 6.15	: Başlık çevresi yumuşak kilde bulunan 2x2 kazık grubunun 20 ve 15 m. kazık boylarındaki yatay yük-yatay deplasman eğrileri.....	96
Şekil 6.16	: 800 mm. çapındaki tek kazıkların 20 ve 15 m. kazık boylarındaki yatay yük-yatay deplasman eğrileri.....	96
Şekil 6.17	: Tek ve 2x2 kazık grubunda Toplam yatay yük/kazık sayısı- yatay deplasman eğrisi.....	97
Şekil 6.18	: Tek ve 2x2'lik kazık grubundaki yatay deplasman-derinlik eğrileri.....	98
Şekil 7.1.a	: Tutulu başlı tek ve 3x3'lük grup kazıkların analizlerine ait	

	Toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay depl. eğrileri, Wakai ve diğ. (1999) sonuçları.....	100
Şekil 7.1.b	: Tutulu başlı tek ve 3x3'lük grup kazıkların analizlerine ait Toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay depl. eğrileri, Lusas sonuçları.....	100
Şekil 7.2	: 20 m. boyundaki tek kazıkta çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yükler oranı-kazık çapı eğrileri.....	102
Şekil 7.3	: 20 m. kazık boyundaki tek ve 2x2 grup kazıkların yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı farkı eğrileri.....	103
Şekil 7.4	: 20 m. boyunda başlık çevresi sıkı kum olan tek kazıkta farklı kazık çaplarında yatay deplasman-derinlik eğrileri.....	104
Şekil 7.5	: 15 m. den 20 m.ye çıkan kazık boyunda oluşan yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı eğrileri.....	105
Şekil 7.6	: Tek ve 2x2'lik kazık grubundaki yatay deplasman-derinlik eğrileri.....	106
Şekil B.1.1	: Sonlu elemanlar ağının plandan görünüşü.....	113
Şekil B.1.2	: Sonlu elemanlar ağının profilden görünüşü.....	113
Şekil B.1.3	: Sonlu elemanlar ağının üç boyutlu görünüşü.....	114
Şekil B.1.4	: Kazık ve başlık arkasındaki ara (joint) elemanları.....	114
Şekil B.1.5	: Yatay yönden yüklendikten sonraki deforme olmuş 2x2'lik kazık grubunun üç boyutlu görünümü.....	115
Şekil B.1.6	: Yatay yönden yüklendikten sonraki deforme olmuş ara (joint) elemanları.....	115
Şekil B.1.7	: Ara (joint) elemanlar sayesinde kazık arkasındaki zeminde çekme gerilmesinin oluşmaması.....	116

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Yüklemeye paralel 2.5d aralıklı kazık gruplarında F^m ve r^m değerleri..	17
Tablo 3.1 : Farklı şartlarda A_1 ve B_1 katsayıları.....	35
Tablo 4.1 : Yatay yük yönündeki kazık aralığına göre azaltma faktörleri.....	49
Tablo 4.2 : Kohezyonsuz zeminde kazık aralığı/çap oranına göre grup etkinlik faktörü.....	50
Tablo 4.3 : Kohezyonlu zeminde farklı kazık gruplarında kazık aralığı/çap oranına göre grup etkinlik faktörü.....	50
Tablo 4.4 : Model deneyleri ve analizler.....	59
Tablo 4.5 : Analizde kullanılan malzeme parametreleri.....	61
Tablo 6.1 : Lusas analizlerinde kullanılan zemin, kazık ve başlık malzeme özellikleri.....	84
Tablo 6.2 : Lusas analizlerinde kullanılan ara yüzey (interface) elemanlarının malzeme özellikleri.....	84
Tablo 6.3 : Lusas analizlerinde kullanılan ara (joint) elemanlarının malzeme özellikleri.....	85
Tablo 6.4 : Lusas ile yapılan analizler.....	88
Tablo 6.5 : Müsaade edilebilir yatay deplasman değerleri.....	89
Tablo 6.6 : Analizlerinde kullanılan zemin, kazık ve başlık malzeme özellikleri....	89
Tablo 6.7 : Analizlerinde kullanılan ara yüzey (interface) malzeme özellikleri.....	89
Tablo 6.8 : Analizlerinde kullanılan ara (joint) elemanlarının malzeme özellikleri.	90
Tablo 7.1 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, çevre zemin değişimi ile yatay yükler arasındaki oran.....	102
Tablo 7.2 : Analizlerde elde edilen grup etkinlik faktörleri, G_e ($S=3D$).....	107
Tablo A.1 : 6.25 mm. yatay deplasmandaki yatay yükler (kN).....	111
Tablo A.2 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, çevre zemin değişimi ile yatay yükler arasındaki oran.....	111

Tablo A.3	: 6.25 mm. yatay deplasmanda, kazık çapının artması ile yatay yükte oluşan artış yüzdeleri (%).	112
Tablo A.4	: 6.25 mm. yatay deplasmanda, kazık boyunun 15 m.den 20 m. ye artmasıyla yatay yük artış yüzdeleri (%).	112
Tablo A.5	: Analizlerde elde edilen grup etkinlik faktörleri, G_e ($S=3D$).	112



ÖZET

Bu çalışmada tek ve grup kazıkların yatay yükler etkisi altındaki davranışları incelendi. Çalışmayı iki kısma ayırmak mümkündür. Bunlardan birincisi genel olarak kazıklardan bahsedildikten sonra yatay yüklü kazıklarla ilgili bilgilerin verildiği bölümler ve yatay yüklü kazıklar ile ilgili yapılan sonlu elemanlar analizinin sunulduğu bölümlerdir.

Kazıklar hakkında genel bilgi verildikten sonra tek ve grup kazıklarının yatay yük altında davranışları incelendi. Kazık grubunda yapılan model deneylerinin sonuçları verildi.

Yatay yüklü tekil kazıkların hesap yöntemlerinden bahsedildi. Brinch-Hansen metodu, Broms metodu, p-y eğrileri, yatak katsayısı metodu, elastik teori ve karakteristik yük yöntemleri hakkında bilgi verildi. Yatay yüklü kazık gruplarının hesap yöntemlerinden bahsedildi. Sürekli ortam yöntemi, Winkler etkileşim modeli, değiştirilmiş birim yük transferi yöntemi, ampirik rijitlik modeli, grup azaltma faktörü yöntemi, birleştirme modeli, grup büyütme yöntemi hakkında bilgi verildi. Daha sonra tek ve grup kazıkların hesaplarında kullanılan sonlu elemanlar yöntemi iki farklı çalışma ile tanıtılarak sonuçları anlatıldı.

Çalışmanın ikinci kısmı sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler ve bu analizlerin sonuçlarını içermektedir. Sonlu elemanlar programı hakkında bilgi verildikten sonra yapılmış bir çalışmanın Lusas ile analizi yapılarak sonuçları karşılaştırıldı. Daha sonra Lusas ile farklı başlık çevresi ortamı, kazık çapı ve kazı boylarında analizler yapılarak sonuçları grafikler halinde verilmektedir. En son bölümde yapılan çalışmaların sonuçları sunulmaktadır.

THREE DIMENSIONAL NON-LINEAR ANALYSES OF Laterally LOADED SINGLE AND GROUP PILES WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In this study, the behaviour of single and group piles under lateral load are examined. We can divide the study into two part. Firstly, general pile knowledge is given and then laterally loaded piles are described. Second, finite element analyses about laterally loaded piles are presented.

After general information about piles are given, the behaviour of single and group piles under lateral load are studied. Model tests which are applied to pile groups are explained and results are given.

The analyses methods of single piles are mentioned. Brinch-Hansen method, Broms method, p-y curves, subgrade reaction approach, elastic theory and characteristic load methods are explained. The analyses methods of pile groups are mentioned. Winkler interaction model, modified unit load transfer method, empirical stiffness model, group reduction factor method, hybrid model and group amplification procedure are explained. Then finite element method which is used to evaluate the single and group piles, is introduced and examined with the two different study.

The second part of the study contain the finite element program and its analyses results. After informing about the finite element program, a study which results are present, is analyzed by Lusas and results are compared. Then by using different pile cap surroundings, pile diameter and pile length, single and group piles are analyzed and results are given with the curves. At last, conclusion of the analyses are presented.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Teknolojinin hızla ilerlemesine paralel olarak, büyük kentler ve sanayi bölgelerinde yüksek ve ağır yapıların inşaatı büyük önem kazanmaktadır. Bu tip yapılarda, yapıdan zemine aktarılacak yüklerin çok büyük değerlere ulaşması nedeni ile çoğu zaman yüzeysel temellerle temel sisteminin çözümü mümkün olmamaktadır. Temellerin aynı anda sağlaması gereken taşıma gücü ve oturma koşulları sağlanamamaktadır. Böyle bir durum genellikle yumuşak veya yumuşağa yakın kohezyonlu zeminlerde; gevşek veya gevşeye yakın kohezyonsuz zeminlerde ortaya çıkmaktadır.

Temel zeminin iyileştirilmesi, zeminin uzaklaştırılarak yerine iyi derecelenmiş çakıllı zeminin sıkıştırılarak yerleştirilmesi veya derin temel yapılabilir. Derin temeller; kazıklı, ayak ve keson temel olmak üzere üçe ayrılır. Kazıklı temeller en çok kullanılan derin temel sistemidir.

Kazıklı temeller yüzeysel temellere göre çok daha pahalıdır. Bunun için kazıklı temellerin tasarım aşamasında optimum ekonomi-fayda sağlanmalıdır. Bu da tasarımı etkileyen parametreleri farklı kombinasyonlarda kullanarak ve birbirleriyle karşılaştırmakla olmaktadır. Bu tip varyasyonlar bilgisayar programlarıyla yapılarak hem zamandan hem de iş gücünden tasarruf sağlanmaktadır. Bu çalışmada yatay yüklü tek ve grup kazıklarının davranışı sonlu elemanlar programıyla çalışan LUSAS (London University Stress Analysis System) ile incelendi.

2. ZEMİN-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

2.1. Kazıklar

2.1.1. Tarihçe

Yapıları desteklemek için taşıyıcı kazıkların çakılması inşaat mühendisliğinin ilk sanat ve bilim örneğidir. Britanya’da Romalılar tarafından inşa edilen nehir kıyısı yerleşimlerinde ve köprülerde sayısız ahşap kazık kullanımı örneği bulunmaktadır. Çin’de, Han Dynasty’deki köprü inşaatçıları ahşap kazık kullanmışlardır (M.Ö. 200- M.S. 200). İsviçre’nin neolitik insanının günümüzden 12000 yıl önce sığ göl tabanlarında ahşap kazık çakarak üzerlerine barınak inşa ettikleri belirlenmiştir. Po nehrinin hemen yanına Batı Avrupalı istilacılardan kaçan İtalyanların kurduğu Venedik şehrinde de benzer bir yapı gözlenmektedir. Ahşap kazıklar üzerindeki yüzen şehir sayesinde insanlar hem besin kaynaklarına yakın olmuşlar, hem de güvenliklerini sağlamışlardır.

Bu ilk zamanlarda belli bir çekiç ve belli bir düşme yüksekliği karşısında çakmaya gösterdiği direnç ile hesaplanan izin verilebilen yükün belirlenmesi ilkel kurallara göre belirlenmekteydi. Çeşitli ağaç türlerinin durabilitesi hakkında ve ahşabı çürümeye karşı yakan veya başlarına kargır taban döşek yaparak su seviyesi altında geçirimsizliği sağlayan bazı yöntemlerin ölçüleri hakkında da bilgiler birikmiştir.

Ahşabın hafifliği ile birleşen dayanımı, durabilitesi, kesme ve taşıma kolaylığı son zamanlara kadar kazık işlerinde kullanılan tek malzeme olmasına neden olmuştur. Daha sonra bu malzeme beton ve çeliğe yerini bırakmıştır. Bunu nedeni ise aynı boyutlardaki ahşaba göre daha fazla basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerini taşımaları ve fabrikada istenilen birimlere getirilebilmeleridir.

19. yüzyılın sonları 20.yüzyılın başlarında yapısal bir ortam olarak gelişen betonarme, karadaki yüksek kapasiteli kazık işlerinde büyük oranda ahşabın yerini

almıştır.çeşitli yapısal formlarda hazırlanabilen bu kazıklar çok değişik zemin ve kaya ortamlarında kullanılabilir ve büyük çaplarda imal edilebilirler.

Kazık işlerinde çelik kullanımı ise vazgeçilmezdir. Bu artan kullanım, fabrikasyon ve taşıma kolaylığının yanısıra çok zor şartlardaki çakma işlemlerinde uygulanabilmesi yüzündendir. Kıyı yapılarında çelikteki korozyon problemi dayanıklı kaplama ve katodik korumalarla çözülmektedir [1].

2.1.2. Kazık Türleri

Kazıklar değişik özellikleri esas alınarak birçok şekilde sınıflandırılabilir. Örneğin kazık malzemesi gözönüne alındığında ahşap, beton, çelik veya bunlardan ikisinin bir arada kullanıldığı türlerden sözedilebilir. Yükü zemine aktarılış düşünüldüğünde ise büyük kesimi kazık ucunda taşınıyorsa uç kazığı, kazık çevresinde taşınıyorsa sürtünme kazığı gibi adlarla anılırlar. Kazıklardan çekme yükünü karşılayanlar ise çekme kazığı adını alırlar. Bazı kazıklar özel üretim biçimleri nedeniyle patente sahip firmanın adı ile anılırlar. Örneğin Franki Kazıkları gibi [3]. Bütün bunların yanısıra kazıkların sınıflandırılması belki daha açıklayıcı olarak zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde neden oldukları yer değiştirmelere göre yapılabilirler [2].

- a) Zeminde çok yer değiştirmeye neden olanlar: Genel olarak çakma kazıklar bu gruba girmektedir. İçi boş ancak alt ucu kapaklı kesitlerin veya içi dolu kesitlerin zemine çakılıp yerinde bırakılmalarıyla oluşturulurlar. İçi dolu kesitler ahşap veya hazır beton (normal donatılı veya öngermeli) kazıkları oluşturulken içi boş kesitler çelik boru veya çelik kutu ile beton boru kazıklar olabilir ve içleri çakıldıktan sonra boş bırakılabilir veya betonla doldurulabilir. Genişletilmiş tabanın ve gövdesinin oluşturulmasında tokmaklanan betonun zemini yanal olarak sıkıştırması nedeniyle Franki kazıkları da bu grup içerisinde sayılmalıdır.
- b) Zeminde az yer değiştirmeye neden olanlar : H kesitli, ucu açık boru veya kutu çelik kazıklar çakma sırasında uçlarında bir tıkaç oluşmuyorsa zeminde çok az yer değiştirmeye neden olurlar. Büyük çekme kuvvetleri taşınabilen çelik vida kazıklar da bu sınıftandır.
- c) Zeminde yer değiştirmeye neden olmayanlar : Zemin kazılarak bir boşluk oluşturmak ve bu boşluğun betonlanmasıyla oluşturulan kazıklardır. Boşluk

kenarlarının desteklenip desteklenmemesi, destekleniyorsa kalıcı mı yoksa geçici mi olduğu, geçici ise bir kılıf yardımı ile mi yoksa sondaj çamuru ile mi yapıldığına göre değişik kazık türlerinden söz edilebilir.

Kazıkların diğer bir yaygın sınıflandırılışı zeminde yerleştiriliş biçimlerine göre yapılmaktadır. Hazır çakma kazıklar, çakma yerinde dökme kazıklar, delinip yerinde dökme kazıklar, burgulanarak yerleştirilenler, su jeti kullanılarak yerleştirilenler, iterek yerleştirilenler gibi.

2.1.3. Kazık Seçiminde Etkiyen Etkenler

Yukarıdaki anılan bir çok kazık türünün birbirine göre olumlu ve olumsuz yanları vardır. Bir tasarımda bu özellikleri birlikte en elverişli çözüm için yapının yeri ve tipi, zemin ve yeraltı suyu durumu, uzun sürede dayanıklılık ve genel maliyet gözönüne alınmalıdır.

Hazır beton çakma kazıklar belirlenmiş bir düzende çakılabilirler. Yumuşak kil, silt ve turbalık zeminde boğulma tehlikesi olmaksızın yerleştirilebilirler. Yer altı suyunun varlığı kazık yapım işini etkilemezken, kazık malzemesinin önceden kalite kontrolü olanaklıdır. Sonradan yerleştirilenlerce yukarı kaldırılmışsa tekrar çakılabilirler. Uzun boylarda çakılabilirler, deniz yapılarında su derinliğinin geçilmesi daha kolaydır. Bu olumlu yanlarının yanısıra boylarının kolayca değiştirilmeyişi, büyük çaplarda ve sınırlı hacimlerde çakma zorlukları, çakma sırasında çevrede kabarma olasılığı ve gürültü, zor çakma koşullarında kazıkta hasar olasılığı ve taşınmaları sırasında doğacak etkileri karşılamak amacı ile belki de gereksiz donatı konulma zorunluluğu olumsuz yönleri olarak sayılabilir.

Fore kazık diye de anılan zeminin kazıldıktan sonra betonlanması ile oluşturulan kazıklarda zeminde kabarma olmayışı, kazık boyunun koşullara göre kolayca ayarlanabilmesi, kazı sırasında zemin verilerinin doğrulanma olanağı olumlu yönleridir. Bu tür kazıkların yumuşak kayaç ve killi zeminde son bulan uçları özel aygıtlarla genişletilerek taşıma kapasiteleri artırılabilir, uzun boylar ve geniş çaplar sınırlı kazık yapım yeri koşullarında gerçekleştirilebilir. Donatı, taşınma ve çakma gerilmeleri tarafından belirlenmez. Bunların yanısıra yumuşak zeminlerde boğulma olasılığı, su altında beton dökme zorlukları ve betonun kontrol edilemeyişi, foraj sırasında granüler zeminlerin gevşemesi, yumuşak kayaçların bozuşma olasılığı,

özellikle kazık tabanı zemininde su akışı nedeni ile gevşeme ve kabarma olasılığı olumsuz ve özen gösterilmeyi gerektiren taraflarıdır [2].

Kazık tipi seçimine etki eden faktörler aşağıda sıralanmaktadır [4].

- Her şeyden önce ekonomi önemlidir,
- Kazık boyu, boyların eşit veya değişken oluşu, boylarının değişken olması durumunda uygulanabilirlik,
- Mevcut zemin şartlarında her tipin emniyetle taşıyacağı yük,
- Kazıkların zeminde teşkilinde kolaylık, imalat hızı veya hazırlanma ve çakılma hızı,
- Çakma şartlarına ve yöntemine uygun kazık tipi,
- Kazık başlarının kolay kesilmesi veya uygun olarak emniyete alınması,
- Gerekirse kazık sayısını arttırabilme kolaylığı,
- Eski yapıya ilave yapılması halinde önceden yapılmış kazıkların tipi,
- Eğik kazık gerektiğinde belli açıda teşkil edilebilme kolaylığı,
- Uygulanacak tip için yüklenici ve işverenin tecrübeleri

2.1.4. Kazıklı Temeller

Üst yapı yüklerini kısmen veya tamamen zemin yüzünden daha derinliklerdeki tabakalara aktaran (temel derinliği/temel genişliği oranı genellikle 5'den büyük olan) temel sistemleri derin temeller olarak nitelendirilmektedir. Derin temeller arasında kazıklı temeller, ayak/keson temeller ve derin kazı içine yerleştirilen yapı temelleri düşünülebilir.

Yapımı yönünden birbirinden oldukça farklılıklar gösteren kazıklı temeller ile ayak/keson temeller, son yıllarda çok büyük çaplı kazıklı temeller inşa edilebilmesi de göz önüne alınarak, davranış analizi yönünden aynı grup içinde düşünülebilir. Derin kazı sonucu zemin yüzünden büyük derinliklere yerleştirilen yapı temellerinin tasarımı ise büyük oranda yüzeysel temellerin tasarımı ile aynı esaslara dayanmaktadır.

Yüzeysel temel çözümlerine göre daha pahalı olmalarına karşın değişik nedenlerle kullanıldıkları bazı durumlar aşağıda sıralanmaktadır [2]:

1. Üsteki zemin tabakalarının üst yapı yükleri taşıma güçlerinin olmayışı veya çok sıkışabilir nitelikleri nedeniyle yüklerin daha sağlam zemin veya kayaca

aktarıma zorunluğu doğabilir. Sağlam tabakanın çok derinde olması halinde yükün büyük kesimi kazık çevresinden zemine aktarılacak şekilde düzenleme yapılabilir.

2. Dayanma yapıları veya yüksek yapı temellerinde zemin, rüzgar ve deprem yükü gibi yanal etkilerin karşılanması amacı ile düzenlenebilirler.
3. Suyla ilişkiye geçtiğinde kabaran veya ani çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerinin aktif zon diye tariflenebilecek bir bölgenin dışına aktarmak gerekebilir.
4. Kuleler, deniz platformları ve yeraltı suyu altındaki radyeler kaldırma kuvvetleri etkisindedirler. Bu kuvvetlerin karşılanmasında kazıklı temeller düzenlenebilir.
5. Köprü kenar ve orta ayakları, erozyon nedeniyle temel altının oyulmasına karşı kazıklı olarak düzenlenebilirler.
6. Kazıklar bazı durumlarda zemin hareketini kontrol amacıyla kullanılabilir.
7. Gevşek granüler zeminlerin sıkı hale getirilerek iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

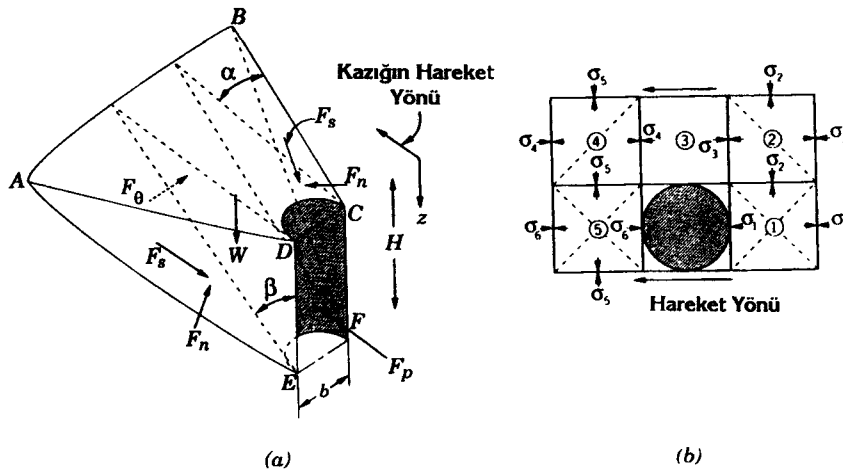
2.2. Yatay Yüklü Tekil Kazığın Davranışı

Liman ve kıyı yapılarında gemi çarpması ve navlun yükleri, açık deniz yapılarında rüzgar ve dalga yükleri, dayanma yapıları temelleri, kule temelleri kazıkların yatay yüklenmesine birer örnektir. Bu tür kazıklarda tasarım kriteri nihai taşıma gücü değil çoğunlukla kazıkların maksimum deformasyonudur. Nihai taşıma gücü ve yer değiştirmelerin yanı sıra kazıkta eğilme ile göçme meydana gelme olasılığına karşı güvenlik de gözötenmelidir. Genelde nihai taşıma gücüne aşırı deformasyondan sonra ulaşıldığı için belirleyici olan diğer iki koşul olmaktadır.

Zemin-yapı etkileşimi problemlerinden birisi olan yanal yüklü kazıkta, temasta olan kazık ve zeminde aynı deformasyon ve yer değiştirme söz konusudur. Zeminde gerilme-şekil değiştirme davranışı elastik olmadığından sonuçta yük-moment-ötelenme arasındaki bağıntı güvenli çalışma bölgesinde dahi doğrusal olmayacaktır [2].

Yatay yüklü kazıklardaki nonlinear davranışa neden olan iki faktör vardır. Birincisi kazık etrafındaki zeminin yük-deplasman davranışı nonlinearidir. Yük kazıktan zemine artan bir yüzdeyle iletilirken, deplasman daha büyük bir yüzde ile artmaktadır. Kazığın davranışı lineer olmaya devam ederken, kazık-zemin sisteminin davranışı nonlinear olmaktadır. İkincisi ise, kazığın üst kısmındaki zeminin dayanımı nihai değerine ulaştığı zaman ek yükler dayanımın nihai değerine aynı derecede ulaşmadığı daha derinlerdeki zeminlere iletilmelidir. Daha derinlere yükleri transfer etmek için, derinlik boyunca kazık daha fazla deplasman yapar ve zemin direnci derinlik boyunca artar. Dolayısıyla momentler kazık başından etkiyen yüke göre çok daha hızlı artmaktadır. Yapılan analizler, maksimum moment ve zemin direnci yatay yükün büyük değerleri için daha derinlerde oluştuğunu göstermektedir [5].

Zemin yüzeyinde, yatay yüklü kazığın zemine etkisi iki boyutlu aktif ve pasif toprak basıncının meydana getirdiği etkiden farklıdır. Yatay yüklü kazığın deplasmanına karşı koyan maksimum birim zemin direnci iki boyutlu durum için hesaplanan maksimum birim pasif dirençten daha büyüktür. $3B$ ve daha büyük derinliklerde yatay yüklü kazık, tamamen zemine gömülü derin temelin taşıma gücünde olduğu gibi zeminini etkiler. Yatay yüke olan zemin direnci bu derinliklerde de iki boyutlu zemin direncinden daha büyük değerlere ulaşır. Zemin yüzeyinden yaklaşık $3B$ derinliğe kadar olan bölgede ise, bu iki deformasyon şekli arasında geçiş olmaktadır (Davisson, 1960). Reese ve diğerleri (1974) zemin yüzeyinde ve daha derinlerde olmak üzere iki farklı durumu göz önüne almaktadır. Şekil 2.1 de gösterilen alanlar yukarıda bahsedilen zemin dirençlerinin bulunmasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 : Yatay yüklü kazığın etrafındaki varsayılan göçme yüzeyleri a) Zemin yüzeyine yakın derinlikler b) Zemin yüzeyinden daha uzak derinlikler [6]

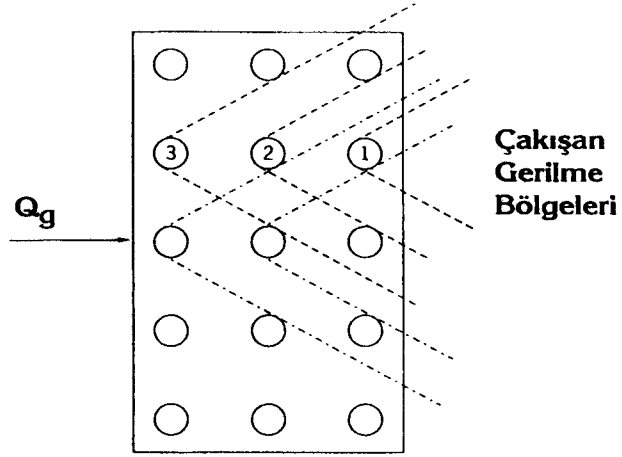
Killi zeminlerdeki tekrarlı yüklere maruz kazıklarda zemine yakın bölgelerde zemin direncinde azalma olmaktadır. Kayma şekil değiştirmeleri kilin rijitliği ve kayma mukavemetinde azalmaya sebep olmaktadır. Eğer tekrarlı yüklerden sonra bir müddet beklenirse zeminin dayanımında artış olmaktadır. Ancak bu etki kilin konsolidasyon ve tiksotropik özellikleri ile üzerindeki düşey yüke bağlıdır. Killi zeminlerdeki çakma kazıklarda kazığın yanal direnci zamanla arttığı görülmektedir.

Kumlardaki tekrarlı yüklemelerde yatay yüklü kazığın deplasmanı yükün ilk etkisiyle oluşan deplasmanın iki katı kadar olabilir. Eğer kum gevşek yapıda ise, tekrarlı yükler kumun sıkılığını artırır ve deplasmandaki sonradan oluşan artışları düşürür. Yükün büyüklüğündeki değişikliğe benzer bir artış kumun sıkılığında olmaktadır [6].

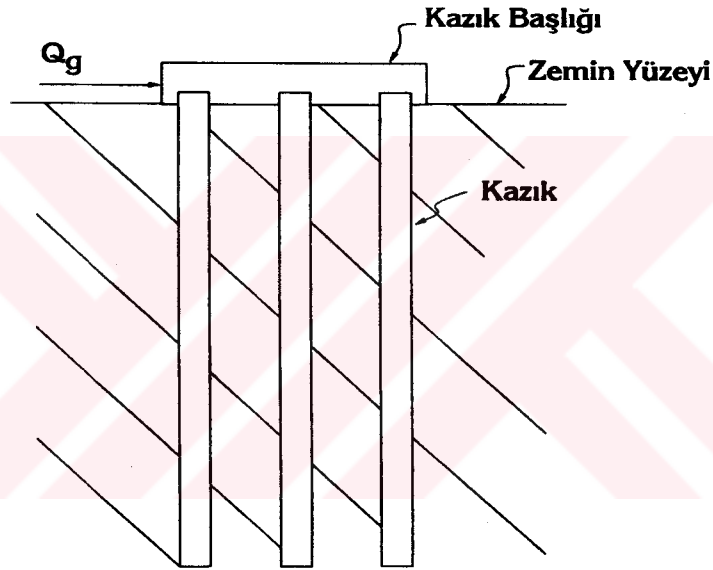
2.3. Yatay Yüklü Kazık Grubunun Davranışı

Yatay yüklü kazık grubu ile tekil kazık davranış olarak birbirlerinden farklıdır. Kazık grubundaki kazıklar hareketleri ile hem çevre zemini hem de çevresindeki kazıkların davranışlarını etkilemektedir. Şekil 2.2 de plan ve kesiti gösterilen yatay yüklü kazık grubunda kazıkların etki alanları kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Görüldüğü gibi kazıkların yatay yük etkisinde oluşturdukları gerilme bölgeleri birbirleriyle çakışmaktadır. Ön sıra kazıkların deplasman yapması arkalarındaki zemini ferahlatmaktadır. Zemin örselendiği için gösterdiği direnç azalmakta ve arka sıra kazıklar daha fazla deplasman yapmaktadır. Gruptaki köşe kazıklar en fazla yükü alırlarken, ortalarındaki kazıklar daha az yüklenirler.

Şekil 2.3.a da yatay yüklü kazık grubunda grubun önünde oluşan etki incelenmektedir. Düşey bir plaka üniform bir basınçla yüklendiğinde şekildeki gibi bir gerilme soğanı oluşmaktadır. Eğer plaka 9 eşit parçaya bölünüp, 6 parça ayrı ayrı yüklenirse efektif gerilme soğanı, Şekil 2.3.a daki limit değerlerden daha içerde ve çakışan gerilme soğanlarının da dışında oluşmaktadır (Şekil 2.3.b). Parça plakaların gerilme soğanları içiçe girdiğinden grup için kabul edilemez. Şekil 2.3.c de ise ara mesafeleri arttırılmış 3 parçaya basınç uygulanmaktadır. Burada çakışma meydana gelmediğinden grubun gerilme soğanı parça plakalarınınkine eşittir [6].



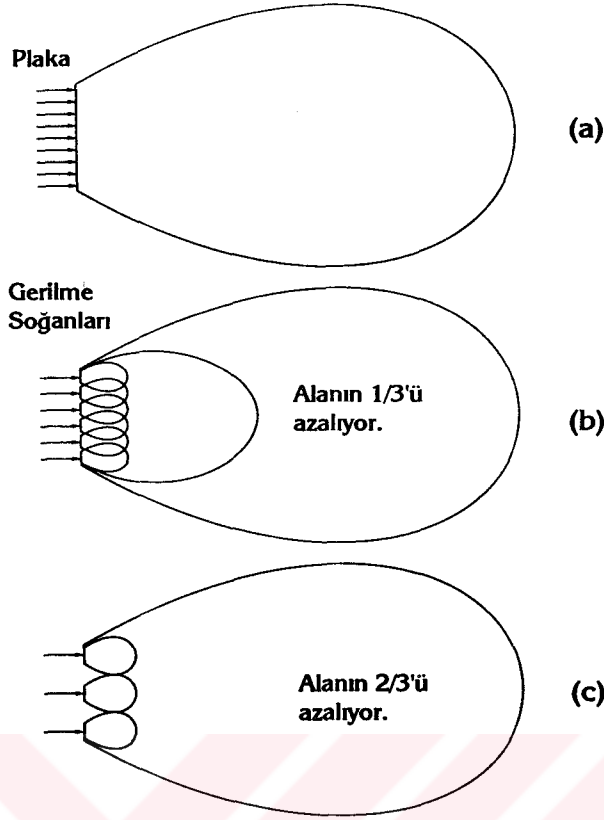
(a)



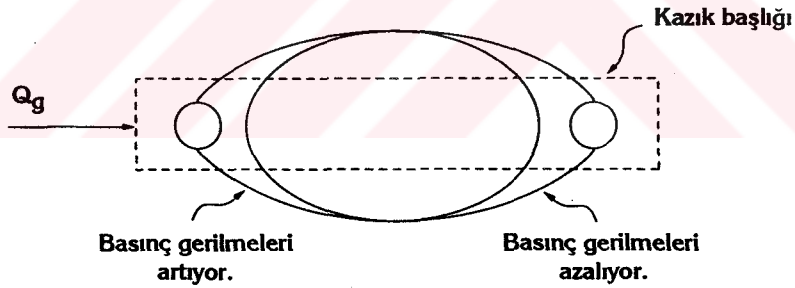
(b)

Şekil 2.2 : Kazık grubundaki çakışan gerilme bölgeleri a) Plan b) Kesit [6]

Yük doğrultusunda arka arkaya bulunan kazık başlıklı iki kazığı incelersek, başlıktan yük uygulandığında arka kazık önündeki zeminde basınç gerilmeleri oluşturmaktadır. Fakat ön kazığın deplasmanı ise arkasındaki zeminin basınç gerilmesini azaltmaktadır. Bu durum Şekil 2.4 deki gerilme zonları ile gösterilmektedir. Kazık aralığını maksimum 12B olmalıdır. Grup etkisi yük yönünde kazık aralığının 8B olmasıyla kaybolmaktadır.

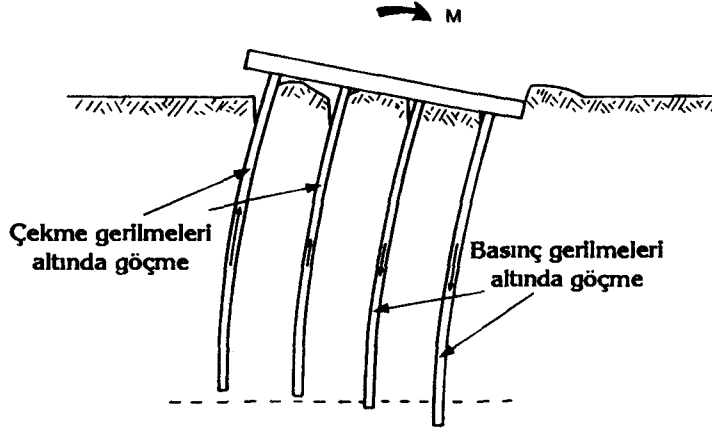


Şekil 2.3 : Boyut etkisi a) Plaka b) Plakanın 3/2'si c) Plakanın 1/3'ü [6]



Şekil 2.4 : Ön ve arka kazıktaki gerilme zonları [6]

Kazık gruplarının göçmesi fazla yanal deformasyon yapması yanında dönmesinden dolayı da olmaktadır. Şekil 2.5 de görüldüğü dönme ekseninin arkasındaki kazıklar çekme gerilmelerinden, önündeki kazıklar ise basınç gerilmelerinden dolayı göçmektedir. Bu yüzden kazık grubun genel stabilitesi için yanal kapasitesinin yanında düşey kapasitesi de önemlidir. Yanal yüklü kazık gruplarında, grup etkinlik katsayısı birden oldukça fazladır. Çekme ve basınç etkisindeki grup kapasitesi ve göçme şekli yanal toprak direnci de hesaba katılarak statik hesaplarla bulunabilir.



Şekil 2.5 : Yanal yük etkisinde kazık grubunun göçmesi [7]

2.4. Kazık Gruplarında Yapılan Model Deneylerin Sonuçları

Kum içerisindeki kazık grubuna, yatay zemin hareketi uygulanarak model deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmanın başlıca amacı yatay yüklü kazık grubu davranışını etkileyen ; kazık aralığı, kazık sayısı ve başlığın serbest veya tutulu olması durumlarını incelemektir. Kullanılan kumun birim hacim ağırlığı 13 kN/m^3 'dür. Deneyden önce kumun granülometri eğrisinden $D_{85} = 1.0 \text{ mm}$, $D_{50} = 0.5 \text{ mm}$ $D_{10} = 0.22 \text{ mm}$ değerleri bulunmuştur. Deneyler üç farklı kazık dizilişi için yapılmıştır. Bunlar aynı sıradaki, aynı çizgideki ve kare dizilişteki kazık gruplarıdır. Zemin hareket yönüne dik olanlar aynı sırada, paralel olanlar aynı çizgide diye kabul edilmiştir [8].

Poulos vd. (1995) tarafından tek kazıklar için yapılan deney sonuçlarını Chen ve diğerleri (1997) grup içerisindeki kazıklarla ayrı ayrı karşılaştırmıştır. Grup etkisinin değerlendirilmesi için kazığın eğilme momenti ve başlığın deplasmanı deney sırasında ölçülmüştür. Fakat eğilme momenti değerleri deplasmana göre daha tutarlı olmuştur. Bunu nedeni deplasmanı ölçerler çok hassas olması ve titreşim gibi dış etkilere etkilenmektedirler. Ayrıca kazıklar düşey olarak yerleştirilmemiş olabilir. Oysa eğilme momentlerinin bulunmasında kullanılan deformasyon ölçerler dış etkilere karşı çok hassas değildir. Sonuç olarak, grup etkisi eğilme momenti sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

Grup etkisini incelemek için 2 farklı grup faktörü tanımlanmıştır. Eşitlikleri

$$F^m = \frac{M_{\text{maks } i}}{M_{\text{maks } s}} \quad (2.1)$$

$$r^m = \frac{M_{-maks}}{M_{+maks}} \quad (2.2)$$

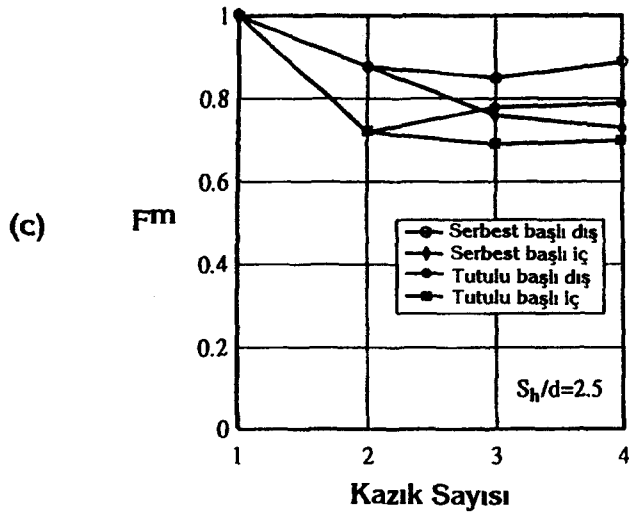
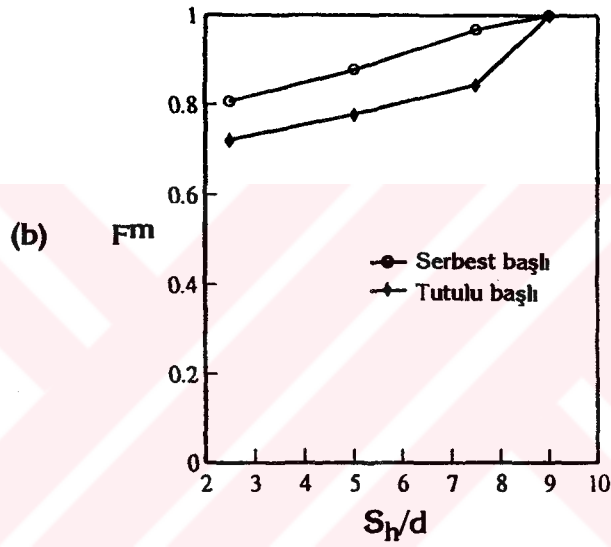
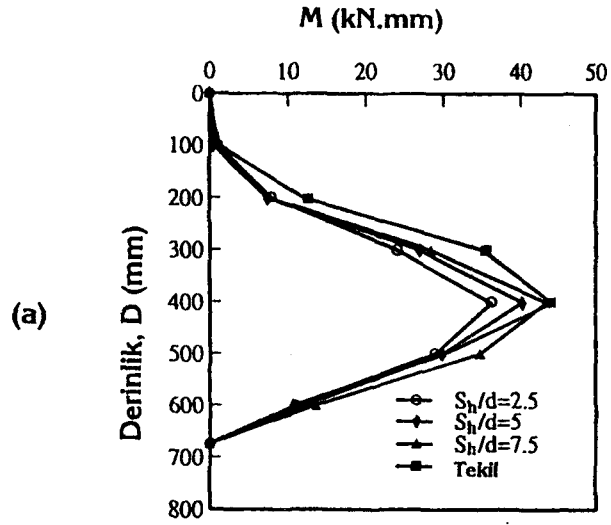
şeklinde verilen grup faktörlerinden F^m , maksimum pozitif eğilme momentine göre grup faktörüdür. $M_{maks\ i}$ gruptaki i nolu kazığın maksimum pozitif eğilme momenti, $M_{maks\ s}$ tekil kazığın maksimum eğilme momentidir. r_m , maksimum negatif ve pozitif eğilme momentlerinin karşılaştıran oran faktörüdür. M_{-maks} maksimum negatif eğilme momenti, M_{+maks} maksimum pozitif eğilme momentidir [8].

2.4.1. Zemin Hareket Yönüne Dik Olan Kazıklar

Kazık aralığının etkisi

Şekil 2.6.a da serbest başlı tekil kazık ve kazık gruplarındaki eğilme momenti profilini gösterilmektedir. S_h terimi zemin hareketine dik yönde olan kazık aralığını tanımlamaktadır. Görüldüğü gibi her durum için profiller şekil olarak benzerdir fakat eğilme momentinin büyüklüğü farklıdır. Farklı kazık aralığında eğilme momentinin değişmesi kazık uzunluklarının ortalarında olmakta ve aynı şekilde maksimum momentin de yeri bu derinlikte meydana gelmektedir. Kazık aralığı azaldıkça maksimum eğilme momenti düşmektedir. Başlıklı durumda, üst kısımda negatif eğilme momenti oluşsa da değeri çok küçüktür. Bu yüzden, serbest başlıya göre farklı kazık aralığında eğilme momenti profilinin şekli aynı olsa bile değeri daha küçüktür.

Serbest ve tutulu başlı kazık durumu için maksimum eğilme momentine göre grup faktörü olan F^m ile normalize edilmiş kazık aralığı arasındaki ilişki Şekil 2.6.b de gösterilmektedir. Her durum için F^m değerinin birden küçük olduğu ve kazık aralığı düştükçe azaldığı görülmektedir. Tutulu durumda, kazığın üst kısmında negatif moment oluştuğundan serbest başlıya göre F^m daha az değerler almaktadır. Hem serbest hem de tutulu başlı kazık gruplarında, grup ve tek kazık arasında karşılaştırılma yapılırsa maksimum eğilme momenti %20 ile %30 arasında azalmaktadır.



Şekil 2.6 : Zemin hareket yönüne dik olan kazıkların davranışı (a) 2 serbest başlı kazık bulunması halinde eğilme momenti profilleri (b) 2 kazık bulunması durumunda F_m ve S_h/d ilişkisi (c) Kazık sayısının artışının kazık davranışına etkisi [8]

Kazık sayısının etkisi

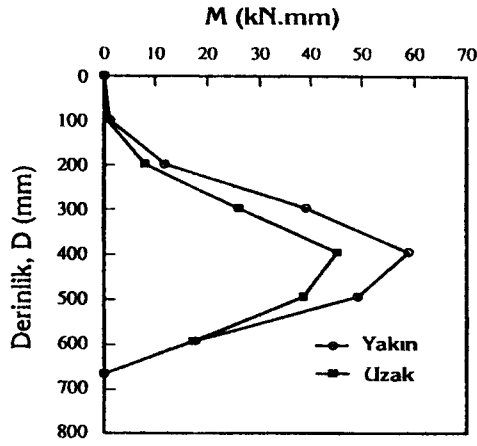
Kazık sayısının kazıkların yatay yöndeki davranışına etkisini incelemek için zemin hareketine dik yönde dizilen 3'lü ve 4'lü serbest ve tutulu başlı kazıklarda deneyler yapılmıştır. Kazık sayısının maksimum eğilme momentteki etkisi Şekil 2.6.c de gösterilmiştir. Deney sonuçları, her iki başlık durumu içinde eğilme momenti profiline şeklinin çok benzer olduğunu ve maksimum momentin yerinin birbirine yakın olduğunu göstermiştir. F^m ile kazık sayısı arasındaki ilişki iç ve dış kazıklar için serbest ve tutulu durumlarda farklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni farklı yük paylaşımlarından dolayıdır. Aynı sıradaki kazık sayısının değişimi ile eğilme momentinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Diğer yandan serbest başlı iç kazıklarda kazık sayısı arttıkça eğilme momentinin düştüğü gözden kaçmamalıdır [8].

2.4.2. Zemin Hareket Yönüne Paralel Olan Kazıklar

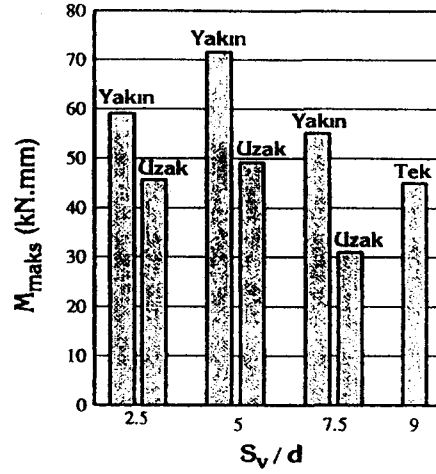
Kazık aralığının etkisi

Bu etkiyi araştırmak için serbest ve tutulu başlı 2'li kazık gruplarında 2.5d, 5d, ve 7.5d olmak üzere üç farklı kazık aralığı seçilmiştir. Grafiklerde kazıkları tanımlamak için yakın ve uzak terimleri kullanılmıştır. Yakın ve uzak yüklemenin yapıldığı yöne olan kazıkların göreceli uzaklıklarını göstermektedir. S_v terimi ise zemin hareketine paralel yönde olan kazık aralığıdır.

Şekil 2.7.a da serbest başlı yakın ve uzak kazıklar için eğilme momenti profili gösterilmektedir. Her profilin şekli benzer ve maksimum eğilme momentinin yerleri birbirlerine yakındır. Zemin hareket yönüne dik olarak sıralanan kazıklara göre momentin büyüklüğü biraz farklıdır. Şekil 2.7.b de farklı kazık aralıkları için her kazığa ait maksimum eğilme momenti gösterilmektedir. Yakın kazıklarda, uzak ve tekil kazıklara göre daha büyük M_{maks} oluşmuştur. Uzak kazıklarda ise kazık aralığına göre tekil kazıklardan düşük veya yüksek M_{maks} oluşmuştur. Bu sonuçlardan hem yakın hem de uzak kazıkta en fazla değerlere ulaşıldığından 5d'nin kritik aralık olduğu görülmektedir.

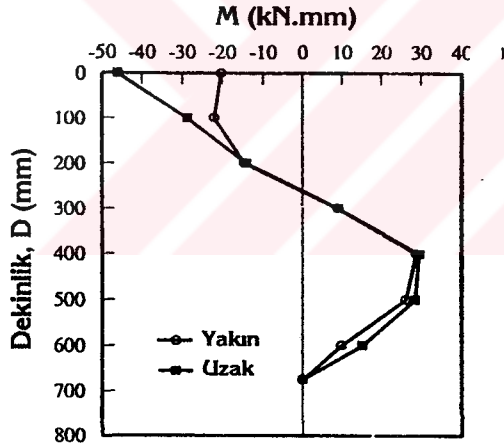


(a)

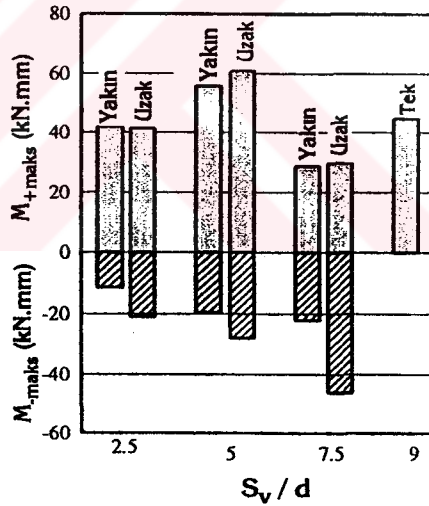


(b)

Şekil 2.7 : Yükleme yönündeki serbest başlı iki kazığın eğilme momenti (a) $S_v/d=2.5$ için moment - derinlik ilişkisi (b) $M_{maks} - S_v/d$ ilişkisi [8]

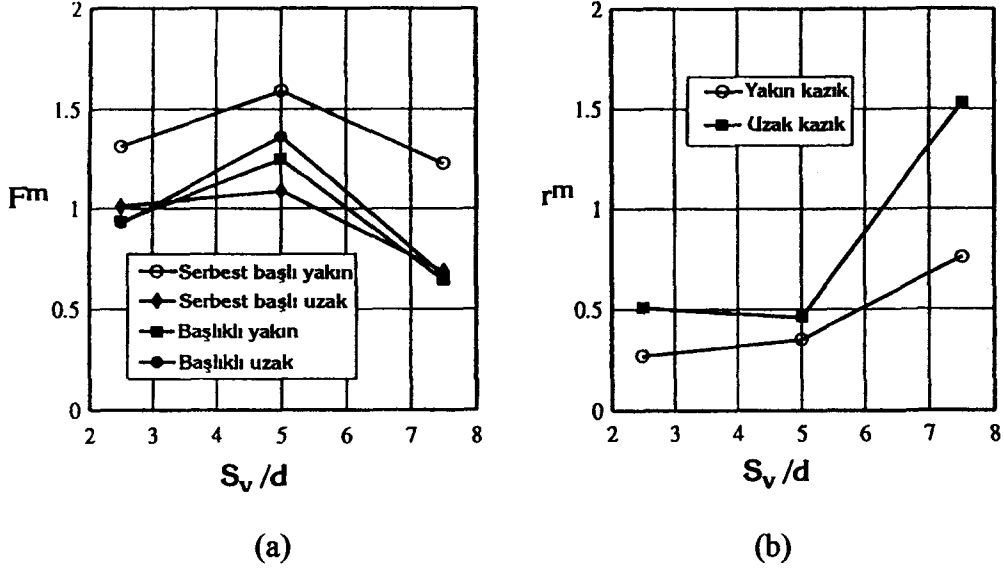


(a)



(b)

Şekil 2.8 : Yükleme yönündeki tutulu başlı iki kazığın eğilme momenti (a) $S_v/d=7.5$ için moment - derinlik ilişkisi (b) $M_{maks} - S_v/d$ ilişkisi [8]



Şekil 2.9 : Yükleme yönündeki kazıkların F^m ve r^m ilişkisi (a) $F^m - S_v/d$ ilişkisi
(b) $r^m - S_v/d$ ilişkisi [8]

Şekil 2.8.a da başlığın tutulu olması durumunda yakın ve uzak kazıklardaki eğilme momenti profili görülmektedir. Özellikle üst kısımlarda birbirlerinden farklılık göstermektedir. Zemin hareket yönüne dik olarak sıralanan kazıklardan farklı olarak kazık başlığının eğilme profiline etkisinin önemli derecede olduğu görülmektedir. Negatif momentin pozitif göre büyük veya küçük olmasını kazık aralığı etkilemektedir. Şekil 2.8.b de yakın ve uzak kazıklarda, maksimum negatif (M_{maks}) ve pozitif (M_{+maks}) eğilme momentlerinin kazık aralığıyla olan ilişkisi gösterilmektedir. Serbest başlı da olduğu gibi, M_{+maks} 5d aralığında en fazla değerine ulaşmaktadır. Aynı zamanda bu değer tekil kazık maksimum eğilme momentinden de büyüktür. Burada yine yükleme yönündeki 5d aralığının kritik olduğu görülmektedir. Bu şekilden çıkan bir başka sonuç ise, tutulu başlılarda kazık aralığıyla M_{maks} doğru orantıyla değişmektedir.

Şekil 2.9.a da grup faktörü olan F^m ile normalize edilmiş kazık aralıkları arasındaki ilişki gösterilmektedir. Her kazık aralığında 1'den büyük olan F^m değerleri, serbest başlı yakın kazıklarda oluşmaktadır. Bu kazıktaki eğilme momenti tekil kazıktakinden % 60 daha fazladır. Kazıkların diğer durumu için kazık aralığına göre F^m değerleri 1'den büyük veya küçük çıkmaktadır. Şekil 2.9.b de oran faktörü olan r^m ile normalize edilmiş kazık aralıkları arasındaki ilişki gösterilmektedir. 7.5d

kazık aralığı hariç, r^m 1'den küçüktür. Uzak kazıklarda r^m daha büyük değerler aldığı görülmektedir.

Kazık Sayısının Etkisi

Kazık sayısının yanal davranışta etkisini anlayabilmek için 2.5d kazık aralığında olan 3'lü ve 4'lü kazık gruplarında model deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 2.1 de görülmektedir. Görüldüğü gibi maksimum eğilme momenti farklı değerler almaktadır. Kazık sayısının artması, davranışında önemli etkiler meydana getirdiği görülmektedir. Buna zıt olarak, yüklemeye dik yöndeki kazıkların sayısının değişmesi kazık davranışında önemli bir etki yapmamaktadır.

Tablo 2.1: Yüklemeye paralel 2.5d aralıklı kazık gruplarında F^m ve r^m değerleri [8]

Kazık Grubu	Kazık Yeri	Serbest Başlı	Tutulu Başlı	
		F^m	F^m	r^m
2 kazık	Yakın	1.31	0.93	0.27
	Uzak	1.01	0.92	0.51
3 kazık	Yakın	1.10	0.42	0.78
	Orta	0.70	0.67	0.82
	Uzak	0.95	0.90	0.92
4 kazık	Yakın	1.20	0.74	0.26
	Yakın-Orta	0.79	0.64	0.52
	Orta-Uzak	0.69	0.66	0.81
	Uzak	0.82	0.82	1.06

2.4.3. Kare Dizilişteki Kazık Grupları

2x2'lik kazık gruplarında yapılan deneylerde eğilme momenti profilinin yüklemeye paralel sıralanan gruplardakine benzediği görülmüştür. Bazı durumlarda maksimum momentin yeri aşağı kaymıştır. Kare dizilişteki yakın ve uzak kazıklardaki maksimum eğilme momenti, yükleme yönünde sıralanan gruptakilere göre daha küçük çıkmıştır. Bunun nedeni; kare dizilişte kazıklar birbirine daha yakın olduğundan birbirlerinin hareketlerini daha fazla etkilemeleridir [8].

3. YATAY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN ANALİZİ

3.1. Giriş

Pratikte kazık ve kazık başlığının göreceli rijitliğine ve birbirlerine bağlı oluş biçimlerine göre serbest başlı kazıklar ve tutulu başlı kazıklar diye iki grup kazık ayırt edilebilir. Bir kazıklı sisteme gelebilecek izin verilebilir yükü bulmakta iki şekilde hareket edilebilir.

1. Zeminde göçme yaratacak yük yeterli bir güvenlik sayısına bölünebilir.
2. Kabul edilebilir yatay deplasman yaptıracak büyüklükte yatay kuvvet bulunur.

Kazıkların yatay yüklemeler altındaki analizleri de bunlara paralel olarak ya nihai göçme yükünü hesaplamaya yönelik yöntemler, ya da yer değiştirmenin tahmin edilmesine yönelik yöntemler olarak geliştirilmişlerdir [2].

3.2. Kazıkların Yanal Olarak Taşıyabilecekleri Nihai Yükün Bulunuşu

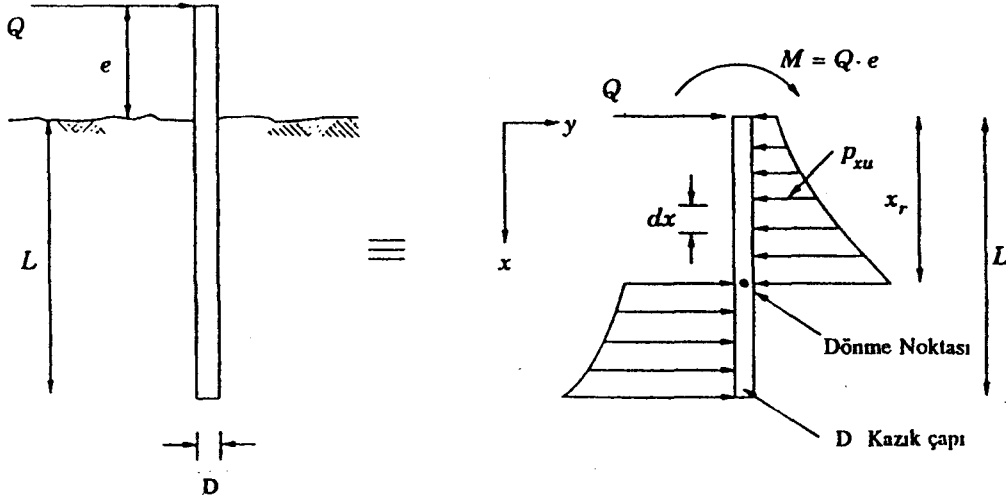
3.2.1. Brinch Hansen (1961) Yöntemi

Zemin basıncı teorisine dayalı bir yöntem olup c , ϕ zeminlerinde uygulanabilir, tabakalı zeminler için de elverişlidir, ancak sadece kısa rijit kazıklarda uygulanabilir. Dönme noktasının saptanması için deneme-yanılma çözümleri gerektirir. Şekil 3.1 de Brinch Hansen yöntemi gösterilmektedir.

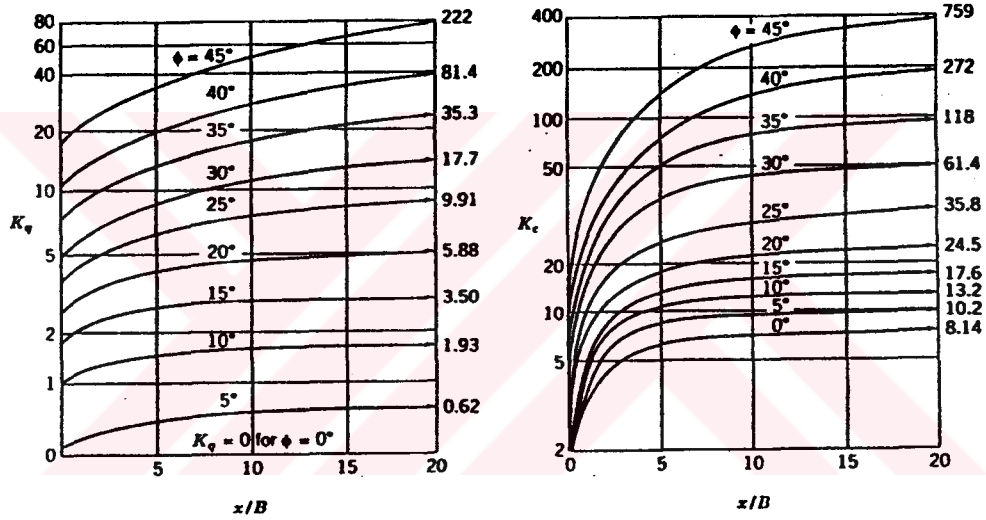
Taşınabilir maksimum yatay yük Q_u ve moment M_u nihai yatay zemin direncinin P_{xu} derinlikle değişiminin belirlenmesi ve denge şartlarından bulunabilir:

$$P_{xu} = \sigma_{vx}' K_q + c K_c \quad (3.1)$$

Burada σ_{vx}' düşey efektif gerilme, c kohezyon, K_c ve K_q ise içsel sürtünme açısı ϕ' 'ye ve x/D oranına bağlı olarak Şekil 3.2'den alınacak katsayılardır. Yöntem için zemin tabakalara bölünür P_{xu} 'lar derinlikle saptanır.



Şekil 3.1 : Brinch Hansen Yöntemi [2]



Şekil 3.2 : K_q ve K_c katsayıları [2]

Dönme noktasının yeri x_r için varsayımda bulunulur. Kazık tepesine göre moment alınarak toplam momentin sıfır olması koşulu yazılır. Bu sağlanamıyorsa x_r 'nin yeri değiştirilir ve denge koşulu sağlanır. x_r 'nin doğru değeri saptanınca bu kez x_r 'nin yerine göre moment alınarak göçme yükü Q_u bulunur. Kısa süreli analizlerde $\phi = 0$, c_u analizi yeterli olup, uzun süreli analizlerde c' , ϕ' analizi yapılmalıdır.

3.2.2. Broms (1964) Yöntemi

Kazık boyunca gerekli nihai zemin direnci için basitleştirici kabuller yapan ve yine zemin basıncı teorisine dayalı bir yöntemdir. Kısa ve uzun kazıkların ikisi için de uygundur, ancak zemini ya tam granüler (ϕ zemini) ya tam kohezyonlu ($\phi = 0$, c_u

zemini) kabul etmek zorunluluğu vardır. Tabakalı zeminlerde uygulanamaz. Serbest ve tutulu başlı kazıkların ayrı ayrı analizleri olanaklıdır.

Kazıklar bu yöntemde kısa, rijit kazıklar ve uzun, bükülebilir kazıklar diye iki grupta gözönüne alınmaktadır. Rijitlik faktörleri olan T ve R aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$\text{Kohezyonsuz zeminler için : } T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (3.2.a)$$

$$\text{Kohezyonlu zeminler için : } R = \left(\frac{EI}{k_h} \right)^{1/4} \quad (3.2.b)$$

(3.2) bağıntılarında yer alan ifadeler:

E = Kazığın elastisite modülü

I = Kazık kesitinin atalet momenti

$k_h = n_h \cdot x$ derinlikle birlikte lineer artan yatay yatak katsayısı

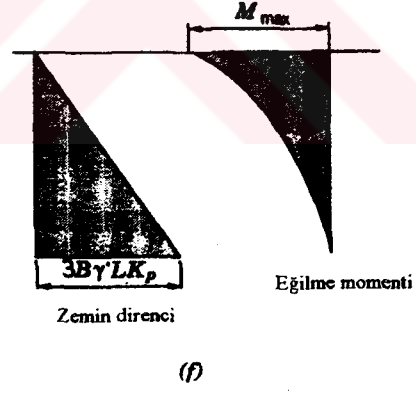
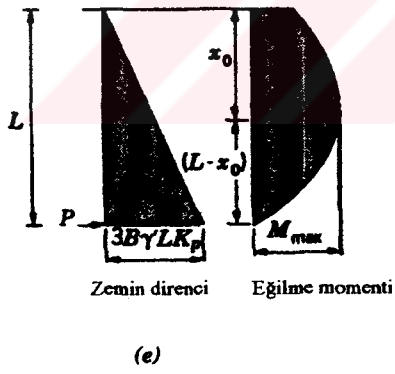
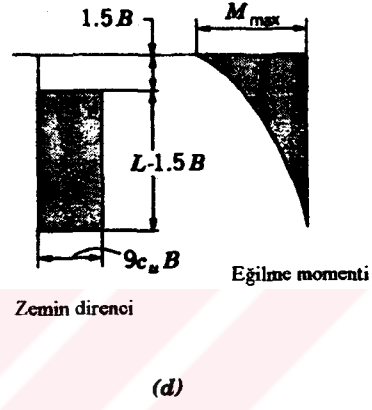
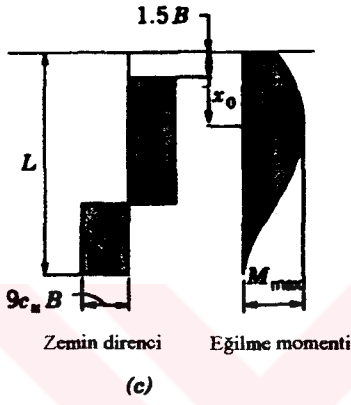
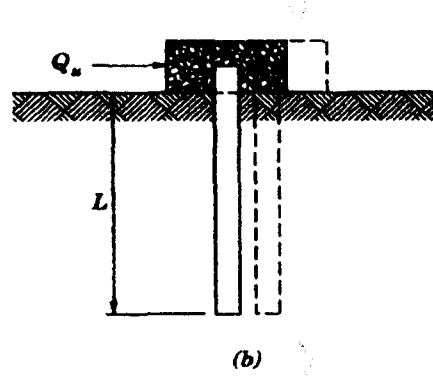
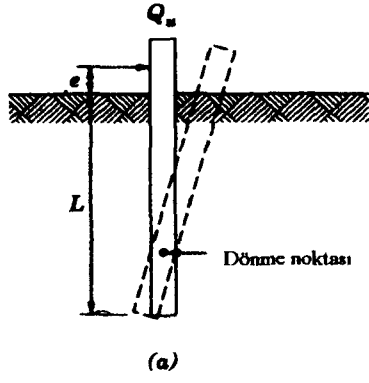
n_h = yatay yatak katsayısı sabiti

Kısa rijit kazıklarda $L/T \leq 2$ veya $L/R \leq 2$ olup, uzun bükülebilir kazıklarda $L/T \geq 4$ veya $L/R \geq 3.5$ dur.

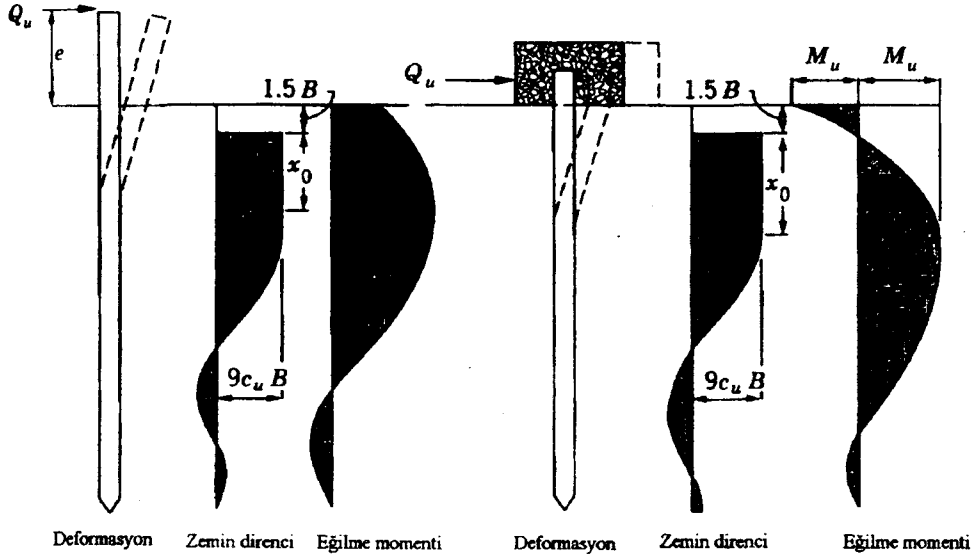
Kısa rijit kazıkların başlıklarının durumuna göre deformasyon şekilleri de değişir. Serbest başlıklı kısa kazıklar bir nokta etrafında dönme hareketi yaparlarken rijit başlıklı kısa kazıklar ise ötelenme hareketi yaparlar (Şekil 3.3.a,b).

Uzun kazıklarda kazığın alt kısımlarında oluşan büyük toprak (pasif) basınçlarından dolayı bu bölgelerde dönme veya ötelenme hareketi oluşmaz. Dolayısıyla kısa ve uzun kazıklarda yapılan analizler birbirlerinden ayrılmaktadır. (Şekil 3.4.a,b).

Zemin direncinin kazık boyunca dağılımı kısa kazıklar için Şekil 3.3 de uzun kazıklar için ise Şekil 3.4 de gösterilmiştir.

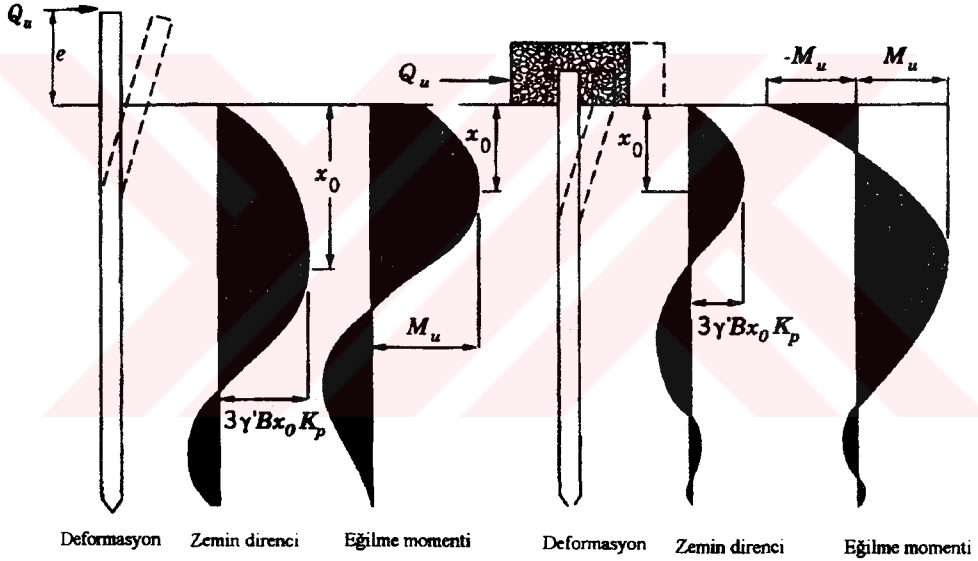


Şekil 3.3 : Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre : (a,b) deformasyonu (c,d) kohezyonlu zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılımı (e,f) kohezyonsuz zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılımı [1]



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 3.4 : Uzun elastik kazıklarda dönme ve ötelenme hareketleri : (a,b) kohezyonlu zeminlerde (c,d) kohezyonsuz zeminlerde [1]

Kohezyonsuz zeminlerdeki kısa kazıklarda kazık arkasındaki aktif basınç ihmal edilir ve kazık önündeki pasif basıncın 3 katı alınır.

$$p = 3B\sigma_v'K_p = 3\gamma'LBK_p \quad (3.3)$$

bağıntısında

p = Birim zemin direnci

σ_v' = Efektif düşey gerilme

γ' = Zeminin efektif birim hacim ağırlığı

L = Zemin içindeki kazık boyu

B = Kazık genişliği

$K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ = Rankine pasif toprak basıncı katsayısı

ϕ' = Efektif içsel sürtünme açısı

olarak verilmiştir. Kazık kesitinin şekli basınç dağılımında etkili değildir ve yatay direnç ancak bir miktar deformasyon oluştuğunda mobilize olmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerdeki kısa kazıklarda zemin yüzeyindeki direnç sıfır olarak kabul edilir. Zemin yüzeyinden $1.5B$ derinliğe kadar bu kabul geçerlidir ve bu noktadan itibaren $9c_u B$ sabit değerli zemin direnci kazığa etkir (Şekil 3.3.c,d).

Uzun kazıklarda kohezyonsuz zeminlerde (3.3) bağıntısındaki L teriminin yerine x_0 terimi gelir. Kohezyonlu zeminlerde $9c_u B$ değeri $(1.5B + x_0)$ derinliğinden itibaren azalmaya başlar. Uzun kazıklarla ilgili zemin direnci dağılımları Şekil 3.4 de verilmektedir.

3.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Broms Metodu

Daha öncede ifade edildiği gibi Broms (1964) zeminle ilgili birtakım kabuller ışığında zeminler uygulanan yatay yüklerle ilgili bir analiz yöntemi geliştirmiştir. Bu analiz yönteminde kısa rijit kazıkların yanında uzun elastik kazıkları da incelemiş kazık başlığının serbest veya rijit olması durumlarına göre farklı yöntemleri önermiştir. Bu bölümde kohezyonsuz zeminlerdeki serbest başlıklı ve rijit başlıklı kazıkların analiz yöntemleri tanıtılacaktır.

Serbest Başlıklı Kısa Kazıklar

Kısa kazıklarda ($L/T \leq 2$) ilgili tahmini deformasyon durumu ve bu duruma ait moment ve zemin direnci değişimleri Şekil 3.3.a ve Şekil 3.3.e de verilmiştir. Kohezyonsuz zeminlerde yer alan serbest başlıklı kısa kazıklarda dönme noktası kazık tabanına yakın olacağından kazık tabanına yakın olan bölgelerde oluşan büyük toprak basınçları tekil yük olarak gösterilebilir (Şekil 3.3.e). kazık tabanına göre moment alındığında

$$Q_u = \frac{0.5\gamma' L^3 B K_p}{(e + L)} \quad (3.4)$$

(3.4) bağıntısının terimleri Şekil 3.5.a daki gibi yatay eksen L/B ve düşey eksen $Q_u/K_p B^3 \gamma'$ 'yi göstermek üzere boyutsuz ifadelerle tanımlanabilir. Görüldüğü gibi kazıkla ilgili bilgiler L , e , B ve zeminle ilgili bilgiler ϕ' γ' bilindikten sonra zemin tarafından taşınabilecek maksimum yatay kuvvet (3.4) bağıntısı yardımıyla bulunabilecektir. Şekil 3.3.e de görüldüğü gibi maksimum moment M_{maks} x_o derinliğinde oluşmaktadır. Bu derinlikte kesme kuvveti sıfır değerini alacağından

$$Q_u = 1.5\gamma' B x_o^2 K_p \quad (3.5)$$

bağıntısı kullanılarak

$$x_o = 0.82 \left(\frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5} \quad (3.6)$$

bağıntısı yazılabilir. Maksimum moment ise,

$$M_{maks} = Q_u (e + 1.5x_o) \quad (3.7)$$

olarak elde edilir.

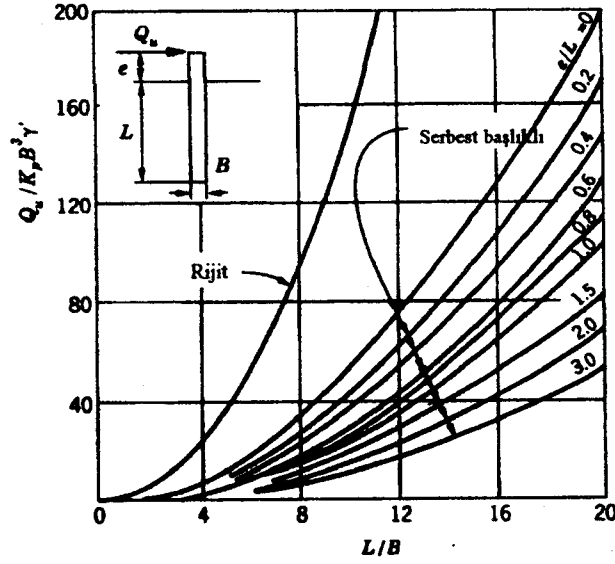
Serbest Başlıklı Uzun Kazıklar

Uzun kazıklarda meydana gelen deformasyonlar, moment ve zemin direnci dağılımları Şekil 3.4.c de verilmiştir. Maksimum moment kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktaya tekabül ettiğinden (3.6) bağıntısı uzun kazıklar için aynı kalırken maksimum moment ve maksimum yatay kuvvet sırasıyla (3.8) ve (3.9) bağıntılarıyla bulunmaktadır.

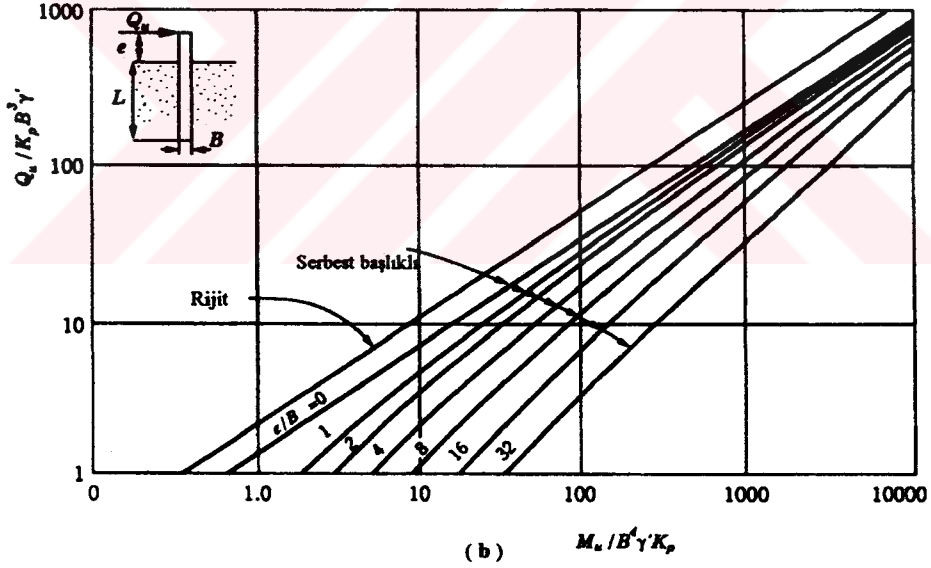
$$M_{maks} = Q (e + 0.67x_o) \quad (3.8)$$

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \left(\frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5}} \quad (3.9)$$

(3.9) bağıntısındaki M_u , kazığın taşıyabileceği momenti ifade etmektedir. Yukarıda yer alan bağıntılar yerine Şekil 3.5.b kullanılarak da Q_u değerini elde etmek mümkündür.



(a)



(b)

Şekil 3.5 : Kohezyonsuz zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması
(a) kısa kazıklar (b) uzun kazıklar [1]

Rijit Başlıklı Kısa Kazıklar

Bu tür kazıklarda oluşan deformasyonun durumu Şekil 3.3.b de, moment ve zemin direnci dağılımı ise Şekil 3.3.f deki gibidir. Bu kazıklardaki hareket ötelenme şeklinde olduğu için yatay kuvvetlerin dengesinden aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$Q_u = 1.5\gamma' L^2 B K_p \quad (3.10)$$

$$M_u = \gamma' L^3 B K_p \quad (3.11)$$

Rijit Başlıklı Uzun Kazıklar

Şekil 3.4 de bu tür kazıklarda oluşan deformasyon, moment ve zemin direncinin durumu verilmektedir. Maksimum yanal kuvvet ve moment aşağıdaki bağıntılar kullanılarak verilebilir.

$$Q_u = \frac{2M_u}{(e + 0.67x_o)} \quad (3.12)$$

$$x_o = 0.82 \left(\frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5} \quad (3.13)$$

$$M_{\text{maks}} = Q_u (e + 0.67x_o) \quad (3.14)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan x_o terimi zemin direncinin maksimum olduğu derinliktir. Şekil 3.5 te verilen grafik çözüm rijit başlıklı uzun ve kısa kazıklar için geçerlidir.

3.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Broms Metodu

Serbest Başlıklı Kısa Kazıklar

$L/T \leq 2$ kuralını sağlayan kohezyonlu zeminlerdeki kazıkların tahmini deformasyon yüzeyleri, moment ve zemin direnci dağılımları Şekil 3.3.a ve Şekil 3.3.c de verilmektedir. Uzun kazıkların yatay yük taşıma kapasitesi çoğunlukla kazık şaftının taşıyabileceği yük ile ilişkili iken kısa kazıklarda yatay taşıma kapasitesi neredeyse tamamen yanal zemin direncine bağlıdır.

Maksimum momentin oluştuğu noktaya (zemin yüzeyinden $1.B+x_o$ derinlikteki nokta) göre moment alınır:

$$M_{\text{maks}} = Q_u (e + 1.5B + 0.5x_o) \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. x_o boyu haricindeki kazık boyu ($L-x_o$) zemin direncine karşı koymaya çalışacağından,

$$M_{maks} = 2.25Bc_u(L-x_o)^2 \quad (3.16)$$

bağıntısı elde edilir. x_o 'ın aşağıdaki bağıntıyla elde edilmesi mümkündür.

$$x_o = \frac{Q_u}{9c_u B} \quad (3.17)$$

(3.16) ve (3.17) bağıntıları Q_u 'nın elde edilmesinde de kullanılabilir. Kohezyonsuz zeminlerdeki grafik çözüme benzer bir çözüm yöntemi kohezyonlu zeminler için Şekil 3.6 da verilmiştir. Bu çözüm şeklinde L/B ve e/B oranlarının bilinmesi halinde Q_u değerini elde etmek mümkündür. Şekil 3.6.a dan kısa kazıklar için önerilen grafik çözüme ait değerleri elde etmek mümkündür.

Serbest Başlıklı Uzun Kazıklar

Şekil 3.4.a da uzun kazıklara ($L/R \geq 3.5$) ait tahmini deformasyon yüzeyi, moment ve zemin direnci dağılımı eğrileri bulunmaktadır. (3.15) ve (3.17) bağıntıları uzun kazıklar için de geçerlidir. Şekil 3.6.b de verilen grafik çözüm kullanılarak Q_u elde edilebilir.

Rijit Başlıklı Kısa Kazıklar

Deformasyon durumu, moment ve zemin direnci dağılımı Şekil 3.3.b ve Şekil 3.3.d deki gibidir. Aşağıdaki bağıntılar geçerlidir.

$$Q_u = 9c_u B(L-1.5B) \quad (3.18)$$

$$M_{maks} = 4.5c_u B(L^2 - 2.25B^2) \quad (3.19)$$

Grafik çözüm için Şekil 3.6.a daki değerler kullanılır.

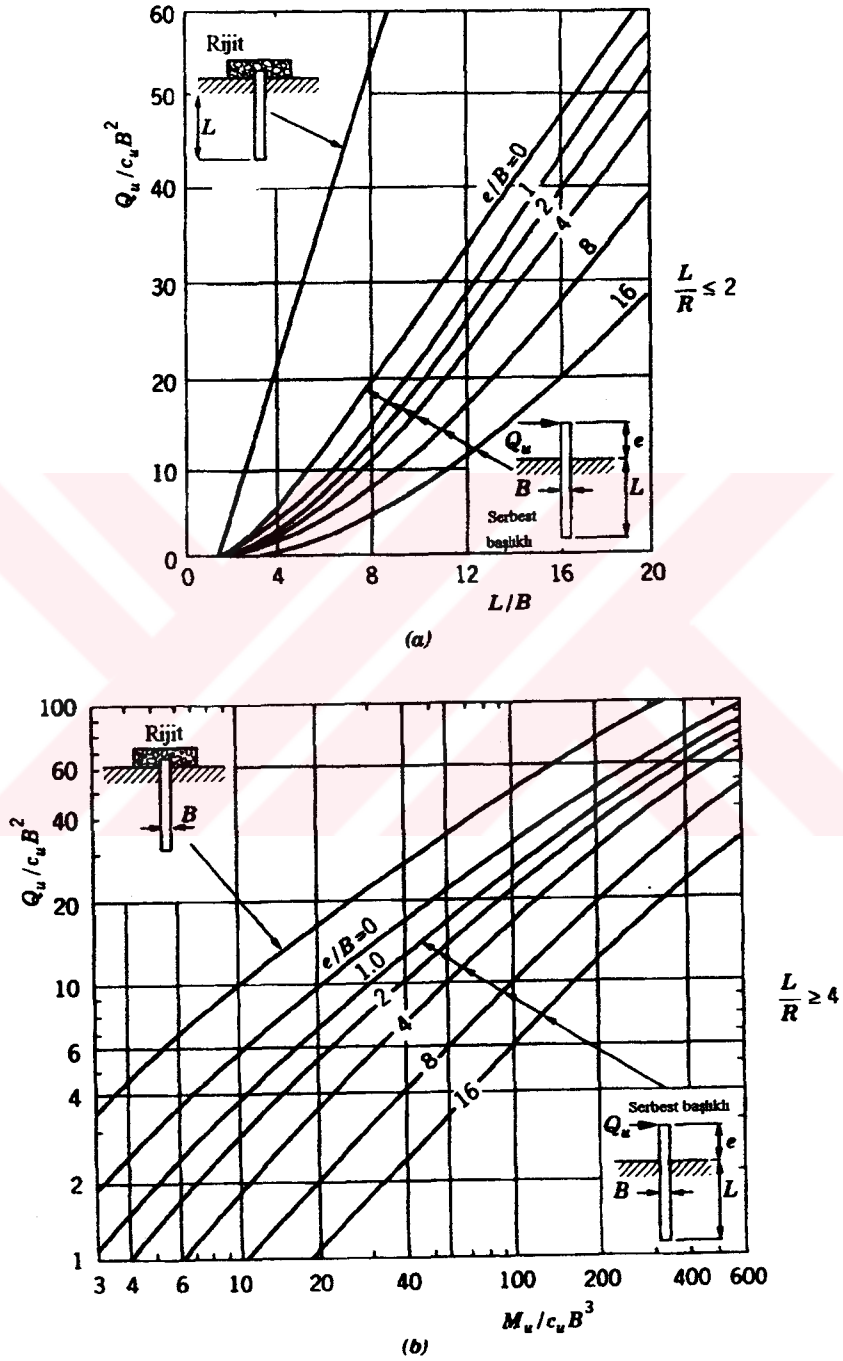
Rijit Başlıklı Uzun Kazıklar

Bu tür kazıkların davranışlarıyla ilgili gerekli bilgi Şekil 3.4.b de verilmiştir. Bu tip kazıklar için Q_u ve x_o değerleri aşağıdaki bağıntılarla bulunabilir.

$$Q_u = \frac{2M_u}{(1.5B + 0.5x_o)} \quad (3.20)$$

$$x_o = \frac{Q_u}{9c_u B} \quad (3.21)$$

Grafik çözümle sonuca ulaşmak için Şekil 3.6.b deki değerler kullanılmalıdır.



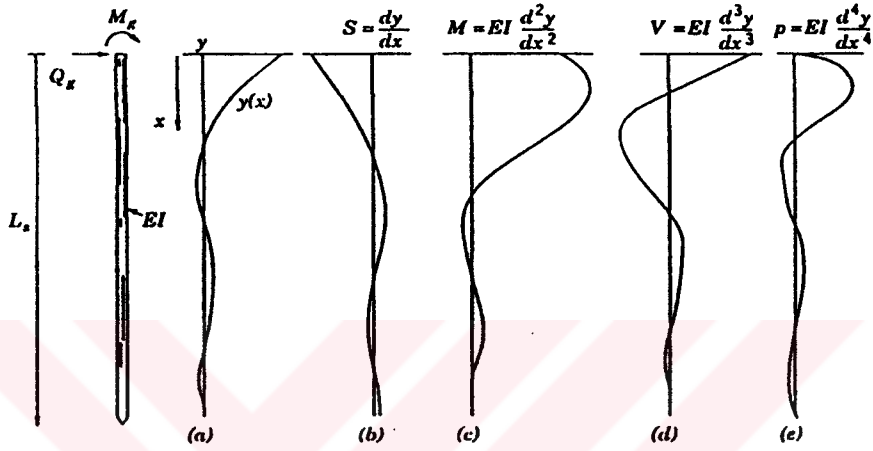
Şekil 3.6 : Kohezyonlu zeminlerde kazıkların yatay yük taşıma kapasitesinin bulunması
 (a) kısa kazıklar (b) uzun kazıklar [1]

3.3. Çalışma Yükünde Yatay Ötelenme

3.3.1. Kohezyonsuz Zeminde Yatay Ötelenmeler

3.3.1.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Serbest başlı bir kazıkta kazık ötelenmesi y , bunların derinlikle değişimi $s=dx/dy$, moment M , kesme kuvveti V ve zemin direnci p , Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Kazık başında Q_g yükü ve M_g momenti altında kazık davranışı (a) Deplasman (b) dy/dx (c) Moment (d) Kesme kuvveti (e) Zemin direnci [6]

$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (3.22)$$

ile kazık davranışı gösterilebilir. Bunun çözümü

$$y = f(x, T, L, k_h, EI, Q_g, M_g) \quad (3.23)$$

şeklinde. Elastik davranış kazık boyutlarına göre küçük deformasyonlar için geçerli olup süperpozisyon prensibi geçerlidir. Daha büyük deformasyonlarda p - y eğrileri kavramı kullanılarak analiz yapılabilir. Q_g ve M_g etkileri ayrı ayrı bulunup sonra süperpoze edilebilir. Çözümler Reese ve Matlock (1956) tarafından eğriler halinde verilmektedir.

3.3.1.2. Elastik Ortam Yaklaşımı

Yatay kuvvet ve moment etkisindeki kazıkların moment ve deplasmanlarının saptanmasında elastik yaklaşım teorik olarak daha gerçekçidir, zira zemini kazık

etrafında sürekli bir ortam olarak kabul etmektedir. Zemin deplasmanları sonsuz ortamda yatay yükler için Mindlin eşitliklerinden elde edilmekte ve kazık deplasmanları elastik zemine oturan kiriş yaklaşımından bulunmaktadır. Yatay deplasmanlar ve maksimum moment için (3.24) bağıntısında gösterildiği gibi çözümlerde derinlikle artan zemin elastisite modülü varsayılmıştır.

$$E_s = N_h \times \quad (3.24)$$

Buradaki N_h , n_h benzeri bir katsayıdır. Eğer yatak katsayısı artışı ile elastik modül artışı aynı ise $N_h = n_h$ 'dır.

Poulos ve Davis (1980)'e göre serbest başlı kazıkta deplasman

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L^2} \left(I'_{gH} + \frac{e}{L} I'_{gM} \right) / F'_g \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilmekte, çözüm için gerekli katsayıların değişimi eğriler şeklinde verilmektedir. Bu bağıntıdaki I_{gH} , I_{gM} , F_g ifadeleri tablolardan elde edilen katsayılardır.

Tutulu başlıklı kazıklarda ise deplasman

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L^2} I'_{gF} / F'_{gF} \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilmekte, çözüm için gerekli katsayıların değişimi yine eğriler olarak verilmektedir. I_{pF} , F_{gF} ifadeleri de tablolardan elde edilebilecek olan katsayılardır [6].

3.3.2. Kohezyonlu Zeminlerde Yatay Ötelenmeler

3.3.2.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Daha önceden değinildiği gibi yatak katsayısı normal konsolide killerde derinlikle doğrusal artacağından, çözümler granüler zeminlerdekine benzemektedir. Aşırı konsolide killerde yatak katsayısının derinlikle sabit olduğu düşünülerek ötelenme katsayıları serbest başlı kazıklarda

$$A_{yc} = \frac{y_A EI}{Q_g R^3} \quad (3.27.a)$$

$$B_{yc} = \frac{y_B EI}{M_g R^2} \quad (3.27.b)$$

olarak tarif edilecektir.

$$y = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad (3.28.a)$$

$$M = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad (3.28.b)$$

A_{yc} , B_{yc} , A_{mc} , B_{mc} katsayılarının derinlikle değişimi Davisson ve Gill (1963) tarafından verilmiştir.

$Z_{maks} = L/R < 2$ için kazıkların rijit kazık gibi davrandığı görülmektedir. $L/R \geq 4$ değeri için ise kazık sonsuz uzun kazık gibidir [6].

3.3.2.2. Elastik Ortam Yaklaşımı

Normal konsolide killerde ötelenme ve momentler granüler zeminlerdekine benzer çözümlerle bulunabilir. Yatak katsayısının sabit olduğu aşırı konsolide killer için çözüm aşağıda verilmektedir. Yatay ötelenmeler serbest başlı kazıkta

$$y = I_{gH} \frac{Q_g}{E_s L} + I_{gM} \frac{M_g}{E_s L^2} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Serbest başlı kazığın dönmesi ise

$$\theta = I_{\theta H} \frac{Q_g}{E_s L^2} + I_{\theta M} \frac{M_g}{E_s L^2} \quad (3.30)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Bağlantılardaki I_{gH} , I_{gM} , $I_{\theta H}$ ve $I_{\theta M}$ ve ifadeleri tablolardan elde edilen katsayılardır. Bunlar K_R gibi kazık bükülebilirlik faktörünün fonksiyonudur. K_R

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \quad (3.31)$$

diye tarif edilir. Bu katsayılar için elde olunan çözümler Poulos (1971) tarafından verilmiştir.

Tutulu başlı kazıkta yatay ötelenme

$$y = I_{gf} \frac{Q_g}{E_s L} \quad (3.32)$$

ile bulunabilir [6].

3.4. P-y Eğrileri Yardımı İle Yanal Yükleme Analizi

Yanal yüklenmiş bir kazık için malzemenin lineer elastik olması ve kazığın gördüğü direncin sürekli değişken çizgisel bir yük olması varsayılırsa

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3.33)$$

(3.33) bağıntısındaki ifadeler

P_x = Kazıkta eksenel yük

y = Kazığın yatay yer değiştirmesi

x = Kazık boyunca uzunluk

EI = Kazık eğilme rijitliği

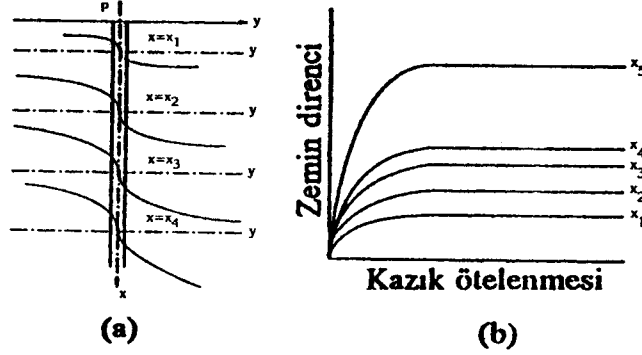
p = Birim boydaki zemin reaksiyonu ($=k.y$)

şeklinde tarif edilir. Zemin modülü k herhangi bir noktadaki zemin direncinin o noktada kazık yer değiştirmesine oranı diye kabul edilir ve diğer herhangi bir yerdeki özelliğe bağlı değildir. k 'nın derinlikle ve çevresel basınçla birlikte arttığı bilinmektedir. Eşitliğin çözümü p 'nin x ve y 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesine bağlıdır. Zemin modülünün nümerik değeri p 'yi y 'nin bir fonksiyonu olarak veren eğri takımı ile yapılabilir.

Bir kazık yüklenmeden önce üniform ve simetrik bir çevresel basınç altındadır. Kazık bir y_i deformasyonu yapınca üzerinde üniform olmayan bir basınç dağılışı vardır. Kazık etrafındaki bu gerilmenin entegrasyonu birim boy için dengelenmeyen p_i kuvvetini verir:

$$P_i = \int_0^2 \pi P_\theta d\theta \quad (3.34)$$

P-y arasındaki bağıntı Şekil 3.8 de görüldüğü gibi genelde lineer olmayıp yüzeyden olan derinliğe, zemin türüne, yapıya, zeminde gerilme-birim deformasyon özellikleri ile zemine uygulanan yük-çevrim sayısına bağlıdır.



Şekil 3.8 : Kazıkta p-y kavramı [6]

p-y eğrileri saptandıktan sonra iteratif bir yöntem izleyerek yatay yüklü kazık problemi çözülebilir.

1. Zemin cinsine göre artan veya sabit yatak katsayısına göre T veya R göreceli kazık uzunluğu hesaplanır.
2. Kazık başına etkiyen kuvvet ve momente göre kazık boyunca deformasyon önceden anlatılan yöntemlerle tahmin edilecektir.
3. Hesaplanan kazık deplasmanlarına göre önceden oluşturulmuş p-y eğrilerinden kazığa etkiyecek p gerilmeleri belirlenir.

$$k = p/y \quad (3.35)$$

hesaplanıp zemin modülünün sabit veya derinlikle değişimine göre yeni R veya T hesaplanacaktır ve 1. aşamada hesaplanan ile karşılaştırılacaktır. Eğer uyumlu değilse 3. aşamada bulunan modül değerine yakın bir modül kabul edip 2. ve 3. aşamalar tekrarlanacaktır ve bu iterasyon kabul edilenle hesaplanan aynı oluncaya dek devam edecektir. Bulunan son R veya T değerine göre deplasmanlar ve momentler tayin edilebilir. Bu amaçla Reese (1977) tarafından bir bilgisayar programı geliştirilmiştir [2].

3.4.1. Kohezyonsuz Zeminde p-y Eğrileri Teşkili

Deneysel ölçümlerin yorumlanması sonucu Reese vd. (1974) önerisi aşağıdadır.

1. Arazi veya laboratuvar deneyleri içsel sürtünme açısı ϕ ve birim hacim ağırlığı γ bulunacaktır.
2. $\alpha = 1/2 \phi$, $\beta = 45 + \phi$, $K_0 = 0.4$, $K_A = \tan^2(45 - \phi/2)$

$$p_{cr} = \gamma x \left[\frac{K_0 x \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (D + x \tan \beta \tan \alpha) + K_0 x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_A D \right] \quad (3.36)$$

$$p_{cd} = K_A D \gamma x (\tan^2 \beta - 1) + K_0 D \gamma x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (3.37)$$

hesaplanabilir. Burada p_{cr} kritik derinlik x_r 'a kadar, p_{cd} ise x_r 'den sonra p değeridir. x_r değeri x 'in değişik değerleri için p_{cr} ve p_{cd} 'nin değişimi işaretlenip kesim noktası olarak bulunabilir.

3. p-y eğrisinin bulunacağı derinlik x seçilecek ve bu 2. aşamada bulunan kritik derinlik x_r ile karşılaştırılacaktır ve p_{cr} ya da p_{cd} 'nin hangisinin uygulanacağına karar verilecektir.
4. Eldeki zemin için uygun n_h değeri tablodan alınacak ve

$$p_m = B_1 p_{cd} \quad (3.38)$$

veya

$$p_m = B_1 p_{cr} \quad (3.39.a)$$

$$y_m = D/60 \quad (3.39.b)$$

bulunacaktır.

$$p_u = A_1 p_c, \quad y_u = 3 \frac{D}{80}, \quad m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m}, \quad n = \frac{p_m}{m y_m} \quad (3.40.a)$$

$$C = \frac{p_m}{(y_m)^{\frac{1}{n}}}, \quad y_k = \left(\frac{C}{n_h x} \right)^{\frac{n}{(n-1)}}, \quad p = C y^{\frac{1}{n}} \quad (3.40.b)$$

bulunacaktır.

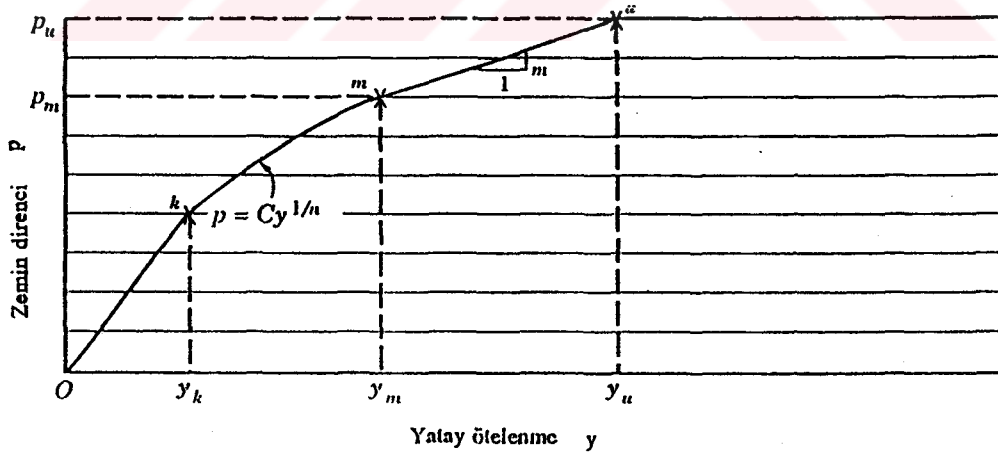
5. Bulunan değerlere göre Şekil 3.9 da gösterildiği gibi p-y eğrisi şöyle oluşturulur. Önce y_k değeri bulunur. Buna karşılık gelen koordinatı $p = Cy^{1/n}$ parabol denkleminde hesaplanır. ok arası doğru, km arası parabol, mn arası yine doğru olarak eğri oluşturulur. Yukarıda adı geçen A_1 , B_1 , Reese vd. (1974) tarafından önerilen Tablo 3.1’den alınacaktır.

Tablo 3.1 : Farklı şartlarda A_1 ve B_1 katsayıları [2]

X/D	A_1		B_1	
	Statik	Çevrimli	Statik	Çevrimli
0	2.85	0.77	2.18	0.50
1.0	2.10	1.08	1.56	0.84
2.0	1.50	1.05	1.04	0.83
3.0	1.05	0.95	0.75	0.72
4.0	0.90	0.90	0.53	0.58
>5	0.88	0.88	0.50	0.55

$$p_m = B_1 p_c, \quad y_m = B/60 \quad (3.41.a)$$

$$p_u = A_1 p_c, \quad y_u = 3B/60 \quad (3.41.b)$$



Şekil 3.9 : Kohezyonsuz zeminde p-y teşkili [6]

3.4.2. Kohezyonlu Zeminde p-y Eğrileri Teşkili

Arazi ölçümleri ve model deneylerine dayanarak Matlock (1970) kohezyonlu zeminlerde p-y eğrilerinin teşkili için aşağıdaki önerileri getirmektedir.

3.4.2.1. Yumuşak-Orta Katı Killer

1. Drenajsız kayma mukavemeti c_u ve birim hacim ağırlığı γ bulunur.

$$2. \quad x_r = 6 \frac{D}{\frac{\gamma D}{c_u} + J} \quad (3.42)$$

kritik derinliği bulunur.

Burada J ampirik bir faktör olup yumuşak kilde 0.5, katı kilde 0.25 alınacaktır.

$$x < x_r \text{ için } N_c = 3 + \frac{\gamma x}{c_u} + \frac{Jx}{D} \quad (3.43.a)$$

$$x \geq x_r \text{ için } N_c = 9 \quad (3.43.b)$$

bulunacaktır.

3. Eğri hangi derinlikte çiziliyorsa o noktanın x 'ine göre N_c bulunup

$$P_u = c_u N_c D \quad (3.44)$$

kazığın birim boyu için nihai zemin direnci hesaplanacaktır. Drenajsız laboratuvar deneyinde maksimum gerilme için elde edilen ϵ_c birim deformasyona göre p_u 'ya karşılık gelen y_c deplasmanı

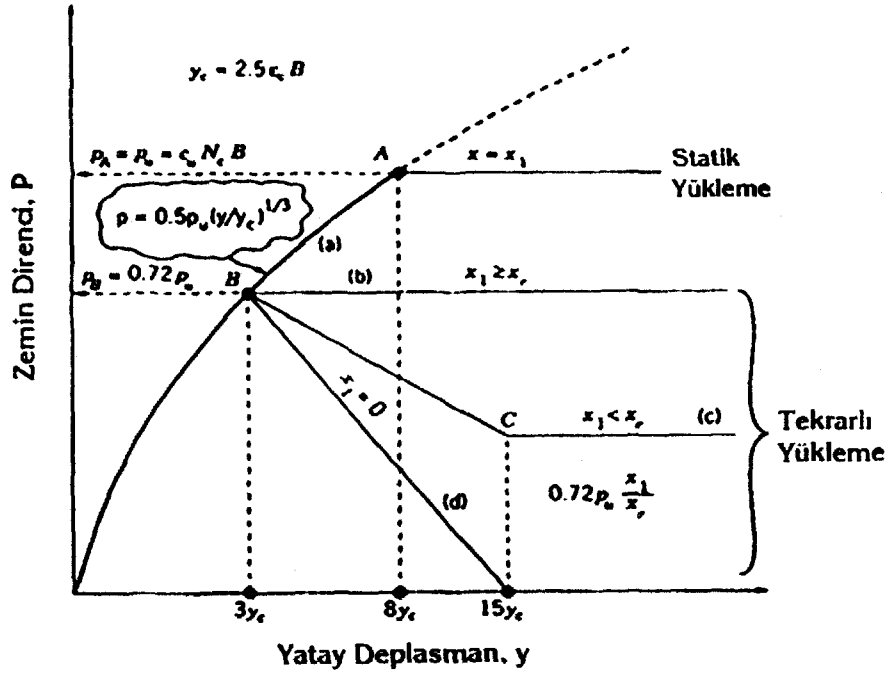
$$y_c = 2.5 \epsilon_c D \quad (3.45)$$

olarak hesaplanacaktır. Laboratuvar deneyi sonucu yoksa ϵ_c için gevrek ve hassas killerde 0.005, örselenmiş veya yoğrulmuş killer veya konsolidasyonu tamamlamamış çökelerde 0.02, normal konsolide killerde 0.01 alınacaktır.

4. p-y eğrisi biçimi

$$p = 0.5 p_u \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} \quad (3.46)$$

olacaktır. Çevrimli yüklemenin p-y'deki etkisi Şekil 3.10 da gösterildiği gibi gözönüne alınabilir.



Şekil 3.10 : Yumuşak-orta katı kilde p-y teşkili [6]

$x_1 > x_r$ için eğri $p_B = 0.72 p_u$ da kesilir. B noktası C'ye birleştirilir ve yatay devam eder. $x_1 = 0$ için B noktası C'nin apsisteki izdüşümüne birleştirilir.

3.4.2.2. Katı Killerde p-y Teşkili

Reese ve Welch (1975) önerdiği gibi

1. Deneylerden c_u , γ' ve deviator gerilmenin yarısına karşılık gelen ϵ_{50} birim deformasyonu tahmin edilir. Deney sonucu yoksa ϵ_{50} için 0.0050-0.010 arası bir değer alınabilir.
2. p_u birim kazık boyu için nihai zemin direnci şu iki değerden küçüğüdür.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma' x}{c_u} + 0.5 \frac{x}{D} \right) c_u D \quad \text{ve} \quad p_u = 9 c_u D \quad (3.47)$$

3. Nihai direncin yarısına karşılık gelen deplasman

$$y_{50} = 2.5 D \epsilon_{50} \quad (3.48)$$

bulunur.

$$4. \quad p = 0.5p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/4} \quad (3.49)$$

ile eğri teşkil edilecek; $y > 16y_{50}$ için $p = p_u$ olacaktır.

Çevrimli yükleme için şöyle için hareket edilecektir.

- Statik hal için p-y eğrileri elde edilir.
- Yatay yükün kaç kez uygulanacağı tahmin edilir.
- p/p_u değişik değerleri için C_1 ve C_2 elde edilir.

$$C_2 = \frac{(\epsilon_c - \epsilon_i)}{(\epsilon_{50} \log N)} \quad C_1 = 9.6R^4 \quad (3.50)$$

ϵ_i başlangıçta, ϵ_c N çevrim sonra ölçülen birim deformasyondur. Laboratuvar değeri yoksa

$$C_1 = C_2 = 9.6R^4 \quad (3.51)$$

alınabilir. Burada

$$R = \frac{p}{p_u} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{maks}} \quad (3.52)$$

ile bulunan gerilme oranıdır.

- c aşamasında seçilen p/p_u değerlerine karşılık gelen p değerlerinde çevrimli yükleme için yeni y değerleri

$$y_c = y_s + y_{50} C_1 \log N \quad (3.53)$$

olarak bulunacaktır. Burada y_c N çevrim sonra deplasman, y_s başlangıçta yükleme sonrası oluşan deplasmandır.

3.4.2.3. Katı Aşırı Konsolide Killerde p-y Teşkili

Bhushan vd. (1979) katı killer için 3.4.2.2. de verilenlerle şu değişiklikler yapmak gerekmektedir.

$$p_u = \left(3 + \frac{\gamma' x}{c_u} + 2 \frac{x}{D} \right) c_u D \quad (3.54)$$

$$y_{50} = 2 D \varepsilon_{50} \quad (3.55)$$

$$p = 0.5 p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} \quad (3.56)$$

ile hesaplanan değerler 3.4.2.2. de karşılık değerlerle değiştirilerek aynı adımlar izlenecektir.

3.5. Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)

p-y yönteminin arazi yükleme deneyleri ile uyum göstermesi tek kazığın yanal yüklemesi için iyi bir referans teşkil etmektedir. Yöntemin veri hazırlama ve hesaplamada uzun zaman alışı bazı projelerde kullanışımı kısıtlamakta olup CLM yöntemi buna iyi bir alternatif oluşturmaktadır [5].

Yöntemde kazığın çap ve eğilme rijitliği ile zeminin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme davranışı özelliklerini içeren karakteristik bir yük ve karakteristik bir moment tarif edilmektedir. Karakteristik yük

kilde
$$P_c = 7.34 D^2 (E_p R_i) \left(\frac{S_u}{E_p R_i} \right)^{0.68} \quad (3.57)$$

kumda
$$P_c = 1.57 D^2 (E_p R_i) \left(\frac{\gamma' D \phi' K_p}{E_p R_i} \right)^{0.57} \quad (3.58)$$

ve karakteristik moment

kilde
$$M_c = 3.86 D^3 (E_p R_i) \left(\frac{S_u}{E_p R_i} \right)^{0.46} \quad (3.59)$$

kumda
$$M_c = 1.33 D^3 (E_p R_i) \left(\frac{\gamma' D \phi' K_p}{E_p R_i} \right)^{0.40} \quad (3.60)$$

olarak tarif edilmektedir. Burada R_i atalet momenti oranı olup

$$R_i = \frac{I_p}{I_{daire}} \quad (3.61)$$

şeklinde verilmektedir. I_p kazık atalet momenti, I_{daire} ise dolu dairesel kesit atalet momentini göstermektedir. γ için yeraltı suyu 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 yüzünden itibaren 8D 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 nihai 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.

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 tutulu olmasının deplasmana olan büyük etkisi görülmektedir. Pratikte kazıkların kazık başlıklarına yeterince gömülüp moment transferi için gerekli donatı yerleştirilen durumlarda kazık başının tutulu olduğu kabul edilebilir.

Eğer yatay kuvvet zemin yüzünden yukarıda etkiyorsa bu zemin yüzüne bir yatay kuvvet ve bir moment olarak indirgenir. Kazıkların yük ve moment etkisinde davranışı lineer olmadığından lineer bir süperpozisyon yerine nonlineer bir süperpozisyon önerilmektedir.

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

Yöntem Reese vd. (1975)'in gerçekleştirdiği yatay yükleme sonuçlarına uygulandığında killi zeminde tahmin edilen ötelenme ölçülenden %70 kadar fazla olmuşken, ölçülen ve tahmin edilen momentler uyum içinde bulunmuştur. Kumlu zeminlerde ise hesaplanan ve ölçülen ötelenmeler yalnızca %10 fark etmiş, momentler ise birbirine çok yakın bulunmuştur [5].



4. YATAY YÜK ETKİSİNDE KAZIK GRUPLARININ ANALİZİ

4.1. Giriş

Yatay yüklü kazık gruplarında tek kazıkta olduğu gibi kazıkların yapısal göçmesi, grubun aşırı yer değiştirmesi ve kazıklar etrafındaki zeminde nihai taşıma gücüne ulaşma nedeni ile göçme olasılığı birlikte gözlemlenmelidir. Kazık gruplarıyla ilgili problemlerde genellikle en çok yük alan kazıkta doğan maksimum eğilme momenti veya deplasmanlar daha kritik olmaktadır.

Bir grup içerisindeki yerleşime göre grupları geniş ve dar aralıklı diye ikiye ayırmak mümkündür. Geniş aralıklarda bir kazığın deplasmanı diğerini etkilememekte olup yanal yük kazıklara eşit bölünüp daha sonra tek kazık analizi yapılabilir. Sık aralıklı gruplarda ise kazıklar arası zeminin deplasmanından dolayı bir kazığın davranışı diğerini etkilemektedir.

Yanal yük etkisinde, grup içerisindeki herhangi bir kazığın deplasmanı kendisini çevreleyen zemin ve kazıkta yer değiştirmelerin olmasını sağlayabilir. Bu yüzden kazık grupları, gruptaki bir kazığa gelen yüke eşit bir yüklemeye maruz tekil kazığa göre daha fazla deplasman yapmaktadır. Bu davranış kazık-zemin-kazık etkileşimi diye adlandırılır. Bu etkileşimle zemin yumuşamış gibi davranmaktadır.

Bu davranışa etki eden diğer etkenler arasında kazık başlığının zeminle temas durumu ve kazık başlığının varlığı ile onun sağladığı rijitlik sayılabilir. Zeminle etki içerisinde olan bir kazık başlığı, kazık grubuna yanal yüke olan direncini arttırmaktadır. Kazıklar etrafındaki zeminin, oturması ve kazık yerleşimi sırasındaki örselenmesi kazık başlığı-zemin etkileşimini azaltabilir veya kaldırabilir. Bundan dolayı yatay yüklerde kazık başlığının direnci genellikle göz önüne alınmaz [2].

Tek bir kazık için bile serbest ve tutulu başlı kazıkta yanal ötelenme 4:1 oranında olduğu bilindiğinden bir grupta kazık başlığının kazık başlarına sağladığı rijitlik özellikle gözönüne alınmalıdır. Diğer yandan kazığın yerleştirme biçimi (çakma veya delme) zeminin içerisindeki gerilmeleri farklı şekilde değiştirdiğinden

kazık grubunun davranışında etkili olması beklenir. Kazık gruplarının yatay yükler etkisinde tasarımında kazık-zemin-kazık etkileşimini hesaba katan yöntemler iki ana gruba ayrılırlar. Bunlar :

1. Elastik yöntem,
2. Yatak katsayısı yöntemi,

olmaktadır. Bunlar Bölüm 3 de ayrıntılı şekilde açıklanmaktadır. Yatay yüklü kazık gruplarının analizinde kullanmak için bu yöntemler geliştirilmiş ve kazıkların grup etkisi göz önüne alınmıştır. Elastisite yöntemini kullanan sonlu elemanlar metodu en gelişmiş olanıdır. Bu yöntemi kullanan programlar sayesinde çok çeşitli analizler (statik, dinamik, sünme ve burkulma analizi vb.), farklı yapısal modeller (elastik, plastik, elasto-plastik ve pekleşen elasto-plastik vb.) ve arayüzey elemanları kullanılarak daha gerçekçi ve doğru sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu metotlar kullanılarak önerilen çözümler aşağıda özetlenmektedir [2].

4.2. Sürekli Ortam Yöntemleri

Elastik yarı ortamda noktasal yatay yüklerin neden olduğu gerilme ve yer değiştirmeler Mindlin Elastisite Eşitlikleri yardımı ile bulunmaktadır. Poulos (1971) yöntemi zemini elastik kabul etmekte, bir kazığın diğerine etkisini lineer elastik teoriye dayalı bir etki faktörü ile gözönüne almaktadır. Kazıklar arası zeminin elastik modülünün belirlenmesinin güçlüğü bu yöntemin olumsuz yanı sayılmaktadır.

Diğer sürekli ortam yöntemleri sınır elemanlar (Banerjee and Davies 1980) ve sonlu elemanlar metodunu içermektedir. Shibata vd.(1988) tarafından yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde nonlinear zemin davranışı kullanılmaktadır. Bundan dolayı, yatay yüklü kazık grubu analizinde başarı olasılığı olan bir yöntemdir. Eğik kazık kullanılan bu analizde zemin ve kazık rijitlikleri ayrı ve doğru hesaba katılmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise karmaşıklığıdır [10]. Poulos ve Davis (1980) tarafından genel kazık grupları ve kare gruplar için yapılan elastik analizler ve sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Genel Kazık Grupları için Elastik Analizler

3 grup için zemin yüzeyindeki yatay deplasman ve dönme hesapları yapılabilir [9].

1. Her kazığın eşit deplasman yaptığı serbest başlı gruplar,

2. Her kazığa eşit (veya bilinen) yatay yük ve/veya momentin uygulandığı serbest başlı gruplar,
3. Her kazığın eşit deplasman yaptığı tutulu başlı gruplar.

Örneğin, yatay yük etkisinde n tane serbest başlı kazık düşünülürse, superpozisyon ile grup içerisinde k ismini verdiğimiz kazıktaki deplasman,

$$\rho_k = \bar{\rho}_H \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (H_j \alpha_{\rho Hkj}) + H_k \right] \quad (4.1)$$

bağıntısıyla bulunmaktadır. (4.1) bağıntısında

ρ_k = k kazığındaki deplasman,

$\bar{\rho}_H$ = Birim referans deplasmanı yani birim yatay yük altındaki serbest başlı tekil kazığın deplasmanı,

H_j = j kazığındaki yük,

$\alpha_{\rho Hkj}$ = İki kazık için $\alpha_{\rho H}$ değeridir. $\alpha_{\rho H}$, yatay yük altındaki serbest başlı kazığa komşu kazığın neden olduğu deplasman ile kendi yükünün neden olduğu deplasmanının oranıdır.

olarak ifade edilmektedir. Eğer gruba etkiyen toplam yük H_G ise,

$$H_G = \sum_{j=1}^n H_j \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Kazıkların eşit deplasman yaptığı durum için, (4.1) bağıntısından kazık deplasmanı için n tane denklem ve (4.2) bağıntısının denge denklemi çözülerek bilinmeyen yükler ve grup deplasmanı bulunmaktadır. Kazıkların eşit yüklendiği durumu için, (4.1) bağıntısından her kazığın deplasmanı bulunmaktadır. Yatay yüklü tutulu başlı kazıklarda ise uygun birim referans deplasman ve etkileşim faktörü kullanılarak uygulanabilir.

Grup deplasmanı R_p olan deplasman oranı ile tanımlanabilir. R_p , grup deplasmanın tekil kazık deplasmanına oranıdır. Tekil kazık, grubun içerisindeki kazığa gelen ortalama yük veya moment ile yüklendiği kabul edilir. buna alternatif

olarak grup azaltma faktörü olan R_R de kullanılabilir. R_R , grup deplasmanın kendisiyle aynı yük veya momenti taşıyan tekil kazık deplasmanına oranıdır. R_R ,

$$R_R = \frac{\rho_G}{H_G \bar{\rho}} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada, $\bar{\rho}$ birim referans deplasmanı, ρ_G grup deplasmanı, H_G ise grup yüküdür. Zemindeki elastik koşullar R_p ile R_R arasında

$$R_p = R_R n \quad (4.4)$$

şeklinde bir ilişkiyi sağlamaktadır. n gruptaki kazık sayısıdır. Pratik problemlerde R_p daha kullanışlı bir büyüklük olsa da farklı grupların davranışını teorik olarak incelendiğinde R_R 'nin avantajları daha fazladır. R_p ve R_R 1 ile $1/n$ arasında değişmektedir.

Yükleme şekli, kazık başlığı durumu ve deplasman ya da dönmeye göre farklı R_R değerleri tanımlanmaktadır. Bunlar aşağıda gösterilmektedir.

R_{RpH} = Yatay yükün neden olduğu deplasman için grup azaltma faktörü

R_{RpM} = Uygulanan momentin neden olduğu deplasman için grup azaltma faktörü

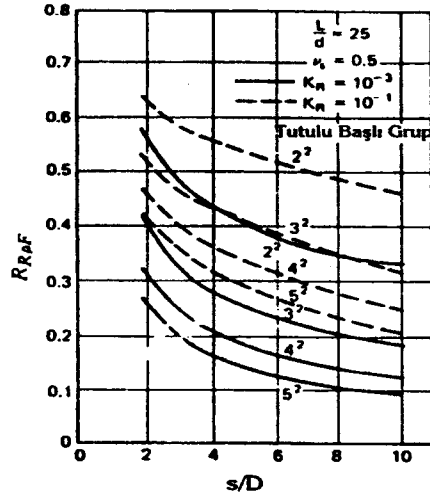
$R_{R\theta H}$ = Yatay yükün neden olduğu dönme için grup azaltma faktörü

$R_{R\theta M}$ = Uygulanan momentin neden olduğu dönme için grup azaltma faktörü

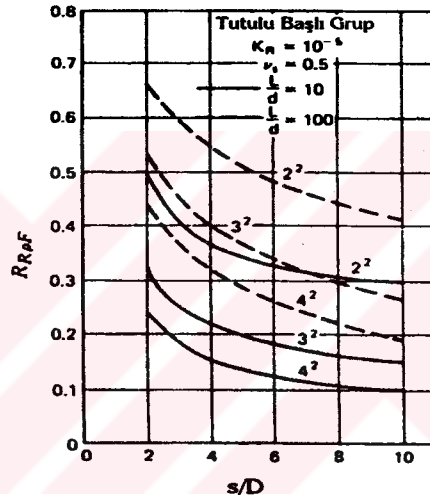
R_{RpF} = Tutulu başlı kazıklar için grup azaltma faktörü

Kare Gruplar için Elastik Çözümler

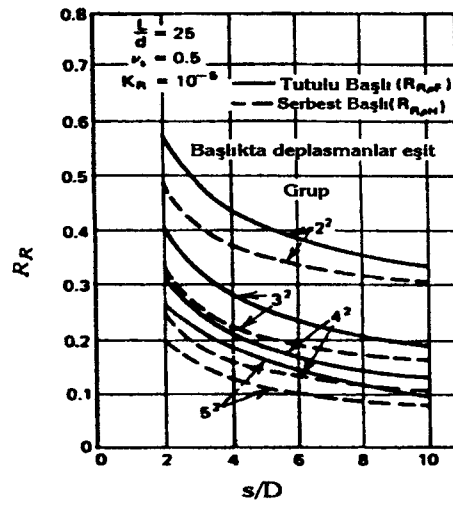
Homojen zeminde 2^2 , 3^2 , 4^2 ve 5^2 olan tutulu başlı kazık gruplarında farklı kazık aralığı ile grup azaltma faktörü olan R_{RpF} arasındaki ilişkisi Şekil 4.1.a da görülmektedir. Buradaki K_R kazığın uzun elastik veya kısa rijit olduğunu göstermektedir. Kısa rijit kazıklarda $K_R=10$ iken uzun elastik kazıklarda $K_R=10^{-5}$ değerini almaktadır. Bütün kazık aralıklarında R_{RpF} rijit kazıklarda daha fazladır. Şekil 4.1.b de L/d arttığında R_{RpF} 'nin de arttığı görülmektedir. L , kazığın uzunluğudur. Ayrıca Şekil 4.1.c de görüldüğü gibi, serbest başlı kazık aralıkları için hesaplanan R_{RpH} değerleri tutulu başlıya ait olan R_{RpF} değerlerinden daha küçük bulunmaktadır.



(a)

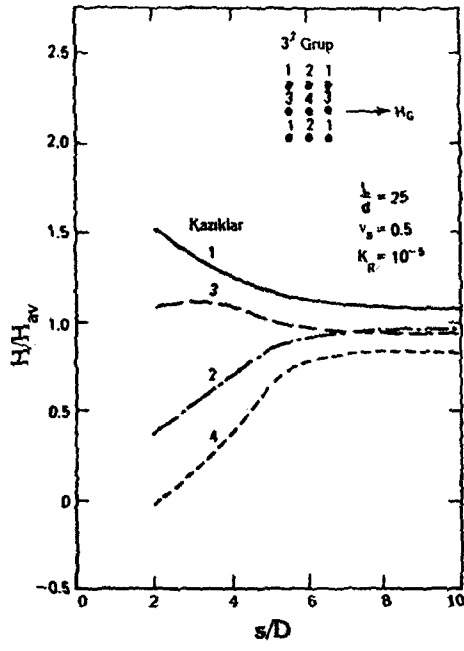


(b)

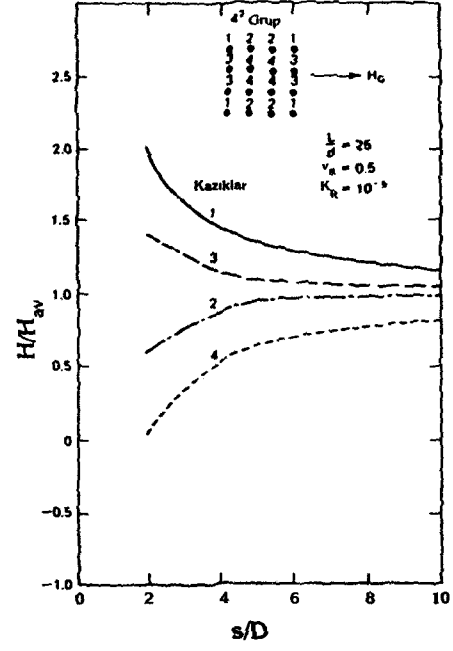


(c)

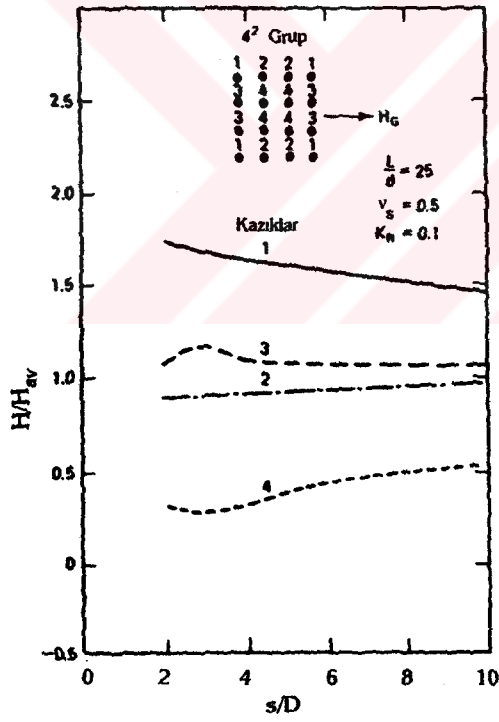
Şekil 4.1: R_{RdF} ve R_R 'nin kazık aralığı ile değişimi (a) Kazık rijitliğinin R_{RdF} 'e etkisi (b) L/d 'nin R_{RdF} 'e etkisi (c) Başlık durumunun R_R 'e etkisi [9]



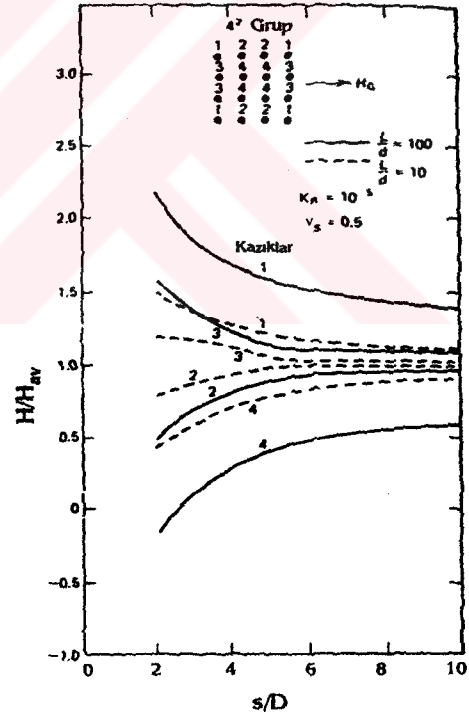
(a)



(b)



(a)



(b)

Şekil 4.2 : Tutulu başlı kazık gruplarında çeşitli durumlarda yatay yük paylaşımları [9]

Homojen zeminde bulunan ve bütün kazıkların eşit deplasman yaptığı 3^2 , 4^2 olan kazık gruplarında çeşitli yatay yük dağılımları Şekil 4.2 de gösterilmektedir. Bu şekiller şu sonuçları çıkarmaktadır [9].

1. Dış kazıklar en fazla yükü taşıırken, merkezdeki kazık en azını taşımaktadır.
2. Kazık aralığı arttıkça kazıklardaki yük paylaşımları birbirlerine yaklaşmaktadır.
3. Kazık sayısı arttıkça, kazıklarca en fazla ve en az taşınan yüklerin farkı artmaktadır.
4. K_R ve L/d arttıkça yükün kazıklara olan dağılımının homojenlikten uzaklaştığı görülmektedir.

4.3. Winkler Etkileşim Modeli

Nogami ve Paulson (1985) ve Hariharan ve Kumarasamy (1982) gruptaki kazıkları ve zemini bir yay ağı ile temsil etmektedir. Bu yöntem, kazık-zemin-kazık etkileşimini sadece yatay yönde olmasına izin vermektedir.

Nogami ve Paulson (1985) tarafından nonlinear kazık grubu davranışının analizi için transfer matris yöntemini önermiştir. Transfer matris yöntemi zemin ortamını Winkler modelinin genişletilmiş olan ‘kazık grubu için Winkler modeli’ ile idealleştirmiştir. Bu metot kazık-zemin-kazık etkileşimini farklı seviyeler arasında modelleyemez. Bu yaklaşım ile denklemlerdeki bilinmeyenlerin sayısını düşürmüştür [10].

4.4. Değiştirilmiş Birim Yük Transferi Yöntemi

Bogart ve Matlock (1983) tarafından önerilen değiştirilmiş birim yük transferi yöntemi, kazık grubunu tek kazık gibi kabul ederek grup için p-y eğrilerini belirlemektedir. Değiştirilmiş tek kazığın çapı kazık grubunun genişliğine eşittir ve gruptaki kazıklar ve aralarındaki zemini örneklemektedir. Bu yöntem, yumuşak kil içerisindeki dairesel kazık grubu için kullanılmaktadır ve yatay yüke karşı olan direncin bütün kazıklar arasında eşit dağıldığı kabulü yapılmaktadır. Dairesel olmayan kazık grupları için yöntem pek uygun değildir [10].

4.5. Ampirik Rijitlik Modeli

Dunnavant ve O'Neil (1986) tarafından önerilen bu yöntem gruptaki kazıklar arasındaki yük dağılımını hesapladığı için en güvenilir yöntemlerden birisi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem kazıkların birbirini perdeleme etkisini gözletmektedir. Perdeleme, ön sıra kazıkların gölgelenen veya arka sıradaki kazıklara göre daha fazla yüklendiği belirten bir etkidir. Dunnavant ve O'Neil'e (1986) göre yöntemin güvenilirliği, doğru zemin elastisite modülünün seçimine bağlıdır [10].

4.6. Grup Azaltma Faktörü Yöntemi

Kumlar üzerinde yapılan model deneylere dayanmakta olup Davisson (1970)'a göre 8D'den daha fazla aralıkta kazık-zemin-kazık etkileşimi söz konusu değildir. Prakash (1962) tarafından kumlu zeminlerdeki kazık gruplarında yapılan model deneylerinde buna benzer olarak, yük yönünde 6D-8D'den fazla kazık aralığında, kazıklar tekil kazık gibi davranmıştır. Yük yönüne dik doğrultuda kazıkların tek kazık gibi davranması için kazık aralığının en az 2.5D olması gerektiğini Prakash (1981)'tarafından saptanmıştır.

Kazık grubunun yatay yük kapasitesini bulmak için yatak katsayısı (kumlu zeminlerde, yatak katsayısı değişim sabiti n_h veya killi zeminlerde sabit olan yatak katsayısı k_h) yatay yük yönündeki aralığa göre Tablo 4.1 deki gibi azaltılmalıdır.

Tablo 4.1 : Yatay yük yönündeki kazık aralığına göre azaltma faktörleri [2]

Yük yönündeki kazık aralığı	n_h veya k_h 'da azaltma faktörü
3D	0.25
4D	0.40
6D	0.70
8D	1.00

Kazıkların yanal yük kapasitelerini deplasmanla sınırlamak için yapılacak analiz bu azaltılmış değere göre tek bir kazığın taşıma gücü bulunup grup için tek kazık taşıma gücü toplanacaktır.

Diğer bir yöntem grubun yanal taşıma gücünü bulmak için tek kazık taşıma gücü toplamına bir grup etkinlik faktörü uygulamaktır. Kohezyonsuz zeminde Oteo (1972) tarafından yapılan model deneyleriyle Tablo 4.2 deki değerleri önermektedir.

Tablo 4.2 : Kohezyonsuz zeminde kazık aralığı/çap oranına göre grup etkinlik faktörü [2]

S/D	G_e
3	0.50
4	0.60
5	0.68
6	0.70

Kohezyonlu zeminlerdeki kazık grupları için Prakash ve Saran (1967) tarafından model deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kazık uzunluğunun çapına oranı 32'dir. Çıkan sonuçlar Tablo 4.3 de sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, 2x2'lik kazık gruplarının grup etkinlik faktörü 3x3'lük gruplara göre daha fazla çıkmaktadır. S/D=8 için G_e 1 alınarak, S/D=6'ya ait G_e değeri enterpolasyonla 0.65 bulunmuştur.

Tablo 4.3 : Kohezyonlu zeminde farklı kazık gruplarında kazık aralığı/çap oranına göre grup etkinlik faktörü [6]

S/D	G_e		
	2x2	3x3	Önerilen
3	0.42	0.39	0.40
3.5	0.50	0.42	0.45
4.0	0.57	0.44	0.50
4.5	0.61	0.47	0.55
5.0	0.63	0.48	0.55
6.0 ^a	-	-	0.65
8.0 ^a	-	-	1.00

^a= Enterpolasyon değerleri

Bu grup etkinlik faktörü

$$Q_{u_g} = G_e n Q_u \quad (4.5)$$

eşitliğinde kullanılarak grup taşıma gücü olan Q_{ug} bulunacaktır. Q_u tek bir kazığın taşıyabileceği nihai yük kapasitesidir. G_e değerlerinin kohezyonlu zeminlerde kohezyonsuza göre daha küçük olduğu görülmektedir [2]. G_e değeri, gruptaki kazık sayısı artınca ve kazıktan kazığa olan mesafe düştükçe azalmaktadır. Düşey yük etkisindeki kazık grubunun etkinlik faktörüyle karşılaştırılırsa daha az olduğu görülmektedir [9].

4.7. Birleştirme Modeli

Focht ve Koch (1973), Poulos'un elastik ortam yöntemi ile nonlinear p-y analizini birleştirmektedir. Grubun yapacağı deplasmanın kazığın hemen yakınında görülecek nonlinear davranış ile kazıktan uzakta daha az gerilme uygulanacak kesimin lineere yakın davranışının birleşiminden meydana geldiği kabul etmektedir.

Focht ve Koch (1973), nonlinear zemin davranışından dolayı kazığın hemen yanında oluşan deplasmanın nonlinear p-y analizi ile incelenmesini önermektedir. Duncan vd. tarafından önerilen karakteristik yük metoduyla da analizi yapılmaktadır. Kazık-zemin-kazık etkileşiminden dolayı oluşan ikinci deplasman bileşeni Poulos'un (1971) elastik etkileşim katsayıları ile hesaplanmaktadır. Focht ve Koch (1973) yöntemiyle beraber ya p-y ya da karakteristik yük metodu kullanılarak kazığın hemen yanındaki zemini ve daha az gerilmeli kazıktan uzaktaki zemini farklı rijitlik değerleri ile temsil edilebilmektedir.

Dunnavant ve O'Neill (1986) yatay yüklü kazık grubu deneylerini bu yöntemi kullanarak analiz yapmışlardır. Kazıklar arasındaki yük paylaşımını ampirik rijitlik modeli, kazık grubundaki deplasmanlar ve momentler için ise birleştirme modelinin daha iyi sonuç verdiği belirtilmektedir. O'Neill vd. (1977), O'Neill ve Tsai (1984) ve Horsnell vd. (1990) tarafından bu yöntem değiştirilmiştir. Fakat grup büyütme yöntemi Focht ve Koch (1973) tarafından önerilen yöntemi esas kabul etmişlerdir.

Kazık grubu tekil bir kazığa göre daha fazla deplasman yapmaktadır. Burada tekil kazığa gelen yük, gruptaki kazık başına düşen yüke eşittir. Gruptaki her kazık çevresindeki zeminde deplasman oluşturur. Bu deplasmanlarda çevre kazıklarda ek yer değiştirmelere sebep olmaktadır. Kazık grubundaki deplasmanın büyük olması eğilme momentlerinin de büyük olmasını sağlamaktadır.

Tek bir kazığın yanal ötelenmesi ve momenti grup için bir büyütme faktörü ile çarpılıp bulunabilir.

$$y_g = C_y y_s \quad (4.6)$$

$$M_g = C_m M_s \quad (4.7)$$

Burada y_s ve M_s tek kazık için hesaplanacak yanal ötelenme ve maksimum moment, C_y ve C_m ise ötelenme ve moment büyütme faktörüdür. y_g grup deplasmanı, M_g ise gruptaki kazıkta oluşan maksimum momenttir. C_y her zaman bire eşit veya büyüktür. Bu faktörler kazık-zemin-kazık etkileşimini ve fore kazık etkilerini hesaba katmaktadır [10].

4.8. Grup Büyütme Yöntemi, Ooi ve Duncan (1994)

Grup büyütme yöntemi (Ooi 1991), karakteristik yük yöntemi (Duncan vd. 1994) ve Focht ve Koch (1973) yöntemini kullanarak hazırlanan, kazık gruplarının nümerik analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Tek kazık için ötelenme ve momentleri karakteristik yük yöntemi, grup deplasman ve momentlerini ise Focht ve Koch yöntemini kullanan bilgisayar programı (PGROUPD) ile hesaplamışlardır. Buda bir çok kazık grubunda farklı kazık sayısı, farklı kazık aralığı, farklı kazık boyutu, farklı kazık rijitliği ile farklı zemin mukavemet ve rijitliği için kombinezonlar yapmalarını sağlamıştır. Parametrik çalışmalar sonunda

$$C_y = \frac{A + N_{kazık}}{B \left(\frac{S}{D} + \frac{P_s}{C P_N} \right)^{0,5}} \quad (4.8)$$

bulunmuştur. Burada C_y boyutsuz deplasman büyütme faktörü, A kilde 16, kumda 9 alınması gereken boyutsuz katsayı, $N_{kazık}$ gruptaki kazık sayısı, B kilde 5.5, kumda 3.0 alınması gereken boyutsuz katsayı, S ortalama kazık aralığı, D kazık çapı, P_s bir kazığa gelen ortalama yük (Toplam yük/kazık sayısı), C kilde 3, kumda 16 olan boyutsuz katsayı, P_N kil için $S_u D^2$, kum için $K_p \gamma D^3$ dür. γ üstteki 8D bölgesinde toplam birim hacim ağırlığı, K_p ise pasif itki katsayısı, ϕ 8D bölgesindeki kumun ortalama içsel sürtünme açısı, S_u 8D bölgesindeki kilin ortalama drenajsız kayma mukavemetidir.

(4.8) bağıntısı karakteristik yük metoduyla beraber kullanıldığında, zemin davranışını karakterize edebilmek için sadece zemin mukavemet parametreleri gerekmektedir. Bu yöntemde ima edilen zemin modülü değerleri kumda ϕ , kilde S_u olan zemin mukavemet parametreleri ile ilişkilidir.

Eğer kazık grubu için hesaplanan yanal deplasman maksimum sınır değerinden fazla ise kazık çapı, kazık sayısı ve/veya kazık aralığı, grup deplasmanın sınır değerden küçük veya eşit olacak şekilde ayarlanmalıdır. (4.8) bağıntısı bu parametrelerdeki değişikliklerin etkisini değerlendirmemizi sağlamaktadır.

Brown vd. (1987,1988)'e göre serbest başlı kazıkların grubunda maksimum moment ön sıra kazıkta olmaktadır. Elastisite teorisini esas alan ve Focht ve Koch (1973) yöntemini içeren metotlar en fazla yükün ise köşe kazıklar tarafından taşındığını tahmin etmişlerdir. Maksimum momentin büyüklüğü ve yeri etkiyen yükün büyüklüğüne ve statik ya da çevrimli etki etmesine göre değişmekte olup hiçbir basit yöntemle tam tahmin edilemez.

Focht ve Koch (1973) tarafından önerilen teori değiştirilerek ön sıra kazıklardaki maksimum eğilme momentinin bulunmasını sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Focht ve Koch teorisini kullanarak grup deplasmanı hesaplanmaktadır. Daha sonra killerde S_u , kumlarda ϕ değeri azaltılarak zemin 'yumuşatılır' ve tek kazık deplasmanının grup deplasmanına eşit hale gelmesi sağlanır. Maksimum moment bu yumuşatılmış zemin parametresine göre hesaplanabilir. Böylece hesaplanacak moment, grubun fazla deplasmanı ile uyum içinde olacak ve grubun en fazla yüklenen kazığının maksimum momentini verecektir. Böylece moment büyütme faktörü

$$C_m = (C_y)^p \quad (4.9)$$

olarak elde edilmiştir. Burada kilde ve kumda sırası ile

$$n = \frac{P_s}{150P_N} + 0.25 \quad (4.10)$$

$$n = \frac{P_s}{300P_N} + 0.30 \quad (4.11)$$

alınacaktır. Kazık grubundaki maksimum eğilme momenti (4.7) ve (4.9) denklemleri kullanılarak hızlı olarak bulunmaktadır. Böylece uzun tekrarlı denemeler yapılmaksızın kazık-zemin-kazık etkileşimi ve zemin yumuşaması etkileri de göz önüne alınarak sonuçlara ulaşılmaktadır [10].

Grup büyütme yöntemindeki kısıtlamalar:

1. Bu yöntemin üniform aralıklar için geliştirilmesi nedeni ile üniform olmayan aralıklarda ortalama değer olarak hesap yapılabilir.
2. Dairesel gruplar veya eğik kazıklar için uygun değildir.
3. Tek kazık deplasman ve momentleri hesaplanırken kazık başlığının rijitliği gözönüne alınmalıdır.
4. Kazık grubundaki herhangi kazığa etkiyen yük tahmin edilemezken, maksimum eğilme momenti bulunabilmektedir.
5. Yöntem grup içindeki sıralamayı gözetmeksizin aynı sayıdaki kazık grupları için aynı deplasman ve moment değerlerini vermektedir. Teorik ve deneysel çalışmalar böyle bir farkın doğabileceğini işaret etmekte iseler de fark çok olmadığından bu konu yöntemin olumsuzluğu gibi görülmemelidir.
6. Yöntem üniform zemin koşulları kabul etmekle birlikte 8D bölgesindeki ortalama değerler kullanmak farklı ortamlar için pratikte yeterlidir.

4.9. Sonlu Elemanlar Metodu

Matematiksel modellerin gelişmesiyle kazıklı temellerin analizlerinde farklı yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle bilgisayarların işlemci ve hafıza kapasitesinin artmasıyla 3 boyutlu kazıklı temellerin matematiksel modellerin yardımıyla bilgisayar ortamında çözülmesi kolaylaşmış ve yaygınlaşmıştır. Bu modellerden en yaygını ise sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile model ufak parçalara ayrılır ve parçaların davranışlarından yapısal davranış belirlenmektedir. Bu yöntemle yapılan bazı çalışmalar aşağıda anlatılmaktadır.

Pressley ve Poulos (1986) tarafından elasto-plastik zemin kullanılarak simetrik olmayan model yapılmıştır. Muqtadir ve Desai (1986) tarafından 3 boyutlu eğik kazıklardan oluşan kazıklı temeli hem zemin hem de kazık-zemin arayüzeyi için elastik hiperbolik yapısal kullanılarak modelleme yapılmıştır. Chow (1987) ve Leung

ve Chow (1987) bir boyutlu kazık modellemesi ve grup içerisindeki kazıkları birleştirmek için Mindlin's denklemlerini kullanarak basitleştirilmiş bir çalışma yapmışlardır. Trochanis, Bielak ve Christiano (1991) nonlinear zemin davranışının kazığın aksel ve yatay davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada elasto-plastik model ve arayüzey elemanlarını içeren üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [11]. Wakai, Gose ve Ugai (1999) tarafından hem model deneyleri hem de sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Bu çalışmada serbest ve tutulu başlı kazık gruplarının davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [13].

Bu çalışmaların ortak özelliği, zemin ve/veya kazık-zemin arayüzeyinde nonlinear davranış gözönüne alınarak daha gerçekçi modellerle çözümler yapılmasıdır. Bunlardan ikisi aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

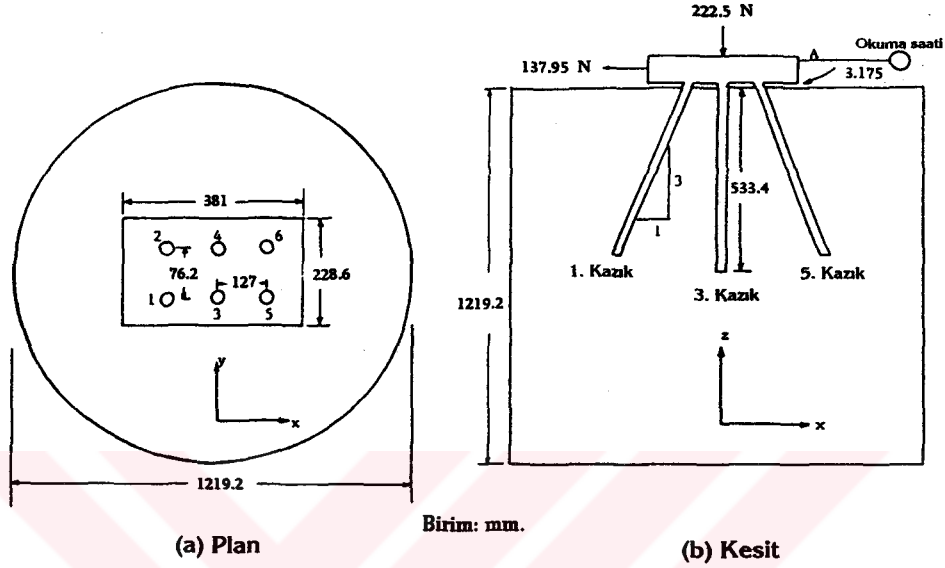
4.9.1. A. Muqtadir ve C. S. Desai Tarafından Yapılan Çalışma

Kazık grubundan oluşan temelin analizi için 3 boyutlu nonlinear sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu nümerik yöntem sayesinde kumun elastik, nonlinear elastik, pekleşen elasto-plastik davranışı incelenebilmektedir. Kazık zemin arayüzeyini tanımlamak için ince tabakalı arayüzey elemanları kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar laboratuvar test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bundan başka nonlinear zemin davranışı ve kazık zemin arayüzeyindeki göreceli hareketler tanımlanmış ve tartışılmıştır.

Kazık gruplarında kazık başlığı, zemin ve kazık arasında üç boyutlu bir etkileşim bulunmaktadır. Geçmişte geometri ve malzeme özelliklerinde yapılan basitleştirmelerle problemler çözülmeye çalışılmıştır. Fakat bu problemlere gerçekçi yaklaşmak için, üç boyutlu geometri, arayüzey etkileri ve nonlinear zemin davranışı göz önüne alınmalıdır.

Bu çalışmada zemin ile kazık arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için ince tabakalı arayüzey elemanı kullanılmıştır. Bu eleman sayesinde yapışma, kaymama, kayma ve ayrılma biçimleri modellenmektedir. Burada kullanılan elemanın normal rijitliği, yanındaki zeminle aynı olduğu kabul edilmiştir. Kayma rijitliği ise zemin ile yapı arasındaki arayüzeyin modellendiği kesme kutusu deneyine dayanılarak tanımlanmıştır.

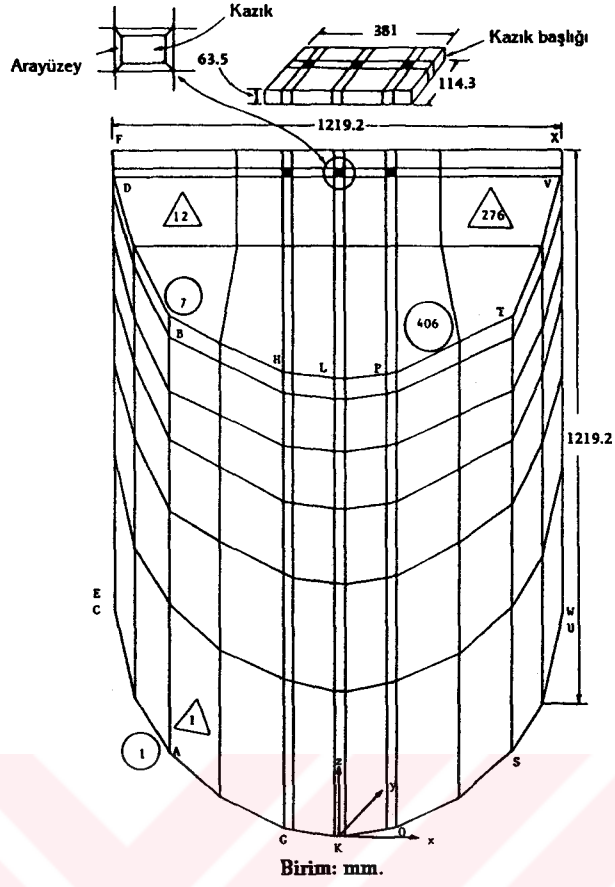
Yapısal model olarak nonlinear elastik hiperbolik model seçilmiştir. Bu model hem basitliği hem de model deneylerindeki kumun ayrıntılı gerilme-şekil değiştirme bilgilerinin eksikliğinden dolayı seçilmiştir. Yapılan deneyde Şekil 4.3 de gösterildiği gibi 6 adet alüminyum kazık kullanılmıştır. Kazıkları çevreleyen zemin gevşek kumdur.



Şekil 4.3 : Kazık grubunun boyutları ve yükler [12]

Şekil 4.4 de kazık, başlık, zemin ve arayüzeyin olduğu sonlu eleman ağı gösterilmektedir. Ağ 312 sekiz düğüm noktalı eleman ve 498 düğüm noktasından oluşmaktadır. Dairesel kazıklar onlara eşdeğer dikdörtgen kazıklarla temsil edilmiştir. Bu yaklaşım basitleştirme ve karmaşıklığı gidermek için düşünülmüştür. Simetriden faydalanarak sadece kazık grubun yarısı için model kurulmuştur. Kazık ve başlık lineer elastik, zemin ise nonlinear elastik malzeme olarak tanımlanmıştır.

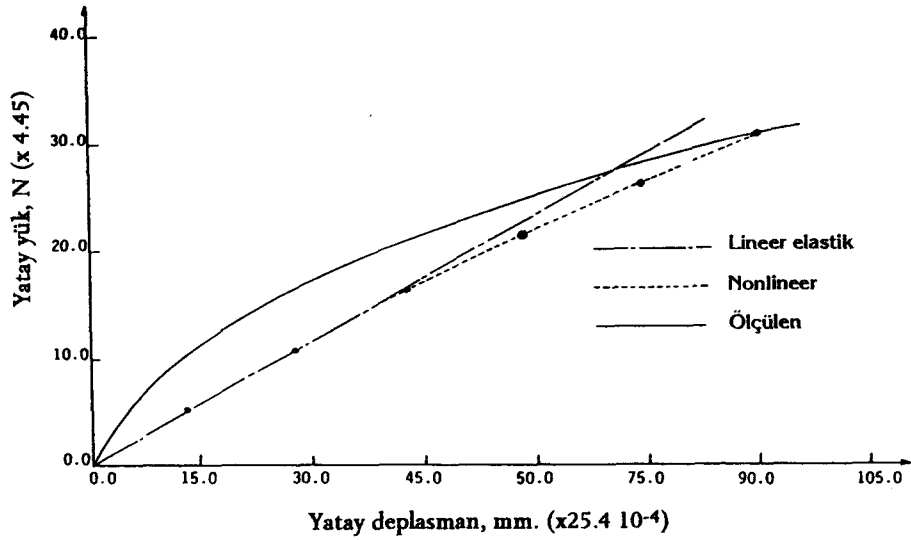
Yüklemeye düşey ve yatay olarak yapılmıştır. Önce 222.4 N'luk düşey yük bir defada kazık başlığının ortasından uygulanırken, 137.9 N'luk yatay yük artarak toplam değerine ulaşır ve her artışında ona karşı gelen deplasman kaydedilmiştir. Lineer elastik analizler için düşey ve yatay yükün tamamı tek artışla uygulanmıştır. Nonlinear analizlerde ise düşey yük iki artış, yatay yük ise altı artışla uygulanmıştır.



Şekil 4.4 : Sonlu elemanlar ağı [12]

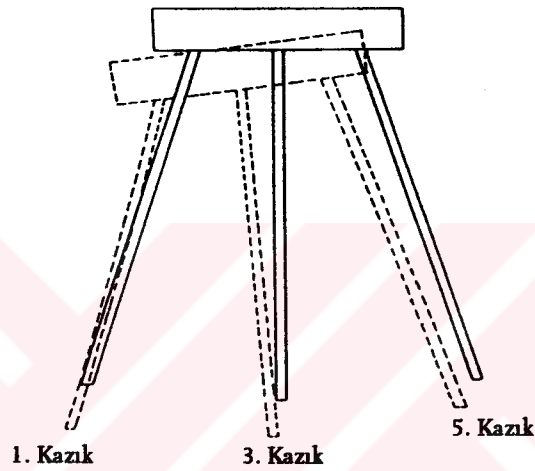
Sonuçlar

Şekil 4.5 de kazık başlığındaki A noktasında elde edilen yük-deformasyon eğrileri gösterilmektedir. Kazık başlığındaki nihai yanal deplasman Hrennikoff



Şekil 4.5 : A noktasında (Şekil 4.3) kazık başlığının yanal deplasmanı [12]

yöntemi tarafından 0.00188 mm. tahmin edilmiştir. Lineer elastik analiz durumunda, sonlu elemanlar metodu ile 0.00208 mm. değeri bulunmuştur. Hrennikoff yönteminin de lineer elastik zemin davranışına dayandığı düşünülürse sonuçların birbirine yakın olması güzel bir neticedir. Grafikten de görüldüğü gibi ölçülen değerlerle nonlineer sonlu elemanlar analizindeki sonuçlar uyum içerisindedir. Tahmin edilen ve gözlenen nihai sonuçlar birbirine yakındır, fakat başlangıç yük aralığındaki sonuçlarda büyük bir fark vardır. Bunun nedeni seçilen malzeme özelliklerinden dolayıdır. Ayrıca deneysel hatalarında bu farkta etkisi olmaktadır.



Şekil 4.6 : Yükler uygulandıktan sonra deforme olmuş kazık grubu [12]

Kazık grubunun düşey ve yatay yük altındaki yer değiştirmesi Şekil 4.6 da gösterilmiştir. Düşey yük uygulanması ile bütün kazıklarda 0.0029 mm.'lik düşey deplasman oluşmuştur. Yatay yük uygulanınca sırasıyla 1,3 ve 5 nolu kazıklarda 0.0035 mm., 0.00284 mm. ve 0.00218 mm.'lik düşey deplasman gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre yatay yük etkisiyle 1 nolu kazık aşağı hareket ederek basınca çalışırken, 5 nolu kazık yukarı deplasman yaparak çekmeye çalışmıştır. 3 nolu kazık ise rijit davranarak sola ötelenmiştir.

4.9.2. A. Wakai,S. Gose ve K. Ugai Tarafından Yapılan Çalışma

Bu çalışmada yatay yüklü serbest ve tutulu başlı tek ve 3x3'lük kazık gruplarının model deneyleri yapılmıştır. Üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemiyle de bu modellerin davranışlarının analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

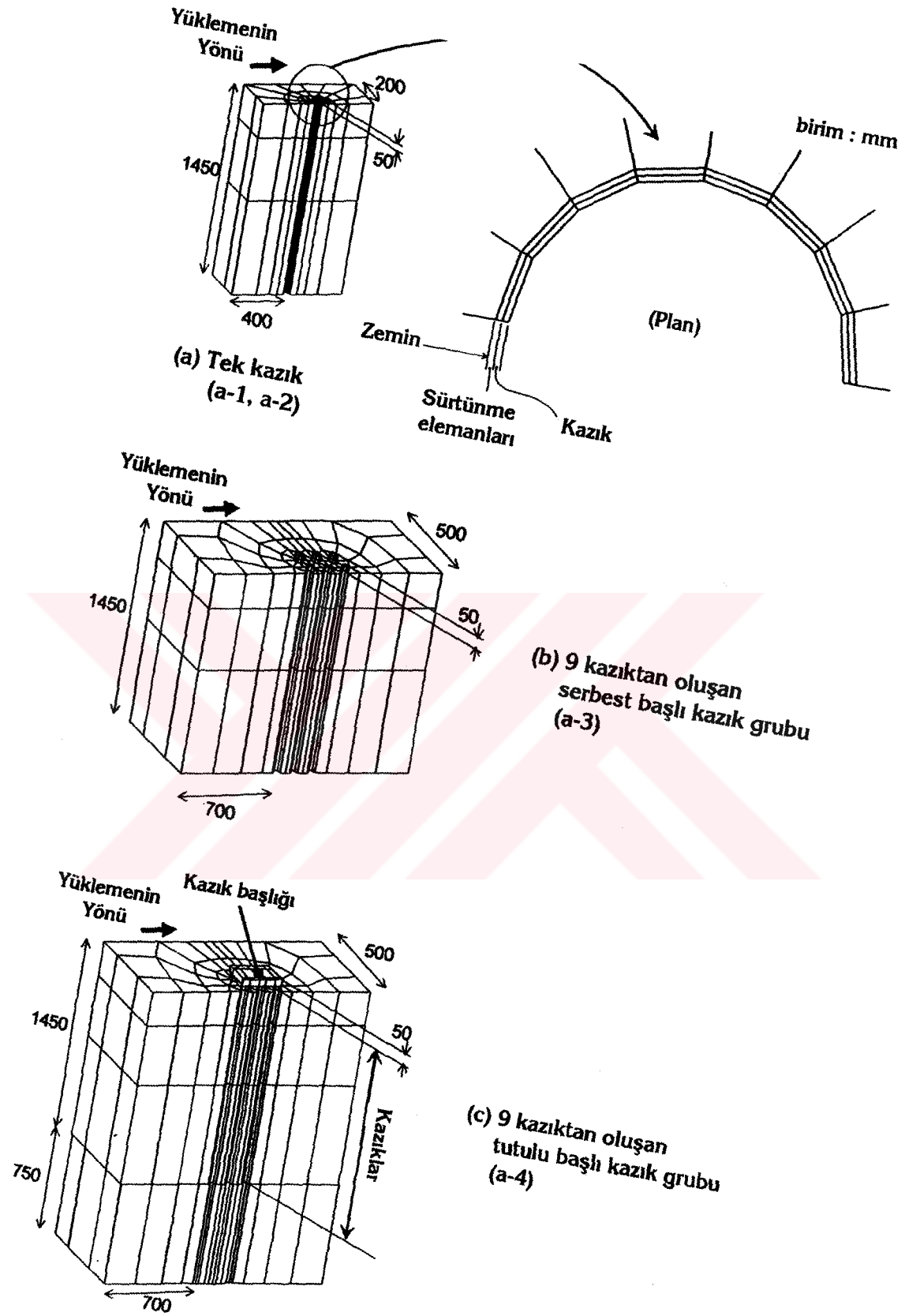
Deneyde kullanılan model kazıkların malzemesi alüminyumdur. Kazıkların kalınlığı 1.5 mm, dış çapı 50 mm'dir. Kazıklar 1450 mm derinliğe kadar kumun içine yerleştirilmiştir. Yatay yük zemin yüzeyinden 5 cm yukarıdan kazığa uygulanmıştır. Gruptaki kazıkların merkezleri arasındaki mesafe 2.5D'dir. Tablo 4.4 de model deneyleri ve analizleri detaylı olarak gösterilmektedir.

Şekil 4.7 de model deneylerine karşılık gelen sonlu elemanlar ağları gösterilmektedir. Kazık ve zeminin modellenmesinde 20 düğüm noktalı dörtgen prizmalar kullanılmıştır. Şeklin simetri avantajı kullanılarak yarısı için yatay yük uygulanmıştır. Sadece a-4 (Tutulu başlı kazık grubu) durumu için kazığın altında zemin için ağ devam ettirilmiştir. Bunun nedeni kazık grubu biraz dönerek ön kazıkta basınç arka kazıkta çekme meydana getireceği tahmin edilmiştir.

Tablo 4.4 : Model deneyleri ve analizler [13]

(a) Model Deneyleri		
No	Kazık Sayısı	Serbestlik Durumu
e-1	Tek	Serbest
e-2	Tek	Tutulu
e-3	3x3	Serbest
e-4	3x3	Tutulu
(b) Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapılan Analizleri		
No	Kazık Sayısı	
a-1	Tek	Serbest
a-2	Tek	Tutulu
a-3	3x3	Serbest
a-4	3x3	Tutulu

Kazık ile kumun arasına ince sürtünme elemanları yerleştirilerek kazık-zemin ara yüzeyinde kaymanın oluşması sağlanmıştır. Fakat yazarlar ilerideki araştırmalarda bunu yerine 3 boyutlu ara (joint) elemanların kullanılmasını tavsiye etmektedir. Bu analizlerde, işlem sürelerini kısaltmak için kazık başlığının yatay deplasmanı kontrol altına alınmış ve 5 mm'ye (0.1D) kadar hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.7 : 3 boyutlu sonlu elemanlar ağları [13]

Tablo 4.5 de analizde kullanılan malzeme özellikleri gösterilmektedir. Kazık doğrusal elastik kabul edilmiştir. Kumda, göçme kriteri için Mohr-Coulomb, plastik potansiyeli için ise Drucker-Prager denklemlerini içeren MC-DP modeli kullanılmıştır. Bu kombinasyon sonlu elemanlar hesaplarındaki konverjansın gelişmesi için faydalıdır.

Tablo 4.5 : Analizde kullanılan malzeme parametreleri [13]

Malzeme	Kazık	Kum	Kazık-zemin Arayüzeyi	Başlık
Elastisite Modülü, E (MPa)	6.86×10^4	Denk. (4.12)	Denk. (4.12)	Büyük bir değer
Poisson Oranı, ν	0.345	0.4	0.4	0.345
Kohezyon, c (Mpa)	Büyük bir değer	0	0	Büyük bir değer
Sürtünme Açısı, ϕ (°)	-	42	25	-
Genleşme Açısı, ψ (°)	-	12		-
Birim Ağırlık, γ (kN/m ³)	26.4	15.3	15.3	26.4
Toprak basınç katsayısı, K_0	-	0.5	0.5	-

Kumun içsel sürtünme açısı olan 42°, üç eksenli basınç deneylerinden bulunmuştur. Kumun genleşme açısı için Tatsuoka,1993 tarafından önerilen

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (4.12)$$

eşitliği kullanılmıştır. Kumun elastisite modülü E

$$E = E_0 \sqrt{\frac{p}{p_0}} \quad (4.12)$$

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (4.13)$$

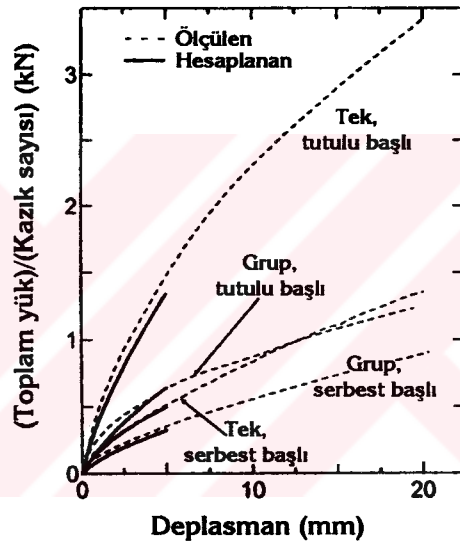
için (4.12) bağıntısı kullanılmıştır. p, başlangıç ortalama çevre basıncıdır. $E_0 = 19.6$ Mpa, $p_0 = 98$ kPa alınmaktadır. p değeri drenajlı üç eksenli basınç deneylerinin

sonuçlarından elde edilmiştir. p 'nin bulunmasında E_{50} , sekant elastisite modülü kullanılmıştır.

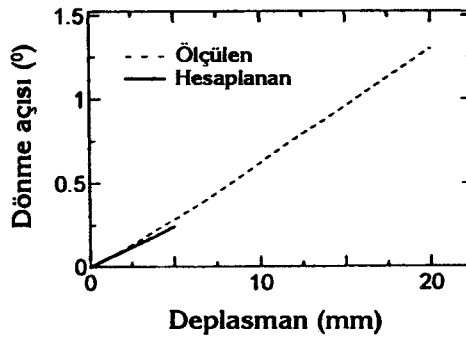
Kum ve alüminyum plakaların kullanıldığı, deneylerden kazık-zemin arayüzeyinin sürtünme açısı 25° bulunmuştur. Arayüzey elemanı için genleşme açısı ise sıfır kabul edilmiştir. Analizlerde çekme gerilmesiz analizler kullanılmıştır. Bu sayede her elemanın minimum asal gerilmesinin pozitif olması sağlanmıştır.

Sonuçlar

Şekil 4.8.a da tekil kazık ve 3x3 kazık grubu durumları için yatay kuvvet ile kazık başının deplasman ilişkisini gösteren eğriler bulunmaktadır. Görüldüğü gibi, aynı deplasmanı için tutulu başlı kazıkların daha fazla yüklenmesi gerekmektedir.



(a)



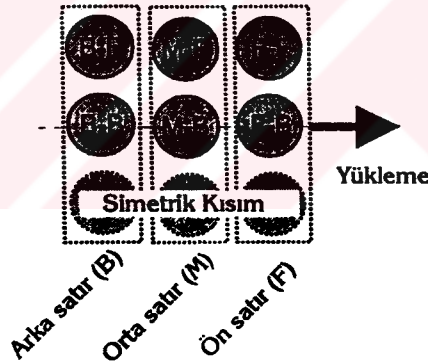
(b)

Şekil 4.8 : (a) Her durum için yük-deplasman eğrileri (b) Tutulu başlı kazık grubunda başlığın dönmesi [13]

Kazık grubuna uygulanan yük, kazık sayısına bölününce tekil kazığa gelen yükten küçük olmaktadır. Bu analizlerde deplasman $0.1D$ 'ye ulaştığında, grup etkinlik faktörü 0.6 ile 0.7 arasında hesaplanmıştır.

Şekil 4.8.b de tutulu başlı kazık grubunun yatay deplasmanı ile başlığın dönme açısı arasındaki ilişki grafik olarak gösterilmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yatay yük başlıkta çok az bir dönmeye sebep olmaktadır. Bu yüzden ön kazıklar basınç arka kazıklar ise çekmeye çalışmaktadır.

Şekil 4.9 da görüldüğü gibi kazıklara isim verilmiştir. Şekil 4.10.a ve b de her kazık sırasına ait yük dağılım oranları gösterilmektedir. Her eğrinin başlangıç kısımlarında, deney ve analiz sonuçları farklılık göstermektedir. Küçük deformasyon bölgesindeki gerilme-şekil değiştirme karakterinin farklılığından dolayı bu sonuç çıkmıştır. Analizlerde zemin göçmeden önce doğrusal elastik gibi davranmıştır, diğer yandan deneylerde yükleme başlangıcından beri zemin doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Bu yüzden ayrı eğriler bulunmuştur.

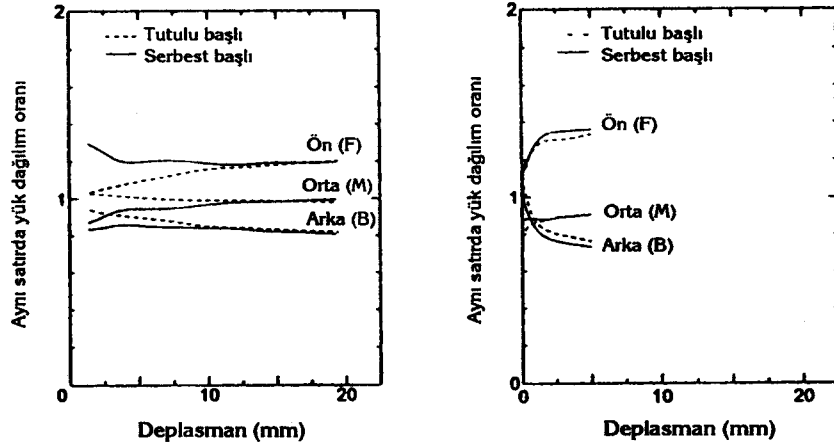


Şekil 4.9 : Kazıkların adlandırılması [13]

Öte yandan eğrinin sonraki kısımlarından, ön kazıkların orta ve arka kazıklara göre çok daha fazla yüklendiği görülmektedir. Hem deneyde hem de analizlerde kazık sıralarının yük dağılım oranlarının kazık başının sabitliğinden bağımsız olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan deneyin başlangıç kısımları ayrılmalıdır.

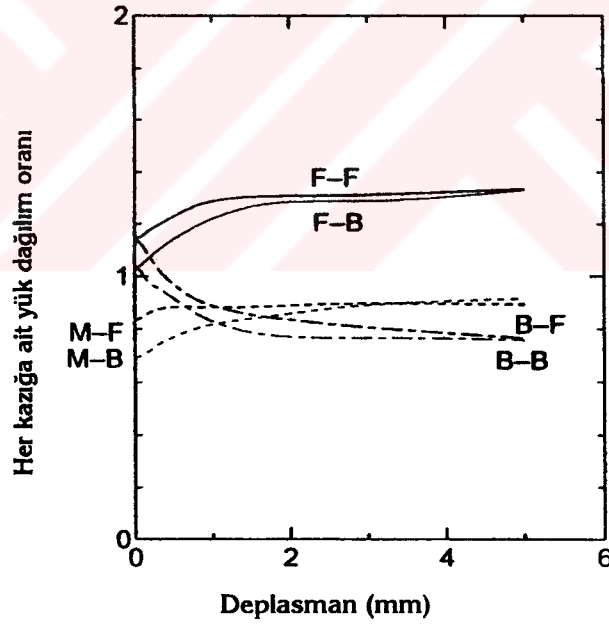
Şekil 8.c de analizlerden elde edilen, tutulu başlı kazık grubunda kazıkların yük dağılım oranları gösterilmektedir. Her eğrinin ilk yarısı için, aynı sırada bulunan 3 kazık kendi arasında karşılaştırılırsa, dış kazıklar (F-F, M-F, B-F) iç kazıklara (F-B, M-B, B-B) göre daha fazla yüklendiği görülmektedir. Deformasyon artınca, dış

ve iç kazıkların yük dağılım oranları arasındaki fark küçülmektedir. Hemen hemen yukarıdaki sonuçlar serbest başlı kazık gruplarında da görülmektedir. Elastik-tam plastik analizlerde, zemin akmadan önce doğrusal elastik davrandığından, ön (F-F, F-B) ve arka (B-F, B-B) sıra kazıklara gelen yüklerin aynı olması kaçınılmaz bir sonuçtur.



(a) Ölçülen

(b) Hesaplanan



(c) Hesaplanan

Şekil 4.10 : 3x3'lük kazık grubunda yük dağılım oranları [13]

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PROGRAM ÖZELLİKLERİ

5.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında yatay yüklü kazıkların davranışları bilinen klasik yöntemlerin dışında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da incelenmiştir. İnceleme sırasında LUSAS 13.2 sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve LUSAS sonlu elemanlar programı üzerinde kısaca durulacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi, yapıların yük altındaki davranışlarını tespit etmek amacıyla ufak parçalara ayrılması ve parçaların davranışlarından yapısal davranışın belirlenmesi davranışına dayanır. Yapıyı oluşturan parçaların her birine eleman adı verilir. Sonlu sayıdaki bu elemanlar yönteme de adlarını vermişlerdir. Her elemanın şekli bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Eğer yapıyı oluşturan tek bir elemanın davranışını tanımlamak mümkün olabiliyorsa yapıdaki tüm elemanlar için aynı davranışın tanımlanması mümkündür. Bu tanımlama yapılırken tek bir eleman davranışı için geliştirilen bağıntılar tüm sisteme uygulanarak matris tekniği ile bilinmeyenler bulunur. Örneğin, mekanik bir problemde deplasmanları elde ettikten sonra birim deformasyon ve gerilme değerlerine ulaşmak mümkündür.

Sonlu elemanlar programları problemlerin modellenmesinde kullanıcılara birçok kolaylık sağlamaktadır. Kullanılan malzeme özelliklerinin seçilmesinde, sınır koşullarının belirlenmesinde, farklı yüklerin incelenebilmesinde sunulan çeşitlilik problemlerin en doğru şekilde modellenmesine olanak sağlamaktadır. Makina ve uçak mühendisliğinde oldukça geniş kullanım alanı olan bu yöntem günümüzde inşaat mühendisliği alanında da yaygın olarak uygulanmaktadır. İnşaat ve geoteknik mühendisliğinde : yükleme, gerilme-şekil değiştirme, akım, konsolidasyon (oturma), taşıma gücü, zemin dinamiği veya genel olarak dinamik davranış, malzeme çeşitliliği

olan (lineer, lineer olmayan, izotropik, ortotropik, anizotropik) vs. problemlerde, sonlu elemanlar programları kullanılmaktadır.

5.2. Kullanılan Kavramlar

Rijitlik Matrisi

Rijitlik matrisi, bir elemanın malzeme ve geometrik özelliklerinden türetilen denge denklemlerinin katsayılarından oluşur ve minimum potansiyel prensibi kullanılarak elde edilir. Rijitlik, düğüm noktalarının deplasmanları ve düğüm noktası kuvvetleri ile ilgilidir. Rijitlik matrisi $[k]$, düğüm noktası vektörü $\{Q\}$ ve deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki eşitlik

$$[k] \{q\} = \{Q\} \quad (6)$$

olarak verilmektedir [15]. Rijitlik matrisindeki elemanlar “etki katsayıları”dır.

Toplam Rijitlik Matrisi

Bütün ortam (bünye) için, eleman rijitlik matrisinden kurulan global rijitlik matrisidir. Bu matris, tek eleman düğüm noktası kuvvet vektörlerinin kullanıldığı toplam kuvvet ya da yük vektörlerini kapsar. Toplam rijitlik matrisi $[k]$, toplam yük vektörü $\{R\}$ ve düğüm noktası deplasman vektör $\{r\}$ arasındaki eşitlik aşağıdaki gibidir [10]:

$$[k] \{r\} = \{R\} \quad (6)$$

Gerilme Durumu

Elementel hacimdeki yüklü bir bünyedeki gerilme durumu altı bileşene sahiptir ve şöyle ifade edilir [10] :

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}] \quad (7)$$

$$\{\sigma\}^T = \text{Gerilme vektörü}$$

$\sigma_x \sigma_y \sigma_z =$ Normal gerilme bileşenleri

$\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} =$ Kayma gerilmesi bileşenleri

Eğer koordinat eksenleri asal eksen ise gerilme vektörü şu hale gelir.

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 0 0 0] \quad (8)$$

Gerilme invariantları J_1, J_2, J_3 aşağıda verilmektedir [10]

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (9)$$

$$= \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1$$

$$J_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2$$

$$= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Deformasyon ve Kinematik Durumu

Gerilme gibi deformasyon da 6 bileşene sahiptir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\{\epsilon\}^T = [\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}] \quad (10)$$

$$\{\epsilon\}^T = \text{Deformasyon vektörü}$$

$\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z =$ Normal deformasyon

$\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} =$ Kayma deformasyon

Deformasyon invariantları I_1, I_2, I_3 'de gerilme invariantlarına benzer şekilde şöyle gösterilir.

$$I_1 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

$$I_2 = \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x - 0.25 (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \quad (11)$$

$$= \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1$$

$$I_3 = \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + 0.25 (\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} - \varepsilon_x \gamma_{yz}^2 + \varepsilon_y \gamma_{zx}^2 + \varepsilon_z \gamma_{xy}^2)$$

$$= \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1$$

Lineer İzotropik Elastisite

Genelleştirilmiş Hooke Kanunu'nda en basit hal malzeme lineer, izotropik ve elastik olduğundadır. İzotropik malzemede, bünyedeki her düzlem malzeme davranışının simetri düzlemidir (Yani nokta simetrisi söz konusudur). Deformasyonlar cinsinden (12) eşitliği yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ & & & & & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Gerilme cinsinden (13) eşitliği yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Düzlem Deformasyon Durumu

Bir uzun yapının geometrisi ve yükleme durumu boylamasına önemli derecede değişmiyorsa bu duruma düzlem deformasyon durumu denir. Bu tür

problemlerde bağımlı değişkenler sadece x ve y koordinatlarının fonksiyonları olabilirler. Bu da kesit üzerinde inceleme yapmamızı sağlar. z yönündeki deplasman bileşeni, her kesitte 0 olduğunu kabul edersek ε_z , γ_{yz} , γ_{zx} kaybolacaktır ve kalan sıfırdan farklı deformasyon bileşenleri şöyle olacaktır.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{ve} \quad \sigma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (14)$$

ε_z 'in kaybolmasıyla σ_z gerilmesi σ_x ve σ_y cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (15)$$

böylece elastik izotropik malzeme için yapısal model (16)'daki şekle indirgenecektir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Düzlem deformasyon problemlerinde genellikle birim kalınlıkta bir düzlem olduğu kabul edilir (istinat duvarı, toprak baraj problemleri).

Düzlem Gerilme Durumu

Düzlem deformasyon (z yönündeki boyut x ve y boyutlarına göre çok büyüktür) durumunun tersine, düzlem gerilme durumunda z yönündeki boyut çok küçüktür. Kendi düzleminde yüklenen ince plak örneği tipik bir örnek olarak verilebilir. Plak yüzey yükleme yapmadığımızı düşünürsek bileşenleri τ_{yz} ve τ_{zx} yüzeyden kaybolacaktır ve σ_z kalınlık boyunca sıfır olacaktır. Sıfırdan farklı bileşenler σ_x , σ_y ve τ_{xy} kalınlık üzerinden ortalamaları alınabilir ve z'den bağımsız olarak düşünülebilirler. Bu tanımlamayla karakterize edilen gerilme durumu “genelleştirilmiş düzlem gerilme durumu” adını alır. Deformasyon bileşenleri γ_{yz} ve γ_{zx} yüzeyden kaybolacaktır ve ε_z şöyle gösterilebilecektir [10]:

$$\varepsilon_z = -\frac{\gamma}{1-\gamma}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (17)$$

Yapısal ilişki ise şu hale gelecektir :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

5.3. Lusas Programının Özellikleri

5.3.1. Programın Sistem Özellikleri

Lusas sonlu elemanlar programı kullanıcılara oldukça zengin analiz imkanları sunmaktadır.

- Lineer statik analiz
- Lineer olmayan statik analiz
- Lineer dinamik analiz
- Lineer olmayan dinamik analiz
- Sünme analizi
- Doğal frekans analizi
- Burkulma analizi
- Spektral yanıt analizi
- Harmonik yanıt analizi
- Fourier analizi
- Kararlı durum alan analizi
- Geçici alan analizi
- Bağlı termo-dinamik analiz

Mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan lineer ve non-lineer modeller de programda yer alır. Bunlar :

- Lineer izotropik/ ortotropik/ anizotropik

- Elasto-plastik/ basınca bağı ve deformasyon pekleşmeli anizotropik
- Deformasyon yumuşamalı lineer olmayan beton
- Bozulma
- 2-D ve 3-D ara yüzey
- Sünme
- İzotropik alan
- Ortotropik alan
- Konveksiyon/ radrasyon
- Kullanıcının tanımlayabileceği lineer olmayan malzeme, sünme ve bozulma

Büyük deformasyonları, hem küçük hem de büyük şekil değiştirmeleri modellemek için geometrik olarak lineer olmayan formülasyonlar bulunmaktadır.

- Toplam enerji
- Güncelleřtirilmiř Lagranj
- Euler
- Ko-rotasyonel

Lusas'ın eleman kütüphanesi 100'ün üzerinde eleman tipini kapsamaktadır. Elemanlar řu ana tipler altında bulunmaktadır

- Bar elemanlar
- Beam (kiriş) elemanlar
- 2-D katı sürekli ortam elemanlar
- 3-D katı sürekli ortam elemanlar
- Plaklar
- Kabuklar
- Zarlar
- Alan elemanlar
- Joint elemanlar

Sonlu elemanlar modelinde kullanılabilecek sınır koşulları aşağıdadır.

- Tutulu/ önceden belirlenen değerler

- Yaylar
- Kayma çizgileri
- İletim/ radrasyon

Lusas'ta oldukça fazla yükleme koşulu bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmektedir.

- Önceden belirlenen deplasmanlar
- Yoğunlaştırılmış (tekil) yükler
- Eleman yükleri
- Yayılı yükler
- Bünye kuvvet yükleri
- Başlangıç hızları
- Başlangıç gerilmeler ve deformasyonlar
- Kalıcı gerilmeler
- Isı yükleri
- Alan yükleri
- Genel Yükler

5.3.2. LUSAS Programının kullanım Esasları

Modellemenin doğru yapılması sonlu elemanlar analizinin en önemli konusudur. Örneğin, modelde kullanılacak yapısal sistem malzeme özelliklerini en iyi şekilde yansıtabilmelidir ya da kullanılan elemanlar ne programın çalışmasını gereksiz yere uzatacak kadar küçük ne de çözümün hassasiyetini etkileyecek kadar büyük seçilmelidir. En uygun olanı her ikisinin arasında kalabilmektir.

Doğru bir modelleme incelenen problemin sonuçları hakkında önceden fikir sahibi olabilmekle (örneğin: gerilme dağılımını tahmin etmek vs.) daha mümkündür. Bu sayede modelleme yapılırken daha bilinçli çalışabilmek ve belki de daha iyi modellerle analizin süresini kısaltmak mümkün olacaktır. Eğer problem sonucu hakkında herhangi bir tahmin yapılamıyorsa başlangıç ağlarının büyük kurulup sonraki analizlerde hassas ağlar kurulması en mantıklı olan yöntemdir.

Lusas sonlu elemanlar programında bir çok eleman bulunmaktadır. Analizlerin doğru sonuçlar vermesi elemanların özelliklerine uygun problemlerde kullanılmalarıyla mümkün olacaktır. Elemanların sayısı, elemanların büyüklükleri ve birbirlerine olan mesafeleri kullanıcının belirlemesi gereken önemli hususlardan bazılarıdır.

5.3.3. Data Dosyasının Hazırlanması

Problemin modellenmesinde Lusas 13.2 sonlu elemanlar programı kullanıldı. Program, analizin giriş ve çıkış bilgilerini düzenleyen bir grafik yazılımı olan MODELLER ve analiz programı olan SOLVER'dan oluşmaktadır. Modeller ile problemi tanımlayan elemanlar, yükleme çeşitleri, sınır koşulları, kullanılacak yapısal modeller ve çözüm yöntemleri vb. belirlenmektedir. Yapılan çizim modeller yardımı ile data dosyasına çevrilir ve solver ile çözdürülür. Çıktı dosyası Modeller programı ile görüntülenerek sonuçlar irdelenir.

Modeller'da analizi yapılmak üzere hazırlanan problemin, bu programdan çıkmadan önce menü panelindeki bir komut yardımıyla otomatik olarak data dosyası oluşturulur. Data dosyasında belirli bir formatta problemle ilgili bütün veriler bulunur. Lusas sonlu elemanlar programında analiz bu data dosyası kullanılarak yapılır. Data dosyası aşağıda verilen terminolojiye göre hazırlanır:

• Problemin tanımı	PROBLEM
• Eleman topolojisi	ELEMENT TOPOLOGY
• Düğüm noktası koordinatları	NODE COORDINATES
• Geometrik özellikler	GEOMETRIC PROPERTIES
• Malzeme koşulları	MATERIAL PROPERTIES
• Destek koşulları	SUPPORT NODES
• Yükleme	LOAD CASE
• Problemin sonu	END

Eğer problemin içinde belirtilmesi gereken özel durumlar var ise bunlar içinde kullanılabilecek komutlar bulunmaktadır.

Data dosyasının hazırlanmasında iki ana yöntem mevcuttur : birincisi Modeller programı kullanılarak hazırlamak diğeri ise bir editör programı yardımıyla

yazmaktır. Modeller’da bütün özellikleri ile tanımlanan probleme ait data dosyası basit birkaç komut sayesinde programın kendisi tarafından otomatik olarak oluşturulur. Kullanıcı isterse data dosyasını herhangi bir editör yardımıyla verileri uygun formatta yazabilir. Üçüncü yöntem ise Modeller’da hazırlanmış bir data dosyasının herhangi bir editörde düzenlenmesidir. Bu çalışmada sonuncu yöntem sıkça kullanıldı. Yukarıda bahsedilen komutlardan bazılarının açıklamaları aşağıda verilmektedir. Ek-B.2’de bu çalışmada kullanılmış olan data dosyalarından bir tanesinin kısaltılmış örneğini bulunmaktadır.

- **PROBLEM TITLE** :Problemle ilgili açıklama yapılır. Data dosyasının ilk komutudur.
- **OPTION** :Kullanıcı tarafından analizin gidişatı ile ilgili opsiyonlar tanımlanmaktadır. Analizin gidişatını bozmadan istenildiği kadar “option” tanımlamak mümkündür.
- **ELEMENT TOPOLOGY** :Sonlu elemanlar ağını oluşturan elemanların düğüm noktalarının yerleri tanımlanır.
- **SOLUTION ORDER** :Çözümün nasıl yapılacağı tanımlanır. Doğru seçilmesi analizin süresini kısaltabilir.
- **SOLVER** :Bulunması gerekmez ama bazı özel durumlarda zamandan tasarruf edilebilir. Lineer denklem takımının çözülmesi için seçim yapmayı sağlar.
- **NODE COORDINATES** :“Element Topology” başlığı altında tanımlanan elemanlara ait düğüm noktalarının koordinatlarının tanımlanmasını sağlar.
- **GEOMETRIC PROP.** :Modelde kullanılan elemanlara ait geometrik özelliklerin tanımlanmasını sağlar.
- **MATERIAL PROP.** :Modelde kullanılan elemanlara ait malzeme özelliklerin tanımlanmasını sağlar.
- **FREEDOM TEMPLATE** :Serbestlik Şablonu, destek durumlarını belirtmeden önceki serbestliklerin durumunu veren kısımdır.
- **SUPPORT NODES** :Sınır koşullarını tanımlayan başlıktır. Hangi

düğüm noktasının hangi yönlerde sınırlandığı bu başlık altında tanımlanır.

- **LOAD CASE** :Modelde yer alan bütün yükler bu başlık altında tanımlanır. Bu yüklere örnek; SSR, CL, FDL, UDL olarak verilebilir.
- **CURVE DEFINITION** :Yüklemelerin kaç kademede yapılacağı ve hangi şiddette tanımlanacağı bu başlık altında tanımlanır.
- **NONLINEAR CONTROL** :Nonlinear analiz ile ilgili bilgiler bu başlık altında toplanmıştır. İterasyon sayısı, yakınsamanın hassaslığı, yük kademesinin sayısı gibi bilgiler yer alır.
- **END** :Modelle ilgili bilgilerin sonuna mutlaka konulmalıdır.



6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

6.1. Yatay Yüklü Kazıkların Modellenmesi

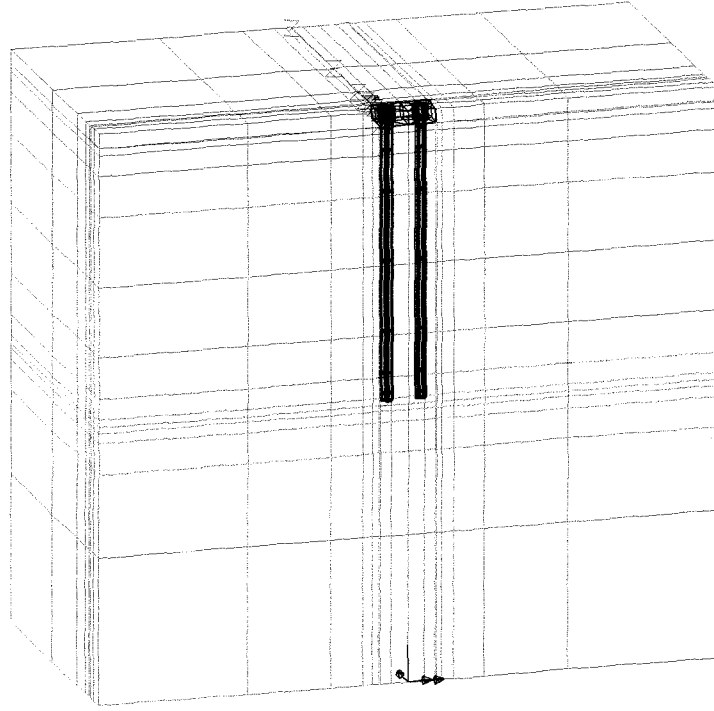
Modelleme sonlu elemanlar ağı, geometri, malzeme , sınır koşulları, yükleme çeşitlerini vs. özellikleri içeren bir uygulamadır. Bu özellikler uyumlu bir şekilde bir arada kullanılarak, problemin gerçek tanımı modellenmeye çalışıldı. Doğru sonuçlara ulaşılmasını etkilemeden, işlemleri kolaylaştırmak ve zamandan tasarruf sağlamak için bazı kabuller de yapıldı.

İki grup analiz yapıldı. Birinci grupta, Wakai ve diğ. (1999) tarafından yapılan yatay yüklü tek ve kazık grubu çalışması, Lusas sonlu elemanlar programı ile modellenerek analizi yapıldı. Bölüm 4.9.2. de anlatıldığı gibi; Wakai ve diğ. (1999) tek ve 3x3 grup kazıklarını hem model deneylerini hem de sonlu elemanlar programı ile analizlerini yaparak karşılaştırmalarını sunmuşlardır. Bu örnek ile Lusas sonlu elemanlar programının sonuçları karşılaştırıldı. İkinci grupta ise farklı çaplarda, çevre zeminlerinde ve uzunluktaki tek ve 2x2 kazık gruplarının analizi Lusas ile yapılarak değerlendirildi.

6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı

Analizler Şekil 6.1 de görüldüğü gibi üç boyutlu olarak çizildi. Gerilmelerin yoğun olduğu kazık çevresinde ağ sıklaştırıldı, sınırlara doğru ağ seyrekleştirilerek elemanların boyutları arttırıldı. Böylece optimum eleman sayısı ile, etkili çözüm yapıldı.

Simetriden yararlanılarak problemin yarısı için analizler yapıldı. Buradaki amaç hem işlemi kolaylaştırmak hem de zamandan tasarruf sağlamaktır. Simetri ekseninde uygun sınır koşulları tanımlanarak sistemin, modelin tamamı gibi davranması sağlandı.



Şekil 6.1 : 2x2 kazık grubu modelinin üç boyutlu sonlu elemanlar ağı

Kazıklar sekiz köşeli dörtgen olarak tanımlandı. Eğilme rijitlikleri ve alanları daireye çok yakın olduğundan hem sonuçları etkilemedi hem de eleman sayısını azalttığından analiz süresini düşürdü.

6.1.2. Kullanılan Elemanlar

Ağı oluşturan elemanlar üç farklı eleman grubundan seçilmiştir. Bunlar

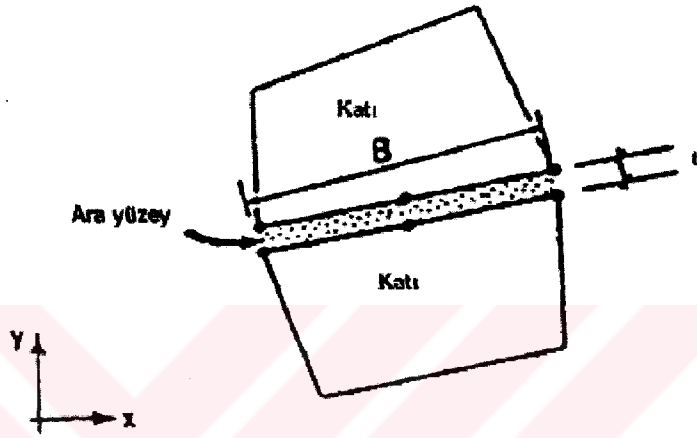
1. 3D katı sürekli ortam,
2. Kabuk,
3. Ara (joint),

eleman gruplarıdır.

3D katı sürekli ortam eleman grubunda HX8, HX16, HX20, PN6, PN12, PN15, TH4 ve TH10 elemanları vardır. Bu elemanların şekilleri Şekil 6.3.a da gösterildiği gibidir. Eleman adlarının önündeki HX, PN, TH sırasıyla Latincedeki 8 (hexa), 6 (penta) ve 4 (tetra) rakamlarına karşı gelir ve elemanların kaç yüzlü olduklarını tanımlar. Önlerindeki rakamlar ise her elemandaki düğüm nokta sayısını

gösterir. Eleman düğüm noktalarının numaralandırılmasına alt yüzden ve saat dönüş yönünün tersi istikamette başlanır. 3D katı sürekli ortam elemanlara ait pozitif gerilme yönleri Şekil 6.4 de gösterildiği gibidir.

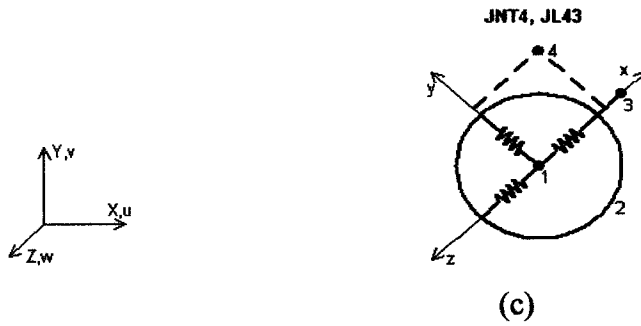
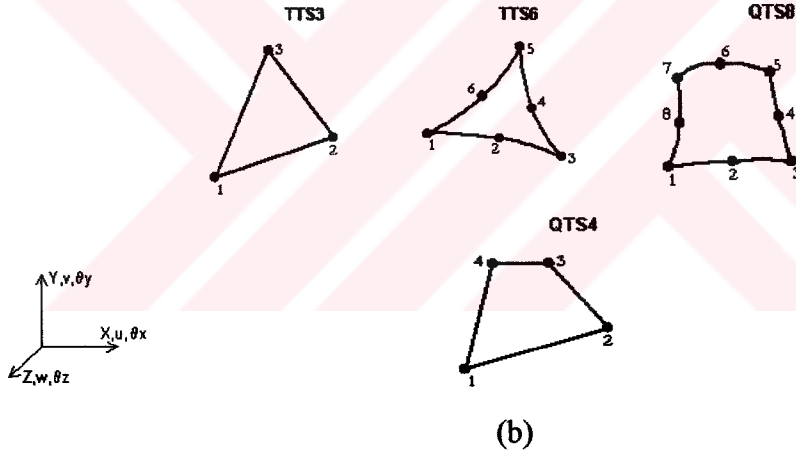
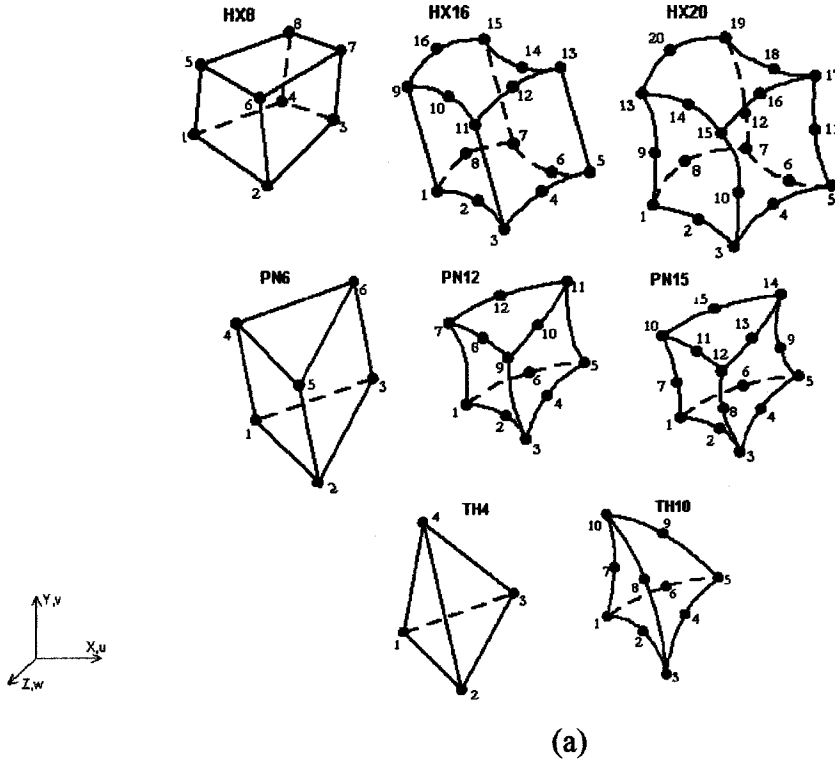
HX8 hem zemin hem de ara yüzey elemanı olarak kullanıldı. Ara yüzey elemanın plandaki iki boyutu arasındaki oran Şekil 6.2 de görüldüğü gibi $t/B=0.1$ seçildi. Ara yüzey elemanının davranışı, t/B oranının 0.01 ile 0.1 arasında bir değer almasıyla en iyi şekilde modellenenmektedir.



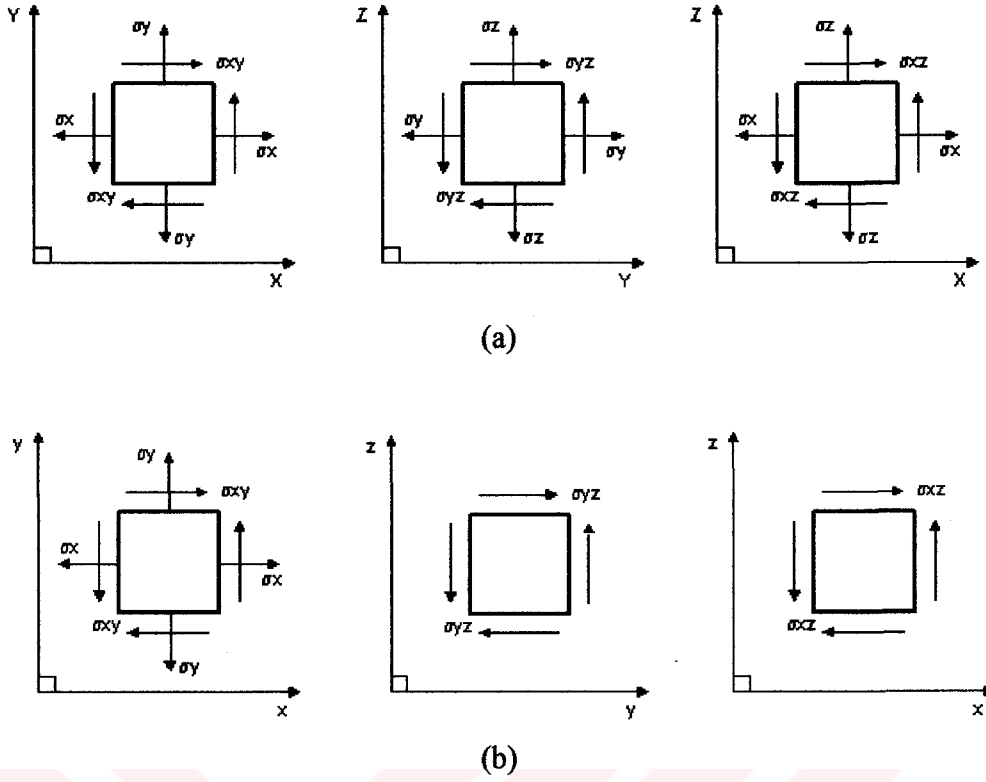
Şekil 6.2 : Ara yüzey elemanı [16]

Kabuk (shell) eleman grubunda TTS3, TTS6, QTS4 ve QTS8 elemanları vardır. Şekil 6.3.b de gösterilen kabuk elemanlarından TTS üç, QTS dört yüzlü 2 boyutlu elemanlardır. Şekil 6.4.b de kabuk elemanlara ait pozitif gerilme yönleri gösterilmektedir. Kabuk elemanları, Wakai ve diğ. (1999) tarafından yapılan çalışmadaki, malzeme özelliği alüminyum olan içi boş kazığın modellenmesinde kullanıldı.

Ara (joint) eleman olarak kullanılan JNT4, analizler sırasında zemin elemanlarının çekme gerilmesini almaması için kullanıldı. Şekil 6.4.c de eleman şekli gösterilmektedir. Bu elemanlar ile zemin-yapı etkileşiminde ayrılma veya açılma hareketleri ve nonlinear sınır şartı tanımları yapılabilmektedir. Ara elemanlar bir yay örneği gibi çalışmaktadır. Çekme ve basınç etkisinde akma gerilmeleri farklı verilebilmektedir. Bu elemanlar kullanılarak, yatay yük altında kazık arkasında oluşan çekme gerilmeleri minimuma düşürüldü.



Şekil 6.3 : Modelde kullanılan elemanlar, (a) 3D katı sürekli ortam elemanlar , (b) Kabuk elemanlar, (c) Ara (joint) elemanlar [17]



Şekil 6.4 : Pozitif gerilme yönleri (a) 3D katı sürekli ortam elemanlardaki durum, (b) Kabuk elemanlardaki durum [17]

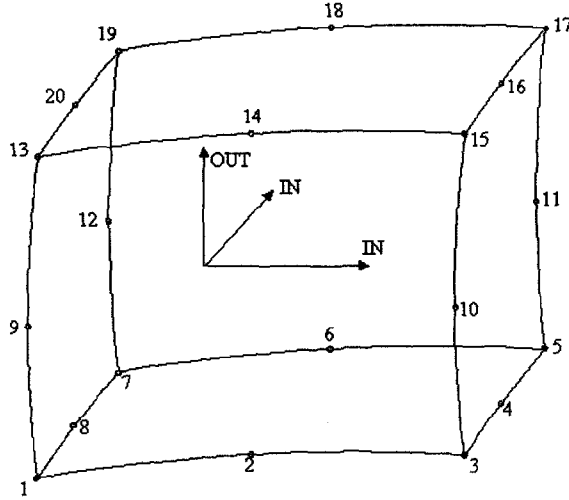
6.1.3. Malzeme Parametreleri

Kazıklar elastik kabul edilip üç parametreyle tanımlandı. Bunlar E elastisite modülü, ν poisson oranı ve γ birim hacim ağırlıktır. Zemin elasto-plastik kabul edildi ve yapısal modeli için Drucker-Prager akma kriteri kullanıldı. Zemin için kazıktan farklı olarak c kohezyon, ϕ içsel sürtünme açısı parametreleri de kullanıldı.

Kazık-zemin ara yüzeyindeki relatif hareketleri modelleyebilmek için ara yüzey (interface) malzeme özellikleri kullanıldı. Bu elemanı tanımlayabilmek için birçok parametre kullanıldı. Bunlar, E_{in} ara yüzeyin kayma doğrultusundaki, E_{out} ise kayma düzlemine dik (düzlem normali) doğrultusundaki başlangıç elastisite modülü, benzer şekilde G_{in} ve G_{out} kayma modülleri, ν_{in} ve ν_{out} ise poisson oranları, γ birim hacim ağırlık, c kohezyon, ϕ kum ile kazık arasındaki sürtünme açısı, σ ara yüzey elemanın çekme mukavemeti olarak tanımlanmaktadır. Kayma modülü G,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Şekil 6.5 de in ve out eksenleri gösterilmektedir.



Şekil 6.5 : Üç boyutlu ara yüzey elemanın in ve out eksenleri [17]

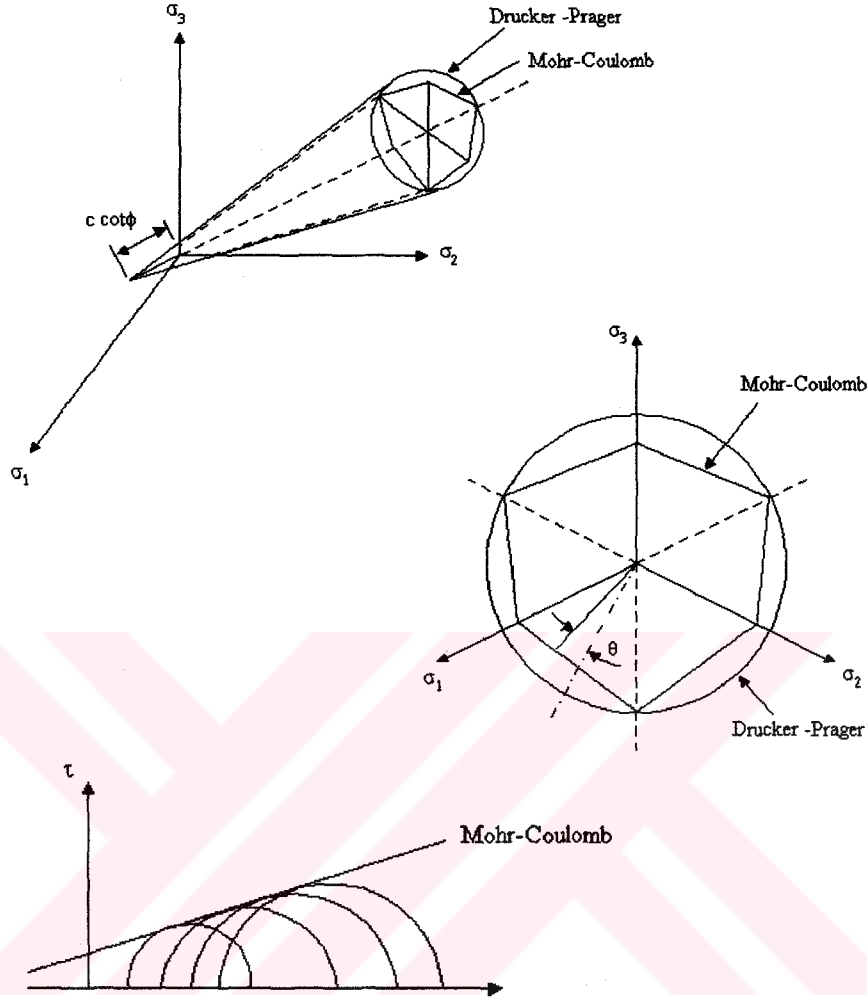
Yatay yük etkisinde, kazığın arka bölgesinde yoğun olarak çekme gerilmeleri oluşmaktadır. HX8 zemin elemanları çekme etkisiyle zeminle beraber hareket etmektedir. Zemin elemanları çekme almadığından, modelde kazık arkasına JNT4 ara (joint) elemanları yerleştirildi ve arkasından da HX8 zemin elemanları devam ettirildi. Bu elemanların malzeme özellikleri uygun seçilerek kazık arkasındaki bölgede çekme gerilmesi alınması minimuma düşürüldü. Malzeme parametreleri, k elastik yay katsayısı, y_{ldf} çekme ve basınç akma gerilmesidir.

6.1.4. Kullanılan Yapısal Modeller

Jeolojik ortamlar genellikle elasto-plastik malzeme davranışı göstermektedir. Bu yüzden sonlu elemanlar yöntemi ile modellerken zeminin davranışını nonlineer kabul etmek gerçeğe çok yakın çözümlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden tek ve grup kazıklı temellerin modellenmesinde zemin elasto-plastik kabul edildi. Kazık ise elastik olarak alındı.

Elasto-plastik davranış için Mohr-Coulomb veya Drucker-Prager yapısal modelleri mevcuttur. Bu çalışmada zemin Drucker-Prager akma kriterine göre modellenmiş, kazık ise lineer izotropik olarak kabul edildi. Drucker-Prager akma kriterine ait en önemli zemin parametreleri elastisite modülü E_s , poisson oranı ν ,

zeminin birim hacim ağırlığı γ , zeminin kohezyonu c , zeminin içsel sürtünme açısı ϕ 'dir.



Şekil 6.6 : Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager akma kriterleri [18]

Mohr-Coulomb akma kriteri Coulomb sürtünme yasasının genelleştirilmiştir ve aşağıdaki gibidir [15].

$$F(\sigma, K) = \tau - (c - \sigma_n \tan \phi) = 0 \quad (6.2)$$

τ = Kayma mukavemeti

σ_n = Normal gerilme

c = Kohezyon

ϕ = Kayma mukavemeti açısı

Mohr-Coulomb akma fonksiyonu gerilme invaryantları cinsinden şöyle yazılabilir (Şekil 6.6).

$$F(\sigma, K) = \sigma_n \sin \phi + (J_2)^{1/2} \left[\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right] - c \cos \phi \quad (6.3)$$

Burada hem c hem de ϕ deformasyon pekleşme parametresi K 'ya bağlıdır. Drucker-Prager akma fonksiyonu (6.4) de tanımlandığı gibi hidrostatik gerilmelerin etkisini kapsamaktadır (Şekil 6.6).

$$f(\sigma, K) = \frac{6\sigma_n \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} + (J_2)^{1/2} - \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (6.4)$$

6.2. Wakai ve Diğ. (1999) Tarafından Yapılan Çalışmanın Lusas ile Analizi

Ayrıntıları Bölüm 4.9.2. de verilen bu çalışmanın Lusas analizlerinde kullanılan kısmı karşılaştırma için tekrarlanacaktır. Her iki çalışmanın ortak yönlerinin çok fazla olması yanında farklı kısımları da vardır. Ortak ve farklı hususları dikkate alarak sonuçların değerlendirilmesi daha sağlıklı yorumların yapılmasını sağlayacaktır.

Wakai ve diğ. (1999) tarafından yatay yüklü serbest ve tutulu başlı tek ve 3x3'lük kazık gruplarının model deneyleri yapılmıştır. Üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemiyle de bu modellerin davranışlarının analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Lusas sonlu elemanlar programı ile tutulu başlı tek ve 3x3'lük kazık gruplarının analizi yapıldı.

Deneyde ve Lusas analizlerinde kullanılan kazığın boyutları, malzeme özellikleri ve kazık aralıkları aynıdır. Her iki çalışmada da zemin kumdur. Fakat lusas analizlerinde ψ ve K_0 değerleri Drucker-Prager yapısal modelinin zemin parametreleri arasında bulunmadığından kullanılmadı. Ayrıca Wakai ve diğ. (1999) tarafından sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizde kumun elastisite modülü derinlikle değişen bir denkleme göre tanımlanmıştır. Lusas analizlerinde ise derinlik boyunca zemin dört parçaya ayrılarak, denklem yardımıyla derinlikle artan dört farklı elastisite modülü Tablo 6.1 de gösterildiği gibi kullanıldı. Lusas ile yapılan analizlerde, program kohezyonun sıfır ve yakın değerlerini kabul etmediğinden 2 değeri verilerek çözümler yapıldı. z , derinliği ifade etmektedir.

Tablo 6.1 : Lusas analizlerinde kullanılan zemin, kazık ve başlık malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Elastisite Modülü (KN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (KN/m ²)	İçsel sürtünme açısı (°)
Kazık	6.86E07	26.4	0.345	-	-
Başlık	1E08	26.4	0.345	-	-
Kum (z=0-95 mm)	513	15.3	0.4	42	2
Kum (z=95-675 mm)	2876	15.3	0.4	42	2
Kum (z=675-1450 mm)	6030	15.3	0.4	42	2
Kum (z=1450-2450 mm)	10530	15.3	0.4	42	2

Her iki analizde de kazık-zemin etkileşimini modelleyebilmek için kazık ile kumun arasına ince sürtünme elemanları bulunmaktadır. Bu elemanlar sayesinde birbirlerine göre relatif hareketler veya ara yüzeydeki kayma hareketi sağlanmaktadır. Lusas analizlerinde kullanılan ara yüzey elemanların malzeme özellikleri Tablo 6.2 de gösterilmektedir.

Tablo 6.2 : Lusas analizlerinde kullanılan ara yüzey (interface) elemanlarının malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	E _{in} , E _{out} (KN/m ²)	G _{in} , G _{out} (KN/m ²)	v _{in} , v _{out}	γ (KN/m ³)	c (KN/m ²)	φ (°)	σ (KN/m ²)
Kum (z=0-95 mm)	513	183	0.4	15.3	2	25	0.1
Kum (z=95-675 mm)	2876	1027	0.4	15.3	2	25	0.1
Kum (z=675-1450 mm)	6030	2154	0.4	15.3	2	25	0.1
Kum (z=1450-2450mm)	10530	3761	0.4	15.3	2	25	0.1

Wakai ve diğ. (1999) analizlerinde çekme gerilmesiz analiz yapmışlardır. Lusas sonlu elemanlar programında böyle bir analiz yöntemi olmadığından onun yerine kazık arkasına ara (joint) elemanları yerleştirildi. Bu elemanların özellikleri Tablo 6.3 de gösterildiği gibi tanımlanırken çekme gerilmesi almaması sağlandı. Bu sayede modelin tamamında olmasa da, çekme gerilmesinin en fazla olduğu ve sonucu etkileyecek olan kazık arkalarında çekme gerilmeleri çok küçük değerlere

düşürüldü. z zemin yüzeyinden olan derinliktir. Parametrelerin tanımı Bölüm 6.1.3. de yapıldı.

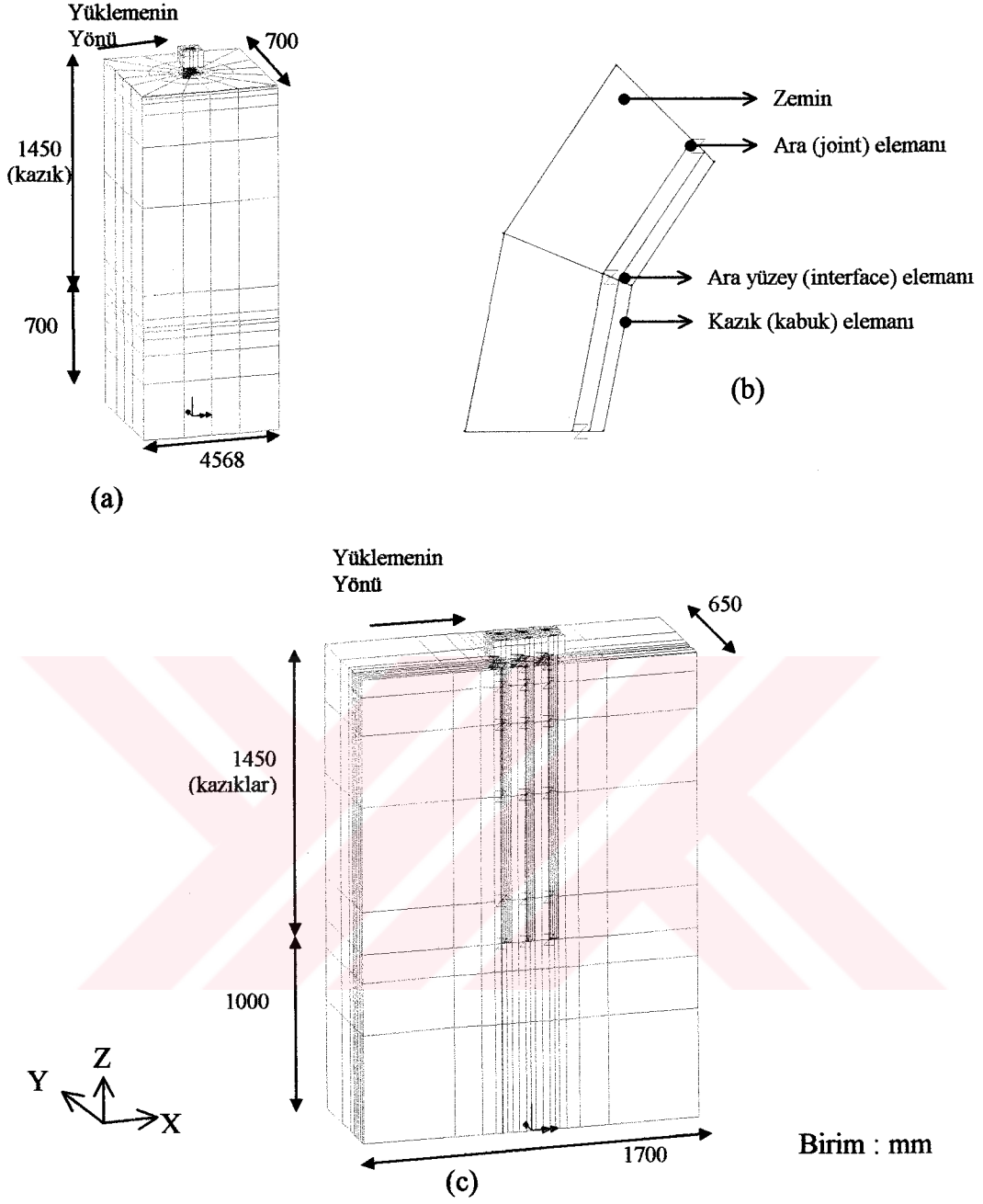
Tablo 6.3 : Lusas analizlerinde kullanılan ara (joint) elemanlarının malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	K (KN/m ²)	y _{ldf} (çekme) (KN/m ²)	y _{ldf} (Basınç) (KN/m ²)
Kum (z=0-95 mm)	513	1E-20	513
Kum (z=95-675 mm)	2876	1E-20	2876
Kum (z=675-1450 mm)	6030	1E-20	6030
Kum (z=1450-2450mm)	10530	1E-20	10530

Lusas sonlu elemanlar ağıının x,y ve z eksenlerindeki sınırları, tek ve grup kazıklarında Wakai ve diğ. (1999) sınırlarından daha geniş tutuldu. Özellikle tekli durumda kazık altında bitirilen ağ, Lusas ile yapılan analizde kazık yarı boyu kadar uzatıldı. Yatay yük uygulandığında, kazık altında gerilmeler oluşacaktır. Oysa sonuçların sınırlardan etkilenmemesi için, sonlu elemanlar ağıının sınırlarındaki gerilme ve deplasmanları çok küçük veya hiç olmaması gerekmektedir.

Wakai ve diğ. (1999) tarafından kazık doğrusal elastik kabul edilmiştir. Kumda, göçme kriteri için Mohr-Coulomb, plastik potansiyeli için ise Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır.Lusas analizlerinde de kazık doğrusal elastik kabul edildi. Programda kum için iki farklı yapısal model kullanılamadığından, sadece Drucker-Prager akma kriteri kullanıldı.

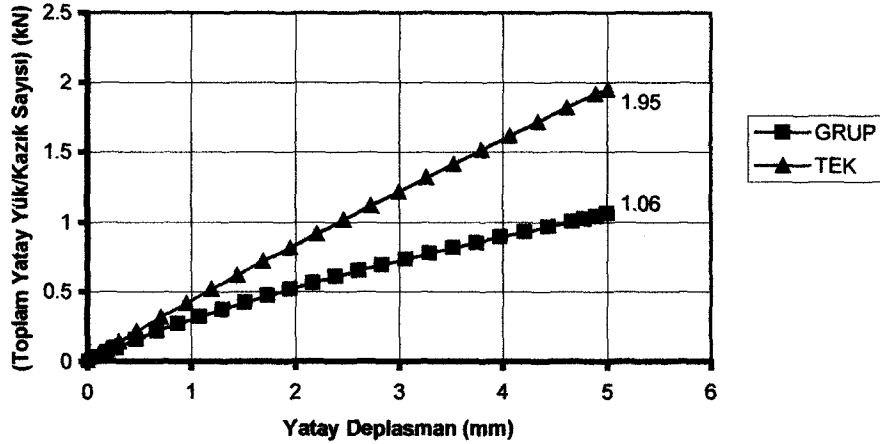
Her iki analizde de zaman tasarrufu için hesaplar kontrol altına alınarak, kazık başlığı yatay deplasmanının 5 mm (0.1D) değerine ulaşmasıyla tamamlanmaktadır. Zamandan ve işlem fazlalığından tasarruf için kazık grubunda modelin yarısı için analiz yapıldı. Modelin tamamının davranışının yansıtılması için simetri eksenini olan x’de sınır şartları şöyledir : x,z ötelenmeye karşı serbest dönmeye karşı tutulu, y ise ötelenmeye karşı tutulu dönmeye karşı serbest olarak tanımlandı. Eksenler ve sonlu elemanlar ağı Şekil 6.7 de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.7 : Lusas ile yapılan sonlu eleman ağları, (a) Tek kazık, (b) Kullanılan elemanların detayı, (c) 3x3'lük kazık grubu

Şekil 6.8 de Lusas ile yapılan analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Analizler, Wakai ve diğ. (1999) tarafından yapılan analizlerde olduğu gibi 5 mm kazık başlığı yatay deplasmanında kesildi. Eğrilerde grup etkinlik faktörünün değerlendirilmesi için grubun yatay yükü kazık sayısına bölünerek eğride sunuldu.

Yatay Yüklü Tekil Kazık ve 3x3'lük Kazık Grubu, L=1450 mm, S=2.5D



Şekil 6.8 : Lusas tarafından yapılan Tek ve 3x3'lük grup kazık analizinden elde edilen toplam yatay yük/kazık sayısı- yatay deplasman eğrileri

6.3. Lusas ile Yapılan Yatay Yüklü Tek ve Grup Kazık Analizleri

Tek ve grup kazıklar ile ilgili birçok parametre değiştirilerek analizler yapıldı. Analizler tutulu başlı kazıklar için yapıldı. Orta sıkı kum, yumuşak kil ve yarı katı kil zeminler kullanılarak tabakalı zemin durumunda, kazık başlığı boyunca zeminin hem özelliği değiştirilerek hem de kaldırılarak yatay yük taşıma kapasitesine olan etkisi araştırıldı. Kazık çapları 600, 800 ve 1000 mm seçilerek kazığın derinlikle olan değişimi ve yatay yük kapasitesine etkisi irdelendi. Kazığın boyu 15 ve 20 m. seçilerek, yarı katı kile soketlenme miktarının farklı çevre zeminindeki etkisi incelendi. Tek ve grup kazık analizleri kullanarak grup etkinlik faktörleri değerlendirildi.

Tekli kazıkla yapılan analizlerde ortak nokta kazığın malzeme özelliği olurken, gruptaki analizlerde ise buna ilave olarak kazıklar arası mesafenin 3D olması ve her grupta dört kazık bulunmasıdır. Tablo 6.4 de yapılan analizleri gösterilmektedir. Tabloda, D, kazık çapını, L kazık boyunu tarif etmektedir.

Tablo 6.4 : Lusas ile yapılan analizler

2x2'lik KAZIK GRUBU (S=3D)			
Başlık çevresindeki durum	D (mm)		
	600	800	1000
ORTA SIKI KUM	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m
YUMUŞAK KİL	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m
ZEMİN YOK	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m
TEK KAZIK			
Başlık çevresindeki durum	D (mm)		
	600	800	1000
ORTA SIKI KUM	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m
YUMUŞAK KİL	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m
ZEMİN YOK	L=15-20 m	L=15-20 m	L=15-20 m

Yatay yüklü kazıkların analizinde kazıkların yapısal göçmesi, grubun aşırı yer değiştirmesi ve kazıklar etrafındaki zeminde nihai taşıma gücüne ulaşma nedeni ile göçme olmaktadır. Lusas sonlu elemanlar programında çok büyük deplasman değerlerine kadar analizler devam ettirilmesine rağmen yatay yük-yatay deplasman eğrisinden kazığın göçmesi gözlenemedi. Bu yüzden deplasman şartı gözetilerek nihai taşıma gücüne ulaşıldı. Kazık başlığının 6.25 mm (0.25 in.) yatay deplasmanındaki yatay yükü, nihai taşıma gücü olarak kabul edildi. Bu değer, Tablo 6.5 deki farklı referansların farklı kazık malzemesine göre tespit ettikleri yatay deplasman değerlerinden seçildi. Analizlerde Şekil 6.10.b de gösterilen kazık başlığının ortasındaki A noktası için yatay yük-yatay deplasman eğrileri çizildi.

Analizlerde kazık çevresinde iki veya üç zemin türü kullanıldı. Bu zeminler orta sıkı kum, yumuşak kil ve yarı katı kildir. Kazık-zemin ara yüzeyindeki kaymanın gerçekleşmesi için zeminlere uygun olarak üç farklı ara yüzey (interface) malzemesi de kullanıldı. Kazıkların arkasındaki bölgede çekme gerilmesi oluşmaması için yine yanındaki zemine uygun olarak üç farklı ara (joint) malzemesi kullanıldı. Kazık ve kazık başlığı malzemesi betondur. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Spundwand Handbuch-Teil 1 de belirtilen değerlerden seçildi. Zeminler için nihai zemin mukavemeti parametreleri kullanıldı. Tablo 6.6 ve 6.7 ve

6.8 de malzeme özellikleri gösterilmektedir. Parametrelerin tanımı Bölüm 6.1.3. de yapılmaktadır.

Tablo 6.5 : Nihai taşıma gücündeki yatay deplasman değerleri [19]

Kazık Cinsi	Müsaade edilebilir yatay deplasman, mm. (in.)	Referanslar
Ahşap, Beton, Çelik	9.38 (0.375)	New York Şehri Yapı Kodu, 1968
Ahşap, Beton, Çelik	6.25 (0.25)	Teng
Ahşap, Beton	6.25 (0.25)	Feagin
Ahşap (Serbest) Ahşap (Tutulu) Beton	6.25 (0.25)	McNulty

Tablo 6.6 : Analizlerinde kullanılan zemin, kazık ve başlık malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Elastisite Modülü (KN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (KN/m ²)	İçsel sürtünme açısı (°)
Kazık ve Başlık	2.1E7	24	0.15	-	-
Orta sıkı kum, yuvarlak	75 000	19	0.3	1	32.5
Yumuşak kil	1 750	17	0.4	10	17.5
Yarı katı kil	7 500	19	0.3	25	25

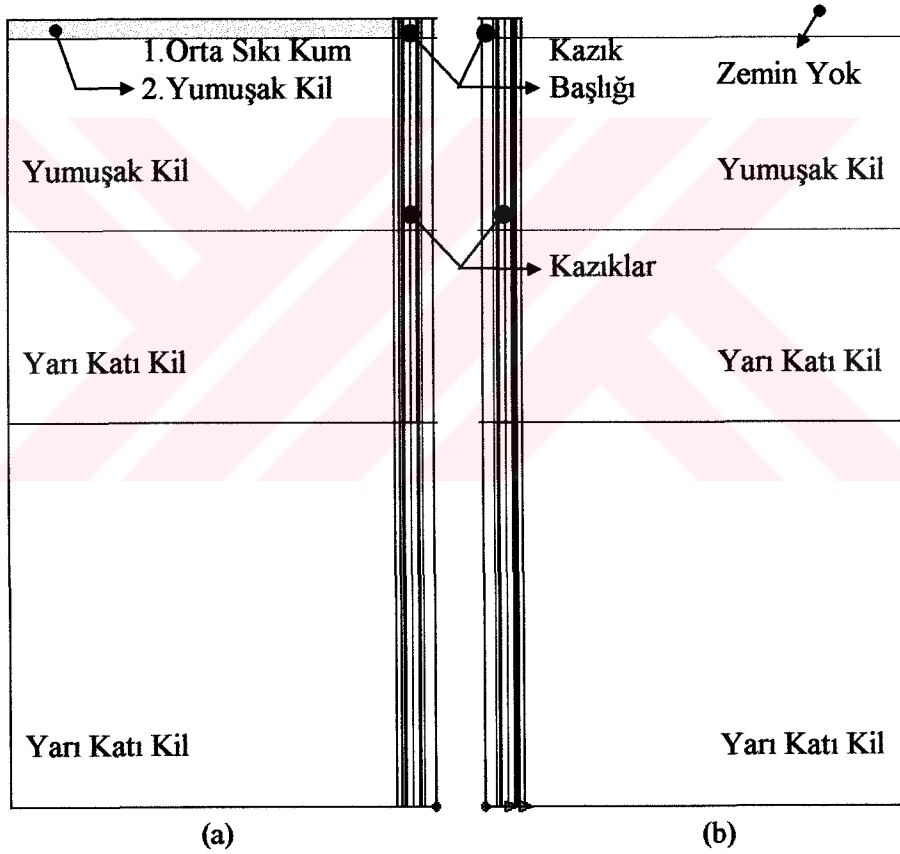
Tablo 6.7 : Analizlerinde kullanılan ara yüzey (interface) malzeme özellikleri

Zemin Cinsi	E _{in} , E _{out} (KN/m ²)	G _{in} , G _{out} (KN/m ²)	v _{in} , v _{out}	γ (KN/m ³)	C (KN/m ²)	φ (°)	σ (KN/m ²)
Orta sıkı kum, yuvarlak	75 000	28 846	0.3	24	1	32.5	0.1
Yumuşak kil	1 750	625	0.4	19	10	17.5	0.1
Yarı katı kil	7 500	2 885	0.3	17	25	25	0.1

Tablo 6.8 : Analizlerinde kullanılan ara (joint) elemanlarının malzeme özellikleri

Zemin Cinsi	K (KN/m ²)	y _{ldf} (çekme) (KN/m ²)	y _{ldf} (Basınç) (KN/m ²)
Orta sıkı kum, yuvarlak	75 000	1E-20	75 000
Yumuşak kil	1 750	1E-20	1 750
Yarı katı kil	7 500	1E-20	7 500

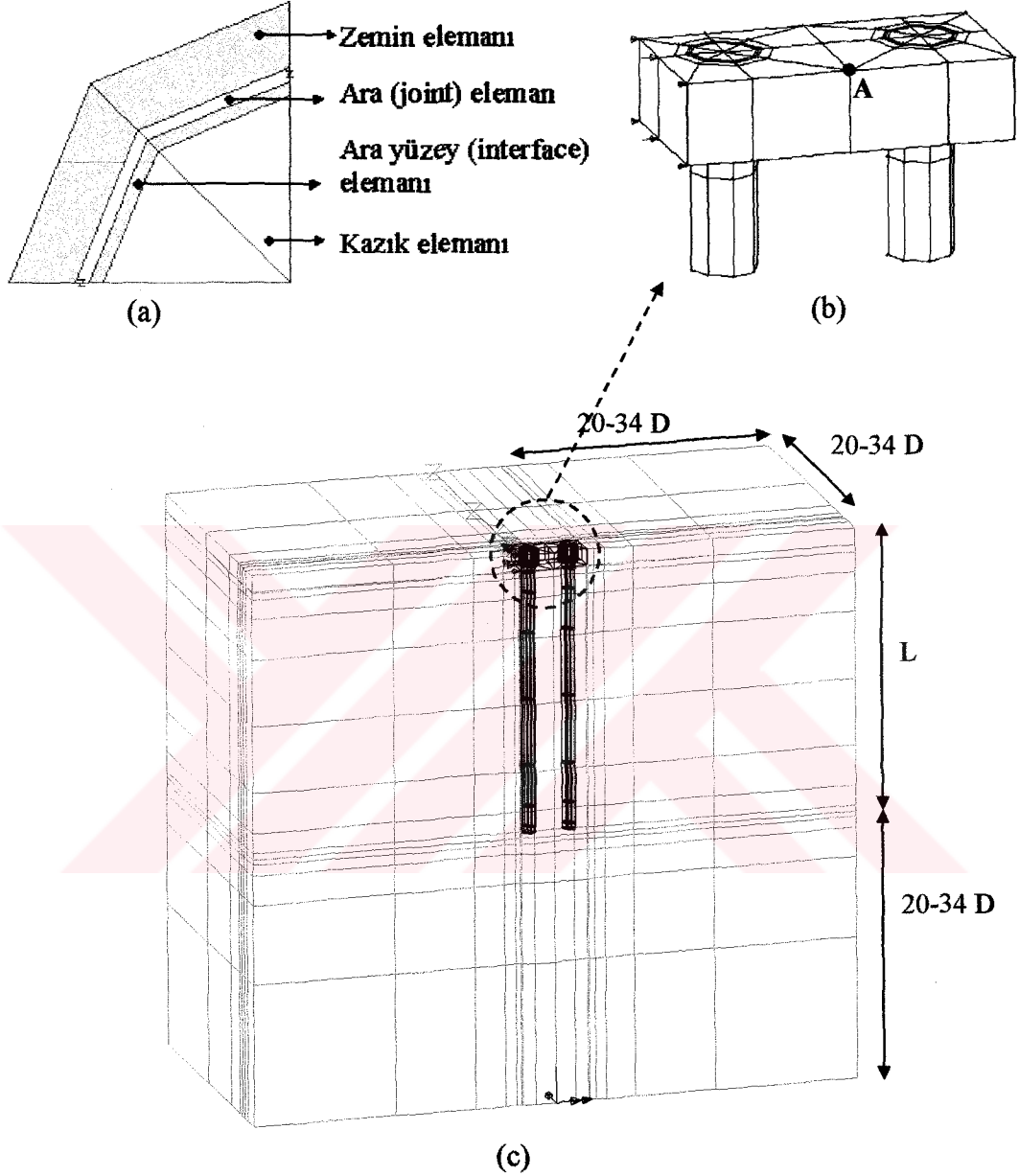
Analizlerde kullanılan zemin cinsleri Şekil 6.9.a,b de gösterilmektedir. Kazıklar yarı katı kile soketlenmektedir. Yarı katı kilin üzerinde yumuşak kil bulunmaktadır. Analizlerde farklı olan kısım kazık başlığı çevresidir. Analizlerde bu kısımda ya Şekil 6.9.a daki gibi orta sıkı kum veya yumuşak kil kullanıldı ya da Şekil 6.9.b deki gibi kazık başlığının çevresi boş bırakıldı.



Şekil 6.9 : Analizlerde kullanılan zemin profili, (a) Kazık başlığı çevresinde orta sıkı kum veya yumuşak kil olması, (b) kazık başlığı çevresinin boş olması.

Kullanılan elemanların plandaki görünüşü Şekil 6.10.a daki gibidir. Analizlerde Şekil 6.10.b deki gibi kazık başlığının yan yüzeyinden üniform.bir yükleme yapılmıştır. Sonuçlardaki yatay deplasman Şekil 6.10.b de görülen A noktasına aittir. Bu nokta kazık başlığının yatay deplasmanını ifade etmektedir.

Şekil 6.10.c de sonlu elemanlar ağının sınırları görülmektedir. D, kazık çapıdır. Kazık çapının değerine göre değişmektedir. Ağ sınırları, yatay yük altında oluşan gerilme ve deplasmanlardan etkilenmeyecek uzaklıklarda seçildi.



Şekil 6.10 : Üç boyutlu sonlu elemanlar ağı, (a) Elemanların plandaki görünümü, (b) Kazık başlığının yan yüzeyinden yapılan üniform yükleme, (c) 2x2 kazık grubunun sonlu elemanlar ağı

Kullanılan eleman ve düğüm noktası sayısı analizlerde farklılık göstermektedir. Eleman ve düğüm nokta sayısı, kazık grubunda başlık çevresinde zemin olmadığında 2856-10830, zemin bulunduğu 3238-12030, tek kazıkta başlık çevresinde zemin olmadığında 1572-6052, zemin bulunduğu 1808-6932

olarak kullanıldı. Analizler, pentium III 500 Mhz işlemci ve 256 Mbyte ram belleği olan bir bilgisayarla yapıldı. Eleman ve yük kademelerinin sayısına bağımlı olan analiz süreleri 30-55 dakika arasında değişmektedir.

Modellemenin ardından analizler iki adımda tamamlanmaktadır. Zemin ilk önce jeolojik yüklerin elde edilmesi için kendi ağırlığı ile yüklenmekte daha sonra elde edilen gerilmeler ağı oluşturan elemanlara atanmaktadır. Bu atamalar yapılırken zemin deformasyonları sıfırlanmakta yalnız zemin gerilmeleri atanmaktadır. Bu durum SSRE (residüel gerilme) komutu kullanılarak yapıldı. Zemin gerilmeleri atandıktan sonra kazık yatay olarak yüklendi ve analizler sona erdirildi.

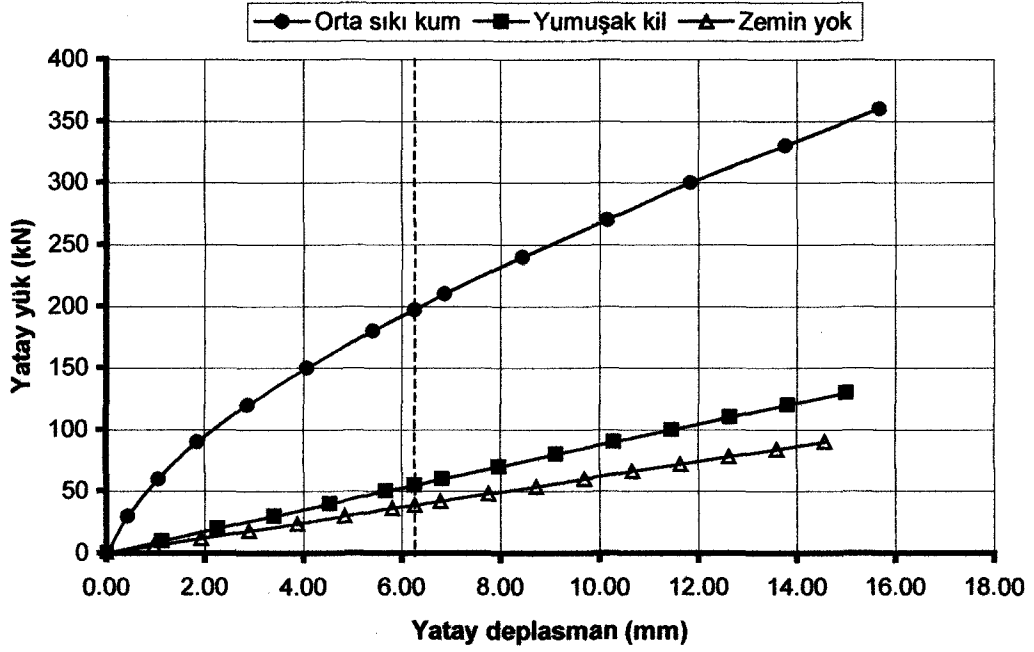
Analizler farklı zeminlerde, kazık çaplarında ve kazık boylarında yapıldı. Bu Bu üç farklı analiz grubunda elde edilen sonuçlar yatay yük-yatay deplasman, yatay deplasman-derinlik ve toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay deplasman eğrilerinde değerlendirildi. Yatay yük-yatay deplasman ve yatay yük/kazık sayısı-yatay deplasman eğrileri 14-15 mm. kesildi ve kesikli düşey çizgi ile 6.25 mm. başlık yatay deplasmanı belirtildi. Yatay deplasman-derinlik eğrileri kazık başlığındaki A noktasının 6.25 mm. deplasman yaptığı durumda çizildi.

6.3.1. Başlık Çevresindeki Ortamın Değişimi

Tek ve grup kazıklarında başlık çevresindeki ortamın yatay yüke olan etkisi incelendi. Başlık çevresinde üç farklı durum göz önüne alındı. Bunlar orta sıkı kum, yumuşak kil ve zemin olmaması durumlarıdır. Analizlerde kullanılan kazık boyları 15 ve 20 m., kazık çapları 600, 800 ve 1000 mm. olarak seçildi.

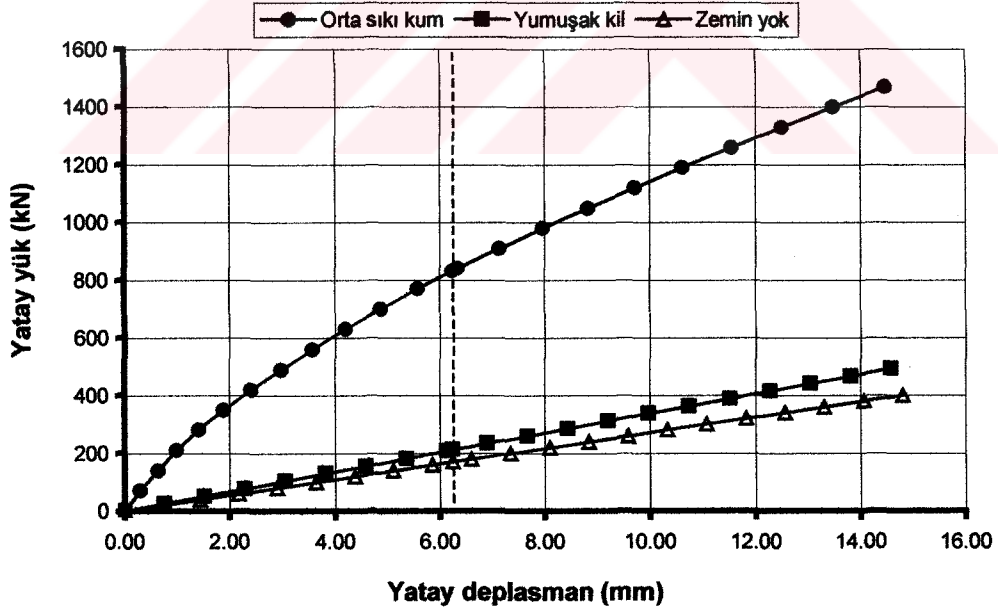
Şekil 6.11 de tek kazıklı modelde, kazık başlığının çevresindeki ortam değiştiğinde elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri verilmektedir. Kesikli düşey çizgi 6.25 mm deplasmana karşılık gelen göçme yüklerinin belirlenmesi için çizildi. Şekil 6.12 de kazık grubunda, kazık başlığının çevresindeki ortam değiştiğinde elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri verilmektedir. Tek ve grup kazıkta çevre zemininin değişimi benzer etkiler göstermektedir. Sıkı kumda çok açık bir şekilde yatay yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Yumuşak kil ile zemin bulunmaması durumunda çok fark olmadığı görülmektedir.

Tek Kazık, L=15 m., D=600 mm.



Şekil 6.11 : Tek kazıklı durumda çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri

2x2 Kazık Grubu, L=20 m., D=1000 mm.

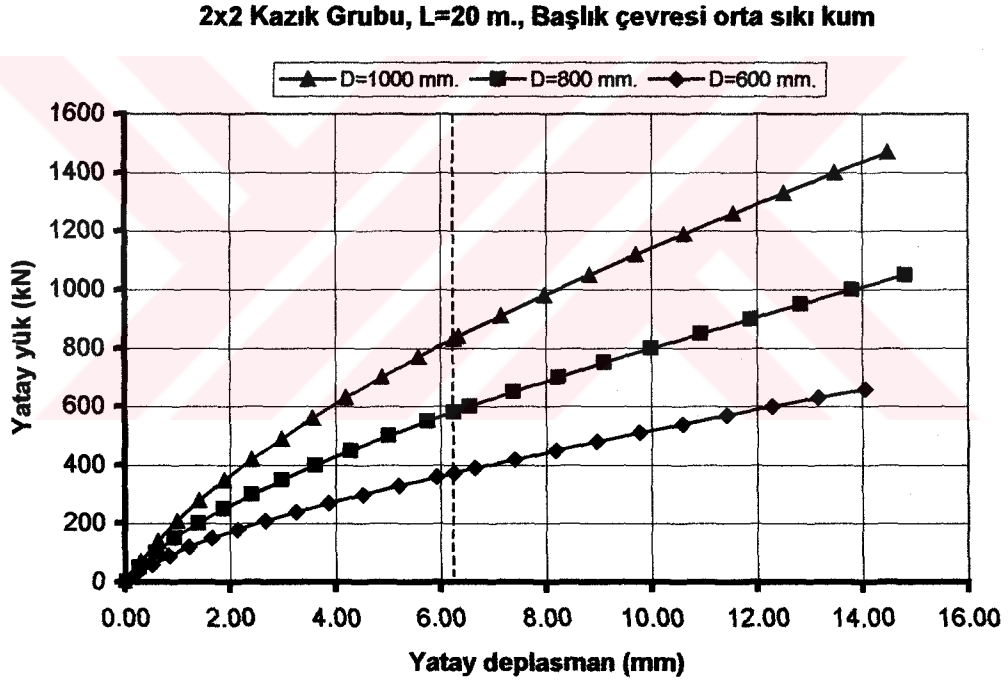


Şekil 6.12 : 2x2'lik kazık grubunda çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri

6.3.2. Kazık Çapının Değişimi

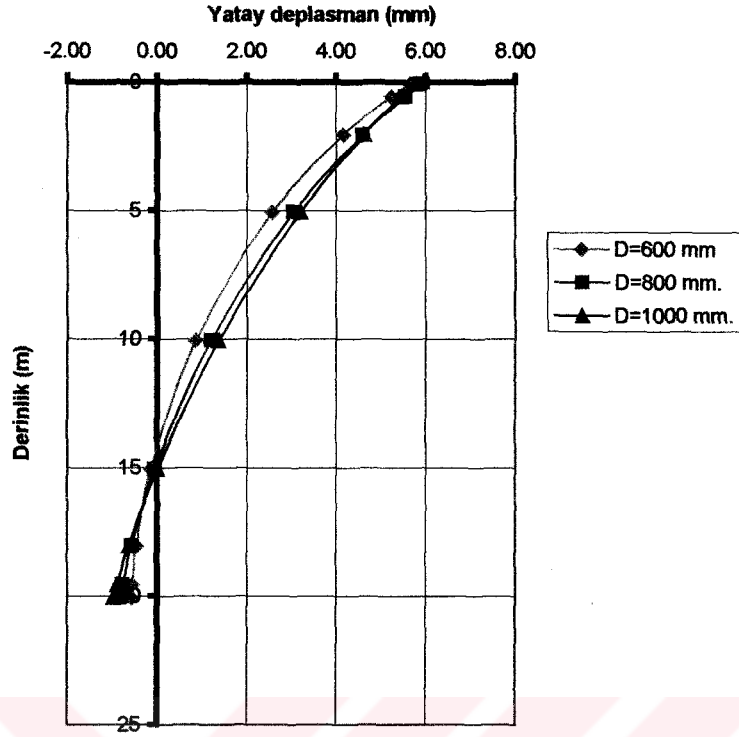
Tek ve grup kazıklarında kazık çapının değişiminin yatay yüke olan etkisi incelendi. Değerlendirme yatay yük-yatay deplasman ve yatay deplasman-derinlik eğrileri ile yapıldı. Karşılaştırmada 600, 800 ve 1000 mm. olarak seçilen kazık çapları kullanıldı. Farklı kazık boyları ve başlık çevresi ortamlarında da kazık çapı etkisi incelendi. Analizler arasında karşılaştırılma yapılabilmesi için, kazık çapı arttıkça zaman başlık yüksekliği de artırılarak oranları sabit tutuldu.

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 de kazık çaplarının değişiminin etkileri, hem yatay yük-yatay deplasman eğrilerinde hem de yatay deplasman-derinlik eğrileri ile gösterilmektedir. Kazığın çapı arttıkça yatay yük taşıma kapasitesi artarken, derinlik boyunca olan dönme hareketiyle daha rijit bir davranış özelliği göstermektedir.



Şekil 6.13 : 20 m. kazık boyu ve başlık çevresi orta sıkı kum olan 2x2 kazık grubunda farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri

Tek Kazık, L=20 m., Başlık çevresi orta sıkı kum



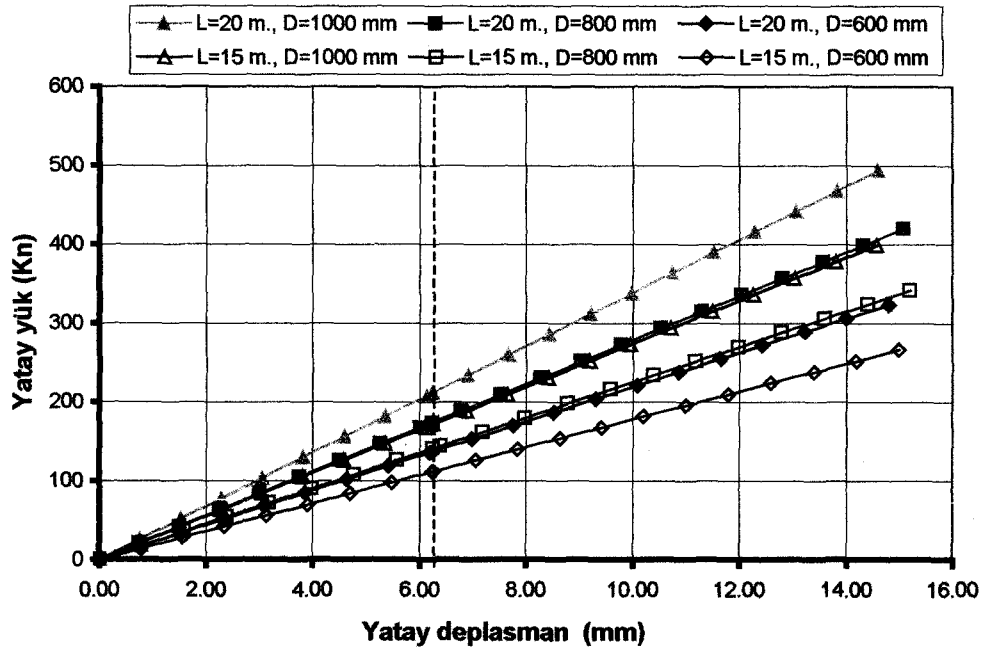
Şekil 6.14 : 20 m. kazık uzunluğu ve başlık çevresi orta sıkı kum olan tek kazıkta farklı kazık çaplarında yatay deplasman-derinlik eğrileri

6.3.3. Kazık Boyunun Değişimi

Tek ve grup kazıklarda kazık boyunun değişiminin yatay yüke olan etkisi incelendi. 15 m. ve 20 m. olan iki farklı kazık boyu için değerlendirme yapıldı. Kazıklar yarı katı kile sırasıyla 5 m. ve 10 m. soketlenmektedir. Farklı kazık çapları ve başlık çevresi ortamlarında da kazık boyu etkisi incelendi.

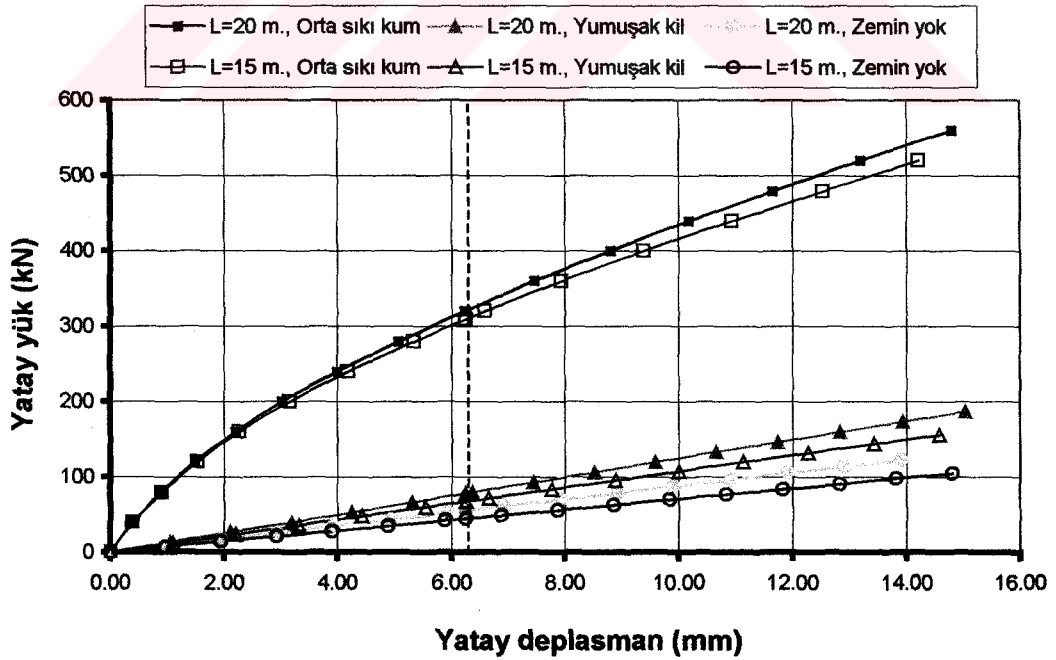
Şekil 6.15 ve 6.16 da 15 m. ve 20 m. olan iki farklı kazık boyu için yatay yük-yatay deplasman eğrileri verilmektedir. Yarı katı kile soketlenme miktarı arttıkça yatay yük taşıma kapasitesi artışı gözlenmektedir.

2x2 Kazık Grubu, Başlık çevresi yumuşak kil



Şekil 6.15 : Başlık çevresi yumuşak kilde bulunan 2x2 kazık grubunun 20 ve 15 m. kazık boylarındaki yatay yük-yatay deplasman eğrileri

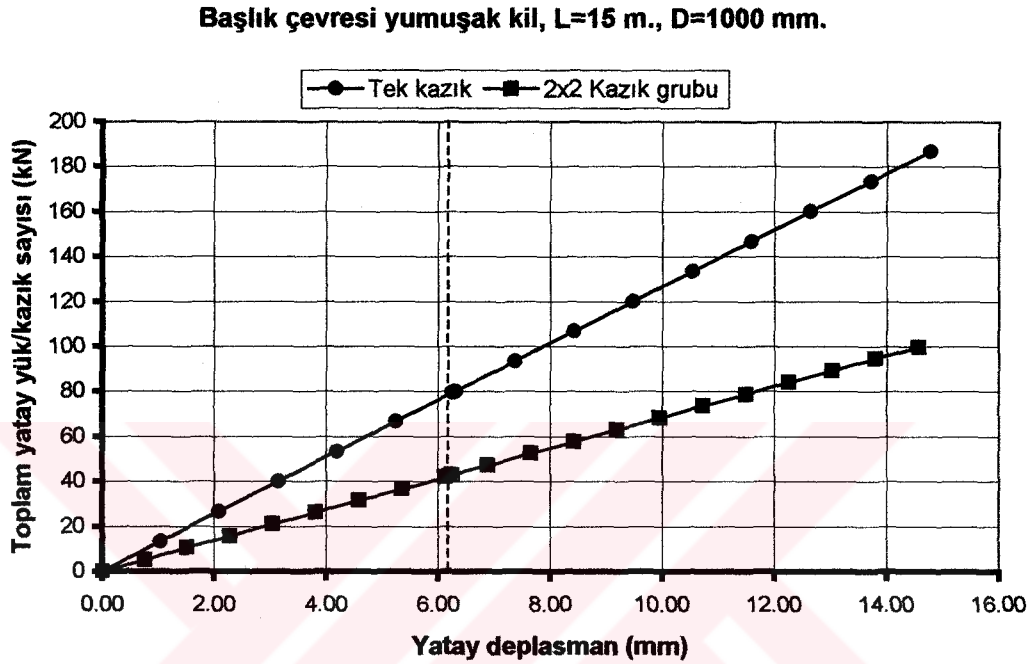
Tek Kazık, D=800 mm.



Şekil 6.16 : 800 mm. çapındaki tek kazıkların 20 ve 15 m. kazık boylarındaki yatay yük-yatay deplasman eğrileri

6.3.4. Tek ve Grup Kazık Davranışı

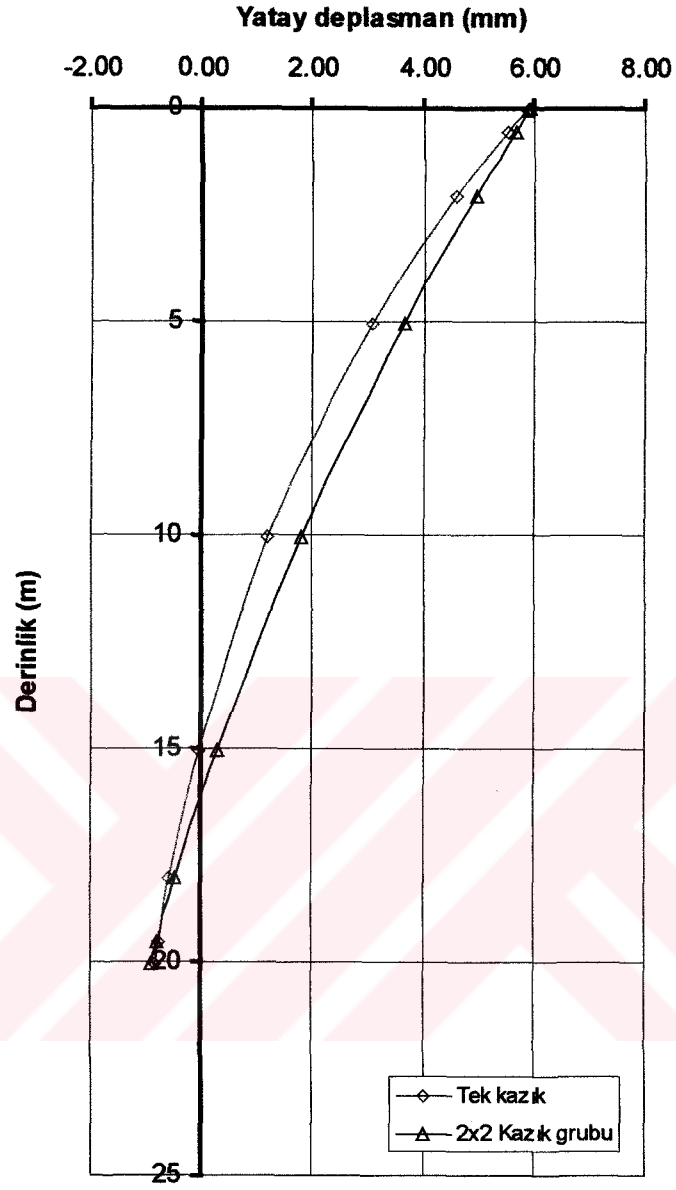
Şekil 6.17 de tek ve 2x2 kazık grubu için toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay deplasman eğrileri gösterilmektedir. Bu eğriler başlık çevre zemini, kazık çapı ve kazık boyu değiştirilerek çizildi. Bu sonuçlar yardımıyla grup etkinlik faktörleri incelendi.



Şekil 6.17 : Tek ve 2x2 kazık grubunda Toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay deplasman eğrisi

Şekil 6.18 de 800 mm. çapında, 20 m. boyundaki kazığın tek ve 2x2 kazık grubundaki yatay deplasman-derinlik eğrileri gösterilmektedir. Farklı kazık çapları, boyları ve başlık çevre zemini için tek-grup farkı incelendi. Kazık grubu analizlerinde, ön ve arka kazıkların derinlik boyunca yatay deplasmanları birbirine çok yakın çıktığından, ortalamaları alınarak grubun yatay deplasman-derinlik eğrileri elde edildi. Bu eğrilerden başlık seviyesinde aynı deplasmanı yapan tek ve grup kazıklarından, kazık grubunun derinlik boyunca daha fazla deplasman yaptığı görülmektedir.

Başlık çevresi sıkı kum, L=20 m, D=800 mm.



Şekil 6.18 : Tek ve 2x2'lik kazık grubundaki yatay deplasman-derinlik eğrileri

7. SONUÇLAR

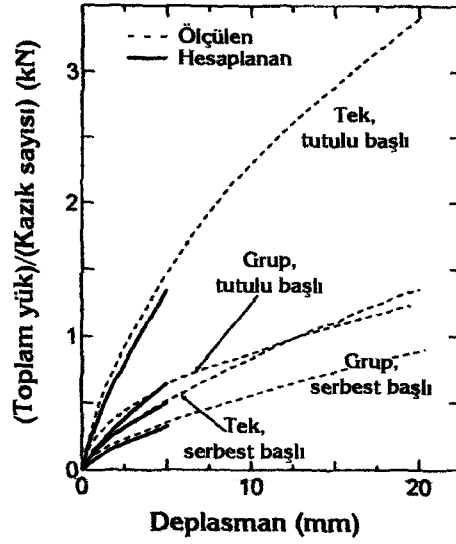
Bu çalışmada yatay yüklü tek ve grup kazıklar, bu tür kazıkların davranışı, analiz yöntemleri, bu yöntemlerin dayandığı teoriler üzerinde durulmuştur. Model deneyleri ve bir sonlu elemanlar programıyla yapılan bir çalışma Lusas sonlu elemanlar programıyla da analizleri yapılarak karşılaştırılması yapıldı. Daha sonra Lusas sonlu elemanlar programı yardımıyla yatay yüklü tek ve grup kazıklar ile ilgili birçok analiz yapıldı.

Yatay yüklü tek kazık analizinde kullanılabilecek yöntemlerden bazıları Brinch-Hansen metodu, Broms metodu, p-y eğrileri, yatak katsayısı metodu, elastik teori ve karakteristik yük yöntemidir. Bunlardan p-y eğrileri ve elastik teori nonlineer davranışı dikkate alırken ikisinin dışındakiler lineer hesap yöntemleridir. Yatak yüklü kazık grubu analizinde ise kullanılabilecek yöntemlerden bazıları sürekli ortam yöntemi, Winkler etkileşim modeli, değiştirilmiş birim yük transferi yöntemi, ampirik rijitlik modeli, grup azaltma faktörü yöntemi, birleştirme modeli, grup büyütme yöntemidir. Bu yöntemler bazı kısıtlamalar içerdiklerinden her türlü kazık grubu sistemlerini çözememektedir. Ayrıca kazık grubu davranışında en önemli etken olan kazık-zemin-kazık etkileşimi farklı hassaslıklarda hesaba katılmıştır.

Matematiksel modellerin gelişmesiyle kazıklı temellerin analizlerinde farklı yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle bilgisayarların işlemci ve hafıza kapasitesinin gelişmesiyle 3 boyutlu kazıklı temellerin matematiksel modellerin yardımıyla bilgisayar ortamında çözülmesi kolaylaşmış ve yaygınlaşmıştır. Bu modellerden en yaygını ise sonlu elemanlar yöntemidir.

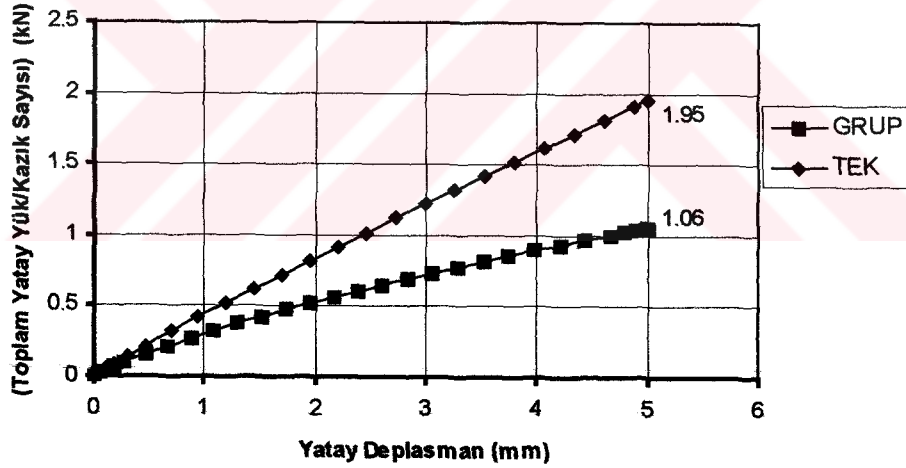
Sonlu elemanlar programında kazık-zemin-kazık etkileşimini modelleyebilmek için üç boyutlu ara yüzey (interface) ve ara (joint) elemanları kullanıldı. Ara yüzey elemanları ile kazık zemin ara yüzeyinde düşey yönde kayma hareketine olanak verilirken, ara elemanlarla da kazık ve başlık arkasında çekme gerilmeleri minimuma düşürüldü. Sonlu elemanlar ağı simetriden faydalanılarak

modelin yarısı için oluşturuldu. Ağ sınırları yatay yük etkisiyle oluşacak gerilme ve deplasmanlardan etkilenmeyecek şekilde uzatıldı.



(a)

YATAY YÜKLÜ TEKİL KAZIK VE 3*3 KAZIK GRUBU (L=1450 mm, S=3D)



(b)

Şekil 7.1 : Tutulu başlı tek ve 3x3'lük grup kazıkların analizlerine ait Toplam yatay yük/kazık sayısı-yatay depl. eğrileri, (a) Wakai ve diğ. (1999) sonuçları, (b) Lusas sonuçları

Lusas sonlu elemanlar programı ile, Wakai ve diğ. (1999) tarafından yapılan tutulu başlı tek ve 3x3'lük grup kazıkların analizi yapıldı. Şekil 7.1.a,b de sonuçlar gösterilmektedir. Wakai ve diğ. tarafından toplam yük/kazık sayısı, tutulu başlı tek kazıkta 1.36, grupta ise 0.64 bulunmuştur. Buna göre deplasman 0.1D'ye ulaştığında,

grup etkinlik faktörü 0.47 hesaplanmıştır. Lusas ile yapılan analizde bu değer 0.54 bulundu. D, kazı çapıdır ve 0.1D değeri 5 mm. dir.

Grup etkinlik faktörünün daha büyük çıkmasının iki sebebi vardır. Birincisi, modelin tamamı için geçerli olacak çekme gerilmesiz analiz yönteminin Lusas programında mevcut olmamasıdır. İkincisi de, elastisite modülünü derinlikle artan bir denklemle programda tanımlanamadığından yerine tabakalı zemin kullanılmasıdır. Neticede bulunan sonuçlar birbirine çok yakın olduğundan model deneyi ve sonlu elemanlar programıyla yapılan çalışma ile Lusas analizleri iyi bir uyum içerisinde olmaktadır.

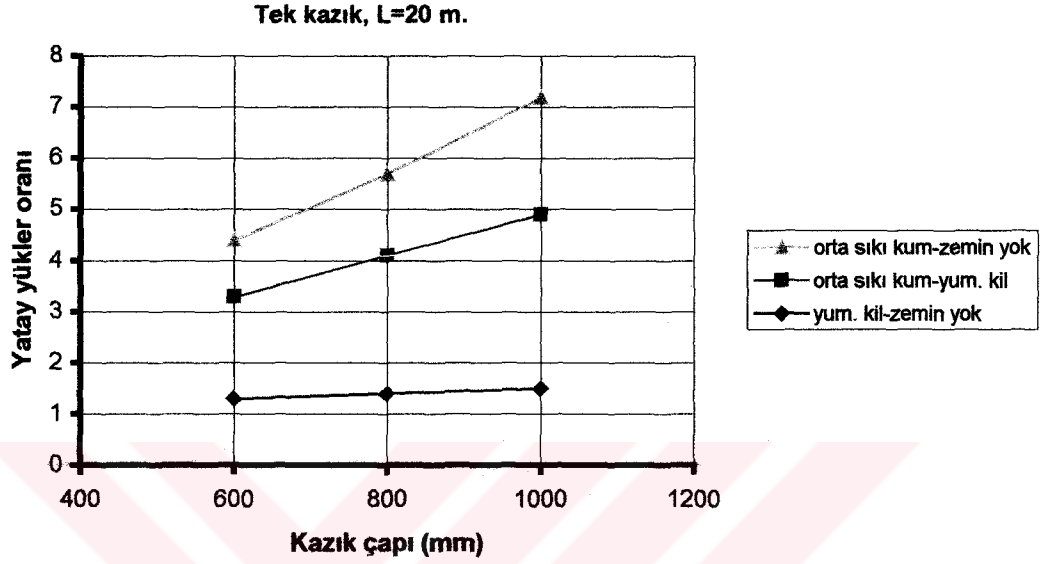
Lusas sonlu elemanlar programı ile kazık başlığı boyunca zeminin hem özelliği değiştirilerek hem de kaldırılarak, yatay yük taşıma kapasitesine olan etkisi araştırıldı. Kazık çapları 600, 800 ve 1000 mm seçilerek kazığın derinlikle olan değişimi ve yatay yük kapasitesine etkisi irdelendi. Kazığın boyu 15 m ve 20 m seçilerek, yarı katı kile soketlenme miktarının farklı çevre zeminindeki etkisi incelendi. Tek ve grup kazık analizlerinin yaptıkları yatay deplasmanlar karşılaştırıldı ve grup etkinlik faktörleri değerlendirildi.

Lusas sonlu elemanlar programında analizlerde kazık başlığının 6.25 mm yatay deplasmanındaki yatay yük, nihai taşıma gücü olarak kabul edildi. Bu değer, bir önceki bölümde verilen Tablo 6.5 deki farklı referansların farklı kazık malzemesine göre tespit ettikleri yatay deplasman değerlerinden seçildi.

Tek ve grup kazıkta başlık çevresindeki ortamın değişiminin etkisi bir önceki bölümde yatay yük-yatay deplasman eğrileri ile gösterildi. Şekil 7.2 de ise bu eğriler yardımıyla bulunan yatay yükler oranı-kazık çapı şekilleri gösterilmektedir. Bu şekiller tek kazık ve 20 m. kazık boyu için geçerlidir. Gruplarda ve kazık boyunun 15 m. olduğu durumlarda da benzer davranış görülmektedir.

İyi bir dolgu malzemesi olan sıkı kum, taşıma gücü zayıf olan yumuşak kille başlık çevresinde değiştirilirse yatay yük taşıma kapasitesi çok fazla artmaktadır. Kazık başlığı çevresindeki yumuşak kil kaldırılırsa taşıma gücü fazla etkilenmektedir. En büyük yatay yük oranı, 15 m boyundaki ve 1000 mm çapındaki tek ve grup kazıklarında sıkı kum-zemin olmaması farkında görülmektedir. Grupta 6.1 olurken tek kazıkta 9.1 kat daha fazla yatay yük taşınmaktadır. En küçük değerler

20 m boyundaki ve 600 mm çapındaki tek ve grup kazılarındaki yumuşak kil-zemin olmaması farkında görülmektedir. Grupta 1.2 olurken, tek kazıkta 1.3 kat daha fazla yatay yük taşınmaktadır. Tablo 7.1 de bütün analizlere ait yatay yük oranları gösterilmektedir. Şekil 7.2 den görüldüğü gibi kazık çapının artmasıyla, yatay yükler oranı sıkı kumda daha etkili olarak arttırmaktadır.

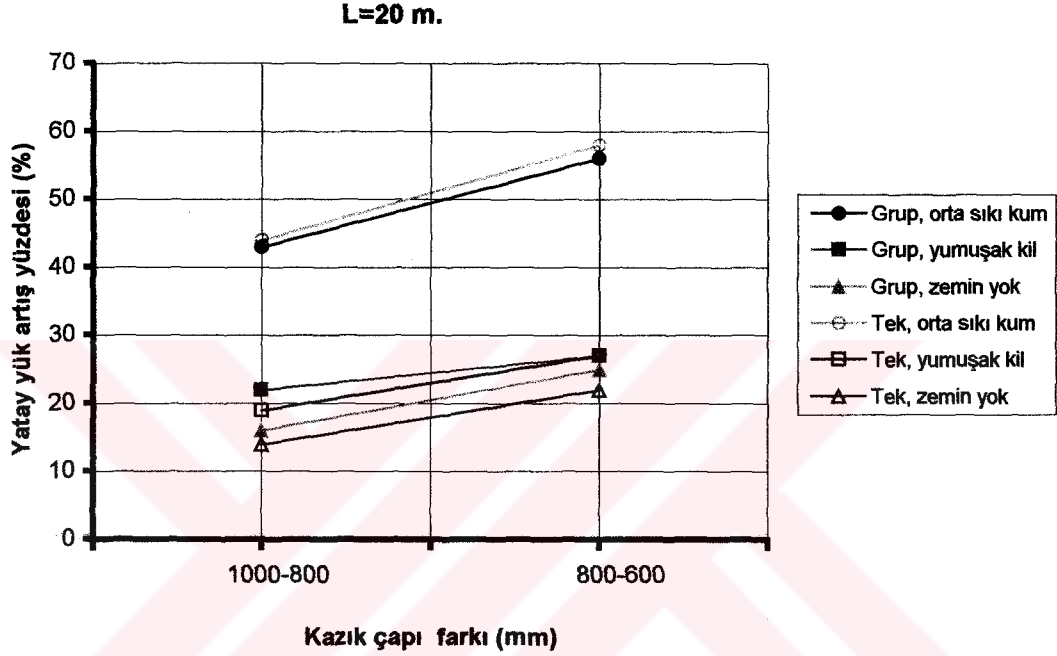


Şekil 7.2 : 20 m. boyundaki tek kazıkta çevre zeminin değişimi ile elde edilen yatay yükler oranı-kazık çapı eğrileri

Tablo 7.1 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, çevre zemin değişimi ile yatay yükler arasındaki oran

L=20 m. (15 m.)				
Başlık çevresindeki ortam		D (mm)		
		600	800	1000
GRUP (2x2)	Yum. Kil-Zemin Yok	1.2 (1.2)	1.2 (1.3)	1.2 (1.3)
	Orta Sıkı. Kum-Yum. Kil	2.7 (3.1)	3.3 (3.9)	3.9 (4.6)
	Orta Sıkı Kum-Zemin Yok	3.2 (3.9)	4.0 (5.0)	4.9 (6.1)
TEK	Yum. Kil-Zemin Yok	1.3 (1.4)	1.4 (1.5)	1.5 (1.6)
	Orta Sıkı. Kum-Yum. Kil	3.3 (3.6)	4.1 (4.5)	4.9 (5.6)
	Orta Sıkı Kum-Zemin Yok	4.4 (5.1)	5.7 (6.9)	7.2 (9.1)

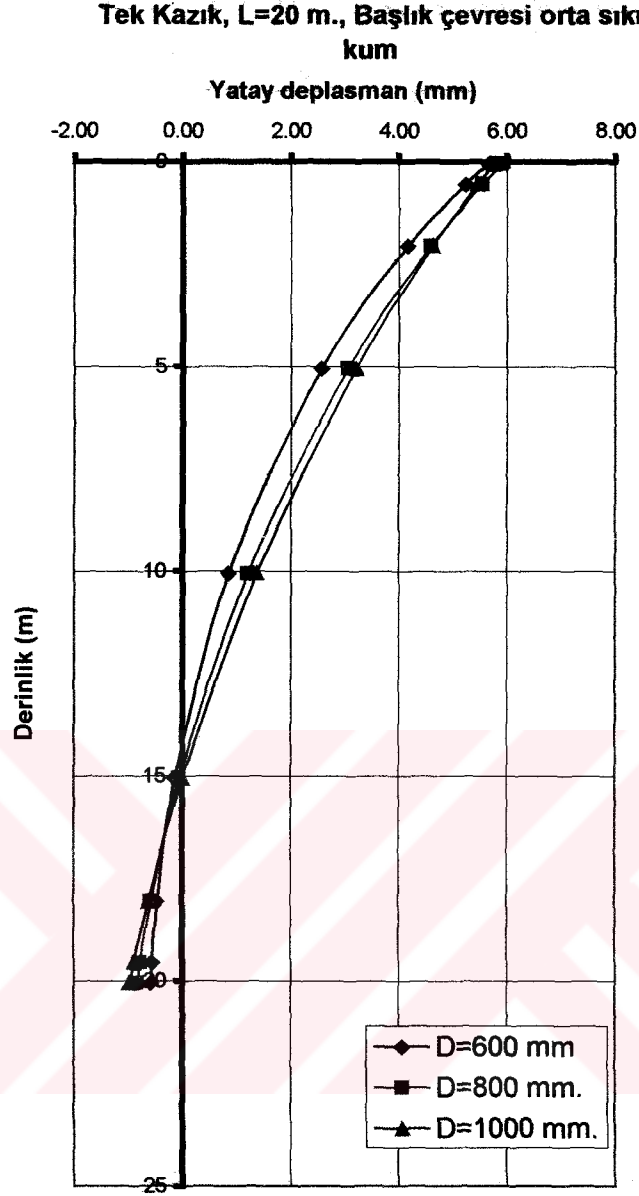
Önceki bölümlerde yatay yük-yatay deplasman eğrileriyle kazık çapının yatay yüke etkisi gösterildi. Burada 1000-800 mm ile 800-600 mm. çap farklarında 6.25 mm. deplasmanda elde edilen yatay yük artış yüzdeleri gösterilmektedir (Şekil 7.3). Buradaki çap artış farkları aynı olmasına rağmen 800-600 mm. çap artışıyla yatay yük artış yüzdesinin daha fazla arttığı görülmektedir. Tek ve grup kazıklarında yatay yük artış yüzdeleri birbirlerine yakın olmaktadır. Aynı şekilde kazık boyunun 15-20 m arasında değişmesinde de yakın artış yüzdeleri çıktı.



Şekil 7.3 : 20 m. kazık boyundaki tek ve 2x2 grup kazıkların yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı farkı eğrileri

Kazık çapının değişimiyle yatay yük kapasitesindeki en fazla artış başlık seviyesinde sıkı kum olması ve 600-1000 mm çap değişimlerinde, en düşüğü ise başlık seviyesinde zemin olmaması ve 600-800 mm çap değişimlerinde görülmektedir. En fazla artış yüzdesi % 127, en düşüğü ise % 9'dur. Ek A.3 de bütün analizlerdeki sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

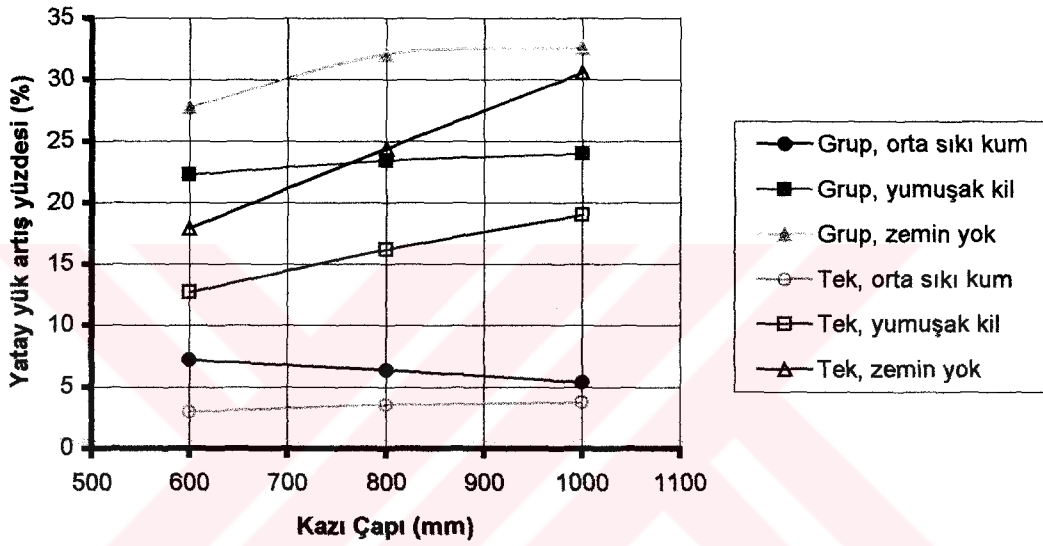
Aynı kazık uzunluğu ve çevre zemininde kazık çapı artınca kazık rijitliği artmaktadır. Şekil 7.4.de görüldüğü gibi 1000 mm. lik çapta derinlik boyunca kazıkta dönme hareketine yakın deplasman yapmaktadır. Oysa 600 mm. lik kazık ,uzun kazıklar gibi davranıp daha fazla eğilmektedir.



Şekil 7.4: 20 m. boyunda başlık çevresi sıkı kum olan tek kazıkta farklı kazık çaplarında yatay deplasman-derinlik eğrileri

Kazık boyunun değişiminin yatay yük taşıma gücüne olan etkisi önceki bölümde yatay yük-yatay deplasman eğrileriyle gösterildi. Bu eğrilerden elde edilen verilerle Şekil 7.5 deki yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı eğrisi çizildi. Yarı katı kile soketlenme miktarı arttıkça yatay yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Taşıma gücündeki en fazla artış % 32.6 ile başlık çevresinde zemin olmadığında ve çap 1000 mm.de olurken, en azı da % 3 ile sıkı kum olması durumunda ve 600 mm çap değerinde gerçekleşmektedir.

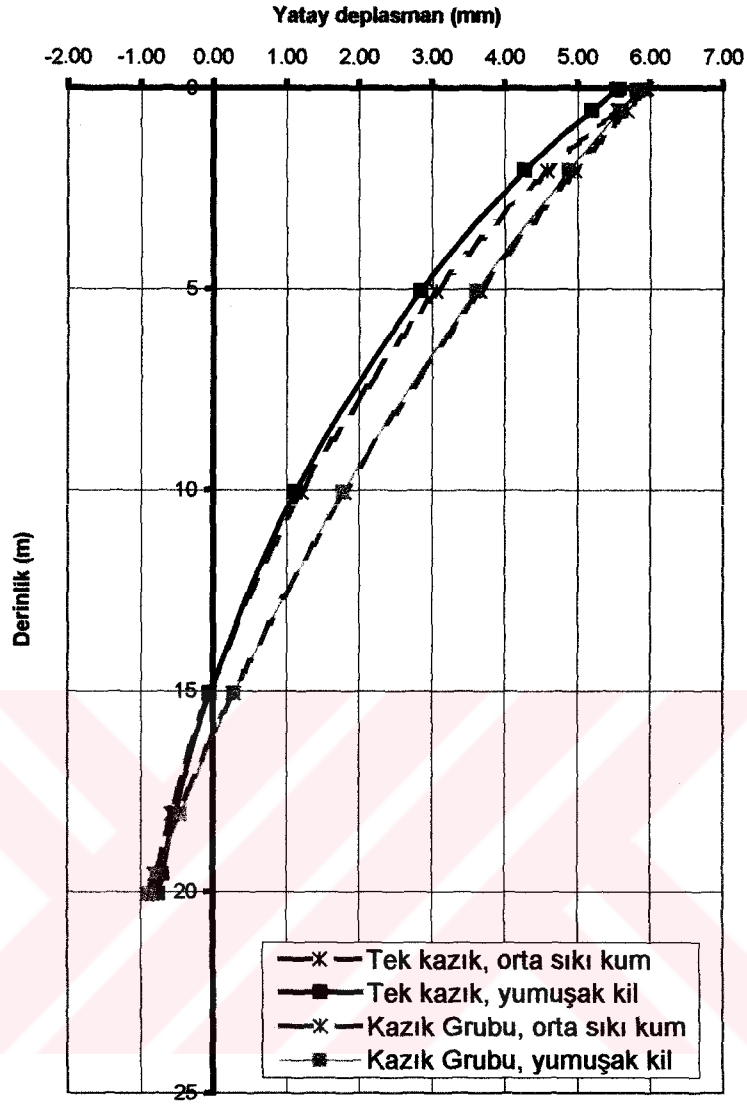
Kazık boyunun artmasıyla meydana gelen artış kazık çapı arttıkça bir analiz hariç artmaktadır. Bu örnek ise başlık çevresinde orta sıkı kum olan kazık grubudur. Modelde başlık yüksekliği kazık çapına göre seçildiğinden çap artmasıyla başlık önündeki yatay yüke direnen toprak basıncı artmaktadır. Dolayısıyla çap arttıkça yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı eğrilerinin eğimi azalmaktadır. Bu neden, başlık çevresinde orta sıkı kum olan kazık grubuna ait eğride negatif eğilmeye sebep olmaktadır. Analizlere tamamına ait yatay yük artış yüzdeleri Ek A.4 de gösterilmektedir.



Şekil 7.5 : 15 m. den 20 m.ye çıkan kazık boyunda oluşan yatay yük artış yüzdesi-kazık çapı eğrileri

Yanal yük etkisinde, grup içerisindeki herhangi bir kazığın deplasmanı kendisini çevreleyen zemin ve kazıkta yer değiştirmelerin olmasını sağlayabilir. Bu yüzden kazık grupları, gruptaki bir kazığa gelen yüke eşit yüklemeye maruz tekil kazığa göre daha fazla deplasman yapmaktadır. Bu davranış kazık-zemin-kazık etkileşimi diye adlandırılır. Bu etkileşimle zemin yumuşamış gibi davranmaktadır. Bu davranış Şekil 7.6 da görülmektedir.

L=20 m., D=800 mm.



Şekil 7.6 : Tek ve 2x2'lik kazık grubundaki yatay deplasman-derinlik eğrileri

Yapılan model deneyler yardımıyla; Oteo (1972) kohezyonsuz zeminlerde $S=3D$ için grup etkinlik faktörü olan G_e değerini 0.50 olarak tespit etmiştir. Prakash ve Saran (1967) kohezyonlu zeminde $S=3D$ ve 2x2 kazık gruplarında grup etkinlik faktörünü 0.42 bulmuşlardır. Tablo 7.2 de analizlerden elde edilen grup etkinlik faktörleri gösterilmektedir. Sonuçlar 0.44 ile 0.67 değerleri arasındadır. Bu sonuçlar ile model deney sonuçları arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

Tablo 7.2 : Analizlerde elde edilen grup etkinlik faktörleri, G_e ($S=3D$)

$L=20 \text{ m. (15 m.)}$			
Başlık çevresindeki ortam	D (mm)		
	600	800	1000
ORTA SIKI KUM	0.46 (0.44)	0.45 (0.44)	0.45 (0.44)
YUMUŞAK KİL	0.55 (0.51)	0.55 (0.52)	0.56 (0.54)
ZEMİN YOK	0.63 (0.58)	0.64 (0.61)	0.67 (0.66)

Wakai ve diğerlerinin (1999) yaptığı çalışma ile Lusas sonlu elemanlar programıyla yapılan analizler iyi bir uyum sağlamaktadır. Modelde kazık-zemin-kazık etkileşimini sağlayan elemanlar ikinci grup Lusas analizlerinde de kullanıldı. Bundan dolayı, ikinci grup analizlerde elde edilen sonuçların yorumları daha gerçekçi olmaktadır. Diğer yandan Lusas sonlu elemanlar programında geoteknik problemlerin modellenmesinde, arazi şartları büyük oranda gerçekleştirilse de bazı eksik yanları da olmaktadır. Bu yüzden arazi deneylerinden elde edilen sonuçlarla desteklenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Tomlinson, M.J., (1994), *Pile Design and Construction Practice*, E & FN Spon, London.
- [2] Yıldırım, S., Özaydın, İ.K., (1994), *Derin Temeller*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, s. 684-758.
- [3] BS 8004, (1986), *Foundations*, British Standards Institution.
- [4] Özkan, M.T., Sağlamer, A., (1995), *Kazıklı Temeller*, Dünya İnşaat, No. 131/7, s. 35-38.
- [5] Duncan, M.J., Evans, L.T., Ooi, P.S.K., (1994), *Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 1018-1033.
- [6] Prakash, S., Sharma, H.D., (1989), *Pile Foundations in Engineering Practice*, JohnWiley & Sons Inc., New York.
- [7] Fleming, W.G.K., Weltman, A.J. Randolph, M.F., Elson, W.K., (1992), *Piling Engineering*, Blackie A & F, Glasgow.
- [8] Chen, L.T., Poulos, H.G., Hull, T.S., (1997), *Model Tests on Pile Groups Subjected to Lateral Soil Movement*, Soils and Foundations, Vol. 37, No. 1, pp. 1-12.
- [9] Poulos, H.G., Davis, E.H., (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, JohnWiley & Sons Inc., Singapore.
- [10] Ooi, P.S.K., Duncan, M.J., (1994), *Lateral Load Analysis of Groups of Piles and Drilled Shafts*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 1034-1050.
- [11] Trochanis, A.M., Bielak, J., Christiano, P., (1991), *Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 429-447.
- [12] Muqtadir, A., Desai, C.S., (1986), *Three-Dimensional Analysis of a Pile-Group Foundation*, Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10., pp. 41-58.

- [13] **Wakai, A., Gose, S., Ugai, K.,** (1999), *3-D Elasto-Plastic Finite Element Analyses of Pile Foundations Subjected to Lateral Loading*, Soils and Foundations, Vol. 39. No. 1, pp. 97-111
- [14] **FEA LTD.,** Modeller Reference Manual
- [15] **Öztoprak, S.,** (1996), *Kazıklı Temellerin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Hesaplanması ile ilgili bir İnceleme*, Yüksek Lisans Tezi, İnş. UZ966
- [16] **Desai, C. S., Zaman, M. M., Lightner, J. G., Siriwardane, H. J.,** (1984), *Thin-Layer Element For Interfaces and Joints*, Int. Jor. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8., pp. 19-43.
- [17] **FEA LTD.,** Element Reference Manual.
- [18] **FEA LTD.,** Theory Manual.
- [18] **Vanikar, S. N.,** (1986) *Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundations*, Report No. FHWA-DP-66-1, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Demonstration Projects Division, Washington.
- [19] **Trade Arbed,** Spundwand Handbuch, Teil 1, Grundlagen, Luxembourg.

EKLER



A. Analizlere ait tablolar

Tablo A.1 : 6.25 mm. yatay deplasmandaki yatay yükler (kN)

L=20 m. (15 m.)				
Başlık çevresindeki ortam		D (mm)		
		600	800	1000
GRUP (2x2)	ORTA SIKI KUM	373 (348)	581 (546)	832 (789)
	YUMUŞAK KİL	137 (112)	174 (141)	212 (171)
	ZEMİN YOK	115 (90)	144 (109)	171 (129)
TEK	ORTA SIKI KUM	203 (197)	320 (309)	462 (445)
	YUMUŞAK KİL	62 (55)	79 (68)	94 (79)
	ZEMİN YOK	46 (39)	56 (45)	64 (49)

Tablo A.2 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, çevre zemin değişimi ile yatay yükler arasındaki oran

L=20 m. (15 m.)				
Başlık çevresindeki ortam		D (mm)		
		600	800	1000
GRUP (2x2)	Yum. Kil-Zemin Yok	1.2 (1.2)	1.2 (1.3)	1.2 (1.3)
	Orta Sıkı. Kum-Yum. Kil	2.7 (3.1)	3.3 (3.9)	3.9 (4.6)
	Orta Sıkı Kum-Zemin Yok	3.2 (3.9)	4.0 (5.0)	4.9 (6.1)
TEK	Yum. Kil-Zemin Yok	1.3 (1.4)	1.4 (1.5)	1.5 (1.6)
	Orta Sıkı. Kum-Yum. Kil	3.3 (3.6)	4.1 (4.5)	4.9 (5.6)
	Orta Sıkı Kum-Zemin Yok	4.4 (5.1)	5.7 (6.9)	7.2 (9.1)

Tablo A.3 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, kazık çapının artması ile yatay yükte oluşan artış yüzdeleri (%)

L=20 m. (15 m.)				
Başlık çevresindeki ortam		D (mm)		
		1000-800	800-600	1000-600
GRUP (2x2)	ORTA SIKI KUM	43 (45)	56 (57)	123 (127)
	YUMUşAK KİL	22 (21)	27 (26)	55 (53)
	ZEMİN YOK	16 (18)	25 (21)	49 (43)
TEK	ORTA SIKI KUM	44 (44)	58 (57)	128 (126)
	YUMUşAK KİL	19 (16)	27 (24)	52 (44)
	ZEMİN YOK	14 (9)	22 (15)	39 (17)

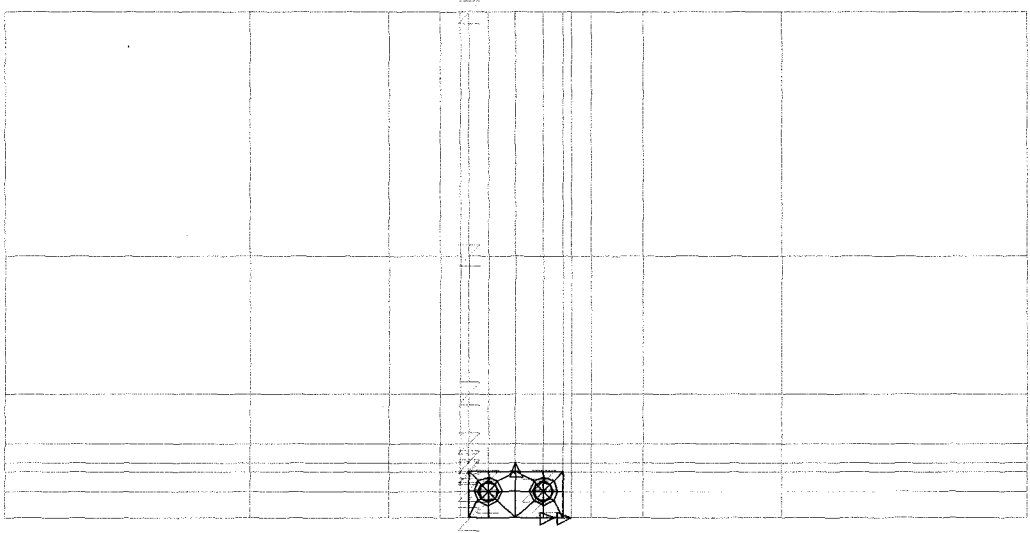
Tablo A.4 : 6.25 mm. yatay deplasmanda, kazık boyunun 15 m.den 20 m. ye artmasıyla yatay yük artış yüzdeleri (%)

Başlık çevresindeki ortam		D (mm)		
		600	800	1000
GRUP (2x2)	ORTA SIKI KUM	7.2	6.4	5.4
	YUMUşAK KİL	22.3	23.4	24
	ZEMİN YOK	27.8	32.1	32.6
TEK	ORTA SIKI KUM	3	3.6	3.8
	YUMUşAK KİL	12.7	16.2	19
	ZEMİN YOK	17.9	24.4	30.6

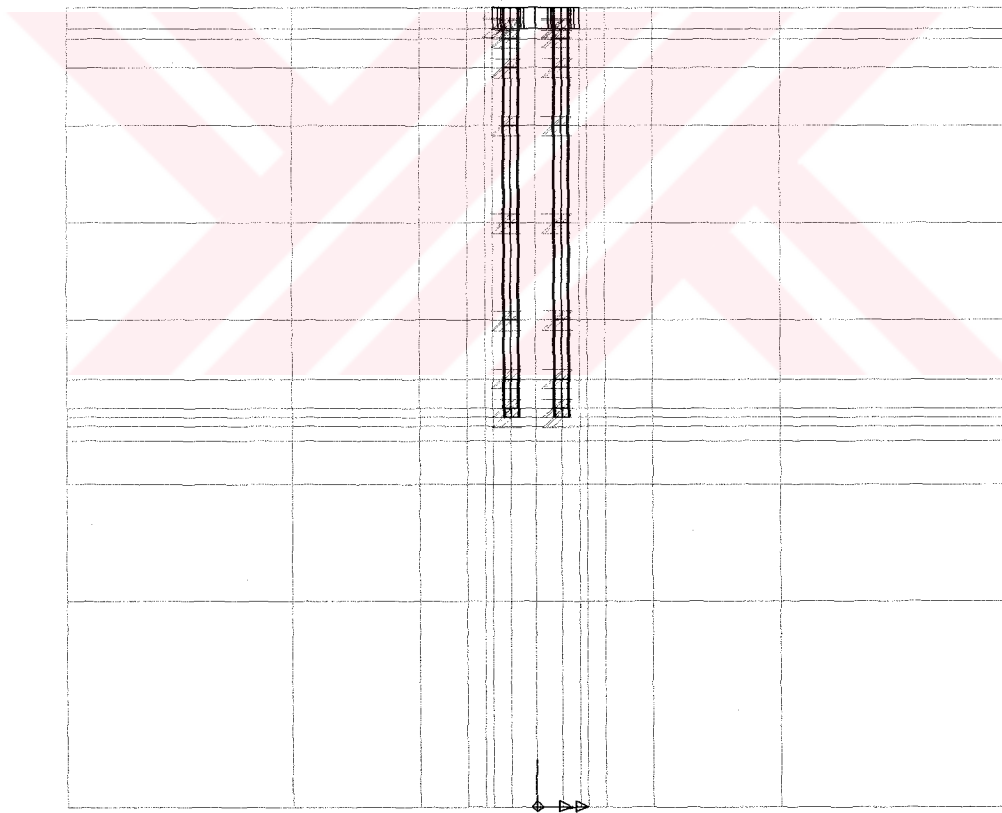
Tablo A.5 : Analizlerde elde edilen grup etkinlik faktörleri, G_e (S=3D)

L=20 m. (15 m.)			
Başlık çevresindeki ortam	D (mm)		
	600	800	1000
ORTA SIKI KUM	0.46 (0.44)	0.45 (0.44)	0.45 (0.44)
YUMUşAK KİL	0.55 (0.51)	0.55 (0.52)	0.56 (0.54)
ZEMİN YOK	0.63 (0.58)	0.64 (0.61)	0.67 (0.66)

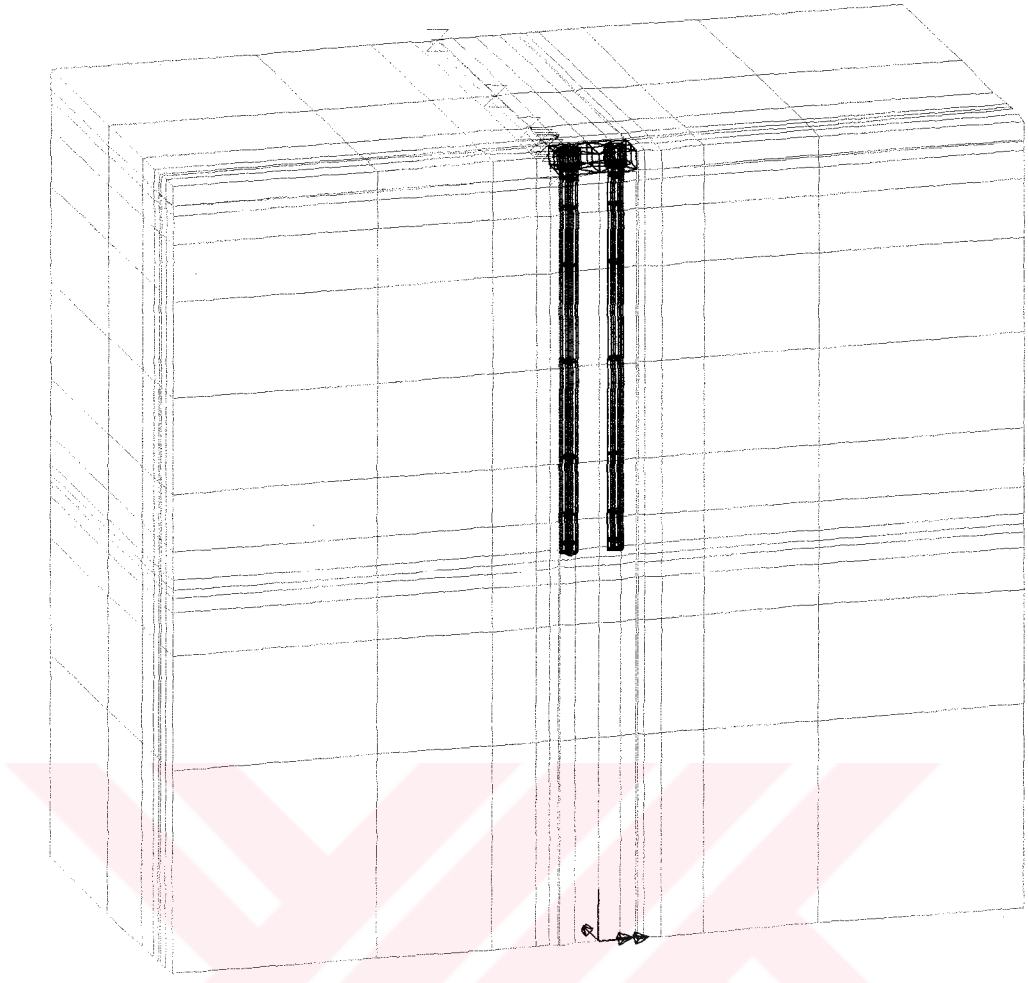
B.1. LUSAS'dan alınan şekiller



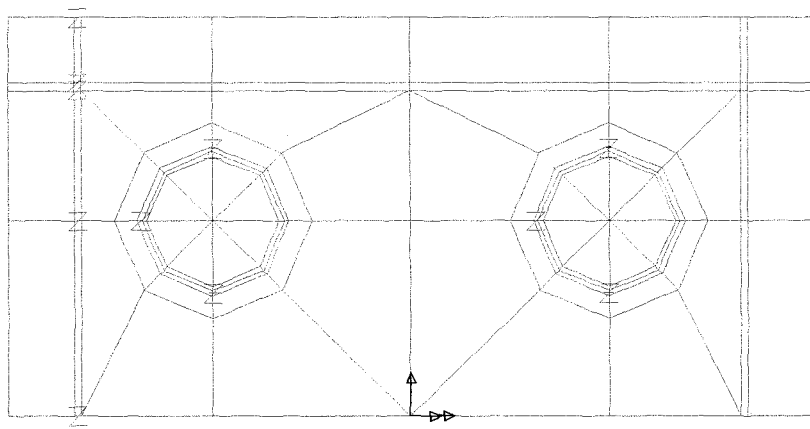
Şekil B.1.1 : Sonlu elemanlar ağının plandan görünüşü



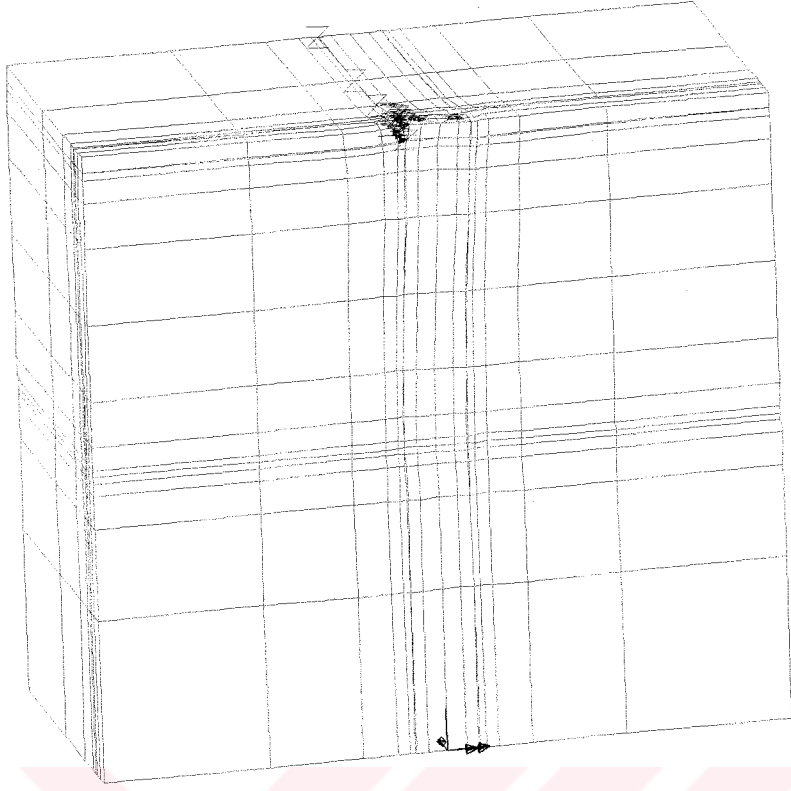
Şekil B.1.2 : Sonlu elemanlar ağının profilden görünüşü



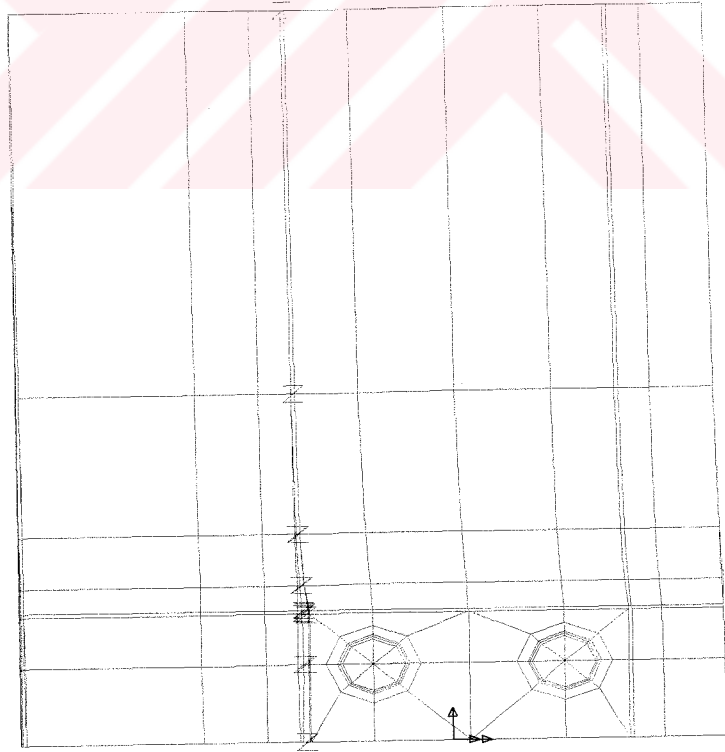
Şekil B.1.3 : Sonlu elemanlar ağının üç boyutlu görünüşü



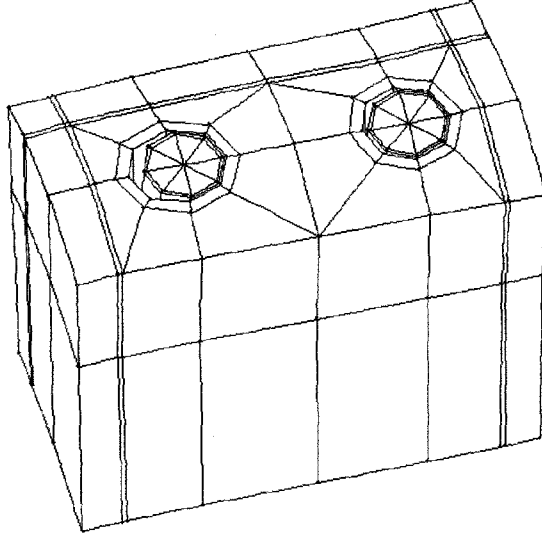
Şekil B.1.4 : Kazık ve başlık arkasındaki ara (joint) elemanları



Şekil B.1.5 : Yatay yönden yüklendikten sonraki deforme olmuş 2x2'lik kazık grubunun üç boyutlu görünümü



Şekil B.1.6 : Yatay yönden yüklendikten sonraki deforme olmuş ara (joint) elemanları



Şekil B.1.7 : Ara (joint) elemanlar sayesinde kazık arkasındaki zeminde çekme gerilmesinin oluşmaması



B.2. Örnek LUSAS data dosyası

C Version 13.2-5 Date 19-10-00 Time 12:26

PROBLEM TITLE

OPTION 2 48 61 117 118 123 146 157 235 250 ...
253 278 319

HX8 ELEMENT TOPOLOGY

6	52	57	55	53	99	90	68	77
7	99	90	68	77	100	91	69	78
8	100	91	69	78	101	92	70	79

...
...
...

3004	10694	10680	10679	10698	11504	11481	11480	11508
3005	10698	10679	10678	10702	11508	11480	11479	11512
3006	10702	10678	10668	10669	11512	11479	11468	11469

PN6 ELEMENT TOPOLOGY

1	1	4	2	35	13	22
2	35	13	22	36	14	23
3	36	14	23	37	15	24

...
...
...

2926	10465	10383	10386	11289	11210	11180
2931	10409	10465	10386	11178	11289	11180
2941	10428	10448	10386	11260	11271	11180

JNT4 ELEMENT TOPOLOGY

3007	63	390	11567	11568
3008	65	447	11569	11570
3009	2375	2573	11571	11572

...
...
...

3236	11488	11404	12025	12026
3237	10608	10588	12027	12028
3238	11478	11402	12029	12030

SOLUTION ORDER AUTOMATIC 4

NODE COORDINATES

1	1.482842712E+00	9.171572875E-01	0.000000000E+00
2	1.200000000E+00	8.000000000E-01	0.000000000E+00
4	1.200000000E+00	1.200000000E+00	0.000000000E+00
7	1.482842712E+00	9.171572875E-01	2.000000000E+01
8	1.200000000E+00	8.000000000E-01	2.000000000E+01

...
...
...

12027	-1.950000000E+00	2.205000000E+01	4.005000000E+01
12028	-2.050000000E+00	2.305000000E+01	4.005000000E+01

12029 -1.950000000E+00 2.205000000E+01 4.105000000E+01
12030 -2.050000000E+00 2.305000000E+01 4.105000000E+01

JOINT PROPERTIES NONLINEAR 32 3

17 3.300644604E+02 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+03 0.000000000E+00 ...
3.300644604E+02 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+03 0.000000000E+00 ...
3.300644604E+02 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+03 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

...
...
...

JOINT PROPERTIES NONLINEAR 32 3

48 1.987500000E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+04 0.000000000E+00 ...
1.987500000E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+04 0.000000000E+00 ...
1.987500000E+05 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E-20 ...
0.000000000E+00 7.500000000E+04 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1

6 7.500000000E+03 3.000000000E-01 1.900000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 2.500000000E+01 ...
2.500000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES

4 2.100000000E+07 1.500000000E-01 2.400000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 26

14 7.500000000E+03 7.500000000E+03 2.885000000E+03 ...
2.885000000E+03 3.000000000E-01 3.000000000E-01 ...
1.900000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
2.500000000E+01 2.500000000E+01 0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 26

15 1.750000000E+03 1.750000000E+03 6.250000000E+02 ...
6.250000000E+02 4.000000000E-01 4.000000000E-01 ...
1.700000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
1.000000000E+01 1.750000000E+01 0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1

9 1.750000000E+03 4.000000000E-01 1.700000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E+01 ...
1.750000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES

21 2.100000000E+07 1.500000000E-01 2.400000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1

12 7.500000000E+04 3.000000000E-01 1.900000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E+00 ...
3.250000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
1.000000000E-01

MATERIAL PROPERTIES

2 2.100000000E+07 1.500000000E-01 2.400000000E+01 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 26

16 7.500000000E+04 7.500000000E+04 2.884600000E+04 ...
2.884600000E+04 3.000000000E-01 3.000000000E-01 ...
1.900000000E+01 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
1.000000000E+00 3.250000000E+01 1.000000000E-01

MATERIAL ASSIGNMENTS

C
C LusasM Dataset 17 Has Title Joint Material 1
3007 3008 1 17 0 0 0 0 17 0 0

C
C LusasM Dataset 17 Has Title Joint Material 1
3009 3010 1 26 0 0 0 0 17 0 0

C
C LusasM Dataset 17 Has Title Joint Material 1
3011 3012 1 27 0 0 0 0 17 0 0

...
...
...

C
C LusasM Dataset 12 Has Title Isotropic Material 5 (elastic)
2966 2970 1 12 0 0 0 0 12 0 0

C
C LusasM Dataset 12 Has Title Isotropic Material 5 (elastic)
2972 2976 1 12 0 0 0 0 12 0 0

C
C LusasM Dataset 12 Has Title Isotropic Material 5 (elastic)
2982 3006 1 12 0 0 0 0 12 0 0

FREEDOM TEMPLATE

U V W

SUPPORT NODES

1 2 1 R R R
4 52 48 R R R
53 57 2 R R R
120 121 1 R R R

...
...
...

11375 11377 2 F R F

```

11378 11380 1 F R F
11402 11422 20 R R R
11423 11468 45 R R R
11469 11472 1 R R R
11478 11482 1 R R R

```

LOAD CASE 1 TITLE Loadcase 1
SSRE 6

C	Element	Node	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SZX	User data
1	1	-282.5	-282.5	-659.1	-0.0006947	-0.0002685	-0.0007937		
1	4	-282.5	-282.5	-659.1	-0.0006947	-0.0003714	-0.0005609		
1	2	-282.5	-282.5	-659.1	-0.0006947	-0.0002513	-0.0005947		
1	35	-282.5	-282.5	-659.1	0.0008743	-0.0005515	0.01051		
1	13	-282.5	-282.5	-659.1	0.0008743	-0.0006544	0.01075		
1	22	-282.5	-282.5	-659.1	0.0008743	-0.0005343	0.01071		
2	35	-214.8	-214.8	-501.3	0.0008743	-0.007103	-0.0222		
2	13	-214.8	-214.8	-501.3	0.0008743	-0.008524	-0.01767		
2	22	-214.8	-214.8	-501.3	0.0008743	-0.005933	-0.01786		
2	36	-215.2	-215.1	-501.5	-0.004939	-0.006962	-0.007002		
2	14	-215.2	-215.1	-501.5	-0.004939	-0.008383	-0.00247		
2	23	-215.2	-215.1	-501.5	-0.004939	-0.005792	-0.002663		

...
...
...

2945	10504	-3.608	-2.797	-14.11	-0.164	0.0342	-1.691		
2945	10372	-3.423	-2.547	-12.94	-0.2126	-0.1419	-1.299		
2945	10371	-3.566	-2.543	-12.6	-0.1518	-0.004381		-1.082	
2945	10478	-3.661	-2.709	-13.49	-0.1411	0.1325	-1.555		
2945	11329	1.669	-1.537	-13.13	0.3394	0.4235	0.5852		
2945	11228	1.754	-1.426	-11.99	0.1395	-0.5396	0.7952		
2945	11227	1.087	-1.448	-11.74	0.1952	0.02802	-0.2336		
2945	11312	1.177	-1.534	-12.59	0.2876	0.4763	-0.2985		
2953	10486	-3.682	-2.567	-13.52	0.1165	-0.01987		-1.55	
2953	10433	-3.647	-2.457	-12.59	0.1788	0.00327	-1.053		
2953	10372	-3.46	-2.544	-12.94	0.1194	0.1054	-1.294		
2953	10504	-3.579	-2.626	-14.08	0.04079	-0.00449		-1.677	
2953	11316	1.344	-1.635	-12.63	-0.1949	-0.2324	-0.1105		
2953	11264	1.245	-1.498	-11.71	-0.1733	-0.02101		-0.1533	
2953	11228	1.748	-1.441	-12	-0.06787		0.4151	0.7361	
2953	11329	1.676	-1.667	-13.15	-0.1766	-0.2644	0.6368		

SSRE 3

C	Element	Node	Fx	Fy	Fz	User data
3007	63	-0.3147	0	0		
3007	390	-0.3147	0	0		
3008	65	-0.3023	0	0		
3008	447	-0.3023	0	0		
3009	2375	-14.32	0	0		
3009	2573	-14.32	0	0		
3010	2358	-12.88	0	0		
3010	2517	-12.88	0	0		

...
...
...

3236	11488	-12.11	0	0
3236	11404	-12.11	0	0
3237	10608	-11.91	0	0
3237	10588	-11.91	0	0
3238	11478	-7.161	0	0
3238	11402	-7.161	0	0

ELEMENT OUTPUT

1 3238 1 0

NODE OUTPUT

1 12030 1 0

NONLINEAR CONTROL

iteration 10 2 .75 5 25 0

convergence .0 .0 1 0 0 0 0

output 0 1 1

LOAD CASE 2 TITLE Loadcase 2

cl

10478 0 0 0.625

10504 0 0 9.375

10486 0 0 2.5

11312 0 0 0.625

11329 0 0 9.375

11316 0 0 2.5

NONLINEAR CONTROL

incr 1

iteration 30 2 0.75 5 25 0

convergence 0 0 1 0 0 0 0

output 0 1 1

term 0 22

PLOT FILE

END

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1 Ocak 1976 tarihinde Sivas'da doğdu. İlköğrenimini Aktepe Bağlarbaşı İlkokulu'nda, ortaöğrenimini Ankara Yükseliş Koleji'nde tamamladıktan sonra 1994 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenimine başladı. Buradan 1998 yılında mezun olan yazar aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Geoteknik Programına kayıt oldu.