

**YATAY YÜKLÜ TEK KAZIĞIN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ÜÇ BOYUTLU
NONLİNEER ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Meltem ÖZEN
501991313**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2004**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tuğrul ÖZKAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER (İ.T.Ü)
Prof.Dr. Feyza Çinicioğlu (İ.Ü)**

ARALIK 2003

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, yanal yüklü kazıkların hesaplarını inceleyerek Geoteknik Mühendisliği alanında bu konuya katkıda bulunmak amacıyla yapılmıştır.

Tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Sayın Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Analizlerin yapıldığı Lusas Sonlu Elemanlar Programının öğrenilmesinde yardımlarını ve zamanını esirgemeyen Araş. Gör. Ertuğrul ORDU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Analizler esnasında programla ilgili yardımlarından dolayı Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesinden Araş Gör. Bahri ÖZDEMİR'e ve İ.Ü. Mühendislik Fakültesinden Araş. Gör. M. Kubilay KELEŞOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tezin oluşturulmasında destek ve yardımlarından dolayı sevgili ablam Özlem ÖZEN'e, önemli noktalarda bana fikir vererek beni doğru şekilde yönlendiren sevgili babama, her türlü desteği için sevgili anneme, her zaman olduğu gibi yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez çalışmalarım esnasında da bana destek olarak hayatımı kolaylaştıran Ersegün AYDOĞDU' ya ve tezin hazırlanması sürecinde yanımda olarak tezin zevkli bir şekilde yürütülmesini sağlayan sevgili arkadaşım Yasemin KARALI'ya çok teşekkür ederim.

Aralık, 2003

MELTEM ÖZEN

İSTANBUL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv

1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Amaç	1
1.3. Problemin çözümleme Süreci ve Problem	2
1.4. Yöntem	2
2. KAZIKLI TEMELLER	3
2.1. Giriş	3
2.2. Kazıkların Sınıflandırılması	4
2.2.1. Kullanım Amaçlarına Göre Kazıklar	4
2.2.2. Yapımında Kullanılan Malzemelere Göre Kazıklar	5
2.2.3. Zemin İçine Yerleştirilme Tarzına Göre Kazıklar	6
2.3. Kazık Tipi Seçimini Belirleyen Faktörler	6
3. YANAL YÜKLÜ TEK DÜŞEY KAZIĞIN ANALİZİ	9
3.1. Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler	9
3.2. Yatay Yükler Altındaki Düşey Kazıkların Davranış Esasları	10
3.3. Yatay Yüklü Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri	15
3.4. Nihai Direncinin Hesaplanma Yöntemleri	15
3.4.1. Brinch Hansen Yöntemi	16
3.4.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Brinch Hansen Yöntemi	17
3.4.1.2. Kohezyonlu Zeminlerde Brinch Hansen Yöntemi	17

3.4.2. Broms Yöntemi	18
3.4.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Broms Yöntemi	21
3.4.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Broms Yöntemi	24
3.5. Çalışma Yükünde Yatay Ötelenme	26
3.5.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı.....	27
3.5.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Yatak Katsayısı Yaklaşımı	30
3.5.1.2. Kohezyonlu Zeminlerde Yatak Katsayısı Yaklaşımı	34
3.5.1.3. Yatak Katsayısına Etki Eden Faktörler	36
3.5.1.4. Yatak Katsayısının Belirlenmesi	39
3.5.2. Elastik Ortam Yaklaşımı	39
3.5.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı	40
3.5.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı	45
3.6. p-y Eğrileri ile Hesap Yöntemi	47
3.6.1. Kohezyonsuz Zeminlerde p-y Eğrileri Çizimi	53
3.6.2. Kohezyonlu Zeminlerde p-y Eğrilerinin Çizimi	55
3.6.3. p-y Eğrilerine Etki Eden Faktörler	60
3.6.3.1. Yükleme Tipinin Etkisi	60
3.6.3.2. Kazık ve Zemin Özelliklerinin Etkisi	62
3.6.4. Presyometre Deneyi Sonuçlarından p-y Eğrilerinin Elde Edilmesi.....	63
3.7. Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)	64
3.8. Kazıklarda Yatay Kuvvetler İçin Basit Yaklaşım (SALLOP)	69
3.9. Tabakalı Zeminlerde Yanal Yüklü Tekil Kazık	72
3.9.1. Tabakalı Zeminde Kazığın Nihai Direnci	72
3.9.2. Tabakalı Zeminde Kazığın Yanal Ötelenmesi	72
4. LUSAS SONLU ELEMENLAR PROGRAMI	76
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	76
4.1.1. Kullanılan Elemanlar	77
4.2. Lusas Programının Özellikleri	81
4.2.1. Programın Sistem Özellikleri	81
4.2.2. Lusas Programının Kullanım Esasları	83
4.2.3. Data Dosyasının Hazırlanması	83

5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER	87
5.1. Lusas İle Yatay Yüklü Kazıkların Modellenmesi	87
5.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı	87
5.1.2. Kullanılan Elemanlar	89
5.1.3. Kullanılan Yapısal Modeller	91
5.2. Yatay Yüklü Kazık Analizi	92
5.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık ve Parametreleri	93
5.3. Kohezyonlu Zeminlerde Yapılan Analizler	94
5.4. Kohezyonsuz Zeminlerde Yapılan Analizler	95
6. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR.....	96
6.1. Kohezyonlu Zeminlerin Analiz Sonuçları	96
6.2. Kohezyonsuz Zeminlerin Analiz Sonuçları	101
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	106
KAYNAKLAR	108
EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ	128

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Düşey kazılar için izin verilebilir yatay yükler	15
Tablo 3.2. Kohezyonlu zeminlerde k değerleri	28
Tablo 3.3. Kohezyonsuz zeminler için nh değerleri	29
Tablo 3.4. Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{maks} \geq 5$) elastik çözümü için A katsayıları	32
Tablo 3.5. Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{maks} \geq 5$) elastik çözümü için B katsayıları	32
Tablo 3.6. A_1 ve B_1 katsayıları	55
Tablo 3.7. Karakteristik yük yöntemi için minimum uzunluklar	68
Tablo 5.1. Lusas ile yapılan analizler	92
Tablo 5.2. Analizlerde kullanılan zemin ve kazık malzeme özellikleri	93
Tablo 5.3. Analizlerde kullanılan ara yüzey elemanlarının malzeme özellikleri	94
Tablo 5.4. Kohezyonlu Zeminlerde Yapılan Analizler	95
Tablo 5.5. Kohezyonsuz Zeminlerde Yapılan Analizler	95
Tablo 6.1. 16 m. boyunda kazığın 1000 kN yatay yük altında yaptığı yatay deplasman (mm) (kohezyonlu zemin)	100
Tablo 6.2. 16 m. boyunda kazığın 1000 kN yatay yük altında yaptığı yatay deplasman (mm) (kohezyonsuz zemin)	104

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.a, b : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Uç kazıkları	4
Şekil 2.1.c : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Sürtünme kazığı	4
Şekil 2.1.d : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Çekme kazığı.....	4
Şekil 2.1.e : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Bağlama kazığı.....	4
Şekil 2.1.f : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Sıkıştırma kazığı	4
Şekil 2.1.g : Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması, Eğik Kazık	4
Şekil 3.1.a : Kazığa etkiyen yükler, zemin direnci	11
Şekil 3.1.b : Kazığa etkiyen yükler, kazık deformasyonu.....	11
Yatay yüklü kazık etrafında varsayılan göçme yüzeyleri, zemin yüzeyine yakın derinlikler.....	12
Şekil 3.2.a : Yatay yüklü kazık etrafında varsayılan göçme yüzeyleri, zemin yüzünden daha uzak derinlikler.....	12
Şekil 3.3 : Kazıkta oluşan zemin direnci – Brinch Hansen.....	16
Şekil 3.4 : K_q ve K_c katsayıları.....	17
Şekil 3.5.(a,b) : Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre deformasyon	19
Şekil 3.5.(c,d) : Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre kohezyonlu zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılım.....	19
Şekil 3.5.(e,f) : Kısa rijit kazıkların başlık durumuna göre kohezyonsuz zeminlerdeki zemin direnci ve moment dağılım.....	19
Şekil 3.6.(a,b) : Uzun elastik kazıklarda dönme ve ötelenme hareketleri, kohezyonlu zeminlerde.....	20
Şekil 3.6.(c,d) : Uzun elastik kazıklarda dönme ve ötelenme hareketleri, kohezyonsuz zeminlerde.....	20
Şekil 3.7.a : Kohezyonsuz zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu, kısa kazıklar.....	23
Şekil 3.7.b : Kohezyonsuz zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu, uzun kazıklar.....	23

Şekil 3.8.a	: Kohezyonlu zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu, kısa kazıklar.....	25
Şekil 3.8.b	: Kohezyonlu zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu, uzun kazıklar.....	25
Şekil 3.9.a	: Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı, elastik zemine oturan giriş.....	27
Şekil 3.9.b	: Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı, Winkler idealizasyonu.....	27
Şekil 3.9.c	: Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı, zeminde yatay yüklü kazık.....	27
Şekil 3.9.d	: Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı, yatay yüklü kazık yaylı ortam.....	27
Şekil 3.10.a	: Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde, deplasman, ...	30
Şekil 3.10.b	: Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde, eğim.....	30
Şekil 3.10.c	: Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde, kesme kuvveti.....	30
Şekil 3.10.d	: Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde, zemin reaksiyonu.....	30
Şekil 3.11.a	: Kohezyonsuz zeminlerde rijit başlıklı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için, deplasman, C_y	34
Şekil 3.11.b	: Kohezyonsuz zeminlerde rijit başlıklı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için moment, C_m katsayıları.....	34
Şekil 3.12.a	: Kazığa yatay kuvvet ve sıfır moment etkisi durumu.....	35
Şekil 3.12.b	: Kazığa sıfır yatay yük ve moment etkimesi durumunda yer değiştirme ve moment katsayıları	36
Şekil 3.13	: Kumda bulunan kazıklar için kazık deplasmanının yatak katsayısına etkisi	37
Şekil 3.14	: Kazık genişliğinin boyutsuz basınç eğrisine etkisi	38
Şekil 3.15.a	: Gerilme etkisi, kazığa.....	40
Şekil 3.15.b	: Gerilme etkisi, kazıktan kazık çevresindeki zemine.....	40
Şekil 3.16	: Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için I'_{pH} değerleri	42
Şekil 3.17	: Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için I'_{pM} değerleri	43
Şekil 3.18	: Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için F_{p0} değerleri.....	43
Şekil 3.19	: Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için I'_{pF} değerleri.....	44

Şekil 3.20	: Rijit başlıklı kazıklarda zemin modülü için F'_{pF} değerleri.....	44
Şekil 3.21.a	: Serbest başlıklı kazıklarda sabit zemin modülü için I_{pH} değerleri.....	46
Şekil 3.21.b	: Serbest başlıklı kazıklarda sabit zemin modülü için I_{pM} ve I_{0H} değerleri	46
Şekil 3.22	: Serbest başlıklı kazıklarda sabit zemin modülü için I_{0M} değerleri	47
Şekil 3.23.a	: Kazık yatay yüklenmeden önce zemin reaksiyonu dağılışı	48
Şekil 3.23.b	: Kazık yatay yüklendikten sonra zemin reaksiyonunun davranışı	48
Şekil 3.24.a	: Yatay yüklü kazıklar için p-y eğrileri, zemin yüzeyinin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri	49
Şekil 3.24.b	: Yatay yüklü kazıklar için p-y eğrileri, p-y eğrilerinin x-y eksenlerinde gösterimi	49
Şekil 3.25.a	: x_r kritik derinliğin elde edilmesi	54
Şekil 3.25.b	: p-y eğrilerinin oluşturulması	54
Şekil 3.26	: Yumuşak ve orta katı killer p-y eğrilerinin oluşturulması.....	57
Şekil 3.27	: Presyometre deneyinden zemin reaksiyonu değerlerinin elde edilmesi	63
Şekil 3.28	: CLM yönteminde yatay yük nedeniyle meydana gelen ötelenmeler	66
Şekil 3.29	: CLM yönteminde moment nedeniyle meydana gelen ötelenmeler.....	66
Şekil 3.30	: Yük-moment eğrileri.....	67
Şekil 3.31	: SALLOP- Doğrusal Etkileşim Bağıntısı.....	72
Şekil 3.32	: Tabakalı zeminlerde yatak katsayısı.....	73
Şekil 5.1	: Modelin üç boyutlu geometrisi	88
Şekil 5.2	: Modelin sonlu elemanlar ağı	88
Şekil 5.3	: 3D katı ortam elemanlar	89
Şekil 5.4	: 3D katı sürekli ortam elemanlarındaki pozitif gerilme yönleri	90
Şekil 5.5	: Ara yüzey elemanı	90
Şekil 5.6	: Mohr-Coulomb ve Drucker Prager akma kriteri	91
Şekil 5.7.a	: Analizlerde kullanılan zemin profili a) kohezyonlu zemin	93
Şekil 5.7. b	: Analizlerde kullanılan zemin profili b) kohezyonsuz zemin	93

Şekil 6.1	: Üst tabaka yumuşak kil olduğunda 16 m. ve 20 m. kazık boylarındaki yatay yük – yatay deplasman eğrileri	96
Şekil 6.2	: Kohezyonlu zeminlerde zemin üst tabakanın orta sıkı kum olması durumunda farklı kazık boylarına göre yatay yük- yatay deplasman eğrileri	97
Şekil 6.3	: D=100 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	98
Şekil 6.4	: D=80 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	99
Şekil 6.5	: D=65 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	99
Şekil 6.6	: Kohezyonlu zeminde üst tabaka zeminin değişimi ile elde edilen yatay deplasman azalma yüzdesi – kazık çapı eğriler	100
Şekil 6.7	: Üst tabaka gevşek kum olduğunda 16 m. ve 20 m. kazık boylarındaki yatay yük- yatay deplasman eğrileri	101
Şekil 6.8	: Kohezyonsuz zeminlerde zemin üst tabakanın orta sıkı kum olması durumunda farklı kazık boylarına göre yatay yük- yatay deplasman eğrileri	102
Şekil 6.9	: D=100 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	103
Şekil 6.10	: D=80 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	103
Şekil 6.11	: D=65 cm. çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri	104
Şekil 6.12	: Kohezyonsuz zeminde üst tabaka zeminin değişimi ile elde edilen yatay deplasman azalma yüzdesi – kazık çapı eğriler	105

SEMBOL LİSTESİ

A	: Katsayı
A_{mc}	: Katsayı
A_{yc}	: Katsayı
A₁, b₁	: Katsayılar
B	: Katsayı
B	: Kazık Genişliği
B_{mc}	: Katsayı
B_{yc}	: Katsayı
c	: Kohezyon
c_u	: Drenajsız kohezyon
c'	: Drenajlı Efektif Kohezyon
C	: Katsayı
C₁, C₂	: Katsayı
C_y, C_m	: Deplasman Katsayıları
D	: Kazık çapı
D_v	: Sıfır kayma derinliği
D₈₅	: Ağırlık olarak danelerin %85nin küçük olduğu çap
e	: Kazık başının zemin yüzeyi üzerindeki kısmının uzunluğu
e	: Eksantriste
E	: Elastisite (Young Modülü)
E₀	: Presyometre ilk yükleme modülü
E_pI_p	: Kazık Eğilme Rijitliği
E₅₀	: Sekant Elastisite Modülü
E_p	: Kazığın Elastisite Modülü
I₁, I₂, I₃	: Deformasyon İnvaryantları
I	: Atalet Momenti
I_daire	: Dolu dairesel kesit atalet momenti
I_{pH}, I_{pM}	: Katsayılar
I_{θH}, I_{θM}	: Katsayılar
I_{pF}	: Katsayı
I_p	: Kazığın Atalet Momenti
J	: Ampirik bir faktör
J₁, J₂, J₃	: Gerilme İnvaryantları
K	: Elastik yay Katsayısı
[k]	: Rijitlik matrisi

K	: Deformasyon pekleşme parametresi
K_A	: Aktif toprak basıncı katsayısı
K_h	: Yatay yatak katsayısı
K₀	: Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
K_R	: Kazık bükülebilirlik faktörü
K_c, K_q	: ϕ 'ye ve x/D oranına bağlı katsayılar
K_p	: Rankine pasif toprak basıncı katsayısı
L	: Kazık Boyu
M	: Moment
M_c	: Karakteristik Moment
M_{maks}	: Maksimum eğilme Momenti
M_g	: Tek kazıkta maksimum moment
M_u	: Kazığın taşıyabileceği maksimum momenti
n	: Katsayı
n_h	: Yatay yatak katsayısı sabiti
N	: Çevrimli Yüklerde Çevrim sayısı
N_h	: Es'nin derinlikle artış oranı
p	: Zemin Direnci
p	: Başlangıç ortalama çevre basıncı
p	: Birim zemin direnci
P₁	: Presyometre limit basıncı
P_c	: Karakteristik Yük
P_{cr}	: Kritik derinliğe kadar olan zemin reaksiyonu
P_{cd}	: Kritik derinlikten sonraki zemin reaksiyonu
P_u	: Kazığın birim boyu için nihai zemin direnci
P_x	: Kazıkta eksenel yük
r²	: Regresyon katsayısı
R_I	: Atalet momentleri oranı
{q}	: Deplasman vektörü
{Q}	: Düğüm noktası vektörü
Q_g	: Kazığın taşıyabileceği maksimum yatay yük
Q_v	: Kazığa etkiyen eksenel kuvvet
Q_u	: Kazığın taşıyacağı nihai direnç
{r}	: Düğüm noktası vektörü
{R}	: Toplam Yük Vektörü
R	: Rijitlik faktörü
RI	: Atalet momenti oranı
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
t	: Ara Yüzeyin aralığı
T	: Rijitlik faktörü
V	: Kesme Kuvveti
x	: Zemin Yüzeyinden itibaren derinlik
x₀	: Maksimum momentin zemin yüzeyine olan uzaklığı

x_r	: Zemin yüzeyi ile dönme noktası arasındaki derinlik
Y	: Yatay yer değiştirme
Y_{50}	: Nihai direncin yarsına gelen deplasman
Y_c	: N çevrim sonrası deplasman
Y_g	: Serbest başlı kazıkta deplasman
Y_s	: Başlangıç yükleme sonrası oluşan deplasman
Y_s	: Tek kazığın yatay deplasmanı
W	: Kazığın mukavemet momenti
Z	: Derinlik
Z_{maks}	: Maksimum derinlik katsayısı
α	: Şev eğimi
β	: Duvarın yatayla yaptığı açı
βL	: Boyutsuz Büyüklük
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	: Normal Deformasyon
ϵ_c	: Drenajsız üç eksenli basınç deneyinden elde edilen maksimum gerilme için elde edilen birim deformasyon
ϵ_{50}	: Deviator gerilmenin yarsına karşılık gelen birim deformasyon
ϵ_i	: İlk birim deformasyon
ϵ_c	: N çevrim sonra ölçülen birim deformasyon
λ	: Kazık Başlığının Tutululuk Durumu
ηL	: Boyutsuz Büyüklük
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
σ	: Ara yüzey elemanının çekme mkavemeti
$\sigma_{vx'}$	: Düşey Efektif Düşey 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

ÖZET

Bu tezde, kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin tabakalarında bulunan kazığın yatay yükler etkisi altında davranışları LUSAS Sonlu Elemanlar Programı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada farklı olarak, kazık başı seviyesinden itibaren bir miktar zemin yerine sıkı kum dolgu yerleştirme durumunun kazık-zemin davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Tez, yedi bölümden oluşmaktadır.

Birinci Bölümde; yapılan çalışmanın zemin mühendisliğindeki yeri, amacı, önemi, ele alınan problemin tanımı ve çözüm yöntemi verilmiştir. İkinci Bölümde, kazıkların genel kullanım amaçlarından bahsedildikten sonra, kazıklar; malzeme türlerine ve zemin içine yerleştirilme şekillerine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca kazık tipi seçimini belirleyen faktörler verilmiştir. Üçüncü Bölümde; yatay yükler altındaki düşey kazıkların davranış esasları, yatay yüklü kazıklarda kabul edilebilir yük ve deplasman limitleri, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde “Brinch Hansen Yöntemi, Broms Yöntemi, p-y eğrileri, Yatak Katsayısı Metodu, Elastik Ortam Yaklaşımı ve Karakteristik Yük Yöntemi” verilmiştir. Dördüncü Bölümde; Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Lusas Programının kullanım esasları ve Lusas Sonlu Elemanlar Programında analizlerin yapılması için gereken data dosyasının içeriği açıklanmıştır. Beşinci Bölümde; oluşturulan kazık- zemin modeline ait sonlu eleman tipleri, sonlu elemanlar ağı, kazık ve zemin malzeme özellikleri verilmiştir. Aynı zamanda, farklı zemin şartlarına göre farklı kazık çapı ve kazık boyu analiz girdileri verilmiştir. Altıncı bölümde; yapılan analiz bulguları karşılaştırmalı grafikler halinde sunulmuştur. Son bölümde ise; bulgular değerlendirilmiş ve değerlendirme sonuçlarına göre; kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kazık başı çevresine sıkı kum dolgu yapılmasıyla kazık deplasmanlarında önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür.

THREE DIMENSIONAL NON-LINEAR ANALYSES OF LATERALLY LOADED SINGLE PILE WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In this study, the behavior of laterally loaded single piles in cohesive and cohesionless soil conditions is determined by using Lusas Finite Element Program. Different from prior works, the load carrying capacity of the pile is discussed by altering the stiffness of top layer of the soil.

This study is analyzed with in seven chapters.

In the First Chapter, the location of the analyzed problem in Geotechnical Engineering and the aim, importance and definition of the studied problem with its solution methods are examined. In the Second Chapter the application fields of piles and those facts that determine the pile type are defined. Also, the classification methods of the piles, according to their material properties and their installation methods take place in the same chapter. In the third chapter, the behavior of single pile under lateral loads, allowable lateral loads and displacements of laterally loaded piles and methods for calculating lateral resistance and acceptable displacements are given. There also, the calculation methods of “Brinch Hansen, Broms Methods, p-y Curves, Subgrade Reaction Approach, Elastic Theory and Characteristic Load Methods” are explained. Fourth Chapter is about the principles of Lusas Finite Element Program, which also includes the parts and the preparation of Lusas data file. In the Fifth Chapter, the criterias that are used to specify Pile-Soil Profile, like element types, material properties and finite element mesh are stated. An analysis showing the soil conditions affecting the length and the diameter of a pile is provided in the same chapter. In the Sixth Chapter, the results achieved are submitted and they are presented by graphics.

Finally in the Seventh Chapter, an overall evaluation of the work is provided. According to the results, it is observed that the stiff layer near the ground surface increases the load capacity of a single pile appreciably in both soil types.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Bilim ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, çok katlı yüksek binaların, deniz kıyılarında limanların, yumuşak ve gevşek zeminlerde büyük viyadüklerin, açık denizlerde petrol platformlarının planlanıp boyutlandırılmasına gereksinim duyulmaktadır. Bu yapılarda çok büyük statik, dinamik düşey ve yatay yükler oluşmaktadır.

Temellere gelen bu düşey ve yatay yükler temellerin yüksekliğini, zemin mühendislik ekonomisi açısından temellerin güvenli ve ekonomik boyutlandırılmasının önemini arttırmaktadır. Bu bağlamda, temellerin güvenlik ve ekonomik ölçütler ile optimum olarak planlanması, projelendirilmesi ve boyutlandırılması gereksinimi, temellere mesnetlik yapan derin kazıkların güvenli ve ekonomik olarak boyutlandırılmasını, derin kazıkların tahkik edilmesini öncelikli hale getirmektedir.

Kazıklar, üst yapı yüklerinin yüzeysel temeller ile güvenilir biçimde zemine aktarılamadığı durumlarda, yükü taşıma gücü açısından daha kuvvetli olan tabakalara aktarmak için kullanılan yapı elemanlarıdır.

Yatay yükler etkisi altında olan derin kazıkların zemin mekaniği ve mühendislik ekonomisinin temel ilkeleri ve yöntemleri ile güvenli ve ekonomik projelendirilmesi, boyutlandırılması üzerinde uzun zamandan beri çalışılmakta ve gelecekte de çalışılmaya devam edilmesi beklenmektedir.

1.2. Amaç

Bu tezdeki amaç, farklı özellikteki zemin tabakalarında bulunan sekizgen kazığın LUSAS Sonlu Elemanlar Programı ile yatay yükler etkisi altındaki davranışlarının

genel karakterini belirleyerek derin kazıkların güvenlik tahkikini ve boyutlandırmasını yapmaktır.

1.3. Problemin ve Çözüm Yöntemlerinin Süreci

Bu çalışmada çözüm süreci; tabakalı gevşek ve yumuşak zeminlerde bulunan tekil kazığın sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenerek boyutlandırılması ve kazığın yatay yük altında davranışının belirlenmesidir.

Kazıkların kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki kabul edilebilir yük ve deplasman limitleri için geliştirilen çözüm yöntemlerinin en önemlileri; Brinch Hansen Yöntemi, Broms Yöntemi, p-y eğrileri, Yatak katsayısı Metodu, Elastik Teori, Karakteristik Yük Yöntemleri olarak sayılabilmektedir. Bu çözüm yöntemlerinin dışında bilgisayar teknolojilerinin gelişimlerine paralel olarak kazıkların sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünde APILE, PLAXIS, LUSAS vb. bilgisayar programları geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, farklı zemin şartlarında bulunan tek kazığın yatay yük etkisindeki davranışı LUSAS Sonlu Elemanlar programıyla incelenmiştir.

1.4. Yöntem

Kazığın yük ve deplasman limitlerinin ana karakterinin belirlenmesi için kullanılan sonlu elemanlar yöntemi aşağıdaki işlemleri içerir:

- Model 3 boyutlu çok küçük sonlu sayıda parçalara ayrılır.
- Sonlu sayıda parçalar sonlu elemanlar yöntemine bağlı LUSAS programı ile çözülür.
- Yük ve deplasman limitlerinin ana karakteri belirlenir.

2. KAZIKLI TEMELLER

2.1. Giriş

Kazıklar, üst yapı yüklerinin yüzeysel temeller ile güvenilir biçimde zemine aktarılamadığı durumlarda, yükü taşıma gücü açısından daha kuvvetli olan tabakalara aktarmak için kullanılan yapı elemanlarıdır.

Kazıklar, yeterli taşıma gücüne sahip zemin tabakalarının yüzeysel bir temel sistemi için ekonomik olmayacak kadar derinde bulunması, zemin profilindeki zemin tabakalarının fazla eğimli olması, büyük miktarda yatay yük aktaran yapılar olması, statik sistem bakımından farklı oturmalara karşı hassas yapılar bulunması durumlarında tercih edilirler.

Yüzeysel temellere göre, daha pahalı olmalarına karşın değişik nedenlerle kullanıldıkları bazı durumlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Üst yapıdan gelen düşey ve yatay yükleri sağlam tabakalara aktarmak,
- Yeraltı su seviyesine bağlı olarak oluşan dönmeleri ve yukarıya doğru olan hareketleri engellemek, kazıklar kullanarak kule temellerini desteklemek,
- Gevşek, kohezyonsuz zeminleri sıkıştırmak,
- Makine temelleri altındaki zeminin, titreşimlere ve sistemin doğal frekansına karşı sıkışmasını sağlamak,
- Sıkışabilirliği yüksek zeminlerde bulunan tekil temellerin veya temel sistemlerinin oturmalarını kontrol altına almak,
- Köprü ayaklarında, erozyon nedeniyle temel altının oyulmasına karşı güvenlik oluşturmak,
- Suyla ilişkiye geçince, kabaran veya ani çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerini aktif zon dışına aktarmak,
- Açık deniz yapılarında yatay yüke karşı kullanılması,
- Şev kaymalarını kontrol etmek,

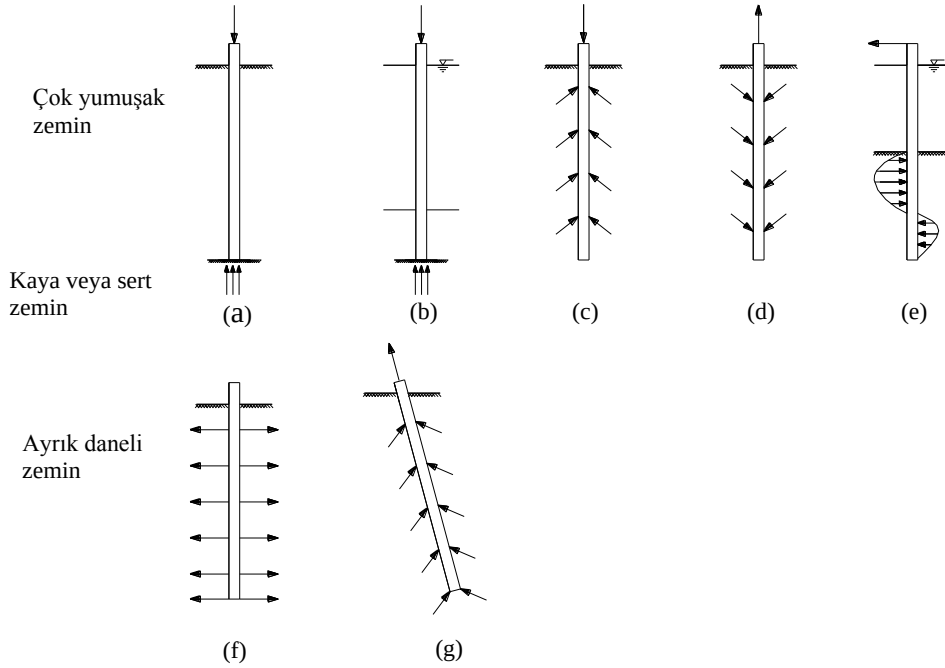
2.2. Kazıkların Sınıflandırılması

Bu çalışmada, kazıklar kullanım amaçlarına göre, imal edildikleri malzemelere göre, imalat ve zemin içine yerleştirilme yöntemine göre sınıflandırılmıştır [1].

2.2.1. Kullanım Amaçlarına Göre Kazıklar

Uç Kazıkları, üst yapıdan gelen yükleri su veya taşıma gücü açısından zayıf zemin tabakalarının altındaki sağlam, taşıma gücü yüksek zemin tabakalarına iletmek için kullanılan kazıklardır (Şekil 2.1 a,b).

Bir kazığın taşıma gücü, kazığın uç direnci ve sürtünme direnci olarak ayrılmaktadır. Kazıkta meydana gelen pozitif çevre sürtünmesi, yukarı doğru etkiyen sürtünme direncidir ve uç kazıklarda bu tip sürtünme direnci dikkate alınmamaktadır. Buna karşılık zeminden bir kazığı çekip çıkarmak istendiğinde karşılaşılan direnç negatif çevre direncidir ve bu direnç ise mutlaka dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.1 Kazıkların kullanımına göre sınıflandırılması (a,b) uç kazığı, (c) sürtünme kazığı, (d) çekme kazığı, (e) bağlama kazığı, (f) sıkıştırma kazığı, (g) eğik kazık

Sürtünme Kazıkları, üstyapıdan gelen yüklerin kazık çevresinde oluşan zemin sürtünmesi ile kısmen veya tamamen taşınması için kullanılırlar (Şekil 2.1 c).

Çekme Kazıkları, suyun kaldırma kuvvetine maruz yapıların veya üst yapıya gelen kuvvetler nedeniyle döndürme momentine maruz temel sistemlerinin tespitini sağlayan kazıklardır. Su altında yapılan tesisler veya toprağa gömülü tanklar bu tip kazıkların kullanıldığı yerlerdir (Şekil 2.1 d).

Yatay Yüklü Kazıklar, yatay kuvvetlere karşı kullanılan kazıklardır. Bu kazıklar, gemilerin iskeleyle çarpmasından, dalga kuvvetlerinden oluşan etkileri karşılamak için kullanılırlar.

Kompaksiyon Kazıkları ile zemin sıkılaştırılarak zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amaçlanır (Şekil 2.1 f).

Eğik kazıklar, hem yatay hem de düşey kuvveti taşıyabilmek için kullanılırlar. (Şekil 2.1g).

2.2.2. Yapımında Kullanılan Malzemelere Göre Kazıklar

Ahşap kazıklar, kolay taşınma, kolay işlenme ve uzun ömürlü olmaları bakımından kullanılırlar. Bu tip kazıklar, özellikle killi topraklarla iyi adezyon sağlarlar. Su seviyesi altında ömürleri uzundur. Ahşap kazıkları sert zeminlere, sıkı kum-çakıl tabakalara çakmak zordur, aşırı çakma halinde uçları veya gövdeleri çatlayabilir veya kırılabilir. Yaklaşık olarak 20-25 cm çaplı bir kazığın taşıyacağı yük 200-300 kN civarında olmaktadır [2].

Betonarme kazıklar, en çok uygulama alanı bulan kazık tipidir. Bu tip kazıklar çakma kazıklar ve yerinde dökme kazıklar olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Çakma kazıklar, fabrikada önceden hazırlanırlar ve zemine üzerlerine ağırlık düşürülerek çakılırlar. Bu kazıklar oldukça büyük yükleri yumuşak zemin tabakaları altındaki sağlam tabakalara iletmek için kullanılırlardır. Yerinde dökme kazıklar (fore kazıklar), kaplama borusu veya sondaj deliği içerisinde imal edilirler. Bu kazıklar, delme teknikleri kullanılarak veya boş bir boru çakılarak zeminde oluşturulan deliğin içine beton doldurulması ile imal edilen kazıklardır.

Çelik Kazıklar, hafif, nakliyesi kolay ve çok büyük yüklerin aktarılmasını sağlayabildiklerinden dolayı kullanışlıdır. Çelik kazıklar H ve I profil veya dairesel boru şeklinde olabilir. Bu kazıklar taşıyıcı tabakaların derinde olması durumunda yüksek taşıma kapasitesine sahip uç kazıkları olarak kullanılabilirler. Çelik kazıklar açık veya kapalı uçlu olabilir. Açık uçlu çelik kazıklar çakılmaya karşı daha az direnç gösterirler. Boru kazıkların içleri çakımdan sonra betonla doldurulur ve bu

işlem kazığının rijitliğinin artmasını sağlar. Çelik kazıklar, yeraltı suyunun zararlı madde içermesi halinde ve deniz içinde çabuk çürürler. Çürüme oksijenin varlığından kaynaklandığı için bu kazıkların ömrü, kumlu zeminlerde uzun olmamakta, sert ve katı killerde ise daha uzun olmaktadır.

Kompozit Kazıklar, birden fazla farklı malzeme kullanılarak yapılan kazıklardır. Genellikle bu tip kazıkların alt kısmı ahşap, üst kısmı da beton veya çelikten oluşur. Ahşap kısım, çürümeden etkilenmeyeceği derinliğe kadar çakılır, üst kısım beton olarak, şartlara göre, gerektiğinde kaplama borusu yerinde bırakılarak yapılır. Bu tip kazıkların uygulama alanı geniş değildir.

2.2.3. Zemin İçine Yerleştirilme Tarzına Göre Kazıklar

Kazıklar, zemin içinde neden oldukları sıkışma ve ötelenme yönünden, deplasman kazıkları ve deplasman yaratmayan kazıklar olarak sınıflandırılabilirler.

Deplasman kazıkları, zemin içine çakılırken yerini aldıkları zemini yana doğru iterek yer değiştirmeye sebep olurlar. Çakma işlemi esnasında kazığın zemin içine itilmesi nedeni ile yanlara doğru sıkışan zeminde bir hacim değişmesi söz konusu olur. Bu tip kazık kategorisinde, çakma kazıklar, H kesitli çelik kazıklar bulunmaktadır.

Deplasman yaratmayan kazıklar, zeminin önce kazılarak bir boşluk oluşturulması ve bu boşluğun betonlanmasıyla oluşan kazıklardır. Burada kazığın içine yerleştirileceği zemin önceden kazıldığı için zeminde ötelenme veya sıkışma meydana gelmez.

2.3. Kazık Tipi Seçimini Belirleyen Faktörler

Kazık cinsinin belirlenmesi için yapının cinsi, bulunduğu yer, zemin şartları ve ekonomi önemli olmaktadır [1].

Burada kazık türlerinin olumlu ve olumsuz yönleri anlatılmıştır.

Betonarme çakma kazıklar, betonu önceden dökülerek, zemine çakılmak suretiyle yerleştirilen kazıklardır. Bu kazık tipinin olumlu ve olumsuz yanları aşağıdadır.

Olumlu Yanları:

- Yeraltı suyunun varlığı kazık yapım işini etkilemez.
- Kazık malzemesinin kalitesi önceden belirlenebilir.
- Kazık boyu istenilen boya göre ayarlanabilir.

Olumsuz Yanları:

- Kazık boyları, arazide zemin koşullarına göre ayarlanamaz.
- Büyük çaplarda, çakma zorlukları yaşanmaktadır.
- Çakma sırasında çevrede kabarma ve zor çakma koşulları altında kazıkta hasar olasılığı görülmektedir.

Zeminde oluşturulan bir deliğin betonlanmasıyla oluşturulan fore kazıklar, yurdumuzda çok yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu kazık tipinin olumlu ve olumsuz yanları aşağıdadır.

Olumlu Yanları,

- Fore kazıklar yapım sürecinde temel kazısı yapılmadan önce de delinip yapılabilirler. Bu işlem inşaat işine hız kazandırır.
- Değişken zemin koşullarına göre boyutları ayarlanabilir.
- Zemin içinde çakma kazıkların çakılmasına engel olan taş ve bloklar, fore kazık için delme işlemi yapılırken uygun teçhizat kullanılarak geçilebilir.
- İnşa sırasında çevrede önemli titreşim, sarsıntı yaratmazlar. Bu nitelik, şehir içinde çevre yapıların bu tür etkilere karşı hassas olduğu durumlarda büyük bir avantajdır.
- Kazıklar yerinde yapıldığı için, gereken malzeme kum, çakıl, su, çimento, demir olup, şantiyede bunların elde edilmesi kolaydır.
- Gerektiğinde kazık dibinde enjeksiyon veya aşırı tokmıklama ile genişletilmiş bir bölge (soğan) oluşturularak taşıma gücü artırılabilir. Bu işlem kazığın çekmeye karşı dayanımını da artırır.
- Sondaj deliğinden çıkan zeminin incelenmesi ile istenilen derinliğe inildiği ve istenilen sağlam tabakaya erişilip erişilmediği kolayca kontrol edilebilir.
- Fore kazıkların boyu delme sırasında çıkarılıp incelenen zeminin niteliği göz önüne alınarak kolayca ayarlanabilir.

Olumsuz Yanlar:

- Beklenmeyen zemin şartları ile karşılaşılması halinde proje süresinde önemli gecikmeler olabilir. Bu nedenle, fore kazıkların yapılacağı alanda çok detaylı bir zemin etüdü yapılmış olmalıdır.
- Yeraltı suyunun varlığı halinde, yeraltı suyu beton kalitesini etkileyebilir. Özellikle yeraltı suyu akımı olması halinde, kazık deliği çevresindeki

zeminde yıkıntı veya döküntü olabilir. Kazığın ucunun basacağı zeminde kaynama meydana gelerek bu zemini gevşetebilir.

Sonuç olarak kazık tipi seçimini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir [3]:

- a) Her kazık için belirlenen taşıma kapasitesi
- b) Karşılaştırılmalı maliyet
- c) İstenildiği taktirde kazık adetini arttırabilme
- d) Kazık hazırlama hızı ve pratikliği
- e) İnşaat alanına girebilme
- f) İstenilen uzunlukta hazırlanabilme
- g) Eldeki malzemeler ve bu malzemelerin kolay bulunabilmesi
- h) Sondaj aletlerinin mevcudiyeti
- ı) Çakma şartlarına ve yöntemlerine en uygun kazıklar
- i) Zeminin en az örselenmesi
- j) Zeminde asit veya diğer zararlı maddeler bulunması
- k) Eğik kazıkların bir açıda çakılabilme kolaylığı
- l) Eğilme için direnç veya esneklik
- m) Su seviyesinin altında veya üzerinde çakabilme
- n) Mühendisin geçmişteki deneyimleri ile sahip olduğu kişisel tercih hakkı

3. YATAY YÜKLÜ TEK DÜŞEY KAZIĞIN ANALİZİ

Kazıklara düşey yükün yanı sıra rüzgar, deprem, toprak basıncı, gemi darbe ve çekme kuvvetleri, dalga çarpması gibi nedenlerden dolayı yanal yükler etki etmektedir. Bir kazıklı temelde müsaade edilebilecek yanal yük, kazık cinsine, zemin cinsine, zemin durumuna ve kazık başlığının bağlanma durumuna bağlıdır.

Yatay yüklü kazıkların çözümü için hesap yöntemleri iki grupta incelenmektedir. Bunlar, nihai yanal direncin hesabını içeren metotlar ve çalışma yükünde kabul edilebilir ötelenmenin hesabını içeren yöntemlerdir.

Bu bölümde, kazıklara etkiyen yatay yükler ve bu yükler etkisindeki düşey kazıkların davranışı anlatılmış; yatay yük etkisindeki düşey kazıkların hesap metodları incelenmiştir.

3.1. Kazıklara Etkiyen Yatay Yükler

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

- Rüzgar yükleri,
- Deprem yükleri,
- Toprak basınçları,
- Gemi çarpma ve bağlama kuvvetleri,
- Dalga kuvvetleri,
- Kolonlardaki düşey eksantrik yükler,
- Akarsu akıntılarının köprü ayaklarında oluşturduğu yatay kuvvetler,
- Elektrik direklerindeki kablo kuvvetleri,
- Köprülerde araçların fren ve ilerleme hareketleri,

Kazıklara etkiyen yükler, aktif ve pasif yükler olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif yükler, zamanla değişen ve hareketli yüklerdir. Rüzgar, dalga, trafik, gemi çarpma ve gemi bağlama yükleri aktif yüklerdir. Toprak basıncı ve kemer köprülerdeki ölü yükler ise pasif yüklerdir.

Üstyapı yükünün yatay bileşeninin küçük olduğu durumlarda, yatay yükler düşey kazıklarla güvenle taşınabilmektedir. Bununla birlikte rıhtım ve dalgakıranların kazıkları, köprü ayaklarının kazıklı temelleri, petrol arama kule ve vinçlerinin kazıklı temelleri, yüksek baca yapılarının temelleri ve dayanma yapıları gibi yapılarının kazıklı temelleri oldukça yüksek mertebelerdeki yatay yük bileşenleri etkisinde kalabilmektedir. Bu yükler göz önüne alınmaksızın tasarlanıp inşa edilen düşey kazıkların, üst yapı yüklerini güvenli şekilde taşımaları olanaksızdır. Bu durumda, yatay yükler göz önüne alınarak tasarlanan düşey kazıklar veya bu kazıkların da taşıma gücü açısından yetersiz kaldığı durumlarda eğik kazıklar inşa edilerek yüksek yatay taşıma gücü sağlanabilmektedir.

Dayanma yapılarında toprak basıncı her zaman aynı yönde, duvar arkasından duvar yönüne etkir. Duvar altına inşa edilecek düşey kazıklar, hem duvar ağırlığını hem de yatay kuvvetleri karşılayacak şekilde tasarlanır. Köprü ayaklarında fren ve araç trafiğinin çekme kuvveti yatay yüke neden olmakta ve köprü ayaklarının derin olduğu durumlarda su akıntısı yönünde ek yükler söz konusu olmaktadır. Deniz yapılarında gemi çarpma ve dalga kuvvetleri de önemli yatay yükler oluşturmaktadır.

3.2. Yatay Yükler Altındaki Düşey Kazıkların Davranış Esasları

Bir kazıklı temelde izin verilebilecek yatay yük, kazık cinsine, zemin durumuna ve kazık başlığının kazığa bağlanma şekline bağlıdır.

Yatay yüklü tekil kazığın davranışını belirlemek için, M_g , moment, Q_g , kesme kuvveti, Q_v , eksenel kuvvet etkisindeki elastik dikey kazık incelenmiştir. Buna göre, Şekil 3.1' de kazığın dış kuvvetler etkisi ile deformasyonu ve zemin direnci dağılımı görülmektedir. B genişlikli kazık boyunca herhangi bir x noktasındaki zemin direnci P, o noktadaki deformasyon y, ile orantılı olarak alınır ve k yatak katsayısı olmak üzere, $P = k.y$ olarak ifade edilir. Zemin reaksiyonlarının dağılımı, uygulanan yüke

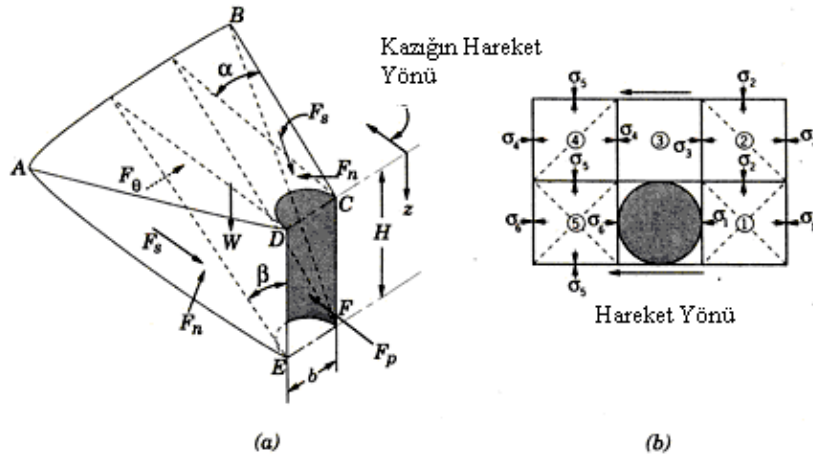
ve zeminin deformasyon karakteristiklerine bağlıdır. Statik denge koşuluyla uygulanan tüm yatay kuvvetler, yatay zemin reaksiyonuyla karşılanmaktadır [4].

Şekil 3.1 Kazığa etkiyen yükler a) zemin direnci ve b) kazık deformasyonu [4]

Şekil 3.1’ de kazığın eğilmesinden dolayı oluşan deformasyon görülmektedir. Kazığın zemine gömülü kısmı boyunca herhangi bir noktaya göre moment alındığında, kazıkta oluşan yanıl deformasyonların, kazığa etkiyen düşey kuvvette eksantriste oluşturduğunu göstermiştir. Bu eksantristeden dolayı kazığa Q_g ve M_g ’

den oluşan momente ek olarak Q_v e momenti de etkimektedir. Bunlara göre, eksenel yükün kazıkta ek deformasyona, dönmeye, kesmeye neden olduğu sonucu çıkarılabilir. Zemin yüzeyi yakınında, yatay yüklü tekil kazık, zemini iki boyutlu pasif ve aktif basıncın meydana getirdiği değişimden farklı bir değişime maruz bırakır. Yatay yüklü kazığın deplasmanına karşı koyan maksimum birim zemin direnci, iki boyutlu durum için hesaplanan maksimum birim pasif dirençten daha büyüktür. Zemin yüzeyinden $3B$ veya daha büyük derinlikte yatay yüklü kazık, derin temelin taşıma gücünde olduğu gibi zemini etkiler. Zemin yüzeyinden yaklaşık $3B$ derinlikten itibaren zeminin yatay yüklere karşı oluşan direnci pasif toprak basıncından daha büyük değerlere ulaşır [5].

Reese ve diğ., yatay yüklü kazıkların analizinde, zemin yüzeyi ve zemin yüzeyinden daha derinde olmak üzere iki durum göz önüne almışlardır [6]. Deney sonuçlarında, zemin yüzeyine yakın bölgelerde plastik deformasyonlar olduğu gözlenmiştir. Zemin yüzeyinden daha derinlerde plastikten elastik zemin davranışına geçen bir geçiş söz konusudur. Şekil 3.2’ de gösterilen alanlar zemin dirençlerinin bulunmasında kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Yatay yüklü kazık etrafında varsayılan göçme yüzeyleri a) zemin yüzeyine yakın b) zemin yüzünden derinde [6]

Sadece rijit ve çok kısa kazıklarda, tam bir plastik davranış görülebilir, bu yüzden normal kazıklarda elastik ve plastik zemin direnci kombinasyonları göz önünde tutulmalıdır.

Kazık zemin arasındaki etkileşimde en önemli etkenlerden birisi kazık uzunluğudur. Kazık uzunluğu, kazık deplasman mertebesi, göçme biçiminin dönme, ötelenme

veya kırılma şeklinde olmasını etkiler. Uzun ve kısa kazıkların yük altında davranışlarının farklılık göstermesi nedeniyle, kazık uzunluğu önemli bir kriterdir. Ancak belirli bir kazık derinliğinden sonra, kazık boyunun arttırılmasının, kırılmaya neden olan yüke ihmal edilebilecek bir etkisinin oluşu belirlenmiştir [5] . Normal boyutlu kazıklarda maksimum moment zemin yüzeyinden yaklaşık 0.60-0.90 m derinlikte meydana gelmekte, ancak çamur gibi yumuşak zeminlerde bu derinlik 4.5 m 'ye çıkmaktadır. Sabit başlıklı kazıklarda meydana gelen deplasman değerlerinin, serbest başlıklı kazıklara göre üçte biri veya yarısı değerlerinde olduğu görülmüştür. Eğer zemin yüzeyine yakın sert zemin tabakasının altında yumuşak zemin tabakası yer alıyorsa, sert zemin tabakasının yararlı etkileri kazık deplasmanlarını azaltmaktadır.

Killi zeminlerde, tekrarlı yüklere maruz kalan kazıklar, zemin yüzeyine yakın bölgelerde zemin direncinin azalmasına neden olmaktadır. Tekrarlı yükler altında bozulan zeminde, yüklemeye ara verildiğinde, kilin mukavemetinde bir artış gözlenir, bu etki kilin konsolidasyonuna ve tiksotropik özelliğine bağlıdır. Kilde yer alan kazıkların çakılmadan sonra yanal dirençlerinin arttığı görülmüştür [5].

Kumlarda, tekrarlı yük altındaki kazıklarda meydana gelen deplasman, yükün ilk uygulandığı andaki deplasmanın 2 katına çıkabilir. Gevşek kumda, tekrarlı yükler kumun sıkılığını artırır ve deformasyondaki artışları azaltabilir.

Yatay yüklü kazığın deformasyon ve nihai yanal direnci, yarı rijit eleman ile kısmi elastik, kısmi plastik davranan zemin arasındaki etkileşimi içeren bir durumdur [4].

Serbest başlıklı kazık durumunda, kazık başındaki yatay yük, ilk olarak yüzeye yakın zemin tarafından taşınır. Daha düşük yüklemelerde, zemin elastik olarak sıkışır fakat zeminin hareketi, daha derinlerde basıncın bir kısmının kazıktan zemine iletilmesine olanak verir. Daha büyük yüklemelerde ise, zemin plastik deformasyona uğrar ve yükünü daha derinlere iletir. Uzunluk / genişlik oranı 10 –12' den daha az olan serbest başlıklı rijit kısa kazıklar yüklendiğinde, kazık dönme eğilimi gösterir ve kazık arkasında pasif direnç oluşur. Uzun kazıklarda ise göçme mekanizması farklıdır; kazık alt kısımlarında oluşan pasif direnç oldukça büyük olacağından kazık dönme eğilimi göstermez. Göçme, kazığın maksimum eğilme momentinin oluştuğu noktadan kırılmasıyla meydana gelir. Analiz amaçlı olarak, bu noktada kesmeyi iletebilen plastik mafsalları oluştuğu farz edilir. Rijit başlıklı uzun kazık durumunda,

yüksek gerilmeler başlığın tutulu olduğu noktada meydana gelir ve kırılma bu noktada oluşur.

Yatay yüklü kazığın direnci ile ilgili birçok araştırma yapılmış ancak her zemine ve her kazık tipine uygulanabilen basit bir hesap yöntemi elde edilememiştir. Kazık direncini etkileyen birçok faktör olduğu bilinmektedir. Bunlardan en önemlisi kazığın rijitliğidir. Bu özellik kazığın deplasmanını etkiler ve göçme mekanizmasının kısa kazık gibi dönerek mi, yoksa uzun fleksibl kazık gibi eğilerek mi oluşacağını belirler. Yük çeşidi olan, desteklenmiş yükler (istinat duvarlarından aktarılan yanıl basınç), dalgalı, periyodik olan yükler (pistonlu makinelerden gelen yükler) ve titreşimli yükler (köprü üstündeki trafikten gelen yükler), zeminin deformasyon derecesinde etkili olur. Dış faktörler olan kazık çevresindeki oyulma, kilin mevsimsel büzülmesi, sıkı derinliklerde kazık direncini etkilemektedir [7].

Bir araştırmada, kazı ile meydana gelen zemin hareketi sonucunda kaolin kilindeki tekil kazığın davranışı, santrifüj model testleri ile incelenmiştir [8]. İstinat duvarı arkasında bulunan kazıklar üzerinde yapılan testler sonucunda maksimum eğilme momenti ve kazık deplasmanları, duvarın göçmeye başladığı anda meydana geldiği gözlenmiştir. O andan sonra kazık eğilme momenti ve kazık deplasmanlarının azaldığı belirlenmiştir. Kum ve kil için yapılan her iki testte de, kazığın eğilme momentinin kazı derinliğiyle beraber arttığı görülmüştür. Shen, duvarın göçmesinden sonra, kumda bulunan kazığın maksimum eğilme momentinin büyüklüğünün değişmediğini göstermiştir. Kilde ise; maksimum eğilme momenti, duvarın göçmesinden sonra önemli derecede azalmaktadır. Bunun nedeni, kazı işlemi esnasında kilde ortaya çıkan negatif boşluk suyu basıncının dağılmasıdır [8].

Yapılan santrifüj model testleri sonucunda eğilme momentleri, kazının başlamasıyla beraber, duvarın göçtüğü ana kadar arttığı belirlenmiştir. Kazı işlemi sona erdikten sonra, fazla boşluk suyu basıncının dağılması ile maksimum moment azalmaktadır. Bu zamana bağlı oluşan bir etkidir. Maksimum eğilme momenti, kazık ile duvar arasındaki mesafenin artmasıyla azalmaktadır [8] .

Yatay yüklü kazık tasarımında göz önünde bulundurulması gereken temel faktörler aşağıda sıralanmıştır:

1. Yüzeye yakın zemin profili (10D' yi geçmeyen derinlikler) kazığın yanıl yük altındaki deformasyonunu etkiler.

2. Kazık başlığı durumu (sabit başlık – serbest başlık), kazığın deformasyonunu etkilemektedir. Kazığın başlığa sabitlenme derecesi önemli bir tasarım parametresidir. Buna göre, kazık başlığı dönmeye göre sabitlenerek, deformasyonu ve momenti azaltması sağlanmalıdır.
3. Tekrarlı yükler, deformasyonların ve eğilme momentinin artmasına neden olur.
4. Yükleme doğrultusunda kazık aralıkları bırakmak önemli bir etkidir. Artan kazık aralıkları kazık performansını arttırmaktadır.
5. Beton kazıklarda, düşey yüklerin eğilme gerilmelerine olan olumlu etkileri incelenmelidir. [9]

3.3. Yatay Yüklü Kazıklarda Kabul Edilebilir Yük ve Deplasman Limitleri

Kazığın başlık düzeyinde izin verilebilecek yatay yerdeğiştirmesi kabaca, binalarda 6 mm, geniş binalarda 12 mm alınabilir. İzin verilebilecek yatay yükler, McNulty tarafından deneylere dayanılarak aşağıdaki Tablo 3.1’ de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Düşey Kazıklar İçin İzin Verilebilir Yatay Yükler [10]

Kazık Cinsi	Kazık Başlığı	Zemin Cinsi	İzin verilebilir yük(t)
Ahşap (30 cm çapında)	Serbest Başlı	Kum	0,7
		Orta Kil	0,7
	Rijit Başlıklı	Kum	2,0
		Orta Kil	1,8
Beton (40 cm çapında)	Serbest Başlı Veya Rijit Başlı	Orta Kum	3,2
		İnce Kum	2,5
		Orta Kil	2,3

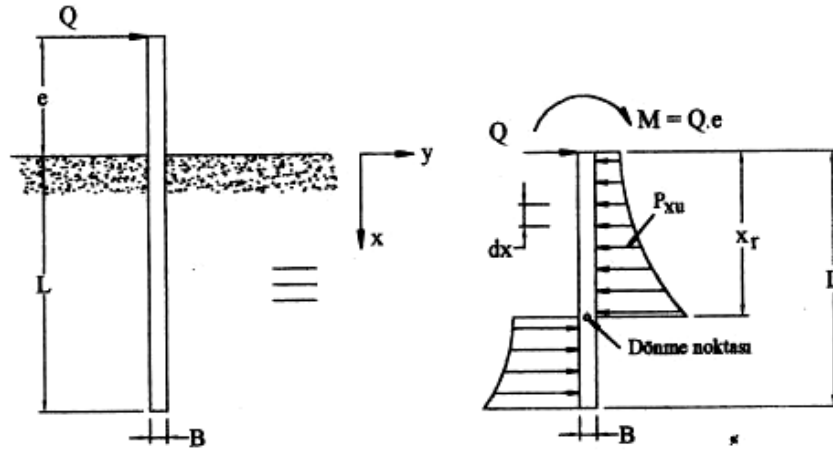
3.4. Nihai Direncinin Hesaplanma Yöntemleri

Serbest başlıklı bir kazığın en üst noktasına etkiyen yatay yük ve momenti karşılamak için zeminde direnç oluşmaktadır. Şekil 3.1’ de bu mekanizma görülmektedir. Eğer kazık uzunluğu boyunca nihai zemin direncinin dağılımı bulunabilirse, yatay yükler ve moment dengesinde, x_r , dönme noktasının derinliği ve Q_u , nihai yanal direnç bulunabilir.

Bu kavramlar, düşey kazıkların nihai yanal direncinin bulunması için kullanılan Brinch Hansen ve Broms metodunda da yer almaktadır [11], [12], [13].

3.4.1. Brinch Hansen Yöntemi

Bu metot c- ϕ zeminlerde, toprak basıncı teorisine dayanarak kısa rijit kazıklar için geliştirilmiştir. Bu yöntem, hem üniform hem de tabakalı zeminler için kullanılabilir. Kazığın dönme merkezi, kazığa etkiyen tüm kuvvetlerin kazığın dönme noktasına göre oluşturdukları momentlerin sıfıra eşitlenmesi ile bulunur. Yatay yükten x_r uzaklığındaki dönme merkezi için önce varsayımda bulunulur. Dönme merkezinin kesin yeri için yatay yükün bulunduğu noktaya göre toplam momentin sıfır olması şartı gereklidir. x_r 'nin bulunması ile bu noktaya göre alınan toplam momentin sıfır olması koşuluyla göçme yükü bulunur. Bu yöntemin olumsuz yanları, yalnız kısa kazıklara uygulanabilmesi ve dönme noktasının belirlenmesinde deneme yanılma yönteminin kullanılmasıdır [11].



Şekil 3.3 Kazıkta oluşan zemin direnci [4]

Herhangi bir derinlikte meydana gelen nihai yanal direnç,

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

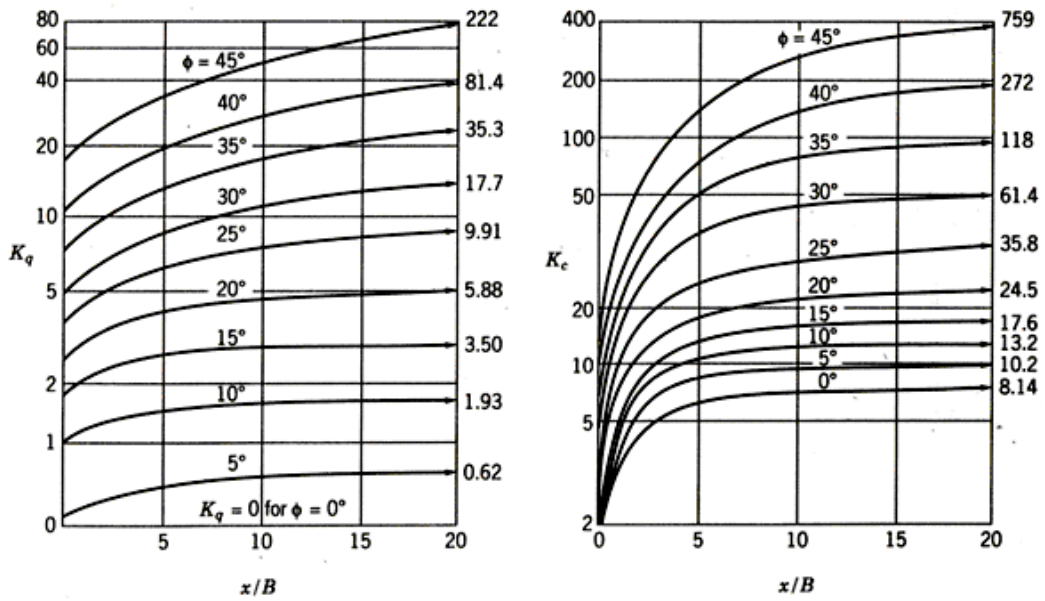
olarak ifade edilir. Burada σ_{vx}' , düşey efektif gerilme, c kohezyon, K_c ve K_q içsel sürtünme açısı ϕ' ye ve x/D oranına bağlı olarak Şekil 3.4' den elde edilen katsayılarıdır.

3.4.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Brinch Hansen Yöntemi

Kohezyonsuz zeminlerde $c=0$ olduğundan dolayı (3.1) bağıntısına göre zemin tepkisi,

$$P_{xu} = \sigma_{vx} K_q \quad (3.2)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada σ_{vx} , x derinliğinde efektif düşey gerilmeyi, K_q ise Şekil 3.4' den alınmış değerlerdir.



Şekil 3.4 K_q ve K_c katsayıları [4]

3.4.1.2. Kohezyonlu zeminlerde Brinch Hansen Yöntemi

Herhangi bir derinlikte meydana gelen nihai direnç (3.3) bağıntısında verilmektedir. Kohezyonlu zeminler için $\phi=0$ ve $c=c_u$ olduğundan ve Şekil 3.4' e göre $\phi = 0$ için $K_q = 0$ olarak verildiği için nihai zemin direnci,

$$p_{xu} = c_u K_c \quad (3.3)$$

olarak bulunur. Zemin direncinin hesaplanması için ,

1. Zemin profili belirli sayıda tabakalara bölünür.
2. Her tabaka için K_c ve P_{xu} hesaplanır.
3. Dönmenin olacağı derinlik tahmin edilir ve bu noktaya göre moment alınır.

4. Alınan bu moment değeri 0 veya 0'a yakın bir değer ise x_r noktasının yeri doğru alınmıştır. Eğer değilse momentin 0 olduğu nokta bulunana kadar önceki adımlar tekrarlanır.
5. Bu nokta bulunduktan sonra o noktaya göre moment alınarak Q_u bulunur.

3.4.2. Broms Yöntemi

Bu yöntem kısa ve uzun kazıklarda, serbest ve rijit başlıklı kazıklarda, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilmekte, $c-\phi$ ve tabakalı zeminlerde uygulanmamaktadır [12], [13].

Kazıklar bu yöntemde kısa rijit kazıklar ve uzun elastik kazıklar diye iki grupta ele alınmaktadır. Rijitlik faktörleri olan T ve R aşağıdaki bağıntılarla bulunmaktadır.

$$\text{Kohezyonsuz Zeminler için: } T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (3.4)$$

$$\text{Kohezyonlu Zeminler İçin: } R = \left(\frac{EI}{k_h} \right)^{1/4} \quad (3.5)$$

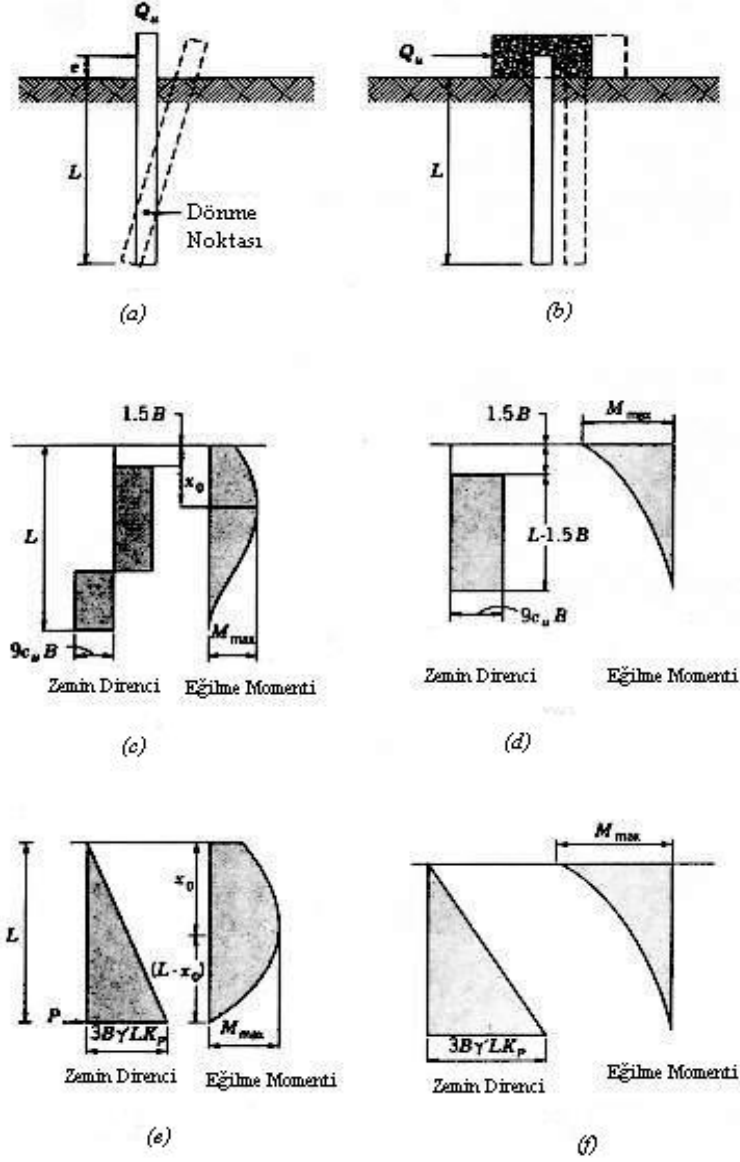
Burada, E kazığın elastisite modülü, I kazık kesitinin atalet modeli, k_h derinlikle artan yatay yatak katsayısı, n_h yatay yatak katsayısı sabitidir.

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

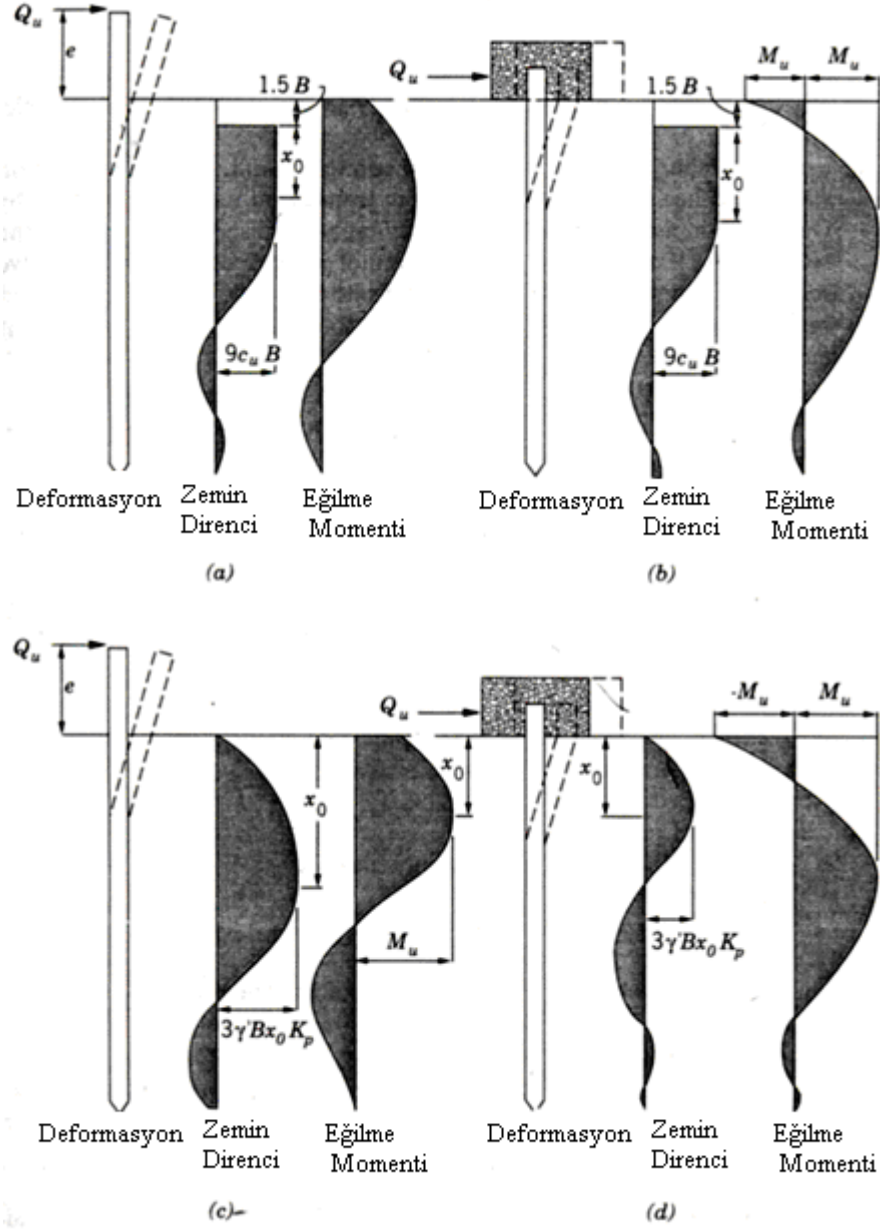
Kısa rijit kazıkların deformasyon durumları, kazık başlıklarının durumuna göre değişmektedir. Serbest başlıklı kazıklar bir nokta etrafında dönme hareketi yaparken, rijit başlıklı kazıklar ise yükün uygulandığı yöne doğru ötelenme yapar. Bu her iki durumda hareket biçimlerinin farklılığı nedeniyle kazık boyunca basıncın dağılımı Şekil 3.5' de görüldüğü gibi birbirinden farklı olur.

Uzun kazıklarda ise kazığın alt kısımlarında ortaya çıkan yüksek pasif gerilme nedeniyle kazıkta dönme veya ötelenme meydana gelmez. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi yatay yük altındaki serbest başlı bir kazığın tek bir merkez etrafında tüm olarak dönmesi zorlaşır ve kazıkta maksimum momentin oluştuğu yerde moment dayanımına varıldığında plastik mafsall oluşur. Kazık başının rijit olması durumunda

ise kazık başı kesitindeki negatif momentin kazığın moment dayanımına varması ile kazık aynı şekilde kırılmakta ve kazık başında plastik mafsall oluşmaktadır.



Şekil 3.5 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 [4]



Şekil 3.6 Uzun 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 [4]

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

$$P = 3B\sigma_v' K_p = 3\gamma'LBK_p \quad (3.6)$$

P, birim zemin direnci, σ_v' , efektif düşey gerilme, γ' , zeminin efektif hacim ağırlığı, L, zemin içindeki kazık boyu, B, kazık genişliği, K_p , $(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$, Rankine toprak basıncı katsayısı, ϕ' , efektif içsel sürtünme açısıdır.

Matlock ve Reese, kohezyonlu zeminlerde bulunan kazıklarda nihai zemin direncinin zemin yüzeyinde $2c_uB'$ den $3c_uB'$ ye, zemin yüzeyinden 2d-3d derinliğinde $8c_uB'$ den $12c_uB'$ ye kadar arttığını varsaymışlardır [14], [15].

Broms, kohezyonlu zemindeki kısa kazığın yatay yük altındaki nihai taşıma gücünü hesaplayabilmek için basitleştirilmiş bir zemin profilinde bir limit basınç dağılımını benimsemiştir. Zemin direnci kazık başından itibaren 1.5B derinliğine kadar sıfır ve bu derinlikten itibaren kazık tabanına kadar sabit şekilde $9c_uB$ olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.5. c, d) [12].

Uzun kazıklarda, kohezyonsuz zeminlerde (3.6) bağıntısındaki L teriminin yerine x_0 terimi gelir. Kohezyonlu zeminlerde $9c_uB$ değeri $(1.5B+x_0)$ derinliğinden itibaren azalmaya başlar.

3.4.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Broms Yöntemi

Bu yöntemde kısa rijit ve uzun elastik kazıklar ayrı ayrı incelenmiş, kazık başlığının serbest veya rijit olması durumlarına göre farklı çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bu bölümde bu yöntemler incelenecektir [13].

Serbest Başlıklı Kısa Kazıklar

Kısa kazıklarda ($L/T \leq 2$) oluşabilecek deformasyon durumu, eğilme momenti ve zemin direnci Şekil 3.5 a, e' de verilmiştir. Serbest başlıklı kısa kazıklarda dönme noktası kazık alt tabanına yakın olduğu için, kazığın alt bölgesinde oluşan büyük toprak basınçları tekil yük olarak alınabilir (Şekil 3.5 e).

Kazığın tabanına göre moment alındığında,

$$Q_u = \frac{0.5\gamma' L^3 BK_p}{(e + L)} \quad (3.7)$$

bağıntısı elde edilir. Şekil 3.5' den görüldüğü gibi maksimum moment (M_{maks}), x_0 derinliğinde oluşmaktadır. Bu derinlikte kesme kuvveti sıfır olacağından,

$$Q_u = 1.5\gamma' Bx_0^2 K_p \quad (3.8)$$

olur. Bu bağıntıdan,

$$x_0 = 0.82 \sqrt{\frac{E I^{0.5} Q_u}{\gamma' B K_p}} \quad (3.9)$$

çıkarılabilir. Maksimum moment ise,

$$M_{maks} = Q_u e + 1.5x_0 \zeta \quad (3.10)$$

olarak ifade edilebilir.

Kısa kazıklarla ilgili çözümlerin kolaylıkla yapılmasını sağlayan L/B ve $Q_u/K_p B \gamma'$ boyutsuz terimleri ile oluşturulan eğriler Şekil 3.7 a' da görülmektedir.

Serbest Başlıklı Uzun Kazıklar

Uzun kazıklarda ($L/T > 4$) oluşan deformasyon durumu, eğilme momenti ve zemin direnci kohezyonsuz zemin için Şekil 3.6 c' de verilmiştir. Serbest başlıklı uzun kazık için, maksimum eğilme momenti, kesme kuvvetinin sıfır olduğu, x_0 derinliğinde meydana geleceğinden dolayı kısa kazıklardakine benzer şekilde x_0 , (3.9) bağıntısından alınabilir. Buna göre, M_{maks} ve Q_u ,

$$M_{maks} = Q_u e + 0.67x_0 \zeta \quad (3.11)$$

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \sqrt{\frac{E I^{0.5} Q_u}{\gamma' B K_p}}} \quad (3.12)$$

bağıntılarıyla bulunmaktadır. Burada M_u , kazığın taşıyabileceği maksimum momenttir. Q_u değeri ayrıca Şekil 3.7 b' de kullanılarak da bulunabilir.

Şekil 3.7 Kohezyonsuz zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu a) kısa kazıklar b) uzun kazıklar [4]

Rijit Başlıklı Kısa Kazıklar

Kısa kazıklarda, deformasyon durumu, Şekil 3.5 b' de, zemin direnci dağılımı ve eğilme momenti Şekil 3.5 f' deki gibidir [13]. Bu tip kazıklar bulunduğu ilk konumunu koruyarak dönmeden ötelenmektedirler.

$$Q_u = 1.5\gamma' L^2 BK_p \quad (3.13)$$

$$M_{maks} = \gamma' L^3 BK_p \quad (3.14)$$

Rijit Başlıklı Uzun Kazıklar

Bu tür kazıklarda oluşan deformasyon durumu, zemin direnci ve moment Şekil 3.6' da görülmektedir. Q_u ve M_{maks} ,

$$Q_u = \frac{2 M_u}{e + 0.67 x_0} \quad (3.15)$$

$$x_0 = 0.82 \sqrt{\frac{E I}{B K_p}} \quad (3.16)$$

$$M_{maks} = Q_u (e + 0.67 x_0) \quad (3.17)$$

olarak ifade edilir. Burada x_0 , maksimum momentin meydana geldiği derinliktir. Şekil 3.7' de verilen grafik çözümler kohezyonsuz zeminlerdeki kısa ve uzun rijit başlıklı kazıklar için de geçerlidir.

3.4.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Broms Yöntemi

Serbest Başlıklı Kısa Kazık

$L/R \leq 2$ olan kazıkların moment, zemin direnci tahmini deformasyon yüzeyleri Şekil 3.5 a ve Şekil 3.5 c' de verilmektedir. Kısa kazıklarda yatay taşıma kapasitesi kazığın yanal zemin direncine bağlıdır. Zemin yüzeyinden $1.5B + x_0$ derinliğinde maksimum momentin oluştuğu noktaya göre moment alınır,

$$M_{maks} = Q_u (e + 1.5B + 0.5x_0) \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. Kazığın $(L - x_0)$ uzunluğundaki kısmı, zeminin eğilme momentine karşı koymaya çalışacağından,

$$M_{maks} = 2.25 B c_u (L - x_0)^2 \quad (3.19)$$

$$x_0 = \frac{Q_u}{9 c_u B} \quad (3.20)$$

bağıntıları elde edilir. Q_u bu bağıntılarla ve ayrıca Şekil 3.8 a' da verilen L / B ve e/B oranlarının bilinmesiyle elde edilen $Q_u / c_u B^2$ ile bulunabilir.

Şekil 3.8. Kohezyonlu zeminlerde son taşıma gücünün bulunuşu a) kısa kazıklar
b) uzun kazıklar [4]

Serbest Başlıklı Uzun Kazıklar

$L / R \geq 3.5$ olan uzun kazıkların yatay kapasitesi kazık kapasitesinin akma momentine bağlıdır. Bu nedenle hesaplarda akma momentini esas almak gerekir. Burada M_{akma} bir kesitin akma momentidir. Bir kesitin her noktasında gerilmenin malzemenin akma gerilmesi σ_a ' a erişmesi halinde,

$$M_{akma} = \sigma_a W \quad (3.21)$$

olarak hesaplanır. Burada W kazığının mukavemet momentidir.

Uzun kazıkların moment, zemin direnci tahmini deformasyon yüzeyleri Şekil 3.6 a' da verilmektedir. (3.18) ve (3.20) bağıntıları uzun kazıklar için de geçerlidir. Şekil 3.8 b' de verilen grafik çözüm kullanılarak da Q_u bulunabilir.

Rijit Başlıklı Kısa Kazıklar

Bu tip kazıkların deformasyon durumu, zemin direnci ve eğilme momenti dağılımı Şekil 3.5 b ve 3.5 d' de görülmektedir. Bu kazıklar için aşağıdaki bağıntılar geçerlidir. Ayrıca Şekil 3.8 a' dan yararlanılarak da çözüm elde edilebilir.

$$Q_u = 9c_u B \zeta - 1.5B \zeta^2 \quad (3.22)$$

$$M_{maks} = 4.5c_u B \zeta^2 - 2.25B^2 \zeta \quad (3.23)$$

Rijit Başlıklı Uzun Kazıklar

Deformasyon durumu, zemin direnci ve moment dağılımı Şekil 3.6 b' de görülmektedir. Bu tip kazıklar için Q_u değeri,

$$Q_u = \frac{2M_u}{5B + 0.5x_0 \zeta} \quad (3.24)$$

olarak ifade edilir. x_0 değeri,

$$x_0 = \frac{Q_u}{9c_u B} \quad (3.25)$$

ile bulunabilir. Kohezyonlu zeminlerdeki rijit başlıklı uzun kazıklar için grafik çözüm Şekil 3.8 b' de görülmektedir.

3.5. Çalışma Yükünde Yatay Ötelenme

Kazığının yatay yüklere karşı dayanımı, çoğu durumda kabul edilebilir yatay yer değiştirme temel alınarak tasarım yapılabilir. Yatay yer değiştirmenin hesaplanması için kullanılan iki yaklaşım,

1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı [16], [20].
2. Elastik Ortam Yaklaşımı [17], [18]' dir.

3.5.1. Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Yatak katsayısı yöntemi, kazıkların yatay yükler altındaki yatay hareketlere göre, kazığın nihai taşıma gücünü bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Yatak katsayısı yöntemi, zemin içindeki yatay yüklenmiş kazığı, elastik zemine oturan kiriş gibi çözümlenmektedir. Winkler'in zemin modeline göre, elastik zemin yerine belli sayıda elastik sonlu yayların yerleştirildiği kabul edilir. Şekil 3.9' da bu yatak katsayısının modellenmesi gösterilmiştir.

Şekil 3.9 Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık davranışı a) elastik zemine oturan kiriş b) Winkler idealizasyonu c) zeminde yatay yüklü kazık d) yatay yüklü kazık yaylı ortam [4]

Bu yayların rijitliği,

$$k_h = p/y \quad (3.26)$$

olarak ifade edilir. Burada, k_h yatay yatak katsayısı, p birim kazık uzunluğundaki zemin reaksiyonu, y kazık deformasyonudur. k_h yatay yatak katsayısı, zeminin deformasyon özellikleri haricinde, aynı zamanda kazığın boyutlarına ve rijitliğine bağlıdır.

Kohezyonlu zeminler için ötelenme, boyutsuz büyüklük olan βL ’ ye bağlıdır.

$$\beta = \frac{E_p I_p}{E_h B^3}^{1/4} \quad (3.27)$$

$E_p I_p$ kazığın rijitliği, B kazık çapı, k_h yatay yatak katsayısıdır.

Uzun kazıklarda, $\beta L > 2.25$ için,

$$k_h = \frac{0.4k}{B} \quad (3.28)$$

olarak elde edilir. Burada k , yatak katsayısı, B kazık genişliğidir. k değerleri, Tablo 3.2’ den alınabilir. Uzun kazıklarda, rijit başlıklı kazıklar için $\beta L=2$, serbest başlıklı kazıklar için $\beta L=1$ derinliğine kadar k_h nin varyasyonlarını iyi analiz etmek gerekir.

Yatak katsayısı kohezyonlu zeminlerde, zeminin serbest basınç direnci ile orantılıdır. Normal konsolide killerin ve siltlerin serbest basınç direncinin derinlikle büyüdüğü söylenebilir. Aşırı konsolide olmuş killerde yatak katsayısı derinlikle değişmez. Buna karşılık kuruma ile aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatak katsayısı derinlikle değişebilir.

Tablo 3.2 Kohezyonlu zeminlerde k değerleri [19]

Kilin drenajsız kayma muk. S_u (kPa)	50-100	100-200	200-400
k (KN/m ³)	8000	16000	32000

Kısa kazıklarda, $\beta L < 2.25$ için,

$$k_h = \frac{E_p I_p}{E_h B^3} \quad (3.29)$$

Burada k yatak katsayısı, L kazık boyu, B kazık genişliğidir. Kısa kazıklarda, eğer k değeri derinlikle artıyorsa, serbest başlıklı kazıklar için $0.25L$, rijit başlıklı kazıklar için $0.5L$ derinliğindeki k_h değerleri kullanılmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde,

$$k_h = n_h \frac{z}{B} \quad (3.30)$$

olarak ifade edilir. Yatay yüklü kazıkta yatay yer değiştirmeler, boyutsuz büyüklük olan ηL ’ye bağlı olmaktadır.

$$\eta = \frac{E_p I_p}{G_h L^3} \quad (3.31)$$

n_h değerleri Tablo 3.3’ den bulunmaktadır.

Tablo 3.3 Kohezyonsuz zeminler için n_h değerleri [19]

Kumun relatif sıkılığı	Gevşek	Orta	Sıkı
n_h (kN/m ³) kuru, nemli	750	2250	6000
n_h (kN/m ³) suya doymuş	400	1500	3600

Anlatılanlara göre kazığın davranışı elastik zemine oturan kiriş denklemlerinden çıkarılarak,

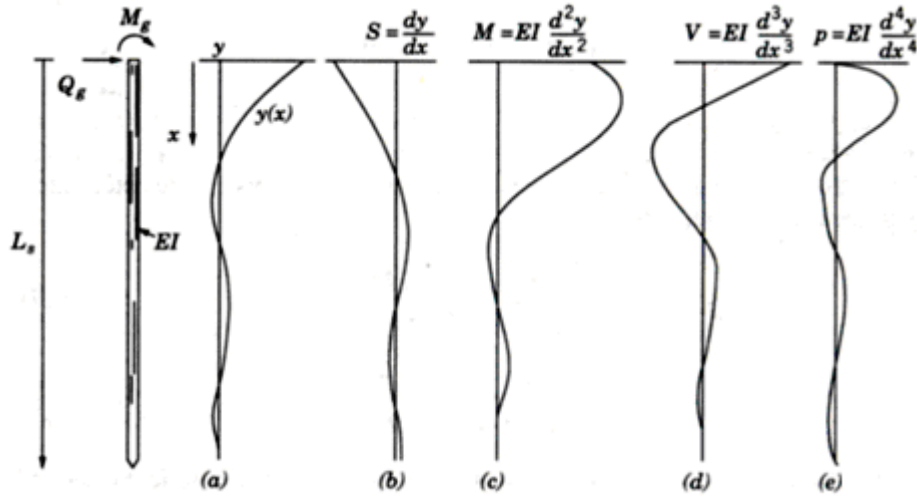
$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (3.32)$$

ile ifade edilir. Burada, E kazık elastisite modülü, I kesit atalet momenti ve $k_h y$ ($=P$) zemin reaksiyonudur.

3.5.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Serbest Başlıklı Kazık

Şekil 3.10' da kazık boyunca yatay kuvvet Q_g ve moment M_g ' den oluşan kazığın ötelenmesi y , bunun derinlikle değişimi $S = dy/dx$, moment M , kesme kuvveti V ve zemin direnci dağılımı p gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Kazıkta meydana gelen Q_g yatay yükü ve M_g momenti etkisinde, a) deplasman, y b) eğilme c) moment d) kesme kuvveti e) zemin reaksiyonu [4]

(3.31) bağıntısının çözümü aşağıdaki fonksiyonu vermektedir.

$$y=f(x, T, L, k_h, EI, Q_g, M_g) \quad (3.33)$$

Burada x derinlik, T relatif rijitlik faktörü, L kazık uzunluğu, $k_h = n_h \cdot x$, yatay yatak katsayısı, n_h yatak katsayısı, B kazık genişliği EI kazık rijitliği, Q_g yatay yük, M_g momenttir.

Elastik davranış kazık boyutlarına göre küçük deformasyonlar için geçerlidir. Böyle bir davranışta süperpozisyon kuralı geçerlidir. Daha büyük deformasyonlar için, bu analiz p - y eğrileri kullanılarak yapılan değişikliklerle kullanılabilir. Süperpozisyon kurallarına göre, y_A , Q_g yatay yükünden, y_B , M_g momentinden dolayı oluşan deformasyonlardır. x derinliğindeki toplam yatay deplasman,

$$y_x = y_A + y_B \quad (3.34)$$

bağıntısı ile elde edilir. Bu yöntemde kullanılan boyutsuz büyüklükler,

$$A_y = \frac{y_A EI}{Q_g T^3} \quad (3.35)$$

$$B_y = \frac{y_B EI}{Q_g M_g T^2} \quad (3.36)$$

olarak belirtilir. A_y , yatay yük için, B_y , moment için yer değiştirme katsayılarıdır. Bu büyüklükler kullanılarak toplam deplasman,

$$y_x = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI} \quad (3.37)$$

$$M_x = A_m Q_g T + B_m M_g \quad (3.38)$$

$$S_x = A_s \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \frac{M_g T}{EI} \quad (3.39)$$

$$V_x = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad (3.40)$$

$$p_x = A_p \frac{Q_g}{T} + B_p \frac{M_g}{T^2} \quad (3.41)$$

$$T = \frac{EI}{n_h k}^{1/5} \quad (3.42)$$

olarak elde edilir. A_y , A_s , A_m , A_v , A_p , B_y , B_s , B_m , B_v , B_p değerleri, $Z=X/T$ 'ye göre değişmektedir. Bu katsayılar Tablo 3.4 ve Tablo 3.5' den bulunabilir. Z derinlik katsayısıdır.

Maksimum derinlik katsayısı ise,

$$Z_{maks}=L / T \quad (3.43)$$

olarak belirtilir. $Z_{maks}=2$ için kazık deformasyonu, rijit kazığın deformasyonuna benzer. Buna göre kazıklar $Z_{maks} \leq 2$ için rijit kazık gibi davranmaktadır. $Z_{maks}= 5$ ve 10 için, yer değiştirme katsayıları aynıdır. Buna göre, $Z_{maks} = 5$ durumunun dışında, kazık boyunun, yer değiştirmeye etkisi yoktur.

Tablo 3.4 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{maks} \geq 5$) elastik çözümü için A katsayıları, [20], [21]

Z	A_y	A_s	A_m	A_v	A_p
0.0	2.435	-1.623	0.000	1.000	0.000
0.1	2.273	-1.618	0.100	0.989	-0.227
0.2	2.112	-1.603	0.198	0.956	-0.422
0.3	1.952	-1.578	0.291	0.906	-0.586
0.4	1.796	-1.545	0.379	0.840	-0.718
0.5	1.644	-1.503	0.459	0.764	-0.822
0.6	1.496	-1.454	0.532	0.677	-0.897
0.7	1.353	-1.397	0.595	0.585	-0.947
0.8	1.216	-1.335	0.649	0.489	-0.973
0.9	1.086	-1.268	0.693	0.392	-0.977
1.0	0.952	-1.197	0.727	0.295	-0.962
1.2	0.738	-1.047	0.767	0.109	-0.885
1.4	0.544	-0.893	0.772	-0.056	-0.761
1.6	0.381	-0.741	0.746	-0.193	-0.609
1.8	0.247	-0.596	0.696	-0.298	-0.445
2.0	0.142	-0.464	0.628	-0.371	-0.283
3.0	-0.075	-0.040	0.225	-0.349	0.226
4.0	-0.050	0.052	0.000	-0.106	0.201
5.0	-0.009	0.025	-0.033	0.013	0.046

Tablo 3.5 Serbest başlı uzun kazıkların ($Z_{maks} \geq 5$) elastik çözümü için B katsayıları, [20], [21]

Z	B_y	B_s	B_m	B_v	B_p
0.0	1.623	-1.750	1.000	0.000	0.000
0.1	1.453	-1.650	1.000	-0.007	-0.145
0.2	1.293	-1.550	0.999	-0.028	-0.259
0.3	1.143	-1.450	0.994	-0.058	-0.343
0.4	1.003	-1.351	0.987	-0.095	-0.401
0.5	0.873	-1.253	0.976	-0.137	-0.436
0.6	0.752	-1.156	0.960	-0.181	-0.451
0.7	0.642	-1.061	0.939	-0.226	-0.449
0.8	0.540	-0.968	0.914	-0.270	-0.432
0.9	0.448	-0.878	0.885	-0.312	-0.403
1.0	0.364	-0.792	0.852	-0.350	-0.364
1.2	0.223	-0.629	0.775	-0.414	-0.268
1.4	0.112	-0.482	0.688	-0.456	-0.157
1.6	0.029	-0.354	0.594	-0.477	-0.047
1.8	-0.030	-0.245	0.498	-0.476	0.054
2.0	-0.070	-0.155	0.404	-0.456	0.140
3.0	-0.089	0.057	0.059	-0.213	0.268
4.0	-0.028	0.049	-0.042	0.017	0.112
5.0	0.000	0.011	-0.026	0.029	-0.002

Rijit Başlıklı Kazık

Rijit başlıklı kazıkta, zemin yüzeyinde deformasyon eğrisinin eğimi 0 olup, (3.38) bağıntısı,

$$S_x = A_s \frac{Q_g T^2}{EI} + B_s \frac{M_g T}{EI} = 0 \quad (3.44)$$

şeklini alır. Bu eşitlikten

$$\frac{M_g}{Q_g T} = -\frac{A_s}{B_s} \quad (3.45)$$

bulunur.

$x=0$ için Tablo 3.4 ve Tablo 3.5' e göre $Z= x/T=0$ için, $A_s/B_s= 0.93$ bulunur. Buna göre,

$$y_x = A_y - 0.93 B_y \frac{Q_g T^3}{EI} \quad (3.46)$$

$$y_x = C_y = \frac{Q_g T^3}{EI} \quad (3.47)$$

$$M_x = C_m Q_g T \quad (3.48)$$

bağıntıları elde edilir. C_y ve C_m değerleri Şekil 3.11' den bulunabilir.

Kısmen Tutulu Başlı Kazıklar

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

$$C_y = (A_y - 0.93\lambda B_y) \quad (3.49)$$

$$C_m = (A_m - 0.93\lambda B_m) \quad (3.50)$$

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

Şekil 3.11 Kohezyonsuz zeminlerde rijit başlıklı kazıkların yatak katsayısı yaklaşımı ile çözümü için a) deplasman, C_y b) moment, C_m katsayıları [4]

3.5.1.2. Kohezyonlu Zeminlerde Yatak Katsayısı Yaklaşımı

Normal konsolide killerde yatak katsayısı derinlikle artacağından, kazığın ötelenmesinin bulunması için kohezyonsuz zeminlerdeki çözüm metodları ve analizleri kullanılmaktadır. Aşırı konsolide killerde ise, yatak katsayısı derinlikle sabittir ve bu tip killeri için deplasman katsayıları,

$$A_{yc} = \frac{y_A EI}{Q_g R^3} \quad (3.51)$$

$$B_{yc} = \frac{y_B EI}{M_g R^2} \quad (3.52)$$

olarak bulunur. Herhangi bir derinlikteki y deplasman ve moment,

$$y = A_{yc} \frac{QR^3}{EI} + B_{yc} \frac{QR^3}{EI} \quad (3.53)$$

$$M = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad (3.54)$$

bağıntılarıyla bulunabilir. Buradaki A_{yc} , B_{yc} , A_{mc} , B_{mc} katsayılarının derinlikle değişimi Davisson ve Gill tarafından verilmiştir [13]. Bu katsayılar Şekil 3.12' den bulunabilmektedir.

Şekil 3.12 a) Kazığa yatay kuvvet ve sıfır moment etkisi durumu b) kazığa sıfır yatay yük ve moment etkimesi durumunda yer değiştirme ve moment katsayıları [4]

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

3.5.1.3. Yatak Katsayısına Etki Eden Faktörler

Kazık Deplasmanın Etkisi

Yatak katsayısı k_h , kazık deplasmanından ve uygulanan yükten önemli ölçüde etkilenmektedir. Kum zeminde bulunan bir kazık için yatak katsayısı k_h , ile deplasmanın değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Yatak katsayısı için, benzer bir değişim kil zemindeki kazık için de bulunmuştur [22].

Şekil 3.13 Kumda bulunan kazıklar için kazık deplasmanının yatak katsayısına etkisi [22]

Grup Etkisi ve Tekrarlı Yükleme

Davisson, grup kazıklarda, kazık merkezleri arasındaki mesafenin $8d$ ' den büyük olması durumunda, kazıkların birbirlerine etkisinin önemli olmadığını belirtmiştir. Ancak bundan daha az mesafelerde, k_h 'in efektif değeri, tek kazığın k_h değerine göre daha az olmaktadır. Prakash, kumda yaptığı model kazık testlerinde, kazık aralıklarının $3d$ olması durumunda, efektif yatay yatak katsayısını $0,25k_h$ olarak bulmuştur [22].

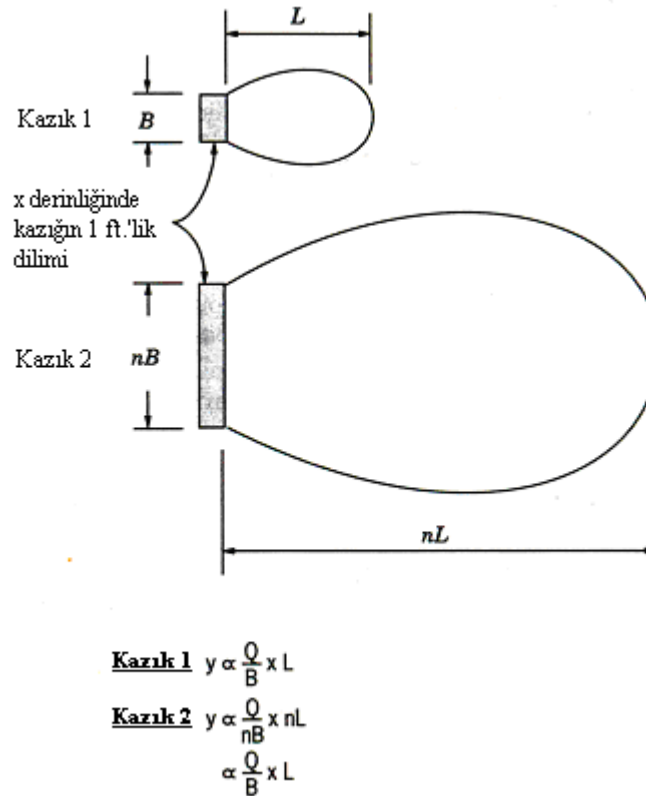
Tekrarlı yükleme, zemin direncini ve yatak katsayısını azaltmaktadır. Davisson' a göre, kazık 50 kez veya daha fazla aynı tekrarlı yüke maruz kalırsa, kazıkta meydana gelen deplasman, yükün ilk uygulandığı duruma göre, yaklaşık iki kat artmaktadır. Tekrarlı yükleme, ilk yüklemeğe göre yatak katsayısı değerini % 30 oranında azaltmaktadır [22].

Tekrarlı yükleme ve grup etkisi kombinasyonlarında, yatak katsayısı, tek kazık durumuna göre % 10 azalmaktadır [22].

Konsolidasyon Etkisi

Konsolidasyon sonucu, yatay yüklü kazığın bulunduğu zeminde yatay deplasmanlarda artma ve zemin direnci dağılımında değişme meydana gelmektedir. Broms' a göre katı ve çok katı killer için, k_{ef}/k_h değeri 1/4 ile 1/2, yumuşak killer için ise 1/3 ile 1/6 olmaktadır. Kumlar için ise; k_{ef}/k_h değeri 1 olarak alınabilir [22].

Kazık Boyutlarının Etkisi



Şekil 3.14 Kazık genişliğinin boyutsuz basınç eğrisine etkisi [4]

Zeminin lineer elastik davranışı dikkate alındığında, kazık genişliğinin yatak katsayısına etkisi yoktur (Şekil 3.14). Yatak katsayısı gerçekte deneysel bir veri olduğundan, yatak katsayısı deplasman, derinlik, kazık çapı, yükleme tipi, yükleme durumu gibi parametrelerden etkilenmektedir. Sadece eğilme momentinin önemli olduğu basit analizler için yatak katsayısı değerleri, zemin özellikleri ile ilgili korelasyonlardan veya tablolardan alınabilir. Kazık stabilitesinin önemli olduğu, daha gerçekçi ve hassas durumlarda, verilen kazık ve zemin şartlarında yanal kazık yükleme deneyi yapılmalıdır [4].

3.5.1.4. Yatak Katsayısının Belirlenmesi

Yatak katsayısı genellikle aşağıdaki yöntemlerden biri ile belirlenir:

1. Yanal kazık yükleme deney yöntemi.
2. Plaka yükleme deney yöntemi.
3. Zemin özellikleri ile amprik korelasyonlar yöntemi.

Yanal kazık yükleme deneyi pahalı, zaman alıcı ve dikkat isteyen bir yöntemdir. Plaka yükleme deneyinde ana problem plaka deney sonuçlarının kazığa ekstrapolasyonudur. Terzaghi killer için, yatak katsayısının derinlikten bağımsız olduğunu belirtmiş ve aşağıdaki bağıntıyı vermiştir [22].

$$k_h = \left(\frac{1}{1.5d} \right) k_{s1}^- \quad (3.55)$$

k_{s1}^- : 30 cm genişliğinde yatay kare plaka katsayısı (aşırı konsolide killer için Terzaghi tipik k_{s1}^- değerlerini tablo halinde vermiştir).

d : Çap ve en.

Vesic, Broms, Skempton, Davisson yatak katsayısı için bağıntılar vermişlerdir. Ayrıca yatak katsayısının tekrarlı yüklemeyle azaldığı Alizadeh ve Davisson'un deney sonuçları ile Awad ve Petrasovits'in model deney sonuçlarında gösterilmiştir [22].

3.5.2. Elastik Ortam Yaklaşımı

Yatay yük ve momente maruz kalan kazığın yatay yer değiştirmesinin ve momentinin bulunması yatak katsayısı teorisine dayanır. Ancak burada zemin ağırlığının sürekliliği hesaba katılmadığı için bu teori yetersiz kalmaktadır. Poulos, yatay yüklü kazıkların davranışını elastik ortam kabulü olan zeminler için incelemiştir [17], [18]. Kazık etrafındaki zeminin elastik ortam olarak varsayılması teorik olarak gerçekçi bir yöntemdir. Bu yaklaşım, diğer yöntemlere göre daha gerçekçi olmasına rağmen pratikteki problemlere uygulanmasındaki en büyük sorun, zemin modülü E' nin gerçekçi determinasyonudur. Ayrıca, bu yaklaşımdaki teorik kavramları pratikteki problemlere uygulayabilmek için daha fazla sayıda arazi verilerine ihtiyaç vardır.

Yatay yüklü kazıkların davranışının, elastik ortam yaklaşımı ile çözümü aşağıdaki varsayımlar ile yapılmaktadır:

1. Şekil 3.15' de görüldüğü gibi kazık B genişliğinde, L uzunluğunda ve EI sabit rijitliğinde ince, uzun ve düşey dikdörtgen olarak varsayılmaktadır. (Dairesel kazıklarda B genişliği kazık çapı olarak alınmalıdır). Kazık, kazık başı ve sonu hariç $(n+1)$ sayıda eşit uzunluktaki parçaya ayrılmaktadır. Bu uzunluk $(\delta/2)$ dir.
2. Analizi kolaylaştırmak için, zemin ile kazık çevresinde oluşabilecek yatay kesme gerilmeleri ihmal edilmiştir.
3. Her elemana üniform yatay P yükünün etkidiği varsayılmaktadır.
4. Zemin ideal, homojen, izotropik, yarı sonsuz elastik malzeme, Young Modülü E, Poisson oranı vs. olan ve kazık özelliklerinden etkilenmediği varsayılmaktadır.
5. Kazığın arka yüzeyine yakın yerdeki zeminin kazığa yapıştığı varsayılmaktadır.

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

Şekil 3.15 Gerilme etkisi a) kazığa b) kazıktan, kazık çevresindeki zemine [4]

3.5.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı

Bu yaklaşımda, 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, derinlikle artan elastisite modülü ile bulunmaktadır.

$$E_s = N_h x \quad (3.56)$$

Burada N_h , n_h benzeri katsayıdır. Eğer E_s ve k_h ' nin derinlikle artış oranı aynı ise, $N_h = n_h$ alınabilir.

Poulos ve Davis, serbest başlıklı kazık ve rijit başlıklı kazık için bağıntılar elde etmişlerdir [22].

Serbest Başlıklı Kazık

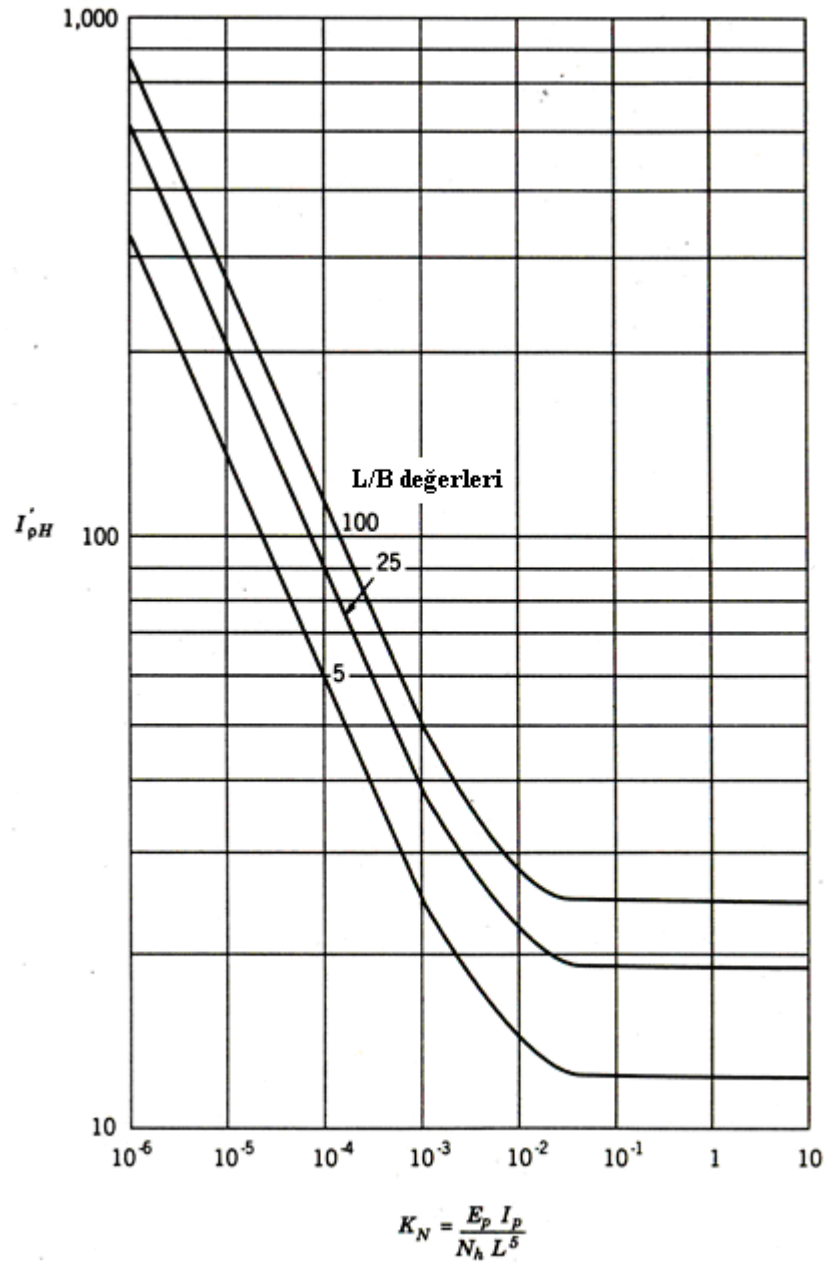
$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L_2} \left(\frac{I'_{\rho H}}{I'_{\rho M}} + \frac{e}{L} \right) I'_{\rho M} F'_{\rho} \quad (3.57)$$

Burada, $I'_{\rho H}$, $I'_{\rho M}$ ve F'_{ρ} değerleri Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18' dan alınan değerlerdir.

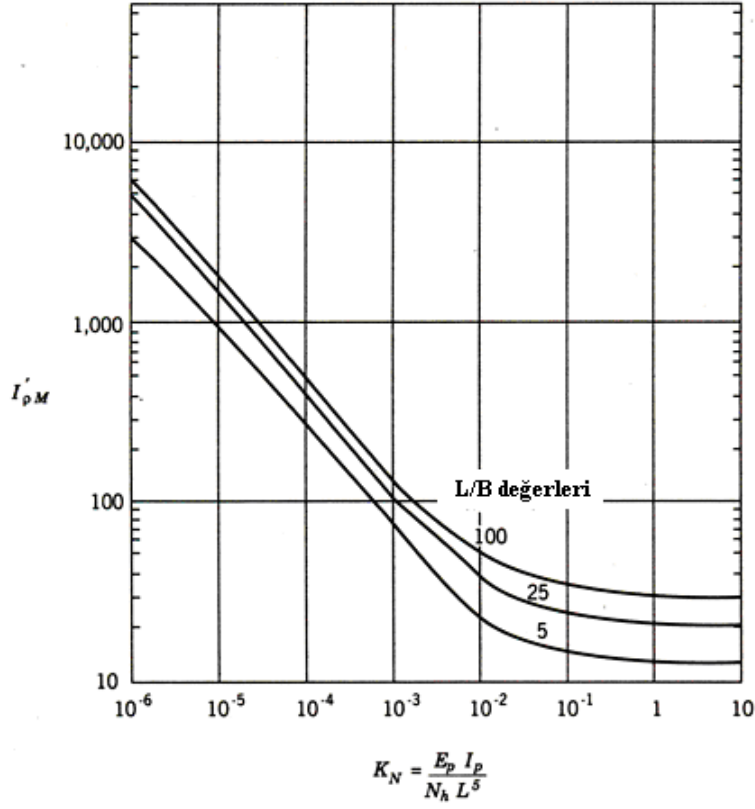
Rijit Başlıklı Kazık

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L_2} I'_{\rho H} / F'_{\rho F} \quad (3.58)$$

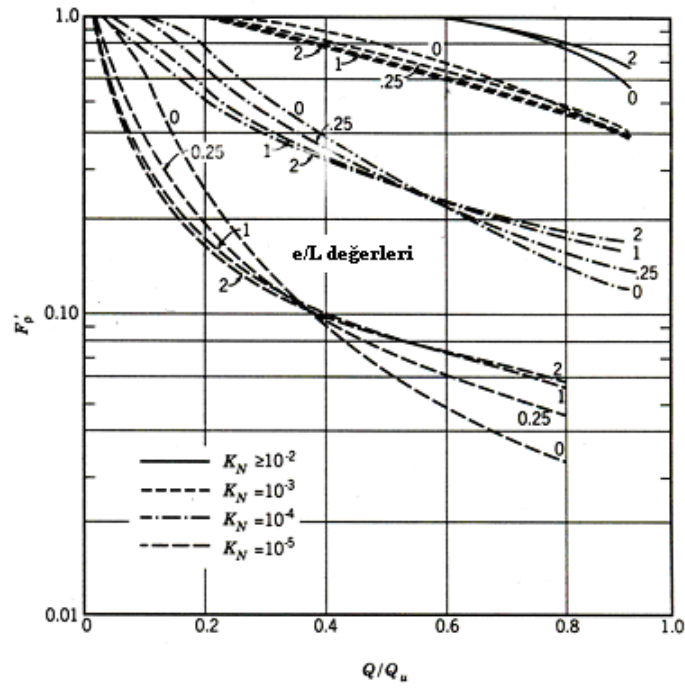
Buradaki $I'_{\rho F}$ ve $F'_{\rho F}$ değerleri Şekil 3.19 ve Şekil 3.20' den alınan katsayılarıdır.



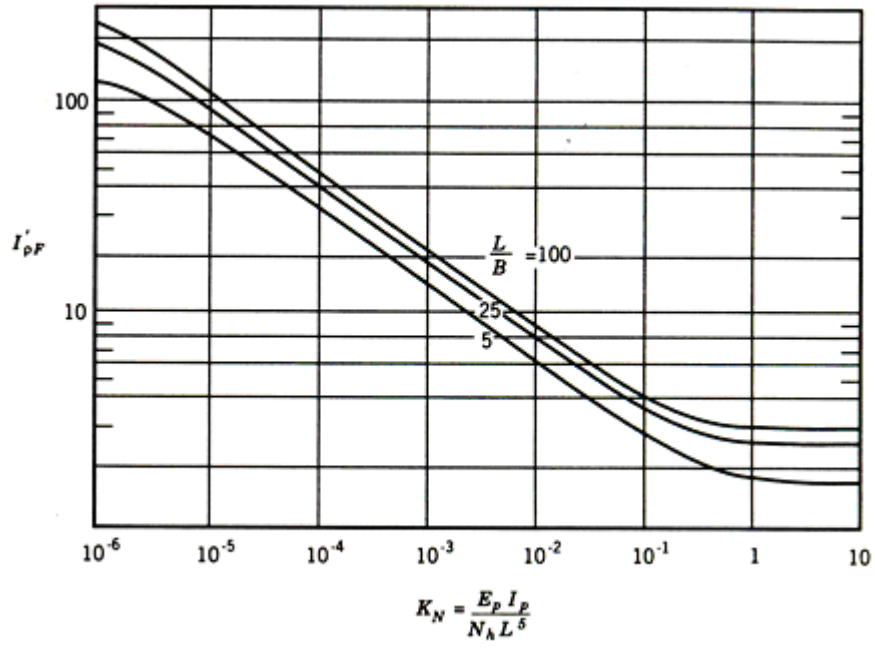
Şekil 3.16 Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'_{\rho H}$ değerleri [4]



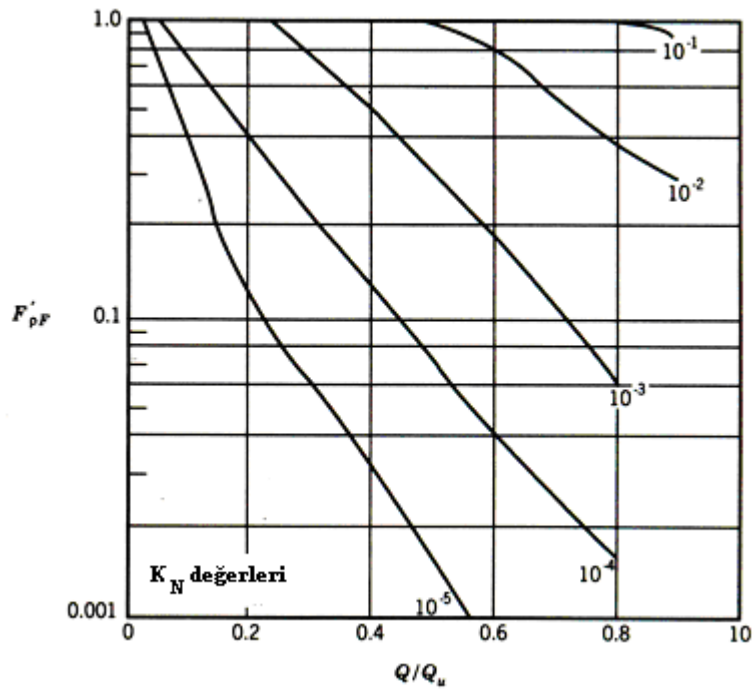
Şekil 3.17 Serbest Başlıklı Kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için $I'_{\rho M}$ değerleri [4]



Şekil 3.18 Serbest başlıklı kazıklarda, derinlikle lineer değişen zemin modülü için F'_{ρ} değerleri [4]



Şekil 3.19 Rijit Başlıklı Kazıklarda zemin modülü için $I'_{\rho F}$ değerleri [4]



Şekil 3.20 Rijit Başlıklı Kazıklarda zemin modülü için $F'_{\rho F}$ değerleri [4]

3.5.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Elastik Ortam Yaklaşımı

Normal konsolide killerde ötelenme ve momentler kohezyonsuz zeminlerdeki çözümlerle bulunmaktadır. Poulos, zemin modülünün derinlikle sabit olduğu aşırı konsolide killerde yanal yüklü kazığın deplasman ve momentinin bulunması için çözümler elde etmiştir [17]. Bu çözümler serbest başlıklı ve rijit başlıklı kazıklar için aşağıda anlatılmıştır.

Serbest Başlıklı Kazık

Bu tip kazıkta yatay ötelenme,

$$y = I_{\rho H} \frac{Q_g}{E_s L} + I_{\rho m} \frac{M_g}{E_s L^2} \quad (3.59)$$

Kazığın dönmesi,

$$\theta = I_{\theta H} \frac{Q_g}{E_s L^2} + I_{\theta M} \frac{M_g}{E_s L^2} \quad (3.60)$$

bağıntıları kullanılarak bulunur.

Burada $I_{\rho H}$, Şekil 3.21 a' dan, $I_{\rho M}$ ve $I_{\theta H}$ Şekil 3.21 b' den, $I_{\theta M}$ ise Şekil 3.22' den alınan katsayılarıdır. Bu katsayılar, K_R kazık bükülebilirlik faktörünün, fonksiyonudur. K_R ,

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \quad (3.61)$$

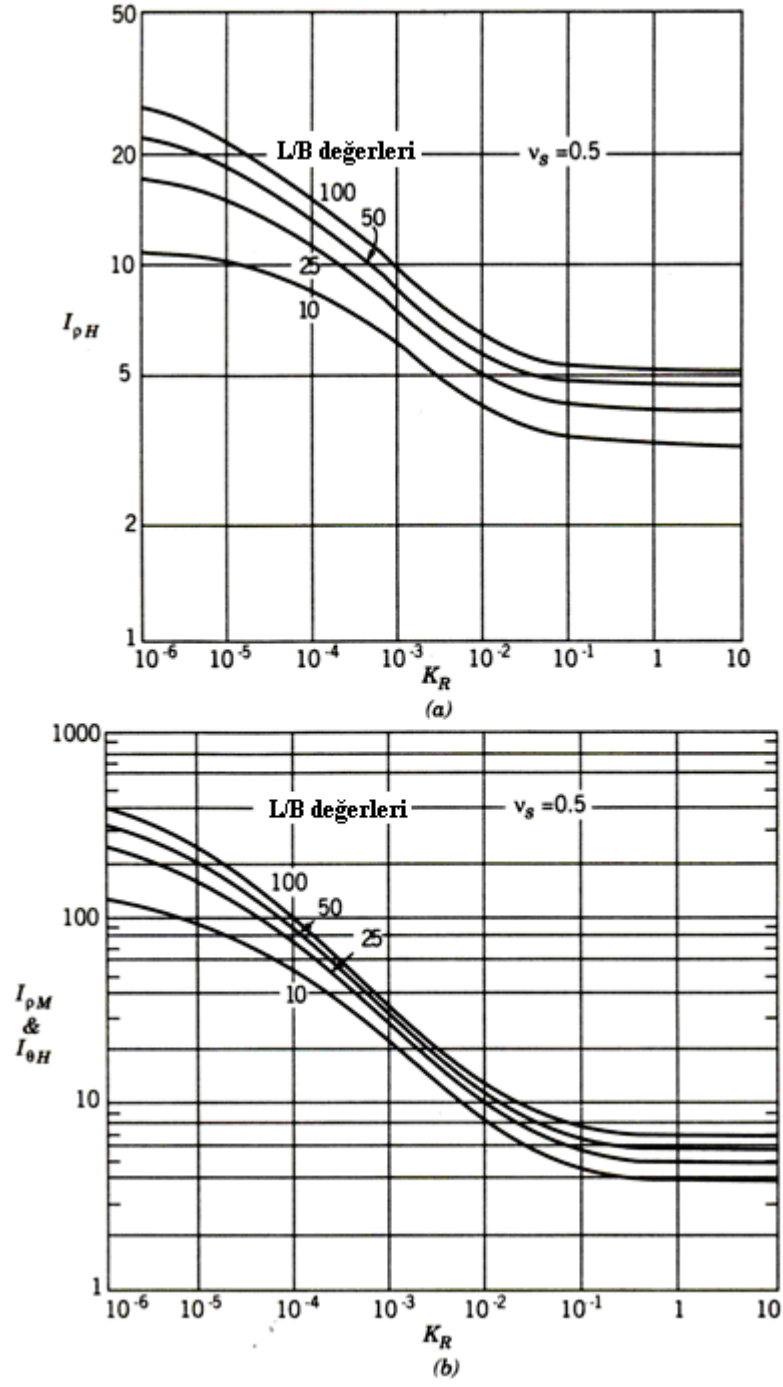
olarak bulunabilir. E_s amprik bir korelasyon olan $E_s = 40c_u$ ile bulunabilir. c_u drenajsız kayma mukavemetidir.

Rijit Başlıklı Kazık

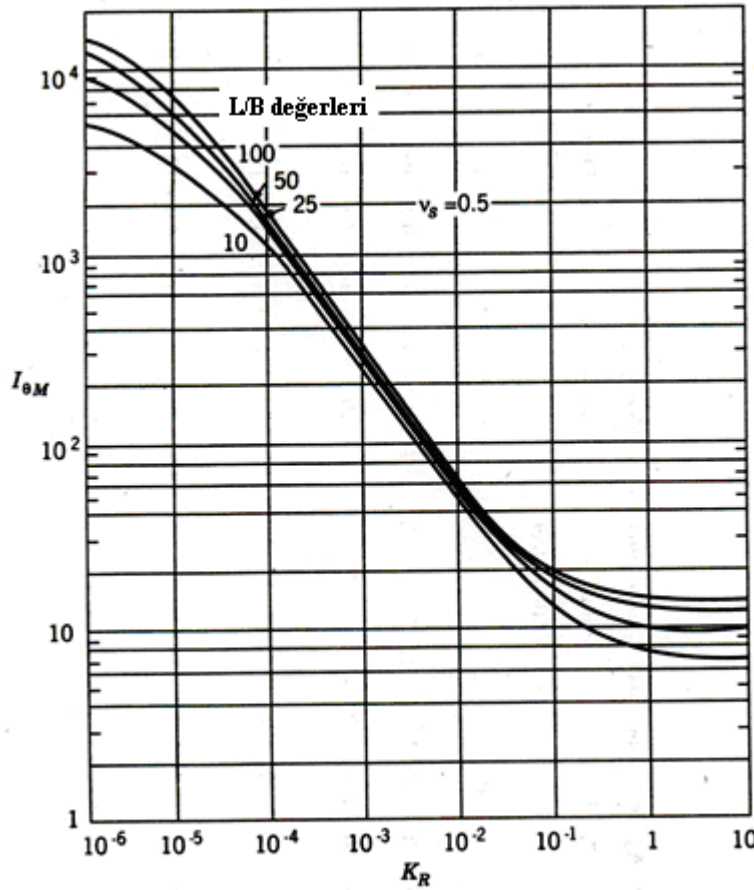
Yatay deplasman,

$$y = I_{\rho F} \frac{Q_q}{E_s L} \quad (3.62)$$

ile bulunabilir.



Şekil 3.21 Serbest Başlıklı Kazıklarda sabit zemin modülü için a) $I_{\rho H}$ değerleri
b) $I_{\rho M}$ ve $I_{\theta H}$ [4]



Şekil 3.22 Serbest Başlıklı Kazıklarda sabit zemin modülü için I_{0M} değerleri [4]

3.6. p-y Eğrileri ile Hesap Yöntemi

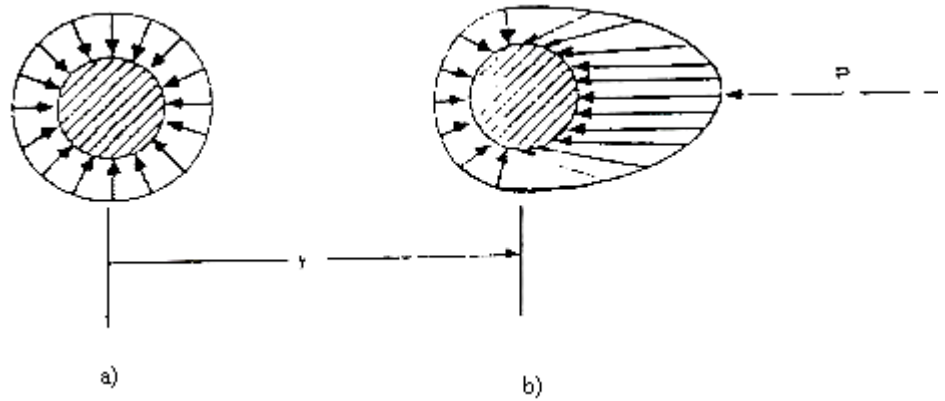
Yatay yükün hesabı için kullanılan yatak katsayısı yönteminin dezavantajı süreklilikten yoksun olmasıdır. Yatak katsayısı metodunda yapılan kabuller zeminin elasto-plastik davranışını gözönüne almamaktadır. Ayrıca yatak katsayısı metoduyla hesaplanan moment ve yer değiştirme değerlerinin gerçek değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir [10].

Kazık davranışının analizinde en uygun metot p-y (zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirmesi) eğrileri yöntemidir [6], [14]. Bu yöntemde, kazık boyunca gerilme-şekil değiştirme bağıntısı için bir kabul yapılmaktadır. Bu amaçla, zemin modülünün derinlikle lineer arttığı veya belirli bir fonksiyona bağlı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Eğer zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirmesi bağıntısı lineer değilse problemin çözümünde zeminin elasto-plastik davranışının gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumda ya bir elastik yöntemin ardışık

uygulanmasıyla, zeminin olmayan davranışının simulasyonu yapılmakta veya kazık-zemin sisteminin fiziksel modeli hazırlanarak yatay yüklenmiş kazığın davranışı bu modelle incelenmektedir.

Şekil 3.23' de zemin içerisindeki dairesel kesitli bir kazık gösterilmiştir. Yatay yüklemmeden önce kazık etrafındaki zemin reaksiyonu Şekil 3.23' a da görüldüğü gibidir. Kazığın y yer değiştirmesi yapması durumunda, kazık arkasındaki gerilme azalmakta, ön kısımda gerilme artmaktadır (Şekil 3.23 b) Bu durumda kazığın birim uzunluğu için P kuvveti oluşur.

Burada gösterilen y parametresi kazığın yatay yüklenmesiyle yatay yönde oluşan yatay yer değiştirmesi, p ise kazığın yer değiştirmesi sonucu kazığa karşı zeminde ortaya çıkan ve kazık birim uzunluğuna etkiyen reaksiyon kuvvetidir.



Şekil 3.23 (a) Kazık yatay yüklenmeden önce zemin reaksiyonu dağılışı (b) kazık yatay yüklendikten sonra zemin reaksiyonunun davranışı [23]

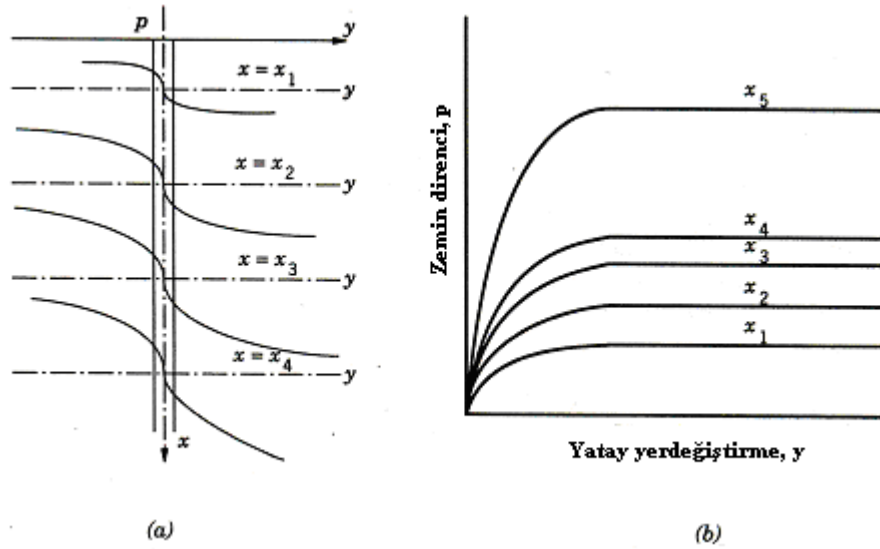
Yatay yüklenmiş bir lineer elastik kiriş gibi düşünülen kazığın diferansiyel denklemi,

$$\frac{EI d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3.63)$$

şeklinde. Burada, P eksenel yük, EI kazık eğilme rijitliği, y kazığın yatay yer değiştirmesi, x kazık boyunca herhangi bir nokta, $p = (k'_s \cdot y)$ birim boydaki zemin reaksiyonudur.

Kazık eksenini boyunca çeşitli derinliklerdeki p-y eğrileri Şekil 3.24' de gösterilmiştir.

Kazık- zemin sistemi için Şekil 3.24 a' dakine benzer p-y eğrileri elde edilebilirse, (3.63) eşitliğiyle verilen diferansiyel denklemin, zeminin lineer olmayan davranışını da dikkate alarak çözümlenmesi mümkündür [20]. Zemin modülünün nümeriksel tarifi, zemin reaksiyonu p ile y deplasman eğrilerinin çizilmesi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24 Yatay yüklü kazıklar için p-y eğrileri (a) zemin yüzeyinin altında çeşitli derinliklerde p-y eğrileri b) p-y eğrilerinin x-y eksenlerinde gösterimi [4]

p-y eğrileri Şekil 3.24 a' da gösterildiği gibi lineer olmadıklarından ve derinliğin bir fonksiyonu olduklarından yatay yüklenmiş kazık probleminin çözümünde iterasyon yapılmalıdır.

Genel olarak takip edilen çözüm yolu aşağıda özetlenmiştir.

- 1- k'_s zemin modülü için kazık boyunca bir seri değer seçilir. Çoğunlukla ilk yaklaşım olarak zemin modülünün derinlikle lineer arttığı kabul edilir. ($k'_s = k_h \cdot z$).
- 2- Her düğüm noktasına ait derinlik için k'_s değerleri hesaplanır ve (3.63) denklem takımı çözülerek y_n kazık yer değiştirmeleri hesaplanır.
- 3- Her düğüm noktası için elde edilen y değerleri, bu düğüm noktasının bulunduğu derinliğe ait p-y eğrisinde yerine konarak, o düğüm noktasındaki p zemin reaksiyonu hesaplanır.

- 4- Bütün düğüm noktaları için hesaplanan p-y değerleri, $p = -k'_s \cdot y$ eşitliğinde yerine konarak yeni bir dizi $-k'_s$ değeri elde edilir.
- 5- Hesaplanan $-k'_s$ değerleri kullanılarak denklem yeniden çözülür.
- 6- Kazık boyunca hesaplanan $-k'_s$ zemin modülü değerlerinin bir önceki adımda hesaplanan değerlere eşit olması veya aradaki farkın kabul edilebilir sınırlar halinde kalması ile iterasyona son verilir.
- 7- Nihai $-k'_s$ değerlerinden yararlanarak eğim, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu değerleri sonlu farklar açılımından elde edilir.

Birçok araştırmacı tarafından zemin modülünün derinlikle değiştiği kabul edilmiştir.

$$-k'_s = k_h \cdot z^n \quad (3.64)$$

Burada k_h yatay yatak katsayısı, n ise 1-3 arasında değerler alan tamsayıdır. Zemin modülünün eşitliğiyle ifade edilmesi ve zemin yüzündeki kazık yer değiştirmelerinin ölçülmesi halinde problemi iterasyon yapmadan boyutsuz katsayılarla çözmek mümkündür [24], [25].

Zemin modülünün derinlikle lineer arttığı kabulü halinde, yer değiştirme, eğim, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu değerlerini veren eşitlikler boyutsuz katsayılar cinsinden ifade edilerek tablolar halinde verilmiştir [20].

p-y eğrilerinin elde edilmesi için geliştirilen yöntemlerin çoğu ampiriktir. Bu yöntemler ile arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen çeşitli zemin parametrelerine bağlı olarak p-y eğrileri oluşturulabilir.

Deneylerde p-y eğrilerini saptamanın bir metodu, zemin reaksiyonunun ve kazık yer değiştirmesinin doğrudan ölçülmesidir. Matlock, zemin reaksiyonlarını ölçmekte kullanılan basınç hücrelerinin duyarlı alanlarının sınırlı olduğunu, bunun yanında, şekil değiştirme ölçerle ölçülen yer değiştirmelerin ve momentlerin daha hassas olacağını belirtmiştir [26], [27]. Bu yöntemde, kazığın çeşitli noktalarına yerleştirilecek şekil değiştirme ölçerlerin, kazık deneye tabi tutulmadan önce bilinen moment değerlerine göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Kazık başındaki yerdeğiştirme değerleri ölçülerek, statik ve tekrarlı yükleme altında bilinen şartlarında her yükleme kademesi için eğilme momenti değerleri elde edilir. Seçilen

derinliklerde p-y eğrileri ise eğilme momenti değerlerinden aşağıdaki eşitliklerin nümerik çözümüyle hesaplanır.

$$y = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \quad (3.65)$$

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z) \quad (3.66)$$

Burada göz önüne alınması gereken en önemli konu, deneysel eğilme momenti değerlerinin strain-gauge okumalarından çok hassas olarak elde edilmesi gerekliliğidir. Eğilme momentindeki ufak hatalar zemin reaksiyonunun sonlu farklar ile belirlenmesinde büyük hatalara sebep olmaktadır [24], [25].

Kazık davranışının analizinde, zemin modülünün derinlikle değişimi hakkında bir kabul yapılmasını gerektirmeyen ve zemin reaksiyonunun sonlu farklar eşitlikleri kullanılmadan belirlenmesini mümkün kılan bir yöntem Aköz, Sağlamer, Öntuna tarafından verilmiştir [28], [29].

Bu eğriler oluşturulurken şu varsayımlar yapılmaktadır:

- 1- p-y eğrileri uygulanan yatay yük altında zemin yatay deformasyonlarının, herhangi bir derinlikteki kazık kesiti ile denklğini gösterir.
- 2- Eğriler kazık şekil ve rijitliğinden bağımsız olup, zemin kesit alanının denkleştğı derinliğin altında ve üstünde yüklemekten etkilenmemektedir. Bu varsayım tam olarak doğru değildir ancak, konuyla ilgili tecrübeler göstermiştir ki, pratik amaçlar için, p-y eğrileri esasen sadece söz konusu derinlikteki zemin reaksiyonuna bağlıdır.

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

Zemin – kazık sisteminin p-y eğrileri saptandıktan sonra, yatay yüklü kazık sistemi aşağıdaki adımlarla çözülebilir:

1. Daha önceden açıklandığı gibi tahmin edilen ve verilen, n_h ve k değerlerine göre kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killeri için T , aşırı konsolide killeri için R hesaplanır.
2. Hesaplanan T ve R değerlerinden, önceden anlatılan yöntemlerle , kazık başına etkiyen kuvvet ve momente göre, kazığın kazık boyunca deformasyonu bulunur.
3. Hesaplanan y deformasyonları kullanılarak yatay basınç p hesaplanır. Zemin modülü k ve rijitlik faktörleri T ve R hesaplanır.

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

$$(b) \text{ zemin modülünün derinlikle sabit olması: } k_h = k \quad R = \left(\frac{EI}{k} \right)^{1/4}$$

Bulunan R ve T değerleri 1. adımda hesaplanan değerlerle karşılaştırılır. Eğer bu değerler uyumlu değilse 3. adımda bulunan modül değerine yakın bir değer kabul edilir. R veya T değerleri 2. ve 3. adımlar tekrarlanır. Bulunan son R veya T değerleri ile kazık boyunca deplasmanlar ve momentler bulunabilir.

Reese, yatay yüklü kazığın p - y eğrilerinin tespit edilmesi için bilgisayar programı geliştirmiştir [30] .

Yatay yüklü kazıklar için varolan bilgisayar programları, kazığın yanal direncini bulmak için p - y eğrilerinden yararlanırlar. Bu eğrilerin geliştirilmesi için gereken veriler, arazi testlerinden bulunur.

Florida Üniversitesi, tekil kazıklar üzerinde yapılan yanal yükleme testleri için 24 SPT ve 6 CPT test sonuçlarına göre bir bilgisayar veritabanı (Florida Pier) oluşturmuştur.

Programda p - y eğrilerinin tespiti için su seviyesi altında veya üstünde bulunan sıkı-gevşek kum ve katı-yumuşak killeri için parametreler O' Neill & Murchison; Reese, Cox, Koop; O' Neill & Gazioglu; Matlock, Welch & Reese'nin yaptığı çalışmalardan alınmıştır [15], [31], [32], [33].

3.6.1. Kohezyonsuz Zeminlerde p-y Eğrileri Çizimi

Kohezyonsuz zeminlerde yatay yüklü kazıkların p-y eğrileri ile çözümü aşağıdaki adımlarla anlatılmıştır.

1. İçsel sürtünme açısı ϕ ve dane birim hacim ağırlığı γ , arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilir.
2. $\alpha = 1/2\phi$, $\beta = 45 + \alpha$, $K_0 = 0.4$, $K_A = \tan^2 (45 - \phi/2)$ değerleri alınarak,

$$P_{cr} = \gamma x \frac{K_0 x \tan \phi \sin \beta}{\tan \beta - \phi \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \phi \cos \alpha} B + x \tan \beta \tan \alpha \quad (3.67)$$

$$P_{cd} = K_A D \gamma x \tan^8 \beta - 1 + K_0 D \gamma x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (3.68)$$

ile hesaplanır. P_{cr} , yüzeyden kritik derinlik x_r 'a kadar olan derinliklerde, p_{cd} ise, kritik derinliğin altındaki derinliklerde hesaplanır. Kritik derinlik değeri, p_{cd} ve p_{cr} 'in x ile değişimin çizilmesiyle elde edilen iki eğrinin kesim noktasıdır (Şekil 3.25).

3. p-y eğrisinde çizilecek derinlik x seçilir, bu derinlik ile kritik derinlik karşılaştırılır. p_{cr} veya p_{cd} 'nin hangisinin uygulanacağına karar verilir.
4. Uygun n_h değeri Tablo 3.3' den alınır ve aşağıdaki bağıntılar hesaplanır.

$$p_m = B_1 p_c \quad (3.69)$$

$$Y_m = B/60 \quad (3.70)$$

$$P_u = A_1 P_c \quad (3.71)$$

$$Y_u = 3B/80 \quad (3.72)$$

$$m = p_u - p_m / y_u - y_m \quad (3.73)$$

$$n = p_m / m y_m \quad (3.74)$$

$$C = P_m / y_m^{1/n} \quad (3.75)$$

$$y_k = \frac{C}{n_h} \left(\frac{P}{k} \right)^{1/n} \quad (3.76)$$

$$p=Cy^{1/n} \quad (3.77)$$

B kazık genişliğidir. A_1 ve B_1 değerleri Reese ve diğ. tarafından önerilen Tablo 3.6' dan alınacaktır [6].

5. p-y eğrisini oluşturmak için Şekil 3.25 b' de görüldüğü gibi y_k değeri y eksenine işaretlenir. Verilen bağıntılardan y_k için p hesaplanır. Bu iki değer eğrideki kesim noktası k değerini verir. k ile orijin noktası birleştirilerek 0-k doğrusu oluşturulur. y_m ve p_m hesaplanarak m noktası bulunur. m ile k noktası birleştirilerek parabol oluşturulur. y_u ve p_u değerleri hesaplanarak u noktası işaretlenir ve m ile u noktaları birleştirilerek bir doğru oluşturulur.

Şekil 3.25 (a) x_r kritik derinliğin elde edilmesi, (b) p-y eğrilerinin oluşturulması [4],

Tablo 3.6. A_1 ve B_1 Katsayıları [4]

x/B	A_1		B_1	
	Statik	Çevrimsel	Statik	Çevrimsel
1	2	3	4	5
0	2.85	0.77	2.18	0.50
0.2	2.72	0.85	2.02	0.60
0.4	2.60	0.93	1.90	0.70
0.6	2.42	0.98	1.80	0.78
0.8	2.20	1.02	1.70	0.80
1.0	2.10	1.08	1.56	0.84
1.2	1.96	1.10	1.46	0.86
1.4	1.85	1.11	1.38	0.86
1.6	1.74	1.08	1.24	0.86
1.8	1.62	1.06	1.15	0.84
2.0	1.50	1.05	1.04	0.83
2.2	1.40	1.02	0.96	0.82
2.4	1.32	1.00	0.88	0.81
2.6	1.22	0.97	0.85	0.80
2.8	1.15	0.96	0.80	0.78
3.0	1.05	0.95	0.75	0.72
3.2	1.00	0.93	0.68	0.68
3.4	0.95	0.92	0.64	0.64
3.6	0.94	0.91	0.61	0.62
3.8	0.91	0.90	0.56	0.60
4.0	0.90	0.90	0.53	0.58
4.2	0.89	0.89	0.52	0.57
4.4 - 4.8	0.89	0.89	0.51	0.56
≥ 5	0.88	0.88	0.50	0.55

3.6.2. Kohezyonlu Zeminlerde p-y Eğrilerinin Çizimi

p-y eğrilerinin oluşturulması için elde edilen amprik bağıntılar, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilmektedir.

Yumuşak –Orta Katı Killer

Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrilerinin çizimi Matlock tarafından aşağıdaki adımlarla tarif edilmiştir [14].

1. Laboratuvar ve arazi deneylerinden drenajsız kayma mukavemeti c_u ve dane birim hacim ağırlığı γ bulunur.
2. Aşağıda verilen bağıntılar hesaplanır.

$$x_r = \frac{6B}{\frac{\gamma B}{c_u} + j} \quad (3.78)$$

Burada x_r kritik derinlik, B kazık çapı, γ birim hacim ağırlık, c_u kilin drenajsız kayma mukavemet, J amprk bir faktördür. Matlock tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre, yumuşak killer için $J=0.5$ ve katı killer için $J=0.25$ alınabilir [14].

$$x < x_r \quad \text{için} \quad N_c = 3 + \frac{\gamma x}{c_u} + \frac{Jx}{B} \quad (3.79 \text{ a})$$

$$x \geq x_r \quad \text{için} \quad N_c = 9 \quad (3.79 \text{ b})$$

Bu bağıntılarda N_c taşıma gücü faktörü, x derinliktir.

3. Eğrinin çizileceği derinlik belirlendikten sonra, bu derinlik kritik derinliğe göre verilen bağıntılarla N_c hesaplanır.
4. Kazık boyu için nihai zemin direnci hesaplanır.

$$P_u = c_u N_c B \quad (3.80)$$

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

$$Y_c = 2.5 \varepsilon_c B \quad (3.81)$$

Deney sonuçlarının bulunmadığı durumlarda Matlock, ε_c değerini hassas killer için 0.005, örselenmiş ve konsolide olmamış tabakalar için 0.02, normal konsolide killer için 0.01 alınmasını önermiştir.

5. Şekil 3.26' da görülen p - y eğrisinin değişimi,

$$p = 0.5 p_u (y / y_c)^{1/3} \quad (3.82)$$

ile elde edilir.

6. Bu hesap adımları hesap yapılması istenilen her derinlik için tekrarlanarak p - y eğrisi oluşturulur.

Şekil 3.26 Yumuşak ve orta katı killer için p-y eğrisinin oluşturulması [4]

Şekil 3.26' da A noktasının üstündeki p-y eğrisi, drenajsız üç eksenli deneylerdeki zemin örneğinin gerilme deformasyon eğrilerinden ya da plaka yükleme deneyindeki yükleme oturma eğrilerinden saptanabilir.

Tekrarlı yüklerin etkisi aşağıdaki adımlar takip edilerek belirlenir.

Tekrarlı yükler altında p-y eğrileri:

1. $x_1 \geq x_r$ ise p-y eğrisi $p_B=0.72p_u$ noktasından keser (Şekil 3.26 b eğrisi).
2. $x_1 < x_r$ ise B noktası C ile birleştirilir, C noktası $y = 15y_c$ karşı gelen noktadır ve $p=0.72 p_u x_1/ x_r$ dir (Şekil 3.26 c eğrisi).
3. $x_1 = 0$ ise B noktası $y=15y_c$ ile birleştirilir ve $y \geq 15y_c$ de zemin reaksiyonu sıfır olduğu kabul edilir (Şekil 3.26 d eğrisi).

Katı killer

Reese ve Welch, katı killerde p-y eğrilerinin tespiti için aşağıdaki yöntemleri tavsiye etmişlerdir [15].

Kısa süreli statik yükleme

1. Deneylerden c_u , γ ve deviatör gerilmenin yarısına karşılık gelen ε_{50} birim deformasyonu tahmin edilir. Eğer ε_{50} değeri bulunamıyorsa, 0.005 veya 0.01 arasında bir değer alınabilir.
2. p_u birim kazık boyu için nihai zemin direnci ,

$$p_u = 9C_u \left(\frac{\gamma' x}{c_u} + 0.5 \frac{x}{B} \right) \quad (3.83)$$

$$p_u = 9C_u B \quad (3.84)$$

bağıntılarıyla bulunan değerlerden küçük olanıdır. Burada γ' zeminin ortalama efektif birim hacim ağırlığıdır.

3. Nihai direncin yarısına karşılık gelen deplasman,

$$y_{50} = 2.5 B \varepsilon_{50} \quad (3.85)$$

olarak bulunur.

4. p-y eğrisini oluşturan noktalar aşağıdaki ifadelerle bulunur.

$$p = 0.5 p_u \left(y/y_{50} \right)^{1/4} \quad (3.86)$$

$y > 16 y_{50}$ olduğu durumlarda $p = p_u$ olarak alınabilir.

Çevrimli Yükleme

1. Statik yükleme için p-y eğrileri elde edilir.
2. Yatay yükün temele kaç kez uygulanacağı tahmin edilir.
3. p / p_u değişik değerleri için, laboratuar verilerinden ve aşağıdaki bağıntılardan C_1 ve C_2 değerleri elde edilir.

$$C_2 = \frac{p_c - \varepsilon_i}{\varepsilon_{50} \log N} \quad (3.87)$$

Burada ϵ_c , N çevrim sonra ölçülen birim deformasyon, ϵ_i ilk yüklemedeki birim deformasyondur. Laboratuvar değeri yoksa,

$$C_1 = C_2 = C = 9.6R^4 \quad (3.88)$$

alınabilir.

Burada R,

$$R = \frac{p}{p_u} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3.89)$$

ile bulunur.

4. 3. adımda seçilen p / p_u değerine karşılık gelen p değerlerinde çevrimli yükleme için yeni y değerleri,

$$y = y_s + y_{50} C_1 \log N \quad (3.90)$$

olarak bulunur.

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

Katı Aşırı Konsolide Killer

Bu tip zeminlerde zemin modülü derinlikle sabit kalmakta ve p - y eğrilerinin çizilmesi için deneysel veriler gerekmektedir. Bhushan ve diğ. katı aşırı konsolide killer için katı killerde verilen bağıntılarda bir takım değişiklikler yapılması gerektiğini belirtmektedir [44].

$$p_u = \frac{c_u}{3} + \frac{\gamma' x}{c_u} + 2 \frac{x}{B} c_u \quad (3.91)$$

$$y_{50} = 2.5 B \epsilon_{50} \quad (3.92)$$

$$p = 0.5 / p_u (y / y_{50})^{1/2} \quad (3.93)$$

Bu bağıntılarda yer alan değişikliklerle beraber, katı killerdeki adımlar, katı aşırı konsolide killer için de geçerli olmaktadır.

3.6.3. p-y eğrilerine etki eden faktörler

3.6.3.1. Yükleme Tipinin Etkisi

Statik Yükleme Durumu

Kazık yükleme deneyleri kazık dilimlerine yatay bir yük uygulamak, bu yükü birkaç dakika sürdürmek ve zemin reaksiyonunu enstrümantasyonla tayin etmekten ibarettir. p-y eğrilerinden alınacak verileri hesaplamak için deneysel sonuçlardan geliştirilmiş analitik ifadeler vardır. Bu ifadelerden yararlanarak statik eğriler olarak tanımlanan p-y eğrileri elde edilir.

Statik p-y eğrileri bir iskelet eğri gibi düşünülebilir. Bu eğrileri kullanarak zemin özelliklerinin değişik durumları hakkında yorum yapılabilir. Statik p-y eğrileri, p-y yönteminin ana teorisini ifade etmek açısından oldukça yararlıdır. Statik p-y eğrileri; yüklemenin kısa süreli olduğu ve tekrar etmediği durumlarda, toprak itkisi gibi sürekli yükleme durumlarında, kazığın çevresinde aşırı konsolide killeri, yumuşak kaya ve temiz kumlar gibi konsolidasyona müsait bir zemin yoksa kullanılabilir. Pratikte sıkça karşılaşılan tekrarlı yükler için p-y eğrileri kullanılırken genellikle kazık deplasmanında ve eğilme momentinde büyük artışlarla karşılaşılır. Yüklemin kazık üzerindeki etkisini daha açık bir şekilde görebilmek için hem tekrarlı hem de statik p-y eğrileri için hesap yapılabilir.

Tekrarlı Yükleme Durumu

Statik yükleme durumunda olduğu gibi tekrarlı yükleme durumu için de arazi deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda bir yük artımı uygulanır, enstrümantasyon okunur ve yükleme birçok kez tekrar edilir. Bazı durumlarda yük arkadan ve önden uygulanır. Zemin yüzeyinde yer değiştirmede veya eğilme momentinde bariz bir artış olmayıncaya kadar tekrarlı yüklemeye devam edilir. En son yüklemede ise maksimum moment, çeliğin akmasına sebep olacak moment değerine kadar yaklaştırılır.

Tekrarlı yüklemelerde suyun varlığı önemli bir etkidir. Killi zeminlerde zemin yüzeyinde suyun bulunması, tekrarlı yük nedeniyle zemin dayanımının kaybolmasına neden olur. Tekrarlı yüklemelerde, eğer kazıkta meydana gelen ötelenme, zeminin elastik olarak davrandığı bir sınır ötelenme değerinden büyükse, yük boşaltıldığında zeminle kazık arasında boşluk oluşur. Zemin içinde bulunan su, bu boşluğa doğru hareket eder ve yük tekrar uygulandığında, bu su yukarı doğru

hareket eder. Bu suyun hızı, önemli miktarda zeminin, zemin yüzeyinden dışarı taşmasına neden olabilecek kadar fazla olabilmektedir. Bu durum, zemin dayanımının kaybolmasına neden olmaktadır [23].

Tekrar sayısının artışı ile yanal yüklü kazıkların deplasmanlarındaki artışa neden olan iki önemli unsur vardır. Bunlar;

- Kazık- zemin sisteminin yapısal unsurudur. Özellikleri değişmeden kalan elasto-plastik zemin içindeki kazık için, yük tekrarının artımı ile deformasyonlar yığılmakta ve bu deformasyon dengesinin oluşması farklı çökme ve deformasyonlarla sonuçlanmaktadır.
- İkinci olarak, tekrarlı yüklemeye bağlı zeminin kendi mukavemet ve rijitliğindeki azalmadır. Bu zeminin gevşemesi olarak adlandırılabilir.

Drenajsız koşullarda yüklenmiş kil için, tekrarlı yükleme iki önemli etkiye sahiptir. Birincisi, zemin modül değerinde bir azalma yapabilmektedir. İkincisi, drenajsız kayma mukavemetinde azalma yapabilmektedir. Böylece yatay yüklü kazık durumunda kazık-zemin etkileşim sınırında azalma meydana gelmektedir. Bütün bu etkiler tekrarlı yükleme sırasında, boşluk suyu basıncında meydana gelen artışla beraber düşünülerek kazık analizinde dikkate alınmalıdır. Bu durumda, ya her tekrarlı yüklemenin zemin parametrelerine etkisi ayrı ayrı, ya da belirli sayıdaki tekrarlı yükleme sonrası zemin parametrelerinde meydana gelen etki dikkate alınarak analizde iki çeşit yaklaşım söz konusu olabilmektedir.

Katı killerde yatay yüklü kazıkların arazi deneyleri sonucu elde edilen p-y eğrilerinde başlangıç eğim ve nihai direnç derinlikle artmaktadır. Kısa süreli statik yükleme ve tekrarlı yüklemelere ait p-y eğrileri karşılaştırıldığında zemin direncinin tekrarlı yükleme sonunda azaldığı görülmüştür. Tekrarlı eğriler için nihai direnç, statik eğrilere nazaran daha küçük deplasmanlarla elde edilebilmektedir. Nihai direnç noktasından sonra zemin direncindeki keskin azalış tekrarlı yüklerden kaynaklanmaktadır [34].

Sağlamer ve Dinçer'in, model kazıkları üzerinde yaptığı deneylerde, yatay kuvvetin tekrarlı etkimesi sonucunda, zemin yüzeyinde ölçülen kazık yer değiştirmelerinde önemli artışlar olduğu tespit edilmiştir. Kazığa ait yatay yer değiştirmelerin zemin yüzeyinden yaklaşık olarak 7d ila 11d arasında sıfırdan geçtiği belirlenmiştir. Eğilme

momentinin maksimum olduğu noktalar zemin yüzeyinden 3d ila 5d arasında değişmektedir [29]. Tekrarlı yükleme kazığa etkiyen maksimum eğilme momentinde % 1 ile % 5 dolayında artış meydana getirmektedir. Maksimum momentteki bu artış ihmal edilebilir mertebede olup, kazığın alt yarısında etkili olmaktadır [35]. Bu artış statik yükleme altındaki eğilme momentinin ortalama % 30'u civarındadır.

Yatay kuvvetin şiddetinin arttırılması veya tekrarlı yükleme deneylerinde tekrar sayısının arttırılması kazık çevresindeki zemin yer değiştirmelerinin daha geniş ve derin bir bölgeye yayılmasına sebep olmaktadır.

3.6.3.2. Kazık ve Zemin Özelliklerinin Etkisi

Ashour, M. ve Norris G., p-y eğrilerine etki eden faktörleri şekil değiştirme kaması (strain wedge) modeliyle araştırmışlardır. Bu model ile kazık eğilme rijitliğinin, kazık şeklinin, kazık başlığının durumlarının etkileri araştırılmıştır [36].

Kazığın Eğilme Rijitliği

Kazığın eğilme rijitliğinin tespiti için sıkı/gevşek kum ve yumuşak/katı kile yerleştirilen çelik kazık ve ahşap kazık kullanılmıştır. Karşılaştırılan p-y eğrilerine göre, kazığın rijitliğinin sıkı kumda önemli bir etkisi, gevşek kumda ise daha makul bir etkisi bulunmaktadır.

Kil zeminde yer alan kazıkların, karşılaştırılması sonucunda ise, rijit kazığın bulunduğu katı kilde, daha yüksek zemin direnci görülmektedir. Buna karşılık yumuşak kil zeminde ise kazık rijitliğinin değişiminin zemin direnci üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir.

Kazık Başlığının Durumu

Kazık başlığının durumunun p-y eğrilerine etkisinin incelenmesi için serbest başlı veya rijit başlı kazığın, gevşek / sıkı kum ve yumuşak / katı kil zemin içinde davranışı incelenmiştir. Sıkı kuma rijit başlıklı kazık yerleştirildiğinde, serbest başlıklı kazığa göre zeminde daha yüksek direnç görülmektedir. Gevşek kumda ise iki farklı kazık başlığı için de p-y eğrileri birbirine çok benzemektedir. Katı ve yumuşak kilde bulunan rijit başlıklı kazık, aynı zeminde bulunan serbest başlıklı kazığa göre, nihai zemin direncine daha az bir ötelenmede ulaşmaktadır [36].

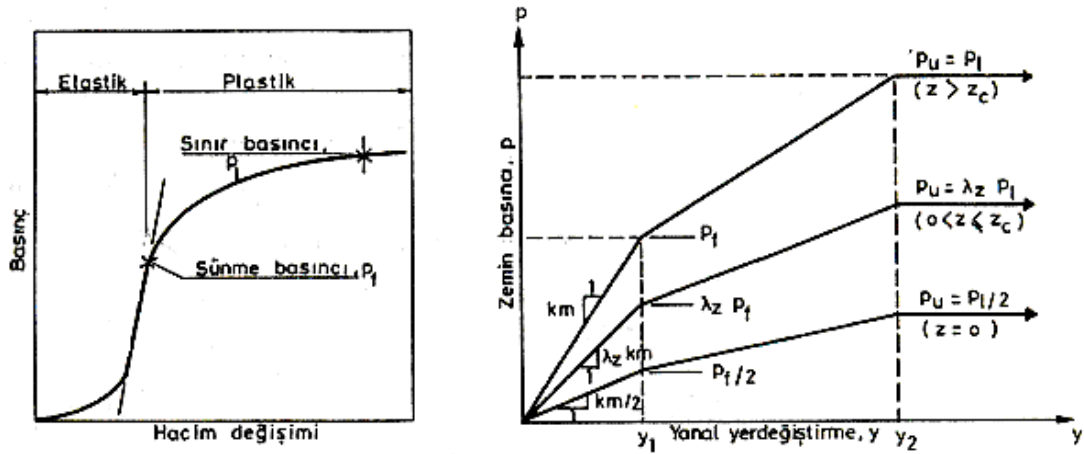
Kazık Şekli

Kazık kesitinin p-y eğrilerine etkisinin incelenmesi için kum ve kil zeminde, kare ve dairesel kesitli, aynı eğilme rijitliğine sahip beton kazıklar kullanılmıştır. Buradan elde edilen eğrilere göre hem kil hem de kum zeminde kare kesitli kazıkta, dairesel kesitli kazığa göre daha büyük bir kazık-zemin direnci görülmektedir [36].

3.6.4. Presyometre Deneyi Sonuçlarından p-y Eğrilerinin Elde Edilmesi

Presyometre deneyinin sonuçlarından yararlanarak p-y eğrilerinin elde edilmesi pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [37]. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanlardan biri Baguelin tarafından önerilmiş olup aşağıda kısaca anlatılmıştır [38]. Presyometre deneyi sonucunda Şekil 3.27 a' da gösterilen eğriye benzer bir eğri elde edilir. Bu eğrinin ilk kısmı, basınç ile hacim değişimi arasındaki lineer ilişkiyi temsil eder.

Basıncın, sünme basıncı, p_f değerine ulaşması ile bu ilişki lineer olmaktan çıkarak zemin plastik şekil değiştirme yaptığını gösterir. Basınç, sınır basıncı, p_L değerine ulaştıktan sonra da basınç artmaksızın hacimdeki değişim hızla artar. Dolayısıyla, p_L zeminin taşıma gücüne ulaştığı değerini temsil eder ($p_U = p_L$)



a) Basınç/ Hacim Değişimi

b) Modellemede Kullanılan p-y Eğrisi

Şekil 3.27 Presyometre deneyinden zemin reaksiyonu değerlerinin elde edilmesi [38]

Bageulin ve diğ. Şekil 3.27 b' de anlatılan iki kademe yüklemeyi temsil eden eğrileri vermiştir. En yukarıdaki eğri kritik derinlik z_c ' den daha aşağıdaki bölgeler için kullanılır. En aşağıdaki eğri ise, zemin yüzeyindeki ($z=0$) p-y eğrisi olup kabarmadan dolayı yapılması gereken azaltma çarpanı ($\lambda_z=0.5$) içerir. $0 < z < z_c$ arasında ise derinliğe bağlı olarak (3.94) bağıntısından hesaplanan azaltma katsayısı (λ_z) ile çarpılmış ortadaki eğri kullanılmalıdır [38].

$$\lambda = [1 + (z / z_c)] / 2 \quad (3.94)$$

p-y yöntemi, zeminin elasto-plastik davranışını göz önünde bulundurması, kazık-zemin deformasyonları arasında uyum sağlaması, üst yapıdan kazığın aktarılan tesirleri tam olarak dikkate alması sebebiyle son yıllarda yatay yükler altındaki kazıkların analizinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber, p-y analiziyle elde edilen çözümlerin hassaslığı, p-y eğrilerinin doğru olarak tahmin edilmesine bağlıdır. Kazık boyunca hesaplanan eğilme momentleri p-y eğrilerindeki değişikliklerden fazla etkilenmezken, kazık yer değiştirmeleri için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Her kazık-zemin sistemi için farklı zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirmesi (p-y) eğrisi beklenirken, bu bölümde benimsenen p-y kriterleri Texas, Austin Üniversitesindeki bir grup araştırmacının yaptığı arazi deneylerine dayanmaktadır. Bu nedenle p-y kriterlerinin kullanılmasında dikkatli davranılmalıdır. Ayrıca Winkler modelinin zemini, birbirinden bağımsız hareket eden bir takım yaylardan ibaret bir ortam olarak kabul etmesi bazen yanlış sonuçlar veren bir basitleştirme olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.7. Karakteristik Yük Yöntemi (CLM)

Duncan ve diğ. tarafından önerilen ve p-y yöntemi uygulamasından elde edilen veri tabanı üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan bir yaklaşımdır [39]. Karakteristik yük yöntemi, yatay yük taşıyan kazıkların davranışını boyutsal analiz yöntemiyle ve davranış parametrelerini de boyutsuz değişkenlere bağlayarak çözümlenmektedir. Bu yöntem, gerek kohezyonlu ve gerekse kohezyonsuz zeminler içindeki pek çok sayıda rijit ve serbest başlı kazık üzerinde p-y yöntemi ile çözümler yaparak elde edilen sonuçları, boyutsuz değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerini tanımlamak yolunda kullanmak sureti ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem aşağıdaki problemlerin çözümünde kullanılmaktadır:

- a- Zemin yüzeyi seviyesinde yanal yüklenmiş rijit ve serbest başlı kazıklar ile kazık başlığının üzerindeki bir seviyede yük alan kazıkların zemin yüzeyi seviyesindeki ötelenme miktarının bulunması.
- b- Yukarıda anlatılan yükleme şartlarında oluşabilecek maksimum moment miktarının ve yerinin saptanması.

Yöntemde kazığın çap ve eğilme rijitliği ile zeminin mukavemet ve gerilme –şekil değiştirme davranışı özelliklerini içeren karakteristik bir yük ve karakteristik moment tanımlanmaktadır.

Killi zeminlerde,

$$P_C = 7,34B^2 (E_p R_l) \left(\frac{S_u}{E_p R_l} \right)^{0.68} \quad (3.95)$$

$$M_C = 3,86D^3 (E_p R_l) \left(\frac{S_u}{E_p R_l} \right)^{0.46} \quad (3.96)$$

Kumlu Zeminlerde,

$$P_C = 1.57B^2 (E_p R_l) \left(\frac{\gamma' B \phi K_p}{E_p R_l} \right)^{0.57} \quad (3.97)$$

$$M_C = 1,33D^3 (E_p R_l) \left(\frac{\gamma' B \phi K_p}{E_p R_l} \right)^{0.40} \quad (3.98)$$

şeklinde verilmiştir. Burada, R_l atalet momenti oranı olup,

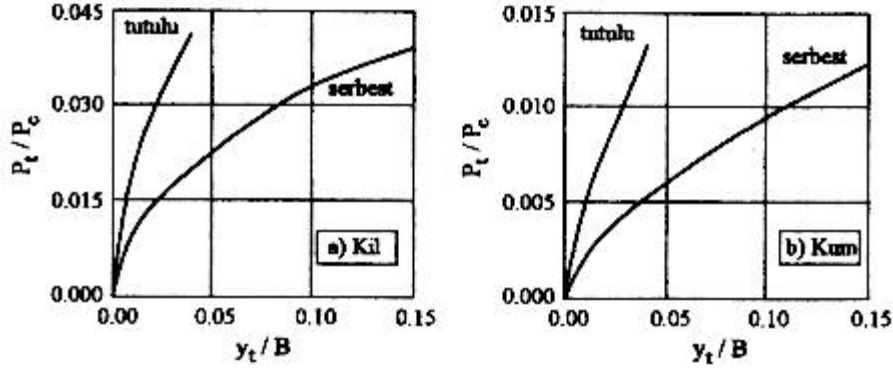
$$R_l = \frac{I_p}{I_{daire}} \quad (3.99)$$

şeklindedir. I_p kazığın atalet momenti, I_{daire} ise dolu dairesel kesit atalet momentini göstermektedir. γ değeri, yeraltı suyu altında ise, su altındaki, yeraltı suyu üzerinde ise, toplam birim hacim ağırlığı olarak alınır. K_p Rankine pasif itki katsayısıdır. Drenajsız kayma mukavemeti S_u 'nun arazi ve üç eksenli basınç deneyleriyle, ϕ 'nin ise arazi deneyleriyle bulunması önerilmiştir.

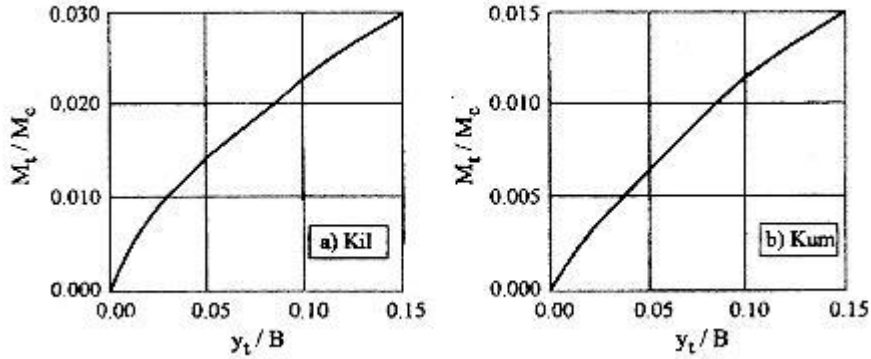
P_c ve M_c değerlerinin gerçekçi olarak saptanabilmesi yönünde bu yöntem bulgularını p-y yöntemi bulguları ile kıyaslamak için yapılmış olan çalışmalar, direnç

parametreleri S_u ve ϕ' değerlerinin kazık çapının 8 katı derinliği içinde araştırılarak bulunan değerlerin ortalamalarının alınmasının optimum çözüm için yararlı olacağı ortaya konmuştur.

Duncan ve diğ. serbest ve rijit başlı kazıklar için killi ve kumlu zeminlerde zemin yüzeyine etkiyen yatay yük ve moment nedeni ile oluşacak ötelenmeleri Şekil 3.28 ve Şekil 3.29' da boyutsuz eğriler şeklinde vermişlerdir.



Şekil 3.28 CLM yönteminde yatay yük nedeniyle meydana gelen ötelenmeler [40]



Şekil 3.29 CLM yönteminde moment nedeniyle meydana gelen ötelenmeler [40]

Serbest başlı bir kazığa zemin yüzeyi üzerindeki bir seviyede uygulanan yatay yük nedeni ile zemin yüzeyi seviyesinde hem yatay yük hem de moment bulunacaktır. Bu seviyedeki ötelenme, bu iki etkenin bileşiminden oluşacaktır. Yük-ötelenme ilişkisi doğrusal olmadığından çözümde doğrusal olmayan bir süperpozisyonun yapılması gerekir.

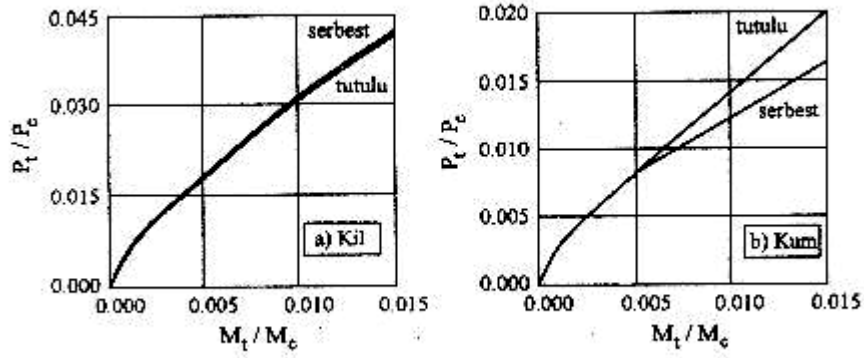
1. Yalnız başına yük etkimesi halinde ötelenme Y_{tp} ile yalnız moment etkimesi

halindeki ötelenme Y_{tm} yukarıdaki eğrilerden bulunur.

2. Momentin doğuracağı ötelenmeyi yaratacak yük P_m ile yükün yaratacağı ötelenmeyi verecek moment M_p yine eğrilerden ters işlem yapılarak bulunur.
3. $P_t + P_m$ ile $M_t + M_p$ yük ve momentlerine karşılık gelen Y_{tpm} ve Y_{tmp} ötelenmeleri bulunur.
4. Zemin yüzünden yukarıda etkiyen yük için beklenen ötelenme,

$$Y_{birleşir} = 0.5(Y_{tpm} + Y_{tmp}) \quad (3.100)$$

olacaktır. Maksimum moment için aşağıdaki eğriler kullanılabilir.



3.30: Yük- moment eğrileri [40]

Kazık başının tutulu olması halinde en büyük moment kazık başında meydana gelir. Bu durumda, en büyük moment kazık başına uygulanmak suretiyle tüm değerler yukarıdaki gibi hesaplanır. Zemin seviyesinden daha üst bir seviyede bulunan yatay yüklerle yüklenmiş olan serbest başlı kazıklarda maksimum moment tutulu başlı kazıkların aksine kazığın belli bir derinliğindeki kesitte oluşur. Bu durumda momentin derinlikle değişimi Matlock-Reese bağıntıları kullanılarak bulunabilir. Ancak bu yaklaşımda yük ve moment nedeniyle zemin seviyesinde oluşacak ötelenme değeri,

$$Y_{birleşir} = \frac{2.43P_t}{E_p I_p} T^3 + \frac{1.62M}{E_p I_p} T^2 \quad (3.101)$$

yazılabilir. 2.43 ve 1.62 katsayıları A_y ve B_y katsayılarıdır. Bu eşitlikten T karakteristik uzunluğu çekilerek, kazık boyunca moment dağılımı aşağıdaki şekilde bulunur.

$$M_z = A_m P_t T + B_m M_t \quad (3.102)$$

A_m ve B_m değerleri Tablo 3.4 ve 3.5’ de verilmiştir. Kazık başına zemin yüzeyinde yalnızca yatay bir yük uygulanırsa maksimum moment $Z=1.3 T$ derinliğinde görülür. Aynı şekilde yalnızca bir moment uygulanırsa, bu moment maksimum moment olur. Zemin seviyesinden yukarıdaki bir seviyede yatay yük uygulanması halinde ise maksimum moment $z=0$ ve $z=1.3T$ arasında bir derinlikte görülür. Duncan ve diğ. karakteristik yük yönteminin uygulanabilmesi için kazık uzunluklarının kazık davranışlarında etkili olmayacak kadar yeterli olması gerektiğini ve bunun için minimum derinliğin kazıkla zeminin göreceli rijitlikleri oranına bağlı olarak belirlenebileceğini belirtmektedirler [39]. Değişik zemin ve kazık özellikleri için yöntemin geçerli olabileceği minimum uzunluklar aşağıda Tablo 3.7’ de verilmiştir.

Tablo 3.7 Karakteristik Yük Yöntemi İçin Minimum Uzunluklar [40]

Zemin Türü	Kriter		Minimum Uzunluk
Kil	$\frac{E_p R_t}{S_u}$	100 000	6B
		300 000	10B
		1 000 000	14B
		3 000 000	18B
Kum	$\frac{E_p R_t}{\gamma B \phi K_p}$	10 000	8B
		40 000	11B
		200 000	14B

Önerilen minimum boydan daha kısa kazıklarda ötelenmelerin karakteristik yük yöntemi ile hesaplanandan daha fazla, momentlerin daha az olması beklenmektedir. Yöntem Reese ve diğ.’nin gerçekleştirdiği yatay yükleme sonuçlarına uygulandığında killi zeminde tahmin edilen ötelenme, ölçülenden %70 kadar fazla olmuşken ölçülen ve tahmin edilen momentler uyum içinde bulunmuştur [34].

Kumlu zeminlerde ise hesaplanan ve ölçülen ötelenmeler yalnızca %10 farketmiş, momentler ise birbirine çok yakın bulunmuştur.

3.8. Kazıklarda Yatay Kuvvetler İçin Basit Yaklaşım (SALLOP)

Briaud, presyometre deneyi sonucuna göre basit bir yöntem önermektedir [41]. Aktarma boyu olarak,

$$l_0 = \left(\frac{4EI}{k} \right)^{1/4} \quad (3.103)$$

verilmektedir.

Tanımlanan değerde E ve I kazık elastisite modülü ve atalet momenti, k ise zemin yay sabiti (kN/m²) dir.

Kazıkta sıfır kayma kuvvetin olduğu en sığ derinlik sıfır kayma derinliği D_v olarak tanımlanmakta olup uzun bir kazıkta (L>3 l₀)

$$D_v = l_0 \tan^{-1} \left(\frac{1}{\frac{2M_0}{l_0 H_0}} \right) \quad (3.104)$$

ile bulunabilir. Kazık başına etkiyen kuvvet H₀, moment ise M₀ dır. M₀ = 0 ise

$$D_v = \frac{\pi}{4} l_0 \text{ olmaktadır.}$$

Kısa kazıkta ise (L < L₀),

$$D_v = \frac{H_0 L^2}{3(H_0 L + 2M_0)} \quad (3.105)$$

M₀ = 0 ise D_v = L/3 olmaktadır. Birçok durumda uzun kazık durumları geçerlidir. Briaud, kazık çapı ve genişliğinin %10 yatay yer değiştirmesine karşılık gelen yük kazığın yatay taşıma gücü olarak

$$H_{ou} = \frac{3}{4} P_t B D_v \quad (3.106)$$

ile vermektedir. P_t “önceden delerek” presyometre limit basıncıdır ve D_v derinliği boyunca ölçülmelidir. P_t presyometre probunun başlangıç boşluk hacminin iki katına ulaştığı hacimdeki basınç değeri olup P_t verileri elde yoksa SPT, CPT veya S_u ölçümlerine göre geliştirilmiş bağıntılarla bulunabilir. (3.103) bağıntısı eldeki presyometre veri tabanına göre ölçülen ve tahmin edilen değerlerin optimasyonu sonucu amprik olarak elde edilmiştir. 20 adet kazığın yükleme deneyi sonuçlarında zemin yay sabiti,

$$K = 2.3E_0 \quad (3.107)$$

olarak alınmıştır. E_0 presyometre ilk yükleme modülüdür ve D_v boyunca ölçülen değerlerin ortalamasıdır. E_0 ve D_v birbirine bağlı olduğu için çözümde iterasyon kullanılmalıdır. Bu yolla H_{ou} ’ nun tahmin edilen ve ölçülen değerleri arasında ilişki regresyon katsayısı ($r^2 = 0.977$) olacak kadar iyidir. Bir kazıkta ölçülen ve tahmin edilen değerler oranı 1.42 olduğu için bu yolla tahmin edilen değere 3 güvenlik sayısı uygulanması önerilmiştir.

Deney sonuçlarının yük – yatay yer değiştirme eğrilerinde $H_{ou}/3$ ’ e eşit yüklerde kazık başı hareketi $0.009B$ ile $0.034B$ arasında değiştiği için tutucu bir yaklaşımla,

$$y_0 = 0.02B \quad (3.108)$$

almanın doğru olacağı ileri sürülmektedir. Ancak bu şekilde yapılacak tahminlerde regresyon iyi olmamıştır ($r^2 = 0.082$). Daha iyi bir tahmin için diğer bir seçenek olarak yay katsayısı ile,

$$\text{Uzun kazıkta,} \quad y_0 = \frac{2H_0}{I_0K} + \frac{2M_0}{I_0^2K} \quad (3.109)$$

$$\text{Kısa kazıkta,} \quad y_0 = \frac{2(2H_0L + 3M_0)}{KL^2} \quad (3.110)$$

olarak bulunabilir. Veri tabanında tahmin edilen referans yük , $H_{ow}=H_{ou}/3$ için (3.109) ve (3.110) bağıntıları ile tahmin edilen y_0 değerleri arasında daha iyi bir bağıntı olduğu ($r^2 = 0.355$) görülmüştür. Kazıkta maksimum moment yay çözümü ile aşağıdaki gibi bulunup kazık kesiti kontrol edilmelidir.

Uzun kazıkta,

$$M_{\max} = H_0 l_0 e^{-(z_{\max}/l_0)} \sin \frac{z_{\max}}{l_0} + M_0 e^{-(z_{\max}/l_0)} \left(\cos \frac{z_{\max}}{l_0} + \sin \frac{z_{\max}}{l_0} \right) \quad (3.111)$$

$$z_{\max} = l_0 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1}{1 + \frac{2M_0}{l_0 H_0}} \right) \quad (3.112)$$

Kısa kazıkta,

$$M_{\max} = M_0 + H_0 z_{\max} + \left(\frac{H_0 L + 2M_0}{L^3} \right) z_{\max}^3 - \left(\frac{2H_0 L + 3M_0}{L^2} \right) z_{\max}^2 \quad (3.113)$$

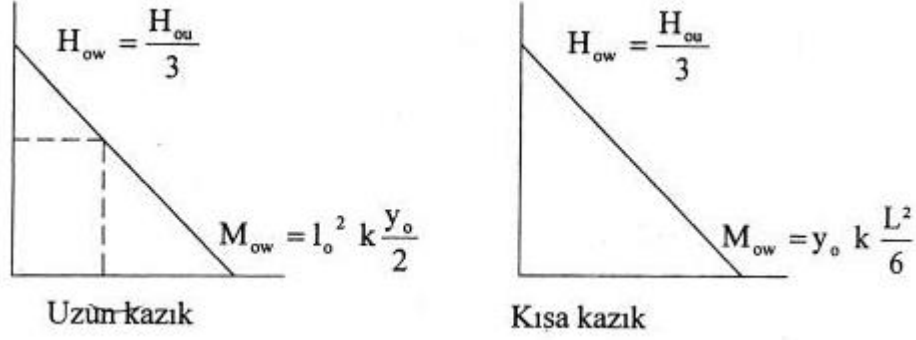
$$z_{\max} = \left(\frac{H_0 L^2}{3(H_0 L + 2M_0)} \right) \quad (3.114)$$

$M_0 = 0$ olarak kabul edilerek kazık başı hareketi, (3.108), (3.109) ve (3.110) bağıntıları ile $H_{ou}/3$ yükü için tahmin edilmektedir. Yatay kuvvet ve moment aynı anda etkiğinde etkileşim çizilmesi gerekmektedir. $M_0 = 0$ olduğunda $H_{ou}/3$ yükü izin verilebilir yer değiştirme y_{oa} olmakta, bu değer $H_0 = 0$ olduğunda,

$$\text{Uzun kazıkta } M_{ow} = \frac{1}{2} y_{oa} (I_{oa})^2 k \quad (3.115)$$

$$\text{Kısa kazıkta } M_{ow} = \frac{1}{6} y_{oa} L^2 k \quad (3.116)$$

çalışma momentleri tarafından oluşmaktadır. (3.109) ve (3.110) doğrusal bağlantılarına göre doğrusal etkileşim bağıntısı elde edilebilmektedir. H_{ow} ve M_{ow} 'nin bu diyagramında herhangi bir nokta ile belirtilen değerlerinde izin verilebilir kazık başı hareketi oluşmaktadır.



Şekil 3.31 SALLOP-Doğrusal Etkileşim Bağıntısı

Yöntemin 4.6 m. – 36.6 m. arasında değişen boylarda, 0.273 m – 0.915 m çaplarda çelik, beton ve ahşap kazıkların kum, kil ve kil üzerinde kum koşullarında elde edilmiş verilere dayandığı için her koşulda kullanılabileceği belirtilmektedir.

3.9. Tabakalı Zeminlerde Yatay Yüklü Tekil Kazık

Kazıkların teşkil edileceği zeminler çoğunlukla tabakalar halinde bulunurlar. Bu sistemde eğer tabaka kalınlıkları çok az ise, bu tabakalar ihmal edilebilirler. Bir tabaka sisteminde, varolan tabaka kalınlıkları birbirinden farklı, fakat tabakaların mühendislik özellikleri birbirine göre çok fazla farklılıklar göstermiyorsa, bütün tabakaların özellikleri bir ortalama altında kabul edilebilir [4]. Bu durumda zemin homojen, kohezyonlu ve kohezyonsuz olarak tanımlanarak çözüm daha önce anlatılan yöntemlerle yapılabilir. Ancak, tabaka sisteminde, tabaka kalınlıkları ve özellikleri birbirinden farklı ise, analiz yöntemlerinde de değişiklikler gerekmektedir.

3.9.1. Tabakalı Zeminde Kazığın Nihai Direnci

Brinch Hansen yöntemi, tabakalı zeminlerde yer alan kısa ve rijit kazıklara da uygulanabilir [11]. Bu yöntemin ayrıntıları 3.1. bölümünde incelenmişti. Tabakalı zeminlerin hesabında, zemin profili belirli bir tabaka sayısına bölünür, her tabakanın nihai direnci P_{xu} , 3.1 bağıntısı ile hesaplanır. x_r dönme merkezi, deneme-yanılma ile bulunur. x_r bulunduktan sonra, nihai yanal direnç Q_u dönme merkezine göre moment alınarak hesaplanır [4].

3.9.2. Tabakalı Zeminde Kazığın Yanal Ötelenmesi

Davisson ve Gill, iki tabakadan oluşan bir zemin kitlesi içinde yatay yükle yüklenmiş bir kazığın davranışını incelemişlerdir [42]. Bu iki tabaka, çeşitli

nedenlerle oluşabilecek doğal durumları yansıtmaktadır. Çoğu kez homojen bir killi zemin yüzeyi kuruma nedeni ile daha sertleşmektedir. Alüvyon zeminlerde, yüzeyde granüler, derinlerde silt-kil karışımları görmek olasıdır. Aynı hal tersine olabilir, pek çok durumda su birikintileri içindeki çökeller, yüzeyde yumuşak olup derinlikle sertleşirler [1], [42].

Diğer yandan yumuşak zemin içinde olup fazla ötelenme gösteren kazıkların baş seviyesinden itibaren yumuşak zemin bir miktar sıyrılıp yerine sıkı bir dolgu yapılabilir. Bu, aşırı ötelenmeyi önleyecek ve moment miktarını azaltacak bir pratik bir önlemdir.

Bu analizde kullanılan iki tabakanın yatak katsayısı varyasyonları Şekil 3.32’ de gösterilmiştir. Kazığın bulunduğu zemin tabakasının kalınlığı, iki tabakaya bölünür, burada toplam kalınlığın bir kısmı üst tabakayı, diğer kalan kısmı alt tabakayı oluşturmaktadır. Üst tabakanın rijitliği, zemin modülü olan K_T ve alt tabakanın rijitliği, K_b ile karakterize edilmektedir.

Şekil 3.32 Tabakalı Zeminlerde Yatak Katsayısı Varyasyonları [4]

$C_t = K_T / K_b$ oranı 0 ile 20 arasında değerler almaktadır. Daha önce anlatıldığı gibi, belli sayıda elastik sonlu yayların üzerine yerleştirildiği varsayılan kirişin davranışını ifade eden diferansiyel denklem,

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{K_T}{K_b} y = 0 \quad (3.116)$$

şeklindedir.

$$Z = \frac{x}{R} \quad \text{ve} \quad R = \left(\frac{EI}{K_b} \right)^{1/4} \quad (3.117)$$

olarak alınarak, Şekil 3.32 'e göre üst tabaka için $K_T/K_b = C_t$, alt tabaka için $K_T/K_b = 1$ alınırsa, diferansiyel denklemler ,

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + C_t y = 0 \quad \text{for } \frac{x}{R} < \tau \frac{L}{R} \quad (3.118)$$

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + y = 0 \quad \text{for } \frac{L}{R} < \frac{x}{R} < \frac{L}{R} \quad (3.119)$$

aralıklarında geçerlidirler.

Davisson ve Gill serbest başlıklı ve sabit başlıklı kazıklar için, moment ve ötelenme bağıntıları elde etmişlerdir. Bu bağıntılar aşağıda ifade edilmişlerdir [42].

Serbest Başlıklı Kazıklar

$$y_x = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad (3.120)$$

$$M_x = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad (3.121)$$

Rijit Başlıklı Kazıklar

$$y_x = C_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} \quad (3.122)$$

$$M_x = C_{mc} Q_g R \quad (3.123)$$

Eğriler yardımı ile serbest başlıklı kazıklar için, A_{yc} , A_{mc} , B_{yc} , B_{mc} , sabit başlıklı kazıklar için, C_{yc} ve C_{mc} boyutsuz katsayıları bulunabilir.

Davisson ve Gill'in bu çalışmada vardıkları sonuçlar aşağıdadır:

- a. İki tabakalı bir zeminde yüzeyde bulunan zemin altta bulunan tabakaya göre daha sert bir kil olması halinde bu zemin içindeki bir kazığın başında yatay yük nedeni ile oluşacak ötelenme miktarı azalır. Ancak bu etki, yüzeydeki sert kilin kalınlığının $0.2 R$ den daha fazla olması halinde artış göstermez.
- b. Kazık başının ötelenme değeri c katsayısının artması ile azalır; ancak bu azalma eğilimi, c değerinin 5 den fazla olması halinde yavaşlar.
- c. Yüzeyden itibaren $0.2 R$ ila $0.4 R$ derinlik içinde bulunan zemin, yanal yük taşıyan bir kazığın davranışını çok önemli ölçüde etkilemektedir.
- d. Yukarıda maddede sözü edilen durum nedeni ile yatak katsayısı değerinin $0.2 R$ ie $0.4R$ derinlik içinde yapılacak araştırmalar ile saptanması gerekir [42].

4. LUSAS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI

Bu çalışmada yatay yüklü kazıkların davranışları, Sonlu Elemanlar Yöntemi LUSAS 13.3 programı kullanılarak incelenmiştir. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile LUSAS programı kısaca anlatılacaktır.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, tekrar eden çok sayıda işlemler ile mühendislerin karşılaştığı taşıyıcı sistemlerin karmaşık ve zor mekanik problemlerini kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözebilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Bu yöntem, yapıların yük altındaki davranışlarını tespit etmek amacıyla ufak parçalara ayrılması ve parçaların yapısal davranışlarından sistemin yapısal davranışın belirlenmesi esasına dayanır. Yapıyı oluşturan parçaların her birine eleman adı verilir. Bu elemanların şekli elemanın düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Burada yapıyı oluşturan elemanların davranışının tanımlanması için geliştirilen bağıntılar tüm sisteme uygulanarak matris tekniği ile bilinmeyenlere ulaşılır.

Bu yöntem geoteknik mühendisliğinde yükleme, gerilme - şekil değiştirme, akım, konsolidasyon, taşıma gücü, zemin dinamiği veya genel olarak dinamik davranış, malzeme çeşitliliği olan problemlerde yaygın olarak kullanılabilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, aynı amaca yönelik diğer yöntemlere göre taşıyıcı elemanların mekanik problemlerinin çözümlerinin modellenmesinde kullanıcılara birçok olanaklar sağlamaktadır. Bu olanaklar aşağıdaki gibi sıralanabilir [45].

- Sonlu Elemanlar Yöntemi, geometrisi karmaşık taşıyıcı elemanların çözümünü, incelenmesini olanaklı hale getirir.
- Taşıyıcı elemanda çözüm ortamı alt bölgelere ayrılarak ve değişik sonlu elemanlar kullanılarak bazı bölgeleri daha ayrıntılı ve hassas hesaplama olanağı sağlar.
- Sonlu Elemanlar Yöntemi, değişik ve farklı malzeme özellikleri olan sistemleri çözümleme olanağı sağlar.

- Noktadan noktaya değişen izotropik, anizotropik, ortotropik, lineer ve nonlinear malzeme özellikli, değişken kesitli taşıyıcı elemanları, sürekli, süreksiz değişken yükler altında hesaplama olanağı sağlar.
- Sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra sonlu elemanlar yönteminin en önemli olanaklarından biri olan sınır şartları oldukça basit bir işlemler ile temel denklemlere dahil edilme olanağı sağlar.

4.1.1. 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 $[k]$ ile düğüm noktası vektörü $\{Q\}$ ve deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki eşitlik,

$$[k]\{q\} = \{Q\} \quad (4.1)$$

olarak verilmektedir.

Toplam Rijitlik Matrisi

Bütün ortam 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 vektörü $\{r\}$ arasındaki eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$[k]\{r\} = \{R\} \quad (4.2)$$

Gerilme Durumu

Sürekli bir ortamda bir noktadaki gerilme hali, altı bileşene sahiptir ve bu bileşenler matris hesabında aşağıdaki gerilme vektörü ile ifade edilir [44].

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\} \quad (4.3)$$

$\{\sigma^T\}$ = Gerilme Vektörü

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = Normal Gerilme Bileşenleri

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = Kayma Gerilmesi Bileşenleri

Üzerinde kayma gerilmeleri olmayan üç düzlem vardır, bu düzlemlere “asal düzlemler” denir. Koordinat eksenleri asal düzlemlere uygun seçilirse, gerilme vektörü aşağıdaki hali alır.

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (4.4)$$

Koordinat eksenleri ile değişmeyen gerilme invariantları, gerilme bileşenleri cinsinden,

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} J_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ &= \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} J_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \\ &= \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \quad (4.7)$$

olarak ifade edilirler.

Deformasyon ve Kinematik Durumu

Gerilme vektörü gibi deformasyon vektörü de altı bileşene sahiptir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\} \quad (4.8)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ = Normal Deformasyon

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ = Kayma Deformasyon

Gerilme halinde olduğu gibi, kayma deformasyon bileşenlerinin sıfır olduğu yani aralarındaki dik açının değişmediği üç asal düzlem vardır ve koordinat eksenleri uygun seçilirse, deformasyon vektörü,

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (4.9)$$

olarak ifade edilir. Burada $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ asal deformasyonlardır.

Koordinat eksenlerine bağlı olmayan deformasyon invariantları,

$$I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \\ &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + \frac{1}{4}(\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} - \varepsilon_x \gamma_{yz}^2 + \varepsilon_y \gamma_{zx}^2 + \varepsilon_z \gamma_{xy}^2) \\ &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Lineer İzotropik Elastisite

Genelleştirilmiş Hooke Kanunu'nda enbasit hal malzemenin lineer, izotropik ve elastik olduğundadır. İzotropik malzemede, bünyedeki her düzlem malzeme davranışının simetri düzlemidir. Deformasyonlar cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{U} \\ \text{S} \\ \text{T} \end{array} \begin{array}{c} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{array} \end{array} \begin{array}{c} 1/E \\ -\nu/E \\ -\nu/E \\ 1/E \\ 1/E \\ 1/E \end{array} \begin{array}{c} -\nu/E \\ 1/E \\ -\nu/E \\ 1/E \\ 1/E \\ 1/E \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} \text{C} \\ \text{O} \\ \text{M} \\ \text{P} \\ \text{R} \\ \text{E} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{array} \quad (4.13)$$

Gerilme cinsinden ise aşağıdaki eşitlik yazılabilmektedir.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{U} \\ \text{S} \\ \text{T} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{array} \begin{array}{c} \text{U} \\ \text{V} \\ \text{W} \end{array} \begin{array}{c} \text{V} \\ \text{W} \\ \text{Z} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 v \\ v \\ v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1-v \\ v \\ 1-v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2} \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{U} \\ \text{S} \\ \text{T} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{array} \begin{array}{c} \text{U} \\ \text{V} \\ \text{W} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 v \\ v \\ v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1-v \\ v \\ 1-v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2} \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2}
 \end{array}
 \quad (4.14)$$

Düzlem Deformasyon Durumu

Sistemin bir boyutu boyunca geometrisi ve yükleme şartları önemli derecede değişmiyorsa bu duruma düzlem deformasyon durumu denir. Şerit temeller, tünel, boru gibi uzun silindirler, destek duvarları, barajlar tipik düzlem deformasyon problemleridir. Düzlem deformasyon şartında z yönündeki aşağıdaki deformasyon bileşenleri sıfır olur.

$$\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (4.15)$$

Ve gerilme – deformasyon bağıntıları aşağıdaki hali alır.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{U} \\ \text{S} \\ \text{T} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{array} \begin{array}{c} \text{U} \\ \text{V} \\ \text{W} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 v \\ v \\ 1-v \\ 0 \\ v \\ v \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{U} \\ \text{S} \\ \text{T} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{array} \begin{array}{c} \text{U} \\ \text{V} \\ \text{W} \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 v \\ v \\ 1-v \\ 0 \\ v \\ v \\ 0 \\ \frac{1-2v}{2}
 \end{array}
 \quad (4.16)$$

$$\sigma_z = v(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4.17)$$

Düzlem Gerilme Durumu

Sistemin bir boyutu çok küçük ise ve bu yönde yük taşııyorsa düzlem gerilme problemleri söz konusu olur. Kendi düzleminde yüklenen ince plak örneği tipik bir örnek olarak verilebilir. Düzlem gerilme şartı,

$$\sigma_x = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (4.18)$$

olmaktadır. Buna göre gerilme deformasyon bağıntıları,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\epsilon_z = -\frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (4.20)$$

olmaktadır.

4.2. LUSAS Programının Özellikleri

4.2.1. Programın Sistem Özellikleri

Lusas Sonlu Elemanlar programı kullanıcılara oldukça fazla analiz imkanı sunmaktadır [46].

- 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
- Fouier analizi
- Kararlı durum alan analizi
- Geçici alan analizi
- Bağlı termo-dinamik analiz.

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

- Lineer izotropik / ortotropik / anizotropik
- Elasto-plastik / basınca bağlı deformasyon pekleşmesi anizotropik
- Deformasyon yumuşamalı lineer olmayan beton
- Bozulma

- 2D ve 3D ara yüzey
- Sünme
- İzotropik alan
- Ortotropik alan
- Konveksiyon / Radyasyon
- Kullanıcının tanımlayabileceği lineer olmayan malzeme, sünme ve bozulma
Büyük deformasyonları, hem küçük hem de büyük şekil değiştirmeleri
modellemek için geometrik olmayan formülasyonlar bulunmaktadır.
- Toplam Enerji
- Güncelleştirilmiş lagranj
- Euler
- Ko-rotasyonel

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

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

Sonlu elemanlar modelinde kullanılabilecek sınır koşulları aşağıdadır.

- Tutulu / önceden belirlenen değer
- Yaylar
- Kayma çizgileri
- İletim/ radyasyon

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

4.2.2. LUSAS Programının Kullanım Esasları

LUSAS sonlu elemanlar programı iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, problemin geometrisinin oluşturularak modelin sonlu elemanlara bölündüğü ve probleme ait malzemenin, sınır koşullarının, yük durumlarının atandığı Modeller programı ve oluşturulan modele ait data dosyanın çözdürüldüğü analiz programıdır. Lusas programında modellemenin doğru yapılması, modelde kullanılacak malzeme özelliklerinin doğru şekilde kullanılması, sonlu elemanların çözümün hassasiyetini etkileyecek kadar az veya analiz süresini çok fazla uzatacak kadar seçilmemesi çok önemlidir.

4.2.3. Data Dosyasının Hazırlanması

Problemin modellenmesinde Lusas 13.3 sonlu elemanlar programı kullanıldı. Program, analizin giriş 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 belirlenmektedir. Yapılan çizim Modeller yardımı ile data dosyasına çevrilir ve Solver ile çözdürülür. Çıktı dosyası Modeller programı ile görüntülenerek çözümler incelenebilmektedir.

Modeller'de analizi yapılmak üzere hazırlanan problem data dosyasına çevrilir. Oluşturulan 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 yardımı ile 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 editörle düzenlenmesidir. Bu çalışmada sonuncu yöntem sıkça kullanıldı.

LUSAS ile modellenen problemin data dosyasını oluşturan bölümler aşağıda yer almaktadır (Ek A.1).

- **Problem Title**

Probleme ilgili açıklama yapılır. Data dosyasının ilk komutudur.

- **Units**

Bu bölümde kullanılan kuvvet (kN), uzunluk (m), kütle (t) ve zaman birimi (sn) yer almaktadır.

- **Option**

Kullanıcı tarafından analizle ilgili opsiyonlar tanımlanmaktadır. Analizin gidişatını etkileyebileceği için option tanımlamalarına dikkat edilmesi gerekir.

- **Element Topology**

Sonlu elemanlar ağını oluşturan elemanların düğüm noktalarının yerleri tanımlanır. Eleman topolojisi her eleman için tekrarlanır.

- **Solution Order**

Çözümün nasıl yapılacağı tanımlanır. Doğru seçilmesi analizin süresini kısaltabilir.

- **Node Coordinates**

Düğüm noktalarının koordinatları global kartezyen koordinatlarında girilir.

- **Material Properties**

Modelde kullanılan elemanlara ait malzeme özelliklerinin tanımlanmasını sağlar. Burada Mohr Coulomb Akma Yüzeyi modeli ve Drucker Prager Akma Yüzeyi modelleri kullanılmıştır. Drucker Prager Akma Yüzeyi Modeli ‘Material Properties Nonlinear 64’ olarak gösterilir.

- **Material Assignments**

Bu bölümde modelde kullanılan elemanlara hangi malzemenin atandığı yer alır.

- **Support Nodes**

Sınır koşullarını tanımlayan başlıktır. Hangi düğüm noktasının hangi yönlerde sınırlandığı bu başlık altındadır.

- **Load Case**

Modelde yer alan bütün yükler bu başlık altında tanımlanır. Bu yüklere örnek; rezidüel gerilmeler (SSRE), tekil yük (CL) ve sabit kütle kuvvetleri (CBF)’ dir.

CBF ile zemine kendi ağırlığı uygulanır ve bu yükleme ile ilgili olarak Option 48’in kullanılması gerekir.

- **Curve Definition**

Yüklemelerin kaç kademede yapılacağı ve hangi şiddette tanımlanacağını bu başlık altında tanımlanır.

- **Curve Assignments**

Eğri ataması bölümünde tanımlanan eğriler, yük durumlarına belli bir faktörle çarpılarak atanır.

- **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.

5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

5.1. LUSAS ile Yatay Yüklü Kazıkların Modellenmesi

LUSAS Sonlu Elemanlar yönteminde kazık – zemin modeli sonlu elemanlar ağı, geometri, malzeme, sınır koşulları, yükleme çeşitlerini içermektedir. Kazık zemin modeli LUSAS grafik ortamında modellendikten sonra, probleme ait data dosyası LUSAS analiz ile çözümlendirilmiştir.

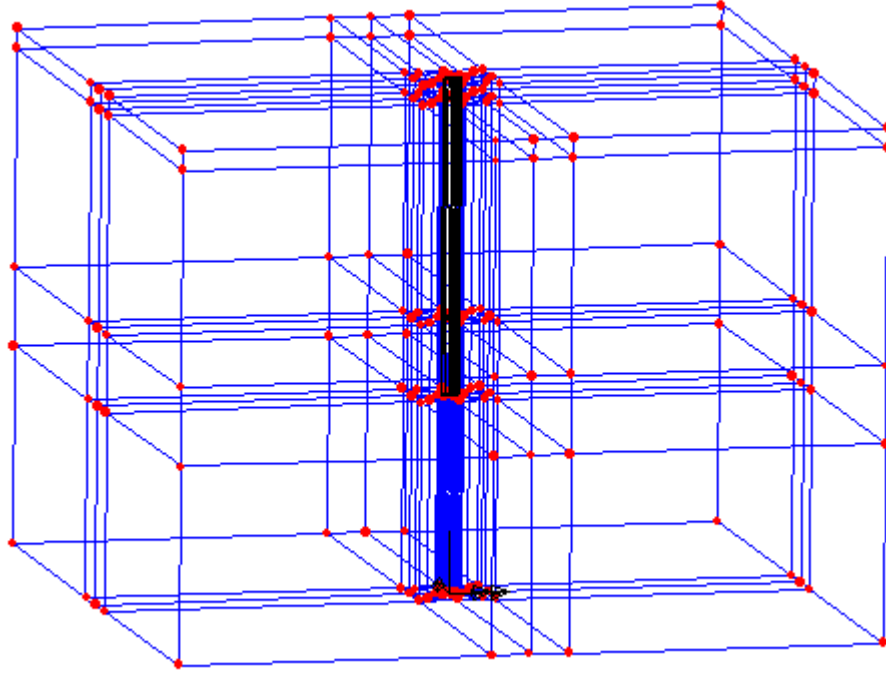
Burada farklı çaplarda, farklı uzunluklarda ve farklı zemin ortamlarındaki yatay yüklü tekil kazıkların analizleri LUSAS Sonlu Elemanlar programıyla yapılmış, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı

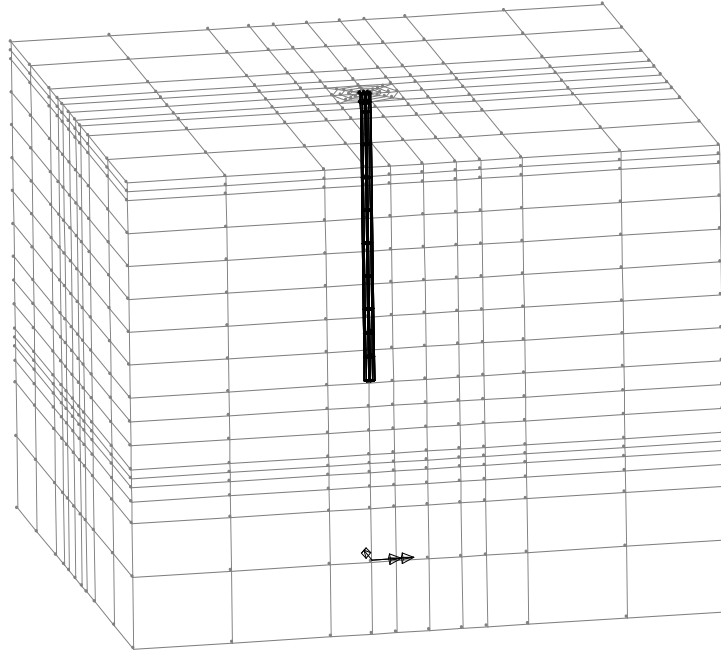
Analizler Şekil 5.1’ de görülen üç boyutlu model ile yapılmıştır. Eleman sayısı, yatayda gerilmelerin yoğun olacağı kazık civarında ve düşeyde kazık başı ve kazık sonunda sıklaştırılmış, bahsedilen yerler dışında elemanlar seyrekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar ağının sadece belirli yerlerde sıklaştırılmasının nedeni optimum analiz süresini ayarlamak içindir.

Analizlerde kullanılan kazık modeli, eğilme rijitliklerinin ve kesit alanının daireye yakın olması ve eleman sayısını azaltmasından dolayı sekizgen olarak belirlenmiştir.

Modelde zemin sınırları düşey yönde kazık boyunun yaklaşık 1.5 katı, yatay yönde ise kazık boyunun yaklaşık 2,5 katı kadar belirlenmiştir. Zemin sınırları, 16 m’lik kazık için düşeyde 26 m, yatayda 36 m, 20 m’ lik kazık için yatay da 44 m düşeyde 30 m olarak oluşturulmuştur. Kazıklar yatay olarak yüklendiği için zemin yatay mesafe daha fazla uzatılmıştır.



Şekil 5.1 Modelin Üç Boyutlu Geometrisi

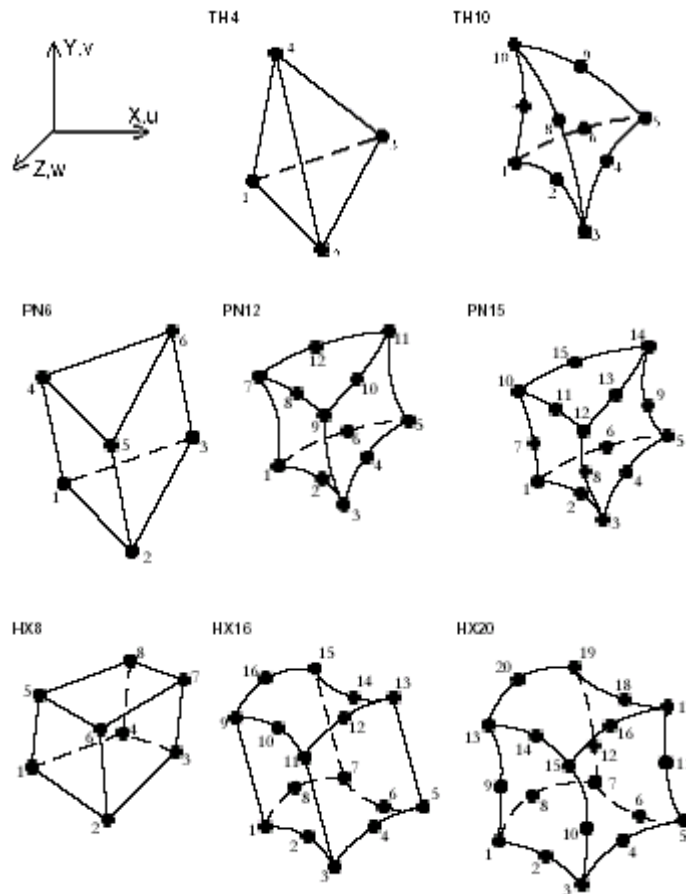


Şekil 5.2 Modelin Sonlu Elemanlar Ağı

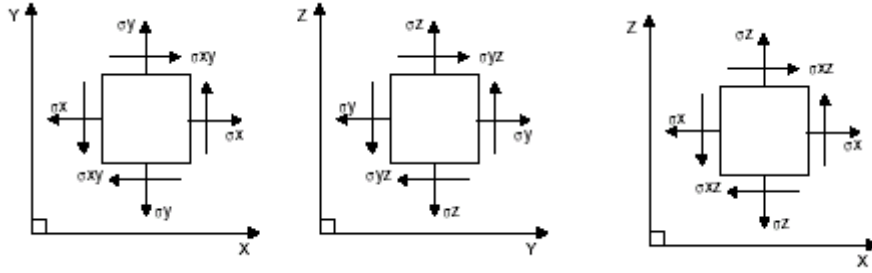
5.1.2. Kullanılan Elemanlar

Şekil 5.2' de ağı oluşturan elemanlar 3D katı kontinuum elemanlar grubu olarak adlandırılan gruba ait elemanlardır. Bu grubun içinde HX8, HX16, HX20, PN6, PN12, PN15, TH4 ve TH10 elemanları vardır. Bu elemanların şekilleri Şekil 5.3' de gösterildiği gibidir. Eleman adlarının önündeki HX, PN ve 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. Analizlerde Şekil 5.3' de yer alan HX8 ve PN6 üç boyutlu elemanlar kullanılmıştır.

3D katı sürekli ortam elemanlara ait pozitif gerilme yönleri Şekil 5.4' de gösterildiği gibidir.

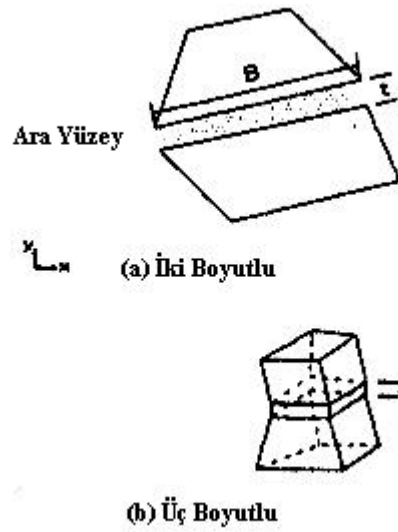


Şekil 5.3 3D Katı Ortam Elemanlar [47]



Şekil 5.4 3D Katı Sürekli Ortam Elemanlarındaki Pozitif Gerilme Yönleri [47]

Bu çalışmada kazık etrafına 10 cm' lik ara yüzey oluşturulmuştur. Zemin yapı etkileşimi problemlerinde, birbirleri ile temas halinde bulunan iki farklı ortamda, yük altında davranışın sonlu elemanlar ile analizinde ara yüzey elemanlar kullanılması gerektiği yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Bunun nedeni iki farklı ortamın relatif hareketinin belirlenmesidir. Ara yüzey elemanın malzeme özelliklerinin maruz kaldıkları relatif hareket ile uyumlu olarak belirlenmesi, non-lineer davranışın alınması ve eleman kalınlığı / genişliği oranının 0.1-0.01 arasında seçilmesi gerekir.

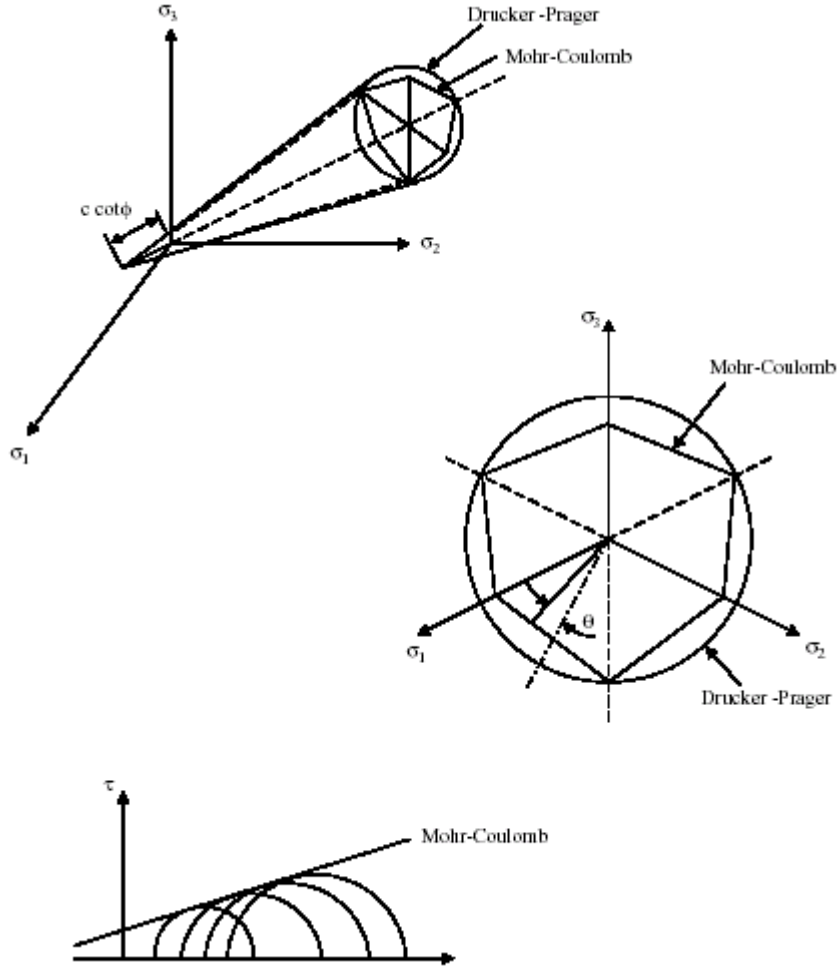


Şekil 5.5 Ara yüzey elemanı [48]

5.1.3. Kullanılan Yapısal Modeller

Kazıkların modellenmesinde zemin elasto-plastik, kazık ise elastik olarak alınmıştır.

Elasto-plastik durum için Mohr-Coulomb ve Drucker Prager yapısal modelleri mevcuttur. Bu çalışmada zemin Drucker - Prager akma kriterine göre modellenmiş, kazık ise lineer izotropik olarak kabul edilmiştir. Drucker - Prager akma kriterine ait en önemli zemin parametreleri elastisite modülü E_s , poisson oranı ν , zeminin birim hacim ağırlığı γ , zeminin kohezyonu c , içsel sürtünme açısı ϕ dir.



Şekil 5.6 Mohr-Coulomb ve Drucker Prager Akma Kriteri [49]

Mohr – Coulomb’da akma kriteri Coulomb sürtünme yasasının genelleştirilmiş olup ve (5.1) bağıntısındaki gibidir.

$$F(\sigma, K) = \tau - (c - \sigma_n \tan \phi) = 0 \quad (5.1)$$

Burada τ kayma mukavemeti, σ_n normal gerilme, c kohezyon, ϕ kayma mukavemeti açısıdır.

Mohr- Coulomb akma fonksiyonu gerilme invariantları cinsinden şöyle yazılabilir:

$$F(\sigma, K) = \sigma_n \sin \phi + (J_2)^{1/2} \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot c \cos \phi \quad (5.2)$$

Burada hem c hem de ϕ deformasyon pekleşme parametresi K ’ya bağlıdır.

Drucker-Prager akma fonksiyonu (5.3) bağıntısında tanımlandığı gibi hidrostatik gerilmelerinin etkisini kapsamaktadır (Şekil 5.5).

$$f(\sigma, K) = \frac{6\sigma_n \sin \phi}{\sqrt{3(3 - \sin \phi)}} + (J_2)^{1/2} - \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3(3 - \sin \phi)}} \quad (5.3)$$

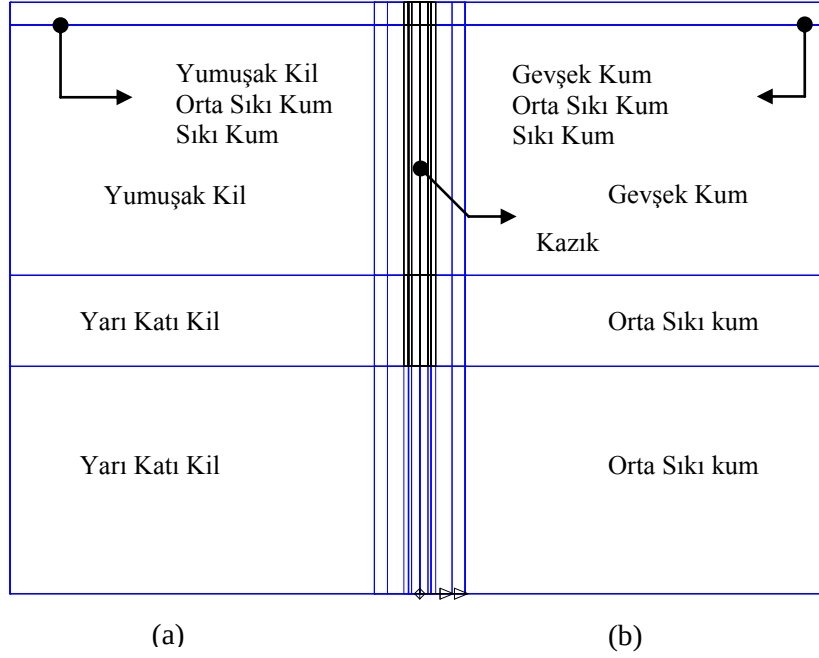
5.2. Yatay Yüklü Kazık Analizi

Analizler farklı kazık boyu, kazık çapı ve farklı zemin parametreleri için yapılmıştır. Analizlerde kullanılan kazık başlıkları serbesttir. Tekil kazığın kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki davranışı incelenmiş ve aynı modelin zemin yüzündeki zeminin özelliği ve kalınlığı değiştirilerek kazığın yatay yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Kazıklarda malzeme özellikleri sabit olarak alınmıştır. Analizlerde kullanılan kazık çapları 65 cm, 80 cm ve 100 cm, kazık boyları ise 16 m ve 20 m olarak alınmıştır. Tablo 5.1’ de üst tabaka zeminin değişimi ile yapılan analizler gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Lusas ile Yapılan Analizler

Zemin Ortamı	Üst Tabaka Zemin		
	D=65 cm (L=16, 20 m)	D=80 cm (L=16, 20 m)	D=100 cm (L=16, 20 m)
Kohezyonlu Zemin	Yumuşak Kil Orta Sıkı Kum Sıkı Kum	Yumuşak Kil Orta Sıkı Kum Sıkı Kum	Yumuşak Kil Orta Sıkı Kum Sıkı Kum
Kohezyonsuz Zemin	Gevşek Kum Orta Sıkı Kum Sıkı Kum	Gevşek Kum Orta Sıkı Kum Sıkı Kum	Gevşek Kum Orta Sıkı Kum Sıkı Kum

5.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık ve Zemin Parametreleri



Şekil 5.7 Analizlerde kullanılan zemin profili a) kohezyonlu zemin b) kohezyonsuz zemin

Analizlerde Şekil 5.7’ de görülen zemin türleri kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan kazık betondur. Zemin parametreleri Spundwand Handbuch-Teil 1 de belirtilen değerlerden seçilmiştir ve bu zemin parametreleri Tablo 5.2’ de gösterilmektedir. Lusas ile yapılan analizlerde, program kohezyonun sıfır ve yakın değerlerini kabul etmediğinden kumda kohezyona 2 değeri verilerek analiz yapılmıştır.

Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan zemin ve kazık malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (t/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme açısı
Kazık	2.1 x 10 ⁷	2.4	0.15	-	-
Gevşek Kum	40000	1.8	0.3	2	30
Orta sıkı kum	75000	1.9	0.3	2	37.5
Sıkı Kum	100000	1.9	0.3	2	37.5
Yumuşak Kil	2500	1.7	0.4	10	17.5
Yarı Katı Kil	10000	1.9	0.3	25	25

Analizlerde kazık – zemin etkileşimini modelleyebilmek için kazık ile zemin arasına ara yüzey tanımlanmıştır. Bu elemanlar sayesinde birbirlerine göre relatif hareketler sağlanmaktadır. Tablo 5.3’ de Lusas analizlerinde kullanılan ara yüzey elemanlarının malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3 Analizlerde kullanılan ara yüzey elemanlarının malzeme özellikleri

Ara yüzey elemanı	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (t/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme açısı
Gevşek Kum	40000	1.8	0.3	2	12
Orta Sıkı Kum	75000	1.9	0.3	2	15
Sıkı kum	10000	1.9	0.3	2	15
Yumuşak Kil	250	1.7	0.4	7	12
Yarı Katı Kil	1000	1.9	0.3	17.5	17.5

Kazığın yatay yük etkisindeki analizinden önce, zemin ilk önce jeolojik yüklerin elde edilmesi için kendi ağırlığında yüklenmiş ve 1. analiz tamamlanmıştır. Bu analizden elde edilen zemin gerilmeleri data dosyasında ağı oluşturulan elemanlara SSRE residüel gerilmeleri komutu altında atanmış ve aynı data dosyasına yük komutu da eklenerek kazık yanal olarak yüklenerek SSRE ve CL (Concentrated Load) yükleri altında 2. analizi yapılmıştır.

5.3. Kohezyonlu Zeminlerde Yapılan Analizler

Analizler yumuşak kil ve yarı katı kilden oluşan tabakalı zeminde, kazık çapının, kazık boyunun ve yüzeye yakın zeminin özelliğinin ve derinliğinin değişiminin yatay deplasmana olan etkisinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Burada, kazık çapları 65, 80, 100 cm ve kazık boyu 16 m, 20 m seçilerek kazığın yarı katı kile soketlenme miktarının kazık-zemin davranışına olan etkisi eğrilerle verilmiştir. Yüzeye yakın zeminin özelliği ve kalınlığı değiştirilerek, yumuşak kil, orta sıkı kum ve sıkı kum için farklı çaplara göre analizler yapılmıştır. Tablo 5.4’ de yapılan analizler görülmektedir.

Tablo 5.4 Kohezyonlu Zeminlerde Yapılan Analizler

Kazık Çapı (cm)	Üst Tabaka Zemin		
	Yumuşak kil	Orta sıkı kum	Sıkı kum
65	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m
80	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m
100	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m

5.4. Kohezyonsuz Zeminlerde Yapılan Analizler

Analizler gevşek kum ve orta sıkı kumdan oluşan tabakalı zeminde, kazık çapının, kazık boyunun ve yüzeye yakın zeminin özelliğinin ve derinliğinin değişiminin yatay deplasmana olan etkisinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Burada, kazık çapları 65, 80, 100 cm ve kazık boyu 16 m, 20 m seçilerek kazığın orta sıkı kuma soketlenme miktarının kazık- zemin davranışına olan etkisi eğrilerle verilmiştir. Yüzeye yakın zeminin özelliği ve kalınlığı değiştirilerek, gevşek kum, orta sıkı kum ve sıkı kum için farklı çaplara göre analizleri yapılmıştır. Tablo 5.5’ de yapılan analizler görülmektedir.

Tablo 5.5 Kohezyonsuz Zeminlerde Yapılan Analizler

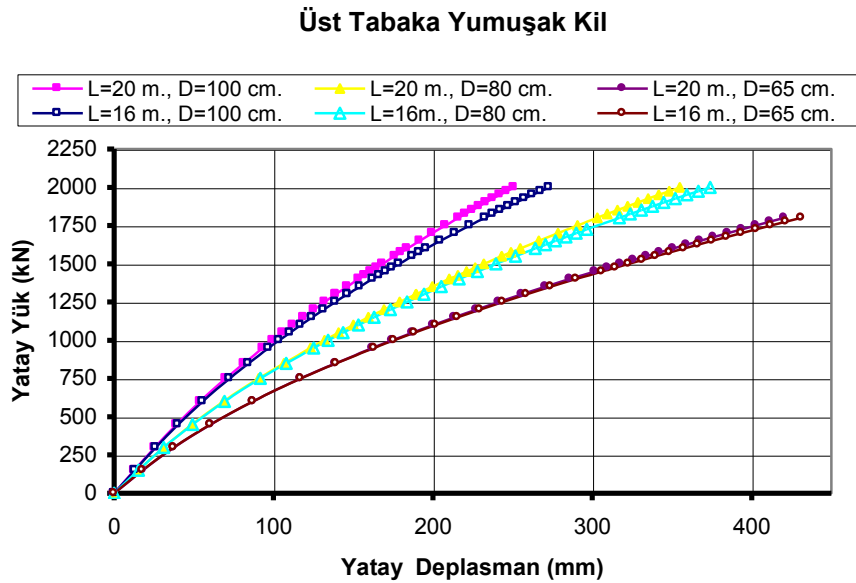
Kazık Çapı (cm)	Üst Tabaka Zemin		
	Gevşek Kum	Orta Sıkı Kum	Sıkı Kum
65	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m
80	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m
100	İki tabaka	1 m 1,5 m 2 m	1 m 1,5 m 2 m

6. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR

Yatay yüklü tekil kazığın yatay yük taşıma gücünün artırılması amacıyla kazık boyu, kazık çapı ve üst tabaka zemin özellikleri değiştirilerek kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde analizler yapılmıştır. Analizlerde kullanılan kazık ve zemin parametreleri bir önceki bölümde verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre farklı çap ve uzunluktaki kazıkların, farklı zemin ortamlarındaki davranışı yatay yük-yatay deplasman eğrileri ile incelenmiştir. Analizlerde göçme yükünün gözlenemediği durumlarda yatay yük en fazla 2000 kN' a kadar devam ettirilmiştir.

6.1. Kohezyonlu Zeminlerin Analiz Sonuçları

Burada, yumuşak kil ve yarı katı kilden oluşan iki tabakalı zemin ortamındaki 16 m ve 20 m boyunda, 65, 80, 100 cm çaplarında kazığın yatay yük etkisindeki davranışı incelenmiştir. 16 m boyundaki kazık yarı katı kile 4 m, 20 m boyundaki kazık ise yarı katı kile 8 m soketlenmektedir. Şekil 6.1' de boyları 16 m ve 20 m olan kazıkların farklı çapları için yatay yük-yatay deplasman eğrileri verilmektedir.

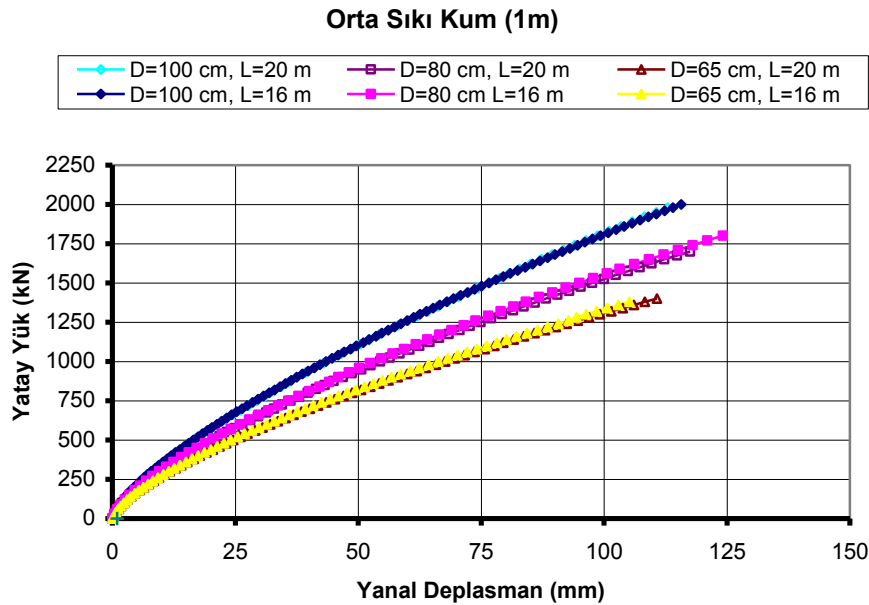


Şekil 6.1 Üst tabaka yumuşak kil olduğunda 16 m. ve 20 m. kazık boylarındaki yatay yük- yatay deplasman eğrileri.

Şekil 6.1’ de eğrilerden görüldüğü gibi her iki kazık boyu için de kazık çapı arttıkça kazığın yatay yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. Buna karşılık kazığın yarı katı kile soketlenme miktarının artışı, 100 cm ve 80 cm çaplarındaki kazığın taşıma gücünü az ölçüde etkilemiştir. 65 cm çapındaki kazıkta diğer kazık çaplarındaki gibi bir etki söz konusu olmamaktadır.

Üst Tabaka Zemininin Değiştirilmesi

İki tabakadan oluşan zemin ortamında üst tabakada bulunan yumuşak kil tabakasından, zemin yüzeyinden itibaren 1, 1.5 ve 2 m kalınlığındaki yumuşak zemin kaldırılarak yerine orta sıkı kum ve sıkı kum yerleştirilerek kazığın yatay taşıma gücü araştırılmıştır. Zemin üst yüzeyinin 1 m kalınlığında orta sıkı kum olması durumunda 16 m ve 20 m boylarındaki kazıkların yarı katı kile soketlenme boyunun kazık taşıma gücüne olan etkisi araştırılmıştır. Şekil 6.2’ de zemin üst tabakasının 1 m. orta sıkı kum olması durumunda 16 m ve 20 m boylarındaki kazıkların yatay yük–yatay deplasman eğrileri verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi iki farklı boyda olan kazığın taşıma güçleri birbirlerinden farklı olmamaktadır. Kazık başı seviyesi 1.5 m kalınlığında orta sıkı kum olduğunda da kazık boyu etkisi gözlenmemiştir. (Ek A.1.1)

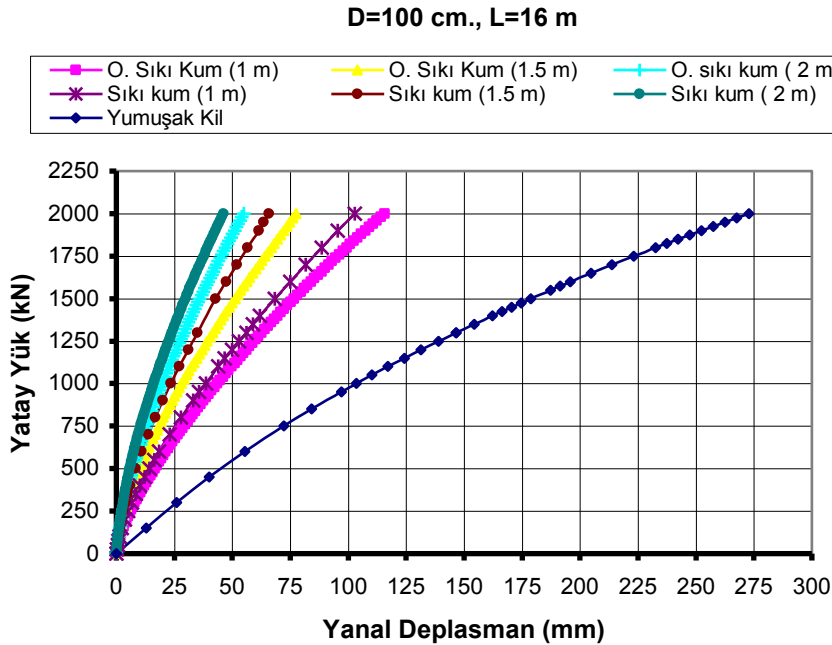


Şekil.6.2 Kohezyonlu zeminlerde zemin üst tabakasının orta sıkı kum olması durumunda farklı kazık boylarına göre yatay yük –yatay deplasman eğrileri

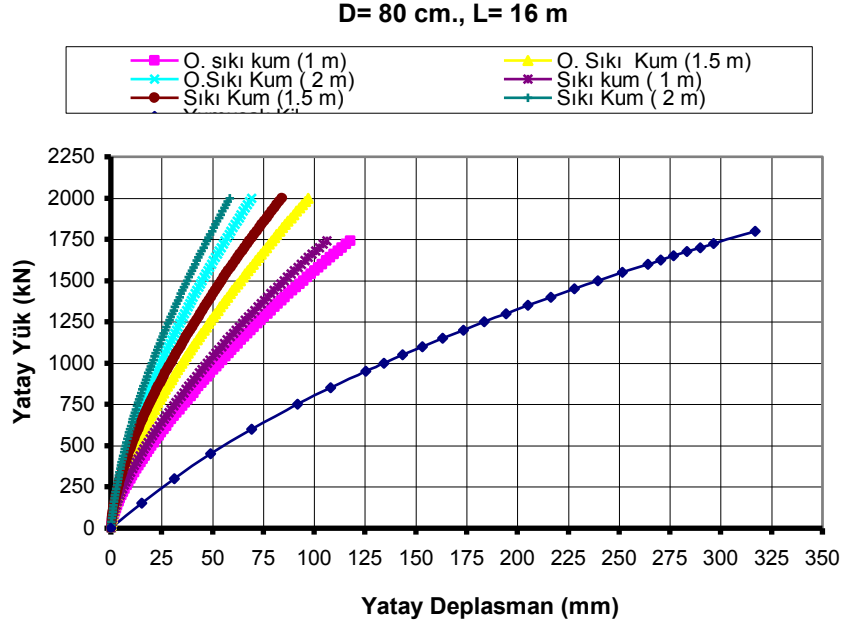
Şekil 6.3, 6.4 ve 6.5’ de yumuşak kil ve yarı katı kil ortamında, zemin üst tabaka özelliğinin orta sıkı kum, sıkı kum olması ve tabaka kalınlıklarının 1, 1.5, 2 m olduğunda elde edilen analiz sonuçları farklı kazık çaplarına göre verilmiştir. Kazık boyu değişimin bir etkisi gözlenmediğinden dolayı, burada karşılaştırma için sadece 16 m boyundaki kazık için elde edilen eğriler verilmiştir. Kıyaslama yapılması amacıyla zemin üst tabakasının yumuşak kil olması durumunda elde edilen eğriyle beraber verilmiştir.

Verilen eğrilerden görüleceği gibi, kazığın yatay yük taşıma kapasitesindeki en büyük artış zemin üst yüzeyinde 2 m. kalınlığında sıkı kum olması durumunda görülmektedir. Bu durum 65 cm, 80 cm ve 100 cm çaplarındaki kazıkların her biri için geçerlidir. Zemin üst tabakanın değişiminin her bir kazık çapına göre ayrıca oluşturulmuş eğrileri Ek A.’ da yer almaktadır.

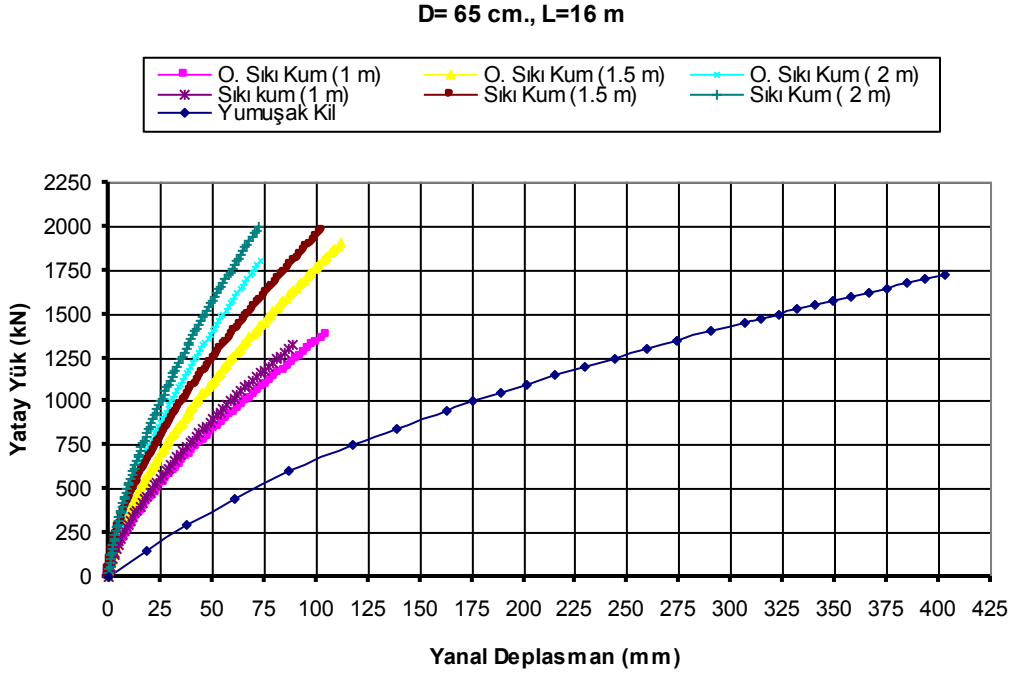
Tablo 6.1’ de 100 cm, 80 cm ve 65 cm çaplarında 16 m boyunda kazığın farklı zemin ortamlarında 1000 kN yatay yük altında yaptığı deplasmanlar verilmiştir.



Şekil 6.3 D=100 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri



Şekil 6.4 D=80 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri

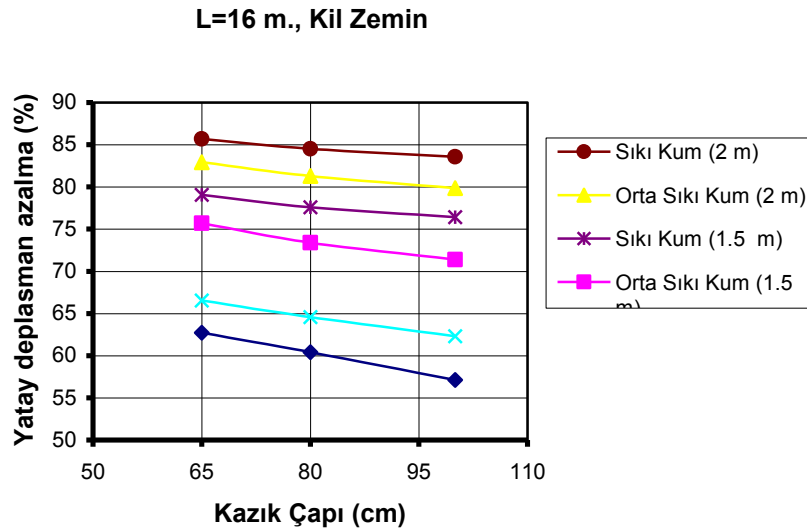


Şekil 6.5 D=65 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük - yatay deplasman eğrileri

Tablo 6.1 16 m. boyunda kazığın 1000 kN yatay yük altında yaptığı yatay deplasman (mm)

Üst Tabaka Zemin	Kazık Çapları		
	D=100 cm.	D=80 cm.	D= 65 cm.
Yumuşak Kil	103.56	134.30	175.56
Sıkı Kum (2 m)	16.14	20.25	24.98
Orta Sıkı Kum (2 m)	19.77	24.59	30.20
Sıkı Kum (1.5 m)	23.49	29.57	36.25
Orta Sıkı Kum (1.5 m)	28.17	34.87	42.84
Sıkı Kum (1 m)	38.57	47.48	58.7
Orta Sıkı Kum (1 m)	43.45	53.5	66.28

Zemin sıkılığının ve tabaka kalınlığının artışı ile yapılan analiz sonuçlarında, belirli sabit yüklere gelen yatay deplasman ortalamaları esas alınarak yatay deplasman azalma yüzdesi ve kazık çapına göre grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.6’ da her bir tabaka değişiminde elde edilen yatay deplasmanların, üst tabakanın yumuşak kil olduğunda elde edilen deplasmanlara göre azalma yüzdeleri verilmiştir.



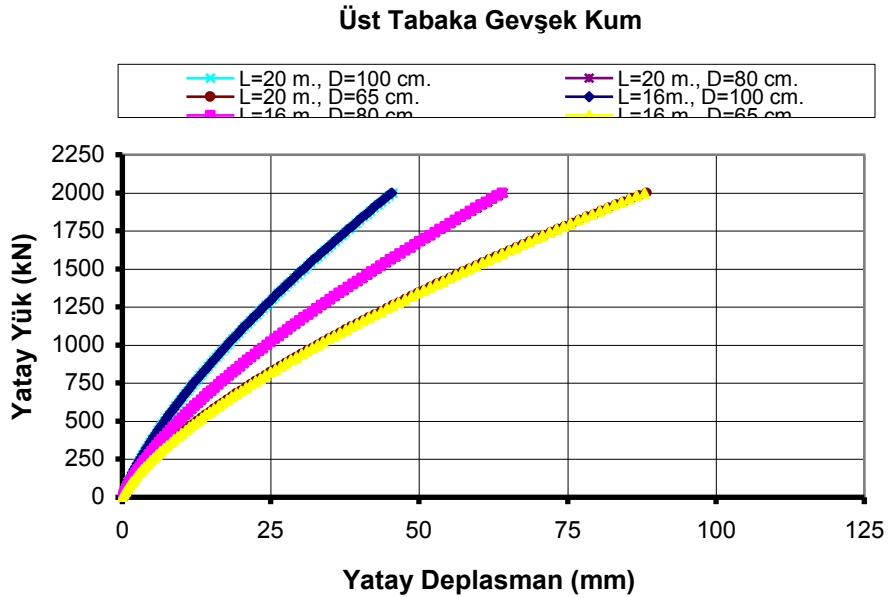
Şekil 6.6 Kohezyonlu zeminde üst tabaka zeminin değişimi ile elde edilen yatay deplasman azalma yüzdesi – kazık çapı eğrileri

Her bir kazık çapı için oluşturulan yatay deplasman azalma yüzdesi grafiklerinden görüldüğü gibi en büyük deplasman azalma yüzdesi 65 cm çapında kazıkta, yumuşak kil yerine 2 m kalınlığında sıkı kum yerleştirilmesi durumunda ortaya çıkmıştır. İkinci en büyük azalma yüzdesi ise 2 m kalınlığında orta sıkı kumda görülmüştür. Diğer kazık çaplarında da en büyük azalma değerleri 2 m kalınlığında sıkı kumda olduğu gözlenmiştir. Çaplara göre en büyük azalma değerleri, $D=65$ cm için % 85.7, $D=80$ cm için % 84.5, $D=100$ cm için % 83.6' dır. Zeminin sıklığı ve sıkı zemin kalınlığı arttıkça deplasmanlar önemli ölçüde azalmaktadır.

6.2. Kohezyonsuz Zeminlerde Analiz Sonuçları

16 m ve 20 m boyunda, 65, 80, 100 cm çaplarında kazıkların gevşek kum ve orta sıkı kumdan oluşan iki tabakalı zemin ortamındaki yatay yük etkisindeki davranışı, yatay yük- yatay deplasman eğrileri ile verilmiştir. 16 m boyundaki kazık orta sıkı kuma 4 m, 20 m boyundaki kazık ise orta sıkı kuma 8 m soketlenmektedir.

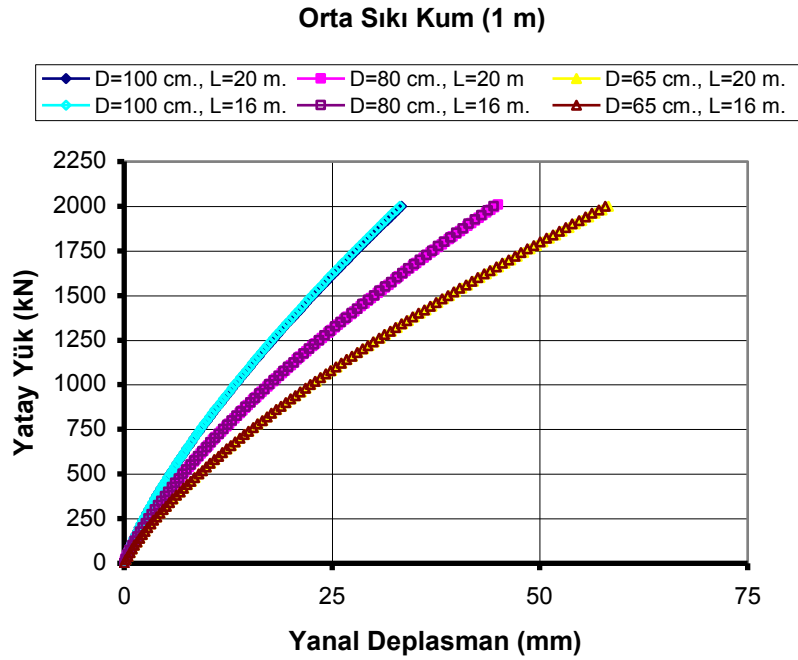
Analizlerde gevşek kum ve orta sıkı kumdan oluşan zemin ortamında kazık boyunun yatay yük-yatay deplasman ilişkisine olan etkisi incelenmek amacıyla 16 m ve 20 m boyunda iki farklı kazık kullanılmıştır. Şekil 6.7' de eğrilerden görüldüğü gibi kazık boyunun artışının kazıkların yatay taşıma gücüne bir etkisi olmamaktadır.



Şekil 6.7 Üst tabaka gevşek kum olduğunda 16 m ve 20 m kazık boylarındaki yatay yük - yatay deplasman eğrileri

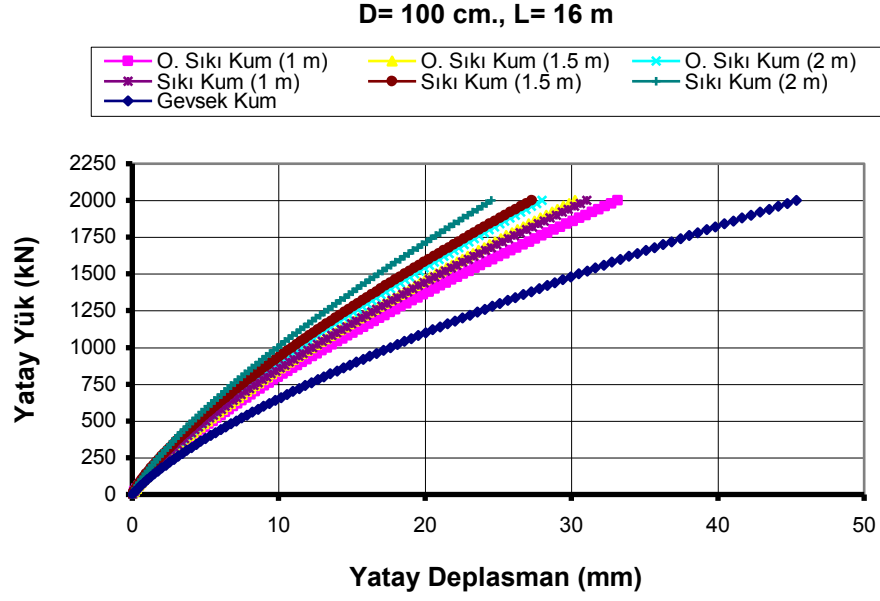
Üst Tabaka Zemininin Değiştirilmesi

Zemin üst yüzeyinin 1 m. kalınlığında orta sıkı kum olması durumunda 16 m ve 20 m boylarındaki kazıkların orta sıkı kuma soketlenme boyunun kazık taşıma gücüne olan etkisi analizler yapılarak incelenmiştir. Şekil 6.8’ de zemin üst tabakasının 1 m. orta sıkı kum olması durumunda 16 m ve 20 m boylarında kazıkların yatay yük–yatay deplasman eğrileri verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi iki farklı boyda olan kazığın taşıma güçleri üst tabaka zeminin orta sıkı kum olması durumundaki gibi birbirlerinden farklı olmamaktadır.

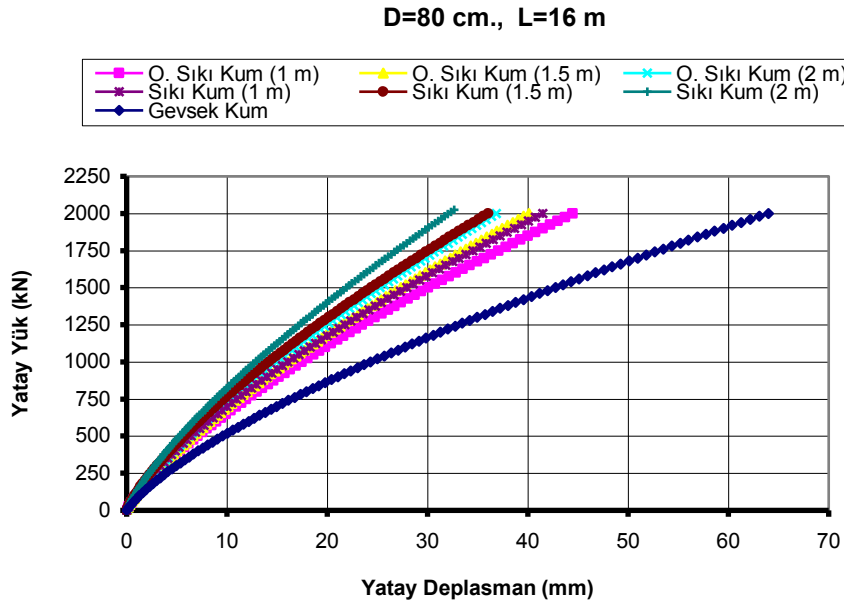


Şekil.6.8 Kohezyonsuz zeminlerde zemin üst tabakasının orta sıkı kum olması durumunda farklı kazık boylarına göre yatay yük –yatay deplasman eğrileri

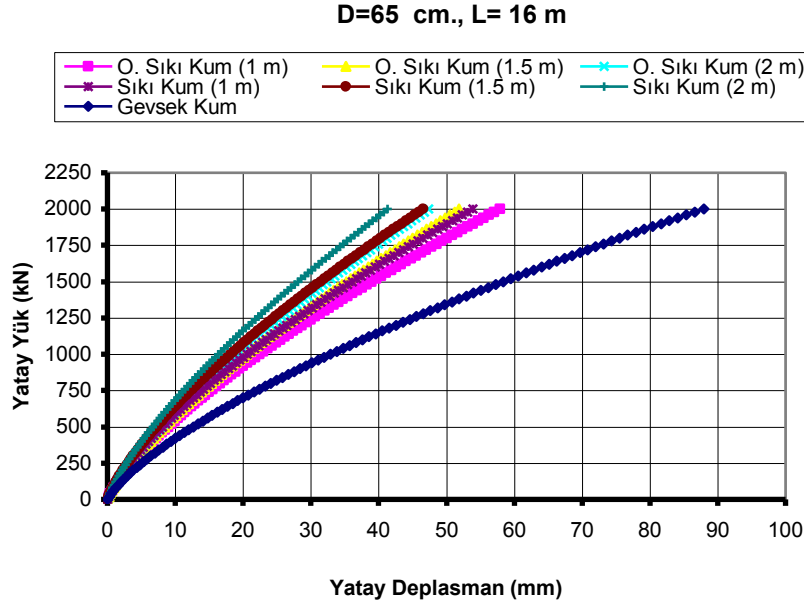
Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11’ de gevşek kum ve orta sıkı kum ortamında, zemin üst tabaka özelliğinin orta sıkı kum, sıkı kum olması ve tabaka kalınlıklarının 1, 1.5 ve 2 m olduğunda elde edilen analiz sonuçları beraber verilmiştir.



Şekil 6.9 D=100 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri



Şekil 6.10 D=80 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri



Şekil 6.11 D=65 cm çapında kazığın üst tabaka zeminin ve kalınlığının değişimi ile elde edilen yatay yük-yatay deplasman eğrileri

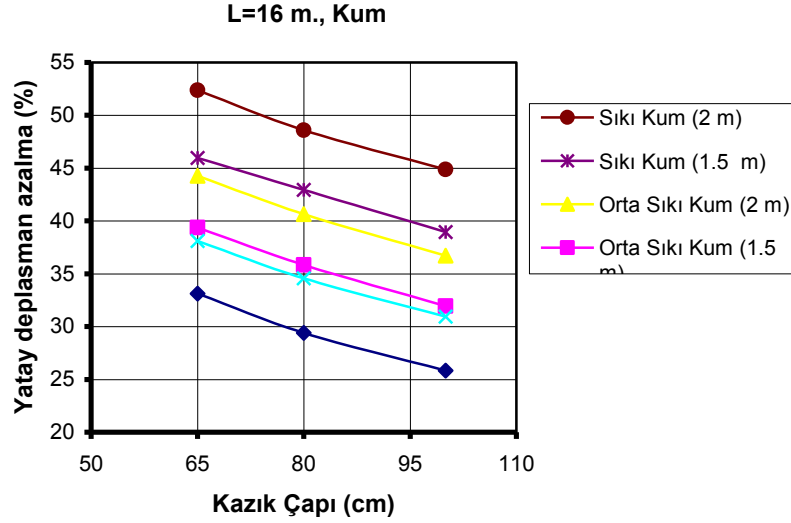
D=100 cm, 80 cm ve 65 cm çaplarında 16 m boyunda kazığın farklı zemin ortamlarında 1000 kN yatay yük altında yaptığı deplasman değerleri Tablo 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.2 16 m. boyunda kazığın 1000 kN yatay yük altında yaptığı yatay deplasman (mm)

Üst Tabaka Zemin	Kazık Çapları		
	D=100 cm	D=80 cm	D= 65 cm
Gevşek Kum	17.63	24.33	32.89
Sıkı Kum (2 m)	9.92	12.93	16.36
Sıkı Kum (1.5 m)	10.93	14.2	18.18
Orta Sıkı Kum (2 m)	11.47	14.94	19.02
Orta Sıkı Kum (1.5 m)	12.26	16.04	20.57
Sıkı Kum (1 m)	12.32	16.09	20.61
Orta Sıkı Kum (1 m)	13.30	17.43	22.39

Orta sıkı kum ve sıkı kumun tabaka kalınlığının artışın etkisinin araştırılması için yapılan analiz sonuçlarında kohezyonsuz zeminler için belirli sabit yüklere gelen kazık deplasmanları ortalaması esas alınarak yatay deplasman azalma yüzdesi ve kazık çapına göre grafikler oluşturulmuştur. Şekil 6.12’ de her bir tabaka

değişiminde elde edilen yatay deplasmanların üst tabakanın gevşek kum olduğunda elde edilen deplasman değerlerine göre azalma yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 6.12 Kohezyonsuz zeminde üst tabaka zeminin değişimi ile elde edilen yatay deplasman azalma yüzdesi – kazık çapı eğrileri,

Verilen eğrilerden görüldüğü gibi yatay yük taşıma kapasitesindeki en büyük artış zemin üst yüzeyinde 2 m kalınlığında sıkı kum olması durumunda görülmektedir. Aynı şekilde üst tabakanın 1 m kalınlığında sıkı kum ile 1.5 m kalınlığında orta sıkı kum olduğunda da kazıkların taşıma güçleri de eğrilerden görüldüğü gibi birbirine çok yakındır. Bu durumlar 65 cm, 80 cm ve 100 cm çaplarındaki kazıkların her biri için geçerlidir. Zemin üst tabakanın değişiminin her bir kazık çapına göre ayrıca oluşturulmuş eğrileri Ek A.' da yer almaktadır.

Şekil 6.12'ye göre en büyük deplasman azalması 65 cm çapında kazıkta, gevşek kum yerine 2 m kalınlığında sıkı kum yerleştirilmesi durumunda ortaya çıkmıştır. Çaplara göre en büyük azalma değerleri, $D=65$ cm için % 52.4, $D=85$ cm için % 48.6, $D=100$ cm için % 44.9' dur. Zeminin sıklığı ve kalınlığı arttıkça deplasmanlar önemli ölçüde azalmaktadır.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kazıklara etkiyen yatay yüklere, yatay yükler altındaki kazıkların davranış esaslarına ve yatay yüklü kazıkların analiz yöntemlerine değinilmiştir. Farklı çap, farklı kazık boyu ve farklı zemin durumlarına ait kazık-zemin modelinin davranışlarının incelenmesi için Lusas Sonlu Elemanlar Programı ile birçok analiz yapılmıştır.

Tek kazığın yatay yüklere karşı dayanımının hesabında üç yaklaşım tarzı vardır. Bunlardan birincisi, kazık üzerine gelen zemin yanal basınçlarını statik ilişkiler ve limit dayanım ilkeleri içinde ele alarak çözüm yapar. İkinci yaklaşım zeminin gerilme-ötelenme ilişkisini zemini temsil eden yayın mekanik özelliklerine bağlayarak tanımlar. Üçüncü yaklaşım ise kazık zemin etkileşimini sürekli ortam mekaniği içerisinde ele alır. Bu çalışmada bu yaklaşımları esas alan yöntemlerden bazıları olan Brinch- Hansen Metodu, Broms Metodu, p - y eğrileri, yatak katsayısı metodu, elastik teori, karakteristik yük yöntemi ve deneysel bir çalışmanın sonunda elde edilen basit bir yaklaşım anlatılmıştır. Bu yöntemlerden p - y eğrileri ve elastik teori nonlineer davranışı dikkate alırken ikisinin dışındaki yöntemler lineer hesap yöntemleridir.

Yatay yüklü kazıkların analiz şekillerinden bir tanesi de sonlu elemanlar yöntemidir. Bilgisayar ortamında gerçeğe uygun bir şekilde modellenen problemin analizi bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemini esas alarak çözülebilmektedir. Bu çalışmada Lusas Sonlu Elemanlar Programını kullanarak kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde üç boyutlu model ile analizler yapılmıştır.

Lusas Sonlu Elemanlar Programı ile kazık çapı, kazık boyu, zemin üst tabakanın özelliği değiştirilerek, kazığın yatay yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Kazık çapları 65, 80, 100 cm olarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan kazık boyları 16 m ve 20 m seçilerek, kazığın kohezyonlu zeminlerde yarı katı kile ve kohezyonsuz zeminlerde orta sıkı kuma soketlenme boyunun etkisi incelenmiştir.

Killi zeminlerde yapılan analiz sonuçlarına göre, kazık boyunun artışı ile $D=100$ cm ve $D=80$ cm çaplarındaki kazıkların yaptığı deplasmanlarda yaklaşık % 5 azalma görülmüştür. Bu azalma $D=65$ cm çaplı kazıkta yaklaşık % 2 dir.

Kumlu zeminlerde kazığın orta sıkı kuma soketlenme boyunun arttırılması ile yapılan analiz sonuçlarına göre 16 m ve 20 m boylarındaki kazıkların belirli yük altında yaptıkları deplasmanlar birbirine çok yakındır. Kazık boyunun 16 m' den 20 m'ye çıkarılmasının kazığın yatay taşıma gücüne etkisi görülmemektedir.

Yumuşak ve gevşek zemin içinde kazığın yaptığı deplasmanın azaltılması için kazık başı seviyesinden itibaren bir miktar zemin sıyrılarak yerine sıkı dolgu yerleştirilerek analizler yapılmıştır. Dolgu malzemesi olarak 1, 1.5, 2 m kalınlıkta sıkı kum ve orta sıkı kum kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, killi ve kumlu zeminlerde en yüksek deplasman azalma yüzdesi 2 m kalınlığında sıkı kum dolgu yapıldığında ortaya çıkmaktadır.

Killi zemin ortamında bulunan $D=100$ cm, $D=80$ cm ve $D=65$ cm çapında kazıkların baş seviyesine 2 m sıkı kum dolgu yapılmasından sonra kazık deplasmanlarında sırasıyla % 83.6, % 84.5 ve % 85.7 azalma meydana gelmiştir.

Kumlu zemin ortamında da; dolgu sonrası kazık başı deplasmanlarında meydana gelen deplasman azalma yüzdeleri kazık çaplarına göre, $D=100$ cm' de % 44.9, $D=80$ cm' de % 48.6 ve $D=65$ cm' de % 52.4 'tür. Bu değerlerden görüldüğü gibi kum dolgu yapılması, çapın daha küçük olduğu durumlarda daha etkili bir yöntemdir.

Killi zeminlerde ikinci en büyük azalma yüzdesi ise 2 m. kalınlığında orta sıkı kum dolgusunda, kumlu zeminlerde ise 1.5 m sıkı kum dolgusunda görülmüştür. Ayrıca kumlu zeminlerde, kazık başında 1 m kalınlığında sıkı kum ile 1.5 m kalınlığında orta sıkı kum dolgusu olması durumlarında kazıkların yaptıkları deplasmanların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Birand, A.**, (2001), *Kazıklı Temeller*, ODTÜ, Ankara
- [2] **Toğrol, E.**, (1970), *Kazıklı Temeller*, Temel Araştırma Yayınları, İstanbul
- [3] **Özkan, M.T., Sağlamer, A.**, (1995), *Kazıklı Temeller*, Dünya İnşaat, No.131/7, s.35-38
- [4] **Prakash, S., Sharma, H. D.**, (1989), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [5] **Davisson, M. T.**, (1960), *Behaviour of Flexible Vertical Piles Subjected to Moment, Shear and Axial Load*, Ph. D. Thesis, University of Illinois, Urbana.
- [6] **Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D.**, (1974), *Analysis Of Laterally Loaded Piles in Sand*, Proceeding of the 6th Off-Shore Technology, Copy Paper No. TC 208A.
- [7] **Tomlinson, M.J.**, (1994), *Pile Design and Construction Practice*, E&FN Spon, London
- [8] **Leung, C.F., Lim, J.K. and Chow, Y.K.**, (2001), *Behaviour of Pile Due to Excavation-Induced Soil Movement in Clay*, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, İstanbul
- [9] **Committee on Deep Foundations of the ASCE Geotechnical Division** *Practical Guidelines for the Selection, Design and Installation of Piles*, New York.
- [10] **McNulty, J.F.**, (1956), *Thrust Loading on Piles*, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, SM2, pp. 1-25.
- [11] **Brinch Hansen, J.**, (1961), *The Ultimate Resistance of Of Rigid Piles Against Transversal Forces*, Danish Geotechnical Institute Bull. No.12, Copenhagen, p.5-9.
- [12] **Broms, B.**, (1964a), *The Lateral Resistance Of Piles in Cohesive Soils*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.90, No. SM2, March, pp. 27-63.

- [13] **Broms, B.**, (1964b), *The Lateral Resistance Of Piles in Cohesionless Soils*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.90, No. SM3, May, pp. 123-156.
- [14] **Matlock, H.**, (1970), *Correlations For Design Of Laterally Loaded Piles In Soft Clay*, Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC 1204, pp 544-593.
- [15] **Reese, L.C., and Welch, R.C.**, (1975), *Lateral Loading Of Deep Foundations In Stiff Clay*, Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, Vol.101, No. GT7, July, pp. 633-649.
- [16] **Reese, L.C., and Matlock, H.**, (1956), *Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth*, Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, TX, pp. 1-41.
- [17] **Poulos, H.G.**, (1971a), *Behavior of Laterally Loaded Piles: I- Single Piles*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, No. SM 5, pp. 711-731.
- [18] **Poulos, H.G.**, (1971b), *Behavior of Laterally Loaded Piles: II- Pile Groups*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, No. SM 5, pp. 733-751.
- [19] **Simons, N.E., Menzies, B.K.**, (2000), *A Short Course In Foundation Engineering*, IPC Science and Technology, London.
- [20] **Matlock, H. and Reese, L. C.**, (1961), *Foundation Analysis of Offshore Pile Supported Structures*, Proceedings Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 2, pp.91-97.
- [21] **Matlock, H. and Reese, L. C.**, (1962), *Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles*, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 127, part 1, pp. 1220-1247.
- [22] **Poulos, H. G., Davis, E. H.**, (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, Inc., pp. 397.
- [23] **Army Corps of Engineers**, (1997) *Design of Deep Foundations*.
- [24] **Alizadeh, M.**, (1968), *Lateral Load Tests on Piles Instrumented Timber Piles*, Performance of Deep Foundations, ASTM, STP 444, pp. 379-394.
- [25] **Sağlamer A.**, (1977), *Açık Deniz Yapılarındaki Kazıkların Davranışı*, İ.T.Ü Doçentlik Tezi, 210 sf.

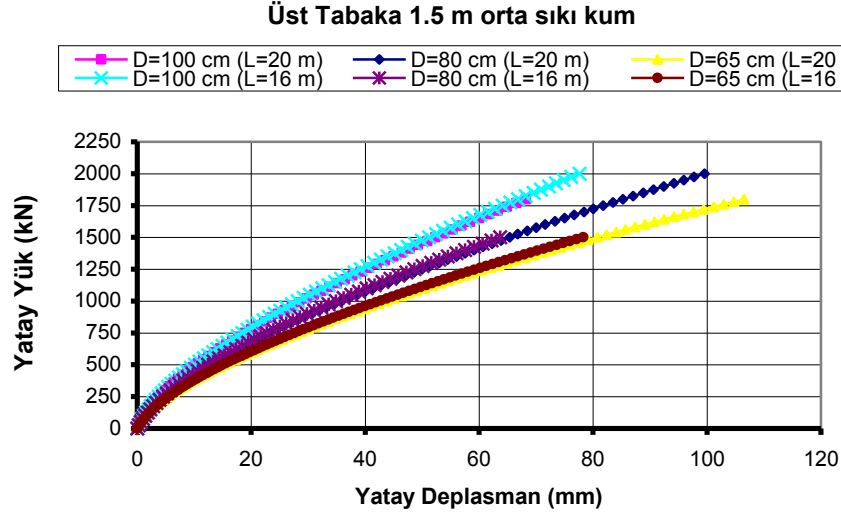
- [26] **Matlock, H.**, (1956), *Discussion on Paper by B. Mc Clelland & J.A. Focht*, Transactions of ASCE, Vol.86, SM 5, pp.63-91.
- [27] **Kın, A.S.**, (1995), *Yatay Yükler Etkisindeki Büyük Çaplı Kazıkların Davranışlarının Belirlenmesi*, Doktora Tezi, İTÜ.
- [28] **Aköz, Y., Sağlamer, A., Öntuna, K.A.**, (1981), *A New Approach to the Analysis of Laterally Loaded Piles*, Soil Mechanics and Foundation Engineering Tenth International Conference, Rotterdam.
- [29] **Sağlamer, A., Dinçer, E.**, (1987), *Model Kazıklarda Yapılan Yatay Yükleme Deneyleri*, ZM2, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi, sf. 157-172.
- [30] **Reese, L.C.**, (1977), *Laterally Loaded Piles: Program Documentation*, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.103, No. GT 4, April, pp. 287-305.
- [31] **Anderson, J.B., Townsend, F.C.**, (2002), *A Pile Database*, Deep Foundation 2002, An International Perspective on Theory Design, Feb.14-16, Geoinstitute Of ASCE, Geotechnical Special Publication, No: 116.
- [32] **O' Neill, M. W., and Gazioglu, S. M.** (1984), *An Evaluation of p-y Relationships in Cohesive Soils*, Proc., Analysis and Design of Pile Foundations, ASCE Technical Council on Codes and Standards, ASCE National Convention, J. Meyers, ed., New York, 192-213.
- [33] **O' Neill, M. W., and Murchison, J. M.**, (1983), *An Evaluation of p-y Relationships in Sands*, Research Rep. No. GT-DF02-83, Dept. Of Civil Engineering, Univ. Of Houston, Houston.
- [34] **Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D.**, (1975), *Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay*, Off-Shore Technology Conference, Texas.
- [35] **Sağlamer, A., Parry, R.H.G.**, (1970), *Model Study of Laterally Loaded Piles*, 7th European Conf. On SMFE, Vol. 2, sf. 115-120.
- [36] **Ashour, M., Norris, G.**, (2000), *Modelling Lateral Soil Response Based on Soil Pile Interaction*, J. Geotech. And Geoenviron. Eng., ASCE, May.
- [37] **Briaud, J.L., Smith, T., and Meyer, B.**, (1984), *Laterally Loaded Piles and the Pressuremeter: Comparison of Existing Methods*, Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and Performance, ASTM STP 835, pp. 97-111.

- [38] **Baguelin, F., Jezequel, J. F. And Shields, D. H.**, (1978), *The pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans Tech. Publications, Clausthal.
- [39] **Duncan, J.M., Evans, Jr., L.T. and Ooi, S.K.**, (1994), *Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts*, J. Geotech. Engr. Div. ASCE, Vol.20, No.5, pp.1018-1033.
- [40] **Yıldırım, S.**, (2002), *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [41] **Briaud, J.L.** (1997), *Sallop: Simple Approach for Lateral Loads on Piles*, JGGE, ASCE, pp 958-964.
- [42] **Davisson, M.T., Gill, H.L.**, (1963), *Laterally Loaded Piles in a Layered Soil Systems*, J. Soil Mech. And Foundation Eng., Div ASCE, Vol 89, SM3.
- [43] **Alem, A., Benamar, A.**, (2002), *Graphs For Design of Laterally Loaded Pile in Clay*, The Electronical Journal of Geotechnical Engineering, Vol.7, [www. Ejge.com/2002/Ppr 0210.htm](http://www.Ejge.com/2002/Ppr0210.htm)
- [44] **Bhushan, K., Haley, S. C. and Fong, P. T.**, (1979) Lateral Load Tests on Drilled Pier in Stiff Clays, J. Geotech . Eng. Div. ASCE, Vol. 105, No. GT 8, August , pp.969-985.
- [45] **Kurtay, T.**, (1980), *Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş*, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [46] **Öztoprak, S.**, (1996), *Kazıklı Temellerin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Hesaplanması İle İlgili Bir İnceleme*, Yüksek Lisans Tezi, İnş. UZ 966.
- [47] **FEA LTD.**, Element Reference Manual
- [48] **Özaydın K., Berilgen M.**, *Zemin Yapı Etkileşimi Problemlerinde Ara Yüzey Kullanımı*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi,
- [49] **FEA LTD.**, Theory Manual.
- [50] **Trade Arbed**, *Spundwand Handbuch, Teil 1*, Grundlagen, Luxembour.
- [51] **Delen, D.**, (1994) Tabakalı Zeminlerde Yatay Yüklü Kazıklar, Yüksek Lisans Tezi, İnş. UZ 833,

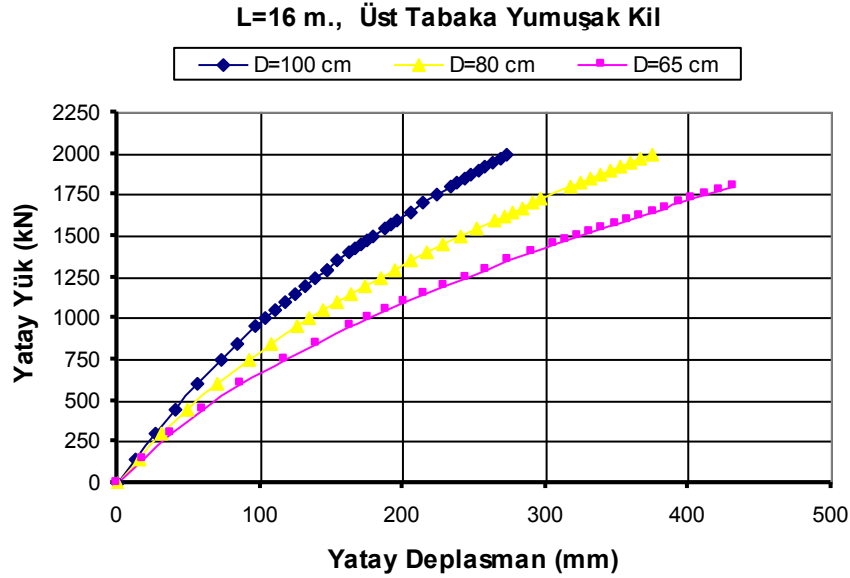
- [52] **Dinçer, E.**, (1986), *Yatay Yük Etkisindeki Model Kazıkların Davranışı*, Doktora Tezi, İTÜ.
- [53] **Durlanık, N.**, *Kazıkların Eksenel ve Yatay Yük Taşıma Kapasiteleri*, Yüksek Lisans Tezi, İnş. UZ 856.
- [54] **Erkan, B.**, *Yatay Yüklü Tek ve Grup Kazıkların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Nonlineer Analizi*, Yüksek Lisans Tezi,

EKLER

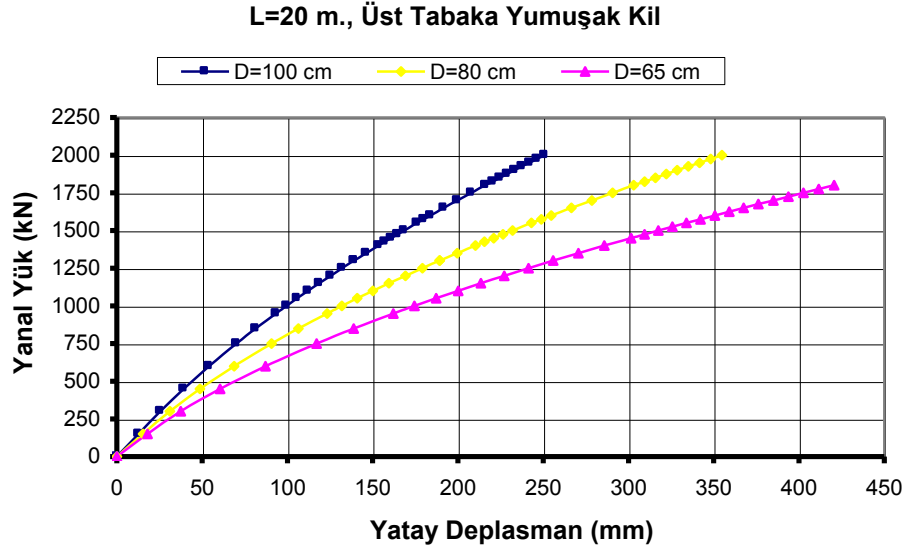
A.1. Kohezyonlu Zeminlerde Lusas İle Yapılan Analizlere Ait Eğriler



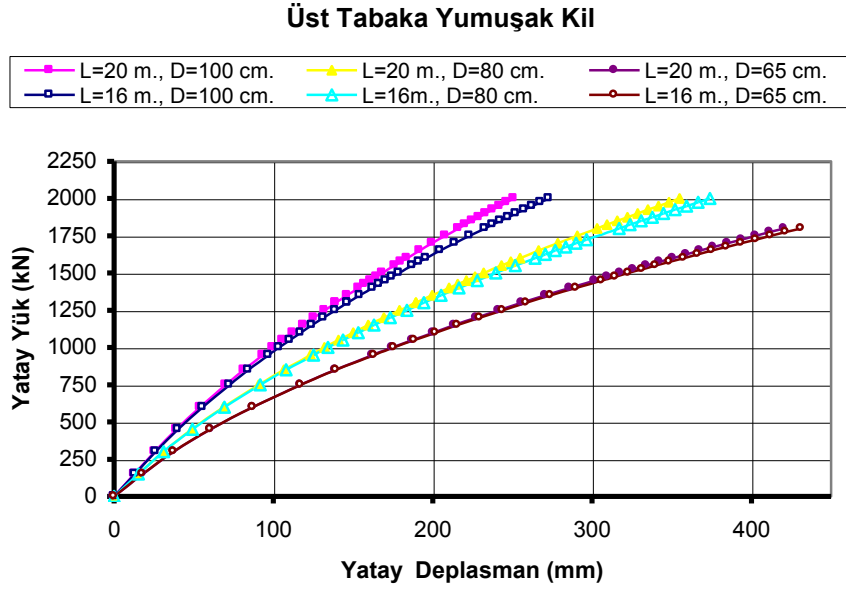
A.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde zemin üst tabakasının 1.5 m orta sıkı kum olması durumunda farklı kazık boylarına göre yatay yük –yatay deplasman eğrileri,



A.1.2.16 m. boyunda kazığın farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri,

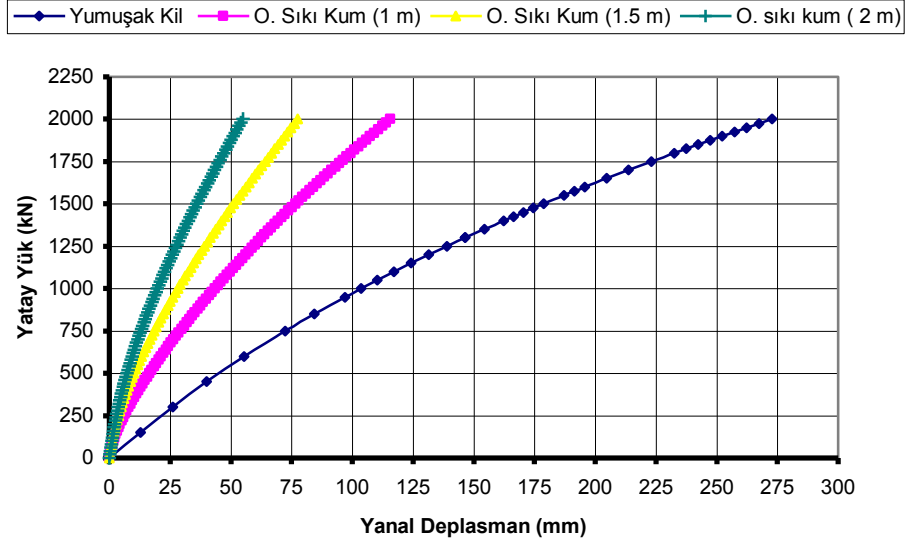


A.1.3. 20 m. boyunda kazığın farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri



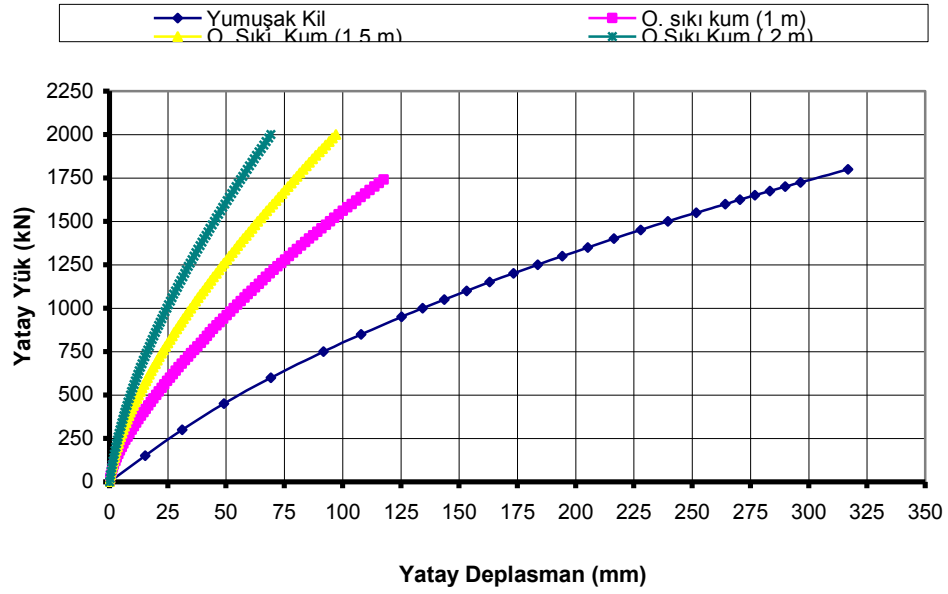
A.1.4.Üst tabaka yumuşak kilde 16 m. ve 20 m. kazık boylarındaki yatay yük- yatay deplasman eğrileri.

D=100 cm., L=16 m



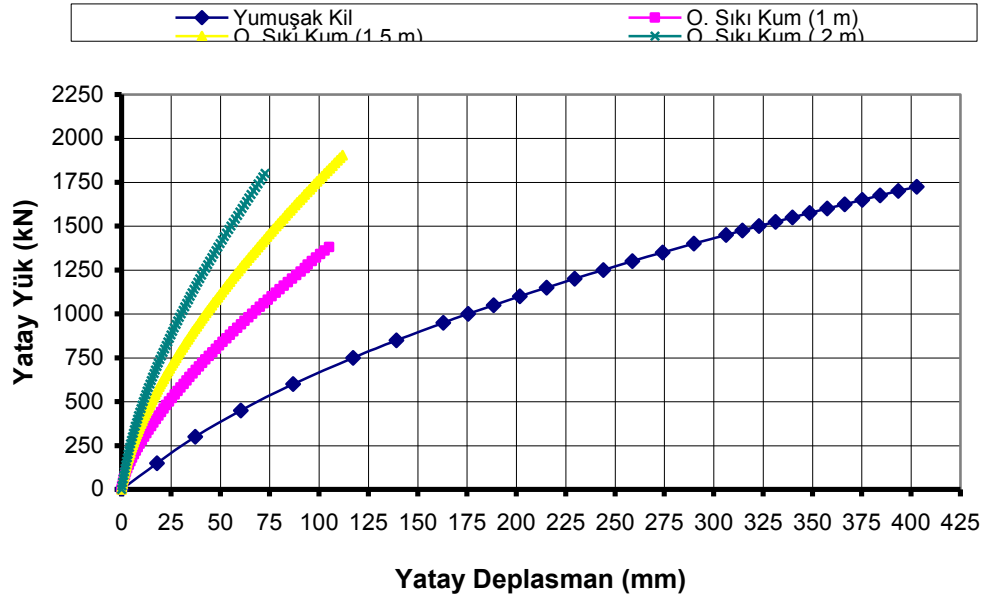
A.1.5.D= 100 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D= 80 cm., L= 16 m



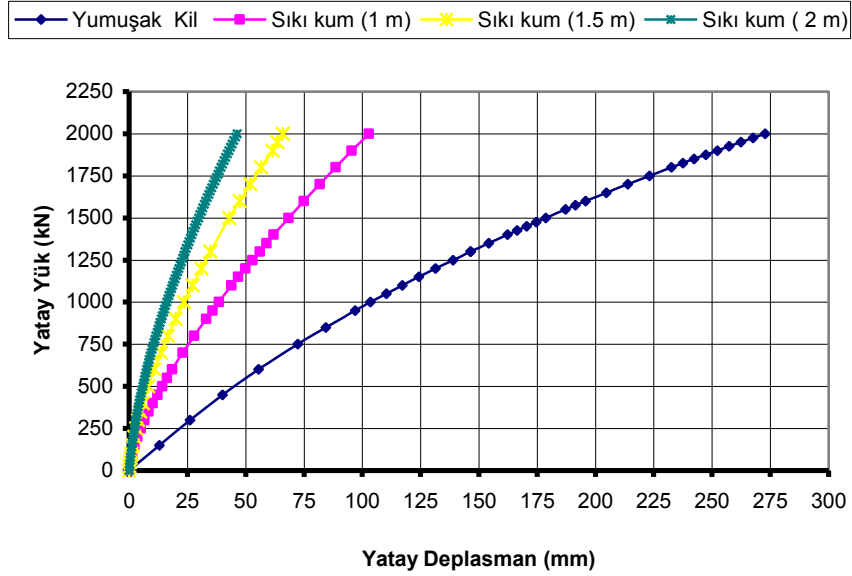
A.1.6.D = 80 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri,

D= 65 cm., L=16 m



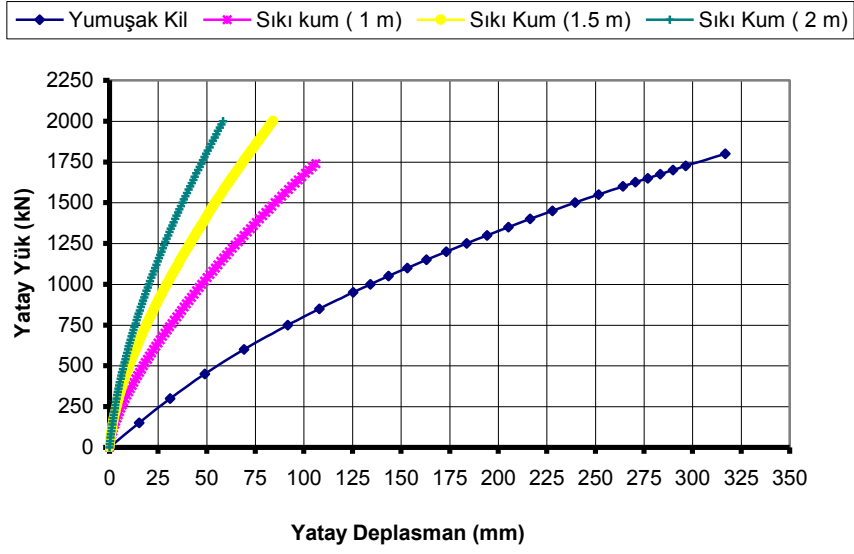
A.1.7. D= 65 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D=100 cm., L=16 m



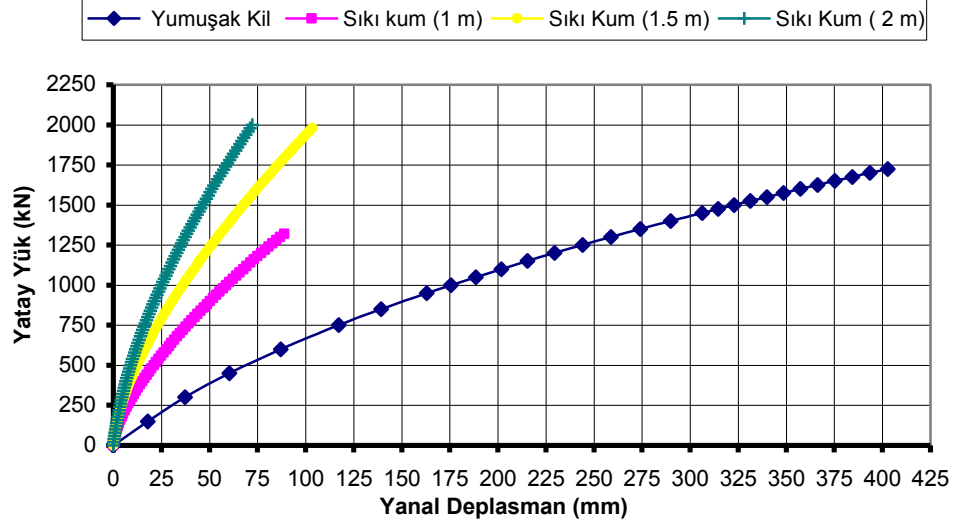
A.1.8.D= 100 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D= 80 cm., L= 16 m



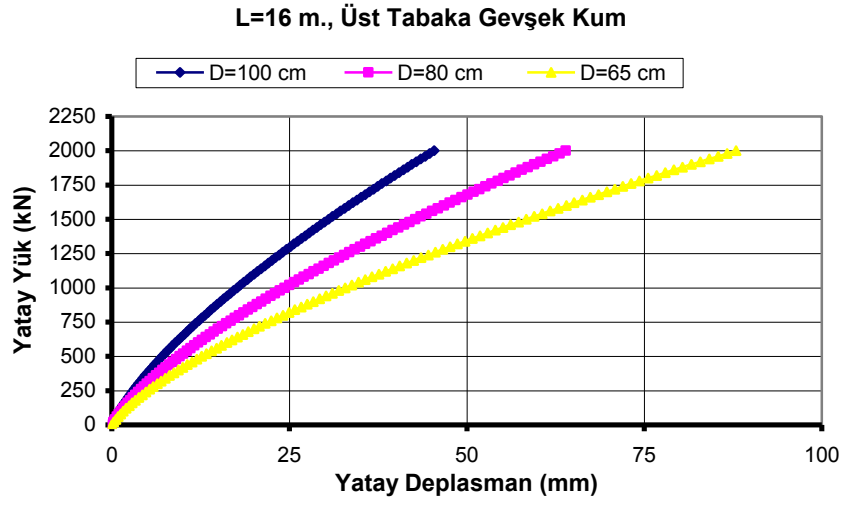
A.1.9.D= 80 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D= 65 cm., L=16 m

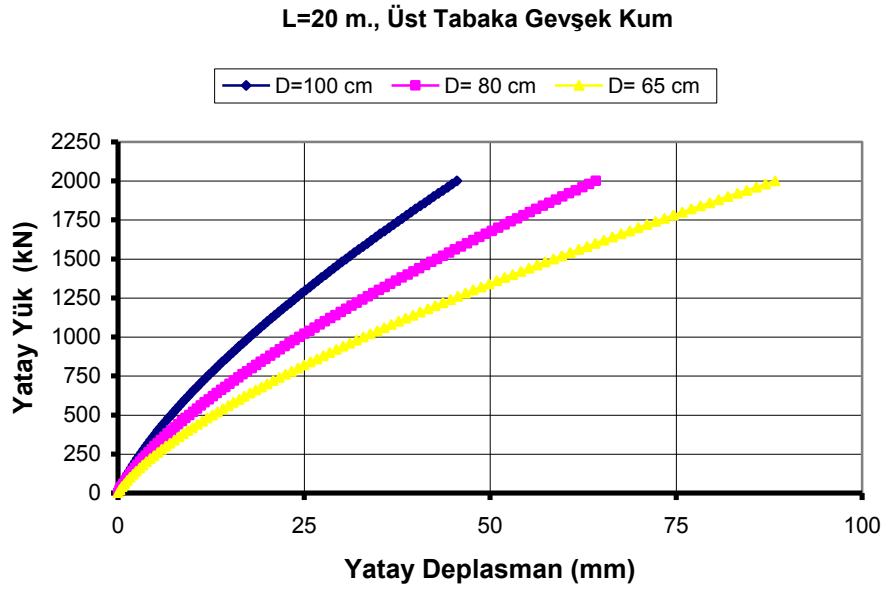


A.1.10. D= 65 cm. kazıkta zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

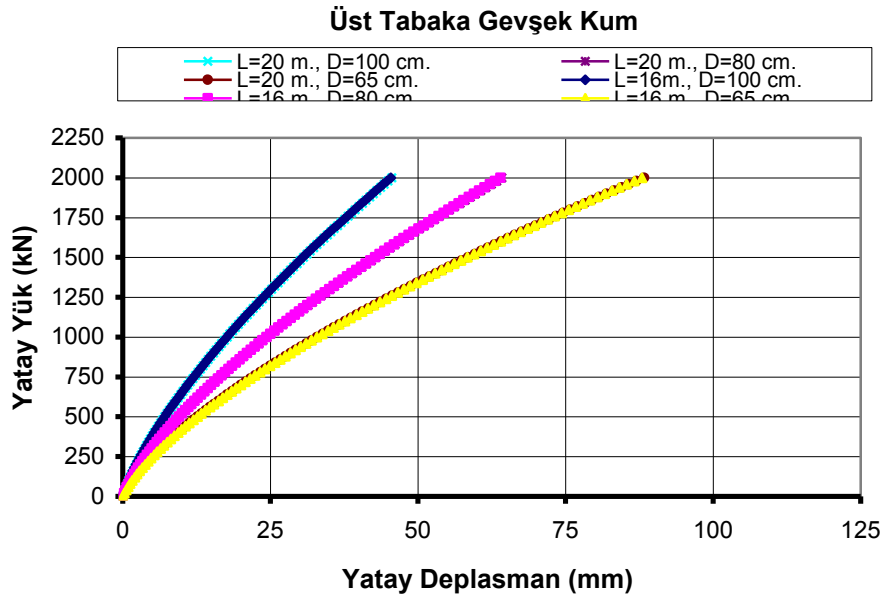
A.2. Kohezyonsuz Zeminlerde Lusas İle Yapılan Analizlere Ait Eğriler



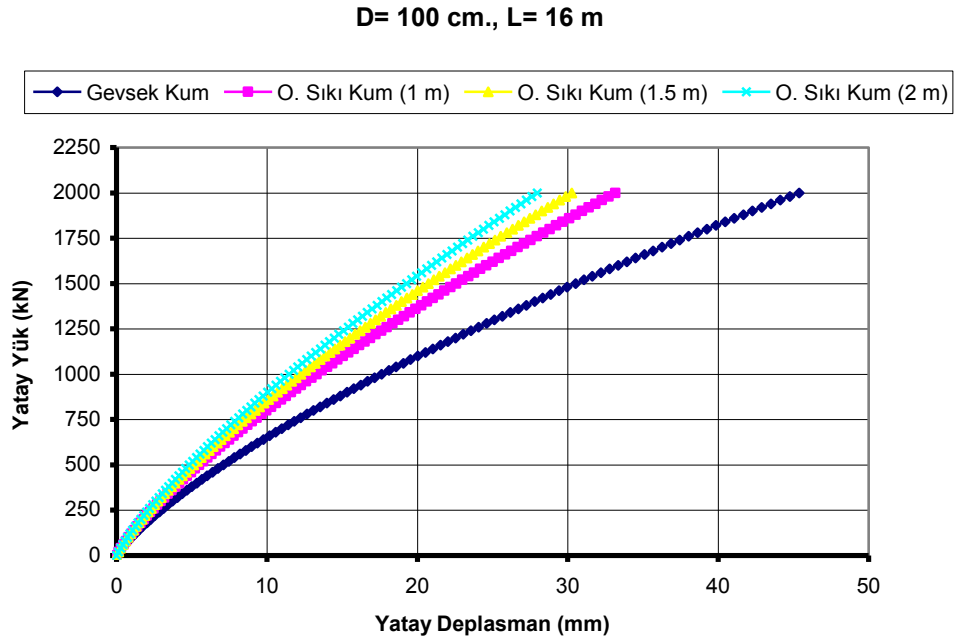
A.2.1.16 m. boyunda kazığın farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri,



A.2.2. 20 m. boyunda kazığın farklı kazık çaplarında yatay yük-yatay deplasman eğrileri,

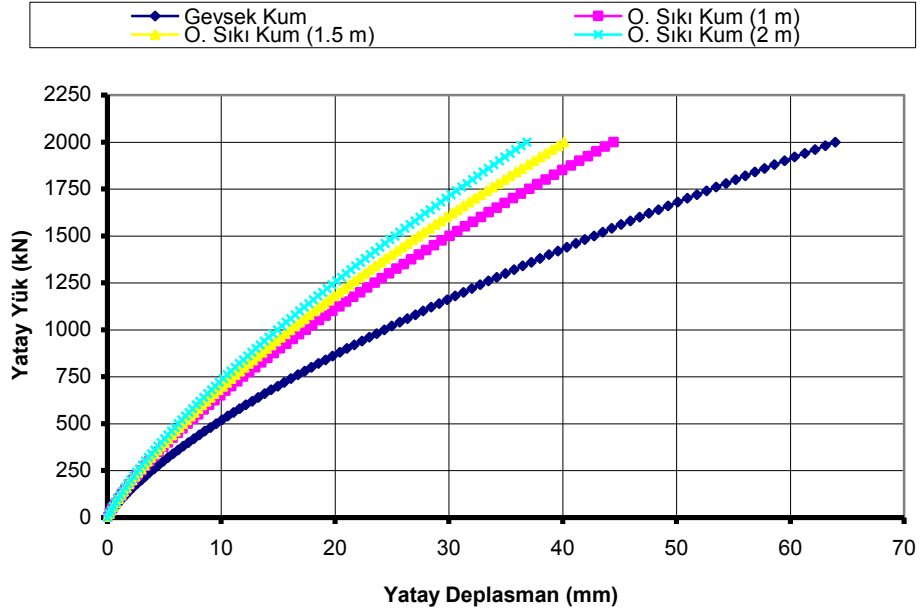


A.2.3. Üst tabaka gevşek kum olduğunda 16 m. ve 20 m. kazık boylarındaki yatay yük yatay deplasman eğrileri.



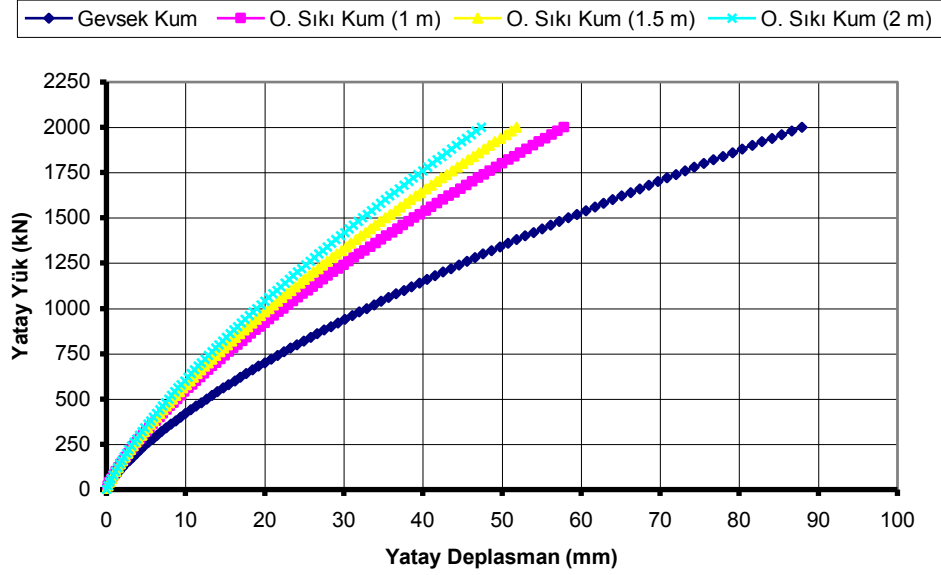
A.2.4. D=100 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D=80 cm., L=16 m



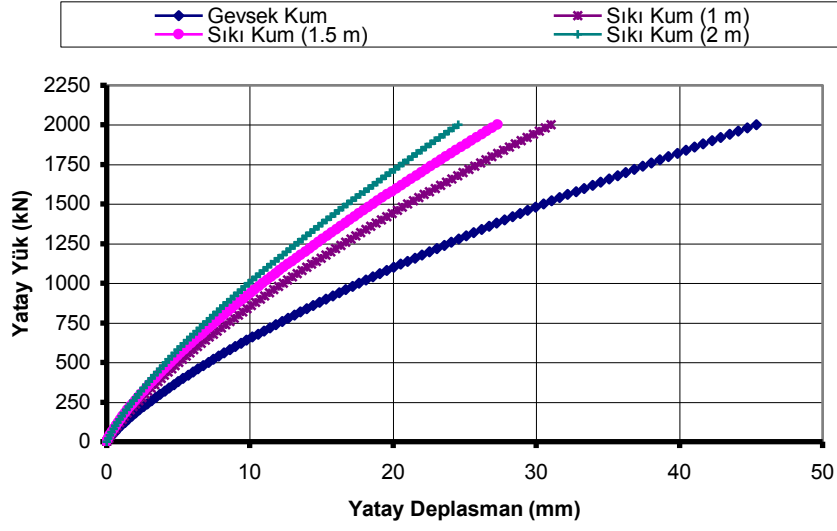
A.2.5. D= 80 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D=65 cm., L= 16 m



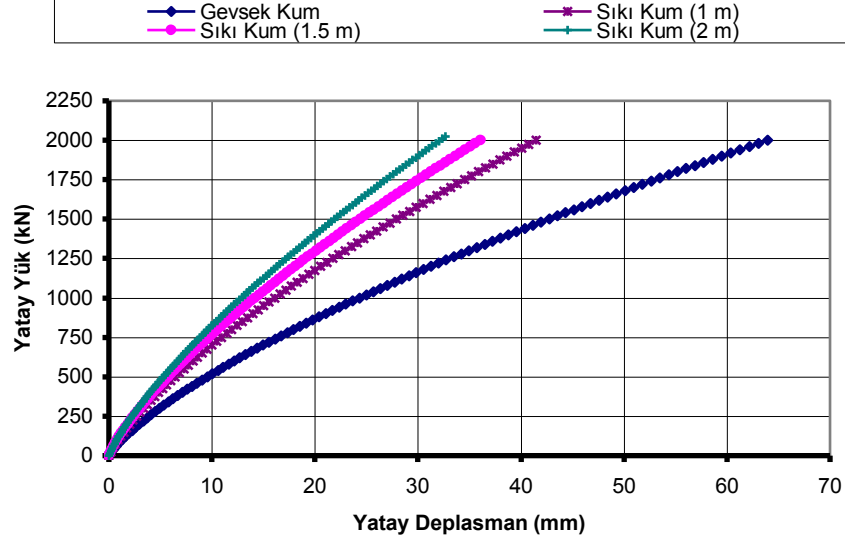
A.2.6. D=65 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın orta sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

D= 100 cm., L= 16 m

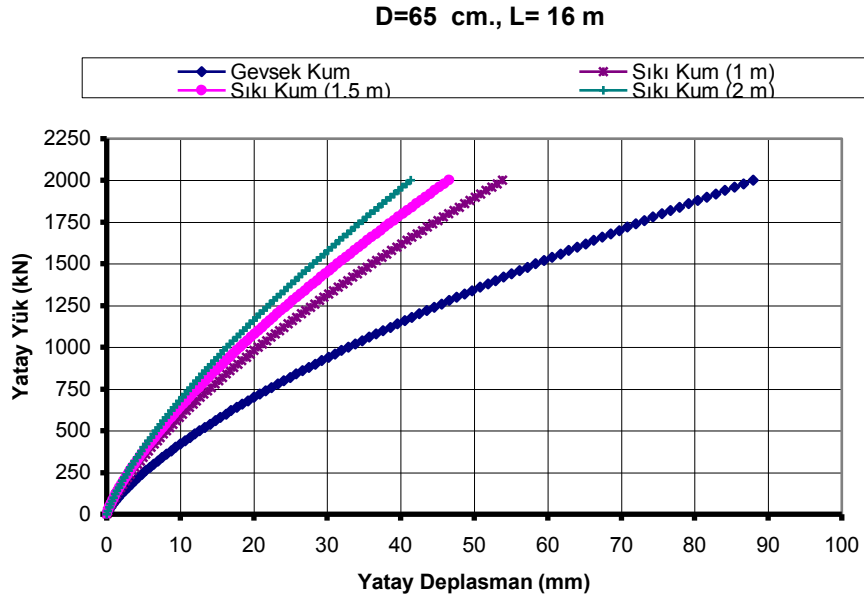


A.2.7. D= 100 cm. çapında zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri,

D=80 cm., L=16 m



A.2.8. D= 80 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri,



A.2.9. D= 65 cm. çapında kazıkta zemin üst tabakanın sıkı kum ile değiştirilmesi ile elde edilen yatay yük- yatay deplasman eğrileri

B.1.Örnek Lusas Data Dosyası

C Version 13.3-2 Date 02-05-01 Time 15:41

PROBLEM TITLE

OPTION 2 48 61 117 118 123 146 157 235 250 ...
253 278 319 324

UNITS kN m t s C

PN6 ELEMENT TOPOLOGY

1	1	2	4	40	24	13
2	40	24	13	41	25	14
3	41	25	14	42	26	15
4	42	26	15	43	27	16
5	43	27	16	44	28	17
6	44	28	17	7	8	10

.....
.....
.....

2259	5111	5831	5371	7708	7888	7755
2260	7708	7888	7755	7696	7885	7741
2261	5594	5291	4771	7868	7677	7586
2262	7868	7677	7586	7865	7666	7570
2263	5103	5831	5111	7705	7888	7708
2264	7705	7888	7708	7690	7885	7696

HX8M ELEMENT TOPOLOGY

13	109	117	119	111	171	182	235	198
14	111	119	118	110	198	235	240	203
15	110	118	115	108	203	240	155	144
16	171	182	235	198	172	183	236	199

.....
.....
.....

2445	7878	7755	8187	8491	7875	7741	8171	8410
2446	8491	8187	8186	8490	8410	8171	8172	8411
2447	8490	8186	8185	8489	8411	8172	8173	8412
2448	8489	8185	8182	8457	8412	8173	8170	8409

SOLUTION ORDER AUTOMATIC 4

NODE COORDINATES

1	2.121333906E-01	-2.121333906E-01	0.000000000E+00
2	3.000000000E-01	0.000000000E+00	0.000000000E+00
4	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00

.....
.....
.....

8505 -1.200000000E+01 6.000000000E+00 2.550000000E+01
8506 -6.000000000E+00 6.000000000E+00 2.550000000E+01

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1
10 1.000000000E+04 4.000000000E-01 1.900000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 2.500000000E+01 ...
2.500000000E+01 2.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
1.000000000E-02

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

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1
13 2.500000000E+03 4.000000000E-01 1.700000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 1.000000000E+01 ...
1.750000000E+01 2.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
1.000000000E-02

MATERIAL PROPERTIES NONLINEAR 64 1
42 2.500000000E+02 4.000000000E-01 1.700000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 ...
0.000000000E+00 0.000000000E+00 7.000000000E+00 ...
1.200000000E+01 2

MATERIAL ASSIGNMENTS
C
C LusasM Dataset 10 Has Title Zemin taban (elastic)
1 864 1 10 0 0 0 0 10 0 0
C
C LusasM Dataset 4 Has Title Kazik2 (elastic)
865 867 1 4 0 0 0 0 4 0 0
C
C LusasM Dataset 16 Has Title Zemin 2 (elastic)
868 885 1 16 0 0 0 0 16 0 0
C
C LusasM Dataset 4 Has Title Kazik2 (elastic)
886 891 1 4 0 0 0 0 4 0 0

....
....
....

C
C LusasM Dataset 19 Has Title Ust kil 1 (elastic)
2237 2250 1 19 0 0 0 0 19 0 0
C
C LusasM Dataset 45 Has Title Ara yuzey ust kil 1 (elastic)
2251 2252 1 45 0 0 0 0 45 0 0
C
C LusasM Dataset 19 Has Title Ust kil 1 (elastic)
2253 2256 1 19 0 0 0 0 19 0 0
C
C LusasM Dataset 45 Has Title Ara yuzey ust kil 1 (elastic)
2257 2258 1 45 0 0 0 0 45 0 0
C

C LusasM Dataset 19 Has Title Ust kil 1 (elastic)
 2259 2448 1 19 0 0 0 0 19 0 0

FREEDOM TEMPLATE

U V W

SUPPORT NODES

1 2 1 R R R
 4 61 57 R R R
 62 108 46 R R R
 109 111 1 R R R
 115 117 2 R R R
 118 119 1 R R R

...

...

...

8457 0 0 F R F
 8460 0 0 R R F
 8463 8465 1 F R F
 8476 8478 1 R F F

LOAD CASE 1 TITLE Loadcase 1

SSRE 6

C 10 Element	Node	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SZX	User data
1	1	-288	-288	-432	-1.54e-015	0.000732		-0.000732
1	2	-288	-288	-432	-1.54e-015	6.94e-013		-0.00104
1	4	-288	-288	-432	-1.54e-015	6.94e-013		-1.54e-012
1	40	-288	-288	-432	-3.88e-005	0.0174	-0.0391	
1	24	-288	-288	-432	-3.88e-005	0.0167	-0.0394	
1	13	-288	-288	-432	-3.88e-005	0.0167	-0.0384	
2	40	-243	-243	-365	-3.88e-005	0.0208	-0.0425	
2	24	-243	-243	-365	-3.88e-005	0.0167	-0.0442	
2	13	-244	-244	-365	-3.88e-005	0.0167	-0.0384	
2	41	-244	-244	-366	0.000295	-0.0571	0.145	
2	25	-244	-244	-366	0.000295	-0.0612	0.144	
2	14	-244	-244	-366	0.000295	-0.0612	0.149	
3	41	-217	-217	-324	0.000295	0.00996	0.0783	
3	25	-217	-217	-324	0.000295	-0.0612	0.0489	
3	14	-216	-216	-323	0.000295	-0.0612	0.149	
3	42	-221	-221	-328	0.000817	0.426	-0.928	91e-010

....

....

....

2447	8489	-2.87	-2.79	-4.27	-0.0151	0.00561	-0.00107	
2447	8411	-2.97	-2.78	-4.24	-0.0172	0.00561	-0.00225	
2447	8172	-2.96	-2.76	-4.23	-0.0172	0.00634	-0.00225	
2447	8173	-2.86	-2.76	-4.26	-0.0172	0.00634	-0.00107	
2447	8412	-2.85	-2.77	-4.27	-0.0172	0.00561	-0.00107	
2448	8489	-2.84	-2.75	-4.25	-0.00231	0.00066	0.000395	
2448	8185	-2.84	-2.75	-4.24	-0.00231	0.000659		0.000395
2448	8182	-2.82	-2.75	-4.25	-0.00231	0.000659		0.000152
2448	8457	-2.82	-2.75	-4.25	-0.00231	0.00066	0.000152	

2448	8412	-2.84	-2.74	-4.24	-0.00253	0.00066	0.000395
2448	8173	-2.84	-2.74	-4.24	-0.00253	0.000659	0.000395
2448	8170	-2.81	-2.74	-4.25	-0.00253	0.000659	0.000152

LOAD CASE 2

CL
7547 0 0 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00

CURVE DEFINITION 10 USER
1 1
13 1

CURVE DEFINITION 11 USER
1 0
2 150
3 300
4 450
5 600
6 750
7 850
8 950
9 1000
10 1050
11 1075
12 1100
13 1125

CURVE ASSIGNMENT
1 1 10
2 1 11

ELEMENT OUTPUT
1 2448 1 0
NODE OUTPUT
1 8510 1 0

NONLINEAR CONTROL
ITER 15 0 0
CONV 0 0 0.1 0.1 0 0
OUTP 0 1 1
TERM 0 13

END

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 25 Nisan 1977 tarihinde İstanbul'da doğdu. Ortaöğrenimini 1995 yılında Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesinde, Yüksek öğrenimini 1999 yılında İ.T.Ü İnşaat Mühendisliğinde tamamladı.Yazar, aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri İnşaat Fakültesi Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt oldu.