İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEĞET KAZIKLARIN DÜŞEY TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Cenk BAŞESKİ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEĞET KAZIKLARIN DÜŞEY TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Cenk BAŞESKİ
(501011560)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2005

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. M. Tuğrul ÖZKAN**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Melike ALTAN**

Doç.Dr. İsmail Hakkı AKSOY

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, düşey yüklü kazıkların ara mesafelerine göre taşıma gücü değişimlerini 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 programların öğrenilmesinde yardımlarını ve zamanlarını esirgemeyen Araş. Gör. Ertuğrul ORDU' ya ve Sn. Müge İNANIR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin oluşturulmasında destek ve yardımlarından dolayı A. Murat AÇIKGÖZ' e, her türlü desteği için sevgili aileme, her zaman olduğu gibi tez çalışmalarım esnasında da bana destek olarak hayatımı kolaylaştıran Z.Büke DEVGE' ye çok teşekkür ederim.

Ocak, 2005 Cenk BAŞESKİ

İÇİNDEKİLER

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

1. GİRİŞ 1

1.1. Genel Bakış 1
1.2. Amaç 1
1.3. Problemin çözümleme Süreci ve Problem 1
1.4. Yöntem 2

2. KAZIKLI TEMELLER 3

2.1. Kazıkların Fonksiyonları 3
2.2. Tarihçe 4
2.3. Kazıkların Sınıflandırılması 5
2.3.1. Zemin İçine Yerleştirilme Tarzına Göre Kazıklar 5
2.3.2. Kullanım Amaçlarına Göre Kazıklar 6
2.3.3. Yapımında Kullanılan Malzemelere Göre Kazıklar 7
2.4. Kazık Tipi Seçimini Belirleyen Faktörler 8
2.5. Kazıkların İmalat Etkileri 9
2.5.1. Çakma Kazıkların İmalat Etkileri 10
2.5.2. Sondaj Kazıklarının İmalat Etkileri 12

3. DÜŞEY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN DAVRANIŞI 13

3.1. Genel 13
3.1.1. Kazık Dayanımının Hesaplanmasında Temel Yaklaşımlar 13
3.1.2. Kazığın Yük Altındaki Davranışı 14
3.1.3. Göçme Yükünün Tanımı 15
3.1.4. Kazıklarda İzin Verilen Yükler 16

3.2. Kazıkların Taşıma Gücü 18
3.2.1. Kazıklarda Uç Taşıma Gücü 19
3.2.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Uç Taşıma Gücü 21
3.2.1.2. Kohezyonlu Zeminlerde Uç Taşıma Gücü 23
3.2.2. Kazıklarda Çevre Sürtünmesi 25
3.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Çevre Sürtünmesi 25
3.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi 29
3.2.3. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Taşıma Gücü 35
3.2.4. Kazıklarda Taşıma Gücünün Pratik Olarak Hesaplanması 37
3.3. Düşey Yük Altında Tek Kazığın Oturması 38
3.4. Oturma Tahmini Analiz Yöntemleri 40
3.5. Yük Oturma Eğrileri İçin Bazı Yorumlar 42
3.6. Uç ve Çevre Tarafından Taşınan Yükün Bileşenleri 43
3.7. Yük-Oturma Eğrilerinden Göçme Yükünün Saptanması 44

4. DÜŞEY YÜK ALTINDA KAZIKLARIN GRUP DAVRANIŞI 48
4.1. Genel 48
4.1.1. Kazıklı Temellerin Grup Davranışı 48
4.1.2. Grup Kazıkların Hesap Esasları 50
4.1.3. Grup Kazıkların Yerleştirilme Esasları 51
4.2. Kazık Grubunun Taşıma Kapasitesi 54
4.3. Kazık Gruplarının Altındaki Zemin Tabakalarındaki Gerilmeler 60
4.4. Kazık Gruplarının Oturması 62

5. PLAXIS 3D FOUND. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI 64
5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi 64
5.1.1. Kullanılan Kavramlar 65
5.2. Plaxis 3D Foundation Programının Özellikleri 69
5.2.1. Programın Genel Özellikleri 69
5.2.2. Plaxis 3D Foundation Kullanım Esasları 70
5.2.3. Kullanılan Yapısal Modeller 72

6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER 74
6.1. Plaxis 3D Foundation ile Modelleme Yapılması 74
6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı 74
6.2. Düşey Yüklü Kazık Analizi 76

6.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık ve Zemin Parametreleri 77
6.2.2. Hesap Adımları 78
6.3. Analiz Sonuçları ve Bulgular 79

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 89

KAYNAKLAR 92

EKLER 93

ÖZGEÇMİŞ 103

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1.	Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları ……...	17
Tablo 3.2.	Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları ……...	17
Tablo 3.3.	N_q^* için NAVFAC Önerisi ……...	23
Tablo 3.4.	N_c^* için CFEM Önerisi ..……....	23
Tablo 3.5.	Yanal İtki Katsayısı (K) Değerleri ..…….….	25
Tablo 3.6.	Rölatif Sıkılık – K_o İlişkisi ……..…….....	26
Tablo 3.7.	Yanal İtki Katsayısı (K) Değerleri ….....……..…….	26
Tablo 3.8.	Çeşitli Arayüzey Durumları için Kazık-Zemin Arası Sürtünme Açısı (δ) Değerleri ……....	27
Tablo 3.9.	Kazık-Zemin Arası Sürtünme Açısı (δ) – ϕ İlişkisi ….....	27
Tablo 3.10.	Adhezyon Faktörü Değerleri .……...	32
Tablo 3.11	Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi ……..	33
Tablo 3.12	Kohezyonlu Zeminlerde Yeralan Fore Kazıklar için α Değerleri	34
Tablo 3.13.	f_s – N İlişkisi ……..…….....…	36
Tablo 3.14.	Kazık Oturması için C_p Değerleri …….....	39
Tablo 4.1.	Kazık Ara Mesafesi (S) Değerleri …….....	53
Tablo 4.2.	Kazık Ara Mesafesi (S) Değerleri …….....	54
Tablo 4.3.	Tasarımda Kullanılacak K Değerleri ……	57
Tablo 6.1.	Analizlerde Kullanılan Malzeme Özellikleri ……	78
Tablo 6.2.	D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri ……	85
Tablo 6.3.	Kazıkların Servis Yükleri ……. ……	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.a,b : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması, Uç Kazığı 6
Şekil 2.1.c : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması,
Sürtünme Kazığı 6
Şekil 2.1.d : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması,
Çekme Kazığı 6
Şekil 2.1.e : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması,
Bağlama Kazığı 6
Şekil 2.1.f : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması,
Sıkıştırma Kazığı 6
Şekil 2.1.g : Kazıkların Kullanımına Göre Sınıflandırılması,
Eğik Kazık. 6
Şekil 2.2 : Zamana Göre Yük Kapasitesinin Artışı 10
Şekil 2.3 : Yumuşak Killerde Kazık Çakılmasından Sonra Taşıma Artışı .. 11
Şekil 2.4 : Kumlardaki Çakma Kazıklarda Çevre Zemin Hareketi 11
Şekil 3.1 : Kazık Göçme Yükü için Yük-Oturma Eğrisi 14
Şekil 3.2.a : Kazıklarda Yük Transferi,
Şekil 3.1. de yük-oturma eğrisindeki A noktası 15
Şekil 3.2.b : Kazıklarda Yük Transferi,
Şekil 3.1. de yük-oturma eğrisindeki B noktası 15
Şekil 3.2.c : Kazıklarda Yük Transferi,
Şekil 3.1. de yük-oturma eğrisindeki D noktası 15
Şekil 3.3 : Düşey Yükler Etkisi Altındaki Kazıklarda Kayma Yüzeyleri ... 16
Şekil 3.4 : Kazıklarda Uç Mukavemeti ve Çevre Sürtünmesi 18
Şekil 3.5 : Homejon Kumlarda Uç Mukavemetinin Değişimi 20
Şekil 3.6 : Zemin Sürtünme Açısı ile $(L_b/D)_{cr}$ Değerinin Değişimi 22
Şekil 3.7 : Zemin Sürtünme Açısı ile $N_c^*{}_{max}$ ve $N_q^*{}_{max}$ Değerlerinin
Değişimi 21
Şekil 3.8 : Janbu Taşıma Gücü Faktörleri 24
Şekil 3.9 : Kumlardaki Kazıklar için Birim Çevre Sürtünmesi 26
Şekil 3.10 : Ktan δ için Poulus-Davis Önerisi 28
Şekil 3.11 : Kazık Penetrasyon Boyu ile λ Değerinin Değişimi 30

Şekil 3.12 : Tabakalı Zeminlerde λ Uygulaması ……..……. 31
Şekil 3.13 : Kilin Drenajsız Kohezyonuyla α Değerinin Değişimi ……... 31
Şekil 3.14 : Tabakalı Zeminlerde α Değerleri …..... 32
Şekil 3.15 : α için ASCE Önerisi …..... 33
Şekil 3.16 : Çevre Sürtünmesi Dağılımına Göre ξ Değerleri …...…… 38
Şekil 3.17 : Yükleme Deneyi Sonuçları Yorumu ……..... 42
Şekil 3.18 : İdeal Elastoplastik Zeminde Kazık Davranışı ….....…… 43
Şekil 3.19 : Davisson Yöntemi …..... 44
Şekil 4.1 : Sürtünme Kazığını Çevreleyen Gerilmeler ve Kazık Grubuna Bunların Toplam Etkisi ……..... 48
Şekil 4.2 : Tek Kazık ve Kazık Grubu Altında Gerilmeden Etkilenen Bölgelerin Karşılaştırılması ……..... 49
Şekil 4.3. : Kazık Grubunun Kayma Göçmesi ……..... 49
Şekil 4.4.a : Yüzeysel Temel ve Kazık Gruplarının Altındaki Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması, Yüzeysel Temel .....…… 50
Şekil 4.4.b : Yüzeysel Temel ve Kazık Gruplarının Altındaki Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması, Mini Sürtünme Kazıkları …..... 50
Şekil 4.4.c : Yüzeysel Temel ve Kazık Gruplarının Altındaki Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması, Uzun Sürtünme Kazıkları …..... 50
Şekil 4.5 : Tipik Kazık Grubu Örnekleri …….....…..... 51
Şekil 4.6 : Killer için Grup Etkinliği ……..... 55
Şekil 4.7 : Kazık Grubunun Blok Temel Davranışı ….....……..….. 59
Şekil 4.8 : Taşıma Gücü Katsayısı, N_c Değeri ……..... 59
Şekil 4.9 : Dikdörtgen Kazık Grupları için Şekil Faktörü ……..... 60
Şekil 4.10 : Zemin Gerilmelerinin Değerlendirilmesi için Mindlin Çözümü Kazık-Zemin Sistemleri ……..... 61
Şekil 5.1 : Sonlu Elemanlar Modeli ……..... 64
Şekil 5.2 : Zemin Elemanlarında Düğümlerin ve Gerilme Noktalarının Yerleşimi ……..... 70
Şekil 5.3 : 3D Katı Sürekli Ortam Elemanlarındaki Pozitif Gerilme Yönleri ……...……. 70
Şekil 5.4 : Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması ……..……... 71
Şekil 5.5 : Mohr-Coulomb Yapısal Modeli ……...…...…….….... 73
Şekil 6.1 : ϕ 1000 mm Çapındaki Perde Kazıklar Modeli Sonlu Elemanlar Ağı …...…….….. 76
Şekil 6.2 : ϕ 1000 mm Çapındaki Tekil Kazık Modeli Sonlu Elemanlar Ağı …..…… 76
Şekil 6.3 : Analizlerde Kullanılan Kazık Ara Mesafeleri ……...….…..... 77

Şekil 6.4 : ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri ……..…….. 80
Şekil 6.5 : ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 80
Şekil 6.6 : ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 81
Şekil 6.7 : ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 81
Şekil 6.8 : ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..…… 82
Şekil 6.9 : ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 83
Şekil 6.10 : ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 83
Şekil 6.11 : ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 84
Şekil 6.12 : Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi ……..…….. 86
Şekil 6.13 : Kazık Aralığının Servis Yüküne Etkisi ……...……... 88
Şekil 6.13 : Kazık Aralığının Servis Yüküne Etkisi ……...……... 88
Şekil A.1.1 : ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri ……..…….. 94
Şekil A.1.2 : ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 94
Şekil A.1.3 : ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 95
Şekil A.1.4 : ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri …….. 95
Şekil A.1.5 : ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..…… 96
Şekil A.1.6 : ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 96
Şekil A.1.7 : ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 97
Şekil A.1.8 : ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri ……..……. 97
Şekil B.1.1 : ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri ……...…..……. 98

Şekil B.1.2 **:** ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 3D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri ……..... 99
Şekil B.1.3 **:** ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 2D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri ……..…… 100
Şekil B.1.4 **:** ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 1,5D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri ……..…….. 101
Şekil B.1.5 **:** ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene D Aralıklarla (Teğet) Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri …….. 102

SEMBOL LİSTESİ

Q_p, Q_{ult}	: Kazığın nihai taşıma gücü
Q_p	: Kazığın nihai uç taşıma gücü
Q_s	: Kazığın nihai çevre sürtünmesi taşıma gücü
W	: Kazığın ağırlığı
A_b	: Kazık birim $m^{2'}$sindeki ağırlığı
A_{si}	: Kazığın i zemin tabakasındaki yüzey alanı
Q_{bk}	: Tabanın birim $m^{2'}$sindeki direncin karakteristik değeri
Q_{sik}	: i tabakasında birim $m^{2'}$deki sürtünmenin karakteristik değeri
y_b, y_s	: Kısmi güvenlik sayıları
q_b	: Birim alanda taşınabilecek maksimum yük
q	: Sürşarj yükü
c_u	: Drenajsız kohezyon
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
N_c, N_q, N_y	: Taşıma gücü katsayıları
Φ^o	: Kayma mukavemeti açısı
α	: Adhezyon faktörü
K	: Yanal itki katsayısı
δ	: Kazık - zemin arasındaki sürtünme açısı
N	: SPT vuruş sayısı
f_s	: Soket çevre sürtünmesi
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
S	: Oturma
E	: Elastisite modülü
s	: Kazık ara mesafeleri
L	: Kazık boyu
E_g	: Grup etkililiği
E_s	: Geometrik etkinlik
τ	: Kayma gerilmesi

ν	: Poisson oranı
$[k]$	: Rijitlik matrisi
$\{Q\}$	: Düğüm noktası vektörü
$\{q\}$	: Deplasman vektörü
$\{s\}$	: Gerilme vektörü
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: Normal gerilme bileşenleri
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	: Kayma gerilmesi bileşenleri
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	: Deformasyon bileşenleri
$\{\epsilon\}$	: Deformasyon vektörü
J_1, J_2, J_3	: Gerilme invaryantları
I_1, I_2, I_3	: Deformasyon invaryantları
D	: Kazık çapı
P_{em}	: Emniyetli taşınan yük
S_{em}	: Emniyetli oturma

TEĞET KAZIKLARIN DÜŞEY TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, kazıklara etkiyen düşey yük tiplerine, düşey yükler altındaki tek ve grup kazıkların davranış esaslarına ve düşey yüklü kazıkların analiz yöntemlerine değinilmiştir.

Birinci Bölümde; yapılan çalışmanın geoteknik mühendisliğindeki yeri, amacı, önemi, ele alınan problemin tanımı ve çözüm yöntemi verilmiştir.

İkinci Bölümde, kazıkların genel kullanım amaçlarından bahsedildikten sonra, kazıklar; kullanım amaçlarına, malzeme türlerine ve zemin içine yerleştirilme şekillerine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca kazık tipi seçimini belirleyen faktörler ve imalat etkilerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü Bölümde; düşey yükler altındaki tek kazığın davranış esasları, düşey yüklü tek kazığın taşıma gücü ve oturma hesapları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Yük-oturma eğrilerinden göçme yükünün tahmini yöntemlerine değinilmiştir.

Dördüncü Bölümde; düşey yükler altındaki grup kazıkların davranış ve yerleştirme esasları, düşey yüklü tek kazığın taşıma gücü ve oturma hesapları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Beşinci Bölümde; Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis Programının kullanım esasları ve analizlerdeki "kazık- zemin" modelinin oluşturulmasında kullanılan sonlu eleman tipleri, malzeme özellikleri ve sonlu elemanlar ağından bahsedilmiştir.

Altıncı Bölümde; yapılan analizler hakkında bilgi verilmiş ve analiz bulguları karşılaştırmalı grafikler halinde ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur.

Bu çalışmada Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programını kullanılarak tek ve perde kazıklar için üç boyutlu model ile analizler yapıldı. Analizlerde kullanılan çeşitli kazık çaplarında kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisi incelendi.

Kazıklar, perde kazıkları olarak, eksenden eksene mesafeleri önce 3D, sonra 2D, daha sonra 1,5D ve D (teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için ayrı ayrı modellendi. Analizlerde zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için yük-oturma grafikleri elde edildi.

Sonuçların değerlendirmesinde baz alınacak değer olması için, kazık çapı, kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın düşey yük altındaki davranışı modellendi ve yük-oturma eğrisi elde edildi. Aynı kazık çapı için elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, kazıklar arası mesafenin taşıma gücüne etkisi belirli kriterlere göre değerlendirildi.

Son bölümde ise; yapılan çalışma hakkında değerlendirmelerde bulunulmuş ve yapılan çalışmanın sonuçları yorumlanmıştır.

THREE DIMENSIONAL NON-LINEAR ANALYSES OF AXIALLY LOADED TANGENT PILE GROUP WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In this study, pile load types, behavior of axially loaded piles and pile groups, analysis methods for axially loaded piles are mentioned. The effects of spacing between piles on bearing capacity are determined by using Plaxis 3D Foundation Finite Element Program. This study is analyzed with in seven chapters.

First chapter is about, the aim of the study and the importance of the analyzed problem in a sense of Geotechnical Engineering.

Second chapter is about, the application fields of piles and those facts that determine the pile type. In the same chapter also the classification methods of the piles, according to their material properties and installation methods, are mentioned.

Third chapter is about, the behavior of single pile under axial loads, bearing capacity of single pile under axial loads and methods for calculating acceptable settlements.

Fourth chapter is about, the behavior of pile group under axial loads, bearing capacity of pile group under axial loads and methods for calculating acceptable settlements.

Fifth Chapter is about, the principles of Plaxis 3D Foundation Finite Element Program. You can also find the definitions of the criteria's that are used to model the Pile-Soil Profile, like element types, material properties and finite element mesh etc. in chapter five.

In sixth chapter, detailed information is given about models and analysis made in this study. Also the achieved results and their presentation by graphics could be found in chapter six.

In this study, to investigate group interaction effects on bearing capacity as a function of pile spacing, full-scale 3D finite element models are performed on pile walls where the piles spaced at variable pile distances (like 3D, 2D and 1,5D) and also where the piles are tangent. In analysis, axial load is applied to the piles until soil body collapse. With the analysis, load – settlement graphs are obtained for variable pile spacing and pile diameter.

Lastly, to find the base load – settlement graph for evaluation of the analysis results, the behavior of axially loaded single pile modeled and its load-settlement graph is obtained by taking pile diameter, pile length and soil profile constant. The effects of pile spacing on bearing capacity is determined by comparing the load-settlement graphs which was found for same pile diameter, according to some particular criteria's.

Finally, seventh chapter is about an overall evaluation of the work and the final conclusion for the case.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Günümüzde artan insan nüfusu ve ihtiyaçları, bilim ve teknolojinin de gelişmesiyle çok katlı yüksek binaların inşa edilmesi sonucunu doğurmuştur. Yapı boyutlarında meydana gelen bu artış ile temellere gelen yüklerin de önemli miktarlarda artmasına neden olmuştur.

Temellere gelen bu yükler, 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.

Düşey yükler etkisi altında olan 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, perde kazıkların Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile düşey yükler etkisi altındaki davranışlarının genel karakterini belirlenmesi ve bu davranış karakterine kazıklar arasındaki ara mesafenin etkilerini ortaya çıkarmaktır.

1.3. Problemin ve Çözüm Yöntemlerinin Süreci

Bu çalışmadaki çözüm süreci; tekil kazığın sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenerek boyutlandırılması ve kazığın düşey yük altında davranışının

belirlenmesidir. Ardından aynı niteliklere sahip zemin tabakalarında bulunan perde kazıkların değişik eksenden eksene ara mesafeler için sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenerek boyutlandırılması ve kazığın davranışının tekil durumla karşılaştırılmasıdır.

Bilgisayar teknolojilerinin gelişimlerine paralel olarak kazıkların kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki kabul edilebilir yük ve deplasman limitleri için sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünde APILE, PLAXIS, LUSAS vb. bilgisayar programları geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, kazıkların düşey yük altındaki davranışları Plaxis 3D Foundation 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 Plaxis 3D Foundation programı ile çözülür.
- Yük ve deplasman limitlerinin ana karakteri belirlenir.

2. KAZIKLI TEMELLER

2.1. Kazıkların Fonksiyonları

Zeminin üst tabakalarının gerekli taşıma gücünü sağlayamadığı ve müsaade edilen oturma sınırlarını geçtiği durumlarda, yapı yükleri derin temel sistemleri kullanılarak taşıma gücü açısından daha kuvvetli olan tabakalara aktarılır. Bu anlamda kullanılan yapı elemanları kazık ve ayak (keson) olarak isimlendirilmektedir. Temel sistemi de adını, kullanılan yapı elemanından almakta ve kazıkların kullanıldığı sistemler kazıklı temeller olarak adlandırılmaktadır.

Derin kazı sonucu zemin seviyesinden büyük derinliklere yerleştirilen yapı temellerinin tasarımı ise büyük ölçüde yüzeysel temellerin tasarımı ile aynı esaslara dayanmaktadır. Bununla beraber imalat, yeraltında, gözle görülmeden yumuşak zemin içerisinde ve çoğunlukla yeraltı suyu içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, imalatların yeterli özen gösterilerek yapılması sonucuna varılmaktadır.

Bu tip temel sistemi son derece pahalı bir uygulamadır. Tüm temel ve zemin mühendisleri, yüzeysel temellerin yetersiz kaldığı zorunlu durumlarda çözüm olarak kazıklı sistemi önerirler. 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,
- Suyla ilişkiye geçince, kabaran veya ani çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerini aktif zon dışına aktarmak,
- Makine temelleri altındaki zeminin, titreşimlere ve sistemin doğal frekansına karşı sıkışmasını sağlamak,
- Gevşek granüller zeminleri sıkıştırılarak iyileştirilmesi,
- Sıkışabilirliği yüksek zeminlerde bulunan tekil temellerin veya temel sistemlerinin oturmalarını kontrol altına almak,
- Köprü kenar ve orta ayaklarında, erozyon nedeniyle temel altının oyulma tehlikesine karşı güvenlik oluşturmak,

- Açık deniz yapılarında yükün deniz tabanında sağlam tabakalara iletilmesi,
- Şev kaymalarını kontrol etmek için kullanılır [2].

2.2. Tarihçe

Yapıları desteklemek için taşıyıcı kazıkların çakılması inşaat mühendisliğinin ilk sanat ve bilim örneğidir. Britanya'da Romalılar tarafından inşa edilen nehir kıyısı yerleşimlerinde ve köprülerde sayısız ahşap kazık kullanımı örneği bulunmaktadır. Çin'de, Man Dynasty'deki köprü inşaatçıları ahşap kazık kullanmışlardır (M:Ö: 200 -M.S. 200). İsviçre'nin neolitik insanının günümüzden 12.000 yıl önce sığ göl tabanlarında ahşap kazık çakarak üzerlerine barınak inşa ettikleri belirlenmiştir. Bu ilk zamanlarda belli bir çekiç ve belli bir düşme yüksekliği karşısında, çakmaya gösterdiği direnç ile hesaplanan izin verilen yükün belirlenmesi ilkel kurallara göre belirlenmeliydi. Çeşitli ağaç türlerinin durabilitesi hakkında ve ahşabı çürümeye karşı yakan veya kazık başlarına kagir taban döşek yaparak su seviyesi altında geçirimsizliği sağlayan bazı yöntemlerin ölçüleri hakkında da bilgiler birikmiştir.

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

19. Yüzyılın sonlan 20. yüzyılın başlarında yapısal bir ortam olarak gelişen betonarme, karadaki yüksek kapasiteli kazık işlerinde büyük oranda ahşabın yerini almıştır. Çeşitli yapısal formlarda hazırlanabilirler. Çok değişik zemin ve kaya ortamlarında kullanılabilirler ve büyük çaplarda imal edilirler. Sondaj delikleri açılarak, islenilen derinliğe kadar uygulanabilirler.

Kazık işlerinde çelik kullanımı ise vazgeçilmezdir. Bu artan kullanım, fabrikasyon ve taşıma kolaylığının yanı sıra çok zor şartlardaki çakma işlemlerinde uygulanabilmesi yüzündendir. Kıyı yapılarında çelikteki korozyon probleminin üstesinden dayanıklı kaplama ve katodik korumalarla gelinmekledir [2].

2.3. Kazıkların Sınıflandırılması

Kazıklar değişik özellikleri esas alınarak, birçok şekilde sınıflandırılabilirler. Kazık malzemesi göz önüne alındığında ahşap, beton, çelik veya bunlardan ikisinin bir arada kullanıldığı kompozit türlerden söz edilebilir. Yükü zemine aktarış şekli düşünüldüğünde ise yük büyük oranda kazık ucunda taşınıyorsa uç kazığı, kazık çevresinde taşınıyorsa sürtünme kazığı adını alırlar. Bazı kazıklar özel üretim biçimleri nedeniyle patente sahip firmanın adı ile anılırlar.

2.3.1 Zemin İçine Yerleştirilme Tarzına Göre Kazıklar

Kazıklar, zemin içinde yerleştirilmesi sırasında neden oldukları sıkışma ve ötelenme yönünden sınıflandırılabilirler. Bu durum BS 8004 (1986)'de 3 kategori halinde aşağıdaki gibi verilmektedir [7].

Büyük Deplasman Kazıkları, yerleştirilmeleri sırasında zeminde büyük miktarda yer değiştirmeye neden olurlar. Genel olarak çakma kazıklar bu gruba girmektedir. İçi boş ancak alt ucu kapalı veya içi dolu kesitlerin zemine çakılıp yerinde bırakılmaları ile oluşturulurlar. İçi dolu kesitli tipleri ahşap veya hazır beton (prefabrik veya öngörmeli) oluştururken, içi boş kesitler çelik boru veya beton boru kazıklar olabilir. İçleri çakıldıktan sonra boş bırakılabilir veya betonla doldurulabilir.

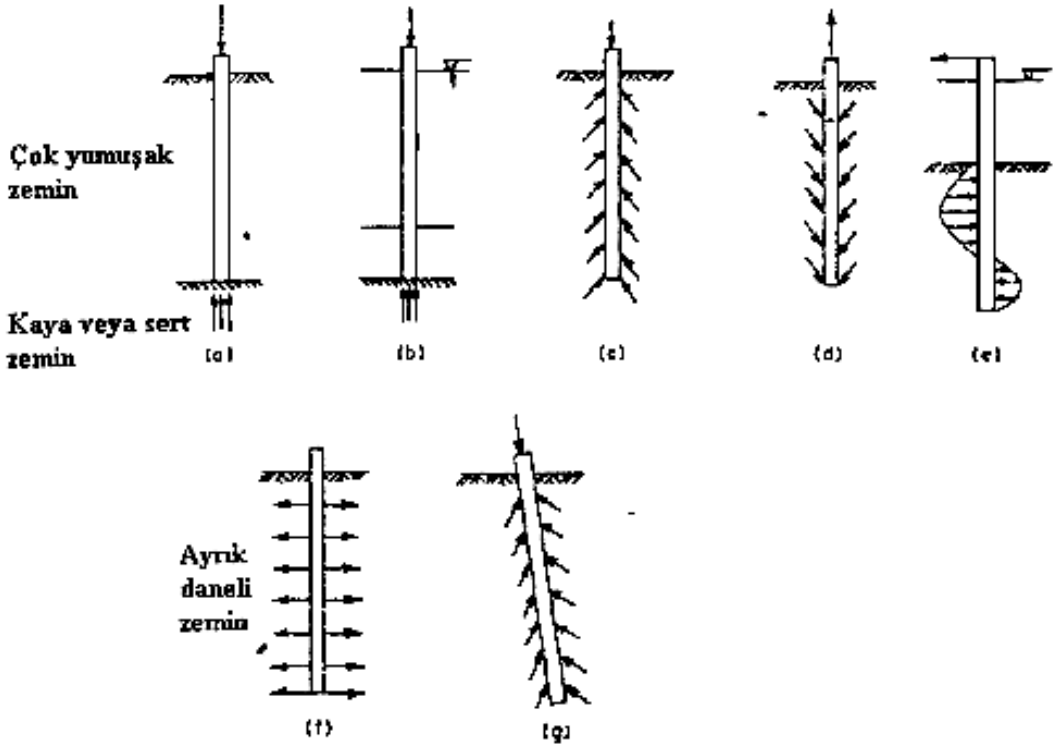
Küçük Deplasman Kazıkları, yerleştirilmeleri sırasında zeminde az miktarda yer değiştirmeye neden olurlar. H kesitli, ucu açık veya kutu çelik kazıklar çakma sırasında uçlarında bir tıkaç oluşturmuyorsa zeminde çok az yer değiştirmeye neden olurlar. Büyük çekme kuvvetleri taşıtılabilen çelik vida kazıklar da bu sınıftandır.

Deplasman Yaratmayan Kazıklar, zeminin kazılarak bir boşluk açılması ve bu boşluğun betonlanmasıyla oluşturulan kazıklardır. Burada kazığın yerleştirileceği zemin önceden kazıldığı için zeminde ötelenme veya sıkışma meydana gelmez. Boşluk kenarlarının desteklenip desteklenmemesi, destekleniyorsa kalıcı mı yoksa geçici mi olduğu, geçici ise bir kılıf yardımı ile mi yoksa sondaj çamuru ile mi yapıldığına göre değişik kazık türlerinden söz edilebilir.

2.3.2. Kullanım Amaçlarına Göre Kazıklar [3]

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 [1].

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). Kazık yükü, kazık ucu vasıtasıyla temel zeminine aktarılır. Çevre sürtünmesi ihmal edilebilir.



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 [3]

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

*Çekme Kazıkları***,** suyun kaldırma kuvvetine maruz yapıları veya üst yapıya gelen kuvvetler nedeniyle döndürme momentine maruz temel sistemlerinin güvenilir bir şekilde zemine tespitini sağlayan kazıklardır. Su altında yapılan tesisle veya toprağa

gömülü tanklar bu tip kazıkların kullanıldığı yerlerdir (Şekil 2.1 d).

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

Kompaksiyon Kazıkları ile zemin sıkılaştırılarak zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amaçlanır (Şekil 2.1 f). Örnek olarak kum kazıklar verilebilir.

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

2.3.3. Yapımında Kullanılan Malzemelere Göre Kazıklar [3]

Ahşap kazıklar, en eski kazık tipidir. Taşınma, işlenme kolaylığı ve uzun ömürlü olmaları bakımından kullanılırlar. Bu tip kazıklar, özellikle killi zeminlerde, zemin ile kazık arasında iyi bir aderans 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. Bu nedenle çakma sırasında kazığın davranışı gözlemlenmelidir.

Ahşap kazıkların taşıma gücü yüksek değildir. Yaklaşık olarak 20–25 cm çaplı bir kazığın taşıyacağı yük 200–300 kN civarında olmaktadır.

Betonarme kazıklar, en çok uygulama alanı bulan kazık tipidir. Bu tip kazıklar çakma kazıklar ve yerinde dökme kazıklar olarak iki kategoride bulunmaktadırlar. Çakma kazıklar, fabrikada önceden hazırlanırlar ve zemine üzerlerine ağırlık düşürülerek çakılırlar. Bu kazıklar oldukça büyük yükleri yumuşak zemin tabakaları altındaki sağlam tabakalara iletmek için kullanışlılardır. Yerinde dökme kazıklar (fore kazıklar), kaplama borusu veya sondaj deliği içersinde imal edilirler. Bu kazıklar, delme teknikleri kullanılmak 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 sağlayabildiğinden 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

kazığın rijitliğinin artmasına neden olur. 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.

2.4. Kazık Tipini Seçimini Belirleyen Faktörler

Kazık cinsinin belirlenmesi için yapının konumu ve tipi, zemin şartları ve durabilite önemli olmaktadır. Ancak en önemli etken ekonomidir [4].

Çakma kazıklar, betonu önceden dökülerek, zemine çakılmak suretiyle yerleştirilen kazıklardır. Hazır beton çakma kazıklar belirlenmiş bir düzende çakılabilirler. Yumuşak kil, silt ve turbalık zeminde boğulma tehlikesi olmaksızın yerleştirilebilir. Yeraltı suyunun varlığı kazık yapım işini etkilemez. Kazık malzemesinin kalitesi önceden belirlenebilir, kazık boyu istenilen boyda ayarlanabilmektedir.

Sonradan çakılan kazık etkisi ile öncekiler yukarı yönde bir hareket yapmış ise tekrar çakılabilir. Deniz yapılarında su derinliğinin geçilmesi daha kolaydır. Bu olumlu yanlarının yanı sıra boylarının kolayca değiştirilmeyişi, büyük çaplarda ve sınırlı hacimlerde çakma zorlukları, çakma sırasında çevrede kabarma olasılığı ve taşınmaları sırasında doğacak etkileri karşılamak amacı ile belki de gereksiz donatı konulması zorunluluğu olumsuz yönleri olarak sayılabilir.

Zeminde oluşturulan bir deliğin betonlanmasıyla oluşturulan fore kazıklar, yurdumuzda çok yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu kazık tiplerinde zeminde kabarma olmayışı, kazık boyunun koşullara göre kolayca ayarlanabilmesi, kazı sırasında zemin verilerinin doğrulanma olanağı ilk anda göze çarpan olumlu yönleridir. Fore kazıklar yapım sıralamasında temel kazısı yapılmadan önce de delinip yapılabilirler. Bu işlem inşaat işine hız kazandırır.

Bu tür kazıkların yumuşak kayaç veya killi zeminde son bulan uçları özel aygıtlarla genişletilerek taşıma kapasiteleri artırılabilir, uzun boylar ve geniş çaplar kazık

yapım yeri koşullarında gerçekleştirilebilir. Donatı taşınma ve çakma gerilmeleri tarafından belirlenmez. Bunların yanı sıra yumuşak killerde boğulma olasılığı, su altında beton dökme zorluklan ve betonun kontrol edilemeyişi, foraj sırasında granüller zeminlerin gevşemesi, yumuşak kayaçların bozuşması olasılığı, özellikle kazık tabanı zemininde su akışı nedeni ile gevşeme ve kabarma olasılığı olumsuz ve özen gösterilmeyi gerektiren taraflarıdır [4].

Sonuç olarak kazık tipi seçimini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir [5].

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,
i) Çakma şartlarına ve yöntemlerine en uygun kazıklar,
j) Zeminin en az örselenmesi,
k) Zeminde asit veya diğer zararlı maddeler bulunması,
l) Eğik kazıkların bir açıda çakılabilme kolaylığı,
m) Eğilme için direnç veya esneklik,
n) Su seviyesinin altında veya üzerinde çakabilme,
o) Mühendisin geçmişteki deneyimleri ile sahip olduğu kişisel tercih hakkıdır.

2.5. Kazıkların İmalat Etkileri [6]

Bir kazığın imalat metodu, onun yük altındaki davranışında büyük rol oynar. Bu konuda yapılan çalışmalara göre çakma kazıklar diğer imalat şekillerine göre zemini daha fazla örselerken sondaj kazıklarının nispeten daha az örselediği gözlenmiştir.

Kazıkların imalatı sırasında kazığı çevreleyen zemin orijinal özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenir. Bu değişimler normal arazi araştırmaları, numune alma ve laboratuar veya arazi deneyleri yardımıyla belirlenebilir.

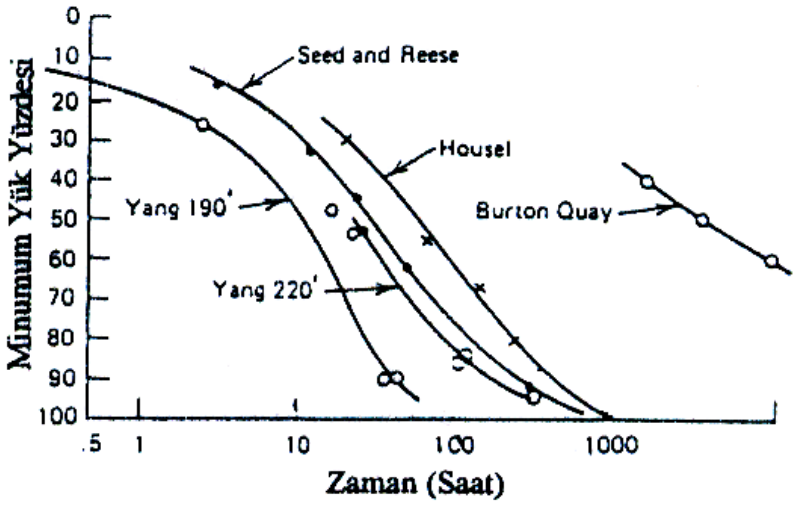
2.5.1. Çakma Kazıkların İmalat Etkileri

- *Kil Zeminler*

Killerde kazık etkileri Mello (1969) tarafından dört ana gruba ayrılmıştır.

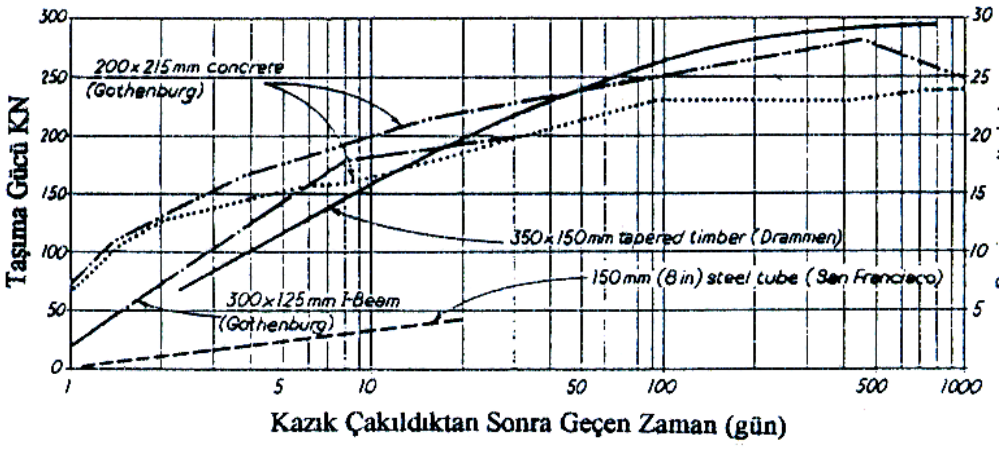
a) Kazık çevresindeki zeminde yoğrulma veya yapısal yer değiştirme
b) Kazık çevresindeki zeminin gerilme durumundaki değişimler
c) Kazık çevresinde oluşan aşırı boşluk suyu basınçların dağılması
d) Zemindeki uzun vadeli dayanım kazanma olayları

Kazık imalatını takip eden farklı zamanlarda yapılan kazık yükleme deneylerinde elde edilen göçme yükleri farklılık göstermektedir. Buradan anlaşılacağı gibi kazık çakma esnasında boşluk suyu basıncının artmasından dolayı hissedilir derecede düşen, kilin drenajsız dayanımı zaman içinde artışa geçer. Bu olay Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te taşıma gücünün zaman içinde artışı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Zamana Göre Yük Kapasitesinin Artışı [4]

Yapılan araştırmalarda kazık çakma esnasında ne kadarlık bir bölgenin yoğrulmaya maruz kaldığı kavramı araştırmacılar tarafından hemfikir olunamayan bir kavramdır. Mello (1969) göre çakılmadan sonra ani olarak kazık çevresindeki 1.5 veya 2 kazık çapı kadar olan zeminin hepsi yoğrulmaktadır. Orrje ve Broms (1967) ise hassas killerde imal edilen beton kazıklarda, kazıklar arasındaki mesafe en az 4 kazık çapı bırakıldığında 9 ay içinde zeminin orijinal kayma dayanımına ulaştığını belirtmektedirler.

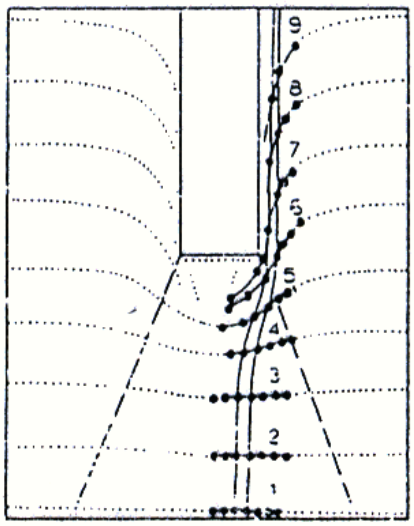


Şekil 2.3. Yumuşak Killerde Kazık Çakılmasından Sonra Taşıma Artışı [6]

- *Kum Zeminler*

Bir kazık kuma ve kohezyonsuz bir zemine çakıldığında zemin, deplasman ve vibrasyon etkisi ile sıkışarak yeni bir yapı oluşturur ve bazı daneler kırılır. Böylece gevşek kumlarda, kazığın taşıma gücü çakına kazıklarda rölatif yoğunluğun artmasından dolayı artar. Bunun sonucu olarak şunu söyleyebiliriz ki gevşek kumlarda çakma kazıklar, sondaj kazıklarına göre daha avantajlıdır.

Robinsky ve Morrison (1964) kumlarda yaptığı bir dizi model deneyinde kazık çevresindeki zeminin kompaksiyonu ve deplasmanını incelemiştir. Başlangıç rölatif sıkılığı %17 olan gevşek kumlarda kazık çevresinde 3 ile 4 kazık çapı, kazık ucunda ise 2.3 ile 3.5 kazık çapı kadar bir bölgenin zemin hareketi gözlenmiştir (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Kumlardaki Çakma Kazıklarda Çevre Zemin Hareketi [6]

2.5.2. Sondaj Kazıklarının İmalat Etkileri

- *Kil Zeminler*

Killerde sondaj kazıkların imalatının etkileri kazık ile zemin arasındaki adhezyon faktörünün değişimi açısından incelenmiştir. Adhezyon imalattan önce drenajsız kohezyonda daha düşük bulunur. Bunun başlıca sebebi yüzeye yakın kilin yumuşamasıdır. Yumuşama başlıca şu sebeplerden artar.

a) Islak betondan nem emilmesi
b) Sondaj çevresindeki düşük gerilmeli bölgelere doğru kil bünyesindeki suyun yayılımı
c) Sondaj çukuruna delme operasyonu esnasında suyun dolması

Son etken kaliteli delme teknikleri ile önlenebilirken, ikinci etken ise delme işleminin kısa sürede yapılmasıyla minimum bir seviyeye indirgenebilir.

Diğer taraftan killerdeki sondaj kazıklarında, delme etkisiyle kazık ucundaki zemin örselenir ve yumuşar.

- *Kum Zeminler*

Kumlarda ve kohezyonsuz zeminlerde sondaj kazıklarının imalat etkileri konusunda fazla bir açıklayıcı bilgi yoktur. Sondaj kuyusunun göçmemesi ve kuyu duvarlarını tutmak için sondaj sıvısı veya kaplama gerekmektedir. Sonradan bu kaplamanın beton dökümü sırasında çekilmesiyle kazık yanal yüzeyindeki zemin örselenir ve bir miktar genişler. Böylece kazık zeminden sıyrılır.

Tomlinson (1975) göre yoğun çakıllar veya yukarı yönde hareketlerin olmadığı zamanlar, nihai kayma dayanımı açısı kullanılmalıdır. Çünkü beton dökülmesiyle kazık ucundaki zemin tekrar sıkışacak ve ϕ açısı yoğun durumdaki değerini alacaktır. Kazık yanal yüzeyini de betonun yayılmasından dolayı yüksek adhezyon olması halinde kazık ucundaki zeminin sıkışması mümkün olmayacaktır.

Ayrıca sondaj kazıklarında genel olarak yapısal problemlerde gözlenebilir. Bunlar Panday (1967) tarafından şu şekilde sıralanmıştır.

a) Sondaj deliğinin kazılması sonucu kazığın bazı bölgeleri boyun yapar.
b) Kazık içindeki agrega ayrılır.
c) Kazık donatısı burkulabilir.

3. DÜŞEY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN DAVRANIŞI

3.1. Genel

3.1.1. Kazık Dayanımının Hesaplanmasında Temel Yaklaşımlar [4]

Her kazık tipi ve imalat metodu, faklı yollarla kazığı çevreleyen zemini örseler. Bu etki kazığın taşıma gücünü arttırabilir ya da azaltabilir. Bu nedenle kazık taşıma gücünün hesaplandığı pratik formüller için imalat yönteminin iyi belirlenmesi temel teşkil etmektedir.

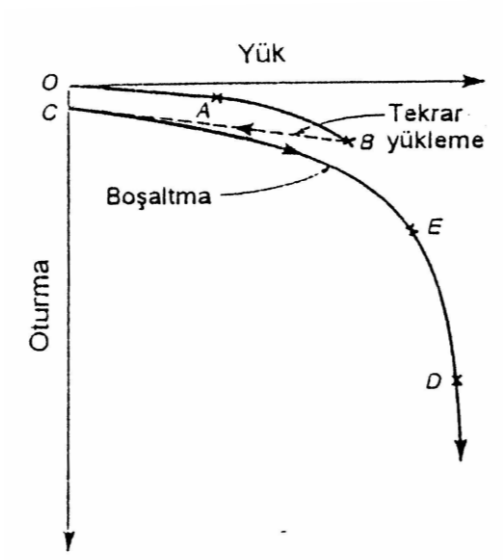
Düşey yükler altındaki kazığın dayanımının hesaplanması temel statik veya zemin mekaniği yaklaşımıdır. Günümüzde bazı araştırmacıların çalışmaları saf zemin mekaniği teorisine dayanmaktadır. Bu teori, kazık yanal yüzeyindeki çevre sürtünmesi, sükunetteki toprak basıncı katsayısı, efektif gerilme ve drenajlı kayma dayanım açısı arasındaki basit bir ilişki ile tanımlanabilir. Fakat sükunetteki toprak basıncı katsayısının, kazık imalatına göre değişen farklı katsayılarla düzeltilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde kazığın uç dayanımının, kazığın ucundaki örselenmemiş kayma dayanımını temel alan klasik zemin mekaniği teorisi ile hesaplanması mümkündür. Servis yükü altında kazık veya kazık grubunun oturması kazıktan zemine çevre sürtünmesiyle transfer edilen yük ve elastik teori göz önüne alınarak hesaplanır.

Kazığın imalatı, kazık-zemin ortak yüzeyinde karışık bir durum oluşturur. İmalat sonunda bu ara yüzey davranış açısından genellikle orijinal zemin davranışıyla bağdaşmaz veya tamamen yoğrulmuş bir durum alır. Kazığı çevreleyen boşluk suyu basıncı imalattan sonra yıllara, aylara, günlere ve saatlere göre büyük değişiklikler gösterir ve bu nedenle efektif gerilmenin kullandığı çevre sürtünmesi ilişkileri doğruluğunu kaybeder. Bunun sonucu olarak, kazık nihai taşıma gücünün hesaplanması için efektif gerilmelerin kullanılması durumunda, boşluk suyu basınçlarının değişimi ve hatta yeraltı su seviyesinin mevsimlere göre değişimi göz önünde bulundurulmalıdır.

Hesaplanan taşıma gücü ve uygulama yükü imalattın ardından kontrol edilmelidir. Bu hesaplamaların doğruluğu imalattan kısa bir sure sonra yapılan kazık yükleme deneyi ile tayin edilir. Ancak deney sonuçlarının analizi sırasında taşıma gücüne zamanın etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.2. Kazığın Yük Altındaki Davranışı

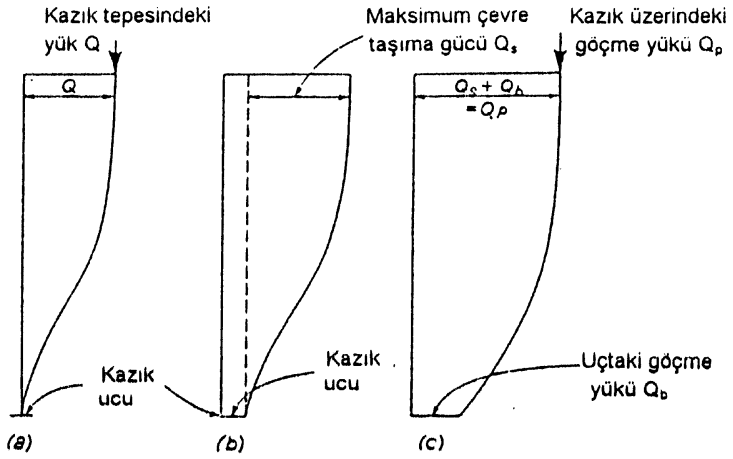
Bir kazık kısa sürede artan düşey yük etkisi altında olduğu zaman Şekil 3.1 deki gibi Yük-Oturma eğrisi gösterir.



Şekil 3.1. Kazık Göçme Yükü için Yük-Oturma Eğrisi [4]

Eğrideki O ile A noktaları arasında yük ve oturma arasındaki ilişki lineerdir. Bu noktada yük boşaltılırsa kazık başı orijinal seviyesine geri döner. A noktasından sonra yükün arttırılmasıyla akma başlar ve B noktasına ulaşılana kadar kazık-zemin ara yüzeyi ve kayma oluşur. Bu sırada kazık şaftında maksimum çevre sürtünmesi mobilize olacaktır. Eğer bu noktada yük boşaltılırsa kazık başı C noktasına dönecektir. Düşey eksendeki OC mesafesi "kalıcı yer değiştirme" olacaktır. Maksimum çevre sürtünmesinin mobilize olması için gereken hareket miktarı çok küçüktür ve kazık çapının sadece %0.3 ile % 1'i arasındadır. Kazığın uç dayanımının tamamen mobilize olması için daha büyük bir hareket gerekmektedir. Bu ise kazık taban çapının %10 ile %20'si arasındadır. Eğri üzerinde kazık uç direncinin tamamen mobilize olduğu nokta D'dir. İşte bu anda kazık, yükte daha fazla artışa gerek olmadan, aşağıya doğru hareket eder ve yükteki çok küçük artışlar, büyük deplasmanlara neden olur.

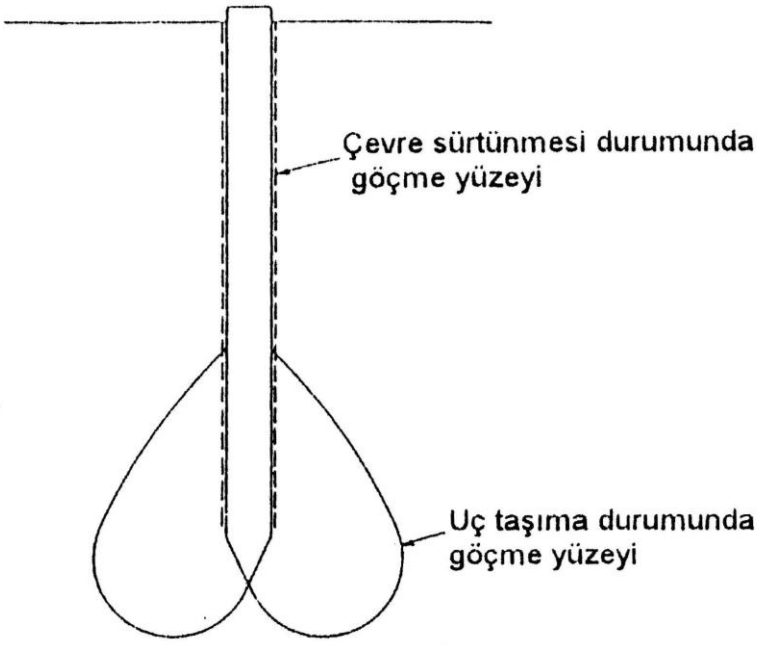
Kazık şaftında değişik noktalara kazığın her yük kademesindeki yer değiştirmesini ölçecek bir düzenek kurulursa, yük değişim seviyelerinde, Şekil 3.1'deki yüklemeden dolayı kazıktan zemine olan yük transferi Şekil 3.2'deki gibi elde edilir. Burada A noktasına kadar kazık üstündeki yüklerin çevre sürtünmesi tarafından taşındığı söylenebilir. A ile B noktaları arasında yükler, çevre sürtünmesi ile birlikte kazık uç direnci tarafından karşılanmaktadır. D noktasında ise çevre sürtünmesiyle yük transferi olmamakta ama uç yükü maksimum değerine çıkmaktadır [4].



Şekil 3.2. Kazıklarda Yük Transferi, (a) Şekil 3.1.' de yük-oturma eğrisindeki A noktası, (b) Şekil 3.1.' de yük-oturma eğrisindeki B noktası, (c) Şekil 3.1.' de yük-oturma eğrisindeki D noktası [4]

3.1.3. Göçme Yükünün Tanımı

Şekil 3.1'deki yük-oturma eğrisinde D noktasına karşılık gelen yükleme nihai taşıma gücü veya nihai limit durum olarak adlandırılmaktadır. Bu safhada kazık ucunun hemen altındaki zemin veya kayada genel kayma göçmesi vardır. Bir kazıklı temelin mühendislik fonksiyonu, komşu iki tek kazık veya kazık grubundaki komşu kazıklar arasındaki rölatif oturma, yapısal iskelet için verilen tolerans sınırları dışında bir distorsiyona neden olunca biter. Bu safha da 3.1'deki yük-oturma eğrisindeki E noktası gibi gösterilebilir. Böylece yapısal göçme, kazığın nihai taşıma gücünden daha düşük bir yükte oluşacaktır. Kazıklarda düşey yük altında oluşan kayma yüzeyleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir [4].



Şekil 3.3. Düşey Yükler Etkisi Altındaki Kazıklarda Kayma Yüzeyleri [4]

3.1.4. Kazıklarda İzin Verilen Yükler

Düşey yük altında bir kazığın taşıyabileceği maksimum yükün bulunması için ampirik ve yarı ampirik çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte genelde uygulama alanı bulan yöntemler aşağıda verilmiştir:

1) Zemin kayma dayanımını kullanan statik analizler
2) Arazi deneyi sonuçlarını kullanan ampirik analizler (SPT, CPT, MPT vb.)
3) Dinamik çakma direnci analizleri (kazık çakma eşitlikleri, dalga yayılım eşitlikleri vb.)
4) Kazık yükleme deneyi analizleri

Ancak kazıklarda müsaade edilen yükün hesabı için en mükemmel dizayn metodu, başlangıçtan nihai kırılma noktasına kadar tüm aşamalar boyunca yükleme-yer değiştirme eğrisinin belirlenmesidir. Bu belirlenen eğriye göre kazık üzerindeki yük dağılımı müsaade edilen yer değiştirme sınırı içinde kalacak şekilde düzenlenir.

Kazığın taşıyabileceği tahmin edilen maksimum yük, beklenmeyen yük artışları ve zemin mühendislik özelliklerinin değişim olasılığına karşı bir güvenlik sayısına bölünür. Güvenli kazık yükünün çalışma yükü(servis yükü) olarak da nitelendirilebilmesi için bu yük altında kazık malzemesinde doğacak gerilmelerin

izin verilebilir değerleri aşmaması gerektiği ve beklenen oturmaların izin verilebilir sınırlar içinde kalacağının gösterilmesi gerektiği açıktır [8].

Uygulanacak güvenlik sayısı maksimum yük kapasitesinin tahminindeki güvenilirlik ve kazığın imalatı sırasındaki denetime bağlı olarak değişebilir. Bu durumlar için AASHTO (1992) tarafından önerilen değerler Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları [8]

Kontrol ve Tahmin (1)	**Artan Yapım Kontrolü**				
Zemin İncelemesi	X	X	X	X	X
Statik Analiz	X	X	X	X	X
Çakma Eşitlikleri	X	-	-	-	-
Dalga Yayılma Analizi	-	X	X	X	X
Dinamik Ölçüm	-	-	X	-	X
Yükleme Deneyi	-	-	-	X	X
Güvenlik Sayısı (FS)	**3.50**	**2.75**	**2.25**	**2.00** (2)	**1.90**

Not: (1) Adı geçen kontrol kontrat belgelerinde tanımlanmalıdır.
(2) Yükleme deneyinin dahil edildiği herhangi bir kontrol kombinezonunda FS=2.00 alınabilir.

Yukarıda verilen güvenlik sayıları yükler altında önerilen değerler olup, Tablo 3.2'de yüklemenin normal, seyrek beklenen ve nadir beklenen durumlar için farklı güvenlik sayıları önerilmektedir.

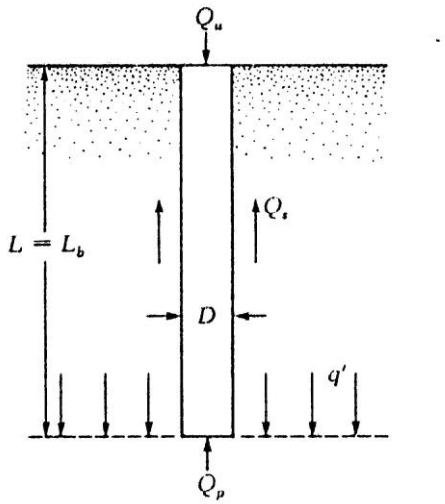
Tablo 3.2. Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları [8]

Taşıma Gücü Tahmini ve Denetim	**Yük Koşulu**	**Min FS**	
		Basınçta	**Çekmede**
Kazık yükleme deneyi ile doğrulanan kuramsal veya ampirik tahmin	Olağan	2.00	2.00
	Seyrek	1.50	1.50
	Çok Seyrek	1.15	1.15
Kazık çakma analizi ile doğrulanan kuramsal veya ampirik tahmin	Olağan	2.50	3.00
	Seyrek	1.90	2.25
	Çok Seyrek	1.40	1.70
Yükleme deneyi ile doğrulanmayan kuramsal veya ampirik tahmin	Olağan	3.00	3.00
	Seyrek	2.25	2.25
	Çok Seyrek	1.70	1.70

3.2. Kazıkların Taşıma Gücü

Bir kazığın nihai taşıma gücü, uç dayanımı ve çevre sürtünmesinin toplamından elde edilen aşağıdaki basit denklem yardımıyla hesaplanabilir. (Şekil 3.4) [4]

$$Q_u = Q_p + Q_s + W \tag{3.1}$$



Şekil 3.4. Kazıklarda Uç Dayanımı ve Çevre Sürtünmesi [11]

Burada,

$Q_{u:\ Nihai}$ taşıma gücü

$Q_{p:\ Kazığın}$ nihai uç taşıma direnci

$Q_{s:\ Kazığın}$ nihai çevre sürtünmesi direnci

W : Kazığın ağırlığı

Göçme yükü Q_u'nun bileşenleri olan Q_p ve Q_s Şekil 3.2c'deki son yük safhasında görülmektedir. Kazığın ağırlığı, W ise çoğunlukla ihmal edilir.

Avrupa Şartnamesi (Eurocode 7) Q_u'yu Q, Q_p kazık uç direncini $Q_p = Q_{pk}/\gamma_p$ ve Q_s kazık çevre sürtünmesi direncini $Qs = Q_{sk}/\gamma_s$ olarak tanımlamaktadır. Q_{pk} ve Q_{sk} ise şu şekilde gösterilir. [3]

$$Q_{pk} = q_{pk} \cdot A_p \tag{3.2}$$

$$Q_{sk} = \sum_{i=1}^{n} q_{sik} \cdot A_{si} \tag{3.3}$$

A_p : Kazık tabanındaki kesit alanı

A_{si} : Kazığın i zemin tabakasındaki yüzey alanı

q_{pk} : Tabanın birim m^2'sindeki direncin karakteristik değeri

q_{sik} : i tabakasında yanal yüzeyin birim m^2'sindeki direncin karakteristik değeri

γ_p ve γ_s kısmi güvenlik katsayılarıdır. γ_p fore kazıklar için 1.6; çakma kazıklar içinse 1.3'tür. γ_s ise hem fore kazıklarda hem de çakma kazıklarda 1.3'tür.

3.2.1. Kazıklarda Uç Taşıma Gücü [8]

Bir kazık ucunun taşıyabileceği maksimum yükün zemin dayanım parametrelerine dayalı olarak tahmini yüzeysel temeller için önerilen formda yapılabilir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$q_u = c \cdot N_c^* + q \cdot N_q^* + \gamma \cdot B \cdot N_\gamma^* \tag{3.4}$$

q_u : Birim alanda taşınabilecek maksimum yük

N_c^*, N_q^*, N_γ^* : Biçim ve derinlik faktörlerini içeren taşıma gücü katsayıları

q : Sürsarj yükü

c : Kohezyon ve drenajsız kayma dayanımı

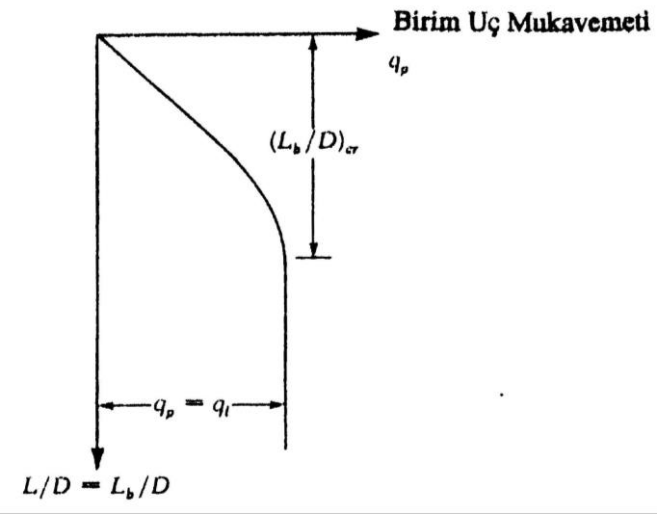
B : Kazık taban genişliği

γ : Zemin birim hacim ağırlığı

Kazıklı temellerin oldukça derin olması nedeniyle yüzeysel temeller için tarif edilen değerlerden farklı değerlerdir. Kazıklar için temel genişliği B yerine (3.4) eşitliğinde kazık çapını düşünmek gerekir. Son terimin diğerleri yanında küçük olacağı düşünülür de (3.4) eşitliği efektif gerilmeler cinsinden yazılırsa birim uç dayanımı,

$$q_p = c' \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^* \tag{3.5}$$

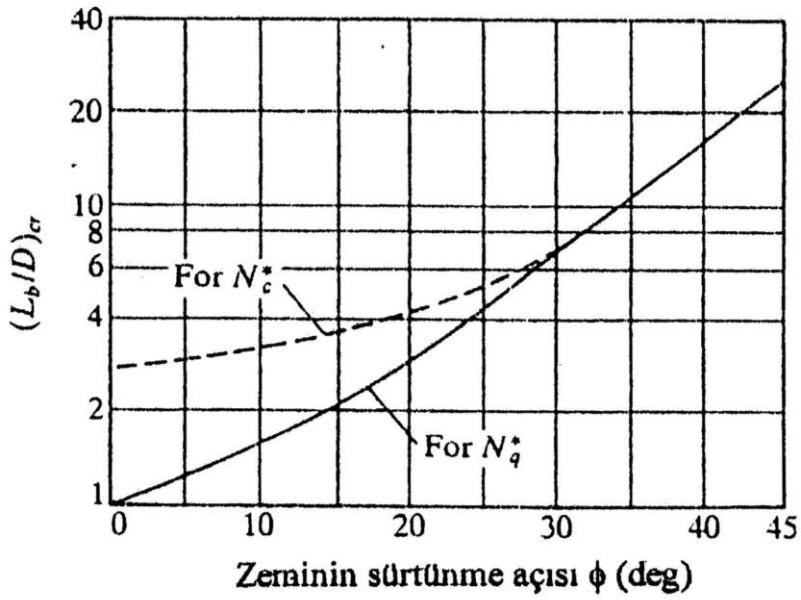
olarak elde edilir. [8]



Şekil 3.5. Homojen Kumlarda Uç Dayanımının Değişimi [8]

Meyerhof (1976) uç taşıma gücünün derinlikle artmakla birlikte kritik bir derinlikten sonra değişmediğini ileri sürmektedir (Şekil 3.5). Kulhawy (1984) ise uç direncinde derinlikle birlikte artışta bir azalma olduğunu ancak bir limit değerden söz edilemeyeceğini belirtmektedir.

Yumuşak ve taşıma gücü az olan zeminleri geçtikten sonra iyi nitelikli tabakalara giren kazıklarda toplam kazık boyu L, kazığın taşıyıcı tabakadaki boyu L_b'den farklıdır. (3.5) eşitliğindeki taşıma gücü faktörlerinin her ikisinin de L_b/D oranı ile değiştiğini saptamış olup kritik bir oranda maksimum değerlere ulaşılmaktadır. Pratikte uygulanan kazık boy ve çapları bu faktörlerin maksimum değerlerine ulaşmaları için yeterli olup araştırmacılar bu oranın 10–20 arasında değiştiği ileri sürülmektedir. $(L_b/D)_{cr}$ oranı ile zemin sürtünme açısı arasındaki ilişki Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Zemin Sürtünme Açısı ile $(L_b/D)_{cr}$ Değerinin Değişimi [11]

3.2.1.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Uç Taşıma Gücü [8]

Kohezyonsuz zeminlerde c'=0 olduğu düşünülürse bir kazığın ucunda taşıyabileceği maksimum yük şu şekilde bulunabilir.

$$Q_p = q_p \cdot A_p = q' \cdot N_q^* \cdot A_p \tag{3.6}$$

İçsel sürtünme açısı ϕ'ye bağlı olarak (3.6) eşitliğinde kullanılabilecek taşıma gücü faktörleri Şekil 3.7' den alınabilir. Burada A_p kazık ucu kesit alanı, q' kazık ucu seviyesindeki efektif gerilme olmaktadır.

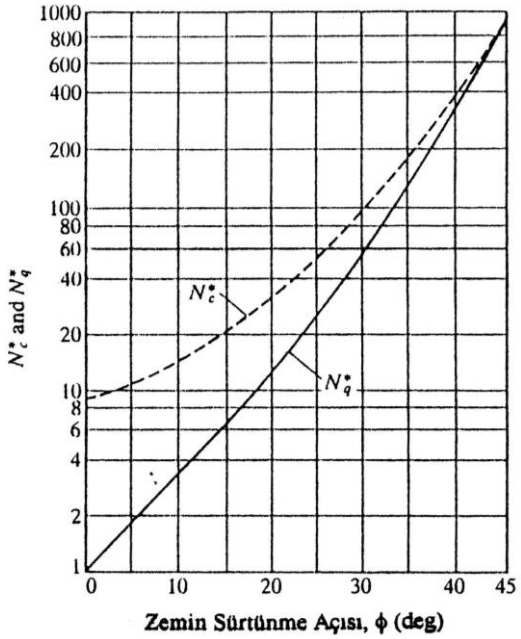
Bununla birlikte Q_p değeri $A \cdot q_t$ değerini aşmamalıdır.

$$Q_p = q' \cdot N_q^* \cdot A_p \le A_p \cdot q_t \tag{3.7}$$

Kazık ucunda birim alanda taşınabilecek yükün sınırı Meyerhof (1976) tarafından şu şekilde verilmiştir.

$$q_t = 50 \cdot N_q^* \cdot \tan\phi \quad (\mathrm{kN/m^2}) \tag{3.8}$$

Burada ϕ taşıyıcı zemin tabakasının zemin sürtünme açısını ifade etmektedir.



Şekil 3.7. Zemin Sürtünme Açısı ile $N_c^*{}_{max}$ ve $N_q^*{}_{max}$ Değerlerinin Değişimi [8]

Meyerhof (1976), nihai uç dayanımını q_p homojen granüller zeminlerde ($L=L_b$) arazi deneylerinden elde ettiği gözlemler sonucu Standart Penetrasyon Deneyi, (SPT) darbe sayısı N değerlerine bağlı olarak

Kumlu zeminlerde :

$$q_p = \frac{40 \cdot \overline{N} \cdot L}{.D} \leq 400 \cdot \overline{N} \qquad (\text{kN/m}^2) \tag{3.9}$$

Kohezyonsuz siltlerde :

$$q_p \leq 300 \cdot \overline{N} \tag{3.10}$$

olarak ve fore kazıklar için bu değerin 1/3' ünün alınması önerilmektedir. Meyerhof SPT' ye bağlı eşitliklerde tahmin yapıldığında güvenli yük için F_{smin} = 4.0 önerilmektedir. Yukarıdaki (3.9) ve (3.10) eşitliklerinde $\overline{N}$ düşey jeolojik gerilmelere göre düzeltilmiş darbe sayısı olup kazık ucundan 10D yukarıda ve 4D aşağıda bir bölgede ortalama bir değer olarak alınacaktır.

Kohezyonsuz zeminlerde tabanda taşınan yük tahmininde kullanılan N_q^* taşıma gücü faktörünün varsayılan göçme mekanizmalarına bağlı olarak değişik araştırmacılar tarafından çok farklı önerildiği bir gerçektir. NAVFAC (1988) pratik olması

amacıyla Meyerhof (1976) ve Coyle – Castello (1981) tarafından gerçekleştirilen kazık yükleme deneylerinin göz önüne alarak ϕ'ye bağlı olarak Tablo 3.3'deki gibi alınmasını önermektedir.

Tablo 3.3. N_q^* için NAVFAC Önerisi [8]

ϕ^o *	26	28	30	32	34	36	38	40
$N_{q\ çakma}$	10	15	21	29	42	62	86	145
$N_{q\ fore}$ **	5	8	10	14	21	30	43	72

* Kazık yerleştirilmesinde su jeti kullanılıyorsa $\phi=28^o$ alınmalıdır.

** YASS altında taban temizliği yakalama kovası veya bailer ile yapılıyorsa $\phi=28^o$ alınmalıdır. Büyük çaplı kazıklarda oturma daha kritik olup eşdeğer temel oturmasının %50' si alınmalıdır.

3.2.1.2. Kohezyonlu Zeminlerde Uç Taşıma Gücü [2]

Kohezyonlu zeminlerde inşaat sonrası durum taşıma gücü yönünden daha kritik olduğundan drenajsız durumda $\phi_u = 0$ olup, kazık ucunda taşınan maksimum yük şu şekilde hesaplanır [2]:

$$Q_p = c_u \cdot N_c^* \cdot A_p + = 9 \cdot c_u \cdot A_p \qquad (3.11)$$

Burada c_u kohezyonlu zeminde drenajsız kayma dayanımıdır ve taşıma gücü faktörünün $\phi_u = 0$ için kazıklarda temel derinliği/temel genişliği oranı büyük olduğundan 9'a eşit olduğu varsayılmaktadır. Canadian Foundation Engineering Manual (1985) büyük çaplardaki fore kazıklar için bu faktörün daha az alınmasını önermektedir. (Tablo 3.4)

Tablo 3.4. N_c^* için CFEM Önerisi [2]

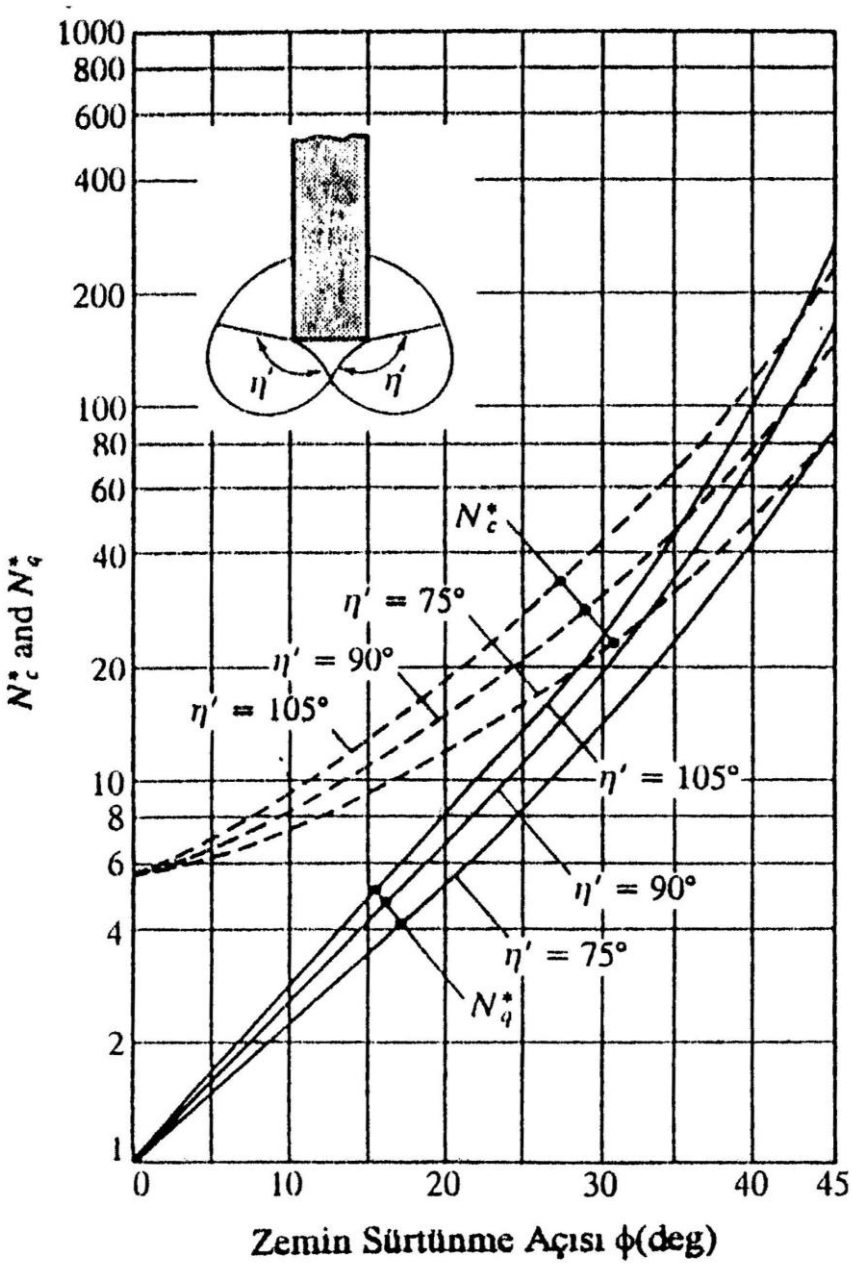
D (cm)	< 50	50 – 100	>100
N_c *	9	7	6

AASHTO (1992) ise bu taşıma faktörü için,

$$N_c = 6 \cdot \left(1 + 0.2 \cdot \frac{L}{D}\right) \leq 9 \qquad (3.12)$$

alınmasını önermektedir. Ayrıca birim alanda taşınacak yükün 500 kPa ile sınırlandırılması gerektiği belirtilmektedir. Drenajsız kayma dayanımı kazık tabanından iki çap kadar aşağıda bir bölgede için ölçülmüş olmalı, bu kesimde yumuşak tabaka varsa N_c^* değeri 1/3' ü kadar azaltılmalıdır [2].

Ayrıca killi-kumlu zeminlerde Janbu (1976) (3.5) eşitliğini kabul etmekle beraber taşıma gücü katsayılarının kazık ucunda η açıcı ile tanımlanan bir taban göçmesi yüzeyi şekline göre Şekil 3.8' den alınmasını öngörmektedir [1].



Şekil 3.8. Janbu Taşıma Gücü Faktörleri [1]

Taşıma gücü katsayıları için aşağıdaki ilişkiler verilebilir.

$$N_q^* = \left(\tan\phi + \sqrt{1+\tan^2\phi}\right)^2 \cdot c^{2\eta\tan\phi} \tag{3.13}$$

$$N_c^* = \left(N_q^* - 1\right)\cdot \cot\phi \tag{3.14}$$

3.2.2. Kazıklarda Çevre Sürtünmesi

Kazıkların yanal yüzeylerinde taşıyabilecekleri maksimum yük ya da bir başka deyişle kazık şaftının taşıma gücü (3.15) eşitliği ile ifade edilebilir [2]:

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} A_{si} \cdot f_{si} \tag{3.15}$$

Q_s : Kazık çevre sürtünmesi

A_{si} : Kazığın i zemin tabakasındaki yüzey alanı

f_{si} : i tabakasında şaftın birim m^2'sindeki sürtünmenin karakteristik değeri

3.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Çevre Sürtünmesi [8]

Bir kazık için herhangi bir derinlikteki birim çevre sürtünmesi şu şekilde ifade edilir:

$$F_s = K \cdot \sigma_v^{'} \cdot \tan\delta \tag{3.16}$$

Gerçekte K derinlikle değişmekte olup kazık başında Rankine pasif kazık basıncına (K_p) eşit ve kazık ucunda sükunetteki toprak basıncından (K_o)'dan dan daha azdır. Bunun yanı sıra kazığın yerleştirilirken zeminde neden olduğu yer değiştirmelerden de etkilenir. Bu nedenle kazık imalat metoduna bağlı olduğu söylenebilir. Tablo 3.5'de K değerleri, Tablo 3.6'de rölatif sıkılık-sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_o) ilişkisi görülmektedir. NAVFAC ise K için Tablo 3.7' deki değerleri önermektedir.

Tablo 3.5. Yanal İtki Katsayısı (K) Değerleri [8]

Kazık Tipi	**K**
Fore kazıklar ve su jeti ile yerleştirilen kazıklarda	K_o
Zemine az yer değiştirten kazıklarda	K_o - 1.4 K_o
Zemine çok yer değiştirten kazıklarda	K_o - 1.8 K_o

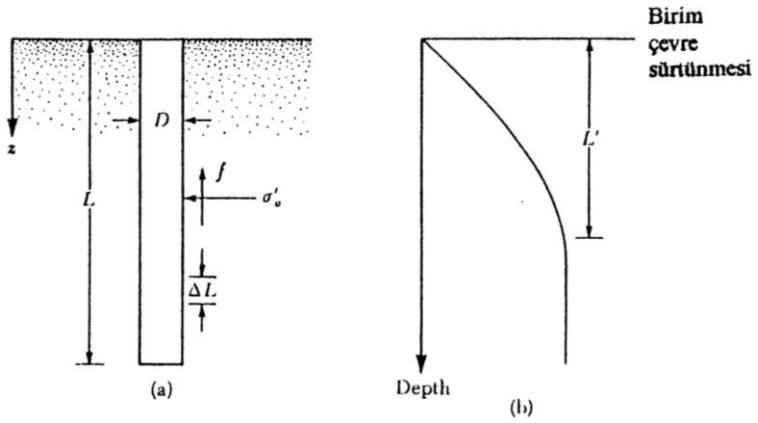
Tablo 3.6. Rölatif Sıkılık – K_o İlişkisi [4]

Rölatif Sıkılık	**K_o**
Gevşek	0.5
Orta Sıkı	0.45
Sıkı	0.35

Tablo 3.7. Yanal İtki Katsayısı (K) Değerleri [8]

Kazık Tipi	**K**
H kesitli çelik kazıklarda	0.5 - 1.0
Hazır çakma kazıklarda	1.0 - 1.5
Konik çakma kazıklarda	1.5 - 2.0
Su jeti ile yerleştirilenlerde	0.4 - 0.9
Fore kazıklarda	0.7

3.16' daki σ'_v, düşey efektif gerilmesi kohezyonsuz zeminlerde kritik bir derinliğe kadar artar, maksimum değere ulaşır ve bu değerde sabit kalır. Gevşek kumlarda 10D, siltlerde 20D derinliğe kadar artıp sonra sabit kaldığı deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Şekil 3.9b'de gösterilen bu kritik derinlik, zemin içsel sürtünme açısı ϕ, zeminin sıkışabilirliği ve rölatif sıkılığına D_r bağlıdır. Ancak güvenli kabul için Lcr = 15D alınabilir.



Şekil 3.9. Kumlardaki Kazıklar için Birim Çevre Sürtünmesi [11]

δ, kazık - zemin sürtünme açısı için zeminin dane dağılımı ve kazığın cinsine bağlı olarak birçok değer önerilmektedir. Kulhawy Tablo 3.8'deki bu değerleri önermektedir.

Tablo 3.8. Çeşitli Ara yüzey Durumları için Kazık-Zemin Arası Sürtünme Açısı (δ) Değerleri [4]

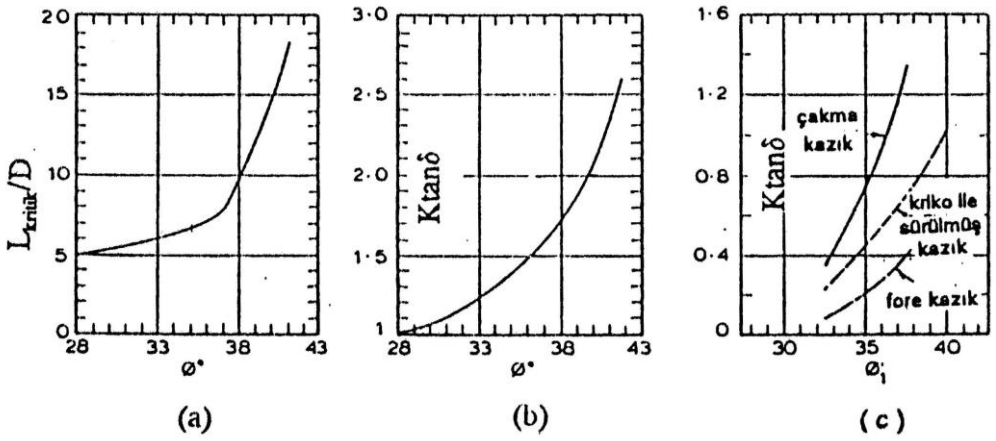
Kazık - Zemin Ara yüzeyi	**δ**
Yerinde dökme beton - Kum	1.0 ϕ
Önceden hazırlanmış beton - Kum	0.8 ϕ - 1.0 ϕ
Pürüzlü (oluklu) çelik - Kum	0.7 ϕ - 0.9 ϕ
Düz (kaplanmış) çelik - Kum	0.5 ϕ - 0.7 ϕ
Ahşap - Kum	0.8 ϕ - 0.9 ϕ

Kazık-zemin ara yüzey durumu için alınabilecek kazık-zemin sürtünme açısı, δ değerleri için diğer önerileri Tablo 3.9' da görmekteyiz.

Tablo 3.9. Kazık-Zemin Arası Sürtünme Açısı (δ) – ϕ İlişkisi[8]

Kazık Cinsi	**NAVFAC (1986)**	**ASCE (1993)**
Çelik	20^o	0.67 ϕ - 0.83 ϕ
Beton	3/4 ϕ	0.9 ϕ - 1.0 ϕ
Ahşap - Kum	3/4 ϕ	0.8 ϕ - 1.0 ϕ

Bu konuda Poulos ve Davis Ktan δ değerinin ϕ'ye bağlı olarak alınmasını, çakma kazıklar için Şekil 3.10b'nin, fore kazıklar için Şekil 3.10c'nin kullanılmasını önermektedir. Zeminin kazık yerleştirilmeden önceki sürtünme açısı f, çakma kazıklarda $\phi = 0.75\ \phi_1 + 10^o$ alınacaktır.



Şekil 3.10. Ktan δ için Poulus-Davis Önerisi [2]

Kohezyonsuz zeminlerde birim çevre sürtünmesinin arazi deneylerine dayalı olarak tahmininde Meyerhof (1976) tarafından önerilen değerler aşağıda verilmektedir.

Zeminde fazla yer değiştiren çakma kazıklar

$$2 \cdot \overline{N} \le 100kPa \tag{3.17}$$

Zeminde az yer değiştiren fore kazıklar

$$\overline{N} \le 40kPa \tag{3.18}$$

Çevrede güvenle taşınabilecek yük bulunurken minimum F_S=3 alınması önerilmektedir. Burada $\overline{N}$ kazık boyunca ortalama ve gerilmelere göre düzeltilmiş SPT sayısıdır.

AASHTO (1993) kohezyonsuz zeminlerdeki fore kazıklar için yanal taşıma gücünün aşağıdaki ampirik eşitlikle bulunabileceğini belirtilmektedir.

$$Q_s = \pi \cdot B \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_z^{'} \cdot z_i \cdot \beta_i \cdot \Delta z_i \tag{3.19}$$

Burada

$$\beta_i = 1.5 - 0.135\sqrt{z_i} \qquad 1.2 \le \beta_i \le 0.25$$

olarak alınacak katsayı, z_i göz önüne alınan tabakada ortalama derinlik (m), Δz_i tabaka kalınlığı, γ'_i zemin tabakasının su altındaki birim hacim ağırlığıdır. Birim alanda taşıma gücünün 190 kPa ile sınırlandırılması önerilmektedir.

3.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi [8]

Killi zeminlerde yerleştirilen kazıklar, yerleştiriliş biçimine göre killi zeminde önemli değişikliğe yol açabilirler. Örneği çakma kazıklarda kazık çapına eşit bir çevre bölgesinde zemin yoğrulmuş olabilir. Çakma işlemi ile birlikte doğması beklenen fazla boşluk basıncı zamanla sönümlenip daha kuvvetli bir ortam doğabilir. Ancak hassas veya aşırı konsolide killerde örselenmemiş hale göre sonuçta daha küçük dayanımda bir ortam doğması beklenir.

Fore kazıklarda ise yaklaşık 25 mm. kalınlıkta bir bölgede yumuşama olmakta ve zamanla bu bölgenin kayma dayanımında önemli değişme olmamaktadır. Pratik olması için, düşük-orta hassaslıkta homojen killerde kazık inşaatı sırasında kayma dayanımında değişiklik olmadığı varsayılabilir. Sert, fissürlü killerde kayma dayanımının laboratuarda saptanmasına genel eğilim çatlaksız numunelerde ölçüm yapmak olduğu için bulunan değerlerin

$$c_u = c_{u\,lab}\, R_c \tag{3.20}$$

eşitliği ile düzeltilmesi önerilmektedir. Burada R_c düzeltme sayısı olup

Çakma kazıklar için

$$\frac{(D+0.5)}{2\cdot D} \le 1 \tag{3.21}$$

Fore kazıklar için

$$\frac{(D+1)}{(2\cdot D+1)} < 1 \tag{3.22}$$

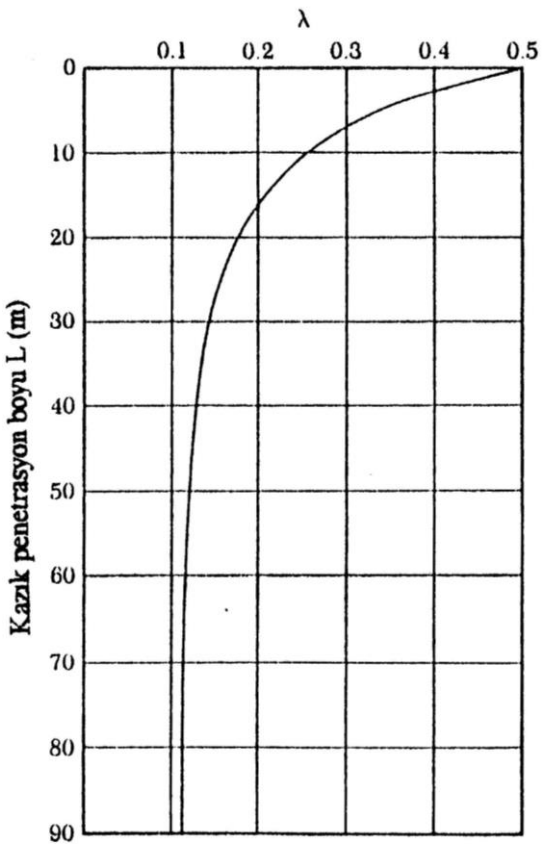
bağıntıları kullanılabilir. Killi zeminlerde birim çevre sürtünmesini belirlemek için birçok metot vardır. Bunlardan en geçerli olanları 3 grup olarak incelenmiştir.

1) λ Yöntemi

Bu metot Vijayvergia ve Focht (1972) tarafından önerilmiştir. Bu metotta, kazığın çakılmasından oluşan zeminin oturması, herhangi bir derinlikteki pasif yatay basınç ile ortaya çıkar ve ortalama birim çevre sürtünmesi şu şekilde ifade edilir:

$$f_{av} = \lambda \cdot (\sigma_v^{'} \cdot 2c_u) \tag{3.23}$$

Burada σ'_v kazık boyunca ortalama düşey efektif gerilme değeri, c_u ortalama drenajsız kayma dayanımı ve λ kazık boyuna bağlı katsayıdır. Yükleme deneyleri sonucunda Şekil 3.11' de verilen λ eğrisini biraz değiştirip λ_{min} = 0.14 alınması önerilmektedir [8].

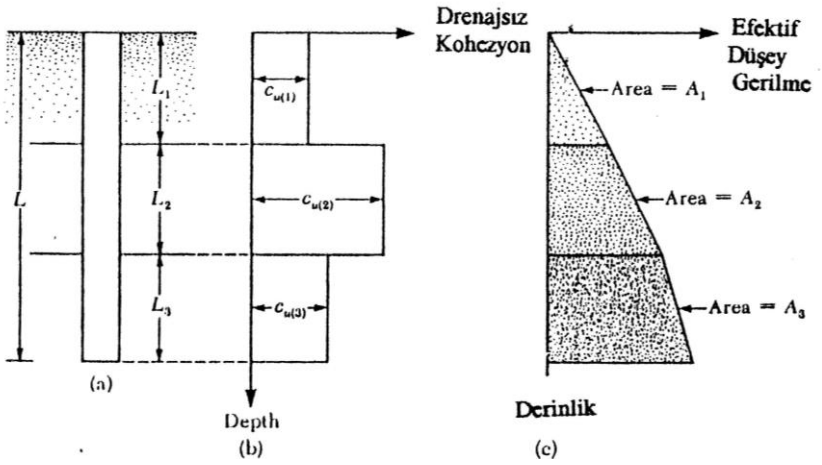


Şekil 3.11. Kazık Penetrasyon Boyu ile λ Değerinin Değişimi [2]

λ değerleri için Wolf (1995) L kazık boyu olmak üzere aşağıdaki bağıntıyı önermektedir.

$$\lambda = -0.406 + (3.281 \cdot L)^{-0.125} \tag{3.24}$$

Zemin tabakasının σ'_v ve c_u değerlerinin belirlenmesinde azami dikkat gösterilmektedir. Bu Şekil 3.12' de açıklanmıştır. 3.12b'de tabakalar için c_u değerleri gösterilmiştir. Aynı mantıkla 3.12c'de derinlikle efektif gerilmelerin değişimi gösterilmiştir [11].



Şekil 3.12. Tabakalı Zeminlerde λ Uygulaması [11]

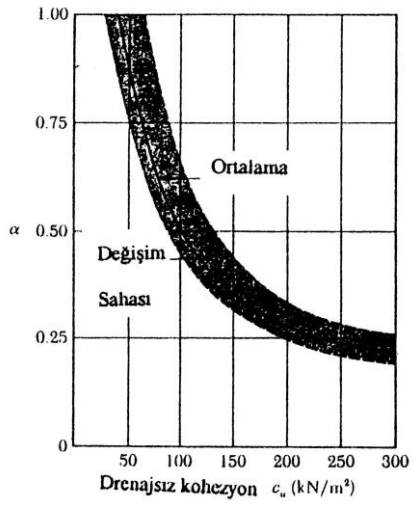
λ yönteminin hem normal hem de aşırı konsolide killerde tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmektedir.

2) α Yöntemi

Killi zeminlerde birim çevre sürtünmesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$f = \alpha \cdot c_u \tag{3.25}$$

Burada α ampirik bir adhezyon faktörüdür. Kilin yapısı ve mukavetinin yanı sıra kazık yapım yöntemi ve boyutu ile zamanın α üzerinde etkili olduğu ileri sürülebilir. İdeal olarak killi zeminler için adhezyon yükleme deneyleri işe bulunabilirse de çoğu kez bu olanak olmadığından ampirik olarak verilen eğrilerden alınmaktadır (Şekil 3.13).

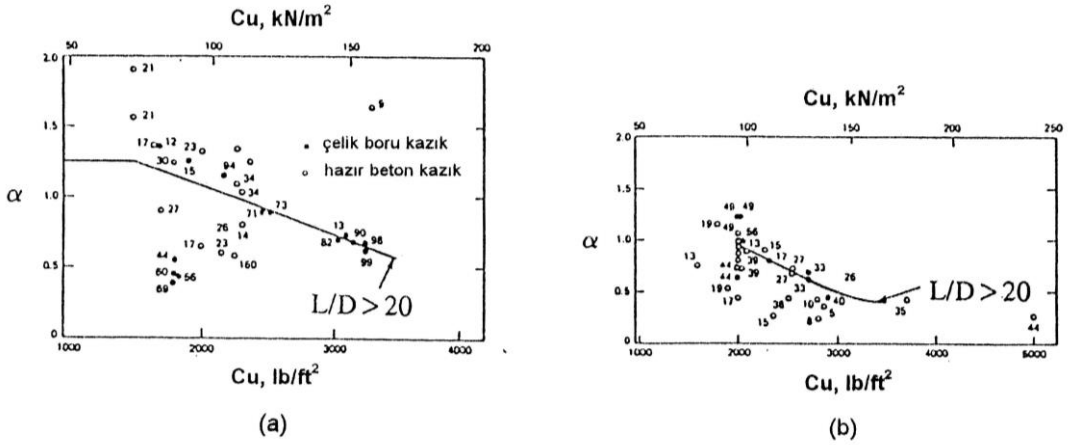


Şekil 3.13. Kilin Drenajsız Kohezyonuyla α Değerinin Değişimi [8]

Kilin üzerindeki tabakaların adhezyon faktörüne etkisinin göz önüne alınmasını belirtip, kazığın kil tabakasına girme miktarına bağlı olarak aşağıdaki değerler önerilebilmektedir (Tablo 3.10) [2].

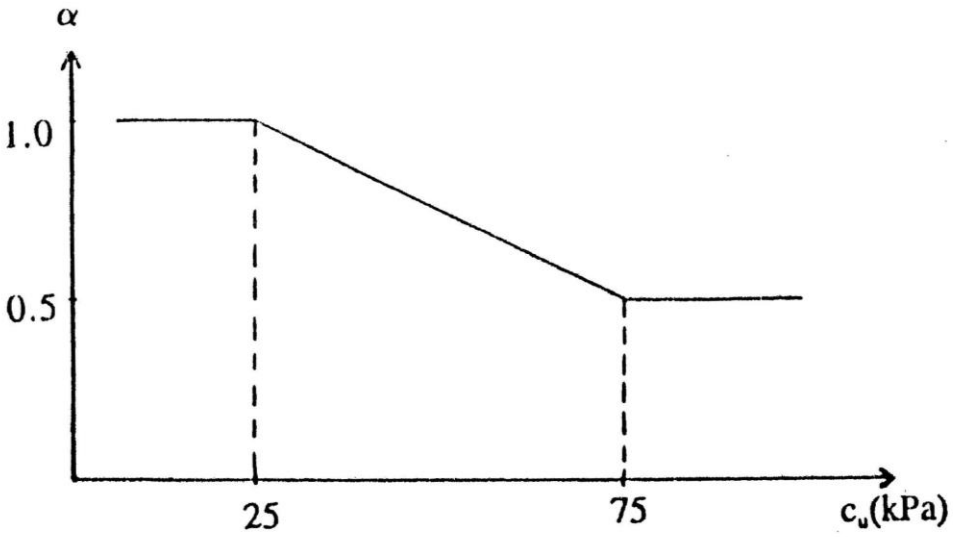
Tablo 3.10. Adhezyon Faktörü Değerleri [2]

Zemin	**Giriş Oranı (L/d)**	**α**
Katı kil üzerinde kum veya kumlu zemin	< 20	1.25
	> 20	Bak. Şekil 3.14a
Katı kil üzerinde yumuşak kil veya silt	< 20 (>8)	0.4
	> 20	0.7
Katı kil üzerinde başka tabaka yok	< 20 (>8)	0.4
	> 20	Bak. Şekil 3.14b



Şekil 3.14. Tabakalı Zeminlerde α Değerleri [2]

Kohezyonlu zeminlerde ASCE (1993) önerisi Şekil 3.15'deki gibidir.



Şekil 3.15. α için ASCE Önerisi [2]

ASCE (1993), normal konsolide killerde çevre taşıma gücü hesabında β yöntemine benzer şekilde zemin cinsine göre ϕ'açısı alınmasını ve granüller zeminlerdekine benzer bir yaklaşımla tahminde bulunulması önerilmektedir (Tablo 3.11).

Tablo 3.11. Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi [8]

Zemin Tipi	**Kıvam**	**ϕ' (°)**
Yağlı Kil CH	Çok Yumuşak	13 - 17
Yağlı Kil CH	Yumuşak	17 - 20
Yağlı Kil CH	Orta Katı	20 - 21
Yağlı Kil CH	Katı	21 - 23
Silt ML	-	25 - 28

NAVFAC (1988) α yöntemi için fore kazıklarda Tablo 3.12' de verilen değerlerin kullanılmasını önermektedir.

Tablo 3.12. Kohezyonlu Zeminlerde Yaralan Fore Kazıklar için α Değerleri [8]

Koşul	α	Limit Değer (kPa)	Düşünceler
Homojen zeminde veya kazık ucunda çok rijit olmamak koşulu ile tabakalı zeminde düzgün kenarlı kazık			Kuruda geçilen yerler için (a) daki gibi
a. Kuruda veya bentonitle yer değiştirerek yapım	0.60	200	
b. Bazı yerlerde bentonit hapsedilme olasılığında	0.30	50	
B. Genişletilmiş uçlu kazıklar zemin koşulları A' daki gibi			(A (b) deki gibi
a. A(a) daki gibi	0.30	50	
b. A(b) deki gibi	0.15	30	
Düz veya genişletilmiş uçlu kazıklar, çevreye göre çok rijit tabakaya oturuyorsa	0	0	

3) β Yöntemi

Kazıklar suya doygun killere çakıldıklarında kazık çevresinde boşluk suyu basıncı normal konsolide killerde 4–6 c_u değerlerine çıkabilir. Bu fazla boşluk suyu basıncı zamanla sönümlendiğinde kil-kazık arasında birim çevre sürtünmesi kilin yoğrulmuş efektif gerilme parametreleriyle bulunabilir. Diğer yandan sert, fissürlü killerde drenajlı parametreler ile tahmin edilecek çevre kapasitesi daha kritik olabileceğinden bu tür bir analiz daha uygun olabilir. Buna göre birim sürtünme,

$$f = \beta \cdot \sigma_v' \qquad \beta = K \cdot \tan\phi_r' \tag{3.26}$$

ile tahmin edilebilir. Burada ϕ'_r artık (residüel) içsel sürtünme açısı olup, K yanal itki kaysayısı ise güvenli bir şekilde

Normal konsolide killerde

$$K = 1 - \sin\phi_r' \tag{3.27}$$

Aşırı konsolide killerde

$$K = (1 - \sin\phi_r')\sqrt{OCR} \tag{3.28}$$

ile ifade edilebilir.

Normal konsolide killerde 0.24–0.29 arasında bir β değeri tahmin edilebileceğini (ϕ' için 20^o-30^o aralığında), bunun da bu formasyonlarda yaptığı ölçümlerle uyum içerisinde olduğu belirtilebilir. Bununla birlikte Burland $K = K_o$, $\phi' = \phi$ almanın sert killerde fore kazıklar için üst limit, çakma kazıklar için alt limit olacağını ileri sürmektedir.

3.2.3. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Taşıma Gücü

Kayaca soketlenmiş kazıklarda kazık taşıma gücü hem uç, hem de çevre sürtünmesinden kaynaklanır. Çevre direncinin beton veya kayaç dayanımı ile bağlantılı olması beklenir ve yükün paylaşımı soket geometrisi L/D' ye bağlıdır. Çevrede taşınan yük nitelikleri kötü bir kayaçta, kayaca girişin az olduğu hallerde veya soketlenme çapının fazla olduğu durumlarda göz ardı edilebilirken, tersi bir durumda kazık taşıma gücünün hemen hemen tümünü oluşturabilir [8].

Yapılan araştırmalar soket sürtünmesinin üniform olmayıp üstten bir maksimum değerden aşağı doğru hızla azaldığını göstermektedir. Bu dağılım kazık ve kayaç elastisite modüllerinin oranının bir fonksiyonudur. Bu oranın tam değerinin bilinmesi gerek olmazken, elastik çözümlerde 10–50 arası bir değer alınarak çözüme gidilebilir.

Son yıllarda soket çevresindeki sürtünmenin, kayaç serbest basınç dayanımına göre belirlenmesi eğilimi ağırlık kazanmıştır. Kaya kalitesi (karot yüzdesi), SPT, serbest basınç dayanımı q_u ve dolaylı çekme q_t değerlerine göre sürtünmenin tahmin edilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan uygulama alanı bulmuş bazıları aşağıdaki gibidir [8]:

Temiz soket için

$$f_s = 1.842 \cdot q_u^{0.367} \tag{3.29}$$

Pürüzlü soket için

$$f_s = 1.45 \cdot \sqrt{q_u} \tag{3.30}$$

Birimlerin kg/cm^2 değeri için eşitliklerin geçerli olduğuna dikkat edilmelidir.

Tablo 3.13. f_s – N İlişkisi [2]

N	10	15	20	25	30	> 30
f_s	0.36	0.77	1.10	1.80	2.60	2.60

Soket düşey düzlemindeki kayma gerilmesinin değeri kayaç kohezyonundan %10' da daha az çoğunlukla %5 fark etmektedir. Bu analizden hareketle,

$$f_s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{q_u} \cdot \sqrt{q_t} \tag{3.31}$$

eşitliği türetilmiştir. Burada q_t dolaylı çekme dayanımıdır.

İyi – çok iyi kalitede kayada soket yükü beton dayanımı ile ilgilidir. Genelde (0.03–0.5) f_s alınması tavsiye edilmektedir.

Kayaca oturan kazıklarda uç direnci,

$$q_p = q_u \cdot (N_\phi + 1) \qquad N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \tag{3.32}$$

olarak hesaplanması önerilmektedir. q_u' nun laboratuarda saptanmasında karot çapının büyük etkisi olabileceği düşünülüp ölçülen değerin 1/5' ini almak ayrıca güvenlik için FS = 3 uygulamak gerekebilir.

Uç direnci için aşağıdaki ilişki verilebilir.

$$Q_{TR} = N_{ms} \cdot C_o \cdot A_t \tag{3.33}$$

Burada C_o kayacın ölçülen basınç direnci (2D alta kadar bölgede), N_{ms} kayaç kitle kalitesi (RMR, NGI, RQD) değerleri ile kayaç sınıfına bağlı bir faktör, A_t kazık uç alanıdır.

Zayıf ve kuvvetli kayaçların art arda yer aldığı hallerde zayıf kayaç özellikleri göz önüne alınmalıdır. Yumuşak ve ayrışmış kayaçları geçip daha sağlam kayaçlara giren soketlerde üst kesim direnci ihmal edilebilir. Kuvvetli kabul edilenin %20' sinden daha az olanlar "zayıf", RQD<%20 olanlar bozuşmuş kabul edilmelidir. İnce, rijit kayaç tabakalarında zımbalama tehlikesine karşı yeteri derinliğe indirildiğinden emin olunmalıdır ve minimum 2D girişle tabakalar arası kayma olasılığına karşı önlem alınmalıdır [8].

3.2.4. Kazıklarda Taşıma Gücünün Pratik Olarak Hesaplanması

Genişletilmiş tabanı olmayan kazıklarda en büyük kaldırma kapasitesi, Q_{ult}, [7]

$$Q_{ult} = \left(\overline{f}_{st} \cdot A_s\right) + W \tag{3.34}$$

eşitliği ile bulunabilir. Eşitlikte $\overline{f}_{st}$ ortalama çevre sürtünmesi direncini, As yanal yüzey alanı, W kazık ağırlığını ifade etmektedir.

Kohezyonlu zeminlerde, $\overline{f}_{st}$ aşağı doğru yüklemedeki gibi alınabilir. Kumlarda De Nicol ve Randolph (1993) çekme kuyu direnci ile basınç kuyu direnci oranının kazığın rölatif sıkılığına bağlı olduğunu göstermişlerdir.

$$\frac{f_{st}}{f} = \left[1 - 0.2 \cdot \log\left(\frac{100}{L/D}\right)\right] \cdot (1 - 8\eta + 25\eta^2) \tag{3.35a}$$

$$\eta = \nu_p \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{G_{av}}{E_p}\right) \cdot \tan\delta \tag{3.35b}$$

Denklemlerde, L kazık uzunluğunu, D kazık çapını, η kazık sıkışabilirlik faktörü, ν_p poisson oranı, δ kazık-zemin arası sürtünme açısı, G_{av} zemin kayma gerilmesinin kazık şaftı boyunca ortalaması, E_p young modülünü temsil etmektedir.

Genişletilmiş tabana sahip kazıklarda Qult, [9]

1. Kazık ağırlığı ve tüm taban alanındaki en büyük kaldırma direncinin toplamı

2. Kazık ağırlığı, kazık çevresi boyunca sürtünme kuvveti ve net taban alanındaki en büyük kaldırma direncinin toplamından daha az olabilir.

Doymuş kil ve siltlerde, 5 uzun dönem kaldırma kapasitesi, kısa dönem kaldırma kapasitesinden fark edilir biçimde az olabilir. Tabanın en büyük plaklar için geliştirildikleri çözüm kullanılabilir [9].

3.3. Düşey Yük Altında Tek Kazığın Oturması

Zemine yerleştirmenin neden olduğu örseleme ve kazıktan zemine aktarılan gerilme dağılışı ile yerinin belirsizliği konuyu karmaşık kılmaktadır. Çalışma yükü altında bir kazığın oturması kazık malzemesinin elastik kısalması ile uçtaki ve çevredeki aktarılan yüklerin neden olduğu oturmaların toplamı olarak alınabilir [8].

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \tag{3.36}$$

S : Kazığın toplam oturması

S_1 : Kazığın elastik oturması

S_2 : Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle oturma

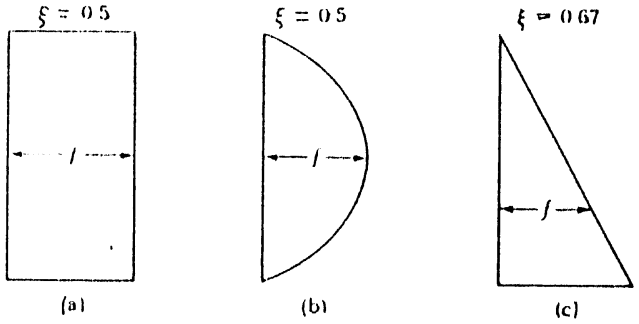
S_3 : Kazık çevresinden aktarılan yük nedeniyle oturma

Kazık malzemesinin elastik kısalması,

$$S_1 = \frac{\left(Q_{wp} + \xi \cdot Q_{ws}\right) \cdot L}{A_p \cdot E_p} \tag{3.37}$$

olarak tahmin edilir. Burada Q_{wp} ve Q_{ws} çalışma yük altında uçta ve çevrede taşınan yük olup, A_p kazık kesit alanı ve E_p kazık elastisite modülüdür.

ξ birim çevre direncinin kazık boyunca dağılımına bağlı olup üniform ve parabolik dağılım için 0.5, üçgen dağılış için 0.67 değerindedir (Şekil 3.16). Bazı araştırmacılar, üniform ya da üçgen dağılışa göre tahmin edilen oturmaların ξ değerine fazla duyalı olmadığını ve pratik maksatlar için ξ' nin her iki değerinin de kullanılabileceğini belirtmektedirler. ξ için uzun çakma kazıklarda daha küçük değerler gözlenmiş olup sıkı kuma çakılan kazıklarda 0.1 mertebesinde olmaktadır.



Şekil 3.16. Çevre Sürtünmesi Dağılımına Göre ξ Değerleri [11]

Kazık ucunda yük nedeniyle oturma, yüzeysel temellerin oturma tahminlerine benzer formda ifade edilebilir [8].

$$S_2 = \frac{q_{wp} \cdot D}{E_s} \cdot \left(1 - \mu_s^2\right) \cdot I_{wp} \tag{3.38}$$

Burada q_{wp} kazık ucuna aktarılan gerilme, I_{wp} etki faktörü, μ_s zeminin poisson oranıdır.

Vesic (1977) S_2 oturmasının belirlenmesi için yarı ampirik aşağıdaki ifadeyi önermiştir.

$$S_2 = \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{D \cdot q_p} \tag{3.39}$$

Burada, q_p kazık ucunda birim alanda taşınan maksimum gerilmedir. C_p değerleri ise Tablo 3.14' de verilmiştir.

Tablo 3.14. Kazık Oturması için C_p Değerleri [8]

Zemin Türü	**Çakma Kazık**	**Fore Kazık**
Kum (sıkı-gevşek)	0.02 - 0.04	0.09 - 0.18
Kil (katı-yumuşak)	0.02 - 0.03	0.03 - 0.06
Silt (sıkı-gevşek)	0.03 - 0.05	0.09 - 0.12

Bu değerler kazık ucundaki taşıyıcı tabakanın en az 10D daha devam ettiği ve kazık ucundaki zemine göre en az onun kadar sıkı olduğu hallerde uzun süredeki oturmalar için kullanılabilir. 10D' den daha yakında kayaç varsa C_p daha az olup, kayaç 5D

derinlikte ise oturmanın %88' i, D derinlikte ise %51' i alınır. Kazık ucu altında fazla sıkışabilir bir tabaka var olmadıkça genelde konsolidasyon oturması toplam oturmanın %15'ini geçmez. Aksi durumlarda konsolidasyon oturması hesaplanıp oturma değerine eklenmelidir.

Çevreye aktarılan yük nedeniyle oluşacak oturma

$$S_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p \cdot L}\right) \cdot \frac{D}{E_s} \cdot \left(1 - \mu_s^2\right) \cdot I_{ws} \tag{3.40}$$

ile bulunabilir. Burada p kazık çevresi ve $\left(\frac{Q_{ws}}{p \cdot L}\right)$ ifadesi kazık boyunca ortalama çevre sürtünmesi değeridir. Etki faktörü, I_{ws} ise basit bir amprik bağıntı ile açıklanabilir.

$$I_{ws} = 2 + 0.35 \cdot \sqrt{\frac{L}{D}} \tag{3.41}$$

Ayrıca Vesic (1979) tarafından S_3 belirlenmesi için ampirik bir bağıntı önerilir.

$$S_3 = \frac{Q_{ws} \cdot C_s}{L \cdot q_p} \qquad C_s = \left(0.93 + 0.16\sqrt{\frac{L}{D}}\right) \cdot C_p \tag{3.42}$$

C_p değerleri Tablo 3.14 ile bulunabilir. Bununla beraber burada killer için bulunan oturma ani oturmaya karşılık gelmektedir.

3.4. Oturma Tahmini Analiz Yöntemleri

Kazık zemin etkileşiminin modellenmesi için dört ana yol vardır [9]:

a) *Yük transfer (t-z) eğrileri ile* bu eğriler yerel kayma gerilmelerini kazık boyunca yerel deplasmanlarla ilişkilendirirler. Bunlar (yerel kayma gerilmesi ve deplasmanlar) kazığın belirli bir yerindeki kazık-zemin davranışını ifade eden non-lineer bağımsız yay mesneti özellikleridir.

b) *Elastik teori ile* bu teori zemini elastik sürekli olarak idealize eder ve kazığın farklı kesimlerinin zemin ile etkileşimini göz önüne alır.

c) *Basitleştirilmiş analiz yöntemleri ile* bu yöntemler kazık çevresinde yerel kaymaları göz önüne alır ve uygun kapalı form çözümlerine götürür.

d) *Zemin davranışının gelişmiş birleşik modellerinden yararlanan nümerik analizler*.

Yük transferi veya t-z metodunun pratikte geniş bir uygulama alanı vardır. Non-lineer zemin-kazık davranışının göz önüne alınması gereken veya zeminin tabakalı olduğu durumlarda özellikle deniz üstü yapılarındaki kazık tasarımında, tek bir kazığın yük-oturma davranışının belirlenmesi için kullanılır. Bu metot kazığın, şaft boyunca ve kazık tabanındaki direnci temsil eden ayrık yaylarla mesnetlenmiş yapı elemanı olarak modellenmesini içerir. Yerel yük transferi, t ve yerel deplasman, z arasındaki bağlantılar genel olarak t-z eğrileri olarak adlandırılır. Bu eğriler ampirik olarak elde ediliyordu, ancak günümüzde kazığı çevreleyen zeminin rijitliği teorik bağıntılar yardımıyla daha tatmin edici olarak elde edilebilir. Bu eğriler göreceli olarak karmaşık olabilir ve non-linearite, şekil değiştirme (yumuşama) ve çevrimsel yükleme etkileri gibi faktörleri birleştirir.

Bir kere zemin ve kazık belirlendikten sonra uygulanan yük ve kazık başının oturması arasındaki bağlantı artık sıradan bir yapısal analiz ile elde edilebilir.

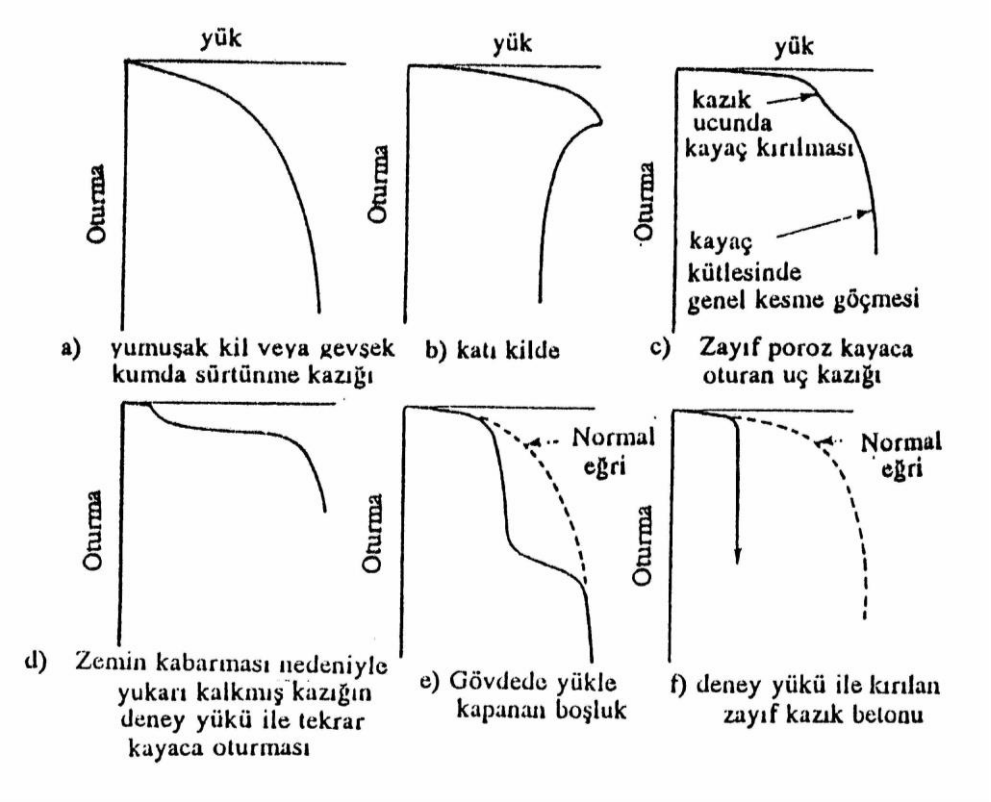
Genelde elastisite teorisini kullanan farklı yöntemler kazık oturmaları için benzer çözümler verir. Örneğin, modülü derinlikle lineer olarak artan bir zemindeki tipik bir kazık için, dört bağımsız lineer analiz, oturma için pratik amaçlar için uygun olarak, % ±7 farklı sonuçlar vermektedir.

Homojen kil tabakada bulunan bir kazığın analizi için yukarıdaki (d) yöntemini kullanarak bir sonlu eleman yöntemi geliştirilmiştir. Bu problem ayrıca yukarıdaki (a) ve (b) kategorilerindeki çeşitli alternatif yöntemlerle analiz edilmiş ve gerçek kazık rijitliği için, sonuç yük-oturma eğrilerinin sonlu eleman çözümleri ile uyumlu olduğunu bulunmuştur. Bu yüzden, kıyaslamalar kuvvetli olarak göstermektedirler ki, metodun, sağlam zemin olması şartıyla, tek kazık oturmasının tahmininde analiz yöntemi kritik bir faktör değildir [9].

3.5. Yük Oturma Eğrileri İçin Bazı Yorumlar

Göçme noktasına kadar yüklenmiş kazıklarda yük-oturma eğrisinin biçimi göçmenin biçimi hakkında bilgi verebilir. Tomlinson yorumunu yaptığı 6 tipik eğriyi vermektedir. Her sonucun zemin koşullan ve kazık türüne göre değişebileceği unutulmamalıdır. Bu eğriler Şekil 3.17' de verilmektedir.

Yük-oturma eğrisinde bazı şekil bozuklukları, bazen yük artımlarındaki bekleme süresindeki değişiklikten kaynaklanabilir. Tasarım yükünde veya onun 1.5 ya da 2.0 katında, ara yüklemelere göre daha fazla beklenmektedir. İdeal olarak kazık ucu ve çevresindeki zeminin aynı konsolidasyon yüzdesine erişinceye kadar tutulmalıdır, ancak çoğu kez pratikte ya eşit zaman aralıkları kavramı veya "hareketin durması" kavramı uygulanmaktadır.



Şekil 3.17. Yükleme Deneyi Sonuçları Yorumu [2]

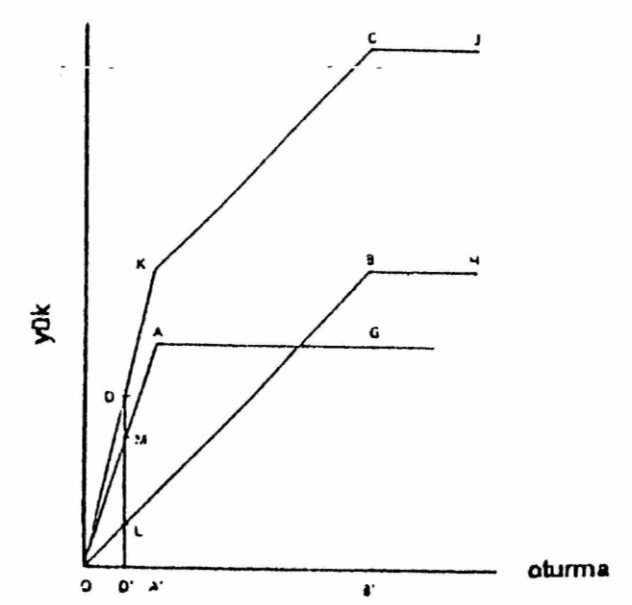
Deney yapıldıkça oturmaların artış-zaman eğrisinin çizimi, ani ve konsolidasyon oturmalarının gelişmesinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Böylelikle belirli bir zaman için tutulan her yükten kaynaklanan eşit konsolidasyon yüzdesine karşılık gelen oturmalarla yükler arasında bir eğri oluşturmak mümkün olabilir ve uzatılmış bekleme sürelerine karşılık gelen değişiklikler ayırt edilebilir.

3.6. Uç ve Çevre Tarafından Taşınan Yükün Bileşenleri

Yük oturma eğrisi çevre ve taban için birleşik bir eğri olup bileşenlerin ayrı ayrı incelenmesi ile daha iyi anlaşılabilir. Genişletilmiş tabanlı kısa kazıklar, çakılmış uç kazıkları ve kayaca soketli kazıklar dışında büyük bir kazık grubunda direncin büyük kısmı çevrede taşınmış olup kazık çevresinin davranışının bu birleşik eğrinin formuna önemli etkisi vardır.

Nihai taşıma yükünün genellikle %50–75 arası bir değerde sürtünme ağırlıklı kazıklarda eğri üzerinde bir "akma noktası" tanımlanabilir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde fark edilen bu noktaya çevrede tüm direncin mobilize oluşuna ya da mobilize oluşun oturmalarla hızındaki azalışına karşılık gelir. Kazık türü, boyutu ve zemin koşullarına göre değişimle birlikte kazığın göreceli olarak 10 mm. kadar hareketi bu mobilize olması için yeterlidir.

Tabanı genişletilmiş bir kazığın zeminde göstereceği ideal oturma diyagramı Şekil 3.18'de verilmektedir.



Şekil 3.18. İdeal Elastoplastik Zeminde Kazık Davranışı [2]

Şekilde eğri üzerinde D noktası güvenliğin 3 olduğu noktaya karşılık gelmektedir (CB'/DD'). Bu yükte çevre direnci yönünden güvenlik CB’/D'M'=1.3’ dür. Bu yükte çevre direnci BB’/LD'=5.2' dir. Bu örnek taban ve çevrede çok farklı güvenlik sayılarının geçerli olabileceğini göstermektedir.

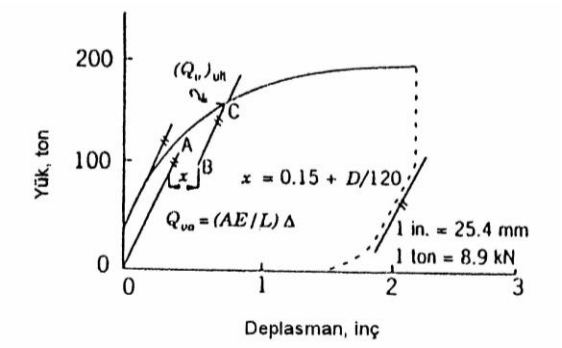
Kazık boyunca yer değiştirmelerin bulunuşu için özel düzenek hazırlanmamışsa yükleme deneyinde yalnız kazık başı yer değiştirmesi ölçümü ile bu iki bileşenin bulunuşu için bir yöntem önerilmektedir. Yöntem boşaltmalara karşılık gelen kalıcı oturmaların saptanmasına dayanmaktadır. Her yükten sonraki elastik dönüş-yük eğrisi çizilirse eğrinin doğru kesimi uzatılarak sürtünme bileşeni kestirilebilir.

3.7. Yük-Oturma Eğrilerinden Göçme Yükünün Saptanması

Bir kazığın göçme yükü ulaşılan yükle oturmaların hızla gerçekleşmesi veya diğer deyimle kazığın batması olarak tarif edilebilir. Genelde kazık yükleme deneyleri yorumlarından göçme yükünün bulunması için kullanılan yöntemler şu şekilde toplanabilir.

1. Kazık başının toplam oturmasını sınırlayan kriterler
    a) 25.4 mm, (Hollanda, New York)
    b) Kazık elastik çapının %10'u, (İngiltere)
    c) Kazık elastik oturması +D/30, (Kanada)
2. Plastik oturmayı sınırlamak
    a) 6.4 mm (AASHTO, New York State, Lousiana)
    b) 12.6 mm (Boston)
3. Plastik/elastik oturmalar oranını sınırlamak
    1.5 (Danimarka)
4. Oturma/birim yük oranını sınırlamak
    a) Toplam 0.25 mm/ton (California, Chicago)
    b) Artış 0.65 mm/ton (Ohio)
    c) 1.26 mm/ton (Raymond Int.)
5. Plastik oturma/birim yük oranını sınırlamak
    a) Toplam 0.25 mm/ton (New York City)
    b) Artış 0.08 mm/ton (Raymond Int.)
6. Yük-Oturma eğrisinin yorumuna dayalı yöntemler

- *Davisson Yöntemi (Şekil 3.19.)*



Şekil 3.19. Davisson Yöntemi [2]

Şekil 3.19' da OA eğrisi kazığın elastik oturmasını göstermektedir. Buna x=0.15+D/120 (birimler inç) uzaklıkta BC paraleli çizilir, eğri kestirilirse kesim noktası göçme yüküdür. Eğer yük birimi kN, deplasman birimi cm alınırsa x=0.381+D/120 olur.

Bu yöntem çakma kazıklar için önerilmiş olup QM türü yükleme için tercih edilmektedir. Asıl olumlu yanı BC' nin başlangıçta çizilebilmesi ve çalışan (tasarım) kazıkta kanıtlama kriteri olarak kullanılabilmesidir. Bu yöntemin SM, QM, CRP' nin üçü için de kullanılabileceği NAVFAC tarafından önerilmektedir.

- *Chin Yöntemi*

Uygulanan yük Q_v ile kazık başı deplasmanı A değerlerine göre Δ/Q_v-Δ eğrisi çizilir. Eğrinin doğrusallaştığı kesimde

$$\frac{\Delta}{Q_v} = C_2 + C_1 \cdot \Delta \tag{3.43}$$

yazılırsa $1/C_1$ değeri nihai taşıma gücüdür. Yöntem hiperbolik bir eğri varsaymakta olup QM ve SM yükleme yöntemlerinin ikisi için de uygundur. Noktaların Davisson limitini aşıncaya kadar bir doğru üzerine düşmeyeceği göz önüne alınmalıdır. Yöntemin geçerliliği için sabit zaman aralıkları kullanılmalıdır.

- *De Beer Yöntemi*

log Q_v - log Δ eğrisinin başlangıç ve sonuç kesimlerinin uzantılarının kesim noktası göçme yükü olarak tarif edilir. Bu yöntem genellikle SM yükleme yöntemi için önerilmektedir.

- *Brinch Hansen %90 Kriteri*

CRP yöntemi ile yükleme için en uygun olup, göçme yükü, öyle bir değerdir ki bu yükün %90'ına eşit yükte kazık başı hareketi göçme yükü olarak tarif edilen yükteki kazık başı hareketinin %50'sine eşittir.

- *Brinch Hansen %80 Kriteri*

$\sqrt{\Delta / Q_v}$ ile Δ arasında oluşturulan eğrinin doğrusallaştığı kesim

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{Q_v} = C_1 \cdot \Delta + C_2 \qquad (3.44)$$

ile ifade edilirse göçme yükü $Q_u = 1 / 2\sqrt{C_1 \cdot C_2}$, göçmede kazık başı hareketi $\Delta_u = C_2/C_1$ olarak belirlenir.

Yük-oturma eğrisinin yaklaşık parabolik olduğunu varsaymakta olup hem QM hem SM yükleme yöntemleri için uygulanabilir. Göçme kriteri zımbalama türü göçme ile uyum içerisindedir. Yüklemeden önce hesaplama ve eğri oluşturma olanağı yoktur. Boşaltma çevrimleri içeren yüklemeler için veya zımbalama türü göçme mekanizması olmayan hallerde uygun değildir.

- *Mazurkiweicz Yöntemi*

Bu yöntemde Q_v - Δ eğrisi çizilir. Daha sonra eşit aralıklarla bölünmüş Δ ekseninden eğri kestirilip yatay çizilir. Bunların ordinatı kestiği yerde 45° açı yapan doğrular çizilip bir sonraki yatayla kestirilir. Kesişme noktaları bir doğru üzerinde olup uzantıları ordinatı göçme yükünde keser.

Yöntemde yük-oturma eğrisi parabolik kabul edilmekte, Brinch Hausen %80 kriterine benzer sonuçlar vermektedir.

- *Butler ve Hoy - Fuller ve Hoy Yöntemi*

Daha önceki yöntemde olduğu gibi Q_v - Δ eğrisi çizilir. QM yöntemi ile yükleme için uygundur. Butler-Hoy başlangıçta eğri tanjantı ile eğimi 0.05”/ton olan doğrunun kesim noktası olarak belirlerken, Fuller ve Hoy yönteminde göçme yükü 0.05”/ton (0,125 mm/kN) doğrusunun eğriye değdiği yer olarak belirlenmektedir. Ayrıca Chellis, Fuller ve Hoy'a göre göçme yükü-oturma eğrisinin 0,14 mm/kN eğiminde bir doğruya teğet olduğu yerdir.

- *Vander Veen Yöntemi*

Yöntem için Q_u nihai yükü varsayılır ve $\ln((1-Q_v)/Q_u)$ değerleri değişik Δ oturmalarına karşı hesaplanır. Bu eğrilerden doğru hale geleni doğru Q_u anlamına gelecektir.

Sonuçta:

1. Fore ve çan uçlu kazıklarda Fuller ve Hoy yeteri kadar doğrulukla göçme yükü tahmin etmiştir.

2. Franki kazıkları için Davisson, Butler ve Hoy, Fuller ve Hoy daha başarılıdır.

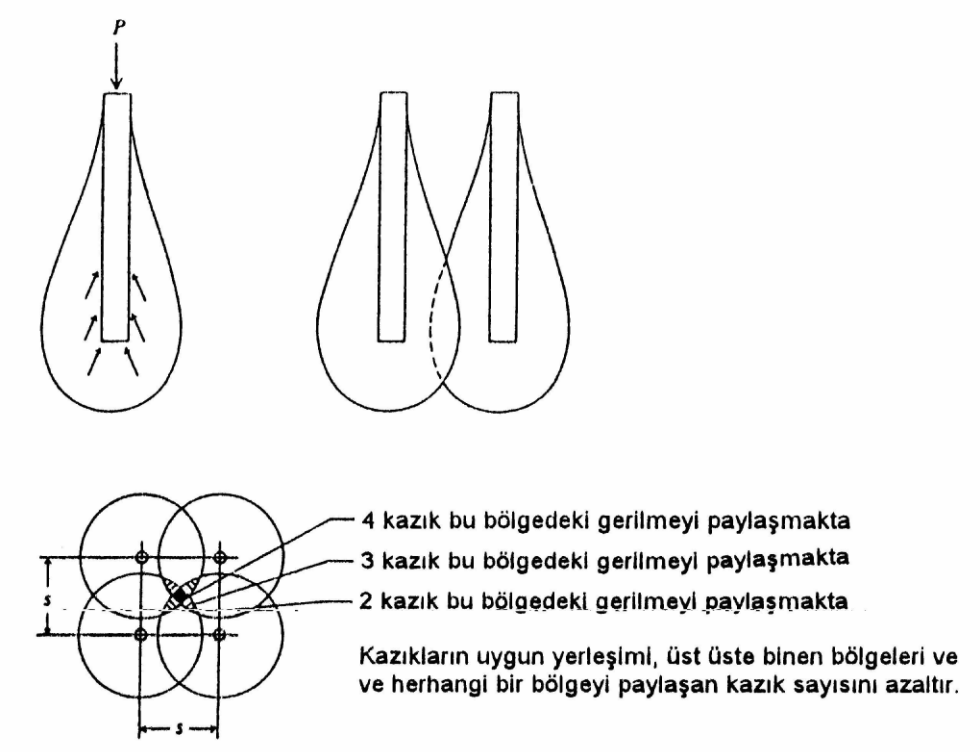
3. Çakma H kazıkları Brinch Hansen %90 kriteri ile Fuller ve Hoy, Butler ve Hoy daha doğru sonuç vermiştir. Fellenius, CRP ile yüklemede Fuller ve Hoy, Brinch Hansen %90 ve Vander Veen yöntemlerinin daha başarılı olduğunu ileri sürmektedir. Genelde Davisson tutucu, Chin gerçekten fazla göçme yükü tahmin etme eğilimindedir ve Fuller-Hoy genellikle iyi bir tahmin yöntemidir.

4. DÜŞEY YÜK ALTINDA KAZIKLARIN GRUP DAVRANIŞI

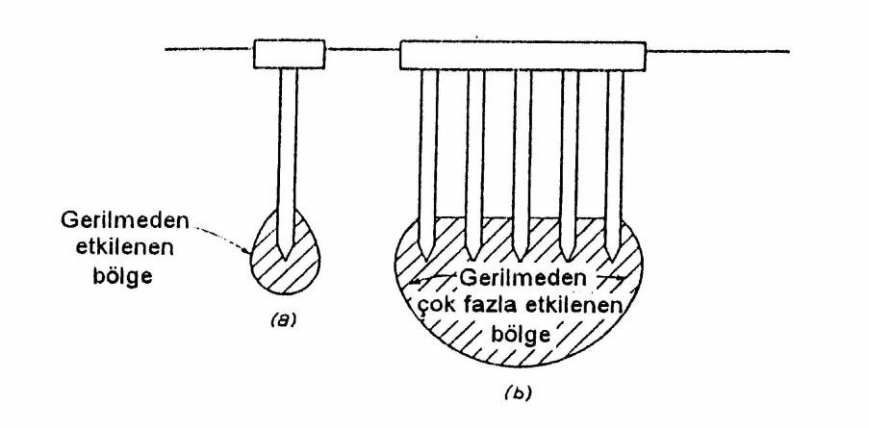
4.1. Genel

4.1.1. Kazıklı Temellerin Grup Davranışı

Düşey yük altında kazık grubunun taşıma kapasitesi, grubu oluşturan kazıkların tekil taşıma kapasitelerinin toplamından daha az olmaktadır. Bunun nedeni ise grup etkileşimidir (Şekil 4.1). Kazıkların sık olması halinde zemine aktarılan gerilmeler çakışacak ve bu nedenle taşıma gücü azalacaktır. Bunun dışında elastik ve konsolidasyon oturmaları kazık gruplarında, tek kazıklara göre her zaman daha büyüktür. Bunun nedeni de kazık grubunun altındaki zemin ya da kayada oluşan gerilme etki bölgesi tek kazıklara göre daha geniş ve derin alana yayılmaktadır (Şekil 4.2).

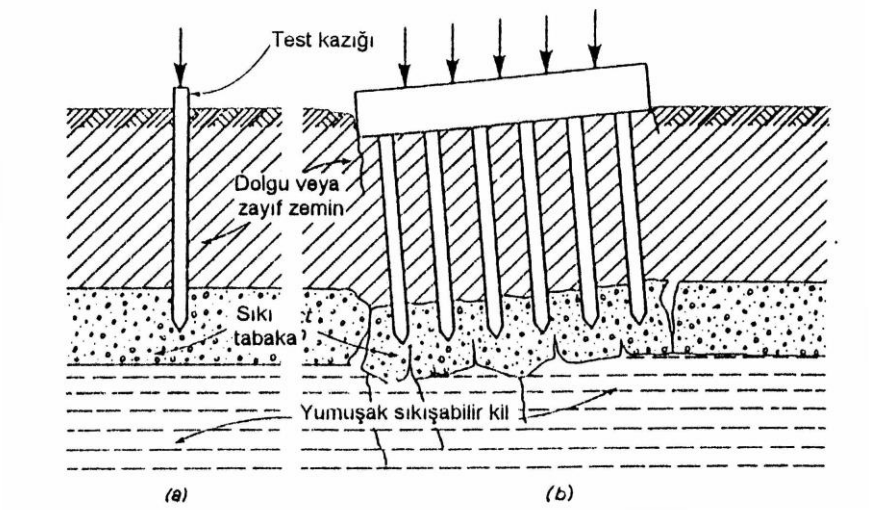


Şekil 4.1. Sürtünme Kazığını Çevreleyen Gerilmeler ve Kazık Grubuna Bunların Toplam Etkisi [10]



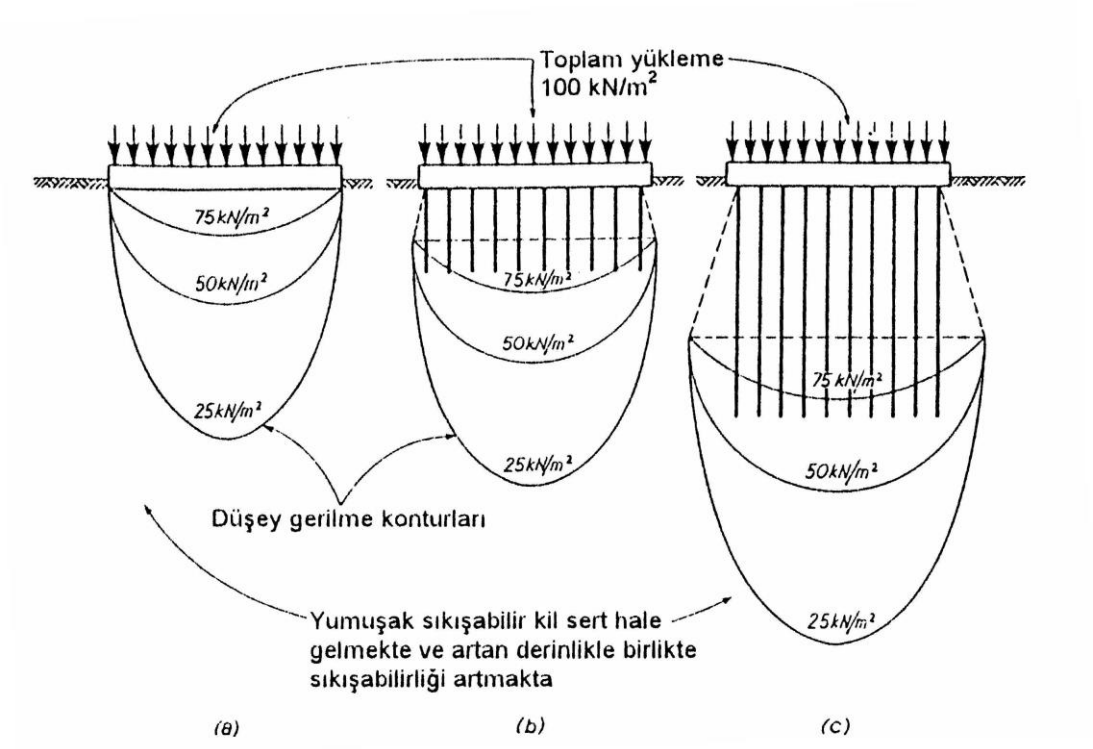
Şekil 4.2. Tek Kazık ve Kazık Grubu Altında Gerilmeden Etkilenen Bölgelerin Karşılaştırılması [4]

Kazıklı radye temellerin ideal olarak tasarımlarında kazıkların uygun aralıklarla yerleştirilmesi ve radyenin de optimum kalınlıkta imal edilmesi gerekir. Kazıklar arası mesafe radyenin ekonomik olarak çözülebileceği kadar yakın, kazıkların birbirlerini etkiyip taşıma gücünün düşmeyeceği kadar uzakta olmalıdır. Ayrıca, killi zeminlerde kazık grupları blok göçmesine karşı tahkik edilmelidir. Nitekim Şekil 4.3b' de tipik bir kazık grubu göçmesi görülmektedir. Şekil 4.3a'da tek kazık sağlam ya da sıkı bir tabakaya yeteri kadar çakılmakta sıkı tabakanın altında da yumuşak kil tabakası bulunmaktadır ve bu durumda yükleme yapıldığında yatay tabakalar oluşan gerilmelerden etkilenmemektedir. Ancak, aynı ortamdaki kazık grubuna üstyapı yükü etkidiğinde, oluşan gerilmeler yumuşak kil tabakasına ulaşacaktır ve aşırı oturmalar veya toptan göçme oluşur.



Şekil 4.3. Kazık Grubunun Kayma Göçmesi [4]

Kazıklar, üstyapı yükünü alttaki sağlam zemin tabakalarına aktarmak için kullanılan temel çeşitleridir. Yüzeysel temeller ile aralarındaki bu temel fark, gerilme dağılışlarıyla da dikkati çekmektedir (Şekil 4.4). Burada radyenin hemen altındaki zemin örselenmediği için, aynı yük etkisindeki kazık gruba göre daha az oturabilir.



Şekil 4.4. Yüzeysel Temel ve Kazık Gruplarının Altındaki Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması, (a) yüzeysel temel, (b) mini sürtünme kazıkları, (c) uzun sürtünme kazıkları [4]

4.1.2. Grup Kazıkların Hesap Esasları

Üst yapıdan gelen belli yüklerin belirli bir emniyetle kazıklara ve sonuç olarak zemine aktarılması kazıklı temel hesabını oluşturur. Yapılan hesapla,

- Kazık grubunu oluşturan her kazığa gelen yük bulunur.
- Maksimum kazık yükünün, kazığın servis yüküne uygun olduğu gösterilir.
- Kazık başlığı boyutlandırılır.
- Kazık grubunun stabilitesi tahkik edilir.
- Meydana gelecek oturmaların müsaade edilen değerlerde olduğu gösterilir.

Kazık yüklerinin belirlenmesinde şu hususlar etkilidir [5]:

- Zemin özellikleri
- Kazık Tipi
- Yükün çevre sürtünmesi veya uç dayanımıyla iletilmesi

Kazık grubuna etkiyen yatay yük, düşey yükün %3' ünden az ve en fazla %5' ini geçmiyorsa, bu yatay yük düşey kazıklar tarafından alınabilir, eğik kazığa gerek görülmez ancak düşey kazığın taşıyabileceği yatay yük hesapla gösterilmelidir.

Kazıklar taşıyıcı zemine 3.0 m girmelidir. Uç kazıklarda kayaya girme miktarı 3D kadardır.

Kazıklarda taşıma gücünü etkileyen etkenler aşağıdaki gibi verilebilir [5]:

1. Taşıma gücü büyük ölçüde çevre sürtünmesinden oluşuyorsa, bu tür çakma kazıkların taşıyabilecekleri yük, ince kum, silt ve killi zeminlerde çakma işleminden sonra uzun bir süre artabilir.

2. Kazıklar üstteki zemin tabakalarının oturması halinde, ilaveten negatif çevre sürtünmesiyle yüklenir (kazıkların uygun teşkili ve daha büyük kazık aralığı seçimi ile bu etki azaltılabilir).

3. Kazıklı temel çevresinde yüzeysel yayılı yük bulunması halinde yumuşak zeminlerde yatay hareketler olabilir ve kazıklarda ilave eğilme zorlamaları ortaya çıkabilir.

4. Büyük sallantı ve titreşimler gibi dinamik zorlamaların tesiri, kazık gücünün azalmasına neden olabilir.

4.1.3. Grup Kazıkların Yerleştirilme Esasları

Kazıkların yerleştirilmesiyle ilgili esaslar aşağıda verilmektedir [5]:

1. Grup halinde teşkilde, plandaki küçük alan boşluk maliyetini azaltır ve büyük yük halinde gerekli kazık miktarının yerleştirilebilmesine olanak sağlar.

2. Zemin açısından mesafenin küçülmesi zararlıdır.

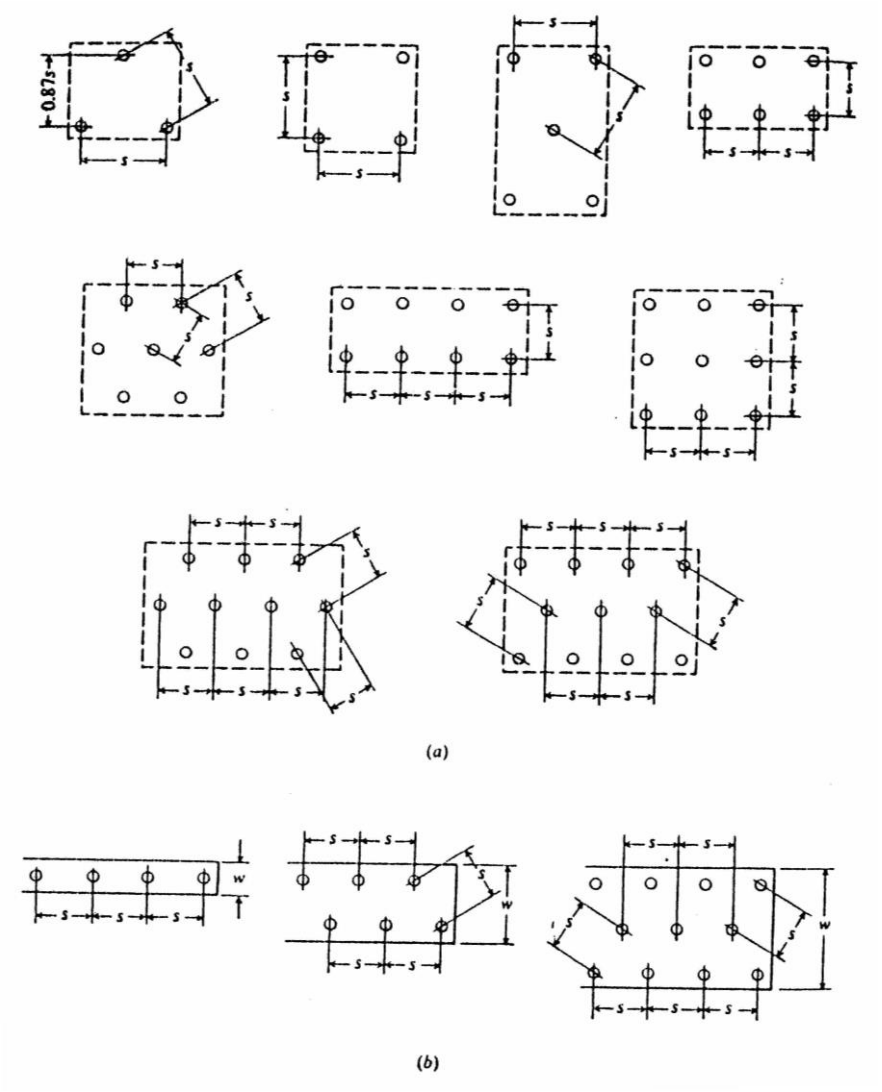
3. İmalat esnasında kazıkların plandaki yerlerinden sapabilir. Bu duruma izin verilebilmelidir.

4. Bir veya iki kazıklı gruplarda eksantrisite önemli boyuta ulaşabilir, grubun en az üç kazıktan oluşması tercih edilmelidir. Şekil 4.5'te tipik kazık grupları yerleşimleri ve örnekleri görülmektedir.

5. Normal yükleme halinde, grupta bir kenarda basınç, diğer kenarda çekme kazığı olmasından sakınılmalıdır

6. Oturma yönünden, uç kazıklarında farklı yükler önemli değil, yumuşak zeminlerdeki sürtünme kazıklarında kazık yükleri arasındaki eşitsizlik minimumda tutulmalıdır.

Grup içerisindeki kazıkların ara mesafeleri Tablo 4.1' de çeşitli şartnamelerle verilmektedir.



Şekil 4.5. Tipik Kazık Grubu Örnekleri, (a) tekil temel, (b) temel duvarlar [5]

Tablo 4.1. Kazık Ara Mesafesi (S) Değerleri [5]

Şartname	Kazık Tipi	Sürtünme Kazıkları	Uç Kazıkları
Amerikan Şartnamesi	Dairesel Kazık Köşeli Kazık Min. s	s = 2D s = 2 x köşegen uz. ≥ 76 cm	s = D + 30 cm s = köşegen uz. + 30 cm
İngiliz Şartnamesi	Dairesel Kazık Kare Kesitli Kazık Min. s	s = 3D s = 4 x kenar uz. ≥ 106 cm	s = 2D ≥ 76 cm
Alman Şartnamesi	Tüm Kazıklarda Sınır Değer	≥ 4D s = 3D	s = 2D

Japon şartnamesine göre,

Çakma kazıklarda; s = 2.5D ve S_{min} ≥ 60 cm,

Fore kazıklarda; s = 2.5D ve S_{min} ≥ 90 cm olmaktadır. Konuyla ilgili bağıntılar ise aşağıdaki gibidir [5]:

$$s = \left(\frac{2.5 \cdot P}{100} \right)^{1/2} \tag{4.1}$$

Bağıntıda P düşey yükü (ton), s ise kazıklar arası ara mesafeyi (cm) tanımlamaktadır. Ayrıca L kazık boyu olmak üzere kazıklar arası ara mesafe,

$$s = 1.08 \cdot (L \cdot D)^{1/2} \tag{4.2}$$

$$s = L/10 \tag{4.3}$$

$$s = (\text{Kazık yükü / Kayan emniyet gerilmesi})^{1/2} \tag{4.4}$$

İsveç kazık şartnamelerine göre kazıkların merkezden merkeze mesafeleri Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2. Kazık Ara Mesafesi (S) Değerleri [4]

Tahmin Edilen Kazık Boyu	Uç ve Sürtünme Kazıkları		Kohezyon Kazıkları	
	Dairesel	Kare	Dairesel	Kare
< 10 m	3D	3.4 B	4D	4.5B
10 - 25 m	4D	4.5 B	5D	4.5B
> 25 m	5D	5.6 B	6D	6.8B

Not : B = Kare temelin kenar uzunluğudur. Ayrıca tüm durumlarda s_{min} =80cm dir

4.2. Kazık Grubunun Taşıma Kapasitesi

Bir grup içerisinde tek bir kazığın davranışının komşu kazıkların davranışı ve grubun geometrisinden etkilendiğini Şekil 4.1'de belirtilmişti. Bu etkileşim grup etkisi olarak adlandırılmaktadır. Kazık-zemin-kazık etkileşiminin genelde yerleştirme etkisi veya mekanik yükleme etkisi olmak üzere iki bileşeni olduğu düşünülebilir.

Grup etkinliği, E_g hakkında farklı düşünceler bulunmaktadır. E_g grup taşıma kapasitesinin, kazık sayısı ile tek kazık taşıma kapasitesinin çarpımına olan oranı olarak ifade edilebilir.

Gevşek kumlarda yapılan model deneyler çakma kazık grubun taşıma gücünün, tek kazıklar taşıma kapasiteleri toplamına oranı olarak tarif edilen grup etkinliğinin, daima E_g>1 olduğunu ve maksimum değerin s/D (s kazık merkezleri arasındaki mesafe) oranının 2 olduğu durumlar için elde edildiğini göstermektedir. Gruptaki kazık sayısı arttıkça grup etkinliğinin arttığı da gözlenmiştir. Sıkı kumlarda ise genel eğilim E_g>l olmakla birlikte dilatans nedeni ile E_g<l durumu gözlenebilir. Aynı sonuç fore kazıklar veya su jeti ile yerleştirilen kazıklar için de söz konusudur. Günümüzde genel olarak kullanılan uygulama ise, kumda çakma kazıklarda güvenli bir varsayımla üst sınır için E_g=l almak, fore kazıklar için E_g = 0.67 kabul etmek yönündedir.

Killi zeminlerde yapılan model deneyler ise grup etkinliğinin, E_g<1 olduğunu ve kare gruplarda s/D<2 oldukça blok göçme eğilimi gözlenmektedir. Günümüzde blok göçme olmadıkça ve çakma sonucu doğan boşluk basıncının sönümlenmesi için

yük uygulamasından önce yeterli süre bırakılan hallerde E_g=l almak eğilimi vardır. Vesic, günümüz pratiğinin grup kapasitesini fazla tahmin ettiğini, blok göçmesi olmaksızın kazıkların tek tek zemine gömülmelerini gözlemlediğini belirtmektedir. Blok göçme olasılığının kontrol edilmesinin yanı sıra s/D=2 için E_g=0.7 alınıp, s/D=8 için E_g= 1' e artırılmalıdır.

Değişik grup etkinlik eşitliklerinde etkinlik kazıklar arası uzaklığa bağlanmakta olup kazık-zemin durumunu gözetmeksizin daima E_g<l vermektedir. Bu eşitliklerden bazıları aşağıda verilmektedir [4] :

1) Converse - Labarre

$$E_g = 1 - \frac{\xi}{90} \cdot \left(\frac{(n-1)\cdot m + (m-1)\cdot n}{m \cdot n} \right) \tag{4.5}$$

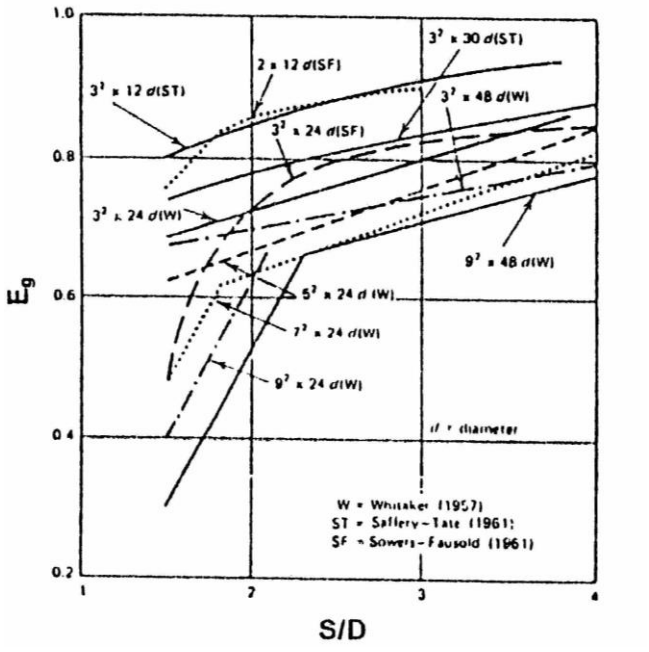
m : Kazık sıra sayısı

n : Bir sıradaki kazık sayısı

ξ : Arctan (D/s)

2) Fiel, kazık sayısına göre E_g = 0.72–0.94 alınmasını önermektedir.

3) Whiteaker, deneysel model sonuçlarına göre 3x3 ve 9x9' lu gruplar için s/D' nin değişik değerlerine göre etkinlik sayısı vermektedir. NAVFAC, bu eğrilerin killer için uygulamasını Şekil 4.6' daki gibi önermektedir.



Şekil 4.6. Killer için Grup Etkinliği [2]

4) Poulus ve Davis

$$\frac{1}{E_g^2} = 1 + \frac{(m \cdot n)^2 \cdot Q_o^2}{Q_B^2} \tag{4.6}$$

Burada Q_o tek kazığın, Q_B ise kazık grubu yerine düşünülecek eşdeğer büyük kazığın nihai yük taşıma kapasitesidir. (Blok göçmesine karşı taşıma gücü)

Çeşitli eşitlikler karşılaştırıldığında elde edilen grup etkinliği değerleri arasında önemli farklar olduğu gözlemlenebilir. Grup etkinliğinin hesaplanması için matematik bir model olmayışı ve sadece kazık grubunun geometrisine göre yaklaşımların yapılması, zemin ve zaman faktörlerinin, kazık başlığı-zemin ilişkisinin ve kazık yerleştirme sırasının grup etkinliğine olan etkileri ihmal ediliyor olmasından dolayı bu sonuç ortaya çıkmaktadır. İhmal edilen bu faktörlerin bir kısmını hesaba alan bir yaklaşım şu şekilde ifade edilebilir [2].

Grup etkisinin yalnızca kazık çevresinde taşınan yükte göz önüne alınması gerektiğinden hareketle,

$$Q_g = \sum Q_p + E_s \cdot \sum Q_s \qquad\qquad Q_o = Q_p + Q_s \tag{4.7}$$

Q_g : Grubun taşıyacağı toplam yük

Q_o : Tek kazığın taşıyabileceği yük

Q_p ve Q_s : Çevredeki tek kazık yükü

$$E_s = E_s^{'} \cdot K \tag{4.8}$$

E_s, geometrik etkinlik E_s' ve etkinlik faktörü K' nın çarpımı ile elde edilmektedir.

$$E_g = \frac{Q_g}{\sum Q_o} = 1 - (1 - E_s^{'} \cdot K) \cdot \frac{\sum Q_s}{\sum Q_o} \tag{4.9}$$

Denklemde yer alan $\frac{\sum Q_s}{\sum Q_o} = \frac{Q_s}{Q_o}$ olarak alınır ve bu oran da ρ sürtünme faktörü olarak ifade edilirse,

$$E_g = 1 - (1 - E_s^{'} \cdot K) \cdot \rho \tag{4.10}$$

olarak elde edilir. Uç kazıkları için ρ = 0 olup E_s = 1 vermektedir ki pratikte karşılaşılan durumlarla uyum içerisindedir. Eşitlikte kazık başlığının etkisi göz önüne alınmamaktadır. Geometrik etkinlik E_s' grup çevresinin tek kazıklar çevrelerinin toplamına oranı olarak tarif edilir.

$$E_s^{'} = \frac{P_g}{\sum P_o} = 2 \cdot \frac{[(n-1)\cdot s + D] + [(m-1)\cdot s + D]}{\pi \cdot m \cdot n \cdot D} \tag{4.11}$$

Geometrik etkinliğin tipik değeri 0.6 ile 2.5 arasındadır. Killi zeminlerde ρ değerinin 0.60'dan büyük olması beklenirken tam sürtünme kazıklarında ρ = 1'dir.

Grup etkileşim faktörü K ise kazık yerleştirme yöntemi, kazık aralığı ve zemin cinsine bağlı olacaktır. Kazık yerleştirilmesine bağlı dayanım artış ve azalışları bu sayı ile modellenebilir. Sıkı kohezyonsuz veya sert kohezyonlu zeminlerde yüksek, gevşek ve yumuşak zeminlerde düşük değerler beklenecektir. Orta sıkı kumlarda 2–3 gibi değerler önerilmektedir. Tasarımda kullanılabilecek K değerleri Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3. Tasarımda Kullanılacak K Değerleri [2]

Zemin Türü	**ρ**	**s/D**	**K**
Gevşek Kum	0.1 - 0.2	2	3.00 - 7.00
		4	2.00 - 4.00
		6	1.00 - 2.00
Orta Sıkı Kum	0.2 - 0.3	2	2.00 - 4.00
		4	1.00 - 3.00
		6	1.00
Yumuşak Kil	0.8 - 0.9	2	1.10 - 1.70
		4	0.70 - 0.90
		6	0.50 - 0.60
Orta Sıkı Kil	0.6 - 0.7	2	1.50 - 1.70
		4	0.75 - 0.80
		6	0.50

K için alt sınır değerleri az sayıda kazıklı grup, üst sınır çoklu kazık grupları için uygundur. Değerlerin çakma veya itme yoluyla yerleştirilen kazıklar için uygun olduğu, fore kazıklarda önemli farklılıklar doğabileceği özellikle vurgulanmalıdır. Hem kil hem kumda çakılmış gruplar için alınan ölçüm sonuçlarıyla yaptıkları karşılaştırmalarda yöntemin büyük uyum sağladığını belirtmektedirler.

Kazık başlığının kumlu zeminlerde zeminle temasta olması halinde grubun taşıyacağı yüke büyük katkısı olabilir. Bununla birlikte böyle bir kapasitenin mobilize olması başlığın kazıklardan daha fazla hareket etmesini gerektirebilir. Poulos ve Davis kazıklardan başlık ucuna kadar olan uzaklığın yarısını genişlik olarak kabul eden şerit bir temelin taşıma gücünün pratik maksatlar için göz önüne alınabileceğini belirtmektedirler.

Eğer kazık grubu tamamen yumuşak bir kil içinde sonlanacaksa -ki bu pek istenen bir uygulama değildir- grubun toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı hesaplanmalıdır. Grubun çevrelediği blok zeminin (Şekil 4.7) nihai kapasitesi (4.12) denklemi ile hesaplanabilir:

$$Q = 2 \cdot D \cdot (B + L) \cdot \bar{c} + 1.3 \cdot c_b \cdot s \cdot N_c \cdot B \cdot L \qquad (4.12)$$

D : Kazıkların yüzeyden itibaren derinliği

B : Toplam genişlik

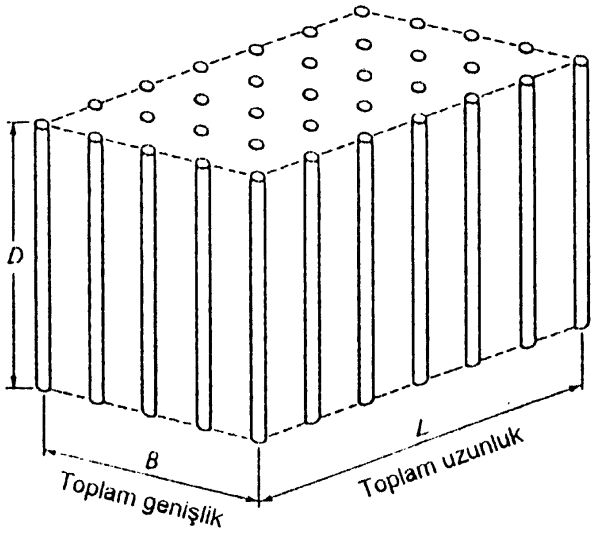
L : Toplam uzunluk

$\bar{c}$: Kazık boyunca bulunan kilin ortalama kohezyon değeri

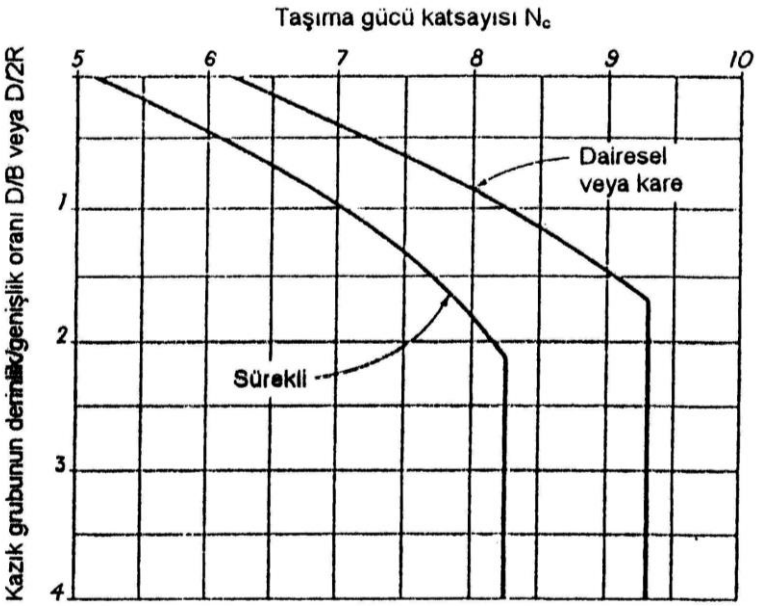
s : Şekil faktörü

N_c : Taşıma gücü katsayısı

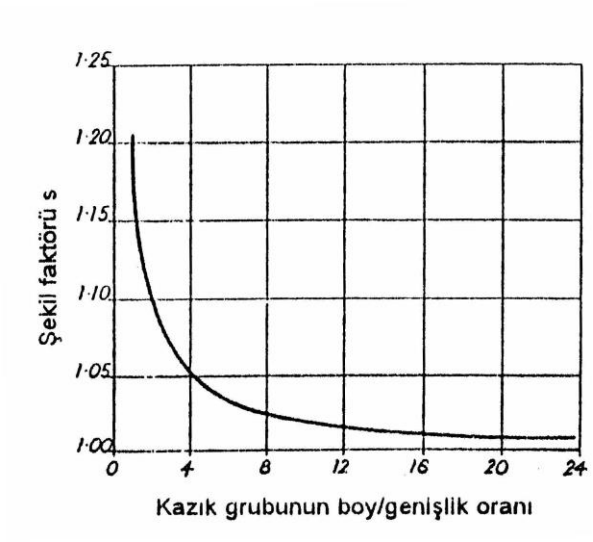
N_c değerleri Şekil 4.8' den, s değerleri ise Şekil 4.9' dan elde edilebilir.



Şekil 4.7. Kazık Grubunun Blok Temel Davranışı [4]



Şekil 4.8. Taşıma Gücü Katsayısı, Nc Değeri [4]



Şekil 4.9. Dikdörtgen Kazık Grupları için Şekil Faktörü [4]

4.3. Kazık Gruplarının Altındaki Zemin Tabakalarındaki Gerilmeler

Kazık gruplarının altındaki zeminlerin dayanımı ve oturmalarını tahmin etmek gerçekten çok zordur. Bunun nedenlerini şöyle sıralanabilir [10]:

a) Kazık başlığının etkisi, genellikle şişen zeminler hariç, zemin ile direkt temas halindedir. Bu temas, kazık-zemin etkileşimini oldukça belirsiz hale getirmektedir.

b) Kazık boyunca oluşan sürtünme etkisinin tam bilinmemesi, bu yüzden de kazık ucundaki yükün bulunamaması,

c) Komşu kazıkların gerilmelerinin çakışmaları değerlendirmeyi güçleştirmesi,

d) Çakma kazıkların çevre zemini etkilemeleri,

e) Konsolidasyon, tiksotropi, değişken yükler ve yeraltı suyu seviyesinin değişimi gibi zamana bağlı etkilerin oluşması.

Kazık gruplarının altındaki zeminde oluşan gerilmelerin hesaplanması için bir analitik metot Geddes tarafından önerilmiştir. Geddes bu metodu Mindlin'nin elastik katılar içindeki tekil yük çözümünün üzerine adapte ederek bulmuştur. Boussinesq analizindeki gibi bu metot, zemini yarı sonsuz, izotoprik, homojen ve elastik varsaymaktadır.

Geddes bu metot için 3 durum geliştirilmiştir (Şekil 4.10). Her durum için dört gerilme elde edilebilir (düşey, kayma, yanal ve çevresel). Düşey gerilme (4.13) deki gibi ifade edilir.

$$\sigma_z = \frac{P}{8\cdot\pi\cdot(1-\mu)}\left\{-\frac{(1-2\mu)\cdot(z-D)}{R_1^3}+\frac{(1-2\mu)\cdot(z-D)}{R_2^3}+\frac{3\cdot(z-D)^3}{R_1^5}\right.$$

$$\left.-\left[\frac{3\cdot(3-4\mu)\cdot z\cdot(z+D)^2-3\cdot D\cdot(z+D)\cdot(5z-D)}{R_2^5}\right]-\frac{30\cdot z\cdot D\cdot(z+D)^3}{R_2^7}\right\} \qquad (4.13)$$

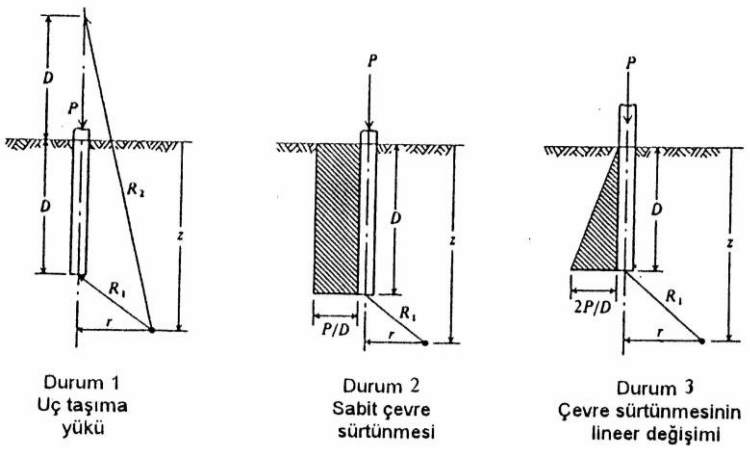
Kayma dayanımı ise (4.14) deki gibi ifade edilir.

$$\tau = \frac{\Pr}{8\cdot(1-\mu)}\left\{-\frac{(1-2\mu)}{R_1^3}+\frac{(1-2\mu)}{R_2^3}-\frac{3\cdot(z-D)^3}{R_1^5}\right.$$

$$\left.-\left[\frac{3\cdot(3-4\mu)\cdot z\cdot(z+D)-3\cdot D\cdot(3z+D)}{R_2^5}\right]-\frac{30\cdot z\cdot D\cdot(z+D)^2}{R_2^7}\right\} \qquad (4.14)$$

$$R_1^2 = r^2+(z-D)^2 \qquad R_2^2 = r^2+(z+D)^2 \qquad (4.15)$$

Bu yöntem kazık ucunun altındaki zeminde konsolidasyon (veya elastik) oturmanın hesabı için düşey gerilme profilini elde etmekte tavsiye edilmektedir. Bu tip problemlerde zeminin ağırlığını hesaba katmak mümkün değildir. Bununla birlikte hesaplar yer değiştirmelerin zemin ağırlığından dolayı oluştuğunu göstermektedir. Bu yöntemde kazık ucundaki zemin gerilmeleri oturmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.10. Zemin Gerilmelerinin Değerlendirilmesi için Mindlin Çözümü Kazık-Zemin Sistemleri [10]

4.4. Kazık Gruplarının Oturması

Büyük bir kazık grubunun aynı kazık yüklerinde küçük bir gruba göre, büyük ya da küçük bir kazık grubunun da tek kazığa göre oturmasının daha fazla olduğu pratikte gözlenmektedir. Bu gözlem elastik oturmalar için de konsolidasyon oturmaları için de geçerlidir.

Killi zeminlerde bir grubun oturmasının zaman, zemin örselenmesi ve ölçek farklılıkları nedeni ile tek kazığın oturmasından hareketle bulunamayacağı açıktır. Bu nedenle kazık grubunun yükü zemine nasıl aktardığı konusunda varsayım yapılmakta ve bu transferin gerçekleştiği yerde fiktif bir temel varsayılarak oturması hesaplanmaktadır. Literatürde aşağıdaki varsayımların kullanıldığı görülmektedir [2].

1. Kazık boyunun 2/3 L aşağısında kazıklarca çevrelenen fiktif bir temel
2. Yüzeyden itibaren 4 düşey 1 yatay açıyla genişleyen ve yine 2/3 L de bir fiktif temel
3. Kazıkların ucunda kazıkların çevrelediği fiktif bir temel
4. Kazık ucunda daha geniş alanlı fiktif bir temel

Zemine yer değiştirici kazıklarda 1 ve 2'nin daha uygun bir çözüm olacağını zira 3'e göre daha fazla oturma vereceğini ve bunun kazık çakımı ile ilgili örselenmeyi de göz önüne alınacağını söyleyebiliriz. Fore kazıklar özellikle yakın aralıklı kazıklarda ise 3 varsayımı daha geçerlidir.

Granüller zeminlerde killerdekine benzer bir yöntemler oturmaları hesaplamak için olanaklı ise de genellikle bu yol izlenmeyip grup oturması tek kazık oturma sonucuna göre belirlenmektedir. Bu konuda önerilen

$$\frac{S_g}{S} = \left(\frac{(4B+3)}{B+4} \right)^2 \tag{4.16}$$

$$\frac{S_g}{S} = \sqrt{\frac{B}{D}} \tag{4.17}$$

eşitlikleri kullanılabilir. Burada S tek kazığın çalışma yükündeki oturması, B grup genişliği, S_g grup oturmasıdır. (4.16) eşitliği NAVFAC ve Canadian Foundation Design Manual tarafından da önerilmektedir. Eşitliğin hem kumlar hem killerin

elastik oturmasında kullanılabileceği belirtilmektedir. Killi zeminlerde önceden açıklanan fiktif temelin konsolidasyon oturmasının buna eklenmesi gerektiği açıktır.

Kum ve çakıllar için ampirik olarak

$$\frac{S_g}{S} = \frac{0.92q\sqrt{BI}}{\overline{N}} \qquad q = \frac{Q_g}{A \cdot B} \tag{4.18}$$

önerilmektedir. N kazık ucundan kazık grubunun genişliği B kadar alta uzanan bölgede düzeltilmiş SPT darbe sayısı, I etki faktörü ise,

$$I = 1 - \frac{L}{8B} \geq 0.5 \tag{4.19}$$

olup siltli kumlar için tahmin edilen oturmaların iki katı alınmalıdır. Koni deneyi sonuçlarından ise

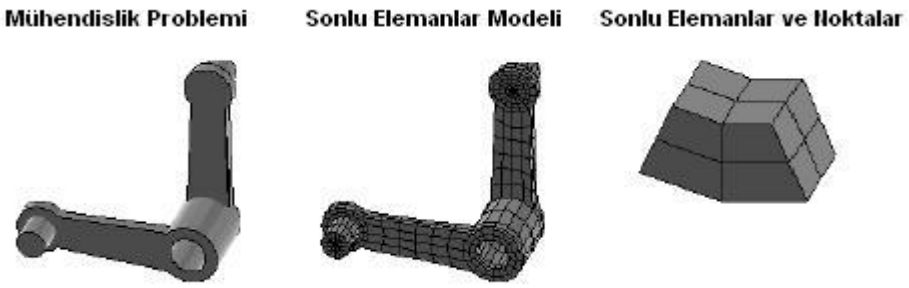
$$S_g = \frac{q \cdot B \cdot I}{2q_o} \tag{4.20}$$

eşitliği ile yararlanılabilecektir. Tüm bu yöntemlerin uniform zemin koşullarını kabul ettikleri göz önüne alınmalıdır.

5. PLAXIS 3D FOUNDATION SONLU ELEMANLAR PROGRAMI

5.1. 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 davranışlarının 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.



Şekil 5.1. Sonlu Elemanlar Modeli [13]

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 kullanılabilmektedir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, aynı amaca yönelik diğer yöntemlere göre taşıyıcı elemanların mekanik problemlerinin çözümlerinin modellenmesinde kullanıcılara birçok olanaklar sağlamaktadır. Bu olanaklar aşağıda biçimde sıralanabilir [12].

- 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 nonlineer malzeme özellikli, değişken kesitli taşıyıcı elemanları, sürekli, süreksiz değişken yükler altında hesaplama olanağı sağlar.
- Sistemin temel denklemleri kuruluktan sonra sonlu elemanlar yönteminin en önemli olanaklarından biri olan sınır şartları oldukça basit bir işlemler ile temel denklemlere dahil edilme olanağı sağlar.

5.1.1. Kullanılan Kavramlar

Rijitlik Matrisi

Rijitlik matrisi, bir elemanın malzeme ve geometrik özelliklerinden türetilebilen 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,

$$[k]\{q\} = \{Q\} \tag{5.1}$$

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.

$$[k]\{r\} = \{R\} \tag{5.2}$$

Gerilme Durumu

Sürekli bir ortamda bir noktadaki gerilme hali, altı bileşene sahiptir ve bu bileşenler matris hesabında aşağıdaki gerilme vektörü ile ifade edilir [15].

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\} \tag{5.3}$$

$\{\sigma^T\}$ = 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.

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \tag{5.4}$$

Koordinat eksenleri ile değişmeyen gerilme invaryantları, gerilme bileşenleri cinsinden,

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{5.5}$$

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

$$= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \tag{5.6}$$

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

$$= \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \tag{5.7}$$

olarak ifade edilirler.

Şekil Değiştirme ve Kinematik Durumu

Gerilme vektörü gibi şekil değiştirme vektörü de altı bileşenlere sahiptir ve aşağıdaki şekilde ifade edilirler.

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\} \tag{5.8}$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ = Şekil Değiştirme

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ = Şekil Değiştirme

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

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \tag{5.9}$$

olarak ifade edilir. Burada ε_1, ε_2, ε_3 asal şekil değiştirmelerdir.

Koordinat eksenlerine bağlı olmayan şekil değiştirme invaryantları,

$$I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \tag{5.10}$$

$$I_2 = \varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y\varepsilon_z + \varepsilon_z\varepsilon_z - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}{}^2 + \gamma_{yz}{}^2 + \gamma_{zx}{}^2)$$

$$= \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1 \tag{5.11}$$

$$I_3 = \varepsilon_x\varepsilon_y\varepsilon_z + \frac{1}{4}(\gamma_{xy}\gamma_{yz}\gamma_{zx} - \varepsilon_x\gamma_{yz}{}^2 + \varepsilon_y\gamma_{zx}{}^2 + \varepsilon_z\gamma_{xy}{}^2)$$

$$= \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \tag{5.12}$$

Lineer İzotropik Elastisite

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

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ & & & & & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \tag{5.13}$$

Gerilme cinsinden ise aşağıdaki eşitlik yazılabilmektedir.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{Bmatrix} \tag{5.14}$$

Düzlem Şekil Değiştirme Durumu

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

$$\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \tag{5.15}$$

Ve gerilme – şekil değiştirme bağıntıları aşağıdaki hali alır.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ & 1-\nu & 0 \\ & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix} \tag{5.16}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \tag{5.17}$$

Düzlem Gerilme Durumu

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

$$\sigma_x = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \tag{5.18}$$

olmaktadır. Buna göre gerilme şekil değiştirme bağıntıları,

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix}1 & \nu & 0\\ \nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{bmatrix} \tag{5.19}$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \tag{5.20}$$

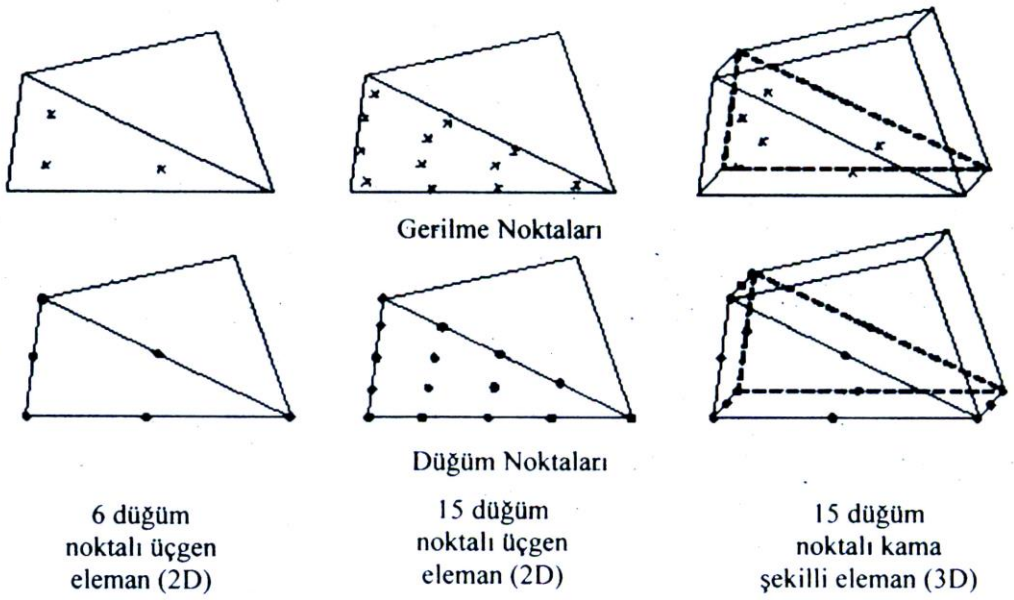
olmaktadır.

5.2. PLAXIS 3D FOUNDATION Programının Özellikleri

5.2.1. Programın Genel Özellikleri [14]

"Plaxis 3D Foundation" özellikle temel sistemlerindeki yer değiştirme ve taşıma gücü problemlerinin sonlu elemanlar metodu ile 3 boyutlu analiz edilerek, çözümlenmesi için geliştirilmiş ticari bir yazılımdır. Zemin veya kayanın doğrusal olmayan, zamana bağlı ve eşyönsüzlük özellikleri, ileri yapısal modellerle temsil edilebilmektedir. Ayrıca zeminin çok fazlı yapısı temsil edilebilmekte, statik boşluk suyu basınçları ve yükleme anında oluşan ek boşluk suyu basınçları hesaplanabilmektedir. Yapı – zemin arasındaki etkileşim, sıfır kalınlıklı özel ara yüzey elemanları (interface) ile otomatik olarak modellenebilmektedir.

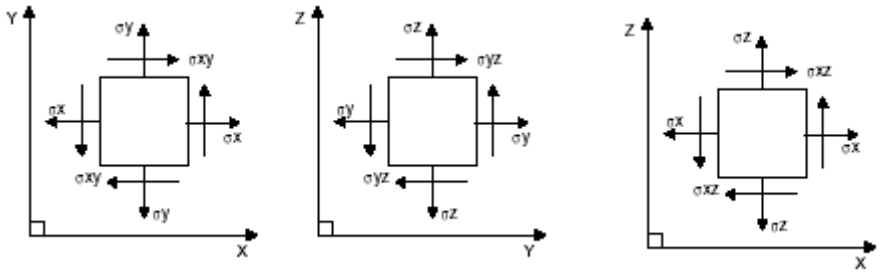
Yazılımda istenilen kesitin zemin tabakaları, yapılar, yapım aşamaları (hesap aşamaları), yükler ve sınır şartları grafik olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca kesitin düzgün olmayan elemanlardan oluşan iki boyutlu sonlu eleman ağı otomatik olarak oluşturulmaktadır. İstenirse oluşturulan bu iki boyutlu eleman ağı, kesitin tümü için ya da sadece bölgesel olarak eleman boyutu ayarlaması seçeneği ile sıklaştırılabilmektedir. 6 düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı y-ekseninde doğrusal uzatılarak modelin tümü için üç boyutlu sonlu eleman ağı tamamlanmaktadır. Üç boyutlu sonlu elemanlar ağında, gerilme ve yer değiştirmelerin hesaplanması için 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Zemin Elemanında Düğümlerin ve Gerilme Noktalarının Yerleşimi [14]

İki boyutlu analizde kullanılan 15 düğüm noktalı üçgen elemanların oluşturacağı üç boyutlu elemanlar, çok büyük kapasiteli bilgisayarlar ile çözülebileceği ve çözüm süresinin kabul edilemez şekilde uzun olacağından kullanılmamaktadır.

3D katı sürekli ortam elemanlara ait pozitif gerilme yönleri Şekil 5.3 gösterildiği gibidir.



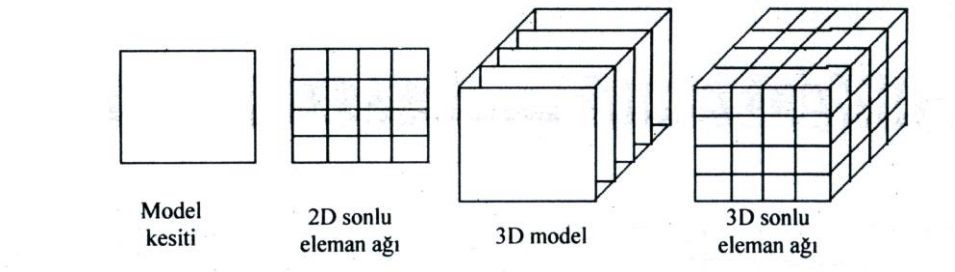
Şekil 5.3. 3D Katı Sürekli Ortam Elemanlarındaki Pozitif Gerilme Yönleri [13]

5.2.2. Plaxis 3D Foundation Programının Kullanım Esasları [14]

Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı birbirleri ile girişimli 4 ayrı alt programdan oluşmaktadır. Bunlar, problemin geometrisinin oluşturularak modelin sonlu elemanlara bölündüğü ve probleme ait malzemenin, sınır koşullarının, yük durumlarının atandığı INPUT veri girişi programı, oluşturulan modele ait hesaplamaların yapıldığı CALCULATIONS analiz programı, hesaplamalardan elde edilen sonuçların görüldüğü OUTPUT veri çıkışı programı ve sonuçların grafiksel

olarak görülebildiği CURVES grafik programıdır. Plaxis programında modellemenin doğru yapılması, modelde kullanılacak malzeme özelliklerinin doğru şekilde kullanılması, sonlu eleman ağını oluşturan elemanların boyutlarının çözümün hassasiyetini etkileyecek kadar büyük veya analiz süresini çok fazla uzatacak kadar küçük seçilmemesi çok önemlidir.

"Plaxis 3D Foundation Input" alt programıyla model geometrisi 3 boyutlu olarak oluşturulmakta; malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmaktadır. Öncelikle modelin; zemin tabakaları, yapılar ve yükleri kapsayan x-z eksenlerinde düğüm noktaları, çizgiler ve kapalı alanlardan oluşan kesiti çizilmekte ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır. Daha sonra y-ekseninin gerekli koordinatları tanımlanmakta, böylece x-z eksenlerindeki kesitin istenen sayıda kopyası, y-ekseni boyunca düzlemleri oluşturmaktadır. Düzlemler arasında kalan hacimler de dilimleri oluşturmaktadır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. 3D Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması [14]

"Plaxis 3D Foundation Input" alt programında hesap aşamaları (stage construction) seçeneği ile yapım veya kazı aşamaları, yüklerin uygulanması ve yeraltı su seviyesinin değişmesi gibi durumlar elemanların aktif ya da pasif hale getirilmesi ile temsil edilebildiğinden gerilme ve yer değiştirmeler kolaylıkla gerçeğe yakın olarak tahmin edilebilmektedir.

Ayrıca programda yer alan otomatik yük arttırımı (automatic load stepping) özelliği ile plastik hesap adımlarında en uygun yük artışları sağlanırken, "arc-length control" özelliği ile göçme yükü tam olarak tespit edilebilmektedir.

5.2.3. Kullanılan Yapısal Modeller [14]

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

Elasto-plastik durum için Mohr-Coulomb ve Pekleşen Zemin (Hardening Soil) yapısal modelleri mevcuttur. Bu çalışmada zemin Mohr-Coulomb yapısal modeline göre modellenmiş, kazık ise lineer izotropik olarak kabul edilmiştir. Mohr-Coulomb yapısal modeline ait en önemli zemin parametreleri elastisite modülü *E*, poisson oranı υ, zeminin birim hacim ağırlığı γ, zeminin kohezyonu *c*, içsel sürtünme açısı ϕ dir.

Mohr – Coulomb'da yapısal modeli Coulomb sürtünme yasasının genelleştirilmişi olup ve (6.1) deki gibidir.

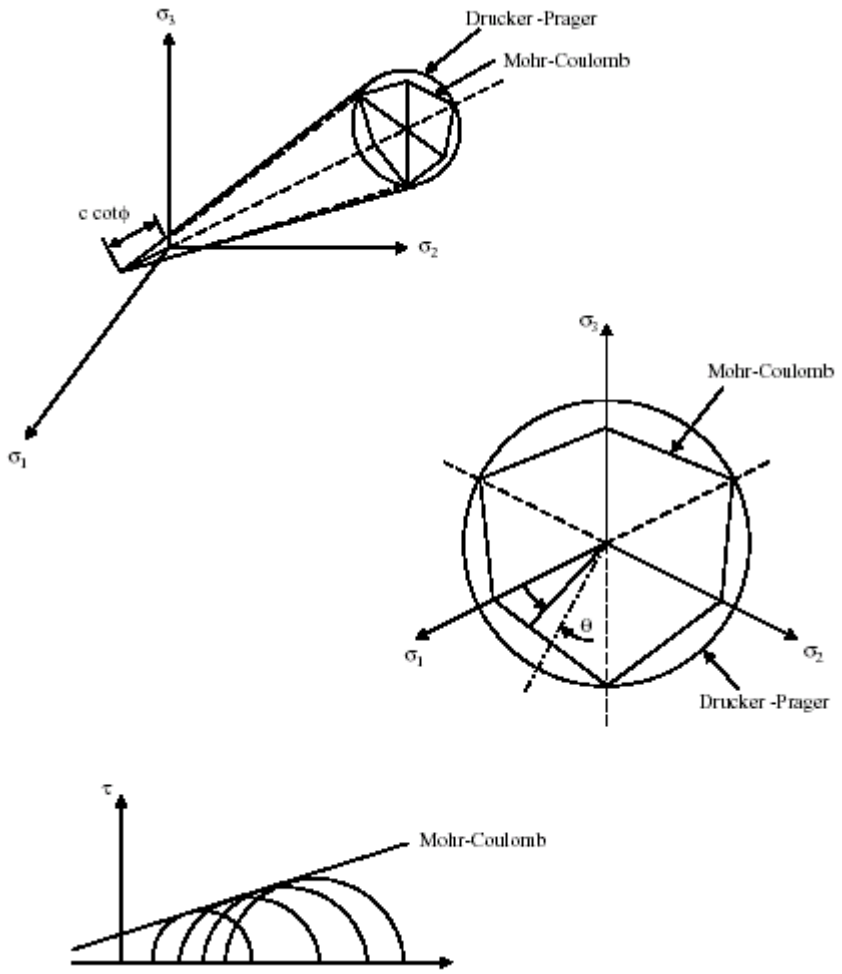
$$F(\sigma, K) = \tau - (c - \sigma_n \tan\phi) = 0 \qquad (6.1)$$

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

Mohr- Coluomb akma fonksiyonu gerilme invaryantları cinsinden şöyle yazılabilir.

$$F(\sigma, K) = \sigma_n \sin\phi + (J_2)^{1/2} \left[\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\theta . \mathrm{Sin}\phi \right] - c\mathrm{Cos}\phi \qquad (6.2)$$

Burada hem c hem de ϕ yer değiştirme pekleşme parametresi K'ya bağlıdır.



Şekil 5.5: Mohr-Coulomb Yapısal Modeli [14]

6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

6.1. Plaxis 3D Foundation ile Modelleme Yapılması

Kullanılan sonlu elemanlar yönteminde kazık–zemin modeli sonlu elemanlar ağı, geometri, malzeme, sınır koşulları, yükleme çeşitlerini içermektedir. Kazık zemin modeli INPUT alt programında grafik ortamda modellendikten sonra, hazırlanan model CALCULATIONS alt programı ile analiz edilerek, çözüldü.

Analizlerde farklı çaplarda, L = 15m sabit uzunluktaki kazıkların tek ve grup olarak düşey yük etkisi altında davranışları Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programıyla belirlendi.

Kazıklar, perde kazıkları olarak, eksenden eksene mesafeleri önce 3D, sonra 2D, daha sonra 1,5D ve D (teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için ayrı ayrı modellendi. Analizlerde zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için yük-oturma grafikleri elde edildi. Analizler ϕ 450 mm, ϕ 650 mm, ϕ 800 mm ve ϕ 1000 mm çapında kazıklarda yapıldı.

Ardından kazık çapı, kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın düşey yük altındaki davranışı modellendi ve yük-oturma eğrisi elde edildi. Kazıklar arası mesafenin taşıma gücüne etkisinin görülebilmesi için aynı kazık çapı için elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, sonuçlar belirli kriterlere göre değerlendirildi.

6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı

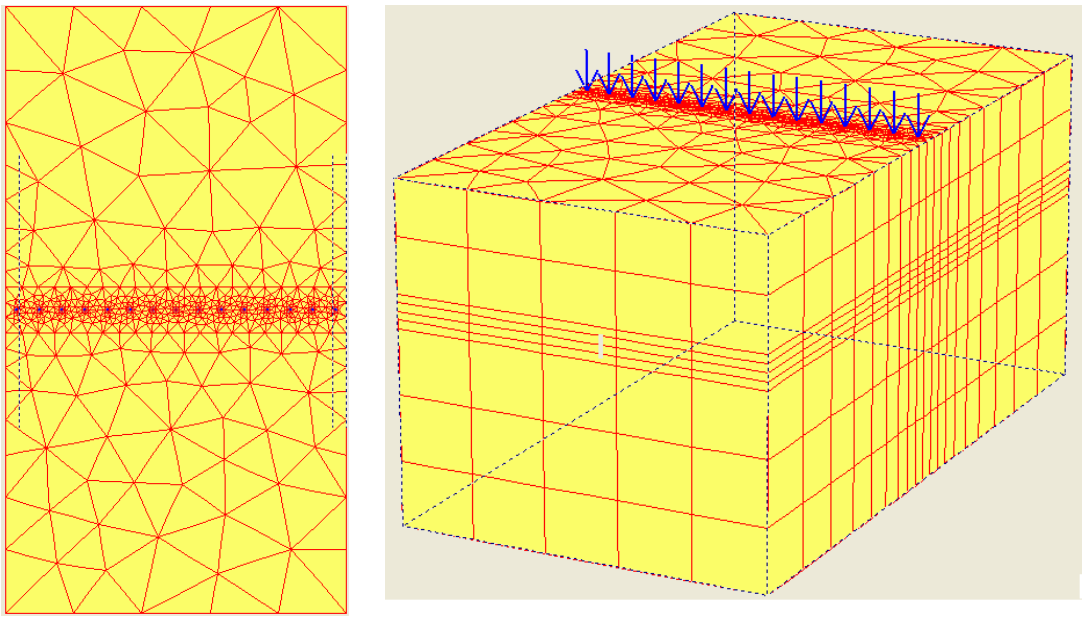
Sonlu eleman ağı boyutları tüm kazık çapları için x, y ve z eksenlerinde 20m' den 75m' ye kadar değişen çok sayıda farklı modelde yapılan çözümler sonucunda, model boyutlarının daha büyük olmasına karşın gerilme ve yer değiştirme dağılımda önemli değişiklikler görülmemesi durumu göz önünde bulundurularak belirlendi.

Genel olarak tekli kazık modellerinde zemin sınırları düşey yönde, y-ekseninde kazık boyunun yaklaşık 2,5 katı, yatay yönde x ve z-eksenlerinde ise kazık çapının yaklaşık 40 katı olarak belirlenmiştir. Örneğin zemin sınırları, 15m boyunda ϕ1000 mm kazık için düşeyde 40 m, yatayda 40 m olarak oluşturuldu.

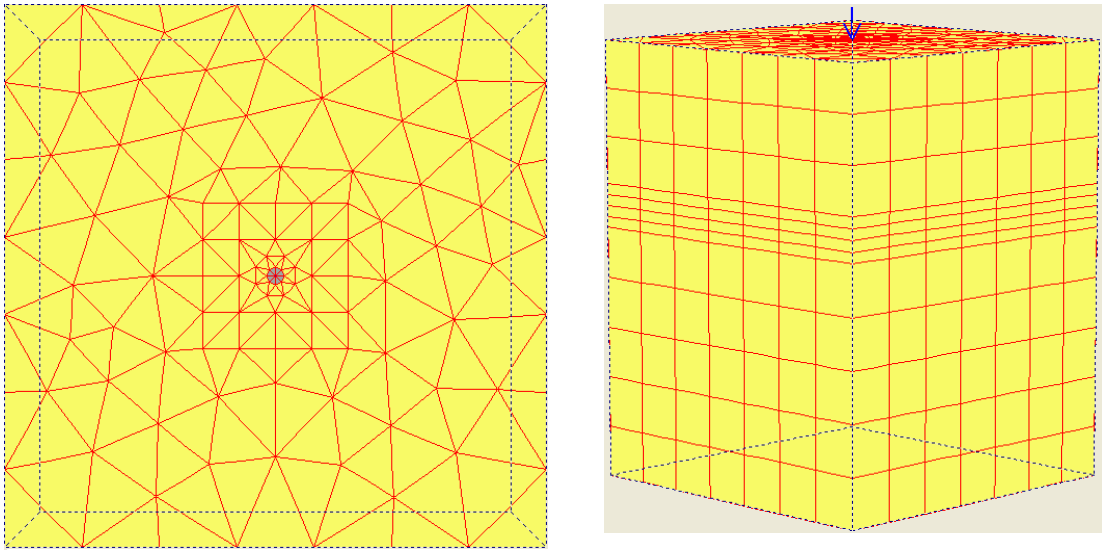
Perde kazık modellerinde ise düşey yöndeki ve z- eksenindeki sınır koşulları, tekli kazıklarla aynı kriterler kullanılarak belirlendi. Ancak x-eksenindeki sınır koşulları, perde kazıkların bir şerit halinde yerleştirilmesi ve aks mesafelerinin değişken olması dolayısıyla analiz edilen kazık sayısı ve kazık çapına bağlı olarak farklı değerlerde kullanıldı.

Program kapsamında yarım kazık ya da çeyrek kazık modülü olmamasından dolayı, analiz edilen modellerde yer alan simetriden yararlanılamamıştır. Perde kazıklarda, belli sayıda kazık için modelleme yapıldı, ardından sonuçlar kazık grubunun ortasında yer alan kazık için değerlendirildi. Kazık sayısının belirlenmesi için yapılan denemelerde kazık sayısının daha da arttırılmasının yük-yer değiştirme grafiğinde önemli farklar doğurmaması kriteri arandı. Buna göre 15 adet kazık üzerinde yapılan yüklemelerde en güvenilir sonuçların alındığı görüldü.

Ayrıca sonlu eleman çözümlerinde gerilme ve yer değiştirmelerin yoğun olduğu bölgelerde elemanların sıklaştırılması ile analiz sonuçları daha gerçekçi ortaya çıkmakta ve diğer bölgelerde – özellikle ağın kenar ve köşelerine doğru- ise seyreltilmesi ile analiz süresi optimum değerlerde tutmaktadır. Bu doğrultuda da eleman büyüklüklerinin ve sayıların farklı olduğu deneme çözümleri yapılarak en uygun eleman ağı oluşturuldu. Analizler ϕ 1000 mm çapındaki kazıklar için Şekil 6.1 ve Şekil 6.2' de görülen üç boyutlu modeller ile yapılmıştır.



Şekil 6.1: ϕ 1000 mm Çapındaki Perde Kazıklar Modeli Sonlu Elemanlar Ağı



Şekil 6.2: ϕ 1000 mm Çapındaki Tekil Kazık Modeli Sonlu Elemanlar Ağı

6.2. Düşey Yüklü Kazık Analizi

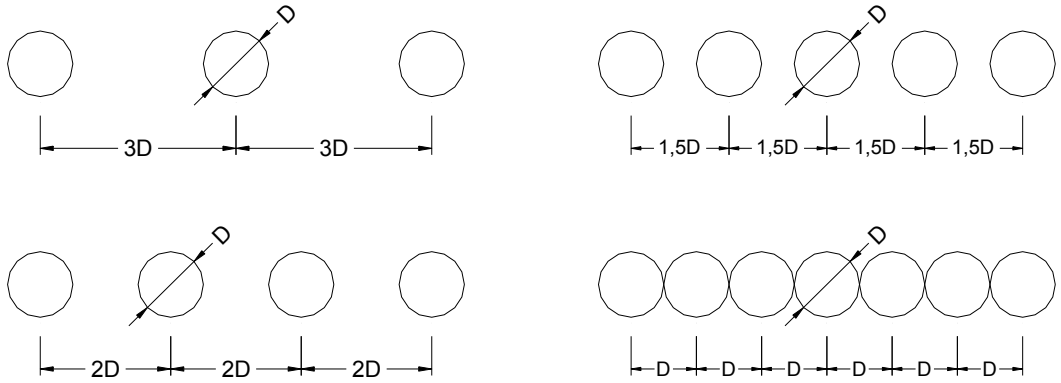
Bir geoteknik problemi sonlu elemanlar programları ile modellenirken, bazı kabuller yaparak problem basitleştirilmelidir. Burada önemli olan gerçek problemle modelin uygunluğudur. Başka bir deyişle, problem uygun elemanlar, iyi bir sonlu elemanlar ağı ve doğru zemin parametreleri kullanılarak modellenmelidir.

Plaxis 3D Foundation programıyla perde ve tekil kazıkların düşey yük altındaki davranışları sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiştir. Analizler kohezyonlu zemin profilinde yer alan, 15m boyunda ϕ 450 mm, ϕ 650 mm, ϕ 800

mm ve ϕ 1000 mm çapında kazıklarda yapıldı. Analizlerde kullanılan kazık başlıkları serbesttir.

Kazıklar, perde kazıkları olarak, eksenden eksene mesafeleri önce 3D, sonra 2D, daha sonra 1,5D ve D (teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için ayrı ayrı modellendi (Şekil 6.3). Analizlerde zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için yük-oturma grafikleri elde edildi.

Ardından kazık çapı, kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın düşey yük altındaki davranışı modellendi ve yük-oturma eğrisi elde edildi. Kazıklar arası mesafenin taşıma gücüne etkisinin görülebilmesi için aynı kazık çapı için elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, sonuçlar belirli kriterlere göre değerlendirildi.



Şekil 6.3. Analizlerde Kullanılan Kazık Ara Mesafeleri

6.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık ve Zemin Parametreleri

Yapılan modellemelerde zemin parametrelerinin doğru olarak seçilmesi çok önemlidir. Kazıkların taşıma gücünün modellenmesinde zeminin elastisite modülü (E) ve poisson oranının (ν) sonuçlar üzerinde çok etkili olduğu görüldü. Ayrıca Poulos' a göre zeminin elastisite modülü, taşıma gücü ve yük dağılımını oldukça fazla değiştirmektedir. Poisson oranın 0,5' e yakın olması suya doygun bir zemin davranışı göstermektedir. Poisson oranı düştükçe zemin daha rijit olacaktır. Analizlerde Tablo 6.1' de görülen zemin ve kazık özellikleri kullanıldı.

Tablo 6.1. Analizlerde Kullanılan Malzeme Özellikleri

ZEMİN MALZEME ÖZELLİKLERİ

Derinlik	0 - 40 m
Zemin sınıfı	Kil
Malzeme Modeli	Mohr Coloumb
Malzeme Tipi	Drenajsız
ρ_n (kN/m^3)	16
ρ_{doygun} (kN/m^3)	18
e_o	1
E (kPa)	9000
ν	0,35
c' (kPa)	5
ϕ' (o)	22
R_{inter}	0,7

KAZIK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Malzeme Modeli	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Boşluksuz
ρ (kN/m^3)	25
E (kPa)	30000
ν	0,2

Modellemede kullanılan Plaxis 3D Foundation programı, temel problemlerinin sonlu elamanlar yöntemiyle çözümü amacıyla geliştirildiğinden, kazık-zemin etkileşimi otomatik olarak oluşturulabilen sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarıyla temsil edilebilmektedir. Kullanılan ara yüzey elemanları ile (interface) zemin dayanımı istenilen bölgede R_{inter} değişkeni ile azaltılmaktadır. Modellemelerde kullanılacak gerçekçi zemin profilinin tam olarak belirlenmesi amacıyla R_{inter} değişkeninin 0,6 ile 0,9 arasındaki değişik değerleri için deneme modelleri yapıldı. Alınan sonuçlar incelenerek, sonuç olarak 0,7 değerinin kullanılmasına karar verildi.

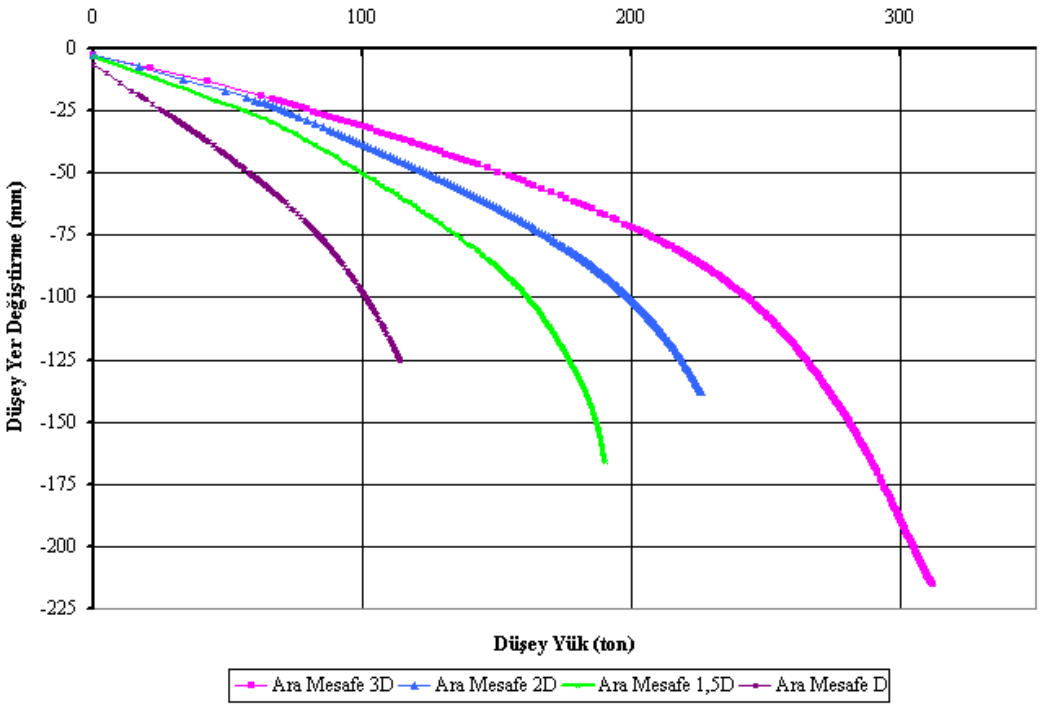
6.2.2. Hesap Adımları

Geometri, sınır şartları ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra tek ve perde kazık modelleri ilk hesap adımında zemin kendi ağırlığında yüklendi ve bu yükleme sonucu elde edilen oturmalar sıfırlandı. Ardından 2. adımda elemanlara kazık malzeme özellikleri atanarak, kazığın kendi ağırlından oluşan oturmalar elde edilerek, bu oturmalar da sıfırlandı. Son hesap adımı olarak kazıklara, kazık ekseninden etki eden tekil düşey yük ile tanımlandı. Bu yük, programın zeminin elasto-plastik davranışını dikkate alarak otomatik yük artırımı yapma (automatic step size procedure) özelliği ile adım adım uygulandı.

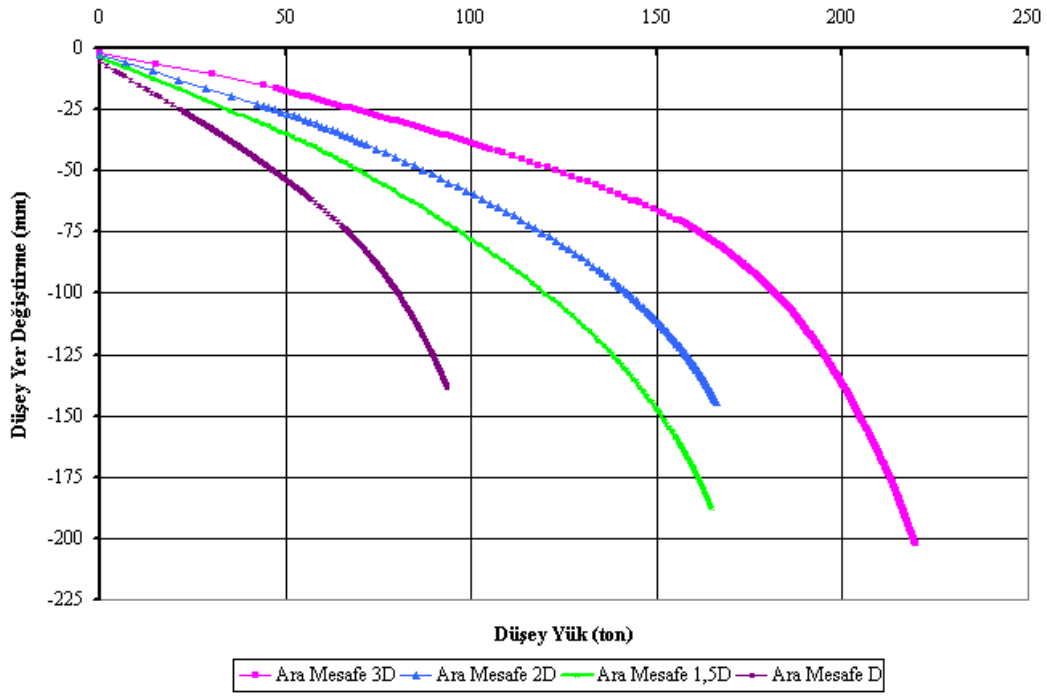
6.3. Analiz Sonuçları ve Bulgular

Analizler kohezyonlu zeminlerde, kazık aralığı değişiminin düşey deplasmana ve dolayısıyla taşıma gücüne olan etkisinin incelenmesi amacıyla yapıldı. Analizlerde öncelikle yukarda belirtilen zemin profilindeki 15m boyunda ϕ 1000 mm çapında kazıklar, kazık arası eksenden eksene 3D mesafe ile yerleştirilerek sonlu elemanlar ağı oluşturuldu. Perde kazıklar, her birinin eksenlerine tanımlanan düşey tekil yük ile yüklenerek, model çözümlendi. Ardından analizler, aynı çaptaki kazıklar ve zemin parametreleri ile eksenden eksene sırayla 2D, 1.5D ve D (teğet) ara mesafeler için ayrı ayrı tekrarlandı. Perde kazıklar için yapılan analiz sonuçlarının değerlendirmesinde, sınır koşullarından en az etkilendiği için kazık grubunun ortasında yer alan kazığın yük-oturma eğrisi kullanıldı. Son olarak değerlendirme de baz değer olarak kullanılmak üzere aynı çap ve boyda tekil kazık yüklenerek, yük-oturma eğrisi elde edildi. ϕ 1000 mm çapında kazıklarda yapılan analizlerden elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, birbirleri ile karşılaştırıldı. Bu kazık çapı için yapılan tüm analizler ϕ 450 mm, ϕ 650 mm ve ϕ 800 mm çapında kazıklar için tekrarlanılarak sonuçlarda çeşitlilik sağlandı.

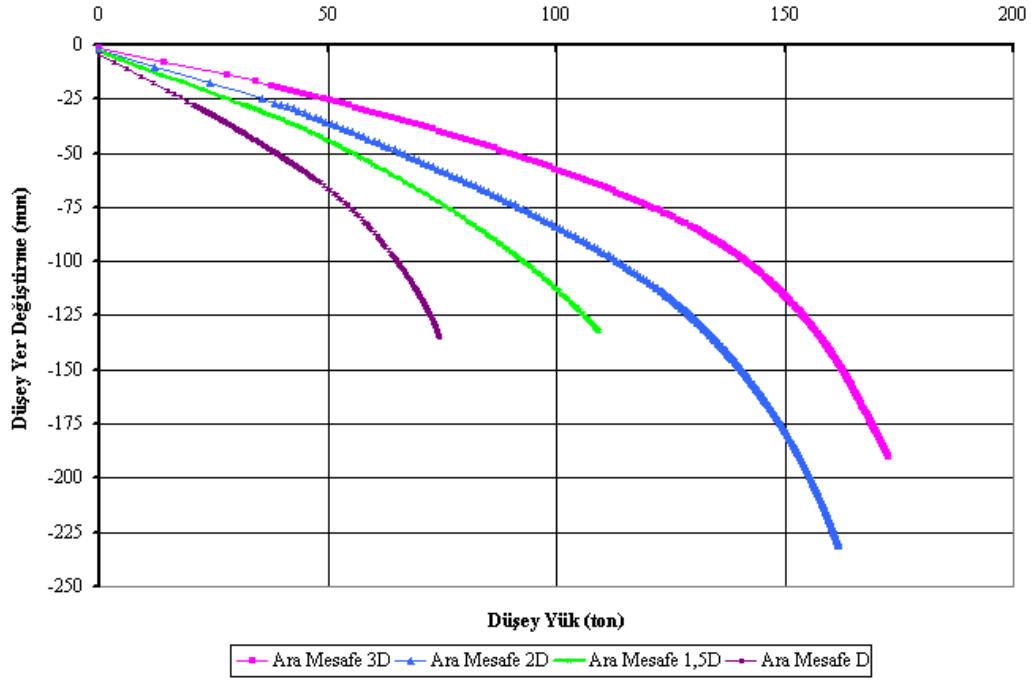
Tüm kazık modellerinde, modelde tanımlanan zemin yapısı göçünceye kadar yüklenme yapılmaya devam edildi. Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da analizlerde kullanılan tüm kazık çaplarının, farklı eksenden eksene ara mesafeleri için göçme durumunda elde edilen düşey yük-düşey yer değiştirme eğrileri ayrı ayrı verilmektedir.



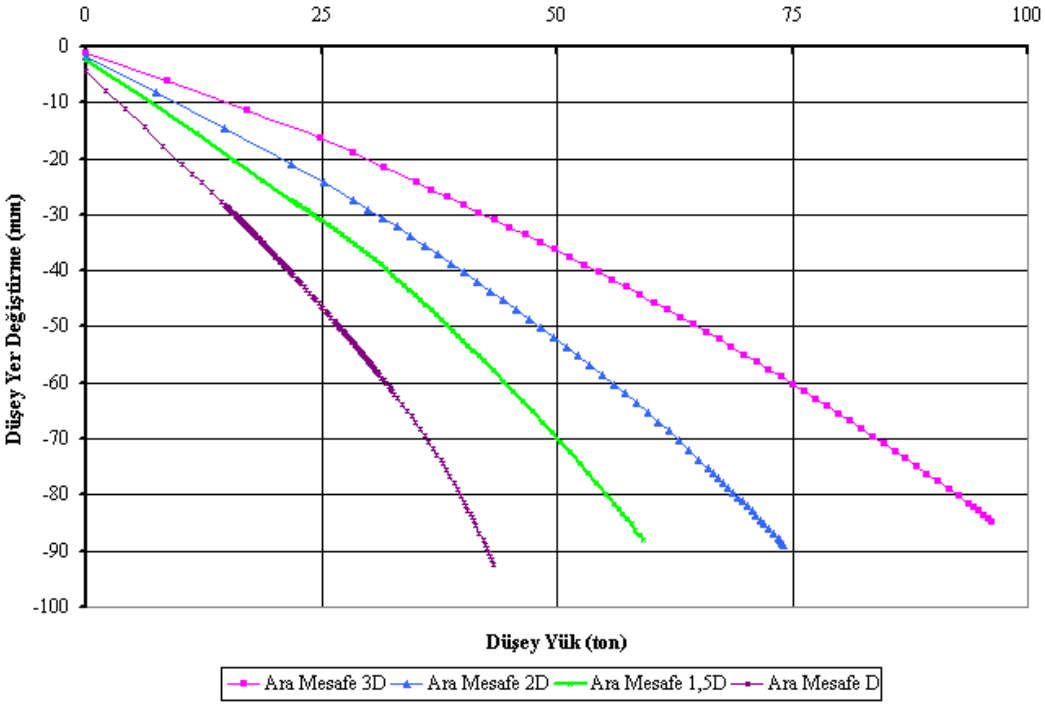
Şekil 6.4. ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.5. ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



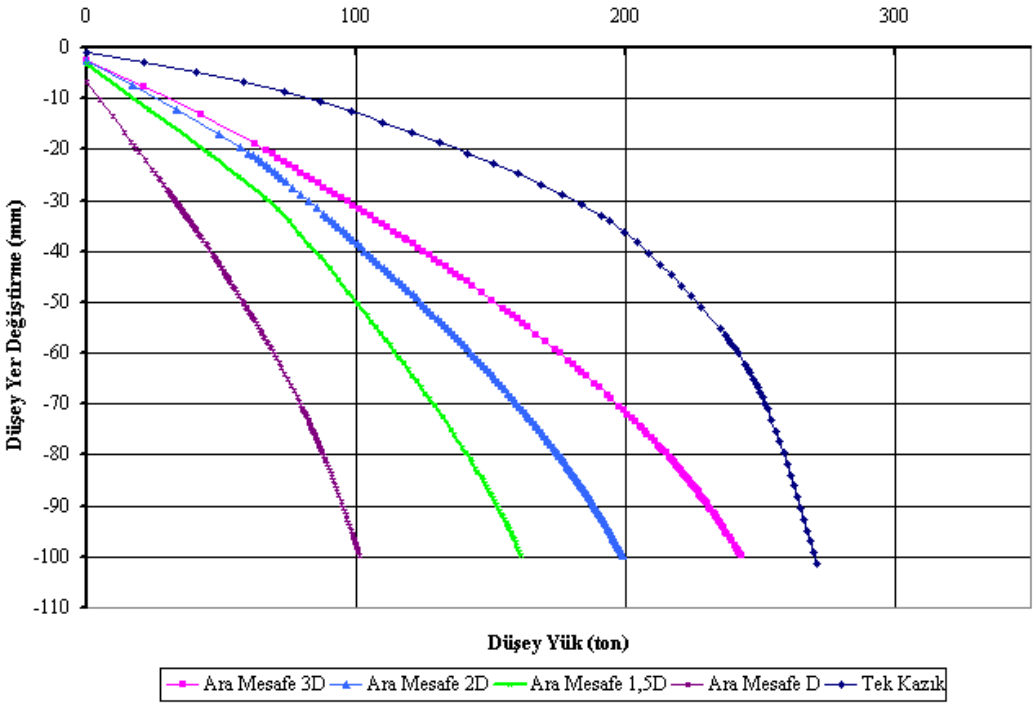
Şekil 6.6. ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.7. ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri

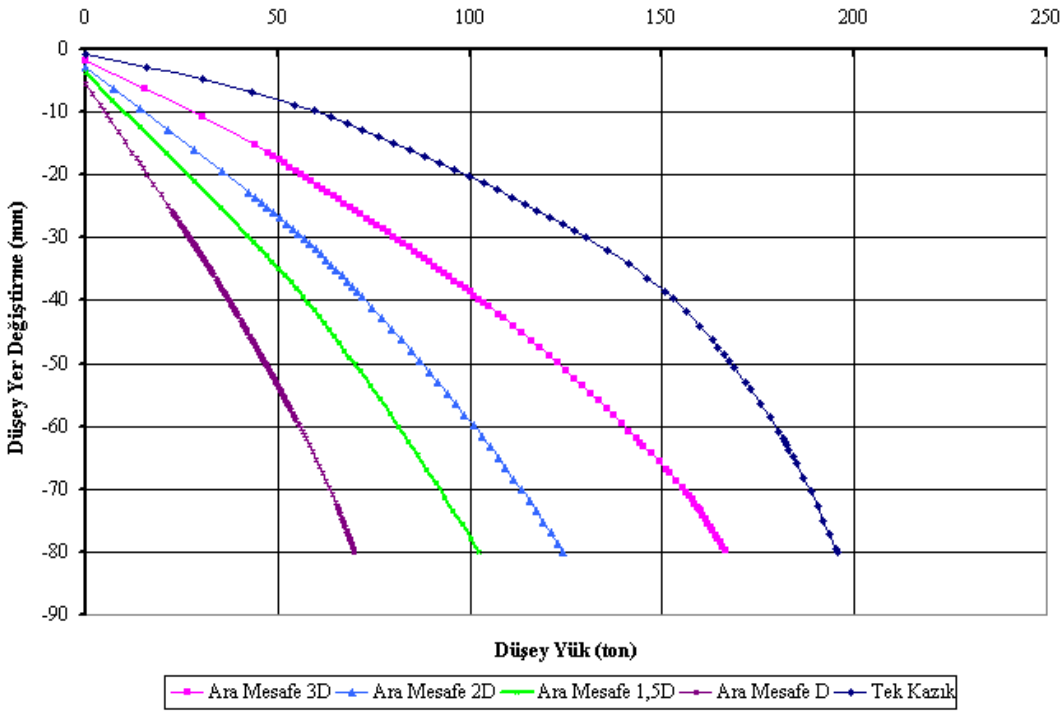
Tüm çaplar için perde kazık modellerinin analizlerinin tamamlanmasından sonra karşılaştırma amacıyla her kazık çapı için, tekil kazığın düşey yük altındaki davranışı modellenerek, tekil kazığın yük- yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

Analizler sonucu elde edilen grafiklerin değerlendirilebilmesi ve kazık aralığının taşıma gücüne etkisini görebilmek için bazı basit kabuller yapılmıştır. Kazıkların toplam taşıma gücü, kazık çapının yüzde onu (D/10) oturma değerine karşılık gelen yük değeri olarak belirlenmiştir. Bu oturma değerine karşı gelen yüklerde uç dayanımının tamamen mobilize olduğu varsayılmaktadır. D/10 oturmaya karşılık gelen yük – oturma grafikleri, analizlerde kullanılan tüm kazık çaplarının, farklı eksenden eksene ara mesafeleri için Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de verilmektedir.

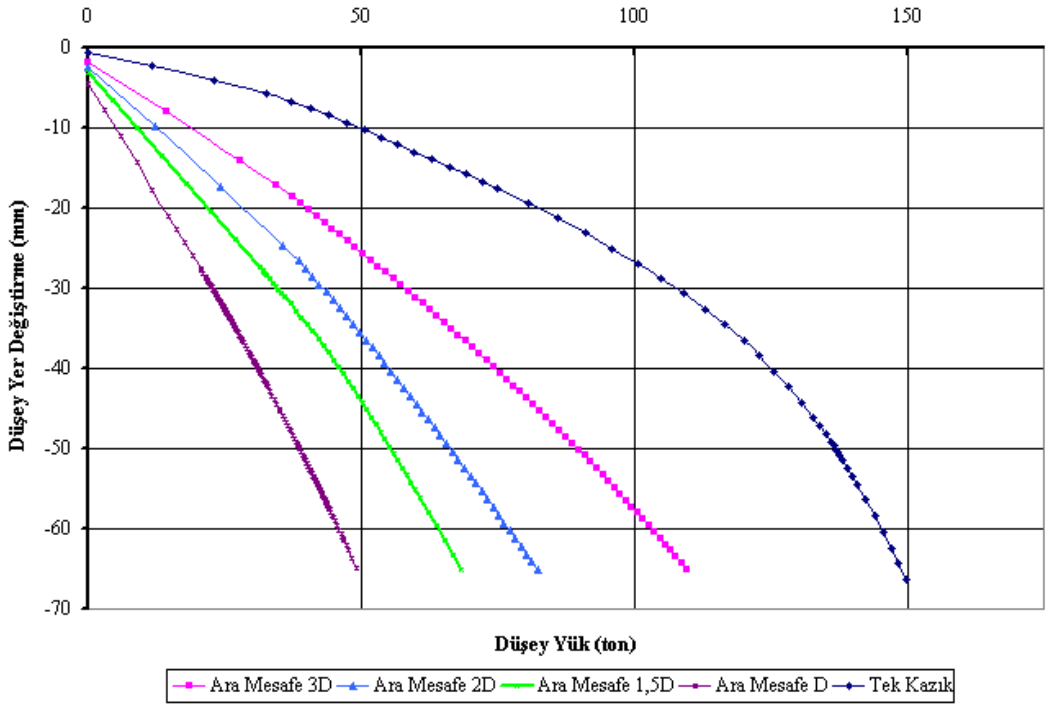


Şekil 6.8. ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

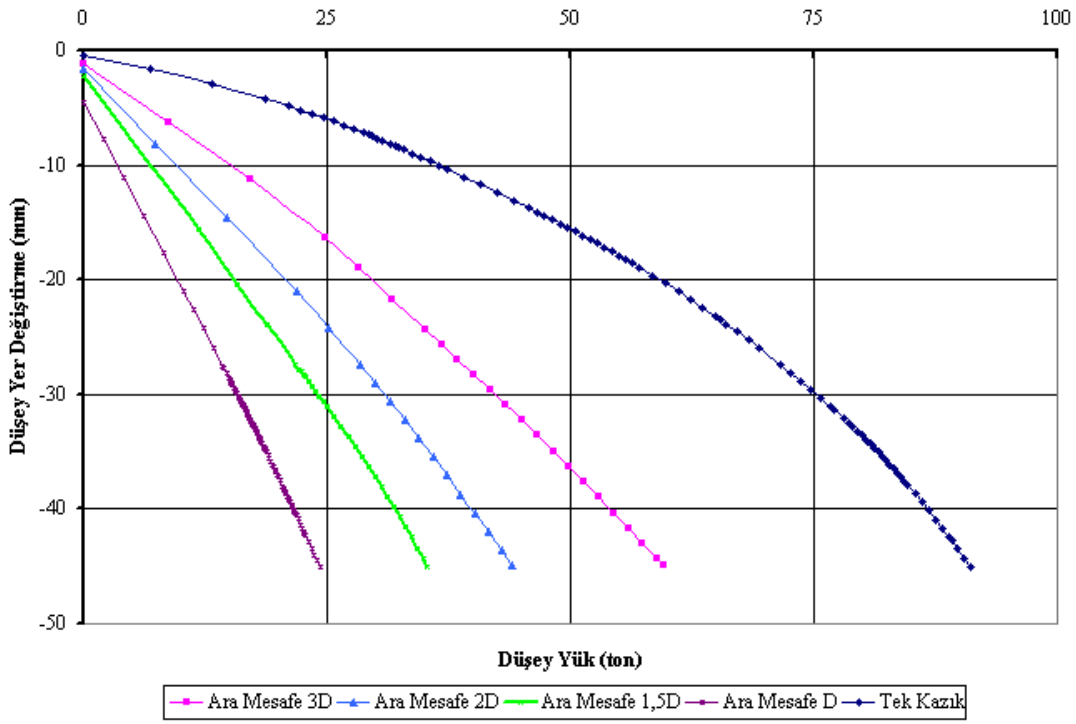
Elde edilen grafiklerden görüleceği gibi tekil kazık durumunda elde edilen taşıma gücü 3D ve 2D kazık ara mesafelerinde azalma göstermekte, ancak kazıklar arası mesafenin daha da azaltılması durumunda %50'den fazla taşıma gücü kaybı oluşmaya başlamaktadır.



Şekil 6.9. ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.10. ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.11. ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

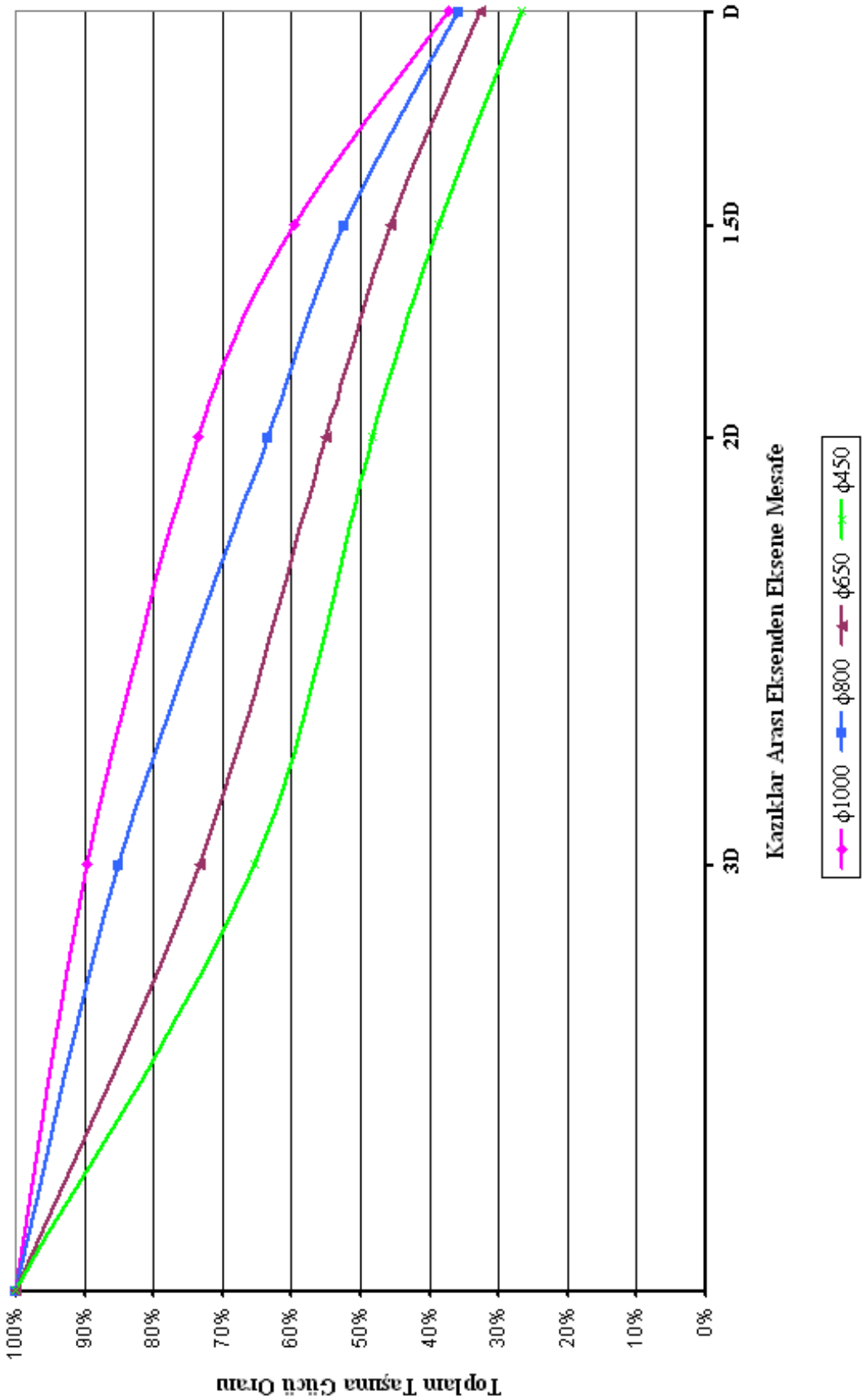
Görüldüğü gibi düşey yük altında bulunan kazık grubundaki kazıkların taşıma gücü, grubu oluşturan kazık tipinin tekil taşıma gücünden daha az olmaktadır. Bunun nedeni ise grup etkileşimidir. Kazıkların sık olması nedeniyle zemine aktarılan gerilmeler çakışmakta ve bu nedenle taşıma gücü azalmaktadır. Bunun dışında elastik ve konsolidasyon oturmaları kazık gruplarında, tek kazıklara göre daha büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni de kazık grubunun altındaki zeminde oluşan gerilme etki bölgesi tek kazığa göre daha geniş ve derin alana yayılmaktadır.

Grafiklerin incelenmesinden görüleceği gibi taşıma gücü değerleri, kazıklar arası ara mesafe azaldıkça azalmaktadır. Özellikle kazıkların teğet olması durumunda taşıma gücünde yaklaşık %60 - %70 oranında azalma görülmektedir. D/10 oturmaya karşılık gelen yükler ve bu yüklerin tekil kazığın taşıma gücüne oranları Tablo 6.2' de özetlenmiştir.

Tablo 6.2. D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri

Kazık Çapı (mm)	Kazıklar Arası Ara Mesafe	Taşıma Gücü Oturması (mm)	Taşıma Gücü (ton)	Taşıma Gücü Yüzdesi
ϕ1000	Tek	100	270,47	100,00%
	3D		242,58	89,69%
	2D		198,75	73,48%
	1,5D		161,01	59,53%
	D		100,92	37,31%
ϕ800	Tek	80	195,43	100,00%
	3D		166,4	85,15%
	2D		124,06	63,48%
	1,5D		102,19	52,29%
	D		69,98	35,81%
ϕ650	Tek	65	149,75	100,00%
	3D		109,63	73,21%
	2D		82,26	54,93%
	1,5D		68,31	45,62%
	D		49,02	32,73%
ϕ450	Tek	45	91,04	100,00%
	3D		59,57	65,43%
	2D		44,05	48,39%
	1,5D		35,31	38,79%
	D		24,27	26,66%

Grafik ve tabloların incelenmesinden elde edilen bir diğer sonuç ise kazık çapının küçülmesiyle, aynı kazık ara mesafesindeki taşıma gücü kaybı miktarının artmasıdır. Örneğin ϕ 1000 mm kazıklarda teğet durumda taşıma gücü kaybı %60 civarında iken yine teğet durumdaki ϕ 450 mm çapındaki kazıklarda %75 civarındadır. Taşıma gücündeki, kazık aralığının azalmasına istinaden gözlenen kayıp miktarları özellikle piyasada sıkça kullanılmakta olan ϕ 300 ve ϕ 250 mm çapında mini kazıklarda daha önemli boyutlarda olacağı düşünülmektedir. Tablo 6.2' de görülen sonuçlar Şekil 6.10' da grafik olarak görülebilir.



Şekil 6.12. Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi

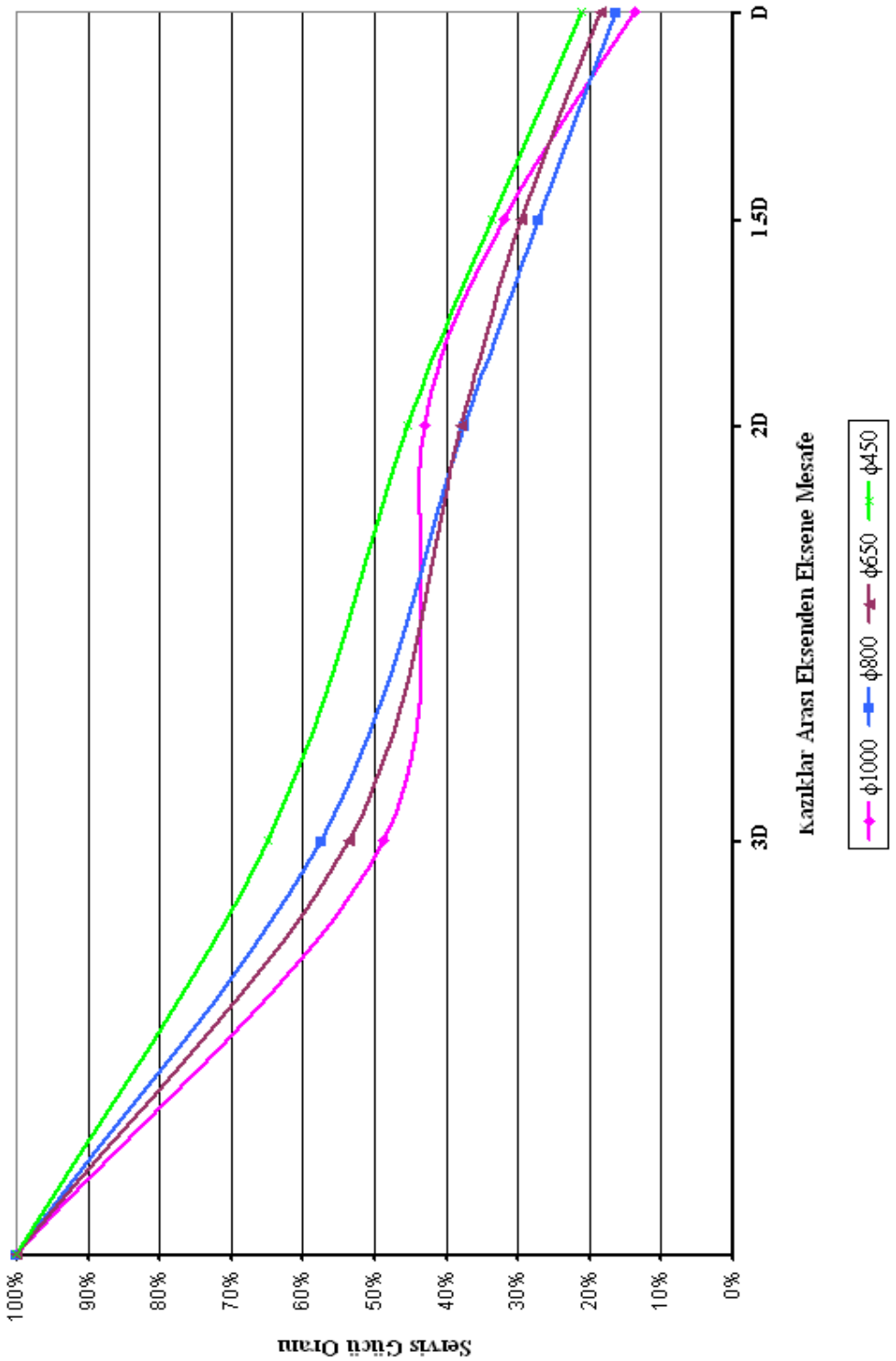
Bir diğer değerlendirmede analizlerden elde edilen sonuçlar, kazıkların servis yüklerine göre karşılaştırılmıştır. Kazıkların toplam taşıma gücünün D/10 oturmaya karşılık gelen yük değerinin yarısı ile 20 mm oturmaya karşılık gelen yük değerinden küçük olanı servis yükü olarak kabul edilmiştir. Bu değerlendirmede de kazıkların servis yükü kapasitelerinin, kazık ara mesafelerinin azalmasıyla azaldığı belirlendi. Perde kazıkların servis yükleri ve bu yüklerin tekil kazığın servis yüküne oranları Tablo 6.3' de özetlenmiştir.

Tablo 6.3. Kazıkların Servis Yükleri

Kazık Çapı (mm)	**Kazıklar Arası Ara Mesafe**	**Servis Yükü (ton)**	**Servis Yükü Yüzdesi**
ϕ1000	Tek	135,235	100,00%
	3D	65,94	48,76%
	2D	58,06	42,93%
	1,5D	43,33	32,04%
	D	18,63	13,78%
ϕ800	Tek	97,715	100,00%
	3D	56,18	57,49%
	2D	36,53	37,38%
	1,5D	26,56	27,18%
	D	16,05	16,43%
ϕ650	Tek	74,875	100,00%
	3D	40,19	53,68%
	2D	28,47	38,02%
	1,5D	22,05	29,45%
	D	13,88	18,54%
ϕ450	Tek	45,52	100,00%
	3D	29,58	64,98%
	2D	20,71	45,50%
	1,5D	15,36	33,74%
	D	9,64	21,18%

Tablo 6.3' ten görüleceği üzere kazıklarda servis yükü kriterine göre ara mesafenin azalmasıyla oluşan yük kaybı, taşıma gücü kriterine göre olan kayıp miktarından daha fazla olmaktadır. Ayrıca servis yükü kriterine göre kazık çapı büyüdükçe, aynı ara mesafeler için oluşan yük kaybı oranı artmaktadır. Bu durum büyük çaptaki kazıklar için 20 mm' ye karşılık gelen yük değerinde, kazık uç taşıma gücünün küçük çaptaki kazıklara oranla daha azının mobilize olmasından kaynaklanmaktadır.

Örneğin ϕ 450 mm çapındaki bir kazıkta 20 mm oturmaya karşılık gelen yükte, uç taşıma gücünün hemen hemen yarısı mobilize olurken; ϕ 1000 mm çapındaki kazıklarda uç taşıma gücünün yaklaşık %20 mobilize olabilmektedir. Elde edilen Tablo 6.3' de görülen sonuçlar Şekil 6.11' da grafik olarak görülebilir.



Şekil 6.12. Kazık Aralığının Servis Gücüne Etkisi

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kazıklara etkiyen düşey yüklere, düşey yükler altındaki tek ve grup kazıkların davranış esaslarına ve düşey yüklü kazıkların analiz yöntemlerine değinilmiştir. Kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisini yorumlayabilmek için Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı ile birçok analiz yapılmıştır.

Günümüzde geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılması zemin problemlerinin çözümünde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bilgisayar ortamında gerçeğe uygun bir şekilde modellenen problemin analizi, statik kazık formüllerinde yapılan bir takım kabuller ve ihmal edilen değerler hesaba katılarak, sonlu elemanlar yöntemi ile çözülebilmektedir.

Bu çalışmada Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programını kullanılarak tek ve perde kazıklar için üç boyutlu model ile analizler yapıldı. Analizlerde kullanılan kazık boyu 15 m. seçilerek, çeşitli kazık çaplarında kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisi incelendi. Kazık çapları 450 mm, 650 mm, 800 mm ve 1000 mm olarak seçildi.

Kazıklar, perde kazıkları olarak, eksenden eksene mesafeleri önce 3D, sonra 2D, daha sonra 1,5D ve D (teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için ayrı ayrı modellendi. Analizlerde zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için yük-oturma grafikleri elde edildi.

Sonuçların değerlendirmesinde baz alınacak değer olması için, kazık çapı, kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın düşey yük altındaki davranışı modellendi ve yük-oturma eğrisi elde edildi. Aynı kazık çapı için elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, kazıklar arası mesafenin taşıma gücüne etkisi belirli kriterlere göre değerlendirildi.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan modellerde, perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D olmasının, kazıkların düşey taşıma gücünün etkilenmesi açısından yeterli olmadığı görülmüştür.

Değerlendirmede ilk kriter olarak, kazık çapının onda biri (D/10) oturmaya karşılık gelen yükün, toplam taşıma gücü olduğu kabulü yapıldı. Kazıkların perde halinde bulunması durumundaki toplam taşıma güçleri, çeşitli ara mesafeler için, tekil kazığın taşıma gücüyle karşılaştırılarak, oluşan yük kaybı araştırıldı.

Yapılan analizlerde perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D olması durumundaki taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %10.3, %14.8, %26.8 ve %34.6 oranında yük kaybı oluştuğu belirlendi.

Kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D' nin altına indirilmesi durumunda, taşıma gücündeki kaybın daha büyük olduğu görülmektedir. Perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 2D olması durumundaki taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %26.5, %36.5, %45.1 ve %51.6 oranında; 1.5D olması durumunda ise sırasıyla %40.5, %47.7, %54.4 ve %61.2 oranında yük kaybı oluştuğu belirlendi.

Bu çalışmada, perde şeklindeki teğet kazıkların taşıma güçlerinde meydana gelecek yük kaybının, incelenen model esas olmak üzere 4 farklı çaptaki kazıklar için %60-%75 değerlerinde olduğu görülmüştür. Perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin D olması bir başka ifade ile perdeyi oluşturan kazıkların birbirine teğet olması durumundaki taşıma gücü, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırayla %62.7, %64.2, %67.3 ve %73.3 oranında azalmaktadır. Belirtilen değerler kazık çapının küçülmesiyle, kazıkların teğet olduğu durumdaki taşıma gücünde oluşan yük kaybı yüzdesinin arttığını göstermektedir.

Bir başka değerlendirmede, kazık çapının onda biri (D/10) oturmaya karşılık gelen yükün yarısı ile 20 mm oturmaya karşılık gelen yükten küçük olanın servis yükü olduğu kabul edilerek, elde edilen sonuçlar bu kritere göre değerlendirildi. Bu durumda da kazık servis yüklerinin, kazıklar arası mesafenin küçülmesiyle azaldığı belirlendi. Ancak toplam taşıma gücü kriterinde elde edilen sonuçlardan farklı olarak bu kriterde, kazıklarda ara mesafenin azalmasıyla oluşan yük kaybı miktarının daha fazla olduğu görülmektedir.

Servis yükü kriteri esas alınırsa, perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D olması durumunda, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm

çapındaki kazıklarda sırasıyla %51.2, %42.5, %46.3 ve %35.0 oranında yük kaybı oluştuğu belirlendi.

Perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 2D olması durumundaki servis yükünde, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %57.1, %62.6, %62.0 ve %54.5 oranında; 1.5D olması durumunda ise sırasıyla %68.0, %72.9, %70.6 ve %66.3 oranında kayıp oluştuğu belirlendi.

Teğet perde kazıkların servis yükünde ise, tek kazığa oranla 1000 mm, 800 mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırayla %86.2, %83.6, %81.5 ve %78.9 oranında kayıp oluştuğu belirlendi.

Bu çalışmada tek bir zemin profilinde çalışma yapılmış olup; bu açıdan çalışma genişletilebilir. Kazık boyunun teğet kazıkların taşıma gücüne etkisinin araştırılması için farklı boy kazıklarda bir inceleme yapılması çalışmaya başka bir boyut katabilir.

Ayrıca olanak bulunduğu takdirde, bu çalışma kapsamında incelenen ve matematik modellerle bulunan perde kazıkların taşıma güçleri, arazide imal edilecek gerçek kazıklar üzerinde yapılacak deneylerle desteklenebilir. Bu durum gerçek deneylerle belirlenen yük kayıpları esas olmak üzere, matematik modellerle elde edilen sonuçların doğruluk derecesini bir başka şekilde gösterecektir. Ancak önerilen bu çalışmanın önemli bir bütçe ve zaman gerektirdiği açıktır.

KAYNAKLAR

[1] **Birand, A.,** (2001), Kazıklı Temeller, ODTÜ, Ankara

[2] **Yıldırım, S.,Özaydın, K.,** (1994), Derin Temeller, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği V. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, ANKARA, s. 684-758

[3] **Toğrol, E., Tan O.,** (2003), Kazıklı Temeller, Birsen Yayınevi, İstanbul

[4] **Tomlinson, M.J.,** (1994), Pile Design and Construction Practice, E&FN Spon, London

[5] **Özkan, M.T., Sağlamer, A.,** (1995), Kazıklı Temeller, *Dünya İnşaat Dergisi*, 131/7, 35-38

[6] **Poulus, H., Davids, E.H.,** (1980), Pile Foundation Analysis and Design, John Willey&Sons İnc.

[7] **Rove, R. K.,** (2000), Geotechnical and Geoenviromental Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers Group, Netherlands

[8] **Yıldırım, S.,** (2002), Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul

[9] **Randolph, M. G.,** (1983), Design of Piled Raft Foundations, CUED/D soils TR 143, Cambridge University

[10] **Bowles, J. E.,** (1988), Foundation Analysis and Design, Mc Graw Hill.

[11] **Das, Braja M.,** (1990), Principles of foundation Engineering, PWS-KENT.

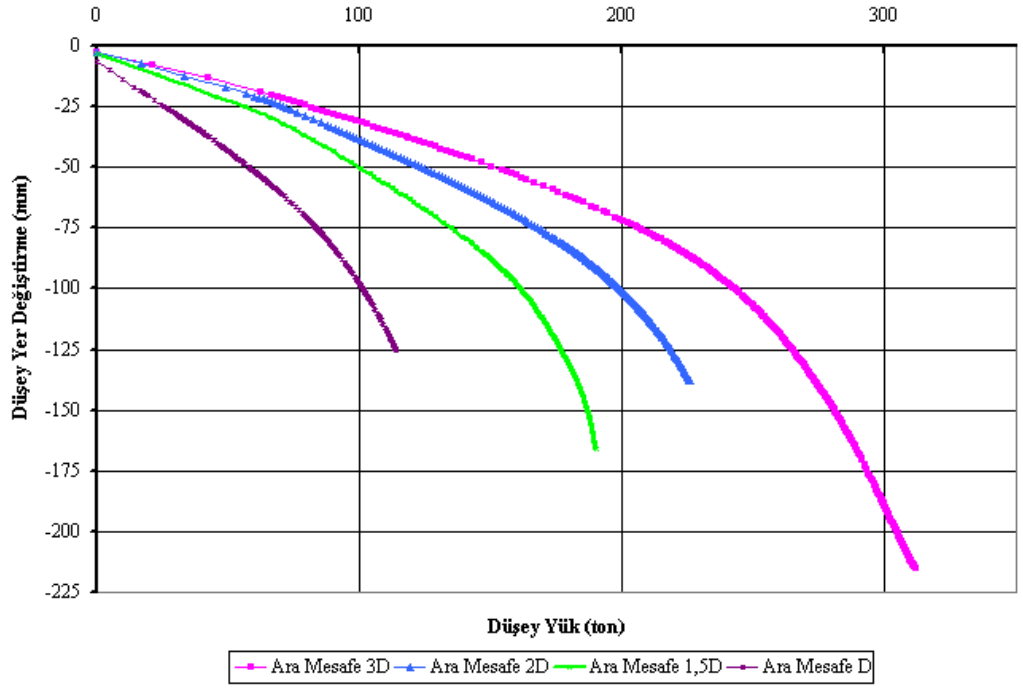
[12] **Kurtay, T.,** (1980), Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.

[13] **FEA LTD.,** Element Reference Manual

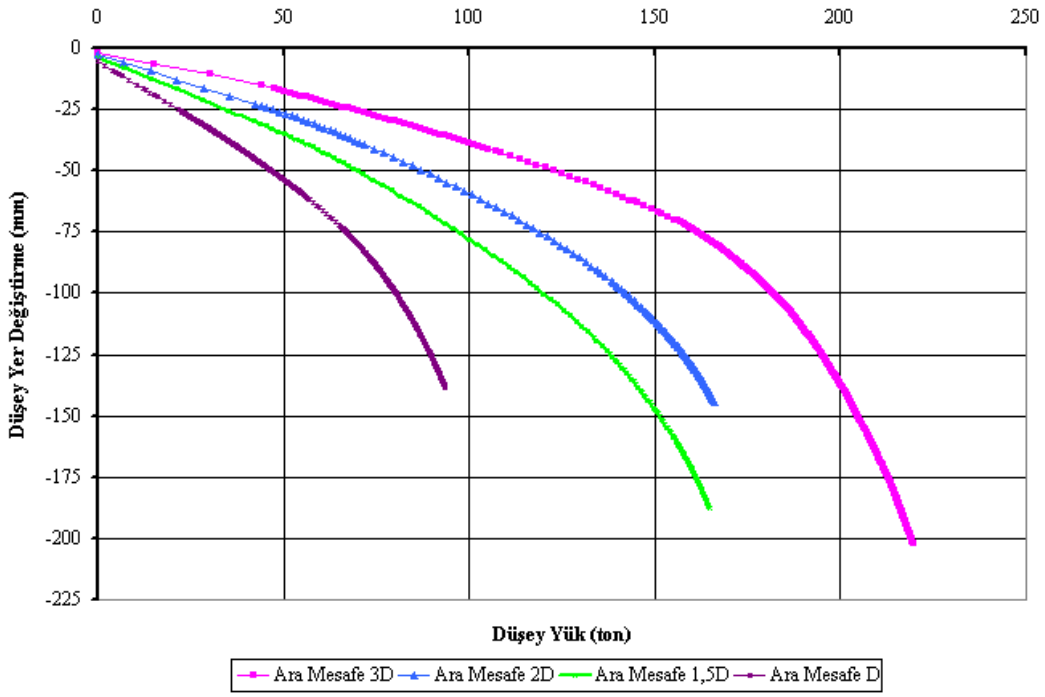
[14] **Plaxis,** 3D Foundation Reference & Material Models Manual

EKLER

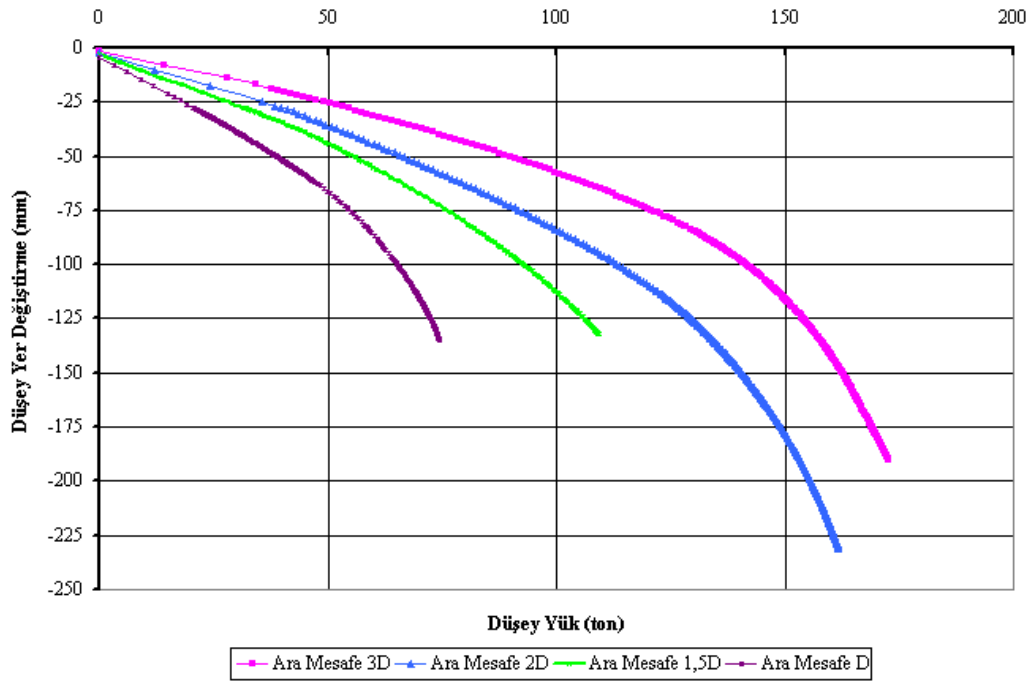
A.1. Plaxis İle Yapılan Analizlere Ait Eğriler



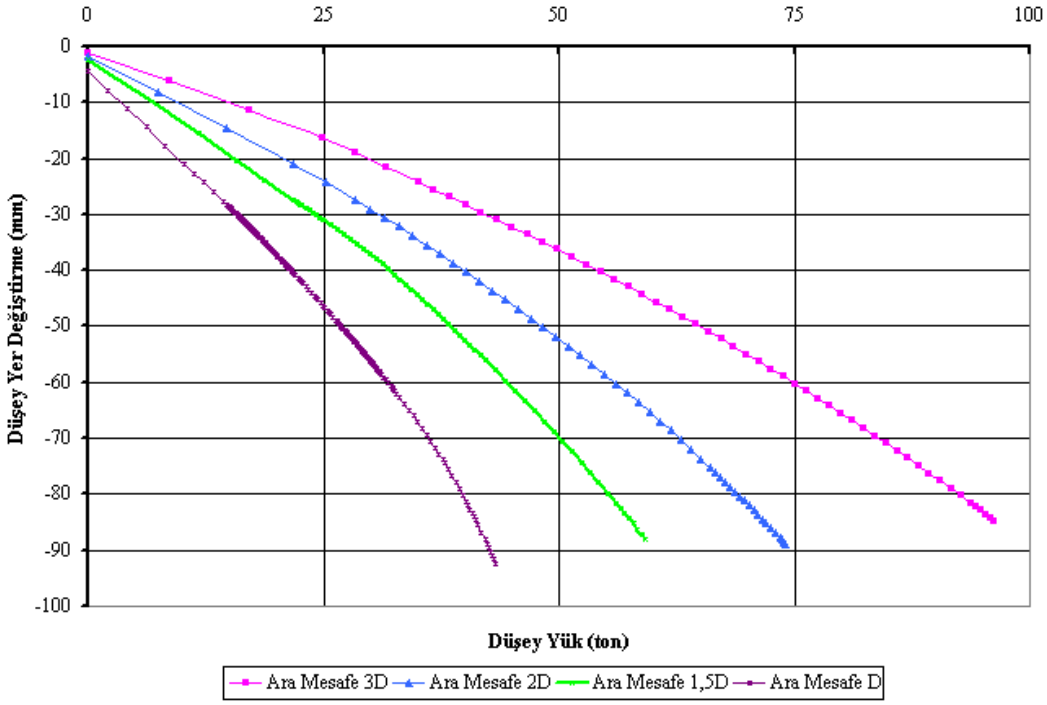
A 1.1. ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



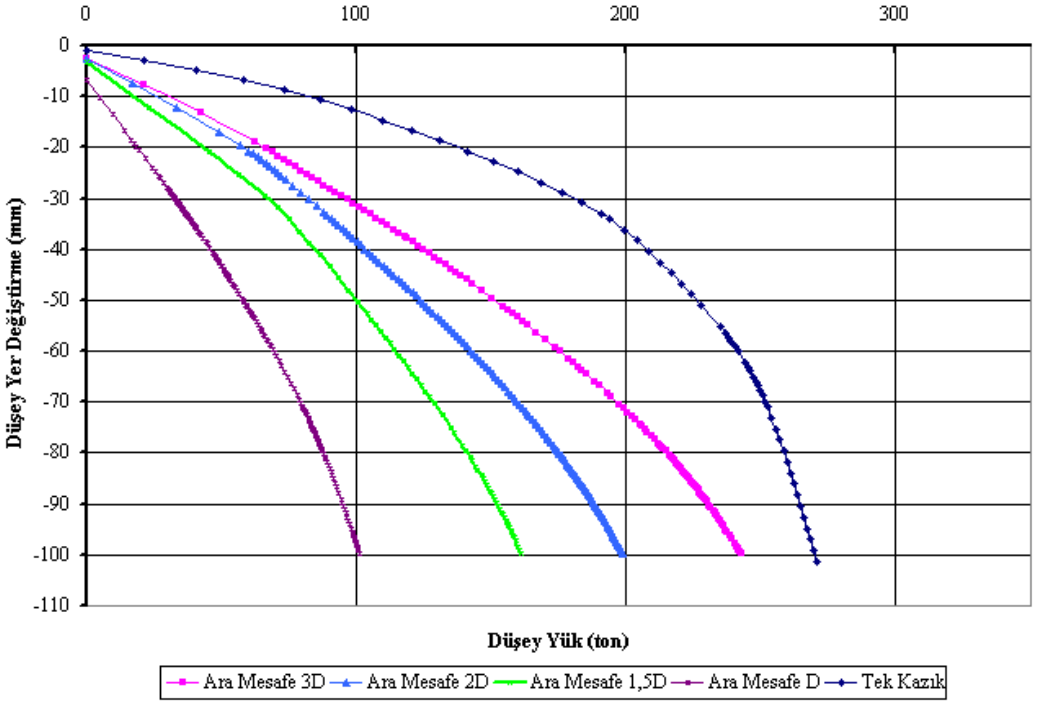
A 1.2. ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



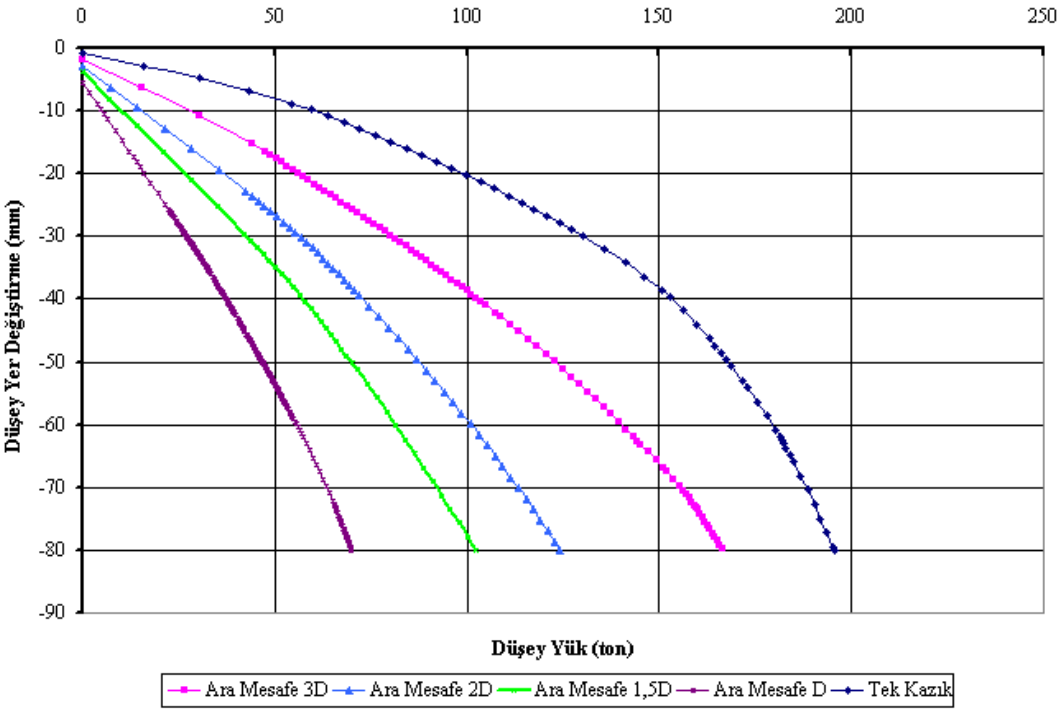
A 1.3. ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



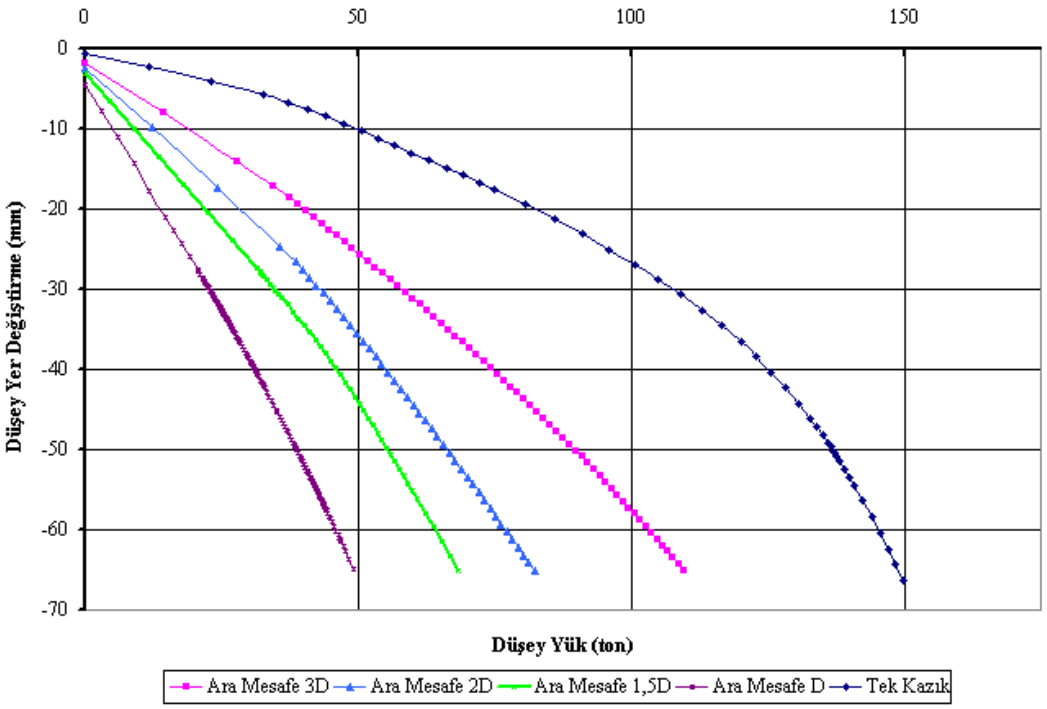
A 1.4. ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



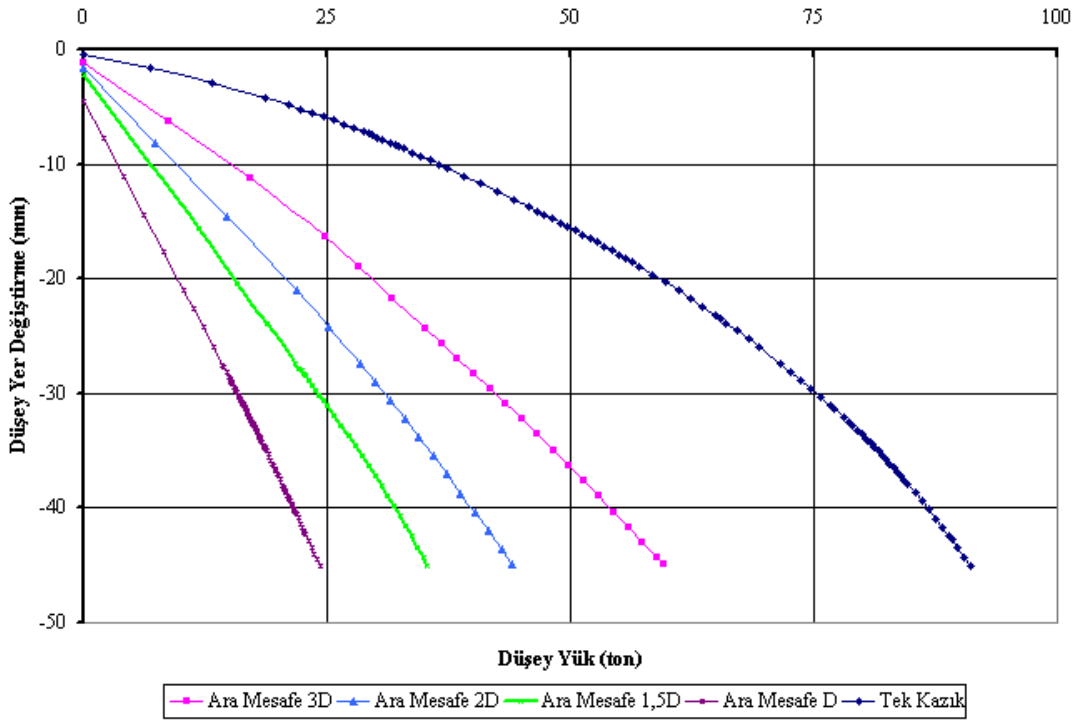
A 1.5. ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



A 1.6. ϕ 800 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

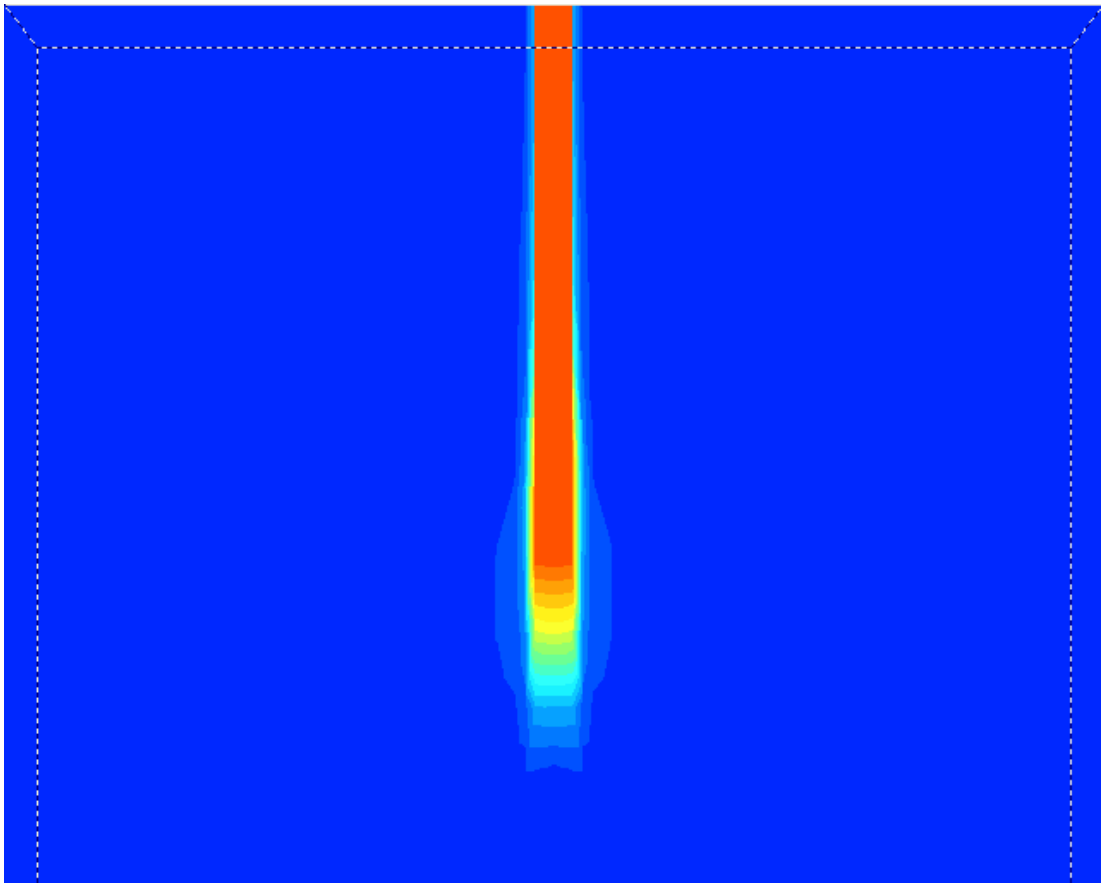


A 1.7. ϕ 650 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

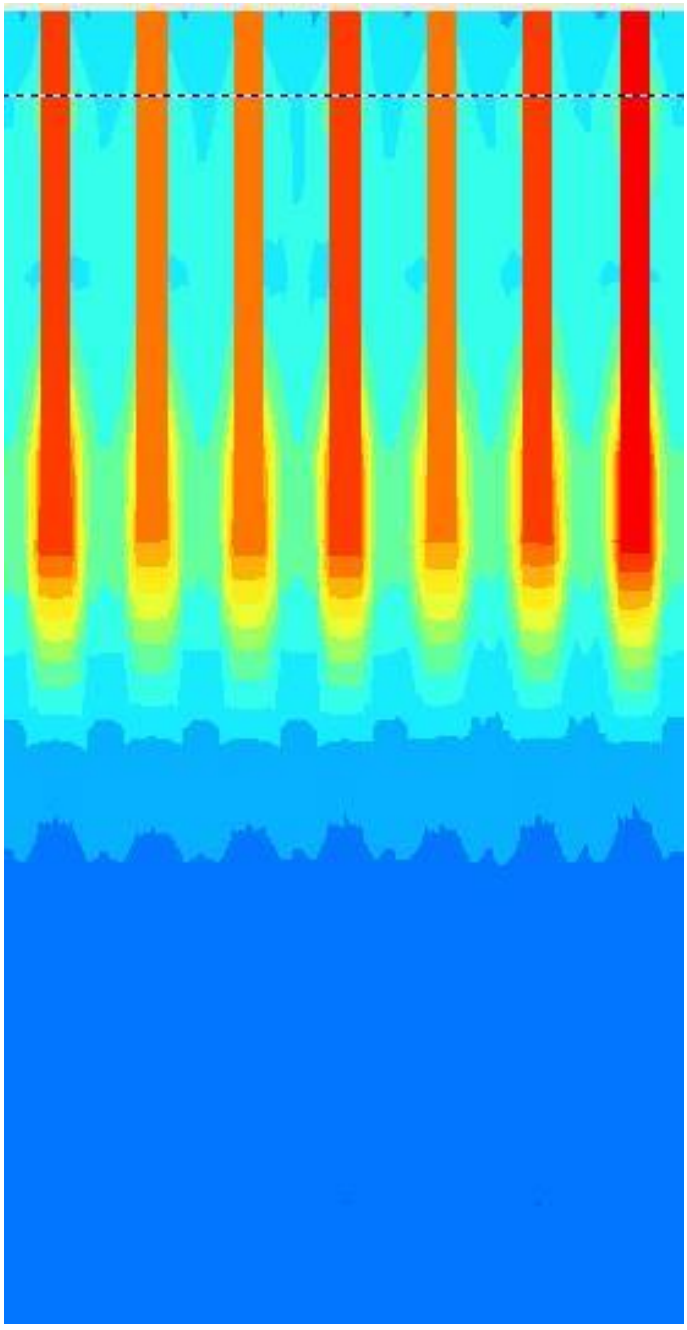


A 1.8. ϕ 450 mm Çapında Kazık İçin Kazık Çapının %10 Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

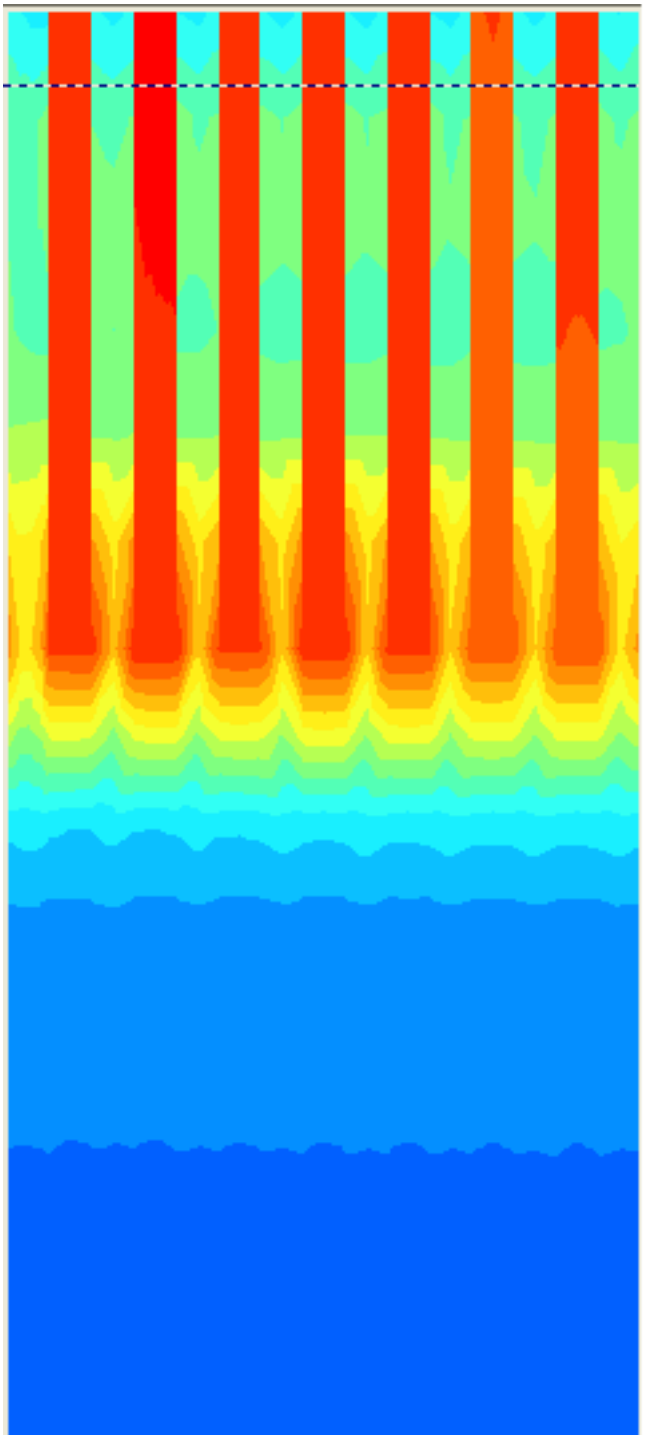
B.1. Örnek Plaxis Deformasyon Çıktıları



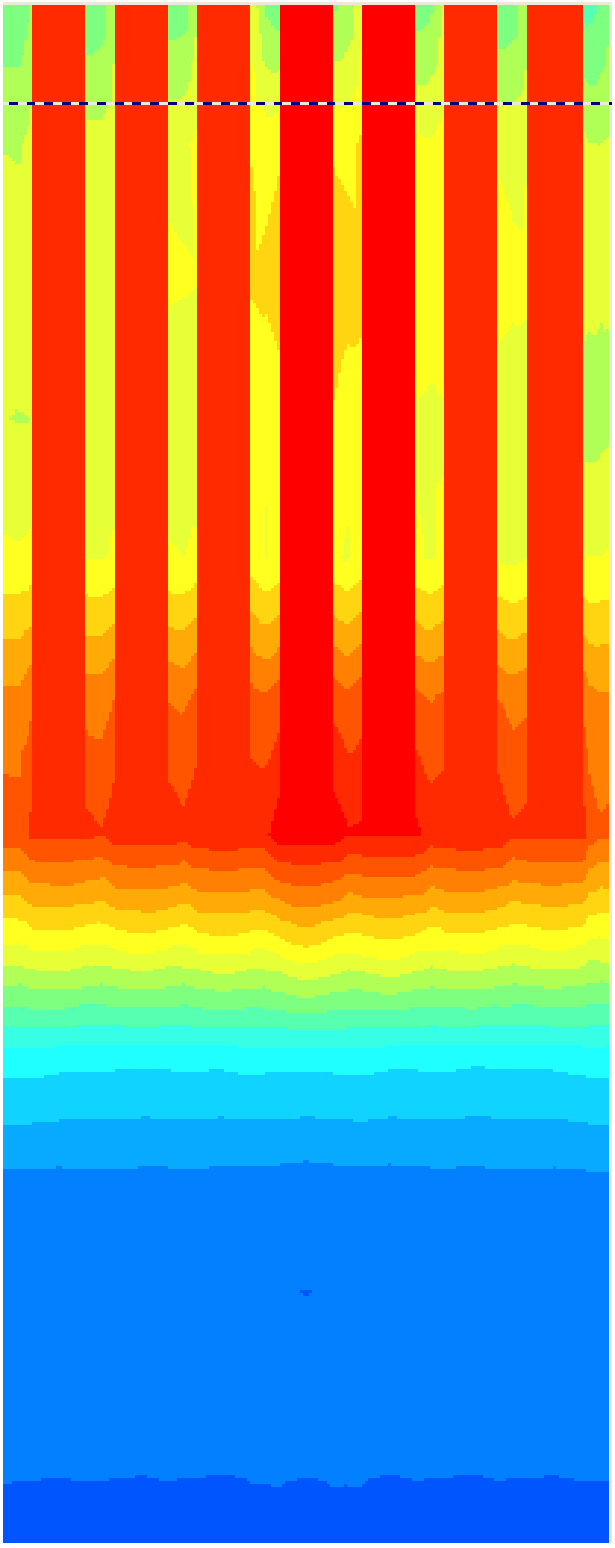
B 1.1. ϕ 1000 mm Çapında Kazık İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri



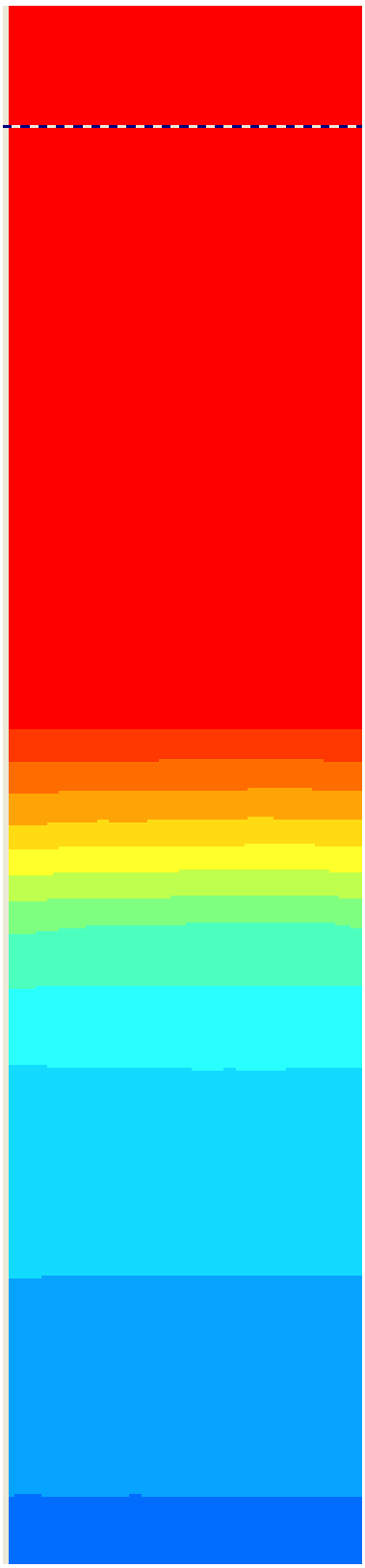
B 1.2. ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 3D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri



B 1.3. ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 2D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri



B 1.3. ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene 1,5D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri



B 1.3. ϕ 1000 mm Çapında Eksenden Eksene D Aralıklarla (Teğet) Yerleştirilen Perde Kazıklar İçin Göçme Durumunda Yer Değiştirme Renklendirmeleri

ÖZGEÇMİŞ

Cenk BAŞESKİ, 19 Şubat 1979 tarihinde İstanbul'da doğdu. Orta ve lise öğrenimini 1997 yılında Kadıköy Anadolu Lisesi' nde; yüksek öğrenimini 2001 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nde tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri İnşaat Fakültesi Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt oldu.