

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOHEZYONSUZ ZEMİNDE VE KAYAYA SOKETLİ PERDE
KAZIKLARIN TAŞIMA GÜCÜ ÜZERİNE BİR İNCELEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞ. MÜH. SAİM ŞEN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN

MAYIS 2006

ÖNSÖZ

Sonlu elemanlar metodu, kazıkların taşıma kapasitelerinin analiz edilmesinde günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanılabilmesi içinde gerçek problem ile modelin birbirine uygun olması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, düşey yüklü kazıkların ara mesafelerine göre taşıma gücü değişimleri sonlu elemanlar metodu yardımı ile incelenmiştir. Tez çalışmam süresince büyük bir sabırla yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN 'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin oluşturulmasında destek ve yardımlarından dolayı Eda AKÇAY'a, analizlerin yapıldığı programın öğrenilmesinde yardımlarını esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Cenk BAŞESKİ'ye ve Sn. Müge İNANIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2006
İSTANBUL

Saim ŞEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii

1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Amaç	1
1.3. Problemin ve Çözüm Yöntemlerinin Süreci	2
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. Ahşap Kazıklar	6
2.3.2. Betonarme Kazıklar	7
2.4. Kazık Tipi Seçimini Belirleyen Faktörler	7
2.5. İmalat Sırasında Zemin İçine Yerleştirme Tarzı	8
3. DÜŞEY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN DAVRANIŞI	10
3.1. Genel	10
3.1.1. Kazık Dayanımının Hesaplanmasında Temel Yaklaşımlar	10
3.1.2. Yük Altındaki Tek Kazığın Davranışı	12
3.1.3. Göçme Yükünün Tanımı	13
3.1.4. Kazıklarda İzin Verilen Yükler	14
3.2. Kazıkların Taşıma Gücü	17
3.2.1. Genel	17
3.2.2. Statik Kazık Formülleri	18
3.2.2.1. Genel	18

3.2.2.2. Uç Direnci	18
3.2.2.2.1. Uç Kazıklarında Uç Direnci	18
3.2.2.2.2. Sürtünme Kazıklarında Uç Direnci	18
3.2.2.3. Çevre Sürtünmesi Direnci	25
3.2.2.3.1. Genel Formülasyon	25
3.2.2.3.1.a Kohezyonlu Zeminlerde Birim Çevre Sürtünmesi Değerleri	25
3.2.2.3.1.b Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi Direnci	28
3.2.2.3.1.c Granüler-Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünme Direnci....	32
3.2.2.4. Yerinde Yapılan Arazi Deney Bilgilerinin Kullanıldığı Yöntemler	34
3.2.2.4.1. Statik Koni Penetrasyon Deneyi	34
3.2.2.4.2. Standart Penetrasyon Deneyi	35
3.2.3. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Taşıma Gücü	37
3.2.4. Kazıklarda Taşıma Gücünün Pratik Olarak Hesaplanması	39
3.3. Düşey Yük Altında Tek Kazığın Oturması	40
3.4. Oturma Tahmini Analiz Yöntemleri	49
3.5. Tasarım Grafikleri ve Tek Kazıklar için Denklemler	50
3.6. Non Lineer Analiz	53
3.7. Yük-Oturma Eğrilerinden Göçme Yükünün Tayin Yöntemleri	55
3.7.1. Terzaghi Yöntemi	57
3.7.2. Boston Şartnameleri	57
3.7.3. Kazık Çapının Yüzde On'u Kuralı	57
3.7.4. Brinch Hansen Yöntemi	57
3.7.5. Yük-Oturma Eğrisi Yarıçapı	58
3.7.6. De Beer Yöntemi	58
3.7.7. Mazurkiewicz Yöntemi	59
3.7.8. Fuller ve Hoy Yöntemi	59
3.7.9. Davisson Yöntemi	60
3.7.10. Chin Yöntemi	61
3.8. Yükleme Deneyinin Yorumu	62
4. DÜŞEY YÜK ALTINDA KAZIKLARIN GRUP DAVRANIŞI	64
4.1. Genel	64
4.1.1. Kazık Grubunun Açıklığı	64
4.1.2. Kazık Gruplarının Etkinliği	67
4.2. Kazık Grubunun Taşıma Gücü	76

4.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü	80
4.2.2. Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü	81
4.3. Kazık Gruplarının Altında Bulunan Zemin Tabakalarındaki Gerilmeler	84
5. SONLU ELEMANLAR METODU	89
5.1. Giriş	89
5.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulandığı Alanlar	90
5.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Tanımı	91
5.4. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları	93
5.5. Sonlu Elemanlar Metodunun Dezavantajları	95
5.6. Sonlu Elemanlarda Yakınsama Kriterleri	95
5.7. Sonlu Elemanlar Metodundaki Hatalar	95
5.8. Plaxis 3D Foundation Programının Özellikleri	96
5.8.1. Programın Genel Özellikleri	96
5.8.2. Plaxis 3D Foundation Programının Kullanım Esasları	97
5.8.3. Kullanılan Yapısal Modeller	98
6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER	100
6.1. Plaxis 3D Foundation İle Modelleme Yapılması	100
6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı	101
6.2. Modelleme Esasları	104
6.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık Ve Zemin Parametreleri	104
6.2.2. Hesap Adımları	106
6.3. Kohezyonsuz Zemindeki Analiz Sonuçları	106
6.4. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Analiz Sonuçları	115
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	125
KAYNAKLAR	129
EKLER	131
ÖZGEÇMİŞ	150

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları	16
Tablo 3.2. Kazık Taşıma Güçleri için Güvenlik Sayıları	17
Tablo 3.3. Taşıma Gücü Katsayıları	20
Tablo 3.4. Kazık Tipine Göre K Değerleri	26
Tablo 3.5. Geostatik Katsayıya Oranla K Değeri	27
Tablo 3.6. Kazık-Zemin Sürtünmesi Değerleri	27
Tablo 3.7. Adezyon Katsayısı α_i	29
Tablo 3.8. Yaklaşık Çevre Sürtünmesi Değerleri (f_s)	30
Tablo 3.9. Kazık Yükleme Deneylerinden Elde Edilmiş Adezyon Katsayıları (α) ..	32
Tablo 3.10. Zemin Kıvamına Göre Adezyon Faktörü (α)	33
Tablo 3.11. CTP için Nihai Çevre Sürtünmesi Korelasyonu	35
Tablo 3.12. CTP için Taşıma Kapasitesi	36
Tablo 3.13. Temel Taşıma Katsayısı	37
Tablo 3.14. Yükleme Deneyi Kriterleri	56
Tablo 4.1. Çeşitli Bina Şartnamelerine Göre Kazık Açıklıkları	66
Tablo 4.2. İsveç Kazık Şartnamesine Göre Kazık Açıklıkları	67
Tablo 4.3. Arsoy ve Parakash'a Göre Grup Etkinliği	69
Tablo 4.4. Çeşitli Açıklıklar için Grup Etkinlikleri	71
Tablo 4.5. Grup Etkileşim Faktörü	75
Tablo 6.1. Zemin Malzeme Özellikleri	105
Tablo 6.2. Kazık Malzeme Özellikleri	105
Tablo 6.3. Kohezyonsuz Zeminde D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri.....	111
Tablo 6.4. Kohezyonsuz Zemindeki Kazıkların Servis Yükleri	113
Tablo 6.5. Kayaca Soketlenmiş Kazıkların D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri	121
Tablo 6.6. Kayaca Soketlenmiş Kazıkların Servis Yükleri	123

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1.	Kazık Göçme Yüğü İçin Yük-Oturma Eğrisi 12
Şekil 3.2.	Kazıklarda Yük Transferi 13
Şekil 3.3.	Düşey Yükler Etkisi Altındaki Kazıklarda Kayma Yüzeyleri 14
Şekil 3.4.	Taşıma Gücü Katsayısı N_q 21
Şekil 3.5.	L_b/d_{cr} Oranının İçsel Sürtünme Açısına Göre Değişimi 23
Şekil 3.6.	N_c^* ve N_q^* Değerlerinin İçsel Sürtünme Açısı ile Değişimi 23
Şekil 3.7.	Janbu'nun Taşıma Gücü Değerleri 24
Şekil 3.8.	Adezyon Katsayısı Değerleri 30
Şekil 3.9.	Kazık Penetrasyon Boyu ile λ Değerinin Değişimi 31
Şekil 3.10.	Adezyon Faktörü 34
Şekil 3.11.	Moofields'teki Londra Kilinde Sürgülü Kazıkların Elastik Oturması 42
Şekil 3.12.	Sert Kil İçindeki Geniş Çaplı Sürgülü Kazıklar İçin Yük-Oturma İlişkileri 43
Şekil 3.13.	Transfer Fonksiyonu Yaklaşımı için Yük-Transferi Analizi 47
Şekil 3.14.	Düşey Eksenel Yükleme Altında Kazığın Deformasyonu için t-z Yayı 48
Şekil 3.15.	Tek Kazık Geometrisinin Tanımı 51
Şekil 3.16.	Homojen Kildeki Tek Kazığın Oturması 52
Şekil 3.17.	Doğrusal Artan Modüle Sahip Zemindeki Tek Kazığın Oturması ... 53
Şekil 3.18.	Yük-Oturma Eğrisinin Oluşturulması 54
Şekil 3.19.	Tipik Yük-Oturma Diyagramı 55
Şekil 3.20.	Brinch Hansen %90 Kriteri 58
Şekil 3.21.	De-Beer Yöntemine Göre Göçme Yüğü'nün Saptanması 58
Şekil 3.22.	Mazurkiewicz Yöntemi'nin Uygulanması 59
Şekil 3.23.	Fuller ve Hoy Yöntemi 60
Şekil 3.24.	Davissan Yönteminin Uygulanması 60
Şekil 3.25.	Chin Yönteminin Uygulanması 61
Şekil 3.26.	Yük-Oturma Eğrilerinin Yorumu 63
Şekil 4.1.	Tipik Kazık Gurubu Örnekleri 65

Şekil 4.2.	Sürtünme Kazığının Çevreleyen Gerilmeler ve Kazık Gurubuna Bunların Toplam Etkisi	66
Şekil 4.3.	Tek Kazık ve Kazık Grubu Altında Gerilmeden Etkilenen Bölgelerin Karşılaştırılması	68
Şekil 4.4.	Converse-Labarre Yöntemine Dayalı Olarak Kazıkların Grup Halinde Çakıldığında S=3D Durumu için Sürtünmeye Bağlı Etkinlikleri	70
Şekil 4.5.	Kazık Grubunun Etkinliği- Feld Metodu	71
Şekil 4.6.	Killi Zeminler için Grup Etkinliği	72
Şekil 4.7.	Kazık Grupları	74
Şekil 4.8.	Kazık Grubunun Blok Davranışı	77
Şekil 4.9.	a) Tekil Kazık Göçmesi b) Kazıkların Sıra Olarak Göçmesi c) Blok Göçmesi	78
Şekil 4.10.	Cullman Yönteminin Uygulanması	80
Şekil 4.11.	Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü Hesabı için Basitleştirilmiş Yöntem	82
Şekil 4.12.	Dikdörtgen Kazık Grupları için Şekil Faktörü	83
Şekil 4.13.	Taşıma Gücü Katsayısı	83
Şekil 4.14.	Kazıkların Gruptaki Doğrultularından Sapma Etkisi	84
Şekil 4.15.	Midlin Çözümünü Kullanarak Zemin Gerilmelerinin Hesaplanması için Zemin Kazık Sistemi	88
Şekil 5.1.	Üç Düzüm Noktalı Bir Eleman	91
Şekil 5.2.	Değişken Kalınlıklı ve Düzensiz Şekilli Bir Plak Eleman	91
Şekil 5.3.	Düzensiz Geometrisi Olan Bir Plak Elemanın Sonlu Elemanlara Ayrılması	92
Şekil 5.4.	Üçgen, Dikdörtgen ve Dörtgen Elemanlara Ayrılmış Düzensiz Şekilli Bir Cisim	93
Şekil 5.5.	Bir ve İki Boyutlu Yüksek Mertebeden Elemanlar	94
Şekil 5.6.	Zemin Elemanında Düzümlerin ve Gerilme Noktalarının Yerleşimi	96
Şekil 5.7.	3D Katı Sürekli Ortam Elemanlarındaki Pozitif Gerilme Yönleri	97
Şekil 5.8.	3D Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması	98
Şekil 6.1.	Kohezyonsuz Zeminlerde $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıkların Sonlu Elemanlar Ağı 3 Boyutlu	102
Şekil 6.2.	Kohezyonsuz Zeminlerde $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıkların Sonlu Elemanlar Ağı 2 Boyutlu	102
Şekil 6.3.	Kayaca Soketli Kazıklarda $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıkların Sonlu Elemanlar Ağı 3 Boyutlu	103
Şekil 6.4.	Kayaca Soketli Kazıklarda $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıkların Sonlu Elemanlar Ağı 2 Boyutlu	103

Şekil 6.5.	Φ1000 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	107
Şekil 6.6.	Φ800 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	107
Şekil 6.7.	Φ650 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	108
Şekil 6.8.	Φ450 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	108
Şekil 6.9.	Φ1000 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	109
Şekil 6.10.	Φ800 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	109
Şekil 6.11.	Φ650 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	110
Şekil 6.12.	Φ450 mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	110
Şekil 6.13.	Kohezyonsuz Zeminde Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi ..	112
Şekil 6.14.	Kohezyonsuz Zeminde Kazık Aralığının Servis Gücüne Etkisi....	114
Şekil 6.15.	Kayaca Soketlenen Kazıklar için Sonlu Elemanlar Ağı 2 Boyutlu	115
Şekil 6.16.	Kayaca Soketlenen Kazıklar için Sonlu Elemanlar Ağı ve Zemin Profili 3 Boyutlu.....	116
Şekil 6.17.	Φ1000 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	117
Şekil 6.18.	Φ800 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	117
Şekil 6.19.	Φ650 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	118
Şekil 6.20.	Φ450 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri	118
Şekil 6.21.	Φ1000 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	119
Şekil 6.22.	Φ800 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	119

Şekil 6.23.	Φ650 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	120
Şekil 6.24.	Φ450 mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri	120
Şekil 6.25.	Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi	122
Şekil 6.26.	Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Kazık Aralığının Servis Gücüne Etkisi	124

SEMBOL LİSTESİ

Q_p	: Kazığın nihai taşıma gücü
Q_b	: Kazığın nihai uç taşıma gücü
Q_s	: Maximum çevre taşıma gücü
Q_g	: Kazık grubunun taşıma gücü
L	: Kazık boyu
c	: Zeminin kohezyonu
c_u	: Drenajsız kohezyon
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
d	: Kazık çapı
N_γ, N_q, N_c	: Taşıma gücü katsayıları
A_p	: Kazık ucu kesit alanı
q_p	: Birim alana düşen uc direnci
σ_v'	: Düşey efektif gerilme
P	: Kazık enkesidinin çevre uzunluğu
ΔL	: Kazığın değişik zemin tabakalarındaki uzunluğu
K	: Yanal toprak basıncı katsayısı
δ	: Kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı
K_o	: Sükunetteki yatay toprak basıncı katsayısı
α	: Adhezyon faktörü
q_c	: Koni uç direnci
b	: Kuyu faktörü
f_{SI}	: Çevre sürtünmesi nihai değeri
K_c	: Taban katsayısı
C_0	: Kayacın ölçülen serbest basınç direnci
N_{ms}	: Kayaç kitle kalitesi
G_{av}	: Zemin kayma gerilmesinin kazık shaftı boyunca ortalaması
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
I_p	: Oturma etki katsayısı

R_A	: Kazık kesit alanının kazık brüt kesit alanına oranı
E_{SO}	: Zeminin yüzeyindeki young modülü
S	: Oturma miktarı
E_g	: Kazık grubu etkinliği
m	: Gruptaki kazık sırası sayısı
n	: Bir sıradaki kazık sayısı
s	: Merkezden merkeze kazık aralığı
κ	: Şekil faktörü
τ	: Kayma gerilmesi
Φ	: Kayma mukavemeti açısı
σ_n	: Normal gerilme
τ_x, τ_y, τ_z	: Kayma gerilmesi bileşenleri
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: Normal gerilme bileşenleri
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	: Deformasyon bileşenleri

ÖZET

Kazık tasarımı ve bu tasarım için yapılan hesaplar, bir yapı-zemin etkileşmesi problemi. Bu etkileşimde kazıkların, tam anlamı ile gerçekçi olmasa da doğrusal elastik davranış gösteren yapı elemanları olarak ele alınmaları, zeminin benzer bir davranış varsayımı ile ele alınmasından daha olağan görünmektedir. Bununla beraber pratik çözümlerde gerek aşırı karmaşık yaklaşımlardan kaçınmak isteği ve gerekse pek çok halde yük altında oluşan küçük deformasyonlar için zemin davranışının da doğrusal olabileceğine dair belge ve gözlemlerin varlığı her iki elaman içinde pek çok halde yük-ötelenme ilişkisinin doğrusal olarak tanımlanması sonucunu doğurmuştur. Çözümlerin bu halde dahi çok basit olmadığı bilinmektedir.

Bilgisayarların hız ve belleklerinin artması sonucunda kazık-zemin etkileşimi probleminin doğrusal olmayan davranış modelleri kullanarak bilgisayar programları aracılığı ile çözümlenmesini olanaklı hale getirmiştir. Bu çalışmada da bu doğrultuda, düşey yükler altındaki tek ve grup kazıkların davranış esaslarına ve düşey yüklü kazıkların analiz yöntemlerine değinilmiştir. Kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisini araştırmak için Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ile iki farklı zemin profilinde bir çok analiz yapılmıştır.

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

İkinci Bölümde; Kazık tipleri, kazıkların işlevleri, kullanım amaçları, malzeme özellikleri anlatılmıştır. Ayrıca kazık tipi seçimini belirleyen faktörler ve imalat sırasında yerleştirme biçimlerine değinilmiştir.

Üçüncü Bölümde; Kazıklara uygulanan düşey yükleri çevre zemine nasıl aktararak taşıdıkları, çevre sürtünme direncinin kazık boyunca nasıl dağıldığı, kazıkların zemine yük aktarma mekaniği, düşey yüklü tek kazığın taşıma gücü, arazi deneyleri yardımı ile taşıma gücünün tespit edilmesi ve düşey yüklü tek kazığın oturması ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Bununla birlikte, yük-oturma eğrilerinden göçme yükünün tayin yöntemleri ile yükleme deneyinin yorumu anlatılmıştır.

Dördüncü Bölümde; Düşey yükler altındaki kazık gruplarının açıklığı, taşıma güçleri ve yükleri zemine iletme mekaniğinden bahsedilmiştir.

Beşinci Bölümde; Hesaplanması uzun zaman alan, kaya ve zemin mekaniği problemlerinin çözümünde, geleneksel metotlar yerine, her geçen gün daha da sıkça kullanılan sonlu elemanlar metodunun uygulandığı alanlar, avantajları, dezavantajları ve hataları anlatılmıştır. Ayrıca Plaxis 3D Foundation programının özellikleri, kullanım esasları ve analizlerde kullanılan sonlu elemanlar açısından bahsedilmiştir.

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

Yedinci Bölümde ise; yapılan çalışmalar hakkında değerlendirmelerde bulunulmuş ve yapılan çalışmanın sonuçları yorumlanmıştır.

SUMMARY

A RESEARCH ABOUT THE BEARING CAPACITY OF PILE WALLS WHICH ARE PENETRATED INTO ROCK AND IN COHESIONLESS SOIL

Pile design is a problem of building-soil interaction. It is more usual assuming the behavior of piles linear elastic than the behavior of soil. The will of avoiding from complex solutions in practice and the existence of the documents and observations about the behavior of the soil like minor deformations in most loading case, leads the linear elastic assumption for both materials. Despite these assumptions solutions are not easy.

As a consequence of increase in the speed and the memory of computers it became available to solve these problems using non-linear behavior assumption. In this research, the behavior fundamentals of single pile and pile group which are under vertical loads and analysis methods of pile groups which under vertical loads are defined. In order to study the effects of the spacing between piles to bearing capacity, two different analysis for two different soil profile are done with computer program named Plaxis 3D Foundation which uses the method of finite elements.

In section one, the place of the research in geotechnical engineering, the aim and the importance of the research, definition of the problem and the solution methods are mentioned.

In section two, types of piles, functions of piles, aim to use of piles, and material properties are covered. Production process and the factors that determine the type of the pile are also touched on.

In section three, how the piles transmit the forces to soil, the distribution of side friction, mechanics of transmittal of forces from piles to soil, bearing capacity of a pile under vertical loading, calculating the bearing capacity of a pile using site experiments and detailed information about settlement of a pile under vertical loading, are mentioned. In addition to these, comments are included about determining the load under which the pile reaches ultimate load by using loading-settlement curves.

In section four, the spacing of the pile groups under vertical forces, bearing capacity and mechanics how they transmit the forces to soil are mentioned.

In section five, nowadays, instead of using traditional solution systems, finite elements method has become popular, while solving soil and rock mechanics problems. In this section advantages, disadvantages and errors of finite elements method is mentioned. In addition to this, information about Plaxis 3D Foundation is also given.

In section six, brief information is given about the analysis. The results of these analyses are studied by comparing the load-settlement graphics.

In section seven, the results of research are examined.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Eski zamanlardan beri kullanılan kazıklar ve kazıklı temeller, zemin yüzeyine yakın tabakalar, üst yapıdan gelen yüklerin göçmeden veya üst yapıya hasar verecek miktarda oturmaksızın taşıyabilecek bir yüzeysel temelin teşkiline uygun değilse, üst yapıdan gelen bu yükleri zemin profilinin daha derininde bulunan ve taşıyıcılık özellikleri daha yüksek olan tabakalara aktarmak için kullanılan ahşap, betonarme veya çelikten imal edilmiş yapı elemanlarıdır.

Kazıklar pratikte genellikle, en az üç kazıktan oluşan kazık gurupları şeklinde teşkil edilirler. Bir kazığın taşıma kapasitesi ile kazık gurubun taşıma kapasitesi arasında doğrusal bir bağıntı mevcut değildir. Bu sebeple bir kazık yerine kazık gurubunu taşıma kapasitesinin belirlemek için deneyler yapılmalıdır. Ancak bu deneyler yükleme için çok yük gerektirdiği ve ekonomik olmadığı için genellikle uygulamada tek kazığın taşıma kapasitesi belirlenir ve kazık gurubunun taşıma kapasitesinin tahmin edilmesine çalışılır. Zemin cinsine ve kazıklar arası ara mesafeye bağlı olarak kazık gurubun taşıma kapasitesi, tekil kazıkların taşıma kapasitesinden az olduğu gibi çokta olabilmektedir. Bu nedenle kazık guruplarının taşıma kapasitesi belirlenirken gurup tesiri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Düşey yükler etkisi altında olan kazıkların zemin mekaniği ve mühendislik ekonomisinin temel ilkeleri 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 karakterinin belirlenmesi ve bu davranış karakterlerine kazıklar arasındaki ara mesafenin etkilerini ortaya çıkarmak

için yapılan araştırmanın genişletilerek farklı zemin koşulları ve kazık boylarında kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisinin boyutlarının ortaya konmasıdır.

1.3. Problemin ve Çözüm Yöntemlerinin Süreci

Bu çalışmadaki çözüm süreci; tekil kazığın sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenerek düşey yük altındaki davranışının belirlenmesi ve aynı özelliklere sahip zemin tabakalarında değişik eksenden eksene ara mesafeler için sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmesi ve kazığın davranışının tekil durumla karşılaştırılmasıdır.

Bu çalışmada, kazıkların düşey yük altındaki davranışları Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programıyla incelenmiştir.

1.4. Yöntem

Kazığın yük ve deplasman limitlerinin ana karakterlerinin 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

Üst yapı yüklerinin bir bölümü yada tümünü zemin yüzeyinden daha derinlerdeki sağlam tabakalara aktaran temel sistemleri derin temeller olarak nitelendirilmektedir. Derin temeller olarak kazıklı temeller, ayak/keson temeller ve derin kazı içine yerleştirilen yapı temelleri düşünülebilir.

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

Kazıklı temellerin kullanımı yeni değildir. Günümüze kadar gelen, zayıf zeminler üzerinde inşa edilmiş, birçok tarihi yapının temellerinde ahşap kazıklar kullanılmıştır. Ahşap kazıkların kullanılması uzun bir süre sorun olmamıştır. 20. yüzyılın ilk çeyreğinde, yurdumuzda hala birçok projede ahşap kazıklar kullanılıyordu. Daha ağır yapıların, daha kötü zemin koşullarına sahip yerlerde yapılmak istenmesi, bütün dünyada, çelik ve betonarme kazıkların geniş ölçüde kullanılmasına yol açılmıştır. [3]

Yüzeysel temel çözümlerine göre daha pahalı olmalarına karşın kazıklı temellerin yapı güvenliği için gerekli oldukları bazı koşullar aşağıda sıralanmaktadır.

- Üsteki zemin tabakalarının üst yapı yükleri için yeterli taşıma güçlerinin olmayışı veya çok sıkışabilir nitelikleri nedeniyle yüklerin daha sağlam zemin veya kayaca aktarılma zorunluluğu doğabilir. Sağlam tabakanın çok derinde olması durumunda yükün büyük kesimi kazık çevresinden zemine aktarılacak şekilde düzenleme yapılabilir.
- Dayanma yapıları veya yüksek yapı temellerinde zemin; rüzgar ve deprem yükü gibi yanal etkilerini karşılama amacı ile düzenlenebilir.

- Suyla ilişkiye geçtiğinde kabaran veya birden çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerinin aktif zon diye tanımlanacak bir bölgenin dışına aktarmak gerekebilir.
- Kuleler, deniz platformları ve yeraltı suyu altındaki radyeler kaldırma kuvveti etkisindedir. Bu kuvvetlerin karşılanması kazıklı temeller düzenlenebilir.
- Köprü kenar ve orta ayakları erozyon nedeniyle temel altının oyulmasına karşı kazıklı olarak düzenlenebilir.
- Kazıklar bazı durumlarda zemin hareketlerini kontrol amacıyla kullanılabilir.
- Gevşek granüler zeminlerin sıkı hale getirilerek iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

2.2. TARİHÇE

Yapıları desteklemek için taşıyıcı kazıkların çakılması tarih öncesi zamanlara dayanmaktadır. İsviçre'deki Neolitik yerleşimcilerin 12.000 yıl önce sığ göllerde evlerini yapmak için kazıklı temelleri kullanmışlardır. Britanya' da Romalılar tarafından yapılan nehir kıyısı yerleşimlerinde ve köprülerde sayısız ahşap kazık kullanım örneği bulunmaktadır. Çin' de Han hanedanlığı (İ.Ö.200-İ.S.200) zamanındaki köprü inşaatlarında ahşap kazıklar kullanmışlardır. Venezuela' da Kızılderililer Maracaibo gölü kıyılarında kazıklı temelle yapılmış evler inşa etmişlerdir.

İlk zamanlarda yapılmış bu örnekler, kazıkta belli bir çekiç ve belli bir düşme yüksekliği karşında, çarpmaya gösterdiği direnç ile izin verilen yükün belirlenmesi, kurallara göre belirleniyor olmalıydı. Çeşitli ağaçların durabilitesi, zarar veren etmenlere karşı önlem alınması, su geçirimsizliğinin sağlanması ve kazığın çakılması sırasında zarar görmesini engellemek için başlık yapılması bu geçen zamanlarda yöntemler hakkında tecrübe ve bilgi birikmesini sağlamıştır.

Ahşabın hafifliği ile birleşen dayanımı, durabilitesi, kesme taşıma kolaylığı son zamanlara kadar kazık işlerinde kullanılan tek malzeme olmasına neden olmuştur. Yakın dönemlerde teknolojinin yeni yapı malzemeleri üretmesi ile birlikte beton ve çelik daha fazla basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerini taşımaları ve fabrikada istenilen birimlere getirilmesi ile ahşaba tercih edilmiştir.

19.Yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında yapısal bir ortam olarak gelişen betonarme, karadaki yüksek kapasiteli kazık işlerinde büyük oranda ahşabın yerini almıştır. Çeşitli yapısal formlarda hazırlanabilen betonarme, çok değişik zemin

koşullarında kullanılabilir. Bununla birlikte çelikte, fabrikasyon ve taşıma kolaylığının yanı sıra çok zor şartlarda kullanılabilir. [3]

2.3. Kazıkların Sınıflandırılması

Kazıklar bir çok araştırmacı tarafından farklı sınıflara ayrılmıştır. Bu sınıflandırmalar genelde beş grupta incelenir.

1. İmal edildikleri malzemelere göre; Ahşap, betonarme, çelik, kompozit ve özel tip kazıklar.
2. Kazığın yapım metoduna göre; Prekast veya yapım sırasındaki (fore kazıklar) hazırlanma durumuna göre.
3. Zemin içine yerleştirme yöntemine göre; BS 8004 (1986'da bu durum üç kategoride açıklanır.) [10]
 - a.) Büyük deplasman kazıkları; Yerleştirme sırasında çakma, kılıfla itilen veya vibrasyonla yerleştirilen kazıklardır. Bu tip kazıklar ise ahşap, önceden hazırlanmış betonarme kazıklar, öngermeli betonarme kazıklar, ucu kapalı çelik boru veya beton boru kazıklar örnek verilebilir.
 - b.) Küçük deplasman kazıkları; H kesitli, çelik vida kazıklar, ucu açık veya kutu kesitli çelik kazıklar çakma sırasında uçlarında bir tıkaç oluşturmuyorsa zeminde çok az yer değiştirmeye neden olurlar.
 - c.) Deplasman yaratmayan kazıklar; Genelde fore kazıklar olarak bilinen ve zeminde önce bir sondaj deliği açılarak bu deliliğin içine beton (gerekirse demir donatılı olarak) yerleştirilmek suretiyle imal edilen kazıklardır. Burada kazığın içine yerleşeceği zemin önceden hafredilmiş olduğundan kazık imal edilirken zeminin ötelenmesi veya sıkışması söz konusu olamaz.
4. Zemin içine yerleştirme yöntemine göre;
 - a.) Hazır çakma kazıklar.
 - b.) İş yerinde dökme çakma kazıklar.
 - c.) Delinip yerinde dökme kazıklar.
 - d.) Burgulanarak yerine yerleştirilen kazıklar.
 - e.) Su jeti kullanılarak yerine yerleştirilen kazıklar.
 - f.) Vibrasyon ile yerleştirilen kazıklar.

5. Yükleri taşıma ve iletme şekillerine göre;

- a.) Uç kazıkları; Yapı yüklerini su veya zayıf zemin altındaki sağlam tabakaya aktarmak için kullanılan kazıklardır. Kazık yükü, kazık ucu vasıtasıyla temel zeminine aktarılır. Çevre sürtünmesi ihmal edilebilir.
- b.) Sürtünme kazıkları; Yapı yüklerinin kazık çevresindeki zemin sürtünmesi ile kısmen veya tamamen taşıtılması için kullanılan yapılardır.
- c.) Çekme kazıkları; Suyun kaldırma kuvvetine maruz yapıları veya üst yapıya gelen yanal kuvvetleri dolayısıyla döndürme momentine maruz temel sistemlerini güvenilir bir şekilde zemine sabitlemek için kullanılır.
- d.) Ankraj kazıkları; palplanş perdelerini tespit etmek veya diğerk yanal kuvvetlere karşı ankraj kazıkları kullanılır.
- e.) Kompaksiyon Kazıkları; Ayrık daneli zeminleri sıkıştırmak amacıyla, zemini iyileştirmede kullanılır. Kum kazıkları örnek olarak verilebilir.

2.3.1. Ahşap Kazıklar [1]

Ahşap kazıklar, çok eski zamandan beri kullanılagelmişlerdir. ASCE Manval 17 (1959) ahşap kazıkları üç sınıfa ayırır.

A sınıfı; Ağır yükleri taşımasında kullanılan kazıklar. Minimum 360 mm çapında.

B sınıfı; Orta yükler için kullanılan kazıklar. Minimum 300 mm çapında.

C sınıfı; Su seviyesi altında bulunan zeminlerde kullanılan kazıklar. Minimum ap 300 mm.

Ahşap hem geçici maksatlarda hem de sürekli olarak kullanılabilir. Ahşap üzerinde yarık, çatlak, büyük ve gevşemiş budaklar bulunmamalıdır.

Ahşap kazıklar, çürüme, böcekler ve burgu kurtların tahribatı, yeraltı su seviyesinin değışmesi, mekanik aşınma, yangın gibi sebeplerle hasara uğrayabilir.

Kazık ucunun hasara uğramaması için demirden yapılmış bir çarık kullanılır. Kazık akıldıktan sonra başı kare biçiminde kesilir ve beton başlık dökülmeden önce çinko bir kılıf geçirilir veya sülyen ile boyanır.

Ahşap kazıkları sert zeminlere, sıkı kum-çakıl tabakalarına akmak zordur. Aşırı akma halinde uçları veya gövdeleri çatlayabilir veya kırılabilir. Bu nedenle çakma sırasında kazığın davranışı gözlenmeli giriş miktarı darbe sayısı oranı dikkatle izlenmeli.

Ahşap kazıkların taşıma gücü yüksek değildir. Yaklaşık olarak 20-25 cm çaplı bir kazığın taşıyacağı yük 200-300 KN civarında düşünülebilir.

2.3.2. Betonarme Kazıklar

Betonarme kazıklar üç ana kategoriye ayrılır.

a.) Betonarme Çakma kazıklar; Betonarme kazıklar şantiyede hazırlanır sonra çakılacakları yere taşınır. Betonarme çakma kazıklar, oldukça büyük yükleri yumuşak zemin tabakaları altındaki, sağlam tabakalara aktarmak için kullanışlıdır.

Kazığın boyu zemin şartlarına göre belirlendiğinden çakma kazıkların kesilmesi ve eklenmesi durumu oluşabilir. Kazık başlarının çakma işlemi sırasında tahrip olması durumunda kazık başları kesilerek yeniden imal edilebilir.

b.) Yerinde Dökme Kazıklar; Betonarme yerinde dökme kazıklar, kaplama borusu veya sondaj deliği içinde imal edilebilir. Ucu açık bir kaplama borusu zemine sokularak, kaplama borusunun içi temizlenerek yeri hazırlanan kazıklara sondaj kazığı denir. Kazık yeri zemin oyularak ve kazığın işgal edileceği hacimdeki malzeme dışarı çıkartılarak delik açılır. Sondaj kazıklarının inşası sırasında civarındaki yapılara hasar verilecek sarsıntılar meydana getirme ihtimali azdır.

c.) Kompozit Kazıklar; Kompozit kazıklar, birden fazla malzeme kullanılarak yapılan kazıklardır. Genellikle bu tip kazıkların alt kısmı ahşap, üst kısmı da beton veya çelikten oluşur. Ahşap kısım, çürümeden etkilenmeyeceği derinliklere (örneğin yeraltı su seviyesinin altına) kadar açılır. Sonra üst kısım betonlanarak, şartlara göre gereğinde kaplama borusu yerinde bırakılarak yapılır. Bu tip kazıkların uygulama alanı geniş değildir. [1]

2.4. Kazık Tipi Seçimini Belirleyen Faktörler

Hazır beton çakma kazıklar belirlenmiş bir düzende çakılabilirler. Yumuşak kil, silt ve turbalık zeminde boğulma tehlikesi olmaksızın yerleştirilebilir. Yeraltı suyunun varlığı kazık yapım işini etkilemezken, kazık malzemesinin önceden kalite kontrolü olanaklıdır.

Sonradan yerleştirilenlerce yukarı kaldırılmışsa tekrar çakılabilirler. Kazık boyu istenilen boya göre ayarlanabilir. Hazır beton çakma kazıkların bu olumlu yanlarının yanı sıra boylarının kolayca değiştirilmeyişi, çakma sırasında kabarma görülmesi, büyük çaplarda ve sınırlı hacimlerde çakma zorlukları, zor çakma koşullarında

kazıkta hasar olasılığı ve taşınmaları sırasında doğacak etkileri karşılamak amacı ile belkide gereksiz donatı konulma zorunluluğu olumsuz yönleri sayılabilir.

Fore kazık diye de anılan zeminin kazıldıktan sonra betonlanması ile oluşturulan kazıklarda zeminde kabarma olmayışı, kazık boyunun koşullara göre kolayca ayarlanabilmesi, kazı sırasında zemin verilerinin doğrulanma olanağı olumlu yönleridir. Bu tür kazıkların yumuşak kayaç ve kirli zeminde son bulan uçları özel aygıtlarla genişletilerek taşıma kapasiteleri artırılabilir, uzun boyları ve geniş çapları sınırlı kazık yapım yeri koşullarında gerçekleştirilebilir. Donatı taşıma ve çarpma gerilmeleri tarafından belirlenmez. Bunun yanı sıra yumuşak zeminlerde boğulma olasılığı, su altında beton dökme zorlukları ve betonun kontrol edilemeyişi foraj sırasında granüler zeminlerin gevşemesi, yumuşak kayaçların bozuşması olasılığı özellikle kazık tabanı zemin de su akışı nedeni ile gevşeme ve kabarma olasılığı olumsuz ve özen göstermeyi gerektiren taraflardır. [1]

Kazık tipinin seçimine etkiyen etkenler ayrıntılı olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

- Ekonomi
- Kazık boyu, boyların eşit veya değişken olması, boyların değişken olması durumunda uygulanabilirlik.
- Mevcut zemin şartlarında, her tipin emniyetle taşıyacağı yük
- Kazıkların zeminde teşkilinde kolaylık, imalat hızı veya hazırlanma ve çakılma hızı
- Kazık başlarının kolay kesilmesi veya uygun olarak emniyete alınması
- Gerekirse kazık sayısını artırma kolaylığı
- Eski yapıya ilave kazık yapılması durumunda, önceden yapılmış kazıkların tipi
- Eğik kazık gerektiğinde, kazığın belli açıda teşkil edilebilme kolaylığı
- Uygulanacak tip için yüklenici ve işverenin tecrübesi

2.5. İmalat Sırasında Zemin İçine Yerleştirme Tarzı

Kazıkların zemin içinde neden oldukları sıkışma ve ötelenme yönünden sınıflandırılmaları ile “deplasman kazıkları” ve “deplasman yaratmayan kazıklar” tanımları ortaya atılmıştır. “Deplasman kazıkları”, isminden de anlaşılacağı gibi zemin içine çakılırken yerini aldıkları zemini yana doğru iterek yer değiştirmeye sebep olan çakma kazıklarıdır. Diğer bir deyişle çakma işlemi sırasında kazığın

zemin içine itilmesi nedeni ile yanlara doğru sıkışan zeminde bir hacim değişmesi söz konusu olur. Bu tip kazık kategorisine; önceden dökülmüş betonarme kazıklar ile, yukarıda sözü edilen “Franki” kazıkları dahildir.

“Deplasman yaratmayan kazıklar” ise yukarıda tanımlanan, genelde fore kazık olarak bilinen ve zeminde önce bir sondaj deliği açılarak bu deliğin içine beton (gerekirse demir donatılı olarak) yerleştirilmek sureti ile imal edilen kazıklardır. Burada kazığın içine yerleşeceği zemin önceden hafredilmiş olduğundan kazık imal edilirken zeminin ötelenmesi veya sıkışması söz konusu olmaz dolayısı ile bunlar “Deplasman kazığı” değildirler.

Kazıklar, taşıdıkları yükün niteliğine göre de adlandırılabilirler. Örneğin “sıkıştırma kazığı” adı verilen kazıklar gevşek kumlu zeminlerin içine çakılarak meydana gelen şok neticesinde zeminin sıkıştırılmasını sağlarlar.

Çekme kuvveti taşıyorlarsa “çekme kazığı” bir miktar yanal yük karşılamak için eğik çakılmışlarsa “Eğik Kazık” denebilir. Bazı kazıklar, bir kuşaklama kirişi üzerinde ankraj yapılarak dayanım duvarı elemanı olarak görev yaparlar. Bu tür kazıklar; duruma göre birbirleri ile ayrık durumda olabilecekleri gibi kesişebilirler. Kesişmeleri halinde kazıklardan biri donatılı, komşusu donatısız olarak yapılır. Böyle bir tasarımda önce kazıklar yapılır sonra kazı, kademeli olarak devam ederken gereken kademelerde kazıkların meydana getirdiği perde gerekli aralıklarla zemine usulünce ankrajlanır ve kazı ile beraber perde duvar inşa edilmiş olur. [4]

3. DÜŞEY YÜK ALTINDA TEK KAZIĞIN DAVRANIŞI

3.1. Genel

3.1.1. Kazık Dayanımının Hesaplanmasında Temel Yaklaşımlar

Her türlü kazık tipi ve aplikasyon metodu, kazığı çevreleyen zeminin stabilitesini değişik şekillerde bozar. Bu etki kazıkların taşıma kapasitesinde artma veya azalmaya neden olabilir, böylece kazıkların nasıl yapıldıklarını esaslı olarak anlamak, yükleme kapasitesinin hesabının pratik olarak formulize edilmesinde gereklidir.

Kazıklı temeller genellikle en az üç kazıktan oluşan kazık gruplarından oluşurlar. Bu yüzden pratikte önemli olan kazık grubunun taşıma gücünün belirlenmesidir. Kazık grubunun taşıma gücünün belirlenmesi için ise tek kazığın taşıma gücünün bağlı olduğu faktörler bilinmelidir.

Kazığın taşıma gücü, kazığın göçmeden veya aşırı oturmalar göstermeden taşıyabileceği en büyük yük olarak tanımlanmaktadır. Taşıma gücüne nihai (sınır) yük de denebilir. Proje yükü, nihai yükün bir güvenlik sayısına bölünmesiyle bulunabilir. Servis yükü ise tekil bir kazık için bulunan proje yükünün, kazıkların grup tesiri göz önüne alınarak küçültülmesi ile elde edilir. [1]

Bir kazığa gelen düşey yük kısmen kazığın uç direnci kısmen de çevre sürtünmesi ile karşılanır. Kum içindeki tekil bir kazığın çevre sürtünmesi:

- a-) Kumun sıkılığına,
- b-) Kazığın şekline ,
- c-) Yüzey pürüzlülüğüne,
- d-) Kazığın yerine doldurduğu kumun hacmi ne bağlıdır.

Kumlarda uç direnci de çevre sürtünmesi de derinlikle beraber artar. Homojen bir kum tabakasında kazık çakılırken, çevre sürtünmesi çakılmaya karşı koyacaktır. Kazığın aşağıya doğru hareketi kazık çevresindeki basıncı arttıracak ve böylece çevre

sürtünmesi, taşıma gücünün yarısından da büyük olacaktır. Oysa kazık yukarı çekilirken oluşacak çevre sürtünmesi taşıma gücünün yarısından küçüktür.

Yumuşak kil veya plastik kil içindeki sürtünme kazığının uç direnci, çevre sürtünmesi yanında ihmal edilebilir. Tamamıyla zemin özelliklerine bağlı olarak bir miktar artar. Yumuşak bir kile çakılan kazık, çakılırken çevresindeki zemin halkasını örseler. Örselenmiş bölgede kayma direnci azalır. Bununla birlikte örselenen halkanın bir ay gibi kısa bir zamanda konsolide olması sonucu kazık çevresinde eskisinden daha sağlam bir bölge oluşur. Kazığa gelecek olan yapı yükleri kazık çakıldıktan sonra birkaç ay geçmeden kazığa yüklenemeyeceğinden kazık çakılması sırasında ortaya çıkan direnç azalması önemsizdir. Tecrübelerle dayanarak denilebilir ki; yumuşak kil ve plastik siltler içine çakılmış bir kazığın taşıma kapasitesi hesabında birim çevre sürtünmesi, drenajsız kayma mukavemeti veya serbest basınç dayanımının yarısına eşit alınabilir. Katı killerde durum yumuşak killerden farklıdır. Yumuşak kil kazık çevresini tamamen sarar ve adhezyon kilin kayma direncine eşit olur. Oysa katı kilde kazık çakılırken kazıkla kil arasında kalacak boşluk ve zemin örselenmesi yüzünden çevre sürtünmesi azalır. Çevre sürtünmesinin değeri, serbest basınç direncinin yarısından küçük olur.

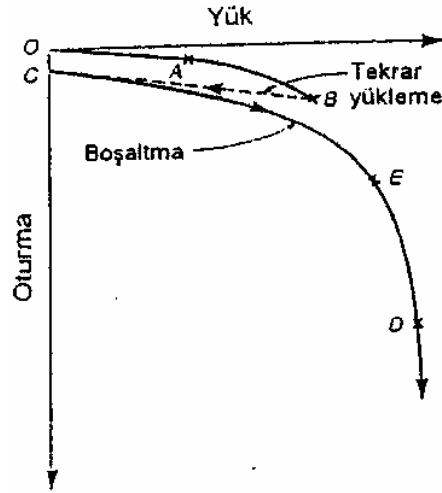
Yükü, derinde bulunan sağlam zemin tabakalarına iletmek için uç kazıkları kullanılır. Uç kazıkları yükün uygulanmasından sonra kısa bir süre için sürtünme kazığı olarak çalışır. Yükün önemli bir kısmı çevre sürtünmesi tarafından taşınır. Kazık, yumuşak kil veya silt gibi tabakaların içinden geçiyorsa, negatif çevre sürtünmesi nedeni ile kazık üzerine gelen yük artar. Eğer bu yük kazık ucu seviyesindeki zeminin taşıyabileceğinden daha büyük bir değere erişirse, oturmada çok büyük olur ve tehlike haftalarca sürecektir bir kazık yükleme deneyi ile bile anlaşılmayabilir. Bu yüzden, uç kazıklarında kazığın toplam taşıma gücünden çok, uç direncini bilmek daha önemlidir.

Kazık taşıma kapasitesinin ne kadarının çevre sürtünmesi ne kadarının uç direnci ile karşılandığı sadece zemin cinsi ve kazık boyutlarına değil aynı zamanda kazığın imal ve yerine yerleştiriliş şekline bağlıdır. Ahşap kazıklar ve dışarıda hazırlanmış betonarme kazıklar bir tokmağın kazık başına düşürülmesi ile zemine çakılır veya içi boş alt ucu çakma sırasında kapalı tutulan bir çelik boruyu zemine çakmak sonra borunun içini betonlayıp boruyu yukarı çekmektir. Böylece kazığın çakımı

sırasındaki etkide azaltılmış olur. Sondaj deliğine beton dökülerek de kazık imal edilebilir.

3.1.2. Yük Altındaki Tek Kazığın Davranışı

Pratik tasarım amaçları için mühendisler kazığın tesisinden kısa bir bağıl zaman sonra taşıma kapasitesi hesaplarını yüklemenin uygulanmasına dayandırmalıdır. Bu hesapların güvenilirliği, kazık tesisinden sonra, kısa bağıl süreler sonunda tekrar tekrar yapılan yükleme testleri ile değerlendirilmiştir.

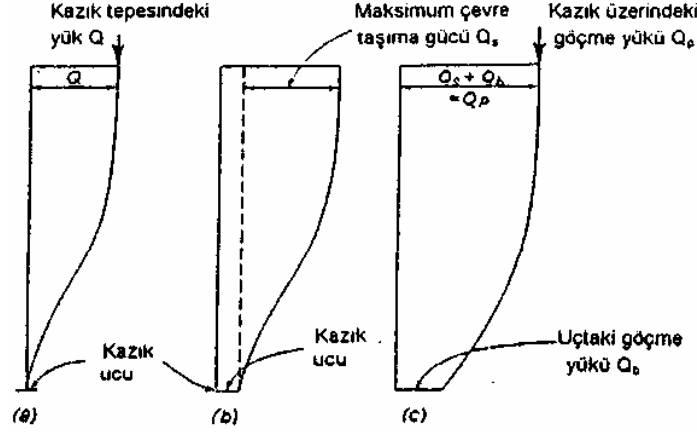


Şekil 3.1. Kazık Göçme Yüğü İçin Yük-Oturma Eğrisi [1]

O ile A noktası arasında yük ile oturma arasındaki ilişkili lineerdir. A noktasından sonra akma başlamıştır ve B noktasına kadar kayma ve kazık- zemin ara yüzü oluşur. B noktasında kazık üzerindeki yük boşaltılacak olursa, kazık başı C noktasına dönecektir. Düşey eksendeki OC mesafesi “ kalıcı oturma” olarak adlandırılır. C, E ve D noktaları arasındaki eğri üzerinde kazık uç direncinin mobilize olduğu ve D noktasında kazık uç direncinin tamamen mobilize olduğu görülmektedir. Maksimum çevre sürtülmesini mobilize eden hareketin kazık çapının %0,3- 1,0 kadar, uç direncini mobilize eden hareketin kazık taban çapını %10-20’si kadar olduğu tespit edilmiştir. D noktasından itibaren yükteki çok küçük artışların, büyük deplasmanlara neden olduğu görülmektedir.

Kazık çevresine bir ölçüm düzeneği kurulacak olursa, şekil 3.1 ‘de verilen A, B ve D yük değişim mertebelerinde kazıktan zemine aktarılan yük değişiminin şekil 3.2 deki gibi olduğu görülür. Bu şekillerde A noktasına kadar kazık üstündeki yüklerin çevre sürtünmesi ile karşılandığı, A ile B noktası arasında yükün çevre sürtünmesi ile

birlikte kazık uç direnci tarafından karşılandığı ve B noktasında ise kazık uç direncinin en büyük değerine ulaştığı ve çevre sürtünmesi ile yük aktarımının olmadığı görülmektedir.

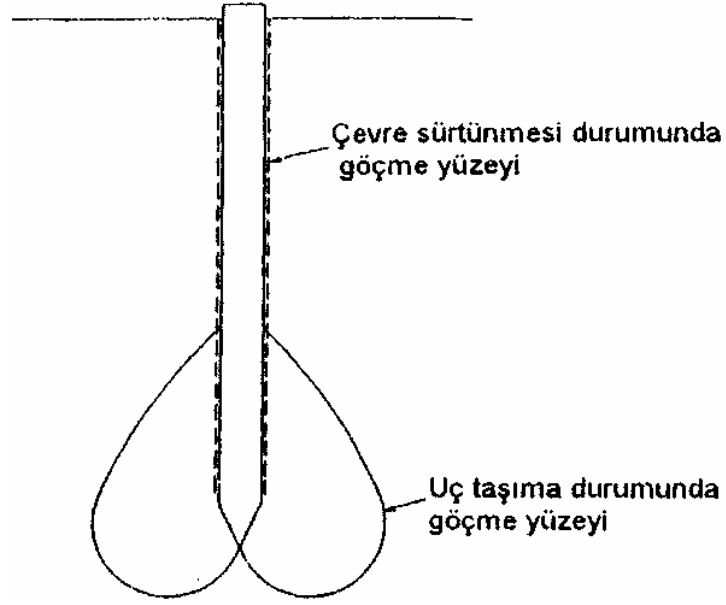


Şekil 3.2. Kazıklarda Yük Transferi [1]

- a-) Şekil 3.1' de verilen yük-oturma eğrisindeki A noktasında yük transferi durumu.
- b-) Şekil 3.1' de verilen yük-oturma eğrisindeki A-B noktaları arasındaki yük transferi durumu.
- c-) Şekil 3.1' de verilen yük-oturma eğrisindeki D noktasında yük transferi durumu.

3.1.3. Göçme Yükünün Tanımı

Şekil 3.1 deki D noktasına uygun gelen yükleme, kazığın uç direnir ve son sınır durumunu ifade eder ve kazık ucunun altındaki kaya veya zeminin genel kayma kritiğinin olduğu aşama olarak tanımlanır. Yinede bu aşama yapı tasarımcılarının akademik ilgi alanına girer. 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 safhada Şekil 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' de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Düşey Yükler Etkisi Altındaki Kazıklarda Kayma Yüzeyleri [1]

3.1.4. Kazıklarda İzin Verilen Yükler

Uygulanabilir yükleri hesaplamak için gerekli olan mükemmel bir tasarım metodu, tüm aşamaları boyunca birincil yüklemeden nihai kritik sonucu veren noktaya kadar, yük-şekil değiştirme yayını önceden bildiren bir metottur. Yapısal bir tasarımcı böyle bir yaydan faydalanarak müsaade edilebilir sınırlar içinde yapının şekil değişmesini korumak için yükü kazıklar üzerinde yayabilmelidir. Bir geoteknik mühendisi, zemin özelliklerindeki değişmelere ve kazıkları fazla yüklemeden dolayı oluşabilecek deformasyona karşı gerekli korumayı sağlamak için uç direnci üzerinde yeterli güvenlik faktörünü sağlamalıdır.

Maalesef bu şekilde bir tasarım metodu, tüm kazık türlerine uygulanabilecek bir dereceye kadar geliştirilememektedir. Tam ölçekli deneme kazıkları üzerindeki dinamik testlerin veya yüklemenin yükselmesinde teknolojinin şu andaki durumunda yapılabileceklerin en iyisi test çukurunda veya kazık deliklerinin tabanına yerleştirilmiş olan levhalarda yükleme testleri yapmaktadır. Alternatif olarak zemin yerleşmesi, laboratuvar testlerinden yahut araziden tespit edilmiş kaya veya zemin şekil değiştirmesi özellikleri bilgilerinden hesaplanabilir. Yinede kazığın tabanı ve gövdesi tarafından taşınan yükün göreceli orantılarını hesaplamak için gereklidir. Uygulanabilir kazık yüklerinin tayini sorununa genel yaklaşım, yoğrulmuş zeminlerin fiziki özelliklerinden kazığın uç direncinin önceden bilebilmek ve o

zamanda uygulanabilir yükleri tespit için bu değere keyfi bir faktör uygulamaktır. Güvenlik faktörünün değeri; zemin özelliklerinin değişkenliğine, ampirik metotlarla kazık uç direncinin önceden saptanmasında mühendise itimada veya itimat eksikliğine ve yüklemeler halinde kazığın müsaade edilebilir hareketine bağlıdır.

600 mm civarındaki çapların her tür kazık için hem kum hem de kilde yapılan kritik değerlerin elde edildiği, çok fazla sayıdaki yükleme testi deneyimleri gösterdi ki; güvenlik faktöre 2,5 alındığında, uygulanabilir yük kazığın son direnci/2,5 olacaktır. O zaman yükleme anındaki yerleşme arzu edilmeyen bir şekilde 10 mm yi aşacaktır. Yine de belirsizlikler son yük hesaplamalarına atfedildiğinden, sürekli işler için önerildiği gibi aynı tipin denenmiş olduğu bir kazık üzerinde yükleme testi yapmak veya yükleme anında yerleşmenin kabuledilebilirliğini teyit etmek için benzeri birkaç test yapmak gereklidir. Projelerin fazla sayıda kazığı kapsamı durumunda olayın ekonomik şartlarda cereyan etmesi değişen uzunluklara sahip kazıkların testlerinin kritizasyonu veya kazık ebadının ve aplikasyon metodunun en yeterli kombinasyonlarla belirlenmesi için sırayla değişik türler vasıtasıyla sağlanır.

BS8004, güvenlik faktörünü çeşitli özelliklere sahip olduğu için 2-3 arasında tavsiye etmektedir. Eurocode metotları ile alışlagelmiş metotlar arasındaki kazık kapasitesinin karşılaştırılması; Eurocode faktörlerinin genellikle yüzey sürtünmesinin hesabı için ortalama kayma gerilmesini, taban direncini hesabı içinde daha düşük bağ kuvvetlerini kullanarak, alışlagelmiş bir biçimde hesaplanmış olan kapasite üzerinde, 2 gibi denk bir güvenlik katsayısı ürettiğini göstermektedir.

Eurocode 7 düzenlemelerini kullanırken, prosedürde ilk olarak; uygulanabilir yükün kazık materyali toprak yada kayanın nihai sınır durumunu geçmemesi gerektiğini kontrol etmek, sonrada sınır durumunun, kazık yada kazık grubunun üzerinde desteklenmiş yapılarda, makine aksamında veya aşırı şekil değiştirmeler ve başka hareketler sonucu yapılan servislerde, zarara sebebiyet vermeyen bir yük olarak tamamlandığı yerde, kazık başlığı yerleşmelerini, kazığın sınır durum dayanıklılığını kontrol etmek için yapılan yükleme testlerinden veya hesaplama belirlemektir. Genellikle tasarım yükünü sınır durum dayanıklılığını tayin eder.

Uygulanacak güvenlik sayısı maksimin yük kapasitesinin tahminindeki güvenlik ve kazığın imalat sırasındaki denetime bağlı olarak değişebilir. Bu durumlar için AASHTO(1992) tarafından önerilen değerler tablo 3.1 de verilmektedir.

Tablo 3.1 Kazık Taşıma Güçleri İçin Güvenlik Sayıları [5]

Kontrol ve Tahmin⁽¹⁾	Artan Yapım Kontrolü				
Zemin İncelmesi	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	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) Yüklemeye deneyinin dahil edildiği herhangi bir kontrol kombinasyonunda 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 [5]

Taşıma Gücü Tahmini ve Denetim	Yük Koşulu	Min FS	
		Basınç	Çekme
Kazık yükleme deneyi ile doğrulanan kurumsal veya ampirik tahmin	Olağan	2,00	2,00
	seyrek	1,50	1,50
	Çok Seyrek	1,15	1,15
Kazık Çakma analizi ile doğrulanan kurumsal veya ampirik tahmin	Olağan	2,50	3,00
	seyrek	1,90	2,25
	Çok Seyrek	1,40	1,70
Yükleme Deneyi ile doğrulanmayan kurumsal veya ampirik tahmin	Olağan	3,00	3,00
	seyrek	2,25	2,25
	Çok Seyrek	1,70	1,70

3.2. Kazıkların Taşıma Gücü

3.2.1. Genel

Bir kazığın taşıma gücünü kazık-zemin etkileşimi yönünden belirleyen başlıca iki etken, kazığı çevreleyen zeminin taşıma gücünü oluşturan mekanik özellikleri ile kazığın yapıldığı malzemenin dayanımını oluşturan mekanik özellikleridir. Bu iki özellik kullanılarak kazık ve zemin ayrı ayrı değerlendirilir ve her ikisinin de uygulanan yük altında sağlam kalacakları kanıtlanır. Tasarım aşamasında öncelikle uygulanan yükün, kazığın yapıldığı malzemeye bağlı olan toplam kesit direncini aşmamasına özen gösterilir. Zemin dayanımı yönünden kazıkların taşıma gücü, önce teorik veya ampirik formüllerle bulunur. Formüller, kazık-zemin etkileşiminin statik dengesini yansıtan veya çakma kazıklarda kazığı çakmak için harcanan enerji

ve/veya yapılan işi esas alan bağıntılardır. Kazıkların taşıma güçleri, bunları arazide yüklemek sureti ile de saptanabilir. Bu hususlar, aşağıda incelenecektir. [4]

3.2.2. Statik Kazık Formülleri

3.2.2.1 Genel

Bir kazığın çevre zemini açısından toplam taşıma gücü genellikle iki bileşenden oluşur. Bunlar uç direnci Q_u ve çevre sürtünmesi Q_ϕ bileşenleridir.

$$Q_{top}=Q_u+Q_\phi \quad (3.1)$$

Q_{top} = Toplam Taşıma Gücü,

Q_u = Uç Direnci

Q_ϕ = Çevre Sürtünmesi Direnci

olmaktadır. Pratikte 3.1 denklemini ile bulunan değere bir güvenlik sayısı uygulanarak servis yükü elde edilir. [4]

3.2.2.2 Uç Direnci

Aşağıdaki paragraflarda, bu direncin hesaplanması için varolan belli başlı yöntemler sunulmaktadır:

3.2.2.2.1. Uç Kazıklarında Uç Direnci

Uç kazıklarının uçları sert bir taşıyıcı zemin içine tespit olunurlar. Genellikle bu taban zemininin taşıma gücü, kazığın yapıldığı malzemenin basınç mukavemetinin üstündedir. Bu nedenle bir uç kazığının toplam taşıma gücü kazığın yapısal kesit direncine eşittir. Yukarıdaki 3.1. formülünde yalnızca Q_u göz önüne alınır. Grupta n adet kazık var ise grubun taşıma gücü $Q_g = n \times Q_u$ olur.

3.2.2.2.2. Sürtünme Kazıklarında Uç Direnci

Bu direncin hesaplanması için yapılmış olan çalışmalara kronolojik bir sıra içinde bakılırsa bunların; kazık ucunu bir yüzeysel temelin zeminle dokunma yüzeyi olarak kabul eden yaklaşımlardan başlayarak aynı ilkeye dayanan

çeşitlemelerle devam ettikleri söylenebilir. Bu direnç Terzaghi (1967) taşıma gücü teorisi kullanılarak dairesel kesitli kazık uçları için aşağıdaki gibi yazılabilir: [4]

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} (1.3c_n + \gamma L(N_q - 1) + 0.3\gamma d N_\gamma) \quad (3.2)$$

L = Kazığın zemin içinde kalan toplam boyu,

c = Zeminin kohezyonu,

γ = Zeminin efektif birim hacim ağırlığı,

d = Kazık çapı,

N_γ, N_q, N_c = Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayılarıdır.

N_q katsayısının denklemlerde $N_q - 1$ olarak alınması, kazığın, net taşıma gücü ifadesinin kullanılması nedeniyledir. Diğer bir deyişle; kazığın yapılabilmesi için çıkarılan veya yer değiştiren zeminin ağırlığını temsil eden bir miktar, taşıma gücünden eksiltilmektedir.

Kare kesitli bir kazık için uç direnci:

$$Q_u = B^2 (1.3cN_c + \gamma L(N_q - 1)) \quad (3.3)$$

olur. B kare enkesitli bir kazığın kesit boyutudur. Granüler bir zeminde ($c=0$) taşıma gücü, (3.2) bağıntısında derinlik etkisini gösteren üçüncü terim genellikle birincinin yanında ihmal edilebilir. Bu durumda taşıma gücü ifadesi aşağıdaki şekle girer

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} \gamma L(N_q - 1) = A_p \cdot \sigma_v' \cdot (N_q - 1) \quad (3.4)$$

Terzaghi (1967), taşıma gücü katsayılarını zeminin içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olarak aşağıda Tablo 3.3 'de gösterildiği gibi vermiştir.

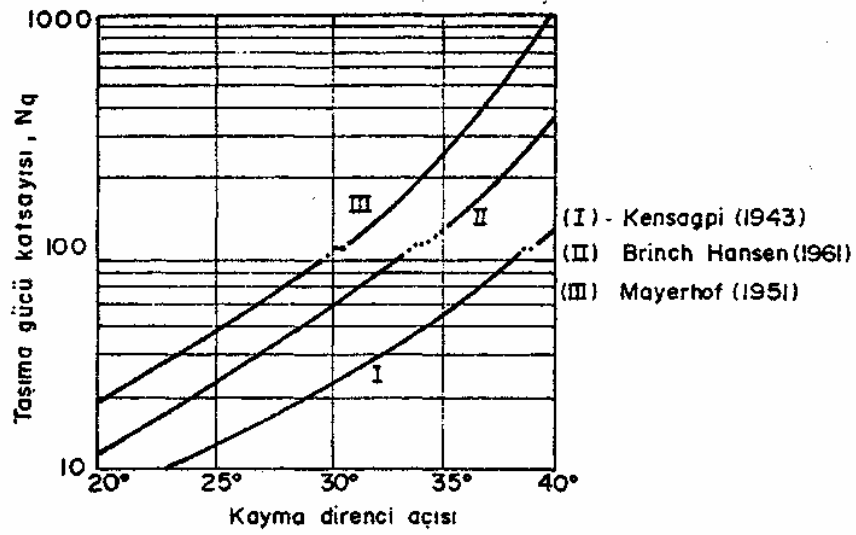
Tablo 3.3. Taşıma Gücü Katsayıları [4]

Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	N _c	N _q	N _γ
0°	5.7	1.0	0.0
5°	7.3	1.6	0.5
10°	9.6	2.7	1.2
15°	12.	4.4	2.5
20°	17.	7.4	5.0
25°	25.1	12.7	9.7
30°	37.	22.5	19.7
35	57.8	41.4	42.4
40°	95.7	81.3	100.4

Kumlarda, kohezyon sıfır alınarak uç direnci:

$$Q_u = \frac{\pi l^2}{4} (\gamma L N_q + 0.3 \gamma_d N_\gamma) \quad (3.5)$$

Burada A_p = kazık kesit alanı, σ'_v = kazık ucunun bastığı seviyede etkiyen efektif düşey zemin gerilmesidir. N_q için çeşitli araştırmacıların tavsiye ettiği değerler Şekil 3.4' de beraberce gösterilmiştir. Bu değerler, Terzaghi tarafından verilen değerlerden (Tablo 3.3) farklıdır. Ancak kazık yükleme deneylerinin sonuçlarından yararlanılmak sureti ile geriye hesap yapılarak elde edildikleri için kıymet taşımaktadırlar.



Şekil 3.4. Taşıma Gücü Katsayısı N_q Ordemir,(1984) [4]

Yukarıdaki şekilde sunulan Meyerhof eğrisi yıllar içinde değişerek aşağıda Şekil 3.5' de sunulan şekle gelmiştir.

Kohezyonlu zeminlerde ise uç direnci:

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} (1.3cN_c + (D_f - 1) \gamma L) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada taşıma gücü katsayıları Tablo 3.3' den alınarak yerlerine konduklarında:

$$Q_u = 5.8d^2c \quad (3.7)$$

ifadesi bulunur. Zemin kohezyonunu gösteren c değeri yukarıdaki ifadede kullanılırken bir azaltma faktörü ile çarpılabilir. Örneğin fisürlü Londra killeri için zeminin ferahlama davranışı düşünülerek 0.75 faktörü kullanılmıştır.

Diğer taraftan Skempton'un (1951) dairesel temeller için taşıma gücünün derinlikle arttığı şeklindeki bulgusu kullanıldığında yumuşak killi zeminlerde kazık uzunluğunun, kazık çapının 20 katının üstünde olduğu pratik haller için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir:

$$Q_u=7d^2c \quad (3.8)$$

Bazı araştırmacılar uç direnci (Q_p):

A_p = Kazık ucunun kesit alanı,

q_p = Birim alana düşen uç direnci

olmak üzere aşağıdaki gibi ifade ederler:

$$Q_p=A_p*q_p \quad (3.9)$$

Granüler-Kohezyonlu bir zeminde toplam uç direnci (3.10) ifadesi ile hesaplanabilir.

$$q_p=A_p(cN_c^* + \sigma_v'N_q^*) \quad (3.10)$$

burada;

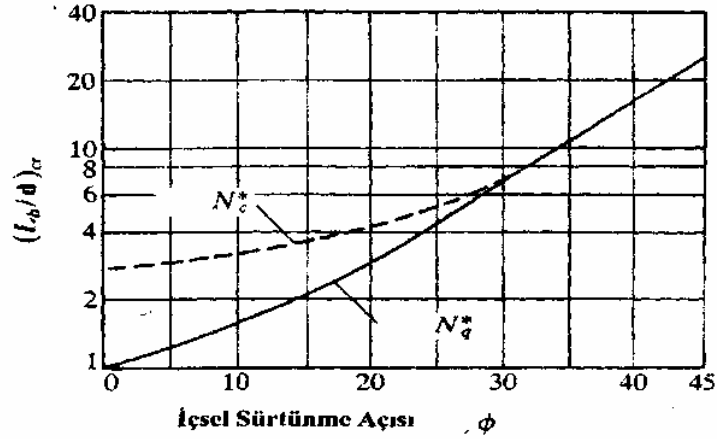
c = Zeminin kohezyonu,

σ_v' = Kazık ucundaki düşey efektif gerilme,

N_c^* , N_q^* = Taşıma gücü katsayılarıdır.

Bu ifadedeki taşıma gücü katsayıları kazık ucunun biçim ve derinlik etkilerini yansıtırlar.

Meyerhof (1979), yukarıda sözü edildiği gibi, granüler zeminlerdeki uç direnci için değişik bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, kazık ucu direncinin derinlikle arttığını ancak belli bir kritik L_b , derinliğinden sonra değişmediğini ifade etmektedir. Bu derinlik; kazık çapı (d) cinsinden "Kritik Gömülme Oranı $(L_b/d)_{cr}$ " ile ifade edilir Bu oranın; Şekil 3.5 de gösterildiği şekilde içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olduğu belirtilmektedir.



Şekil 3.5. L_b/d_{cr} Oranının İçsel Sürtünme Açısına Göre Değişimi (Meyerhof,1979) [11]

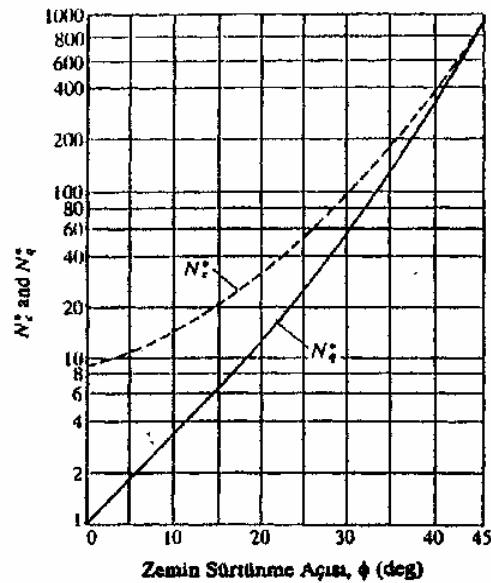
Bu durumda granüler zeminlerde ($c=0$) uç direnci aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q_u = A_p \cdot \sigma_v' \cdot N_q \quad (3.11)$$

Hesap yapılırken σ_v' değeri Şekil 3.5 kullanılarak bulunur. Bunun için zeminin içsel sürtünme açısı değeri ile abağa girilir ve "Kritik Gömülme Oranı" bulunur. Buradan L_b saptanır.

$\sigma_v' = (\text{Zeminin Efektif Birim Hacim ağırlığı}) \times L_b$ olur.

N_q^* ise Şekil 3.6. den elde edilir.

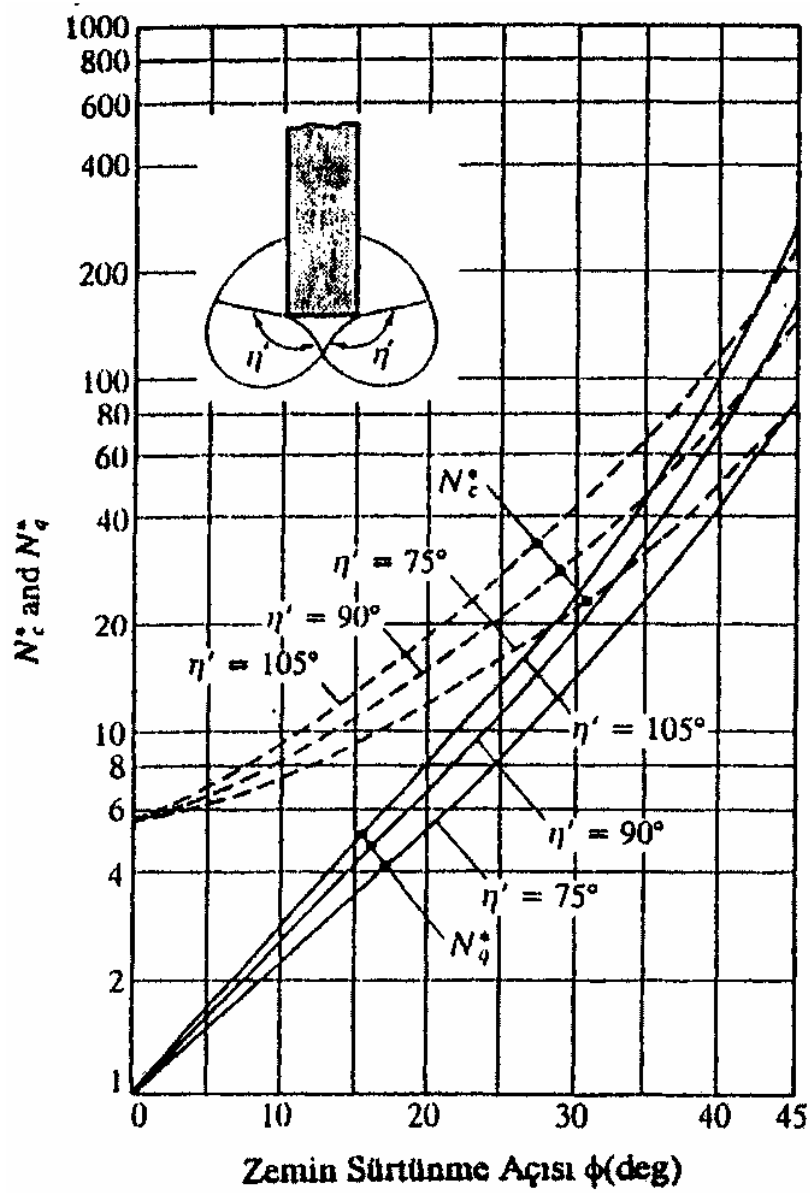


Şekil 3.6. N_c^* ve N_q^* Değerlerinin İçsel Sürtünme Açısı ile Değişimi (Meyerhof,1979) [5]

Suya doygun killer içindeki kazaklarda ise ($\phi=0$) (3.10) ifadesinden (3.7) ve (3.8) ifadelerine benzer şekilde aşağıdaki ifade elde edilir. Burada C_u kazık ucunun bastığı zeminin drenajsız direncidir:

$$Q_p = 9 \cdot c_u \cdot A_p \quad (3.12)$$

Kumlu-Killi Zeminlerde Janbu (1976) (3.10) ifadesini kabul etmekle beraber taşıma gücü katsayılarının kazık ucunda η açısı ile tanımlanan bir taban göçmesi yüzeyi sekline göre Şekil 3.7 den alınmasını öngörmektedir. [4]



Şekil 3.7. Janbu'nun Taşıma Gücü Değerleri (Janbu,1976) [4]

3.2.2.3. Çevre Sürtünmesi Direnci

Granüler zeminlerde zemin ile kazık arasında fiziksel sürtünme, killi zeminlerde ise adezyon hareketlenmesi nedeni ile çevre sürtünmesi direnci oluşur. Bu direnç, aşağıda görüleceği gibi birim alanda oluşan direncin kazığın çevre yüzeyi ile çarpılması sonucu bir toplam taşıma gücü değerine ulaşır. [3]

3.2.2.3.1. Genel Formülasyon

Çevre zemini ile kazık çeperi arasındaki çevre sürtünmesinden doğan bu taşıma gücü bileşeni; kazığın içinde bulunduğu her tabakanın çevre sürtünmesi ayrı ayrı hesaplanıp toplanmak suretiyle bulunur:

Bu anlatım, aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$Q_{\text{ç}} = \sum p_i \cdot \Delta L_i \cdot f_i \quad (3.13)$$

Burada;

P = Kazık enkesitinin çevre uzunluğu,

ΔL_i = Kazığın değişik zemin tabakaları içindeki uzunluğu,

f_i = Kazığın her bir zemin tabakası içindeki birim çevre sürtünmesi değeridir.

(3.13) Denkleminde anlaşılabacağı üzere kazığın çevre sürtünme direncini hesaplamak için zeminin birim çevre sürtünmesi değeri olan (f_i) nin bilinmesi gerekmektedir. [4]

3.2.2.3.1.a. Kohezyonlu Zeminlerde Birim Çevre Sürtünmesi Değerleri (f_i) [4]

Granüler Zeminlerde bu değerlerin hesaplanması sırasında göz önünde tutulması gereken bazı özellikler vardır.

1. Kazık yapım Yöntemi: Çakma kazıklarda zemin sıkışacağından içsel sürtünme açısının değeri artar.
2. (f_i) değeri kritik bir L' derinliğine kadar doğrusal şekilde artar ve bu derinlikten sonra sabit kalır. Bu L' değerleri d kazık çapı olmak üzere aşağıdaki gibi alınabilir.

L' : Gevşek kumlar için 10d

L' : Orta sıkılıktaki kumlar için 15d

L' : Sıkı kumlar için 20d

3. Eşdeğer derinliklerde gevşek kumların bünyesinde aşırı yer değiştirmeye neden olan bir kazığın çevresinde oluşan birim sürtünme değeri az yer değiştirmeye neden olan bir kazığın çevresinde oluşan değerden fazladır.

4. Eşdeğer derinliklerde fore kazıkların çevresinde, çakma kazıklara nazaran daha düşük sürtünme değerleri oluşur.

Bu özellikler dikkate alınmak kaydı ile birim çevre sürtünmesi için derinlik (z) boyunca aşağıdaki hesap kriterleri verilebilir.

$$L' > z > 0 \text{ için } f_i = K_i \sigma_{vi}' \tan \delta_i \quad (3.14)$$

$$L' > z > L' \text{ için } f_i = (f_i)_{z=L'} \quad (3.15)$$

Burada;

K_i = (i) Zemin tabakasının efektif yanal toprak basıncı katsayısı,

σ_{vi}' = (i) Zemin tabakasında efektif düşey gerilme,

δ_i = (i) Zemin tabakasında kazık-zemin arası sürtünme açısıdır.

Zemin tabakasının Efektif Yanal Toprak Basıncı Katsayısı (K) değerleri Kazık imal tarzına göre Tablo 3.4. de verilmektedir.

Tablo 3.4. Kazık Tipine Göre K Değerleri [5]

Kazık Tipi	K
Fore Kazıklar	$\approx K_0 = 1 - \sin \Phi$
Az Deplasman Yapan Kazıklar	$\approx K_0 \text{ ila } 1.4K_0$
Yüksek Deplasman Yapan Çakma Kazıklar	$\approx K_0 \text{ ila } 1.8K_0$

Yüksek deplasman yapan kazıklar için ayrıca aşağıdaki formüller önerilmektedir.

$$K \cdot \tan \delta = 0.18 + 0.0065 D_r \quad (3.16)$$

$$K=0.5 + 0.008 D_r \quad (3.17)$$

Burada D_r =Rölatif Sıkılık Derecesidir(%). Tablo3.4 ve Tablo3.5’ de Kulhawy(1984) tarafından önerilen K ve δ değerleri yer almıştır.

Tablo 3.5 Geostatik Katsayıya Oranla K Değeri [1]

Kazık Tipi	K/K ₀
Yüksek Deplasmanlı Çakma Kazık	1-2
Alçak Deplasmanlı Çakma Kazık	0.75-1.75
Fore Kazık	0.71-1
Su Jeti ile Çakılan Kazık	0.5-0.7

Geostatik Toprak Basınç Katsayısı K_{0i} göz önüne alınarak (3.13) bağıntısının (3.14) bağıntısına yerleştirilmesi halinde aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$Q_c = \sum d_i \Delta L_i \cdot K_{0i} \cdot \sigma'_{vi} \cdot \tan \delta_i \quad (3.18)$$

Tablo 3.6. Kazık-Zemin Sürtünmesi Değerleri [1]

Kazık/Zemin Temas Durumu	Kazık/Zemin Sürtünme Açısı, δ
Pürüzsüz veya Kaplanmış Çelik / Kum	$0.5\Phi' - 0.7\Phi'$
Kaba (ondürelili) Çelik / kum	$0.7\Phi' - 0.9\Phi'$
Önceden Dökülmüş Beton / Kum	$0.8\Phi' - 1.0\Phi'$
Yerinde Dökülmüş Beton/ Kum	$1.0\Phi'$
Ahşap / Kum	$0.8\Phi' - 0.9\Phi'$
Zemin İçinde Boru bırakılan Kazıklar	$0.7\Phi' - 0.85\Phi'$

(3.18) bağıntısında aşağıdaki semboller yer almaktadır.

i = Kazık derinliği boyunca kazığı çevreleyen değişik özellikteki zemin tabakaları,

d = Kazık çapı,

ΔL_i = Kazık boyunca kazığın içinden geçtiği her bir zemin tabakasının kalınlığı,

K_{0i} = Kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının sükunetteki yatay toprak basınç katsayısı (Geostatik Katsayı),

σ'_{vi} = Kazığın içinden geçtiği zemin tabakasındaki ortalama düşey efektif gerilme,

δ_i = Kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı.

Geostatik durumda yatay toprak basıncı katsayısı K_{0i} kumlarda içsel sürtünme açısının (Φ') bir fonksiyonu olup yaklaşık olarak :

$$K_{0i} \equiv 1 - \sin \Phi' \quad (3.19)$$

alınabilir. (Jaky,1984). Bazı araştırmalara bu katsayının daha kesin ifadesi:

$$K_{0i} = (1 - \sin \Phi') (OCR)_i^{0.5} \quad (3.20)$$

şeklindedir. Burada OCR, kil tabakasının aşırı konsolidasyon oranıdır.

Toplam çevre sürtünmesi direnci; yukarıdaki (3.18) bağıntısı kullanılarak, ΔL_i kalınlığındaki her ayrı (i) tabakası için hesaplanır ve kazık boyunca toplamı alınır.

3.2.2.3.1.b. Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi Direnci

Bu direnç genelde kilin drenajsız direnci, efektif düşey gerilme, kazık kesidinin şekli, kazık uzunluğu, kazık malzemesi gibi etkenlerin bir fonksiyonudur. Killi zeminlerde yüzeysel sürtünme rolü, adhezyon tarafından üstlenilmektedir. Bu tür zeminler için (3.13) ve (3.18) denklemlerinin benzeri aşağıdaki gibidir:

$$Q_\zeta = \sum d_i \cdot \Delta L_i \cdot \alpha_i \cdot c_i \quad (3.21)$$

Bu ifade diğer katsayılar (3.18) bağıntısındakilere eşdeğer şekilde tarif edilmekle beraber;

α_i = Kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının adezyon katsayısı,

c_i = Kazığın içinden geçtiği zemin tabakasının drenajsız kayma direncini göstermektedir.

Bu halde de toplam çevre sürtünmesi direncinin hesabına yukarıdaki (3.21) bağıntısı kullanılarak ΔL_i kalınlığındaki her ayrı (i) tabakası için hesaplanır ve kazık boyunca toplamı alınır.

Adezyon Katsayısı a_i aşağıda görüleceği gibi çoğu kez drenajsız kayma direncinin bir fonksiyonu olmaktadır:

$$f_{si} = \alpha_i c_{ui} \quad (3.22)$$

α_i = “Adezyon Katsayısı”dır.

Adezyon Katsayısı kohezyonun (c_{ui}); $25 < c_{ui} < 90$ (KN/m²) sınırları içinde kalan değerleri için aşağıdaki (3.23) ifadesi ile hesaplanabilir.

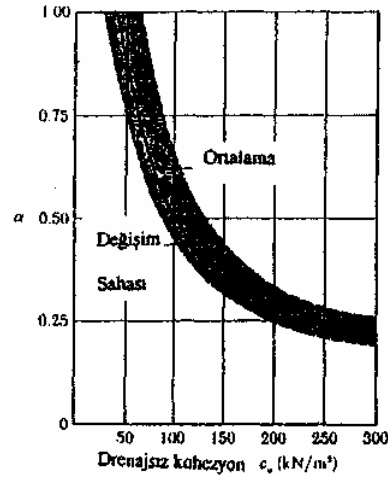
$$\alpha_i = 1 - 0.00615 * (c_{ui} - 25) \quad (3.23)$$

kohezyonun sınır değeri üstündeki; ($c_{ui} > 90$ KN/m²) değerleri için aşağıdaki, Tablo 3.7’de bulunan adhezyon katsayısı kullanılabilir:

C_{ui} = i tabakasının Drenajsız Kayma Direncidir. Bu değer, aşağıdaki Şekil 3.8 den de alınabilir.

Tablo 3.7. Adhezyon Katsayısı α_i [4]

c_{ui} Değeri	α_i Değeri
90	0,60
100	0.58
150	0.42
200	0.35



Şekil 3.8. Adhezyon Katsayısı Değerleri [5]

Aşağıdaki Tablo 3.8’ de sunulan değerler ise tasarımda kullanılmayan ancak çeşitli zeminlerdeki çevre sürtünmesi değerleri arasında kıyaslama yapılabilmesi için fikir veren değerlerdir:

Tablo 3.8. Yaklaşık Çevre Sürtünmesi Değerleri (f_s) [4]

Gevşek kum	25 kN/m ²
Sıkı kum	100 kN/m ²
Yumuşak kil-silt	10-30 N/m ²
Kumlu silt	20-50 kN/m ²
Katı kil	40-100 kN/m ²

Çevre sürtünmesi hesabı için Vijayvergia ve Focht (1972) tarafından ortaya atılan diğer bir yöntem (λ) Metodu olarak bilinir. Bu yöntemle göre ortalama adezyon (f_{av}) aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanır:

$$(f_{av} = \lambda(\sigma_v' + 2c_u)) \quad (3.24)$$

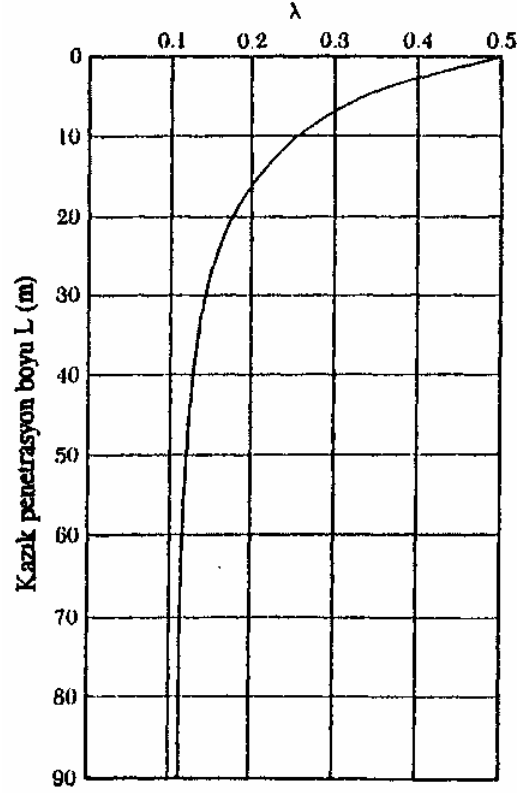
Burada σ_v' = Toplam kazık uzunluğu boyunca hesaplanan ortalama düşey efektif gerilme,

c_u = Ortalama drenajsız dayanımıdır ($\Phi=0$ hali).

Toplam direnç (3.25) bağıntısı ile verilmiştir.

$$Q_\zeta = p \cdot L \cdot f_{av} \quad (3.25)$$

L kazığın toplam uzunluğu, p enkesit çevresi uzunluğudur. λ değeri Şekil 3.9 da sunulmaktadır. [5]



Şekil 3.9. Kazık Penetrasyon Boyu ile λ Değerinin Değişimi [3]

Efektif gerilmelere dayanan diğer bir metot Burland (1973) tarafından önerilmiştir ve özellikle kazıkların çevre dirençlerini efektif gerilmeler cinsinden ele aldığından dayanımın uzun süreli değerlendirilmesinde kullanılır:

$$f = \beta \cdot \sigma_v' \quad (3.26)$$

σ_v' = Düşey efektif gerilme

$$\beta = K \cdot \tan \Phi_r,$$

Φ_r = Yoğrulmuş kilin efektif (drenajlı) içsel sürtünme açısıdır.

Geostatik katsayı olarak kabul edilen K değeri, (3.20) ve (3.21) ifadeleri kullanılarak (3.26) ifadesinde yerine konursa konsolide killeri için :

$$f = (1 - \sin \Phi_r) \cdot \tan \Phi_r \cdot \sigma'_v \quad (3.27)$$

ve ön yüklenmiş killeri için:

$$f = (1 - \sin \phi_r) \tan \phi_r \sqrt{OCR \sigma_v} \quad (3.28)$$

bağlantıları elde edilir.

Tablo 3.9' da bu katsayı için verilen diğer bazı değerler yer almaktadır. Bu değerler arazi kazık yükleme deneyleri sonuçlarının geriye dönük analizleri yapılarak elde edilmiştir.

Tablo 3.9 Kazık yükleme Deneylerinden Elde Edilmiş Adezyon Katsayıları (α) [4]

	Su İçeriği	(PI)	Direnç (KPa)	(α)
Katı Kil	23	35-55	120	0.44
Katı Kil	25	20-60	120	0.62
Masif Şeyl	15	7-16	500	0.64
Katı Kil	-	-	110	0.52
Katı Kil	19	36-46	140	0.3

3.2.2.3.1.c. Granüler-Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünme Direnci

Tomlinson (1981), çevre sürtünmesini hesaba katmak için aşağıdaki ifadeyi önermiştir:

$$f_i = \alpha_i c_i + \sigma_{vi}' K_i \tan \delta_i \quad (3.29)$$

Bu ifadede:

α_i =i Tabakasında adezyon faktörü,

f_i =i Tabakasında kazık-zemin arasındaki birim alana düşen çevre sürtünmesi,

δ_i = Kazık-zemin arasındaki efektif sürtünme açısı,

c_i = Ortalama kohezyon,

σ_{vi}' = Çevre sürtünmesinin hesaplanacağı tabakadaki ortalama düşey efektif gerilme,

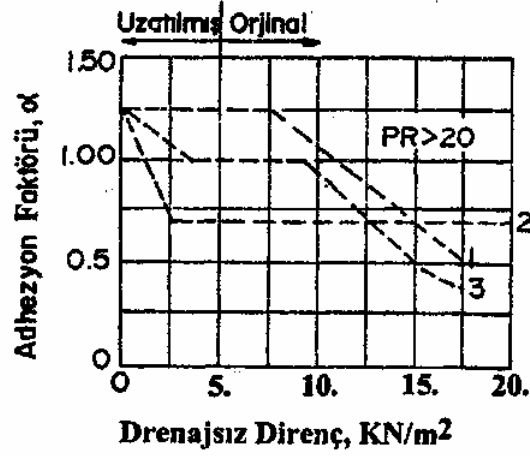
K_i = Yatay toprak basıncı katsayısıdır.

Burada yatay basınç katsayısı (K_i); (3.20) ifadesi ile hesaplanan geostatik katsayı K_0 ile 1.75 arasında bir değerdir. Genellikle K_0 değerine yakın seçilmesi önerilmektedir.

Tablo 3.10. Zemin Kıvamına Göre Adezyon Faktörü (α) (Tomlinson,1981) [8]

Zemin Durumu (1,2 veya 3)	Penetrasyon Oranı, (P_0)*	Faktör (α)
1.Sert veya çok sert kohezyonlu zemin üzerinde yer alan kum ve kum-çakıl	$P_0 < 20$ > 20	1.25 (Şekil 3.7 ye Bakınız)
2.Sert veya çok sert kohezyonlu zemin üzerinde yumuşak kil	$8 < P_0 < 20$ > 20	0.40 (Şekil 3.7 ye Bakınız)
3.Çok sert veya sert kohezyonlu zemin	$8 < P_0 < 20$ > 20	0.40 (Şekil 3.7 ye Bakınız)

Tomlinson (1981) değişik kohezyonlu zeminlere çakılmış kazıklar için (α) değerini aşağıda Penetrasyon Oranı* (P_0)' a bağlı olarak yukarıda Tablo 3.10 da verilmektedir. Aşağıda Şekil 3.10 değişik penetrasyon oranları için adezyon faktörünü göstermektedir.



Şekil 3.10. Adezyon Faktörü (Tomlinson, 1981) [4]

^(*)($P_0=PR$)= Kazığın Zemin İçindeki Boyu/Kazık Çapı

3.2.2.4. Yerinde Yapılan Arazi Deney Bilgilerinin Kullanıldığı Yöntemler

3.2.2.4.1 Statik Koni Penetrasyon Deneyi

Statik koni penetrasyon deneyinden faydalanılarak, kazık kapasitesinin tayini için iki yaklaşım benimsenmiştir:

Koni dayanım değerleriyle nihai kuyu sürtünmesi ve taban kapasitesi arasındaki korelasyonlar (De Ruyter ve Beringen, 1979; Bustamante ve Ganeselli, 1982; Poulos, 1989). [9]

Gömlek sürtünmesi ve nihai kuyu sürtünmesi arasındaki korelasyonlar (Schmertmann, 1975, 1978). Bu yaklaşımın gömlek sürtünmesinin belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle yukarıdaki metoda göre daha az güvenilir olduğu kabul edilir. [9]

Bustamante ve Ganeselli tarafından (1982) benimsenen metod Frank ve Mangan tarafından özetlenmiştir. Nihai kuyu sürtünmesi f_s , taban kapasitesi f_b , aşağıda verilmiştir. [9]

$$f_s = (q_c / b) \leq f_{sl} \quad (3.30)$$

$$f_b = k_c \cdot q_c \quad (3.31)$$

q_c : Ölçülen koni uç direnci,

b : Kuyu faktörü ,

f_{s1} : Çevre sürtünmesinin nihai limit değeri,

k_c : Taban katsayısı

Topla 3.11’de, zemin ve kazık tipine bağlı olan b ve f_{s1} ’ nin tavsiye edilen değerleri verilmiştir. Topla 3.12 ’de k_c ’ nin değerleri verilmiştir. Bu arada denklem kullanılan q_c ’ nin kazık tabanının 1.5 kazık çapı katı kadar altında ve üstündeki mesafedeki ortalama değer olması gerekir. Aşırı düşük ve aşırı yüksek değerler ortalamaya dahil edilmez.

Tablo 3.11. CTP için Nihai Çevre Sürtünmesi Korelasyonu (Melt, 1993) [9]

Kazık Tipi	Kil ve Silt			Kum ve Çakıl			Kireçtaşı	
	Yumuşak	Katı	Sert	Gevşek	Orta	Sıkı	Yumuşak	Ayrıışmış
Delme Kazık								
B	-	-	75 ^a	-	200	200	125	80
f_{s1} kPa	15	40	80 ^a	40	80 ^a	-	40	120
Kılıflı Delme								
B	-	100	100 ^b	-	100 ^b	250	125	100
f_{s1} , kPa	15	40	60 ^b	40	80 ^b	-	40	80
Ucu Kapalı								
Çelik Çakma								
Kazık	-	120	150	300	300	300		
B	15	40	80	-	-	120		
f_{s1} kPa							c	
Beton Çakma								
Kazık	-	75	-	150	150	150		
B	15	80	80	-	-	120	c	
f_{s1} ,kPa								

a) Yivli ve kesilip düzeltilmiş,

b) Kuru kazı, dönmesiz kılıf,

c) Bazı kazık tipleri için f , çok küçük değer alır bu durumlarda özel çalışmaya ihtiyaç duyulur.

3.2.2.4.2. Standart Penetrasyon Deneyi

Meyerhof’un 1956 yılında yayınladığı en büyük sürtünme direnci f_s , en büyük temel direnci ve SPT verileri arasındaki korelasyon günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha ileri korelasyon çalışmaları yine Meyerhof tarafından 1976’ da ve Poulos tarafından 1989’da yapılmıştır. Daha kapsamlı korelasyon çalışmaları

ise Decourt tarafından 1982-1995 arasında yapılan çalışmalarla geliştirilmiştir. Yapılan son çalışmalarda aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$f_s = \alpha \cdot (2.8 \cdot N_{60} + 10) \text{ kN m}^{-2} \quad (3.32)$$

$$f_b = K_b (N_{60})_b \text{ kN m}^{-2} \quad (3.33)$$

N_{60} : Kuyu boyunca elde edilen SPT değerleri (%60 enerji verimliliği ile düzeltilmiş)

$\alpha = 1.0$ (Killi zeminde yer değiştirme yapan kazıklar için)

$\alpha = 0.5 \sim 0.6$ (Ayrık daneli zeminde yer değiştirme yapmayan kazıklar için)

$(N_{60})_b$: Kazık ucu ve çevresindeki ortalama SPT okuması

K_b : Taban katsayısı Tablo 3.13'den

SPT verilerinin kullanımına ilişkin alternatif çalışmalarda yapılmıştır Robert (1997). Bu çalışmalardan elde edilen korelasyonlar daha çok çakma kazıklar için kullanılmaktadır, delme kazıklar için ise daha az kullanılır. Robert'in çalışmaları ahşap kazıkların, üniform kesitli çakma kazıklara göre gittikçe azalan yanal sürtünme kuvvetine sahip olduklarını bulmuştur. Genel olarak kum ve kil için 1.8 katsayısı alınır.

Tablo 3.12 CTP için Taşıma Kapasitesi – Melt, 1993 [9]

	Zemin Tipi	Q_c (Mpa)	k_c	
			Yer değiştirmeye neden olmayan kazıklar	Yer değiştirmeye neden olan kazıklar
Kil, Silt	A Yumuşak	< 3	0.40	0.55
	B Katı	3-6		
	C Sert	> 6		
Kum, Çakıl	A Gevşek	< 5	0.15	0.50
	B Orta	8-15		
	C Sıkı	> 20		
Tebeşir, Kireçtaşı	A Yumuşak	< 5	0.20	0.30
	B Ayrışmış	> 5	0.30	0.45

Tablo 3.13 Temel Taşıma Katsayısı, K_b -Decourt, 1995 [9]

Zemin Tipi	Yer değiştirmeye neden olmayan kazıklar	Yer değiştirmeye neden olan kazıklar
Kum	325	165
Kumlu silt	205	115
Killi silt	165	100
Kil	100	80

3.2.3. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Taşıma Gücü

Kayaca soketlenmiş kazıklarda kazık kapasite hem uç hem de shafttan kaynaklanacaktır. Shaft direncinin beton veya kayaç mukavemetinin bir fonksiyonu olması beklenir ve yükün paylaşımı soket geometrisi L/D 'ye bağlıdır. [5]

Yapılan araştırmalar soket sürtünmesinin üniform olmayıp üstte maksimum değerden hızlı azaldığını göstermektedir. Bu dağılım kazık ve kayaç elastisite modüllerinin oranının bir fonksiyonudur. Koutsoftas (1981)'e göre bu oranın tam değerinin bilinmesi gereksiz olup elastik çözümlerde 10-50 arası bir değer alınması yeterlidir.

Son yıllarda soket çevresindeki sürtünmeyi kayaç mukavemetine göre tayin etme eğilimi yaygınlaşmıştır. Kaya kalitesi (karot yüzdesi), SPT, serbest basınç mukavemeti q_u ve indirekt çekme q_t değerlerine göre sürtünme tahmin etmek için çalışmalar vardır. Bunlardan uygulama alanı bulmuş bazıları aşağıda verilmektedir. [5]

$$f_s = 1.842q_u^{0.367} \quad \text{Williams (1980)} \quad (3.34)$$

$$f_s = 1.45 \sqrt{q_u} \quad (\text{temiz soket}) \quad \text{Rowe ve Armitage (1987)} \quad (3.35)$$

$$f_s = 1.94 \sqrt{q_u} \quad (\text{Pürüzlü Soket}) \quad \text{“} \quad (3.36)$$

$$f_s = 0.67 \sqrt{q_u} \quad \text{Horwath ve Kenney (1979)} \quad (3.37)$$

$$f_s = 0.63 \sqrt{q_u} \quad \text{Carter ve Kulhawy (1980)} \quad (3.38)$$

$$f_s = 0.30 q_u \quad \text{Reynoldas ve Kaderabek (1980)} \quad (3.39)$$

$$f_s = 0.20 q_u \quad \text{Guptan ve Logan (1984)} \quad (3.40)$$

$$f_s = 0.15 q_u \quad \text{Reese ve O'Neill (1987)} \quad (3.41)$$

$$f_s = 0.01N \text{ veya } f_s = -5.54 + 0.41N \quad \text{Crapps (1986)} \quad (3.42)$$

CIRIA (1997) ise SPT sayılarına göre [3]

N	10	15	20	25	30	>30
---	----	----	----	----	----	-----

f_s	0.36	0.77	1.1	1.8	2.6	2.6
-------	------	------	-----	-----	-----	-----

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

Mc Vay vd. (1992), gösterdiğine göre soket düşey düzlemindeki kayma gerilmesinin değeri kayaç kohezyonundan %10' dan daha az çoğunlukla %5 fark etmektedir. Bu analizden hareketle

$$f_s = \frac{1}{2} \sqrt{q_u} \cdot \sqrt{q_t} \quad (3.43)$$

eşitliği türetilmiştir. Burada q_t indirekt çekme mukavemetidir. 14 ayrı yerde yapılan ölçümler (3.43) eşitliğiyle karşılaştırılmış standart hatanın (3.34)-(3.30) eşitliklerinden çok daha az (53 kPa) olduğunu göstermişlerdir. İkinci en az hata (3.40) eşitliği için olup SPT sonuçlarına dayalı tahminlerin soket sürtünmesinin iyi bir ölçüsü olmayacağı vurgulanmaktadır.

İyi-çok iyi kalitede kayaçta soket yükü beton mukavemetiyle ilgilidir. Genelde $(0.03 \sim 0.05)f_c$ alınması D. Apoloni vd.(1975) tarafından önerilmektedir.

Kayaçlara oturan kazıklarda uç direnci Goodman (1980) tarafından

$$Q_u = q_u(N_\phi + 1) \quad N_\phi = \tan^2(45 + \Phi/2) \quad (3.44)$$

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

Uç direnci için AASHTO (1992) önerisi ise;

$$Q_{TR} = N_{ms} \cdot C_0 \cdot A_t \quad (3.45)$$

Şeklinde olup c_0 kayacın ölçülen serbest basınç direnci (2D alta kadar bölgede), N_{ms} kayaç kitle kalitesi (RMR,NGI,RQD) değerleri ile kayaç sınıfına bağlı hoek (1983) tarafından verilen tablodan alınacak bir faktör, A_t kazık uç alanıdır.

Zayıf ve kuvvetli kayaçların birbiri ardı sıra yer aldığı hallerde zayıf kayaç özellikleri göz önüne alınmalıdır. Yumuşak ayrılmış 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 şaft bunları delip daha derine oturtulmalıdır. Eğik yüzeyli kayaçlarda şaftın yeteri derinliğe indirildiğinden emin olunmalıdır ve minimum 2D girişle tabakalar arası kayma olasılığına karşı önlem alınmalıdır.

3.2.4 Kazıklarda Taşıma Gücünün Pratik Olarak Hesaplanması

Genişletilmiş tabanı olmayan kazıklarda en büyük kaldırma kapasitesi, Q_{ult} , [10]

$$Q_{ult} = (\overline{f_{st}} \cdot A_s) + W \quad (3.46)$$

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

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

$$\frac{f_{st}}{f} = \left[1 - 0.2 \cdot \log\left(\frac{100}{L/D}\right) \right] \cdot (1 - 8\eta + 25\eta^2) \quad (3.47a)$$

$$\eta = v_p \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{G_{av}}{E_p} \right) \cdot \tan \delta \quad (3.47b)$$

Denklemlerde, L kazık uzunluğunu, D kazık çapını, η kazık sıkışabilirlik faktörü, v_p poisson oranı, δ kazık-zemin arası sürtünme açısı, G_{av} zemin kayma gerilmesinin kazık shaftı 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 farkedilir biçimde az olabilir. Tabanın en büyük plaklar için geliştirildikleri çözüm kullanılabilir.[9]

3.3. Düşey Yük Altında Tek Kazığın Oturması

Kazık üzerinde çalışan tasarım yükünü bulmak için kazığın hesaplanmış nihai direncini (yada yükleme testlerinden türetilmiş nihai direnci) bir güvenlik faktörüne bölmek gereklidir. Aşağıdaki nedenlerden ötürü bir güvenlik faktörüne gereksinilmektedir:

1. Zeminin sıkıştırılabilirliği ve mukavemetindeki doğal değişiklikler için önlem almak
2. Kullanılan hesap metodundaki belirsizliklere karşı önlem almak
3. Kazık gövdesini oluşturan madde üzerindeki çalışır haldeki gerilmelerin güvenli sınırlar içinde olduğundan emin olmak
4. Kazık grupları yada izole edilmiş tekil bir kazığın toplam oturmalarını tolere edilebilir sınırlar içinde kaldığından emin olmak
5. Birbirine bitişik kazıklar veya kazık grupları arasındaki farklı oturmaların tolere edilebilir sınırlar içinde kaldığından emin olmak.

Yukarıdaki bu dört nedene bakıldığında değişken zemin tipleri içindeki fazla sayıdaki yükleme testlerinden elde edilen yük-oturma yayları hem deplasman hem de

deplasman yapmayan kazıklar üzerinde gösterilmiştir ki; küçük kazıklardan 600 mm ye kadar olan normal kazıklara kadar çalışan yük altındaki bu oturma güvenlik faktörü 2,5 ton daha küçük olmadığı sürece 10mm' yi aşmayacaktır. Bu, işin sigortasıdır ve bizi zeminlerin sıkıştırılabilirliğine bağlı olan tek parça kazıklar üzerindeki oturmaların hesabı ihtiyacından kurtarır. Çalışan bir yük anında 10 mm yi aşmayan bir oturma çoğu bina ve grup oturmalarının aşırı olmadığı çoğu inşaat mühendisliği yapıları için tatmin edicidir. [5]

Yine de çap olarak 600 mm den daha geniş kazıklar için çalışan yük altında tek parça kazıkların oturma problemi kazık çapındaki artışla birlikte taban yükünün ve yüzey sürtünmesinin ayrı ayrı tahminine gereksinim duyarak, daha bir sorun halini almaktadır. Doğru güvenlik faktörü sorusu bu seferde tamamen müsaade edilebilir oturmaların kabulü halini alır. Maksimum gövde direnci sadece 10mm' lik bir oturmada mobilize edilir. Fakat bunun için taban direncinin tamamen mobilize olabilmesi için yaklaşık 150mm' lik bir oturmaya ihtiyaç duyar. Bu aşamada kazık 4.2 MN gibi bir sınır yüklemeye nihai dayanım noktasına ulaşır. Bu şartlarda 2 gibi bir güvenlik katsayısı 2.1 MN luk bir işleyen yük verir işleyen yük anında tüm gövde direnci mobilize edilebilir, fakat yalnızca nihai taban direncinin %22 si işleme konulacaktır. Kazık tasarımında ekonomiklik için işleyen yük anındaki oturma yapısal tasarımcıların kabul edebileceği bir sınıra kadar yaklaşır ve buda genellikle tüm gövde direncinin mobilize olmasını kapsar.

Bu aşamada, nihai gövde ve taban yükleri üzerindeki kısmi güvenlik faktörleri genel düşüncesinin takdimi arzulanır. Burland kil içindeki sürgülü kazıklar için uç taşımasında 3 gibi minimum bir güvenlik faktörüyle, toplam yük faktörünün 2 olduğunu öngören, basit bir stabilite kriteriyası hazırlamıştır. O zaman kazık üzerindeki maksimum güvenlik faktörü ($Q_p/2$) ve $(Q_s+Q_b/3)$ ifadelerinden en az olanı alınır. Burada; Q_p tüm kazık üzerindeki nihai yük, Q_s gövde üzerindeki nihai yük, Q_b taban üzerindeki nihai yüküdür.

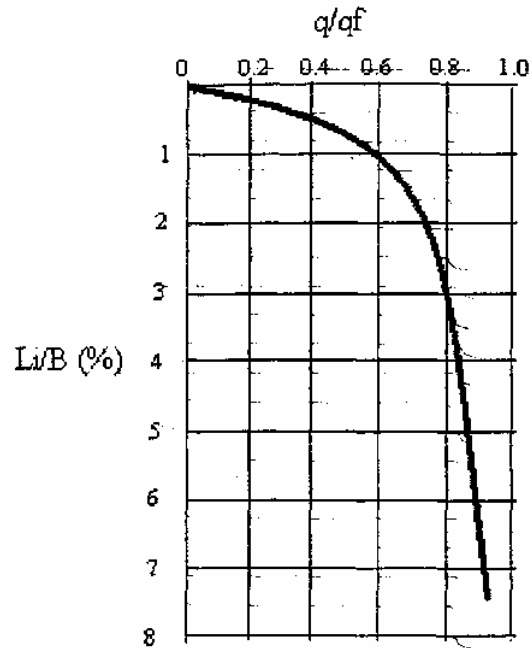
Burland; ikinci ifade geniş tabakalanmış tabanlı kazıkların kontrolünü sağlarken, küçük tabakalanmalarla karşılaştırmalı, düz-araflanmış kazıklar ve uzun kazıklar için ilk ifadenin etkin olduğunu açıklamaktadır. Yukarıdaki kriteriyanın tatminkarlığı işleyen yük anındaki oturma tolere edilebileceği manasına gelmez. Benzeri zemin şartlarındaki kazıklar üzerinde yapılan yükleme testlerine dayalı tecrübeler beklenen oturma düzenine rehberlik edebilir. Ulaşılabılır benzeri deneyimler hiç yoksa, o

zaman tam-ölçekli kazıklar üzerinde yükleme testleri yapmak gerekli olabilir. Geniş kazıklar için pahalı olsa da, seçilen gövdelerde yahut kazık sürgü deliklerinin tabanındaki dairesel plakalar üzerinde yapılan yükleme testleri sonuçlarından değerlerin tahmini daha ekonomik bir uygulamadır.

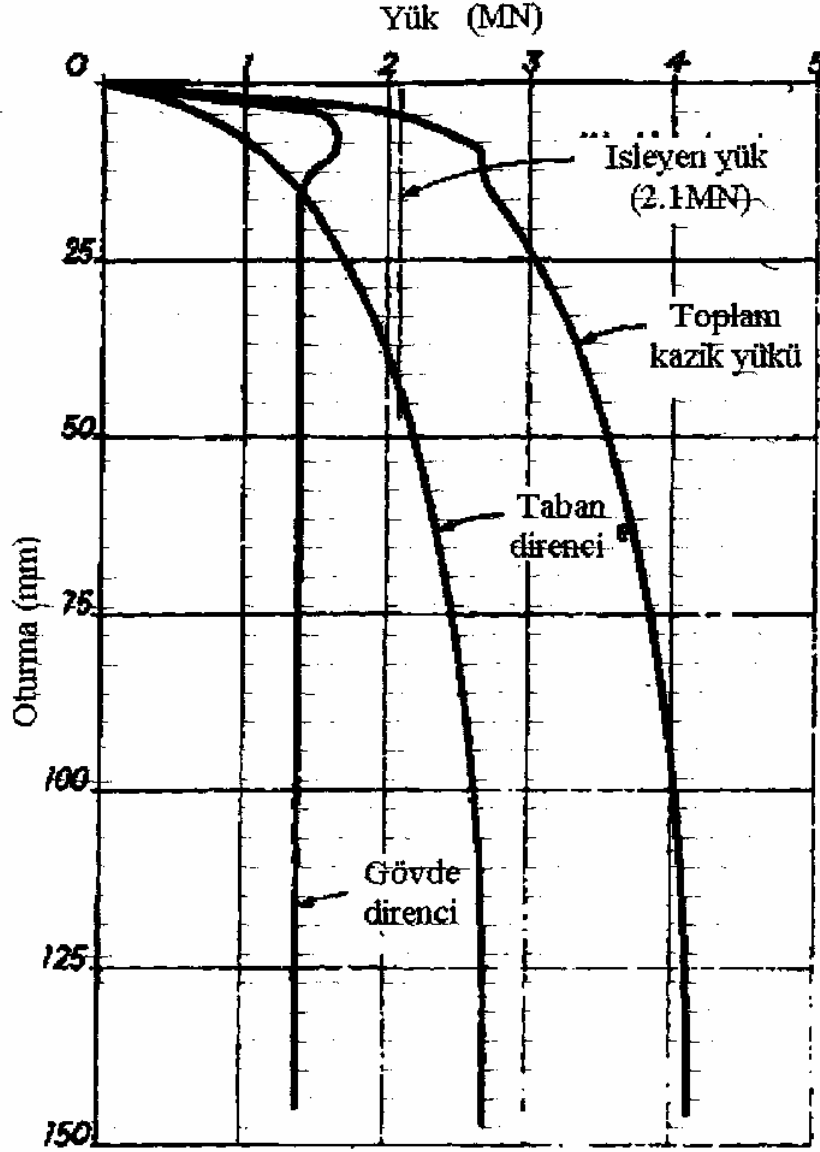
Burland; plaka altındaki zemin için olan nihai taşıma kapasitesi ile bölünmüş plaka taşıma basıncına (q/q_f) karşı, plaka çapı ile bölünmüş test plakaları oturmalarını (p_i/B) çizmiştir ve Şekil 3.11 de gösterilen bir tip yayı elde etmiştir. Uç taşıma yükündeki güvenlik faktörü 3 den büyük olsaydı, bu yay için olan ifade;

$$p_i/B = Kxq/q_f \quad (3.48)$$

olur. Plaka taşıma testleri sınır durumlara ulaştığında, yay çizilebilir ve taban güvenlik faktörünün 3 ten büyük olduğunu gösterebilir. Kazık tabanı oturması O_i , B' nin istenilen herhangi bir değeri için elde edilebilir.



Şekil 3.11. Moofields'teki Londra Kilinde Sürgülü Kazıkların Elastik Oturması [12]



Şekil 3.12 Sert Kil İçindeki Geniş Çaplı Kazıklar İçin Yük-Oturma İlişkileri [12]

Dairesel bir kazığın oturmasının tahmini için kullanılan prosedür aşağıda verilmiştir.

1. Plaka taşıma testi tarafından verilen sınır yük değerinden q_f' in eldesi,
2. Yaklaşık taşıma kapasitesi faktörü N_c ile kayma mukavemetinin çarpılmasıyla elde edilen değere karşı q_f in kontrolü ($q_f = N_c \times C_b$ olmalı)
3. q_f in $Q_b = A_b \times q_f$ eşitliğinde kazığın uç taşıma direnci Q_b hesabında kullanıldığını bilmek
4. F' in 3 ten büyük bir güvenlik faktörü olduğu yerde $W_b = Q_b / F$ eşitliğinden kazık üzerindeki güvenli uç taşıma direncinin tespiti

5. $q=W_b/(\pi B^2/4)$ eşitliğinden q nun, buradan da q/q_f in tespiti
6. Şekil 3.13 de gösterilen yay tipinden q/q_f değeri için p_i/B değerinin okunması, bundan da p_i' nin tespiti (kazık tabanının oturması)

Bir tabakalanma sağlanarak yalnızca taban ölçülerinin artmasıyla taban oturması azalması. Oturma aşırı ise, aşağıdaki uygulamalardan bir ya da birkaçı uygulanır.

1. Kazık üzerindeki işleyen yükü azaltmak
2. Gövde direncini artırarak (mesela gövde çapını artırmak) taban üzerindeki yükü azaltmak
3. Daha büyük bir gövde sürtünmesini mobilize etmek ve tabanı daha derine, daha az sıkışabilir zemine indirmek için gövde uzunluğunu artırmak

Londra kilindeki kazıklar için, eşitlik 3.48 deki K genellikle 0.01-0.02 arasında bulunur. Eğer hiçbir plaka taşıma deneyi yapılmamışsa, daha yüksek değerler benimsenmesi korunumlu bir oturma tahmini yapılmasını sağlar. Yukarıdaki prosedüre tabi tek parça kazıkların oturma tahmininin yapılması halinde, kazık gruplarının bir bütün olarak oturacağının kabullü hale gereklidir.

Kazık uzunluğu boyundaki en büyük oturma kazık başlığı oturmasıdır. Fazla sayıdaki yük-oturma yaylarının analizinden, Weltman ve Healy buzul kütleler içindeki düz gövdeli sürgülü ve yerinde döküm kazıkları oturması için basit bir ilişki kurmuşlardır. Aşağıda verilen ilişki; kazık çapının 600mm den büyük olmadığı, kazık gövdesindeki işleyen gerilmenin $3MN/m^2$ civarında olacağı, uzunluğu kazık çapına oranının 10 yada daha fazla olacağı ve sert zeminden buzul kütlelere doğru drene edilmemiş kayma mukavemetinin $100kN/m^2$ yi aşacağı varsayımına dayanmaktadır. Kazık başlığı oturması aşağıda verilmektedir.

$$p=\ell m/4(\text{mm cinsinden}) \quad (3.49)$$

Burada ℓ m buzul kütle içine gömülü m cinsinde uzunluktur.

Hazır döküm kazıklar ve yerinde döküm kazıkların bazı tipleri $3MN/m^2$ yi aşan gövde gerilmeleriyle beraber işleyen yükleri taşımak için tasarlanır. Benzeri durumlarda, oturuma $3MN/m^2$ lik bir gerilme varsayımıyla, eşitlik 3.49 dan hesaplanabilir. Oturma “her oranda” tasarlanmış işleyen gerilmeye göre arttırılır.

Burland, Weltman ve Healy nin yukarıdaki metotları; Londra kili ve buzul kütleler içine çakmak için spesifik olarak geliştirilir ve mevcut yükleme prosedürünü kullanarak, İnşaat Mühendisleri Enstitüsü tarafından açıkça belirtildiği gibi standart bir yükleme oranında yapılan arazi yükleme testlerinin sonuçlarına dayandırılır.

Yüzey sürtünmesiyle taşıyan ve işleyen yük anında tabana transfer edilen yük gerçeğe uygun olarak tahmin edilebilirse, genellikle kazık oturmaları hesaplanılabilir. O zaman kazık başlığı oturması, taban altındaki zeminin sıkışması ve gövdenin elastik kısılmasının toplamı olarak aşağıda verilmektedir.

$$P = \{(W_s + 2W_b) \times L / (2A_s \times E_p)\} + \{B \times I_p \times (1 - \nu^2) / (4A_s \times E_b)\} \quad (3.50)$$

W_s ve W_b ; Adı geçen sıra ile kazık gövdesi ve tabanı üzerindeki yük

A_s ve A_b ; Adı geçen sıra ile kazık gövdesi ve tabanı en kesit alanı

E_p : Kazık maddesinin elastik modülü

B : Kazık genişliği

L : Kazık uzunluğu

ν : Zeminin poisson oranı

I_p : L/R oranına bağlı tesir faktörü

E_b : Kazık tabanı altındaki zeminin şekil değiştirme modülü

$L/B > 5$ olduğu ve poisson oranının 0-0.25 arası değerler için, son terim $0.5 W_b / (B \times E_b)$ ye yaklaştığında, I_p 0.5 alınır. E_b nin değerleri arazi zemin deneyleri veya laboratuvar sonuçlarıyla olan ampirik ilişkilerden yada kazık tabanı seviyesindeki plaka yükleme deneylerinden elde edilir.

Eşitlik 3.50 deki ilk terim tarafından verilen kazık gövdesi oturmaları kazık gövdesinden aşağı uniform olarak zemine bir transfer yükü varsayar 3.51 ve 3.52 deki müzakereden de anlaşıldığı gibi toplam yükün büyük bir kısmının derinlemesine penetrasyon yapan kazıkların gövdeleri üzerinde yüzey sürtünmesiyle taşındığı yerde, dağılma uniform değildir. Kazık, uzunluğun sıkışabilir kısa kolonları olarak kabul edilebilecek n parçaya bölündüğü varsayılır ($\Delta L = L/n$) Zemin, birbirinden bağımsız hareket eden, bir parçadan öteki parçaya lineer olmayan yaylar serisi ile ifade edilir. Bir başka yay kazık tabanı altındaki zeminin sıkışabilirliğini gösterir.

(Şekil 3.13) Her kolon bir eksenel kuvvet Q_i ye ve yüzey sürtünmesi f_i ye maruzdur. Yüzey sürtünmesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$f_i = (Q_i - Q_{i-1}) / (P_x \Delta L) = \Delta Q_i / (P_x \Delta L) \quad (3.51)$$

Burada P kolonun çevresidir.

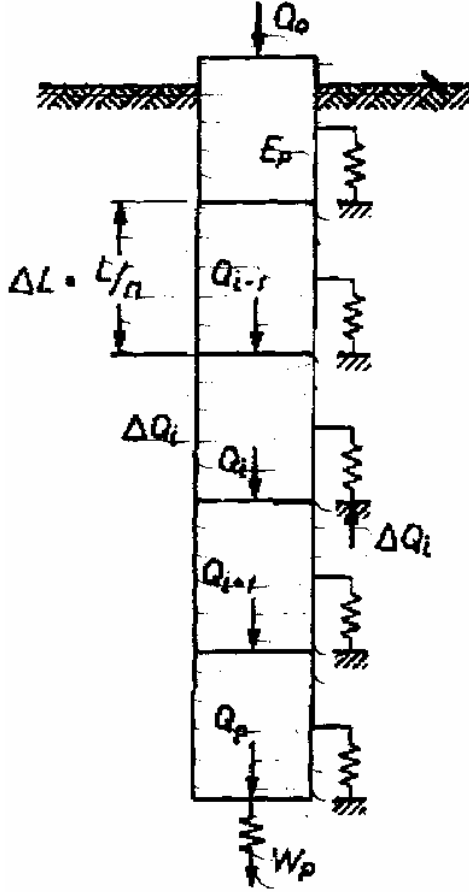
Kolonun elastik sıkışması ise:

$$\Delta \ell_i = \ell_{i+1} - \ell_i = (Q_x \Delta L) / (E_p x A_p) \quad (3.52)$$

eşitliğiyle verilir A_p kolonun kesit alanıdır. Bu eşitlikler sayesinde, eksenel kuvvetler ve bir sınır deplasman bilinir yada belirlenmek üzere kazık boyunca ki deplasmanlara izin verildiği varsayılır. Kazık üzerindeki eksenel kuvvetler, ampirik yada yarı ampirik bir bağıntı şeklinde oluşturulmuş olan “transfer fonksiyonu” ndan hesaplanır.

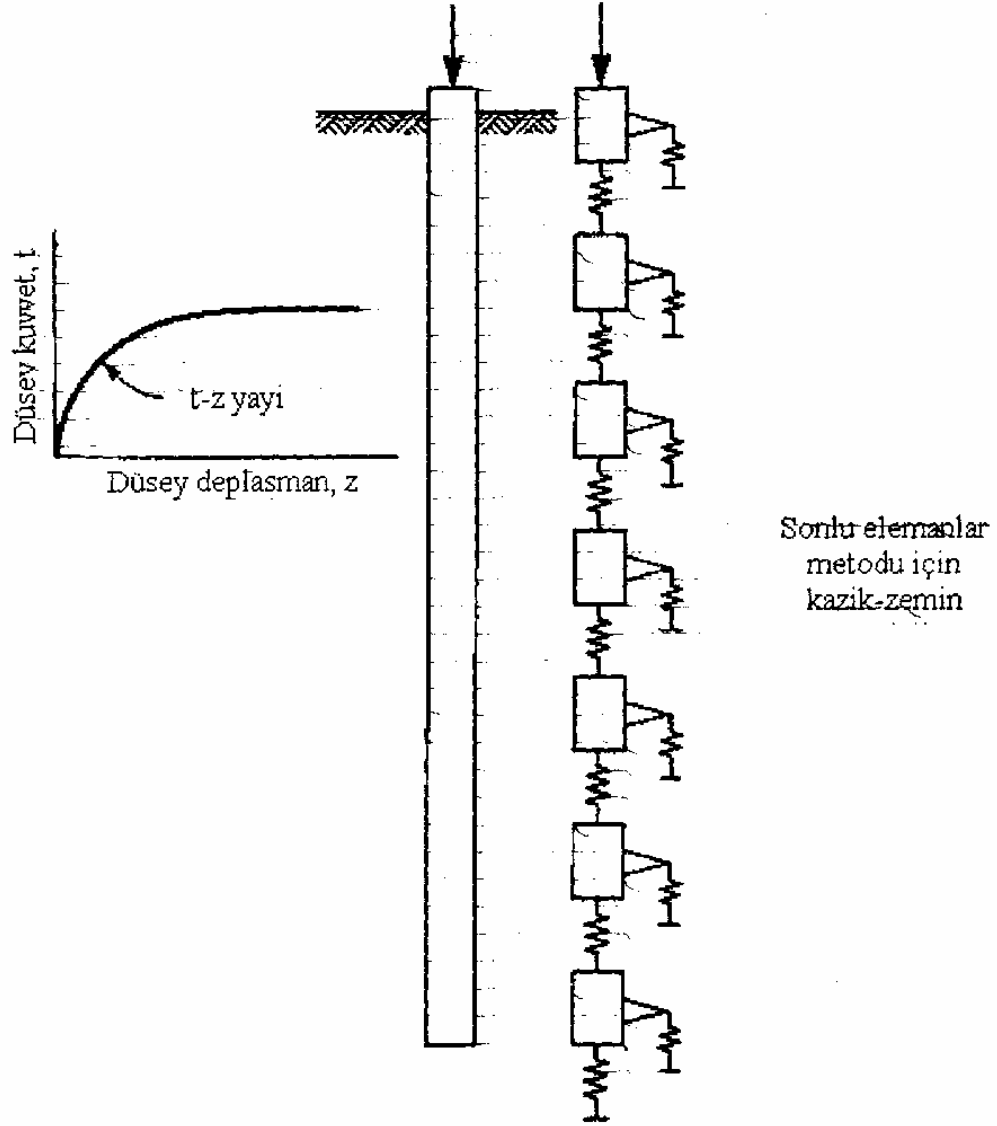
$$\Delta Q = Q_i - Q_{i-1} = K(\Delta \ell_i) \quad (3.53)$$

Transfer fonksiyonu, K_ℓ analitik olarak yada deney yoluyla belirlenir.



Şekil 3.13 Transfer Fonksiyonu Yaklaşımı için Yük-Transferi Analizi [12]

Transfer fonksiyonu metodunun temel eksikliği: yayların birbirinden bağımsız hareket etmesidir. Buda yay ile ifade edilen herhangi bir zemin katmanının altında ve üstündeki katmanlardaki hareketlerden olumsuz etkilenmesi demektir. Elastik süreklilik metodunu bu problemten şu şekilde kurtulur: Homojen, elastik, izotropik bir sürekliliğin oluşturduğu, sıkışabilir bir zeminin çevrelediği rijit, basınca çalışmayan bir kazığın kısımlarını, bu parçaların oluşturduğu varsayılır. Kazık başlığındaki eksenel yük, her parça üzerindeki sürtünmesel kuvvetlerin direnimiyle karşılaşır. Her parçanın deplasmanı, yarı-sınırlı bir kütle içinde noktasal bir yüklemeye uygun bir deplasman için Mindlin'in eşitliğinden elde edilir. Sonuçlanan eşitlikler ve oturma analizi metodları Poulos tarafından tarif edilmiştir. Parça üzerindeki bir sürtünme kuvvetinin büyüklüğünün değişmesiyle, kazık-zemin ara yüzündeki bir kayma göz önüne alınabilir.



Şekil 3.14 Düşey Eksenel Yükleme Altında Kazığın Deformasyonu için t-z Yayı [12]

Transfer fonksiyonu ve elastik süreklilik metotlarında kullanılan eşitlikler, matris formunda yazılabilir ve dijital bilgisayarlar vasıtasıyla değerlendirilebilir. Her iki metodun da; zemin kütlesi içindeki deformasyonları aşırı basitleştirmeleri ve kazık yerleştirme sürecinden ötürü ve kazığın ikincil yüklemelerinden kaynaklanan zeminin deformasyon karakteristiklerindeki değişimleri yok saymaları dezavantaj olarak algılanmaktadır. Bu etkileri canlandırmada ve kazığın yük-şekil değiştirme davranışının sonuçlanmasını belirlemede sınırlı parça teknikleri kullanılmıştır. Eksenel yüklere karşı kazık ve kazık gruplarının işlevini modelleme için bilgisayar tekniklerine dayalı bu ve diğer metotlar Paulos tarafından tekrar incelenmiştir. Yük-

şekil değiştirme davranışı, kazık başlığı oturması yada düşey hareketleri, sınır şartların olduğu aşamaya kadar yükleme alanına bağlayan t-z yayları (Şekil 3.14) şeklinde hazırlanabilir. Benzeri yaylar, kazık tabanının sıkışabilirliği için hazırlanabilir (q-z yayı).

Bölüme başlarken de belirtildiği gibi; kazık taşıma kapasitesinin hesabında sıradan metotlarla birlikte nominal güvenlik faktörlerinin benimsenmesi küçük-çaplı kazıkların işleyen yük oturmalarının hesabına olan zarureti ortaya çıkabilir. Yine de, kısmi güvenlik faktörlerine dayalı Eurocode metotları yoluyla elde edilen tasarım yükleri ile oturma arasında ilişki kuracak çoklukta deneyim yoktur. Bundan dolayı tasarım kazık kapasitesinin desteklenmiş yapının sınır durum faydalanırlığını tehlikeye atıp atmadığının kontrolü gerekmektedir. Ed'nin tasarım değeri kazık için bütünlüğüne ait maddesel bir faktör benimsenebilir.

3.4. Oturma Tahmini Analiz Yöntemleri

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

1. 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 (Coyley ve Reese,1996;Kranft ve diğerleri,1981; Rondolph;1994a,b)
2. Elastik teori ile; bu teori zemini elastik sürekli olarak idealize eder ve kazığın farklı kesimlerinin zemin ile etkileşimini, göz önüne alır (Butterfield ve Banerjee;1971,Banerjee ve Davies,1997;Poulos ve Davis,1980).
3. Basitleştirilmiş analiz yöntemleri ile; bu yöntemler kazık çevresinde yerel kaymaları göz önüne alır ve uygun kapalı-form çözümlerine götürür (Randolph ve Wroth ,1978; Fleming,1992).
4. Zemin davranışının gelişmiş birleşik modellerinden yararlanan nümerik analizler ile (Jardie ve diğerleri, 1986; Trochanis ve diğerleri ,1991)

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, shaft boyunca ve kazık tabanındaki direnci temsil eden ayrik 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 amprik olarak elde ediliyordu, ancak günümüzde kazığı çevreleyen zeminin rijitliği teorik bağlantılar yardımıyla daha tatmin edici olarak elde edilebilir (Kraft ve diğerleri, 1981; Randolp, 1994b). Bu eğriler göreceli olarak karmaşık olabilir ve non-lineer şekil değiştirme (yumuşama) ve çevrimsel yükleme etkileri gibi faktörleri birleştirir. [9]

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, modüllü derinlikle lineer olarak artan bir zemindeki tipik bir kazık için, dört bağımsız lineer analiz, oturma için pratik amaçlara uygun olarak, $\% \pm 7$ farklı sonuçlar vermektedir.

Jardine ve diğerleri (1986), homojen kil tabakada bulunan bir kazığın analizi için yukarıdaki (d) yöntemini kullanarak bir sonlu eleman yöntemi geliştirmişlerdir. Bu problem Poulos (1989) tarafından yukarıdaki (1) ve (2) kategorilerindeki çeşitli alternatif yöntemlerle analiz edilmiştir ve gerçek kazık rijitliği için, sonuç yük oturma eğrilerinin Jardin ve diğerleri (1986)'nın sonlu eleman çözümleri ile uyumlu olduğunu bulmuştur. Bu yüzden, kıyaslamalar kuvvetli olarak göstermektedirler ki, metodun sağlam zemin olması şartıyla, tek kazık oturmasının tahmininde analiz yöntemi kritik bir faktör değildir.

3.5. Tasarım Grafikleri ve Tek Kazıklar İçin Denklemler

Rutin tasarım uygulamaları için, modüllü derinlikle doğrusal olarak artan elastik zemindeki bir kazık için elde edilmiş parametrik çözümleri kullanmak uygundur. Şekil 3.15, problemin parametrelerini ve geometriyi ifade etmektedir. Kazık başı oturması,

$$S = \frac{P}{E_{SL} d} I_p \quad (3.54)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada,

P : Uygulanan yük,

d : Kazık çapı,

E_{sl} : Kazık ucu seviyesindeki Young modülü,

I_p : Oturma etki katsayısıdır.

I_p 'nin değerleri Poulos (1979a) ve Poulos ve Davis (1980) tarafından verilmiştir. Bu değerlerin L/d , $K_b = E_p R_A / E_{SL}$ (kazık rijitlik katsayısı), E_{SO} / E_{SL} ve E_b / E_{SL} gibi boyutsuz parametrelere bağlı olduğu gösterilmiştir. Burada,

E_p : Kazığın young modülü,

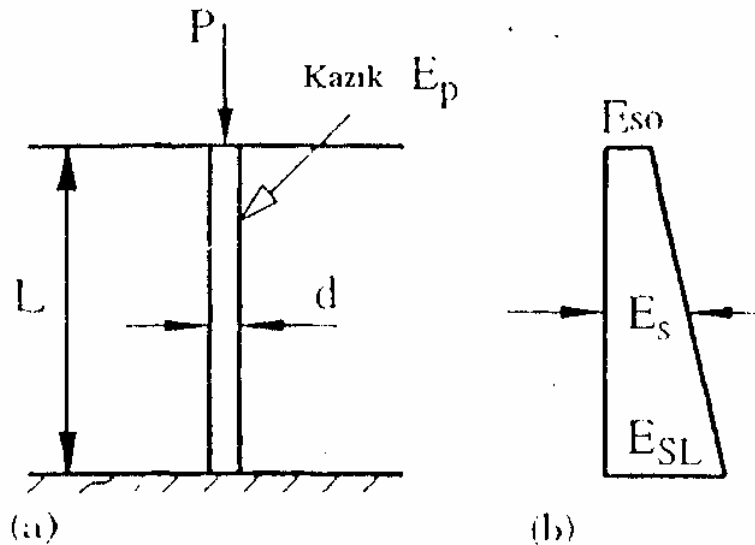
R_A : Alan oranı (kazık kesit alanının kazık brüt kesit alanına oranı),

E_{SO} : Zeminin yüzeyindeki Young modülü,

E_b : Kazık ucunun bulunduğu mesnet tabakasının Young modülünü ifade etmektedir.

Randolph tarafından elde edilen kapalı formülü çözümlerden, Fleming ve diğerleri (1992), I_p için aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.[10]

$$I_p = 4(1 \oplus V_s) \left[1 \oplus \frac{1}{\pi \lambda} \frac{8}{(1 - \nu_s)} \frac{\eta_1}{\xi} \frac{tgh(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{d} \right] \left/ \left[\frac{4}{1 - \nu_s} \frac{\eta}{\xi} \oplus \frac{4\pi \phi}{\xi} \frac{tgh(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{d} \right] \right. \quad (3.55)$$



Şekil 3.15 Tek Kazık Geometrisinin Tanımı [10]

(a) Mesnet tabakası Young modülü, E_h

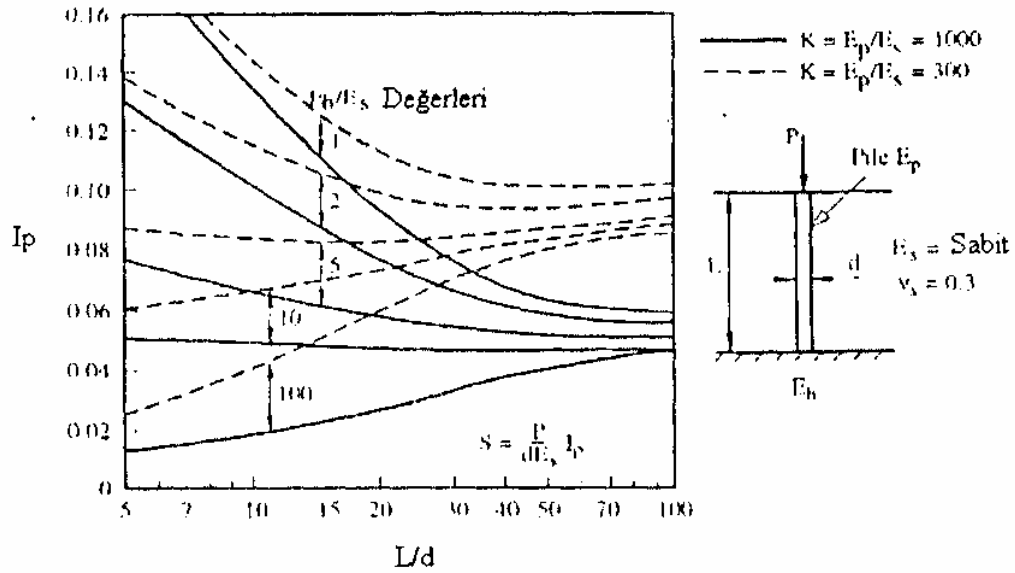
(b) Zemin young modülünün dağılım, $\eta=E_{SO}/E_{SL}$, E_S : Zemin Young modülü

Kazığın oturması, S_z herhangi bir z derinliği için aşağıdaki gibi belirlenir. [10]

$$S_z = S_L \cdot \cosh [\mu(L-z)] \quad (3.56)$$

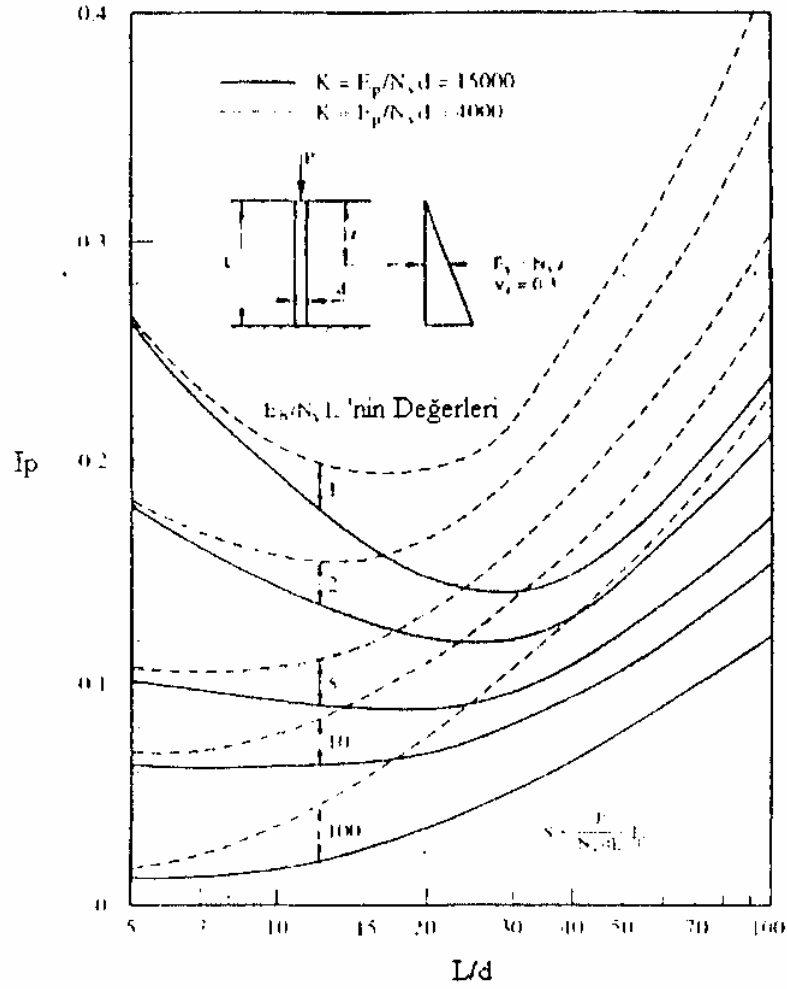
Böylece, tepe ve uç oturmalarının oranı $\cosh(\mu.L)$ 'dir. Yukarıdaki elastik çözümlerin uygulanmasında, anlık veya drenajsız oturma (kildeki kazıklar için) ESO ve ESL drenajsız Young modülü değerleri $\eta=E_{SO} / E_{SL}$, E_S eşitliğinde yerine koyulduğunda hesaplanabilir ve I_p değeri v_s 'nin drene edilmiş değeri için etki faktörüdür ki doymuş killer için 0.5 değerini alır.

Kazık rijitlik katsayısı, K_b 'nin değerlerine karşılık gelen I_p değerleri homojen killer için Şekil 3.16'da verilmiştir ve Şekil 3.17'de ise modülü derinlikte lineer olarak artan zeminler için I_p değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.16 Homojen Kildeki Tek Kazığın Oturması[10]

Tabakalı zemin profilleri için, kazık shaftındaki tabakalı zemine eşdeğer homojen zeminle değiştirmek ve kazık tabanının üstüne oturduğu zeminin modülünü taban bölgesindeki zemin rijitliğini temsil edecek şekilde seçmek bir çok pratik amaç için uygundur. Poulos (1994a) bu modülün belirlenmesi için basit yollar geliştirmiştir.



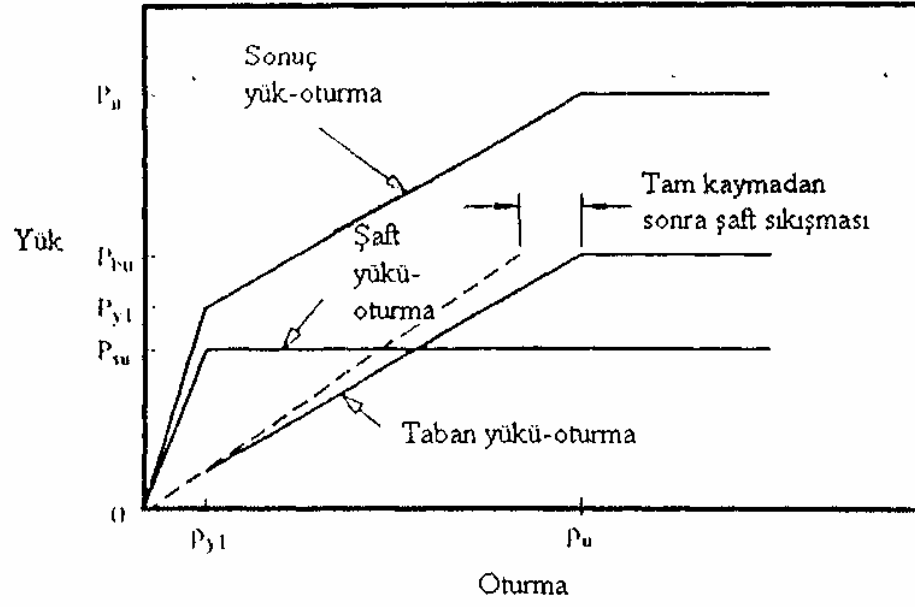
Şekil 3.17 Doğrusal Artan Modüle Sahip Zemindeki Tek Kazığın Oturması [10]

3.6. Non Lineer Analiz

Yukarıdaki çözümler lineer elastik teoriden elde edilmiş ve genel olarak kildeki kazıklar ve dirençlerinin büyük bir kısmını shaft sürtünmesinden karşılayan kazıklar için uygundur. Ancak büyük çaplı kazıklar veya dirençlerinin büyük bir kısmını tabandan alan kazıklar için yük-oturma davranışı yükler altında bariz bir şekil non-lineer olabilir. Bu gibi durumlarda kullanılmak üzere Poulos ve Davis (1980) tarafından basit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem Şekil 3.18’de gösterildiği gibi üç parçalı doğrusal (tri-linear) yük oturma eğrisi oluşturmayı içerir.

Oturma etkisi katsayısına ek olarak, en büyük shaft ve taban direnci ile taban tarafından taşınan yük oranı, β_b ’nin de belirlenmesi gerekir. β_b için Poulos ve Davis

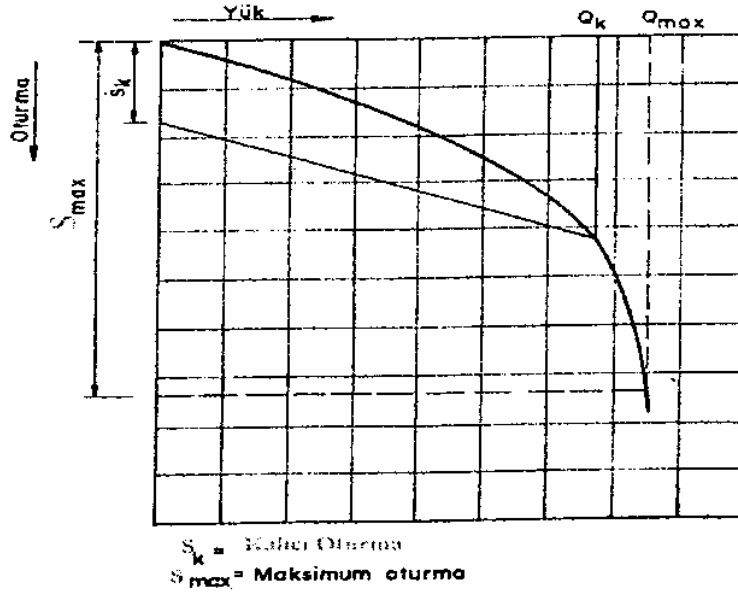
(1980) tarafından çözümler verilmiştir. Ayrıca Randolph, Fleming ve diğerleri (1992)'nin çözümlerinden de türetilabilir. [9]



Şekil 3.18 Yük-Oturma Eğrisinin Oluşturulması – Poulos ve Davis, 1980 [10]

3.7. Yük-Oturma Eğrilerinden Göçme Yükünün Tayin Yöntemleri

Şekil 3.19 yükleme deneyi sonunda elde edilebilecek olan tipik bir yük–oturma eğrisini şematik şekilde göstermektedir. Bu eğri kullanılan kazığın taşıyabileceği en büyük yük olan “göçme yükü” bulunur.



Şekil 3.19 Tipik Yük-Oturma Diyagramı [4]

Bu eğrinin gösterdiği deneyde kazık, Q_k yüküne kadar yüklenmiş sonra yük tamamen boşaltılmıştır. Bu durumda bir “kalıcı veya plastik oturma, S_k ” görülmüştür. Kazık, şekilde gösterilmemekle beraber Q_k yüküne kadar tekrar yüklenmiş ve bu yüklenme sonucunda Q_{max} ile gösterilen noktada göçmüştür. Bu Q_{max} yükü kazığın “göçme yükü” veya “nihai taşıma gücü” olmaktadır. Görüldüğü gibi bu yük altındaki oturma, küçük yük kademeleri altında gittikçe daha fazla artarak “akma” ya dönüşmüş bulunmaktadır. Böylece Q_{max} yükü seviyesindeki oturma da S_{max} olur ve nihai taşıma gücü Q_{max} bir güvenlik sayısına bölünerek “güvenli yük” veya “servis yükü” elde edilir. Pek çok araştırmacı göçme yükünün saptanması için uzun deneyimler sonucunda çeşitli “göçme yükü” tanımları ve /veya grafik yöntemleri önermişlerdir. Q_{max} yükünün saptanmasında bu önerilerden biri veya bir kaç kullanılmalıdır. Araştırmacılar, tanımladıkları göçme kriterlerinde

kazanılabilir. Elastik veya kalıcı (plastik) oturmalar ile bunların toplamı olan toplam oturma miktarı, oturmanın yük ile artış hızı ve benzeri bulguları baz olarak alırlar.

Tablo 3.14 Yükleme Deneyi Kriterleri [4]

Kriterin Tanımı	Kriter / Kullanan
Toplam Oturma Sınırlaması	En Fazla 25mm (Hollanda)
Plastik Oturma Sınırlaması	6,30 mm (AASHO)
Plastik Oturma Sınırlaması	8,40 mm (Magnet)
Plastik Oturma Sınırlaması	12,70 mm (Boston)
Sınır=(Plastik Oturma /Elastik Oturma)	Max.1.50(Christihani – Nielsen)
(Toplam Oturma/Yük) Sınırlaması	6.35 mm / ton (California, Chicago)
Toplam Oturma/Yük) Sınırlaması	0.76 mm / ton (Ohio)
Toplam Oturma/Yük) Sınırlaması	1.27mm / ton (Raymond)
(Kademe Elastik Oturma/Kademedeki Plastik Oturma)Oranı	Maksimum Değer (Szhecy)
(Toplam Plastik Oturma/Yük) Oranı	1.5 mm / ton (Raymond)
Kademe: (Plastik Oturma / Yük) Oranı	4.5 mm /ton (Raymond)

Aşağıda taşıma gücünün saptanması için kimi araştırmacılar tarafından önerilmiş olan yöntemler ele alınacaktır. Bununla beraber dünyada kullanılmakta olan belli başlı kriterlerin bilinmesi de mühendisin değişik yaklaşımlarla sonuca gitmesini sağlayacağından dolayı yararlı olacaktır. Bu nedenle önce bu “göçme yükü” kriterleri yukarıda Tablo 3.14 de sunulmuş bulunmaktadır. Belirgin yükleme deney yöntemleri aşağıda sunulmaktadır.

3.7.1. Terzaghi Yöntemi

Bu yöntem; pek çok kuruluş tarafından benimsenmiştir ve geniş uygulama alanı vardır. Terzaghi yükün tanımını aşağıdaki şekilde yapmaktadır.[3]

- a. Kazık güvenli yükün iki katı yükü göçme olmaksızın taşıyabilmelidir.
- b. Bu yükün %50 fazlası altındaki kalıcı oturma ton başına 0.25mm' den büyük olmalıdır.

Bu durumda servis yükünün bulunabilmesi için önce göçme yüküne en az 2.0 olan bir güvenlik sayısı uygulanır. Bunu takiben; ikinci şartın sağlanabilmesi için yükleme eğrisi üzerinde servis yükü $\times 1.5$ değerinden boşaltma eğrisine bir paralel çizilirse sıfır yük seviyesinde bulunacak olan kalıcı oturma görülerek seçilen servis yükünün yeterliliği irdelenebilir.

3.7.2. Boston Şartnameleri

Bu şartname kademeli yükleme deneylerinin yapılmasını öngörür. Bu deney sonuçlarından 24 saatte 5 mm'den küçük oturma yaptıran yük bulunur. Bu yükün yarısı kazığın servis yükü olarak kabul edilir.

Diğer bir Boston şartnamesine göre ise yük-oturma eğrisinin “kalıcı oturma” dışlanarak bulunan eğiminin 0.025 mm/KN olduğu noktanın gösterdiği yük göçme yükü olarak kabul edilir.

3.7.3. Kazık Çapının Yüzde On'u Kuralı

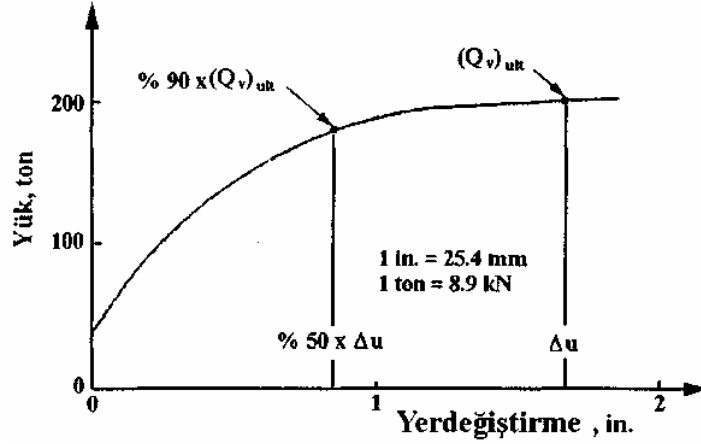
İngiliz şartnamelerinde görülen bu uygulamada önce kazığın elastik oturması hesaplanır. Yük–Oturma eğrisi üzerinde; hesaplanan elastik oturma çıkarılmak kaydı ile kazık çapının %10'u kadar bir oturmaya rastlayan yük bulunur ve göçme yükü olarak alınır.

3.7.4. Brinch Hansen Yöntemi

Sabit hızda delme yöntemi ile denenen kazıklar için kullanılan bu kriter ile göçme yükünün bulunması için;

- a. Şekil 3.20 de gösterildiği gibi yük-oturma eğrisinin incelenmesi ile belirlenen göçme yükünün %90'ına karşılık gelen yük bulunur.

- d. Bu yükte gerçekleşen oturma miktarı gözlenir ve bu oturma miktarı iki ile çarpılır.
- c. Yukarıda b. adımında oturmaya neden olan yük göçme yükü olarak kabul edilir.



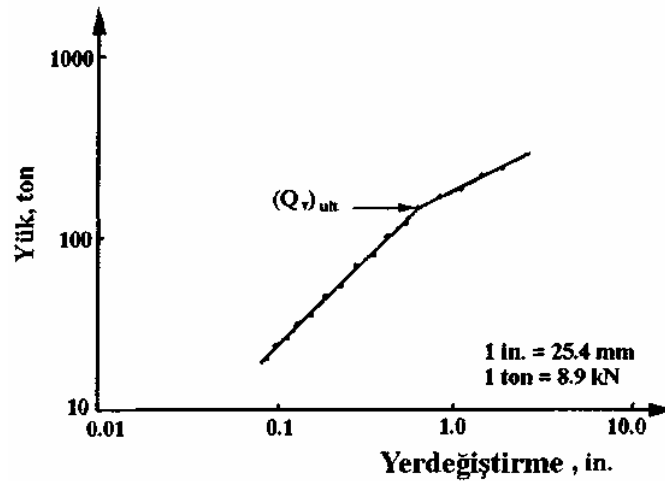
Şekil 3.20 Brinch Hansen %90 Kriteri [4]

3.7.5. Yük-Oturma Eğrisi Yarıçapı

Göçme yükü, yük-oturma eğrisinin en küçük eğrilik yarıçapına sahip olduğu noktaya karşılık gelen yük olarak alınabilir.

3.7.6. De Beer Yöntemi

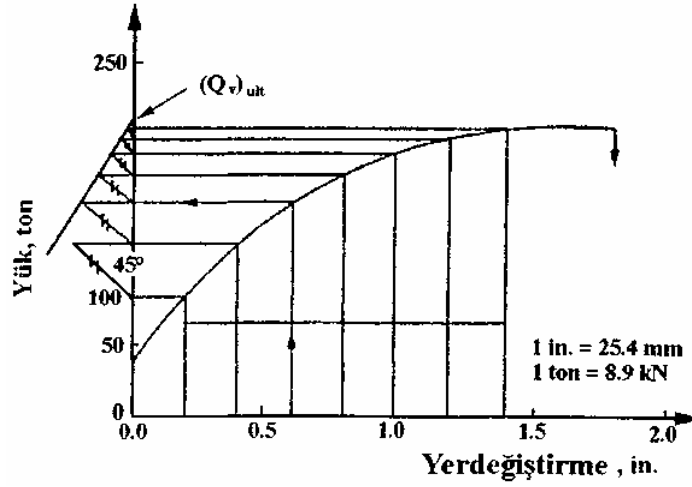
De Beer Yönteminde, kademeli yükleme deneyinden bulunan yük oturma değerleri Şekil 3.21 de görüntülediği gibi log-log ölçekte grafiklenir ve iki doğru elde edilir. Bu doğruların kesişme noktası, göçme yükünü verir.



Şekil 3.21 De-Beer Yöntemine Göre Göçme Yükünün Saptanması [5]

3.7.7. Mazurkiewicz Yöntemi

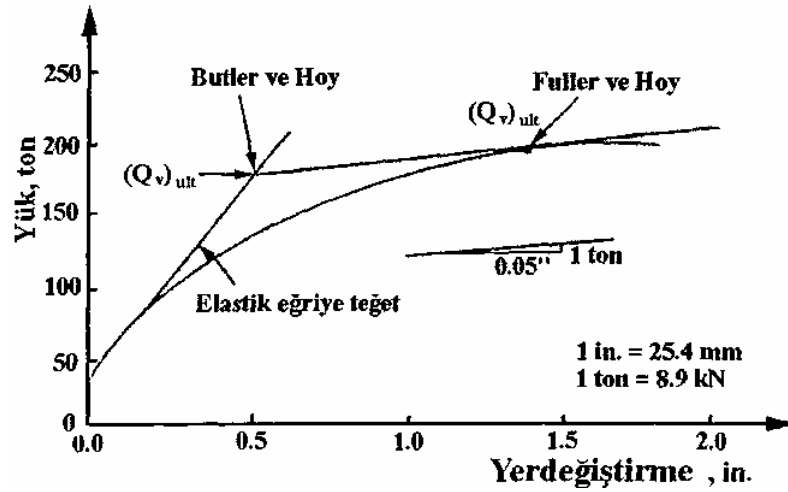
Mazurkiewicz Yönteminde, Yük- Oturma diyagramının oturma eksenini eşit aralıklarla noktalanır. Bu noktalardan yük eksenine paraleller çizilir. Bu paralel çizgilerin yük-oturma eğrisini kestiği yerlerden, oturma eğrisine paralel doğrular çizilir. Bu doğruların yük eksenini kestiği noktalardan, yük eksenini 45 derece açı yapan doğrular çizilir ve oturma eksenine paralel çizilmiş olan bir sonraki doğru ile kesiştirilir. Bu kesişme noktalarını birleştirerek elde edilen doğrunun yük eksenini kestiği yer “göçme yükü” olarak alınır. Bu yöntem Şekil 3.22 de sunulmaktadır.



Şekil 3.22 Mazurkiewicz Yöntemi'nin Uygulanması [5]

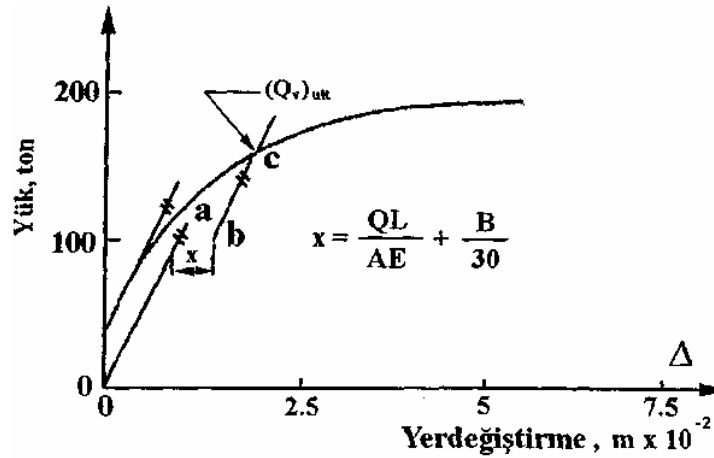
3.7.8. Fuller ve Hoy Yöntemi

Fuller ve Hoy yöntemi oturma miktarının yük miktarına karşı değişim oranı kavramını esas alan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde göçme yükü, yük-oturma eğrisinin eğiminin 0,14 mm/KN olduğu noktanın gösterdiği yük olarak alınır. (Şekil 3.23) Bu yöntemde uzun kazıklarda büyük olan elastik boy kısalması nedeni ile 0.14 mm/KN luk eğim kısa kazıklara göre daha çabuk oluşabilmektedir.



3.7.9. Davisson Yöntemi

Kademeli çubuk yükleme yöntemi ile denenen kazıkların deney sonuçlarının irdelenmesi için önerilen bu yöntem Şekil 3.24 yardımı ile açıklanmaktadır.



Yük oturma grafiğinin başlangıcına çizilen bir teğete $x=4+(D/120)(mm)$ ofset ile çizilen ve ;

$$Q = \frac{AE}{L} (s-x) \quad (3.57)$$

denklemleri ile ifade edilen doğru ile bu grafiğin kesiştiği yere karşı gelen yük “göçme yükü” (offset limit yük) olarak tanımlanmıştır. Burada:

E = Kazık malzemesinin elastik modülü,

L = Kazık boyu,

s = Oturma miktarı,

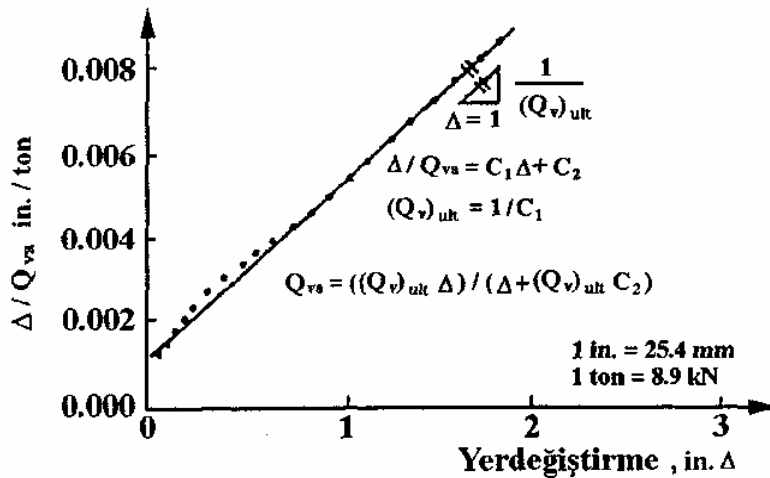
D değeri kazığın uç çapıdır. Ucu genişletilmiş kazıklarda genişletilmiş çap olarak alınır. Bu yöntemden tamamlanan ofset yükünün göçme yükünün alınması halinde, güvenli tarafta kalan bir değin kabul edileceği bilinmektedir. Diğer taraftan ofset yükü, çakma kazıklar için önerilmiş olup, delme kazıklardan pratik olmayacak yüksek ve güvenli değerler vermekte olduğu bilinmektedir.

3.7.10. Chin Yöntemi

Chin yönteminde, yük-oturma eğrisinin bir hiperbol ile temsil edildiği varsayımından yola çıkılmaktadır. Bu varsayım matematiksel olarak (oturma/yük) değerlerinin (oturma) değerlerine ilişkisinin bir doğru ile ifade edilmesinin sonucunu doğurur. Bu doğrunun eğimi hesaplanarak tersi alınırsa göçme değeri bulunur. Doğrunun denklemi (3.58), göçme yükü ise (3.59) bağıntıları ile verilmektedir.

$$\frac{s}{Q} = c_1 + c_2 \frac{1}{Q} \quad (3.58)$$

$$Q_{\text{göçme}} = \frac{1}{c_1} \quad (3.59)$$



Şekil 3.25 Chin Yönteminin Uygulanması [4]

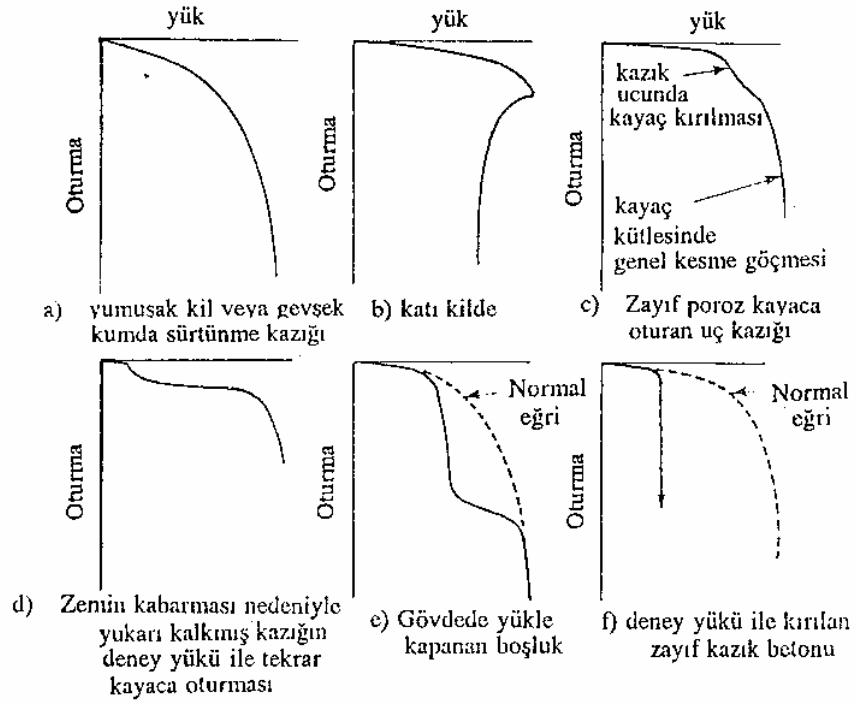
Bu yöntem kademeli yükleme ve sabit hızla yükleme deneylerinde, oturma okumalarının eşit zaman aralıklarında alınması halinde kullanılabilir. Bu nedenle standart yükleme planlarından elde edilen verilere genellikle uygulanmamaktadır.

3.8. Yükleme Deneyinin Yorumu

Yeterli tecrübesi olan bir mühendisin, kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma eğrisinden kazığın göçme mekanizmasını tahmin edebilmesi ve eğer varsa çatlamış, kırılmış, özürlü yapılmış olan kazıkları ayırt etmesi olasıdır. Şekil 3.26 da Tomlinson (1977) tarafından gösterilen yük-oturma eğrileri ile bu eğrilerin yorumları verilmektedir. Bu yorumlar, yükleme deney sonuçlarının değerlendirilmesinde olduğu kadar, kazıkların yapımlarında sonraki kabullerinde de mühendise yardımcı olurlar. [4]

- a. Şeklinde iyi yapılmış ve normal şartlar altında yüklenen bir sürtünme kazığından elde edilen bir eğri bulunmaktadır.
- b. Şeklinde sert-fisürlü bir kil bünyesindeki bir gevrek kırılmadan sonraki ferahlama, toparlanma ve göçme durumu görülmektedir.
- c. Şeklinde zayıf ve boşluklu kayalardaki uç kazıklarında karşılaşılabilecek iki hal beraberce gösterilmiştir. Birinci durumundaki kazık ucundaki gerilme yoğunlu nedeniyle olabilecek bir kırılma sonucundaki ani oturma ve kazığın kırılmayan kayaca tekrar basması ile takibeden toparlanma sergilenmektedir. İkinci durumda ise aynen a şekline benzer bir göçme söz konusudur.
- d. Şeklinde kazı sırasında kabaran zemine yerleştirilen bir kazığın tekrar yerine oturması durumu gösterilmiştir.
- e. Şeklinde ise özellikle fore kazıkların dökümü sırasında rastlanan bir yapım hatası nedeniyle kazık bünyesinde boşluk kalması halinde yükleme sırasında bu boşluğun kapanması ve normal yük-oturma davranışına dönülmesi söz konusudur.
- f. Şeklinde ise kazık malzemesinin zayıflığı nedeni ile yük altında kazık kesitin de oluşan ani bir göçmeyi yansıtan bir eğri görülmektedir.

Bu durumda e. ve f. şekilleri, yapım hatalarına işaret etmektedir.



Şekil 3.26. Yük-Oturma Eğrilerinin Yorumu [3]

4. Düşey Yük Altında Kazıkların Grup Davranışı

4.1. Genel

4.1.1. Kazık Grubunun Açıklığı

Kazık gurubunda kazıklar birbirine gereğinden uzak teşkil edilirse kazık başlığında moment etkisi oluşturlar ve bunu önlemek için kazık başlığını kalın yapmak gerekir, bu da başlık maliyetinin yüksek olmasına sebep olur. Bu da ekonomiklik sınırını aşar.

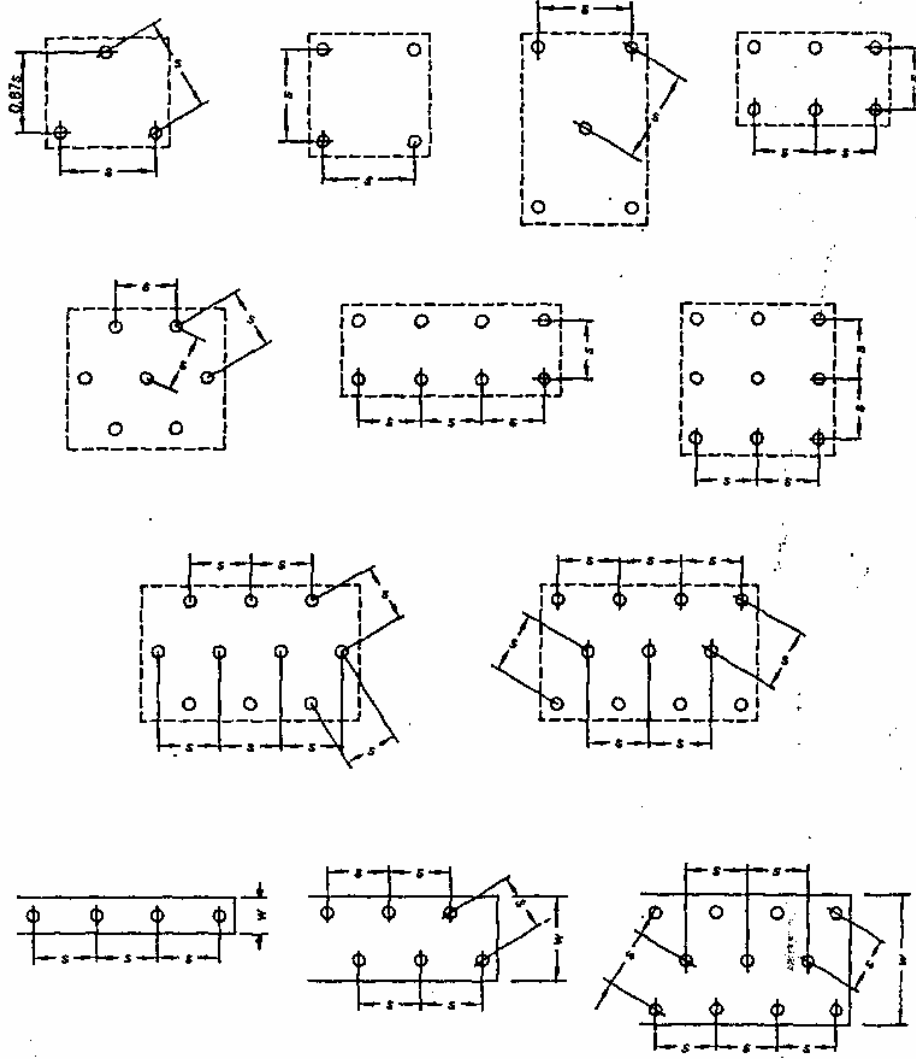
Kazıkların belli bir ekonomiklik sınırı içersinde kalacak şekilde yakın fakat birbirlerini etkilemeyecek uzaklıkta olması beklenir. Kazık açıklığı seçilirken zeminin cinsi, kazığın gruptaki yeri ve görevi, kazığın cinsi ve boyutu, kazık başlığı maliyeti gibi etkenler de göz önüne alınmalıdır.

Bir çok şartnamede bina elemanı altında kullanılabilecek en az sayıdaki kazıklar belirtilmiştir. Tasarımcı verilen probleme göre grup geometrisini kendi seçmelidir. Şekil 4.1’de aydınlatıcı amaçla bazı tipik kazık gruplarını tanıtılmaktadır.

Kazıklar bir araya geldiğinde, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi yanal sürtünmeden veya noktasal mesnetlerden ileri gelen zemine aktarılan gerilme çakışması görülür ve bu yüzden de taşıma gücü azalır.

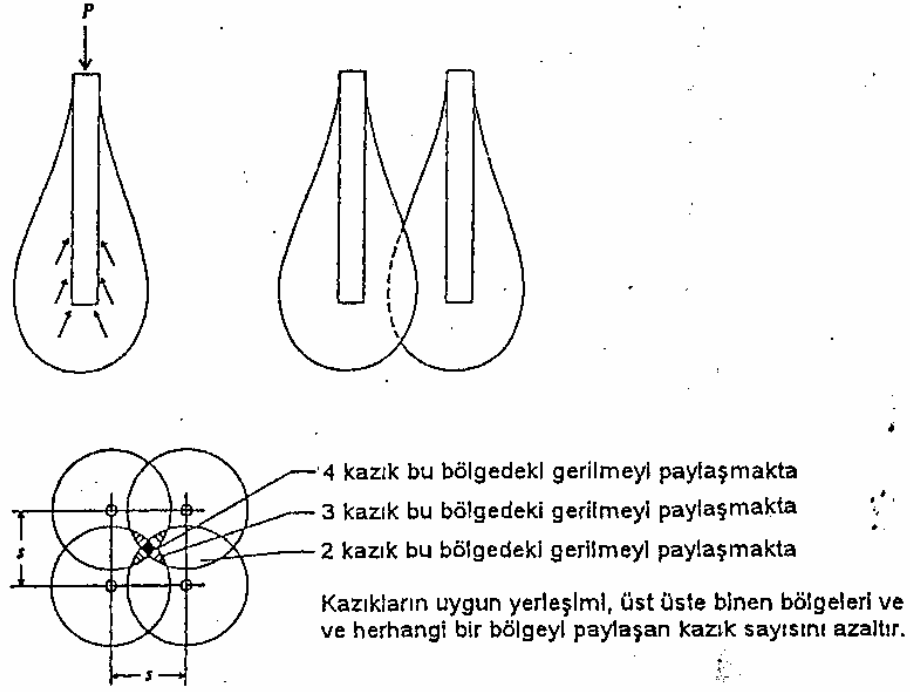
Aşırı yüklemekten oluşan basıncın büyüklüğü hem kazık yüküne hem de açıklığına bağlı olarak değişir ve eğer yeterince geniş ise zemin kesme sonucu göçecek veya aşırı oturma olacaktır.

Çakışan gerilme bölgelerinde meydana gelen gerilme şiddeti, artırılan kazık aralıklarıyla ‘s’ azalacaktır; ancak büyük açıklıklar genelde kullanışsızdır çünkü büyük ve kalın kazık başlıkları yapımını gerektirir buda kazık grubuna gelen yükü arttırır.



Şekil 4.1. Tipik Kazık Gurubu Örnekleri

(a) Yalıtılmış Kazık Başlıkları İçin (b) Temel Duvarları İçin [16]



Şekil 4.2. Sürtünme Kazığının Çevreleyen Gerilmeler ve Kazık Gurubuna Bunların Toplam Etkisi [16]

Çeşitli bina şartnamelerinden alınmış kazıkların önerilen merkezden merkeze en ufak açıklıkları aşağıdaki gibidir:

Tablo 4.1. Çeşitli Bina Şartnamelerine Göre Kazık Açıklıkları [16]

Kazık Tipi	BOCA,1993	NBC,1976	Chicago,1994
Sürtünme Kazıkları	D veya $1.75H \geq 760$ mm	2D veya $1.75H \geq 760$ mm	2D veya $2H \geq 760$ mm
Uç Kazıkları	2D veya $1.75H \geq 610$ mm	2D veya $1.75H \geq 610$ mm	

D=kazık çapı ; H= dikdörtgen veya HP kazığının köşegeni

BOCA şartnamesine göre en uygun açıklık s düşey yükler etkisindeki gruplar için 2.5 ile 3.5D veya 2 ile 3H arasında olur. Yanal ve/veya dinamik yükler taşıyan gruplar için daha büyük açıklıklar daha etkilidirler. Maksimum kazık açıklıkları bina

şartnamelerinde belirtilmemişleridir, fakat gerektiğine 8D veya 10D kadar büyük açıklıklar kullanılmıştır.

İsveç kazık şartnamesine göre kazıkların merkezlerinden merkezlerine mesafeleri Tablo (4.2)’de verilmiştir.

Tablo 4.2. İsveç Kazık şartnamesine Göre Kazık Açıklıkları [17]

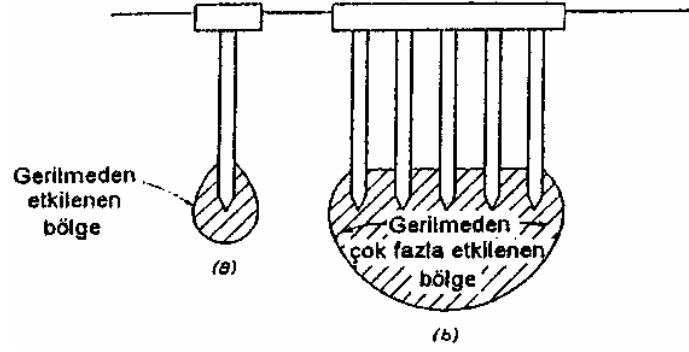
Tahmin edilen kazık boyu	Uç ve sürtünme kazıkları		Kohezyon kazıklar	
	Dairesel	Kare	Dairesel	Kare
< 10 m	3D	3.4B	4D	4.5B
10-25 m	4D	4.5B	5D	4.5B
> 25 m	5D	5.6B	6D	6.8D

Bütün durumlarda min $s=80$ cm

B= Kare Temelin Kenar Uzunluğu

4.1.2. Kazık Gruplarının Etkinliği

Yapısal elemana bağlanan kazık grubunun kapasitesi, münferit temelin kapasitesi, münferit temelin kapasitesi ile gruptaki kazık sayısının çarpımına eşit olmak zorunda değildir. Bu tür bir hesaplama emin bir yöntem değildir. Genelde grubun kapasitesi bu çarpımdan daha küçük olmaktadır. Bunun sebebi grubun gerilme bölgesinin daha derin olmasıdır.(şekil 4.3.) Bir grup içerisinde tek bir kazığın davranışı komşu kazıkların davranışı ve grubun geometrisinden etkilenmektedir. Eğer grubun kapasitesi bir çok münferit kazığın katkısının toplamı ise, grup etkinliği $E_g=1,0$ olur.



Şekil 4.3. Tek Kazık ve Kazık Grubu Altında Gerilmeden Etkilenen Bölgelerin Karşılaştırılması [17]

İngiltere’de Building Research Station’da kohezyonlu zeminlerde kare grup olarak oluşturan model kazıklar üzerinde yapılan deneylerde belirli uzunluk ve sayıdaki kazıklar ve her grup için göçme cinsinin değiştiği belli bir boyutun olduğu görülmüştür. Bu boyuttan daha küçük kazık gruplarında ise göçme tek bir kazık üzerinde olmaktadır. Kazık grupları verimiyle ilgili çeşitli ampirik denklemler vardır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi tanımlanır.[16]

$$E_g = \frac{Q_g}{\sum Q_p} \quad (4.1)$$

Burada

E_g – grup etkinliği

Q_g – kazık grubunun nihai yük taşıma kapasitesi

$\sum Q_p$ – gruptaki kazıkların bireysel nihai yük kapasiteleri

Tablo 4.3. Arsoy ve Parakash'a Göre Birim Yer Değiştirmenin 0,02'den Küçük Olması Durumunda Grup Etkinliği [5]

Kazık Ara Uzaklığı	Yük Doğrultusunda Maksimum Kazık Sayısı	
	2	6
3D	0,48	0,40
4D	0,60	0,50
5D	0,85	0,70
6D	1,00	0,85
7D	1,00	1,00

ASCE Derin Temeller Kuruluşu raporunda (CDF (1984)) grup etkinliğinin grup tesirinin bir tanımı olarak kullanılmamasını önermektedir. Bu kuruluşun raporu 1963'ten yayın tarihine kadar yapılan çalışmaların bir birleşimidir ve gerçekçi bir kılavuzdur. Bu rapor kohezyonsuz zeminlerde bulunan ve açıklığı s olan ($s=2$ ile 3D arasında) olan sürtünme kazıkların grup veriminin $E_g \geq 1$ olmasını önerir. Bu sebeple kohezyonsuz zeminlerdeki kazık yer değiştirmeleri ve yakın kazılan kazıklarda çakma titreşimlerinin sebebiyet verdiği kazık çevresindeki zeminin yoğunluğunu (γ_s) arttırır.

Kohezyonlu zeminlerdeki sürtünme kazıkları için düzlemdeki grubun blok kesmesi ve uç taşımanın toplamı grup kapasitesi olarak kullanılır, fakat hiçbir durumda grup kapasitesi tek bir kazığın kapasitesi ile gruptaki kazık sayısının çarpımından büyük olduğu düşünülmemiştir. Blok taşıma kapasitesi sadece kazık başlığının zeminle temasta olduğu durumda dikkate alınmalıdır. Kazık başlığı zeminin üzerinde olduğu taktirde grup kapasitesi blok çevresinin kesmesi ile bireysel nokta kapasitesi olarak hesaplanabilir. Başlık zeminle temasta olduğu taktirde kazıklarda aynı miktarda oturduğundan zeminle birlikte oturur. Bu yüzden, taşıma kapasitesi başlığın boyutu olan bir bloğunkine denktir. [16]

Günümüzde Converse-Labarre(1941) denklemi en sık kullanılandır. AASTHO (1985) köprü şartnamesi bize bu denklemi sürtünme kazıkları için kullanılmasını önermektedir. Etkinlik formülünü şu şekilde tanımlamıştır:

$$E_g = 1 - \Theta \frac{(n-1)m + (m-1)m}{90mn} \quad (4.2)$$

m, n ve D Şekil 3’de gösterilmektedir ve $\Theta = \tan^{-1} D/s$ (derece). Bu denklem $m \times n$ değerlerine sahip dikdörtgen şekline sahip gruplar için geçerlidir. Formülde;

m: Gruptaki kazık sırası sayısı

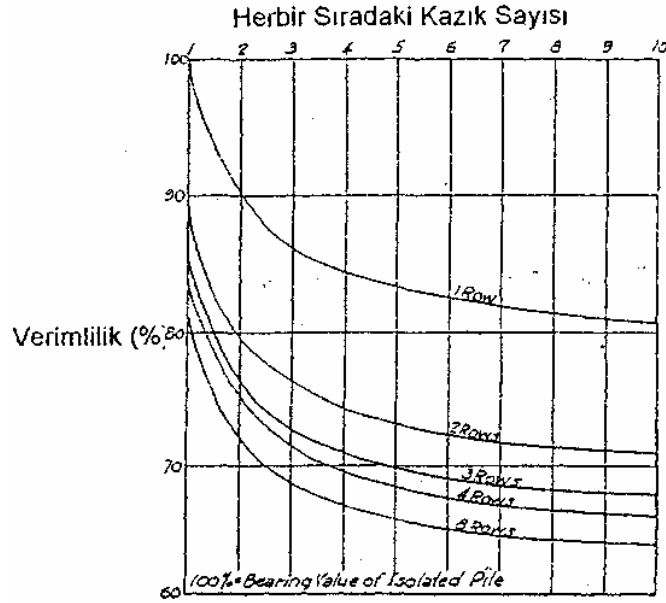
n: Bir sıradaki kazık sayısı

Θ : $\arctg(d/s)$ (derece)

d: Kazık çapı

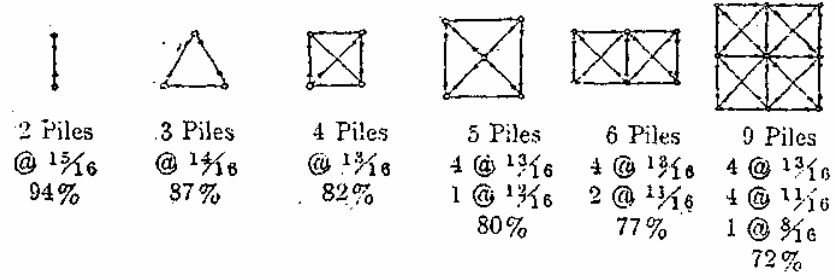
s: Merkezden merkeze kazık aralığı

(Şekil 4.4)’deki eğriler bu formülün kullanılmasıyla elde edilmiştir. Kazık uzunlukları ve sürtünmeli tabakaya soketlenme mesafesi dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.4. Converse-Labarre Yöntemine Dayalı Olarak Kazıkların Grup Halinde Çakıldığında S=3D Durumu için Sürtünmeye Bağlı Etkinlikleri [18]

Feld (1943) yöntemi basit deneysel yöntemdir. Her komşu kazık için gruptaki kazıkların kapasitesinin 1/6 azaltma esasına dayanır. Bir grubun merkezinde diğer kazıklar tarafından kuşatılan bir kazık tekil kazığın % 50 etkinliğine sahiptir. Şekil (4.5)’de bu yöntemin kullanımını göstermektedir. Bu metodun eksikliği kazıkların açıklığını dikkate almamasıdır. Dokuz kazıktan oluşan grubun merkezindeki kazığın kaldırılması grubun taşıma gücüne bir etkisi olmayacaktır.



Şekil 4.5. Kazık Grubunun Etkinliği- Feld Metodu [18]

Whitaker (1957) 3'e 3.5'e 5.7' ye 7 ve 9'a 9'luk kare şeklinde yerleştirilmiş model kazıklar üzerinde gerçekleştirildiği deneyler ile kazık grupları için s/D'nin değişik değerlere göre etkinlik sayısı vermektedir. Belirli uzunluk ve sayıdaki her kazık grubu için göçme mekanizmasının bir eşik değeri olduğunu bulmuştur. Kazık aralıkları bu değerin altında ise kazık grubu "blok" olarak göçtüğü, bu değerin üstünde ise kazıkların birbirinden bağımsız davrandıkları gözlenmiştir. Bu metot kritik kazık açıklığı olduğunu belirtmiştir. NAVFAC(1988) Şekil (4.6)'daki eğirilerin kiler için uygulanması önermektedir.

Bir göçme durumundan diğerine geçmek için Whitaker tarafından ampirik bir ilişki tarafından geliştirmiştir.

$$\frac{1}{E_g^2} = 1 + \frac{n^2 p_{up}^2}{p_{BC}^2} \quad (4.3)$$

Whitaker'ın gerçekleştirilmiş olduğu deney verilerine dayanarak pratikte kohezyonlu zeminlerde kullanmak üzere bir tablo hazırlanmıştır[19].

Tablo 4.4. Çeşitli Açıklıklar için Grup Etkinlikleri [19]

Kazık açıklığı	3B	4B	5B	6B	8B
Grup etkinliği	0.7	0.75	0.85	0.9	1.0

B: kazık çapı

Poulos ve Davis (1980) kazık grubu etkinliğini ;

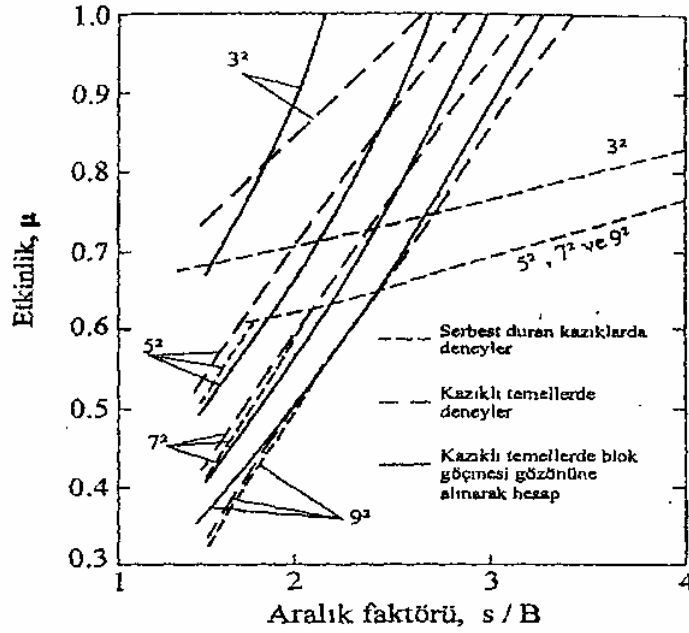
$$\frac{1}{E_g^2} = 1 + \frac{(m.n)^2 \cdot Q_0^2}{Q_B^2} \quad (4.4)$$

denklemleri ile açıklanmıştır.

Q_0 = tek kazığın nihai taşıma kapasitesi

Q_B = kazık grubu yerine düşünülecek eşdeğer büyük kazığın nihai taşıma gücüdür.

Blok göçmesine karşı taşıma gücü olarak da tanımlanır. Q_B değerinin bulunmasında eşdeğer büyük kazık çevresine taşınacak yük bileşeninde kazık-zemin ilişkisi nedeniyle adezyon faktörünün 1 alınması gerektiği açıktır.[5]



Şekil 4.6. Killi Zeminler için Grup Etkinliği [20]

Focht ve O'Neill (1985) tarafından yapılmış olan kazık tatbikatlarında CDF şartnamelerinin kullanıldığı özellikle belirtilmiştir. Grup etkinliğinin yaklaşık yüzde 6'sı grup açıklılığı ve yaklaşık yüzde 30'u eğer blok kesme göçmesi kontrol edilmiş ise E_g 'yi dikkate almıştır. [16]

Son olarak geliştirilen **Sayed ve Bakeer (1992)** yöntemi diğer yöntemlerin göz ardı ettiği değişkenleri içermektedir. Bu denklem grubun üç boyutlu geometrisini, grubun yerleştirdiği zeminin özelliklerini ve doğrudan olmasa da zamanın ve yerleştirme esaslarının etkisini içermektedir. Etkinlik denklemini aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır. [4]

$$Q_0 = Q_p + Q_s \quad (4.5)$$

$$Q_g = \sum Q_p + E_s \sum Q_s \quad (4.6)$$

Bu ifadede;

Q_g = Grubun taşıyabileceği toplam yük

Q_o = Tek kazığın taşıyabileceği yük

Q_s = Gruptaki her bir kazığın sürtünme direnimi

Q_p = Gruptaki her bir kazık için noktasal yük kN veya kips

$$E_s = E_s' \cdot K \quad (4.7)$$

E_s = Yük etkinlik parametresi

E_s' = Geometrik parametresi

K = grup etkileşim faktörü kazık yerleştirme yöntemi, kazık aralığı, zemin cinsine bağlı olarak (aynı zamanda tahmin edilebilir) 0,6 ile 2,5 arasında değerler elde edilebilir.

$$E_g = 1 - (1 - E_s' \cdot K) \frac{\sum Q_s}{\sum (Q_s + Q_p)} \quad (4.8)$$

$\sum Q_s / \sum Q_o = Q_s / Q_o$ alınır bu oran p sürtünme faktörü olarak tarif edilirse

$$E_g = 1 - (1 - E_s' \cdot K) \cdot p \quad (4.9)$$

denklemleri elde edilir. Geometrik etkinlik E_s' ise

$$E_s' = \frac{P_g}{\sum P_p} \quad (4.10)$$

Bu ifade;

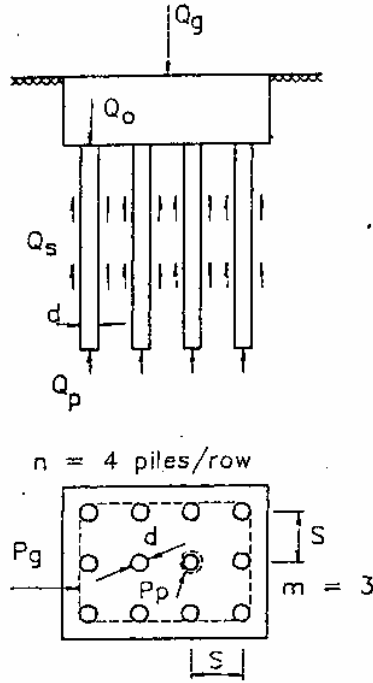
P_g = Kazık grubunun çevresi (eşdeğer geniş kazık)

$\sum P_p$ = Gruptaki tek kazıkların çevrelerinin toplamı

Dairesel kazıklardan oluşan gruplar için ise denklem (4.11)'deki gibi olup 0,6 ile 0,8 arasında değerler elde edilir.

$$E'_s = 2 \frac{[(n-1)s + D] + [(m-1)s + D]}{\pi mnD} \quad (4.11)$$

Kare kazıklar için denklemden π yerine 4, d yerine b kazık genişliği alınır. Bu denklem kazık grubunda yükün büyük bir kısmı çevre sürtünmesi tarafından taşınan kazık grupları için kullanışlı olmaktadır. Uç kazıklardan oluşan grup için $p=0$ olup $E=1$ olmaktadır. Bu denklem sürtünme etkisi, geometri, grup etkileşimini dikkate almasına rağmen kazık başlığının grup taşıma gücüne olumlu etkisini göz ardı etmektedir.



Şekil 4.7. Kazık Grupları [1]

Sönmez ve Ergün (1994) kum içinde yapılan model deneyleri ile oturmalar üzerinde grup etkisi incelemişler ve kazık açıklığının 3D'den daha fazla olduğu zaman bu etkinin azaldığını, açıklık 4D'yi geçtiği zaman ortadan kalktığı sonuncuna varmışlar.[1]

Tek istisna kayaya dökülmüş noktasal yüklü kazıklardır, burada grup kapasitesi her bir kazığın noktasal kapasitenin toplamı olacaktır.

1/8 Etkileşim kuralını kimin ortaya attığı bilinmemektedir. Bu kurala göre grup içindeki belirli bir kazığın taşıma gücünü azaltmak için önce her komşu kazık için bir adet (1/8) sayısı kazık çapı / kazık aralığı (d/s) oranı ile çarpılır. Bu çarpımdan elde edilen rakam ile kazığın taşıma gücü çarpılır ve etkilenmiş taşıma gücü böylece bulunur. Dikdörtgen ızgara üzerindeki m ve n adet kazıktan meydana gelen bir grup için verim formül (4.12) ile ifade edilebilir:[4]

Tablo 4.5. Grup Etkileşim Faktörü

Zemin Cinsi	p	S/D	K
Gevşek kum	0.1-0.2	6	3-7
		4	2-4
		2	1-2
Orta sıkı kum	0.2-0.3	2	2-4
		4	1-3
		6	1
Yumuşak kil	0.8-0.9	2	1.1-1.7
		4	0.7-0.9
		6	0.5-0.6
Orta katı kil	0.6-0.7	2	1.5-1.7
		4	0.75-0.80
		6	0.50

$$E_g = 1 - \frac{12 + 10(m-2) + 10(n-2) + 8(m-2)(n-2)}{8mn} \quad (4.12)$$

Bu formülle hesaplanan ve her bir kazığın taşıma güçlerinin toplanması ile bulunan değerle çarpılarak grup taşıma gücü bulunur. Bu formülde yalnızca kazık-kazık etkileşimi düşünülmüş ve zemin özellikleri göz önüne alınmamıştır.

$$E'_s = \frac{P_g}{\sum P_p} \quad (4.13)$$

Kazık başlığı zeminin üzerinde olduğunda, deniz aşırı yapılarda olduğu gibi grup kapasitesi aşağıdakilerden en ufağı olacaktır.[16]

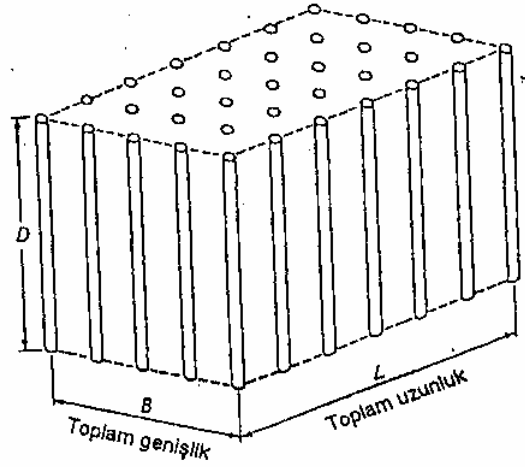
1- Grup çevresine bağlı blok kapasitesinin (L_1 mesafesi bir sıranın iki ucundaki kazıkların merkezleri arası mesafe) veya grubu meydana getiren kazıkların çevresinin toplamından ufak olanı. Her iki durumda da kazık uçlarının taşıma kapasitelerinin toplamı eklenmiştir. Grup çevresi kazık çevrelerinin toplamına eşit olacaktır, kare kazıklar için $s/D \geq \sqrt{n+1}$, dairesel kazıklar için $s/D \geq 0,7854 \sqrt{n} + 1$ (n kazık sıra sayısı).

2- Kullanılan s/D oranlarını dikkate alarak tekil kazıkların kapasitelerinin toplamı. Literatürde kayıtlı çok az tam ölçekli kazık grubu yükleme deneyi vardır. Vecis (1977) kilde 5 grup yükleme deneyi sonuçları belirtmiştir ve hepsi $E_g > 1$ değeri elde edilmiştir. Barden ve Monckton (1970) bir takım grup model deneyleri mevcuttur; ancak ölçek etkileri nedeni ile güvenli sayılmazlar.

Vesic (1969) kumda 1800 mm uzunlukta 100 mm çaplı kazıklar düşey yük etkisi altında kazık grubu deneyleri serisi tanımlamıştır. Gruplar dört ve dokuz kazıktan oluşmaktadır. Dörtlü kazık grubunda düşey yük dört kazık arasında eşit olarak dağılmıştır; dokuzlu kazık grubunda iç kazıklar köşe kazıklardan (en ufak yükü taşırlar) ve kenar (ara büyüklükte yük taşırlar) kazıklardan daha fazla yük taşırlar. Eğer iç kazıkların yüzde 100 etkili olduğunu belirtirsek köşe kazıklar yaklaşık 60 ile 70 arasında ve kenar kazıklar yüzde 80 civarında etkilidirler.[16]

4.2. Kazık Grubunun Taşıma Gücü

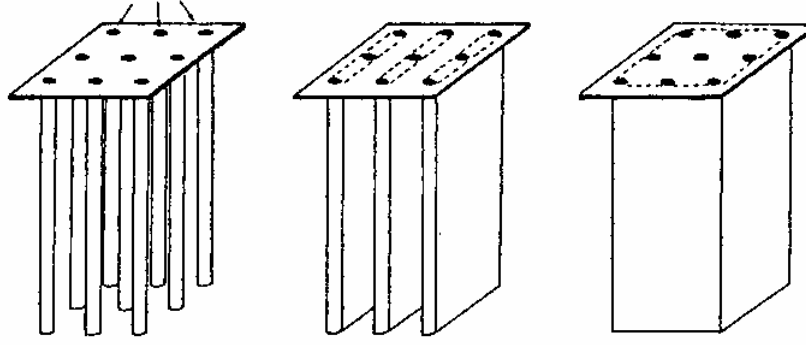
Bir kazık temelin özellikle sürtünme kazıklarına oturan bir temelin emniyetle taşıya bileceği yük, tek bir kazığın emniyetle taşıya bileceği yük ile kazık grubundaki kazık sayısının çarpımına eşit değildir. Bunun sebebi yüklerin aynı şekilde dağılması durumunda bile kazıklara eşit olarak dağılmayacağıdır. Dış kazıklar iç kazıklara göre daha fazla yüklenirler.



Şekil 4.8. Kazık Grubunun Blok Davranışı

Kazık grubunun göçmesi iki şekilde oluşabilir: Kazıkların tek göçmesi veya grubun bir blok olarak göçmesi. Kazık açıklığı fazla olduğu zaman kazıklar aşağı doğru hareket ettiklerinde kazıklar arasındaki zemin sabit kalacaktır. Gruptaki kazıklar yakın aralıklı ise kazık grubu büyük bir tekil kazıkmış gibi davranıp blok olarak göçecektir. Blok göçmesi eksensel ve yatay yükler etkisinde gerçekleşebilir. Genelde blok göçmesi açıklık/çap oranı 2' den küçük olduğunda etkileşim çok fazla olur burada kazıklar arasındaki zeminin kırılma noktasına ulaşarak tamamen plastikleşmesine sebep olur, çevresindeki kazıklarla birlikte blok gibi davranır ve göçme gerçekleşmiştir.

Alman şartnamesi (DIN 1054)' e göre ise eş değer bloğun çevresi en dıştaki kazıkların çapının 3 katı mesafedeki bir doğru ile sınırlandırılmış olarak kabul eder. Bloğun derinliği ise basınç kuvvetlerini soğuran derinlik olarak tanımlanır.



Şekil 4.9. a) Tekil Kazık Göçmesi b) Kazıkların Sıra Olarak Göçmesi c) Blok Göçmesi

Terzaghi ve Peck (1967)'in önerdiği bir değer etkinlik belirleme yöntemi ise blok göçme yaklaşımıdır. Bu yöntem kazık grubunun ve içindeki zeminin rijit bir blok gibi hareket edeceğini kabul eder. Bu yöntem zemin özelliklerini de hesaba katar. Kazıklı bir temelin blok halinde davranması; her zaman olası bir durum değildir ve bu davranışı önemli ölçüde kazık aralığını etkiler, bu yaklaşım içinde iki adımda bir çözüm takip edilir. [4]

Kazık başlığı rijittir.

Kazık grubu içindeki zemin kazıklarla beraber bir blok olarak davranır.

Terzaghi-Peck metodunda, kazık grubu derin bir temel gibi düşünülerek toplam taşıma gücü bulunur. Blok çevresi ve tabanındaki kuvvetlerin dengesi göz önüne alınırsa aşağıdaki gibi ifade elde edilir:

$$Q_g = PL_s + A_t q_f - A_T L \gamma \quad (4.14)$$

Burada :

S = Kazık bloğunu çevreleyen zeminin ortalama kayma mukavemeti,

L = Zemin içinde kalan kazık boyu ,

P = Kazık grubunun plan görünümdeki toplam çevre uzunluğu,

A = Kazık grubunun plan görünümündeki alanı,

γ = Zeminin birim hacim ağırlığı,

Killi zeminler için ifadesinde görülen q_f (Kazığın oturduğu derinlikteki taşıma gücü):

$$q_f = 1.3cN_c + \gamma L \quad (4.15)$$

olarak alınabilir.

Kuma çakılmış kazık grubu kazığın çevresinde bulunan zeminde kazık çapının en az üç katı mesafede kompaksiyon etkisi yaratır ve güçlendirme sağlarlar. Kazık grubunun genişliği tekil kazığinkinden büyük olacağından göçme yükü artma eğilimi gösterecektir. Bu yüzden daneli zeminlerde kazık gruplarının etkinlik oranı grubu oluşturan her bir kazığın toplamından büyük veya geniş aralıklı grubular için eşit olacaktır.

Kazıklarda taşıma gücünü etkileyen etkenler aşağıdaki gibi verilebilir [2]:

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

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

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

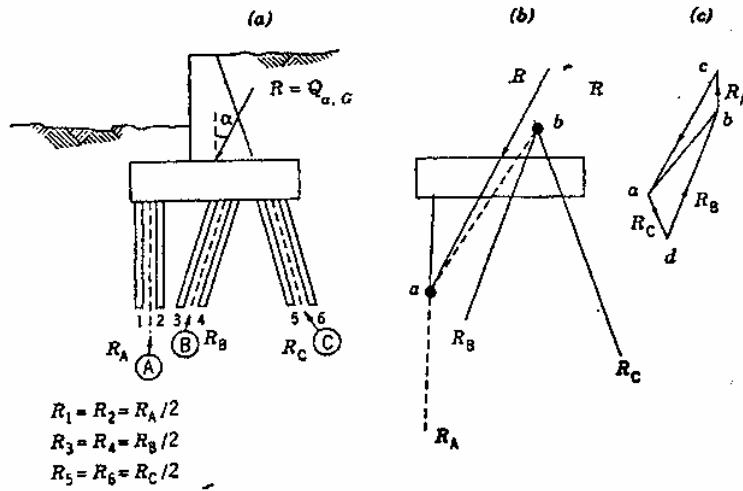
Büyük sallantı ve titreşimler gibi dinamik zorlanmaların tesiri, kazık gücünün azalmasına neden olabilir.

Kazık grubunun etki bölgesinde daha fazla sıkışabilen veya zayıf zemin oluşamayacağına dikkat edilmelidir.

Clumann Yöntemi (1866) düşey ve eğik kazıklara gelen yük dağılımını belirlemek için geliştirilmiş basit yöntemlerden biridir. Sıkça kullanılan bu yöntem grafiksel çözüme dayanmaktadır. Kazıkların sadece düşey kuvvet aldığı, yükün bir düşey kazık grubu ile aksi doğrultularda eğimli iki kazık grubu ile taşındığı kabul edilir. Kazıklar eğimlerine göre gruplara ayrılırlar. Her bir paralel kazıktan oluşan kazık grupları bu grubun ağırlık merkezinden geçen hayali bir kazığa dönüştürülür. Örneğin Şekil(4.10)'da R bileşke kuvveti kazık gruplarının ekseninden geçen üç

bileşene ayrılır. R_A , R_B , R_C kuvvetlerini hesaplamak için birinci adım R_A a noktasında eksenle kesiştirilir. Sonra a noktası R_B ile R_C eksenlerinin kesiştiği b noktası ile birleştirilir ve oluşacak bileşenin doğrultusu belirlenir Şekil (4.10b). Daha sonra şekil (4.10c)' de görüldüğü gibi c noktasından R_A 'nın doğrultusu olan cb doğrusu çizilir. b noktasından R_B 'ye paralel bir doru çizilir ve d noktası elde edilir. Böylece R_A cb'ye, R_B bd'ye R_C ad'ye ölçekli bir şekilde eşit olacaktır. [18,19]

Kazıklara gelen kuvvetlerin bileşkesi bileşke çekme ise şekil (4.10)'da görüldüğü gibi kuvvet bileşenleri çokgen şeklini almaktadır.



Şekil 4.10. Culman Yönteminin Uygulanması [19]

4.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü

Kohezyonsuz zeminlerde yer alan sürtünme kazıklarının grup etkisini belirlemek için geoteknik mühendisleri pek çoğu basitleştirilmiş analizler kullanmaktadır. Basitleştirilmiş analiz Şekil (4.11)'de gösterilmektedir.

Eksenden eksene ara açıklıklarının birbirine olan etkisi aşağıda açıklandığı gibi olmaktadır:

1. $[L_g \times B_g \times L]$ boyutlarında bir blok olarak
2. Tekil kazıklar olarak

Eğer kazıklar blok etkisi gösteriyorsa grubun sürtünme kapasitesi (4.3) ifadesi tayin edilebilir. [18]

$$Q_g = P_g L f_s \quad (4.16)$$

$P_g = [L_g \cdot B_g \cdot L]$ boyutlarındaki bloğun en kesit çevresi olup (n_1 ve n_2 kazık grubunda her iki yöndeki kazık sayıları olmak üzere)

$P_g = 2(n_1 \text{ ve } n_2 - 2)d + 4D'$ dir. Bu değer kazığın en kesit çevresidir.

L = Kazığın uzunluğu

D = Akstan aksa iki kazık arasındaki mesafe

f_s = Ortalama birim çevre sürtünmesi olmaktadır. Bezer olarak grup içindeki her bir kazığın etkisi tek tek hesaplanabilir.

$$F = PL f_s \quad (4.17)$$

4.2.2. Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü

İstenmeyen bir durum olmasına karşın kazık grubunu yumuşak killi, gevşek kum veya dolgulu zeminde çakılarak sıkı kilde sonlandırmak zorunda kalabiliriz. Bu durumda kazık grubu blok göçmesine karşı tahkik edilmelidir ve güvenlik sayısı kullanılmalıdır. **Tomilson (1994)** grubun çevrelediği blok zeminin nihai kapasitesini 4.18 denklemi ile hesaplanmıştır.[17]

$$E_g = 2D(B+L) c + 1.3c_b \kappa N_c B L \quad (4.18)$$

Bu ifade;

D = Kazıkların zemin yüzeyinden itibaren derinliği

B = Grubun toplam genişliği

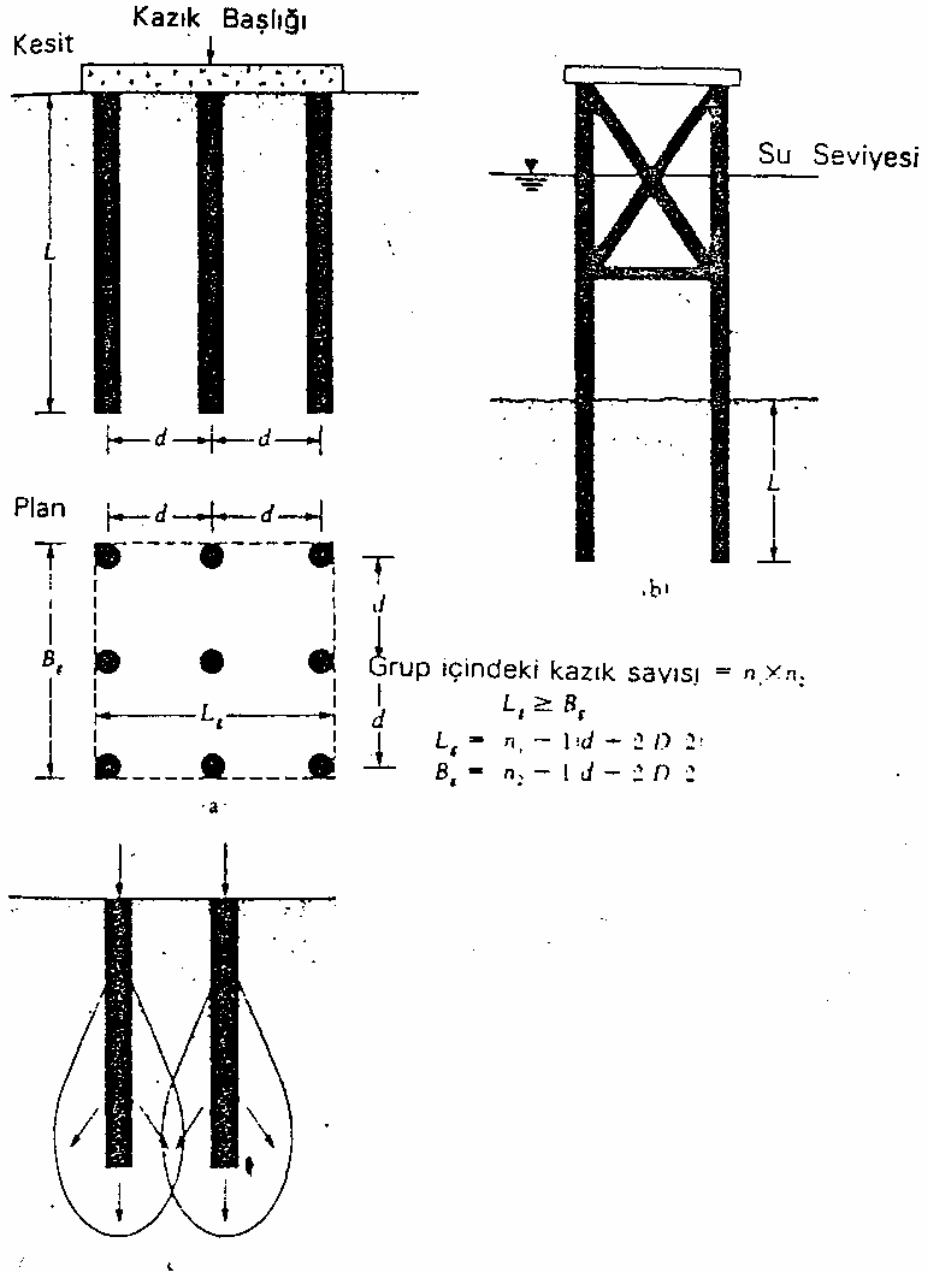
L = Grubun toplam uzunluğu

c = Blok çevresinde bulunan zeminin ortalama kohezyon değeri

κ = Şekil faktörü

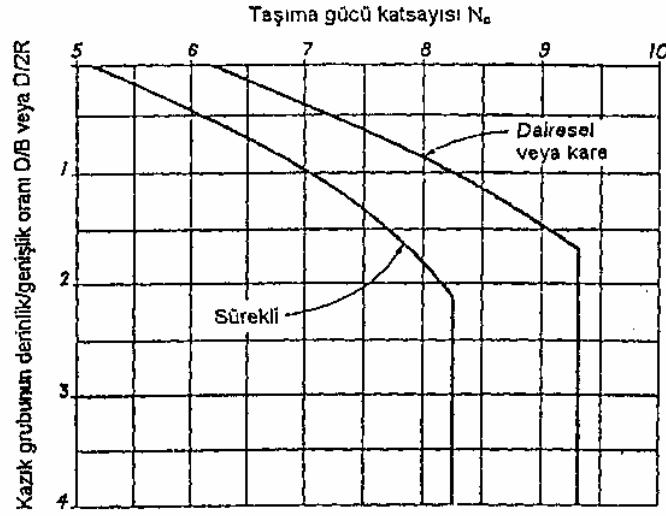
N_c = Taşıma gücü katsayısı

c_b = Blok tabanındaki zeminin kohezyon değeri

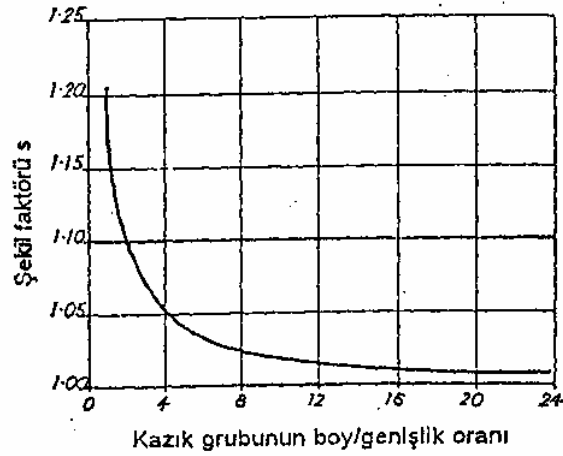


Şekil 4.11. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazık Gruplarının Taşıma Gücü Hesabı için Basitleştirilmiş Yöntem [11]

N_c kazık grubunun derinlik/en oranına (L/B_g)' ye bağlı olarak, κ şekil faktörünün değerleri kazık grubunun B_g/L_g oranına bağlı olarak verilmiştir. Daire veya kare şeklinde yerleştirilmiş kazıklarda, derinlik/en oranının 2'den büyük olması halinde taşıma faktörü $N_c=9$ alınabilir.

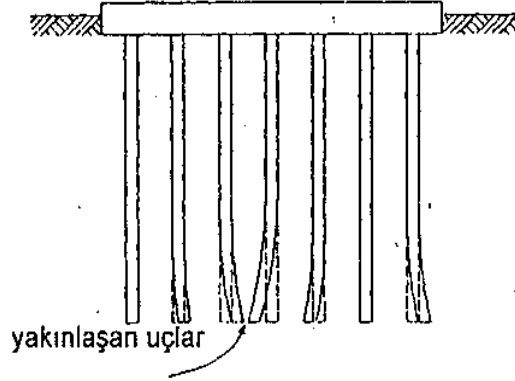


Şekil 4.12. Dikdörtgen Kazık Grupları için Şekil Faktörü [17]



Şekil 4.13. Taşıma Gücü Katsayısı [17]

Hassas kile çakılmış kazık grubunda çevredeki efektif stres artışı gruptaki kazıklar için tekil kazıklardan daha az olabilir. Buda düşük shaft kapasitesi sonucunu verebilir. Kazık grubu az sayıda kazıktan oluştuğunda gruptaki iki veya daha fazla kazık doğrultularından sapar ve birbirlerine yaklaşırlar veya uç noktalarından temas ederlerse aşırı taban oturması meydana gelebilir.



Şekil 4.14. Kazıkların Gruptaki Doğrultularından Sapma Etkisi

4.3. Kazık Gruplarının Altında Bulunan Zemin Tabakalarındaki Gerilmeler

Grup içerisindeki kazıklar tarafından oluşturulan zemin gerilmelerinin bir dayanım veya oturma yapması beklenir. Bu gerilmelerin hesabı bir çok nedenden dolayı güçtür. Bu nedenleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz[16]

- 1- Kazık başlığının etkisi, şişen zeminler hariç genellikle zeminle doğrudan temas halindedir. Bu temas, kazık-zemin etkileşimini belirsiz hale getirmektedir.
- 2- Kazık boyunca oluşan sürtünme etkisi dağılımının bilinmemesi, bu yüzden kazık uç yükünün de bilinmemesi.
- 3- Komşu kazıkların gerilmelerinin örtüşmesi hesaplamayı güçleştirmesi.
- 4- Komşu zemine kazıkların çakma etkisi.
- 5- Zamana bağlı etkilerin örneğin konsolidasyon, tiksotropi, değişken yükler, yer altı suyu seviyesindeki değişim gibi zamana bağlı etkilerin oluşması.

Şekil 4.15'te gösterildiği gibi bütün bu değişkenleri dikkate alarak gerilme hesabını kolaylaştırmak sık rastlanan bir çalışmadır. Sürtünme kazıkları için iki durum dikkate alınabilir. Birinci durumda (Şekil 4.15a) yükün 2:1 eğimde (veya 30°) sürtünme direnci sağlayan tabakanın üzerinde bulunan (ortalama derinlik) Şekil 4.15b deki gibi hayali rijit bir temel ayağına yerleştirilmiştir. Katmanda durum 1 veya 2'den büyük gerilme değerini veren durum kullanılır. Blanchet (1980) bu yöntemin oturma

hesabında kullanılmasının çok da uygun olmadığını ve elastik çözümün tercih edilebilir olduğunu belirtmiştir.

Kum-Çakıl yığınları veya sıkı kumlarda bulunan noktasal yüklü kazıklar olması durumunda bir temel ayağı kazığın gireceği zemine yerleştirilmiştir. Tekrar, yük 2:1 veya 30° eğime yayılmıştır.

Bu analizler çalışan katmanda aşırı gerilmenin oluşmasını engellemek için gereklidir. Aynı zamanda gevşek daneli zeminlerde veya killi zeminlerdeki konsolidasyon oturmasını hesaplamak için gereklidir. Anlaşılabileceği gibi kazık grupları sürtünme kazıkları olması durumunda yükü L_p derinliğindeki zemin kütlelerine veya arkadan yüklü kazıklar olması durumunda tüm derinliğe iletir.

Bu derinliklerde veya daha derinlerde bulunan zeminler yükü aşırı deformasyona uğramadan taşınmalı veya daha derin tabakalara aktarmalıdır.

Boussinesq analizlerinde olduğu gibi, bu yöntem zemini yarı sonsuz, izotropik, homojen ve elastik olduğunu kabul eder. Zemin genelde bu kabullere uymaz, bu nedenle çözümler hatalıdır fakat Boussinesq çözümü kadar iyidirler ve temel altı oturması hesabında çokça kullanırlar.

Daha sonra **Geddes (1969)** Boussinesq çözümü kullanılarak zemin altı yüklemesi ile ilgili çözümler yapmıştır. Bu çözümler genellikle Mindlin çözümünden daha doğrudurlar. **Poulos ve Davis (1968)** oturma tahmini için Mindlin çözümünü kullanmışlardır. Gerilme katsayıları çizelgesini vermek yerine oturma – etkileşim faktörleri grafiğini vermişler. Gerek Geddes gerekse Poulos ve Davis çözümleri Mindlin çözümüne dayandıklarından dolayı çözümleri doğru kullandıkları taktirde aynı şekilde

1. Durum için düşey gerilme şu şekildedir.

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left\{ -\frac{(1-2\mu)(z-L_p)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z-L_p)}{R_2^3} - \frac{3(z-L_p)^3}{R_1^5} - \left[\frac{3(3-4\mu)z(z+L_p)^2 - 3L_p(z+L_p)(5z-L_p)}{R_2^5} \right] - \frac{30zL(z+L_p)^3}{R_2^7} \right\} \quad (4.19)$$

$$\tau = \frac{P_r}{8(1-\mu)} \left\{ -\frac{1-2\mu}{R_1^3} + \frac{1-2\mu}{R_2^3} - \frac{3(z-L_p)^3}{R_1^5} \right. \quad (4.20)$$

$$\left. - \left[\frac{3(3-4\mu)z(z+L_p) - 3L_p(3z+L_p)}{R_2^5} \right] - \frac{30zL_p(z+L_p)^2}{R_2^7} \right\} \quad (4.21)$$

$$R_1^2 = r^2 + (z-L_p)^2 \quad (4.22)$$

$$R_2^2 = r^2 + (z+L_p)^2 \quad (4.22)$$

Diğer denklemler benzer formdadır, bu yüzden gösterilmemektedir. Bilgisayar programlaması için bunlar aşağıda verilerle yer değiştirerek boyutsuz olarak ifade edilir.

$$n = \frac{r}{L_p} \quad m = \frac{z}{L_p} \quad F^2 = m^2 + n^2$$

$$A^2 = n^2 + (m-1)^2 \quad B^2 = n^2 + (m+1)^2$$

ve düşey gerilmeyi elde etmek için bir gerilme katsayısı girilir.

Durum 1 için gerime katsayısı

$$\sigma_z = \frac{P}{D_2} K_z \quad (4.23)$$

Durum 1 için gerilme katsayısı K_z ise şu şekilde ifade edilmiştir.

$$K_z = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)}{A^3} + \frac{(1-2\mu)(m-1)}{B^3} - \frac{3(m-1)^3}{A^5} \right. \quad (4.24)$$

$$\left. - \frac{3(3-4\mu)m(m+1)^2 - 3(m+1)(5m-1)}{B^5} - \frac{30m(m+1)^3}{B^7} \right]$$

$$K_z = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[\begin{aligned} & -\frac{2(2-\mu)}{A} + \frac{2(2-\mu) + 2(1-2\mu)\frac{m}{n}(\frac{m}{n} + \frac{1}{n})}{B} - \frac{(1-2\mu)(\frac{m}{n})^2}{F} \\ & + \frac{n^2}{A^3} + \frac{4m^2 - 4(1-\mu)(\frac{m}{n})^2 m^2}{F^3} + \frac{4m(m+1)(\frac{m}{n} + \frac{1}{n})^2 - (4m^2 + n^2)}{B^3} \\ & \frac{6m^2(\frac{m^4 - n^4}{n^2})}{F^5} + \frac{6m(mn^2 - \frac{1}{n^2}(m+1)^5)}{B^5} \end{aligned} \right] \quad (4.25)$$

$$\sigma = n^2 + (m-1)^2 \quad (4.26)$$

$$K_z = \frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\begin{aligned} & -\frac{2(2-\mu)}{A} + \frac{2(2-\mu)(4m+1) - 2(1-2\mu)(\frac{m}{n})^2(m+1)}{B} + \\ & \frac{2(1-2\mu)\frac{m^3}{n^2} - 8(2-\mu)m}{F} + \frac{mn^2 + (m-1)^2}{A^3} + \\ & \frac{4\mu n^2 - 4m^3 - 15n^2m - 2(5+2\mu)(\frac{m}{n})^2(m+1)^3}{B^3} + \\ & \frac{2(7-2\mu)mn^2 - 6m^3 + 2(5+2\mu)(\frac{m}{n})^2 m^3}{F^3} + \frac{6m^2(n^2 - n^2) + 12(\frac{m}{n})^2(m+1)^5}{B^5} \\ & \frac{12(\frac{m}{n})^2 m^5 + 6mn^2(n^2 - m^2)}{F^5} - 2(2-\mu) \ln \frac{A+m-1}{F+m} \frac{B+m+1}{F+m} \end{aligned} \right] \quad (4.27)$$

P= Tek kazığa yada guruba etkiyen yük

σ_z = Düşey gerilme

τ = Kayma gerilmesi

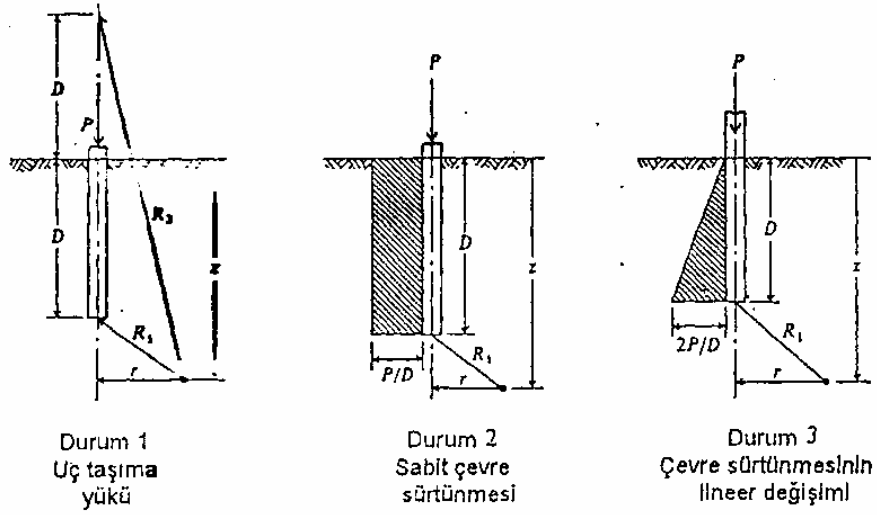
K_z = Gerilme katsayısı

D =Kazık derinliği

μ = Poisson oranı

z = Gerilme derinliği, aranan noktanın derinliği

n, m = Tekil yük için gerilme katsayıları. Bu yöntem kazık ucunun altındaki zeminde konsolidasyon oturmasının hesabı için düşey gerilme profilini elde etmek için tavsiye edilebilir. Bununla birlikte hesaplar deformasyonların zemin ağırlığından dolayı oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.15. Midlin Çözümünü Kullanarak Zemin Gerilmelerinin Hesaplanması için Zemin Kazık Sistemi

5. SONLU ELEMANLAR METODU

5.1. Giriş

Sonlu elemanlar metodunun gelişimi, özellikle, metodun varlığının söz konusu olduğu 1950’li yıllardan beri çok fazla ilgi çekicidir. Sınır değer problemlerinin nümerik olarak çözümü için yapılan çalışmalar, sonlu farklar konusuna öncülük etmiş olabilir; çünkü Southwell bu tip metotların kullanımını 1945 yılında yayımladığı kitabında konu edindi. Sonlu eleman metodunun başlangıç, ilk nümerik metotlar ve sonlu farklar metotlarının geometrik olarak düzensiz problemlerde daha zor bir çözüm oluşturmamasından doğmuştur.

1950’lilerin başlarında elastisitede, sürekli ortam problemlerini çözmek için gösterilen çabalar, basit elastik çubukların bütün davranışlarını tanımlamak için küçük ayırık “elemanlar” kullanılması ile başladığı görülmüştür. İlk olarak, Argyris ve Turner bu tip metotların hava endüstrisinde kullanılması üzerine yayınlar yaptılar. İlk ve gerçek anlamda “sonlu eleman” teriminin uydurulması Clough tarafından yayımlanan bir yazıda görüldü. [13]

Sonlu elemanların ilk kullanımı, yapı ile ilgili problemlere uygulanan tekniklerle sınırlı kaldı. Bununla birlikte, metodun değişkenliği ve zengin matematik temellerinin altında, çok geçmeden çeşitli kişiler tarafından yapı ile ilgili olmayan alanlara da uygulandığı görüldü. Zeinkiewicz ve Chang, sonlu elemanlar metodunu, Poisson ve Laplace denklem takımı çözümü gerektiren alanlara (ısı iletimi, çevrimsiz sıvı akışı v.b) uygulayanlar arasında ilk kişilerdir. Lineer olmayan problemler üzerine yapılan ilk çalışmalarını çoğu Oden’de bulunabilir. Kompleks sınırları olan ısı transferi problemlerinin modellenmesi çabaları Huebner’de tartışıldı; ve Heuser tarafından ısı iletimi için bir üç boyutlu sonlu eleman modellenmesi tanımlandı. Sonlu elemanlar tekniğinin viskos sıvı akışına uygulanması Martin tarafından yapılmıştır. [13]

Metodun kullanımdaki gerçek artış 1970’li yılların ortalarında meydana geldi; büyük oranda makaleler, metinler yayımlandı ve yeni uygulamalar ardışık olarak literatürde

görüldü. Metoda, mükemmel bir şekilde bakış tanımlama Finlayson, Desai, Becker et al, Fletcher, Reddy, Segerlind, Hughes, Bickford ve Zienkiewicz-Taylor tarafından yayımlanan metinlerde bulunabilir. Kesin bir matematik tartışma, Jonhson tarafından tanımlandı. Sonlu eleman metodunun gelişimi üzerine yazılmış kısa bir inceleme yazısı Owen ve Hinton tarafından yapılmıştır.

Sonlu eleman metodunun temeli ilk olarak, Rayleigh ve Ritz tarafından sunulan klasik Rayleigh-Ritz metodu ve varyasyon hesaplama prensiplerileridir. Bu teoriler, varyasyon ifadelerinin elde edilebileceği (lineer difizyon-tip problemler) tip problemler için sonlu elemanlar metodunun uygulanabileceği gösterdi.

Matematik ifadelerin, lineer olmayan ve yapı ile ilgili olmayan problemler için gelişmesi, 20.yüzyılın başında Galerkin tarafından kaleme alınan ağırlıklı kalanlar metodu, başarılı bir şekilde uygulandı, ağırlıklı kalanlar metodu, Rayleigh-Ritz metodunun bile uygulanabildiği, geniş bir problem takımı için ideal teorik esas teşkil ettiği anlaşıldı. Temel olarak, bu metot önceden tayin edilen, bir ağırlık takımı ile çarpılan yönetici bir diferansiyel denklem takımı gerektirir, ortaya çıkan sonuç, tüm alan boyunca integra edilir. Teknik olarak, Galerkin metodu, değişik tipte ağırlıklardan yararlanılabilen, genel ağırlıklı kalanlar metodunun bir sonucudur. Bu nedenle, Galerkin metodunda ağırlıklar, önceleri bilinmeyen değişkenlerin tanımlandığı fonksiyonun aynısı gibi seçilirdi. Galerkin metodu, lineer, eliptik denklemler için Rayleigh-Ritz metoduna yaklaşık sonuç verir. Ağırlıklı kalanlar metodunda, fonksiyon yerine sabit ağırlıklar kullanılmasıyla sonlu hacim tekniğine ulaşılır. Ağırlıklı kalanlar metodunu doğru tanımlaması Finlayson 'de bulunabilir. Bugün çoğu uygulamacı, yönetici denklemlerdeki yaklaşıklığı elde etmek için Galerkin metodu ile çalışmaktadır. Bu metodun kolaylığı ve basitliği dikkat çekicidir. Bu nedenle, kullanıcı daha karmaşık ve daha değişik tipte istenen problemleri kolayca geliştirebilir. [13],[14]

5.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulandığı Alanlar

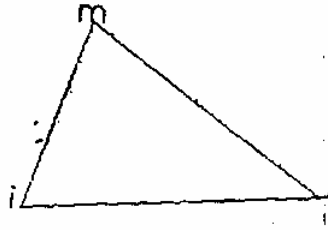
- a)** Yapı mühendisliği: çubuk, plak, levha ve kabukların çözümünde
- b)** Zemin mekaniğinde: şevlerin gerilme analizinde, barajlarda, tünellerde, kazıklı temellerde
- c)** Hidrolikte: viskoz akımda, sürtünme maddelerinin taşınımında, dalga titreşiminde
- d)** Isı transferinde: ısı akımı taşınımında

e) Nükleer enerjide: reaktörün statik ve dinamik analizinde, ısı akımında

f) Elektrik mühendisliğinde: devre analizlerinde, manyetik potansiyel dağılımında kullanılır. [15]

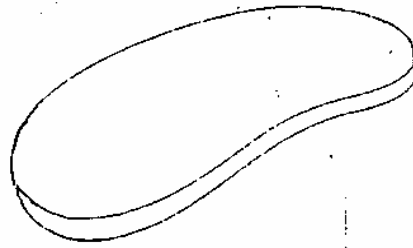
5.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Tanımı

Sonlu eleman metodunun gayesi; yapıyı, cisimi, bölgeyi analiz etmek için çok fazla sayıda sonlu elemana veya basit elemanlara bölmektir. Bu elemanlar bir, iki ve üç boyutlu olabilir. Çok kullanılan ve klasik iki boyutlu eleman şekil 5.1’de gösterildiği gibi üçgen elemanlar. İki boyutlu bir yapı, yüzlerce hatta binlerce elemana (üçgen dörtgen v.b) bölündüğü zaman, yapının bütün geometrisinin temsil edildiği kolayca görebiliriz. Bu özel eleman (üçgen) köşelerine uygunca yerleştirilmiş olan i, j, m düğüm noktalarından oluşur.



Şekil 5.1. Üç Düğüm Noktalı Bir Eleman

Şekil 5.2’de düzensiz geometriye sahip bir plak eleman gösterilir. Bu plak elemanda; malzeme, belirlenmiş sınır koşulları v.b. için plaktaki sıcaklık dağılımı hesaplanmasının istenildiğini kabul edelim. Burada ilgili değişken sıcaklıktır.



Şekil 5.2. Değişken Kalınlıklı ve Düzensiz Şekilli Bir Plak Eleman

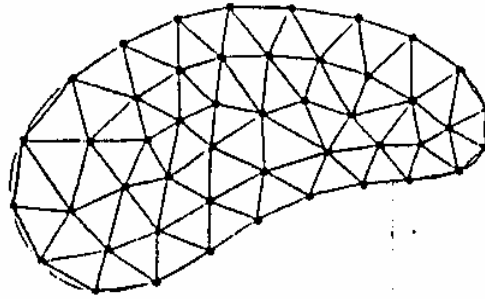
Kapalı form analitik çözümler mevcut olduğu zaman, teorik olarak istediğimiz bir noktada sıcaklığı hesaplayabiliriz. Çünkü matematik olarak sıcaklık x ve y ’nin

fonksiyonu olarak ifade edilir ($T=f(x,y)$). Şekil 5.2'deki gibi düzensiz geometriye sahip olan bir eleman, genellikle kapalı form analitik yöntemlerle çözülemez. Bu yüzden değişik yaklaşımlar üretilerek bu problemi çözmek gerekir.

Bu problemde sonsuz noktadaki sıcaklıkların hesaplanması yerine, sonlu sayıdaki noktada sıcaklığın hesaplanması, çözüm açısından daha kolay ve yeterli olur. Bu noktalarda üçgen elemanın düğüm noktaları olarak alınır. Şekil 5.3'de eğrisel sınırlara sahip olan bir plak elemanın, üçgen elemanlarla temsili gösterilir. Burada sonlu eleman metodu, sadece plağın düğüm noktalarındaki analizini verir. Her eleman için bir interpolasyon fonksiyonu kullanarak sıcaklık değişkeni tanımlanır. Nodal noktalardaki sıcaklık bilgileri; bölge içinde genel sıcaklık alanını tahkik etme imkanı verir. Bu sıcaklıklar sık sık nodal sıcaklıklar olarak vurgulanır. Ve böylece her elemandaki sıcaklık ve ısı akışı hesaplanır.

Böyle problemleri çözmek için, yüksek hızlı bilgisayarlar kullanılmak zorundadır. Konu ile ilgili bilgisayar programına, her düğüm noktasının koordinatları, eleman tanımları, malzeme sayısı, sınır koşullarını v.b verilir. Genel olarak eleman sayısı arttıkça sonuçların doğruluğu da artar. Buna karşılık, bilgisayarın problemi çözme zamanı da artar. Bu sebeple, eleman sayısı tecrübelerle dayalı olarak alınmalıdır.

Yukarıda verilen örnek ısı transferi ile ilgiliydi. Bununla beraber, aynı düşünceler yapı, hidrolik, geoteknik v.s. problemlere uygulanabilir. Yapı ile ilgili uygulamalarında, alan değişkeni; yer değiştirmeler, deplasman, eğim v.s. olabilir. Bu yüzden yapı ile ilgili sonlu eleman model analizinden, nodal yer değiştirmeleri, nodal deplasmanları ve eğimleri hesaplayabiliriz. Ve ayrıca bu sonuçlardan bir elemandaki eğilme momentlerini, gerilmeleri kolaylıkla hesaplayabiliriz.

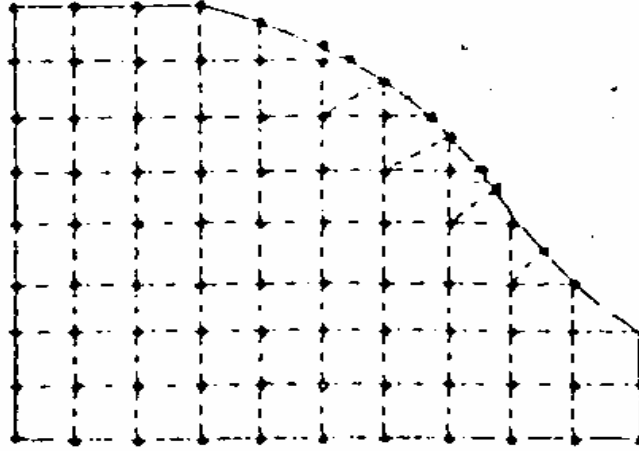


Şekil 5.3. Düzensiz Geometrisi Olan Bir Plak Elemanın Sonlu Elemanlara Ayrılması

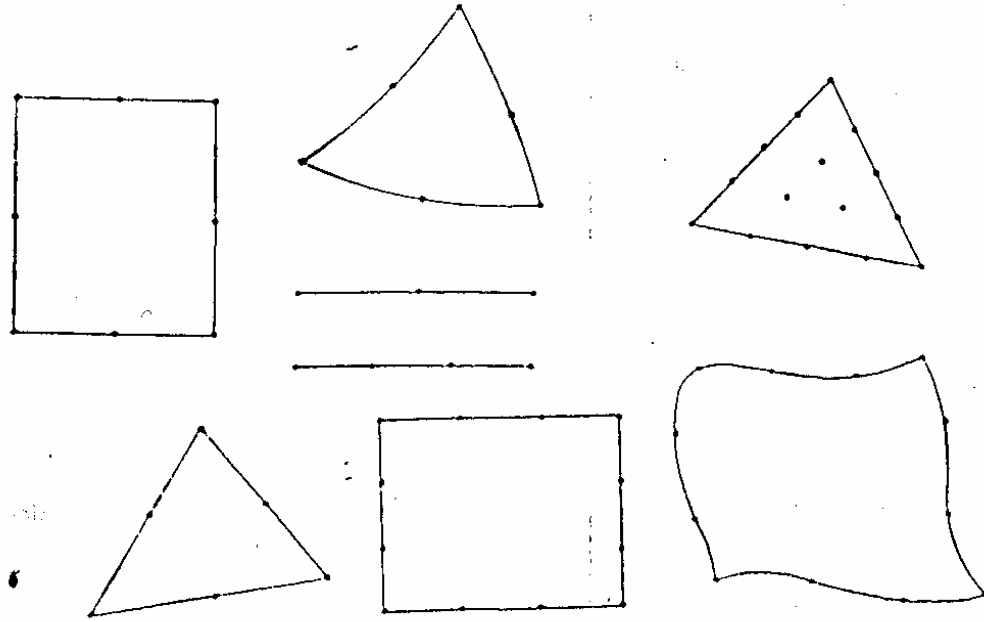
5.4. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları

Sonlu eleman metodunun (FEM) avantajlarının aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Alışagelmiş düzensiz geometrileri ele alır ve çözüm üretir. İki boyutlu uygulamalarda çeşitli üçgen, dörtgen elemanlar kullanılır. Eğrisel kenarlı bölgeler daha ufak elemanlara bölünerek, gerçek eleman geometrisine yaklaşır. Şekil 5.4'de böyle bir eleman gösterilir.
- FEM'da düğüm nokta aralıkları değişken olarak ele alınabilir. Bir yapı yada eleman, sonlu elemanlar kullanılarak bölgelere ayrıldığı zaman, düğüm noktaları bir ağ oluşturur. Şekil 5.4'de çeşitli sonlu elemanlardan oluşmuş ağ gösterilir. FEM için oluşturulan ağlarda, düğüm noktalar arası mesafeler değişken olarak alınabilir.



Şekil 5.4. Üçgen, Dikdörtgen ve Dörtgen Elemanlara Ayrılmış Düzensiz Şekilli Bir Cisim



Şekil 5.5. Bir ve İki Boyutlu Yüksek Mertebeden Elemanlar

- c) Homojen ve izotrop olmayan malzemeleri ele alarak çözüm üretir. Diğer analitik bu tip malzemelere çözüm üretemez. Bir sıcaklık analiz içinde heterojen malzemenin özel bir durumu, sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğidir. Bunun sebebi açıklanabilir. Isı iletkenliği, sıcaklığın bir fonksiyonudur ve sıcaklık da koordinatların bir fonksiyonudur. Sonuç olarak ısı iletkenliği, koordinatların bir fonksiyonu olmak zorundadır.
- d) Sonlu elemanlar metodu yüksek mertebeli (eleman içinde ve eleman kenarları üzerinde düğüm noktası bulunma durumu) elemanları kolaylıkla çözebilir. Bir çok yüksek mertebeli eleman şekil 5.5’de gösterilir.

5.5. Sonlu Elemanlar Metodunun Dezavantajları

Sonlu eleman metodunun (FEM) dezavantajı bilgisayar ve sonlu elemanlar metodu için yazılmış bir program gerektirmesidir. Örnek olarak, NASTRAN adlı bir anten (alıcı) programı 430.000’den daha fazla satıra sahiptir. Elbette bütün programlar bunun kadar yoğun olmayabilir. Sıradan alışagelmış problemler için, küçük programlar yeterlidir. Fakat özel konular için, yoğun bir program yazmak gerekmektedir. Günümüz bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişim, sonlu eleman metodunun kullanımını daha da arttırmıştır.

5.6. Sonlu Elemanlarda Yakınsama Kriterleri

Sonlu elemanlar metodunda, gerçek sonuçlara yakınsama hızının artması için en önemli etken; elemanlarda yer değiştirme parametrelerinin birim değerlerine karşı gelen seçilmiş yer değiştirme fonksiyonlarının uygunluğudur. Bu fonksiyonların belirlenmesinde yakınsaklık kriteri olarak bilinen bazı özelliklerin sağlanması, metodun yakınsaklığının temini için önemlidir. Bu kriterler:

- a) Seçilmiş yer değiştirme fonksiyonları eleman içinde ve kenar boyunca süreklilik şartını sağlamalıdır.
- b) Rijit cisim hareketinden dolayı gerilme ve şekil değiştirme olmamalı, sabit yer değiştirme şartı sağlanmalıdır.
- c) Yer değiştirme fonksiyonları eleman içinde sürekli olmalıdır. Eleman boyutu küçültülerek gerilme yayışı sabiti yakın hale getirilir.

5.7. Sonlu Elemanlar Metodundaki Hatalar

Yöntemde meydana gelen hataları kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

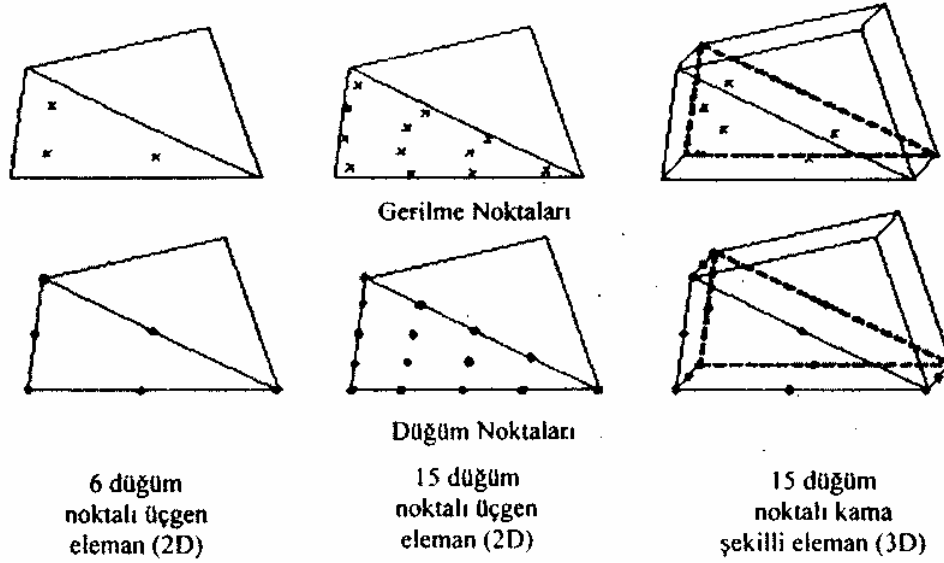
- a) İdealizasyon hataları; eğri ve değişik geometrik şekiller doğru parçalarla idealleştirilmesinde kaynaklanır.
- b) Eleman büyüklüğü hataları: Sistemi küçük elemanlara bölmek daha doğru netice verir.
- c) Eleman biçimi seçilmesi hataları: Düzgün ve simetrik elemanlar, düzgün olmayan ve sivri kenarlı sonlu elemanlardan daha iyi sonuç verir.
- d) Kabullerde yapıla hatalar: Seçilen yerleştirme fonksiyonlarının tabiatında bulunan hatalar.
- e) Yuvarlatma hataları: Yaklaşımlar ve hesap esnasındaki değerlerin yuvarlatılmasından oluşan hatalar.

5.8. Plaxis 3D Foundation Programının Özellikleri

5.8.1. Programın Genel Özellikleri [14]

“ Plaxis 3D Foundation” özellikle temel sistemlerindeki deformasyon ve taşıma gücü problemlerinin sonlu elemanlar metodu ile 3 boyutlu analiz edilerek, çözümlemesi için geliştirilmiş ticari bir yazılımdır. Zemin veya kayanın doğrusal olmayan, zamana bağlı ve eş yönsüzlük özellikleri, ileri yapısal modellerle temsil edilebilmektedir. Ayrıca zeminin çok fazla yapısı temsil edilebilmekte, statik boşluk suyu basınçları hesaplanabilmektedir. Yapı zemin arasındaki etkileşim, sıfır kalınlıklı özel ara yüzey elemanları (interface) ile otomatik olarak modellenenbilmektedir.

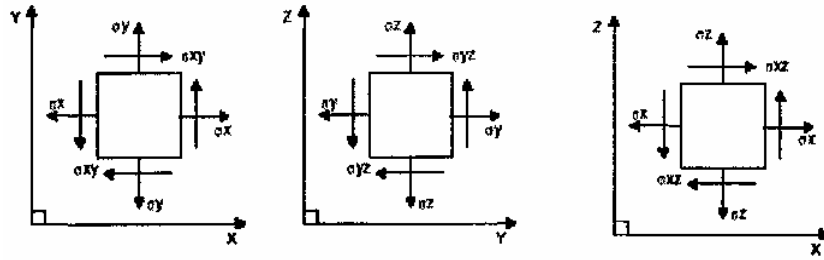
Yazılımda istenilen kesitin zemin tabakaları, yapılar, yapım aşamaları (hesap aşamaları), yükler ve sınır şartları grafik olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca kesitin düzgün olmayan elemanlardan oluşan iki boyutlu sonlu eleman ağı otomatik olarak oluşturulmaktadır. Altı düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı tanımlanmaktadır. Üç boyutlu sonlu elemanlar ağında, gerilme ve deformasyonların hesaplanması için 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmaktadır.(Şekil 5.6).



Şekil 5.6. 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 5.7 gösterildiği gibidir.

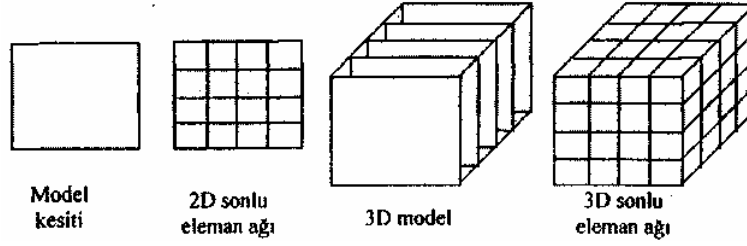


Şekil 5.7. 3D Katı Sürekli Ortam Elemanlarındaki Pozitif Gerilme Yönleri [13]

5.8.2. 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 ve 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 üç 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 oluşturmaktadır. Daha önce y eksenini gerekli kordinatları tanımlanmakta ve böylece x-z eksenlerindeki kesitin istenen sayıda kopyası, y eksenini boyuca düzlemleri oluşturmaktadır. Düzlemler arasında kalan hacimlerde dilimleri oluşturmaktadır.(Şekil5.8)



Şekil 5.8. 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 yada pasif hale getirilmesi ile temsil edilebildiğinden gerilme ve deformasyonlar kolaylıkla gerçeğe yakın olarak tahmin edilebilmektedir.

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

5.8.3. Kullanılan Yapısal Modeller [14]

Kazıkların modellenmesinde zemin elasto-plastik, kazık ile 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 modüllü E , poisson oranı ν , zeminin birim hacim ağırlığı γ , zeminin kohezyonu c , içsel sürtünme açısı ϕ dir.

Mohr- Coulomb’da yapısal modeli Coulomb sürtünme yasasının genelleştirilmiş olup ve (5.1)deki gibidir.

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

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

Mohr – Coluomb akma fonksiyonu gerilme invariantları cinsinden şöyle yazılabilir.

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

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

6. SONLU ELEMENLAR PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

6.1. Plaxis 3D Foundation İle Modelleme Yapılması

Kullanılan sonlu elemanlar yönteminde model oluşturulurken bazı kabuller yapmak ve bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Gerçek problemi doğru bir şekilde modellemek çok önemlidir. Bunun dışında uygun elemanlar, iyi bir sonlu elemanlar ağı, doğru zemin parametreleri kullanılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken noktalar kazık-zemin modeli, sonlu elemanlar ağı, geometri, malzeme, sınır koşulları ve 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, $L=20\text{m}$ sabit uzunlukta kohezyonsuz zeminde ve kayaca soketli durumda kazıklar tek ve grup olarak düşey yük etkisi altında davranışları Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programıyla belirlendi.

Kazıklar, perde kazıklar olarak, eksenden eksene mesafeleri 3D, 2D, 1.5D ve D(teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için iki farklı zemin içerisinde ayrı ayrı modellendi. Analizlerde zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için kohezyonsuz ve kayaca soketli kazıklarda yük-oturma grafikleri elde edildi. Analizler $\Phi 450\text{mm}$, $\Phi 650\text{mm}$, $\Phi 800\text{mm}$ ve $\Phi 1000\text{mm}$ çapında kazıklarda yapıldı.

Ardından kazık çapı, kazık boyu sabit tutularak iki farklı zemin yapısı için ayrı ayrı tek kazık modeli 3D, 2D, 1.5D ve D ara mesafelerinde, düşey yük altındaki davranışı modellendi ve yük-oturma eğrisi elde edildi.

Kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisinin görülebilmesi için elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde çizilerek, sonuçlar belirli kriterlere göre değerlendirildi.

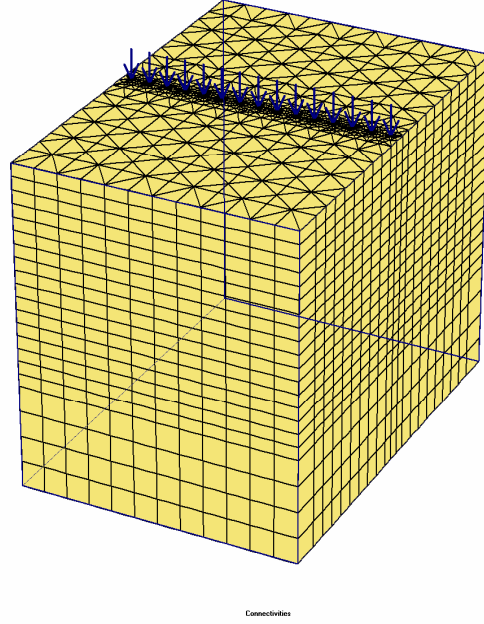
6.1.1. Sonlu Elemanlar Ağı

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken, gerilmelerin fazla olduğu yerler sıklaştırılmıştır. Gerilmelerden çok az etkilenen yerlerde elemanlar geniş tutulmuştur. Böylece optimum eleman sayısı kullanılarak etkili çözüm yapılmıştır. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken sınır koşullarının seçimine dikkat etmek gerekmektedir. Sonlu eleman ağı boyutları tüm kazık çapları için x, y ve z eksenlerinde 16m'den 64m'ye kadar değişen çok sayıda farklı modelde yapılan analizler sonucunda, model boyutlarının daha büyük olmasına karşın gerilme ve deformasyon dağılımında önemli değişiklikler görülmemesi durumu göz önünde bulundurularak belirlendi.

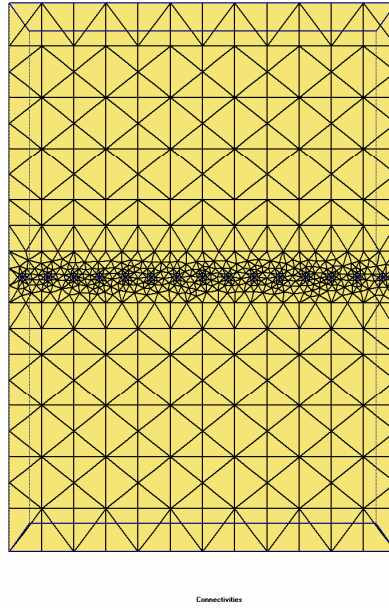
Genel olarak tekil kazık modellerinde zemin sınırları düşey yönde, y-ekseninde kazık boyunun 2,5 katı, yatay yönde x ve z ekseninde ise kazık çapının yaklaşık 40 katı olarak belirlenmiştir.

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

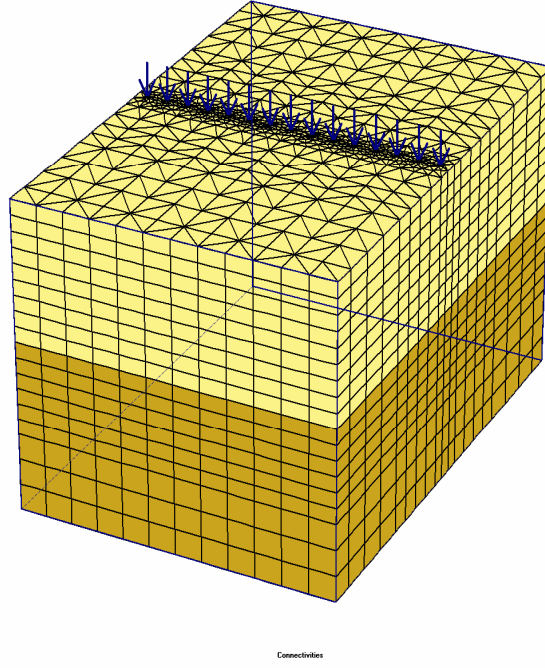
Perde kazıklarda, belirli sayıda kazık için modelleme yapıldı, ardından sonuçlar kazık grubunun ortasında yer alan kazık için değerlendirildi. Kazık sayısının belirlenmesi için yapılan denemelerde kazık sayısının daha da artırılmasının yük-deformasyon grafiğinde önemli farklar doğurmaması kriteri arandı. Buna göre 15 adet kazık üzerinde yapılan yüklemelerde en güvenilir sonuçların alındığı görüldü. Kohezyonsuz zeminlerdeki analizler $\Phi 1000\text{mm}$ çapındaki kazıklar için Şekil 6.1. ve Şekil 6.2'de, kayaca soketli kazıklarda analizler $\Phi 1000\text{mm}$ çapındaki kazıklar için ise Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de görülen üç boyutlu modeller ile yapılmıştır.



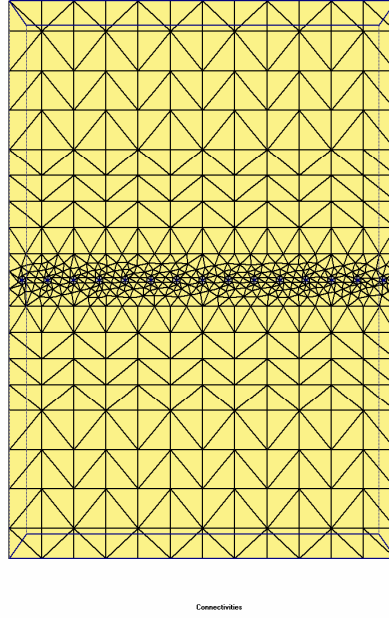
Şekil 6.1. Kohezyonsuz Zeminlerde $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıklarının Sonlu Elemanlar Ağı 3 Boyutlu



Şekil 6.2. Kohezyonsuz Zeminlerde $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıklarının Sonlu Elemanlar Ağı 2 Boyutlu



Şekil 6.3. Kayaca Soketli Kazıklarda $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıklarının Sonlu Elemanlar Ağı 3 Boyutlu



Şekil 6.4. Kayaca Soketli Kazıklarda $\Phi 1000\text{mm}$ Çapında Perde Kazıklarının Sonlu Elemanlar Ağı 2 Boyutlu

6.2. Modelleme Esasları

Zemin elasto-plastik, kazıklar ise elastik olarak modellenmiştir. Zemin için mohr-coloumb yapısal modeli kullanılmıştır.

Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programı ile modellemeler üç aşamada yapılmıştır. İlk aşamada ortamda kazık imal edilmeden önceki gerilme durumu oluşturulmuştur. Bu ilk gerilme halini oluşturmak için zemin kendi ağırlığı ile yüklenmiştir. İkinci aşamada kazıklar imal edilip kendi ağırlıkları ile yüklenmiştir. Üçüncü aşamada ise zemin yapısı göçünceye kadar yükleme yapılarak, her kazık ara mesafesi için yük-oturma grafikleri elde edilmiştir. Analizler iki farklı zemin profilinde yapılmıştır. İlk analiz kohezyonsuz zeminlerde ikincisi ise kayaca soketlenen kazıklar üzerinde yapılmıştır. Analizlerde 20m boyunda Ø450 mm, Ø650 mm, 800 mm ve Ø1000 mm çapında kazıklar kullanılmıştır. Kazık başlıkları serbest olarak modelleme yapılmıştır.

Kazıklar, perde kazıklar olarak, eksenden eksene mesafeleri 3D, 2D, 1.5D ve D (teğet) olacak şekilde yerleştirilip, her bir ara mesafe için ayrı ayrı modellendi. Ardından kazık çapı, kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın düşey yük altındaki davranış modellendi ve yük- oturma eğrisi elde edildi. Kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisinin görülebilmesi için aynı grafik ekseninde çizilerek sonuçlar belirli kriterlere göre değerlendirildi.

6.2.1. Analizlerde Kullanılan Kazık ve Zemin Parametreleri

Zemin mekaniği ve temel inşaatı konusuna giren model ve analizlerde zemin parametrelerinin doğru seçilmesi çok önemlidir. Tabiki sonlu elemanlar programı ile araziye aynen modellemek mümkün değildir. Ancak bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar, iyi sonuçlar alınabildiğini göstermiştir. Modellemelerde zeminin elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν)' nün sonuçlar üzerinde çok etkili olduğu görüldü. Poisson oranı da elastisite modülü kadar olmasa da sonuçları etkilemektedir. Yapılan ilk modellemede kohezyonsuz zemin ikinci modelde ise kayaca soketli kazıklar kullanılmıştır. Her iki zemine ait parametreler ve kazığın malzeme özellikleri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Zemin Malzeme Özellikleri

Derinlik	0-50 m	0-40 m
Zemin sınıfı	Kum	Kaya
Malzeme Modeli	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb
Malzeme Tipi	Drenajsız	Drenajsız
γ_n (KN/m ³)	19	22
γ_s (KN/m ³)	21	22
E (MN/m ²)	115	300
ν	0,3	0,25
C' (kPa)	0,3	0,3
ϕ' (°)	32,5	40
R_{inter}	0,7	0,6

Tablo 6.2. Kazık Malzeme Özellikleri

Malzeme Modeli	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Boşluksuz
δ (KN/m ³)	25
E (MN/m ²)	30000
ν	0,2

Modellemede Kullanılan Plaxis 3D Foundation programı, temel problemlerinin sonlu eleman yöntemleriyle çözümü amacıyla geliştirildiğinden, kazık-zemin etkileşimi otomatik oluşturulabilen sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarıyla temsil edilebilmektedir. Kullanılan ara yüzey elemanlarıyla zemin mukavemeti zemin ile kazığın temas ettiği bölgede Rinter değişkeni ile azaltılmaktadır. Modelleme de kullanılacak Rinter değişkeninin tam olarak tespit edilmesi amacıyla 0,5 ile 1,0 arasında değişen değerler ile deneme analizleri yapılarak en uygun değer 0,7 olduğu saptanmıştır.

6.2.2. Hesap Adımları

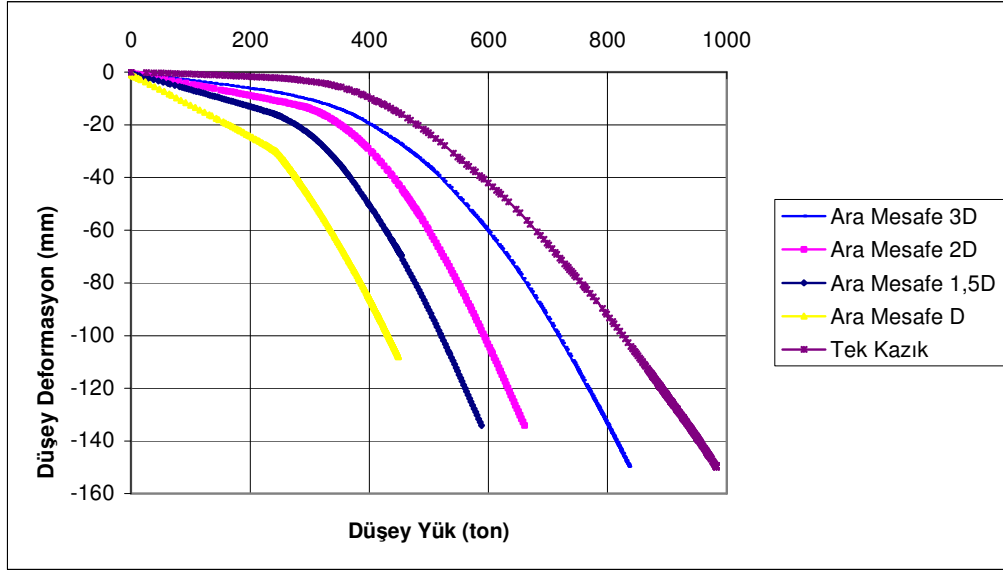
Hesaplar üç aşamadan oluşmaktadır.

Sınır şartları, geometri, malzeme özellikleri ve uygun sonlu elemanlar ağı(mesh) oluşturulduktan sonra tek ve perde kazıklar modellendi, birinci hesap adımında zemin kendi ağırlığı ile yüklendi ve bu yükleme sonucu elde edilen oturmalar sıfırlandı. İkinci hesap adımında kazıklara malzeme özellikleri atanarak, kazıkların kendi ağırlığından oluşan oturmalar elde edildi. Bu oturmalar sıfırlanarak gerçekte olduğu gibi kazığın imalat aşaması modellenmiş oldu. Üçüncü hesap adımında kazık ekseninden etki eden tekil düşey yük ile zemin göçünceye kadar yüklendi. Bu yük programın otomatik yük artırımı yapma özelliği ile adım adım uygulandı. Kohezyonsuz zeminlerde hesap yapılırken maksimum iterasyon sayısı 75, istenilen minimum iterasyon sayısı 7, istenilen maksimum iterasyon sayısı 14 olarak ayarlandı. Bu parametreler ile kohezyonsuz zeminlerdeki yük artırım prosedürünün daha uygun hale gelmesi sağlandı.

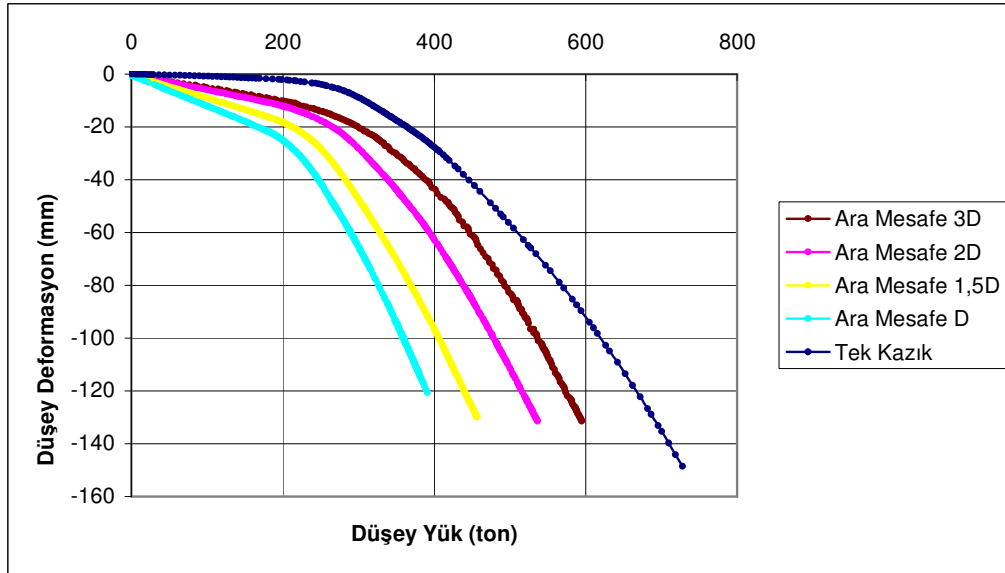
6.3. Kohezyonsuz Zemindeki Analiz Sonuçları

Kazıklar arası ara mesafenin değişiminin taşıma gücü ve düşey deplasmana olan etkisinin incelenmesi amacıyla bir çok analiz yapıldı. Analizler öncelikle kohezyonsuz zemin profilinde 20m boyunda Ø1000 mm çapında kazıklar, kazıklar arası eksenden eksene 3D mesafe ile yerleştirilerek yapılmıştır. Daha sonra aynı çap ve zemin profilinde eksenden eksene mesafeler sırasıyla 2D, 1.5D ve D(teğet) olacak şekilde modellemeler yapılarak analizler çözümlendi. Perde kazıklar için yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde, sınır koşullarından en az etkilendiği için kazık grubunun ortasında yer alan kazığın yük-oturma eğrisi kullanıldı. Son olarak kazık boyu, zemin yapısı ve kazık çapı sabit tutularak tek kazık modelleri oluşturularak çözümlendi. Ø1000 mm çapında kazıklar için yapılan analiz sonuçlarından elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde gösterilerek kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisi incelendi. Ø1000mm kazık çapı için yapılan analizler Ø450mm, Ø650mm ve Ø800mm çapında kazıklar için tekrarlanılarak kazık çapı ile kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücü ve düşey deformasyona olan etkisi sayısal veriler ile ortaya kondu.

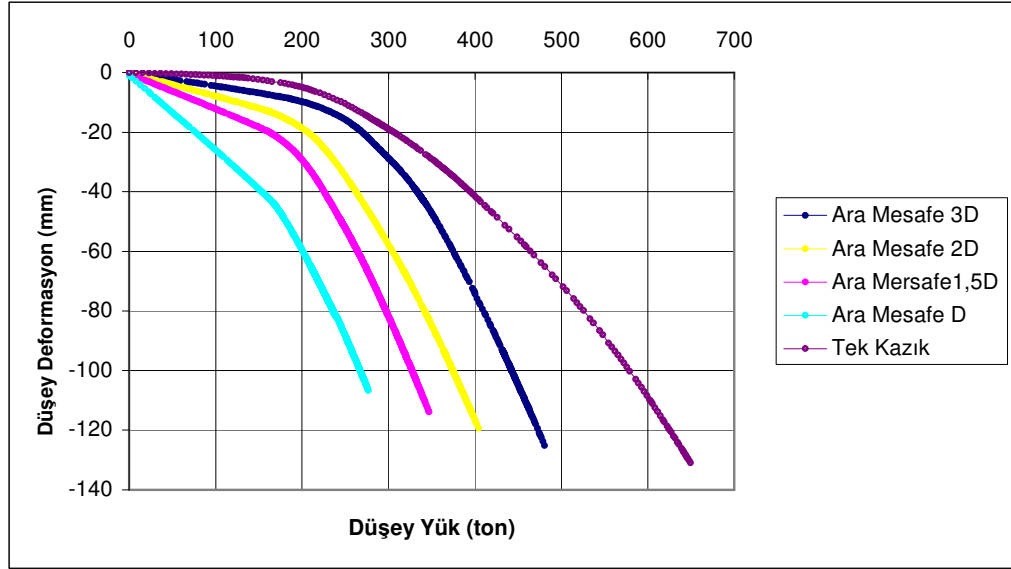
Kohezyonsuz zeminlerde elde edilen düşey yük - düşey deformasyon grafikleri kazık çaplarına göre sırasıyla Şekil 6.5 Şekil 6.6 Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’ de ayrı ayrı verilmiştir.



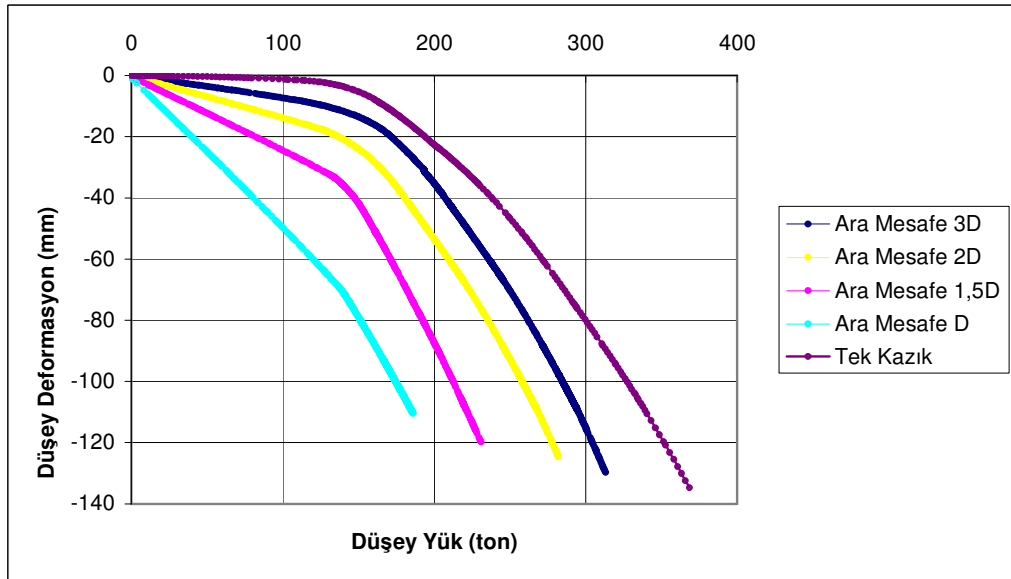
Şekil 6.5. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.6. $\Phi 800$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



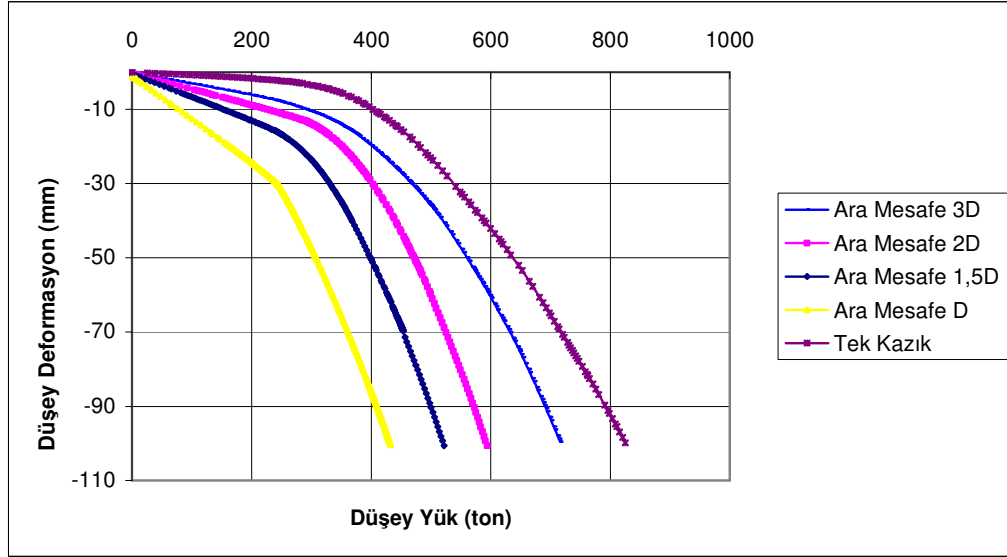
Şekil 6.7. $\Phi 650$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



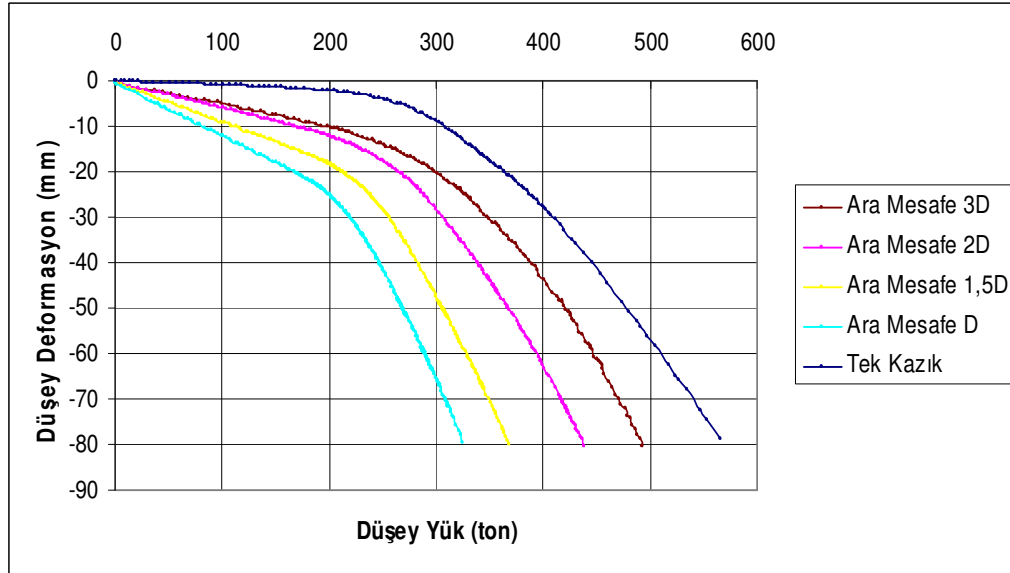
Şekil 6.8. $\Phi 450$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri

Analizler sonucu elde edilen grafiklerin değerlendirilebilmesi ve kazık aralığının taşıma gücüne etkisini görebilmek için bazı kabuller yapılmıştır. Genel bir kural olarak gerçek veya tahmin edilen göçme yükü kazık çapının %10' una eşit deformasyona karşılık gelecek şekilde yapılmalıdır. Elde edilen sonuçlarda buna göre kazıkların toplam taşıma gücü, kazık çapının yüzde onu ($D/10$) oturma değerine karşılık gelen yük değeri olarak belirlenmiştir. Bu oturma değerine karşılık

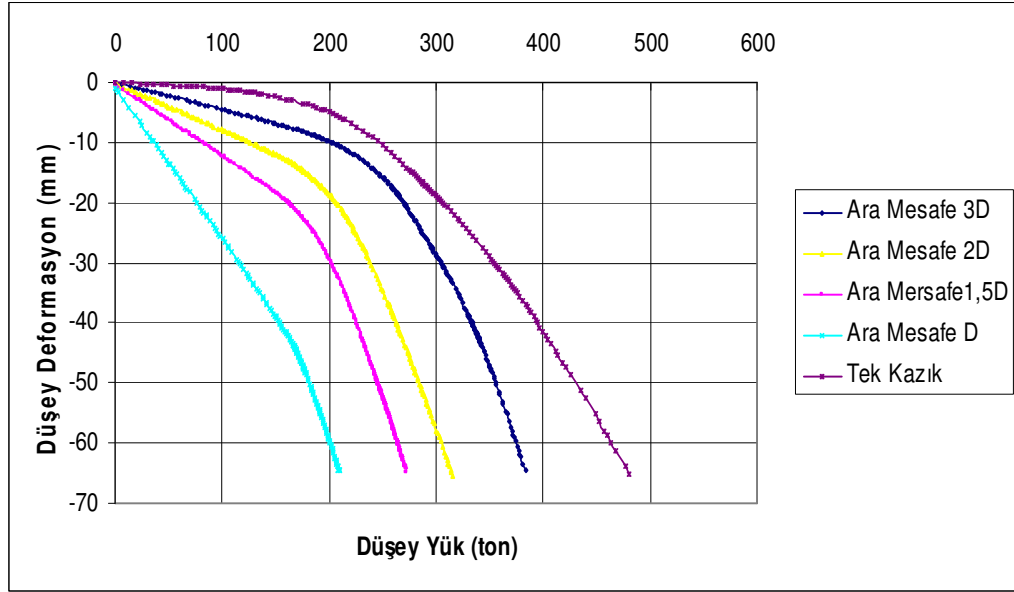
gelen yüklerde uç mukavemetinin tamamen mobilize olduğu varsayılmaktadır. D/10 oturmaya karşılık gelen yük-oturma grafikleri, analizlerde kullanılan tüm kazık çapları için Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’ de verilmektedir.



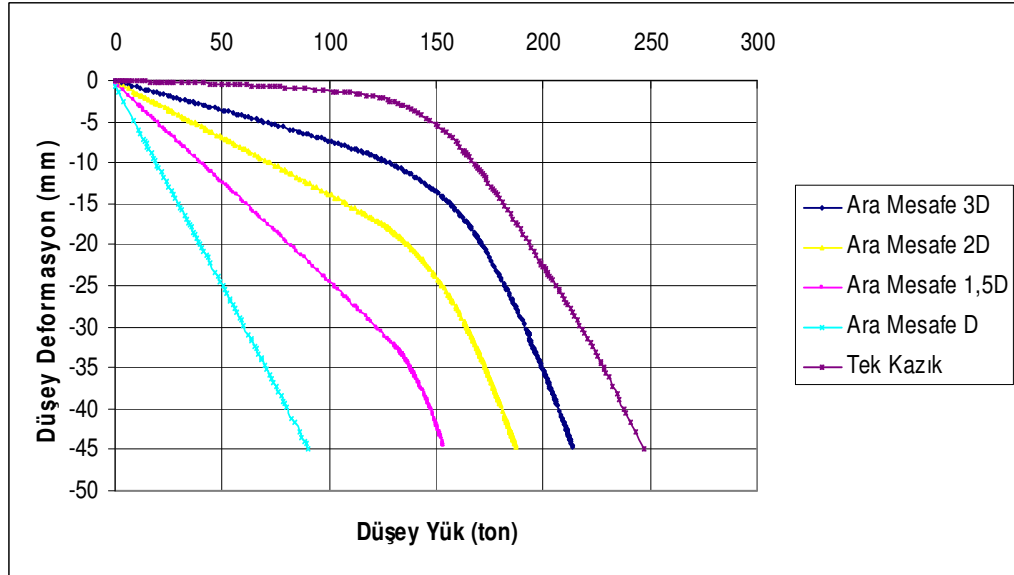
Şekil 6.9. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.10. $\Phi 800$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.11. $\Phi 650$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.12. $\Phi 450$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

Görüldüğü gibi grup içerisinde tek bir kazığın davranışı komşu kazıkların davranışı ve grubun geometrisinden etkilenmektedir. Düşey yük altında bulunan kazık grubundaki kazıkların toplam taşıma gücü, grubu oluşturan kazıkların tekil taşıma güçleri toplamından daha küçüktür. Bunun nedeni ise grup etkileşimidir. Kazıkların birbirine çok yakın olması nedeni ile zemine aktarılan gerilmeler çakışmakta ve bu nedenle taşıma gücü azalmaktadır. Bunun dışında elastik ve konsolidasyon

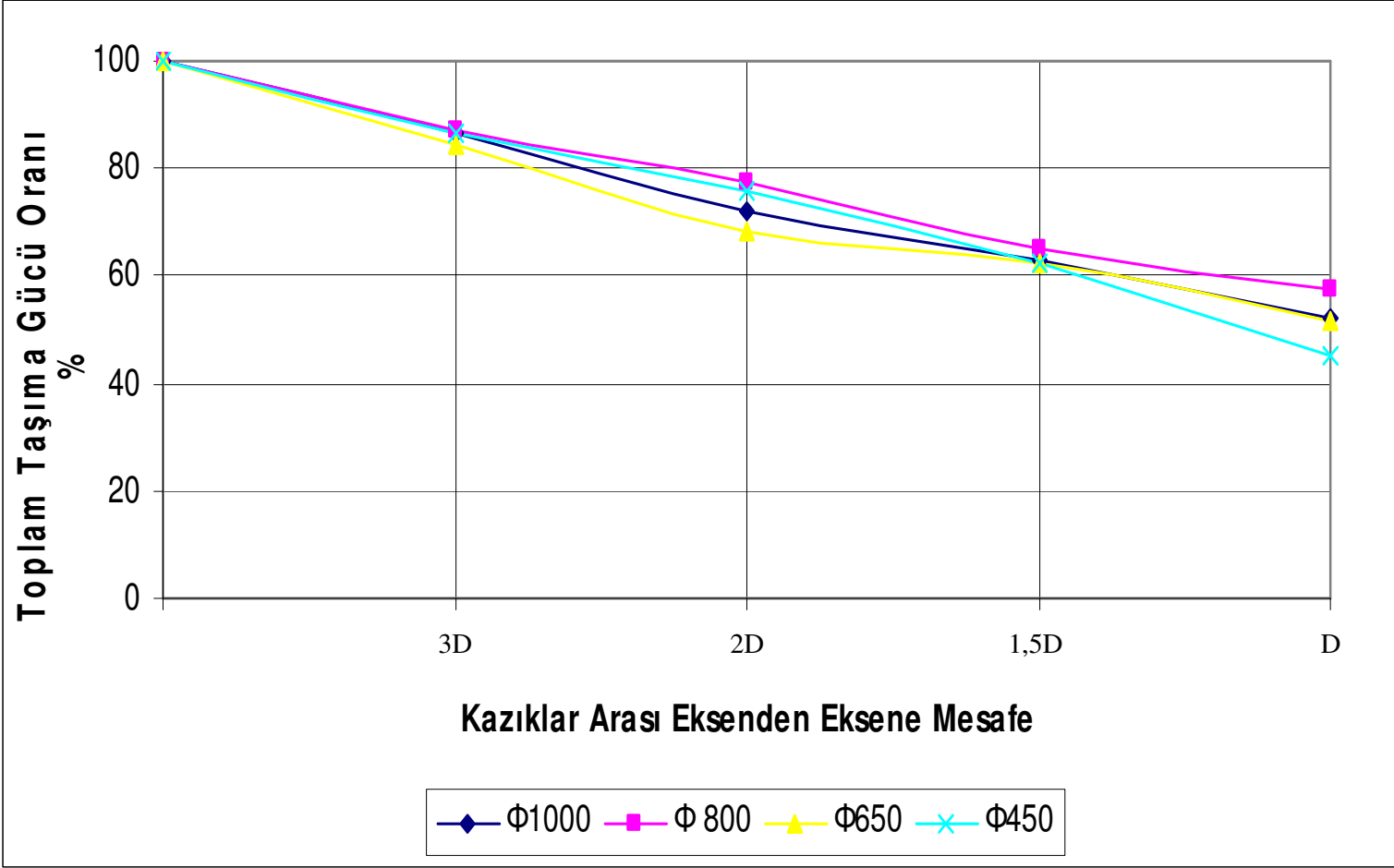
oturmaları kazık gruplarında, tek kazıklara göre daha büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni de kazık grubunun altındaki zeminde oluşan gerilme etki bölgesi tek kazığa göre daha geniş ve derin alana yayılmasıdır.

Grafiklerin incelenmesinden görüleceği gibi taşıma gücü değerleri, kazıklar arası ara mesafe azaldıkça azalmaktadır. Özellikle kazıkların teğet olması durumunda taşıma gücünde yaklaşık %50 - %60 oranında azalma görülmektedir. D/10 oturmaya karşılık gelen yükler ve bu yüklerin tekil kazığın taşıma gücüne oranları Tablo 6.3 'de verilmektedir.

Tablo 6.3. Kohezyonsuz Zeminde D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri

Kazık Çapı (mm)	Kazıklar Arası Ara Mesafe	Taşıma Gücü Oturması (mm)	Taşıma Gücü (ton)	Taşıma Gücü Yüzdesi
Ø1000	Tek	1000	825,25	100,00%
	3D		715,94	86,75%
	2D		593,5	71,92%
	1,5D		520,5	63,07%
	D		430,98	52,22%
Ø800	Tek	800	568,46	100,00%
	3D		496,6	87,36%
	2D		439,07	77,23%
	1,5D		369,07	64,92%
	D		326,54	57,44%
Ø650	Tek	650	480,93	100,00%
	3D		383,37	79,71%
	2D		314,44	65,38%
	1,5D		272,58	56,68%
	D		209,17	43,49%
Ø450	Tek	450	247,05	100,00%
	3D		213,77	86,53%
	2D		187,2	75,77%
	1,5D		153,49	62,13%
	D		90,3	36,55%

Grafik ve tabloların incelenmesinden elde edilen bir diğer sonuç ise kazık çapının küçülmesinin, aynı kazık ara mesafesindeki taşıma gücü kaybı miktarının yaklaşık aynı olmasıdır. Tablo 6.2' de verilen sonuçlar Şekil 6.13'de grafik olarak görülebilir.



Şekil 6.13. Kohezyonsuz Zeminde Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi

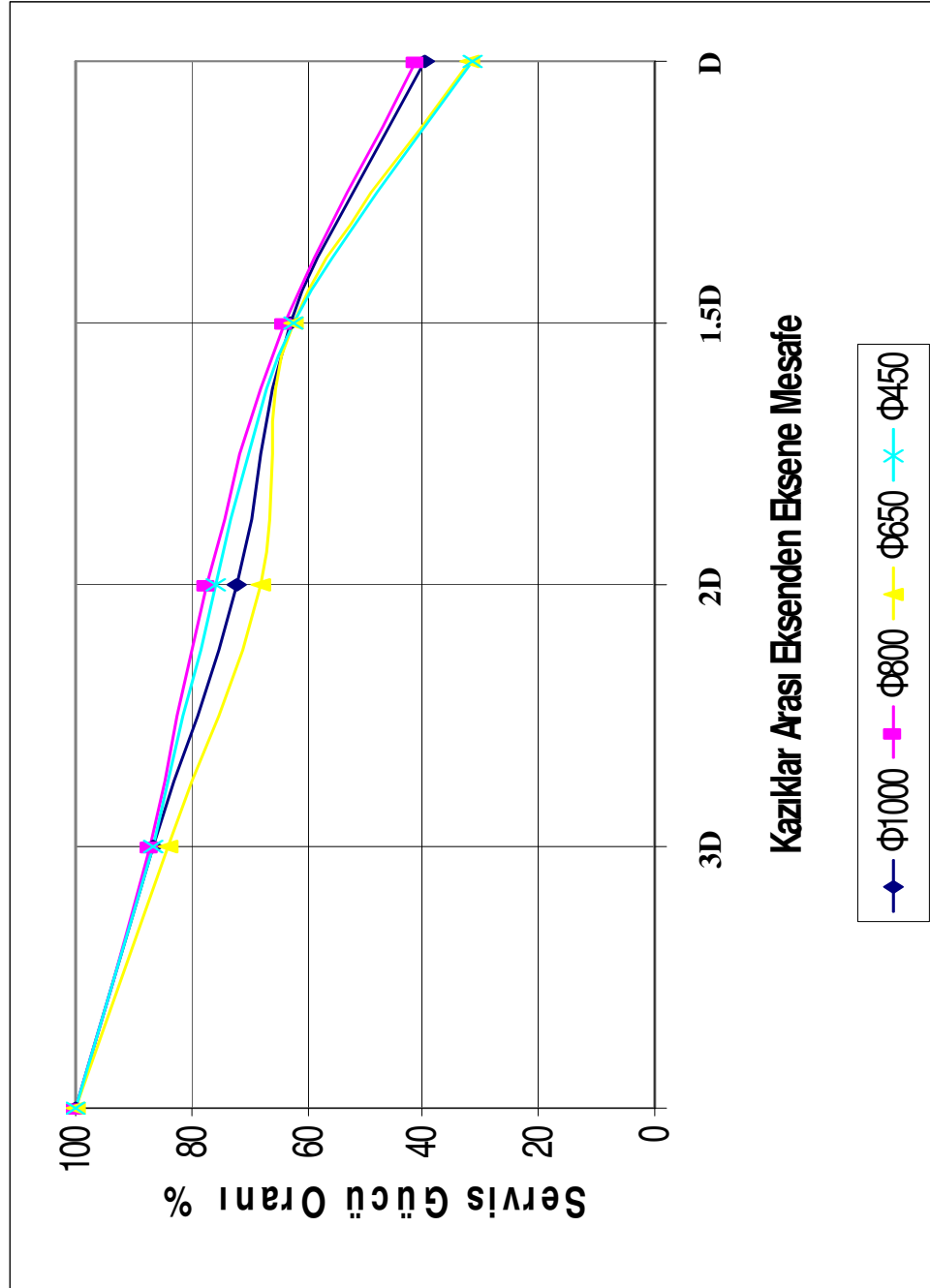
Bir diğer değerlendirmede analizlerden elde edilen sonuçlar, kazıkların servis yüklerine göre karşılaştırılmıştır. Kazıkların toplam taşıma gücünün D/10 oturmaya karşılık gelen yük değerinin yarısı ile 20mm oturmaya karşılık gelen yük değerinden küçük olanı servis yükü olarak kabul edilmiştir. Bu değerlendirmede de kazıkların servis yükü kapasitelerinin, kazık ara mesafelerinin azalmasıyla azaldığı belirlendi. Perde kazıkların servis yükleri ve bu yüklerin tekil kazığın servis yüküne oranları Tablo 6.4’de özetlenmiştir.

Tablo 6.4. Kohezyonsuz Zemindeki Kazıkların Servis Yükleri

Kazık Çapı (mm)	Kazıklar Arası Ara Mesafe	Servis Yükü (ton)	Servis Yükü Yüzdesi
Ø1000	Tek	412,63	100,00%
	3D	357,97	86,75%
	2D	296,75	71,92%
	1,5D	260,85	63,07%
	D	162,88	39,47%
Ø800	Tek	284,23	100,00%
	3D	248,3	87,36%
	2D	219,54	77,24%
	1,5D	184,54	64,13%
	D	117,27	41,26%
Ø650	Tek	240,47	100,00%
	3D	202,38	84,16%
	2D	163,8	68,12%
	1,5D	150	62,38%
	D	76,72	31,90%
Ø450	Tek	123,53	100,00%
	3D	106,89	86,53%
	2D	93,6	75,77%
	1,5D	76,75	62,13%
	D	38,98	31,56%

Tablo 6.4’ten görüleceğı gibi kazıklarda servis yükü kriterine göre oluşan yük kaybı ile taşıma gücü kriterine göre olan yük kaybı kazıklar arası eksenden eksene mesafe

D (teğet) durum hariç yaklaşık aynıdır. Bunun nedeni ise kazık çapının %10'nun yarısına karşılık gelen oturma değerindeki taşınan yükün 20mm oturma değerine karşılık gelen yükten büyük olmasıdır. Kazılar arası eksenden eksene ara mesafe D (teğet) durumunda kazıklar zemin ile beraber blok halinde daha küçük yüklerde göçmektedir. Tablo 6.4' de görülen sonuçlar Şekil 6.14' de grafik olarak verilmiştir.

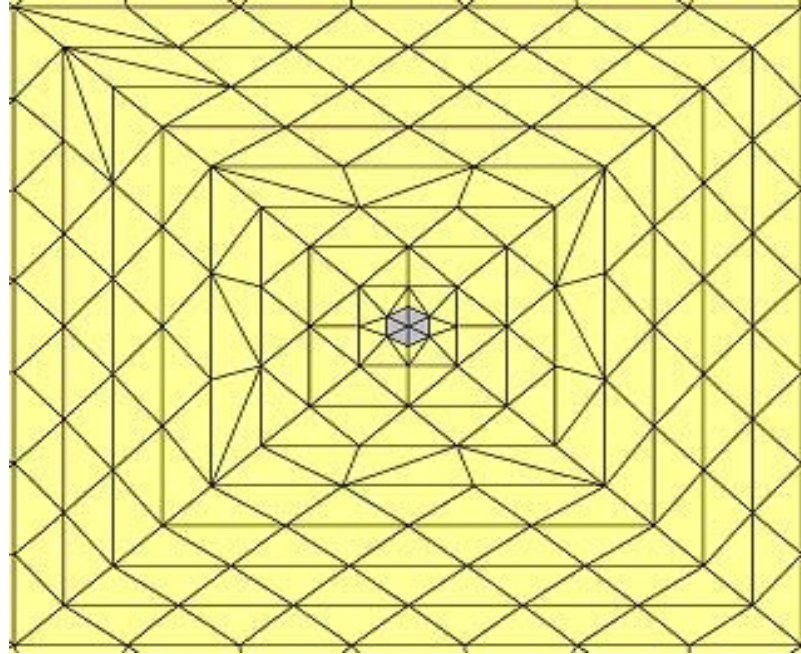


Şekil 6.14. Kohezyonsuz Zeminde Kazık Aralığının Servis Gücüne Etkisi

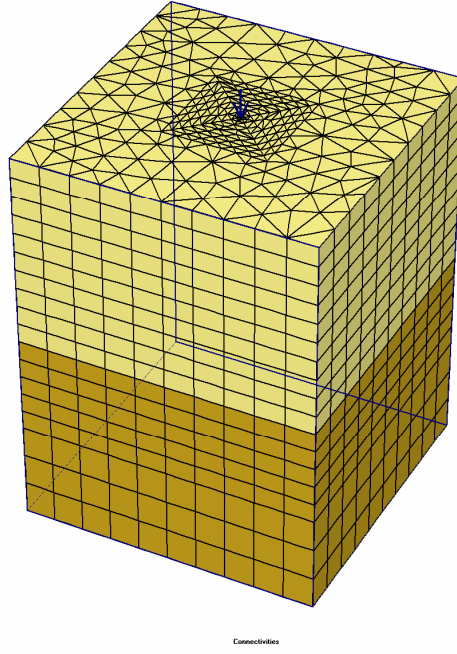
6.4. Kayaca Soketlenmiş Kazıklarda Analiz Sonuçları

Kaya Zemin arasında yük transferi olmadığı, yükün yalnızca soket tarafından kayaya iletildiği kabul edilmiştir. Bu kabul; sağlam yapılmış bir soketli uç kazığının çevre zemine göre oturmayacağı, dolayısı ile bir çevre sürtünme direncinin oluşmayacağı görüşüne dayanır. Bu doğrultuda kazık ile zeminin temas ettiği bölgede zeminin mukavemetini düşürerek yükün sadece kazık ucu tarafından taşınması sağlanmıştır. Ara yüzey elemanları ile dayanım azaltma faktörü R_{inter} değişkeni için 0,5-1,0 arasında değişen deneme analizlerinde en uygun değerin 0,6 olduğu tespit edilmiştir.

Pek çok şartname, uç kazıklarının sağlam zemine bir miktar girmesini önermektedir. Genel bir yaklaşım olarak en az soket boyu kazık çapının üç katı olması gerektiği düşünülerek tüm kazık çapları için soket boyu 3m alınmıştır. İlk önce analizler 20m boyunda Ø1000mm çapında kazıklar ile kazıklar arası eksenden eksene 3D mesafe ile yerleştirilerek yapılmıştır. Daha sonra aynı çap ve zemin profilinde eksenden eksene mesafeler sırasıyla 2D, 1.5D ve D(teğet) olacak şekilde modellemeler yapılarak analizler çözümlendi. Son olarak kazık boyu, zemin yapısı ve kazık çapı sabit tutularak tek kazık modelleri oluşturularak analizler yapıldı. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



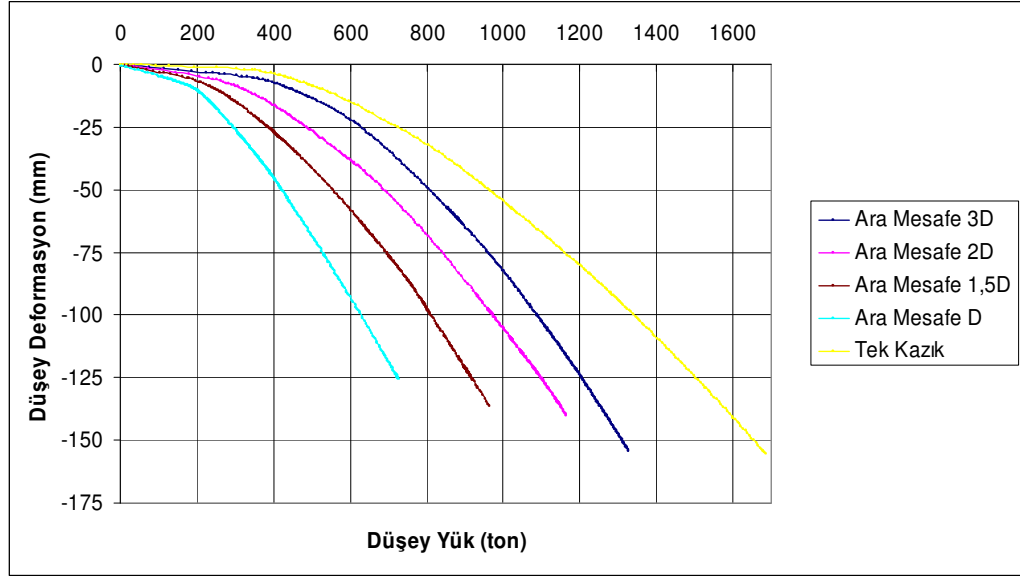
Şekil 6.15. Kayaca Soketlenen Tek Kazık Modeli için Sonlu Elemanlar Ağı
2 Boyutlu



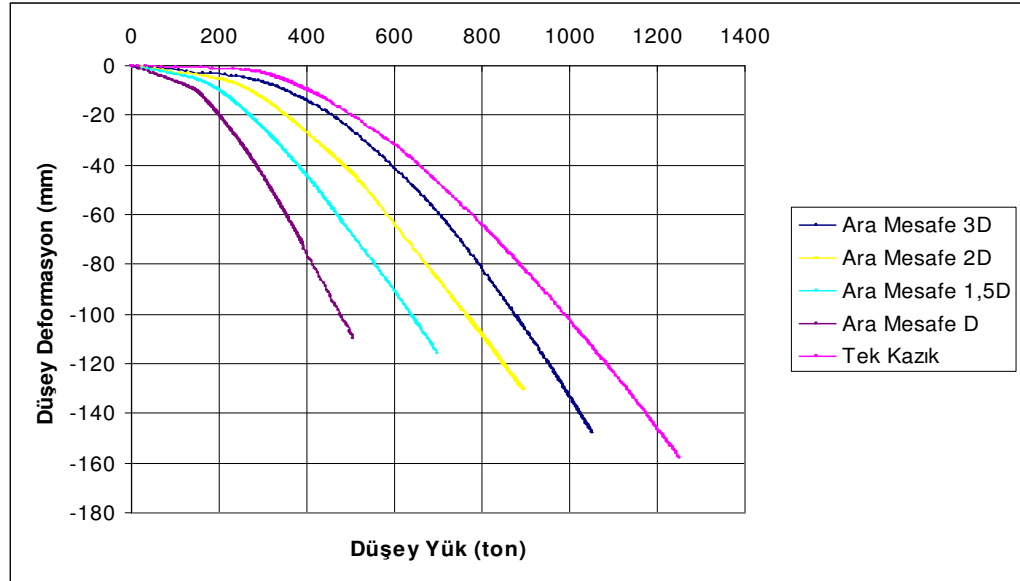
Şekil 6.16. Kayaca Soketlenen Tek Kazık Modeli için Sonlu Elemanlar Ağı ve Zemin Profili 3 Boyutlu

Ø1000mm çapında kazıklar için yapılan analiz sonuçlarından elde edilen yük-oturma eğrileri aynı grafik ekseninde gösterilerek kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisi kayaca soketli uç kazıklar üzerinde incelendi. Ø1000mm kazık çapı için yapılan analizler Ø450mm, Ø650mm ve Ø800mm çapında kazıklar için tekrarlanılarak kazık çapı ile kazıklar arası mesafenin düşey taşıma gücü ve düşey deformasyona olan etkisi kayaca soketli uç kazıkları içinde sayısal veriler ile ortaya kondu.

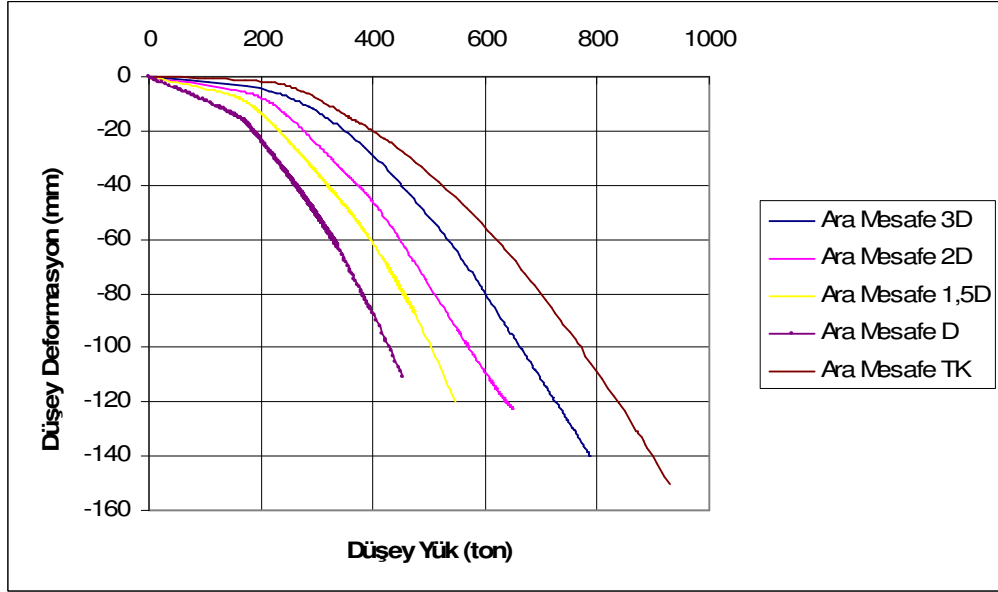
Kayaca soketlenen kazıklar için analizlerden elde edilen düşey yük-düşey deformasyon grafikleri kazık çaplarına göre sırasıyla şekil 6.17, şekil 6.18, şekil 6.19 ve şekil 6.20’de ayrı ayrı verilmiştir.



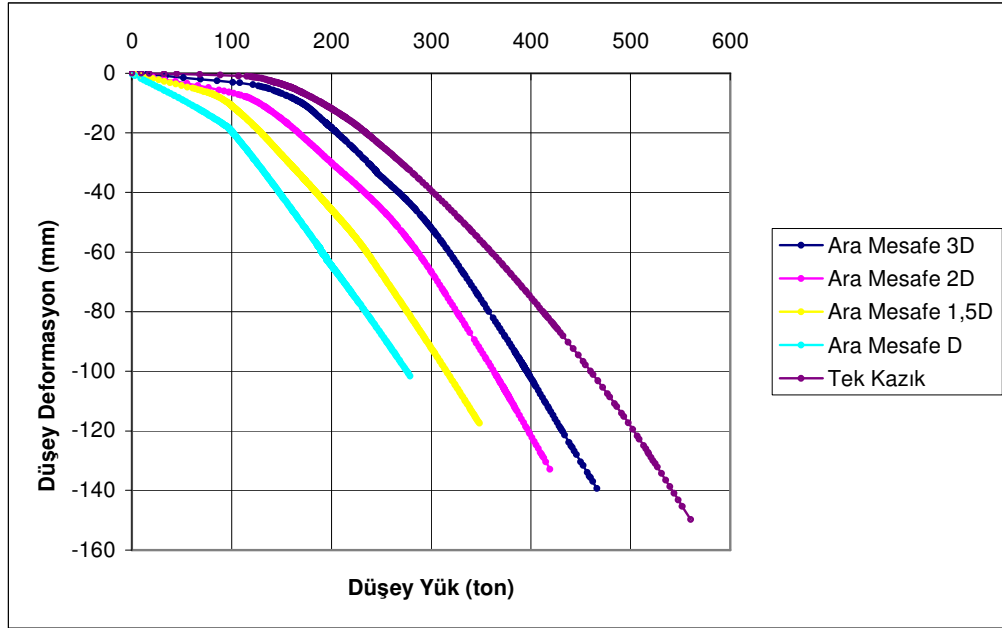
Şekil 6.17. $\Phi 1000$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.18. $\Phi 800$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



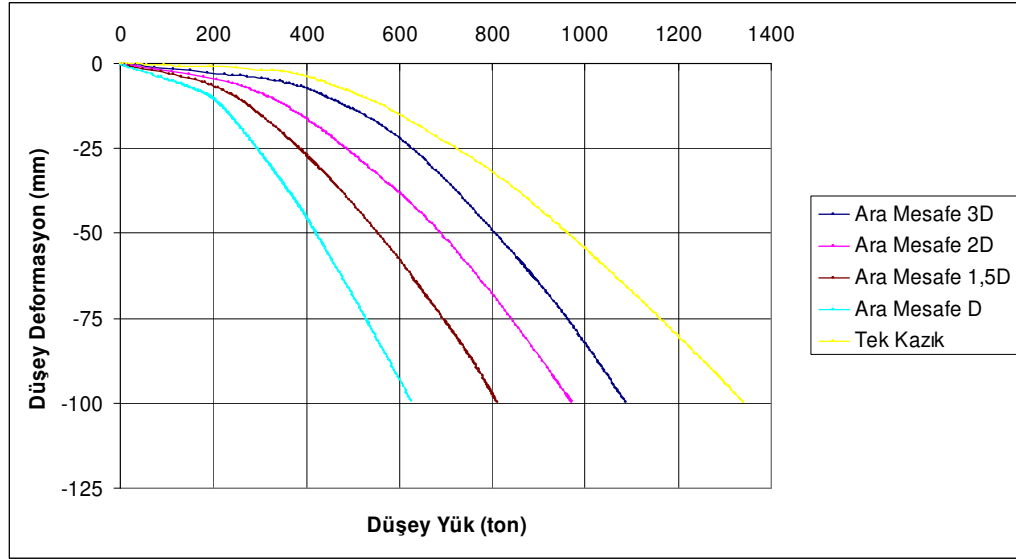
Şekil 6.19. $\Phi 650$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



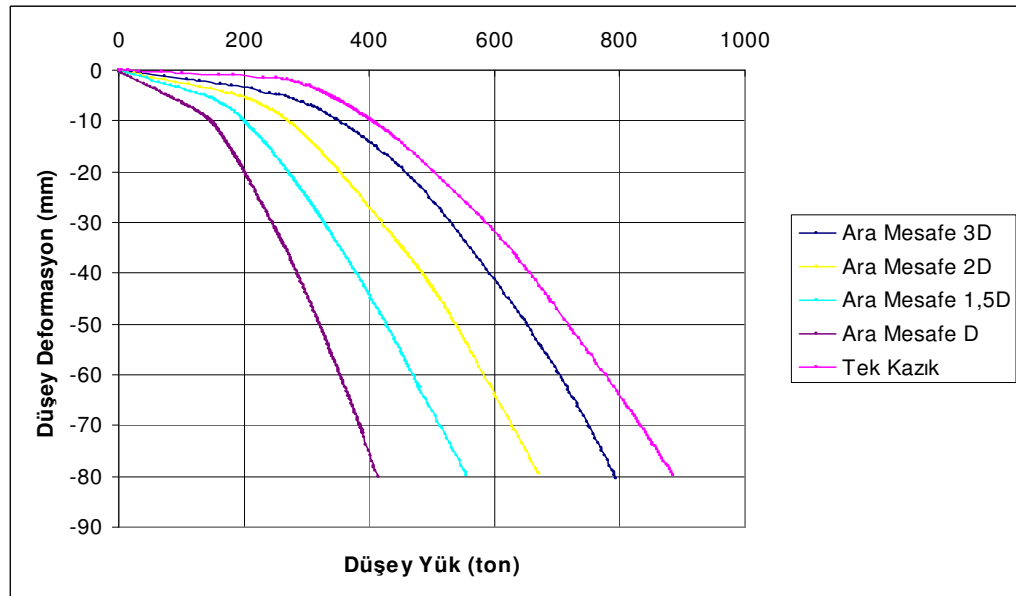
Şekil 6.20. $\Phi 450$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri

Analizler sonucu elde edilen grafiklerin değerlendirilebilmesi ve kazık aralığının taşıma gücüne etkisini görebilmek için kohezyonsuz zeminlerde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde olduğu gibi, tahmin edilen göçme yükü kazık çapının %10'una eşit deformasyona karşılık gelecek şekilde yapılmıştır. Elde edilen

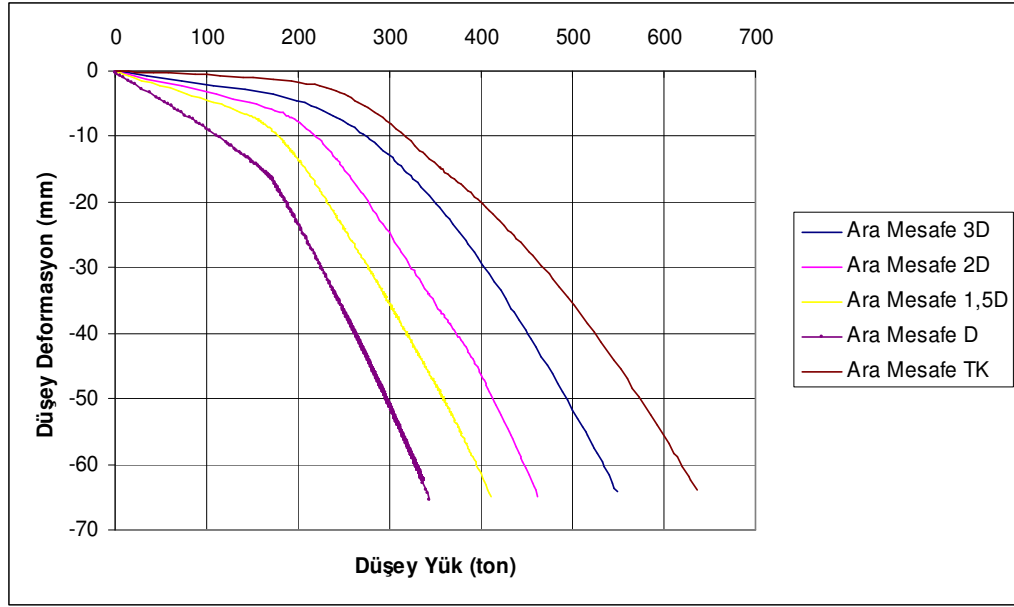
sonuçlarda buna göre kazıkların toplam taşıma gücü, kazık çapının yüzde onu ($D/10$) oturma değerine karşılık gelen yük değeri olarak belirlenmiştir. Bu oturma değerine karşılık gelen yüklerde uç mukavemetinin tamamen mobilize olduğu varsayılmaktadır. $D/10$ oturmaya karşılık gelen yük-oturma grafikleri, analizlerde kullanılan tüm kazık çapları için Şekil 6.21 , Şekil 6.22 , Şekil 6.23 ve Şekil 6.24' de verilmektedir.



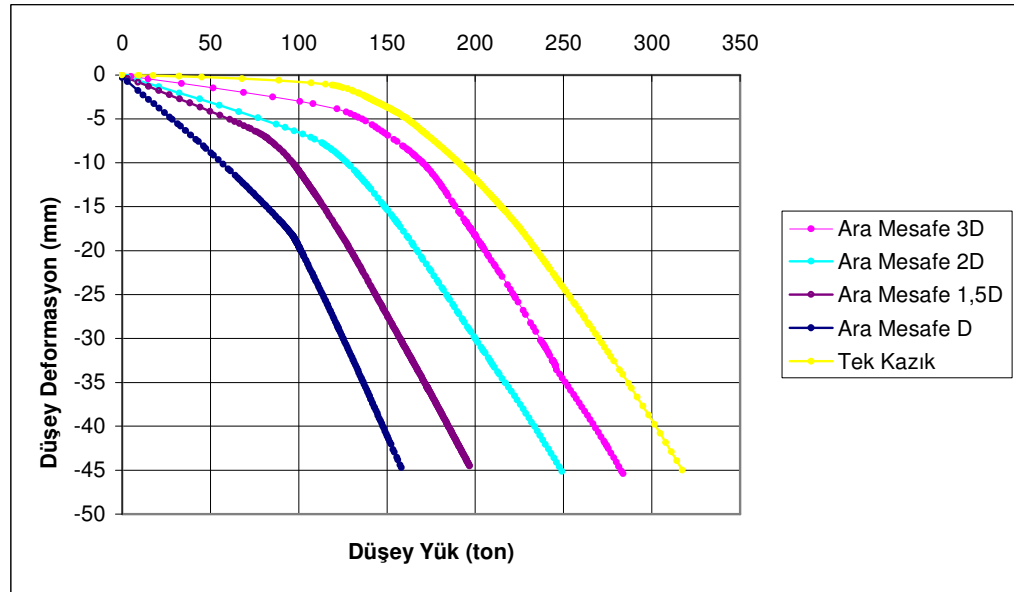
Şekil 6.21. $\Phi 1000$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.22. $\Phi 800$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



Şekil 6.23. $\Phi 650$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



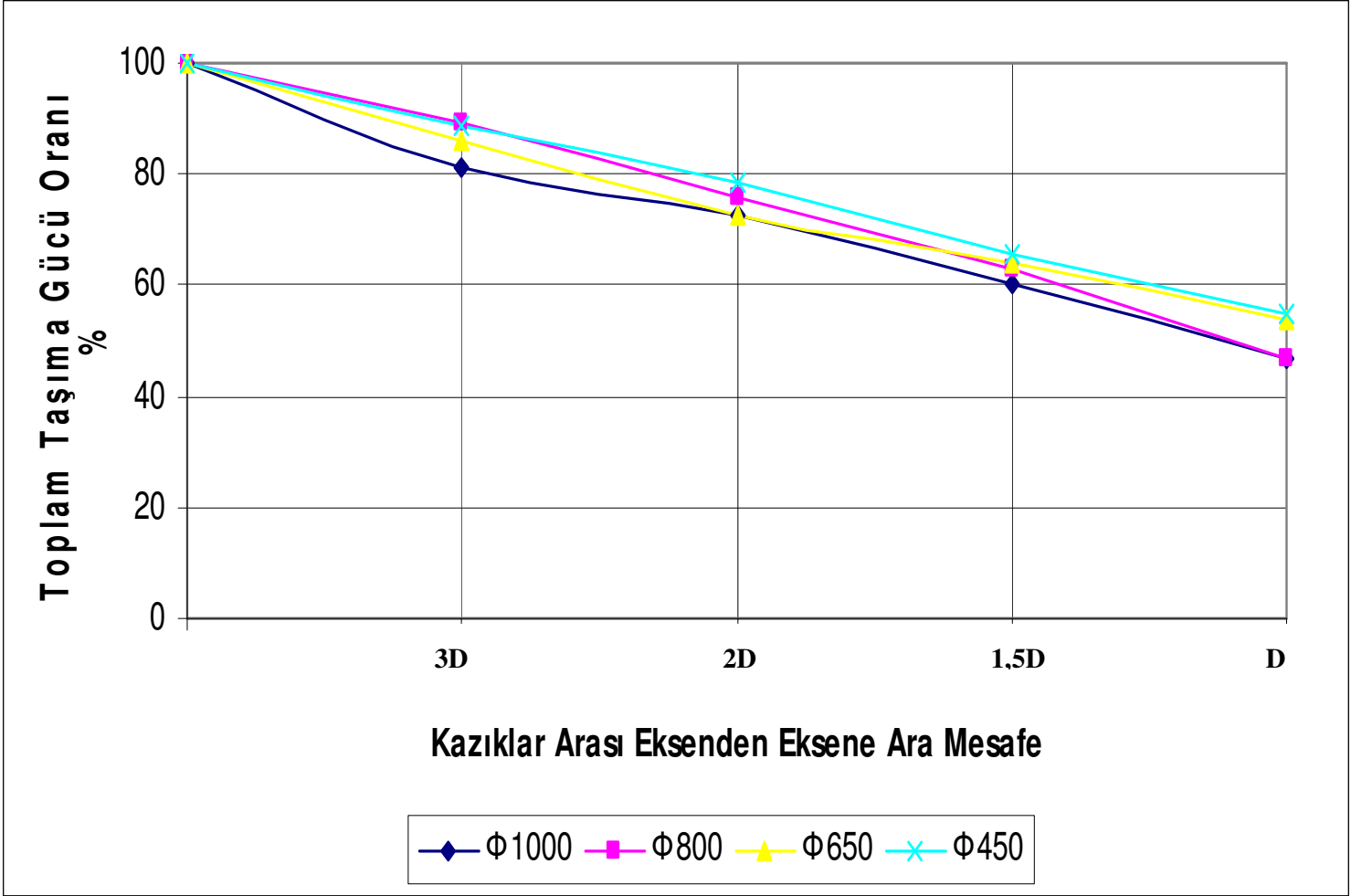
Şekil 6.24. $\Phi 450$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

Grafiklerin incelenmesinden görüleceği gibi kayaca soketli kazıklarda taşıma gücü değerleri, kazıklar arası ara mesafe azaldıkça azalmaktadır. Özellikle kazıkların teğet olması durumunda taşıma gücünde yaklaşık %40 - %45 oranında azalma görülmektedir. D/10 oturmaya karşılık gelen yükler ve bu yüklerin tekil kazığın taşıma gücüne oranları Tablo 6.5 'de verilmektedir.

Tablo 6.5. Kayaca Soketlenmiş Kazıkların D/10 Oturmaya Karşılık Gelen Taşıma Güçleri

Kazık Çapı (mm)	Kazıklar Arası Ara Mesafe	Taşıma Gücü Oturması (mm)	Taşıma Gücü (ton)	Taşıma Gücü Yüzdesi
Ø1000	Tek	1000	1340	100,00%
	3D		1087	81,12%
	2D		972	72,54%
	1,5D		810	60,45%
	D		629	46,94%
Ø800	Tek	800	886	100,00%
	3D		793	89,50%
	2D		671	75,73%
	1,5D		556	62,75%
	D		415	46,84%
Ø650	Tek	650	640	100,00%
	3D		551	86,10%
	2D		464	72,50%
	1,5D		411	64,22%
	D		344	53,75%
Ø450	Tek	450	317	100,00%
	3D		281	88,64%
	2D		249	78,55%
	1,5D		197	62,14%
	D		158	49,84%

Grafik ve tabloların incelenmesinden elde edilen bir diğer sonuç ise kazık çapının küçülmesinin, aynı kazık ara mesafesindeki taşıma gücü kaybı miktarının yaklaşık aynı olmasıdır. Tablo 6.5 'de verilen sonuçlar Şekil 6.25'de grafik olarak görülebilir.



Şekil 6.25. Kayyaca Soketlenmiş Kazıklarda Kazık Aralığının Taşıma Gücüne Etkisi

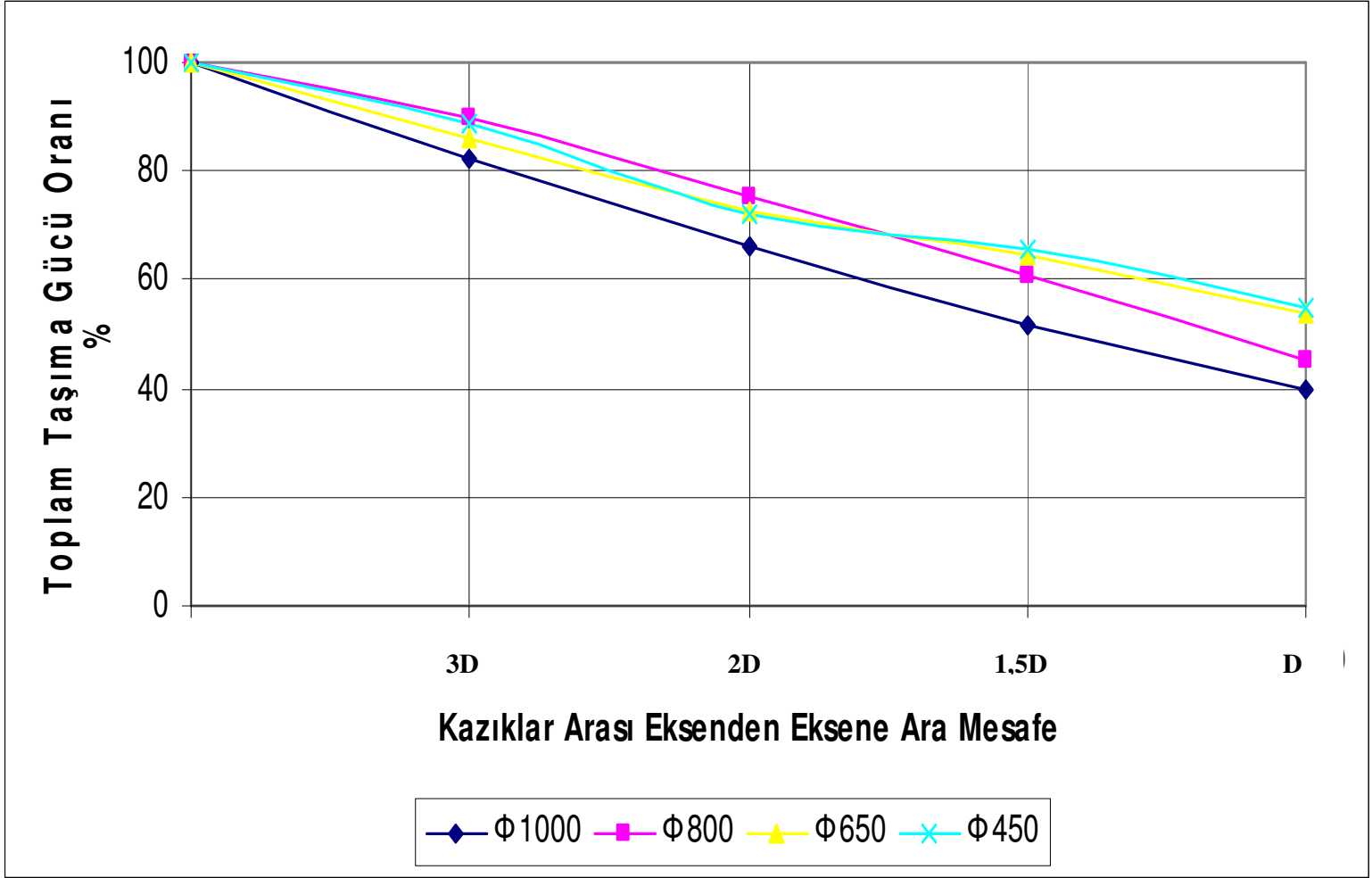
Bir diğ er değ erlendirmede analizlerden elde edilen sonuçlar, kazıkların servis yüklerine göre karşılaştırılmıştır. Kazıkların toplam taşıma gücünün D/10 oturmaya karşılık gelen yük değ erinin yarısı ile 20mm oturmaya karşılık gelen yük değ erinden küçük olanı servis yükü olarak kabul edilmiştir. Bu değ erlendirmede de kazıkların servis yükü kapasitelerinin, kazık ara mesafelerinin azalmasıyla azaldığı belirlendi. Perde kazıkların servis yükleri ve bu yüklerin tekil kazığın servis yüküne oranları Tablo 6.6’da özetlenmiştir.

Tablo 6.6. Kayaca Soketlenmiş Kazıkların Servis Yükleri

Kazık Çapı (mm)	Kazıklar Arası Ara Mesafe	Servis Yüğü (ton)	Servis Yüğü Yüzdesi
Ø1000	Tek	660	100,00%
	3D	544	82,42%
	2D	436	66,06%
	1,5D	341	51,67%
	D	263	39,85%
Ø800	Tek	443	100,00%
	3D	397	89,62%
	2D	334	75,40%
	1,5D	268	60,50%
	D	199	44,92%
Ø650	Tek	320	100,00%
	3D	276	86,25%
	2D	232	72,50%
	1,5D	206	64,38%
	D	172	53,75%
Ø450	Tek	159	100,00%
	3D	141	88,68%
	2D	124	72,09%
	1,5D	98	61,63%
	D	79	49,68%

Tablo 6.6’ dan görüleceğı gibi kazıklarda servis yükü kriterine göre oluşan yük kaybı ile taşıma gücü kriterine göre olan yük kaybı yaklaşık aynıdır. Tablo 6.6 ‘da görülen sonuçlar Şekil 6.26’ da grafik olarak verilmiştir.

Şekil 6.26. Kazık Aralığının Servis Gücüne Etkisi



7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kazıklar genellikle gruplar halinde inşa edilirler. Kazık grubunun davranışı ve taşıma gücünün, tek kazığın davranışı ve taşıma gücünden farklı olma konusu uzun zamandır tartışılan bir konudur. Bu tez çalışmasında da bu doğrultuda, düşey yükler altındaki tek ve grup kazıkların davranış esaslarına ve düşey yüklü kazıkların analiz yöntemlerine değinilmiştir. Kazıklar arası ara mesafenin taşıma gücüne etkisini sayısal verileri ile ortaya koymak için Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar programı ile bir çok analiz yapılmıştır.

Bir çok mühendislik probleminin çözümü için analitik çözümler elde etmek mümkün değildir. Analitik çözüm; bir cisimin her hangi bir yerinde bilinmeyen bir niteliğin istenilen değerini veren matematiksel bir deyimdir. Karmaşık malzeme özellikleri, değişik sınır koşulları v.b. durumları içeren problemler için, yaklaşık fakat kabul edilebilir çözüme ulaşmak için sayısal yöntemler kullanılmalıdır. Ancak diğer sayısal yöntemlerin aksine sonlu elemanlar metodu elektronik bilgisayar çağının bir sonucu olarak yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımı gerektirir. Geoteknik mühendisliğinde yeni bir konu olmasına rağmen günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte yoğun bir şekilde zemin problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanan sonlu elemanlar yöntemi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ancak zemin mekaniği problemlerinin modellenmesi diğer problemlere göre pek kolay olmamaktadır.

Bu çalışmada Plaxis 3D Foundation Sonlu elemanlar programı kullanılarak tek ve perde kazıklar için üç boyutlu model ile analizler yapıldı. Analizlerde iki farklı zemin profili kullanıldı ve kazık boyu 20m seçilerek, 450mm, 650mm, 800mm ve 1000mm çapında kazıklar üzerinde göçene kadar yükleme yapılarak düşey yük-düşey deformasyon grafikleri elde edildi. Kazıklar perde kazıklar 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.

Son olarak analiz sonuçlarının değerlendirebilmesi için kazık boyu ve zemin yapısı sabit tutularak ortamdaki tek kazığın davranışı modellendi ve düşey yük-düşey deformasyon grafikleri elde edildi. Aynı kazık çapı için elde edilen düşey yük-düşey

deformasyon grafikleri aynı grafik ekseninde gösterilerek, kazıklar arası mesafenin taşıma gücüne etkisi belirli kriterlere göre değerlendirildi.

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde ilk kriter olarak, kazık çapının onda biri ($D/10$) oturmaya karşılık gelen yükün, toplam taşıma gücü olduğu kabulü yapıldı. Kazıkların 3D, 2D, 1.5D ve D(teğet) ara mesafelerde perde halinde bulunması durumundaki toplam taşıma güçleri yine aynı ara mesafelerdeki tekil kazığın taşıma gücüyle karşılaştırılarak, meydana gelen yük kaybı sayısal veriler ile ortaya kondu.

Kohezyonsuz zeminde yapılan analizlerde perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D olması durumundaki taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000mm, 800 mm, 650 mm, ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %13.3, %28.1, %36.9 ve %47.8 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Ara mesafenin 2D olması durumundaki taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650 mm ve 450 mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %12.6, %22.8, %35.1 ve %42.7 oranında; kazıklar arası mesafenin 1.5D olması durumunda aynı kazık çapları için sırasıyla %20.3, %34.6, %43.3 ve %56.5 oranında; kazıklar arası mesafenin D(teğet) olması durumunda ise yine aynı kazık çapları için sırasıyla %13.5, %24.23, %37.9 ve %63.4 oranında yük kaybı olduğu belirlendi. Farklı kazık çaplarında aynı ara mesafedeki kazıklarda oluşan yük kaybı yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir.

Kayaca soketlenmiş kazıklarda yapılan analizlerde perde kazıklar arası eksenden eksene mesafenin 3D olması durumunda taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000 mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %18.9, %27.5, %39.6 ve %50.1 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Ara mesafenin 2D olması durumunda taşıma gücünde, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %10.5, %24.5, %37.3 ve %51.2 oranında; kazıklar arası mesafenin 1.5D olması durumunda aynı kazık çapları için sırasıyla %13.9, %27.5, %35.8 ve %46.25 oranında; kazıklar arası mesafenin D (teğet) olması durumunda ise yine aynı kazık çapları için sırayla %11.4, %21.5, %37.9 ve %50.2 oranında yük kaybı olduğu belirlendi ikinci değerlendirmede ise 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 kritere göre yapılan

değerlendirmede de kazıklar arası mesafenin azalmasıyla oluşan yük kaybı miktarının arttığı gözlemlendi.

Kohezyonsuz zeminde, servis yükü kriterine göre, perde kazıklar arası mesafenin 3D olması durumunda, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %13,3, %28.1, %36.9 ve %60.5 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Ara mesafenin 2D olması durumunda, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %12.6, %22.8, %35.9 ve %58.7 oranında; kazıklar arası mesafenin 1.5D olması durumunda aynı kazık çapları için sırasıyla %15.8, %31.9, %37.6 ve %68.1 oranında; kazıklar arası mesafenin D(teğet) olması durumunda ise yine aynı kazık çapları için sırasıyla %13.5, %24,2 %37.9 ve %68.4 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Kayaca soketlenmiş kazıklarda, servis yükü kriterine göre, perde kazıklar arası mesafenin 3D olması durumunda, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %17.6, %33.9, %48.3 ve %60.2 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Ara mesafenin 2D olması durumunda, tek kazığa oranla 1000mm, 800mm, 650mm ve 450mm çapındaki kazıklarda sırasıyla %10.4, %24.6, %39.5 ve %55.1 oranında; kazıklar arası mesafenin 1.5D olması durumunda aynı kazık çapları için sırasıyla %13.8, %27.5, %35.6 ve %46.3 oranında; kazıklar arası mesafenin D(teğet) olması durumunda ise yine aynı kazık çapları için sırasıyla %11.3, %27.9, %38.4 ve %50.3 oranında yük kaybı olduğu belirlendi.

Kohezyonsuz zeminde servis yükü kriterine göre yapılan değerlendirmede kazıklar arası mesafenin D(teğet) olması durumunda oluşan yük kaybı miktarının fazla olmasının sebebi; D/10 oturmaya karşılık gelen yükün yarısının 20mm oturmaya karşılık gelen yükten büyük olmasıdır. Buradan kazıklar arası mesafenin D(teğet) olması durumunda kazık gurubunun birlikte bir blok şeklinde hareket edip zeminin göçtüğü sonuca varıyoruz.

Bu durum kayaca soketlenmiş kazıklarda, D/10 oturmaya karşılık gelen yükün yarısının 20mm oturmaya karşılık gelen yükten daha küçük olması nedeni ile gözlemlenmiyor.

Bu çalışmada iki farklı zemin profilinde, perde kazıklar üzerinde modelleme yapılarak analizler değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmanın genişletilmesi amacıyla kazıklar perde şeklinde bir sıra halinde teşkilinden farklı olarak, daha karmaşık etkileşimleri sayısal verileri ile ortaya koymak için farklı kazık grubu modelleri ile üç-dört kazığın etkileşim bölgelerinin çakıştığı analizler yapılabilir.

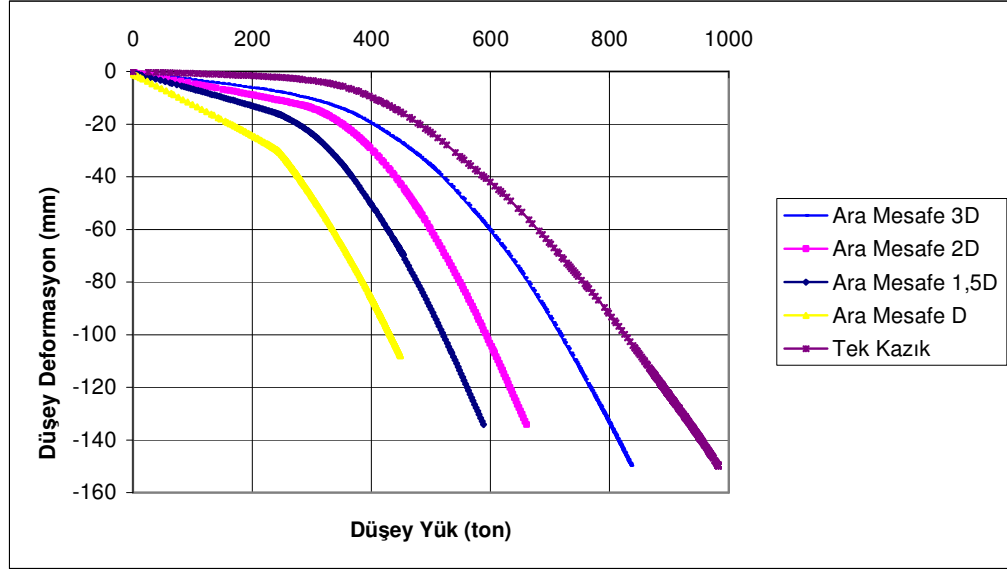
KAYNAKLAR

- [1] **Toğrol, E., Tan, O.,** (2003), *Kazıklı Temeller*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [2] **Özkan, M.T., Sağlamer, A.,** (1995), *Kazıklı Temeller*, Dünya İnşaat, No.131/7, s.35-38
- [3] **Yıldırım, S., Özaydın, K.,** (1994), *Derin Temeller*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği V. Ulusal Kongresi, ODTÜ, ANKARA s. 684-758
- [4] **Birand, A.,** (2001), *Kazıklı Temeller*, ODTÜ, Ankara
- [5] **Yıldırım, S.,** (2002), *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [6] **Burland, J. B.,** (1973), *Shaft Friction Piles in Clay-A Simple Fundamental Approach*, Ground Engineering, Vol.6, No.3
- [7] **Kulhawy, F.H.,** (1984), *Limiting Tip and Side Resistance, Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, San Fransisco
- [8] **Tomlinson, M.J.,** (1994), *Pile Design and Construction Practice*, E&FN Spon, London
- [9] **Randolph, M.G.,** (1983), *Design of Piled Raft Foundations*, CUED/D soils TR 143, Cambridge Universty
- [10] **Rove, R. Kerry,** (2000), *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*, Kluwer Academic Publishers Group, Netherlands
- [11] **Das, Braja M.,** (1990), *Principles of Foundation Engineering*, PWS-KENT
- [12] **Vesic, A.S.,** (1977), *Test on Instrumented Piles*, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.96, No.4
- [13] **Stasa, Frank, L.,** *Applied Finite Element Analysis For Engineers*, HRW, Series in Mechhanic Engineering
- [14] **Heinrich, C., Juan and Pepper, W., Darrell,** (1972), *The Finite element Method*, Basic Concepts and Applications, Series in Computational and Physical Processes Research in Mechanics and Thermal Sciences
- [15] **Köksal, Türkan,** (1995), *Sonlu Elemanlar Metodu*, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Sıra No:304, İSTANBUL
- [16] **Bowles, J. E.,** (1996), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, Singapore

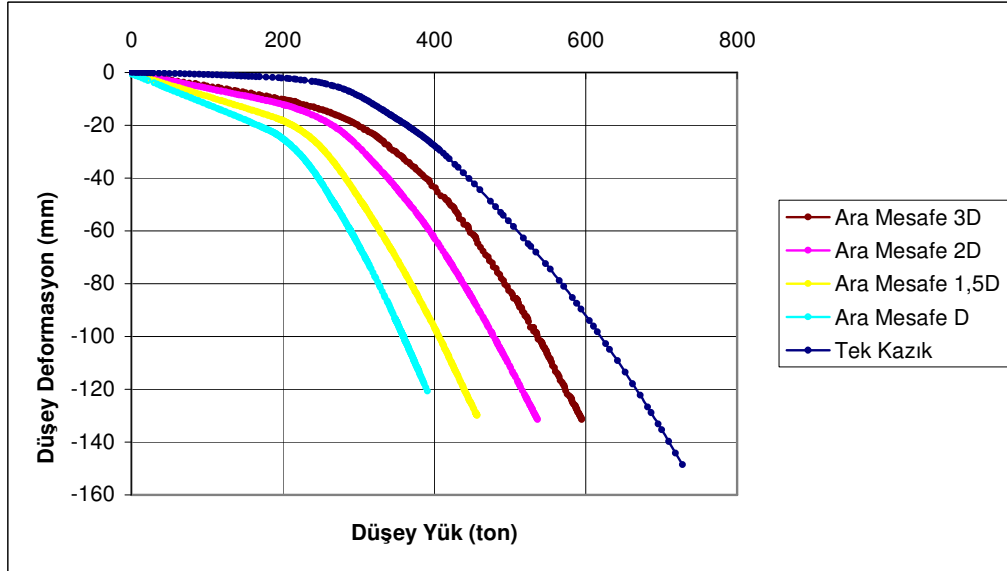
- [17] **Tomlinson, MJ and Boorman, R.**, (1963), *Foundation Design and Construction*, Longman Scientific and Technical, Singapore
- [18] **Chellis, R.D.**, (1961) *Pile Foundations*, McGraw-Hill, New York
- [19] **Prakash, S. And Sharma, H. D.**, (1990), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley, New York
- [20] **Köseoğlu, S.**, (1971), *Temeller Statik ve Betonarme Hesapları*, Özkardeş Matbaası, Antalya
- [21] **Plaxis 3D Foundation** References&Material Models Manual

EKLER

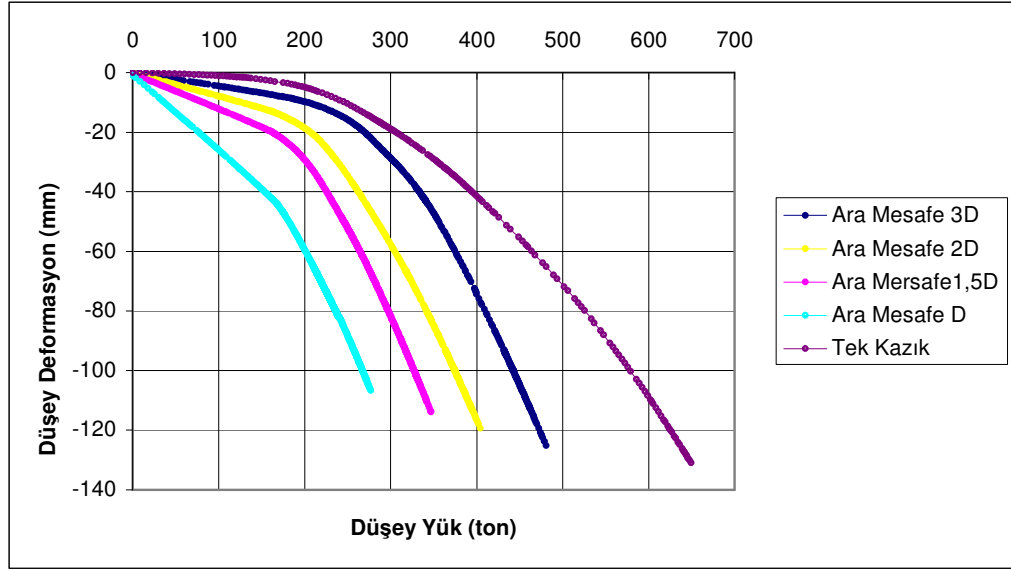
A.1. Plaxis İle Yapılan Analizlere Ait Eğriler



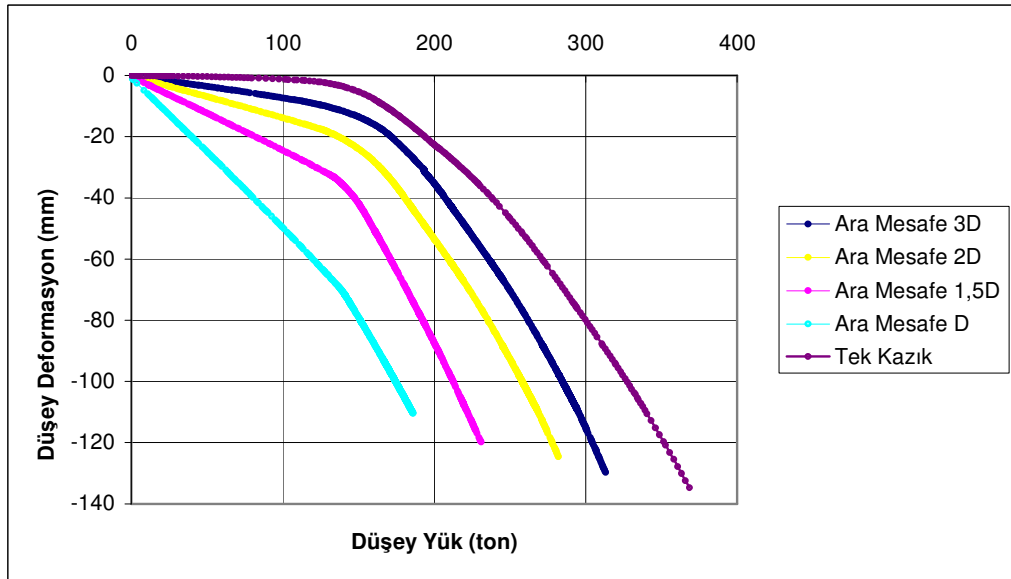
A.1.1. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



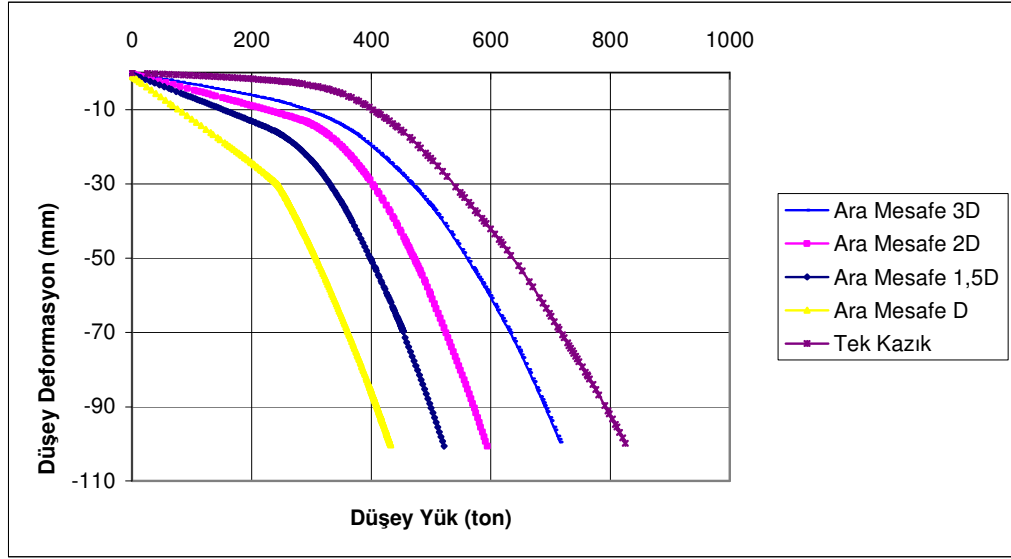
A.1.2. $\Phi 800$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



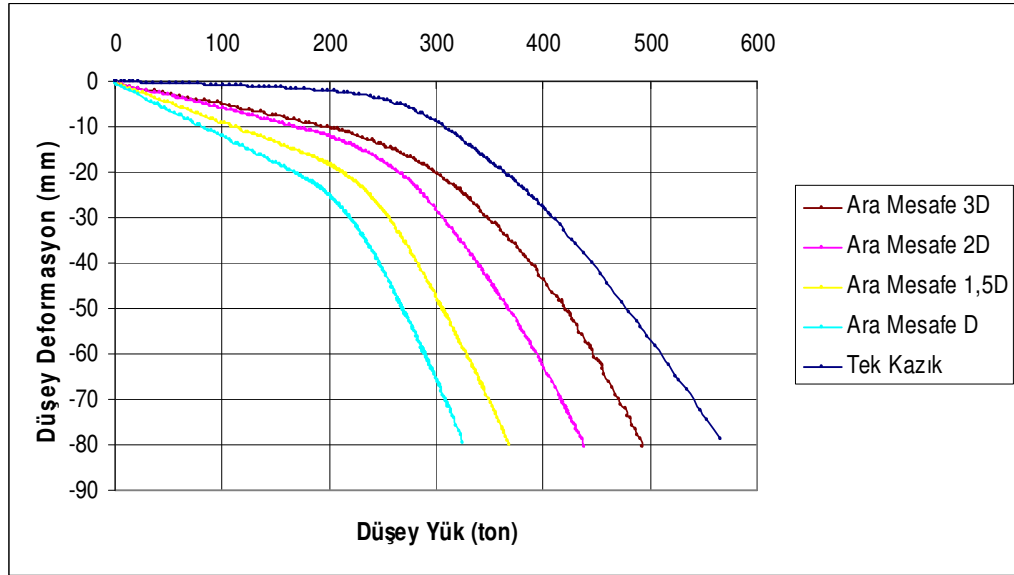
A.1.3. $\Phi 650$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



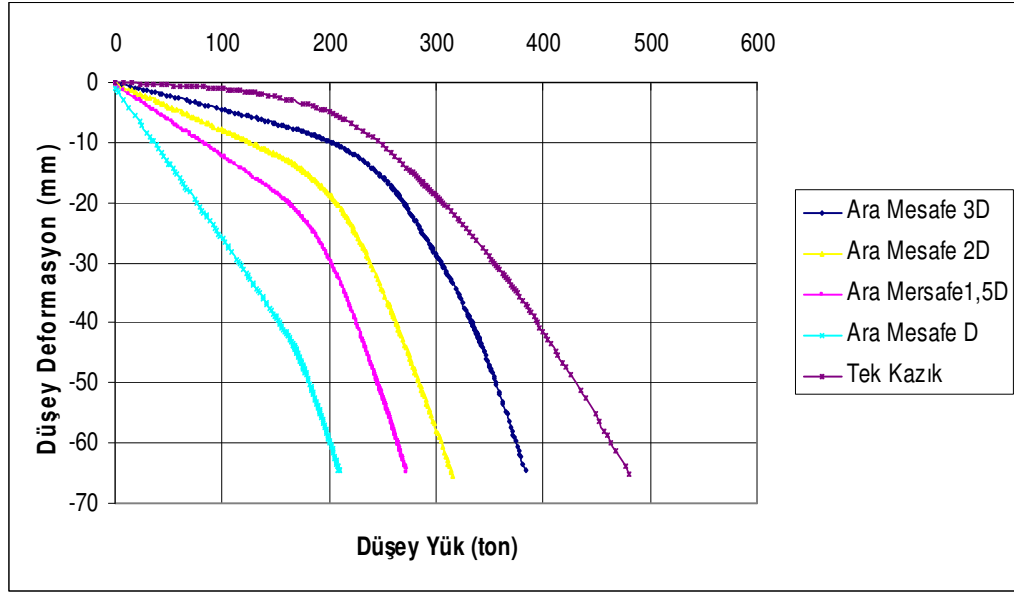
A.1.4. $\Phi 450$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



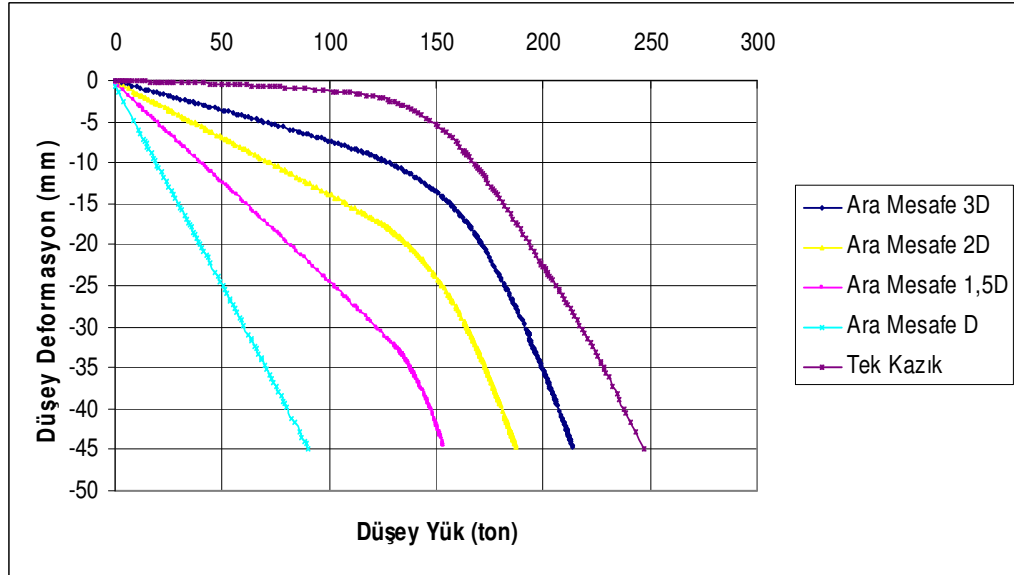
A.1.5. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



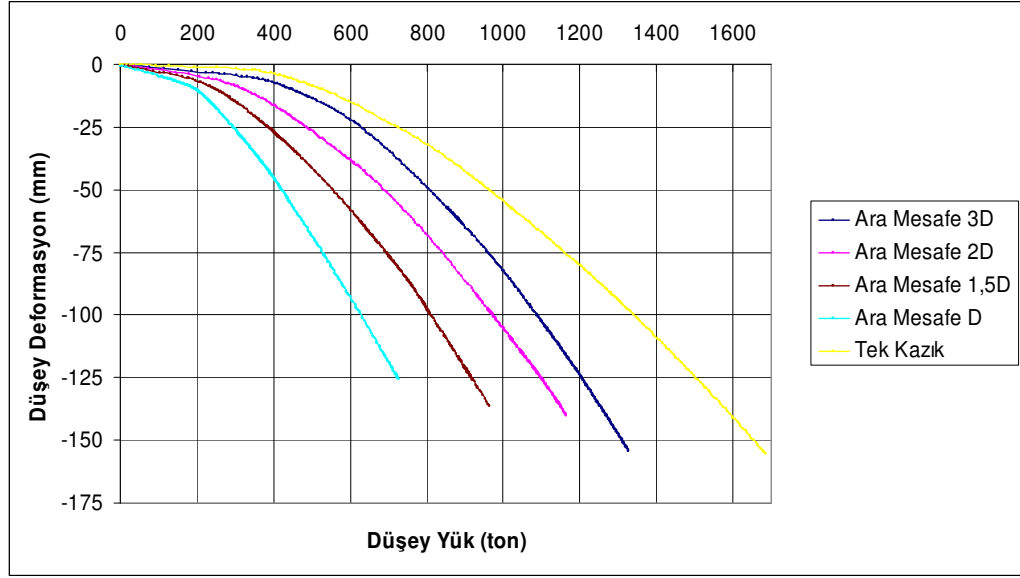
A.1.6. $\Phi 800$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



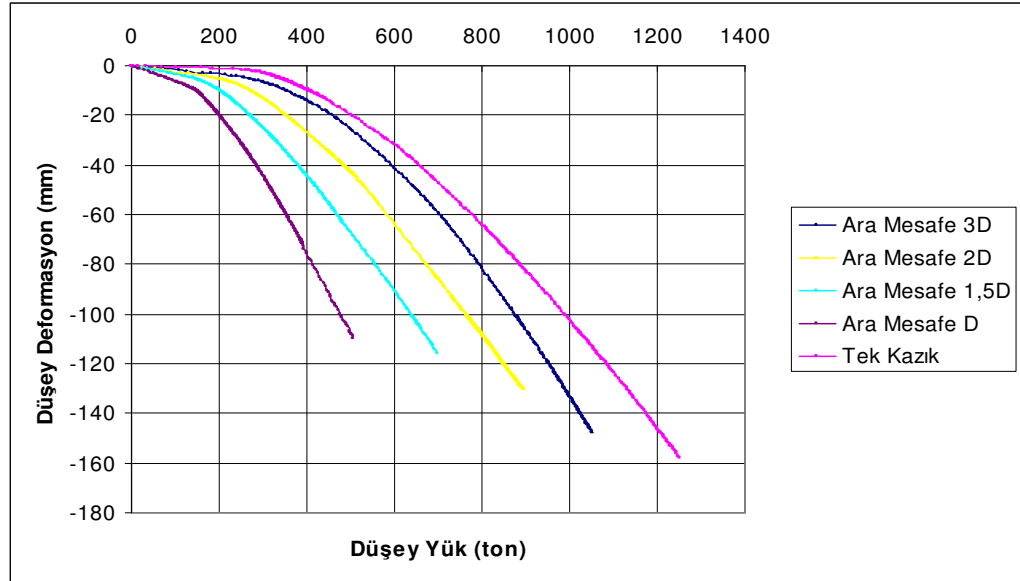
A1.7. $\Phi 650$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



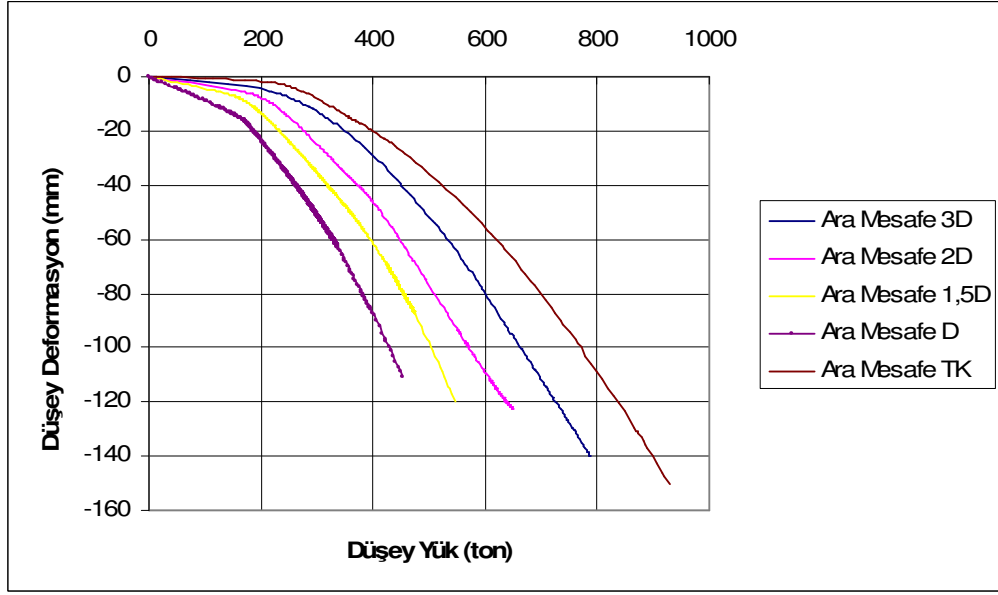
A.1.8. $\Phi 450$ mm Çapında Kohezyonsuz Zemindeki Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



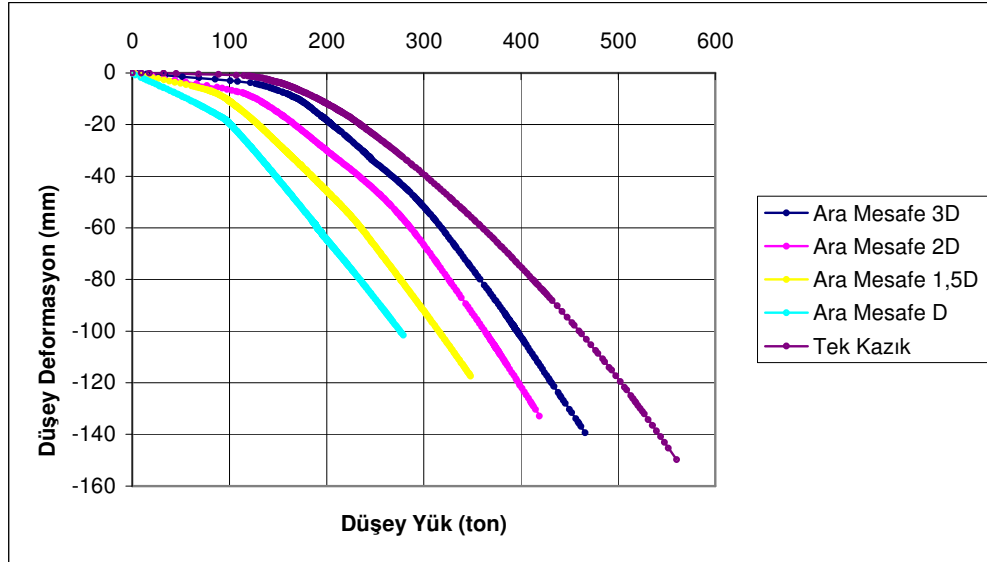
A.1.9. $\Phi 1000$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



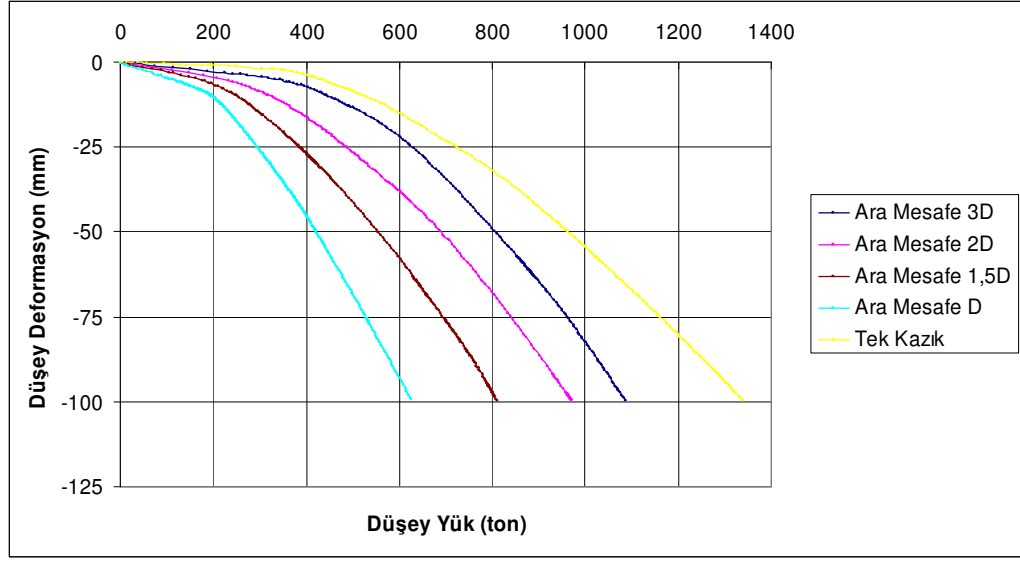
A.1.10. $\Phi 800$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



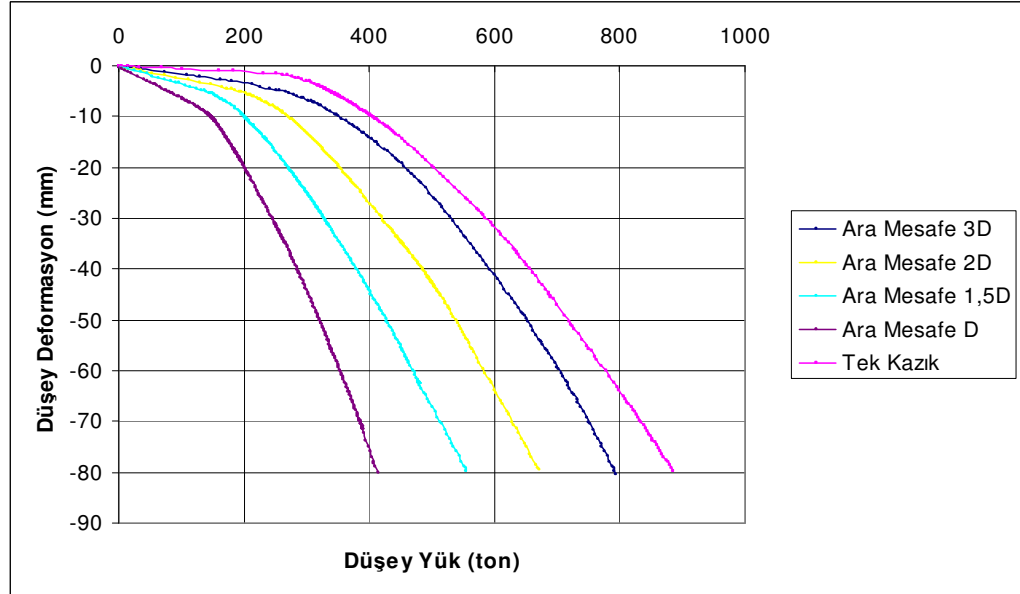
A.1.11. $\Phi 650$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



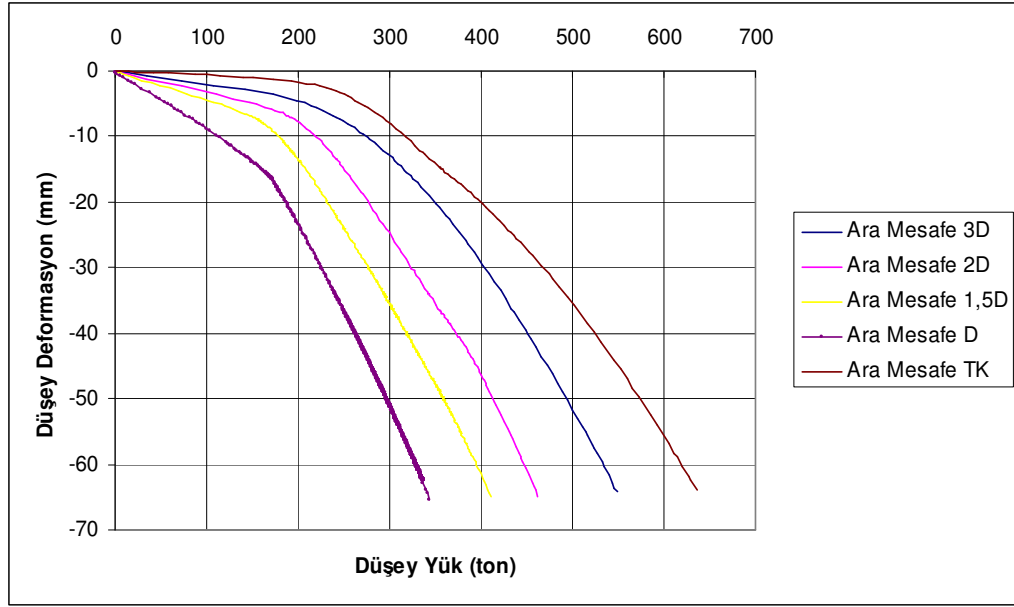
A.1.12. $\Phi 450$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Göçme Durumunda Elde Edilen Yük-Oturma Eğrileri



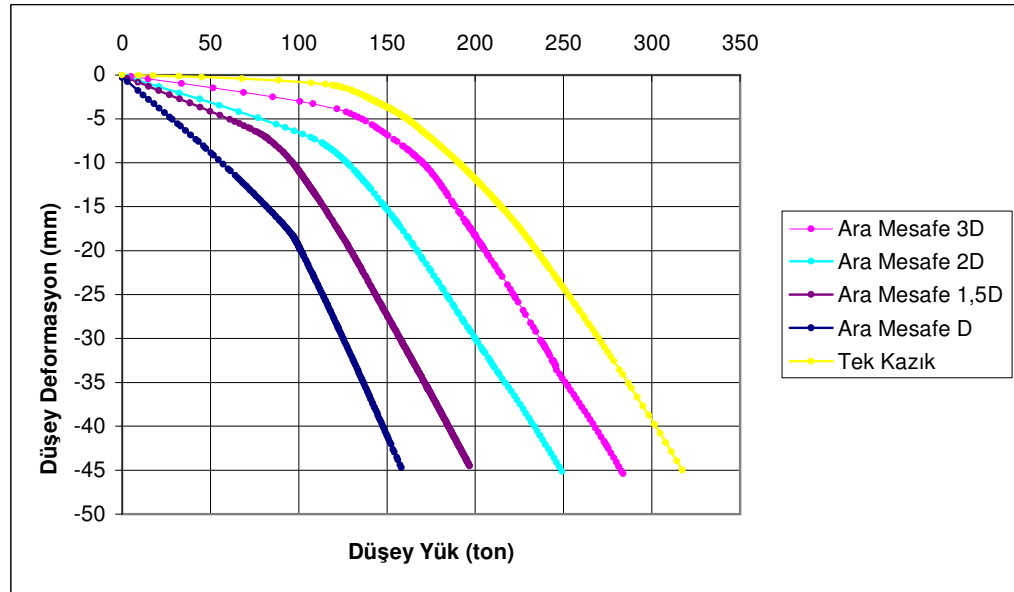
A.1.13. $\Phi 1000$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri



A.1.14. $\Phi 800$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

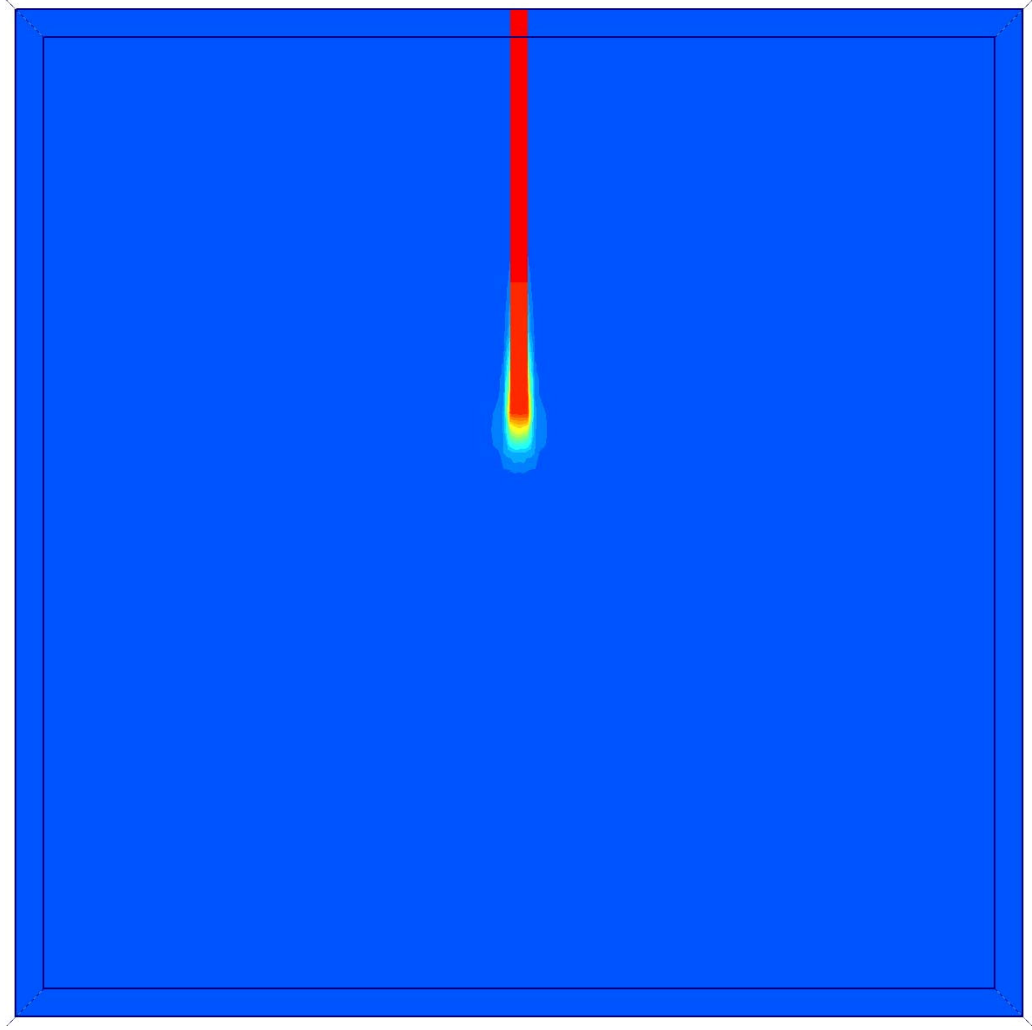


A.1.15. $\Phi 650$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

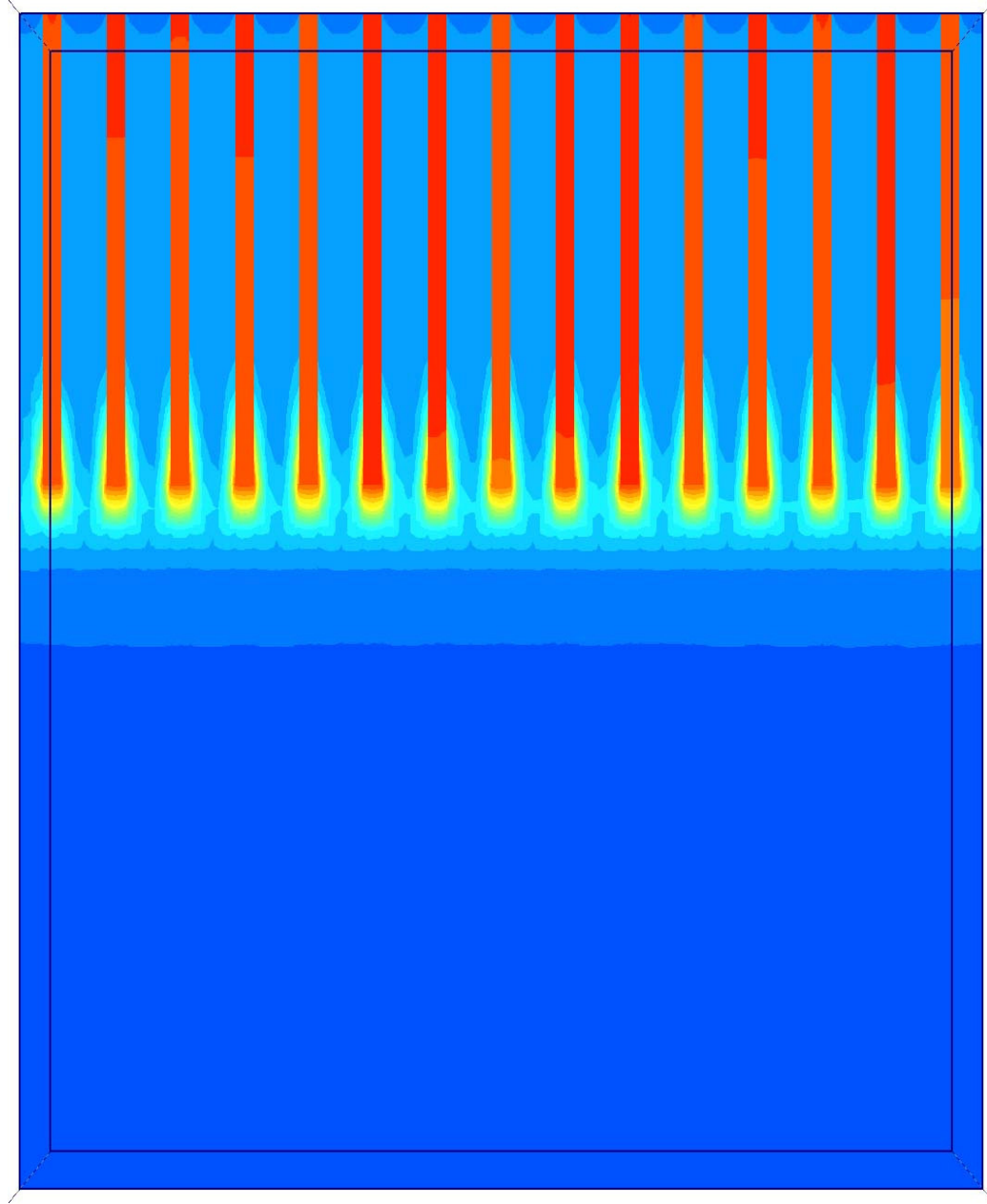


A.1.16. $\Phi 450$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Kazıklar için Kazık Çapının %10'u Oturma Değerine Karşılık Gelen Yük-Oturma Eğrileri

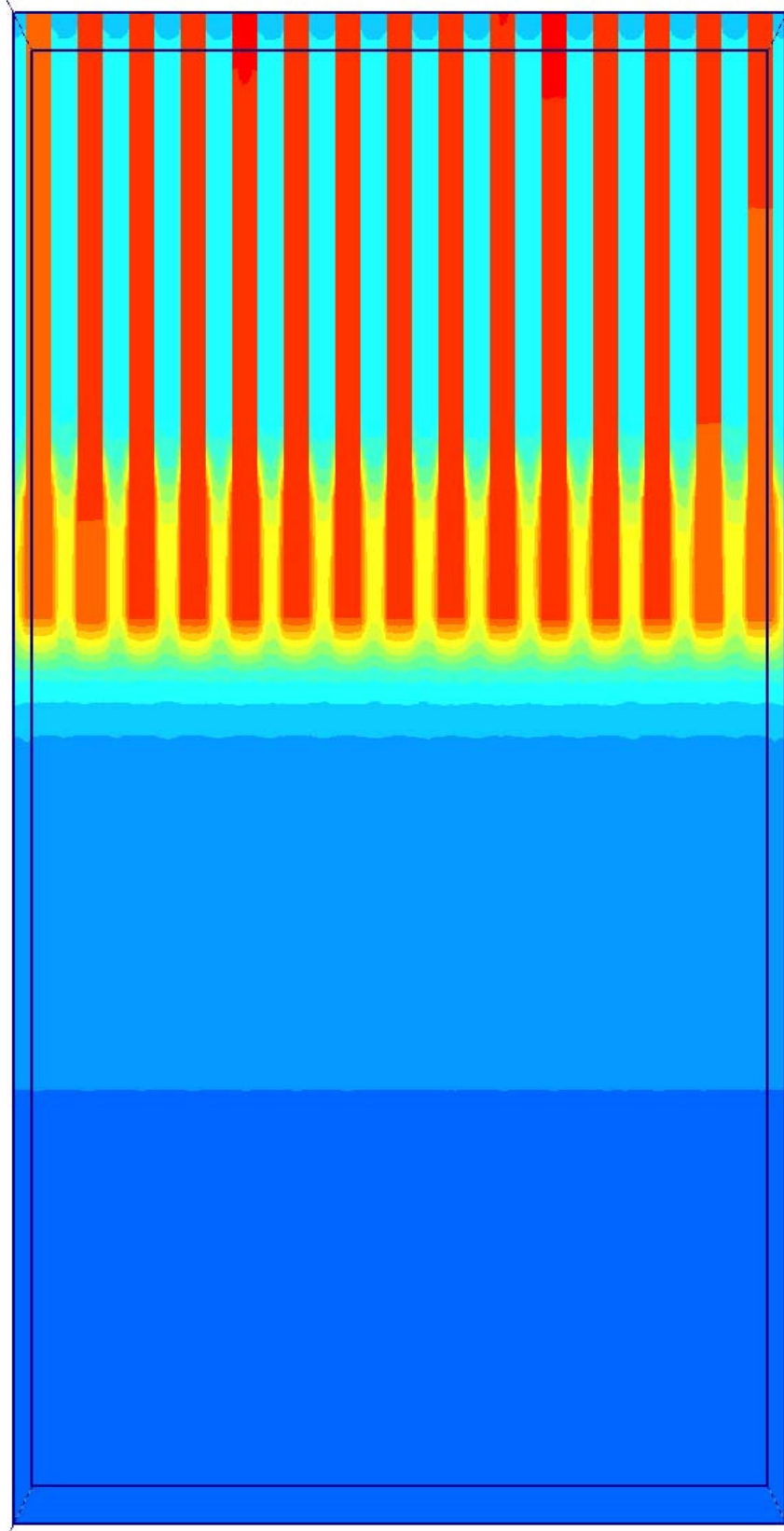
B.1. Örnek Plaxis Deformasyon Çıktıları



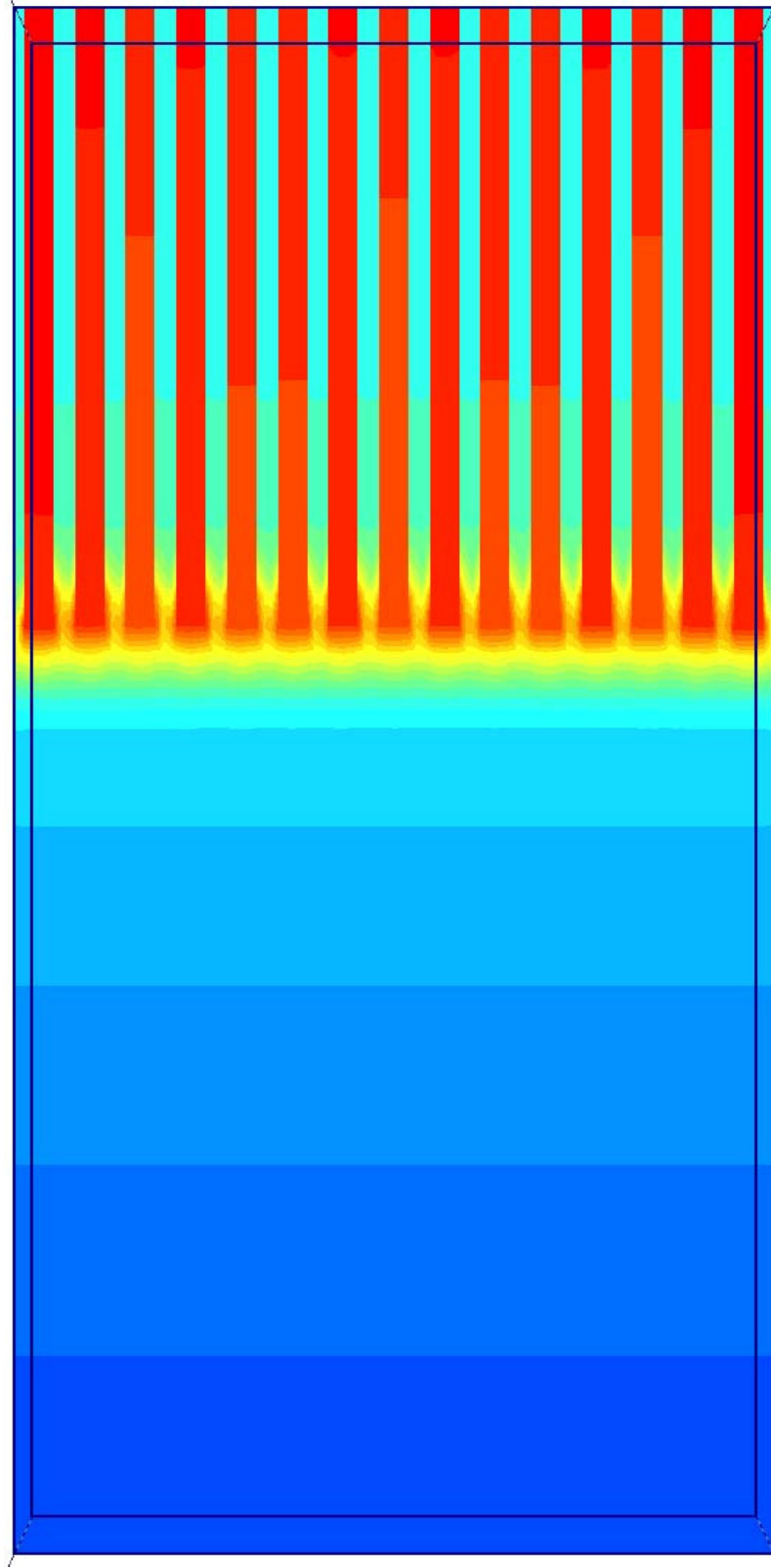
B.1.1. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zeminde Tek Kazık için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



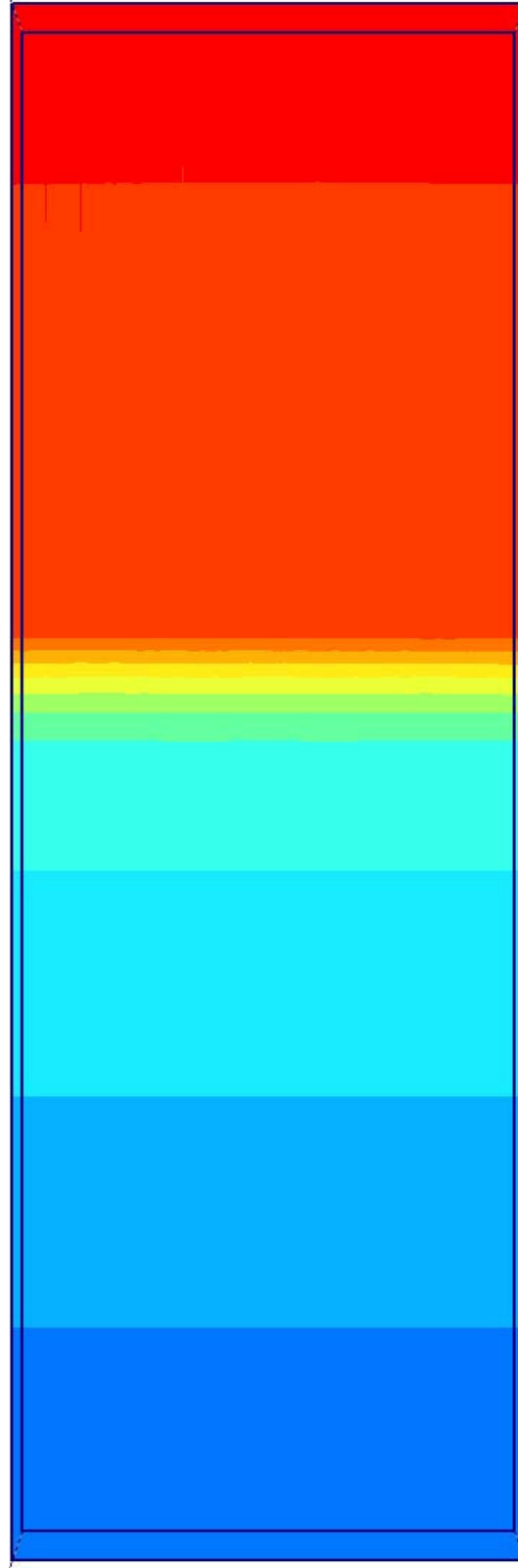
B.1.2. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zeminde Eksenden Eksene 3D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



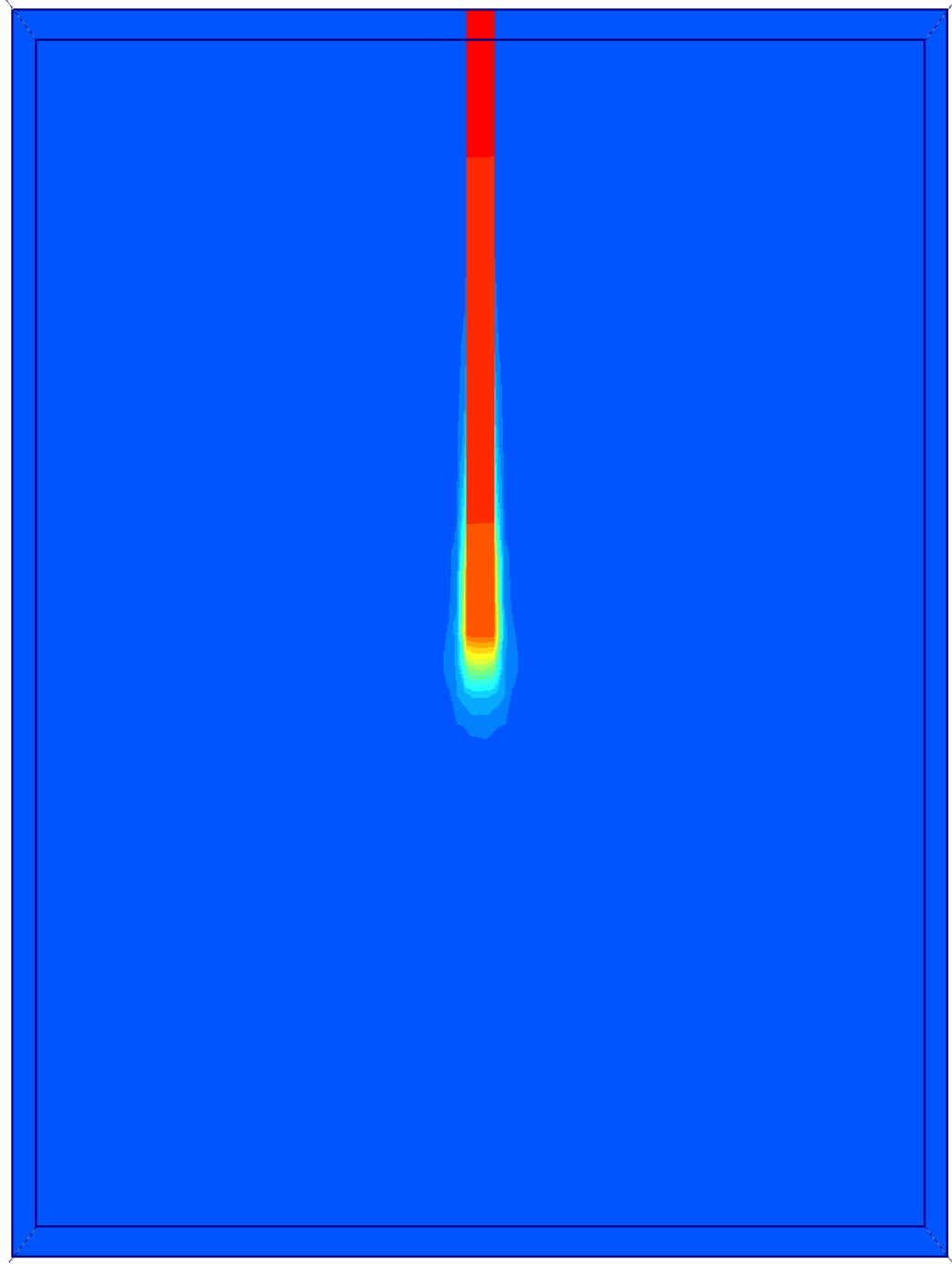
B.1.3. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zeminde Eksenden Eksene 2D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



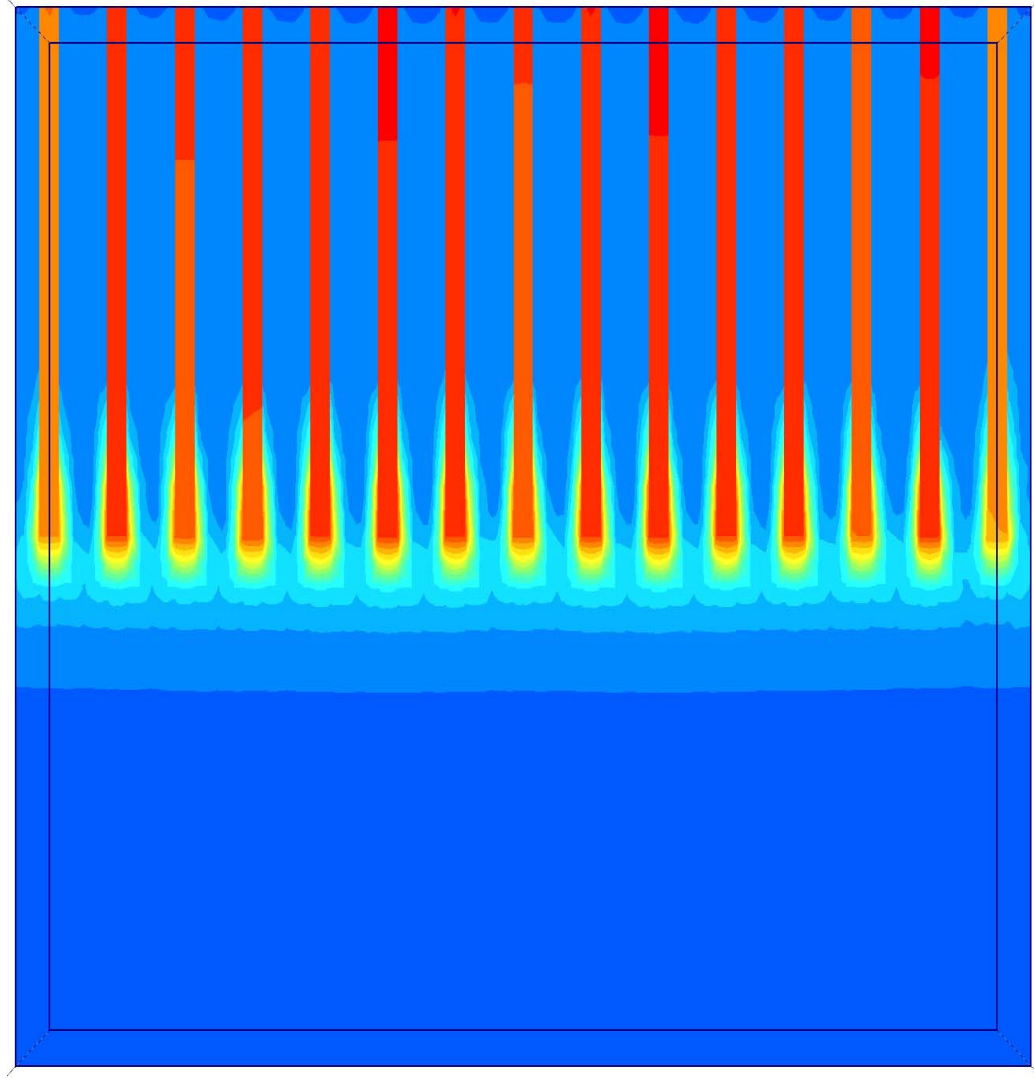
B.1.4. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zeminde Eksenden Eksene 1,5D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



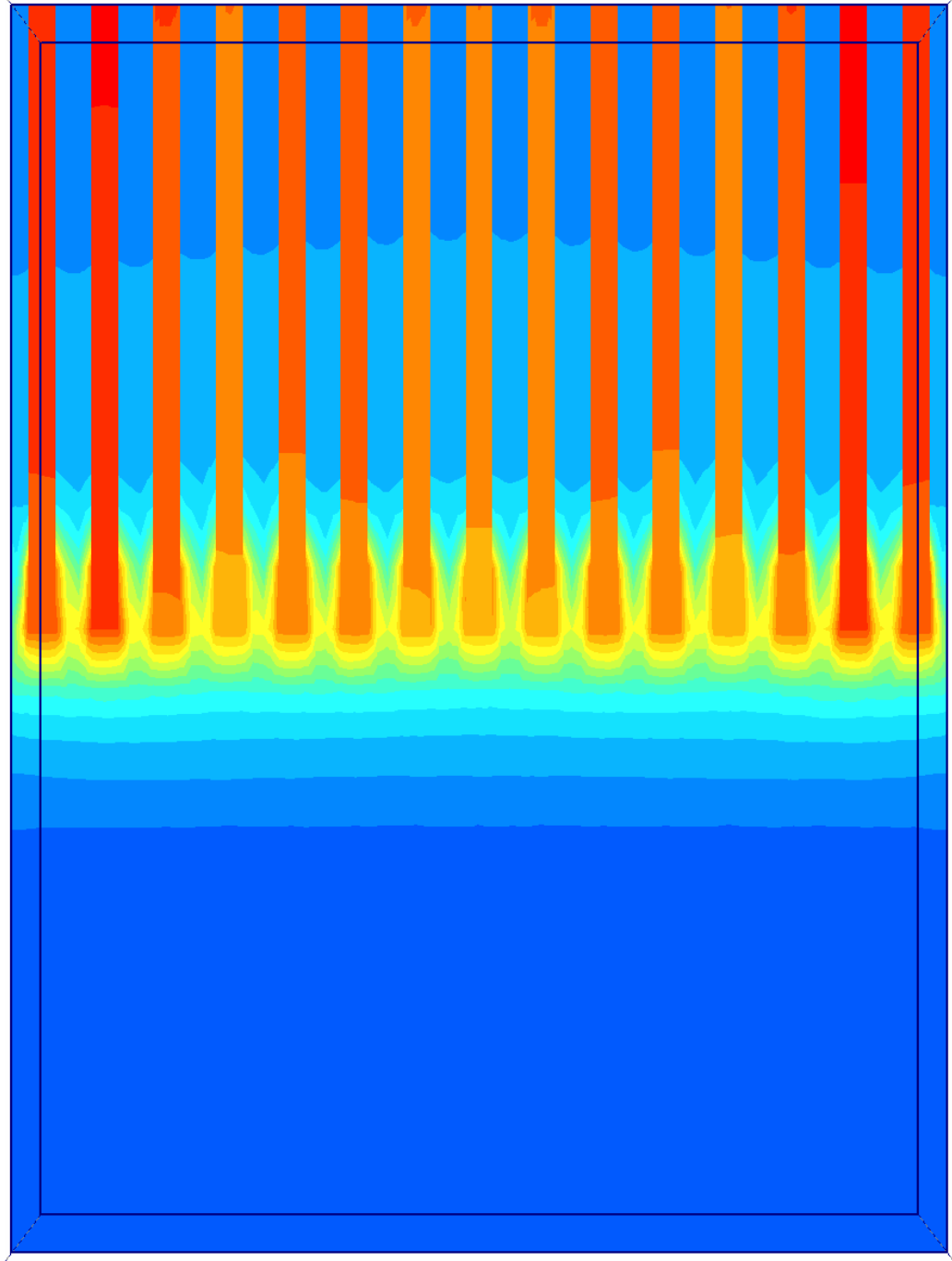
B.1.5. $\Phi 1000$ mm Çapında Kohezyonsuz Zeminde Eksenden Eksene D Aralıklarla Yerleştirilen Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



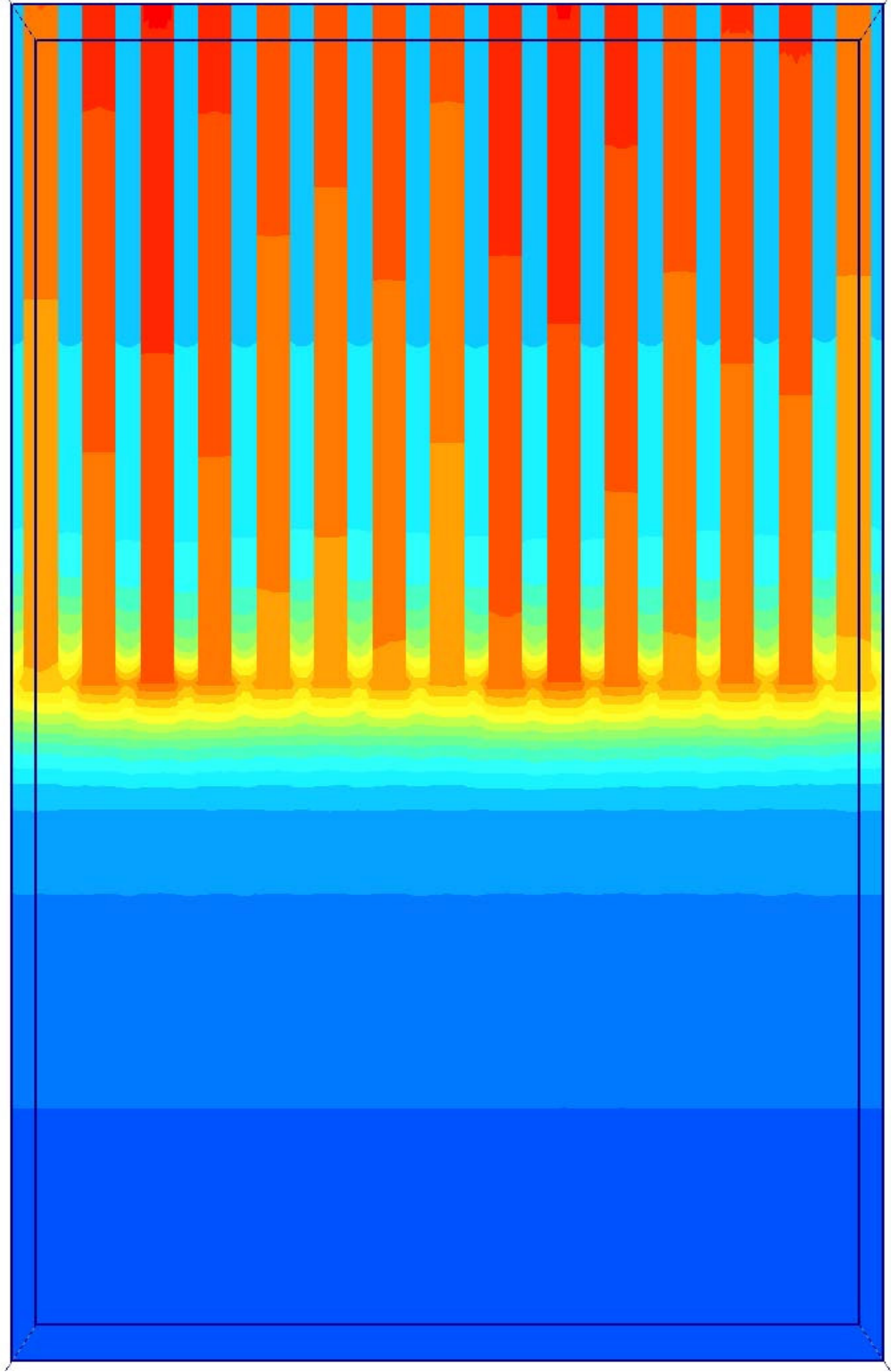
B.1.6. $\Phi 1000$ mm Çapında Kayaca Soketlenmiş Tek Kazık için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



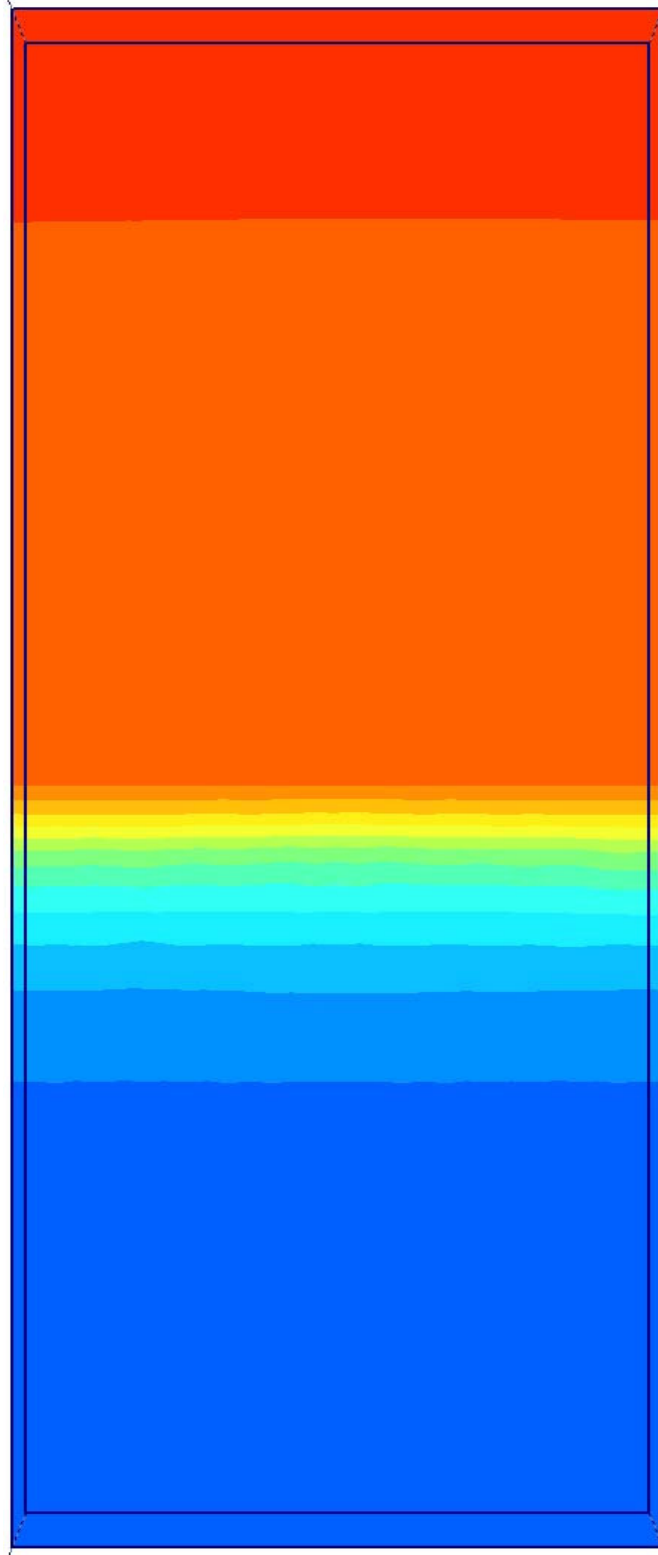
B.1.7. $\Phi 1000$ mm $\varnothing$ apında Eksenden Eksene 3D Aralıklarla Yerleştirilen Kayaca Soketlenmiş Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



B.1.8. $\Phi 1000$ mm Çapında Eksenden Eksene 2D Aralıklarla Yerleştirilen Kayaca Soketlenmiş Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



B.1.9. $\Phi 1000$ mm Çapında Eksenden Eksene 1,5D Aralıklarla Yerleştirilen Kayaca Soketlenmiş Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi



B.1.10. $\Phi 1000$ mm Çapında Eksenden Eksene D Aralıklarla Yerleştirilen Kayaca Soketlenmiş Perde Kazıklar için Göçme Durumunda Deformasyon Renklendirmesi

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 23 Aralık 1979 tarihinde Kayseri’ de doğdu. Lise öğrenimini 1998 yılında Kayseri Melikgazi Lisesinde, yüksek öğrenimini 2002 yılında Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yazar, aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri İnşaat Fakültesi Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt oldu.