Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması

Hüseyin Dirican

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2018

Comparison of Pile Foundation and Jet Grout Application Under Different Building Loads

Hüseyin Dirican

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

Sep 2018

# Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması

Hüseyin Dirican

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hasan Savaş

Eylül 2018

**ONAY**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hüseyin Dirican'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman :** Doç. Dr. Hasan Savaş

**İkinci Danışman : -**

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye :** Doç. Dr. Hasan Savaş

**Üye :** Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

**Üye :** Doç. Dr. Derviş Volkan Okur

**Üye :** Doç. Dr. Murat Türköz

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

**ETİK BEYAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Hasan Savaş danışmanlığında hazırlamış olduğum "Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 04/09/2018

Hüseyin Dirican

İmza

# ÖZET

Derin temeller, olumsuz zemin şartlarında üst yapıdan gelen yüklerin zemine güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayan yapı elemanlarıdır. Günümüzde ayrıca kötü zemin koşullarında zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak, iyileştirilmiş zemin üzerine temel tasarımı yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında; yapı yükü, temel boyutları ve zemin özellikleri belli olan yapı için farklı yapı yükleri altında kazıklı temel tasarımları yapılmıştır. Tasarımı yapılan bu kazıkların oturma hesapları hem ampirik hem de sayısal analiz yöntemleriyle bulunmuş olup, bu değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Aynı yapı ve zemin koşulları için, ikinci bir alternatif olarak zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet grout için tasarım hesapları da gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; temel tasarımı yapılırken mutlaka kazık temel ile birlikte, zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet grout ile de tasarım yapılması ve ekonomik olan yöntemin tercih edilmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Kazıklı Temeller, Plaxis Programı, Kazıklı Temel Dizaynı, Jet grout, İyileştirme.

## SUMMARY

Deep foundations are the structural elements that ensure the safe transfer of the loads from the superstructure to the ground in adverse soil conditions. Nowadays, ground improvement methods are used in poor soil conditions and basic design is made on the improved floor. In this thesis; the basic design of the building was carried out under different building loads. The seating calculations of these piles were determined by both empirical and numerical analysis methods and these values were compared. Design calculations for jet grout, which is one of the soil improvement methods as a second alternative for the same structure and ground conditions, were also performed. In the results of working; while designing the basic design, it has been revealed that the design should be done with jet grout which is one of the ground improvement methods and the economical method should be preferred.

**Keywords:** Pile Foundations, Plaxis Program, Pile Foundation Design, Jet grout, Improvement.

# TEŞEKKÜR

“Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması’’ başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında ve derslerimde bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan, bilgilerini paylaşan, yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Hasan Savaş’a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım. Yapmış oldukları yardım ve katkılarından dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Murat Türköz’e, Dr. Öğr. Üyesi Kamil B. Afacan’a, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Erol’a teşekkür ederim. Yardımlarından dolayı; Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ögretim Üyesi Prof. Dr. Mehmet M. Berilgen’e, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Zekai Angın’a, Jeoloji Yük. Müh. Osman Kendir’e, Jeoloji Müh. Özgür Bayraktar’a, Jeoloji Müh. Soner Çam’a ve çalışmalarım sırasında bana destek olan başta eşim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**ÖZET** ..... vi
**SUMMARY** ..... vii
**TEŞEKKÜR** ..... viii
**İÇİNDEKİLER** ..... ix
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... xii
**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... xiv
**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ** ..... xv
**1. GİRİŞVE AMAÇ** ..... 1
**2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI** ..... 2
2.1. Kazıkların Kullanım Amaçları ..... 2
2.2. Kazıkların Kullanım Yerleri ..... 3
2.3. Kazıkların Sınıflandırılması ..... 4
2.3.1. Yük taşıma ve aktarma şekillerine göre sınıflandırma ..... 4
2.3.2. İmal edildikleri malzemeye göre sınıflandırma ..... 5
2.3.2.1. Betonarme kazıklar ..... 5
2.3.2.2. Çelik kazıklar ..... 6
2.3.2.3. Ahşap kazıklar ..... 6
2.3.2.4. Kompozit kazıklar ..... 6
**3. TEORİK BİLGİ** ..... 7
3.1. Zeminlerin Önemli Mukavemet Parametreleri ve Gerilmeler ..... 7
3.2. Tekil Kazıkların Düşey Statik Yükler Altındaki Davranışı ve Tasarımı ..... 10
3.2.1. Düşey yüklü kazıkların zemine yük aktarması ..... 11
3.2.2. Uç kazıklarının davranışı ..... 12
3.2.3. Sürtünme kazıklarının davranışı ..... 12
3.2.4. Pozitif ve negatif çevre sürtünmesi ..... 13
3.2.5.Tekil kazıkların uç taşıma gücü ..... 14
3.2.5.1. Meyerhof yöntemi ..... 15
3.2.5.2. Hansen yöntemi ..... 18
3.2.5.3. Vesic yöntemi ..... 20
3.2.5.4. Terzaghi yöntemi ..... 21
3.2.6. Tekil kazıklarda sürtünme direnci ..... 22

# İÇİNDEKİLER (devam)

**Sayfa**

3.2.6.1. Kohezyonlu zeminlerde sürtünme direnci .....23
3.2.6.2. Kum zeninde sürtünme direnci .....26
3.3. Arazi Deneylerinden Elde Edilen Bağıntılar.....28
3.3.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT) .....28
3.3.2. Koni penetrasyon deneyi (CPT) .....29
3.4. Tekil Kazıklarda Oturma .....30
3.4.1. Kohezyonsuz zeminlerde tekil kazığın oturması .....30
3.4.2. Kohezyonlu zeminlerde tekil kazığın oturması .....32
3.5. Kazık Gruplarının Düşey Statik Yükler Altındaki Davranışı ve Tasarımı .....32
3.5.1. Kazık gruplarının taşıma gücü .....33
3.5.2. Kazık gruplarında verimlilik.....35
3.5.2.1. Converse-Labarre verimlilik formülü .....36
3.5.2.2. Blok yaklaşımı (Terzaghi-Peck) yöntemi .....36
3.5.3. Kazık gruplarında elastik (ani-drenajsız) ve konsolidasyon oturması .....37
**4. AMPİRİK KAZIK TASARIM GÜCÜ VE OTURMA HESAPLARI** .....41
4.1. Tekil Kazıklarda Taşıma Gücü Hesapları .....41
4.1.1. Tekil kazıklarda uç taşıma gücü hesapları .....41
4.1.2. Tekil kazıklarda sürtünme (yüzey) direnci hesapları .....44
4.1.3. Tekil kazıkların izin verilebilir taşıma gücü hesapları .....46
4.2. Tekil Kazıkların Elastik Deformasyon (Oturma) Hesapları.....46
4.3. Kazık Gruplarının Taşıma Gücü Hesapları.....49
4.4. Kazık Gruplarının Oturma Hesapları .....50
**5. JET GROUT YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME** .....51
5.1. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Ekipman .....51
5.2. Jet Grout Yönteminin Uygulaması .....52
5.3. Jet Grout Teknikleri .....53
5.3.1. Jet 1 .....53
5.3.2. Jet 2 .....53
5.3.3. Jet 3 .....53
5.3.4. Süper jet .....53
5.4. Jet Grout Yönteminde Çalışma Parametreleri.....54

# İÇİNDEKİLER (devam)

**Sayfa**

5.5. Jet Grout Kolonların Sıvılaşma Direnci Üzerine Etkisi .....54
5.6. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücü .....55
5.6.1. Kohezyonsuz zeminlerde kolon taşıma gücü .....56
5.6.2. Kohezyonlu zeminlerde kolon taşıma gücü .....57
5.7. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücü Analizleri .....58
**6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS YAZILIMI** .....60
6.1. Plaxis Yazılımında Başlıca Özellikler .....63
6.1.1. Noktalar.....63
6.1.2. Çizgiler.....63
6.1.3. Hücreler.....63
6.1.4. Elemanlar .....63
6.1.5. Düğüm (nodes) ve gerilme noktaları (stresspoints) .....63
6.1.6. Sondaj kuyuları (borehole) .....64
6.1.7. Zemin testleri .....65
6.1.8. Aşamalı inşaat .....65
6.1.9. Sabit durum ve aşırı boşluk basınçları .....65
6.2. Plaxis Yazılımında Yapısal Elemanlar .....66
6.2.1. Kirişler .....66
6.2.2. Geotekstiller (Geogridler) .....66
6.2.3. Ara yüzeyler .....66
6.2.4. Ankrajlar .....67
6.2.5. Yükler .....67
6.3. Plaxis Yazılımında Zemin Modelleri .....67
6.3.1. Lineer elastik zemin modeli .....68
6.3.2. Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli .....68
6.3.3. İleri zemin modelleri (Hardeningsoil modeli) .....68
6.3.4. Soft-soil-crep (SSC) zemin modeli .....68
6.4. Plaxis Analiz Sonuçları .....69
**7. BULGULAR VE TARTIŞMA** .....74
**8. SONUÇ VE ÖNERİLER** .....77
**KAYNAKLAR DİZİNİ** .....79

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**


2.1. Kazıklı temellerin kullanım yerleri (Yıldırım, Aksöz, 2008)..... 3

2.2. Donatılı prefabrike kazıklar ..... 5

3.1. Göçme durumu ve Mohr Daireleri ..... 7

3.2. İçsel sürtünmeye bağlı kayma mukavemeti ..... 8

3.3. Daneler arası gerilme aktarımı ..... 9

3.4. Kazık toplam yükünün uç ve sürtünme dirençleri arasındaki paylaşımı ..... 11

3.5. (a) ve (b) Uç taşıma kazıkları (c) Sürtünme kazığı ..... 13

3.6. Negatif çevre direncinin meydana geldiği zemin durumları ..... 13

3.7. Kazıkların nihai yük taşıma gücüne ait yük bileşenleri ..... 14

3.8. Meyerhof'a göre kum zeminde uç direncinin derinlikle değişimi (a) homojen kumda (b) tabakalı kumda ..... 16

3.9. $( L_b/D )_{cr}$ değerinin zemin içsel sürtünme açısı ile değişimi ( Meyerhof, 1976 ). ..... 17

3.10. $N_c$ ve $N_q$ taşıma gücü katsayılarının maksimum değerlerinin zeminin sürtünme açısına bağlı olarak değişimi (Meyerhof, 1976)..... 18

3.11. λ katsayısının gömülü kazık boyuyla değişimi (Mc Clelland, 1974)..... 24

3.12. λ yönteminin tabakalı zeminlerde uygulanışı..... 24

3.13. Kil zeminde α katsayısının drenajsız kohezyon ile değişimi ..... 25

3.14. Kum zeminlerde sürtünme direncinin derinliğe bağlı değişimi ..... 27

3.15. $I_{wp}$ etki faktörünün (L/B) oranına bağlı değişimi ..... 31

3.16. Tipik bir kazık grubunun plan ve kesiti (Rajapakse, 2008) ..... 32

3.17. Kazık gruplarında oluşan gerilmelerin süperpozisyonu (Tomlinson, 2004)..... 37

3.18. Kazık gruplarının konsolidasyon oturması ..... 39

5.1. Jet grout yönteminde kullanılan ekipman ..... 51

5.2. Jet grout yönteminin uygulama aşamaları ..... 52

6.1. Zemin ve yapısal elemanlar için veri giriş ekranları:(a) zemin (b) yapısal eleman.61

6.2. Plaxis 2018 ana penceresi ..... 62

6.3. Düğüm noktaları ve gerilme noktaları ..... 64

6.4. Plaxis 2018 programında 'borehole' veri giriş ekranları ..... 64

6.5. Yapım aşamaları veri girişi ..... 65

# ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

**Şekil** **Sayfa**

6.6. Yük ve hesaplama kademeleri..... 67
6.7. Analizlerde kullanılan zemin profili (kazıklar sağlam zemine 0,5 m soketlendi) 69
6.8. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m tekil kazığında $Q_1$=10000 kN yük altındaki oturma..... 70
6.9. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m tekil kazığında $Q_1$=10000 kN yük altındaki efektif gerilme ..... 70
6.10. 6.10. Plaxis programında kazık gruplarının modellenmesi ..... 71
6.11. $L_2$=15 m $D_2$=0,80 m kazık gruplarında $Q_2$=20000 kN yük altında deforme ağ ..... 71
6.12. $L_2$=20 m $D_3$=1,00 m kazık gruplarında $Q_3$=35000 kN yük altında oturma ..... 72
6.13. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m kazık gruplarında $Q_1$=10000 kN yük altında oturma .....73

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge** **Sayfa**


3.1. Hansen yöntemi için taşıma kapasitesi faktörleri ..... 19
3.2. Vesic taşıma kapasitesi denklemleri için taşıma kapasitesi faktörleri ..... 21
3.3. Terzaghi (1947) temel şekil faktörleri ..... 22
3.4. Terzaghi taşıma gücü katsayıları ……..... 22
3.5. Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açıları (δ) ……..... 26
3.6. Çakma ve sondaj kazıkların birim uç mukavemeti değerleri (Meyerhof, 1976) ... 28
3.7. Kohezyonsuz zeminlerde birim çevre sürtünmesi değerleri (Meyerhof, 1979)..... 29
3.8. Kazık tipine bağlı sürtünme direnci katsayıları ($S_1$,$S_2$) ……. 30
3.9. Kazık kullanım kriterleri ……... 33
4.1. Analizlerde kullanılan zemin özellikleri …… 41
4.2. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıklar için uç taşıma gücü değerleri ……... 43
4.3. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıklar için sürtünme (yüzey) dirençleri. ..... 45
4.4. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıkların uç taşıma gücü, sürtünme direnci, toplam taşıma gücü ve izin verilebilir taşıma gücü ……... 46
4.5 Analizlerde kullanılan yapısal elemanların özellikleri ..... 47
4.6. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıkların elastik oturma hesapları ……..... 49
4.7. Farklı çap ve boydaki tekil ve grup kazıkların izin verilebilir taşıma kapasiteleri 50
4.8. Farklı çap ve boylardaki tekil ve grup kazıkların elastik oturmaları ……..... 50
5.1. Zemin cinsine göre jet grout kolonların basınç dayanımları (Durgunoğlu, 2004)…… ... 55
5.2. Kazık malzemesi – δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki ……..... 57
5.3. Jet grout kolon taşıma gücü hesaplarında kullanılan zemin özellikleri……..... 58
5.4. Farklı boyutlarda tekil jet grout kolonların izin verilebilir taşıma kapasiteleri ..... 59
7.1. Yapı yüklerini karşılamak için seçilen kazık özellikleri .....74
7.2. Seçilen kazık gruplarının yapı yükleri altında meydana gelen oturma değerleri .....75
7.3. Farklı çap ve boylardaki tekil ve grup kazıkların elastik oturmaları .....75
7.4. Jet grout ile yapılan iyileştirme sonuçları .....76

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|---|---|
| $Q_u$ | Nihai kazık taşıma gücü |
| $Q_p$ | Kazık ucunun yük taşıma gücü |
| $Q_s$ | Kazık yüzeyi sürtünme direnci |
| $q_u$ | Nihai birim kazık taşıma gücü |
| $q_{all}$ | Emniyetli taşıma gücü |
| $A_p$ | Kazık ucunun alanı |
| $A_s$ | Kazık yanal yüzey alanı |
| B | Radye temel genişliği veya kazık çapı (D=B) |
| q' | Kazığın uç noktasındaki düşey efektif gerilim |
| ø | Taşıyıcı zemin tabakasının içsel sürtünme açısı |
| N | Kazık ucu seviyesinde ortalama standart penetrasyon sayısı |
| $N_c$, $N_q$, $N_\gamma$ | Şekil ve derinliğe bağlı taşıma gücü katsayıları |
| $L_b$ | Kazığın zemin içine gömülü kısmı |
| $C_u$ | Kazık uç seviyesi altındaki zeminin drenajsız kohezyonu |
| $K_o$ | Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı |
| $I_{rr}$ | Zemin için azaltılmış rijitlik indeksi |
| $E_s$ | Zeminin elastisite modülü |
| $\mu_s$, $\nu$ | Zemin ve yapısal eleman poisson oranları |
| $\tau$ | Zeminlerde kayma mukavemeti |
| $f_s$ | Herhangi bir z derinliğindeki birim sürtünme direnci |
| $\sigma'_v$ | Göz önüne alınan derinlikteki efektif düşey gerilme |
| p | Kazık çevresi |
| $\delta$ | Zemin-kazık sürtünme açısı |
| $\alpha$ | Ampirik adhezyon faktörüdür. |
| $L_g$, $B_g$ | Kazık grubu planının uzunluk ve genişliği |
| $n_1$, $n_2$ | $L_g$ ve $B_g$ boyunca kazık sayıları |
| $Q_{wp}$ | Çalışma yükü altında kazık ucunda taşınan yük |
| $Q_{ws}$ | Çalışma yükü altında kazık yüzeyinin sürtünmesi ile taşınan yük |
| $E_p$ | Kazık malzemesinin Young modülü |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $D_r$ | Rölatif sıkılık |
| $\Psi$ | Dilatasyon açısı |
| $\gamma_{unsat}$ | Zeminin kuru birim hacim ağırlığı |
| $\gamma_{su}$ | Suyun birim hacim ağırlığı |
| $\gamma_{sat}$ | Zeminin doygun birim hacim ağırlığı |
| $\gamma'$ | Zeminin efektif birim hacim ağırlığı |
| $V_p$, $V_s$ | Dalga hızları |
| EA | Kazık eksenel rijitliği |
| EI | Kazık eğilme rijitliği |
| $k_x$ | Zeminin yatay yöndeki permabilite katsayısı |
| $k_y$ | Zeminin düşey yöndeki permabilite katsayısı |
| $I_{wp}$ , $I_{ws}$ | Azaltma katsayıları |
| $\eta$ | Kazık grubu verimlilik oranı |
| $q_c$ | Koni uç direnci |
| $S_g$ | Kazıkların grup içerisindeki oturması |
| d | Kazık aks aralığı |
| $Q_d$ | Jet grout kolon taşıma gücü |
| $Q_f$ | Jet grout kolon sürtünme direnci |
| $W_k$ | Kazık ağırlığı |
| $N_{cor}$ | Kazık uç seviyesi altında ortalama SPT sayısı |
| $Ø_R$ | Örselenmiş kilin drenajlı sürtünme açısı |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| CPT | Koni Penetrasyon Deneyi |
| SPT | Standart Penetrasyon Deneyi |
| YASS | Yeraltı Su Seviyesi |
| FS | Güvenlik Sayısı |
| MC | Mohr - Coulomb |

# 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yapı sistemleri genel olarak üç bölümden oluşur. Bunlar; üst yapı, temel ve zemindir. Temel üstünde kalan kısımlar üst yapı ve zeminle üst yapı arasındaki kısım ise temel olarak tanımlanır. Temeller, zeminle doğrudan temas halinde olup üst yapıdan gelen yükleri ve bu yükün dağılımını, zeminin emniyetle taşıyabileceği şekle dönüştürerek aktaran sistemlerdir. Bu yüzden temeller, hem zeminden hem de üst yapıdan doğrudan etkilenirler. Bu yönleriyle temeller, yapı sistemlerinin en önemli kısmını oluştururlar. Temelleri genel olarak iki grupta incelemek mümkündür. Bunlar; derin temeller ve yüzeysel temellerdir. Üst yapı yüklerini zemin yüzeyinden daha derindeki tabakalara aktaran ve temel derinliğinin temel genişliğine oranı ($D_f/B>1$) şartını sağlayan temel sistemlerine **derin temeller** denir. En çok kullanılan derin temel çeşitleri, kazıklar, kesonlar ve ayak temellerdir (Çinicioğlu F., 2005).

Kazıklar, yüzeye yakın zemin tabakalarının, üst yapıdan gelen yükleri güvenle taşıyamadıkları veya üst yapıda hasara neden olacak aşırı oturmalara karşı koyamadığı durumlarda kullanılırlar. Kazıkların davranışı ve hesap yöntemleri diğer derin temelleri de kapsar. Derin temeller düşey ve yatay yönde yapıya etkiyen yükleri kısmen veya tamamen sağlam zemine aktarırlar. Yanal yüklenmiş kazıklı temellerin davranışı ile düşey olarak eksenel yüklenmiş kazıklı temellerin davranışları genel olarak birbirinden farklıdır. Zeminlerin davranışı doğrusal olmadığından kazıklarda büyük deformasyonlar oluşur.

Bu tez çalışması ile özellikleri ve profili verilen bir zeminde kazıkların ve jet grout kolonların taşıma gücü hesapları hem ampirik yöntemlerle hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapılarak karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kazık gruplarında analiz yapılırken; başlık olarak düzlemsel 13x13 m plak radye kullanılmıştır. Aynı zemin profilinde; kazıklı radye sistemine etkiyen farklı yükleme durumlarında farklı çap ve boylardaki kazık grupları için oturma analizleri yapılmıştır. Aynı yapı yükleri, temel ve zemin özellikleri kullanılarak, temel altına jet-grout ile iyileştirme yapılması durumu için de hesaplar yapılmıştır. Kazık sayısı ve kazık aralığı sabit tutularak yapılan analizler sonucunda, verilen zemin profili için en uygun kazık boyutunun belirlenmesine çalışılmıştır.

# 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

## 2.1. Kazıkların Kullanım Amaçları

Üst yapıdan gelen yüklerin zemine emniyetli bir şekilde aktarılması, temellerle mümkün olmaktadır. Bir temelin projesi yapılırken, zeminin özellikleri ve taşıma gücünün yanı sıra temelin yapacağı maksimum oturmanın belli sınır değerlerini aşmaması, farklı oturmaların sınırlandırılması, üst yapıya gelecek ek zorlamalar bakımından son derece önemlidir (Özkan, 2002).

Üst yapıdan temele aktarılan yüklerin aşırı yüksek olması durumunda, yüzeysel temeller gerekli oturma ve taşıma gücü şartlarını sağlayamazlar. Bu durumda; temel zemini çeşitli yöntemlerle iyileştirilir veya derin temel sistemlerinden birisi uygulanır. Günümüzde en yaygın kullanılan derin temel sistemi, kazıklı radye temellerdir. İyileştirme yöntemi olarak ise yaygın olarak jet grout yöntemi tercih edilmektedir.

Kazıkların esas görevi, yapının temeli tarafından zemine aktarılan yükleri taşıma gücü yüksek, sıkışabilirliği az olan zemin tabakalarına aktarmaktır. Bunun sonucunda oturmalar kontrol altına alınarak sınırlandırılmış olur. Kazıklar, üzerine gelen yüklerin bir kısmını kazık uç direnci ve bir kısmını da yüzey sürtünmesi ile karşılarlar. Kazık uç direnci ve yüzeysel sürtünmenin toplam taşıma gücü içindeki payları değişkendir. Bunun sebebi kazığın yerleştirildiği zemin tabakalarının geoteknik özellikleri, kazığın boyutları, narinlik ve uygulanan yüklerin büyüklüğüdür. Kazıkların uzunluğu zeminin kayma direncine, uygulanan yüke ve kazık boyutlarına bağlıdır.

Kazıklı temellerin kullanımı, yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma ölçütlerini sağlayamayacağı aşağıdaki durumlarda gerekli olmaktadır.

- Yüzeysel temellerin taşıma gücünün, üst yapıdan gelen yükler nedeniyle oluşan gerilmelerden küçük olması,
- Yapı altındaki zeminin sıkışabilirliğinin çok yüksek olması, yüzeysel temellerin kullanımı durumunda oluşacak oturmaların kabul edilemez seviyeye çıkması,

• Zeminin sıkışabilirliğinin ve üst yapı yükünün dağılımının farklılık göstermesi nedeniyle ayrık yüzeysel temellerde aşırı farklı oturmaların oluşması,

• Temel sisteminin deprem ve rüzgâr gibi yükler nedeniyle yatay yük etkisi alması,

## 2.2. Kazıkların Kullanım Yerleri

Kazıkların başlıca kullanım alanları:

**1.**Sağlam zemin tabakası yüzeye yakın değil ise

**2.** Temel zemininde oyulma ihtimali varsa

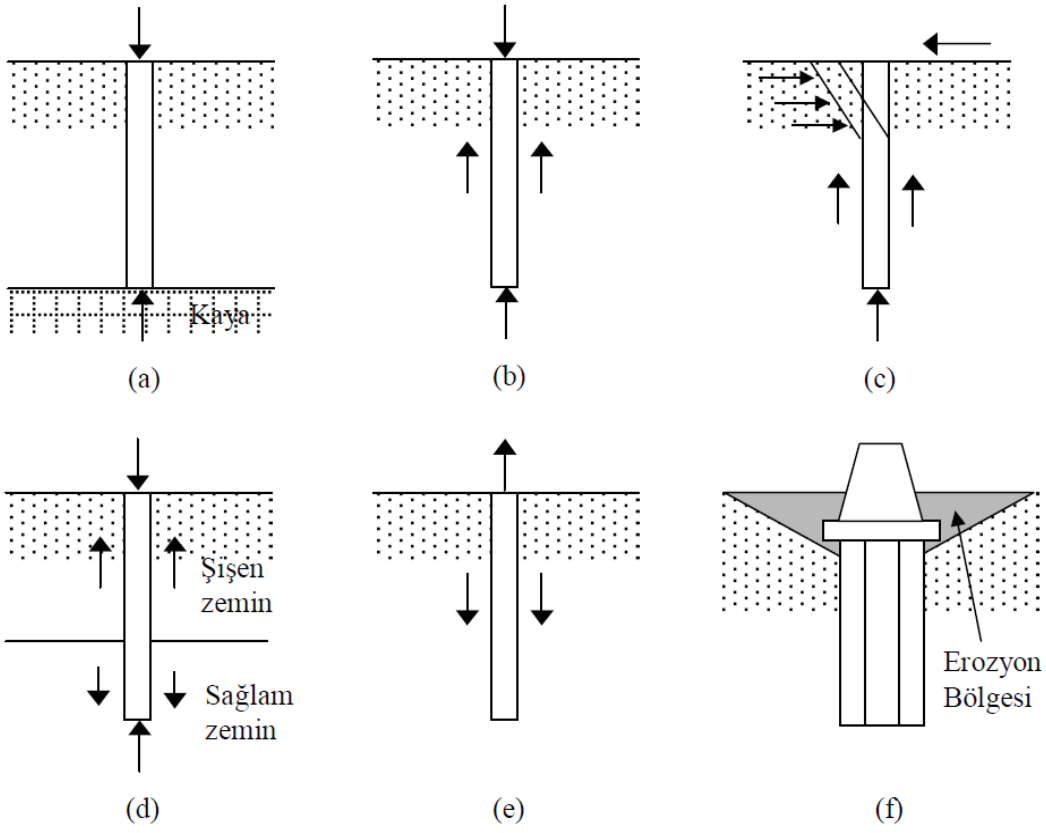
**3.** Temellere gelen yükler büyük yoğunlukta ise

**4.** Yapının farklı oturmalara karşı zayıflığı var ise

**5.** Şevlerin stabilitesinin sağlanmasında

**6.** Su içine inşa edilen su yapılarında

**7.** Su içerisinde yapılan palplanş perdelerde




Şekil 2.1. Kazıklı temellerin kullanım yerleri (Yıldırım, Aksöz, 2008)

Şekil 2.1 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere yüzeye yakın kısımda zayıf zemin tabakası ve altında uygun derinlikte kaya, sıkı kum çakıl v.s. gibi sağlam zemin tabakaları varsa, kazıklar bu tabaka içine soketlenirler. Bu durumda kazıklar üzerine gelen yükleri uç direnciyle taşırlar. Eğer sağlam zemin tabakası yüzeye yakın değilse kazık mukavemetinin bir kısmını yüzey sürtünmesinden bir kısmını da uç direncinden alır. Şekil 2.1(c)'de ise kazıkların düşey yüklerle birlikte yatay yükleri de taşıdıkları durumların olabileceği görülmektedir. Kazıklar ayrıca yüzeye yakın bölgelerde problemli zemin olarak tanımlanan şişen veya göçen zemin olması durumunda temel olarak kullanılabilir (Şekil 2.1.d). Yine toprak kaymalarını engellemek amacıyla da kullanılmaktadırlar (Şekil 1.e.f).

## 2.3. Kazıkların Sınıflandırılması

Kazıklı temeller üzerine gelen yükleri taşıma ve aktarma şekline, imal edildikleri malzeme cinsine, kullanılan teknolojiye göre sınıflandırmak mümkündür.

### 2.3.1. Yük taşıma ve aktarma şekillerine göre sınıflandırma

**a) <u>Uç kazığı</u>**: Kazık uçları sağlam ve az sıkışan bir zemine basıyorsa veya bu zemin içerisine soketlenmiş ise, üzerindeki yükü kazık ucu vasıtası ile zemine aktarır. Bu durumda kazığın nihai taşıma gücü kazığın yerleştirildiği zeminin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu tür uygulamaların büyük bir kısmında gerekli kazık uzunluğu oldukça gerçekçi olarak tespit edilebilir (Das, 1990). Çok uygulanan ve tercih edilen kazıklardır.

**b) <u>Sürtünme kazığı</u>**: Kazık ucu sağlam bir zemine basmıyor ise, bu durumda yükler zemine yüzey sürtünmesi ile aktarılır. Sağlam zemin makul bir derinlikte değilse kazık uzunluğu fazla olacağından ekonomik olmazlar. Bu tür zeminlerde kazıklar daha yumuşak ve gevşek zemin kütleleri içinde belirli ve yeterli derinliklere kadar yerleştirilir. Bu tür kazıklarda taşıma gücünün büyük bir bölümü zeminle kazık yan cidarları arasında oluşan kayma dirençleri ile karşılanır.

**c) <u>Ankraj kazıkları</u>:** Ankraj kazıkları özellikle kayma mukavemeti parametreleri zayıf olan boşluklu daneli zeminlerde üst yapıya etkiyen yatay yükleri, yanal toprak basıncı ve

kaldırma kuvveti itkilerini yüzeyleri boyunca oluşan kayma gerilmeleri ile derinlerdeki kaya formasyonlarına aktarırlar.

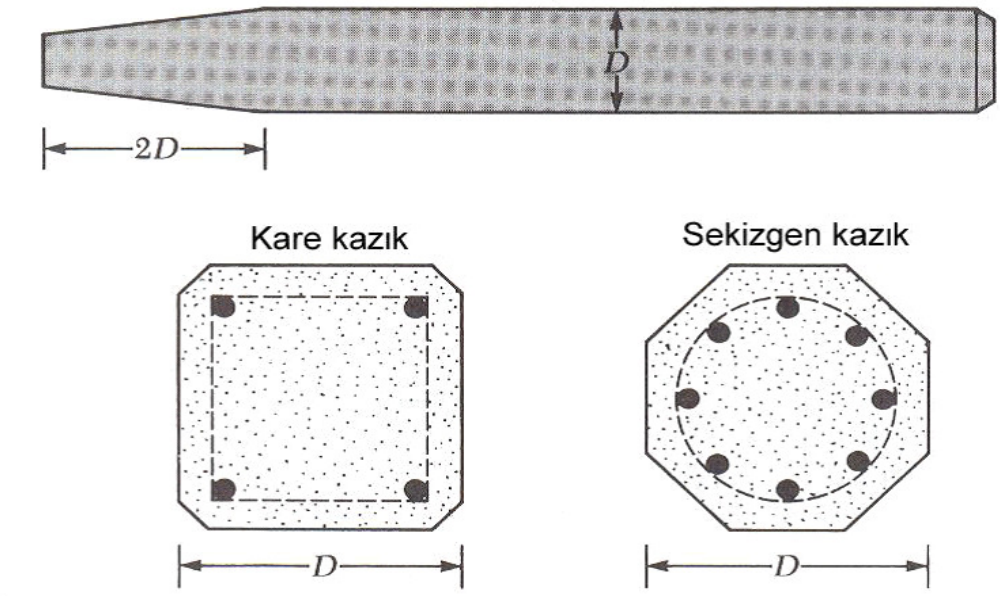
### 2.3.2. İmal edildikleri malzemeye göre sınıflandırma

Bu tür sınıflandırmada kazığın ana malzemesi esas oluşturur. Örneğin ahşap, beton, çelik ya da kompozit. En çok kullanılan kompozit kazık türü ahşap-beton, beton-çelik kazıklardır.

#### 2.3.2.1. Betonarme kazıklar

Betonarme kazıklar kendi aralarında, betonarme çakma kazıklar ve betonarme yerinde dökme (fore kazık) kazıklar olmak üzere ikiye ayrılırlar.

**a) Betonarme çakma kazıklar**: Fabrikada daha önceden dökülen kazıklar bir çakma platformuna konularak üzerine yük düşürmek suretiyle zemine çakılırlar. Genellikle sabit kesitli imal edilirler (Şekil 2.2).




Şekil 2.2. Donatılı prefabrike kazıklar

Geniş bir yük aralığında dizayn edilebilirler. Eğilmeye ve düşey yüklere karşı güçlendirilebilirler. İki kategoriye ayrılabilirler.

-Beton çeliği destekli (betonarme ) çakma kazıklar

- Öngermeli betonarme çakma kazıklar

Betonarme çakma kazıklar, aşırı yükleri yüzeye yakın bulunan taşıma gücü yüksek tabakaya aktarmak için oldukça uygundurlar.

**b) Yerinde dökme betonarme kazıklar (Fore kazıklar):** Bu kazıklar"sondaj kazığı'' olarak da adlandırılırlar. Foraj yöntemleri kullanarak veya içi boş bir borunun zemine çakılmasıyla önceden belirlenen çapta dairesel bir delik açılır ve bu deliğe donatı yerleştirilir. Daha sonra en alt seviyeden başlamak suretiyle deliğe tremi borusu veya pompa ile beton dökülür. Fore kazıklar, zeminde yanal bir ötelenme ve buna bağlı olarak bitişik zeminlerde sıkışma oluşturmazlar (Birand, 2001). Genellikle sağlam kil zeminlerdeki yapı temellerinde kullanılmaktadırlar .

### 2.3.2.2. Çelik kazıklar

Bu kazıklar çelik malzemesinden değişik kesitlerde imal edilirler. Yüksek dayanıma sahip olan bu kazıklar yangına karşı dayanıklı değillerdir. Uç kazığı olarak kullanılabilirler.

### 2.3.2.3. Ahşap kazıklar

Ahşap kazıklar en eski kazık tipi olarak bilinirler. Yeraltı su seviyesinin düşmesi sonucu kolayca tahrip olabilmektedirler. Bazı canlılardan ve dış etkenlerden zarar görmemesi için koruma tedbirleri alınmaktadır. Düşük taşıma gücüne sahiptirler.

### 2.3.2.4. Kompozit kazıklar

Kompozit kazıklar adından da anlaşıldığı üzere, birden çok malzeme kullanılarak imal edilen kazıklardır. Bu tip kazıkların genellikle alt kısımları ahşap, üst kısımları da beton veya çelik malzemesinden yapılır (Birand, 2001). Bu tür kazıklarda iki farklı malzemenin iyi bir birleşimi oldukça zor ve önemlidir. Bu yüzden kullanım alanları sınırlıdır.

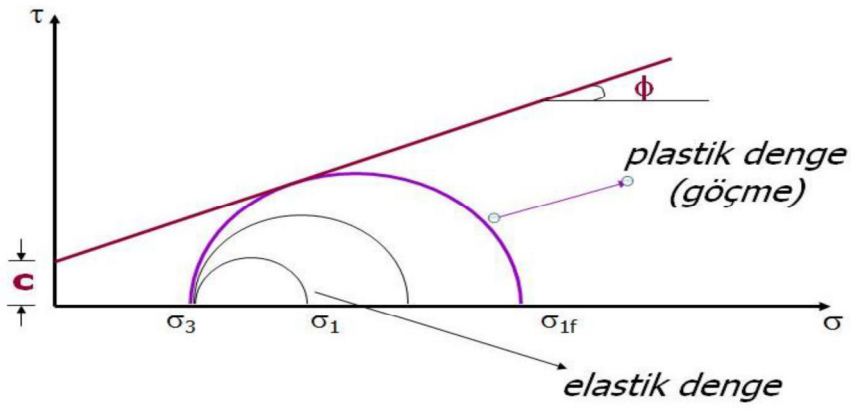
# 3. TEORİK BİLGİ

## 3.1. Zeminlerin Önemli Mukavemet Parametreleri ve Gerilmeler

Yapıdan zemine aktarılan yükler temel tabanı altındaki zemin kütlesi içerisinde dağılarak gerilmeler ve deformasyonlar oluştururlar. Böylece zemin bir miktar sıkışmış olur. Bu sıkışma ve deformasyonların büyüklüğü; aktarılan yüklerin büyüklüğüne, doğrultusuna, iletim biçimine ve zemininin özelliklerine bağlıdır. Zeminin kayma göçmesine karşı emniyetli taşıma gücü ($q_{all}$) için aşağıdaki iki değerden küçük olanı seçilir.

**1.** Kayma göçmesine göre emniyetli taşıma gücü ($q_u$/ FS)
**2.** Oturma kriterinin izin verdiği emniyetli taşıma gücü

Zeminin nihai taşıma gücü; taşıma göçmesi mekanizması ve bu göçme durumuna ulaştıran statik denge hesabı yapılarak bulunur. Tüm statik denge problemlerinde olduğu gibi, göçme mekanizmasına etki eden, kaymaya (göçmeye) karşı koyan kuvvetler (gerilmeler) ile kaydıran (göçüren) kuvvetler (gerilmeler) belirlenir. Bu kuvvetlerin karşılıklı tam dengesi göçmeyi gösterir. Yani göçmeyi başlatan güvenlik sayısı 1,0'dir. Şekil 3.1'de göçme zarfı ve göçme durumları gösterilmiştir. Göçmeye karşı koyan kuvvetleri ise zeminin kayma dayanımı oluşturur. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon zeminin önemli kayma dayanım parametreleridir (Çinicioğlu F., 2005).

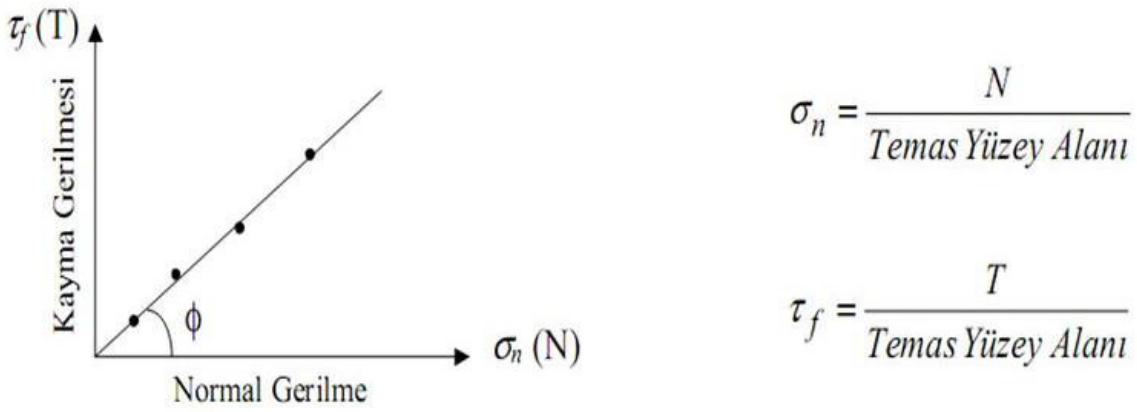



Şekil 3.1. Göçme durumu ve Mohr Daireleri

Kayma mukavemeti, zemin kütlesine uygulanabilen en yüksek kayma gerilmesidir. Göçme (kayma) düzlemi boyunca kayma göçmesine sebep olan kayma gerilmeleri o zeminin taşıyabileceği en yüksek kayma gerilmesi veya kayma mukavemetidir. Buna göre kayma mukavemeti sınır değerdir. Kayma mukavemeti, plastik denge durumuna karşı gelen değerdir, yani geri dönüşü yoktur ve göçme durumudur. Zeminlerde kayma mukavemeti ($\tau$); normal gerilme ($\sigma$), İçsel sürtünme açısı ($\phi$) ve kohezyon (c) parametrelerine bağlı olarak (Coulomb denklemi);

$$\tau = c + \sigma.\tan\phi \qquad (3.1)$$

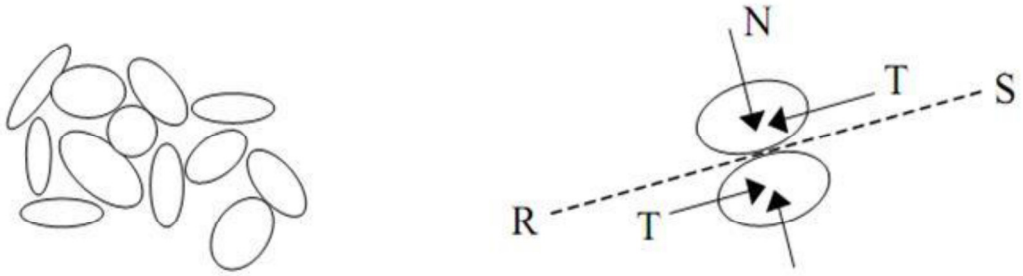
şeklinde tanımlanır. Zeminin sürtünme açısına bağlı olarak kayma mukavemeti değişimi Şekil 3.2'de verilmiştir (Çinicioğlu F., 2005)




Şekil 3.2. İçsel sürtünmeye bağlı kayma mukavemeti

**Elastisite modülü:** Esas olarak bir malzemeye uygulanan kuvvet ile bu kuvvet sonucu ortaya çıkan şekil değiştirme arasındaki bağıntıyı tanımlar. Diğer bir ifade ile gerilme-deformasyon eğrisinin eğimidir. Önemli bir parametre olmakla beraber tek başına fazla bir anlam taşımaz. Bir malzemenin sadece elastisite modülüne bakarak o malzeme hakkında fazla bir şey söylemek doğru olmaz. Malzemelerin elastisite modülü uygulanan yükün malzemede herhangi bir hasar meydana getirmediği durumlarda geçerlidir. Çünkü hasarlar malzemenin özelliklerinin bozulmasına neden olur. Hasardan kasıt malzemedeki çatlama, kırılma, akma vs. gibi durumlardır.

**İçsel sürtünme açısı**: kohezyona göre daha genel bir parametredir ve zeminlerin tüm davranışını kapsar, daha güvenilir ve daha büyük bir değerdir. Sürtünme, birbirleri ile temas halinde olan zemin danelerinin birbirine dayanmasından ve birbirine gerilme iletmesinden kaynaklanır (Şekil 3.3). Zemin üç fazlı bir ortamdan oluştuğundan, ortam bileşenlerinin birbirlerine göre oranları zemin davranışı üzerinde etkilidir ve belirleyicidir. Sürtünmeden kaynaklanan kayma direncinin değeri temas yüzeyine dik etki eden normal kuvvete (N) bağlıdır. T'nin sınır değeri N'ye bağlı olarak artar. Kayma düzlemi üzerinde göçme anında etkili olan kayma gerilmesi kayma mukavemetidir (Çinicioğlu, 2005).




Şekil 3.3. Daneler arası gerilme aktarımı

**Görünen Kohezyon (c) :**Silt ve killerde dane yapısı ve daneleri çevreleyen elektriksel negatif yüke su moleküllerinin tutunması ve daneler arasında bir ara yüzey oluşturarak daneleri birbirine yapıştırması sebebiyle ortaya çıkan ilave bir kayma direnci parametresi vardır. Bu direnç klasik zemin mekaniğinde kohezyon, günümüz terminolojisinde görünen kohezyon olarak adlandırılır. Normal gerilme etkisi sıfır olsa bile silt ve killer gibi kohezyonlu zeminlerde bir miktar kayma mukavemeti kohezyon sebebiyle bulunur. Kohezyonun değeri temiz kum ve çakıllarda sıfırdır, silt ve killerde su muhtevası ve plastisiteye bağlı olarak değişir (Çinicioğlu, 2005).

**Poisson oranı:** Bir malzemede bir yöndeki kısalmanın, diğer yöndeki uzamaya oranı olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle iki yönde meydana gelen birim deformasyonların oranıdır. Bu parametre zeminlerin ve kayaların suya doygunluk derecelerinin belirlenmesinde önemlidir. Arazide yapılan jeofizik deneyler sonucunda bulunan $V_p$ ve $V_s$ dalga hızları kullanılarak belirlenebilir. Bu oran 0,5 değerini geçemez. Bu değere yaklaştıkça zemin veya kayacın suya doygunluk dereceleri artar.

**Su muhtevası:** Zemin içerisindeki su kütlesinin, zeminin kuru kütlesine oranıdır.
**Plastisite İndisi**: Likit limit ile plastik limit arasındaki farktır. Zeminin kıvamı hakkında fikir verir.

### 3.2. Tekil Kazıkların Düşey Statik Yükler Altındaki Davranışı ve Tasarımı

Kazıklar genellikle gruplar halinde kullanılır. Çoğu durumda, tek bir kazığın davranışı, kazık grubunun davranışından farklıdır. Bu nedenle tasarım yükü tek bir kazığa göre belirlenir. Tasarım yükü kesme zorlamasına veya oturma kriterine ve şu iki değerden küçük olanına bağlı olarak belirlenir.

**a)** En kritik yükün bir güvenlik faktörü ile azaltılması ile bulunan değer.
**b)** İzin verilen oturma miktarını gerçekleştiren yük.

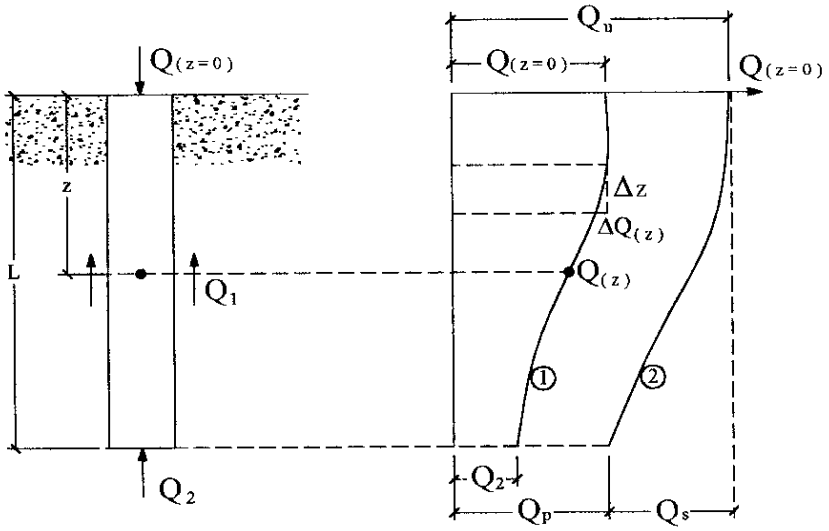
Kazıkların taşıma kapasitesini kazık ve zemin etkileşimi açısından belirleyen önemli iki etken vardır. Bunlardan birincisi; kazıkların etrafını saran zeminlerin taşıma kapasitesi, ikincisi de kazığın imal edildiği malzemenin dayanımıdır. Bu iki özelliğe bağlı olarak kazık ve zemin malzemeleri ayrı ayrı değerlendirilir. Kazığa uygulanan yükün yaratacağı gerilmenin kazığın imal edildiği malzemenin dayanımını geçmemesine dikkat edilir. Zemin dayanımı yönünden bir kazığın taşıma kapasitesi, teorik veya ampirik formüllerle hesaplanabilir. Çakma kazıklarda ise kazığı çakmak için harcanan enerjiye göre taşıma gücünü hesaplayan formüller bulunmaktadır. İlaveten kazıkların taşıma gücü değerleri, kazık yükleme deneyleri ile de belirlenebilir (Birand A.A., Ekim 2001).

Kazıklarda toplam nihai taşıma gücü ($Q_u$), kazık uç yükü ($Q_p$) ve kazık sürtünme direncinin ($Q_s$) toplamından oluşur. Kazık ağırlığı diğer terimlere göre küçük olduğundan hesaplarda genellikle ihmal edilir. Kazıkların taşıma kapasitesi hesaplarında en çok zeminin kayma dayanımına bağlı olan ampirik formüller kullanılır.

Kazık taşıma gücü hesaplarında çeşitli yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bunlar, zemin dayanımına bağlı statik analizler, arazi deneylerinden elde edilen bağıntılara bağlı olarak ampirik çözümler, dinamik yöntemlere bağlı çözümler ve kazık yükleme deneyleridir (Prakash ve Sharma, 1990).

### 3.2.1. Düşey yüklü kazıkların zemine yük aktarması

Düşey olarak yüklenmiş bir kazığın zemine yük aktarma sistemi oldukça karışıktır. Bu durum aşağıda Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Yük aktarma sistemi, kazığa gelen toplam yükün ne kadarının yüzey sürtünme direnciyle ve ne kadarının da uç direnciyle taşınacağını gösterir. Kazığa etkiyen toplam $Q_{(z)}$ yükü, kazık çevresinde oluşan yüzey sürtünmesi $Q_1$ ve kazık ucunda oluşan uç direnci $Q_2$ ile paylaşılmaktadır. Bu paylaşım oranları Şekil 3.4 (b)'de gösterilmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren derinlik arttıkça $Q_2$ yavaş yavaş azalacaktır. Bunun nedeni, derinliğin artmasıyla kazık üzerine gelen yükün sürtünme direnci tarafından zemine aktarılan kısmının artmasıdır.




(a) ( b)

Şekil 3.4. Kazık toplam yükünün uç ve sürtünme dirençleri arasındaki paylaşımı

Kazığa etkiyen düşey yük nihai taşıma gücü (göçme yükü) $Q_u$ değerine ulaştığında, hem sürtünme direnci hem de uç yükü maksimum değere ulaşmış olacaktır. Bunun sonucunda kazığın uç bölgesindeki zonlarda çatlaklar oluşacaktır. Kazığa gelecek olan yüklerin çok büyük olması durumunda ise zeminde kayma yüzeyleri oluşur ve kazık zemine gömülecektir.

### 3.2.2. Uç kazıklarının davranışı

Uç kazıkları, üzerlerine gelen yükü sağlam zemin tabakasına kazık ucu vasıtası ile basınç yoluyla aktarırlar. Kazıkta fazla bir oturma olmadığından sürtünme direnci de az olur. Bu da ihmal edilebilecek kadar küçük bir değerdir.

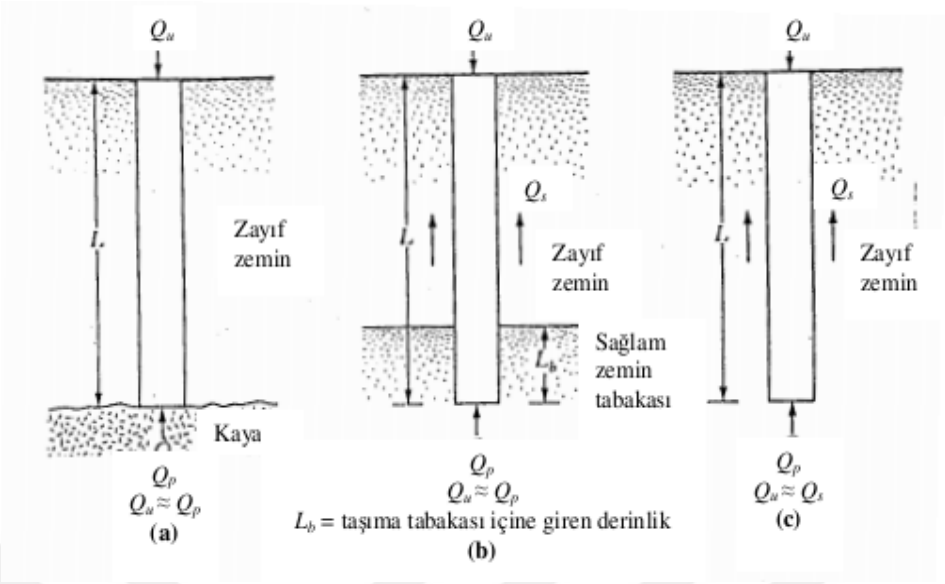
Sağlam zemin veya ana kayanın yüzeye yakın olması durumunda uç kazıklardan oluşan bir temel sistemi kullanılır. Uç mukavemetli kazıklar çok uygulanan ve tercih edilen kazıklardır. Bu tür kazıklar yüzeye yakın olan taşıma gücü yüksek tabakaya oturtulabilir veya soketlenebilir. Uç kazıkları, üzerlerine gelen yüke ve yükü taşıyan sağlam tabakanın taşıma gücüne bağlı olarak iki türde yapılmaktadırlar. Bunlar;

• **Ayaklı:** Bu yöntemde zemin tabakasının taşıma gücünün düşük olmasından dolayı kazık ucuna bir ayak inşa edilerek kazık uç alanı büyütülür. Böylelikle uç taşıma direnci alan büyüdüğünden dolayı ayaksız kazıklara göre daha yüksek seviyede gerçekleşmiş olur.

• **Ayaksız**: Bu yöntemde ise taşıyıcı zemin tabakasının taşıma gücü yüksek olduğundan dolayı kazık ucuna bir ayak inşa edilmesine gerek yoktur.

### 3.2.3. Sürtünme kazıklarının davranışı

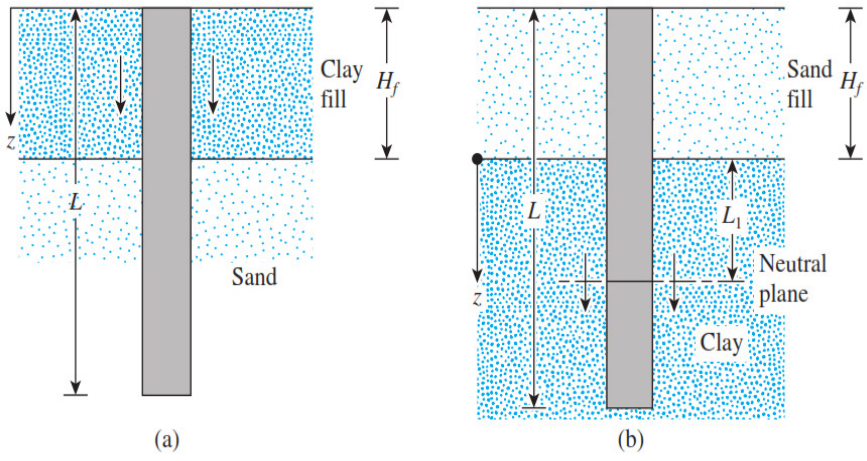
Sürtünme kazıkları üst yapıdan gelen yükleri sürtünme yoluyla zemine aktarırlar. Sağlam zemin fazla derinlerde ise uç kazıklarının yapımı ekonomik olmaz ve bu durumda sürtünme kazığı uygulanır. Zemin içerisindeki kazıklar, üzerine gelen yüklerden dolayı bir miktar otururlar. Bu oturma sonucunda, kazık yüzeyi ile zemin arasında oluşan sürtünmeden dolayı kazığı çevreleyen zemin de oturur. Fakat kazık zemine göre daha fazla oturacaktır. Kazık ile zemin arasındaki sürtünmeden dolayı kazığın çevresinde yukarıya doğru sürtünme direnci meydana gelecektir. Bu dirence ‘’**çevre sürtünme direnci**’’ denir. Uç ve sürtünme kazıkları Şekil 3.5’de gösterilmiştir.




Şekil 3.5. (a) ve (b) Uç taşıma kazıkları (c) Sürtünme kazığı

### 3.2.4. Pozitif ve negatif çevre sürtünmesi

Kazığın zemin içerisinde hareket etmesiyle kazık yüzeyinde sürtünme oluşacağı gibi, zeminin kazığa göre hareketi de sürtünme oluşturur. Kazık, çevresindeki zeminden daha fazla otururşa meydana gelen sürtünme, yükün taşınmasına yardım edici yönde olur. Buna **'pozitif çevre sürtünmesi'**denir. Kazık ve zemin arasındaki göreli bir hareket, kazık yüzeyi ile zemin arasında gerilmelere neden olur. Kazığın hareketi aşağı yönde ise (yani kazık yüzündeki kayma gerilmeleri yukarı yönde ise) kaymanın yönü pozitiftir. Benzer şekilde eğer kazığın göreli hareketi yukarı yönde ise, kayma gerilmelerinin yönü negatiftir.




Şekil 3.6. Negatif çevre direncinin meydana geldiği zemin durumları

Negatif çevre sürtünmesi, kazığın etrafını çevreleyen zeminin, kazıktan daha hızlı oturması ile **aşağıya doğru oluşan çekme kuvvetidir**. Aşağıda verilen durumlarda meydana gelir.

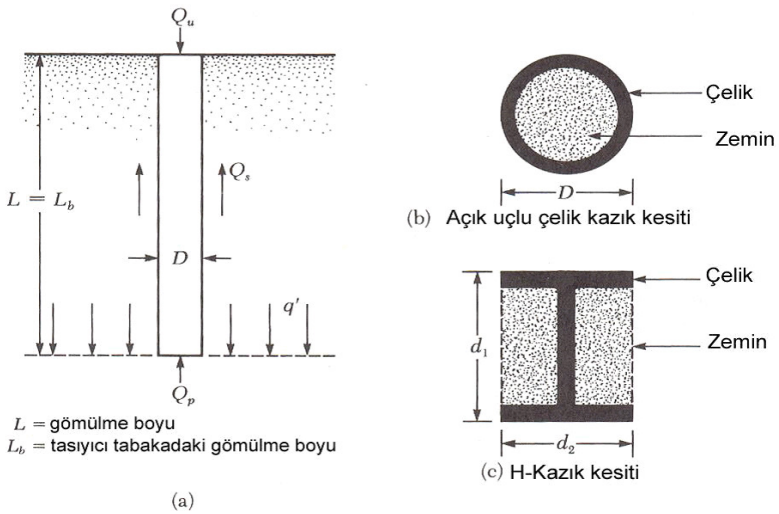
**1)**Eğer kil dolgu kazığın çakıldığı kum zemin üzerine inşa edilirse; zaman içinde kil dolguda meydana gelecek olan konsolidasyon oturması kazığı aşağıya doğru çekecek bir kuvvetin oluşmasına neden olur (Şekil 3.6. a)

**2)**Yumuşak kil tabakası üzerine granüler dolgu yapılırsa, kil tabakasında meydana gelecek konsolidasyon sonucu kazık aşağıya doğru çekilecektir (Şekil 3.6. b)

**3)**Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi efektif gerilmede artışa sebep olacağından kil zeminde konsolidasyon oturması meydana gelir. Bu durum kil içerisine yerleştirilen kazıkta negatif çekme kuvveti meydana getirir.

### 3.2.5. Tekil kazıkların uç taşıma gücü

Kazıklarda toplam nihai taşıma gücü ($Q_u$), kazık uç yükü ($Q_p$) ile sürtünme direncinin ($Q_s$) toplamından oluşur. Hesaplarda genellikle kazık ağırlığı ihmal edilir. Kazıkların taşıma gücünün bulunmasına yönelik sayısız araştırma ve yöntem bulunmaktadır. Fore kazıkların taşıma gücü hesaplarında genellikle statik formüller kullanılmaktadır. Bu formüller Şekil 3.7 (a)'da verilen kazık taşıma gücüne ait yük bileşenleri ve düşey yükler altında kazıkta yük aktarılışı dikkate alınarak aşağıda verilen bağıntılar şeklinde kullanılabilirler.




Şekil 3.7. Kazıkların nihai yük taşıma gücüne ait yük bileşenleri

Kazıkların uç taşıma yükü ($Q_p$) ile yüzeysel temellerin taşıma gücünün oluşum mekanizmaları arasında çok büyük benzerlikler bulunmaktadır. Kazık ucunda oluşan göçme mekanizması yüzeysel temellerin tabanında oluşan ile hemen hemen aynıdır. Bu nedenle kazık uç mukavemetinin hesaplanması için yüzeysel temellere ait taşıma gücü formülleri kullanılır. Tekil kazığın birim uç direnci, ($q_p$) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$q_p = c.N_c + q.N_q + \gamma.D.N_\gamma \qquad (3.2)$$

Burada son terim diğerlerine göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Kohezyon katsayısı (c) yerine, suya doygun killerde drenajsız kayma mukavemeti ($c_u$) kullanılabilir.

$$\text{q}'\text{=Düşey efektif gerilme=}\gamma'.L = \left(\gamma_{doygun} - \gamma_{su}\right).L \qquad (3.3)$$

Nc, Nq , Nγ = Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı, gerekli şekil ve derinlik faktörlerini içeren taşıma gücü katsayılarıdır ve ilgili çizelgelerden elde edilirler. Buna göre bir kazığın uç kapasitesi;

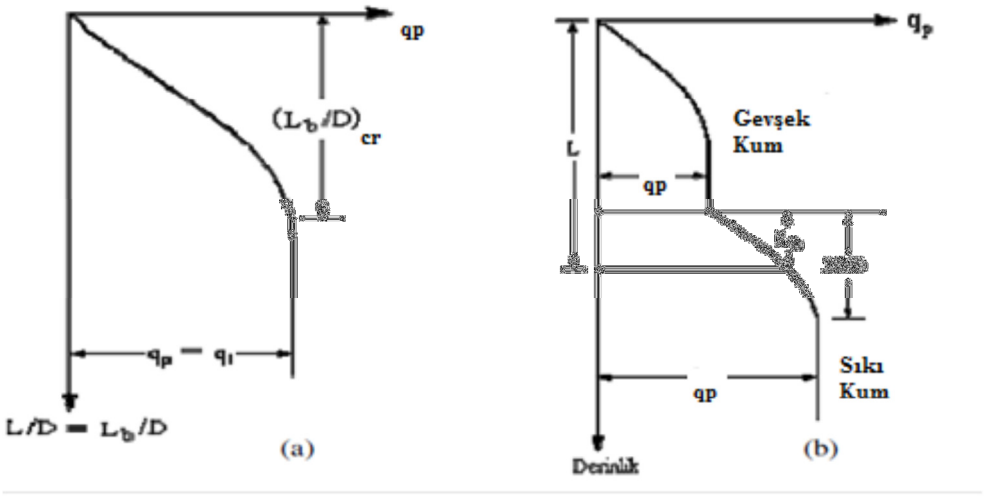
$$Qp = A_p.q_p = A_P.\left(c.N_c + q'.N_q\right) \qquad (3.4)$$

$A_p$ = Kazığın uç alanı
γ = Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m³),
B =Taban genişliği, dairesel kazıklarda B = D, kazık çapı (m),
L = Kazık derinliği (m),

### 3.2.5.1. <u>Meyerhof yöntemi</u>

**a) Kum zeminlerde ($Q_p$) kazık uç direncinin belirlenmesi:**

Şekil 3.8 (a)'da, Meyerhof tarafından efektif gerilmenin kritik derinliğe (L′=15D) kadar arttığı ve bu derinlikten sonra sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 3.8 (b)'de kazığın sağlam zemine gömülme derinliği $L_b$ olarak tanımlanmakta, heterojen olmayan zeminlerde bu derinlik tüm kazık boyunca alınır.




Şekil 3.8. Meyerhof'a göre kum zeminde uç direncinin derinlikle değişimi (a) homojen kumda (b) tabakalı kumda

$Q_p$ sınır değeri, $A_p.q_l$ değerini geçemez. Dolayısıyla kum zeminde kazık uç direnci;

$$Q_p = A_p.q'.N_q \leq A_p.q_1 \quad ve \quad q_1(kN/m^2) = 50.N_q.tan\emptyset \tag{3.5}$$

Zeminin tabakalı olması durumunda kritik derinliğin sağlam tabakanın üst yüzeyinden itibaren alınması ve üstte kalan tabakaların sürşarj olarak değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır. Meyerhof (1976),homojen zeminde taşıma gücünün standart penetrasyon direnci değerine bağlı olarak da bulunabileceğini ifade etmiştir.

$$q_p\ (kN/m^2) = 40.N_{cor}.L/D \leq 400.N_{cor} \tag{3.6}$$

Gevşek kum tabakası altında bulunan sıkı kum tabakasına oturan kazıklarda uç taşıma gücü aşağıda verilen eşitlikten bulunabilir.

$$q_p = q_{l(l)} + \left[\left(q_{l(d)} - q_{l(l)}\right)L_b/10D)\right] \leq q_{l(d)} \tag{3.7}$$

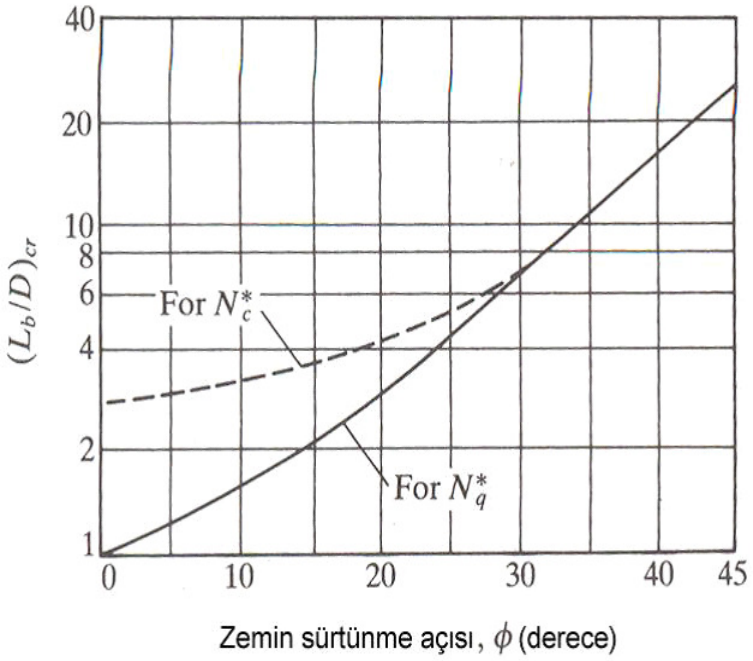
Bu eşitlikte ql(l) yukarıda verilen Eşitlik 3.4'den gevşek kum için $N_q$ ve Ø'nin maksimum değerleri kullanılarak hesaplanan limit uç direnci. Aynı şekilde ql(d) sıkı kum için $N_q$ ve ø'nin en büyük değerleri kullanılarak hesaplanan limit uç direncidir. $L_b$ kazığın sağlam zemine giren boyudur.

**b) Kil zeminde Ø=0 için $N_c$=9 olduğundan kazığın uç direnci:**

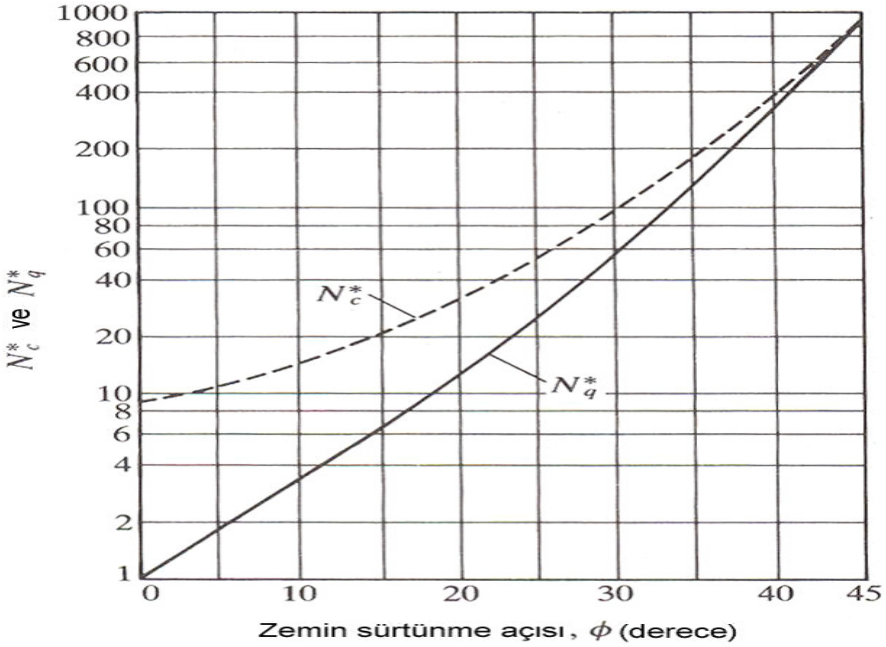
$$Q_p=A_p.\ c_u.N_c=A_p.9.c_u \qquad (3.8)$$

Burada $c_u$ kazık ucu seviyesi altında zeminin drenajsız kayma direnci, $N_c$ kazık boyu büyüdükçe artar ve $D_f/d \geq 4$ durumunda 9 değerini alır. Kazık temellerde kazık boyu kazık çapının 4 katından büyük olduğundan genelde $N_c$=9 değeri kullanılır (Skempton, 1951).

Kritik gömülme oranının $(L_b/D)_{cr}$, içsel sürtünme açısıyla değişimi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Meyerhof (1976)'ya göre, taşıma gücü faktörleri $L_b/D$ oranı arttıkça artar ve $L_b/D = 0.5(L_b/D)_{cr}$ durumunda maksimum değerine ulaşır. Çoğu durumda kazıklar için $L_b/D$ büyüklüğü $0.5(L_b/D)_{cr}$ oranından büyük olur bu yüzden $N_c$ ve $N_q$' nun maksimum değerleri bütün kazıklar için $q_p$ değerinin bulunması için kullanılır. $N_c$ ve $N_q$' nun maksimum değerlerinin içsel sürtünme açısıyla, değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.




Şekil 3.9. ( $L_b/D$ )$_{cr}$ değerinin zemin içsel sürtünme açısı ile değişimi (Meyerhof, 1976)




Şekil 3.10. $N_c$ ve $N_q$ taşıma gücü katsayılarının maksimum değerlerinin zeminin sürtünme açısına bağlı olarak değişimi (Meyerhof, 1976)

Hesap yapılırken zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olarak 'Kritik Gömülme Oranı' Şekil 3.9 kullanılarak kritik $L_b$ derinliği bulunur. $L_b/D>0.5(L_b/D)_{cr}$ olmalıdır. Buradan $L_b$ saptanır ve efektif gerilme $L_b.\gamma'$ bulunur.

### 3.2.5.2. <u>Hansen yöntemi</u>

Bu yöntemde yüzeysel temeller için kullanılan genel taşıma gücü eşitliği, şekil faktörlerinin dikkate alınmasıyla aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$Q_p=A_p.( c.N_c.d_c+\eta.q.N'_q.d_q+0,5.\gamma'.D.N_\gamma) \qquad (3.9)$$

Bu yöntem için şekil ve derinlik faktörleri aşağıdaki eşitliklerden, taşıma gücü faktörleri ise Çizelge 3.1'den bulunabilir. Yukarıdaki eşitlikte bulunan $\eta$ değeri ise 1'e eşittir (Bowles, 1996).

Çizelge 3.1. Hansen yöntemi için taşıma kapasitesi faktörleri

| **Ø** | **$N_c$** | **$N_q$** | **$N_{\gamma(Hansen)}$** | **$N_q/N_c$** | **$2\tan Ø(1-\sin Ø)^2$** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 5,14 | 1,0 | 0,0 | 0,195 | 0,000 |
| 5 | 6,49 | 1,6 | 0,1 | 0,242 | 0,146 |
| 10 | 8,34 | 2,5 | 0,4 | 0,296 | 0,241 |
| 15 | 10,97 | 3,9 | 1,2 | 0,359 | 0,294 |
| 20 | 14,83 | 6,4 | 2,9 | 0,431 | 0,315 |
| 25 | 20,71 | 10,7 | 6,8 | 0,514 | 0,311 |
| 26 | 22,25 | 11,8 | 7,9 | 0,533 | 0,308 |
| 28 | 25,79 | 14,7 | 10,9 | 0,570 | 0,299 |
| 30 | 30,13 | 18,4 | 15,1 | 0,610 | 0,289 |
| 32 | 35,47 | 23,2 | 20,8 | 0,653 | 0,276 |
| 34 | 42,14 | 29,4 | 28,7 | 0,698 | 0,262 |
| 36 | 50,55 | 37,7 | 40,0 | 0,746 | 0,247 |
| 38 | 61,31 | 48,9 | 56,1 | 0,797 | 0,231 |
| 40 | 75,25 | 64,1 | 79,4 | 0,852 | 0,214 |
| 45 | 133,73 | 134,7 | 200,5 | 1,007 | 0,172 |
| 50 | 266,50 | 318,5 | 567,4 | 1,195 | 0,131 |

L/B ≤1 durumunda, L/B terimi radyan olmak üzere;

$$d_q = 1 + 2 \tan ø \, (1 - \sin ø)^2 \, .L/B \qquad (3.10)$$

$$d_c = 1 + 0{,}4. \, L/B \qquad (3.11)$$

L/B ≥1 durumunda, L/B terimi radyan olmak üzere;

$$d_q = 1 + 2 \tan ø (1 - \sin ø)^2 \tan^{-1} L/B \qquad (3.12)$$

$$d_c = 1 + 0{,}4. \tan^{-1} L/B \qquad (3.13)$$

### 3.2.5.3. Vesic yöntemi

Vesic (1977), kazıkların uç taşıma direncini boşluk genişleme teorisi kullanarak hesaplamıştır. Bunun için efektif gerilmeye bağlı eşitlikler önermiştir.

$$Q_p=A_p.q_{p=}\ A_p\ (\ c.N_c+\sigma'_0.N_\sigma) \qquad (3.14)$$

$\sigma'_o$: kazık ucundaki efektif gerilme

$$\sigma'_0=[(1+2K_0)/3].q' \qquad (3.15)$$

$$q'=\gamma'_1.L_1+\gamma'_2.L_2+ \ldots \qquad (3.16)$$

$N_c$, $N_\sigma$: dayanma kapasitesi faktörleridir ve aşağıdaki şekilde bulunurlar veya çizelge 3.2 den alınırlar. Ko: sükûnetteki toprak basıncı, Ko=1-sinØ

$$N_c=(N_q-1)\cot Ø \qquad (3.17)$$

$$N_\sigma=3.N_q/(1+2K_0) \qquad (3.18)$$

Çizelge 3.2. Vesic taşıma kapasitesi denklemleri için taşıma kapasitesi faktörleri

| Ø | $I_{rr}$=10 | 50 | 100 | 200 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| **0** | $N_q$=1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | $N_c$=6,97 | 9,12 | 10,04 | 10,97 | 12,19 |
| **5** | 1,79 | 2,12 | 2,28 | 2,46 | 2,71 |
| | 8,99 | 12,82 | 14,69 | 16,69 | 19,59 |
| **10** | 3,04 | 4,17 | 4,78 | 5,48 | 6,57 |
| | 11,55 | 17,99 | 21,46 | 25,43 | 31,59 |
| **20** | 7,85 | 13,57 | 17,17 | 21,73 | 29,67 |
| | 18,83 | 34,53 | 44,43 | 56,97 | 78,77 |
| **30** | 18,34 | 37,49 | 51,03 | 69,42 | 104,32 |
| | 30,04 | 63,20 | 86,64 | 118,53 | 178,97 |
| **35** | 27,36 | 59,82 | 83,77 | 117,35 | 183,17 |
| | 37,64 | 84,00 | 118,21 | 166,15 | 260,14 |
| **40** | 40,47 | 93,70 | 134,52 | 193,13 | 311,50 |
| | 47,04 | 110,47 | 159,12 | 228,97 | 370,03 |
| **45** | 59,66 | 145,11 | 212,79 | 312,04 | 517,60 |
| | 53,66 | 144,11 | 211,79 | 311,04 | 516,60 |

### 3.2.5.4. Terzaghi yöntemi

Terzaghi, tekil kazıkların uç mukavemetini yüzeysel temellerin taşıma gücüne benzer bir yaklaşımla şekil faktörlerini de gözönüne alarak aşağıda verilen eşitlikle hesaplamıştır. Buna göre tekil kazığın uç mukavemeti;

$$Q_P=A_p(c.N_c.s_c+q.N_q+0,5.\gamma.D.N_\gamma.s_\gamma) \qquad (3.21)$$

Eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan şekil ve taşıma gücü faktörleri sırasıyla Çizelge 3.3 ve 3.4'de sunulmaktadır. Taşıma gücü eşitliğindeki D değerinin küçük olmasından dolayı son terim ihmal edilebilir. Taşıma gücü eşitliği efektif gerilmeler cinsinden de ifade edilebilir

Çizelge 3.3. Terzaghi (1947) temel şekil faktörleri

| **Temel Şekli** | **$S_c$** | **$S_y$** |
|---|---|---|
| Şerit Temel | 1.0 | 1.0 |
| Dairesel Temel | 1.3 | 0.6 |
| Kare Temel | 1.3 | 0.8 |

Çizelge 3.4. Terzaghi taşıma gücü katsayıları

| **Zeminin içsel sürtünme açısı( Ø)** | **$N_c$** | **$N_q$** | **$N_\gamma$** |
|---|---|---|---|
| 0 | 5,7 | 1,0 | 0,0 |
| 5 | 7,3 | 1,6 | 0,5 |
| 10 | 9,6 | 2,7 | 1,2 |
| 15 | 12,9 | 4,4 | 2,5 |
| 20 | 17,7 | 7,4 | 5,0 |
| 25 | 25,1 | 12,7 | 9,7 |
| 30 | 37,2 | 22,5 | 19,7 |
| 34 | 52,6 | 36,5 | 35,0 |
| 35 | 57,8 | 41,4 | 42,4 |
| 40 | 95,7 | 81,3 | 100,4 |
| 45 | 172,3 | 173,3 | 297,5 |
| 48 | 258,3 | 287,9 | 780,1 |
| 50 | 347,5 | 415,1 | 1153,2 |

### 3.2.6.Tekil kazıklarda sürtünme direnci

Yüzey sürtünme kapasitesi, kazık yüzeyiyle zemin arasındaki sürtünmeden dolayı taşınan yükü ifade eder. Bu kapasite sürtünmeye bağlı olduğu için, zemin cinsine göre farklılık arz eder. Bundan dolayı değişik zeminlerde değişik yöntemler kullanılır.

### 3.2.6.1. Kohezyonlu zeminlerde sürtünme direnci

Kohezyonlu zeminde sürtünme direnciaşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Q_s = \sum p.\Delta L.f_s \qquad (3.22)$$

p: kazık çevresi ($p=\pi.D$)

$\Delta L$ = p ve $f_s$ nin sabit kaldığı artımsal kazık boyu

$f_s$ = herhangi bir z derinliğindeki birim çevre sürtünmesi

Kil zeminlerde ise kazıkların çevre sürtünmesinin belirlenmesi, kumlu zeminlere göre daha karmaşıktır. Kil zeminlerde sürtünme kapasitesi üç farklı yöntemle hesaplanabilir. Bunlar:

-α yöntemi

- λ yöntemi

-β yöntemi

Kullanılan bu yöntemler aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

**λ Yöntemi**

Kazık inşası sırasında zeminde oluşacak yanal yer değiştirme, pasif yanal toprak basıncına sebeb olur. İlk olarak bu yöntem Vijayvergia ve Focht (1972) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde killerin konsolidasyon durumları göz önüne alınmaz. Kazık ile zemin arasında meydana gelen birim sürtünme direnci aşağıda verilen eşitlik ile bulunabilir.

$$f_s = \lambda(\sigma'_v + 2c_u) \qquad (3.23)$$

Burada;

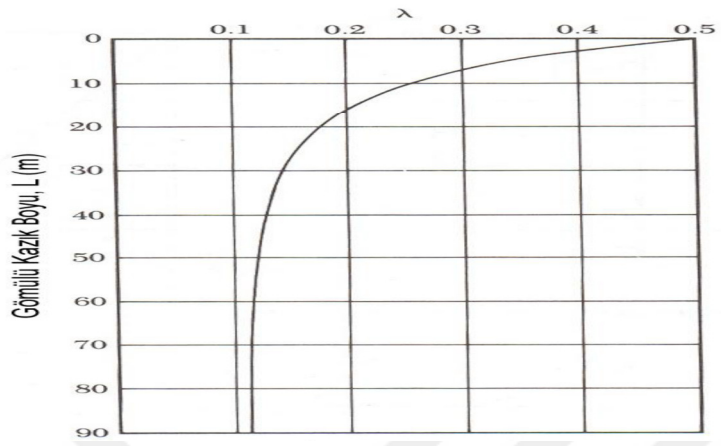
$\sigma_{v'(ort)}$=kazık boyunca ortalama efektif gerilme

$c_u$= zeminin ortalama drenajsız kohezyon direnci

λ=derinliğe bağlı katsayısıdır. Bu katsayısın değişimi Şekil 3.11'da sunulmuştur.

Birim sürtünme direnci hesaplandıktan sonra, kazığın sürtünmeile taşıyacağı yük, bu değerin kazık yüzey alanı ile çarpılması ile hesaplanabilir.

$$Q_s = p.L.f_s \qquad (3.24)$$

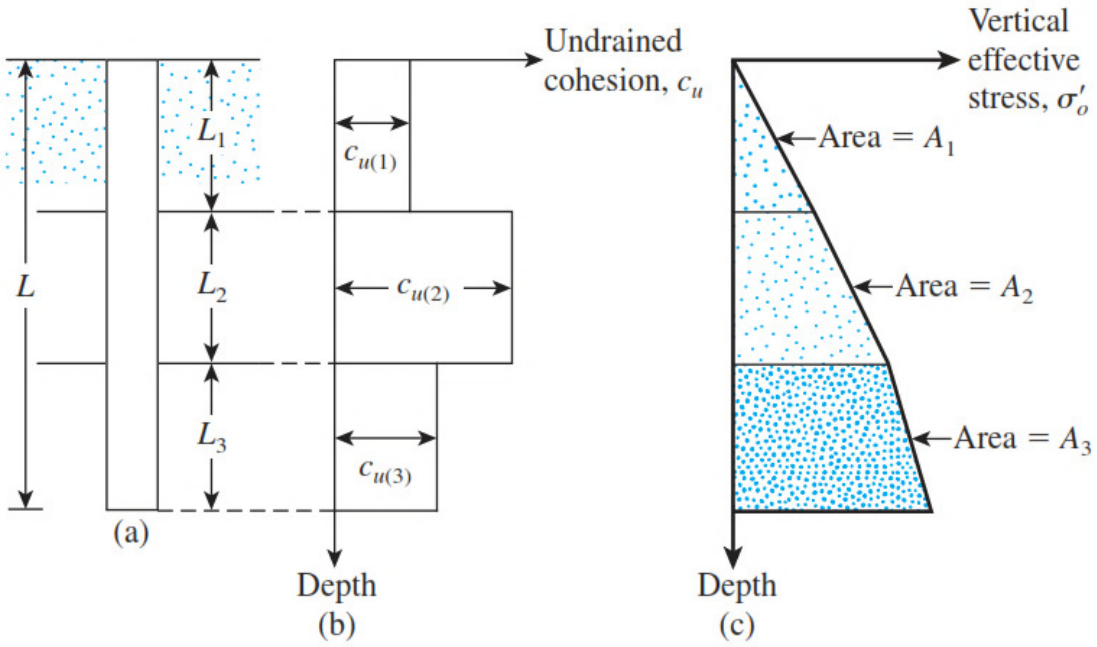



Şekil 3.11. λ katsayısının gömülü kazık boyuyla değişimi (Mc Clelland, 1974)

Tabakalı zemin olması durumunda, ortalama kohezyon ve efektif gerilme değerlerinin hesaplanması gerekir. Buna göre kazık boyunca ortalama drenajsız kohezyon direnci veefektif gerilme aşağıda verilen şekliyle hesaplanmalıdır (Şekil 3.12).

$$c_u = c_{u1}.L_1 + c_{u2}.L_2 + \ldots)/L \quad \sigma'_v = (A_1 + A_2 + \ldots)/L \qquad (3.25)$$

burada $A_1$, $A_2$, $A_3$,…= efektif gerilme diyagramlarının alanlarıdır.




Şekil 3.12. λ yönteminin tabakalı zeminlerde uygulanışı

**α Yöntemi**

Bu yöntemde ise birim sürtünme direnci f drenajsız kohezyon direncine bağlı olarak hesaplanır. Kohezyon direncine karşılık gelen α değeri tablodan okunabilir.

$$f = \alpha.cu \tag{3.26}$$

Buna bağlı olarak, kazığın yüzey sürtünme kapasitesi ise aşağıda verilen eşitlikten bulunur:

$$Q_s = \sum p.L.f = \sum \alpha.c_u.p.L \tag{3.27}$$

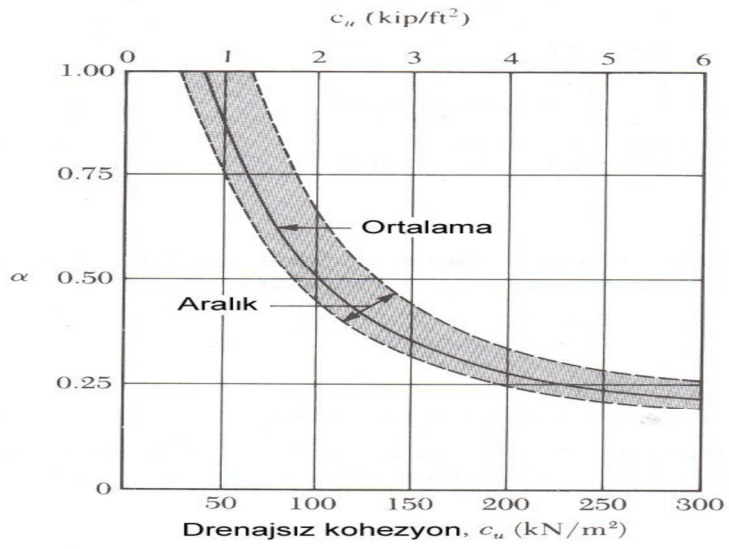
Tabakalı zemin durumunda;

$$Q_s = \sum p.L.f = p(\alpha_1.c_{u1}.L_1 + \alpha_2.c_{u2}.L_2 + \ldots) \tag{3.28}$$

$\alpha$ katsayısı kohezyon direncinin $90 > c_u > 25$ (kN/m²) sınırları içinde kalan değerleri için aşağıdaki eşitlik ile de bulunabilir.

$$\alpha = 1 - 0{,}00615(c_u - 25) \tag{3.30}$$

Drenajsız kohezyon direncinin 90 kN/m² büyük olması durumunda ise $\alpha$değerleri Şekil 3.13'den bulunabilir.




Şekil 3.13. Kil zeminde α katsayısının drenajsız kohezyon ile değişimi

**β Yöntemi**

Suya doygun kil zeminlerde kazık inşası sırasında zeminiçindeki boşluk suyu basıncı yükselecektir. Ancak inşa tamamlandıktan sonra boşluk suyu basınçları sönümlenir. Bundan dolayı birim sürtünme direnci efektif gerilmeler cinsinden hesaplanabilir. Bu yöntem kazıkların uzun dönemli taşıma gücünü hesaplamak için uygundur.

$$f_s=\beta.\sigma'_v \qquad \beta=K.\tan\emptyset_R \qquad (3.31)$$

$\emptyset_R$: zeminin kalıntı içsel sürtünme açısı

K: yanal toprak basıncı katsayısı

Normal konsolide killer için: $K=1-\sin\emptyset_R$

Aşırı konsolide killer için: $K=(1-\sin\emptyset_R)(A.K.O)^{1/2}$ (A.K.O:Aşırı Kons. Oranı)

Kazık boyunca oluşacak sürtünme kapasitesi ise aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$Q_s=\sum p.L.f_s \qquad (3.32)$$

### 3.2.6.2. Kum zeminde sürtünme direnci

Kum gibi kohezyonsuz zeminlerde sürtünme direnci aşağıda verilen eşitlik ile bulunabilir.

$$f_s=K.\sigma'_v.\tan\delta \qquad (3.33)$$

Burada δ zemin ile kazık arasındaki sürtünme açısı olup, Çizelge 3.5'den hesaplanabilir.

Çizelge 3.5. Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açıları (δ)

| Kazık ile Zemin Temas Durumu | Kazık-Zemin Sürtünme Açısı (δ) |
|---|---|
| Pürüzsüz ve Kaplanmış Çelik-Kum | 0.5Ø'-0.7Ø' |
| Kaba (Ondüleli) Çelik-Kum | 0.7Ø'-0.9Ø' |
| Önceden Dökülmüş Beton-Kum | 0.8Ø'-1.0Ø' |
| Yerinde Dökülmüş Beton-Kum | 1.0Ø' |
| Ahşap-Kum | 0.8Ø'-0.9Ø' |
| Zemin İçinde Boru Bırakılan Kazıklar | 0.7Ø'-0.85Ø' |

Kum zeminde yüzey sürtünmesi ile taşınacak toplam yük ise, bulunan birim sürtünme direnci ile kazık yüzey alanı çarpılarak hesaplanabilir.Yanal toprak basıncı değerleri ise derinlikle değişmektedir. Bundan dolayı zemin yüzeyinde pasif basınç oluşurken, kazık uç bölgesinde ise sükûnetteki toprak basıncı oluşmaktadır. Kazık türüne bağlı olarak yanal toprak basıncı katsayısı aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

Fore kazıklar için: $K = K_0 = 1 - sin\emptyset$

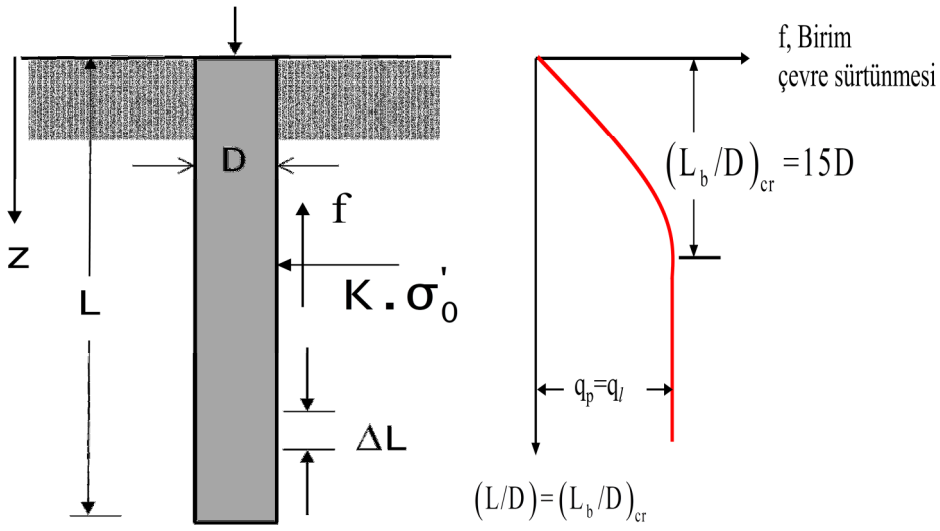
Düşük deplasmanlı çakma kazıklarda : $K = K_0\ (alt\ limit)$ $\quad K = 1{,}4.K_0\ (üst\ limit)$

Yüksek deplasmanlı çakma azıklarda: $K = K_0 (alt\ limit)$ $\quad K = 1{,}8.K_0\ (üst\ limit)$

Ancak zemin-kazık arasındaki sürtünme açısını(δ) deneysel yöntemlerle bulmak daha iyi sonuçlar verecektir. Bu amaçla kesme kutusu deneyi kullanılmaktadır. Kum türü kohezyonsuz zeminlerde birim sürtünme direncinin derinliğe bağlı değişimi Şekil 3.14'de sunulmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi birim sürtünme direnci belirli bir derinliğe kadar artarken, bu derinlikten sonra değişmediği kabul edilmektedir. Bundan dolayı birim sürtünme direnci iki kısımda hesaplanmalıdır.

(0~15D) arasında:$\sigma'_v=\gamma'.7{,}5.D$ $\quad f=K.(\gamma'.7{,}5.D)\tan\delta$ $\quad (3.34)$

(15D~L) arasında:$\sigma'_v=\gamma'.15.D$ $\quad f=K.(\gamma'.15.D)\tan\delta$ $\quad (3.35)$




Şekil 3.14. Kum zeminlerde sürtünme direncinin derinliğe bağlı değişimi

### 3.3. Arazi Deneylerinden Elde Edilen Bağıntılar

Statik analizlere göre yapılan hesapların tahkikinde özellikle arazi deney sonuçlarının kullanılması en çok başvurulan yöntemdir. Günümüz uygulamalarında sonuçları üzerinde en çok ampirik bağıntı geliştirilen ve taşıma gücü hesaplarında en fazla kullanılan arazi deneyleri; Standart Penetrasyon Deneyi ve Koni Penetrasyon Deneyi ve olarak bilinen deneylerdir. Fakat bu yöntem kazık taşıma gücünü hesaplamak için güvenli olmadığından, mutlaka diğer yöntemlerle desteklenmesi gerekir (Yalçın, 2010).

#### 3.3.1. Standart penetrasyon deneyi ( SPT )

Zeminin mukavemet yoğunluğunu değerlendirmek ve numune almak amacıyla yerinde yapılan bir dinamik kesme deneyidir. Meyerhof (1976) çalışmasına göre çakma ve sondaj kazıkları için birim uç mukavemeti değerleri Çizelge 3.6'da önerilen değerlerden tayin edilebilir (Das, 1990). Kazıkların kohezyonsuz zeminlerde birim sürtünme mukavemet değerleri ise Çizelge 3.7'de önerilmektedir.

Çizelge 3.6. Çakma ve sondaj kazıkların birim uç mukavemeti değerleri (Meyerhof, 1976)

| Kazık Cinsi | Zemin Cinsi | qp([kN/m2] | Düşünceler |
|---|---|---|---|
| Çakma Kazıklar | Kumlar | 40.N.L/D | ≤400N |
| | Siltler | 30.N.L/D | ≤300N |
| Sondaj Kazıkları | Kumlar | 12.N.L/D | ≤120N |
| | Siltler | 10.N.L/D | ≤100N |

N: Kazık ucu seviyesinden 3B yukarıda ve 8B aşağıda ortalama düzeltilmiş SPT-N değerleridir)

L: Kohezyonsuz zemindeki kazık ankastre boyu olup, kazığın zemine tamamen gömülü olduğu durumlarda L= $D_f$ olur.

Çizelge 3.7. Kohezyonsuz zeminlerde birim çevre sürtünmesi değerleri (Meyerhof, 1979)

| Kazık Türü | $f_s$ [kN/m$^2$] | Düşünceler |
|---|---|---|
| Zemine fazla yer değiştirten çakma kazıklar | 2.N | ≤100 [kN/m2] |
| Zemine az yer değiştirten çakma kazıklar | N | |
| Zemine yer değiştirtmeyen sondaj kazıklar | 0,6.N | ≤40 [kN/m2] |

### 3.3.2. Koni penetrasyon deneyi (CPT)

Zeminin kayma direncinin derinlikle değişiminin arazide etüd edilmesi bakımından CPT deneyi ve özellikle Hollanda (Dutch) sondası yaygın olarak kullanılan bir itmeli sonda (statik penetrasyon) deneyidir. Deneyin ana ilkesi bir kılıf (muhafaza borusu) içindeki konik ucun statik bir kuvvet uygulanarak muhafaza borusundan bağımsız bir şekilde zemine sokulması ve böylelikle bu uca karşı zeminin gösterdiği direncin yani koni uç direncinin ölçülmesi ya da konik ucun muhafaza borusuyla birlikte zemine sokularak toplam direncin ölçülmesi esasına dayanır (ASTM D. 1586,1989).

$$Q_p=A_p.q_c \qquad (3.36)$$

Bu bağıntıda $q_c$ koni penetrasyon deney verisi olan uç direncidir. Üniform kumlu zeminlerde kazık taşıma gücünü uç direnci belirler. Bu tür zeminlerde koni uç direnci direkt olarak kazık uç direnci olarak hesaplarda kullanılabilir. Bu konuda ilk kapsamlı araştırmayı Meyerhof (1956) itmeli sonda ile yapmıştır (Toğrol, 1970).

**DutchMetodu ;**

$$Q_p=q_c.A_p \qquad (3.37)$$

$$q_c=(q_{c1}+q_{c2})/2 \qquad (3.38)$$

qc1: 0.7D – 0.4D arasındaki derinlikteki ortalama uç direnci

qc2: Kazık uç bölgesi üzerindeki 8D yükseklikteki ortalama uç direnci

Kazık çevre sürtünmesi taşıma hesabında iki farklı yöntem vardır. Bu yöntemlerde kullanılan $S_1$ ve $S_2$ katsayıları kazık tipine göre Çizelge 3.8'den alınır.

Kazık çevre sürtünmesi taşıması kazık çevre sürtünmesi direncine bağlı olması durumu,

$$Q_s = \sum q_s.\pi.D.L = S_1 \sum f_s.\pi.D.L \quad (3.39)$$

$q_s$= Birim sürtünme direnci

Kazık çevre sürtünmesi taşıması kazık uç direncine bağlı olması yöntemine göre,

$$Q_s = \sum q_s.\pi.D.L = S_2 \sum q_c.\pi.D.L \quad (3.40)$$

Çizelge 3.8. Kazık tipine bağlı sürtünme direnci katsayıları ($S_1$,$S_2$)

| **Kazık Tipi** | **$S_1$** | **Kazık Tipi** | **$S_2$** |
|---|---|---|---|
| Ahşap kazık | 1,2 | Ahşap kazık | 0,012 |
| Paralel kenarlı beton, çelik düz uçlu | 0,6 | Betonarme çakma kazık | 0,012 |
| Paralel kenarlı beton, çelik sivri uçlu | 1,1 | Geniş tabanlı betonarme çakma kazık | 0,018 |
| Yerinde çakma kazık | 1,6 | Çelik deplasman kazığı | 0,012 |
| Açık uçlu çelik boru, H kazık | 0,7 | Açık uçlu çelik boru | 0,008 |

## 3.4. Tekil Kazıklarda Oturma

Kazıkların oturma analizlerinde kazığın etrafını saran zeminde oluşan gerilme dağılımı ve kazığın zemine aktardığı yükün uç ve gövde dirençleri arasındaki dağılımları bilinmediğinden , oturma karmaşık bir konu olmuştur.

### 3.4.1. Kohezyonsuz zeminlerde tekil kazığın oturması

Elastik oturma için kullanılan yarı ampirik yöntemde kazıkların elastik oturması üç sebepten meydana gelir. Dolayısıyla toplam oturma (S) da, bu üç sebepten meydana gelen oturmaların toplamına eşittir:

$S=S_1+S_2+S_3$

$S_1$: kazık malzemesinin şaft boyunca elastik kısalması

$S_2$: kazık ucunda aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma

$S_3$: kazık boyunca sürtünmeyle aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma

**$S_1$' in hesaplanması:**

Kazık malzemesi elastik kabul edilirse, şaft boyunca kazığın elastik kısalması 3.41 Eşitliği ile hesaplanır:

$$S_1=[(Q_p+\xi.Q_s).L]/(A_p.E_p) \qquad (3.41)$$

$Q_p$: çalışma yükü altında kazık ucunda taşınan yük

$Q_s$: çalışma yükü altında şaft boyunca taşınan yük

$E_p$: kazık malzemesinin elastisite modülü

$\xi$: birim çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımına bağlı bir katsayı (üniform ve parabolik sürtünme direnci dağılımları için $\xi$=0,5, üçgen dağılımlar için $\xi$=0,67)

**$S_2$' nin hesaplanması:**

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma, yüzeysel temellerin oturma denklemlerine benzer denklemlerle hesaplanır:

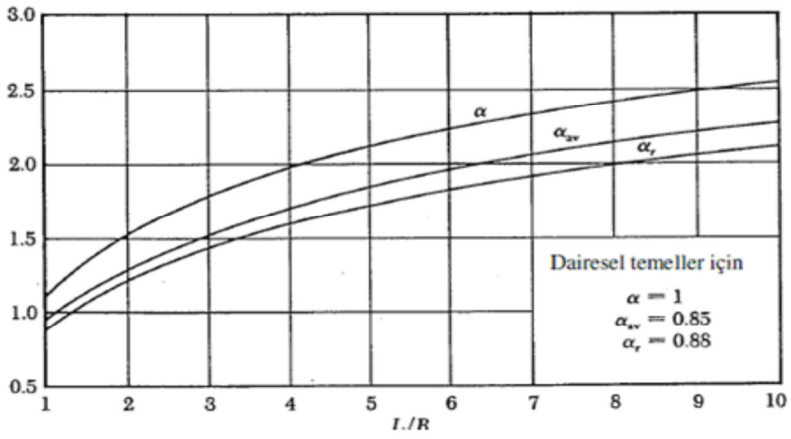
$$S_2=[(q_p.D)(1-\mu_s^2).I_{wp})]/E_s \qquad (3.42)$$

$q_p$: kazık ucundaki gerilme ($q_p$=Qp/Ap)

$E_s$: kazık ucunun çevresindeki zeminin elastisite modülü

$\mu_s$: zeminin Poisson oranı

$I_{wp}$: etki faktörü (L/B oranına bağlı olarak Şekil 3.15'den $I_{wp}=\alpha r$ değeri alınabilir).




Şekil 3.15. $I_{wp}$ etki faktörünün (L/B) oranına bağlı değişimi

**S3'ün hesaplanması:**
Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma, $I_{ws}$ etki faktörü olmak üzere Eşitlik 3.43 ile hesaplanabilir.

$$S_3=[(Q_s.D)(1-\mu_s^2).I_{ws})]/(P.L.E \quad (3.43)$$

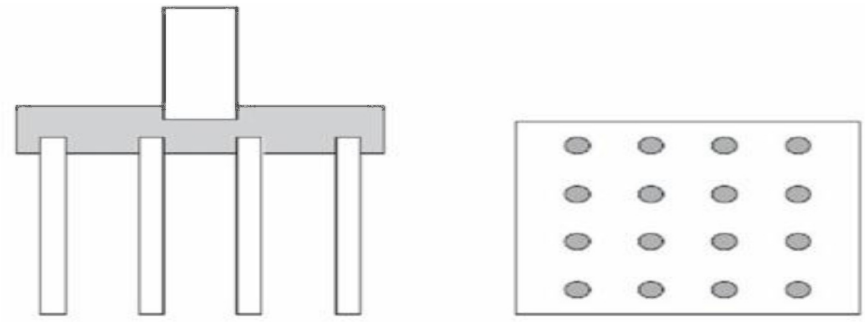
$$I_{ws}=2+0,35.\sqrt{L/D} \quad (3.44)$$

### 3.4.2. Kohezyonlu zeminlerde tekil kazığın oturması

Kohezyonlu zeminlerde bu iş çok komplekstir.

## 3.5. Kazık Gruplarının Düşey Statik Yükler Altındaki Davranışı ve Tasarımı

Kazıklı temeller genellikle grup halinde, temel seviyesinde bir başlık kirişi veya radye ile birleştirilmek suretiyle inşa edilirler. Üst yapıdan gelen yükler kazık başlığına nakledilir. Kazık başlığı da kazık grubuyla birlikte tek bir sistem oluşturarak kazıkların hepsini kapsamına alır (Şekil 3.16). Daha sonra hesaplar, oluşan bu sistem esaslarına göre yapılır.



Şekil 3.16. Tipik bir kazık grubunun plan ve kesiti (Rajapakse, 2008)

Kazık gruplarının taşıma gücü ve oturma analizleri için birçok yaklaşık yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerde üst yapıdan gelen yükler; kazık yerleşim planına, kazık kesit alanlarına ve kazıkların eğimlerine göre bütün kazıklara paylaştırılır. Bu yaklaşımlar yanal zemin direncini, kazık rijitliğini, kazık başının ankastre veya serbest oluşunu, yapısal

esnekliği ve zemin kazık etkileşimini göz önüne almazlar. Bu durum yük dağılımını önemli ölçüde etkiler. Sonuçta hatalı ve yetersiz kazık tasarımı yapılmasına neden olur.

Düşey yük altında çalışan kazık grubunda, kazıkların destek aldıkları zemin bölgelerinin çakışması ve kazık etkileşimi nedeniyle taşıma gücü, grupdaki kazıkların tekil taşıma güçleri toplamından daha azdır. Diğer taraftan kazık gruplarında tek kazıklara göre daha büyük oturmalar gözlenmektedir. Bunun nedeni ise, kazık grubunun altındaki zeminde oluşan gerilme etki bölgesinin daha geniş ve derin bir alana yayılmasıdır.

Kazık gruplarında kazıklar arasındaki mesafenin minimum 3D maksimum 7D kadar olması durumunda kazıkların grup olarak değerlendirilmesi gerekir. Minimum 3D kadar olmasının sebebi, kazıkların imalatını kolaylaştırmak ve kazıkların olumsuz etkisini azaltmaktır. Uygulama kolaylığı ve ekonomik olması bakımından optimum kazık aralığının 3D ile 3.5D aralığında olması önerilmektedir (Vesic, 1977). Kazıkların uç bölgelerinde birbirlerine yakınlaşması sonucu bu bölgelerde aşırı gerilme artışı olduğu gözlenmektedir. Bu durumdaki kazıklarda özellikle killi zeminlerde aşırı miktarda oturma olduğu gözlenir. Bu nedenle kazıklar arasındaki mesafenin en az kazık çapının 3 katı kadar olması gerektiği öngörülür (Tomlinson, 2004). Kazıkların tekil veya grup olarak kullanılma kriterleri aşağıda Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Kazık kullanım kriterleri.

| **Kazık Yerleşimi** | **Kazık Davranışı** |
|---|---|
| 3D---7D arası | GRUP |
| 7D den büyük | BİREYSEL |

### 3.5.1. Kazık gruplarının taşıma gücü

Kazık gruplarının yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi oldukça karışıktır. Kazıklar arasında yeterli mesafe varsa, kazık grup kapasitesi tek tek kazıkların kapasitelerinin toplamına eşittir. Diğer taraftan kazıklar arasında yeterli mesafe yoksa kazık grup kapasitesi, kazıkların oluşturduğu sistem tek bir temelmiş gibi zemine yük naklettiği ve temel zemininin bu gerilmeleri karşıladığı varsayılarak hesap yapılır.

Kazık grubunun taşıma gücü, kazıkların grup halinde davranışları düşünülerek hesaplanır. Zira grup içindeki bir kazık ve çevre zemin, diğer kazıklardan iletilen gerilmelerin etki alanı içinde kalabilir. Bu problemin çözümü için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan biri sürtünme kazıklarında grup etkisini hesaplamak için kullanılan ampirik veya yarı ampirik formüllerdir. Bu formüller kazıklar arası etkileşim nedeni ile grup içindeki kazıkların taşıma güçlerinde meydana gelen azalmayı saptamak amacı ile geliştirilmişlerdir. η sayısı ile gösterilen grup verimi, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplanması ile bulunan değerle çarpılarak grup taşıma gücü bulunur (Afacan, 2007).

Üst yapıdan gelen yükler belirli bir güvenlikle kazıklara dolayısıyla zemine aktarılır. Bu gerilmelerin ve kazık grubunun modellenmesinde öncelikle kazık grubunu oluşturan her kazığa düşen yük bulunur, maksimum yük kazığın servis yüküne uygunluğu gösterilir. Bir sonraki adımda kazık başlığı boyutlandırılır ve kazık grubunun stabilitesi tahkik edilir ve en son oturmalar müsaade edilen değerler arasında olup, olmadığı kontrol edilir.

**Kum zeminlerdeki sürtünme kazıklarında;**

Zemin içindeki yerleşimlerine göre kazıklar iki şekilde davranabilirler: $L_g.B_g.L$ boyutlarında bir blok gibi çalışabilirler. Blok gibi çalışmaları durumunda, $f_{ort}$ ortalama birim sürtünme direnci olmak üzere sürtünme direnci şöyle hesaplanabilir:

$$Q_{g(s)} = f_{ort}.p_g.\ L \qquad (3.45)$$

$$p_g = L_g.B_g \text{bloğunun çevresi} = 2.(n_1+n_2-2).d+4.D \qquad (3.46)$$

$L_g, B_g$ = kazık grubu planının uzunluk ve genişliği

$n_1$: $L_g$ boyunca kazık sayısı

$n_2$: $B_g$ boyunca kazık sayısı

Bireysel olarak çalışmaları durumunda p tekil kazığın kesit çevresi olmak üzere;

$$Q_s \approx f_{ort}.p.\ L \qquad (3.47)$$

Bu durumda grup verimlilik oranı (η) şöyle hesaplanır:

$$\eta=[2.(n_1+n_2-2).d+4.D]/[p.n_1.n_2] \quad (3.48)$$

$$Q_{g(u)} =\eta.\sum Q_u \quad (3.49)$$

Kazık merkezleri arasındaki mesafe çok fazla ise η>1 çıkabilir. Bu durumda kazıklar bireysel çalışır. Bu tür uygulamalarda toplam grup taşıma gücü:

$\eta\geq 1$ ise $Q_{g(u)}=\sum Q_u$ (3.50)

$\eta<1$ ise $Q_{g(u)} =\eta.\sum Q_u$ (3.51)

şeklinde hesaplanabilir.

**Kohezyonlu zeminlerde ;**

Kazıkların bireysel davrandıkları varsayılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla maksimum taşıma kapasitesi hesaplanır:

$$\sum Q_u = n_1.n_2.(Q_p+Q_s) \quad (3.52)$$

Kazıkların blok halinde davrandıkları varsayılarak maksimum dayanma kapasitesi şöyle belirlenir:

$$\sum Q_u = (L_g.B_g).c_u.N_c+\sum \alpha.2.(L_g.B_g).c_u.\ L \quad (3.53)$$

Hesaplanan $\Sigma Q_u$ değerinden küçük olan $Q_{g(u)}$ olarak alınır.

### 3.5.2. Kazık gruplarında verimlilik

Grup etkisinin bireysel etkiye oranı (η), kazık grubunun verimliliği olarak tanımlanır.

$$\eta=Q_{g(u)}/(n_1.n_2.Q_u) \quad (3.54)$$

### 3.5.2.1. Converse –Labarreverimlilik formülü

Bu formülde sadece kazık-kazık etkileşimi dikkate alınmış olup, zemin özellikleri dikkate alınmamıştır.

$$\eta=1-\{[(n_1-1)n_2+(n_2-1)n_1]\theta/(90.n_1.n_2)\} \qquad (3.55)$$

$\theta$ = arctg (D/d), (derece) ve d = kazık aralığı

Grup verimlilik oranı;

1-Zemin parametrelerine,

2- Kazık grubunun şekil ve boyut özelliklerine,

3- Kazık boyuna,

4- Kazık yerleşimine bağlıdır.

### 3.5.2.2. Blok yaklaşımı (Terzaghi ve Peck) yöntemi

Terzaghi ve Peck (1967) kazıklı bir temelin aynen bir " blok derin temel" gibi davranacağı varsayımından hareketle bir hesap yöntemi geliştirmişlerdir. Temelin hangi kazık aralığında blok temel davranışından tekil kazık davranışına geçeceğinin tespitinin zor olması nedeniyle, tekil kazığın göçmesi ile blok temelin göçmesi durumlarını ayrı ayrı gözönüne alan bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yöntem zemin özelliklerini de hesaba katar ve aşağıdaki kabuller ile açıklanabilir:

• Kazık başlığı rijittir.

• Kazık grubu içindeki zemin, kazıklarla beraber bir blok olarak davranır.

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

$$Q_{g(u)}=P_g.L.c_u.+A.q_u-A.L.\gamma \qquad (3.56)$$

A= Kazık grubunun plan görünümündeki alanı

$c_u$ = Kazık bloğunu çevreleyen zeminin ortalama kayma mukavemeti

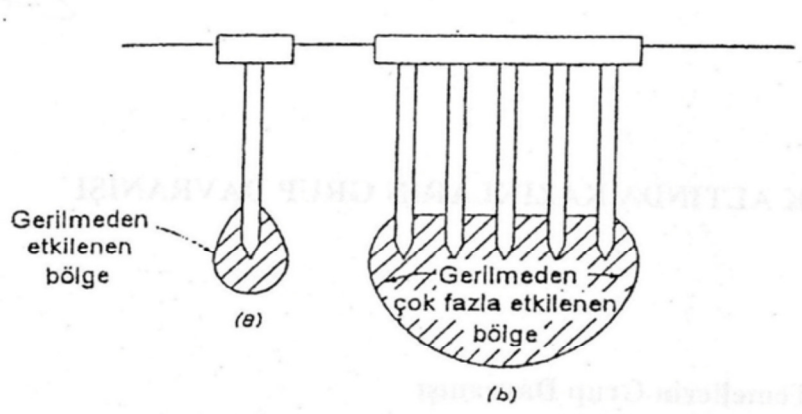
$q_u$ = Zeminin kazığın oturduğu derinlikteki taşıma gücüdür.

Bulunan $Q_{g(u)}$ değeri kazıkların bireysel davranışı durumunda hesaplanan $\sum Q_u$ değeri ile karşılaştırılır ve küçük olan değer alınır.

Özellikle sürtünme kazıklarına oturan bir temelin projelendirilmesinde, tek bir kazığın emniyetle taşıyacağı yükün grupdaki toplam kazık sayısı ile çarpılması ile kazık grubunun emniyetle taşıyabileceği yükün bulunması güvenli bir çözüm değildir. Bunun nedeni kısmen, toplam yükün kazıklara eşit olarak dağıtılmamasıdır. Uygulanan yükün kazık başlığına üniform olarak yayılması halinde bile kazıkların eşit yükler taşıyacakları söylenemez. Bu durumda dış kazıklara, iç kazıklardan daha fazla yük etki edecektir.

### 3.5.3. Kazık gruplarında elastik (ani-drenajsız) ve konsolidasyon oturması

Düşey yük altındaki kazık gruplarının tek kazığa göre oturmasının daha fazla olması beklenmektedir. Bu durum hem elastik hem de konsolidasyon oturmaları için geçerlidir. Bunun sebebi kazıkların zemine aktardıkları gerilmelerin kazık gruplarına göre çok daha derin bir alana iletmeleridir (Şekil 3.17). Burada aktarılan gerilmeden dolayı süperpozisyon olur ve kazık taşıma kapasitesi tekil kazıklara göre azalma ve oturmalarda artışlar olmaktadır (Das, 1999).




Şekil 3.17. Kazık gruplarında oluşan gerilmelerin süperpozisyonu (Tomlinson, 2004).

Öte yandan kazık guruplarında ortadaki kazıkların çevresindeki zeminde oluşan gerilme kenar kazıklarının çevresindeki zeminde oluşan gerilmeden büyüktür. Dolayısı ile esnek bir kazık başlığı mevcut ise ortadaki kazıklar daha fazla oturur.

Rijit bir kazık başlığı mevcut ise kenardaki kazıklar ortadaki kazıklara göre daha fazla yük taşıması gerekir. Tek kazıkta oturma kriteri sağlanmış olsa bile, grup etkisinden dolayı grup kazıklarda aşırı oturmalar görülebilmektedir. Grup kazıklarında kazık sayısının çokluğundan dolayı gerilme dağılışı daha geniş bir alana yayılmakta ve daha derinlerdeki zeminleri etkilemektedirler.

Terzaghi kazık gruplarının kohezyonsuz zeminlerde yer alması durumunda meydana gelecek elastik oturmanın 3.57 Eşitliği ile hesaplanabileceğini öne sürmektedir (Bowles 1981).

$$s_g=[q.B.(1-\mu^2).I_w]/E_s \qquad (3.57)$$

$I_w$: Temel geometrisi düzeltme faktörü

Granüler zeminlerde genellikle şöyle bir yol izlenir (Skempton Yöntemi); tekil kazık oturması hesaplanır ve;

$$s_g/s=[(4.D+3)/(D+4)]^2 \qquad (3.58)$$

eşitliği kullanılarak kazığın grup içindeki oturması bulunur. Bu formül NAVFAC ve Canadian Foundation Design Manual tarafından uygun görülmüş ve eşitliğin hem kumlar hem de killerin elastik oturmalarında geçerli olacağı öngörülmüştür.

Daha basit diğer bir yöntem Vesic (1977) tarafından önerilmiştir. Bu yöntem hem kumların hem de killerin elastik oturmasında kullanılmaktadır

$$S_g=s.\sqrt{d/D} \qquad (3.59)$$

$S_g$=Kazık grubu elastik oturma miktarı

Kil zeminlerde kazık grubunun oturması zaman ve zemin örselenmesi nedeniyle tek kazığın oturmasıyla ilişkilendirilmesi uygun değildir. Bu nedenle kazık grubunun zemine

yük aktarma biçimi üzerine varsayım yapılmaktadır. Yük transferinin gerçekleştiği noktada fiktif bir temelin varlığı düşünülerek hesaplamalar yapılmaktadır.

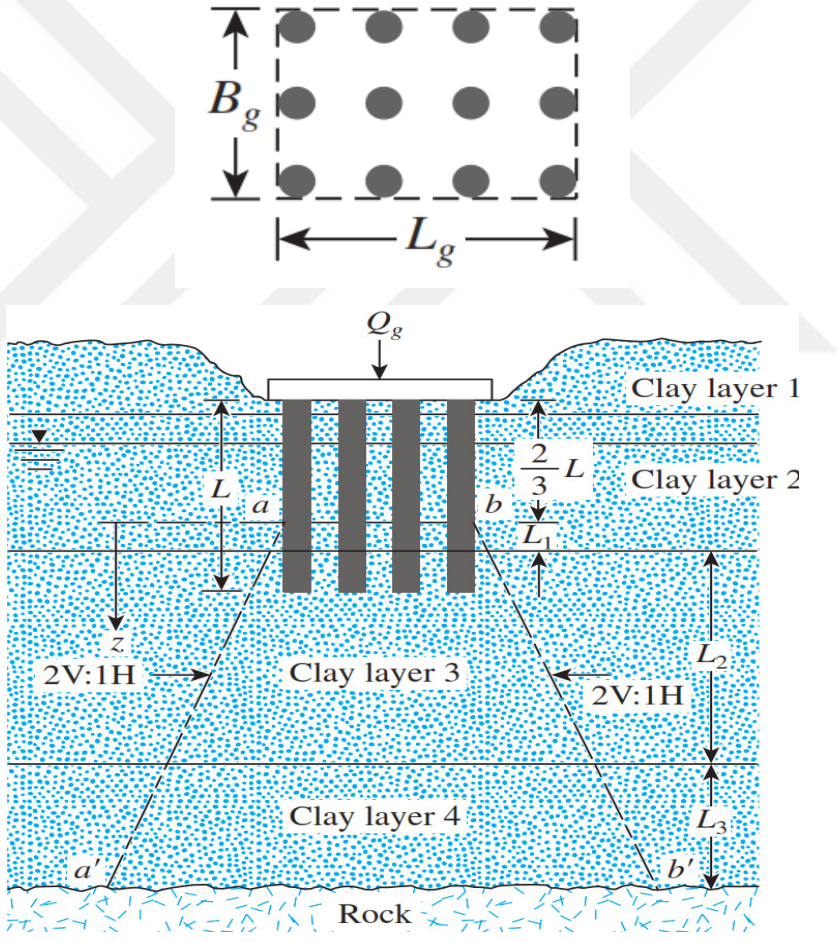
Genellikle şu varsayımlar kullanılmaktadır:

a) Kazık boyunun son 1/3 L lik kısmında kazıklarca çevrelenen fiktif bir temel

b) Yüzeyden itibaren yatay/düşey oranı 1/4 eğimle genişleyen ve yine son 1/3 Llik kısmında fiktif bir temel

c) Kazıkların ucunda kazıkların çevrelediği fiktif bir temel

d) Kazık ucunda daha geniş alanlı fiktif bir temel




Şekil 3.18. Kazık gruplarının konsolidasyon oturması

Kil zeminde grup kazığın konsolidasyon oturması Şekil 3.18'de görüldüğü gibi 2V:1H gerilme dağılımı yöntemiyle bazı kabuller yapılarak yaklaşık hesaplanabilir. Bu hesapların aşamaları aşağıdaki gibidir:

Kazık gömü derinliğinin *L* olduğu kabul edilir. Kazık grupları üst yapıdan gelen toplam yüke maruzdur. Eğer kazık başlığı doğal zemin yüzeyinden aşağıdaysa, kazıklar üzerine gelen toplam yapı yükünden kazık grubunun üzerindeki hafriyat zeminin efektif ağırlığı çıkarılarak bulunur. Bulunan toplam yükün kazık üst seviyesinden 2L/3 kadar derinlikte zemine aktarılmaya başlandığı kabul edilir. Aktarılan bu yük 2V:1H ( düşeyde 2, yatayda 1) olacak şekilde aa-bb derinlik çizgileri çizer. Yükten dolayı her bir zemin tabakası ortasındaki gerilmeler hesaplanır ve gerilme artışları belirlenir. Gerilmelere bağlı olarak zemin tabakalarının oturma miktarları hesaplanır ve toplam oturma bulunur.

# 4. AMPİRİK KAZIK TASARIM GÜCÜ VE OTURMA HESAPLARI

## 4.1. Tekil Kazıklarda Taşıma Gücü Hesapları

Aşağıda Çizelge 4.1'de özellikleri verilen zemin profilinde, boyları $L_1$=10 m, $L_2$=15 m, $L_3$=20 m, çapları $D_1$=0,65 m, $D_2$=0,80 m ve $D_3$=1,00 m olan kazıklar için ampirik yöntemler ve bilgisayar desteği ile sayısal tasarım hesapları yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Analizlerde kullanılan zemin özellikleri.

| **Zemin Özellikleri** | **Siltli Kum (SP)** | **Sıkı Kum-Çakıl** |
|---|---|---|
| Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{unsat}$( kN/m$^3$) | 16 | 17 |
| Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{sat}$( kN/m$^3$) | 17,5 | 19 |
| Permeabilite, kx = ky (m/gün) | $10^{-3}$ | $10^{-5}$ |
| Elastisite Modülü, $E_s$ (kN/m$^2$) | 15000 | 35000 |
| Poisson Oranı, $\mu_s$ | 0,33 | 0,3 |
| İçsel Sürtünme Açısı, ø ( derece ) | 25 | 35 |
| SPT Darbe Sayısı ($N_{ort}$) | 14 | 26 |
| Kohezyon Katsayısı (c) (kN/m$^2$) | 1 | 1 |

### 4.1.1. Tekil kazıklarda uç taşıma gücü hesapları

**$D_1$=0,65 m ve $L_1$ =10 m tekil kazık için**

$A_p=\pi.D^2/4$= 0,33 m²

q'=(17,5 -9,81 )(8,5)+(16).1+(19 -9,81 )(0,5) = 85,95 kN/m²

**Meyerhof Yöntemi**

$Q_p = A_p.q_p = A_p.q'.N_q$ $L_b/D$ = 10/0,65 = 15,38> 10 olduğundan grafikte üst çizgi kullanılır.

ø = 35º için $(L_b/D)_{Cr}$ =10 (Şekil 3.8) 0,5.(10)=5 <15,38

ø = 35º için $N_q$=140 (Şekil 3.9)

$Q_p$ = (0,33)(85,95 .140) = 3970,89 kN

Limit uç direnci ise, $q_l$ = 50.Nq.tanØ=50.140.tan35=4901,45 kN

$Q_p$ = (0,33)(4901,45) = **1617,47 kN**

**Hansen Yöntemi**

$Q_p=A_p.( c.N_c.d_c+\eta.q.N_q.d_q+0,5.\gamma'.D.N_\gamma)$

L/B=10/0,65=15,38>1 (L/B radyan)

$d_q=1+2.\tan 35.(1-\sin 35)^2.\tan^{-1}(L/B)=1,38$ Çizelge 3.1'den $N_q$= 33,55 $N_\gamma$ =34,35

$d_c=1+0,4.\tan^{-1}(L/B)=1,6$

$Q_p$=0,33 [(1)85,95.33,55.1,38+0,5(19–9,81).0,65.34,35]=**1347,05 kN**

**Vesic Yöntemi**

$Q_p=A_p.q_{p=}A_p ( c.N_c+\sigma'_0.N_\sigma)$

ø = 35º ve Irr=50 için Çizelge 3.2'den $N_q$ =59,82

$K_o$ = 1-sin ø = 1-sin 35 º = 0,426

$\sigma_o$'= q'(1 + 2.Ko) / 3 = 85,95.(1 + 2 . 0,426) / 3 = 53,06 kN/m²

$N_\sigma$=(3.59,82)/(1+2.0,426)=96,9

$Q_p$ = 0,33.( 53,06.96,9) = **1696,69 kN**

**Terzaghi Yöntemi**

$Q_p=A_p.q_p=A_p.(c.N_c.s_c+q'.N_q+0,5.\gamma'.N_\gamma.s_\gamma)$

ø = 35º için Çizelge 3.4'den; Nq = 41,4 $N_\gamma$= 42,4

Çizelge 3.3'den $s_c$ = 1,3 $s_\gamma$ = 0,6 (dairesel)

$Q_p$ = 0,33 (85,95 .41,4 + 0,5 (19 – 9,81).42,4 .0,6) = **1212,82 kN**

Farklı çap ve boylardaki kazıklar için aynı yöntemlerle tekil kazıkların uç taşıma gücü hesapları yapılmış ve Çizelge 4.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıklar için uç taşıma gücü değerleri

| **Kazık Boyutları (m)** | | **Kullanılan Yöntemler** | **$Q_p$ Değerleri (kN)** | **Ortalama $Q_p$ Değerleri (kN)** |
|---|---|---|---|---|
| **Çap (m)** | **Boy (m)** | Meyerhof | 1617,47 | |
| $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 1347,05<br>1696,69<br>1212,82 | **1468,51** |
| $D_1$=0,65 | $L_2$=15 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 1617,47<br>1951,76<br>2455,83<br>1738,26 | **1940,83** |
| $D_1$=0,65 | $L_3$=20 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 1617,47<br>2541,97<br>3214,93<br>2263,56 | **2409,48** |
| $D_2$=0,80 | $L_1$=10 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 2450,72<br>2038,41<br>2570,75<br>1837,6 | **2224,37** |
| $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 2450,72<br>2943,13<br>3721,07<br>2633,73 | **2937,16** |
| $D_2$=0,80 | $L_3$=20 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 2450,72<br>3857,85<br>4871,11<br>3429,64 | **3652,33** |
| $D_3$=1,00 | $L_1$=10 | Meyerhof<br>Hansen<br>Vesic<br>Terzaghi | 3847,63<br>3220,06<br>4036,08<br>2885,05 | **3497,2** |

| Kazık Boyutları (m) | | Kullanılan Yöntemler | $Q_p$ Değerleri (kN) | Ortalama $Q_p$ Değerleri (kN) |
|---|---|---|---|---|
| **Çap (m)** | **Boy (m)** | Meyerhof | 3847,63 | **4614,32** |
| $D_3$=1,00 | $L_2$=15 | Hansen | 4632,62 | |
| | | Vesic | 5842,09 | |
| | | Terzaghi | 4134,96 | |
| $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | Meyerhof | 3847,63 | **5738,2** |
| | | Hansen | 6073,02 | |
| | | Vesic | 7647,64 | |
| | | Terzaghi | 5384,54 | |

### 4.1.2. Tekil kazıklarda sürtünme (yüzey) direnci hesapları

**$D_1$=0,65 m ve $L_1$=10 m kazık içinsürtünme direnci**

K= Ko = 1-sin25 = 0,57 $A_s$=3,14.0,65.10=20,41 $m^2$

Çizelge 3.5'den δ=Ø alındı.

(0~15D) arasında: (0~10) m için $\sigma'_v$=85,95 kN/$m^2$

$f_s$=K.$\sigma'_v$.tanδ=0,57(85,95)tan25=22,84 kN/$m^2$

$Q_s$=20,41.22,84/2=**233,13 kN**

**$D_1$=0,65 m ve $L_2$=15 m kazık için sürtünme direnci**

(0~15D) arasında: (0-10) m $\sigma'_v$=85,95 kN/$m^2$ $f_s$=22,84 kN/$m^2$

(15D~L) arasında: (10-15) m $\sigma'_v$=85,95 kN/$m^2$ $f_s$=22,84 kN/$m^2$

$Q_s$=π.0,65.[(22,84/2).10+22,84.5]=**466,16 kN**

**$D_2$=0,80 m ve $L_2$=15 m kazık için sürtünme direnci**

(0~15D) arasında: (0-12) m $\sigma'_v$=(17,5-9,81).11+16.1=100,59 kN/$m^2$

(15D~L) arasında: (12-15) m $\sigma'_v$=100,59 kN/$m^2$

$f_s$=K.$\sigma'_v$.tanδ=0,57(100,59)tan25=26,73 kN/$m^2$

$Q_s$=π.0,8.[(26,73/2).12+26,73.3]=**604,31 kN**

**$D_2$=0,80 m ve $L_2$=20 m kazık için sürtünme direnci**

(0~15D) arasında: (0-12) m $\sigma'_v$=100,59 kN/m$^2$

(15D~L) arasında: (12-20) m $\sigma'_v$=100,59 kN/m$^2$

$f_s=K.\sigma'_v.\tan\delta$=0,57(100,59)tan25=26,73 kN/m$^2$

$Q_s=\pi$.0,8.[(26,73/2).12+26,73.8]=**940,04 kN**

**$D_3$=1,00 m ve $L_2$=15 m kazık için sürtünme direnci**

(0~15D) arasında: (0-15) m $\sigma'_v$=(17,5-9,81).14+16.1=123,66 kN/m$^2$

$f_s=K.\sigma'_v.\tan\delta$=0,57(123,66)tan25=32,87 kN/m$^2$

$Q_s=\pi$.1,0.[(32,87/2).15]=**774,08 kN**

**$D_3$=1,00 m ve $L_3$=20 m kazık için sürtünme direnci**

(0~15D) arasında: (0-15) m $\sigma'_v$=123,66 kN/m$^2$

(15D~L) arasında: (15-20) m $\sigma'_v$=123,66 kN/m$^2$

$f_s$=32,87 kN/m$^2$

$Q_s=\pi$.1,0.[(32,87/2).15+32,87.5]=**1290,15 kN**

Farklı çap ve boylardaki tekil kazıklar için aynı yöntemlerle sürtünme direnci hesapları yapılmış ve Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıklar için sürtünme (yüzey) dirençleri

| **Kazık Boyutları (m)** | **$Q_s$ Değerleri (kN)** |
|---|---|
| $D_1$=0,65 m $L_1$=10 m | **233,13** |
| $D_1$=0,65 m $L_2$=15 m | **466,16** |
| $D_1$=0,65 m $L_3$=20 m | **699,24** |
| $D_2$=0,80 m $L_1$=10 m | **286,87** |
| $D_2$=0,80 m $L_2$=15 m | **604,31** |
| $D_2$=0,80 m $L_3$=20 m | **940,04** |
| $D_3$=1,00 m $L_1$=10 m | **358,58** |
| $D_3$=1,00 m $L_2$=15 m | **774,08** |
| $D_3$=1,00 m $L_3$=20 m | **1290,15** |

### 4.1.3. Tekil kazıkların izin verilebilir taşıma gücü hesapları

Tekil kazıkların uç taşıma gücü ve sürtünme dirençleri verilerinden kazıkların toplam taşıma gücü hesapları yapılmış, güvenlik katsayısı FS=3 alınarak farklı çap ve boylardaki tekil kazıkların izin verilebilir taşıma gücü değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıkların uç taşıma gücü, sürtünme direnci, toplam taşıma gücü ve izin verilebilir taşıma gücü

| **Kazık Boyutları (m)** | | **Uç Taşıma Gücü ($Q_p$) kN** | **Sürtünme Direnci ($Q_s$) kN** | **Toplam Taşıma Gücü ($Q_u$) kN** | **İzin Verilebilir Taşıma Gücü ($Q_{all}$) kN (FS=3)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Çap (m)** | **Boy (m)** | | | | |
| $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 1468,51 | 233,13 | 1701,64 | **567** |
| $D_1$=0,65 | $L_2$=15 | 1940,83 | 466,16 | 2406,99 | **802** |
| $D_1$=0,65 | $L_3$=20 | 2409,48 | 699,24 | 3108,72 | **1036** |
| $D_2$=0,80 | $L_1$=10 | 2224,37 | 286,87 | 2511,24 | **837** |
| $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 2937,16 | 604,31 | 3541,47 | **1180** |
| $D_2$=0,80 | $L_3$=20 | 3652,33 | 940,04 | 4592,37 | **1530** |
| $D_3$=1,00 | $L_1$=10 | 3497,2 | 358,58 | 3855,78 | **1285** |
| $D_3$=1,00 | $L_2$=15 | 4614,32 | 774,08 | 5388,4 | **1796** |
| $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 5738,2 | 1290,15 | 7028,35 | **2342** |

## 4.2. Tekil Kazıkların Elastik Deformasyon (Oturma) Hesapları

Çizelge 4.5'de verilmiş olan yapısal elemanlara ait parametreler doğrultusunda plaxis programında tekil kazıklar için oturma hesapları sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuştur.

Çizelge 4.5. Analizlerde kullanılan yapısal elemanların özellikleri

| **Kazık Temel Özellikleri** | **Kazık** | **Kazık** | **Kazık** | **Radye** |
|---|---|---|---|---|
| **Kazık Boyutları (m)** | D1=0,65<br>L=10-15-20 | D2=0,80<br>L=10-15-20 | D3=1,00<br>L=10-15-20 | 13*13*0,80 |
| Malzeme Modeli | Elastik | Elastik | Elastik | Elastik |
| Eksenel Rijitlik EA (kN/m) | $1,24x10^7$ | $1,92x10^7$ | $3,00x10^7$ | $6,48x10^8$ |
| Eğilme Rijitliği EI ($kN/m^2/m$) | $3,44x10^5$ | $1,02x10^6$ | $2,5x10^6$ | $3,47x10^7$ |
| Poisson Oranı, ν | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Ağırlık W (kN/m/m) | 5,2 | 6,4 | 8,0 | 24 |
| Kesit Alanı ($A_p$) $m^2$ | 0,33 | 0,5 | 0,785 | - |

Üst yapı yükleri **$Q_1$=10000 kN- $Q_2$=20000 kN- $Q_3$=35000 kN** olan yapılar için seçilen tekil kazıkların düşey elastik deformasyon (oturma) hesapları aşağıda yapılmıştır. Kazıkların yerleşimi yatay ve düşeyde d=2,8 m. karelaj (5x5) şeklinde olup 25 adettir.

$Q_1$=10000 kN için bir kazığa gelen yük=10000/25**=400 kN**
$Q_2$=20000 kN için bir kazığa gelen yük=20000/25**=800 kN**
$Q_3$=35000 kN için bir kazığa gelen yük=35000/25**=1400 kN**
(Toplam yükün kazıklara eşit olarak dağıtıldığı varsayılmıştır)

Çizelge 4.7'de verilen tekil ve grup kazıkların taşıma güçleri dikkate alındığında;
**$Q_1$=10000 kN** yapı yükü için seçilen kazık **$D_1$=0,65 m** **$L_1$=10 m**
**$Q_2$=20000 kN** yapı yükü için seçilen kazık **$D_2$=0,80 m** **$L_2$=15 m**
**$Q_3$=35000 kN** yapı yükü için seçilen kazık **$D_3$=1,00 m** **$L_3$=20 m**

**$Q_1$=10000 kN yapı yükü altında $D_1$=0,65 m ve $L_1$=10 m tekil kazık için elastik oturma**
(Tekil kazığa gelen toplam yükün % 50'sinin uç direnci ile % 50'sinin sürtünme direnci ile taşındığı kabul edilmiştir)

$Q_u$=400 kN $Q_p$ = 200 kN $Q_s$ = 200 kN $E_s$= 35000 kN/$m^2$ (sıkı kum-çakıl)

$E_p = 3.10^7$ kN/$m^2$ $A_p$= 0,33 $m^2$ $\xi$ = 0,67 $E_s$= 15000 kN/$m^2$ (kum)

$\mu_s$ = 0,33 (kum) $\mu_s$ = 0,3 (sıkı kum-çakıl) $I_{wp} = \alpha r = 0,88$

$S_1=[(Q_p+\xi.Q_s).L]/(A_p.E_p)$

**$S_1=[(200+0,67.200).10]/ 0,33.3.10^7=0,0019$ m = 0,0337 cm**

$q_p=200/0,33=606$kN/$m^2$

$S_2=[(q_p.D)(1-\mu_s^2).I_{wp})]/E_s$

**$S_2 = (606.0,65) (1-0,3^2) (0,88) /35000 =0,009$ m= 0,9 cm**

$I_{ws}=2+0,35.\sqrt{L/D}=2+0,35.\sqrt{10/0,65}=3,37$

$S_3 = [Q_s/(p.L)](D/E_s) (1-\mu_s^2). I_{ws}$

**$S_3 = [200/(3,14.0,65.10)] (0,65/15000) (1-0,33^2) (3,37) =0,0013$= 0,13 cm**

**Toplam oturma S= $S_1 + S_2 + S_3$= 0,0337 +0,9 + 0,13 = 1,06 cm**

**$Q_2$=20000 kN yapı yükü altında $D_2$=0,80 m ve $L_2$=15 m tekil kazık için elastik oturma**

$Q_u$=800 kN $Q_p$ = 400 kN $Q_s$ = 400kN $A_p$= 0,5 $m^2$

**$S_1=[(400+0,67.400).15]/ 0,5.3.10^7=0,00045$ m = 0,045 cm**

$q_p=400/0,5=800$kN/$m^2$

**$S_2 = (800.0,8) (1-0,3^2) (0,88) /35000 =0,0146$ m= 1,46 cm**

$I_{ws}=2+0,35.\sqrt{L/D}=2+0,35.\sqrt{15/0,8}=3,51$

**$S_3 = [400/(3,14.0,8.15)] (0,8/15000) (1-0,33^2) (3,51) =0,0018$ m= 0,18 cm**

**Toplam oturma S= $S_1 + S_2 + S_3$= 0,045 +1,46 + 0,18 = 1,68 cm**

**$Q_3$=35000 kN yapı yükü altında $D_3$=1,00 m ve $L_3$=20 m tekil kazık için elastik oturma**

$Q_u$=1400 kN$Q_p$ = 700kN$Q_s$ = 700kN$A_p$= 0,785 $m^2$

**$S_1=[(700+0,67.700).20]/ 0,785.3.10^7=0,00099$ m = 0,099 cm**

$q_p=700/0,785=891,7$kN/$m^2$

**$S_2 = (800.0,8) (1-0,3^2) (0,88) /35000 =0,0204$ m= 2,04 cm**

$I_{ws}=2+0,35.\sqrt{L/D}=2+0,35.\sqrt{20/1}=3,56$

**$S_3 = [700/(3,14.1.20)] (1/15000) (1-0,33^2) (3,56) =0,0024$ m= 0,24 cm**

**Toplam oturma S= $S_1 + S_2 + S_3$= 0,099 +2,04 + 0,24 = 2,38 cm**

Yapılan oturma hesap sonuçları Çizelge 4.6'da ve Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Farklı çap ve boylardaki tekil kazıkların elastik oturma hesapları.

| Yapı Yükü (kN) | Kazık Boyutları | | $S_1$ Oturması (cm) | $S_2$ Oturması (cm) | $S_3$ Oturması (cm) | Toplam Oturma (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Çap (m) | Boy (m) | | | | |
| $Q_1$=10000 | $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 0,0337 | 0,9 | 0,13 | **1,06** |
| $Q_2$=20000 | $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 0,045 | 1,46 | 0,18 | **1,68** |
| $Q_3$=35000 | $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 0,099 | 2,04 | 0,24 | **2,38** |

### 4.3. Kazık Gruplarının Taşıma Gücü Hesapları

Q = yapının ölü yükü ve hareketli yük

A = radyenin alanı

d=2,8 m. (karelaj)

$D_f$= **-**2,5 m

YASS=**-**3,5 m

Kazıkların yerleşimi yatay ve düşeyde d=2,8 m. karelaj (5x5) şeklinde olup 25 adettir. Radye temel boyutları 13x13 m. ve üst yapıdan gelen toplam yük **$Q_1$=10000 kN'**dur. Bu yükten dolayı temel tabanında oluşan üniform basınç; **q=10000/(13.13)=60 kPa** dır. Bir kazığa gelen yük**=10000/25=400 kN** (Toplam yükün kazıklara eşit olarak dağıtıldığı varsayılmıştır.)

**$D_1$= 0,65 m $L_1$=10 m kazık grupları için izin verilebilir taşıma gücü**

d=2,8 m. $Q_{all}$ = 567 kN

Converse - Labarre formülüne göre kazık gruplarının verimliliği:

$\theta$=arctg(0,65/2,8)=13,07

$\eta$=1-{[(5-1).5+(5-1).5].13,07/(90.5.5)}=0,76

$Q_{all(grup)}$=0,76.5.5.567=**10773 kN**

Farklı çap ve boylardaki kazık grupları için de aynı yöntemle verimlilik ve taşıma gücü hesapları yapılmış ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı çap ve boydaki tekil ve grup kazıkların izin verilebilir taşıma kapasiteleri

| **Kazık Boyutları (m)** | | **Tekil Kazıkların İzin Verilebilir Taşıma Kapasiteleri** | **(5x5)Yerleşim Planına Göre Kazık Gruplarının Verimliliği(η)** | **Kazık Gruplarının İzin Verilebilir Taşıma Kapasiteleri** |
|---|---|---|---|---|
| **Çap (m)** | **Boy (m)** | **($Q_{all}$) kN FS=3** | | **$(Q_{all})_{grup}$ kN** |
| $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 567 | **η=0,76** | **10773** |
| $D_1$=0,65 | $L_2$=15 | 802 | **η=0,76** | **15238** |
| $D_1$=0,65 | $L_3$=20 | 1036 | **η=0,76** | **19684** |
| $D_2$=0,80 | $L_1$=10 | 837 | **η=0,71** | **14856** |
| $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 1180 | **η=0,71** | **20945** |
| $D_2$=0,80 | $L_3$=20 | 1530 | **η=0,71** | **27157** |
| $D_3$=1,00 | $L_1$=10 | 1285 | **η=0,65** | **20881** |
| $D_3$=1,00 | $L_2$=15 | 1796 | **η=0,65** | **29185** |
| $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 2342 | **η=0,65** | **38057** |

## 4.4. Kazık Gruplarının Oturma Hesapları

**$Q_1$=10000 kN yapı yükü için $D_1$=0,65 m $L_1$=10 m kazık grubunda elastik oturma (Skempton yöntemi):**

$S_g=s.[(4.D+3)/(D+4)]^2$ =1,06.$[(4.0,65+3)/(0,65+4)]^2$**=1,53 cm**

**$Q_2$=20000 kN yapı yükü için $D_2$=0,80 m $L_2$=15 kazık grubunda elastik oturma**

$S_g=s.[(4.D+3)/(D+4)]^2$ =1,68.$[(4.0,8+3)/(0,8+4)]^2$ = **2,8 cm**

**$Q_3$=35000 kN yapı yükü için $D_3$=1,00 m $L_3$=20 m kazık grubunda elastik oturma**

$S_g=s.[(4.D+3)/(D+4)]^2$ =2,38.$[(4.1+3)/(1+4)]^2$ = **4,66 cm**

Çizelge 4.8. Farklı çap ve boylardaki tekil ve grup kazıkların elastik oturmaları

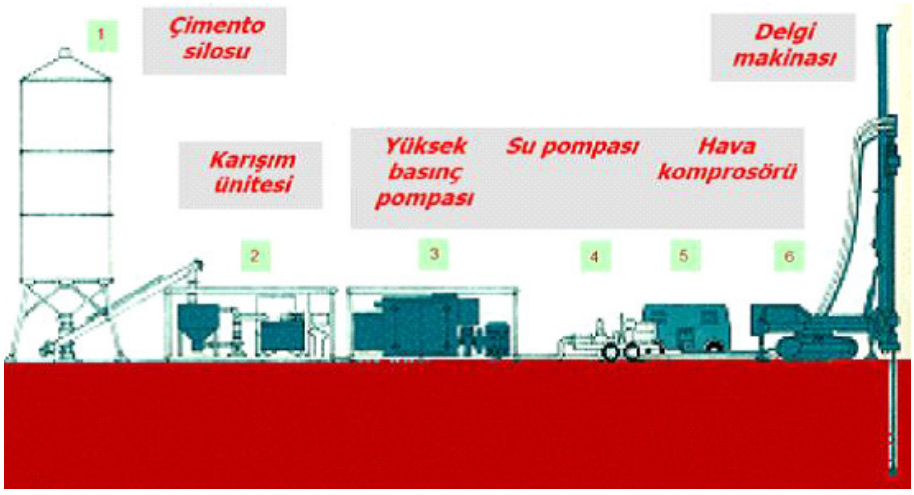
| **Yapı Yükü (kN)** | **Kazık Boyutları** | | **Tekil Kazık Elastik Oturması (cm)** | **Kazık Yerleşim Planı (mxn)** | **Kazıkların Grup İçindeki Elastik Oturması (cm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Çap (m)** | **Boy (m)** | | | |
| $Q_1$=10000 | $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 1,06 | 5x5 | **1,53** |
| $Q_2$=20000 | $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 1,68 | 5x5 | **2,8** |
| $Q_3$=35000 | $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 2,38 | 5x5 | **4,66** |

# 5. JET GROUT YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Bu yöntemde amaç, yapılan jet grout kolonlar ile zeminin basınç dayanımının artırılması prensibine dayanır. Oluşturulan kolonlar ile zeminin sahip olduğu özellikler değiştirilmiş olur. Jet grout uygulamasında kolonların taşıma gücü ve oturma kriterleri göz önünde bulundurulur. Bu yöntemin ilk uygulaması 70'li yılların başında Japonya'da yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Ülkemizde ise ilk olarak 1986 yılında uygulanmıştır. Jet grout yöntemi kohezyonlu veya granüler birçok farklı zemin karakterlerinde uygulanabilmektedir. Jet grout işlemi sonunda zemin iyileştirme öncesi durumuna göre daha rijit bir yapıya ulaşmakta, dayanımı artmakta ve oturmalar azalmaktadır. Homojen ve sürekli yapıda olan bu yeni malzemenin karakteristik özellikleri önceden belirlenebilmektedir. Oluşacak kolonların kesitlerini ve diğer özelliklerini; zemin parametreleri, dönüş ve çekme hızları, grout basıncı ve bileşimi, debi, nozzle çapı ve adedi gibi değişkenler belirler.

## 5.1. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Ekipman

Jet grout kolon imalatında genel olarak; bir sondaj makinesi, enjeksiyon için pompa ünitesi, çimento silosu, su deposu, karışım ünitesi ile santralin bulunduğu bir sistem kullanılır. Bu sistem Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

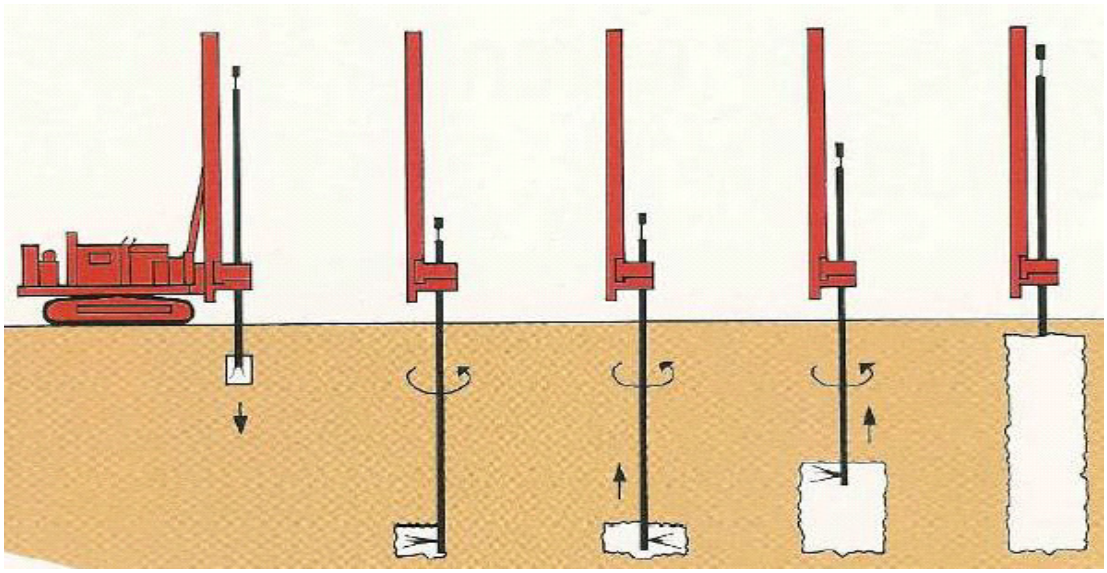



Şekil 5.1. Jet grout yönteminde kullanılan ekipman

## 5.2. Jet Grout Yönteminin Uygulaması

Jet grout yöntemi; delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşamadan oluşur. İlk aşamada, oluşturulacak kolonun alt seviyesine kadar basınçlı su verilerek küçük çaplı delme borusu (sondaj tiji) ile zemin delinmektedir. Daha sonra sondaj tiji içerisindeki Nozzlar, inşa edilecek jet grout kolonun en alt seviyesine kadar indirilerek delme işlemi sonlandırılır. İkinci aşamada; çimento-su karışımından oluşan grout malzemesi yüksek basınçla pompalanarak enjeksiyona başlanır. Yüksek basınçlı grout enjeksiyonu ile birlikte tijler kendi ekseni etrafında belli hızlarla döndürülerek yukarıya doğru çekilir. Kolon boyu, önceden belirlenmiş olan üst seviyeye ulaştığında enjeksiyon işlemi sona erdirilmektedir. Yüksek basınçlı grout zeminle karışıp tijlerin dönel hareketi sonucunda daire kesitli farklı dayanım özelliklerine sahip jet grout kolonları oluşur (Melegary ve Garassino, 1997) (Şekil 5.2). Oluşacak kolonların kesitlerini ve diğer özelliklerini; zemin parametreleri, dönüş ve çekme hızları, grout basıncı ve bileşimi, debi, nozzle çapı ve adedi gibi değişkenler belirler.

Jet grout kolonları ile temel alt kotu arasında 30-60 cm kalınlığında stabilize dolgu malzemesi ile bir tabaka oluşturulur. Bu sayede zemin drenajı sağlanır ve kolon başlarına zarar verilmesi engellenmiş olur. Üst yapıdan gelen yükler üniform bir şekilde kolonlara ve zemine aktarılmış olur.



Şekil 5.2. Jet grout yönteminin uygulama aşamaları

## 5.3. Jet Grout Teknikleri

Uygulanacak Jet grout tekniğini, zemin koşulları ve istenen jet grout kolon özellikleri belirlemektedir. Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve Süper Jet yöntemleri olmak üzere dört farklı jet grout tekniği bulunmaktadır.

### 5.3.1. Jet 1

En yaygın kullanılan ve uygulaması kolay bir yöntemdir. Zeminin parçalanması ve enjeksiyonu genellikle çimento şerbeti ile yüksek enerjiyle yapılır. Bu yöntem çakıllı zeminlerde kohezyonlu zeminlere göre daha başarılıdır.

### 5.3.2. Jet 2

Bu yöntemde ikinci bir akışkan olarak hava jeti, yüksek basınçlı grout ile birlikte kullanılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan kolonların çapları jet 1 yöntemiyle oluşan kolon çaplarından yaklaşık % 70 daha büyüktür. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde Jet 1 yöntemine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir.

### 5.3.3. Jet 3

Zemin yüksek enerjili su jeti ile parçalanır ve eşzamanlı olarak ayrı bir enjeksiyon karışımı jeti ile çimentolanır. Bu yöntemle büyük çaplı kolonlar elde edilebilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde en etkili yöntemdir.

### 5.3.4. Süper jet

Bu yöntemle büyük çaplı kolonlar yüksek hızda ve uygun maliyetle elde edilebilmektedir. Yüksek çaplı nozzllar kullanılır, tijlerin dönme ve çekme hızları düşüktür. Çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülerek kolonlar oluşturulur. Özellikle yatay akımlı yer altı sularının kontrolünde, sıvılaşma riski bulunan zemin tabakalarının iyileştirilmesinde ve geçirimsiz perde duvar inşaatlarında kullanılmaktadır.

## 5.4. Jet Grout Yönteminde Çalışma Parametreleri

Jet grout uygulaması sonucunda oluşacak kolonların çap ve dayanım özelliklerinin istediğimiz şekilde olması çalışma parametrelerine ve jetgrout tekniğine bağlıdır. Başlıca imalat parametreleri; jet tekniği, enjeksiyon basıncı, nozzl sayısı ve çapı, tijlerin dönme ve çekme hızı, su-çimento oranı ve pompa kapasitesidir. Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirmenin başarılı olabilmesi için imalat parametreleri arasında bir optimizasyon yapılarak doğru seçilmesi gerekir. Bu parametreler bazı araştırma ve deneyler sonucunda elde edilirler. Elde edilen bu veriler doğrultusunda en uygun jet grout tekniği seçilir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde, istenilen şekilde kolonlar oluşturmak için, daha küçük çaplı nozzleların kullanılması gerekmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

## 5.5. Jet Grout Kolonların Sıvılaşma Direnci Üzerine Etkisi

Sıvılaşma; özellikle suya doygun granüler zeminlerde deprem sırasında oluşan tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artarak zeminin kayma mukavemetinin, efektif gerilmelerin azalması sonucunda taşıma kapasitesinin düşmesi veya tamamen kaybolması olarak açıklanmaktadır. Deprem etkisiyle oluşan tekrarlı kesme kuvvetleri, sıvılaşma mekanizmasını harekete geçirmektedir. Yapı temelindeki zemin kütlesinde sıvılaşma oluştuğu durumlarda yapının dönmesine veya zemin içine batmasına sebep olabilmektedir. Sıvılaşma potansiyeli bulunan, özellikle suya doygun zeminler üzerine inşa edilen yapılarda depremlere dayalı tekrarlı yükleme koşullarında oturma ve taşıma gücü problemleri yaşanmaktadır.

• Sıvılaşma sonucu zeminde oluşacak yanal ve düşey deformasyonların sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanı olarak jet grout kolonlar kullanılmaktadır.
• Jet grout kolonlar ile sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması sonucu zeminde oluşan kayma gerilmeleri azaltılmaktadır. Deprem esnasında oluşacak kayma gerilmelerinin bir kısmı jet grout kolonlar tarafından karşılanacağı için zemini sıvılaştıran veya yumuşatan tekrarlı kayma gerilmesi oranı düşmektedir.
•Önemli yapılarda sıvılaşma güvenlik sayısı düşük olan yerlerde kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deplasmanların kontrolü için SPT dirençlerinde artış olur.

## 5.6. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücü

Jet grout kolonların dayanım hesaplarında, tekil kazık dayanım hesaplarındaki esaslar geçerlidir. Belli bir emniyet faktörü ile hesaplanan kolon taşıma kapasitesi değerlerinin, karot deneylerinden elde edilen değerlerden daha büyük bir gerilme olmaması önem taşımaktadır. Hesaplamalarda kolon gruplarının toplam taşıma kapasitesinin, tekil kazıkların toplam taşıma kapasitelerine eşit olacağı göz önüne alınmaktadır.

Yükle temel arasında yeterli kalınlıkta granüler dolgu yapılması durumunda yükün önemli bir kısmı zemin tarafından taşınır. Kolon boyutunun artması durumunda ise zemin gerilmelerinin önemli bir kısmı kolonlar tarafından taşınmış olur. Granüler dolgu jet grout kolonların davranışını daha üniform yapar.

Zeminde oluşturulan jet grout kolonların dayanımının yüksek olmasında zemini oluşturan danelerin iyi derecelenmiş olması önemli olup, ince dane miktarının artması sonucu ise kolon dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. Bir jet grout kolonun göçmeden önce taşıyabileceği maksimum yük ($Q_d$), kolon ağırlığı ($W_k$) , kolon maksimum uç direnci ($Q_u$), kolonun çevre sürtünmesi ve adhezyon ile taşıyabileceği yük ($Q_f$) olmak üzere 5.1 Eşitliği elde edilir. Jet grout kolon numunelerinin zemin cinsine bağlı olarak 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

$$Q_d = Q_u + Q_f - W_k \qquad (5.1)$$

Çizelge 5.1. Zemin cinsine göre jet grout kolonların basınç dayanımları (Durgunoğlu, 2004)

| **Zemin Cinsi** | **Jet Grout kolonun 28 günlük basınç dayanımı (Mpa)** | **Jet Grout kolonun FS=3'e göre 28 günlük basınç dayanımı (Mpa)** |
|---|---|---|
| Organik | 1,5 | 0,5 |
| Killi | 3,0 | 1,0 |
| Killi Kumlu | 5,0 | 1,7 |
| Temiz kumlu çakıllı | 12,0 | 4,0 |

### 5.6.1. Kohezyonsuz zeminlerde kolon taşıma gücü

Kohezyonsuz bir zeminde jet grout kolonun tek tabakalı zemin içinden geçmesi durumunda birim uç direnci;

$$q_d=p_0.N_q+K_2.\gamma'.N_\gamma.D \qquad (5.2)$$

Bu formülde ikinci terimin değeri küçük olduğundan ihmal edilebilir.

$p_0$: kolon uç efektif basınç gerilmesi.

$K_2$ parametresi şekil katsayısı olup kare kesitli kazıklarda 0,4 dairesel kesitli kazıklarda ise 0,3'tür. $N_q$ ve $N_\gamma$ değeri Çizelge 3.4'den alınacaktır (Kumbasar – Kip, 1987). Toplam uç direnci ise;

$$Q_u=A.\gamma'.D_f.(N_q-1) \qquad (5.3)$$

Birim sürtünme direnci;

$$f_s=c_u+P_h.\tan\delta P_h=K.P_v \qquad (5.4)$$

$p_h$ : $D_f$=L boyunca sürtünme direncinin hesaplanacağı seviyede kazık yüzeyine etki eden yatay basınç.

K : Yatay toprak basıncı katsayısı. K ve $\delta$ değerleri Çizelge 5.2'den alınacaktır.

$p_v = \gamma.D_f$ düşey basınç gerilmesi olup derinlikle lineer olarak artar.

$c_u$: $D_f$=L boyunca ortalama adhezyon

Toplam sürtünme direnci;

$$Q_f = (\pi/2).K.\gamma'.D^2_f.D.\tan\delta \qquad (5.5)$$

Jet Grout kolonun toplam taşıma gücü;

$$Q_d=Q_u+Q_f-W_k=A.\gamma'.D_f\ (N_q-1)+(\pi/2).K.\gamma'.D^2_f.D.\tan\delta \qquad (5.6)$$

Çizelge 5.2. Kazık malzemesi –δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki

| | | **K Değerleri** | |
|---|---|---|---|
| **Kazık Malzemesi** | **δ** | **Küçük Relatif Sıkılık** | **Yüksek Relatif Sıkılık** |
| **Çelik** | 20 | 0,5 | 1,0 |
| **Beton** | 3/4Ø | 1,0 | 2,0 |
| **Ahşap** | 2/3Ø | 1,5 | 3,0 |

Jet Grout kolonların farklı zemin tabakalarından geçmesi durumunda, sürtünme direnci her tabaka için ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Bu durumda kohezyonsuz zeminlerdeki jet grout kolonların taşıma gücü Eşitlik 5.7 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$Q_d = A.\gamma'.D_f\,(N_q-1)+\sum A_{si}.\,K_i.\,P_{vi}.\,\tan\delta \qquad (5.7)$$

### 5.6.2. Kohezyonlu zeminlerde kolon taşıma gücü

$c_u.N_c = 9.c_u$ ifadesinde $N_c$ katsayısının 9 değerini alabilmesi için kolonun taşıyıcı zemine 5D kadar girmesi gerekmektedir. Burada $c_u$ kazık ucu seviyesinin altında zeminin drenajsız kayma direncidir. $N_c$ katsayısı sağlam zemine giren kazık boyu büyüdükçe artar ve L/D≥4 durumunda 9 değerini alır. Kazıklı temellerde kazık boyu kazık çapının 4 katından daha büyük olduğundan genelde $N_c$=9 değeri kullanılır (Skempton, 1951).

$$q_d=9.c_u+\gamma'.\,D_f \quad \text{ve} \quad Q_u = A.(9.c_1+\gamma'.\,D_f) \qquad (5.8)$$

$f_s = c_u$ olduğundan dolayı toplam sürtünme direnci;

$$Q_f=A_s.c_u \qquad (5.9)$$

$A_s$ : Kolonun zemin içerisinde kalan yanal yüzey alanı olmak üzere toplam taşıma gücü;

$$Q_d=A.(9.c_1+\gamma'.\,D_f)+A_s.c_u-W_k \qquad (5.10)$$

olarak ifade edilebilir. $_{Wk}$ =A.γ′.$D_f$ olduğundan bu formül Eşitlik 5.11'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$Q_d=A.(9.c_1)+ A_s.\alpha.c_2 \qquad (5.11)$$

$c_1$: Kazık uç bölgesinde drenajsız kayma dayanımı

$c_2$: Kazık yüzeyini saran zeminin drenajsız kayma dayanımı

## 5.7. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücü Analizleri

Aşağıda Çizelge 5.3'de özellikleri verilen zemin profilinde boyutları ($L_1$=10 m, $D_1$=0,65 m) ($L_2$=15 m, $D_2$=0,80) ($L_3$=20 m, $D_3$=1,00 m) olan Jet Grout kolonlar için ampirik yöntemler ve bilgisayar desteği ile sayısal tasarım hesapları yapılmıştır.

Çizelge 5.3. Jet grout kolon taşıma gücü hesaplarında kullanılan zemin özellikleri

| **Zemin Özellikleri** | **Siltli Kum (SP)** | **Sıkı Kum Çakıl** |
|---|---|---|
| Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{unsat}$( kN/m$^3$) | 16 | 17 |
| Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{sat}$( kN/m$^3$) | 17,5 | 19 |
| Permeabilite, kx = ky (m/gün) | $10^{-3}$ | $10^{-5}$ |
| Elastisite Modülü, $E_s$ (kN/m$^2$) | 15000 | 35000 |
| Poisson Oranı, $\mu_s$ | 0,33 | 0,3 |
| δ=(3/4)Ø Açısı | 18,75 | 26,25 |
| İçsel Sürtünme Açısı, ø ( derece) | 25 | 35 |
| Kohezyon Katsayısı (c) (kN/m$^2$) | 1 | 1 |

**$D_1$=0,65 m ve $L_1$=10 m Jet grout kolon için taşıma gücü hesabı**

Po=(17,5 -9,81 )(8,5)+(16).1+(19 -9,81 )(0,5) = 85,95 kN/m²

Çizelge 3.1'den ø = 25° için Nq=10,7 ø = 35° için Nq=33 K=1 A=0,33 m$^2$

$Q_d$=A.γ′.$D_f$.(Nq-1)+(π/2).K.γ′.$D^2_f$.D.tan δ= 0,33.85,95.(32)+(π/2).1.85,95.10.0,65.tan18,75

**=1205,16 kN**

**$D_1$=0,65 m ve $L_2$=15 m Jet grout kolon için taşıma gücü hesabı**

$Q_d$ =0,33.124,4.(32)+(π/2).1.124,4.15.0,65.tan18,75=**1960,06 kN**

Farklı çap ve boylardaki jet grout kolonlarının taşıma gücü hesapları yapılmış ve Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı boyutlarda tekil jet grout kolonların izin verilebilir taşıma kapasiteleri

| **Kazık Boyutları** | | **Toplam Taşıma Gücü ($Q_d$) kN** | **İzin Verilebilir Taşıma Gücü ($Q_{all}$) kN , FS=3** | **Yapısal olarak İzin verilebilir taşıma gücü ($Q_{all}$) kN (qu=2.0Mpa)** |
|---|---|---|---|---|
| **Çap (m)** | **Boy(m)** | | | |
| $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 1205,16 | 401 | **660** |
| $D_1$=0,65 | $L_2$=15 | 1960,06 | 653 | **660** |
| $D_1$=0,65 | $L_3$=20 | 2847,95 | 949 | **660** |
| $D_2$=0,80 | $L_1$=10 | 1604,23 | 534 | **1000** |
| $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 2785,97 | 928 | **1000** |
| $D_2$=0,80 | $L_3$=20 | 3994,23 | 1331 | **1000** |
| $D_3$=1,00 | $L_1$=10 | 2617,12 | 872 | **1570** |
| $D_3$=1,00 | $L_2$=15 | 4119,39 | 1373 | **1570** |
| $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 5826,58 | 1942 | **1570** |

Jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinin tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre 28 günlük mukavemet değerleri **2.00 Mpa** olarak alınmıştır.

**$D_1$=0,65 m çaplı Jet Grout Kolonun taşıma gücü = 2.0*0,33*1000=660 kN**

**$D_2$=0,80 m çaplı Jet Grout Kolonun taşıma gücü = 2.0*0,5*1000=1000kN**

**$D_3$=1,00 m çaplı Jet Grout Kolonun taşıma gücü = 2.0*0,785*1000= 1570kN**

Sonuçlar, servis yüklerinin belli bir emniyet faktörü ile taşındığını ispat etmektedir.

# 6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS YAZILIMI

Sonlu elemanlar yöntemi, süreklilik gösteren bir ortamın sonlu eleman adı verilen basit geometrik alt bölgelere ayrılarak bu bölgelerle temsil edilmesidir. Böylece; basınç, gerilme veya yer değiştirme gibi sürekli büyüklükler, küçük ve sürekli parçaların birleşmesinden oluşan bir modele dönüştürülmüş olur. Bunun sonucunda; değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi suretiyle kabul edilebilir bir hata payı ile yaklaşık olarak analiz edilir. Yapıyı oluşturan herhangi bir elemanın davranışını tanımlamak suretiyle yapının tamamı için de davranış tanımlanmış olacaktır. Böylece parçanın yapısal davranışından sistemin yapısal davranışına geçilmiş olur.

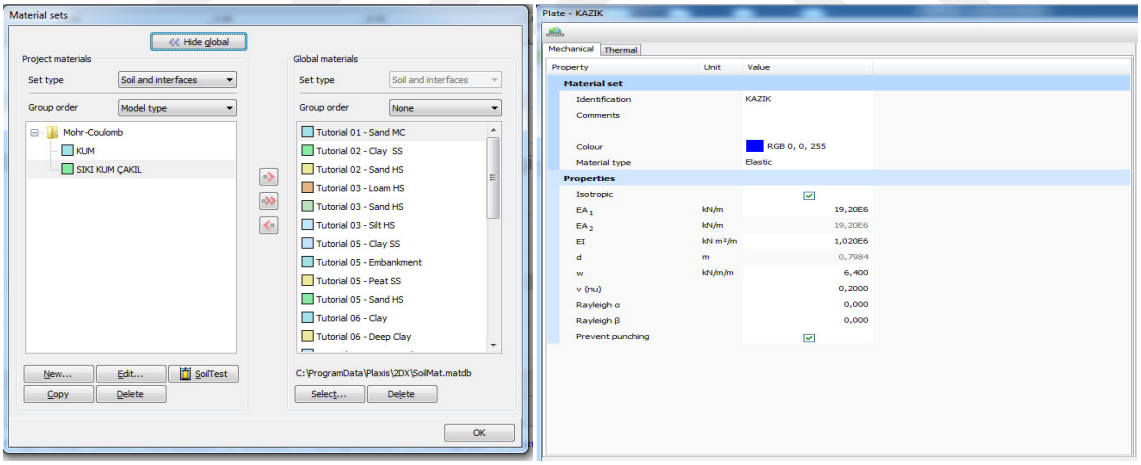
İlk önce, problemin geometrisi oluşturulur ve sistem düğüm noktaları ile birbirine bağlanan sonlu sayıda elemanlara ayrılır. Ayrılan parçaların her biri için denge denklemleri yazılarak bilinmeyenler sınır şartları yardımıyla elde edilir. Düğüm noktasındaki yer değiştirmeler bilinmeyenlerdir. Çözüm için ana değişken (yer değiştirmeler) seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve matris hesap yöntemiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır. Yer değiştirmelere bağlı olarak gerilmeler elde edilir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Plaxis yazılımıyla ilgili çalışmalar ilk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesinde başlamıştır. Analizleri hızlı ve pratik yapacak şekil de geliştirilmiştir. Plaxis özellikle geoteknik problemlerde, deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş iki ve üç boyutlu sonlu eleman yazılımıdır. Karmaşık ve zor sonlu eleman modellerini hızlı bir şekilde çözümler ve sonuçları detaylı bir şekilde verir. Analiz edilecek yeni bir zemin için ilk önce geometri modeli oluşturulur. Bu model; noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan gerçek bir problemi temsil eder. Bir geometri modeli farklı zemin tabakalarını, yapısal elemanları, inşa aşamalarını ve yükleri kapsamalıdır.

Plaxis'de, zemin tabakalarının, yapısal elemanların, inşa aşamalarının, yüklerin ve sınır koşullarının, ara yüzey elemanların detaylı ve doğru verilerle modellenmesi gerekir.

İnşa aşamaları belli bir sırayı takip eder. Bir aşamanın verilerini eksik veya doğru girmeden program diğer aşamaya geçmez veya hata verir. Bir malzeme modeli, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren matematiksel denklemler grubu olarak tanımlanır. Tüm malzeme modelleri uygulanan gerilme-şekil değiştirme oranları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Plaxis yazılımı dört ana bölümden oluşmaktadır: Input (veri girişi), calculations (hesaplamalar), output (sonuçlar), curves (eğriler).

**INPUT (Veri Girişi):** Bu bölümde çizgiler ve noktalar yardımıyla problemin iki veya üç boyutlu geometrisi oluşturulur. Zemin tabakaları, etkiyen yükler, ara yüzeyler, hesaplama aşamaları, malzeme özellikleri ve başlangıç koşulları tanımlanmaktadır. Daha sonra sonlu elemanlar ağı (Generate mesh) oluşturulmaktadır. Plaxis yazılımı oluşturulan modelin sınır şartlarını otomatik olarak kendisi oluşturur. Zemin modelleri ve özellikleri, ara yüzeyler, yapısal elemanlar "Materialsets" mönüsünden yapılabilmektedir. Farklı malzeme modellerinden probleme uygun bir model seçilebilir. Zemin ve kazık malzemeleri için veri giriş pencereleri Şekil 6.1'de görülmektedir.




(a) (b)

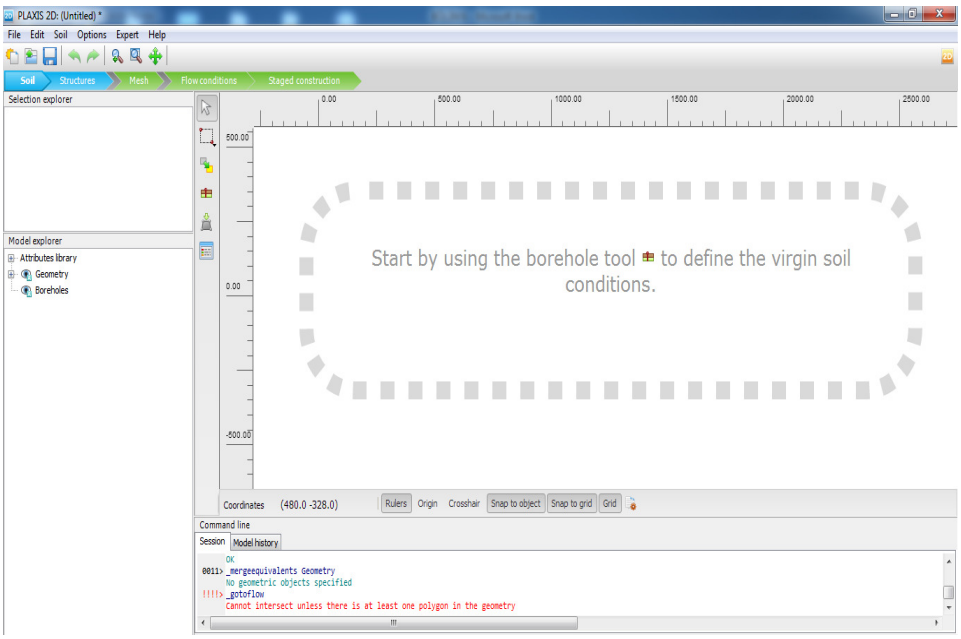
Şekil 6.1. Zemin ve yapısal elemanlar için veri giriş ekranları: (a) zemin (b) yapısal eleman

**CALCULATIONS (Hesaplamalar):** Bu bölüm, sonlu eleman hesaplamalarını ve yapım aşamalarını tanımlayarak gerekli hesapların yapımını başlatır. Burada esas amaç düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri ve gerilme noktalarındaki gerilme değerlerini hesaplamaktır. İlk önce problem modeli kendi ağırlığında yüklenmelidir. Böylece program otomatik olarak başlangıç koşullarındaki gerilme durumunu oluşturur. Yani model

geometrisinde önceden tanımlanmış olan tüm yapısal elemanlar ve yükler yok sayılır, sadece zemin tabakaları için hesaplama yapılır. Başlangıç koşullarındaki gerilme durumu ($K_o$) prosedürü veya ağırlık yüklemesi yöntemi olmak üzere iki şekilde hesaplanabilir. Diğer yapım aşamaları problemin özelliğine göre oluşturularak tanımlanır.

**OUTPUT (Sonuçlar):** Input bölümünde girilmiş olan veriler doğrultusunda eleman hesaplamalarının sonuçlarını listeler ve görüntülenmesini sağlar. Plaxis postprocessor, hesaplama sonuçlarını görüntülemek için gelişmiş grafik özelliklerine sahiptir. Zemin ve yapısal elemanların herhangi bir hesaplama kademesindeki deformasyonları, gerilmeler, yapısal elemanlar için moment ve kesme kuvvetleri hem şekil olarak hem de tablo şeklinde gösterilmektedir.

**CURVES (Eğriler):** Geometri modelinde önceden seçilen noktaların; yük-yer değiştirme, zaman-yer değiştirme, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin ve gerilme veya şekil değiştirme izlerinin çizilmesi için kullanılır. Bu eğriler, çeşitli hesaplama aşamalarında hangi değerlerin nasıl değiştiğinin görülmesine olanak tanır, zemin davranışı hakkında fikir verir. Zemin ve yapısal elemanlara ait farklı menülerin yer aldığı plaxis 2018 ana penceresi Şekil 6.2'de görülmektedir.




Şekil 6.2. Plaxis 2018 ana penceresi

## 6.1. Plaxis Yazılımında Başlıca Özellikler

### 6.1.1. Noktalar

Çizgilerin başlangıç ve bitişini oluştururlar. Aynı zamanda ankraj, noktasal bölgeleri belirlemede ve sonlu elemanlar ağında kullanılırlar.

### 6.1.2. Çizgiler

Çizgiler; oluşturulan model problem geometrisinin fiziksel sınırlarını, geometrideki farklı alanların süreksizliklerini, farklı zemin tabakalarını veya aşamalarını belirlemede kullanılır. Çizgilerin, oluşturulan geometriye göre farklı fonksiyonları ve özellikleri vardır.

### 6.1.3. Hücreler (kümeler)

Zemin tabakalarını ve yapısal elemanları oluşturan, etrafı çizgilerle tamamen kapatılmış bölgelerdir. Plaxis yazılımı hücreleri otomatik olarak algılamaktadır. Hücre içerisinde zemin veya yapısal elemanların özellikleri homojendir ve hücrelere gelen etkiler hücre içerisindeki bütün elemanlara etkir.

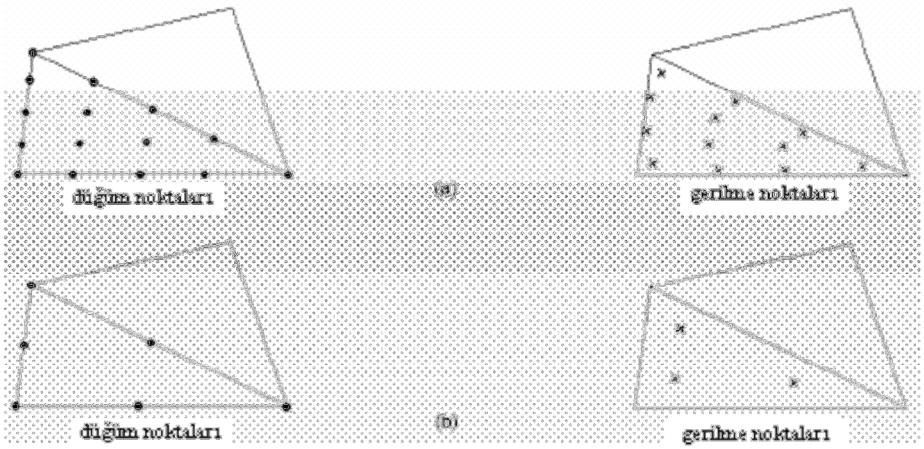
### 6.1.4. Elemanlar

Ağ oluşturulurken hücreler üçgen şeklindeki elemanlara bölünürler. Plaxis'de üçgen elemanlar 15 ya da 6 düğüm noktasına sahiptir. 15 düğüm noktalı elemanlar 6düğüm noktalı elemanlara göre daha detaylı ve daha esnek sonuçlar vermektedir, fakat hesaplamalar daha fazla zaman almaktadır.

### 6.1.5. Düğüm (nodes) ve gerilme noktaları (stresspoints)

Plaxis'de üçgen elemanlar 15 düğüm noktalı veya 6 düğüm noktalıdır. Yer değiştirmeler düğüm noktalarında, gerilmeler ise, özel Gauss noktasında hesaplanır. 15

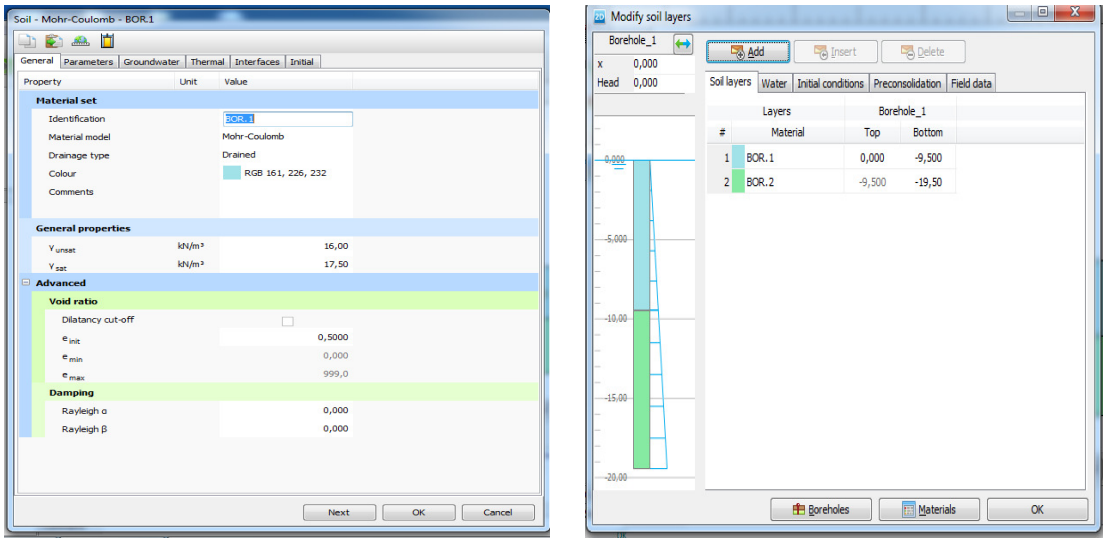
düğüm noktalı üçgen eleman 12, 6 düğüm noktalı üçgen eleman ise 3 gerilme noktasına sahiptir Şekil (6.3).




Şekil 6.3. Düğüm noktaları ve gerilme noktaları

### 6.1.6. Sondaj kuyuları (borehole)

Zemin yüzeyini, katmanları ve su tablasını belli bir konumda tanımlayan geometri modelindeki unsurlardır. Plaxis yazılımı otomatik olarak, katman ve zemin yüzeyi pozisyonlarını sondajlar arasında enterpolasyon yapar. Sondaj kuyularının sayısı ne kadar fazla olursa zemin gerçek özelliklerine o kadar yakın tanımlanmış olur. Zemin tabakalarını tanımlayan plaxis 'borehole' veri giriş ekranları Şekil 6.4'de verilmektedir.



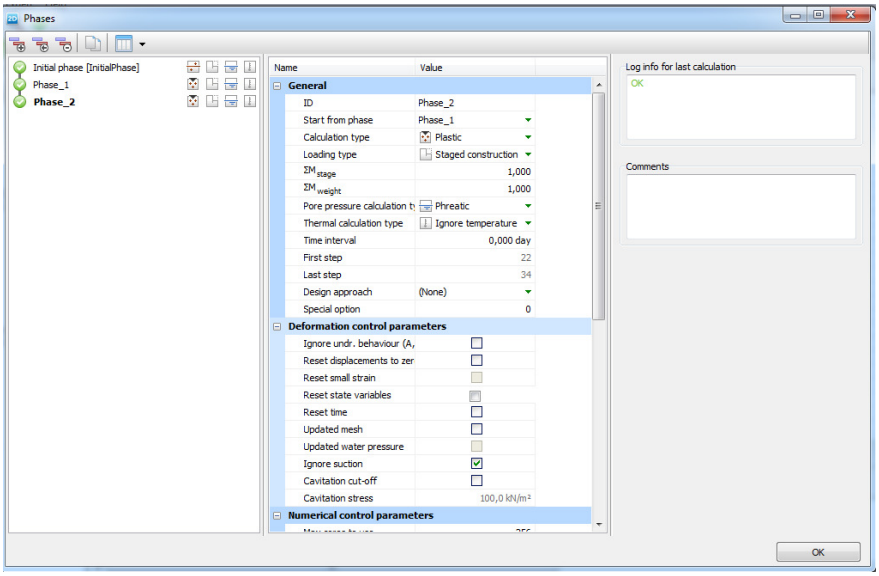

Şekil 6.4. Plaxis 2018 programında 'borehole' veri giriş ekranları

### 6.1.7. Zemin testleri

Plaxis'deki zemin testi seçeneği; verilen malzeme parametreleri ile seçilen zemin malzeme modelinin davranışlarını kontrol etmek için uygun bir prosedürdür. Model sonuçları ile gerçek zemin laboratuvar testlerinin sonuçları arasında en iyi uyumun elde edileceği şekilde model parametrelerini optimize etmek için kullanılabilir.

### 6.1.8. Aşamalı inşaat

Bu güçlü Plaxis özelliği, kümeleri (cluster) aktive ederek ve devre dışı bırakarak inşaat ve hafriyat işlemlerinin gerçekçi bir simülasyonunu sağlar. Bu prosedür gerilmelerin ve yer değiştirmelerin gerçekçi bir değerlendirmesini sağlar. Şekil 6.5'de faz oluşumları verilmiştir.




Şekil 6.5.Yapım aşamaları veri girişi

### 6.1.9. Sabit durum ve aşırı boşluk basınçları

Su seviyelerinin veya doğrudan su basıncı girdilerinin birleşimine dayanarak karmaşık boşluk basıncı dağılımları oluşturulabilir. Plaxis 2D içinde bir sabit durum yeraltı suyu akışı hesaplaması; sabit akış veya sızıntı içeren problemlerde boşluk basıncı dağılımını

hesaplamak için bir alternatif olarak geliştirilmiştir. PlaxFlow modülünde geçici akış ve tam bağımlı akış- deformasyon analizi mevcuttur.

Plaxis, model geçirgen kumlar ve geçirimsiz killerin çoğunda drenajlı ve drenajsız zeminler arasında ayırım yapar. Drenajsız zemin tabakaları yüklere maruz kaldığında aşırı boşluk basınçları plastik hesaplamalar sırasında hesaplanır. Drenajsız yükleme durumları genellikle geoteknik yapıların stabilitesi için belirleyicidir.

## 6.2. Plaxis Yazılımında Yapısal Elemanlar

### 6.2.1. Kirişler

Davranışları elastik veya doğrusal olmayan elasto-plastik olabilir. Tipik uygulamaları; duvar, plak, temel, kirişler ve yapısal kolonlardır. Kiriş elemanlar önceden tanımlanan eğilme momenti veya maksimum eksenel kuvvete ulaştığında plastik hale gelmektedirler. Plaxis programına eğilme rijitliği (EI) ve eksenel rijitlik (EA) değerleri ile atanırlar.

### 6.2.2. Geotekstiller (Geogridler)

Programda donatı malzemeleri, geogrid elemanlar ile modellenir. Plaxis'de geogridler özel gerilim elemanları kullanılarak simüle edilebilir. Geogridler; eğilme rijitliği çok düşük çekme dayanımları yüksek malzemelerdir. Bu elemanların davranışı, eksenel rijitlik ve maksimum gerilme kuvveti kullanılarak tanımlanır. Programa malzeme özelliği olarak sadece eksenel rijitlik (EA) değeri ile girilmektedir.

### 6.2.3. Ara yüzeyler

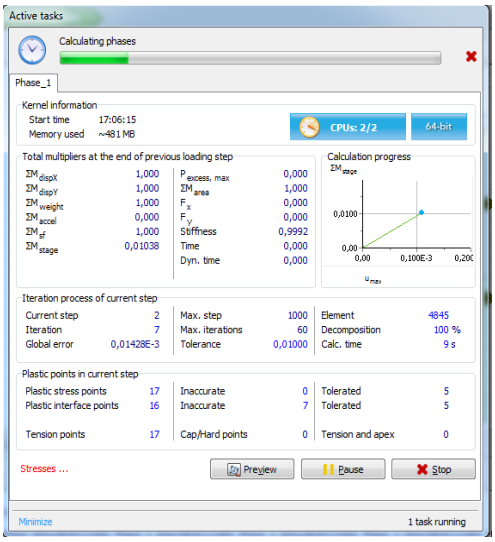
Yapı ile zemin veya donatı ile zemin arasındaki etkileşimi modellemek için ara yüzey elemanlar kullanılır. Ara yüzey elemanlar, yapısal elemanlar ile zemin arasında tam bir etkileşime olanak vermektedir.

### 6.2.4. Ankrajlar

Ankraj ve dikmeleri modellemek için elasto-plastik yay elemanlar kullanılır. Plaxis'de düğümden-düğüme ankrajlar ve sabit uçlu ankrajlar olmak üzere iki tip ankraj modeli vardır. Düğümden- düğüme ankrajlar hem çekme kuvvetlerine (ankraj) hem de basınç kuvvetlerine (yatay destek) maruz kalabilmektedir. Sabit uçlu ankrajlar ise tek bir noktanın bağlanmasını modelleyen yaylardır.

### 6.2.5. Yükler

Program farklı yüklerin ( nokta yükler, hat yükleri ve yayılı yükler) kullanımına imkan verir. Farklı yükler ve yük seviyeleri her inşaat aşamasında bağımsız olarak aktive edilmelidir. Yüklerin uygulanabilmesi için iki bağımsız yük sistemi kullanılabilir (A ve B). Nokta yükler (kN/m) geometri modelinde noktalar üzerine, yayılı yükler (kN/m$^2$) ise çizgiler üstünde uygulanmaktadır. Yükler yatay ve düşey bileşenler içerebilirler. Şekil 6.6'da yük ve hesaplama aşamaları görülmektedir.




Şekil 6.6. Yük ve hesaplama kademeleri

### 6.3. Plaxis Yazılımında Zemin Modelleri

Plaxis Programında, zemin davranışını modellemek amacıyla kullanılan dört farklı zemin modeli aşağıda kısaca açıklanmıştır.

### 6.3.1. Lineer elastik zemin modeli

Bu modelde, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu ve zeminin izotropik lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilir. Zemini tanımlamak için elastisite modülü ($E_s$) ve poisson oranı (ν)değerleri kullanılır. Bu model, kaya gibi rijit ve büyük zemin kütlelerini modellemek için daha uygundur. Genellikle, zemin içerisindeki rijit yapıları modellemek için kullanılır.

### 6.3.2. Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli

Sağlam ve basit doğrusal olmayan bu model, çoğu pratik durumlarda bilinen zemin parametrelerine dayanır. Elasto-plastik bir zemin modelidir. Bu modelde, zeminin elastisite modülü ($E_s$), poisson oranı (ν), kohezyonu (c), sürtünme açısı (Ø), dilatasyon açısı (Ψ), permabilite katsayıları gibi parametreler kullanılmaktadır. Zemin rijitliği için kullanılan $E_s$ parametresi, tüm zemin tabakaları için sabittir. İki farklı elastisite modülü kullanılabilir.

### 6.3.3. İleri zemin modelleri (**Hardeningsoil modeli**)

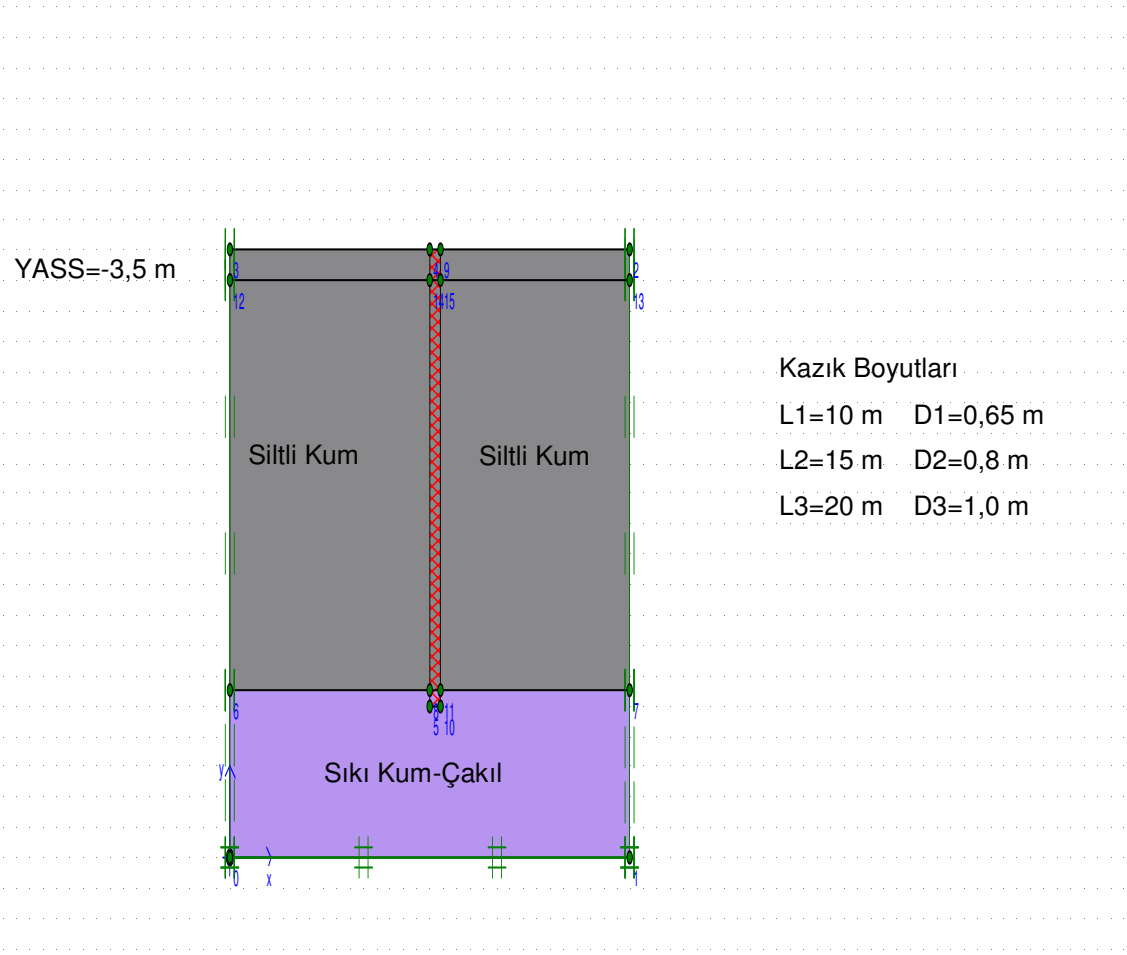
Farklı tipteki zemin davranışını modellemekte kullanılan bir zemin modelidir. Mohr-Coulomb modeline göre çok daha gelişmiş bir modeldir. MC modelde olduğu gibi gerilme seviyesi; kohezyon (c), sürtünme açısı (Ø) ve dilatasyon açısı (Ψ) ile sınırlandırılmıştır. Zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır.

### 6.3.4. Soft-soil-crep zemin modeli

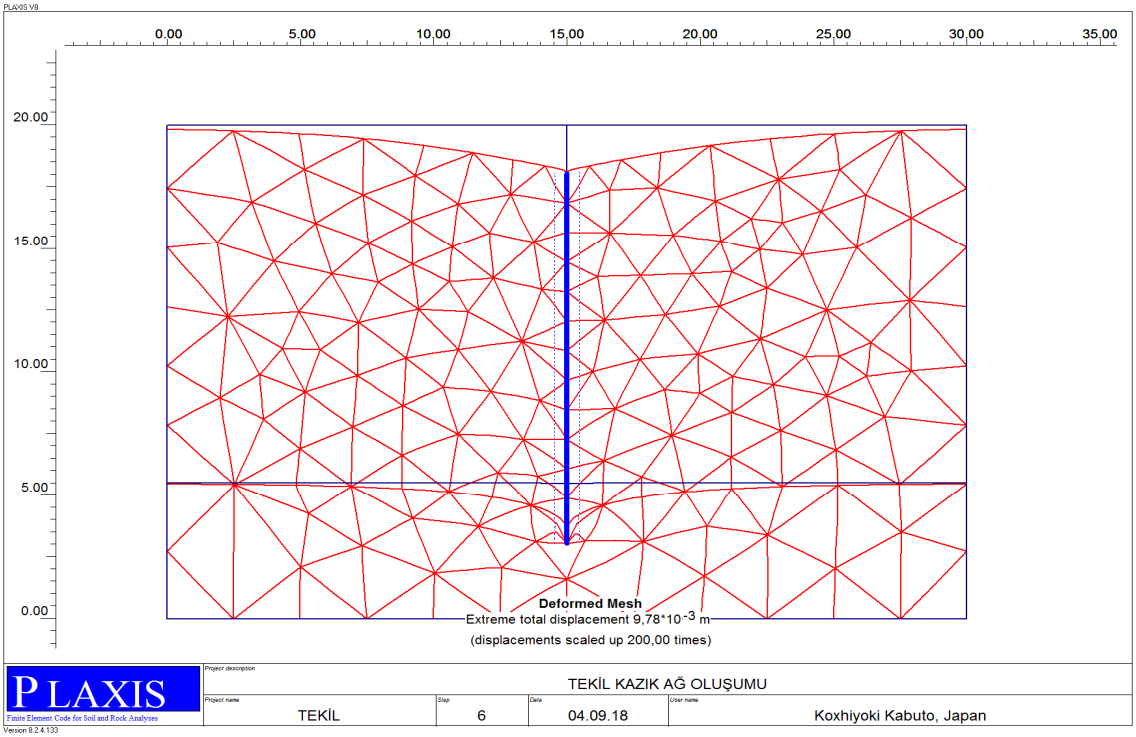
Bu model, konsolide killer, killi siltler ve turba gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır.

### 6.4. Plaxis Analiz Sonuçları

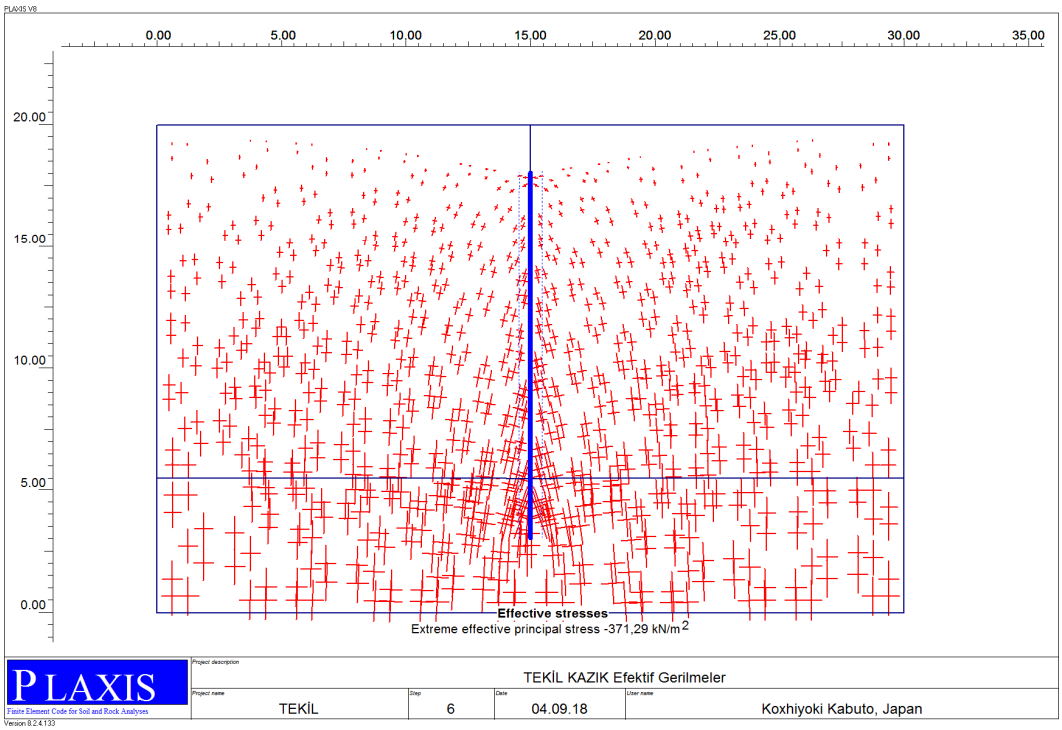
Bölüm 4'de ampirik yöntemlerle elde yapılan taşıma gücü ve oturma hesapları, aynı zemin profilinde (Şekil 6.7) aynı kazıklar ve malzemeler kullanılarak PLAXİS programı ile yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir.



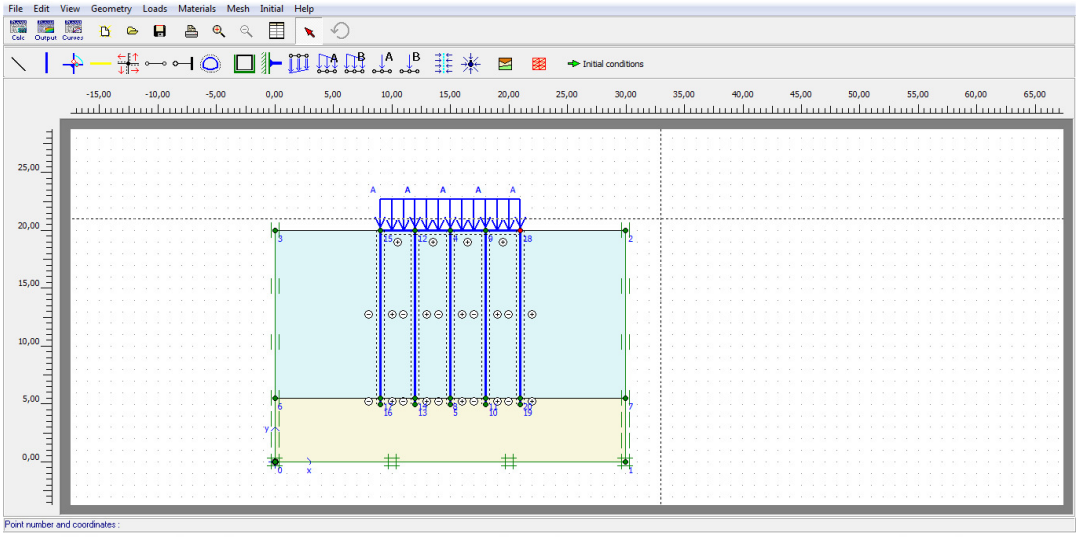

Şekil 6.7. Analizlerde kullanılan zemin profili (kazıklar sağlam zemine 0,5 m soketlendi)



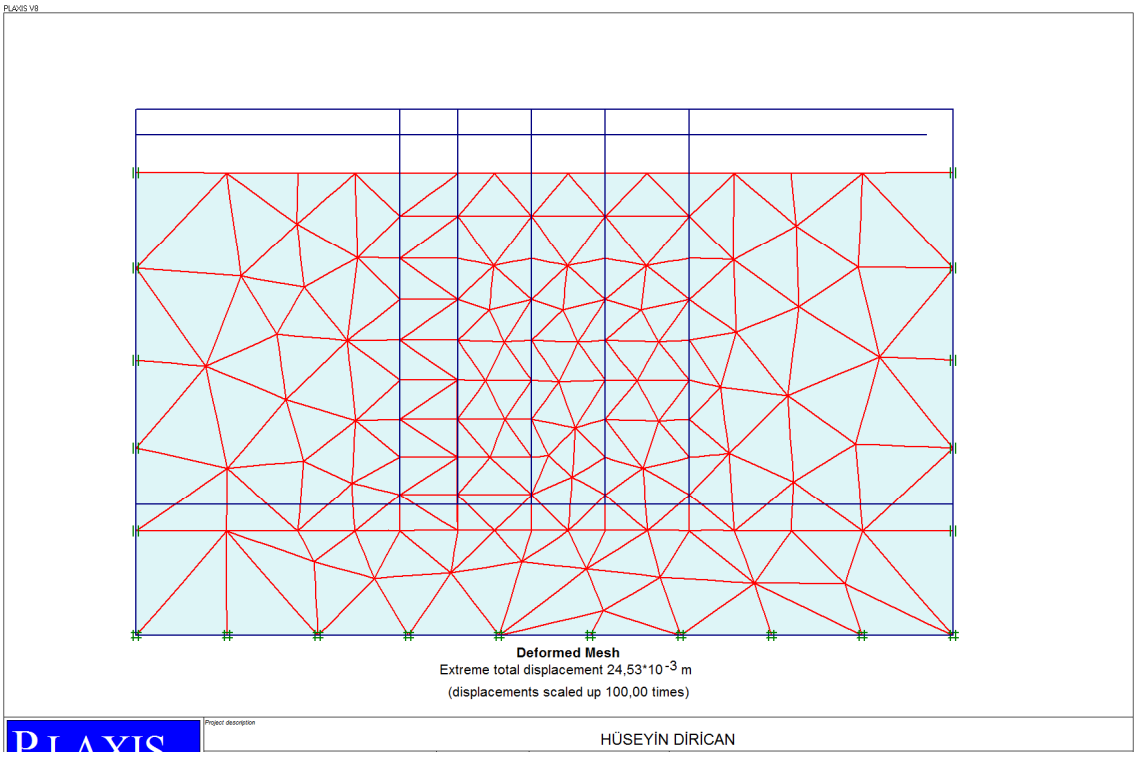

Şekil 6.8. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m tekil kazığında $Q_1$=10000 kN yük altındaki oturma



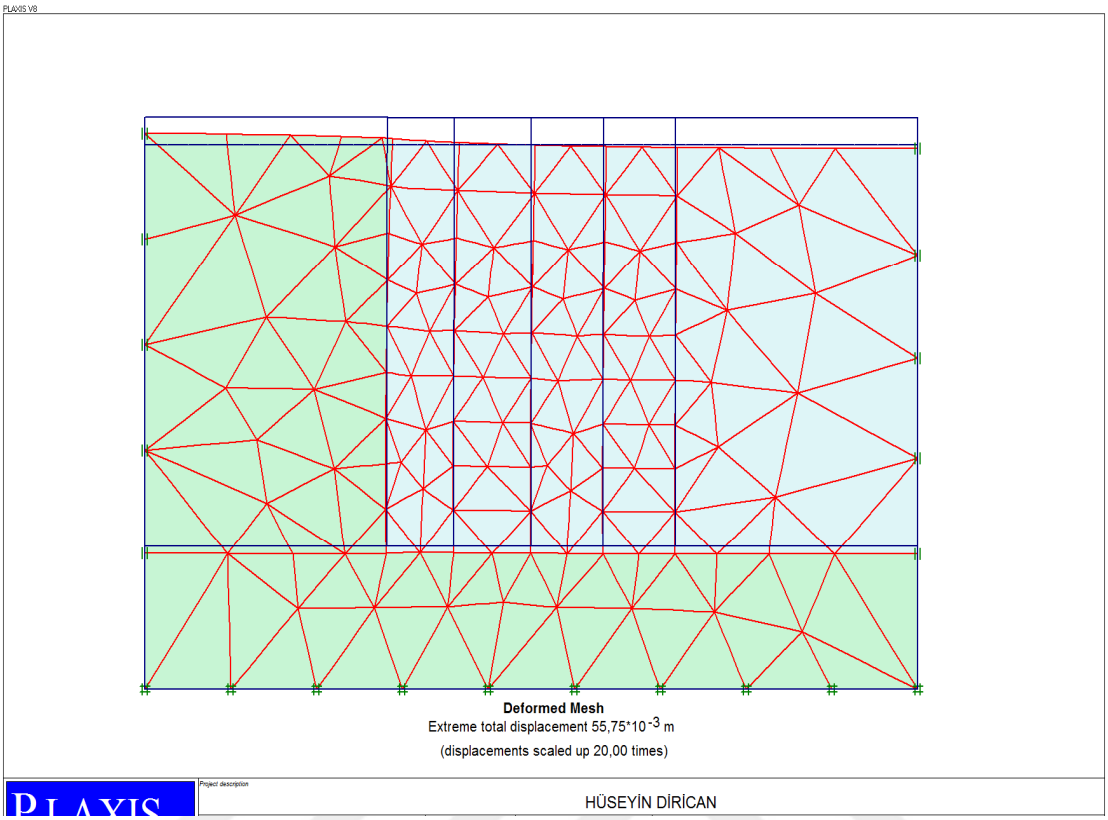

Şekil 6.9. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m tekil kazığında $Q_1$=10000 kN yük altındaki efektif gerilme




Şekil 6.10. Plaxis programında kazık gruplarının modellenmesi




Şekil 6.11. $L_2$=15 m $D_2$=0,80 m kazık gruplarında $Q_2$=20000 kN yük altında deforme ağ

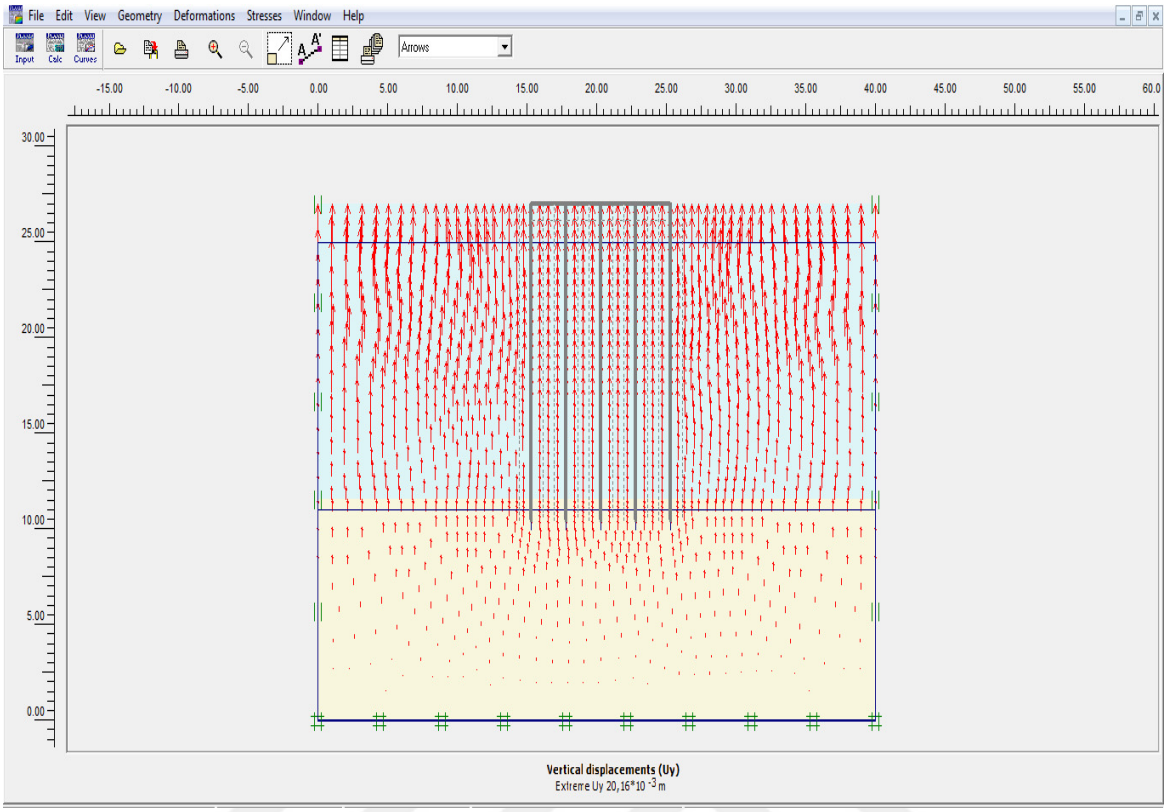



Şekil 6.12. $L_2$=20 m $D_3$=1,00 m kazık gruplarında $Q_3$=35000 kN yük altında oturma

Şekil 6.8. ve Şekil 6.9'dan görüldüğü üzere $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m tekil kazığının $Q_1$=10000 kN yük altında efektif gerilme 372 kN/m$^2$ ve düşey deformasyon 0,98 cm olarak bulunmuştur.

Şekil 6.10'da modellemesi yapılan $L_2$=15 m $D_2$=0,80 m ve d=2,8 m karelaj $Q_1$=20000 kN yük altındaki kazık grubunda oluşan deformasyon 2,45 cm hesaplanmıştır (Şekil 6.11).

Şekil 6.12'de $L_3$=20 m $D_3$=1,00 m ve d=2,8 m karelaj $Q_3$=35000 kN yük altındaki kazık grubunda oluşan toplam oturma miktarı yaklaşık 5,57 cm gerçekleşmiştir




Şekil 6.13. $L_1$=10 m $D_1$=0,65 m kazık gruplarında $Q_1$=10000 kN yük altında oturma

Şekil 6.13'de $L_1$=10 m $D_3$=0,65 m ve d=2,8 m karelaj $Q_1$=10000 kN yük altındaki kazık grubunda oluşan toplam oturma miktarı yaklaşık 2,00 cm olarak bulunmuştur.

Plaxis'de hesaplanan tekil ve grup kazıkların farklı yükler altındaki deformasyonları Bölüm 7'de çizelgelerde verilmiş ve ampirik çözümlerle karşılaştırılmıştır.

# 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında radye temel boyutları 13x13 m. olan ve üst yapı toplam yükü **$Q_1$=10000 kN', $Q_2$=20000 kN' $Q_3$=35000 kN** olan yapılar için, aşağıda özellikleri verilen zemin profili için kazıklı temel tasarımı yapılmıştır. Kazıkların yerleşimi yatay ve düşeyde d=2,8 m. karelaj (5x5) şeklinde olup 25 adettir.

Yapı yükünün **$Q_1$=10000 kN'** olması durumunda bir kazığa gelen yük**=10000/25=400 kN**
Yapı yükünün **$Q_2$=20000 kN'** olması durumunda bir kazığa gelen yük**=20000/25=800 kN**
Yapı yükünün **$Q_3$=35000 kN'** olması durumunda bir kazığa gelen yük**=35000/25=1400 kN**
(Toplam yükün kazıklara eşit olarak dağıtıldığı varsayılmıştır.)

Bölüm 4 de verilen tekil ve grup kazıkların taşıma gücü hesapları dikkate alındığında (Çizelge 4.7); Yapı yükünün $Q_1$=10000 kN olması durumunda seçilen kazık $D_1$=0,65 m ve $L_1$=10 m dir. Bu durumda tekil kazık taşıma gücü $Q_{all}$=567 kN ve grup kazık taşıma gücü ise 10773 kN dur. Benzer şekilde $Q_2$=20000 kN olması durumunda seçilen kazık $D_2$=0,80 m ve $L_2$=15 m dir. Bu durumda tekil kazık taşıma gücü $Q_{all}$=1180 kN ve grup kazık taşıma gücü ise 20945 kN dur. $Q_3$=35000 kN olması durumunda seçilen kazık $D_3$=1,00 m ve $L_3$=20 m dir. Bu durumda tekil kazık taşıma gücü $Q_{all}$=2342 kN ve grup kazık taşıma gücü ise 38057 kN dur (Çizelge 7.1).

Çizelge **7**.1. Yapı yüklerini karşılamak için seçilen kazık özellikleri

| **Yapı yükü (kN)** | **Bir kazığa gelen yük (kN)** | **Seçilen kazık özellikleri (m)** | **Tekil kazık taşıma gücü(kN)** | **Grup taşıma gücü (kN)** |
|---|---|---|---|---|
| $Q_1$ =10000 | 400 | $D_1$=0.65 $L_1$=10 | 567 | 10773 |
| $Q_2$ =20000 | 800 | $D_2$=0.80 $L_2$=15 | 1180 | 20945 |
| $Q_3$ =35000 | 1400 | $D_3$=1.00 $L_3$=20 | 2342 | 38057 |

Çizelge 7.1'de verilen yapı yüklerine karşılık seçilen kazık gruplarının oturma değerleri hem ampirik ifadelerle, hem de sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuştur. Bulunan bu değerler Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3'de sunulmaktadır.

Çizelge 7.2. Seçilen kazık gruplarının yapı yükleri altında meydana gelen oturma değerleri

| **Yapı yükü (kN)** | **Tekil Kazık İçin Elastik Oturma (cm)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Kazık Çapı (0,65 m) $L_1$=10m** | | **Kazık Çapı (0,80 m) $L_2$=15m** | | **Kazık Çapı (1,00 m) $L_3$=20m** | |
| | Plaxis Çözümü | Elle Çözüm | Plaxis Çözümü | Elle Çözüm | Plaxis Çözümü | Elle Çözüm |
| $Q_1$ =10000 | 0.98 | 1.06 | - | - | - | - |
| $Q_2$ =20000 | - | - | 1.47 | 1.68 | - | - |
| $Q_3$ =35000 | - | - | - | - | 2.67 | 2.38 |

Çizelge 7.3. Farklı çap ve boylardaki tekil ve grup kazıkların elastik oturmaları

| **Yapı Yükü (kN)** | **Kazık Boyutları** | | **Tekil Kazık Elastik Oturması (cm)** | **Kazık Yerleşim Planı (mxn)** | **Kazıkların Grup İçindeki Elastik Oturması (cm)** | **Plaxis Çözümü** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Çap (m)** | **Boy (m)** | | | | |
| 10000 | $D_1$=0,65 | $L_1$=10 | 1,06 | 5x5 | **1,53** | **2,00** |
| 20000 | $D_2$=0,80 | $L_2$=15 | 1,68 | 5x5 | **2,8** | **2,45** |
| 35000 | $D_3$=1,00 | $L_3$=20 | 2,38 | 5x5 | **4,66** | **5,57** |

Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3'den görüldüğü üzere ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanan oturma değerleri birbirine oldukça yakındır.

Aynı yapı yükleri, temel ve zemin özellikleri kullanılarak, temel altına jet-grout ile iyileştirme yapılması durumu içinde hesaplar yapılmıştır. Jet grout iyileştirmesinde, yapılan iyileştirme sonrasında zeminin sahip olacağı müsaade edilebilir taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. İyileştirilmiş ortamın müsaade edilebilir taşıma gücü; zemin taşıma gücü ve jet grout kolonu yük taşıma kapasitesi dikkate alınarak;

$$q_{all} = \left( \frac{q_a x A_1 + \sigma_{jg} x A_2}{A_1 + A_2} \right)$$

olarak yeniden hesaplanabilir. Ancak mevcut zeminin taşıma gücü değeri güvenli tarafta kalma amacıyla dikkate alınmamıştır.

Sahada yapılacak 2.8x2.8 m karelaj için örnek olarak bu değer;

$q_{all} = \left( \frac{401}{2.8x2.8} \right) = 51\,kPa$ dır. Yapıdan gelecek gerilme değerleri dikkate alındığında seçilen jet grout özellikleri Çizelge 7.3'de verilmektedir.

Çizelge 7.4. Jet grout ile yapılan iyileştirme sonuçları

| **Yapı yükü (kN)** | **Yapıdan gelecek gerilme değeri (q), (kPa)** | **Seçilen jet grout kolonu (m)** | **İyileştirilmiş zeminin taşıma gücü (kPa)** |
|---|---|---|---|
| $Q_1$ =10000 | 59 | $D_1$=0.65 $L_2$=15 | 83 |
| $Q_2$ =20000 | 118 | $D_2$=0.80 $L_2$=15 | 118 |
| $Q_3$ =35000 | 207 | $D_3$=1,00 $L_3$=20 | 200 |

Çizelge 7.4'den de görüleceği üzere, aynı yapı ve zemin özellikleri için kazıklı temel yerine jet grout uygulaması da tercih edilebilir. Ancak artan yapı yüklerinde jet grout uygulamasının yetersiz kaldığı görülmüştür. Bundan dolayı artan yapı yüklerinde jet grout karelajlarının azaltılması veya kazıklı temel uygulaması tercih edilmelidir.

# 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Derin temeller, olumsuz zemin şartlarında üst yapıdan gelen yüklerin zemine güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayan yapı elemanlarıdır. Statik ve dinamik yükler altında kazıklı temellerin davranışlarının belirlenmesi, taşıma gücü ve oturma analizlerinin yapılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Kazıklı temellerin tasarımı bu yöntemlerdeki kabullere, doğru yaklaşımlara ve sayısal çözüm sağlayan bilgisayar programı sonuçlarına bağlı olarak yapılmaktadır. Kazıklı temeller, üzerine inşa edilecekleri zemin özelliklerine, kazık malzemesine ve üst yapı yükünün uygulanış biçimine göre farklılıklar gösterir. Bu yüzden isteğe uygun temel tasarımı yapılarak hem güvenlik hem de ekonomi sağlanmalıdır. Zeminin emniyetle taşıyabileceği yükler, zemin profiline ve kazık tipine bağlı olarak hesaplanmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamında temel boyutları 13x13 m radye temel olan yapı için farklı yapı yükleri altında kazıklı temel tasarımları yapılmıştır. Tasarımda kullanılan zemin özellikleri kabul edilmiştir. Öncelikli olarak farklı çap ve boylardaki kazıkların bireysel taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Sonrasında sabit karelaj (2.8x2.8m) ve 5X5 yerleşimi için verimlilik hesapları yapılarak grup taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Bu değerlere göre; yapı yükünün 10000 kN olması durumu için 65 cm çapında 10 m boyunda, yapı yükünün 20000 kN olması durumu için 80 cm çapında ve 15 m boyunda, 35000 kN yapı yükü içinde 100 cm çapında ve 20 m boyunda kazıkların (2.8x2.8m) karelajla yerleştirilmesine karar verilmiştir. Tasarımı yapılan bu kazıkların farklı yapı yükleri altındaki oturma hesapları hem ampirik hem de sayısal analiz yöntemleriyle bulunmuş olup, bu değerler her iki yöntem için birbirine oldukça yakındır. Bilgisayar desteği ile sayısal çözümleme yapılırken sonlu elemanlar modeline dayanan Plaxis programı kullanılmıştır.

Aynı yapı ve zemin koşulları için, ikinci bir alternatif olarak zemin iyileştirme yöntemlerinden jet grout için tasarım hesapları da gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarımda yapı yükünün 10000 kN olması durumunda 65 cm çapında 15 m boyunda, yapı yükünün 20000 kN olması durumunda ise 80 cm çapında 15 m boyunda jet grout kolonlarının

(2.8x2.8m) karelajla yerleştirilmesi yeterli olurken, yapı yükünün 35000 kN olması durumunda 100 cm çapında ve 20 m boyunda jet grout kolonlarının yapısal dayanımından dolayı yetersiz kalmıştır. Bundan dolayı yapı yüklerinin büyük olduğu alanlarda kazık temel sisteminin seçilmesi gerekli olmaktadır. Ancak bu durum yapı yüklerine, temel boyutlarına ve özellikle zemin özelliklerine bağlıdır. Bundan dolayı, tasarım yapılırken mutlaka kazık temel tasarımı yanında iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet grout ile de tasarım yapılması ve ekonomik olan yöntemin tercih edilmesi gerekmektedir.

-Kazıklı temellerin tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken üç önemli unsur vardır; bunlar kazık taşıma gücü, oturma kriterleri ve ekonomikliktir. Yapılan çalışmada öncelikle bu üç özellik dikkate alınarak farklı kazık boyutları için aynı zemin ve yapı koşullarında tasarım hesapları yapılmıştır. Ayrıca ekonomiklik kıyaslaması için alternatif zemin iyileştirme hesap sonuçları da verilmiştir.

-Ampirik yöntemlerle farklı yapı yükleri altındaki kazıkların bireysel ve grup içindeki oturma miktarları belirlenip, kabul edilebilir yönetmelik sınırları dâhilinde olup olmadığına bakılmalıdır.

-Plaxis programında plak radye temelin genişliği gerçek boyut olarak alınırken, uzunluğu 1 metre kabul edilip şerit temel hesabı yapılmaktadır. Bu durumda radye temelin rijitliğinin bir miktar azaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle radye temel üzerine gelen yükün sadece tek doğrultuda taşındığı varsayımı ile sayısal analiz yapılmaktadır.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Afacan, K. B., Perde kazıkların düşey taşıma gücünün sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.

Birand, A., 2001. Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi, Ankara Bowles, J. E.,1998, Foundation Analysis and Design, Mc Graw Hill Book Company, New York

Çinicioğlu, S.F., 2005. Zeminlerde statik ve dinamik yüklemeler altında taşıma gücü ve anlayışı, İnşaat Mühendisleri Odası Semineri, İstanbul,19 Subat, s. 1-25.

Durgunoğlu H. T., 2004. "Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Melegary c., Garassıno A. L., 1997. "Seminar on Jet Grouting", CI-Premier Pte. Ltd.,Singapore.

Özkan, M.T.,2002. Yüzeysel ve Derin Temeller Ders Notları.

Plaxis 2D Tutorial Manual 2018, Plaxis 2D Reference Manual 2018, Plaxis Version 8 Tuturial Manual

Togrol, E. Tan, O.,2003, Kazıklı Temeller, BirsenYayınevi, İstanbul.

Tomlinson, M.J.,1993, Pile Design and Construction Practice, 4. Baskı, Chapman & Hall, London.

TS 3167, 1978, Kazık Temellerin Hesap ve Düzenlenmesinde Genel Kurallar, Ankara.

Turan, E., Yatay ve Düşey Yükler Altında Kazıklı Temel Dizaynı, Anadolu Üniversitesi, Lisans Tezi, Eskişehir (2003).

Turan, E., Tuncan, A., Tuncan, M. ve Arslan, G., 2006, Kazıklı Temellerin Statik Düşey Yükler Altındaki Davranışının incelenmesi, Zemin Mekanigi ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Yıldırım, M. Ş., Aksöz, H., Fore Kazıkların Ekonomik Boyutlandırılması Üzerine Bir Araştırma