İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLARDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Gürsu AKTAŞ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLARDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gürsu AKTAŞ
501011566

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Şubat 2006

Tez Danışmanı : Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)

Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Gerek tez konumun seçimi, gerekse çalışmalarım esnasında gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı Sayın Hocam Doç. Dr. Tuğrul ÖZKAN' a, desteğinden ve ilgisinden ötürü Sayın Hocam Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY' a, GeoGrup A.Ş. sahibi İnş. Yük. Müh. Müge İNANIR' a, Altyapı Mühendislik' ten İnş. Yük. Müh. Cenk BAŞESKİ' ye, Kasktaş A.Ş.' den İnş. Yük. Müh. Şenol ADATEPE' ye ve Arş. Gör. Müge BALKAYA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her aşamasında olduğu gibi tez çalışmalarım süresince de gösterdikleri anlayış ve destek için sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Şubat 2006 İnş. Müh. Gürsu AKTAŞ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **viii**
ÖZET **x**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1

2. KAZIKLI TEMELLER **2**
2.1. Kazıklı Temel Türleri 2
2.2. Kazık Tipi Seçimine Etkiyen Faktörler 3
2.3. Kazıklı Temellerin Dayanımı 4

3. KAZIKLARDA ÇEVRE SÜRTÜNMESİ **7**
3.1. Kil Zeminlerde Çevre Sürtünmesi 8
3.1.1. Yumuşak Kilde Çevre Sürtünmesi 8
3.1.2. Sert, Aşırı Konsolide Kilde Çevre Sürtünmesi 12
3.2. Kil Zeminlerde τ_s - c_u İlişkisi 14
3.3. Kohezyonlu Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar 16

4. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ **20**
4.1. Negatif Çevre Sürtünmesini Meydana Getiren Faktörler 21
4.2. Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Boyunca Dağılımı 22
4.2.1. Kaya Zemine Oturan Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi 22
4.2.2. Sıkışabilir Taşıyıcı Tabakaya Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi 24
4.2.3. Kil Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi 26
4.3. Negatif Çevre Sürtünmesi Problemi 27

5. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN HESAPLANMASI **28**
5.1. Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışmalar 28
5.1.1. Bjerrum' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması 28
5.1.2. Fellenius' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Deneyi 29
5.1.3. Terzaghi-Peck' in Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması 29
5.1.4. Meyerhof' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması 30
5.2. Negatif Çevre Sürtünmesi Hesap Yöntemleri 31
5.2.1. Kazıklarda Nötr Nokta 31
5.2.2. Negatif Çevre Sürtünmesi Örnekleri 35
5.2.2.1. Kohezyonsuz Zemin Üzerindeki Kohezyonlu Dolgunun Meydana Getirdiği Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı 35
5.2.2.2. Kohezyonlu Zemin Üzerindeki Kohezyonsuz Dolgunun Meydana Getirdiği Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı 36

5.3. Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltma Yöntemleri 38
5.3.1. Kazık Boyutları ile İlgili Hususlar 38
5.3.2. Kazık Yüzeyinin Kaplanması 40
5.3.2.1. Bjerrum' un Bitüm Kaplı Kazık Üzerindeki Çalışması 40
5.3.2.2. Brons, Amesz ve Rinck' in Çalışması 41
5.3.2.3. Claessen ve Horvat' ın Çalışması 41
5.3.3. Elektro-Osmosis Yöntemi 41

6. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN PLAXIS PROGRAMI İLE SİMULE EDİLMESİ 42
6.1. Plaxis' in Tanımı 42
6.1.1. Plaxis' in Genel Modelleme Özellikleri 43
6.2. Plaxis ile Yapılan Model ve Analizler 45
6.2.1. Genel Bilgiler 45
6.2.2. Zemin Parametreleri 45
6.2.3. Sonlu Elemanlar Ağı 47
6.2.4. Başlangıç Koşulları 47
6.2.5. Hesap Adımları 47

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49

KAYNAKLAR 52

EKLER 53
EK A 56
EK B 90
EK C 102
EK D 114

ÖZGEÇMİŞ 126

KISALTMALAR

API **:** American Petroleum Institute
CUR **:** Center For Civil Engineering Reserach&Codes
FEM **:** Finite Element Method
FS **:** Factor of Safety
SI **:** The International Systems of Units
M-C **:** Mohr-Coulomb

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 **:** ϕ' ye Bağlı Olarak Elde Edilen τ_s / c_u Oranı Değerleri..... 15

Tablo 3.2 **:** τ_s / c_u ve ϕ' Açısına Bağlı Olarak Elde Edilen δ ve n Değerleri..... 16

Tablo 5.1 **:** Kil Zeminde Negatif Çevre Sürtünmesi Değerleri..... 28

Tablo 5.2 **:** K.tanϕ_a' Değerleri..... 32

Tablo 6.1 **:** Yapılan Modele Ait Zemin Parametreleri..... 46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 : Kazık Yüzeyine Bitişik Zemin Elemanındaki Gerilmeler..... 8
Şekil 3.2 : σ_1'>σ_{vo}' Olması Hali..... 8
Şekil 3.3 : σ_v' = σ_{vo}' Olması Hali..... 9
Şekil 3.4 : $\delta<\phi$' ve σ_1' = σ_{vo}' Olması Hali..... 10
Şekil 3.5 : σ_v' = σ_{vo}' Olması Hali..... 11
Şekil 3.6 : $\delta>\phi$' ve σ_v' = σ_{vo}' Olması Hali..... 13
Şekil 3.7 : σ_3' = σ_{vo}' Olması Hali..... 13
Şekil 3.8 : Yumuşak Kil Zeminlerde τ_s - c_u Arasındaki İlişki..... 14
Şekil 3.9 : Sert Kil Zeminlerde τ_s - c_u Arasındaki İlişki..... 15
Şekil 3.10 : Adezyon Faktörü İçin Tasarım Eğrileri..... 18
Şekil 3.11 : Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Kazığın Toplam Taşıma Kapasitesi..... 19
Şekil 4.1 : Sıkışabilir Tabakada Meydana Gelen Negatif Çevre Sürtünmesi... 20
Şekil 4.2 : Sıkışmaz, Sağlam Tabakaya Oturan Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı..... 23
Şekil 4.3 : Taşıyıcı Tabakaya Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı..... 25
Şekil 4.4 : Sıkışabilir Kil Zemin Üzerine Bir Dolgu Serildikten Sonra Teşkil Edilen Kazık Üzerindeki Negatif Çevre Sürtünmesi..... 26
Şekil 5.1 : Negatif Çevre Sürtünmesi Problemi..... 30
Şekil 5.2 : β Katsayısının Penetrasyon Derinliği ile Değişimi..... 31
Şekil 5.3 : Kazıktaki Nötr Noktaya Göre Çevre Sürtünmesi Dağılımı..... 32
Şekil 5.4 : Uç Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi..... 33
Şekil 5.5 : Sürtünme Kazığında Negatif Çevre Sürtünmesi 33
Şekil 5.6 : Nötr Noktaya Göre Kazık Üzerindeki Negatif ve Pozitif Çevre Sürtünmelerinin Teorik Gösterimi..... 35
Şekil 5.7 : Kohezyonlu Dolgu Zemindeki Negatif Çevre Sürtünmesi Sürtünmelerinin Teorik Gösterimi..... 36
Şekil 5.8 : Kohezyonsuz Bir Dolgu Zemin Altındaki Kohezyonlu Zemin Tabakasında Meydana Gelen Negatif Çevre Sürtünmesi..... 37
Şekil 5.9 : Uç Kazıklarında Negatif Sürtünmeden Kaynaklanan Hasarın Sürtünme Kazığı ile Önlenmesi..... 39
Şekil 5.10 : Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması.. 39
Şekil 6.1 : Düğüm Noktaları ve Gerilme Noktaları..... 45

SEMBOL LİSTESİ

τ_s : Çevre sürtünmesi
σ_{vo}' : Kazığın varlığı dikkate alınmadan hesaplanan efektif üst tabaka gerilmesi
σ_v' : Efektif düşey gerilme
σ_h' : Efektif yatay gerilme
σ_1' : Efektif büyük asal gerilme
σ_3' : Efektif küçük asal gerilme
K_o : Sükunetteki yatay toprak basıncı katsayısı
δ : Kazık ile zemin arasında sürtünme açısı
ϕ' : Efektif kayma mukavemeti açısı
n : Efektif yatay gerilmenin efektif düşey gerilmeye oranı
Q_{ult} : Kazığın toplam taşıma kapasitesi
Q_b : Kazığın toplam uç direnci
Q_s : Kazığın toplam çevre sürtünme direnci
N_c : Taşıma kapasitesi faktörü
c_b : Kazık ucundaki örselenmemiş zemine ait drenajsız kohezyon
A_b : Kazık ucu kesit alanı
α : Adezyon faktörü
s : Şekil faktörü
c_u : Kazık çevresindeki örselenmemiş zemine ait ortalama drenajsız kohezyon
A_s : Zemin içindeki kazık yüzeyi alanı
τ_a : Zemin-kazık arası kayma gerilmesi limit değeri
c : Kazık çevresi (π.d)
c_a' : Drenajlı kazık-zemin adezyonu
K_s : Yatay toprak basıncı katsayısı
σ_v' : Efektif düşey gerilme
ϕ_a' : Kazık-zemin arasındaki (drenajlı) sürtünme açısı
β : Sert killerdeki çakma kazıklarda, negatif çevre sürtünmesi ile ilgili katsayı
β_{NC} : Normal konsolide killerde negatif çevre sürtünmesi ile ilgili katsayı
OCR : Aşırı konsolidasyon oranı
γ : L_f derinliğindeki, kazık grubu içindeki zeminin birim hacim ağırlığı
A : Kazık grubu alanı
f_s : Kazık grubu çevresine etkiyen birim çevre sürtünmesi
P_g' : Kazık grubu çevresi
q : z derinliğinde efektif üst tabaka gerilmesi
α : (q.K) ile ilgili katsayı
K : Yatay toprak basıncı katsayısı
q : z derinliğindeki efektif jeolojik yük
Q_{nf} : Negatif çevre sürtünmesi
L_1 : Nötr noktaya olan uzaklık
γ_{unsat} : Kuru birim hacim ağırlık
γ_{sat} : Islak birim hacim ağırlık

$\mathbf{k_x}$ **:** x yönünde permeabilite
$\mathbf{k_y}$ **:** y yönünde permeabilite
$\mathbf{E_{ref}}$ **:** Young modülü
$\boldsymbol{\nu}$ **:** Poisson oranı
c **:** Kohezyon
$\boldsymbol{\psi}$ **:** Dilatansi açısı
$\mathbf{R_{inter}}$ **:** Ara yüzey katsayısı

ÖZET

Güvenli ve ekonomik bir temelin inşaasına izin vermeyen zeminlerde, kazıklı temel sisteminin seçilmesi gerekmektedir. Kaya ve benzeri sağlam zemine oturan kazıklar "uç kazığı" olarak isimlendirilir. Ancak, taşıyıcı tabakanın derinde olması halinde kazık "sürtünme kazığı" olarak inşa edilir ve üst yapı yükleri çevre sürtünmesi ile taşınır. Uç kazıklarında, kazığın oturması söz konusu olduğundan negatif çevre sürtünmesi kazık boyunca meydana gelmesine karşın, sürtünme kazıklarında kazığın bir miktar oturma yapması, kazığın alt kısmında meydana gelen negatif çevre sürtünmesinin yok olmasına neden olur.

Zemin profilinde yer alan yumuşak kil veya gevşek dolgu tabakalarının kazığın taşıma kapasitesine fazlaca bir katkısı beklenmemelidir. Tam aksine, söz konusu tabakaların kendi ağırlıkları veya zemin yüzeyine uygulanacak ilave yükler altında konsolide olmaları halinde kazık-zemin yüzeyinde oluşan pozitif çevre sürtünmesini negatif çevre sürtünmesine dönüştüren tesirler oluşur. Kazıkların dizaynı yapılırken bu ilave düşey yükler de göz önüne alınmalıdır.

Sıkışabilir kohezyonlu bir zemin üzerine, kohezyonsuz bir dolgunun serilmesi halinde, dolgu zeminde düşey yönde sıkışma olmasına rağmen gerçek negatif çevre sürtünmesi, kazığın sıkışabilir tabaka içinde kalan şaftı boyunca meydana gelir. Ayrıca yeraltı su seviyesinin düşerek zeminde oturmaya sebep olması, negatif çevre sürtünmesi problemini de beraberinde getirir.

Negatif çevre sürtünmesi aşağıda belirtilen dört ana faktöre bağlıdır:

a. Kazık özellikleri: Cins, uzunluk, enkesit, yüzey durumu, yerleştirme metodu, vb.
b. Zemin özellikleri: Zemin cinsi, gerilme tarihçesi, sıkışabilirlik, tabaka kalınlığı, taşıyıcı tabakanın kıvamı ve cinsi, vb.
c. Zemin hareketlerinin sebepleri
d. Kazıkların yapım süresi

Yapılan bu tezin ilk bölümünde tez konusu olan kazıklarda negatif çevre sürtünmesi hakkında genel anlamda bilgi verilirken, Bölüm 2' de kazıklı temel türleri ve kazık tipi seçimine etkiyen faktörler incelenmiş ve kazıklı temellerin dayanımı üzerinde durulmuştur.

Bölüm 3' te, kazıklarda çevre sürtünmesi ele alınmış, özellikle kil zeminlerde çevre sürtünmesi irdelenmiş ve kohezyonlu zeminlerde teşkil edilen kazıklar hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4' te, negatif çevre sürtünmesini meydana getiren faktörler ve negatif çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımı üzerinde durulmuş, negatif çevre sürtünmesi problemi konu edilmiştir.

Bölüm 5' te, çeşitli bilim adamlarının negatif çevre sürtünmesi ile ilgili çalışmalarından, negatif çevre sürtünmesi hesap yöntemlerinden ve bu etkiyi azaltmak için yapılan deney ve çalışmalardan bahsedilmiştir.

Bölüm 6’ da, tek bir kazık üzerine gelen negatif çevre sürtünmesinin sonlu elemanlar programı PLAXIS kullanılarak hesaplanması üzerinde durulmuş ve Bölüm 7’ de yapılan bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

A STUDY ON THE PILE NEGATIVE SKIN FRICTION

SUMMARY

Piles are generally reguired for supporting structures resting on deep fills or soft soils. End-bearing piles are driven through fill into a suitable bearing stratum such as hard cohesive soil or base rock. Friction piles are prefered in some cases where there is no bearing stratum. Therefore, end-bearing piles and so-called floating piles (friction piles) exhibit different behaviour. Tip resistance contitutes the significant part of the bearing capacity in end-bearing or rock-socketed piles. Whereas, the skin friction has the greater main component of ultimate bearing capacity is the skin friction mobilized between the pile surface and soil along the pile shaft. Piles are designed in a way that the skin friction acts as a reaction to the superstructure loads effecting on the pile head. This skin friction is defined as "positive skin friction".

In some cases where there are compressible and consolidating soil layers in the soil profile, positive skin friction may gradually reduces and finally becomes negative skin friction. The downward movement of soil layers around the piles result s in drag-drow forces thus applying additional downward vertical forces on the pile which in some cases would have not been considered in the design.

When a fill is placed over a compressible natural soil or the compressible stratum consolidates by some causes such as the such as lowering of the ground water level the soil around the pile move downwards and negative skin friction occurs along the pile shaft. If a pile is driven through compressible soils before these layers have completed the primary consolidation under the effective stress increase the the settlement of these compressible layers would certainly lead to the generation of drag-down forces. As it is stayed previously, the settlement of the soft soil layers around the pile and the lowering of the ground water level are the major reasons of the negative skin friction.

The magnitude of the drag-down forces in a pile depends on some general factors:

a. Pile characteristics: Type, length, shape of pile section, surface treatment, installation method, etc.
b. Soil characteristics: Type, strength, compressibility, depth and thickness of layers, stiffness of bearing stratum, etc.
c. Cause of soil movement
d. Time since installation of pile.

In this thesis, after the first chapter which introduces the problem, the skin friction of piles is investigated in general, in Chapter 2, the types and resistance of piles and the factors of pile' s selection is mentioned.

In Chapter 3, stress conditions in a soil element adjacent to the pile shaft is studied and Mohr-Coulomb failure envelopes are given for different stress conditions.

In these analysis, normally consolidated and over-consolidated clays are considered separately. It is emphasized that the amount of friction angle mobilized or assumed between the soil and the pile material highly affects the stress the stress conditions and the mobilized positive skin friction. The general static formula for ultimate pile capacity is also studied in this chapter.

Negative skin friction problem is studied in Chapter 4, piles characteristics and soil properties those affecting and soil properties those affecting the negative skin friction are reported. The distribution of negative skin friction along the pile shaft for the piles resting on a non-compressible stratum and piles terminating in a compressible soil layer are investigated. Idealized diagrams of negative skin friction given in the literature are also included in this study.

Chapter 5 deals with the calculation of negative skin friction forces. Methods proposed by Bjerrum, Fellenius and Terzaghi-Peck are outlined. Techniques available to reduce the drag-down forces are explained in detail. The significance of neutral point on the magnitude of drag-down forces is also emphasized.

In Chapter 6, negative skin friction in single piles is analyzed with using PLAXIS, finite element program and in Chapter 7, conclusions are evaluated.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde şehirlerde yapılaşmanın artmasıyla birlikte, daha önceden olduğu gibi problemsiz yerleşim alanı bulmak oldukça güçleşmiştir. Buna bağlı olarak, taşıma gücü açısından sorunlu zeminlerde inşaat yapma zorunluluğunun oluşması ve küçük arazilerden mümkün olduğu kadar fazla yararlanma amacıyla yapılan yüksek yapıların getirdiği ağır temel yükleri, kazıklı temellerin önemi gittikçe artırmaktadır.

Yüzeysel temel sisteminin üst yapı yüklerini güvenle taşıyamadığı ve aşırı oturmaların söz konusu olduğu durumlarda üst yapı yüklerinin, kazıklı temellerle taşıma kapasitesi yüksek zemin tabakalarına aktarılması gerekir. Betonarme, çelik veya ahşap olabilen kazıkların birinci görevi üst yapıdan gelen yükleri, derinlerdeki taşıyıcı tabakaya iletmektir. Kaya ve benzeri sağlam zemine oturan kazıklar "uç kazığı" olarak isimlendirilir. Ancak taşıyıcı tabakanın derinde olması halinde kazık "sürtünme kazığı" olarak inşa edilir ve üst yapı yükleri çevre sürtünmesi ile taşınır.

Henüz konsolidasyonunu tamamlamamış zeminlerde teşkil edilen kazıklar, taşıması gereken üst yapı yükünün yanısıra, zeminin oturmasıyla ve adezyonun etkisiyle, çevresindeki zemini de taşımak zorunda kalır. Kazığın taşımak zorunda olduğu bu ekstra yük, "negatif çevre sürtünmesi" olarak isimlendirilir. Kazıkların projelendirilmesi sırasında, zeminin yumuşak ve henüz konsolide olmadığı saptandığı zaman, kazığın taşıma gücüne olumsuz etki yapan negatif çevre sürtünmesi değerinin net olarak hesaplanması gerekmektedir.

Bu tezde, kazıklarda negatif çevre sürtünmesinin nasıl ve nerede meydana geldiği incelendikten sonra, çeşitli bilim adamlarının bu etkiyi saptamak ve azaltmak için yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalar konu edilmiştir. Tezin ana konusu ise, PLAXIS adı verilen sonlu elemanlar programında, tek bir kazık üzerine gelen negatif çevre sürtünmesinin değişik kazık çapları ve değişik kil tabakası kalınlıkları için hesaplanmasıdır.

2. KAZIKLI TEMELLER

Taşıyıcı tabakanın çok derinde olduğu ve yüzeysel temellerin ekonomik olmadığı durumlarda kazıklı temellerin uygulanması tercih edilen bir çözümdür.

Kazıklı temellere olan ilgiyi anlamak için tarihi gelişimlerini incelemek uygun olur. Kazıkların tasarımı ve imal yöntemleri temel mühendisliğinin karmaşık, fakat ilgi çekici ve kazançlı bir bölümüdür. Prehistorik yerleşim merkezlerinin desteklenmesi için kullanılan kazıklar Lucern Gölü' nde bulunmuşlardır ve benzer yapılar Yeni Gine gibi ilkel yerlerde de halen ayakta durmaktadırlar. Sezar, Ren Nehri boyunca bir kazıklı köprü inşa ettirmiştir. 1902' te Venedik' te Campanile yıkıldığında M.S. 900 yılında çakılan suya batmış kazıkların iyi durumda oldukları görülmüş ve tekrar kullanılmışlardır. Bizden öncekiler, bu kazıkları el tokmakları, elle kumanda edilen makineli tokmaklar, dişli çark vinci şahmerdanları, ayak değirmeni çakıcılar, su tekeri çakıcıları ve ekip kumandalı şahmerdanlarla çaktılar.

Modern kazık çakımı 1845' te Nasmyth tarafından icat edilen ilk buharlı kazık çakıcılarla başladı ve o zamandan bu yana da tek başına hareket eden buharlı çekiçler gelişti. Bu konu üzerine literatür, 1893' te, Engineering News' te Wellington tarafından yayınlanan ve içinde herkesin bildiği Engineering News formülünün de bulunduğu "Kazıklar ve Kazık Çakımı" adlı eserle başlar. Bu formül ilk önce ahşap kazıklar ve düşen çekiçler için geliştirilmişse de, daha sonra tek başına hareket eden çekiçlere göre değiştirilmiştir. Eğer bazı modern çekiçler ve kazık tipleri için kullanılırsa sonuçlar çok güvenli ve ekonomik olmayabilir. Ağır metal ve beton kazıklar için kazık boyları, kazık başları gibi değişkenleri hesaba katmaya yönelik birçok başka anlaşılabilir dinamik formül önerilmiştir. Bunların en kullanışlısı Hiley formülüdür [1, sf. 633].

2.1. Kazıklı Temel Türleri

Amaçları ve uygulama yöntemleri birçok farklı kazık türünün bulunması kazıkların sınıflandırılması konusunu karmaşık bir hale sokmaktadır.

Kazıklar uygulama amacına göre;

- Uç kazıkları
- Sürtünme kazıkları
- Çekme kazıkları
- Ankraj kazıkları
- Kompaksiyon kazıkları
- Eğik kazıklar

İmal edildiği malzemeye göre;

- Ahşap kazıklar
- Betonarme kazıklar
- Kompozit kazıklar (Genellikle alt kısmı ahşap veya çelik, üst kısmı beton)
- Çelik kazıklar

Kazık yer değiştirmesine göre;

- Geniş yer değiştirme kazıkları (İnşaasında zemini yana iterek yer değiştirmesine sebep olan tüm hazır, çakma ve yerinde dökme kazıklar)
- Küçük yer değiştirme kazıkları (H veya I kesitli veya açık uçlu boru çelik kazıklar ya da burgu kazıklar)
- Yer değiştirmeme kazıkları (Geleneksel yerinde dökme kazıklar veya muhafaza borusu yardımıyla betonlanan kazıklar)

olarak sınıflandırılabilir.

2.2. Kazık Tipi Seçimine Etkiyen Faktörler

Herşeyden önce ekonomi önemlidir. Kazık boyuna, boyların eşit veya değişken oluşuna, boyların değişken olması durumunda uygulanabilirliğe dikkat etmek gerekir. Örneğin, zemin alt tabakalarından doğacak oturmaların ihmal edilebileceği durumlarda, kazıkların taşıyıcı zemin içinde kalan boylarını farklı biçimde imal etme büyük ekonomi ve kolaylık sağlar. Benzer olarak, çakma kazıkların taşıyıcı zemin içinde kalan kısmına ait uygulanan çakma enerjisi ve süre ekonomiyi önemli

miktarda etkiler. Ayrıca kazık başının zedelenmesi, zemin içinde kırılmaların meydana gelmesi bu bölüm içinde meydana gelmektedir. Yerinde dökme kazıkların foraj masrafları, kaplama borusunu sürme ve çekme zorlukları yine taşıyıcı tabaka içindeki boyları ile değişmektedir.

Kazık tipi seçimine etkiyen bir diğer faktör ise mevcut zemin şartlarında her kazık türünün taşıyacağı yüktür.

Projenin zamanında gerçekleştirilebilmesi için kazıkların zeminde teşkilinde kolaylıkları, imalat hızları, hazırlanma hızları veya çakılma hızları göz önüne alınarak bir tercih yapılmalıdır.

Kazık tipi, çakma şartlarına ve yöntemine uygun olmalıdır. Buna örnek olarak çevrede vibrasyon oluşumunun istenmediği durumlarda yerinde dökme kazıkların çakma kazıklara tercihi ve yüksekliğin kısıtlı olduğu durumlarda Tubex kazıkların diğerlerine tercih edilmesi verilebilir [2].

Yapılacak tercihte dikkate alınacak diğer hususlar; kazık başlarının kolay kesilmesi veya uygun olarak emniyete alınması, gerekirse kazık sayısının artırılabilme özelliği, eski yapıya ilave yapılması halinde önceden yapılmış kazıkların tipi, eğik kazık gerektiği zaman kazığın belli açıda teşkil edilebilme kolaylığı, uygulanacak tip için yüklenici ve işverenin tecrübesi gibi maddelerdir.

2.3. Kazıklı Temellerin Dayanımı

Kazıklı temeller agresif ortamlarda hızlı bir şekilde tahrip olabilirler. Agresif etkenler zeminde doğal olarak oluşan sülfat ve klor iyonu, dolgu malzemesindeki endüstri atıklarında bulunan korozyon oluşturucu maddeler, bitkilerin bozunması sonucu yeraltı suyunda bulunan organik asit veya erimiş karbondioksit olabilir. Çelik kazıklarda korozyon genellikle deniz ortamında gelişir. Hava, oksijen ve su korozyonu besleyen ana unsurlardır; fakat oksijen olmadığı durumlarda sülfat azaltıcı bakterilerin etkisi ile korozyon oluşabilir. Bunlar genelde relatif olarak geçirgen silt ve killerde veya nehir yataklarındaki kirlenmiş sularda oluşur.

Zemindeki sülfat etkisinin ana mekanizması, beton kazıkların çimento karışımlarındaki hidrate olmuş kalsiyum alüminatın, kalsiyum sülfo alüminat şekline dönüşmesinden kaynaklanır. Bu reaksiyon minerallerinin moleküler hacimlerinin

artmasına, bunun sonucu olarak da sertleşmiş betonda bir genişlemeye ve bütünlüğün bozulmasına yol açmaktadır. Zeminlerde doğal olarak bulunan sülfatlar kalsiyum, sodyum ve magnezyum elemanlarına aittir. Magnezyum sülfat bunların içinde en zararlı etkiye sahip olanıdır. Çimentoya ciddi biçimde etki eden amonyum sülfat genelde gübre olarak kullanılır.

Amonyum sülfat havagazı üretiminin bir yan ürünüdür ve gaz çalışmalarının olduğu bölgelerde bulunabilir. Eriyebilir sülfatların tüm etkisi yalnızca yeraltı suyu içerisinde meydana geleceğinden, sülfatların içerikleri ve zeminin tüm sıvı birimlerindeki değişik katyonların oranları dikkatle incelenmelidir. Bu çalışmalar özellikle zemindeki sülfat konsantrasyonunun %5' i geçtiği durumlarda yapılır.

Bazı şeylli ve turbalık zeminlerde piritlerin oksidasyonuna bağlı olarak doğal zeminde ya da yeraltı suyunda sülfirik asit oluşabilir. Bu olay bakırın işlendiği ve boyama işlemlerinin yapıldığı fabrikalardan akan sızıntılardan da kaynaklanabilir.

Sıkı ve iyi kompaksiyon yapılmış bir beton, beton kazıklarda ve kazık başlarında sülfat etkisine karşı en etkin korumayı sağlar. Buna bağlı olarak zararlı etkilerin giderilmesinde yüksek mukavemetli hazır beton kazıklar kullanılması tavsiye edilir. Eğer bazı nedenlerden dolayı hazır kazık kullanılamıyorsa, yerinde imal edilen delgi ve çakma kazıklar için kullanılan karışımlar zararlı etkilere karşı yeterli mukavemeti ve geçirimsizlik düzeyini sağlayacak biçimde tasarlanmalıdır.

Süpersülfat çimentoların kullanımı, sülfat içeren zeminlerdeki kazıklar için ideal olmasına karşın birçok ülke için pahalı ve zor bir çözümdür [3]. Ayrıca, düşük hidratasyon ısısı onu hazır kazıkların imalinde kullanılamaz kılmaktadır.

Hazır beton kazık yüzeyini katran ve bitümle kaplamak yalnızca yumuşak zeminlerde sülfat etkisine karşı güvenilir sonuçlar verir. Diğer daha sert zeminlerde kazık aşağı doğru sürülürken aşınmalar oluşur. Kazıkların korunması metal kılıflarla da yapılabilir, fakat pahalı bir yöntemdir. Tüm bunların yanısıra bitüm emdirilmiş cam lifi örtüsü de kullanılabilir, fakat kazıklar çakıllı zeminlere sürülürken bu örtü yırtılabilir.

Nehir akımlarına ve yeraltı suyundaki organik asit ya da erimiş karbondioksit etkilerine maruz kalan betonun zarar görmesi süper sülfat çimentolar kullanılarak önlenebilir, fakat daha önce de belirtildiği gibi bu yöntem pahalı ve zordur. Tomlinson (1977) pH değerinin 5' ten küçük olduğu geçirgen zeminlerde bitümle

kaplanmış hazır beton kazıkların, özel çimentolar kullanmaktan daha iyi bir çözüm olduğunu ifade etmiştir. Yerinde dökülen kazıklarda, yeraltu suyunun asit içerdiği kısımlarda betonun kılıfla dökülmesi gerekir. Bitüm kaplamanın ve kılıfın aşınmasını önlemek için beton sıkı ve geçirimsiz bir şekilde imal edilmelidir.

İlerleyen bölümlerde de görüleceği gibi kazık yüzeyini bitümle kaplama, aynı zamanda negatif sürtünmeyi azaltmada da etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Agresif iyonlar içeren ve de asitli yeraltı suyu ortamında bulunan yumuşak zeminlerde, bu yöntem tüm bu olumsuz etkileri elimine edeceğinden diğer koruma yöntemlerine göre daha kullanışlı ve ekonomik olduğu sonucuna varılabilir. Agresif etkenlerle mücadelede koruma yöntemini seçerken bu hususun da göz önünde bulundurulması gerekir.

3. KAZIKLARDA ÇEVRE SÜRTÜNMESİ

Kil içindeki kazıklarda çevre sürtünmesi, efektif gerilmeler cinsinden (3.1) bağıntısında gösterildiği gibi ifade edilir [4, 5].

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.K_o.\tan\delta \qquad \textbf{(3.1)}$$

τ_s : Çevre sürtünmesi

σ_{vo}' : Kazığın varlığı dikkate alınmadan hesaplanan efektif üst tabaka gerilmesi

K_o : Sükunetteki yatay toprak basıncı katsayısı

δ : Kazık ile zemin arasında sürtünme açısı

Çakılan kazığın zeminde meydana getirdiği yoğrulma etkisinden dolayı (3.1) eşitliğinde c' terimi sıfır kabul edilir. Yumuşak kilde (ϕ') efektif kayma mukavemeti açısı olmak üzere $\delta = \phi'$ kabul edilebilir.

Eğer zemin normal konsolide ise [6];

$$K_o = 1\text{-}\sin\phi' \qquad \textbf{(3.2)}$$

veya [7]

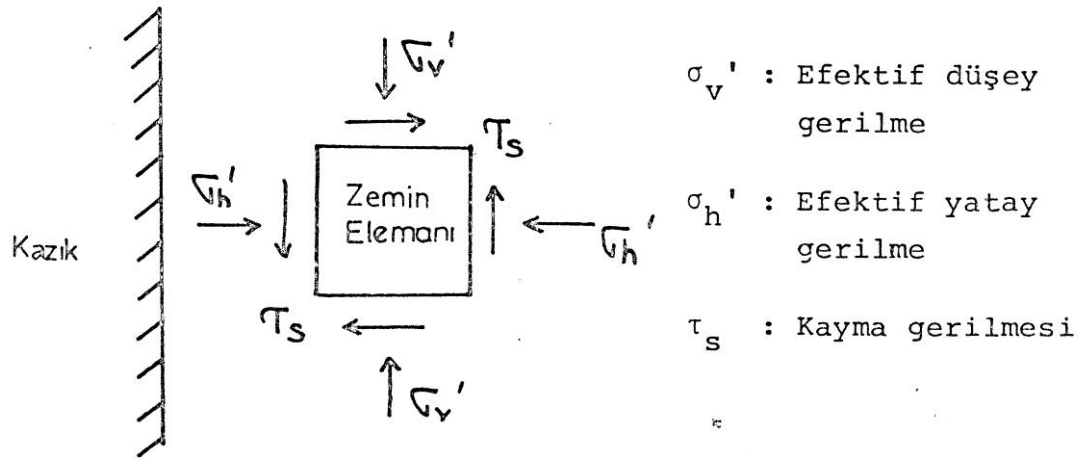
$$K_o = 0.97\text{-}0.94.\sin\phi' \qquad \textbf{(3.3)}$$

eşitlikleri ile hesaplanır. K_o' ın değeri (3.1) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.(1\text{-}\sin\phi').\tan\delta \qquad \textbf{(3.4)}$$

bulunur [6].

Burada yumuşak ve aşırı konsolide sert killerdeki çevre sürtünmesi ele alınacaktır. Sırasıyla, efektif düşey gerilmenin (σ_v'), efektif yatay gerilmeden (σ_h') büyük olduğu ve (σ_v')' nün (σ_h')' den küçük olduğu durumlar incelenecektir (Şekil 3.1).



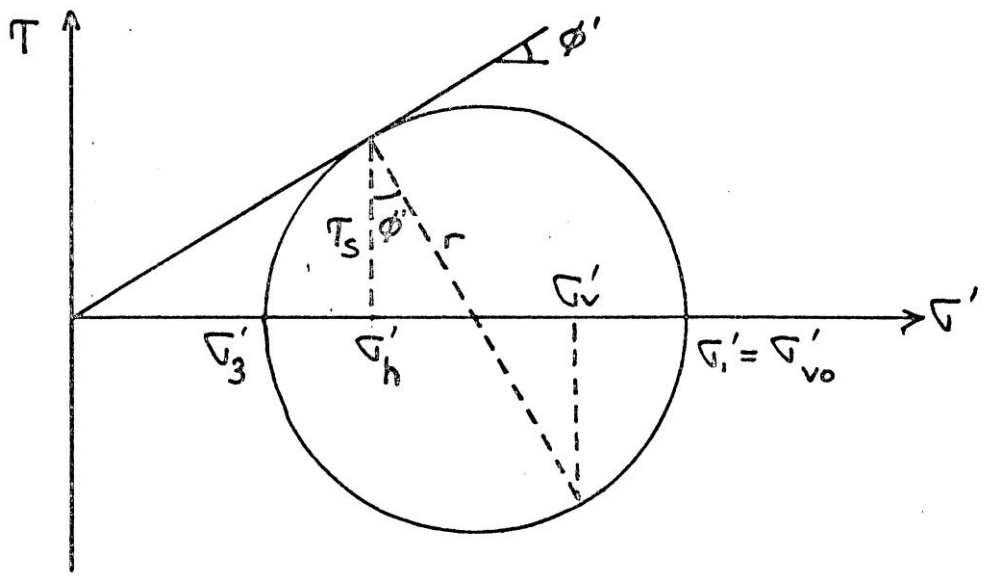
Şekil 3.1: Kazık Yüzeyine Bitişik Zemin Elemanındaki Gerilmeler

3.1. Kil Zeminlerde Çevre Sürtünmesi

3.1.1. Yumuşak Kilde Çevre Sürtünmesi

Efektif düşey gerilmenin, efektif yatay gerilmeden büyük olduğu (σ_v'>σ_h') gözönüne alınarak yumuşak kil için dört özel durum incelenmiştir [6].

Birinci Durum:



Şekil 3.2: σ_1'>σ_{vo}' Olması Hali [6]

Şekil 3.1’ de gösterilen kazık-zemin sisteminde, kazığa komşu zemin elemanının akmaya başladığı ve düşey kazık-zemin yüzeyinde ϕ’ açısının mobilize olduğu kabul edilmektedir. Bu anda, zemindeki efektif asal gerilme σ_1’>σ_{vo}’ olsun. Gerilme durumu Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Şekil 3.2’ den aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

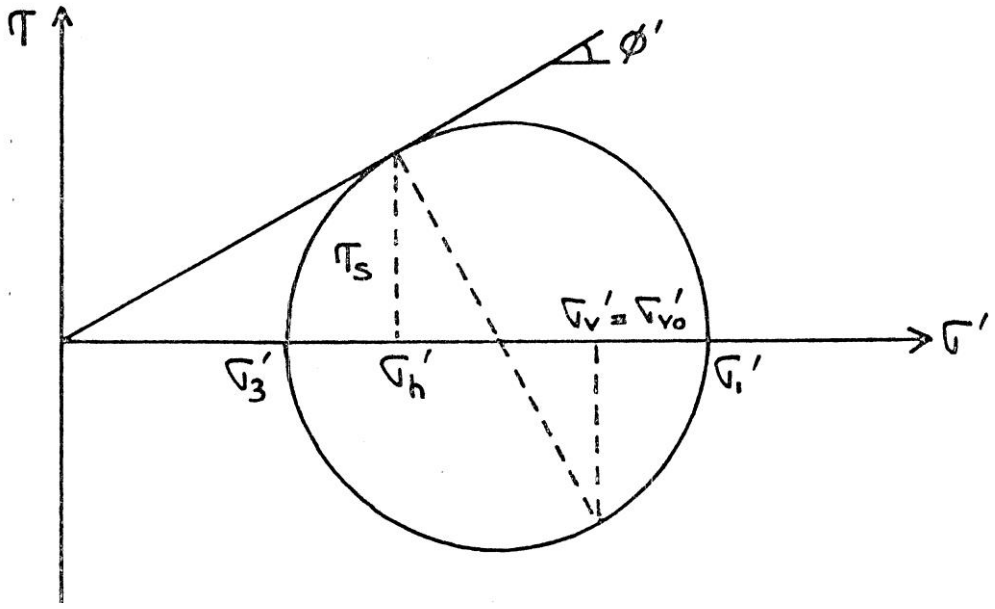
$$\tau_s = r.\cos\phi' \quad \textbf{(3.5)}$$

$$\sigma_{vo}' = \frac{r}{\sin\phi'} + r \quad \textbf{(3.6)}$$

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\cos\phi'}{1+\sin\phi'} \quad \textbf{(3.7)}$$

İkinci Durum:

Kazık yüzeyine komşu zemin elemanında düşey efektif gerilme σ_{vo}’ olup bu değer büyük asal gerilmeye eşit değildir.



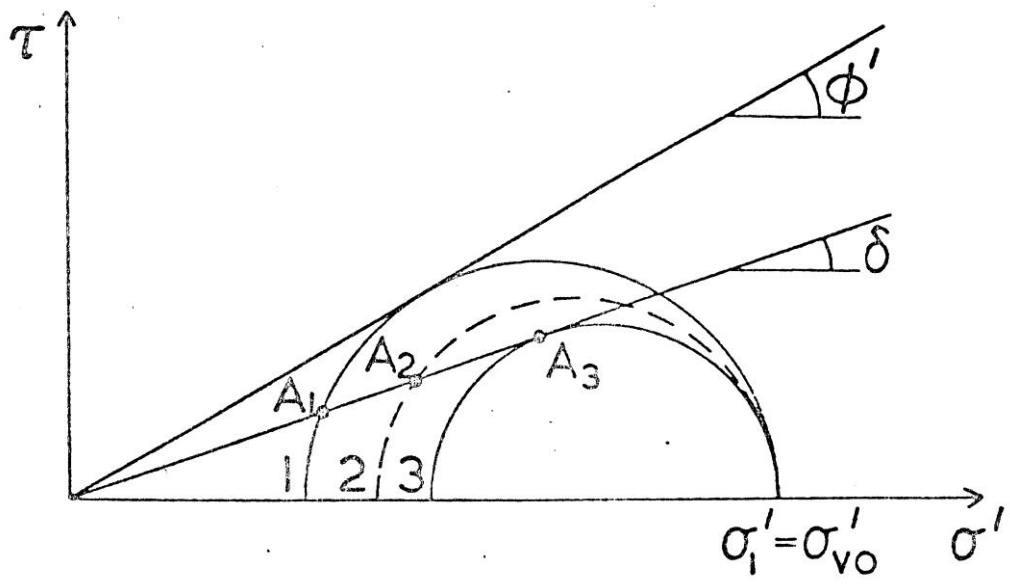
Şekil 3.3: σ_v’ = σ_{vo}’ Olması Hali [6]

$$\sigma_{vo}' = \frac{r}{\sin\phi'} + r.\sin\phi' \quad \textbf{(3.8)}$$

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\cos\phi'}{1+\sin^2\phi'} \quad \textbf{(3.9)}$$

Üçüncü Durum:

Şekil 3.1' de gösterilen zemin elemanının akma durumunda olmadığı ve kazık-zemin temas yüzeyinde mobilize olan sürtünme açısının, efektif kayma mukavemeti açısından küçük olduğu ($\delta<\phi'$) kabul edilmektedir. Büyük asal gerilme, düşey gerilmeye eşit olmakla birlikte düşey değildir. Bu durumda, zemin elemanındaki gerilme durumları 1 ve 3 çemberleri arasında kalır. Söz konusu gerilme durumları sınır gerilme durumlarını göstermektedir. Mümkün olan bir gerilme durumu 2 no' lu Mohr çemberi ile temsil edilmiştir (Şekil 3.4). 1 no' lu Mohr çemberinde zemin elemanı akma durumundadır ve maksimum kazık zemin sürtünme açısı ϕ' ye eşittir. 3 no' lu durumda durumda ise zemin akma durumundan hayli uzaktadır ve mobilize olan sürtünme açısı δ' ya eşittir. Düşey zemin-kazık temas yüzeyindeki gerilme durumları A_1, A_2 ve A_3 noktaları ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4: $\delta<\phi'$ ve $\sigma_1' = \sigma_{vo}'$ Olması Hali [6]

$$\tau_s = r.\sin\omega \qquad \textbf{(3.10)}$$

$$\omega = [180-(\delta+\alpha)] \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$\tau_s = r.\sin(\delta+\alpha) \qquad \textbf{(3.12)}$$

1 no' lu Mohr çemberinde;

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\sin(\delta+\alpha)}{1+\sin\phi} \qquad \textbf{(3.13)}$$

$$\sin\alpha = \frac{\sin\phi'}{\sin\delta} \qquad \textbf{(3.14)}$$

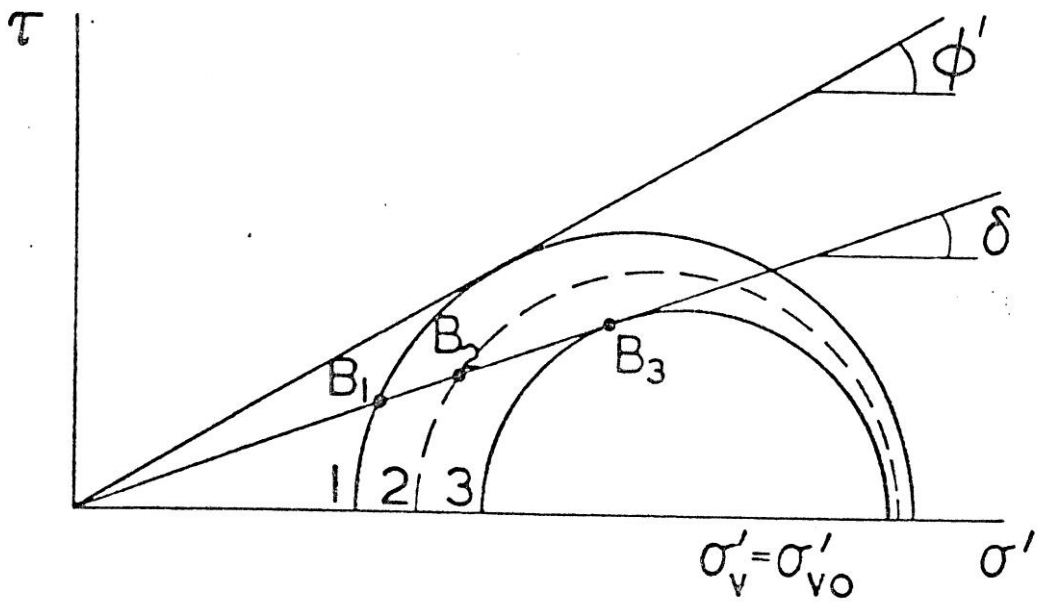
3 no' lu Mohr çemberinde;

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\delta.\cos\delta}{1+\sin\delta} \qquad \textbf{(3.15)}$$

(3.13) eşitliğininin yumuşak killerde pek fazla anlamı bulunmamakla birlikte (3.15) eşitliği servis yükü altındaki kazık-zemin etkileşimini gösterir.

Dördüncü Durum:

Şekil 3.1' de gösterilen zemin elemanının kırılma durumunda olmadığını ve kazık-zemin temas yüzeyinde $\delta<\phi'$ olduğunu kabul edelim. Bu durumda düşey efektif gerilme $\sigma_v' = \sigma_{vo}'$ olmakla birlikte büyük asal efektif gerilmeye (σ_1') eşit değildir. Bu durumda Şekil 3.5' te gösterilen gerilme durumları söz konusudur. Düşey kazık-zemin temas yüzeyindeki gerilme durumları B_1, B_2, B_3 noktaları ile temsil edilir ve aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.



Şekil 3.5: $\sigma_v' = \sigma_{vo}'$ Olması Hali [6]

$\tau_s = r.\sin(\delta+\alpha)$ **(3.16)**

$$\sigma_{vo}' = \frac{r}{\sin\phi'} + r.\cos\omega \quad \textbf{(3.17)}$$

1 no' lu daire için;

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\sin(\delta+\alpha)}{1-\sin\phi'.\cos(\delta+\alpha)} \quad \textbf{(3.18)}$$

$90^o<\sigma<180^o$

3 no' lu daire için;

$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\sin(\delta+\alpha)}{1-\sin\phi'.\cos(\delta+\alpha)} \quad \textbf{(3.19)}$$

(3.18) eşitliği uygulama bir anlam taşımamakla birlikte (3.19) eşitliği servis yükleri altındaki kazık davranışını büyük bir yaklaşıklıkla temsil eder.

3.1.2. Sert, Aşırı Konsolide Kilde Çevre Sürtünmesi

Sert killerde efektif yatay gerilmenin (σ_h') efektif düşey gerilmeden büyük olduğu kabul edilerek iki özel durum incelenmiştir.

Birinci Durum:

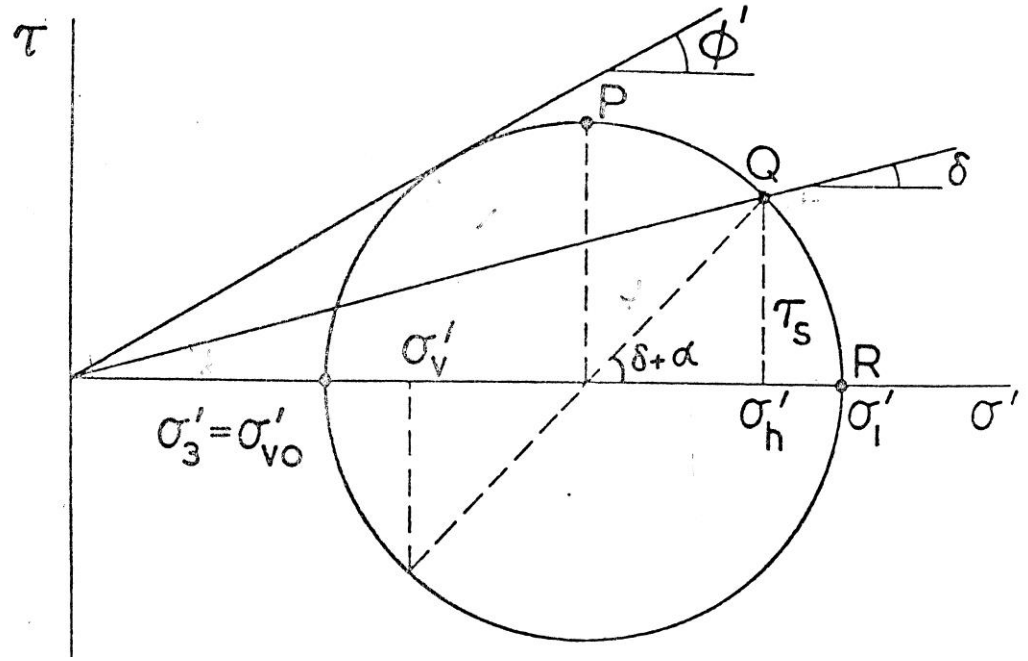
Efektif yatay gerilmenin, efektif düşey gerilmeden büyük olması halinde, Şekil 3.6' da kazık-zemin temas yüzeyinde mobilize olan sürtünme açısının, efektif kayma mukavemeti açısından küçük olduğu ($\delta<\phi$') durum ele alınmıştır. σ_v' = σ_{vo}' olduğunda, bağıntıların ne şekilde belirleneceği aşağıda gösterilmiştir. Burada, σ_{vo}' değerinin, efektif küçük asal gerilmeden (σ_3') büyük olduğu görülmektedir.

σ_{vo}' efektif küçük asal gerilmeye (σ_3') eşit değildir.

$$\sigma vo' = \frac{r}{\sin\phi'} - r.\cos(\delta+\alpha) \quad \textbf{(3.20)}$$

$0^o<\sigma<90^o$

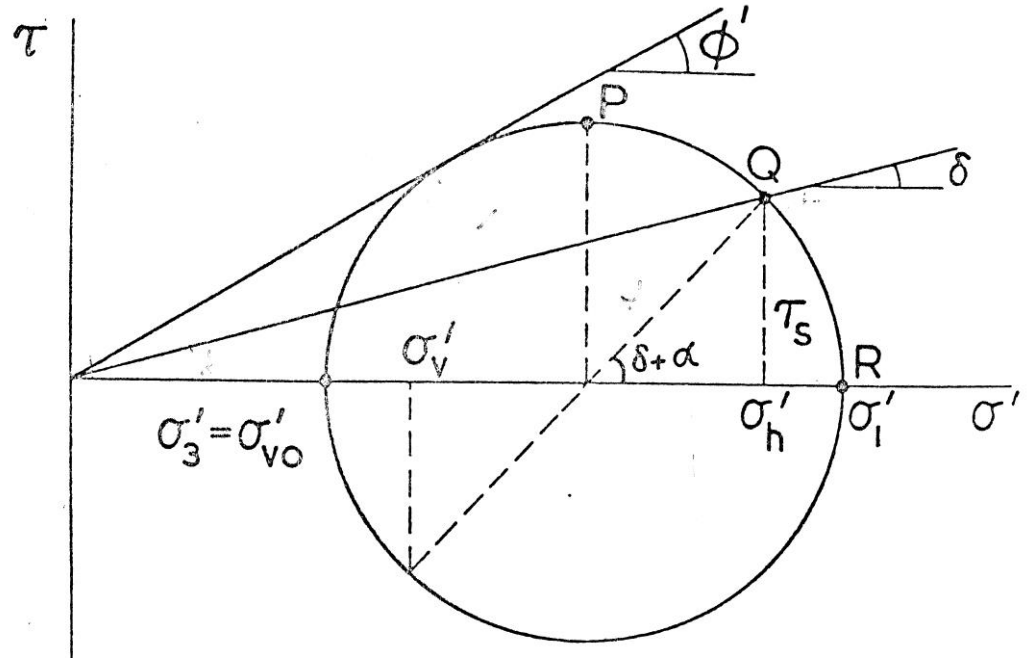
$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\sin(\delta+\alpha)}{1-\sin\phi'.\cos(\delta+\alpha)} \quad \textbf{(3.21)}$$



Şekil 3.6: $\delta > \phi'$ ve $\sigma_v' = \sigma_{vo}'$ Olması Hali [6]

İkinci Durum:

Efektif yatay gerilmenin, efektif düşey gerilmeden büyük olması halinde kazık-zemin temas yüzeyindeki gerilme değerleri, P ve R noktaları arasında yer alır. Şekil 3.7' de görüldüğü gibi Q noktası için, mobilize olan sürtünme açısı efektif kayma mukavemeti açısından küçüktür ($\delta < \phi'$).



Şekil 3.7: $\sigma_3' = \sigma_{vo}'$ Olması Hali [6]

Q' nun gerçek pozisyonu kazık yüklenmeden evvelki gerilme şartlarına bağlıdır.

$$\tan\delta = \frac{\tau_s}{\sigma_h'}$$

$$\tau_s = \sqrt{r^2 - (\frac{\sigma_h' - \sigma_v'}{2})^2} \qquad \textbf{(3.22)}$$

$$r = (\frac{\sigma_h' + \sigma_v'}{2}).\sin\phi' \qquad \textbf{(3.23)}$$

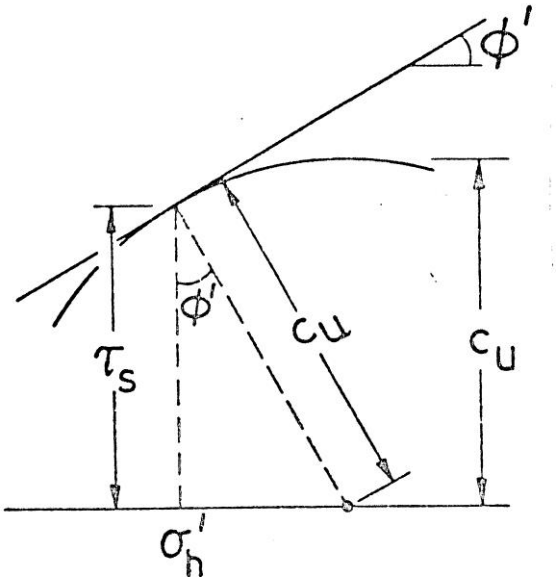
$$\tau_s = \sigma_{vo}'.\frac{\sin\phi'.\sin(\delta+\alpha)}{1-\sin\phi'} \qquad \textbf{(3.24)}$$

$0^o<\alpha<90^o$ ve $\sigma_h' = n.\sigma_v'$

$$\tan\delta = \frac{1}{2}\sqrt{(1+\frac{1}{n})^2.\sin^2\phi' - (1-\frac{1}{n})^2} \qquad \textbf{(3.25)}$$

3.2. Kil Zeminlerde τ_s - c_u İlişkisi

Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7' deki dairelerin hepsi r = c_u olmak üzere aynı yarıçapa sahip olurlar. Bu durumda yumuşak kil zeminde τ_s - c_u ilişkisi Şekil 3.8' de gösterildiği gibi hesaplanır.



Şekil 3.8: Yumuşak Kil Zeminlerde τ_s - c_u Arasındaki İlişki [6]

$\tau_s = c_u.\cos\phi'$ **(3.26)**

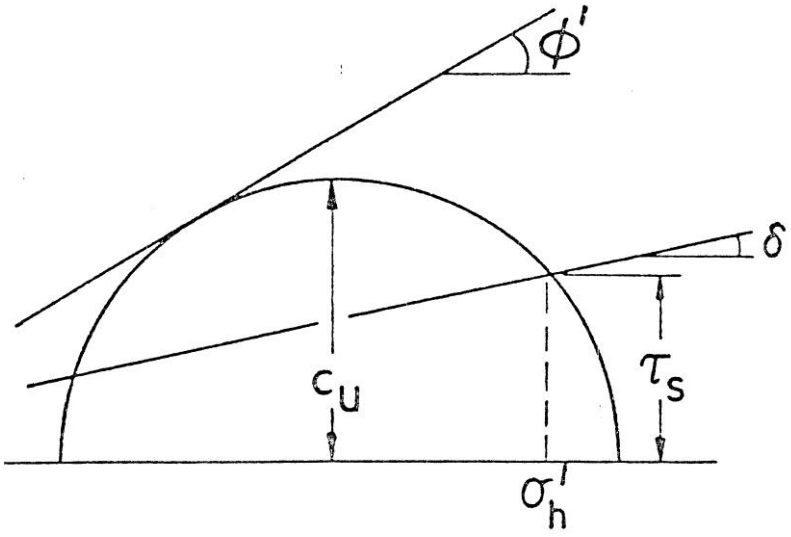
Bu bağıntı ışığında ϕ' = 20^o ve 30^o için aşağıda Tablo 3.1' deki τ_s / c_u oranları hesaplanmıştır.

Tablo 3.1: ϕ' ye Bağlı Olarak Elde Edilen τ_s / c_u Oranı Değerleri [3]

ϕ'	20^o	30^o
τ_s / c_u	0.94	0.87

Nitekim, API (1975) şartnamesi c_u<25 kN/m^2 olmak şartıyla τ_s = c_u alınmasını tavsiye etmektedir. Bu değerler yumuşak killerde τ_s = c_u kabul edilebileceğini göstermektedir.

Sert kil zeminlerle ilgili olarak yapılan birçok çalışmada, Şekil 3.9' da da gösterildiği gibi c_u' dan daha küçük bir τ_s mobilize olabileceği kabul edilmektedir.



Şekil 3.9: Sert Kil Zeminlerde τ_s - c_u Arasındaki İlişki [6]

API (1975) şartnamesine göre c_u>75 kN/m^2 için τ_s / c_u = 0.5, Skempton' un (1959) Londra kili üzerinde yaptığı deneylerde τ_s / c_u = 0.45 ve Tomlinson' un (1971) çalışmaları sonucunda c_u>125 kN/m^2 için τ_s / c_u oranının 0.4~0.7 alınması tavsiye olunmaktadır.

$\sigma_h' > \sigma_v' > 1$ halinin söz konusu olduğu sert killerde, eğer zemin akma durumunda değilse, kazık-zemin temas yüzeyinde mobilize olan sürtünme açısının (δ), efektif kayma mukavemeti açısında (ϕ') dan küçük olduğu açıktır. Şekil 3.8' de de

belirtildiği gibi τ_s değerinin c_u değerinden küçük olduğu görülmektedir. τ_s ile c_u arasındaki gerçek ilişki, zemindeki esas gerilmelere bağlıdır, fakat bu da tam olarak bilinememektedir. Yapılan çalışmada σ_h' ile σ_v' arasındaki bağıntıdan yola çıkılarak, τ_s / c_u oranının 0.4 ile 0.7 ve ϕ' açısının 20^o ile 30^o değerleri için elde edilen (δ) ve (σ_h' / σ_v') ifadeleri Tablo 3.2' de gösterilmiştir [6].

Tablo 3.2: τ_s / c_u ve ϕ' Açısına Bağlı Olarak Elde Edilen δ ve n Değerleri [6]

ϕ'	τ_s / c_u	δ	σ_h' / σ_v' = n
20^o	0.4	5.9	1.9
	0.7	10.9	1.6
30^o	0.4	7.8	2.7
	0.7	14.8	2.1

Tablo 3.2' deki değerler aşırı konsolide killerdeki yatay ve düşey efektif gerilme oranlarının yüklenmiş kazık için 1.6 ile 2.7 değerleri arasında olduğunu göstermektedir. Derinliğe bağlı olarak τ_s / c_u oranının artmasıyla n oranının azaldığı açıktır.

3.3. Kohezyonlu Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar

Kazıklı temellerde, kazık yapımı sırasında zeminin yatay olarak yer değiştirmesi nedeniyle kazık çevresi ve altındaki zemin örselenecektir. Bu hareketten dolayı kohezyonlu ve sert zeminlerde zemin yüzü kabarır, buna karşın konsolide olmamış zeminlerde ise oturma meydana gelir.

Kohezyonlu bir zeminde kazığın taşıma kapasitesi (3.27) bağıntısıyla hesaplanır [8].

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s \qquad \textbf{(3.27)}$$

Q_{ult} : Kazığın toplam taşıma kapasitesi

Q_b : Kazığın toplam uç direnci

Q_s : Kazığın toplam çevre sürtünme direnci

Genelde kil olarak isimlendirilen kohezyonlu zeminlerde, çakma kazık için, zemin yumuşak kil veya sert kil olmasına bağlı olarak kazık üzerindeki çevre sürtünmesi farklılık gösterir. Yumuşak kilde, zeminin tiksotropik özelliği nedeniyle zamanla çevre sürtünmesi artar. Sert kilde çakma sonrası meydana gelen çatlaklar boşluk

suyunun süratle sönümlenmesini sağlar ve çevre sürtünmesi değeri zamanla fazla bir artış göstermez [8].

(Q_b) uç direnci basit olarak (3.28) bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$Q_b = N_c.c_b.A_b \quad \textbf{(3.28)}$$

N_c : Taşıma kapasitesi faktörü

c_b : Kazık ucundaki örselenmemiş zemine ait drenajsız kohezyon

A_b : Kazık ucu kesit alanı

Zeminin toplam kayma mukavemetinin mobilize olmasını sağlamak amacıyla, kazığın zemine minimum çapının 5 katı kadar penetrasyonu halinde N_c değeri doğrudan 9 alınabilir.

Toplam çevre sürtünmesi (Q_s) ise (3.29) bağıntısıyla hesaplanmaktadır [8].

$$Q_s = \alpha.s.c_u.A_s \quad \textbf{(3.29)}$$

α : Adezyon faktörü

s : Şekil faktörü (sabit kesitli kazıklarda s = 1.0)
(teleskopik kesitli kazıklarda s = 1.2)

c_u : Kazık çevresindeki örselenmemiş zemine ait ortalama drenajsız kohezyon

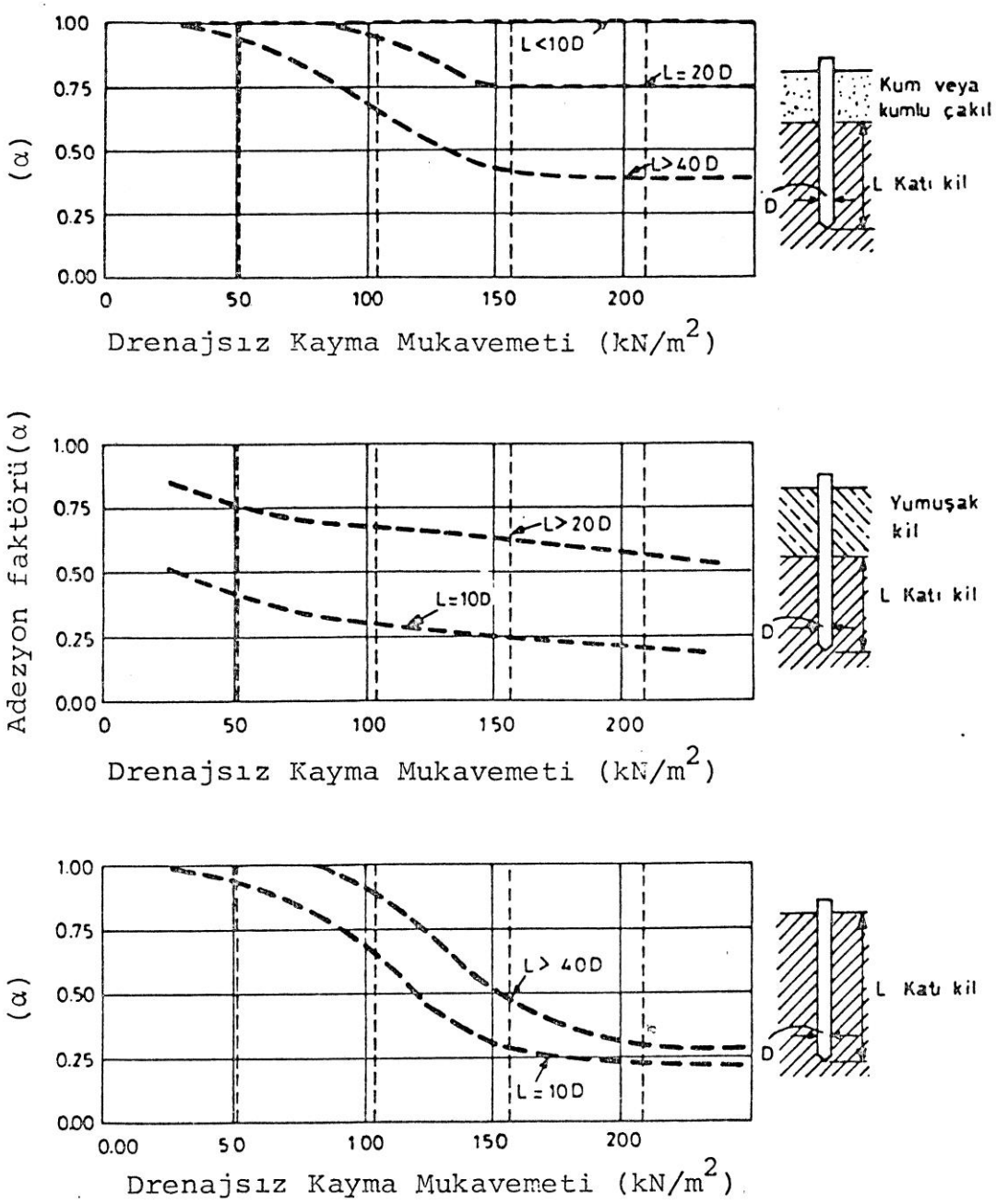
A_s : Zemin içindeki kazık yüzeyi alanı

α değerleri, Şekil 3.10' dan okunan büyüklüklerin (3.30) bağıntısında yerine konulmasıyla elde edilir [8].

$$\alpha = f(c_u) \quad \textbf{(3.30)}$$

Yerinde dökme kazıklar imal edilirken önce rötary burgu veya klapeli kaşık ile zemin içerisinde bir şaft açılır, daha sonra bu şaft içinde betonarme kazık oluşturulur. Bu sistemle yapılan kazıklarda da kil zeminin fiziksel özelliklerinde değişiklik meydana gelir. Değişiklikler şaft boyunca olacağından kazık çevre sürtünmesinde önemli değişiklikler meydana gelir. Dolayısıyla, çevre sürtünmesi hesaplanırken kilin drenajsız kayma mukavemeti bir adezyon faktörü (3.31) ile çarpılır [8].

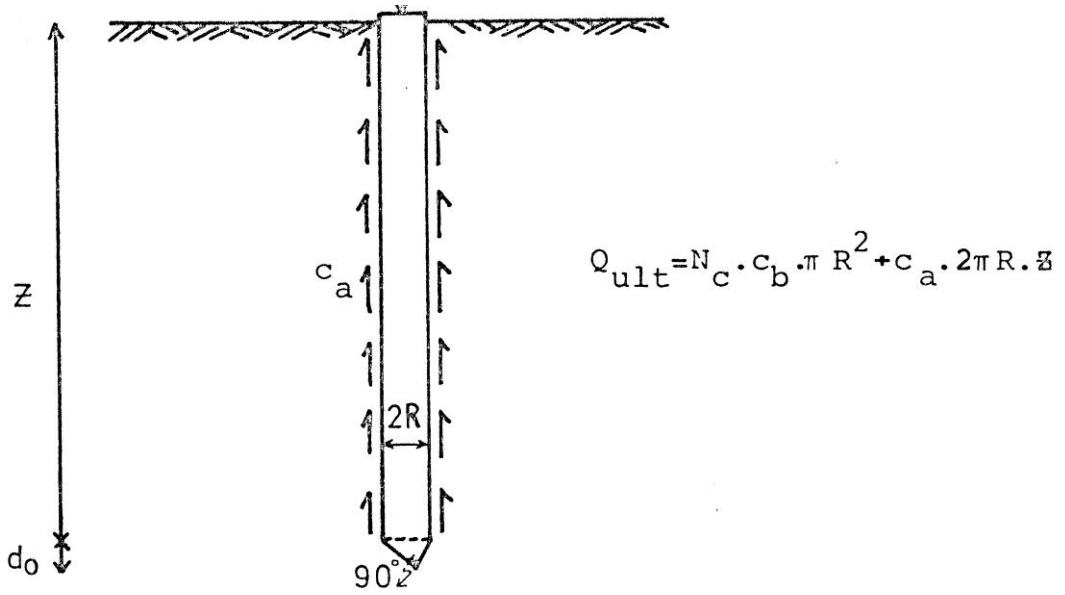
$$Q_{ult} = 9.c_b.A_b + \alpha.c_u.A_s \quad \textbf{(3.31)}$$



Şekil 3.10: Adezyon Faktörü İçin Tasarım Eğrileri

Bu tip kazıklarda s şekil faktörü kullanılmaz. Şekil 3.11' de kazığın toplam taşıma kapasitesini oluşturan bileşenler gösterilmiştir.

Yerinde dökme (cast in-situ) kazıklarda, kazık şaftının açılmasıyla, delik yüzeyi boyunca yanal gerilmelerde ferahlama meydana gelir, kil kabarır ve kazık şaftına doğru su akımı olur. Eğer delik kaplaması iyi olmazsa delik tabanına doğru su akar. Bu durumda, kil zeminde kazık ile kil temas yüzeyinde yumuşamadan söz edilir.

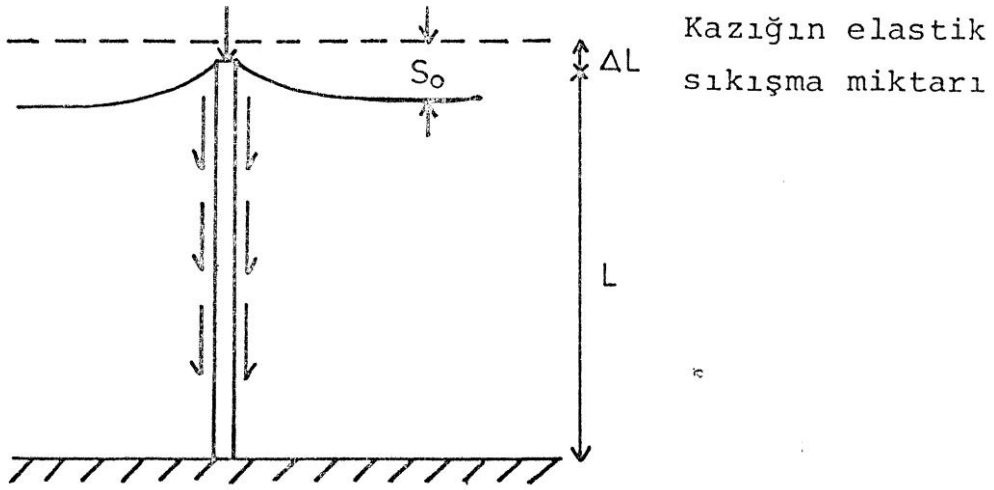


Şekil 3.11: Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Kazığın Toplam Taşıma Kapasitesi

Yerinde dökme çakma kazıklarda ucu çelik levha ya da beton bir tıkaç ile kapatılmış çelik bir boru, istenilen derinliğe kadar çakıldıktan sonra çelik boru geri çekilirken beton dökülür. Diğer iki cins kazığın birçok olumlu özellikleri bu tip kazıklarda da elde edilebilir. Teorik taşıma kapasitesi hesabı diğer kazıklara benzer şekilde yapılır. Sadece ucu genişletilmiş kazıklarda (soğan başı), kazık ucunun geniş olmasından dolayı (A_b) taban alanının ne alınacağı araştırılması gereken önemli bir konudur.

4. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ

Taşıyıcı özelliği yüksek olan zemin tabakalarının derinde olması durumunda üst yapı yükleri kazıklı temellere taşıtılır. Kazık boyu, statik kazık formülleri ile belirlenir. Üst yapı yüklerine ve zemin profiline bağlı olarak "uç kazığı" veya "sürtünme kazığı" oluşturulur. Zemin profilinde yer alan yumuşak kil veya gevşek dolgu tabakalarının kazığın taşıma kapasitesine fazlaca bir katkısı beklenmemelidir. Tam aksine, bu tabakaların kendi ağırlıkları veya zemin yüzeyine uygulanacak ilave yükler altında konsolide olmaları halinde kazık-zemin yüzeyinde oluşan pozitif çevre sürtünmesini "negatif çevre sürtünmesi" ne dönüştüren tesirler oluşur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Sıkışabilir Tabakada Meydana Gelen Negatif Çevre Sürtünmesi

Negatif çevre sürtünmesi sadece oturmasını tamamlamamış dolgularda meydana gelmez. Henüz konsolidasyonunu tamamlamış doğal zeminlerde veya sıkışabilen bir zemin üzerine bir dolgu serilerek alttaki tabakanın konsolidasyonuna sebep olunduğu durumlarda da negatif çevre sürtünmesi meydana gelmektedir. Yumuşak, konsolide olmamış bir kil tabakasında kazık teşkil edildiğinde, bu tabaka zamanla yeraltı su seviyesinin düşmesinden dolayı kendi ağırlığı ile oturuyorsa, kazık şaftı çevresindeki zemin, adezyonun etkisiyle kazık tarafından taşınacağından, kazığın taşıyacağı yük

miktarı artmaktadır. Dolayısıyla kazığın taşımak zorunda kaldığı bu ekstra yük negatif çevre sürtünmesini meydana getirir.

İskandinavya' da son buzul çağından sonra karalarda çok büyük değişimler meydana gelmiş, dolayısıyla yeraltı su seviyesinin değişiklik göstermesi, bu bölgede negatif çevre sürtünmesi problemini beraberinde getirmiştir. Özellikle, kil zeminde kazık oluşturulduktan sonra meydana gelen konsolidasyonun doğurduğu negatif çevre sürtünmesinin kazık yükünü oldukça artırdığı gözlenmiştir. Örnek olarak; zemin kabarma değeri Stokholm' de yaklaşık 5mm/yıl, Baltık Denizi' ne sahili olan Kuzey İsveç ve Finlandiya' da 10 mm/yıl olduğu saptanmıştır.

4.1. Negatif Çevre Sürtünmesini Meydana Getiren Faktörler

Negatif çevre sürtünmesi, aşağıda belirtilen dört ana faktöre bağlıdır [9]:

1. Kazık Özellikleri: Cins, uzunluk, enkesit, yüzey durumu, yerleştirme metotları
2. Zemin Özellikleri: Zemin cinsi, gerilme tarihçesi, sıkışabilirlik, tabaka kalınlığı, taşıyıcı tabakanın kıvamı ve cinsi
3. Zemin hareketlerinin sebebi
4. Kazıkların yapım süresi

Sıkışabilir kohezyonlu bir zemin üzerine, kohezyonsuz bir dolgunun serilmesi halinde, dolgu zeminde düşey yönde sıkışma olmasına rağmen gerçek negatif çevre sürtünmesi, kazığın sıkışabilir tabaka içinde kalan şaftı boyunca meydana gelir. Uç kazıklarında grup halindeki oturma sadece kazıklarda eksenel boy kısalmasına sebep olur. Bölüm 5.2.1.' de açıklanan nötr noktanın yerinin saptanması ile belli bir oranda belirlenebilir. Uç kazıklarında, kazığın oturması söz konusu olmadığından negatif çevre sürtünmesi kazık boyunca meydana gelmesine karşın sürtünme kazıklarında kazığın bir miktar oturma yapması, kazığın alt kısmında meydana gelen negatif çevre sürtünmesinin yok olmasına sebep olur.

Ayrıca yeraltı su seviyesinin düşerek zeminde oturmaya sebep olması, negatif çevre sürtünmesi problemini de beraberinde getirir.

Kazık yükleme deneyi sonrasında kazığın yukarı doğru uzaması, kazığın üst kısmında negatif çevre sürtünmesini artırır. Bu durumda meydana gelen negatif çevre sürtünmesi kazığın alt kısmındaki pozitif çevre direnci tarafından dengelenmek zorundadır. Kazık eğer sıkı kum veya kaya gibi sağlam bir zemine oturuyorsa düşey

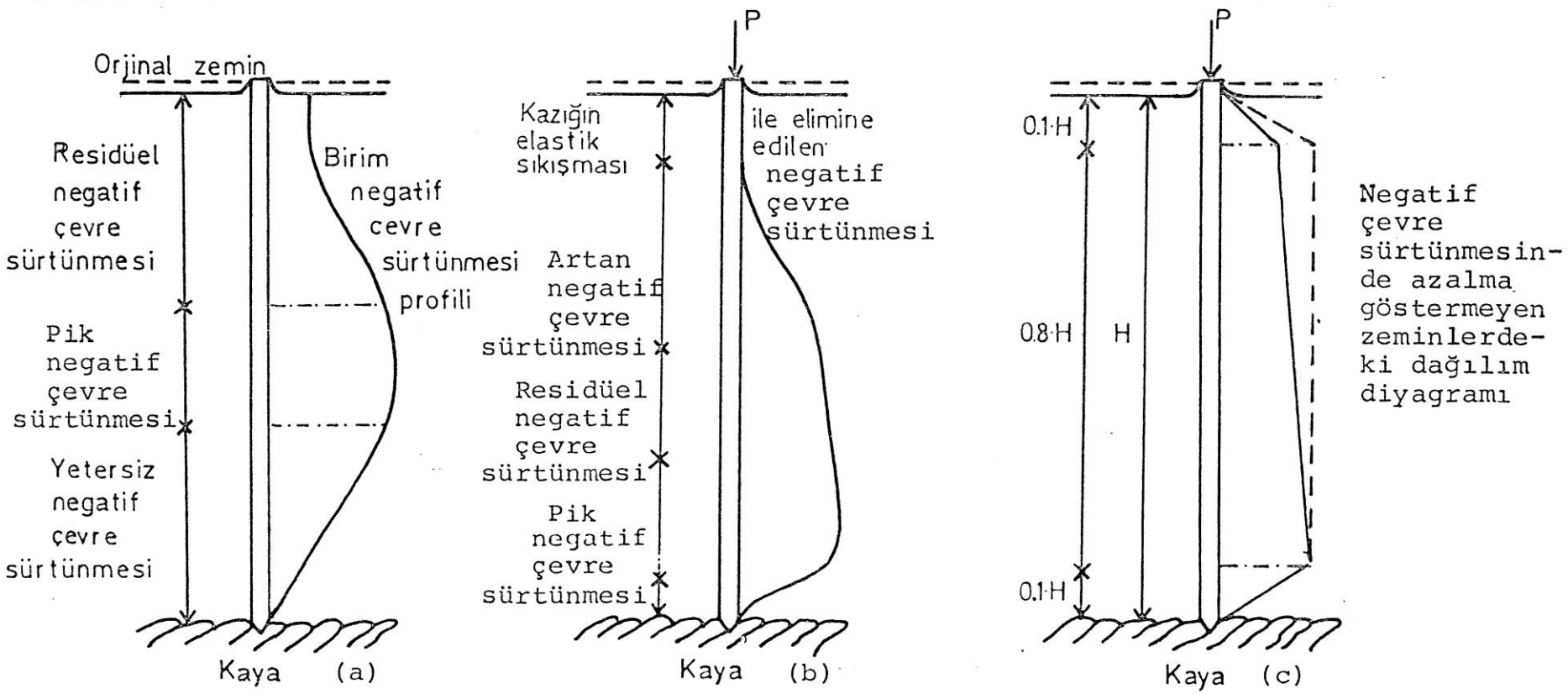
yönde hareketi engellendiğinden negatif çevre sürtünmesi artacaktır. Oysa, kazık üst yapı yükleri etkisiyle oturuyorsa negatif çevre sürtünmesi meydana gelmesi söz konusu değildir.

4.2. Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Boyunca Dağılımı

4.2.1. Kaya Zemine Oturan Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Kaya zemine oturan kazıklarda, kazığın oturması söz konusu olmadığından kazık üzerinde meydana gelecek negatif çevre sürtünmesi dikkatle hesaplanmak zorundadır.

Şekil 4.2.a' da yüklenmemiş kazığın düşey yönde yer değiştirmediği görülmektedir. Bu durum söz konusu olduğunda kazığın üst kısmındaki negatif çevre sürtünmesi hemen hemen mobilize olmasına karşın, kazığın alt kısımlarına inildikçe zemin yükünün artmasından dolayı daha büyük miktarlarda negatif çevre sürtünmesi değerlerine ulaşılır. Ancak, kaya zeminin hemen üstündeki zeminin oturmasının sıfır değerinde olmasından dolayı, kazığın bu uç noktasındaki negatif çevre sürtünmesi değeri sıfırdır. Kazığa yükleme yapıldığı takdirde, kazık elastik sıkışmanın etkisiyle zemin içine doğru bir miktar girer. Elastik sıkışma, kazığın üst kısmında etkili olduğundan, bu kısımda negatif çevre sürtünmesi etkisinin azaldığı hatta sıfırlandığı bilinmektedir. Bununla beraber belli bir mesafeden sonra Şekil 4.2.b' de de gösterildiği gibi negatif çevre sürtünmesi dağılımı artmaya başlar. Kazık ucundaki oturmanın sıfır olmasından dolayı yine burada negatif çevre sürtünmesi değeri sıfırlanır. Şekil 4.2.c' de ise sıkışmayan tabakaya oturmuş yüklenmiş kazığın idealize edilmiş negatif çevre sürtünmesi dağılım diyagramı görülmektedir. Bu diyagramın çizilmesindeki esas amaç, kazık boyunca meydana gelen negatif çevre sürtünmesi değerini kolaylıkla hesap edebilmektir.



Şekil 4.2: Sıkışmaz, Sağlam Tabakaya Oturan Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı [10]

a. Kazık yüklenmemiş halde

b. Kazık yüklenmiş halde

c. Yüklenmiş kazıkta idealize edilmiş diyagram

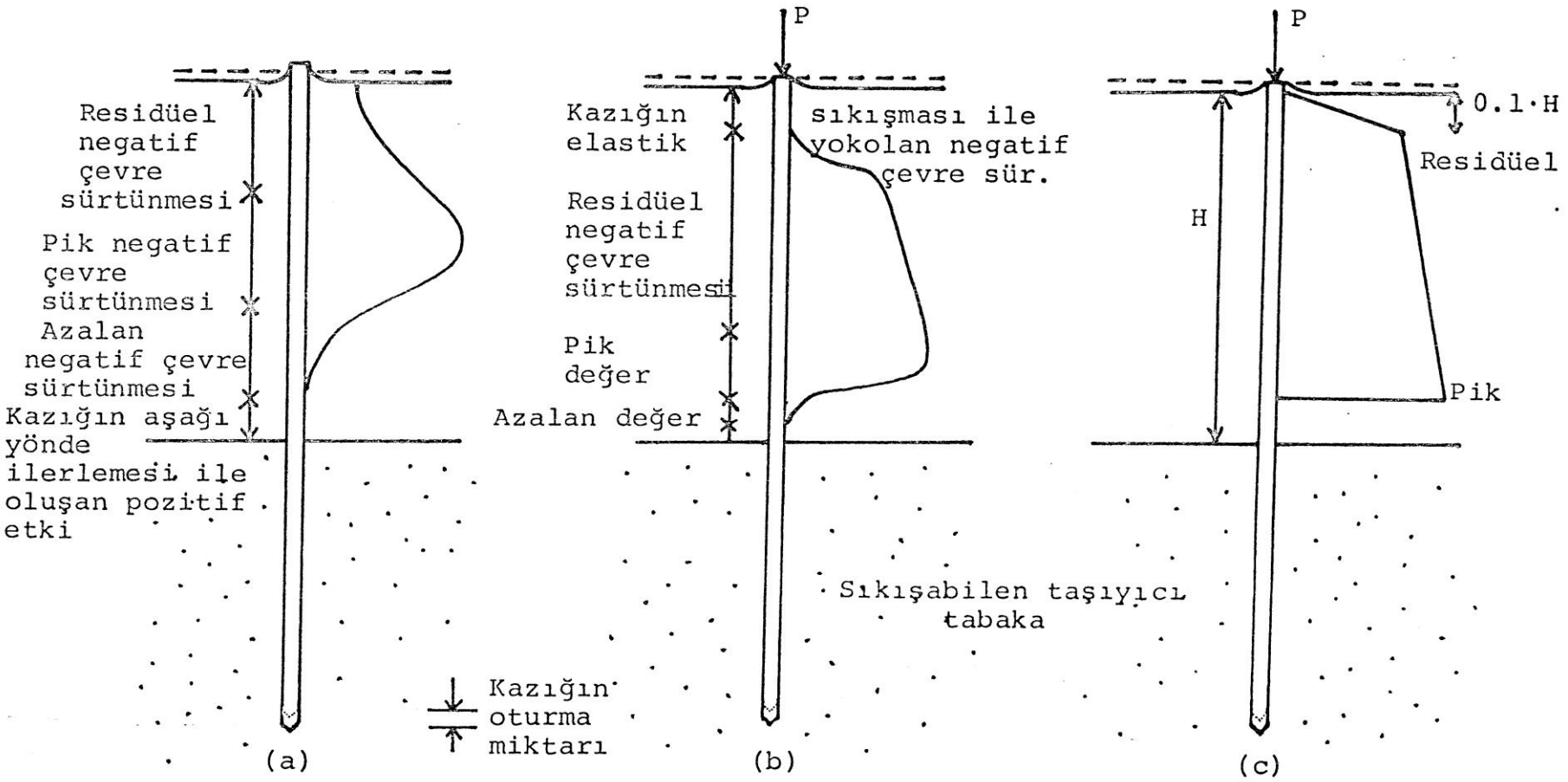
4.2.2. Sıkışabilir Taşıyıcı Tabakaya Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Kazık, sıkışabilen taşıyıcı bir tabaka içinde iken düşey kuvvetlerin etkisiyle zeminde bir miktar oturma yapabilir. Şekil 4.3.a' da gösterildiği gibi iki tabaka halinde teşkil edilen kazıkta, sadece üst tabaka içinde kalan kısmında negatif çevre sürtünmesi meydana gelmektedir. Alttaki tabakanın kohezyonsuz olmasından dolayı burada negatif çevre sürtünmesinin oluşmadığı kabul edilir. Ancak, üstteki dolguda meydana gelen dağılımın Bölüm 4.2.1.' deki diyagramlar ile paralellik taşıdığı açıktır.

Negatif çevre sürtünmesi sadece dolguda görüldüğünden buradaki kazık boyunca dağılımı ele alırsak Şekil 4.3.a' da gösterildiği gibi zeminin oturmasından dolayı kazığın hemen üst noktasında negatif çevre sürtünmesi meydana gelmeye başlar.

Kazık tepe noktasından daha derinlere inildikçe, zemin yükünün artmasıyla belli bir pik değere ulaşılır, fakat alttaki sıkışabilir tabakanın hemen üstündeki dolgunun alt kısmında, küçük bir bölgede negatif çevre sürtünmesi kazığın oturmasından dolayı meydana gelmez. Bu nedenle pik değer bu noktaya doğru azalarak sıfırlanır. Kazık yüklendiğinde, kazığın elastik sıkışması ile üst bölgede negatif çevre sürtünmesi değeri Şekil 4.3.b' de görüldüğü gibi sıfır olur. Dolgu tabakası içinde kazık boyunca derine inildikçe kazık üzerindeki zemin yükünün artmasıyla negatif çevre sürtünmesi değeri artar. Yüklenmemiş kazıkta olduğu gibi alttaki tabakanın etkisiyle dağılım diyagramı bu dolgunun alt kısımlarında birden azalarak sıfırlanır.

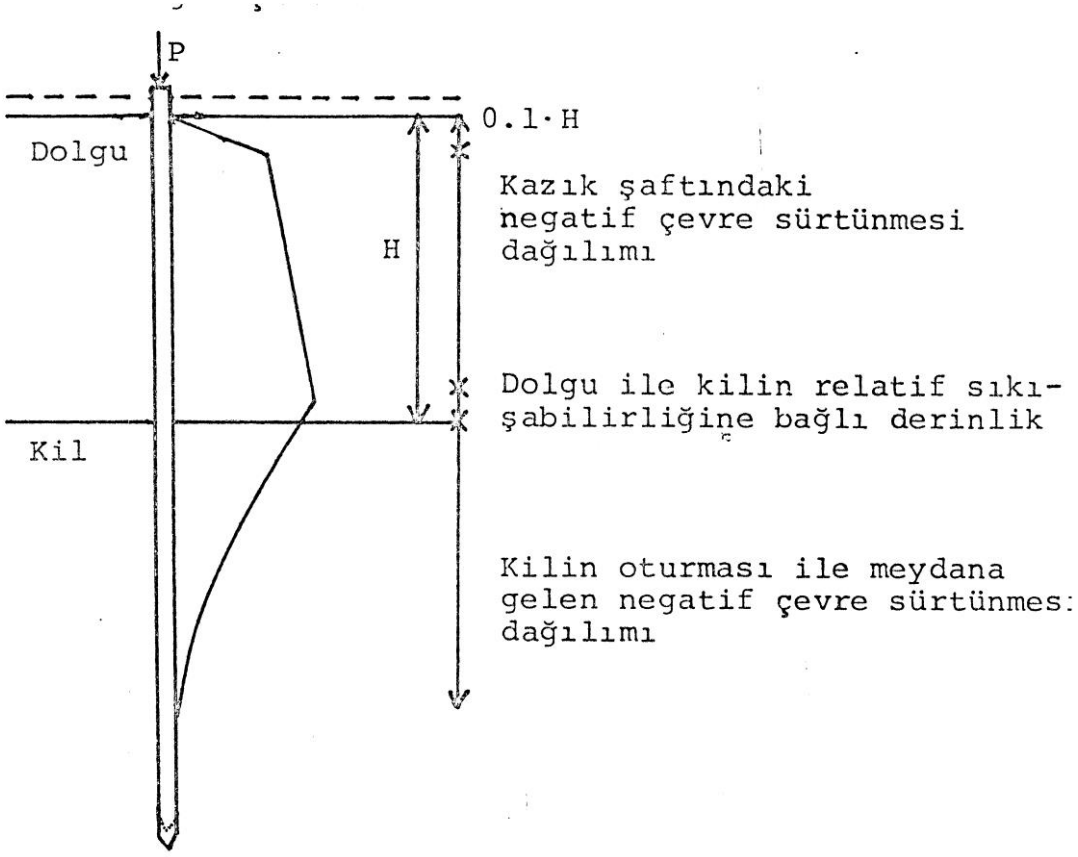
Şekil 4.3.c' de yüklenmiş bir kazıktaki teorik negatif çevre sürtünmesi dağılım diyagramı gösterilmiştir. Ancak, tüm negatif çevre sürtünmesi problemleri sadece bu diyagram yardımıyla çözülemez. Ayrıca, kazık teşkili ile yükleme yapılması arasındaki zaman aralığı önemlidir. Kendi ağırlığı altında tamamen konsolide olmuş eski dolgularda ve sürşarj yüklemesinin olmadığı yerlerde negatif çevre sürtünmesi ihmal edilebilir. Diğer taraftan, pozitif çevre sürtünmesi meydana gelmeyeceği de unutulmamalıdır.



Şekil 4.3: Taşıyıcı Tabakaya Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı [10]

4.2.3. Kil Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Kil üzerine serilmiş bir dolgu zeminde, alttaki kil tabakasına girecek şekilde kazık teşkil edildiğinde, her iki tabaka da kohezyonlu olduğundan kazık boyunca negatif çevre sürtünmesi meydana gelir. Şekil 4.4' te görüldüğü gibi, doğal olarak kazıkta bir miktar oturma meydana gelmektedir. Üstteki dolgu zemin kendi ağırlığı altında, yıllarca sürebilecek bir zaman diliminde konsolidasyonunu tamamlayabilir. Alttaki kil zeminin de kendi ağırlığı ile yapacağı oturmanın yanısıra üstteki dolgu yükü ile de konsolide olacağı açıktır.



Şekil 4.4: Sıkışabilir Kil Zemin Üzerine Bir Dolgu Serildikten Sonra Teşkil Edilen Kazık Üzerindeki Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı [10]

Kazık boyunca meydana gelen negatif çevre sürtünmesi diyagramında pik noktaya kadar olan dağılım Bölüm 4.2.' deki halde yapılan açıklama ile aynı şekilde meydana gelir. Bu noktadan itibaren negatif çevre sürtünmesi değeri kazığın alt kısımlarına doğru azalır. Bunun sebebi ise, üstteki dolgunun yanısıra alttaki kil zeminin de oturma yapmasıyla, kazığın kil zeminde bir miktar ilave yük taşımak zorunda kalmasıdır. Ancak, kazığın bir miktar oturmasının, kazığı negatif çevre sürtünmesine

karşı destekleyici yönde rol oynayacağı unutulmamalıdır. Sonuç olarak, kil zeminde kazığın oturması negatif çevre sürtünmesini azaltıcı etken olmasına rağmen, zeminin kohezyonlu olması bu etkiyi artırıcı bir nitelik taşımaktadır. Bu gibi durumlarda, uzun kazıklarda negatif çevre sürtünmesinin büyük miktarlarda olabileceği göz ardı edilmemeli ve en önemlisi bazı hallerde negatif çevre sürtünmesi değerinin kazığa uygulanan yüklerden daha büyük olabileceği unutulmamalıdır.

4.3. Negatif Çevre Sürtünmesi Problemi

Negatif çevre sürtünmesinin hesaplanması aşağıdaki dört faktöre bağlı olan karmaşık bir problemdir [10].

1. Dolgu ile kazık yüzeyi arasındaki relatif hareket
2. Doğal zemin ile kazık yüzeyi arasındaki relatif hareket
3. Yükleme halinde kazığın sıkışması
4. Sıkışabilir tabakanın konsolidasyon oranı

Genelde kil zeminde negatif çevre sürtünmesini meydana getiren düşey yöndeki hareket ile kazık arasındaki relatif yer değiştirme küçük oranlarda meydana gelir. Bu düşey hareket kilin ya kendi ağırlığı altında ya da yük altında oturmasından ileri gelir. Bu olayların meydana gelmesi kazığa yapılan yükleme ile de tam olarak ilgili değildir. Ancak, kil zeminde negatif çevre sürtünmesinin meydana gelebileceği durumlarda kazık yükleri mutlaka tahkik edilmelidir.

5. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN HESAPLANMASI

5.1. Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışmalar

5.1.1. Bjerrum' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması

Bjerrum (1969), negatif çevre sürtünmesinin, kilin drenajsız kayma mukavemeti ile ilişkisi olmadığını belirtmiş ve bunu (5.1) bağıntısı ile göstermiştir [10].

$$\tau_{act} = K.p_o.\tan\phi_e + X.P_e \qquad \textbf{(5.1)}$$

τ_{act} : Birim negatif çevre sürtünmesi

K : Yatay toprak basıncı katsayısı

p_o : Efektif üst tabaka yükü

ϕ_e : Efektif kayma mukavemeti açısı

X : Yükleme oranı faktörü

P_e : Konsolidasyon basıncı

Birinci terim sürtünme direncini verir ve yükleme oranına bağlıdır. Kohezyonu temsil eden ikinci terim kazık ve zemin arasındaki relatif hareketin çok küçük olmasından dolayı sıfır kabul edilir. Bjerrum, bu eşitlik sayesinde, negatif çevre sürtünmesini Tablo 5.1' de görüldüğü şekilde hesaplamıştır.

Tablo 5.1: Kil Zeminde Negatif Çevre Sürtünmesi Değerleri [10]

Kil Cinsi	ϕ_e	K	Birim Negatif Çevre Sürtünmesi
Siltli	30^o	0.45	0.25xPo
Düşük Plastisiteli	20^o	0.50	0.20xPo
Plastik	15^o	0.55	0.15xPo
Yüksek Plastisiteli	10^o	0.60	0.10xPo

5.1.2. Fellenius' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Deneyi

Fellenius (1972) kazık üzerindeki deneyleriyle, negatif çevre sürtünmesi hakkında belli sonuçlara varmıştır.

Fellenius deneyinde, üstte 40 m kalınlıkta sıkışabilir yumuşak kil ve altta 15 m kalınlıkta az sıkışan silt-kum tabakası içine çakılmış iki prefabrik beton kazık üzerinde negatif çevre sürtünmesinin zamanla artışını ölçmüştür.

Bu deney ile kilin yeniden konsolide olması sonucu 5 aylık bir zaman süresince kazıklara 300 kN' luk ilave bir yük geldiğini gözlemiştir. Bölgesel oturmalar nedeniyle kazıkta yılda 150 kN gibi az bir yük artışı olmuştur. Kazık yapımı bitip kazığın normal taşıyacağı yük olan 440 kN' luk yük etkitildikten 17 ay sonra her kazığa 440 kN yük eklenmiş, bir sene sonrasındaki artış ise 360 kN olmuştur [10].

Tüm bu yüklemeler kazığın belli bir oranda oturmasına sebep olmuş, dolayısıyla bu kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesinin bir miktar azalmasını sağlamıştır, fakat kazığın oturması sona erdiğinde bölgesel oturmanın, kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesi değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Buradan negatif çevre sürtünmesinin kazığın oturması ile zeminin konsolide olması arasındaki korelasyona göre artacağı veya azalacağı sonucuna varılmıştır.

5.1.3. Terzaghi-Peck' in Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması

Terzaghi-Peck (1967) çalışmalarında, kazığa verilen maksimum düşey kuvveti, kazık boyunca elde edilen limit kayma kuvvetlerinin toplamından hesaplamıştır. Tekil bir kazıkta, herhangi bir z derinliğinde, P düşey kuvveti;

$$P = \int_0^L \tau_a .c.dz \qquad \textbf{(5.2)}$$

olarak bulunur [11]. Burada;

τ_a : Zemin-kazık arası kayma gerilmesi limit değeri

c : Kazık çevresi (π.d)

Coulomb kırılma hipotezinden elde edilen τ_a ise [11];

$$\tau_a = c_a' + K_s.\ \sigma_v'.\tan\phi_a' \qquad \textbf{(5.3)}$$

c_a' : Drenajlı kazık-zemin adezyonu

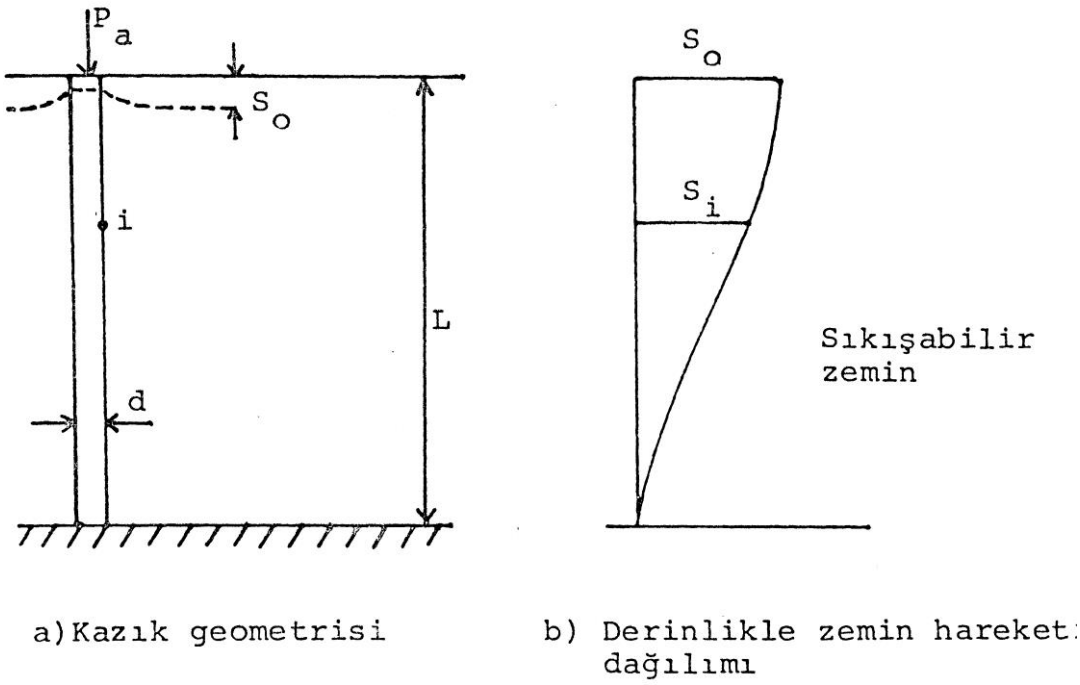
K_s : Yatay toprak basıncı katsayısı

σ_v' : Efektif düşey gerilme

ϕ_a' : Kazık-zemin arasındaki (drenajlı) sürtünme açısı

Sıkışabilir zemine çakılan kazık, Şekil 5.1.a' da görülmektedir. Burada P_a yüklemesi altında kazığın elastik sıkışması ve bölgesel oturmasının şekli teorik olarak gösterilmektedir. Şekil 5.1.b' de ise derinliğe göre zemin hareketinin dağılımı ifade edilmektedir. (5.2) ve (5.3) bağıntılarından (5.4) bağıntısı elde edilir [11].

$$P = \Pi.d.L.\left[c_a' + K_s.\tan\phi_a'.\left(\frac{\gamma.L}{2} + q\right)\right] \qquad \textbf{(5.4)}$$



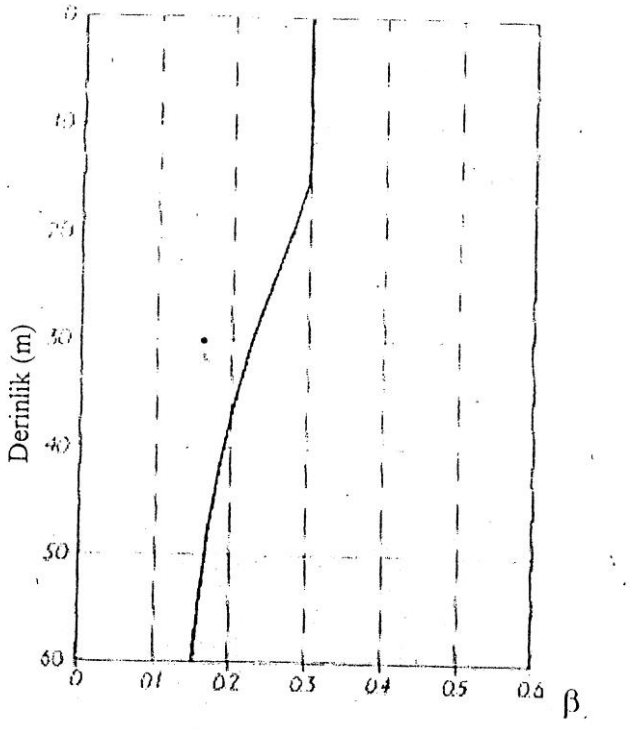
Şekil 5.1: Negatif Çevre Sürtünmesi Problemi [11]

5.1.4. Meyerhof' un Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışması

Meyerhof sert killerde teşkil edilen çakma kazıklarda, negatif çevre sürtünmesinin efektif gerilme ve penetrasyon derinliği ile artan β katsayısına bağlı olduğunu ileri sürmüştür (Şekil 5.2). β değeri suya doygun killerde Flaate ve Selnes tarafından önerilen ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı ampirik korelasyonla belirlenebilir.

$$\beta = \beta_{NC}.OCR^{0.5} \quad \textbf{(5.5)}$$

Bu eşitlikte, OCR zeminin aşırı konsolidasyon oranını, β_{NC} ise normal konsolide durumdaki değerini ifade etmektedir [12].



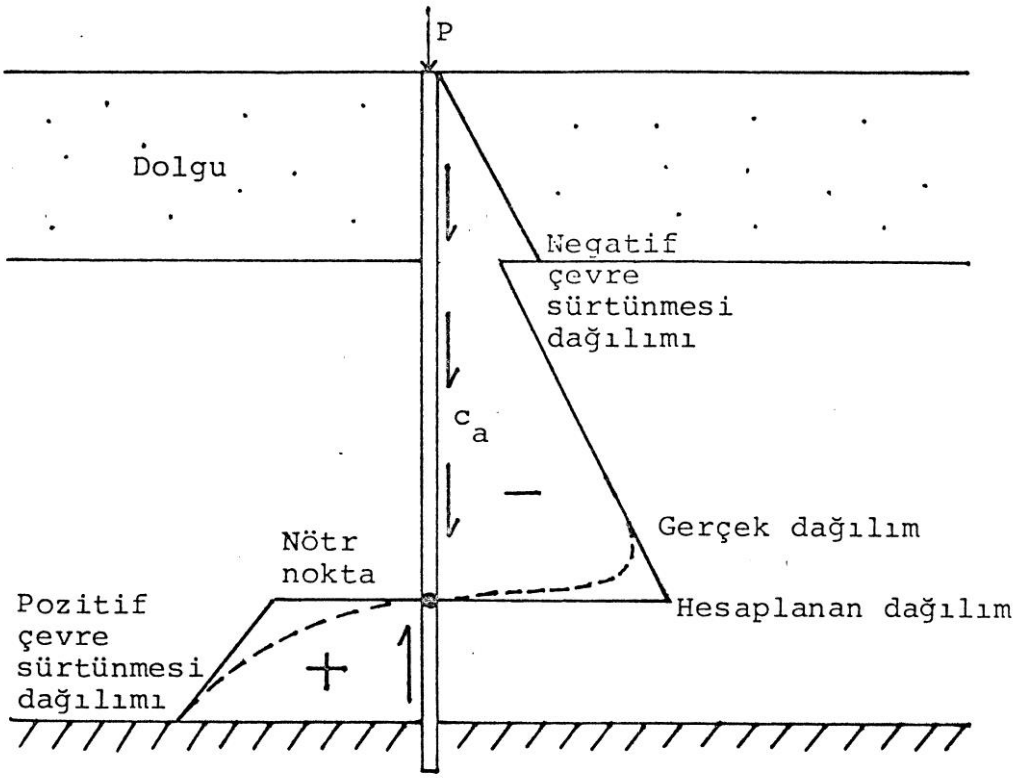
Şekil 5.2: β Katsayısının Penetrasyon Derinliği ile Değişimi [13]

5.2. Negatif Çevre Sürtünmesi Hesap Yöntemleri

5.2.1. Kazıklarda Nötr Nokta

Negatif çevre sürtünmesinin, kazık boyunca sabit kalmadığı bilinmektedir. Şekil 5.3' te de görüldüğü gibi, negatif çevre sürtünmesi, kazıkta "nötr nokta" olarak isimlendirilen ve kazığın eksenel deplasmanının, kazık çevresindeki zeminin oturmasına eşit olduğu noktaya kadar etkili olmaktadır. Bu noktadan sonra kazığı destekleyici şekilde pozitif çevre sürtünmesi meydana gelir.

Şekil 5.3' te de kazık, kaya gibi taşıyıcı bir tabakaya oturmaktadır. Bu durum söz konusu olduğunda kazığın hemen hemen tümü negatif çevre sürtünmesine maruz kalır. Bunun nedeni ise kazığın sağlam zemine oturarak, oturma yapmasının engellenmesinden dolayı nötr noktanın kazık üzerinde alt kısımlarda konumlanmasındandır.



Şekil 5.3: Kazıktaki Nötr Noktaya Göre Çevre Sürtünmesi Dağılımı [13]

Negatif çevre sürtünmesini temsil eden adezyon (c_a) genel olarak (5.6) eşitliğinde gösterildiği şekilde ifade edilir [13].

$$c_a = \sigma.K.\tan\phi_a' \quad \textbf{(5.6)}$$

c_a : Kazık ile zemin arasındaki adezyon

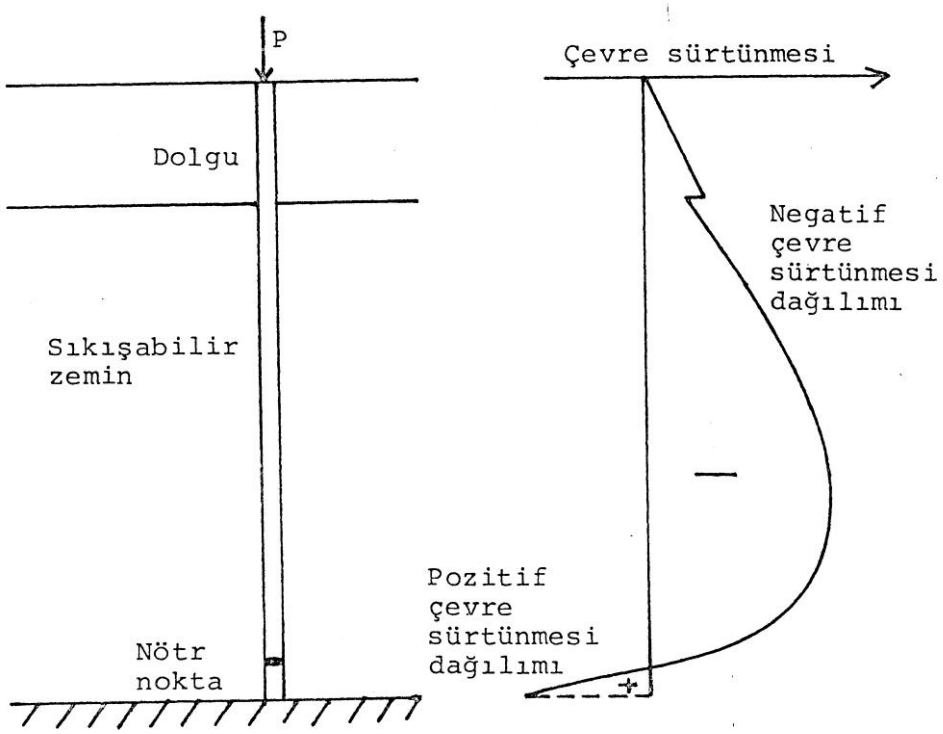
σ : Efektif üst tabaka gerilmesi

$K.\tan\phi_a'$ ifadesi tamamıyla kazığa etkiyen kazığa etkiyen doğal yatay toprak basıncına ve oturma miktarına bağlıdır. Tablo 5.2' de çeşitli zeminler için kabul edilen $K.\tan\phi_a'$ değerleri gösterilmektedir.

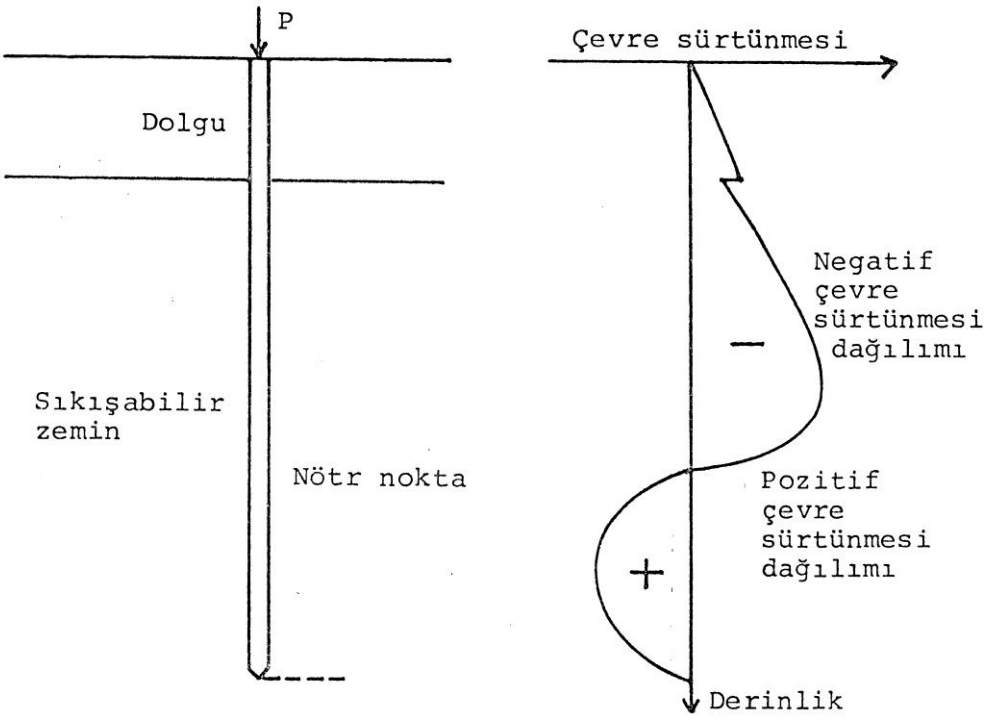
Tablo 5.2: $K.\tan\phi_a'$ Değerleri [13]

Zemin cinsi	$K.\tan\phi_a'$
Kaya dolgu	0.40
Kum, çakıl	0.35
Silt, normal konsolide kil (w_L<50)	0.30
Normal konsolide kil (w_L>50)	0.20

Pratik olarak kazıkta negatif çevre sürtünmesinin pozitif çevre sürtünmesine geçtiği nokta olarak bilinen nötr noktanın yeri, kazık cinsine göre değişmektedir.



Şekil 5.4: Uç Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi [14]



Şekil 5.5: Sürtünme Kazığında Negatif Çevre Sürtünmesi [14]

Şekil 5.4' te görülen uç kazığında herhangi bir şekilde kazığın oturması söz konusu olmadığından büyük negatif çevre sürtünmesi değerleri meydana gelir. Dolayısıyla nötr nokta kazık ucuna yakın bir yerde konumlanır. Buna karşın Şekil 5.5' te görülen sürtünme kazığında, kazığın oturması ile negatif çevre sürtünmesinin bir miktarı yok olacağından nötr nokta kazığın orta kısmında yer alabilir.

Negatif çevre sürtünmesi hesaplanırken göz önüne alınması gereken iki önemli unsur bulunmaktadır:

1. Grup halindeki kazıklarda toplam negatif çevre sürtünmesi, herbir kazığın toplamından elde edilir [15].

$$Q_n = \Sigma Q_{nf} \qquad \textbf{(5.7)}$$

2. Kazıkların yanısıra kazık aralarındaki zemin ağırlığının da hesaba katılması ile (5.8) bağıntısı elde edilir [15].

$$Q_n = f_s.L_f.P_g' + \gamma.Lf.A \qquad \textbf{(5.8)}$$

γ : L_f derinliğindeki, kazık grubu içindeki zeminin birim hacim ağırlığı

A : Kazık grubu alanı

f_s : Kazık grubu çevresine etkiyen birim çevre sürtünmesi

P_g' : Kazık grubu çevresi

$$f_s = \alpha.q.K \qquad \textbf{(5.9)}$$

q : z derinliğinde efektif üst tabaka gerilmesi

α : (q.K) ile ilgili katsayı

K : Yatay toprak basıncı katsayısı

Kazıkların maruz kaldığı negatif çevre sürtünmesi için emniyet faktörünün dikkatli bir şekilde ele alınması gerekir. Emniyet faktörü, negatif çevre sürtünmesi ve yükleme unsurları için söz konusudur.

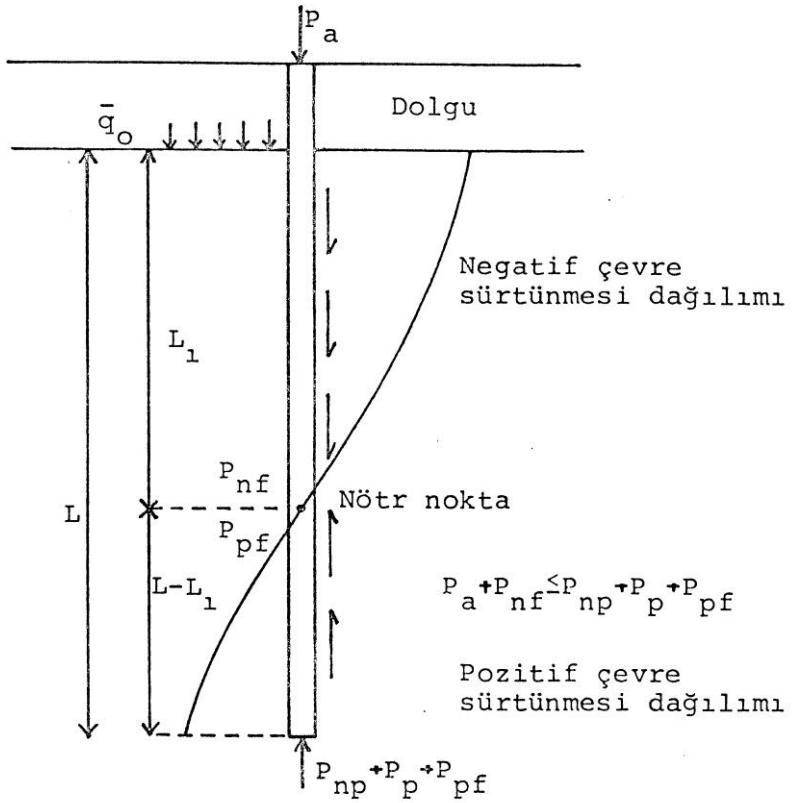
Q_{nf} olarak ifade edilen negatif çevre sürtünmesi kazığa gelen P yüküne eklenir ve Q_{ult} değeri ile (5.10) ifadesinde görüldüğü şekilde karşılaştırılır [10]:

$$P + Q_{nf} = \frac{Q_{ult}}{F} \qquad \textbf{(5.10)}$$

Daha gerçekçi, emin bir yaklaşım için kazık yükleme değerini, F emniyet faktörüne bölmek gerekir. Sonuçta bu elde edilen değerin kabul edilebilirliği kontrol edilmelidir.

5.2.2. Negatif Çevre Sürtünmesi Örnekleri

Tek bir kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesi miktarı, Şekil 5.6' da gösterildiği şekilde, nötr nokta esas alınarak hesaplanabilir.



Şekil 5.6: Nötr Noktaya Göre Kazık Üzerindeki Negatif ve Pozitif Çevre Sürtünmelerinin Teorik Gösterimi [15]

5.2.2.1. Kohezyonsuz Zemin Üzerindeki Kohezyonlu Dolgunun Meydana Getirdiği Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı

Şekil 5.7' de görüldüğü gibi kohezyonsuz doğal zemin üzerine kohezyonlu bir dolgu serildiğinde ve burada kazık teşkil edildiğinde teorik olarak sadece kazığın kohezyonlu tabaka içinde kalan kısmında negatif çevre sürtünmesi meydana gelir.

(5.11) eşitliği ile negatif çevre sürtünmesi değeri hesaplanabilir [15]:

$$Q_{nf} = \int_0^{L_F} \alpha'.p'.q.K.dz \qquad \textbf{(5.11)}$$

α' : (q.K) ile ilgili katsayı

$\alpha' = \tan\delta$

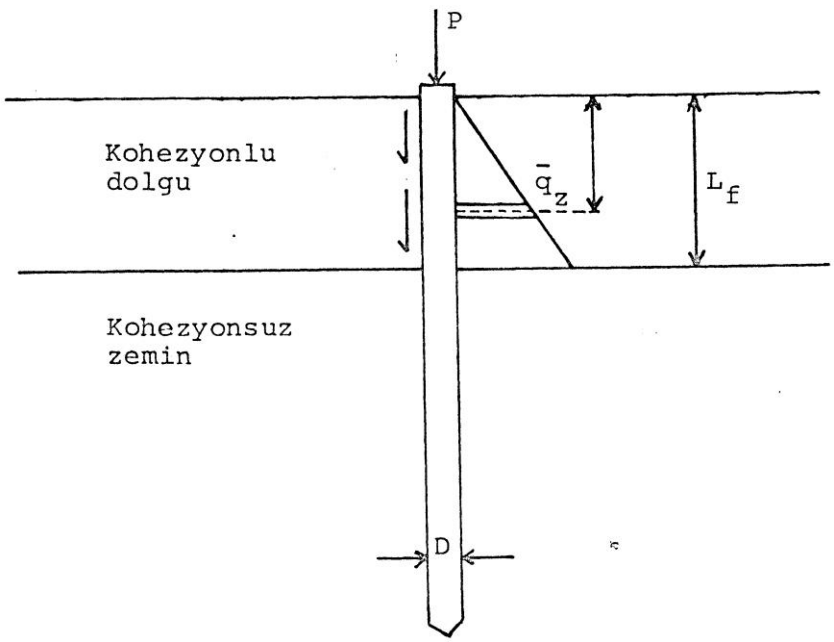
$\delta = (0.5\sim0.9)\phi$

p' : Kazık çevresi

K : Yatay toprak basıncı katsayısı; $K=K_o=1-\sin\phi$

q : z derinliğindeki efektif gerilme

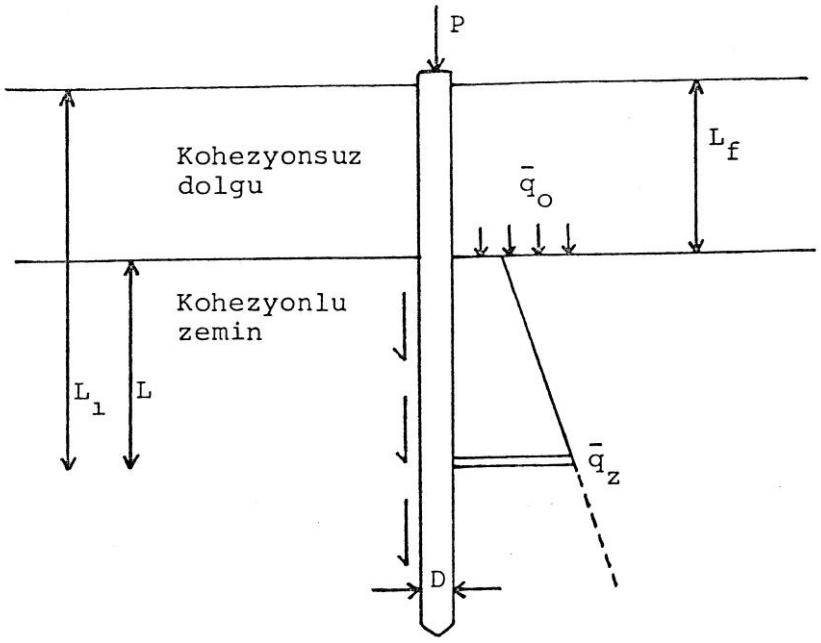
Q_{nf} : Negatif çevre sürtünmesi



Şekil 5.7: Kohezyonlu Dolgu Zemindeki Negatif Çevre Sürtünmesi [15]

5.2.2.2. Kohezyonlu Zemin Üzerindeki Kohezyonsuz Dolgunun Meydana Getirdiği Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı

Bu durumdaki bir zeminde teşkil edilen kazıkta, Bölüm 5.2.2.1.' de olduğu gibi, Şekil 5.8' de gösterildiği şekilde kazığın sadece kohezyonlu zemin içindeki boyunca negatif çevre sürtünmesi meydana gelir.



Şekil 5.8: Kohezyonsuz Bir Dolgu Zemin Altındaki Kohezyonlu Zemin Tabakasında Meydana Gelen Negatif Çevre Sürtünmesi [15]

Bu durumda, negatif çevre sürtünmesi (5.12) bağıntısı ile hesaplanır [15].

$$Q_{nf} = \int_0^{L_1} \alpha'.p'.q.K.dz \qquad \textbf{(5.12)}$$

Nötr noktanın alt kısmında pozitif çevre sürtünmesi mevcuttur ve dolayısıyla bu değer (5.13) bağıntısıyla bulunabilir [16].

$$Q_{pf} = \int_{L_1}^{L} \alpha_2'.p'.q.K.dz + Q_{np} \qquad \textbf{(5.13)}$$

Q_{np} : Uç kazıklarda, uç tarafın negatif çevre direncini taşıyan değer

$$q = q_o + \gamma'.z \qquad \textbf{(5.14)}$$

Ayrıca bu integral hesabında net sonuçlara varabilmek için sınırların belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Eğer $\alpha' = \alpha_2$ alınırsa ve yüzen kazık için Q_{np} değerinin sıfıra eşit olduğu söylenirse eşitliğin düzenlenmesi sonucu (5.15) ifadesi elde edilebilir [15].

$$\alpha'.p'.(q_0.L_1 + \gamma'.\frac{L_1^{\,2}}{2}).K = \alpha'.p'.q_0.(L - L_1).K + \alpha'.p'.\gamma'.(L^2 - L_1^{\,2}).\frac{K}{2}$$

L_1 : Nötr noktaya olan uzaklık

$$L_1 = \frac{L}{L_1}.(\frac{L}{2} + \frac{q_0}{\gamma'}) - 2.\frac{q_0}{\gamma'} \qquad \textbf{(5.15)}$$

$q_0 = 0$ olduğunda; $L_1 = \frac{L}{\sqrt{2}}$ olur.

Q_{np} değeri, uç kazıklarda tahmini bir değeri gerektirmektedir.

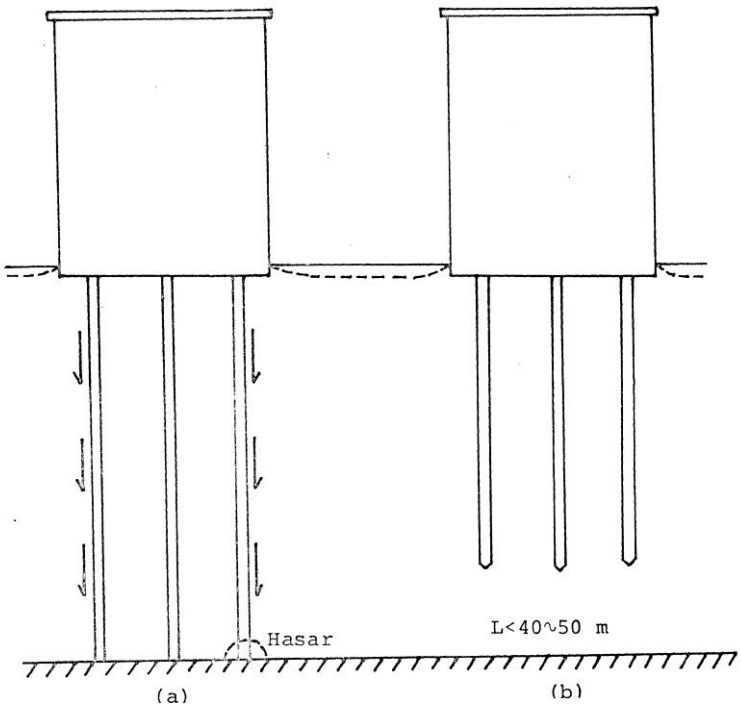
5.3. Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltma Yöntemleri

Kazığın taşıma özelliğinde olumsuz etkilere sebep olan negatif çevre sürtünmesi değeri zeminden daha çok kazık üzerinde yapılan bir kısım işlemlerle azaltılabilmektedir.

5.3.1. Kazık Boyutları ile İlgili Hususlar

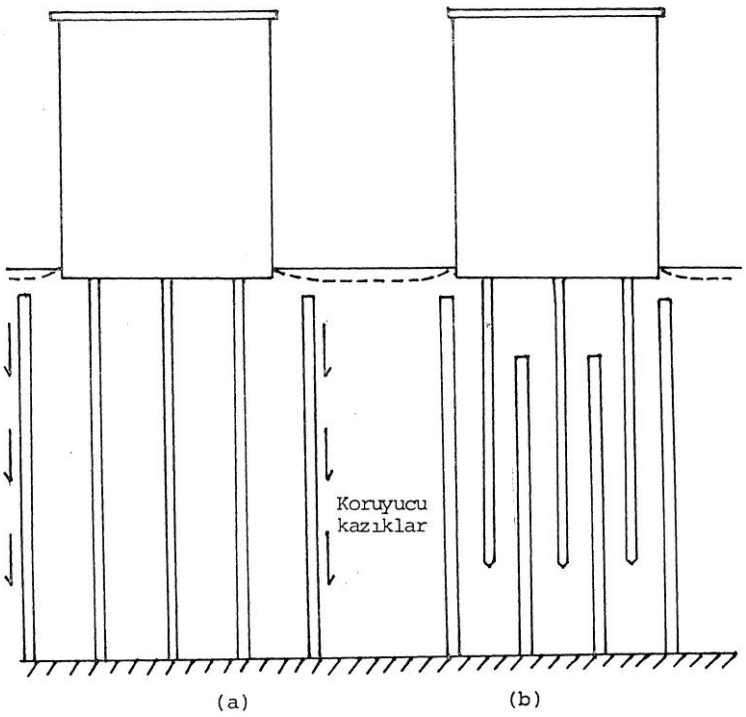
Kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesinin etkisini minimuma indirmek için uygulanacak ilk yöntem kazık boyutları üzerinde yapılabilecek değişikliklerdir. Bunlar, kazık çapının genişletilmesi, geniş uçlu yapılması veya boyunun değiştirilmesi şeklinde sayılabilir. Eğer kazık boyu 40~50 m' yi aşarsa ve kazık taşıyıcı tabakaya oturuyorsa, aşırı miktarlara ulaşan negatif çevre sürtünmesi değerleri kazık ucunda Şekil 5.9.a' da görüldüğü gibi hasar meydana gelmesine sebep olabilir. Bu problem Şekil 5.9.b' de görüldüğü gibi sürtünme kazığı seçimi ile çözülebilir. Ancak, bu seçimde kesinlikle oturmalar üst sınır değerlerinin altında kalacak şekilde kazık boyu tayin edilir. Ayrıca yapının oturması ile zeminin oturmasının aynı olması istenir.

Pratikte negatif çevre sürtünmesi tam olarak elimine edilemez. Bu amaçla bazı kazık sistemlerinde yapılan harcamalar hemen hemen kazık maliyeti ile aynı miktarlara ulaşabilir. Bunun için en pratik, en ucuz yöntem Şekil 5.10.a' da görüldüğü gibi kazık grubunun çevresine bir seri koruyucu kazık teşkil edilerek veya Şekil 5.10.b' de görüldüğü gibi yüzen kazıklı bir kazık sisteminde koruyucu kazık inşa edilerek negatif çevre sürtünmesini azaltmaktır.



Şekil 5.9: Uç Kazıklarında Negatif Sürtünmeden Kaynaklanan Hasarın Sürtünme Kazığı ile Önlenmesi [13]

a. Uç Kazığı b. Sürtünme Kazığı



Şekil 5.10: Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması [13]

Negatif çevre sürtünmesinin azaltılması amacıyla Hollanda' da bir kısım yapılarda geniş uçlu kazıkların kullanıldığı bilinmektedir. Bir diğer çalışma da kazık başına koruyucu bir eleman geçirilip kazık ile koruyucu arasına viskoz bir malzeme doldurularak bu etkinin azaltılmasıdır. Ancak bu yöntemlerin uygulanmasının kolay olmaması bilim adamlarını yeni çalışmalara yöneltmiştir.

5.3.2. Kazık Yüzeyinin Kaplanması

Negatif çevre sürtünmesi pratik olarak kazık yüzeyinin asfaltlanması ile azaltılabilir. Asfalt kalınlığı çelik kazıklarda en az 1 mm, yüzeyi pürüzlü olduğu için betonarme kazıklarda 2 mm olarak belirlenmiştir. Ancak asfalt kaplama, kazığın çakılması sırasında zarar görebilir. Bunu önlemenin en kesin yolu geniş uçlu asfaltlı kazıkların teşkil edilmesidir.

5.3.2.1. Bjerrum' un Bitüm Kaplı Kazık Üzerindeki Çalışması

Negatif çevre sürtünmesini azaltmak amacıyla, Bjerrum (1969), farklı zemin şartlarında bitüm kaplanmış ve kaplanmamış çeşitli kazıklar üzerinde birçok araştırma ve deney yapmıştır. Deneyini, iki farklı bölgede, uzun çelik kazıklar kullanarak ölçümlerle gerçekleştirmiştir. Deneyinde herhangi bir takviye yapılmayan, kaplamasız kazıklar normal; geniş uçlu, bitümle kaplanmış kazıklar ise bentonit bulamacı ile teşkil edilmiş kazıklardı. Bentonit kullanımının buradaki tek amacı, bitüm kaplamanın çakma esnasında zarar görmesini önlemektir.

Yapılan gözlem ve hesaplar sonucu, bitümle kaplı kazıklarda düşey yöndeki ekstra kuvvetlerin % 90 oranında azaldığı bulunmuştur, fakat aynı dizaynda olup da bitüm kaplanmamış geniş uçlu ve bentonitle teşkil edilen kazıklarda ise bu azalmanın %15 dolayında olduğu gözlenmiştir. Buradan varılan sonuç, bitümün negatif çevre sürtünmesini %75 azalttığıdır. Ayrıca, bentonit kullanmadan teşkil edilen geniş uçlu, bitüm kaplı kazıklardaki azalma oranı ise % 30 olarak bulunmuştur [9].

Bitümün Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltma Miktarı %75	=	BİTÜMLÜ KAZIK Bentonitle İnşa Edilmiş Kazığın Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltma Miktarı: %90	-	BİTÜMSÜZ KAZIK Bentonitle İnşa Edilmiş Kazığın Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltma Miktarı: %15

5.3.2.2. Brons, Amesz ve Rinck' in Çalışması

Brons, Amesz ve Rinck (1969) yaptıkları çalışmalarında, 1 cm' lik bitümle kaplı kazık kullanmışlardır. Kazık bentonit bulamacı ile teşkil edildiğinden, negatif çevre sürtünmesini azaltmada % 90' lık bir başarı sağladılar.

Deneylerinde kazıklar arası mesafeyi detaylı olarak ele aldıklarından dolayı, kazıkların fazla yakın çakılması halinde negatif çevre sürtünmesinden dolayı meydana gelen ekstra düşey kuvvetlerde %85 oranında azalma olduğunu saptadılar, benzer olarak kazıkların 1.8 m aralıklarla çakılmaları halinde bu azalmanın %50 civarında olduğunu belirlediler [9].

5.3.2.3. Claessen ve Horvat' ın Çalışması

Claessen ve Horvat da çalışmalarında kazığın bitümle kaplanmasını esas almışlardır. 380x450 mm boyutlarında, üzerine 1 cm bitüm sürülmüş prefabrik kazık üzerinde yaptıkları deneyde, kaplanmamış kazıktaki 1600~1700 kN' luk yüke oranla, 24 m boyundaki kazıkta 750 kN' luk bir azalma saptadılar.

Claessen ve Horvat, kazığın uç kısmındaki bitüm kaplamanın kazığın uç taşıma kapasitesine etkidiğini ve uç mukavemetini azalttığını belirlediler. Bu problemden kaçınmak için buldukları çözüm yöntemi ise, kazığın çapı veya genişliğinin 10 katı kadar bir uzunluk boyunca kazığın alt kısmının bitümle kaplanmamasıydı. Böylece, kazığın uç kısmının bitümden olumsuz etkilenmesini ortadan kaldırdılar [9].

5.3.3. Elektro-Osmosis Yöntemi

Kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesini azaltmak kullanılan en özel çalışmalardan birisi elekro-osmosis yöntemidir. Bjerrum (1969) çalışmasında, 4 amp civarındaki bir elektrik akımı ile bu etkiyi yaklaşık olarak % 50 azaltabilmiştir. Ancak oldukça pahalı bir yöntemdir. Siltli kil ve killi silt gibi zeminlerde başarılı sonuç vermesine rağmen yüksek plastisiteli zeminlerde kullanılması söz konusu olmamaktadır. Daha ileriki yıllarda yapılan deneylerde bu konuda daha farklı sonuçlar elde edilememiştir.

6. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN PLAXIS PROGRAMI İLE SİMULE EDİLMESİ

6.1. Plaxis' in Tanımı

Plaxis üzerindeki çalışmalar 1987 yılında Delft Teknik Üniversitesi' nde Hidroloji Bölümü' nde başlamıştır. İlk olarak Hollanda' da akarsu setlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü amaçlı kullanılmıştır. Sonraki yıllarda geoteknik mühendisliğinin diğer alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu bölüm gelişen çalışmalarıyla 1993 yılında PLAXIS BV adında bir firma olarak ortaya çıkmıştır.

Plaxis' in asıl amacı geoteknik mühendislerinin uzun hesaplamalara girmeden dizayn yapabilmelerini sağlamaktır. Çoğu zaman geoteknik mühendisleri uzun süren hesap metotları ile sonuca ulaşmaktadırlar. Plaxis araştırma merkezi bu amaçla bu konu üzerinde yoğunlaşarak güçlü çözümler üretmişlerdir. Sonuç olarak dünya üzerinde birçok geoteknik mühendisi tarafından kullanılan bu program ortaya çıkmıştır.

Araştırmalar İnşaat Mühendisliği Araştırma ve Kod Üretme Merkezi (CUR Center For Civil Engineering Research & Codes) tarafından desteklenmektedir. Bu maddi desteğin sonucu olarak Plaxis üzerindeki çalışmalar başarılı bir şekilde yürütülmektedir.

Plaxis üzerindeki çalışmaların üniversitelerin desteği olmadan yürütülmesi imkansızdır. Bu amaçla çalışmaların birlikte yürütüldüğü üniversitelerin bir kısmının adları aşağıda listelenmiştir.

Delft University of Technology, (NL)	Prof. A. Verruijt, Dr. R.B.J. Brinnkgreve
Institut für Geotechnik, Uni Stuttgart, (D)	Prof. P.A. Vermeer, Dr. T. Schanz
Laboratoire 3S, Univ. Of Grenoble, (F)	Prof. M. Boulon, Dr. E. Flavingy
University of Oxford, (UK)	Dr. H.J. Burd
University of Colorado, (USA)	Prof. S. Sture, Prof. R.L. Schiffmant
Norwegian Uni. of Science and Tech. (N)	Prof. S. Nordal
Massachusetts Inst. of Tech. (USA)	Prof. A.J. Whittle
Technical University Graz, (A)	Prof. H.F.Schweiger

Plaxis sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanarak deformasyon ve stabilite analizi yapmaktadır. Dizaynların CAD çizimi ile yapılması detaylı ve gerçekçi modellerin ortaya çıkmasına olanak vermektedir. Bu çizilen geometri modeli üzerinde sonlu elemanlar ağı oluşturulur. PLAXIS sonlu elemanlar ağını otomatik olarak kendisi oluşturmaktadır. Kullanıcı istediği takdirde sonlu elemanlar ağına müdahale edebilmekte, istediği nokta, çizgi çevresinde veya herhangi bir alanda ağı sıkıştırabilmektedir. Kullanılan üçgen ağ sistemi SEPRA tarafından geliştirilmiştir. Kullanıcı isteğine göre 6 düğümlü veya 15 düğümlü sonlu elemanlar ağı ile çalışabilmektedir. İstinat duvarları, tünel cidarı ve narin yapılar için "Beam" elemanı kullanılmaktadır. Zemin ile yapı arasındaki etkileşimin sağlanabilmesi için "Interface" ara elemanı kullanılmaktadır.

Ankraj ve destek modellemesinde elastoplastik yay elemanı olan "Anchors", çekme elemanı olarak "Geotextiles", tünel dizaynları için özel olarak hazırlanmış "Tunnel" menüsü kullanılmaktadır.

Zemin modeli olarak "Mohr-Coulomb" kullanılabilmektedir. Bunun yanında kullanıcı ikincil konsolidasyonu da içine alan "Cam-Clay", "Hardening Soil Model" ya da "Soft Soil Creep Model" i kullanabilmektedir.

Program "phi-c reduction" analizini kullanarak tespit ettiği FS (factor of safety) ile de çalıştırılabilmektedir. Bu metot ile her adımdaki FS tespit edilebilmektedir.

Plaxis ile girilen veya minimum boşluk suyu basıncına ulaşılıncaya kadar geçen zamana göre konsolidasyon analizleri yapılabilmektedir.

Belirlenen yük artım değerine göre de analiz yapılabilir. Bunun için "Automatic load stepping" menüsü kullanılır.

Plaxis' in geliştirilmiş grafiksel özelliği sayesinde görsel olarak başarılı bir şekilde hesapların sunumu yapılmaktadır. Minimum 64 MB Ram ile harddisk' te 50 MB boş alan ile çalışan program 20 MB yer kaplamaktadır. Program için tavsiye edilen ideal çözünürlük 1024x768 piksel' dir.

6.1.1. Plaxis' in Genel Modelleme Özellikleri

Analiz edilecek her yeni proje için ilk olarak geometri modelini oluşturmak gereklidir. Noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan geometri modeli gerçek bir problemi temsil eder. Bir geometri modeli farklı zemin tabakalarını, yapısal

elemanları, inşa aşamalarını ve yükleri kapsamalıdır. Problemin sonuçları etkilememesi için seçilen modelin sınırları yeterince geniş olmalıdır. Geometriyi oluşturan üç ana bileşen aşağıda daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

Noktalar: Çizgilerin başlangıç ve bitişini oluştururlar. Noktalar aynı zamanda ankraj, nokta kuvvetler vb. için lokasyonları belirlemede kullanılır.

Çizgiler: Çizgiler geometrinin fiziksel sınırlarını, model sınırlarını, geometrinin süreksizliklerini, farklı tabakaların ayrımını ve inşa aşamalarını belirlemekte kullanılır. Bir doğrunun farklı fonksiyonları ve özellikleri olabilir.

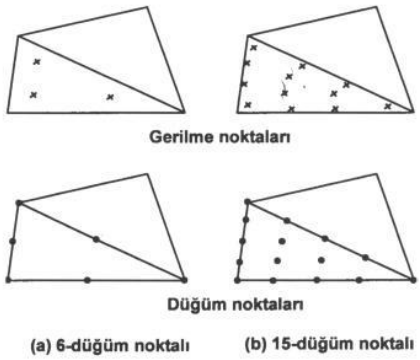
Hücreler: Hücreler her tarafı çizgilerle kapatılmış alanlardır. PLAXIS, geometri çizgilerinin girilmesiyle oluşturulmuş hücreleri otomotik olarak tanır. Hücre içerisinde zemin özellikleri homojendir. Bu yüzden, hücreler zemin tabakalarını oluşturan parçalar olarak düşünülebilir. Hücrelere gelen etkiler hücre içerisindeki bütün elemanlara etkir.

Geometri modelini oluşturduktan sonra, sonlu elemanlar modeli geometri modelinin içerisindeki hücre ve çizgilerin bileşimine bağlı olarak otomotik olarak oluşturulur. Bir sonlu elemanlar ağında, üç tip bileşen ayırt edilebilir, bunlar aşağıda açıklandığı gibidir:

Elemanlar: Ağın oluşturulması sırasında, hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. PLAXIS' te varsayılan üçgen eleman 15 düğümlü elemandır. Ek olarak, 6 düğümlü elemanlar da mevcuttur. Kullanıcı aynı sonlu elemanlar ağında 15 düğümlü elemanların 6 düğüm noktalı elemanlara nazaran daha detaylı ve daha esnek, fakat bu elemanlara göre hesabın çok daha fazla zaman aldığını bilmelidir.

Düğüm Noktaları: 15 düğüm noktalı üçgenler 15 düğüm noktasından, 6 düğüm noktalı üçgenler ise 6 düğüm noktasından oluşur. Elemanlar üzerinde düğüm noktalarının dağılımı Şekil 6.1' de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar hesabı esnasında, deplasmanlar düğüm noktalarında hesaplanır. Düğüm noktaları yük-deplasman eğrilerini oluşturmak için önceden seçilebilir.

Gerilme Noktaları: Deplasmanların tersine, gerilmeler düğümler yerine her bir Gauss noktasında hesaplanmıştır. Şekil 6.1.a' da görüldüğü gibi 15 düğüm noktalı üçgen eleman 12 gerilme noktasına sahiptir ve Şekil 6.1.b' de gösterilen 6 düğüm noktalı üçgen eleman 3 gerilme noktasına sahiptir. Gerilme noktaları gerilme izlerini veya gerilme-şekil değiştirme eğrilerini oluşturmak için önceden seçilebilir.



Şekil 6.1: Düğüm Noktaları ve Gerilme Noktaları

6.2. Plaxis ile Yapılan Model ve Analizler

6.2.1. Genel Bilgiler

Bir geoteknik problemi sonlu elemanlar programı ile modellerken bazı kabuller yapılarak problem basitleştirilmelidir. Burada önemli olan, gerçek problemle modelin uygunluğudur. Bir başka deyişle, problem, uygun elemanlar, iyi bir sonlu elemanlar ağı ve doğru zemin parametreleri kullanılarak modellenmelidir.

Kazık gibi dairesel kesitli yapı elemanları, yükleme ve yapı bakımından merkezlerinden geçen eksene göre simetrik olduklarından eksenel simetrik yani aksi-simetrik olarak modellenebilirler. Eksenel simetriye uygun olarak kazık sola dayalı olarak dizayn edilmiştir. Sınır koşulları ϕ400, ϕ600 ve ϕ800' lük kazıklar için yatayda 20m, düşeyde 40m; ϕ1000' lik kazık için yatayda 25m, düşeyde 50m ve ϕ1200' lük kazık için yatayda 30m ve düşeyde 60m olarak belirlenmiştir. Yan kenarlar yatay yönde, alt kenar ise düşey yönde sınırlandırılmıştır. Dönme ekseni için ise herhangi bir yönde sınırlandırma yapılmamıştır. Birim olarak SI sisteminde çalışılmıştır. Kazık çapının ve kil tabakası kalınlığının negatif çevre sürtünmesi üzerindeki etkisini gözlemlemek için ϕ400, ϕ600, ϕ800, ϕ1000 ve ϕ1200' lük 5 farklı kazık üzerinde ve her kazık çapı için kil tabakası kalınlığı 8m ve 10m olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Kazığın kum içinde kalan kısmı sabit bırakılmıştır.

6.2.2. Zemin Parametreleri

Yapılan modellemede zemin parametrelerinin doğru seçilmesi çok önemlidir. Özellikle, zeminin elastisite modülü (E_{ref}) ve poisson oranı (ν) sonuçlar üzerinde çok etkilidir. Zemin elasto-plastik, kazık ise lineer elastik olarak modellenmiştir. Zemin

için Mohr-Coulomb yapısal modeli kullanılmıştır. Modelde tanımlanan kumlu ve killi zemine ait parametreler aşağıda belirtildiği gibidir:

Tablo 6.1: Yapılan Modele Ait Zemin Parametreleri

Parametre	Sembol	Kil	Kum	Kazık	Birim
Malzeme Modeli	Model	M-C	M-C	Lin. Elastik	-
Davranış Tipi	Tip	Drenajsız	Drenajsız	Geçirimsiz	-
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	γ_{unsat}	16	16.5	25	kN/m^3
Islak Birim Hacim Ağırlığı	γ_{sat}	18	20	-	kN/m^3
Permeabilite (x)	k_x	0.001	1	-	m/gün
Permeabilite (y)	k_y	0.001	1	-	m/gün
Young Modülü	E_{ref}	1000	80000	30000000	kN/m^2
Poisson Oranı	ν	0.35	0.30	0.20	-
Kohezyon	c	10	1	-	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ	17.5	31	-	^{o}
Dilatansi Açısı	ψ	0	1	-	^{o}
Ara Yüzey Katsayısı	R_{inter}	0.9	0.9	-	-

ϕ400, ϕ600 ve ϕ800' lük kazıklar için:

- İlk modelde; 0m-32m arası kumlu, 32m-40m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.
- İkinci modelde; 0m-32m arası kumlu, 32m-42m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.

ϕ1000' lik kazık için:

- İlk modelde; 0m-42m arası kumlu, 42m-50m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.
- İkinci modelde; 0m-42m arası kumlu, 42m-52m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.

ϕ1200' lük kazık için:

- İlk modelde; 0m-52m arası kumlu, 52m-60m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.
- İkinci modelde; 0m-52m arası kumlu, 52m-62m arası killi zemin olarak tanımlanmıştır.

6.2.3. Sonlu Elemanlar Ağı

Sonlu elemanlar ağı oluşturmak önemli parametrelerden biridir. Aynı problem için sadece sonlu elemanlar ağı değiştirilerek değişik sonuçlar elde edilir. Ne çok ince ağ, ne de çok kaba bir ağ tanımlamak doğru sonuçlar verir. Farklı ağlar için problem çözülürse ideal ağ bulunacaktır. Bunun yanısıra, sonlu elemanlar ağı belirlenirken, mühendislik açısından problemin yapısı göz önünde bulundurulmalıdır. Ağın oluşturulması sırasında, hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. Yapılan bu modelde, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi açısından 6 düğüm noktalı üçgen elemanlar yerine 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Aynı amaçla, inceye yakın bir ağ tanımlanmış, buna ilaveten kazığın sağdan ve alttan 1' er metre yakınında bir hücre oluşturularak bu alanda ağ sıkılaştırılmıştır. Yani sonlu elemanlar ağı oluşturulurken, gerilmelerin fazla olduğu yerlerde elemanlar küçültülmüştür. Gerilmelerden çok az etkilenen bölgelerde ise elemanlar geniş tutulmuştur. Böylece optimum eleman sayısı kullanılarak etkili çözüm yapılmıştır.

6.2.4. Başlangıç Koşulları

Ağ oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar modeli tamamlanır. Ancak, hesaba başlamadan önce başlangıç koşulları oluşturulmalıdır. Genel olarak, başlangıç koşulları; başlangıç boşluk suyu basıncı, başlangıç geometrisi ve in-situ gerilmeleri içerir. Ortamda su olmadığından aktif boşluk suyu basıncı sıfırdır. **K_o Yöntemi**, yatay tabakalaşmış zemin profilleri için uygundur. Dolayısıyla yapılan bu modelde in-situ gerilmeleri K_o yöntemi ile hesaplanacaktır. Zeminin tüm ağırlığı başlangıç gerilmelerini oluşturmak için uygulanacağından zemin ağırlığı çarpanı $\Sigma M_{weight}=1.0$ olarak alınır.

6.2.5. Hesap Adımları

Başlangıç koşulları tanımlandıktan sonra hesap adımlarına geçilir. Bu analizde 2 hesap adımı bulunmaktadır. Bu 2 hesap adımından önceki başlangıç aşamasında zeminin yüzyıllar içerisinde oturmasını tamamladığı, yani deformasyonlarının sıfır olduğu varsayılmıştır.

İlk hesap adımında kazık inşa edilmiştir, bu nedenle input kısmında zemin olarak tanımlamış hücre, yapım aşamaları göz önünde bulundurularak bu adımda kazık olarak tanımlanmıştır.

İkinci adımda ise; başlangıçta birim hacim ağırlığı “0” olarak tanımlanan killi zemininin gerçek birim hacim ağırlığı tanımlanır. Bu sayede kilin kendi ağırlığı altındaki davranışı gözlemlenmiş, ilk hesap adımı sonrası kazığın çeperinde oluşan kayma gerilmeleri ihmal edilebilir seviyede olduğundan, ikinci hesap adımı sonrası oluşan gerilmeler “negatif çevre sürtünmesi” olarak tanımlanmıştır.

Aynı hesap adımları, aynı çaptaki kazıklar üzerinde kil tabakası kalınlığının 8m ve 10m olduğu durumlar için incelenmiştir. Bu esnada kazığın kum içinde kalan kısmı sabit bırakılmıştır. Böylece kil tabakası kalınlığının negatif çevre sürtünmesi üzerindeki etkileri gözlenmiştir.

Kazık çapı artırılmak suretiyle, kazık çapının kazık çeperindeki kayma gerilmelerini ne şekilde etkilediği üzerinde durulmuştur.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kazıklar ve kazıklı temeller günümüzde çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kazıklı sistemler pahalı olmasına rağmen, yüzeysel temellerin yetersiz kaldığı durumlarda zorunlu hale gelmektedir.

Kazıkların imalatından sonra, yumuşak kil tabakalarında oturmalar gözlenir. Bu oturmalar ya dış yüklerden, ya da boşluk suyu basınçlarının azalmasından kaynaklanır. Yumuşak kil tabakasında oturmalar kazığa ilave yükler uygular. Kazık tarafından taşınması gereken bu ilave yük "negatif çevre sürtünmesi" olarak adlandırılır. Bu problemle genel olarak;

1. Henüz konsolidasyonunu tamamlamamış doğal zeminlerin oturma yapması

2. Sıkışabilir bir zemin üzerine bir dolgu serilmesiyle, alttaki doğal zeminin bu dolgunun ve kendi ağırlığının etkisiyle sıkışması

3. Serilmiş olan kohezyonlu kalın dolguların zamanla oturması

4. Yeraltı su seviyesinin düşmesi veya sık sık değişim göstermesi

durumlarında karşılaşılır.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar metodunun kullanılması, zemin problemlerinin çözümünde büyük kolaylıklar sağlamakta, problemi basitleştirmek için birtakım kabuller yapılabilmektedir. Uygulanan bu metotta, farklı yapı elemanları için, farklı sınır koşulları, malzeme özellikleri ve yapı yükleri tanımlanabilmektedir.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar programı PLAXIS kullanılarak, taşıyıcı zemine giren tek bir kazığa gelen negatif çevre sürtünmesi 5 farklı kazık çapı ve değişik kil tabakası kalınlıkları için hesaplanmıştır. Başlangıç koşullarında birim hacim ağırlığı "0" olarak tanımlanmış kilin, 2. hesap adımında gerçek değeri girilerek bu sayede kilin kendi ağırlığı altındaki davranışı gözlemlenmiştir. Gerek kazığın, gerekse zeminin oturmalarının makul değerler içinde kalmasına özen gösterilmiştir. Çünkü

kazığın oturması ile zemin oturması aynı olduğunda negatif çevre sürtünmesi problemi söz konusu değildir. Ancak zemin oturmasının daha büyük olması halinde negatif çevre sürtünmesi kesinlikle göz önüne alınması gereken önemli bir husus haline gelmektedir. Yapılan 11 modele ait PLAXIS çıktıları EK A' da, kazık-zemin ara yüzeyinden elde edilen birim kayma gerilmesi değerleri ve bu birim kayma gerilmesi değerlerinin derinlikle değişimine ilişkin grafikler ise EK B' de yer almaktadır. Yapılan modellerden sonuncusu negatif çevre sürtünmesini önlemeye yönelik bir çalışmadır.

Şekil C.1' de, 400 mm çapında tek bir kazık için yapılan modelden elde edilen, kazık-zemin ara yüzeyindeki birim kayma gerilmelerinin derinlikle değişimine ilişkin grafik görülmektedir. Eksenel simetrik problemlerde çözüm 1 tam tur için yapılmakta, fakat sonuçlar 1 radyanlık dilim için verilmektedir. Dolayısıyla, kazık-zemin ara yüzeyinden elde edilen birim kayma gerilmesi değerleri, gerilmenin gerçekleştiği boy ve model eksenel simetrik olduğundan kazık çevresi yani $2\pi r$ ile çarpılarak kayma kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında çizilmiş olan F (kN)-h (m) diyagramında da görüldüğü gibi kazığın elastik sıkışması ile üst bölgede negatif çevre sürtünmesi değeri sıfır olur. Dolgu tabakası içinde, kazık boyunca derine inildikçe kazık üzerindeki zemin yükünün artmasıyla negatif çevre sürtünmesi değeri artar, fakat alttaki tabakanın hemen üstündeki dolgunun alt kısmında, küçük bir bölgede negatif çevre sürtünmesi kazığın oturmasından dolayı meydana gelmez. Bu nedenle pik değer bu noktaya doğru azalarak sıfırlanır. 400 mm çapındaki kazığa ait τ (kN/m^2)-h (m) diyagramı EK C' de, F (kN)-h (m) diyagramı ise EK D' de yer almaktadır. Yine benzer şekilde Şekil C.3, Şekil C.5, Şekil C.7, Şekil C.9' da, kil tabakası kalınlığının 8m olması halinde sırasıyla ϕ600, ϕ800, ϕ1000 ve ϕ1200' lük kazıklardan, Şekil C.2, Şekil C.4, Şekil C.6, Şekil C.8, Şekil C.10' da ise kil tabakası kalınlığının 10m olması halinde aynı çaplı kazıklardan elde edilen τ (kN/m^2)-h (m) grafikleri görülmektedir, bu grafiklerden yola çıkılarak çizilen F (kN)-h (m) diyagramları ise EK D' de yer almaktadır.

Değişik çaplardaki kazıklara ait bu diyagramlardan anlaşılacağı üzere kazık çapının artmasıyla kazık-zemin ara yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmelerinde azalma olmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere birim kayma gerilmelerinin, gerilmenin gerçekleştiği boy ve model eksenel simetrik olduğundan kazık çevresi yani $2\pi r$ ile

çarpılmasıyla kayma kuvvetlerine geçilmektedir. Dolayısıyla kazık çapının artmasıyla negatif çevre sürtünmesi kuvveti de artmaktadır.

Bununla birlikte aynı çaplardaki kazıklar için üstte bulunan kil tabakası 8m ve 10m olacak şekilde 2 farklı model hazırlanmıştır. Her iki durumda da kazığın taşıyıcı zemin içerisindeki uzunluğu sabit tutulmuş, böylece kil tabakası kalınlığının negatif çevre sürtünmesi üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Buradan elde edilen veriler sonucunda kil tabakası kalınlığının artmasıyla kazık çeperinde meydana gelen birim kayma gerilmelerinin ve dolayısıyla kayma kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Negatif çevre sürtünmesini azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri olan kazık çevresinde bentonit bulamacı teşkil edilmesi de ϕ800' lük kazık için modellenmiş, kazık önüne ince bir sac konulup arasının bentonit bulamacı ile doldurulmasıyla kazık çeperinde meydana gelen birim kayma gerilmelerinin ve kayma kuvvetlerinin kayda değer ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Leonards, G.A., 1997. Foundation Engineering, *Mc. Graw Hill Company Inc., New York.*

[2] Egeli, İ., Özer A., 1990. Funtex Metotları ile Yerinde Dökme Betonarme Kazık Yapımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi.*

[3] Moran, D., 1988. Pile Foundations, *A.A. Balkema/Rotterdam.*

[4] Burland, J.B., 1973. Shaft Friction of Piles In Clay, Ground Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 30-42.

[5] Chandler, R.J., 1968. The Shaft Friction of Piles In Cohesive Soils In Terms of Effective Stress, Civil Engineering and P.W.R. Vol. 63, pp. 48-51.

[6] Parry, R.H.G., Swain, C., 1976. Skin Friction of Piles In Clay, University of Cambridge.

[7] Sağlamer, A., 1973. Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.

[8] Tomlinson, M.J., 1973. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Bülteni,* **12-13,** 75-94.

[9] Poulos, H.G., Davis E.H., 1980. Pile Foundation Analysis and Design, *John Willey and Sons Inc., New York.*

[10] Tomlinson, M.J., 1981. Pile Design and Construction Practice, *Viewpoint Publication, London.*

[11] Poulos, H.G., Davis E.H., 1975. Prediction of Downdrag Forces in End-Bearing Piles, ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, **101,** 189-204.

[12] Wong K.S., Teh. C.I., 1995. Negative Skin Friction On Piles In Layered Deposits, ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, **458.**

[13] Broms, B.B, 1981. Precast Piling Practice, *Thomas Telford Ltd., London.*

[14] Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolp, M.F., Elson, W.K., 1985. Piling Engineer, *John Wiley and Sons, New York.*

[15] Bowles, J.E., 1988. Foundation Analysis and Design, *Mc. Graw Hill, London.*

[16] Şenol, A., 1991. Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul' da doğdu. İlköğrenimini 1990 yılında Faik Reşit Unat İlkokulu' nda, orta öğrenimini ise Bursa Ali Osman Sönmez Fen Lisesi' nden ayrıldıktan sonra 1996 yılında Mehmed Bayazıd Lisesi' nde tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nü kazanarak 2001 yılında mezun oldu ve İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı.