İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLARDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Yakup BUĞDAY

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLARDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HAKKINDA BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Yakup BUĞDAY
(501011579)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Haziran 2008

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.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Tez konumun seçiminde ve çalışmalarım sırasında tezimin geliştirilmesinde hiçbir yardımı esirgemeyen, engin bilgisi, gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Doç. Dr. Tuğrul ÖZKAN'a, tezimin gelişmesindeki desteğinden dolayı kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç Dr. Aykut ŞENOL'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi tezimin hazırlanması sürecinde de bu günlere gelmemdeki esas katkıya sahip olan sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2008

Yakup BUĞDAY

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TABLO LİSTESİ	**v**
ŞEKİL LİSTESİ	**vi**
SEMBOL LİSTESİ	**viii**
ÖZET	**x**
SUMMARY	**xi**
1. GİRİŞ	**1**
2. KAZIKLI TEMELLER	**3**
2.1 Kazıklı Temel Türleri	3
2.2 Kazıklı Temellerin Dayanımı	4
2.3 Kazık Taşıma Gücü	5
2.3.1 Taşıma gücünün statik formüllerle hesaplanması	6
2.3.2 Taşıma gücünün dinamik formüllerle hesaplanması	11
2.3.3 Taşıma gücünün CPT ve SPT verilerine göre hesaplanması	12
2.3.4 Kazık yükleme deneyleri	14
3. KAZIKLARDA ÇEVRE SÜRTÜNMESİ	**16**
3.1 Kohezyonsuz Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar	17
3.1.1 Beta (β) Metodu	18
3.2 Kohezyonlu Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar	20
3.2.1 Alfa (α) metodu	20
3.2.2 Lamda (λ) metodu	25
3.2.3 Beta (β) metodu	27
4. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ	**30**
4.1 Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Boyunca Dağılımı	33
4.1.1 Kayaya soketlenen kazıklarda negatif çevre sürtünmesi	33
4.1.2 Kohezyonsuz zemine giren kazıklarda negatif çevre sürtünmesi	34
4.1.3 Kil zemine giren kazıklarda negatif çevre sürtünmesi	35
5. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ	**37**
6. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN HESAPLANMASI	**40**
6.1 Nötr Noktanın Tayini	40
6.2 Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Taşıma Kapasitesi Hesabına Dahil Edilmesi Yöntemleri	44
6.3 Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaplanma Yöntemleri	45
6.3.1 Terzaghi-Peck'in negatif çevre sürtünmesi ile ilgili çalışmaları	45

6.3.2 Bjerrum'un negatif çevre sürtünmesi ile ilgili çalışması 46
6.3.3 Broms'un negatif çevre sürtünmesi ile ilgili çalışması 47
6.3.4 Negatif çevre sürtünmesinde beta (β) metodları 47
6.3.5 Poulos ve Mattes metodu 49
6.3.6 Vesic No metodu 51
6.3.7 Van Der Vean(1986) metodu 51
6.4 Kazık Grupları İçin Negatif Çevre Sürtünmesi 52

7. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HESABI İÇİN BİR YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ 54
7.1 Kazıklarda Oturma Hesabı 55
7.2 Kil Zeminlerde Konsolidasyon Oturması 56
7.3 Sağlam Tabakaya Giren Bir Uç Kazığında Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı İçin Bir Yaklaşım Geliştirilmesi 56
7.4 Geliştirilen Yaklaşımla Örnek Çözümü 64
7.5 Örnek Problem İçin Negatif Çevre Sürtünmesinin Ampirik Metodlarla Hesaplanması 69
7.5.1 Broms(1981) -K.tanθ- metodu ile çözüm 69
7.5.2 Garlanger(1973) – β – beta metodu ile çözüm 69
7.5.3 Eslami Fellenius(1997) – β – beta metodu ile çözüm 70
7.5.4 Vesic(1977) – No –metodu ile çözüm 71
7.6 Kayaya Soketlenmiş Kazıklar İçin Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması 72
7.7 Geliştirilen Yaklaşımla Çalışan Excel Programı 74
7.8 Geliştirilen Yaklaşımla Çalışan Excel Programında Aynı Ortamda Değişik Kazık Ebatları İçin Sonuçların Karşılaştırılması 80

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 81

KAYNAKLAR 84

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : SPT Darbe Sayısı(N) ve Relatif Sıkılık (D_f) İlişkisi. 13
Tablo 2.2 : Killerde SPT Sayısı (N), Serbest Basınç Direnci (qu) ve Kıvam İlişkisi..... 13
Tablo 3.1 : Kazık ile Zemin Arasındaki Sürtünme Açısı Değerleri..... 17
Tablo 3.2 : Adhezyon katsayısı. 24
Tablo 3.3 : Kazık Yükleme Deneylerinden Elde Edilmiş Beta Katsayıları. 28
Tablo 3.4 : Beta Katsayılarının Yaklaşık Değerleri 29
Tablo 6.1 : Kil Zeminde Negatif Çevre Sürtünmesi Değerleri 46
Tablo 6.2 : Ktan$Ø_a$' için Önerilen Değerler. 47
Tablo 6.3 : Garlanger'in Önerdiği Beta Katsayıları..... 49
Tablo 6.4 : Eslami-Fellenius(1997) Önerdikleri Beta Değerleri..... 49
Tablo 6.5 : Vesic(1977) No Değerleri..... 51
Tablo 7.1 : Örnek İçin Negatif Çevre Sürtünmesi Sonuçlarının Karşılaştırılması... 71

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Kazık taşıma gücü…….	7
Şekil 2.2	Berezantsez-Terzaghi'nin Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Nq Sayıları…….	8
Şekil 2.3	Poulos ve Davis(1980)'in Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Nq sayıları……...	8
Şekil 2.4	Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Çeşitli Nq Sayıları Karşılaştırması……..	9
Şekil 2.5	Kazık Direnci ve Çevre Sürtünmesinin Kazık Oturması ile İlişkisi…….	10
Şekil 2.6	Statik ve Dinamik Dirençler Arasındaki Farklar……..	12
Şekil 2.7	Kazık Yükleme Deneyi Sistemi Örneği…….	15
Şekil 3.1	Fore kazıklar İçin β ve Ø Arasındaki İlişki (Poulos&Davis-1980)……..	19
Şekil 3.2	Adezyon Faktörü İçin TOMLINSON(1980) Tasarım Eğrileri…….	22
Şekil 3.3	Adezyon Faktörü için NAVFAC (1982) Tasarım Eğrileri……...	23
Şekil 3.4	Adezyon Faktörü için BOWLES Önerisi ve Karşılaştırması…….	23
Şekil 3.5	Kohezyonlu Zeminde Uygulanan Kazığın Toplam Taşıma Kapasitesi…	24
Şekil 3.6	λ Sürtünme Kuvveti Katsayısı (Vijayvergiya and Focht-1972)…….	26
Şekil 3.7	Killerde Plastisite İndeksine Karşılık Gelen Beta Katsayıları [Clausen et al(2005) Fellenius (2006)]……..	29
Şekil 4.1	Negatif Çevre Sürtünmesinin Sıkışabilir Tabakada Oluşumu……...	31
Şekil 4.2	Kayaya Oturan veya Soketlenen Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı…….....	34
Şekil 4.3.	Kum-Çakıl Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı ……	34
Şekil 4.4	Dolgu ve Sıkışabilir Kil Zeminden Oluşan Zemin Profilinde Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı……	35
Şekil 4.5	Çakma Kazıklara Ait Model Deney (Kazım Çakımı Sonrası ve Negatif Çevre Sürtünmesi Oluşumu Sonrası)…….	36
Şekil 5.1	Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması…….	38
Şekil 5.2	Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması…….	39
Şekil 6.1	Nötr Noktaya Göre Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı (Efektif Kuvvetler Prensibine Dayalı Metodlar İçin) (Broms,1981) …….	40
Şekil 6.2	Nötr Noktaya Göre Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı (Drenajsız Kayma Mukavemeti Prensibine Dayalı Metodlar İçin) …….....	41
Şekil 6.3	Nötr Noktanın Tayini ve Oturma Profilleri……	41
Şekil 6.4	Sürtünme Kazığında Nötr Noktanın Tayini……...	42
Şekil 6.5	Negatif Çevre Sürtünmesi İçin Etki Katsayısı……...	50
Şekil 6.6	Biraud(2006) için Grup Yerleşimi…….	53
Şekil 7.1	Birim Sürtünme Dayanımlarının Kazık Boyunca Dağılım Çeşitleri…….	56
Şekil 7.2	Negatif Çevre Sürtünmesinin Gerçekleştiği Zemin Profili……	58

Şekil 7.3. Kazık ve Zemin Oturmalarının Derinlikle Değişimi ve Nötr NoktanınTespiti…….. 62
Şekil 7.4 Örnek İçin Zemin Profili…… 65
Şekil 7.5 Excel Programı Veri Giriş Sayfası……. 75
Şekil 7.6 Excel Programı Hesap Sonuç Sayfası…… 76
Şekil 7.7 Kazık Zemin Oturmalarının Değişimini Excel Programında Gösteren Grafik……. 77
Şekil 7.8 Excel Programında Kullanılan Formüller…….. 78
Şekil 7.9 Excel Programında Kullanılan Sonuç Formülleri……. 79
Şekil 7.10 Excel Programından Elde Edilen Karşılaştırmalı Sonuçlar…….. 80

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{Q_s}$	: Kazık taşıma gücü
F	: Kazık kesit alanı
$\mathbf{q_{uç}}$	: Uç gerilmesi
L	: Kazık boyu
u	: Kazık çevresi
$\mathbf{f_s}$	: Çevre sürtünmesi
c	:Kohezyon (FL^{-2})
$\mathbf{N_c}$, $\mathbf{N_\gamma}$, $\mathbf{N_q}$	: Taşıma gücü katsayıları
$\mathbf{D_f}$	: Zemine giren kazık uzunluğu
$\boldsymbol{\gamma}$	: Zemin birrim hacim ağırlığı
$\mathbf{K_s}$	: Yanal toprak basıncı katsayısı (K_a ile K_p arasındadır)
$\mathbf{W_K}$	: Kazık ağırlığı
$\mathbf{W_T}$	: Tokmak ağırlığı
H	: Düşüm yüksekliği
s	: Refü veya kazığın her darbede giriş miktarı
c	: Enerji kayıplarını gösteren
$\boldsymbol{\lambda}$	: Tokmağın tesirli düşüş yüzdesi
c1	: Kazık başındaki darbe takozunun elastik kısalması
c2	: Kazığın elastik kısalması
c3	: Zeminin elastik kısalması
e	: Çarpma sayısı
$\mathbf{D_r}$	: Zeminin sıkılığı
$\mathbf{q_u}$	: Kil zeminler için serbest basınç direnci
N	: SPT darbe sayısı
$\mathbf{X_v}$	: Hesap katsayısı
$\mathbf{X_m}$	: Hesap katsayısı
$\mathbf{N_{55}}$	: Ortalama SPT darbe sayısı
τ_s	: Çevre sürtünmesi
σ_{vo}'	: Kazığınvarlığı dikkate alınmadan hesaplanan efektif üst tabaka gerilmesi
K_o	: Sükunetteki yatay toprak basıncı katsayısı
δ	: Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı
c_a	: Kazık çevresindeki zemin adezyonu
$\mathbf{D_c}$	: Kritik deinlik
B	: Kazık çapı
β	: Sürtünme katsayısı
$\mathbf{q_s}$	: Üniform sürşarj yükü
$\mathbf{Q_{ult}}$	: Kazık toplam taşıma kapasitesi
$\mathbf{Q_b}$	: Kazık toplam uç direnci
Q_s	: Kazık toplam çevre sürtünme direnci
$\mathbf{c_b}$	: Kazık ucundaki örselenmemiş zemine ait drenajsız kohezyon

$\mathbf{A_b}$: Kazık ucu kesit alanı
$\mathbf{A_s}$: Zemin içindeki kazık yüzey alanı
$\mathbf{c_u}$: Kazık çevresindeki örselenmemiş zemine ait ortalama drenajsız kohezyon
α : Adezyon faktörü
s : Şekil faktörü
τ_s : Çevre sürtünmesi
σ_{vo}' : Kazığın varlığı dikkate alınmadan hesaplanan ortalama efektif üst tabaka gerilmesi
c_u : Drenajsız zemin kayma mukavemeti
λ : Sürtünme kuvveti katsayısı. Şekil 3.6'dan bulunur.
$\mathbf{L_1}$: Nötr nokta derinliği
$\mathbf{q_0}$: Sürşarj yükü
γ' : Zemin efektif birim hacim ağırlığı
$\mathbf{Q_n}$:Toplam negatif çevre sürtünmesi
$\mathbf{f_s}$: Kazık grubu çevresinde etkiyen birim negatif çevre sürtünmesi
$\mathbf{L_f}$: Kazık grubu derinliği
$\mathbf{P_g}$: Kazık grubu çevresi
γ : Kazık grubu içindeki zeminin birim hacim ağırlığı
A : Kazık grubu alanı
$\mathbf{c_a}'$: Drenajlı kazık-zemin adezyonu
$\mathbf{K_s}$: Yatay toprak basıncı katsayısı
σ_v' : Efektif düşey gerilme
$\mathbf{Ø_a}'$: Kazık-zemin arasındaki (drenajlı) sürtünme açısı
τ_{act} : Birim negatif çevre sürtünmesi
K : Yatay toprak basıncı katsayısı
$\mathbf{p_o}$: Efektif üst tabaka yükü
$\mathbf{Ø_e}$: Efektif kayma mukavemeti açısı
X : Yükleme oranı faktörü
$\mathbf{P_e}$: Konsolidasyon basıncı
$\mathbf{P_n^m}$: Kazıkta meydana gelecek negatif çevre sürtünmesi yükü
$\mathbf{I_N}$: Etki katsayısı (Şelil 6.4'ten elde edilir)
$\mathbf{E_S}$: Zemin elastik modülü
$\mathbf{S_o}$: Kazık başı seviyesindeki zeminin oturma miktarı
L : Kazık boyu
ν_s : Zemin poisson oranı
$\mathbf{Q_{nf}}$: Negatif çevre sürtünmesi kuvveti
$\mathbf{N_o}$: Vesic faktörü
$\mathbf{p_o}$: Ortalama efektif zemin kuvveti
A : Kazık yüzey alanı
D : Kazık çapı

KAZIKLARDA NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HAKKINDA BİR İNCELEME

ÖZET

Kazıklı temeller, problemli zeminlerde yapı yapılabilmesi amacıyla günümüzde çok sıkça kullanılan temel sistemleridir. Yük aktarma biçimlerine göre uç kazığı ve sürtünme kazığı olarak tanımlanan kazıklar, zemin tabakalarının taşıma gücü kapasitelerine göre tercih edilirler ve boyutlandırılırlar. Uç kazıklarında üst yapı yükü uç direnci sayesinde zemine taşıtılırken, sürtünme kazıklarında üst yapı yükü çevre sürtünmesi sayesinde zemine taşıtılır. Ancak kazık çevresindeki zemin tabakaları konsolidasyonlarını tamamlamamış veya zemin üzerine dolgu yapılmışsa, kazık çevresindeki zemin belli bir oturma yapacaktır ve bu oturma kazık oturmasına nispeten daha fazla olursa, kazıklara istenilenin aksi yönde tesir ederek negatif çevre sürtünmesine yol açacaktır. Bu yük bazen kazığın taşıması öngörülen servis yükü kadar olabileceğinden büyük riskler doğurabilmektedir. Uç kazıklarında kazığın oturması söz konusu olmadığından negatif çevre sürtünmesi kazık boyunca etkili olmakta iken sürtünme kazıklarında kazığın bir miktar oturma yapması kazığın alt kısımlarındaki negatif çevre sürtünmesinin yok olmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada kazık taşıma gücüne ters yönde etki ederek kazıkların taşıma kapasitesini azaltan, hatta kazıkların hasar görmesine sebep olabilecek mertebelere ulaşabilen negatif çevre sürtünmesi problemi tanıtılmakta, azaltma yöntemleri ve mevcut hesaplama metodları irdelenmektedir. Mevcut ampirik hesaplamalara alternatif olarak bir hesap yaklaşımı geliştirilmekte, bir örnek üzerinde uygulaması yapılmakta ve sonuçlar diğer metodlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Geliştirilen hesap yaklaşımı bir Excel sayfasına kodlanarak kullanıcılara sunulmaktadır.

A STUDY ABOUT NEGATIVE SKIN FRICTION ON PILES

SUMMARY

New construction developments need pile foundation systems to make it possible to develop new buildings on problematic soils. Pile foundation systems are consisting of two types which are end bearing piles and friction (floating) piles. The type is important inorder to choose the pile size and pile types are choosen after having the capacity properties of soil layers. The reason of choosing end bearing piles is that transferring the construction load to the durable soil layer. And the reason of choosing friction piles is that to carry the construction loads by the help of friction which occurs between pile and soil. Therefore end bearing piles and friction piles show different behavior. In some cases, the soil layers around piles may settle due to some internal and external effects and cause an additional load on piles which is called negative skin friction load because of consolidation settlement. And negative skin friction may cause really important and risky loads which may be bigger than allowable pile capacity. This type of problem is a really important to be considered in designing period.

In this thesis, the problem of “Negative Skin Friction on Piles” is investigated in detail. Solutions and calculation methods are presented and a new calculation approach is developed in the manner of undreained shear strength of cohesive soils by considering the most important point of the problem, pile and soil settlements. The new approach is coded in an Excel file and comparisons are made for different pile sizes in the same soil properties to see the change of the situation.

1. GİRİŞ

Modern şehir yaşamında yapılaşmanın artmasıyla birlikte yerleşim alanı ihtiyacı da artmış bulunmakta ve bu sebeple mevcut alanların problemli olmaları halinde bile değerlendirilmeleri mecburiyeti ortaya çıkmaktadır. Taşıma gücü açısından sorunlu zeminlerde yüksek yapıların yapılması sebebiyle ağır temel yükleri oluşmakta ve bu yüklerin kazıklı temel sistemleri ile taşıma kapasitesi yüksek zemin tabakalarına aktarılması sağlanmaktadır. Bu sistemlerin ana elemanı olan kazıklar betonarme, ahşap ve çelik olabilmektedirler. Kaya ve benzeri sağlam zemine oturan kazıklar "uç kazığı" olarak isimlendirilmektedir. Ancak, taşıyıcı tabakaların derinde olması halinde kazık "sürtünme kazığı" olarak imal edilir ve üst yapı yükleri çevre sürtünmesi vasıtasıyla taşınır.

Kazıklı temeller tasarlanırken ayrıntılı bir geoteknik araştırma yapılmalı ve bu sayede zemin profili çok iyi belirlenmelidir. Yapılan araştırma sayesinde elde olunan zemin mühendislik özellikleri, kazıklı temel sisteminin projelendirilmesinde büyük önem arz etmektedir.

Kazıklar uygulamada grup halinde imal edilirler ve kazık gruplarındaki kazık sayıları ve konfigürasyonlar, yapılan mühendislik hesaplarının sonuçları değerlendirilerek belirlenir. Pratikte tekil kazık kullanılması, özel durumlar için uygulanır.

Konsolidasyonunu henüz tamamlamamış zeminlerde uygulanacak olan kazıklar, taşıması öngörülen üst yapı yükünün yanı sıra, zeminin oturması ve adezyonu etkisiyle, çevresindeki zemini de taşımak zorunda kalır. Kazığın taşımak zorunda kaldığı bu harici yük, "negatif çevre sürtünmesi" olarak adlandırılır. Mühendislik özellikleri araştırılan zeminin yumuşak ve tam konsolide olmadığı saptandığında, bu zemine uygulanacak olan kazık sistemi için yapılacak hesaplarda, kazık taşıma gücüne olumsuz etkiyecek olan negatif çevre sürtünmesi değerinin de dikkatle hesaplanması gerekmektedir.

Negatif çevre sürtünmesinin ele alındığı bu tezde, problemin nerede ve nasıl oluştuğu irdelenecek, ardından bu etkiyi saptamak ve azaltmak için yapılmış teorik ve deneysel çalışmalar incelenecektir. Tezin ana konusu ise, negatif çevre sürtünmesinin

hesaplanma yöntemlerinin tanıtılması, kazık-zemin oturma ilişkisini dikkate alan bir hesap yaklaşımının geliştirilmesi ve bu yaklaşımı bir excel dosyasına programlayarak, değişik şartlar için negatif çevre sürtünmesindeki ve kazık kapasitesindeki değişimin incelenmesidir.

2. KAZIKLI TEMELLER

Taşıma gücü yeterli olmayan zeminlerde, üst yapıdan ileri gelen yüksek temel yüklerini derinlerdeki yeterli taşıma gücüne sahip sağlam zemin tabakalarına aktaran kazıklar, yoğun şehirleşmenin gerçekleştiği ve şehirlerdeki arazilerin oldukça değerlendiği günümüzde, küçük arsalara yüksek yapıların yapılmasına olanak sağlamaktadırlar.

2.1. KAZIKLI TEMEL TÜRLERİ

Çeşitli kriterlere göre sınıflandırılması mümkün olan kazık çeşitlerini ana eksenlerde aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Uygulama amaçlarına göre;

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

İmal edildiği malzemeye göre;

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

Kazık yer değiştirmesine göre;

- Geniş yer değiştirme kazıkları (inşasında zemini yana iterek yer değiştirmesine sebep olan tüm hazır, çakma ve yerinde dökme kazıklar)

- Küçük yer değiştirme kazıkları (H ve I kesitli veya açık uçlu çelik boru kazıkları veya burgu kazıklar)

- Yer değiştirmeme kazıkları (geleneksel yerinde dökme kazıklar veya muhafaza borusu yardımıyla betonlanan kazıklar)

2.2. KAZIKLI TEMELLERİN DAYANIMI

Kazıklı temeller, zeminde doğal olarak oluşan sülfat ve klor iyonları, çeşitli endüstri atıklarındaki korozyon oluşturucu maddeler, bozulmuş bitkilerden yer altı suyuna karışan organik asit veya erimiş karbondioksit sebebiyle oluşabilecek uygun olmayan ortamlarda zarar görebilir, tahrip olabilirler. Hava, oksijen ve su korozyonu besleyen ana unsurlardır. Fakat oksijenin olmadığı, genelde relatif olarak geçirgen silt ve killerde veya nehir yataklarındaki kirlenmiş sularda oluşabilecek olan oksijensiz ortamlarda da sülfat azaltıcı bakterilerin etkisi de korozyona sebep olabilmektedir.

Zeminlerdeki sülfat etkisi, beton kazıkların çimento karışımlarında dönüşümlere sebep olamakta, minerallerin moleküler hacimlerinin artmasına, bunun sonucu olarak ta sertleşmiş betonda genişlemeye, dağılmaya ve bütünlüğün bozulmasına sebep olmaktadır. Amonyum sülfat genelde gübre olarak kullanılmaktadır ve çimentoya ciddi zarar vermektedir. Bu sebeple zeminde %5'i geçen sülfat konsantrasyonuna rastlandığı zaman dikkatli olunmalı ve yer altı suyu içeriği dikkatle incelenmelidir. Bakır işleyen veya boya imalatı yapılan fabrikalarda oluşabilecek sızıntılar sebebiyle yer altı suyuna sülfürik asit karışabilir.

Sıkı ve iyi kompaksiyon edilmiş bir beton, beton kazıklarda ve kazık başlarında sülfat etkisine karşı en etkin korumayı sağlar. Bu sebeple zararlı etkilerin mevcut olduğu durumlarda yüksek mukavemetli hazır beton kazıkların kullanılması tavsiye edilir. Eğer hazır kazık kullanılamıyorsa, yerinde imal edilen delgi ve çakma kazıklar için kullanılan karışımlar zararlı etkilere karşı yeterli mukavemeti ve geçirimsizliği sağlayacak şekilde hazırlanır.

Süpersülfat çimentoların kullanımı, sülfat içeren zeminlerdeki kazıklar için ideal olmasına karşın birçok ülke için pahalı ve zor bir çözümdür [1]. Ayrıca, düşük hidratasyon ısısı onu hazır kazıkların imalinde kullanılmaz 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 sürüklenirken aşınmalar oluşur. Kazıkların korunması metal kılıflarla da yapılabilir, fakat pahalı bir yöntemdir. Tüm bunların yanı sıra bitüm emdirilmiş cam lifi örtüsü de kullanılabilir, fakat kazıklar çakıllı zeminlere sürülürken bu örtü yırtılabilir. 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, yer altı 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 üzere kazık yüzeyini bitümle kaplama, aynı zamanda negatif çevre sürtünmesini azaltmada da etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Zararlı iyonlar içeren ve de asitli yeraltı suyu bulunan yumuşak zeminlerde, bu yöntem tüm bu olumsuz etkileri ortadan kaldıracağından diğer koruma yöntemlerine göre daha kullanışlı ve ekonomik olduğu sonucuna varılabilir.

2.3. KAZIK TAŞIMA GÜCÜ

Bir kazığın göçmeden ve aşırı oturma yapmadan taşıyabileceği en fazla yük miktarı olarak tanımlanan kazık taşıma gücü çeşitli şekillerde belirlenebilir; bunlar statik ve dinamik formüller, zemin sondaları ve kazık yükleme deneyleridir. Bu yöntemler içinde gerçeğe en yakın sonucu veren pahalı olmasına karşın kazık yükleme deneyidir.

Bir kazık eksenel yüklendiği zaman bir miktar oturur, bu arada kazık yüzeyi ile zemin arasındaki sürtünmeden ötürü çevre zemini de oturur ancak kazık zemine kıyasla daha fazla hareket eder. Bu durumda kazık ile zemin arasındaki yüzeyde zemin aderans özelliği oluşur ve sonuçta kazık yüzeyinde oturma yönüne ters yönde bir sürtünme direnci oluşur. Bu oluşan dirence çevre sürtünmesi denir. Bu hareket sırasında kazığın tabanı da dayandığı zemine basarak bu zemini sıkıştırır ve bu sıkışmaya karşılık kazık ucunda bir uç direnci oluşur. Kazığın çevre zemine göre yaptığı göresel hareket sonucu doğan bu iki direnç elemanı, harekete paralel olarak artarlar ve sonunda kendi sınır değerlerine ulaşırlar. Türk Standartları'nında

esinlendiği Alman pratiğine göre, çevre sürtünmesi, kazığın zemine rölatif olarak çapının yüzde biri (%1) kadar, uç direnci ise yüzde onu (%10) kadar bir hareket sonucunda sınır değerine ulaştığı kabul edilir. Bu iki direnç elemanı toplamına kazığın "Toplam Taşıma Gücü" veya kısaca "Taşıma Gücü" denir.

2.3.1. TAŞIMA GÜCÜNÜN STATİK FORMÜLLERLE HESAPLANMASI

Statik kazık formülleri, yüzeysel temellerde uygulanan kırılma hipotezine dayanmaktadır (Şekil 2.1)(DeBeer.,Meyerhof). Bu formüller, kazık ucunun zeminden göreceği direnç ile kazık çevre yüzeyinde oluşacak olan sürtünme kuvvetlerinin toplamı esasına dayanır.

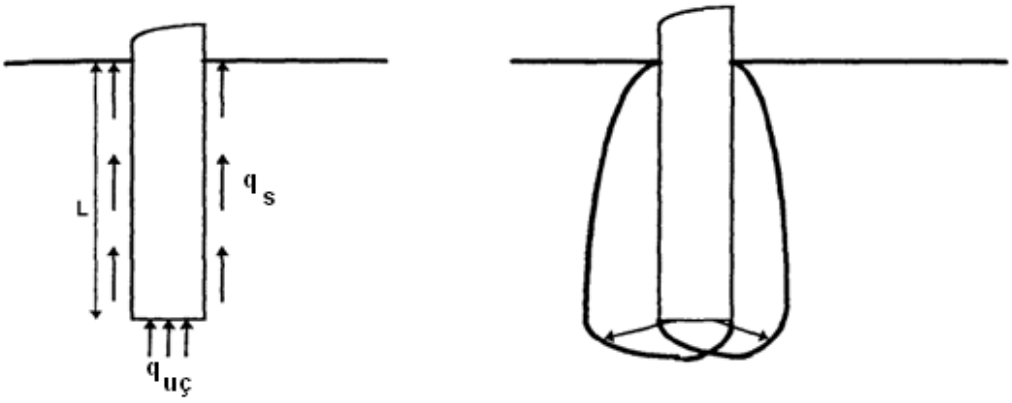
$$Q_s=A_{uç}*q_{uç}+L*u*q_s \qquad (2.1)$$

Q_s : Kazık taşıma gücü
$A_{uç}$: Kazık uç kesit alanı
$q_{uç}$: Uç gerilmesi
L : Kazık boyu
u : Kazık çevresi
q_s : Çevre sürtünmesi

Kohezyonlu bir zeminde dairesel kazık için uç direncinin Meyerhof tarafından aşağıdaki gibi bulunabileceği tavsiye edilmektedir. Zeminin toplam kayma mukavemetinin mobilize olmasını sağlamak amacıyla, kazığın zemine minimum çapının beş katı kadar penetrasyonu halinde taşıma gücü katsayısı olan N_c değeri 9 alınabilmektedir. Bu değer kazığın sağlam zemine penetrasyon etmeden sadece üzerine basması durumunda N_c değeri en fazla 6 değerini almaktadır.

$$q_{uç}=c*N_c=c*9 \qquad (2.2)$$

$q_{uç}$: Uç gerilmesi
c : Kohezyon (FL^{-2})
N_c : Taşıma gücü katsayısı



Şekil 2.1 Kazık Taşıma Gücü [2]

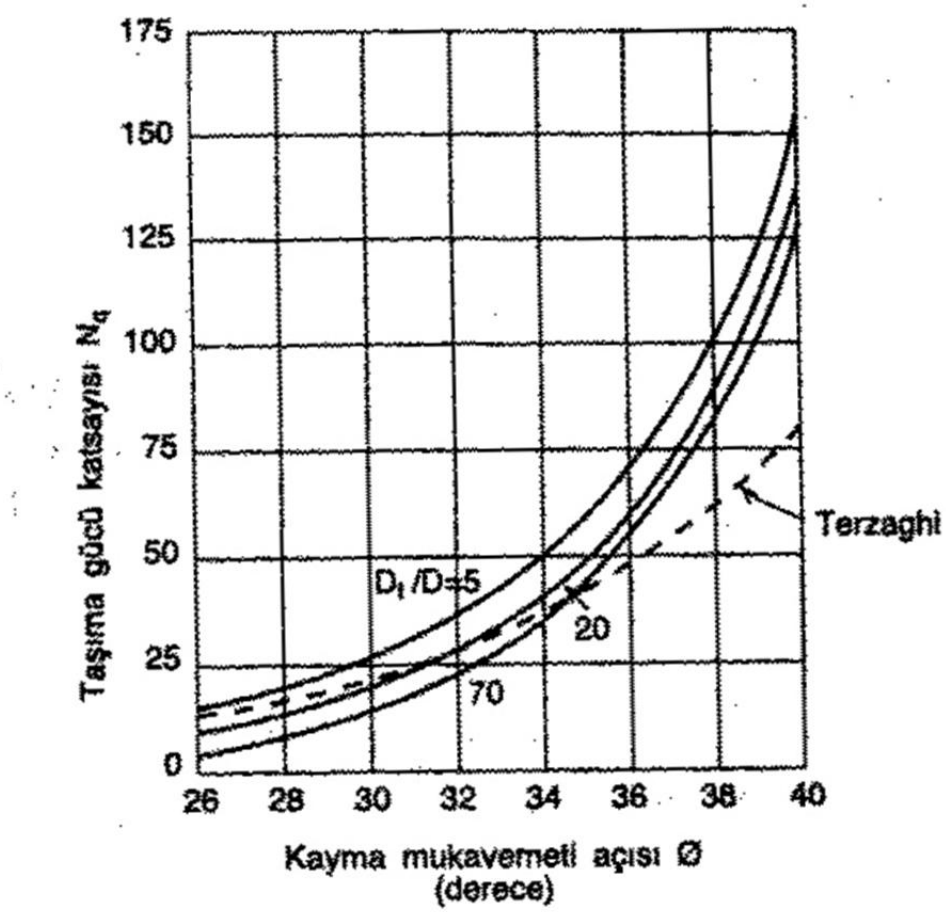
Kohezyonsuz zeminlerde (c=0), Terzahgi taşıma gücü formülünde N_γ 'lı terim çok küçük değerlere sahip olduğundan ihmal edilerek yalnızca N_q terimi göz önüne alınır.

$$q_{uç} : \gamma * L * N_q \qquad (2.3)$$

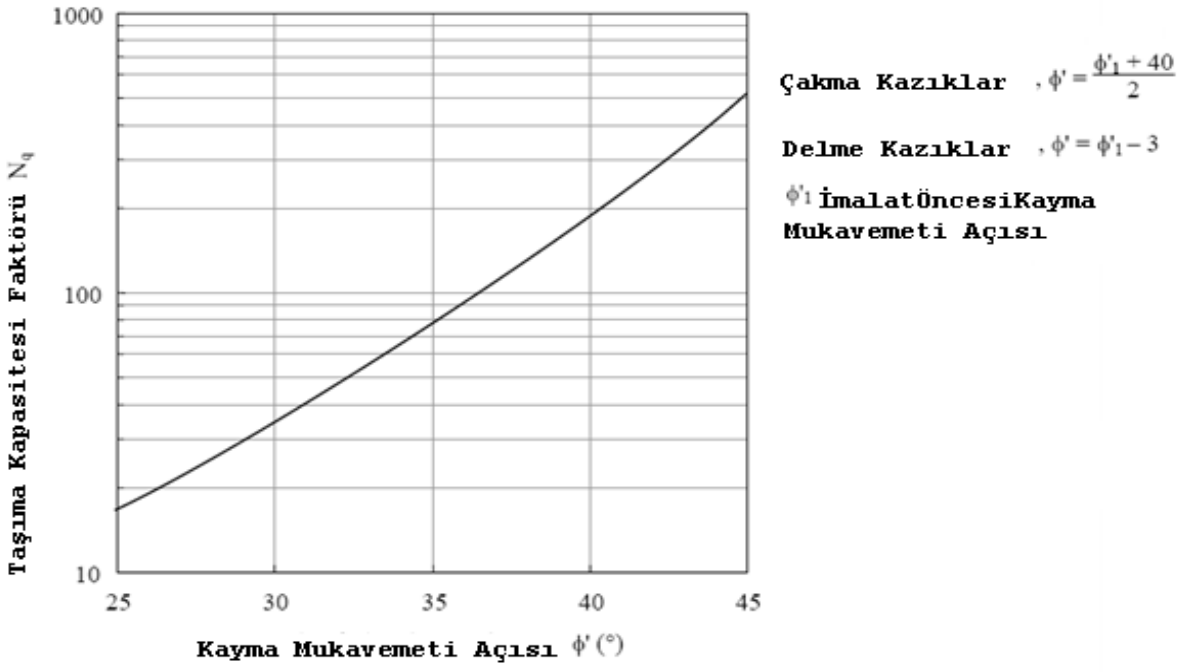
$q_{uç}$: Uç gerilmesi
N_γ , N_q : Taşıma gücü katsayıları
L : Kazık boyu
γ : Zemin birim hacim ağırlığı

Uzun kazıklar için Meyerhof, L/B oranının büyük olması halinde N_q değerinin, Terzaghi'nin sığ temeller için verdiği değerin 2-3 katı olduğunu göstermiştir.

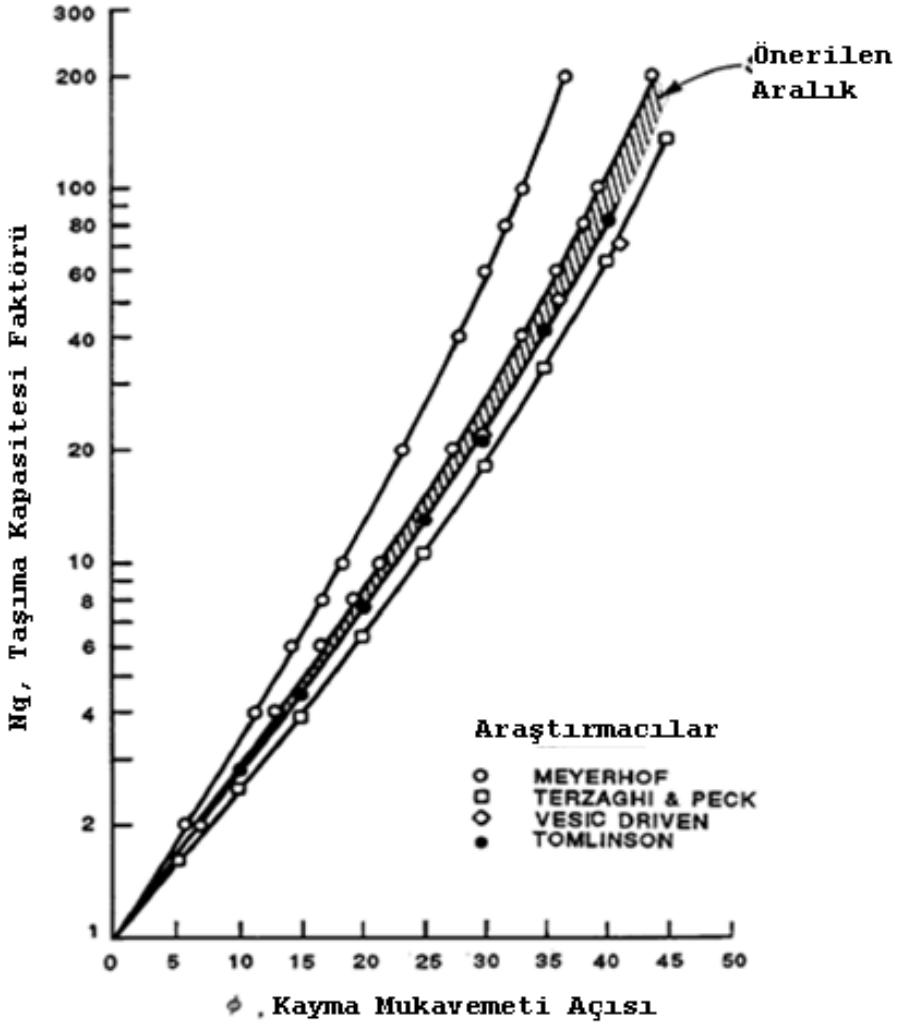
Kohezyonsuz zeminlerde Nq değeri, birçok araştırmacı tarafından değişik biçimlerde sunulmuştur. Aşağıda Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te bu tespitlerden birkaçı sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Berezantsez-Terzaghi'nin Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Nq sayıları [3]



Şekil 2.3. Poulos ve Davis(1980)'in Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Nq sayıları [4]



Şekil 2.4. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar için Çeşitli Nq Sayıları Karşılaştırması [5]

Kohezyonsuz zeminler için z derinliğindeki birim çevre sürtünmesi aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$q_s=\gamma*z*K_s*\tan\delta' \qquad (2.4)$$

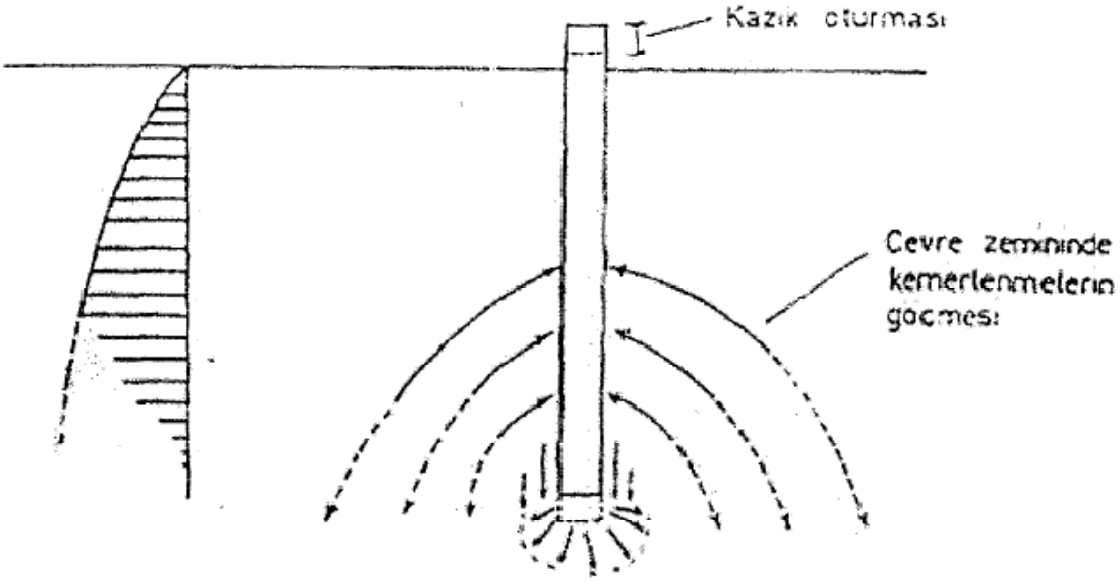
K_s: Yanal toprak basıncı katsayısı (K_a ile K_p arasındadır)

Gevşek kumlarda $K_s.\tan\delta'$ 'ın en küçük değeri 0.25 'tir.

Zemin özelliklerine ve kazık cinsine bağlı olarak sonuca ulaşan statik formüller, sonuç elde etmede çok verimlidir fakat uç direncinin ve çevre sürtünmesinin düşey yükleri ne oranda taşıdıklarının tam belirlenememesi bu formüllerin dezavantajını oluşturmaktadır. Bu formülller vasıtasıyla kesin bir değerlendirme yapmak, zemine

kazık uygulaması yapıldıktan sonra zeminde önemli ölçüde özelliklerin değişebilmesi sebebiyle de pek akılcı olmaz. Dolayısıyla hesaplanmış değerlerin, kazık yükleme deneyi yapılarak kontrol edilmesinde çok büyük fayda vardır. Ayrıca bu formüller tek kazık için hesap yapmayı sağlamakta, kazık guruplarının karşılıklı etkileşimi için sonuç çıkarılmasına olanak sağlamamaktadır. Yapılan araştırmalarda, statik kazık taşıma gücü formülleriyle hesaplanmış olan tek kazık için oturma miktarı ile kazık gurubunun oturma miktarı arasındaki fark, uygulamalarda heaplanandan daha büyük çıktığı tespit edilmiştir.

Statik formüllerle kazık taşıma gücünün hesaplanmasının dayandığı varsayım, kazık çapının büyümesi halinde taşıma gücünün artacağını öngörnektedir fakat Muhs(1967) yaptığı araştırmalar sonucunda bu teorinin geçerli olmadığını ortaya koymuştur [2]. Ayrıca yapılan başka araştırmalar da, kazık yükleme deneylerinin sonucunda statik formüllerde hesaba esas alınan zemin gerilmesinin seçiminde dikkatli olunması gerektiği ortaya çıkmıştır. Çünkü, özellikle kohezyonsuz zeminlerde zeminin sıkılığına ve kazık çapına bağlı olarak belirli bir derinlikten sonra kazık ucu direnci için hesaplara esas teşkil edecek olan zemin gerilmesinin derinlikle artmadığı gözlenmiştir (Şekil 2.5)



Şekil 2.5. Kazık Direnci ve Çevre Sürtünmesinin Kazık Oturması ile İlişkisi [2]

2.3.2. TAŞIMA GÜCÜNÜN DİNAMİK FORMÜLLERLE HESAPLANMASI

Dinamik kazık taşıma gücü bağıntıları, çakma kazıların taşıma gücünün hesap edilmesi amacıyla uzun zamanlardan beri kullanılmaktadırlar. Kazık çakımı yapılırken, kazığa uygulanan çakma darbeleri sebebiyle kazık zemin içinde ilerlemeye çalışırken belirli miktarlarda dirence maruz kalır. Bu ana prenbip çerçevesinde çeşitli araştırmacılar çeşitli formülasyonlar ortaya koymuşlardır. Bunların içinde en çok kullanılanlarından iki tanesi Engineering News ve Hiley formülleridir.

Engineering News formülü,

$$Q_d = \frac{2 * W_T * H}{(s+c)} \tag{2.5}$$

Hiley formülü,

$$Q_d = \frac{\lambda * W_T * H * (W_T + e^2 * W_K)}{((s + \frac{1}{2} * (c_1 + c_2 + c_3) * (W_T + W_K)} \tag{2.6}$$

Burada,

W_K : Kazık ağırlığı,

W_T : Tokmak ağırlığı,

H : Düşüm yüksekliği,

s : Refü veya kazığın her darbede giriş miktarı,

c : Enerji kayıplarını gösteren sabit (Buharlı şahmerdanlar için c=0.25 ve serbest düşmeli şahmerdanlar için c=2.5 cm alınması tavsiye dilmektedir),

λ : Tokmağın tesirli düşüş yüzdesi (serbest düşüşlü tokmaklarda λ=%100, buharlı şahmerdanlarda λ=%90, tambura sürtünme ile sarılan tel halata bağlı tokmak için λ=%75 alınır),

c1 : Kazık başındaki darbe takozunun elastik kısalması,

c2 : Kazığın elastik kısalması,

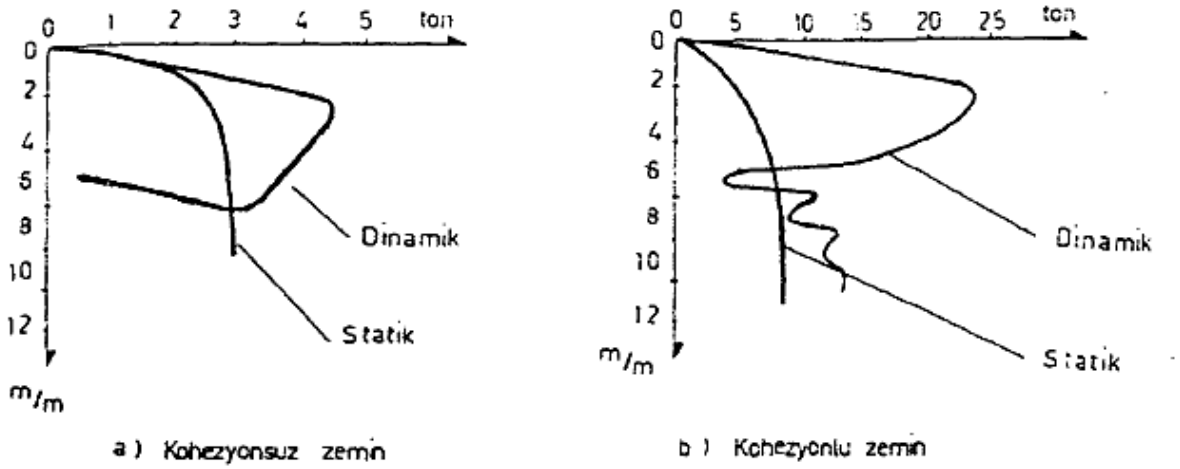
c3 : Zeminin elastik kısalması,

e : Çarpma sayısı,

dır.

Hesaplanan taşıma gücünün emniyet katsayısına bölünmesi ile servis yükü elde edilir. Dinamik formüller arasındaki büyük farklılıklar emniyet katsayıları büyük tutularak giderilmeye çalışılır. Engineering News formülü için emniyet katsayısı altı (6), Hiley formülü için dört (4) alınır. Dinamik formüllerle hesaplanan taşıma gücü sonuçları özellikle kohezyonlu zeminlerde büyük farklılıklar göstermektedirler. Bu sebeplerden dolayı kimi gelişmiş ülke standartları dinamik formüllerin kullanılmasını tavsiye etmez (DIN-4026 veDIN-1054) [2].

Dinamik formüller statik kazık taşıma gücünün çakma sırasında uygulanan enerjinin işe dönüşmesi esasına bağlı olarak türetilmişlerdir. Bu açıklamadan statik ve dinamik formüllerin aynı tip hesap esasına dayandığı sonucuna varılsa da, esasen kazıkların zemine teşkili ile oluşan dirençler arasında önemli farklılar vardır. Bu farklılık statik ve dinamik dirençler arasındaki farka dayanmakta ve bu da Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Statik ve dinamik dirençler arasındaki önemli farklılıklar sebebiyle, dinamik yöntemlerle imal edilen kazıklarda, negatif çevre sürtünmesinin oluşması uzun zaman almaktadır [2].



Şekil 2.6. Statik ve Dinamik Dirençler Arasındaki Farklar [2]

2.3.3. TAŞIMA GÜCÜNÜN CPT ve SPT VERİLERİNE GÖRE HESAPLANMASI

Standart (SPT) ve koni (CPT) penetrasyon deneyleri uzun yıllardır kullanılan ve geoteknik mühendisliğinde birçok korelasyonlara imkan kılan deneylerdir. Zeminlerin mukavemetleri hakkında sonuçlarında elde edildiği bu deneyler içinde koni penetrasyon deneyi özellikle kohezyonsuz zeminlerde güvenilir sonuçlar

vermektedir. Standart penetrasyon deneyi ise çok uzun yıllardır kullanılmakta olup, yaygın bir şekilde kabul görmekte ve bir çok mühendislik özelliklerinin elde edilmesinde çeşitli korelasyonlarla kullanılmaktadır.

Zeminin sıkılığı (D_r) ve kil zeminler için serbest basınç direnci (q_u) değerleri hakkında SPT değerlerini (N) kullanarak Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 sayesinde bir fikir elde etmek mümkündür (zeminin sıkılığı ve kıvamı-konsistansı hakkında bilgi).

Tablo 2.1- SPT Darbe Sayısı(N) ve Relatif Sıkılık (D_f) İlişkisi [3]

SIKILIK	ÇOK GEVŞEK	GEVŞEK	ORTA	SIKI	ÇOK SIKI
D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85 1.00
N	0	4	10	30	50

Tablo 2.2–Killerde SPT Sayısı (N), Serbest Basınç Direnci(qu) ve Kıvam İlişkisi [3]

KIVAM	ÇOK YUMUŞAK	YUMUŞAK	ORTA	KATI	ÇOK KATI	SERT
N	2	4	8	15	30	
$q_u(kg/cm^2)$	0.25	0.5	1.0	2	4	

Serbest basınç değeri (q_u) bulunduktan sonra negatif sürtünme hesabında da kullanılan drenajsız kohezyon değeri (c_u), Skempton tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik sayesinde elde edilir.

$$c_u = q_u / 2 \qquad (2.7)$$

Koni penetrasyon deneyi (CPT) sonucunda bulunan uç mukavemeti q_s ve SPT darbe sayısı arasında aşağıdaki bağıntılar ilgili durumlar için kullanılabilir,

İri daneli kohezyonsuz zeminlerde $q_s = 6*N_{30}$

İnce daneli kohezyonsuz zeminlerde $q_s = 3.5*N_{30}$

Ortalama olarak aşağıdaki bağıntı kullanılarak bir değer elde edilebilir,

$$q_s=4*N_{30} \quad (2.8)$$

Bir başka çalışmada ise Vesic (1970-1975), relatif sıkılığa bağlı olarak kazık yüzeyinde oluşacak olan sürtünme kuvvetinin hesabında bir formül kullanılmasını önermiştir. Vesic'in önerdiği bu formül, yazara göre bir alt limit elde edilmesini sağlamakta, hatta yapılmış olan bir çok kazık yükleme deneyinde elde edilen ortalama değerler, hesaplananlara göre %50 daha fazla çıkmaktadırlar [6]. Formül şu şekilde verilmiştir;

$$\tau_S= X_{v*}(10)^{1.54*Dr\hat{}4} \quad (2.9)$$

X_v : Hesap katsayısı (büyük çakma kazıklarda 8; fore kazıklar, açık ağızlı borular ve H profili kazıklarda 2,5 alınır),

D_r : Zeminin sıkılığı,

Meyerhof (1956,1976) ise kazık yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti hesabında SPT verilerine dayalı şu förmülü önermiştir[6],

$$\tau_S= X_m * N_{55} \quad (2.10)$$

X_m : Hesap katsayısı (büyük çakma kazıklarda 2, küçük kazıklarda 1 alınır)

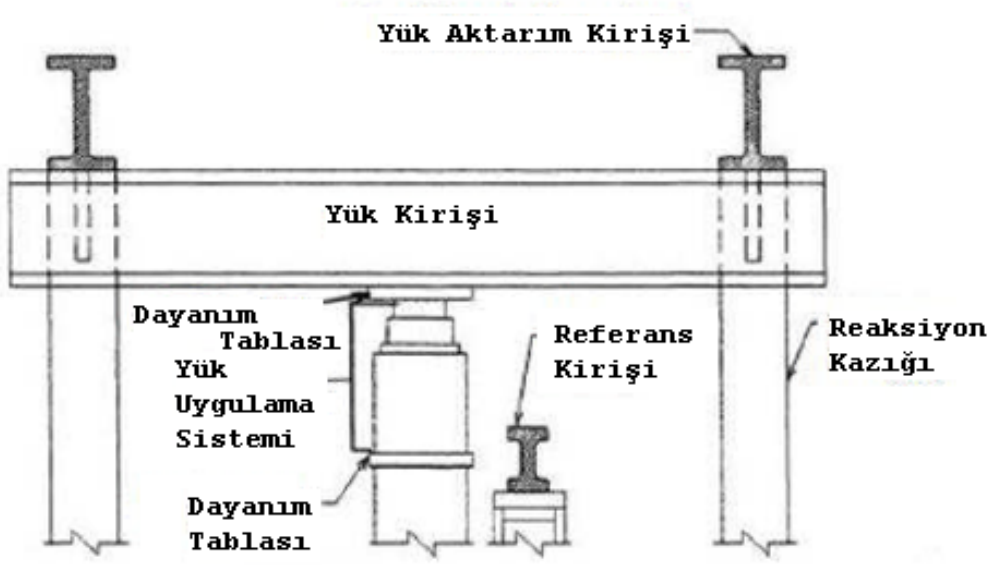
N_{55} : Ortalama SPT darbe sayısı

2.3.4. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

Kazık yükleme deneyi, kazıkların taşıma gücünün belirlenmesinde en güvenilir sonucu veren yöntemdir. Çeşitli modifikasyonlarla kazık yükleme deneyleri sayesinde negatif çevre sürtünmesi değerini bulmak ta mümkündür. Taşıma gücünün belirlenmesinde olduğu gibi bu yöntemle negatif çevre sürtünmesi değeri de en güvenilir şekilde elde edilmektedir (Şekil2.7).

Kazık yükleme deneyleri iki şekilde yapılmaktadır. Bunlardan birincisi sabit penetrasyon hızı (CRP), ikincisi ve en yaygını ise statik yükleme deneyidir. CRP deneyinde kuvvet, kazığın sabit bir değerde göçmeye başladığı ana kadar artırılır.

İkinci yöntemde ise kazığa yapılacak yükleme değerleri, kademeli olarak servis yükünün iki katına kadar çıkarılır ve kademeli olarak ta boşaltılır. Her yükleme boşaltma işlemi için oturma-zaman değerleri belirlenerek, deney sonunda yük-oturma ve oturma-zaman grafikleri çizilir. Elde edilen bu değerler ve grafikler sayesinde çeşitli yöntemlerle kazık taşıma gücü belirlenir.



Şekil 2.7. Kazık Yükleme Deneyi Sistemi Örneği

Yukarıdaki paragrafta da değinildiği üzere negatif çevre sürtünmesi değerinin, kazık yükleme deneyi sayesinde en güvenilir şekilde elde edilmesi mümkündür. Fakat negatif çevre sürtünmesine sebep olacak olan yumuşak kıvamlı kohezyonlu zeminlerde kosolidasyon oturmasının çok uzun zaman alacağı aşikardır. İşte bu sebeple bu yöntem pratikte pek tercih edilememektedir.

3. KAZIKLARDA ÇEVRE SÜRTÜNMESİ

Kazıklarda çevre sürtünmesi, Coulomb hipotezinden elde edilen (3.1) bağıntısında ifade olunduğu üzere efektif gerilmeler cinsinden hesap edilir [7],[8].

$$\tau_s = \sigma_{vo}' * K_o * \tan\delta + c_a \quad (3.1)$$

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 arasındaki sürtünme açısı

c_a : Kazık çevresindeki zemin adezyonu

Çakma kazıklarda, çakma işlemi sebebiyle zeminde oluşan yoğrulma etkisinden dolayı (3.1) eşitliğindeki c_a terimi sıfır kabul edilir. Yumuşak kilde (ϕ') efektif kayma mukavemeti açısı olmak üzere $\delta = \phi'$ kabul edilebilir.

Eğer zemin normal konsolide ise [9],

$$K_o = 1 - \sin\phi' \quad (3.2)$$

veya [9]

$$K_o = 0.97 - 0.94 * \sin\phi' \quad (3.3)$$

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

$$\tau_s = \sigma_{vo}' * (1 - \sin\phi') * \tan\delta \quad (3.4)$$

bulunur [9].

3.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar

Kum zeminlerde c_a=0 olduğundan çevre sürtünmesi aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$\tau_s = \sigma_{vo}' * K_o * \tan\delta \tag{3.5}$$

Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı (δ) aşağıda sunulan Tablo 3.1'den faydalanılarak bulunabilir [10].

Tablo 3.1. Kazık ile Zemin Arasındaki Sürtünme Açısı Değerleri [10]

Kazık – Zemin Temas Durumu	**Kazık – Zemin Arasındaki 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′ - 1.0 ø′
Yerinde Dökülmüş Beton- Kum	1.0ø′
Ahşap- Kum	0.8ø′ - 0.9ø′
Zemin İçinde Boru Bırakılan Kazıklar	0.7ø′ - 0.85ø′

Amerikan Petrol Enstitüsü (API) 'de kohezyonsuz zeminlerde derin kazıkların çevre sürtünmesinin hesabında (3.5) fomülasyonunun uygulanmasını tavsiye etmektedir [11]. Bu formülde çevre sürtünmesinin derinlik arttıkça artacağı öngörülmektedir fakat yapılan deneyler bunun gerçek hayatta böyle olmadığını göstermiş ve bir kritik derinlik kavramının ortaya çıkmasına sebep olmuştur [11]. Fakat bu kritik derinliğin nerde oluştuğu birçok bilim adamı arasında tartışma konusu olmaktadır. Bilim adamları, çevre sürtünmesinin, kazık yarıçapının 10 ile 40 katı kadar bir derinlikten sonra sabit kaldığını belirtmektedirler. Fakat çok tabakalı zeminlerde bu durum henüz net bir biçimde ifade edilememiştir [11].

Çeşitli kaynaklarda ise kritik derinlik kum zeminlerde imal edilen kazıklarda, kazık çapının 10 ile 20 katı kadar bir derinlikte olduğu tarif edilmekte, kum zeminin sıkılığına göre krtik derinlik değerleri açıkça verilmektedir [10].

D_c=10*B gevşek kumlar için (3.6)

D_c=15*B orta sıkı kumlar için (3.7)

D_c=20*B sıkı kumlar için (3.8)

D_c: Kritik deinlik

B: Kazık çapı

Her ne kadar bir çok kaynak, kritik derinlik kavramının kullanmılmasını tavsiye etselerde, buna karşı olan Fellenius(1995), meselenin bir yanlış düşünce olduğunu ve test sonuçlarının yanlış yorumlanmasından ileri geldiğini belirtmektedir[12].

3.1.1 Beta (β) Metodu

Bu metod Burland (1973) tarafından ilk olarak çakma kazıklar için önerilmiştir [6]. Kazık imalatı sırasında kazık şaftı çevresindeki zeminde bulunan kohezyon etkisinin yok olduğunu kabul eden yöntem, yer altı su seviyesinin düşmesiyle meydana gelecek olan sıkışmanın doğurduğu hacim azalması sebebiyle kazık çevresindeki efektif kuvvetin, kazık imal edilmeden önceki düşey efektif kuvvete en azından eşit olduğunu söylemektedir. İmal edilen kazığın yüklenmesi esnasındaki kayma gerilmesinde oluşan asıl değişimin, kazık şaftı ile zemin arasındaki ince bir yüzeyde çok hızlı bir drenajın oluşmasına veya kazık imalatı ile yüklenmesi işlemi arasında kalan zaman aralığında yine bu ince yüzeyde hızlı bir drenaj oluşmasına bağlı olduğu Burland tarafından iddia edilmektedir. Hesaplarda bir (δ) kazık ile zemin arası sürtünme açısına dolayısıyla bir kayma mukavemeti açısına (Ø) ihtiyaç olduğundan, bu yöntemi Bowles, kohezyonsuz zeminler için önermektedir [6].

Bu yaklaşım çerçevesinde Burland (1973) aşağıda dizayn eşitliğini basit bir şekilde ifade etmiştir.

$$\tau_s = \sigma_{vo}' * K_o * \tan\delta \quad (3.9)$$

$$\tau_s = \beta * \sigma_{vo}' \quad (3.10)$$

$$\beta = K_o * \tan\delta \quad (3.11)$$

Eğer zemin üzerine bir üniform sürşarj yükü etkitilirse, bu yükte aşağıdaki şekilde formüle dahil edilir.

$$\tau_s = \beta * (\sigma_{vo}' + q_s) \quad (3.12)$$

τ_s : Çevre sürtünmesi

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

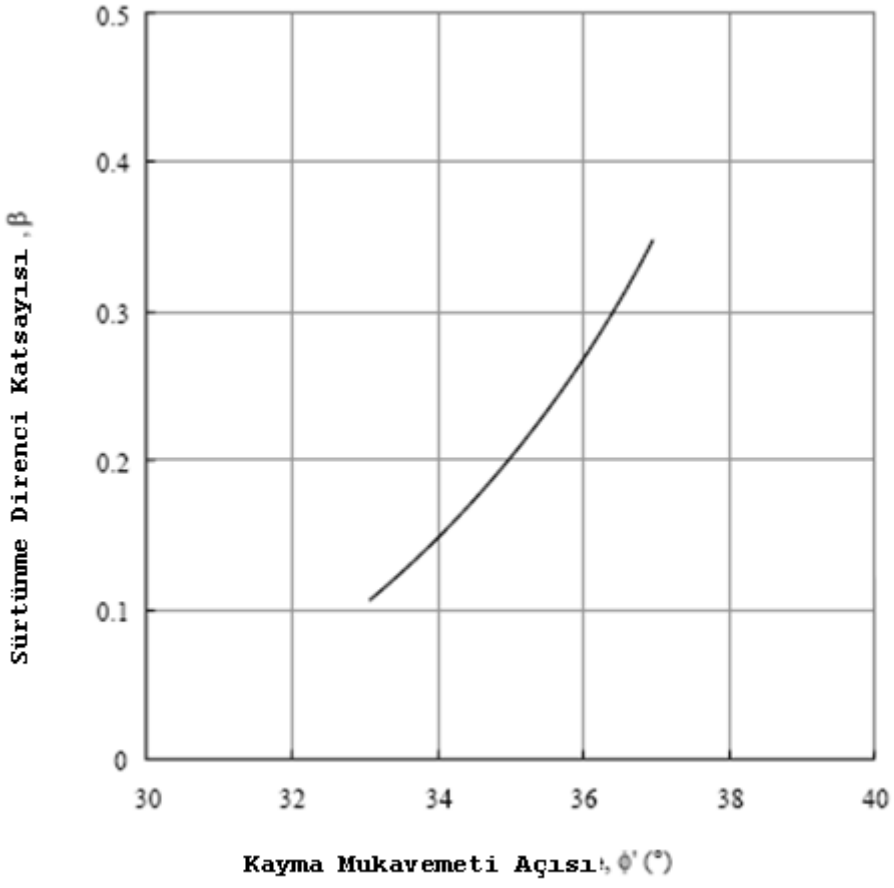
K_o : Sükunetteki yatay toprak basıncı katsayısı (1-sinØ)

δ : Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı

β : Sürtünme katsayısı

q_s : Üniform sürşarj yükü

Çeşitli bilim adamları bu yöntemin geliştirilmesinde büyük katkılarda bulunmuş, birçok kazık yükleme deneyi sonucunda geri hesaplama yöntemi ile beta katsayıları üzerine analizler yapmışlardır. Fore kazıklar için kaba daneli zeminde, Meyerhof'un 1976'da yaptığı hesaplamayı geliştiren Poulos ve Davis, 1980'de ampirik hesaplamalar için Şekil 3.1'de verilen grafiği sunmuşlardır.



Şekil 3.1. Fore kazıklar İçin β ve Ø Arasındaki İlişki (Poulos&Davis-1980) [4]

3.2.Kohezyonlu Zeminlerde Teşkil Edilen Kazıklar

Kazıklı temel sistemlerinin kazıkları inşa edilirken, kazıkların uygulandığı zeminlerde yatay olarak yer değiştirme sebebiyle kazık çevresinde ve altındaki zeminin örseleneceği aşikardır. Bu örselenme sebebiyle kohezyonlu ve sert zeminlerde zemin yüzü kabarır, fakat konsolide olmamış yumuşak zeminlerde ise konsolidasyon oturması meydana gelir.

Çakma kazıklar için kohezyonlu zeminlerde (killi zeminler), zeminin yumuşak kil veya sert kil olmasına bağlı olarak kazıkta oluşan çevre sürtünmesi farklılık göstermektedir. Yumuşak kilde, zeminin tiksotropik özelliği sebebiyle çevre sürtünmesi zamanla artış gösterir. Sert killerde ise çakma işlemi sonrasında ortaya çıkan çatlaklar, boşluk suyunun hızla sönümlenmesine sebep olur ve çevre sürtünmesi değeri zamanla önemli miktarlarda artış göstermez [13].

Killi zeminde sürtünme kazığının çevre sürtünmesi, en fazla kilin kayma dayanımı kadar olabilir. Kazık yüzeyi ile zemin arasındaki yapışkanlık (adezyon), zeminin kayma dayanımından fazla olsa bile, kazığa zemin dayanımını aşacak şekilde bir yük tatbik edildiği zaman, zemin, kazığın zeminle temas yüzeyine yakın bir mesafede kendi içinde yırtılarak kazığın göçmesine neden olur [10].

Aşağıda kohezyonlu zeminlerde birim çevre sürtünmesi hesabı için kullanılan başlıca yöntemler sunulmaktadır.

3.2.1 Alfa (α) Metodu

Tomlinson(1971)'un önerdiği bu yöntemde , kohezyonlu zeminlerde fore kazıklar için çevre sürtünmesi (f_s) hesabında, kilin c_u drenajsız kayma mukavemetine bir (α) azaltma faktörü etkitilir. Bunun sebebi, kazığa yakın kısımlardaki kilde yoğrulma meydana gelmesi ve ayrıca yerinde dökülen kazıklarda olduğu gibi kilin gevşemesi ve örselenmesinden dolayı kazık zemin etkileşiminin zayıflamasıdır yani yapışkanlığın (adezyonun) azalmasıdır. Yerinde dökme kazık imalatında önce klapeli kaşık veya rötary burgu aracılığı ile zemin içinde bir şaft açılır, ardından bu şaft içinde betonarme kazık imal edilir. Bu yöntemle yapılan kazıklarda da killi zeminin (kohezyonlu zemin) fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu

değişiklikler şaft boyunca meydana geleceğinden kazığın çevre sürtünmesine önemli ölçüde etki eder. Bu sebeple kazık çevresindeki sürtünme hesap edilirken, kilin drenajsız kayma mukavemeti bir ampirik (α) adezyon faktörü ile çarpılır [13].

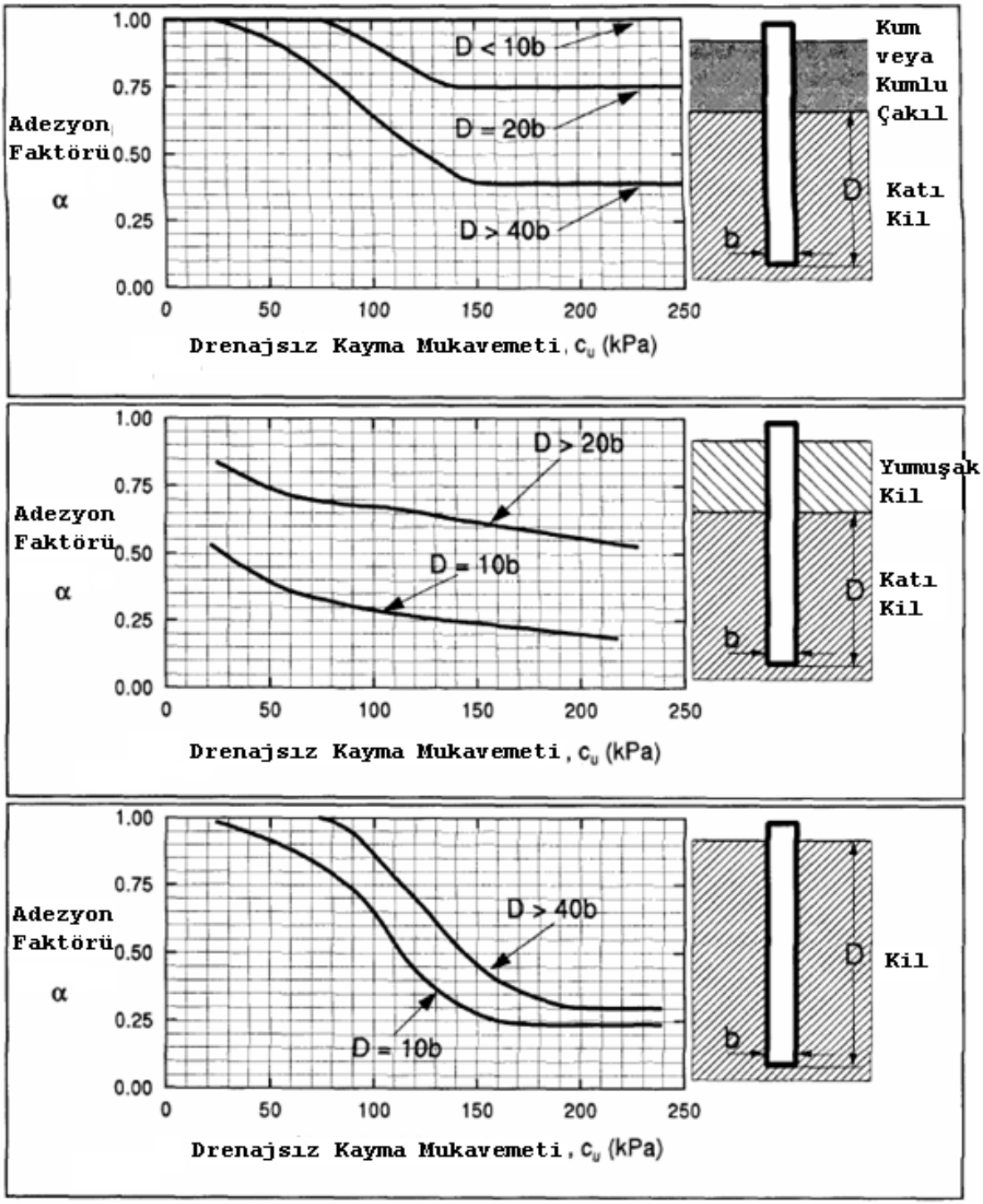
Toplam çevre sürtünmesi değeri (Q_s) ise (3.13) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir [13].

$$Q_s = \alpha.s.c_u .A_s \qquad (3.13)$$

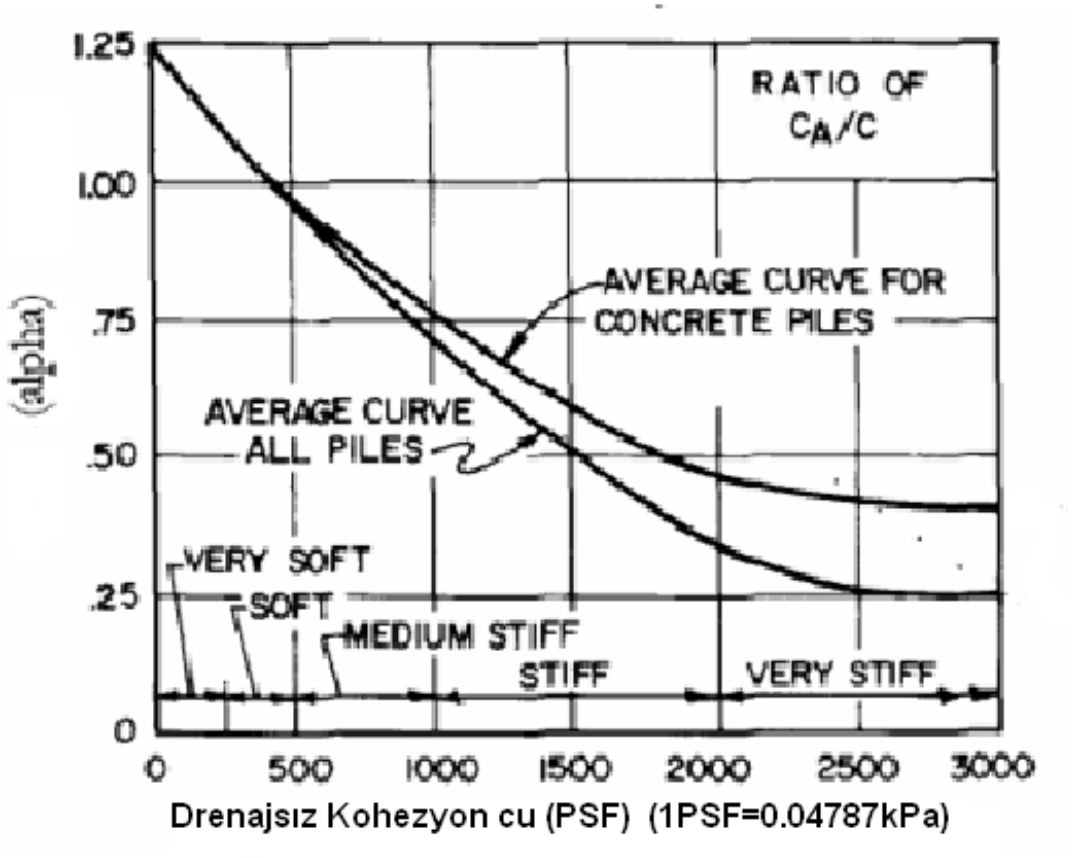
α : Adezyon faktörü
s : Şekil faktörü (sabit kesitli kazıklarda s=1.0, teleskopik kazıklarda s=1.2)
c_u : Kazık çevresindeki örselenmemiş zemine ait ortalama drenajsız kohezyon
A_s : Zemin içindeki kazık yüzey alanı

α değerleri, Şekil 3.2 da ilgili değerlerin yerine konulmasıyla bulunur [13]. α değerlerinin tespitinde bir çok öneri sunulmaktadır. Bunlardan bir kaçı ise Tomlinson (1980)'un Şekil 3.2 de, U.S.Naval Facilities'in Şekil 3.3 de önerdiği grafik [11] ve Şekil 3.4'te Bowles'ın önerdiği grafiktir [6].

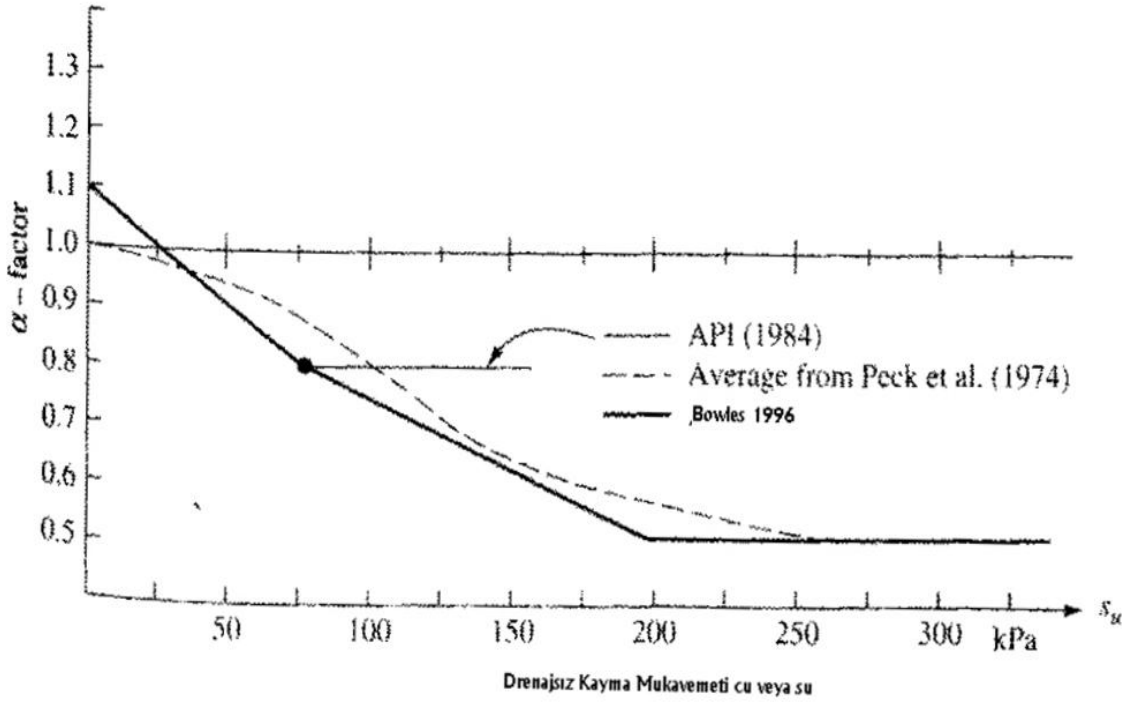
$$\alpha = f(c_u) \qquad (3.14)$$



Şekil 3.2. Adezyon Faktörü İçin TOMLINSON(1980) Tasarım Eğrileri [11]



Şekil 3.3. Adezyon Faktörü için NAVFAC (1982) Tasarım Eğrileri [11]



Şekil 3.4.Adezyon Faktörü için BOWLES Önerisi ve Karşılaştırması [6]

Bazı kaynaklarda ise adezyon faktörü hesabında, kilin drenajsız kohezyon değerinin 25kN/m2 ile 90kN/m' arasında olması durumunda (3.15) denkleminin kullanılması gerektiği, daha büyük değerler için ise verilen Tablo 3.2'den değerlerin elde edilmesi gerektiği belirtilmektedir[10].

$$\alpha_i = 1 - 0{,}00615 * (c_{ui} - 25) \tag{3.15}$$

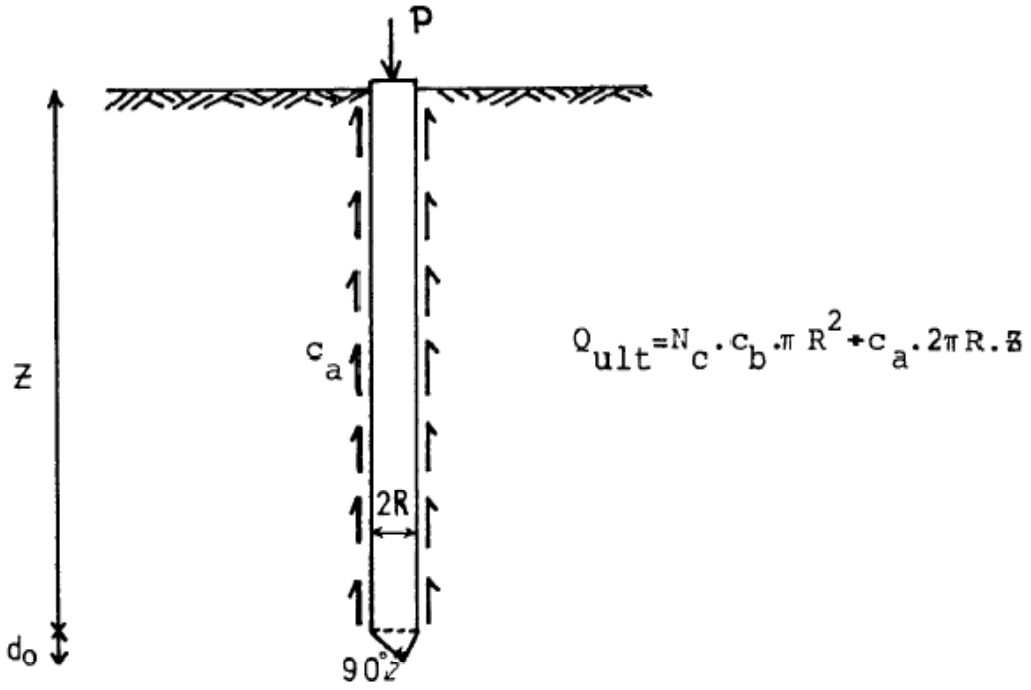
Tablo 3.2. Adhezyon katsayısı[10]

Cui Değeri	**αi Değeri**
90	0,60
100	0,58
150	0,42
200	0,35

Kohezyonlu zeminlerde toplam kazık taşıma kapasitesi;

$$Q_{ult} = 9 * c_b * A_b + \alpha * c_u * A_s \tag{3.16}$$

Yerinde dökme (cast insitu) kazıklarda s şekil faktörü kullanılmaz. Şekil 3.5'de kazığın toplam taşıma kapasitesini oluşturan bileşenler sunulmuştur.



Şekil 3.5. Kohezyonlu Zeminde Uygulanan Kazığın Toplam Taşıma Kapasitesi

Kazık şaftının, yerinde dökme (cast insitu) kazıkların imalatı için zeminde açılmasıyla birlikte, delik yüzeyi boyunca yanal gerilmelerde ferahlama meydana gelir, kil zemin delik yüzeyine doğru kabarır ve kazık şaftına doğru bir su akımı oluşur. Eğer açılan şaftın kaplaması iyi yapılmazsa şaft tabanına doğru su akımı meydana gelecektir. Böyle bir durumda, imal edilecek olan kazık ile kil zeminin temas yüzeyinde yumuşama meydana gelir ve bu yumuşama istenilen sürtünme kuvvetinin oluşmasını engelleyebilir.

Yerinde dökme çakma kazıkların imalatında, ucu beton bir tıkaç veya çelik levha ile kapatılmış, çelik bir boru istenilen derinliğe kadar çakılır. Ardından çakılmış olan bu boru geri çekilirken içine beton doldurulur ve bu beton boru ucundan kazık şaftının içine dolmak suretiyle kazığı meydana getirir. Çakma ve fore kazıklar için geçerli olan çoğu olumlu özellik, bu tip yerinde dökme çakma kazıklarda da elde edilebilmektedir. Teorik olarak bu tip kazıklarda taşıma kapasitesi hesabı aynı şekilde yapılmaktadır. Yalnızca ucu genişletilmiş kazıklarda (soğan başı), kazık ucunun geniş olması sebebiyle (A_b) taban alanının hesabı dikkatle yapılmalıdır.

3.2.2 Lamda (λ) Metodu

Vijayvergia and Focht ‘un 1972 de önerdikleri bu yöntem diğer ampirik yöntemlerle aynı şekilde çeşitli kazık yükleme deneylerinin geri hesaplanması sonucu oluşturulmuştur. Bu metodun, kazık çevre sürtünmesinin aşırı konsolide killerde dizaynı için hesap edilen değeri ile kazık yükleme deneyleri sonucu bulunan değer arasında 10% ‘luk bir yanılma ile sonuç verdiği belirtilmektedir [6]. Metodun orjinal gelişimi, Amerika Birleşik Devletleri’nde kıyıdan uzakta yapılan petrol istasyonlarının aşırıkonsolide kil zeminlere oturtulması ile başlamıştır. Bu metod başka uygulamalarda da bu ülkede birçok defa başarı ile kullanılmıştır.

Formülün içeriğinden görüldüğü üzere bu metod, alfa ve beta metodlarının tüm etkilerini içermektedir (hem drenajsız kohezyon hem de efektif kuvvet etkileri) [6].

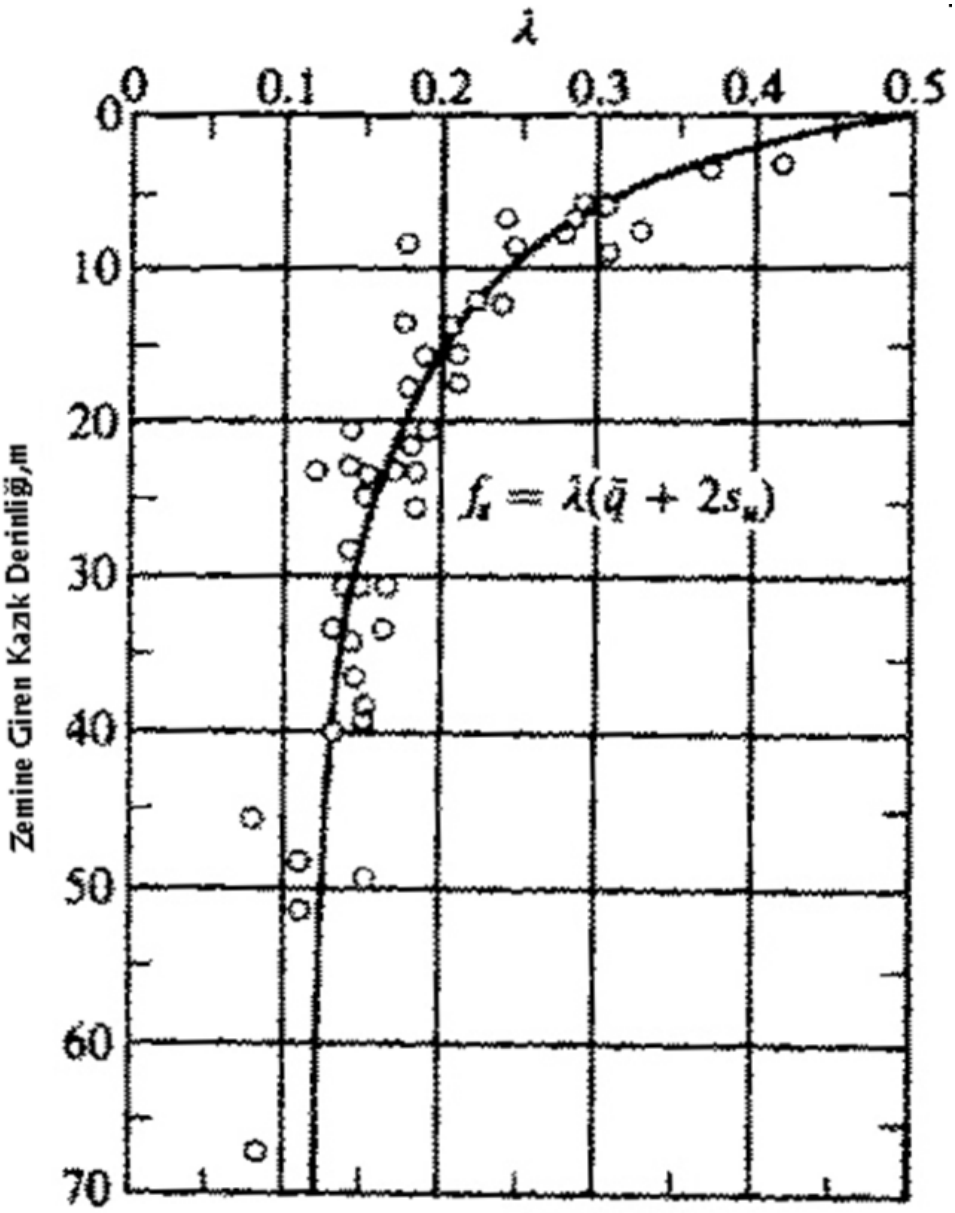
$$\tau_s = \lambda(\sigma_{vo}'+2*c_u) \tag{3.17}$$

τ_s : Çevre sürtünmesi

σ_{vo}': Kazığın varlığı dikkate alınmadan hesaplanan ortalama düşey efektif gerilme

c_u : Ortalama drenajsız dayanımdır (ø = 0 hali).

λ : Sürtünme kuvveti katsayısı. Şekil 3.6'dan bulunur.



Şekil 3.6. λ Sürtünme Kuvveti Katsayısı (Vijayvergiya ve Focht-1972) [6]

Lamda metodu, 15 metreden daha kısa kazıklarda, normal kosonsolide ve aşırı konsolide killerde yüksek değerler üretmektedir. Lamdanın en küçük değeri 0,14'dür. Bu metoddaki mantıksal içerik, kazık imalatı sırasında zeminin üst kısımları, daha fazla etkiye maruz kalacaklarından, kazık sürtünmesine olan katkıları aşağılara nispeten daha az olacaktır [6].

3.2.3 Beta (β) Metodu

Daha önceki bölümlerde de bu metoda değinilmiş ve Bowles (1996) tarafından kohezyonsuz zeminler için kullanılmasının tavsiye edildiği söylenmişti. Fakat bu metod aynı zamanda metodun sahibi Burland (1973) tarafından sert killlerde de önerilmiştir. Kazık imalatı sırasında kazık çeperi çevresindeki kilin yoğrulması ve oluşan kılcal boşluklardan sert killerde boşluk suyunun hızlı drenajlanması sebebiyle, kazığın çevre direncinin efektif gerilmeler cinsinden ele alınması önerilmiştir [4].
Buna göre birim sürtünme;

$$f = \sigma'_v * \beta \tag{3.18}$$

$$\beta = K * \tan\phi'_r \tag{3.19}$$

ϕ'_r : Yoğrulmuş kilin efektif (drenajlı) iç sürtünme açısı,

K : Yanal toprak basıcı katsayısıdır.

σ'_v : Düşey efektif gerilme

Yanal toprak basıncı katsayısı olarak kabul edilen K değeri, (3.2) ve (3.3) ifadeleri kullanılarak (3.18) ifadesinde yerine konulursa normal konsolide killer için:

$$f = (1 - \sin\phi'_r) * \tan\phi' * \sigma'_v \tag{3.20}$$

Aşırı konsolide killer için:

$$f = (1 - \sin\phi'_r) * \tan\phi' * \sqrt{OCR} * \sigma'_v \tag{3.21}$$

bağıntıları elde edilir[10].

Tablo 3.3'de bu katsayı için verilen bazı değerler yer almaktadır. Bu değerler arazi kazık yükleme deneyleri sonuçlarının geriye dönük analizleri yapılarak elde edilmişlerdir [10].

Tablo 3.3. Kazık Yükleme Deneylerinden Elde Edilmiş Beta Katsayıları [10]

	Su içeriği	**(PI)**	**Direnç(kpa)**	β
Katı Kil	23	35-55	120	0,44
Katı Kil	25	20-60	120	0,62
Masif Şeyl	15	7_16	500	0,64
Katı Kil	-	-	110	0,52
Katı Kil	19	36-46	140	0,30

Burland ve Twine (1989), aşırı konsolide killerde fore kazıklar üzerinde yaptıkları bir çok deney sonucunda, kazık çevre sürtünmesi değerinin efektif kuvvetlerce hesaplanmasında kullanılan kayma mukavemeti açılarının, yoğurulmuş kilin drenajlı iç sürtünme açısında karşılık geldiğini veya çok yakın olduğunu kanıtlamışlardır [4].

Dolayısıyla kohezyonlu zeminlerde, drenajsız durumu göz önünde bulunduran yöntemler ile efektif kuvvetler cinsinden hesap yapılmasını sağlayan yöntemlerin hepsi kullanılabilir(kritik olan önemlidir). Drenajsız durum için hesap yapan ampirik metodlar, kazık imalatının yapılacağı bölge zemininde yapılmış olan doğru test sonuçları sayesinde doğru sonuç verebilir. Kazıkların imalattan sonra önemli zemin gerilmesi değişimlerine (örneğin kazı, yeraltı su seviyeside değişimler gibi) maruz kalması durumunda, efektif kuvvet metoduyla hesabın yapılması, gerilmelerin değişmesi sebebiyle yanal toprak basıncı katsayısındaki değişimlerinde hesaba katılmasının sağlanması açısından önerilmektedir [4].

Efektif kuvvetler cinsinden hesaba dayanan bu metodu Fellenius(2006)'da önermektedir. Bazı durumlarda formülün içine efektif kohezyonunda eklenebileceğini belirtmektedir. Çakma kazıklarda bu kohezyonun hesaba dahil edilemeyeceğini fakat yerinde imal edilen fore kazıklarda bu kohezyonun hesaba dahil edilmesinin kullanışlı olabileceğini belirtmiştir [12].

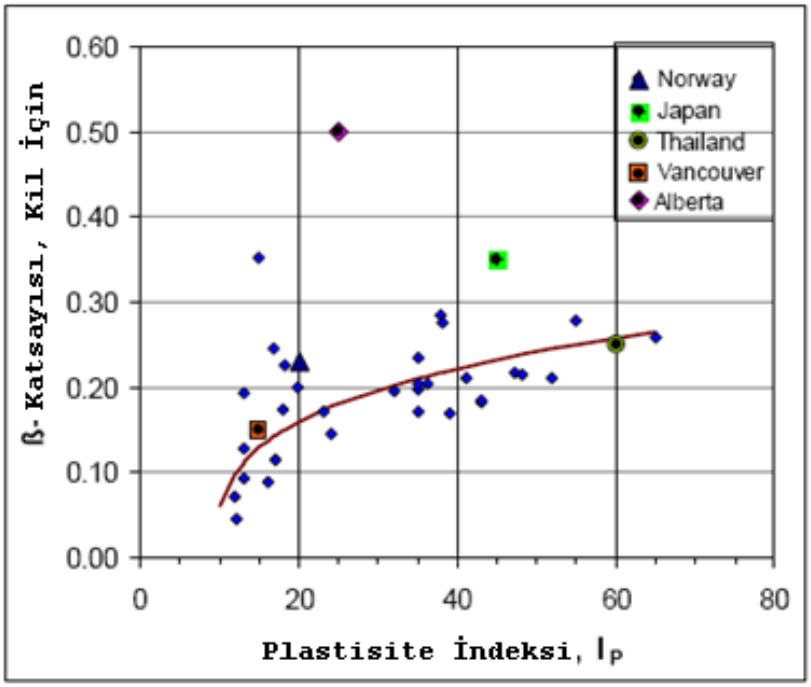
Burland'ın önerdiği bu beta kaysılarının zemin gradasyonuna, minerolojik kompozisyona, birim hacim ağırlığına, istiflenme tarihine ve serbest basınç dayanımına göre değiştiğini belirten Fellenius (2006), Tablo 3.4.'te bu katsayıları vermiştir [12].

Tablo 3.4. Beta Katsayılarının Yaklaşık Değerleri[12]

Beta Kaysayıları, Fellenius(2006)

Zemin Tipi	Phi	Beta
Kil	25 - 30	0.15 - 0.35
Silt	28 - 34	0.25 - 0.50
Kum	32 - 40	0.30 - 0.90
Çakıl	35 - 45	0.35 - 0.80

Beta katsayılarının, çok değişken değerlerde önerilebildiğini, bu değişkenliğin, öneren kişilerin yaptıkları incelemelerin yapıldıkları zemin durumunlarının farklılığından kaynaklandığını belirtmiş, değişik bir kaç beta değer grafiği sunmuştur. Bunlardan biride kil zeminlerde, plastisite indeksine karşı gelen beta değerlerini veren şekildir (Şekil 3.7) [12].



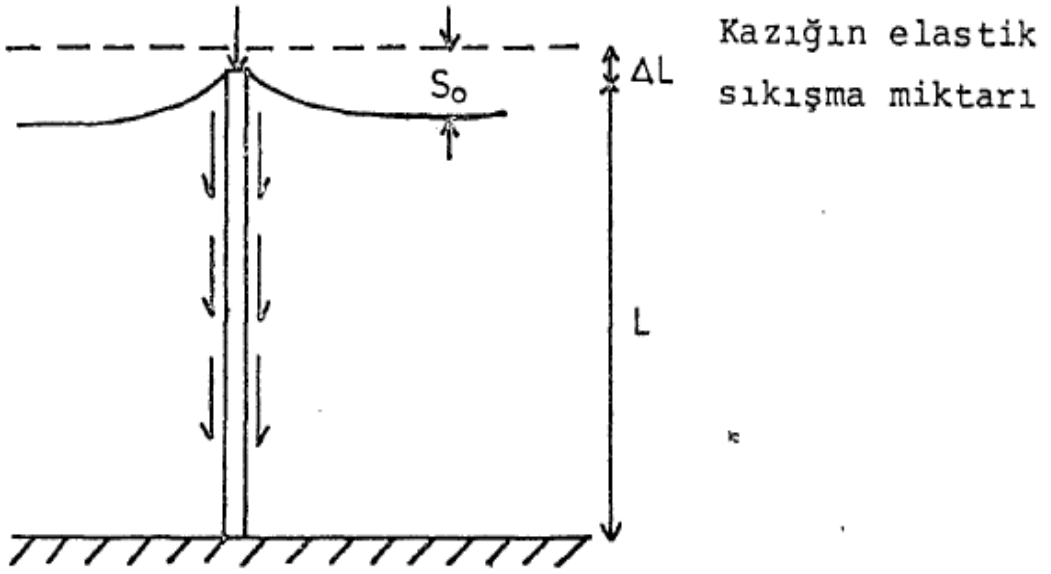
Şekil 3.7. Killerde Plastisite İndeksine Karşılık Gelen Beta Katsayıları (Clausen et al(2005) Fellenius (2006)) [12]

4. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ

Yoğunluğu yüksek yapıların temel yükleri fazla olduğunda, üzerlerine inşa edilecekleri zeminlerin taşıma güçleri yetersiz gelebilmektedir. Bu tip durumlarda zeminler, kazıklı temellerle desteklenerek, yapı yükleri kazıklara taşıtılır veya kazılar aracılığı ile sağlam zeminlere transfer edilirler. Uç kazığı ve sürtünme kazığı olarak sınıflandırılan kazıklar, önceki bölümlerde anlatılan kazık formülleri aracılığı ile hesaplanarak, ebatları tespit edilir.

Yumuşak kıvamlı kohezyonlu zeminlerde ve gevşek dolgu tabakalarında yapılacak olan kazıklı temel sistemlerinde önemli bir risk, negatif çevre sürtünmesinin bu tip zeminlerde zaman içinde oluşması durumudur. Bu sebeple bu tip zeminlerde, kazıkların taşıma kapasitesine sürtünme kuvvetinin katkısı beklenmemelidir; aksine konsolidasyon oturması sebebiyle negatif çevre sürtünmesi kazıklara ters etki ederek taşıyacakları yapı yüküne ilave bir yüke neden olabilir ve böylece kazıkların taşıma kapasitesinin azalmasına hatta hasar görmesine neden olabilir. Bu tip zeminlerde, tabakaların kendi ağırlıkları veya zemin üzerine uygulanacak dolgu gibi ilave yükler sebebiyle kosolidasyon oturması meydana gelecek, kazık ile zemin arasında oluşması beklenen pozitif çevre sürtünmesinin bir kısmı, konsolidasyon oturması ilerledikçe relatif yer değitirme oluştuğunda negatif çevre sürtünmesine dönüşecektir.

Negatif çevre sürtünmesi, yakın çevrede yapılan inşaatlardan, komşu bölgelerdeki kazık çakımı sebebiyle çevre basıncındaki artışlardan, uzak mesafelerde su seviyesinin alçalmasıyla zeminde oluşacak efektif gerilme artışından dolayı kazık çevresi zeminin oturması sebebiyle meydana gelebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Negatif Çevre Sürtünmesinin Sıkışabilir Tabakada Oluşumu

Kazığı çevreleyen zeminin herhangi bir nedenle oturması durumunda kazık tasarımında dikkate alınan pozitif çevre sürtünmesinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Uç mukavemeti az olan veya hiç olmayan sürtünme kazıkları çevre zeminle birlikte oturmaktadır.Bu oturma sonrasında kazık çevresindeki zemin oturmaya devam ederek kazığa oranla belirli bir derinliğe kadar kazıktan fazla oturabilir; bu derinlik nötr nokta olarak tarif edilir.Bu nötr nokta üzerinde sürtünme negatif yönde kazığın taşıma kapasitesini azaltarak kazığa etkir, bu noktanın altında ise pozitif yönde kazık kapasitesine katkıda bulunur. Buna karşılık uç kazığında, çevre zemininin hemen tamamı düşey yönde oturması sebebiyle oturma miktarına bağlı olarak çevre sürtünmesi önce azalmakta ve ardından işaret değiştirerek ters yönde etkimektedir. Böylece kazık çevresi boyunca "negatif" çevre sürtünmesi kazığa ilave bir yük olarak etkimektedir. Kazığa etkiyen bu ek yük bazı özel durumlarda, üst yapıdan etkiyen yükten daha büyük olabilmektedir. Büyüklüğü tam olarak bilinemeyen bu kuvvet, kazık projelendirilmesi aşamasında dikkate alınmaması halinde kazık ucunda yapısal göçme veya zemin göçmesi ile kazıkta aşırı oturmaya sebep olabilir [14].

Negatif çevre sürtünmesi, kazık-zemin arasındaki relatif yerdeğiştirmeye bağlı olarak artar. Sürtünme kazıklarında zemin oturmasının kazık oturmasından 6mm kadar fazla olması durumunda negatif çevre sürtünmesi maksimum değere ulaşır; artan oturma değerlerinde sabit kalır. Uç kazıklarında kazık imalatını takiben zemin yüzeyinde

meydana gelecek 2.5 cm dolayındaki bir zemin-kazık oturma farkı, kazık şaftı boyunca maksimum negatif çevre sürtünmesinin mobilize olması için yeterli olmaktadır [14]. Fellenius (1971)' e göre de bu değer sürtünme kazıklarında yaklaşık 6mm olarak belirtilmiştir [15].Vesic'e göre ise 15 mm'lik bir relatif oturma, negatif çevre sürtünmesinin maksimum değere ulaşması için yeterlidir [5]. Walker ve Darvall (1973), 3 m bir sürsarj yükünün kazıkların çevresine yerleştirilmesiyle zeminde 35 mm'lik bir oturmanın oluşmasıyla kazıklarda 18 m derinliğe kadar etkili olan negatif çevre sürtünmesinin maksimum değere ulaştığını göstermişlerdir. Bjerin (1977), kazık başlığından 12 cm uzakta ölçülen 5 mm'lik bir otumanın 25 m derinlikte negatif çevre sürtünmesinin maksimum değerine ulaştığını göstermiştir. Bu değer kazık başından 5 metre mesafede 8 mm olarak tespit edilmiştir. Bozozuk(1981) ise 20 m derinlikte etkili olan negatif çevre sürtünmesinin maksimum değerine 5 mm'lik bir relatif zemin oturması sonucu ulaşıldığını tespit etmiştir[16].

Negatif çevre sürtünmesinin başlıca sebepleri şu şekilde sıralanabilir [14];

1.Kendi ağırlığı altında henüz konsolidasyonunu tamamlamamış yumuşak zeminlerde kazık imal edilmesi

2.Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi

3.Sıkışabilen zemin tabakasında herhangi bir sebeple ilave boşluk suyu basıncı ortaya çıkması

4.İçinde kazık imal edilmiş olan sıkışabilen bir zemin tabakası üstünde yeni bir dolgu tabakasının oluşturulması veya kazıklı temele komşu alanda dolgu yapılması

5.Mevcut kazıklı temel yanında kazık çakılması

Negatif çevre sürtünmesinin bağlı olduğu faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz [17];

1.Kazık özellikleri; cins, uzunluk, en kesit, yüzey durumu, yerleştirme metodu vb.

2.Zemin özellikleri; zemin cinsi, gerilme tarihçesi, sıkışabilirlik, tabaka kalınlığı, taşıyıcı tabakanın kıvamı ve cinsi vb.

3.Zemin hareketlerinin sebepleri

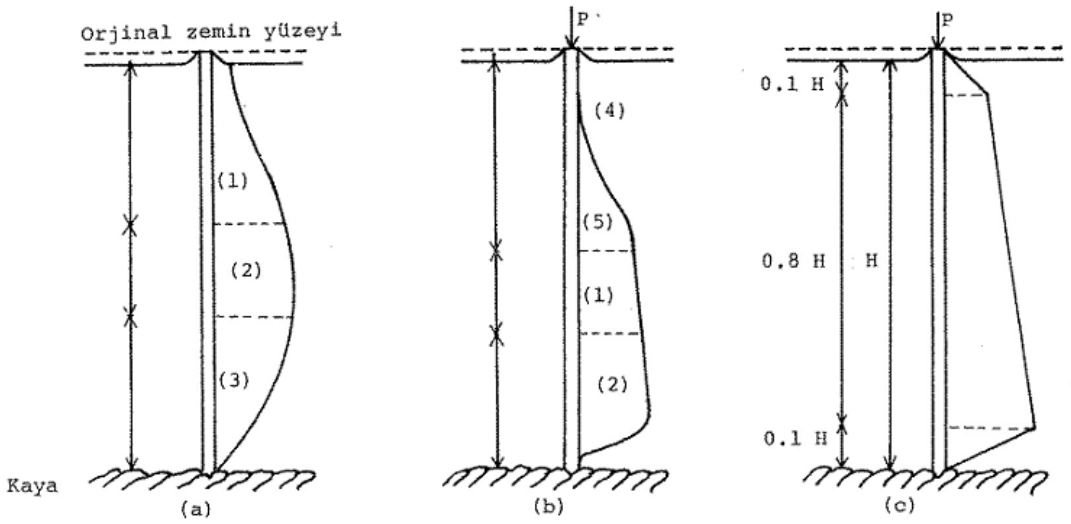
4. Kazıkların imalat süresi

Negatif çevre sürtünmesinin sebep olduğu ilave yükler, kazık ile zemin oturmasının eşit olduğu nokta olarak tarif edilen nötr noktanın yerinin saptanması ile belli bir oranda tespit edilebilmektedir. Uç kazıklarında, elastik kısalma göz önüne alınmadığında kazığın oturması söz konusu olmadığından negatif çevre sürtünmesi kazık boyunca meydana gelmektedir fakat sürtünme kazılarında kazığın bir miktar oturma yapması kazığın alt kısmında meydana gelen negatif çevre sürtünmesinin yok olmasına sebep olur.

4.1.NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN KAZIK BOYUNCA DAĞILIMI

4.1.1.Kayaya Soketlenen Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

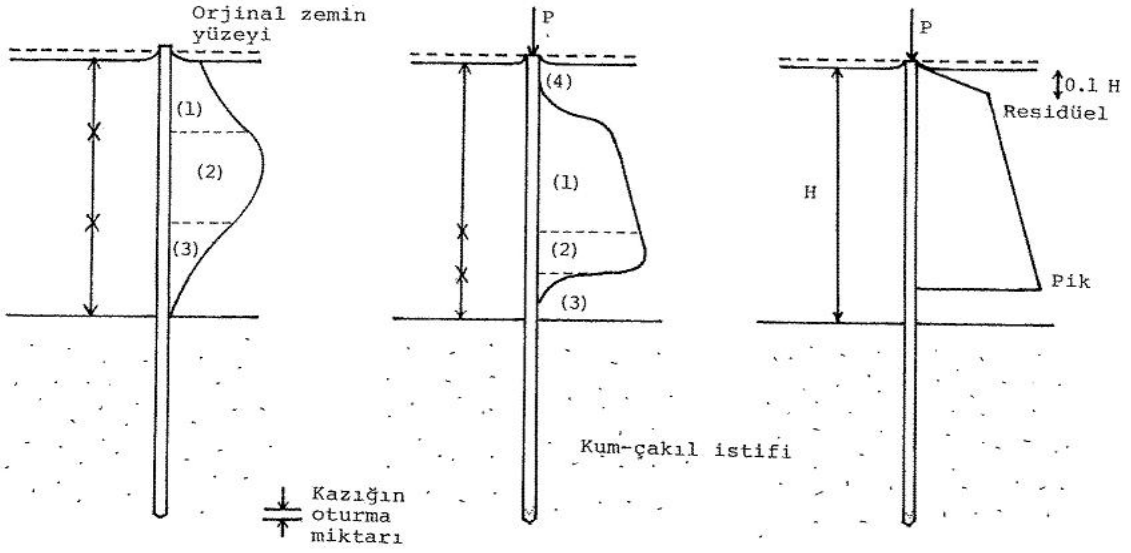
Kayaya oturan veya kayaya soketlenen kazıklarda, kazık şaftı çevresindeki zeminin herhangi bir sebeple oturması durumunda kazığın oturması söz konusu olmadığından, kazık üzerinde ortaya çıkacak negatif çevre sürtünmesi kuvvetleri, kazığın taşıyacağı yapı yüküne eklenerek kazık ucuna aktarılacaktır. Şekil 4.2.a'da henüz yüklenmemiş bir kazığın çevresindeki zeminin konsolide olması durumunda ortaya çıkacak negatif çevre sürtünmesi dağılımı gösterilmiştir. Bu durumda kazığın üst kısmında, negatif çevre sürtünmesi tamamiyle mobilize olmasına karşın, kazığın alt kısımlarına inildikçe zemin yükünün artmasından dolayı daha büyük miktarlarda negatif çevre sürtünmesi değerine ulaşılır. Ancak, kaya zeminin hemen üstündeki zeminin oturmasının sıfır değerinde olmasından dolayı, kazığın bu uç noktasındaki negatif çevre sürtünmesi değeri sıfırdır. Kazık yüklemeye maruz kaldığında, elastik sıkışma sebebiyle zemin içine doğru bir miktar hareket eder. Elastik sıkışmanın kazığın üst kısımlarında maksimum değerine ulaşması sebebiyle, kazık üst kısımlarında zemin içine daha fazla gireceğinden, bu kısımda negatif çevre sürtünmesi değeri azalır hatta sıfırlanır. Bunula birlikte belli bir mesafeden sonra Şekil 4.2.b'de gösterildiği gibi negatif çevre sürtünmesi dağılımı artmaya başlar. Kazık ucundaki oturmanın sıfır olmasından dolayı yine bu bölgede negatif çevre sürtünmesi sıfırlanır. Şekil 4.2.c'de ise bu durumdaki negatif çevre sürtünmesi dağılımının Tomlison (1981)' ce idealize edilmiş dağılım diagramı sunulmuştur [18].



Şekil 4.2. Kayaya Oturan veya Soketlenen Kazıkta Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı, Tomlinson(1981) [18]

4.1.2.Kohezyonsuz Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Sıkışabilen kalın bir dolgu tabakasını geçtikten sonra taşıyıcı zemin olarak kabul edilen kum-çakıl istifi içerisinde son bulan kazık, Şekil 4.3'de gösterilmektedir.

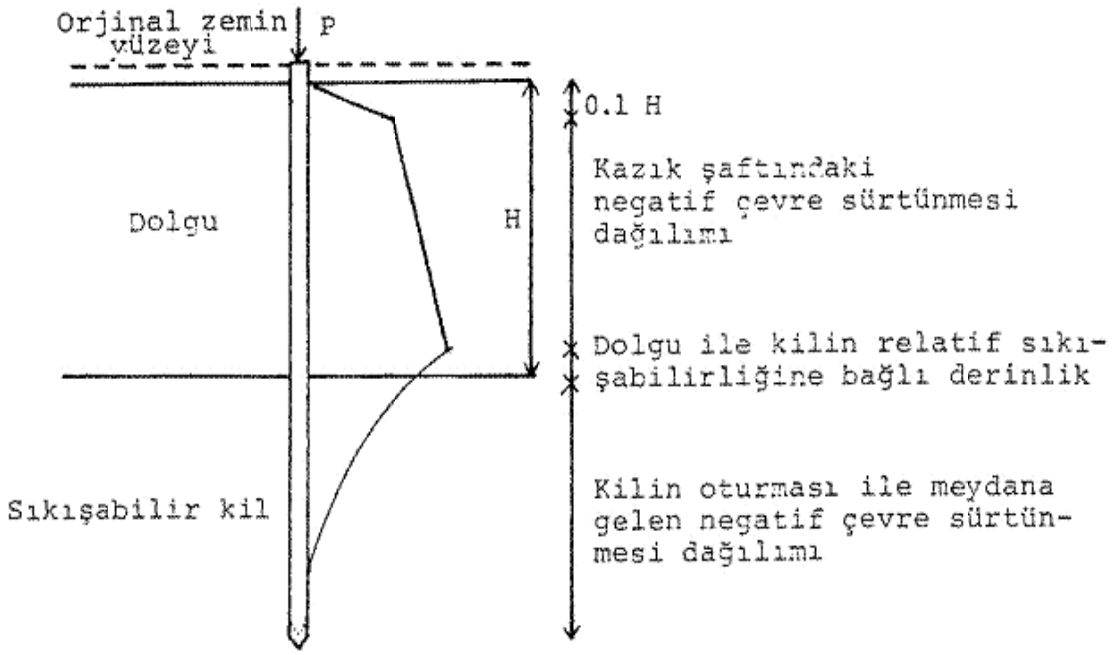


Şekil 4.3.Kum-Çakıl Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı, Tomlinson(1981) [18]

Negatif çevre sürtünmesi, sıkışabilen üst tabaka içerisinde ortaya çıkacaktır. Yüklenmemiş kazıktaki negatif çevre sürtümesi dağılımı Şekil 4.3.a'da, yüklenmeyi takiben elastik kısalma yapan kazıktaki negatif çevre sürtünmesi dağılımı Şekil4.2.b'de ve sonuncu olarak ise idealize edilmiş dağılım ise Şekil4.3.c'de gösterilmiştir. Kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamlamış eski dolgularda zemin yüzeyinde sürşarj yüklemesi olmaması halinde negatif çevre sürtünmesi ihmal edilebilir [18].

4.1.3.Kil Zemine Giren Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Şekil 4.4'te gösterilen zemin profilinde sıkışabilir kil tabakası üzerinde relatif olarak kalın bir dolgu tabakası teşkil edilmiştir. Sıkışabilir kil tabakasının bu ilave yükleme altında konsolide olacağı bilinmektedir. Yüzeydeki dolgu tabakasını geçerek sıkışabilir kil tabakası içerisinde sona eren sürtünme kazıklarında ortaya çıkacak negatif çevre sürtünmesi dağılımı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Dolgu tabakasının kohezyonlu veya kohezyonsuz olması bu dağılımı fazla etkilemeyecektir, çünki sıkışabilir kil tabakasının oturması halinde üstte yeralan granüler dolgu istifi de bu oturmayı takip edecek ve kazık yüzeyinde negatif çevre sürtünmesine sebep olacaktır.



Şekil 4.4. Dolgu ve Sıkışabilir Kil Zeminden Oluşan Zemin Profilinde Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı, Tomlinson(1981) [18]

Üstteki dolgu zemininin kohezyonlu olması halinde dolgu zemin kendi ağırlığı altında yıllarca sürebilecek bir zaman diliminde konsolide olacaktır. Alttaki yumuşak kil tabakası ise hem kendi ağırlığı etkisiyle hem de ilave dolgu yükü altında kosolide olacaktır. Şekil 4.4'den görülebileceği gibi kazığın yüklenmesi ile yumuşak kil tabakası içerisinde son bulan kazığın bir miktar oturması negatif çevre sürtünmesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu oturmanın fazla olması halinde negatif çevre sürtünmesinin sıfırlanacağı veya tekrar pozitif çevre sürtünmesine geçiş olacağı bilinmektedir. Dolayısıyla bu durumda negatif çevre sürtünmesi dağılımı aşağıda sıralanan dört faktörün fonksiyonu olmaktadır [18].

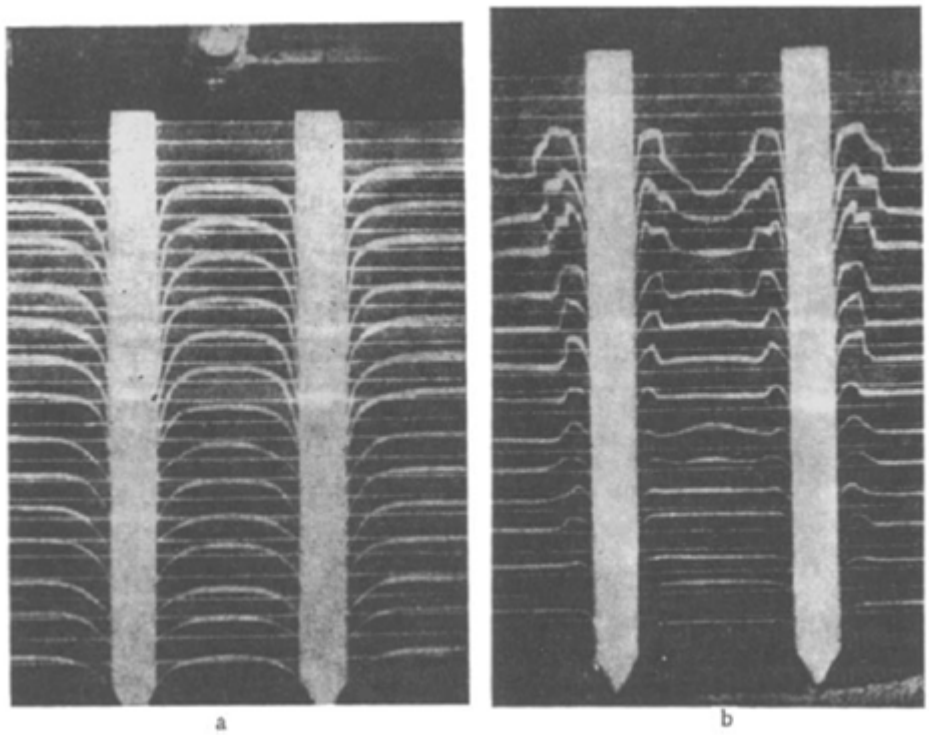
1.Dolgu ile kazık arasındaki relatif yer değiştirme miktarı

2.Yumuşak kil tabakası ile kazık arasındaki yer değiştirme miktarı

3.Yüklemeyi takiben kazıktaki elastik boy kısalması

4.Yumuşak kil tabakasının konsolidasyon yüzdesi

Çakma kazıklar için yapılmış bir model deneye ait görüntüleme bilgi amaçlı olarak Şekil4.5'te sunulmuştur [19].

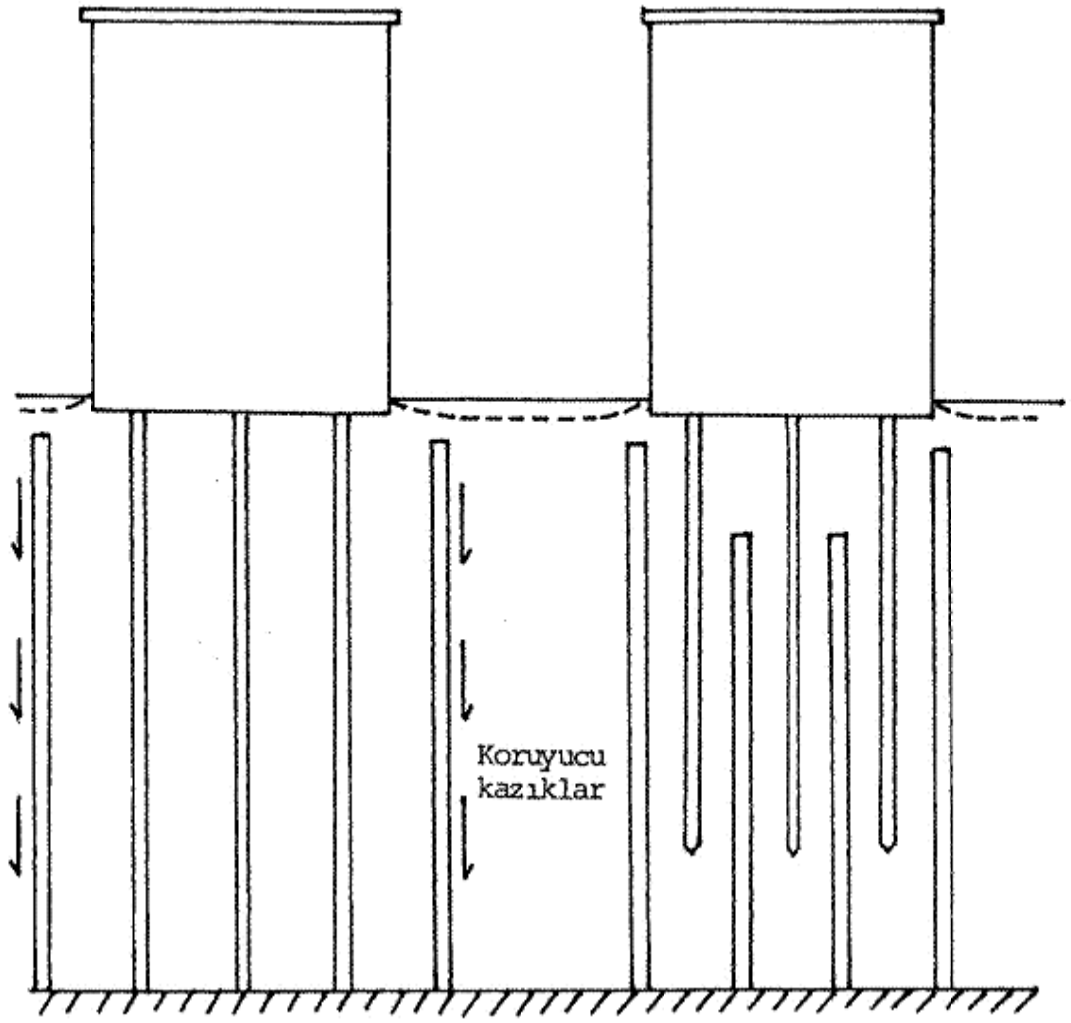


Şekil 4.5. Çakma Kazıklara Ait Model Deney (Kazım Çakımı Sonrası ve Negatif Çevre Sürtünmesi Oluşumu Sonrası) [19].

5.NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

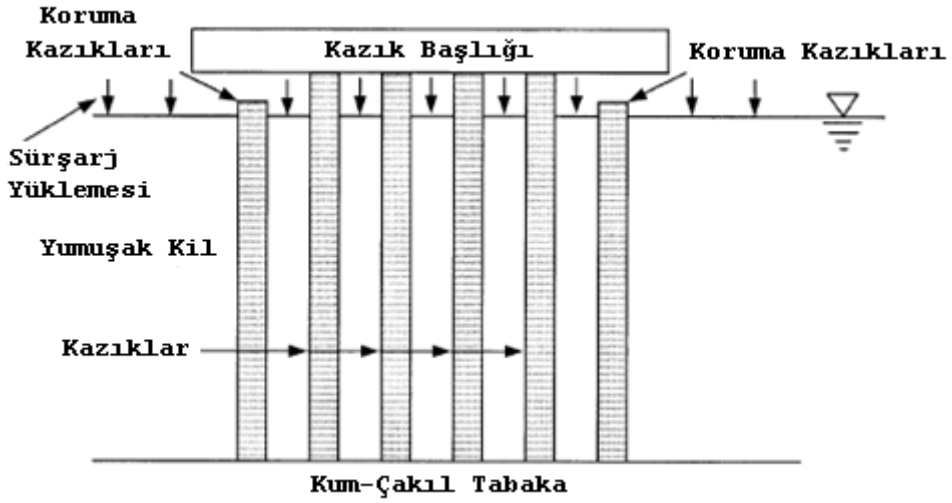
Negatif çevre sürtünmesi değerini azaltma işlemleri zeminden daha çok kazık üzerinde yapılan işlemlerle yapılmaktadır. Kazık üzerinde oluşan negatif çevre sürtünmesi değerini azaltmak için uygulanacak ilk yöntem kazık boyutları üzerinde yapılabilecek değişikliklerdir. Bunlar, kazık çapının genişletilmesi, kazığın geniş uçlu olarak imal edilmesi veya boyunun değiştirilmesi olarak sıralanabilir. Eğer kazık boyu 40-50 m'yi aşarsa ve kazık taşıyıcı tabakaya oturuyorsa, aşırı miktarlarda oluşabilecek olan negatif çevre sürtünmesi değerleri, kazık ucunda hasar meydana gelmesine sebep olabilir. Böyle bir durumda kazıkların sürtünme kazığı olarak imal edilmesi gibi bir çözüm yolu denenebilir [20]. Ancak böyle bir seçimde oturmalar kesinlikle üst sınır değerlerinin altında kalacak şekilde kazık boyları tayin edilmelidir. Ayrıca yapı ile zemin oturmasının eşit olması gerekmektedir.

Negatif çevre sürtünmesi pratikte tam olarak yok edilemez. Bu sebeple yapılabilecek harcamalar kazık sistemlerinin maliyetine eşit seviyede olabilmektedir. Bunun için en pratik yöntem uç kazıklarında kazık grubu çevresine koruyucu kazıklar imal edilmesi veya sürtünme kazıklarından oluşan bir sistemde tesir azaltıcı ek kazıklar imal edilmesidir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) [21]. Bir diğer yöntem ise kazık dışına koruyucu bir eleman geçirerek, kazık ile bu eleman arasının viskoz bir malzeme (örneğin bentonit) doldurulmasıdır [20].



Şekil 5.1.Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması

Günümüzde pratik olarak en çok kullanılan yöntem ise kazık yüzeyinin ziftlenmesi işlemidir. Zift kalınlığı çelik kazıklarda en az 1 mm, yüzeyi pürüzlü olan betonarme kazıklarda ise 2 mm olmalıdır. Ancak kazıkların çakılması esnasında zift kaplama zarar görebileceğinden en kesin koruma yolu ucu genişletilmiş ve ziftlenmiş kazıkların imal edilmesidir [20].



Şekil 5.2.Koruyucu Kazıklar ile Negatif Çevre Sürtünmesinin Azaltılması

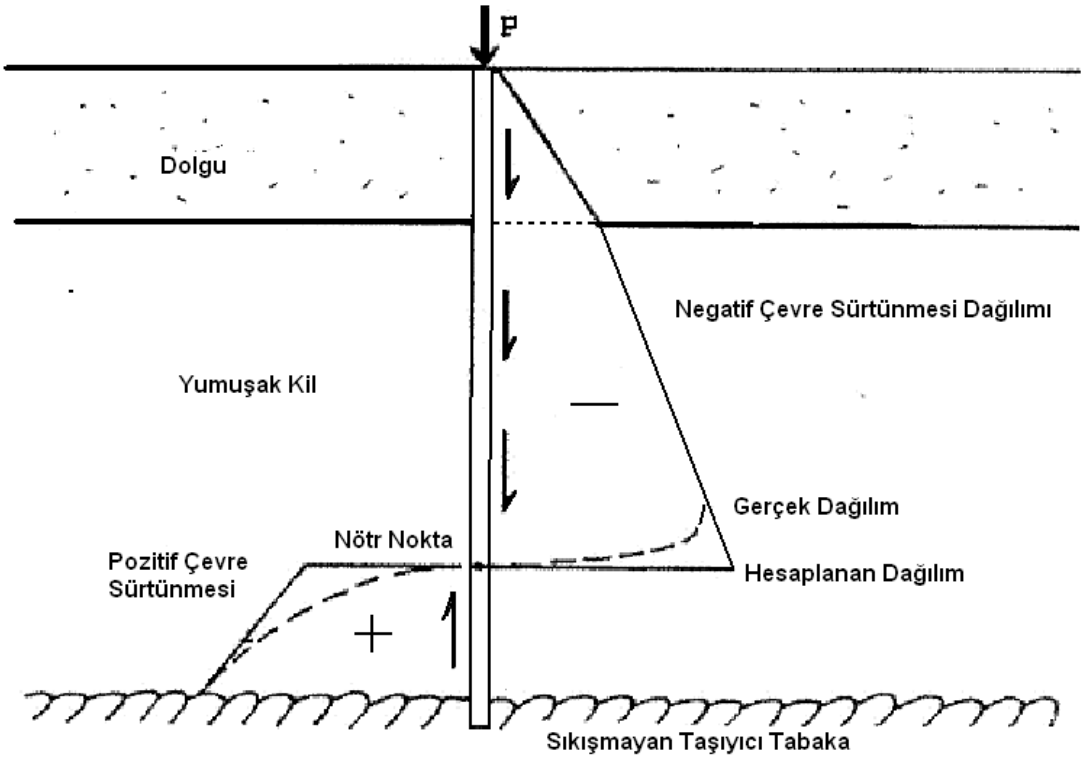
Lee&Lumb (1982), Tuen Mun 'da çelik kazık üzrinde yaptıkları araştırmada, negatif çevre sürtünmesinin zift kaplama sayesinde 86% oranında azaltılabildiğini tespit etmişlerdir. Fukuya (1982) ise Japonya'da çelik kazıklar üzerinde yaptığı çalışmada kazık dışının polietilen plastik ile 3,5 mm kaplanması sayesinde negatif çevre sürtünmesi etkisinin büyük oranda azaltıldığını göstermiştir. Simon&Menzies (1977), Norveç'te yaptıkları çalışmada çelik kazıklarda en az 1mm kalınlığında, betonarme kazıklarda ise en az 2 mm kalınlığında zift kaplama uygulamışlar ve negatif çevre sürtünmesini büyük oranda azaltmışlardır. Simons&Menzies (1977) ise yaptıkları araştırmada, denizde bulunan kil tabakalarında zift kaplamanın dayanıklılığının, bakteriolojik etkilerdeki durumunun incelenmesi gerektiğini önermişlerdir [4]. Biraud (2006) ise çakma metal kazıklarda 10mm kalınlığında bitüm uygulanmasını önermiştir. Broms, Amesz ve Rinck (1969) yaptıkları çalışmada, 10 mm kalınlığında bitümle kaplı kazık kullanmışlar ve kazığı bentonit bulamacıyla teşkil etmişlerdir. Bu uygulamada negatif çevre sürtünmesinde %90 oranında bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Kazık üzerinde negatif çevre sürtünmesini azaltma yöntemlerinden bir diğeri ise elektro-osmosis yöntemidir. Bjerrum(1969) yaptığı çalışmada 4 amp'lik bir elektrik akımı ile bu etkiyi yaklaşık olarak %50 azaltmayı başarmıştır. Oldukça pahalı olan bu yöntem, siltli kil ve killi silt zeminlerde başarılı sonuç vermesine rağmen yüksek plastisiteli zeminlerde kullanılması mümkün olmamaktadır [20].

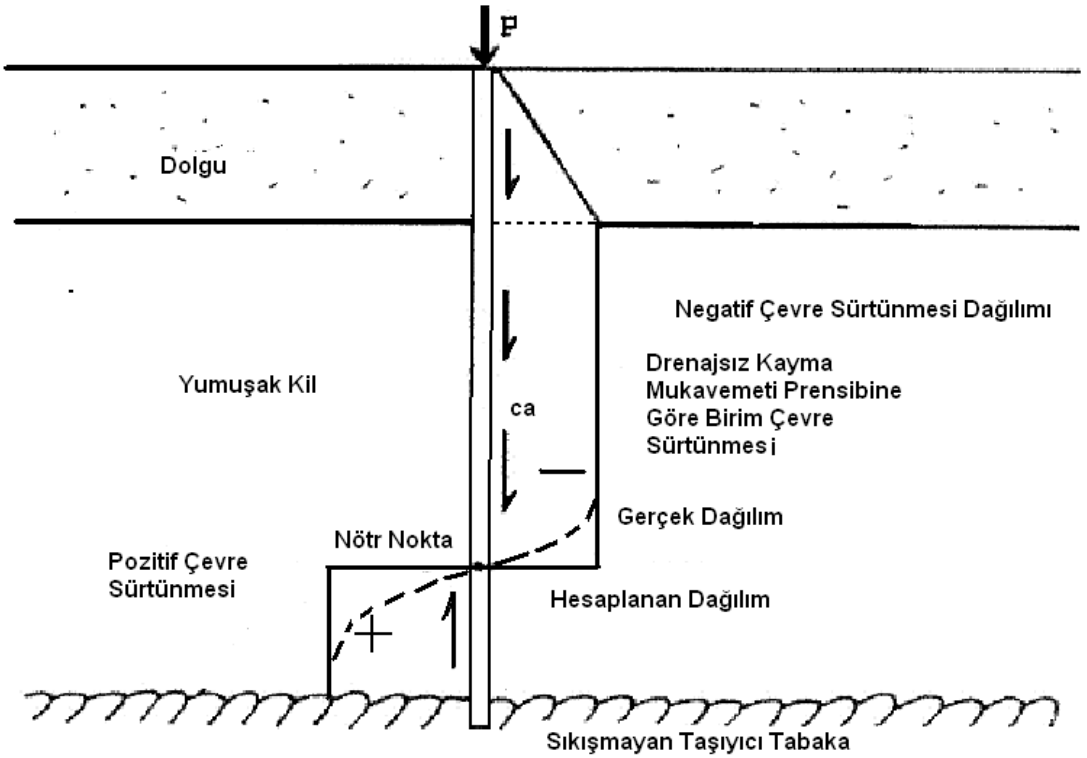
6. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİNİN HESAPLANMASI

6.1.Nötr Noktanın Tayini

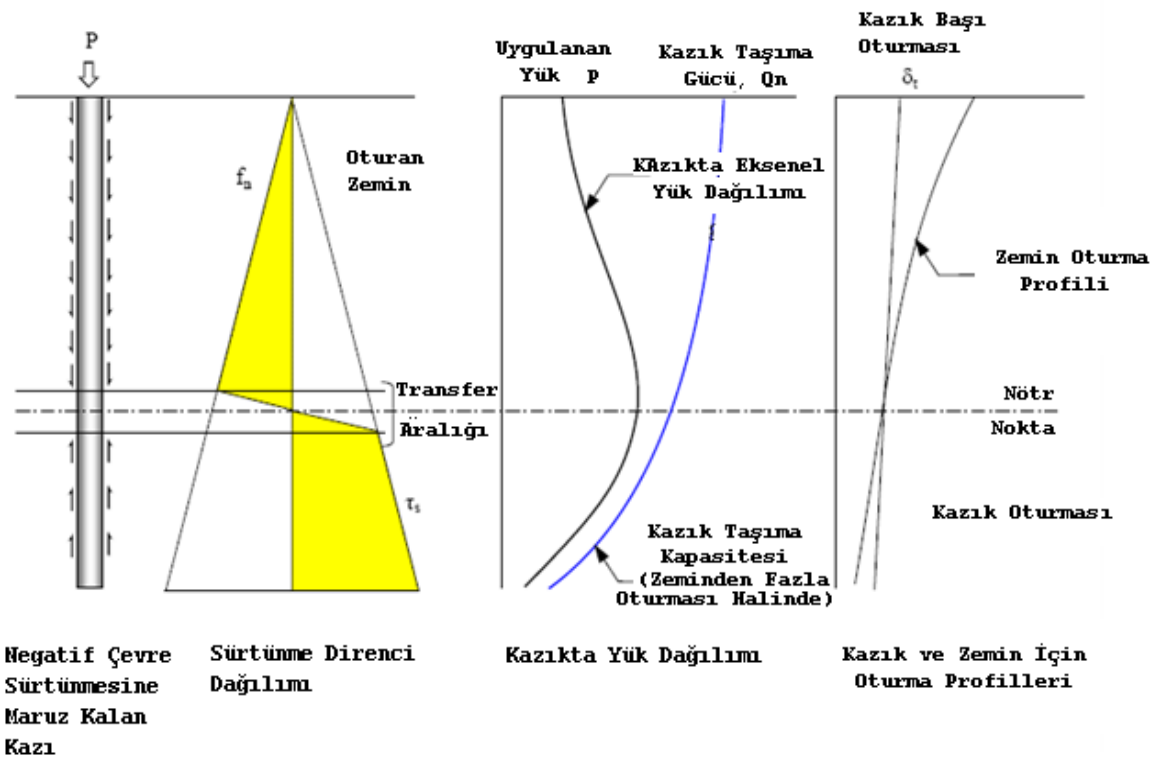
Negatif çevre sürtünmesi kazıkta nötr nokta olarak tanımlanan, kazığın yapacağı eksenel oturmanın kazık çevresindeki zeminin yapacağı konsolidasyon oturmasına eşit olduğu noktaya kadar etkili olmaktadır. Şekil 6.1., Şekil6.2 ve Şekil 6.3'te önerilen dağılımlar gözükmektedir.



Şekil 6.1.Nötr Noktaya Göre Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı (Efektif KuvvetlerPrensibine Dayalı Metodlar İçin) (Broms,1981)[21]



Şekil 6.2.Nötr Noktaya Göre Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı (Drenajsız KaymaMukavemeti Prensibine Dayalı Metodlar İçin)



Şekil 6.3.Nötr Noktanın Tayini ve Oturma Profilleri [4]

Yüzen kazıklarda Bowles (1996) nötr noktanın tayininde Şekil 6.3'den faydalanarak aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$L1 = \frac{L}{L1}.\left(\frac{L}{2} + \frac{q_0}{\gamma'}\right) - \frac{2q_0}{\gamma'} \quad (6.1)$$

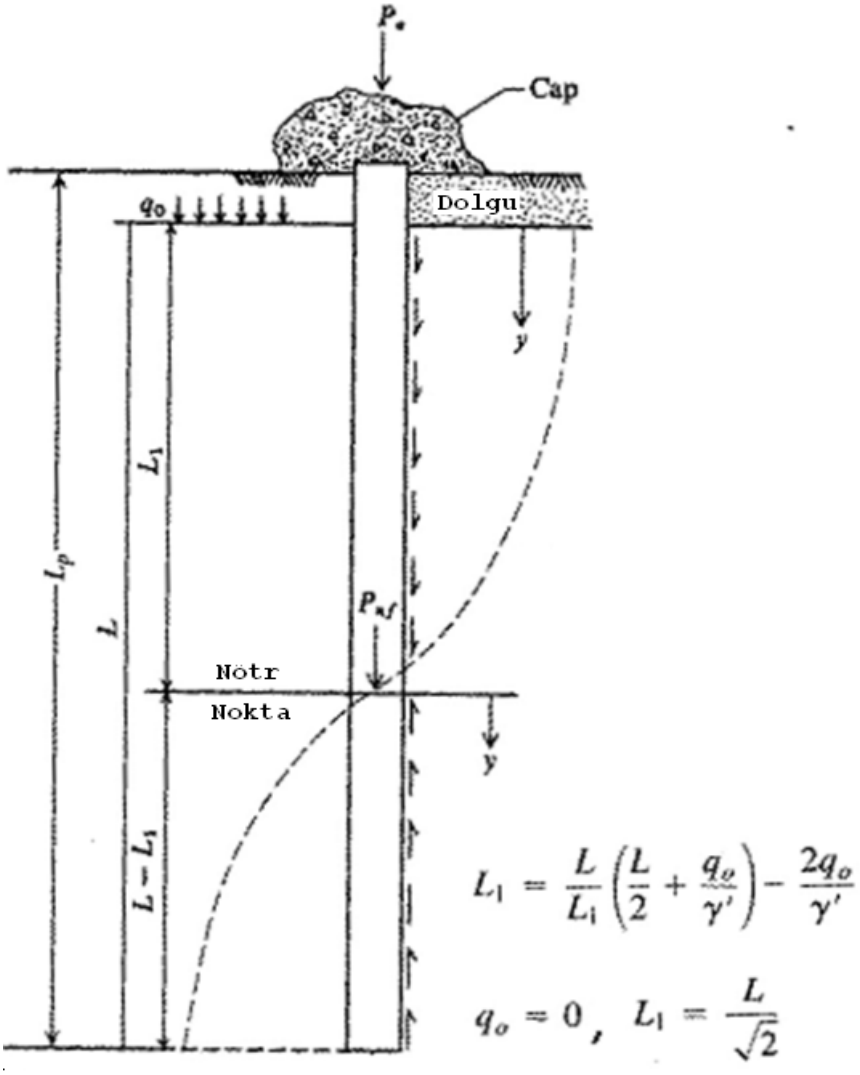
L_1: Nötr nokta derinliği

q_0: Sürşarj yükü

γ': Zemin efektif birim hacim ağırlığı

Sürşarj yükü eğer yoksa yani q_0=0 ise, denklem şu şekle dönüşür;

$$L1 = \frac{L}{\sqrt{2}} \quad (6.2)$$



Şekil 6.4. Sürtünme Kazığında Nötr Noktanın Tayini [6]

Nötr noktanın ampirik olarak tayinin de yapılmış olan en son çalışma Matyas ve Santamarina (1994) 'ya aittir. Bu çalışmayı yapan bilim adamları, çalışmanın çok fazla kabul içermesi sebebiyle çalışmayı yayınlamamış olmalarına karşın, çalışma sonucunda nötr noktanın kazık boyunun yarısı (L/2) ile kazık ucundan 1/3 kadar yukarıda (L/3) olan mesafe arasında bir yerde olduğu neticesine varmışlardır. Buradan hesaplarda negatif çevre sürtünmesinin önem taşıdığı durumlarda emniyetli yönde kalınarak kazık ucundan yukarıya doğru L/3 mesafesinin uygulanması akılcı bulunmaktadır [6]. Ama eğer elimizde yeterince kazık yükleme deneyi verisi varsa, nötr noktanın hesabını yapmamız tavsiye olunmaktadır. Bowles önerdiği (6.1) denlemi ile nötr noktanın bulunmasını ve ardından bu noktada kazığa gelecek eksenel yükün hesap edilmesini, aynı hesabın 0.6*L ile 0.67*L derinlikte de yapılarak, kazığın bu yükleri yaşıyıp taşıyamayacağının kontrolünün güvenlik sayısının 2 ile 3 arasında alınarak yapılmasını, eğer kazık bu noktalarda aşırı yüklemeye maruz kalırsa, kazık çapının biraz artırılarak kontrolün tekrar edilmesini önermektedir [6].

Endo (1969), nötr noktanın kazık boyunun ¾ kadar aşağısında (0.75*L) yer aldığını belirtmektedir fakat Vesic (1977) nötr noktanın 0.75*L'nin aşağısında veya yukarısında bir yerlerde olabileceğini göstermiştir. Bu sebeple oturma yapan tüm yüzeyde negatif çevre sürtünmesinin hesaplanmasının emniyetli bir yol olduğu belirtilmektedir [22].

Uç kazığında herhangi bir şekilde kazığın oturması söz konusu olmadığından, nötr nokta kazık ucuna yakın bir yerde konumlanır. Uç kazıklarında nötr nokta hesabına bu yüzden gerek görülmez ve kazık çevresi zeminin konsolidasyon oturmasına maruz kalacak tüm kazık yüzeyi boyunca negatif çevre sürtünmesi hesap edilir.

Negatif çevre sürtünmesi hesap edilirken gözönüne alınması gereken iki önemli unsur bulunmaktadır. Kazık yerleşimlerinin küçük aralıklarla yapılması durumunda, negatif çevre sürtünmesi tüm grupta etkiyebilir. Bu sebeple aşağıdaki iki inceleme yapılmalı ve büyük sonuç hesaba katılmalıdır.

1-Grup halindeki kazıklarda toplam negatif çevre sürtünmesi, her bir kazığa gelecek olan negatif çevre sürtünmelerinin toplamından elde edilir [6];

$$Q_n=\Sigma Q_{nf} \quad (6.3)$$

2-Kazık aralarındaki zemin ağırlığının da hesaba dahil edilmesi[6];

$$Q_n=f_s*L_f*P_g+\gamma*L_f*A \quad (6.4)$$

Burada,

Q_n :Toplam negatif çevre sürtünmesi

f_s : Kazık grubu çevresinde etkiyen birim negatif çevre sürtünmesi

L_f : Kazık grubu derinliği

P_g : Kazık grubu çevresi

γ : Kazık grubu içindeki zeminin birim hacim ağırlığı

A : Kazık grubu alanı

dır.

6.2.Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Taşıma Kapasitesi Hesabına Dahil Edilmesi Yöntemleri

Negatif çevre sürtünmesi, kazık taşıma kapasitesi hesabına etkitilirken çeşitli yöntemler izlenmektedir. Fellenius kazık dizaynı yapılırken birleştirilmiş yük tayini metodunda müsade edilen yük yani dizayn yükünün hesaplanmasında negatif çevre sürtünmesi hesaba dahil edilmez fakat kazığın maksimum taşıyabileceği yük ve kazık yapısal yeterliliğinin belirlenmesinde nötr noktada en büyük değerin oluşacağını, bu değerin ise ölü yük ile negatif çevre sürtünmesinin toplamından bulunacağını ve bu maksimum yüke karşı kazığın yeterli olabilmesinin gerektiğini söylemektedir. Kazığın maksimum taşıyabileceği yükün hesabında hareketli yük hesaba dahil edilmez [23]. Amerikan Deniz Kuvvetleri Mühendislik Ofisi'ne göre ise negatif çevre sürtünmesinin hesaba dahil edilmesinde hareketli yük ile negatif çevre sürtünmesi beraber değerlendirilmemelidir. İki çeşit yükleme durumu kontrol edilmelidir; birincisi ölü yük ve negatif çevre sürtünmesi toplamı, ikincisi ise ölü yük ve hareketli yük toplamıdır. Aynı kaynak çoğu hesaplamada ölü yük, hareketli yük ve negatif çevre sürtünmesinin beraber toplanarak servis yükü olarak değerlendirildiğini fakat bunun aşırı emniyetli bir hesap tarzı olduğunu belirtmektedir [11]. Fakat pratikte genel olarak, aşırı emniyetli olduğu iddia edilse bile, Tomlinson(1981) 'un da önerdiği üzere kazık servis yükü, kazığın emniyetli

taşıyabileceği yükten negatif çevre sürtünmesinin eksiltilmesiyle tespit edilmektedir [18].

6.3.Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaplanma Yöntemleri

Birçok bilim adamı çok uzun zamanlardan beri bu konu üzerine çeşitli araştırmalar yapmış ve çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirmişlerdir. Analitik hesaplama yöntemleri sayesinde çeşitli idealize durumlar için çözümler,birçok kazık yükleme deneylerinin sonuçlarının geri hesaplama yöntemi ile değerlendirilmesiyle önerilen ampirik çözümler ve son yıllarda karmaşık sonlu elemanlar metodu ile çalışan bilgisayar programları sayesinde çeşitli nümerik araştırmalar sonucunda elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar mevcuttur.

Negatif çevre sürtünmesi hesabı, pozitif çevre sürtünmesi hesabıyla aynı mantığı içermekte, önerilen bütün çözümler Coulomb kırılma hipotezine dayanmaktadır. Bu yüzden yukarıda verilen efektif kuvvetler ve drenajsız kohezyon mantıklarına dayanan alfa-beta-lamda metodları, negatif çevre sürtünmesi hesabında kullanılabilir [11]. Bu yöntemlere ek olarak ise aşağıda anlatılacak olan diğer yöntemler önerilmiştir. Kazıkların rijid olduğu varsayımı ile hesap yapan çözüm yöntemlerinden elde olunan sonuçlar, çoğu kez tasarımcıyı sıkıntıya sokacak kadar büyük çıkmaktadırlar. Uç kazıklarının sıkışabilirliğinin göz önüne alınması halinde uç basıncının azaldığı bilinmektedir [10].

6.3.1. Terzaghi-Peck'in Negatif Çevre Sürtünmesi ile İlgili Çalışmaları

Terzaghi ve Peck(1967) uç kazıklarının değerlendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında, kazığa verilen maksimum düşey kuvveti, kazık boyunca elde edilen limit kayma kuvvetlerinin toplamından hesaplamışlardır. Tekil bir kazıkta herhangi bir z derinliğindeki P düşey kuvveti aşağıdaki şekilde tarif edilir[24];

$$P = \int_0^L \tau_a . c . dz \qquad (6.5)$$

τ_a : Zemin-kazık arasında kayma gerilmesi limit değeri

c : Kazık çevresi (Π.d)

Coulomb kırılma hipotezinden elde edilen τ_a ise şu şekilde tarif edilir [24];

$$\tau_a = c_a' + \sigma_v' * K_s * \tan\phi_a' \quad (6.6)$$

c_a': Drenajlı kazık-zemin adezyonu

K_s: Yatay toprak basıncı katsayısı

σ_v': Efektif düşey gerilme

$Ø_a$': Kazık-zemin arasındaki (drenajlı) sürtünme açısı

6.3.2. Bjerrum'un Negatif Çevre Sürtünmesi İle İlgili Çalışması

Bjerrum (1969), negatif çevre sürtünmesinin, kilin drenajsız kayma mukavemeti ile ilgisi olmadığını belirtmiş ve buna uygun olarak şu bağıntıyı sunmuştur [18];

$$\tau_{act} = K * p_o * \tan Ø_e + X * P_e \quad (6.7)$$

τ_{act} : Birim negatif çevre sürtünmesi

K : Yatay toprak basıncı katsayısı

p_o : Efektif jeolojik yük

$Ø_e$: 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 ufak olmasından dolayı sıfır kabul edilir. Bjerrum, bu eşitlik sayesinde negatif çevre sürtünmesini Tablo 6.1'de görüldüğü şekilde hesaplamıştır.

Tablo 6.1. Kil Zeminde Negatif Çevre Sürtünmesi Değerleri[18]

Kil Cinsi	Øe	K	Birim Negatif Çevre Sürtünmesi
Siltli	30	0.45	$0.25*p_o$
Düşük Plastisiteli	20	0.50	$0.20*p_o$
Plastik	15	0.55	$0.15*p_o$
Yüksek Plastisiteli	10	0.60	$0.10*p_o$

6.3.3. Broms'un Negatif Çevre Sürtünmesi İle İlgili Çalışması

Broms (1981)'in yaptığı çalışmaya göre, kazık çevresindeki zeminin düşey yer değiştirmesinin kazığa oranla 5-10 mm'den daha fazla olması halinde kazık yüzeyi ile zemin arasında mobilize olacak adezyon aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [21];

$$c_a=\sigma_v'*K*\tan\Ø_a' \quad (6.8)$$

c_a : Kazık ile zemin arasındaki adezyon
σ_v': Efektif üst tabaka gerilmesi

$K*\tan\Ø_a'$ ifadesi kazığa etkiyen yatay toprak basıncına ve çevre zemininin oturma hızına bağlıdır. Oturma hızının 10 mm/sene dolayında olması durmunda çeşitli zeminler için tavsiye edilen $K\tan\Ø_a'$ değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. $K\tan\Ø_a'$ için Önerilen Değerler [21]

Zemin Cinsi	$K\tan\Ø_a'$
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

Bazı ülkelerde örneğin Kanada'da bütün zeminler için $K*\tan\Ø_a'=0.25$ sabit değeri kullanılmaktadır [14].

6.3.4. Negatif Çevre Sürtünmesinde Beta (β) Metodları

Negatif çevre sürtünmesi hesabında daha önce de bahsedildiği gibi pozitif çevre sürtünmesi hesabı ile aynı mantık uygulanabileceğinden Bölüm 3.1.1' de anlatılan hesap yöntemi burada da uygulanabilmektedir. Bu yöntemi bir çok bilim adamı incelemiş ve geliştirmiştir.

Hagerty ve Garlanger(1972), yaptıkları araştırmada Zeevaert(1959)'ın açıklmasına dayanarak negatif çevre sürtünmesi üzerine ampirik bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Zeevaert(1959), zemin mekaniğinde sıkça kullanılan efektif yatay ve düşey zemin yüklerinin ilişkilendirilmesinde, konsolidasyon oturmasına maruz kalan zemin ağırlığının bir kısmının kazık-zemin temas yüzeyinde kazık tarafından

taşınacağını ileri sürmekte ve dolayısıyla zemin ağırlığını hesap ederken bir azaltma faktörü(α) ile çarpmaktadır[15].

$$\sigma_h = K * \sigma_v \quad (6.9)$$

$$\sigma_v = \alpha * p_o \quad (6.10)$$

$$f_s = \alpha * K * p_o * \tan\text{Ø} \quad (6.11)$$

$$f_s = \beta * p_o \quad (6.12)$$

$$p_o = \sum(\gamma * z) - u \quad (6.13)$$

σ_h : Yatay zemin gerilmesi
K : Yanal toprak basıncı katsayısı
σ_v : Düşey zemin gerilmesi
f_s : Birim sürtünme kuvveti
α : Adezyon faktörü
p_o : Zemin ağırlığı
Ø : Zemin kayma mukavemeti açısı
γ : Zemin birim hacim ağırlığı
u : Boşluk suyu basıncı

Bu yöntemde relatif oturmanın 6mm'den daha büyük olduğu kabul edilmektedir [15]. Kazık boyuna bağlı olarak kazık yapımını takiben zemin yüzeyinde 2.5-5.0 cm dolayında oturma meydana gelmesi halinde negatif çevre sürtünmesi maksimum değerine ulaşır. Yüzey oturmasının daha küçük olması halinde bu yöntemle hesaplanan negatif çevre sürtünmesi gerçek değerden daha büyüktür [25]. Uygulamada tek bir kazık ender olarak kullanılmaktadır. Kazık grubunda meydana gelecek toplam negatif çevre sürtünmesi kuvvetinin, tek bir kazık için geliştirilen bu yöntemle hesaplanması hatalı sonuçlar verecektir. Kazık ara mesafelerinin, kazık çapının 8-10 katı olması halinde yapılan hata önemsizdir [14]. Uygulamada kazık ara mesafeleri genelde kazık çapının 3 ila 5 katı civarında seçilmektedir. Bu durumda özellikle çok sayıda kazıktan oluşan gruplarda kazıklar arası gerilme etkileşimi olduğu bilinmektedir. Kazık gerilme alanlarında oluşacak etkileşimin negatif çevre sürtünmesi üzerindeki etkisi bilinmemektedir. Bununla beraber, böyle bir durumda kazık grubunda beta yöntemiyle hesaplanan negatif çevre sürtünmesi kuvvetinin gerçek değerden daha büyük olduğu sanılmaktadır. Diğer bir ifadeyle beta yöntemi

sayesinde negatif çevre sürtünmesinin üst değeri hesaplanmaktadır [14].Tablo 6.3'te Garlanger'in önerdiği ampirik beta katsayıları verilmiştir.

Tablo 6.3. Garlanger'in Önerdiği Beta Katsayıları[14]

Zemin Cinsi	β
Kum	0.35-0.50
Silt	0.25-0.35
Kil	0.20-0.25

Şekil 3.1'de Poulos ve Davis (1980)'in, Meyerhof (1976)'un verdiği değerleri geliştirerek önerdikleri beta katsayıları verilmiştir.

Bjerrum (1969), beta katsayılarının siltli killerde 0.2 ile 0.3 arasında olduğunu, Bjerin (1977) ise orta yumuşak ile katı kıvamdaki killerde 0.20 ile 0.25 arasında değiştiğini ileri sürmektedirler [16].

Fellenius'un önerdiği beta katsayılarının değerlerini Eslami ile geliştirmeleri sonucu aşağıdaki Tablo 6.4 ortaya çıkmıştır [26].

Tablo 6.4.Eslami-Fellenius (1997) Önerdikleri Beta Değerleri [26]

β method	β	Eslami-Fellenius (1997)
Clay	0.23-0.40	Soft sensitive soils
		Clay
Silt	0.27-0.50	Silty clay, stiff clay and silt
		Sandy silt and silt
sand	0.30-0.80	Fine sand or silty sand
		Sand to sandy gravel

6.3.5. Poulos ve Mattes Metodu

Negatif çevre sürtünmesi için yukarıda verilen bağıntılar, kaızkların rijid olduğu varsayımı ile çözüm ürettiklerinden dolayı, çoğu kez tasarımcıyı sıkıntıya sokacak kadar büyük sonuç verebilmektedirler. Uç kazıklarının sıkışabilirliği göz önüne alındığında uç basıncının azaldığı bilinmektedir. Bu sebeple Poulos ve Mattes(1969), dairesel tekil bir uç kazığında negatif çevre sürtünmesi hesabı için önerdikleri analitik metodlarında kazık sıkışmasını hesaba dahil etmişlerdir[10]. Kazık ucunun

tam rijit bir zemine girdiğini ve kazık çevresi zeminin homojen izotropik ve elastik bir malzeme olduğunu kabul etmişlerdir [27]. Bu yaklaşımda kazık başında, çevre zemininin So kadar oturduğu ve oturma miktarının kazık boyunca doğrusal olarak azaldığı ve tabanda sıfırlandığı varsayımı yapılmıştır. Çözümde iki ayrı poisson oranları ile değişik kazık narinlik oranları (l/d) kullanılmıştır. İhtiyaç duyulan ara değerler enterpolasyon edilerek tespit edilebilir [10].

$$P_n=I_N.E_S.S_o.L \tag{6.14}$$

P_n : Kazıkta meydana gelecek negatif çevre sürtünmesi yükü

I_N : Etki katsayısı (Şelil 6.4'ten elde edilir)

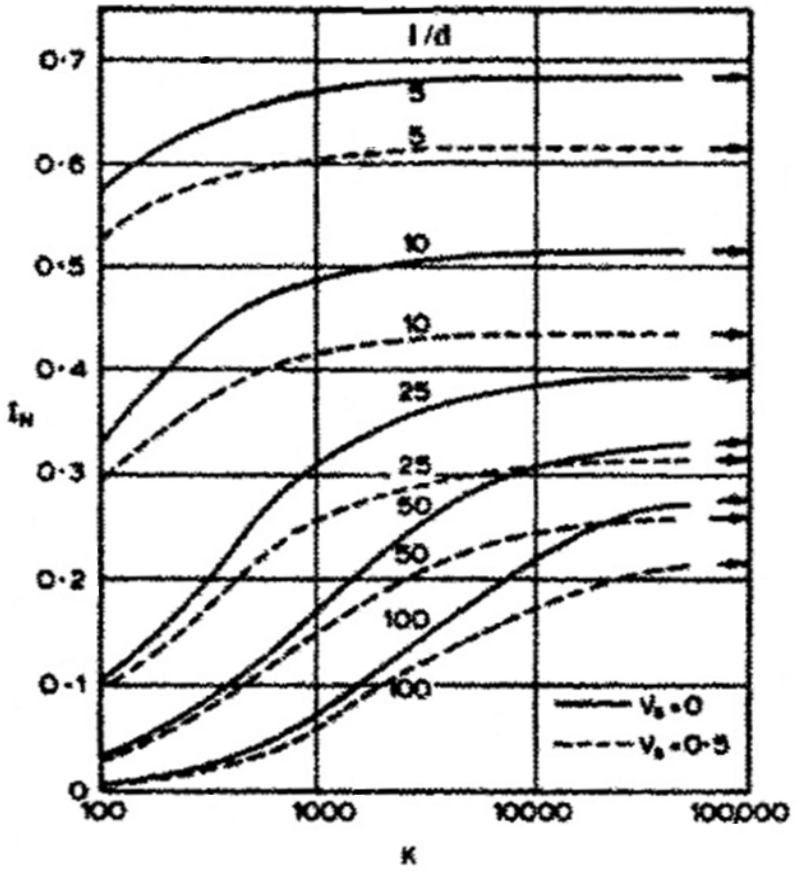
E_S: Zemin elastik modülü

E_s : Kazık elastik modülü

S_o:Kazık başı seviyesindeki zeminin oturma miktarı

L : Kazık boyu

ν_s: Zemin poisson oranı



Şekil 6.5.Negatif Çevre Sürtünmesi İçin Etki Katsayısı [10]

$$K = \frac{Kazık\ Elastik\ Modülü\ (Ek)}{Zemin\ Elastik\ Modülü\ (Es)}.Kazık\ Kesit\ Alanı \tag{6.15}$$

6.3.6. Vesic No Metodu

Vesic (1977), kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için ampirik değerlerden oluşan Tablo 6.5'i önermiştir [22].

Tablo 6.5. Vesic (1977) No Değerleri [22].

Zemin ve Kazık Durumu	No
Kaplama Yapılmamış Kazıklarda	
Silt ve Kilden Oluşan Yumuşak Sıkışabilir Zemin	0.15-0.30
Gevşek Kum	0.30-0.80
Zift veya Bentonit Kaplı Kazıklarda	0.01-0.05

$$Q_{nf}=N_o*p_o*A \tag{6.16}$$

Q_{nf} : Negatif çevre sürtünmesi kuvveti

N_o : Vesic faktörü

p_o : Ortalama zemin efektif kuvveti

A : Kazık yüzey alanı

6.3.7. Van Der Vean (1986) Metodu

Metodun sahibi, negatif çevre sürtünmesi hesabında kazık oturmasının hesaplara dahil edilmesi gerektiğini belirtmektedir. Genel bir hesap formülü sunan metod, kazık oturmasının etkisini içine dahil ettiği formül ile, kazık için kullanılabilecek servis yükünü sonuç olarak verebilmektedir [27].

$$P_{ser} = \frac{Qt}{Fs} - \lambda Q_{nf}^{m} \tag{6.17}$$

Pser : İzin verilen servis yükü

Qt : Kazık taşıma gücü (kazık ucunun girdiği sağlam tabakada oluşan pozitif çevre sürtünmesi dahil)

Fs : Güvenlik sayısı

Q_{nf}^{m}:Maksimum negatif çevre sürtünmesi (uç kazıklarında kazık tüm tabaka boyunca hesap edilir)

λ : Negatif çevre sürtünmesi katsayısı

Negatif çevre sürtünmesi katsayısı λ, başka iki katsayının çarpımıyla bulunur. Bunlar "η" azaltma faktörü ve "ζ" koşul katsayılarıdır.

$$\lambda = \eta * \zeta \tag{6.18}$$

$$\eta = \frac{1}{1+K_0 * tan\emptyset'} \tag{6.19}$$

Ko : Sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısı (1-sinθ')
Ø' : Efektif kayma mukavemeti açısıdır.

Bu katsayı 0,7 ile 0,9 arasında değişir ve kazık yüzeyi çevresindeki zeminin efektif jeolojik yükünü azaltmak için kullanılır. Diğer taraftan ζ koşul katsayısı ise, kazık çevresindeki konsolidasyona uğrayarak sıkışan zemine göre kazığın rölatif oturmasıyla ilgili bir katsayıdır ve yumuşak zeminleri geçerek orta ve çok sıkı kumlar için 0,5 ile 1,0 arasında bir değer alır [27].

6.4. Kazık Grupları İçin Negatif Çevre Sürtünmesi

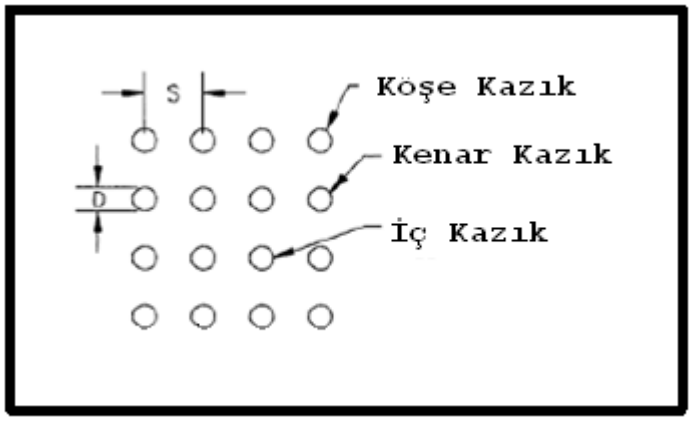
Kazıklı temeller gruplar halinde oluşturulduklarından, negatif çevre sürtünmesinden ileri gelen ek yükün tüm grup için hesaplanması gereklidir. Bu sebeple, iki adımlı kıyaslama yapılır [10];

1. Birinci adımda tek kazığa gelen negatif çevre sürtünmesi hesaplanır ve kazık sayısınca çarpılır.
2. Grup taşıma gücünü saptamak için kullanılan Terzaghi bloğu üzerinde oluşan toplam negatif çevre sürtünmesi direnci hesaplanır.

Bulunan bu iki değerden büyük olanı hesaplarda kullanılır. Kazıklı bir temelin blok halinde davranması; her zaman olası bir durum değildir ve bu davranışı önemli ölçüde kazık aralığı etkiler. Temelin hangi kazık aralığındaki aşamada blok temel davranışından tek kazık davranışına geçeceği sorusuna cevap vermek kolay değildir. Bu soruya her durumda geçerli olabilecek hazır bir cevap bulunamaması nedeniyledir ki; Terzaghi ve Peck tek kazığın göçmesi ile blok temelin göçmesi durumlarını ayrı ayrı göz önüne alan bir yaklaşım önermişlerdir.

Gruplarda negatif çevre sürtünmesi davranışı, kazıklar arası etkileşim sebebiyle oldukça karmaşıktır. Bu sebeple kazık sayısınca çarpılan tek kazığa gelen negatif çevre sürtünmesi yanında Prakash ve Sharma (1990), kazık grubu için aşırı güvenilir tarafta kalan grup içindeki dolgu ve/veya sıkışabilir zeminin ağırlığının negatif çevre sürtünmesi olarak alınmasını tavsiye etmektedirler [22].

Biraud (2006), kazık gruplarında negatif çevre sürtünmesi hesabı üzerine yaptığı açıklamada, 4x4 lük bir kazık grubunda (Şekil 6.6) kazık aralığının kazık çapına oranı (s/d) 5 ise, köşe kazığa gelen negatif çevre sürtünmesi değerinin, tek kazık için hesap edilenin %90 'ına denk geldiğini, kenar kazığınkinin %80 'ine denk geldiğini, iç taraftaki kazığın ise %50 sine denk geldiğini; kazık aralığının kazık çapına oranı 2.5 ise, köşe kazığa gelen değerin tek kazığa gelenin %50 sine denk geldiğini, kenar kazığınkinin %40, iç kazığınkinin ise %15 olduğunu belirtmektedir [28]. Anlaşılmaktadır ki, olay bir sürtünme olayı olduğu için, kazık gruplarının yerleşiminde kazıklar arası mesafe, grup etkileşimi sebebiyle negatif çevre sürtünmesinde çok etkilidir. Dolayısıyla en büyük negatif çevre sürtünmesi değerine maruz kalacak olan kazık, köşe kazıktır(kazıklar arası etkileşimden en az etkilenen kazık). Bu sonuçlar bir çözüm olarak bizi kazık grupları çevresine koruyucu kazıklar imal etmeye sevk eder.



Şekil 6.6.Biraud (2006) için Grup Yerleşimi [28]

7. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ HESABI İÇİN BİR YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ

Kazıklarda negatif çevre sürtünmesi problemi genel olarak konsolidasyonunu tamamlamamış kohezyonlu zeminlerin, konsolidasyon oturması yapması sebebiyle, sürtünme katkısının beklendiği çevre zemini olarak vazife yaptıkları kazıklarda negatif etki yaratmaları durumu olarak karşılaşılır. Bu tip durumların söz konusu olduğu ortamlar için sağlam zeminlere penetrasyon edilmek suretiyle bu problemden kurtulmanın tercih edildiği genel kazık uygulamalarında, kazığa uygulanan servis yükü hesabı yapılırken, Poulos ve Mattes'inde değindiği üzere kazık sıkışabilirliği göz önünde bulundurularak kazığın yapacağı oturma hesap edilmeli, bu oturma sebebiyle nötr noktaya kadar, problemli kazık çevre zemininin negatif tesirde bulunduğu, bu noktanın altında ise kazığa pozitif yönde taşıma kapasitesini artıracak bir etki içinde olacağı bilinmektedir. Bu suretle geliştirilecek olan yaklaşımda üç ana prensip göz önünde bulundurulacaktır;

- Kazık oturması
- Kohezyonlu zeminin konsolidasyon oturması
- Nötr noktanın tespiti

Kazık oturması ve zemin oturmasının hesap edilmesiyle belirlenen nötr nokta sayesinde, kazığın çevre zemininin ne kadarlık bir kısmının negatif etkide bulunduğu belirlenerek, negatif çevre sürtünmesi hesabı yapılır. Nötr noktanın altında kalan kısımda zeminin pozitif katkısı da hesaba bu yaklaşımda ihmal edilmeyerek dahil edilecektir. Geliştirilecek olan bu yaklaşımda kazık oturması ve zemin oturması aşağıdan yukarıya doğrusal olarak kabul edilmektedir. Kazık çevresi zemininin homojen izotropik ve elastik bir malzeme olduğunu kabul edilmektedir. Kazık ucunun girdiği sağlam zemin içinde kazık, yüklenmesini takiben elastik kısalmasının yanında bir miktar oturma yapacak ve bu sayede uç direnci ve sağlam zemin içinde de sürtünme direnci mobilize olacaktır.

7.1.Kazıklarda Oturma Hesabı

Tekil bir kazıkta oturma hesabı, üç ana faktöre dayalı olarak yapılır [29]. Bunlar;

- Elastik boy kısalması
- Kazığın uç direnci sebebiyle oturması
- Kazığın çevre sürtünmesi sebebiyle oturması

$$S=S_1+S_2+S_3 \tag{7.1}$$

S : Toplam kazık oturması

S_1 : Kazık elastik kısalması

S_2 : Kazığın uç direnci sebebiyle oturması

S_3 : Kazığın çevre sürtünmesi sebebiyle oturması

$$S_1 = \frac{\left(\frac{Quç}{FS}+\xi\frac{Qs}{FS}\right)*L}{A_{uç}*E_k} \tag{7.2}$$

$$S_2 = \left(\frac{Q_{uç}}{FS}\right) * \frac{D}{A_{uç}*E_s} * (1-{\mu_s}^2) * I_{wuç} \tag{7.3}$$

$$S_3 = \left(\frac{Q_s}{FS}\right) * \frac{D}{A_s*E_s} * (1-{\mu_s}^2) * I_{ws} \tag{7.4}$$

$$I_{ws} = 2 + 0.35 * \sqrt{\frac{L_{em}}{D}} \tag{7.5}$$

$Q_{uç}$: Kazık uç dayaımı

Q_s : Kazık sürtünme dayanımı

FS : Güvenlik sayısı

$A_{uç}$: Kazık uç alanı

A_s : Kazık sürtünme yüzeyi

$I_{wuç}$: Kazık uç dayanımı faktörü(yaklaşık 0,85 alınır)

I_{ws}: Kazık sürtünme faktörü (Formül Vesic(1977)'e ait ampirik formüldür[29])

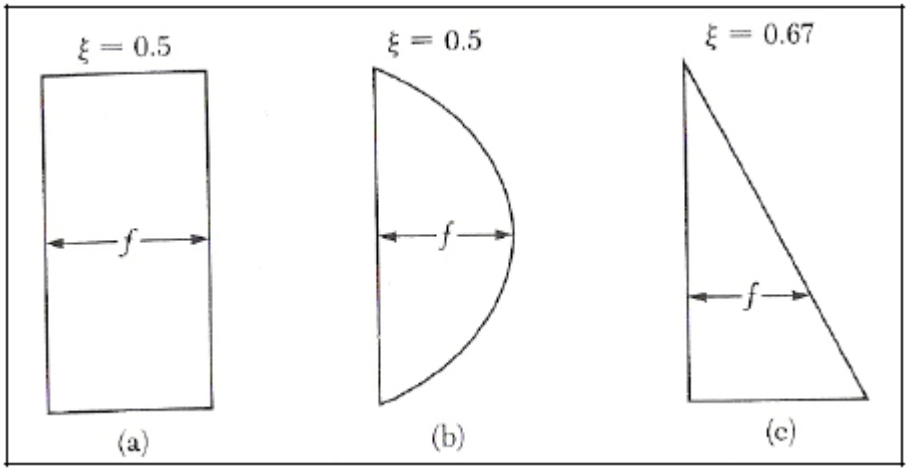
ξ : Çevre sürtünmesi direnci dağılımı faktörü(Doğrusal artan dağılım için 0,67)

E_k : Kazık elastisite modülü

E_s : Zemin elastisite modülü

L : Kazık boyu

L_{em} : Sürtünme ile iligili kazık boyu



Şekil 7.1. Birim Sürtünme Dayanımlarının Kazık Boyunca Dağılım Çeşitleri[29]

7.2. Kil Zeminlerde Konsolidasyon Oturması

H kalınlığında bir kil tabakasına etkiyen düşey efektif gerilme Δp kadar artacak olursa, bu tabakanın kosolidasyon oturması ΔH şu şekilde ifade edilir;

$$\Delta H = m_v * \Delta p * H \qquad (7.6)$$

ΔH : Konsolidasyon oturması miktarı

m_v : Zeminin hacimsel sıkışma katsayısı (Ödometre deneyinden)

Δp : Düşey efektif gerilme artışı

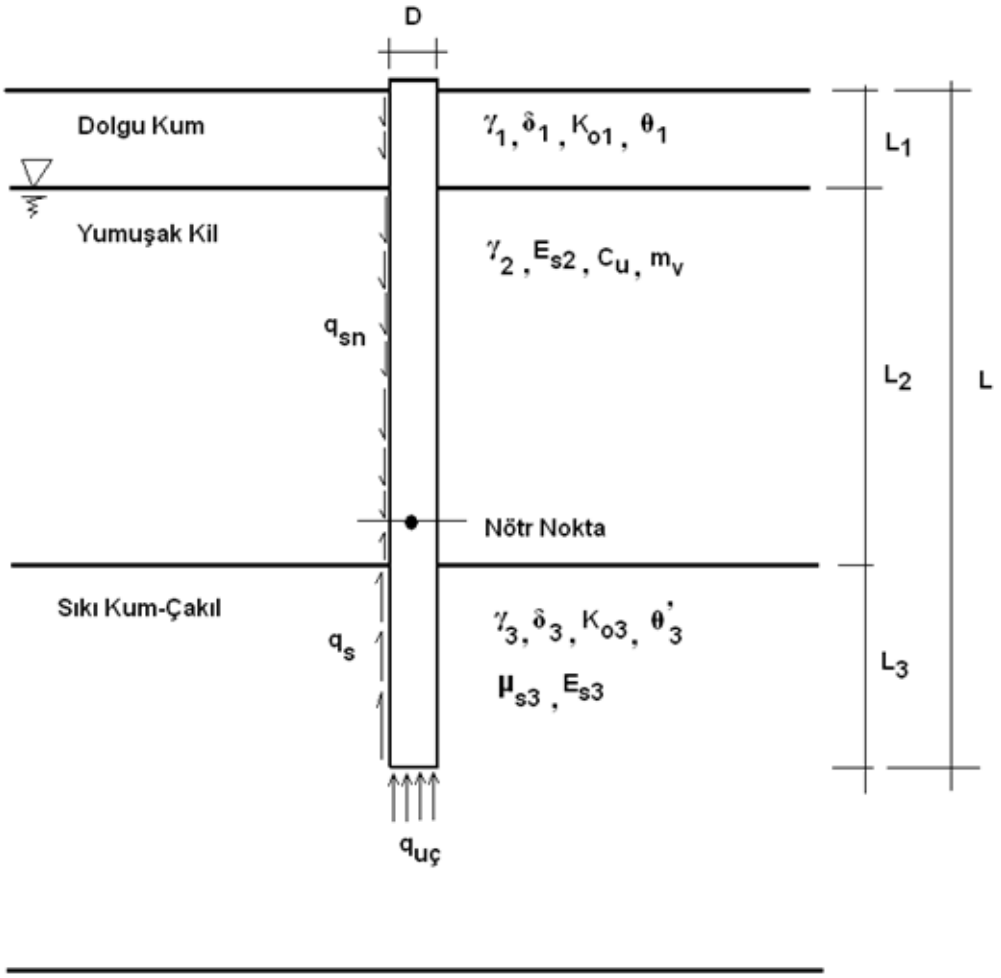
H : Sıkışabilir tabaka kalınlığı

7.3. Sağlam Tabakaya Giren Bir Uç Kazığında Negatif Çevre Sürtünmesi Hesabı İçin Bir Yaklaşım Geliştirilmesi

Kazık ucunun sıkı kum-çakıl gibi sağlam bir zemine yeteri kadar girmesi durumu için bir yaklaşımın geliştirilmesi, yukarıda değinilen kazık oturması ve sağlam tabaka üzerindeki kazığı çevreleyen yeraltı su seviyesi altındaki yumuşak kil tabakasının yapacağı oturma göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Yumuşak kohezyonlu

zemin, üzerine yapılacak olan dolgu sebebiyle konsolidasyon oturması yapacaktır. Kazık ucu sağlam zemine en az çapının 5 katı kadar penatrasyon ettirilmiş, bu penatrayon edilmiş olan tabakada kazık uç dayanımı ve sürtünme dayanımı oluşması kazığın yüklenmesiyle sağlanmıştır. Kazık taşıma gücünün hesabında, bu sağlam zeminden kaynaklanan uç mukavemeti ve yalnızca bu sağlam zeminden kaynaklanacak olan sürtünme direnci dikkate alınacaktır. Sağlam zemin tabakasının üzerinde bulunan kil tabakasının, negatif çevre sürtünmesi oluşturacağı bilinmektedir. Hesaplanan kazık taşıma gücü sayesinde, Bölüm 7.1 de bahsedilen oturma förmülleriyle kazık oturması ve ardından Bölüm 7.2 de bahseliden kilin, dolgu sebebiyle efektif düşey kuvvetin artması sonucu yapacağı kosolidasyon oturması hesaplanarak, bu iki oturmanın eşit olduğu nokta tespit edilecektir. Bu nokta nötr nokta olup, bu noktanın üzerinde kalan zemin kazıkta negatif çevre sürtünmesi oluşturacak, altında kalan kısım ise pozitif yönde etkiyerek kazığın sürtünme kapasitesini artıracaktır. Bu artışın tekrar kazık taşıma kapasitesine dahil edilmesiyle kazığın nihai taşıma kapasitesi tespit edilmiş olunacak ve güvenlik sayısına bölünen bu değer sayesinde kazığın emniyetli aşıma gücü tespit edilecektir. Emniyetli taşıma gücününden, hesaplanan negatif çevre sürtünmesi değeri çıkartılmak suretiyle, kazığın servis yükü bulunmuş olunacaktır.

Tezin konusunu oluşturan negatif çevre sürtünmesi hesabında, bu yaklaşım alfa nümerik olarak oluşturulacak ve bu sayede kullanıcılara direk hesap yapabilecekleri üç ana formül sunulacaktır(kazık oturma değeri, nötr noktanın kazık ucundan olan yüksekliği ve negatif çevre sürtünmesi değeri). Bu formülasyonlar bir Excel dosyasına programlanarak, kullanıcıların kolayca hesap yapabilmeleri sağlanacaktır.



Şekil 7.2. Negatif Çevre Sürtünmesinin Gerçekleştiği Zemin Profili

$$Q_{uç} = (q_{uç}*N_q)*A_{uç} = (q_{uç}*N_q)*(\Pi*D^2/4) \quad (7.7)$$

$$q_{uç} = \gamma_1*L_1 + \gamma_2*L_2 + \gamma_3*L_3 \quad (7.8)$$

$$Q_s = q_s*A_s = (\sigma_v'*K_{o3}*\tan\delta_3)*(\Pi*D*L_3) \quad (7.9)$$

$$\sigma_v' = \gamma_1*L_1 + \gamma_2*L_2 + \gamma_3*(L_3/2) \quad (7.10)$$

$$S_1 = \frac{(Quç+\xi*Qs)*L}{FS*\left(\pi*\frac{D^2}{4}\right)*Ek} \quad (7.11)$$

$$S_1 = \frac{\left[\left(\text{quç}*\text{Nq}*\pi*\frac{D^2}{4}\right)+ \xi*(\sigma\text{v'}*\text{Ko3}*\tan\delta 3)*(Л.\text{D.L3})\right]*\text{L}}{Fs*\left(\pi*\frac{D^2}{4}\right)*\text{Ek}} \quad (7.12)$$

$$S_1 = \frac{\begin{matrix}[(\gamma 1*\text{L1} + \gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*\text{Nq}*\left(\pi*\frac{D^2}{4}\right)+ \\ \xi*\left(\gamma 1*\text{L1} + \gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\frac{\text{L3}}{2}\right)*\text{Ko3}*\tan\delta 3*(\Pi*\text{D}*\text{L3})]*\text{L}\end{matrix}}{Fs*\left(\pi*\frac{D^2}{4}\right)*\text{Ek}} \quad (7.13)$$

Terimin alt ve üst tarafını 4 ile çarpalım ve Π ile D'leri sadeleştirelim.

$$S_1 = \frac{\begin{matrix}[(\gamma 1*\text{L1} + \gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*\text{Nq}*D+ \\ \xi*(2*\gamma 1*\text{L1} + 2*\gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*2*\text{Ko3}*\tan\delta 3*\text{L3}]*\text{L}\end{matrix}}{Fs*D*Ek} \quad (7.14)$$

$$S_1 = \frac{\begin{matrix}[(\gamma 1*\text{L1} + \gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*\text{Nq}*D+ \\ \xi*(2*\gamma 1*\text{L1} + 2*\gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*2*\text{Ko3}*\tan\delta 3*\text{L3}]*\text{L}*(\frac{\text{Es3}}{\text{D}})\end{matrix}}{Fs*D*Ek*(\frac{Es3}{D})} \quad (7.15)$$

$$S_1 = \frac{\begin{matrix}[(\gamma 1*\text{L1}+\gamma 2*\text{L2}+\gamma 3*\text{L3})*\text{Nq}+ \\ \xi*(2*\gamma 1*\text{L1} + 2*\gamma 2*\text{L2} + \gamma 3*\text{L3})*2*\text{Ko3}*\tan\delta 3*\text{L3}*\text{D}^{-1}]*\text{L}*\text{Es3}\end{matrix}}{Fs*D*Ek*Es3} \quad (7.16)$$

J = (γ_1*L_1 + γ_2*L_2 + γ_3*L_3) olsun ($q_{uç}$ değerine eşittir) (7.17)

R = (γ_1*L_1 + γ_2*L_2) olsun (7.18)

$$S_1 = \frac{[\,J*Nq+\xi*(J\,+R\,)*2*\text{Ko3}*\tan\delta 3*\text{L3}*\text{D}^{-1}]*L*Es3}{Fs*D*Ek*Es3} \quad (7.19)$$

olarak tanımlanabilir.

$$S_2 = \left(\frac{Q_{uç}}{FS}\right) * \frac{D}{*E_{s3}} * (1 - {\mu_{s3}}^2) * I_{wuç} \quad (7.20)$$

$$S_2 = \frac{(\gamma 1 * L1 + \gamma 2 * L2 + \gamma 3 * L3) * Nq * \left(\pi * \frac{D^2}{4}\right) * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * 0.85}{Fs * \left(\pi * \frac{D^2}{4}\right) * Es3} \quad (7.21)$$

$$S_2 = \frac{(\gamma 1 * L1 + \gamma 2 * L2 + \gamma 3 * L3) * Nq * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * 0.85 * Ek}{Fs * Es3 * Ek} \quad (7.22)$$

$$S_2 = \frac{J * Nq * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * 0.85 * Ek}{Fs * Ek * Es3} \quad (7.23)$$

olarak bulunur.

$$S_3 = \left(\frac{Q_S}{FS}\right) * \frac{D}{A_{S3} * E_{S3}} * (1 - {\mu_{S3}}^2) * I_{wS3} \quad (7.24)$$

$$S_3 = \frac{\left[\left(\gamma 1 * L1 + \gamma 2 * L2 + \gamma 3 * \frac{L3}{2}\right) * Ko3 * \tan\delta 3 * (\pi * D * L3)\right] * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * (2 + 0.35 * \sqrt{\frac{L3}{D}})}{FS * (\pi * D * L3) * Es3} \quad (7.25)$$

$$S_3 = \frac{\left[(2 * \gamma 1 * L1 + 2 * \gamma 2 * L2 + \gamma 3 * L3) * Ko3 * \tan\delta 3 * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * (2 + 0.35 * \sqrt{\frac{L3}{D}})\right]}{2 * Fs * Es3} \quad (7.26)$$

$$S_3 = \frac{\left[(J + R) * Ko3 * \tan\delta 3 * D * (1 - {\mu_{S3}}^2) * \left(1 + 0.175 * \sqrt{\frac{L3}{D}}\right)\right] * Ek}{Fs * Es3 * Ek} \quad (7.27)$$

$$S_3 = \frac{\left[(J + R) * Ko3 * \tan\delta 3 * (1 - {\mu_{S3}}^2) * \left(D + 0.175 * \sqrt{D * L3}\right)\right] * Ek}{Fs * Ek * Es3} \quad (7.28)$$

olarak bulunur.

Toplam oturmayı hesaplamak için bulunan bu üç sonuç toplanır;

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (7.29)$$

$$s = \frac{\begin{array}{c}\{[J*Nq+\xi*(J+R)*2*\mathrm{Ko3}*\tan\delta 3*\mathrm{L3}*\mathrm{D}^{-1}]*L*Es3 \\ +J*\mathrm{Nq}*D*(1-{\mu_{s3}}^2)*0.85*Ek \\ +(J+R)*\mathrm{Ko3}*\tan\delta 3*(1-{\mu_{s3}}^2)*\left(D+0.175*\sqrt{D*L3}\right)*Ek\}\end{array}}{Fs*Ek*Es3} \quad (7.30)$$

$$\mathrm{A} = (1-{\mu_{s3}}^2) \text{ olsun} \quad (7.31)$$

$$\mathrm{B} = \left(D+0.175*\sqrt{D*L3}\right) \text{ olsun} \quad (7.32)$$

$$S = \frac{\begin{array}{c}[J*Nq*L*Es3]+[\xi*(J+R)*2*Ko3*\tan\delta 3*\mathrm{L3}*\mathrm{D}^{-1}*\mathrm{L}*\mathrm{Es3}] \\ +[\mathrm{J}*\mathrm{q}*\mathrm{D}*\mathrm{A}*0.85*\mathrm{Ek}]+[(\mathrm{J}+\mathrm{R})*\mathrm{Ko3}*\tan\delta 3*\mathrm{A}*\mathrm{B}*\mathrm{Ek}]\end{array}}{Fs*Ek*Es3} \quad (7.33)$$

ifadesiyle kazıkta gerçekleşen toplam oturma bulunur.

Fore kazıklar için K_o=1 – sinθ ‘dir ve δ=θ alınır.

L_2 kalınlığındaki bir kil tabakası, üzerine gelen dolgu nedeniyle artacak olan efektif kuvvet sebebiyle $\Delta H = m_v.\Delta p.L_2$ konsolidasyon oturmasını yapar. Oturma doğrularının kesiştiği nokta (oturmaların birbirlerine eşit olduğu nokta, nötr noktadır) şu denklem sayesinde bulunabilir.

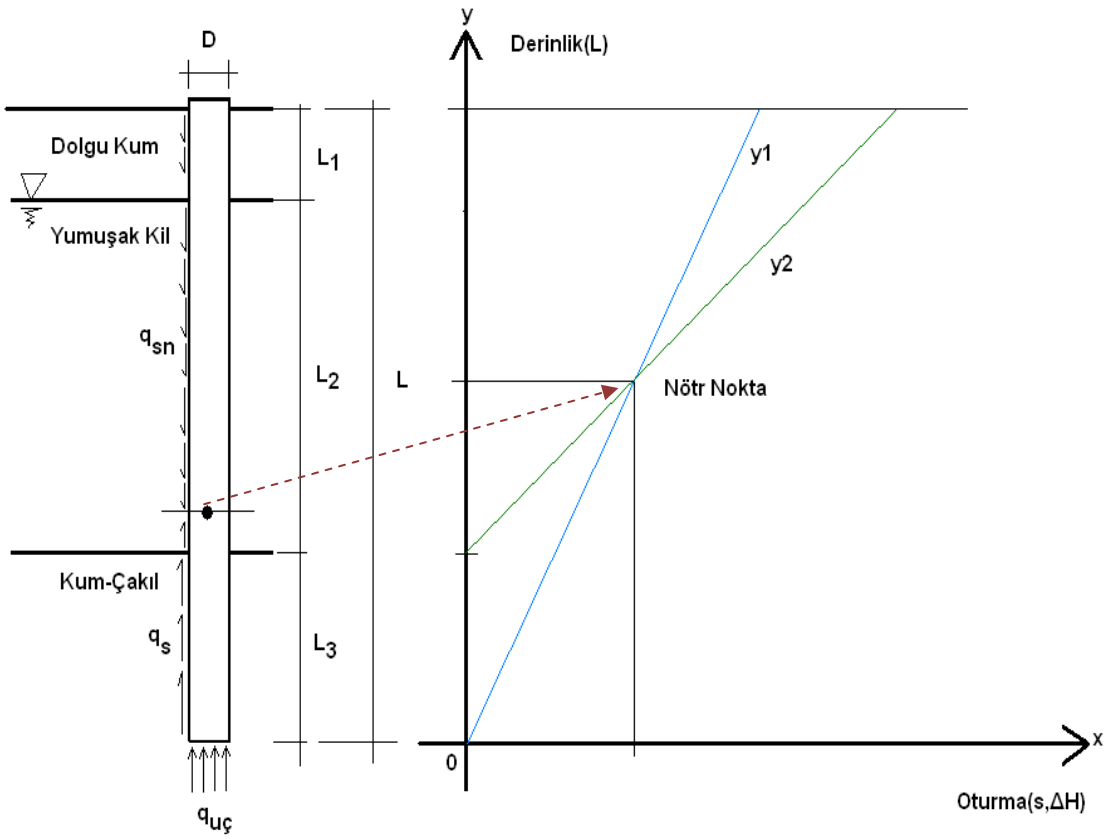
Kazık için, kazık boyunca meydana gelen oturma doğrusu denklemi;

$$y_1 = \left(\frac{L}{S}\right).x \quad (7.34)$$

Kohezyonlu zemin için, tabaka boyunca meydana gelen oturma doğrusunun denklemi;

$$y_2 = \left(\frac{L_2}{\mathrm{mv}.\Delta\mathrm{p}.L_2}\right).x + L3 = \left(\frac{1}{\mathrm{mv}.\Delta\mathrm{p}}\right).x + L3 \quad (7.35)$$

“y_1 “ ve “y_2 “ denklermlerinin keşistiği noktayı, denklemleri eşitlemek suretiyle tespit edelim;



Şekil7.3. Kazık ve Zemin Oturmalarının Derinlikle Değişimi ve Nötr NoktanınTespiti

$y_1 = y_2$

$$\left(\frac{L}{S}\right) * x = \left(\frac{1}{m_v * \Delta p}\right) * x + L_3 \tag{7.36}$$

$$\left(\frac{L}{S} - \frac{1}{m_v * \Delta p}\right) * x = L_3 \tag{7.37}$$

$$\left(\frac{L}{S} - \frac{1}{m_v * (\gamma 1 * L1)}\right) * x = L_3 \tag{7.38}$$

$$\left(\frac{L * m_v * \gamma 1 * L1 - S}{S * m_v * \gamma 1 * L1}\right) * x = L_3 \tag{7.39}$$

$$x = \frac{L_3 * S * m_v * \gamma 1 * L1}{L * m_v * \gamma 1 * L1 - S} \tag{7.40}$$

Bu eşitliği, y_1 denkleminde yerine koyalım;

$$y_1 = \left(\frac{L}{S}\right) * \left(\frac{L_3 * S * \mathrm{m_v} * \gamma_1 * \mathrm{L_1}}{L * \mathrm{m_v} * \gamma_1 * \mathrm{L_1} - S}\right) \tag{7.41}$$

$$y_1 = \frac{L * L_3 * S * \mathrm{m_v} * \gamma_1 * \mathrm{L_1}}{L * \mathrm{m_v} * \gamma_1 * \mathrm{L_1} * \mathrm{S} - S^2} \tag{7.42}$$

eşitliği ile, nötr noktanın kazık ucundan yukarı doğru yüksekliği bulunmuş olunur.

Oturma miktarlarının belli olduğu kazık ve zemin için artık negatif çevre sürtünmesi değerini tespit edebiliriz. Dolgu kum altındaki, suya doygun kilde meydana gelecek olan konsolidasyon oturması, dolgu kumunda oturmasına sebep olacak dolayısıyla kazığa negatif yönte sürtünme uygulamasına neden olacaktır. Bu sebeple dolgu kumda kazıkta negatif çevre sürtünmesi doğurur. Eğer kazık başı dolgu kum kadar kılıflandırılmış olsaydı, dolgu kum yalnızca uç direnci hesabı için hesaplamalara katılırdı. Bu sebeple negatif çevre sürtünmesi hesabı yapılırken dolgu kum boyunca efektif gerilmeler etkili olacak, aşağısındaki kil tabakada ise drenajsız durum dikkate alınarak hesap yapılacaktır.

Nötr noktanın yüksekliğinin tespitiyle artık, kil tabakasının ne kadarının negatif çevre sürtünmesi oluşturduğunu, ne kadarının da pozitif etkide bulunduğunu bulabiliriz. Kil tabakasında negatif etkide bulanan tabaka kalınlığını [L_2-(y_1-L_3)] kadardır.

Bu sebeple negatif çevre sürtünmesini yukarıda şekli verilen model için yazacak olursak;

$$Q_{nf} = \left[\left(\gamma_1 * \frac{\mathrm{L_1}}{2}\right) * \mathrm{K_{01}} * \tan\delta_1 * \pi * \mathrm{D} * \mathrm{L_1}\right] + q_{sn} * [\pi * D * (L_2 - (y_1 - L_3)] \tag{7.43}$$

$$\mathrm{Q_{nf}} = \left[\frac{\gamma_1 * \mathrm{L_1} * \mathrm{K_{01}} * \tan\delta_1 * \pi * \mathrm{D} * \mathrm{L_1}}{2}\right] + \mathrm{q_{sn}} * \pi * \mathrm{D} * \left(\mathrm{L_2} + \mathrm{L_3} - \frac{\mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \mathrm{L_3} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S}}{\mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S} - \mathrm{S^2}}\right) \tag{7.44}$$

$$\mathrm{Q_{nf}} = \left[\frac{\gamma_1 * {\mathrm{L_1}}^2 * \mathrm{K_{01}} * \tan\delta_1 * \pi * \mathrm{D}}{2}\right] + \mathrm{q_{sn}} * \pi * \mathrm{D} \left(\frac{\begin{matrix}\mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \mathrm{L_2} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S} - \mathrm{L_2} * \mathrm{S^2} \\ + \mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \mathrm{L_3} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S} - \mathrm{L_3} * \mathrm{S^2} - \mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \mathrm{L_3} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S}\end{matrix}}{\mathrm{L} * \mathrm{L_1} * \gamma_1 * \mathrm{m_v} * \mathrm{S} - \mathrm{S^2}}\right) \tag{7.45}$$

$$Q_{nf} = \left[\frac{\gamma_1 * {L_1}^2 * K_{01} * \tan\delta_1 * \pi * D}{2}\right] + q_{sn} * \pi * D * \left(\frac{L * L_1 * L_2 * \gamma_1 * m_v * S - L_2 * S^2 - L_3 * S^2}{L * L_1 * \gamma_1 * m_v * S - S^2}\right) \quad (7.46)$$

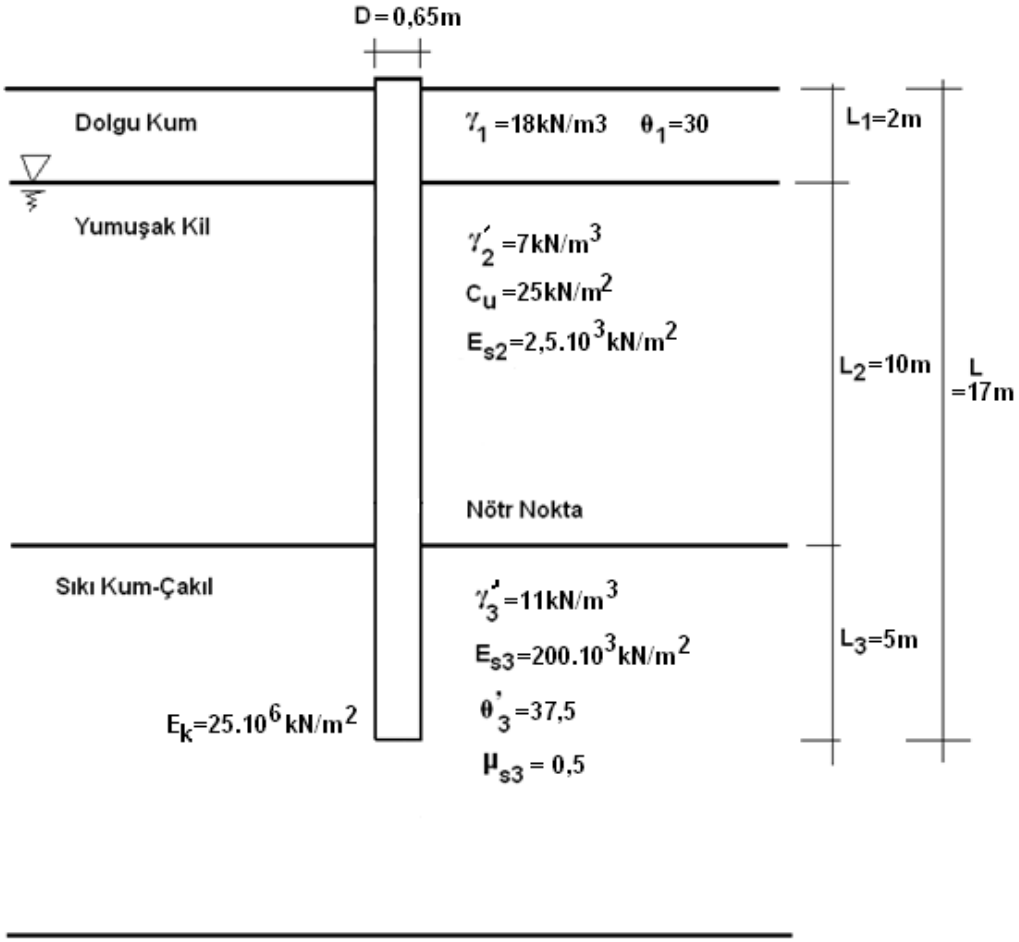
$$Q_{nf} = \left[\frac{\gamma_1 * {L_1}^2 * K_{01} * \tan\delta_1 * \pi * D}{2}\right] + q_{sn} * \pi * D * \left(\frac{L * L_1 * L_2 * \gamma_1 * m_v * S - (L_2 + L_3) * S^2}{L * L_1 * \gamma_1 * m_v * S - S^2}\right) \quad (7.47)$$

$$Q_{nf} = \left[\frac{\gamma_1 * {L_1}^2 * K_{01} * \tan\delta_1 * \pi * D}{2}\right] + q_{sn} * \pi * D * \left(\frac{L * L_1 * L_2 * \gamma_1 * m_v - (L_2 + L_3) * S}{L * L_1 * \gamma_1 * m_v - S}\right) \quad (7.48)$$

olarak bulunur.

7.4. Geliştirilen Yaklaşımla Örnek Çözümü

Yukarıda anlatılan yaklaşım sonucunda elde edilen üç ana denklem kullanılarak, aşağıda deyatları verilen örnek çözümü yapılacaktır. Fiktif olarak tasarlanan örnek tabakalarda kullanılan değerler, Eurocode [31] standartlarına uygun olarak seçilmişlerdir.



Şekil 7.4. Örnek İçin Zemin Profili

Çapı 0.65 m olan fore kazık çözümü için seçilen güvenlik sayısı 3 tür. Kazık sürtünme direncinin dağılımı üçgen olduğu için ξ=0.67 dir. Kazık fore kazık olduğu için kazık-zemin yüzeyindeki sürtünme açısı, zeminin kayma mukavemeti açısına eşit alınır ($\delta=\theta$). Yanal toprak basıncı katsayısı hesap edilirse,

1.Tabaka olan dolgu kum için;

$K_{o1}=1-\sin\theta_1 = 1-\sin30 = 0.500$

$\tan\delta_1 = \tan\theta_1 = \tan30 = 0.577$

3.Tabaka olan sıkı kum-çakıl için;

K_{o3}=1-sinθ_3 = 1-sin 37.5 = 0.391

tanδ_3 = tan θ_3 = tan37.5 = 0.767

θ_3 = 37.5 için Terzaghi taşıma gücü katsayısı N_q=61 dir.

Formüllerde kulanılması gereken hacimsel sıkışma katsayısı, bu örnekte $m_v = 1/E_{s2}$ olarak alınacaktır. Dolayısıyla;

$m_v = \frac{1}{2.5*10^3}$ $m^2/kN = 4*10^{-4}$ m^2/kN dur.

Daha önceki bölünlerde de söylendiği üzere negatif çevre sürtünmesi yaratacak olan kil tabakası için drenajsız kayma mukavemeti hesabı bu formülasyonda kullanılmıştır. Dolayısıyla yer altı su seviyesinin altında olan 2. tabaka yani kil tabakası, kendisi için verilen drenajsız kayma mukavemeti için hesaplanacak adezyon değeri belirlenirken bir alfa adezyon faktörüne etkitilecektir. Bu örnekteki kil tabakasının drenajsız kohezyon değeri, sınır değer olup, DIN4014 T2 [32] de de belirtildiği üzere adezyon değeri yani birim çevre sürtünmesi kuvveti, drenajsız kohezyon değerine eşittir (alfa=1 dir).

Kazığın ucunun girdiği sağlam zemin esas alınarak başlanacak olan hesaplar şu şekildedir;

$A = (1 - \mu_{s3}{}^2) = (1\text{-}0.5^2) = 0.750$

$B = \left(D + 0.175 * \sqrt{D * L_3}\right) = (0.65 + 0.175* (0.65*5)^{½}) = 0.965$

$J = (\gamma_1*L_1 + \gamma_2*L_2 + \gamma_3*L_3) = 18*2 + 7*10 + 11*5 = 161$ kN/m^2

$R = (\gamma_1*L_1 + \gamma_2*L_2) = 18*2 + 7*10 = 106$ kN/m^2

Toplam kazık oturması;

$$S=\frac{161*61*17*200*10^3+0.67*(161+106)*2*0.391*0.767*5*0.65^{-1}*17*200*10^3+161*61*0.65*0.750*0.85*25*10^6+(161+106)*0.391*0.767*0.750*0.965*25*10^6}{3*25*10^6*200*10^3}$$

S=0.009m olarak bulunur.

Kil zeminin konsolidasyon oturması;

$\Delta H=m_v*\Delta p*L_2 = 4*10^{-4}*36*10 = 0.144$ m

Nötr noktanın kazık ucundan olan yüksekliği;

$$y_1=\frac{17*2*5*(4*10^{-4})*18*0.009}{17*2*(4*10^{-4})*18*0.009-0.009^2}$$

y_1=5.191 m olarak bulunur.

Negatif çevre sürtünmesi değeri;

$$Q_{nf}=\left[\frac{18*2^2*0.5*0.577*3.14*0.65}{2}\right]+25*3.14*0.65*\left(\frac{17*2*10*18*(4*10^{-4})-(10+5)*0.009}{17*2*18*(4*10^{-4})-0.009}\right)$$

Q_{nf}= 21.198 + 51.025*(2.313/0*236) ≅ 521kN olarak bulunur.

Kazığın servis yükü hesap edilmek istenirse aşağıdaki işlemler yapılmalıdır.

Kazığın uç direnci hesabı;

$Q_{uç}= q_{uç}*N_q*A_{uç}$

$Q_{uç}= J*N_q*A_{uç}$

$Q_{uç} = 161*61*(3.14*0.65^2/4)$

$Q_{uç} = 3257$ kN

Sağlam zeminin oluşturduğu sürtünme direnci;

$Q_{s1} = q_{s1*}A_{s1} = \{ [R +(J-R)/2]* K_{o3*} \tan\delta_3 \}*A_{s1}$

$Q_{s1} = \{ [106+(161-106)/2]*0.391*0.767)*(3.14*0.65*5)$

$Q_{s1} = 409$ kN

Kil zeminde nötr nokta altında kalan ve kazığın sürtünme kuvvetine pozitif yönde etkiyen kilin drenajsız kayma mukavemetini de hesaplayalım;

Nötr nokta altında kalan kil tabakası kalınlığı;

$\Delta L= y_1-L_3 = 5.191 – 5.000 = 0.191$m dir.

Bu tabakanın pozitif sürtünme kuvveti;

$Q_{s2} = q_{s2}*A_{s2} = q_{s2}*(\Pi*D* (y_1-L_3)) = 25*(3.14*0.65*0.191)$

$Q_{s2} \cong 10$ kN dur.

Kazığın toplam sürtünme direnci;

$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} = 409 + 10 = 419$ kN dur.

Kazığın emniyetli taşıma gücü, güvenlik saysı Fs=3 alınması sebebiyle;

$$Q_{emin} = \frac{Quç+Qs}{3} = \frac{3257+419}{3} = 1225 \text{ kN'dur.}$$

Kazığın servis yükü negatif çevre sürtünmesi sebebiyle daha az olacaktır. Servis yükü hesabı ise;

$Q_{ser} = Q_{emin} - Q_{nf} = 1225 – 521 = 704$ kN olarak bulunur.

7.5. Örnek Problem İçin Negatif Çevre Sürtünmesinin Ampirik Metodlarla Hesaplanması

7.5.1. Broms(1981) – K.tanθ - Metodu ile Çözüm

Bu metod efektif kuvvetler cinsinden hesap yapmakta ve değerleri bir azaltma faktörü ile çarpmaktadır. Tablo 6.2 'de verilen değerlerden faydalanarak;

1.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n1} = (\gamma_1 * L_1/2) * (K * \tan\theta) * A_{s1}$

$Q_{n1} = (18*2/2)*(0.35)*(3.14*0.65*2)$

Q_{n1} = 25 kN'dur

2.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n2} = (\gamma_1 * L_1 + \gamma_2 * L_2/2) * (K * \tan\theta) * A_{s2}$

$Q_{n2} = (18*2 + 7*10 / 2)*(0.30)*(3.14*0.65*(10-0.191)$

Q_{n2} = 426 kN 'dur.

Toplam negatif çevre sürtünmesi;

Qn = Qn1 + Qn2 = 25 + 426 = 451 kN 'dur.

7.5.2. Garlanger(1973) – β – Beta Metodu ile Çözüm

1.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n1} = (\gamma_1 * L_1/2) * \beta * A_{s1}$

$Q_{n1} = (18*2/2)*(0.37)*(3.14*0.65*2)$

Q_{n1} = 27 kN'dur

2.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n2} = (\gamma_1 * L_1 + \gamma_2 * L_2/2) * \beta * A_{s2}$

$Q_{n2} = (18*2 + 7*10 / 2)*(0.22)*(3*14*0.65*(10-0.191)$

Q_{n2} = 312 kN 'dur.

Toplam negatif çevre sürtünmesi;

Qn = Qn1 + Qn2 = 27 + 312 = 339 kN 'dur.

7.5.3. Eslami Fellenius(1997) – β – Beta Metodu ile Çözüm

1.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n1} = (\gamma_1 * L_1/2) * \beta * A_{s1}$

$Q_{n1} = (18*2/2)*(0.45)*(3.14*0.65*2)$

Q_{n1} = 33 kN'dur

2.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n2} = (\gamma_1 * L_1 + \gamma_2 * L_2/2) * \beta * A_{s2}$

$Q_{n2} = (18*2 + 7*10 / 2)*(0.28)*(3.14*0.65*(10-0.191)$

Q_{n2} = 426 kN 'dur.

Toplam negatif çevre sürtünmesi;

Qn = Qn1 + Qn2 = 33 +426 = 459 kN ‘dur.

7.5.4. Vesic(1977) – No –Metodu ile Çözüm

1.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n1} = (\gamma_1 * L_1/2) * No * A_{s1}$

$Q_{n1} = (18*2/2)*(0.50)*(3.14*0.65*2)$

Q_{n1} = 37 kN’dur

2.Tabaka için negatif çevre sürtünmesi;

$Q_{n2} = (\gamma_1 * L_1 + \gamma_2 * L_2/2) * No * A_{s2}$

$Q_{n2} = (18*2 + 7*10 / 2)*(0.20)*(3.14*0.65*(10-0.191)$

Q_{n2} = 284 kN ‘dur.

Toplam negatif çevre sürtünmesi;

$Q_n = Q_{n1} + Q_{n2}$ = 37 + 284= 321 kN ‘dur.

Tablo7.1.Örnek İçin Negatif Çevre Sürtünmesi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Metodun İsmi	Negatif ÇevreSürtünmesi (kN)
Geliştirilen Yaklaşım	521
Broms(1981)	451
Garlanger (1973)	339
Eslami-Fellenius(1997)	459
Vesic(1977)	321

Yapılan hesapların sonuçları Tablo 7.1’de toplanmıştır. Diğer bütün metodların ampirik hesap yapmaları sebebiyle, verdikleri sonuçlar çok farklılık göstermektedir. Alınan sonuçlar, ampirik metodlarda, efektif kuvvetlerce hesap yapılması ve bunların azaltılması sebebiyle, geliştirilen metoda göre farklılık göstermektedir. Geliştirilen

metod için kullanılan hesap tarzı, DIN1054'ce de kabul edilmiş [32], güvenilir yönde hesap yapan mantığa dayanmaktadır. Kil tabakasının çok yumuşak oluşu, drenajsız kohezyon değerinin Eurocode'ca, birim çevre sürtünmesi değerine eşit alınmasına sebep olduğundan(alfa=1 eğer Cu=<25kN/m^2), geliştirilmiş yöntemce yapılan hesapta sürtünme direncinde herhangi bir azaltma yapılmazken, diğer bütün hesaplarda azaltma faktörleri uygulanmıştır.

7.6. Kayaya Soketlenmiş Kazıklar İçin Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması

Kayaya soketlenmiş kazıklarda, kazık oturması yalnızca elastik sıkışması ile sınırlıdır. Dolayısıyla bu özel durum için yapılması gereken hesap, kazık uç direncinin tespit edilmesi ile başlar. Genellikle kazık tabanı kayaya en az çapı kadar gömülüp oturtulur. Ayrıca, etkin uç kapasitesinin oluşturulması bakımından kazık tabanı, kazık çukurunun cidar kırıntılarından temizlenmiş olmalıdır. Kazık taban düzeyinin altında zamanla eriyerek boşluklar meydana getirecek jeolojik yapının olmamasına özen gösterilmelidir [30].

Çatlaksız veya çok az çatlaklı zayıf dayanımlı kaya kütleleri için Rowe ve Armitage (1987) ye göre fore kazık uygulamalarında ampirik olarak kaya kütlesinin taşıma kapasitesi Mpa olarak [30];

$q_{uç} = 2.7*\sigma_k$

Fleming ve arkadaşları (1992) drenajsız çözümleme (Suya doygun zayıf kiltaşı kayalarda, $\theta=0$) esasına dayalı, kilin oluşturduğu taşıma kapasitesini şu şekilde veriyorlar [30];

$q_{uç} = c*N_c = \left(\frac{\sigma_k}{2}\right) * N_c$

Nc taşıma kapasitesi faktörü kazık zemine çapının en az beş katı kadar girmişse 9 alınır. Kazık taşıyıcı zeminin hemen üstüne oturmuşsa Nc değeri 6'dan büyük alınmaz [30].

Zhang Einstein(1998) ampirik bağıntısı Mpa olarak [30];

$q_{uç} = 4.8*\sigma_k^{0.5}$

Tomlinson (1994) kaya kütleleri için efektif içsel sürtünme açısına bağlı taşıma kapasitesini şu şekilde vermiştir. Kil-şeyl gibi kaya kütlelerinde θ'=20 alınmalıdır. Yüksek mika içerikli şist, şeyl, marn gibi kayalarda θ'=20-27 arası, kumtaşı,silttaşı ve tebeşir gibi kayalarda θ' =27-37 arası, granit, bazalt, kireçtaşı gibi kayalarda ise θ' = 34-40 arası alınmalıdır [30];

$q_{uç} = 2*\sigma_k*tg^2\ (45 + \theta'/2)$

$q_{uç}$: Kazık uç mukavemeti
N_c : Taşıma kapasitesi faktörü
σ_k : Serbest basıç mukavemeti
θ' : Efektif içsel sürtünme açısı

Kayaya soketlenmiş kazıklarda, uygulanan eksenel yükü, uç direncinin yanı sıra, kazık ile kaya kütlesi arayüzeyinde çökmeden dolayı harekete geçirilmiş birim nihai kayma-çevre sürtünme- kapasitesi de (τ_k) taşımaktadır. Su seviyesi altındaki kiltaşlarında drenajsız içsel sürtünme açısı sıfır olduğundan drenajsız kohezyon değeri, serbest basınç mukavemetinin yarısı olarak alınır ki bu değer kiltaşının kayma dayanımını verir.

Kulhawy ve Phoon(1993)'e göre birim nihai kayma- çevre sürtünmesi- kapasitesi Mpa olarak aşağıdaki şekilde verilmektedir [30].

$\tau_k = \psi*[\ p_a*\sigma_k\ /2]^{0.5}$, (Mpa)

τ_k : Kaya kütlesinin kayma-çevre sürtünme- kapasitesi (Mpa)
ψ : Litoloji farklılık katsayısı, ampirik, kil için 0.5 , kaya için 2'dir.
p_a : Atmosfer basıncı, (0,1Mpa)
σ_k : Serbest basınç mukavemeti (Mpa)

Zhang Einstein(1998)'e göre birim nihai kayma- çevre sürtünmesi- kapasitesi Mpa olarak aşağıdaki şekilde verilmektedir [30].

$\tau_k = 0.40 * \sigma_k^{0.5}$

Dolayısıyla yukarıda bahsi geçen formüller vasıtasıyla uygun olan uç direnci ve sürtünme direnci tespit edilmeli, ardından kazık taşıma kapasitesi belirlenmeli ve bu kapasite altında yapacağı elastik kısalma bulunmalıdır. Kazık çevresinde kosolidasyonunu henüz tamamlamamış olarak bulunan kohezyonlu zeminde meydana gelecek konsolidasyon oturması da hesap edilirse, doğrusal dağılım prensibiyle eşit oldukları nötr nokta tespit edilir. Nötr nokta üzerinde kohezyonlu zeminin meydana getireceği negatif çevre sürtünmesi belirlenerek, kazık servis yükü, kazık emin taşıma kapasitesinden çıkartılarak elde edilmiş olunur.

7.7. Geliştirilen Yaklaşımla Çalışan Excel Programı

Daha önceki bölümlerde bahsedilen yaklaşımın hesap formülleri, bir excel sayfasında programlanmıştır. Aşağıda Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de gözüken programa kullanıcılar, gerekli bilgileri girmek suretiyle, sağlam bir zemine giren uç kazığında oluşacak olan negatif çevre sürtünmesini ve kazık servis yükünü görebilmekte, farklı özellikler için karşılaştırma yapabilme olanağı bulmaktadırlar.

Fore Kazıklar İçin Sağlam Bir Tabakaya Giren Uç Kazığında
Su Seviyesi Altında Bulunan Kil Tabakasının Oluşturduğu Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesabı

BİLGİ GİRİŞ SAYFASI	
Kazık Çapını Giriniz (m)	0,65
Kazık Elastik Modülünü Giriniz (*10^6 kN/m2)	25,00
Kazık Yüzeyinde Sürtünme Direnci Dağılımı Katsayısı(ξ)	0,67
Üçgen 0,67 ; Parabolik0,5 ; Dikdörtgen 0,5 (Vesic,1977)	
Güvenlik Sayısını Giriniz FS	3,00
1.Tabaka Dolgu Kum İçin	
Tabaka Kalınlığı - L1 (m)	2,00
Birim hacim Ağırlı - γ1 (kN/m3)	18,00
İçsel Sürtünme Açısı - θ1 (derece)	30,00
2.Tabaka Suya Doygun Kil İçin	
Tabaka Kalınlığı - L2 (m)	10,00
Efektif Birim Hacim Ağırlığı - γ2' (kN/m3)	7,00
Drenajsız Kohezyon Değeri - cu (kN/m2)	25,00
Uygulanacak Adezyon Katsayısı - α	1,00
Hacimsel Sıkışma Katsayısı - mv (m2/kN)	4,000E-04
3.Tabaka Kohezyonsuz Sağlam Zemin İçin	
Tabaka Kalınlığı - L3 (m)	5,00
Efektif Birim Hacim Ağırlığı - γ3' (kN/m3)	11,00
Efektif İçsel Sürtünme Açısı - θ3 '(derece)	37,50
Nq Taşıma Katsayısını Giriniz	61,000
Elastisite Modülü - Es3 (*10^3 kN/m2)	200,00
Poisson Oranı – μs	0,5

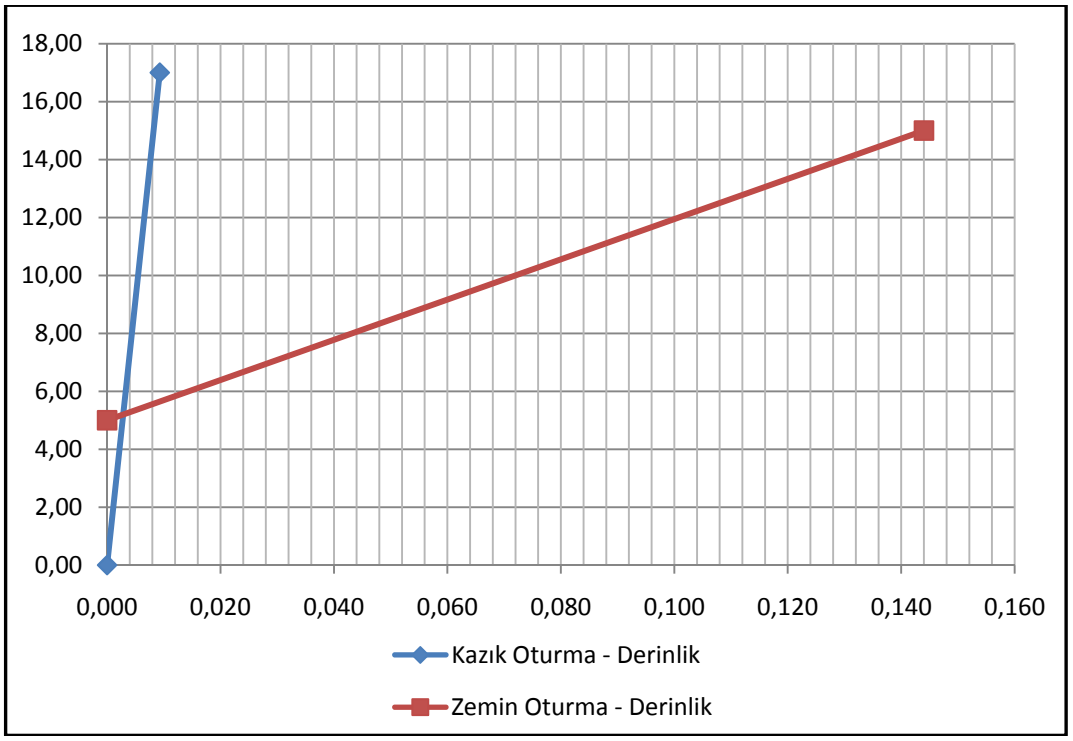
Şekil 7.5. Excel Programı Veri Giriş Sayfası

HESAP SONUÇLARI SAYFASI

HESAPLAR İÇİN GEREKLİ ARA DEĞERLER	
J	161
R	106
A	0,75
B	0,97

SONUÇLAR		
KAZIK OTURMASI "S" (m)	0,009	m
KİL TABAKA KONSOLİDASYON OTURMASI "ΔH"	0,144	m
NÖTR NOKTANIN KAZIK UCUNDAN OLAN YÜKSEKLİĞİ "y1"	5,197	m
KAZIK UÇ DİRENCİ "Quç"	3257	kN
SAĞLAM TABAKADA KAZIK SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs1"	409	kN
KİL TABAKASINDA SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs2"	10	kN
TOPLAM KAZIK SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs"	419	kN
KAZIK EMİN TAŞIMA GÜCÜ "Qemin"	1225	kN
KAZIĞA GELEN NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ DİRENCİ "Qnf"	521	kN
KAZIK SERVİS YÜKÜ	704	kN

Şekil 7.6. Excel Programı Hesap Sonuç Sayfası



Şekil7.7. Kazık Zemin Oturmalarının Değişimini Excel Programında Gösteren Grafik

Ayrıca hazırlanan excel programında başka bir sayfada Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 da gözüktüğü gibi, hesaplarda kullanılan formüllerde verilmektedir.

KAZIK OTURMA MİKTARI

$$S = \frac{[J.Nq.L.Es3] + [\xi.(J+R).2.Ko3.\tan\delta3.L3.D^{-1}L.Es3] + [J.Nq.D.A.0{,}85.Ek] + [(J+R).Ko3.\tan\delta3.A.B.Ek]}{FS.Ek.Es3}$$

KİL ZEMİN KONSOLİDASYON OTURMASI

$$\Delta H = mv.\Delta p.L2$$

NÖTR NOKTANIN KAZIK UCUNDAN OLAN YÜKSEKLİĞİ

$$y_1 = \frac{L.L_3.S.m_v.\gamma_1.L_1}{L.m_v.\gamma_1.L_1.S - S^2}$$

NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ DEĞERİ

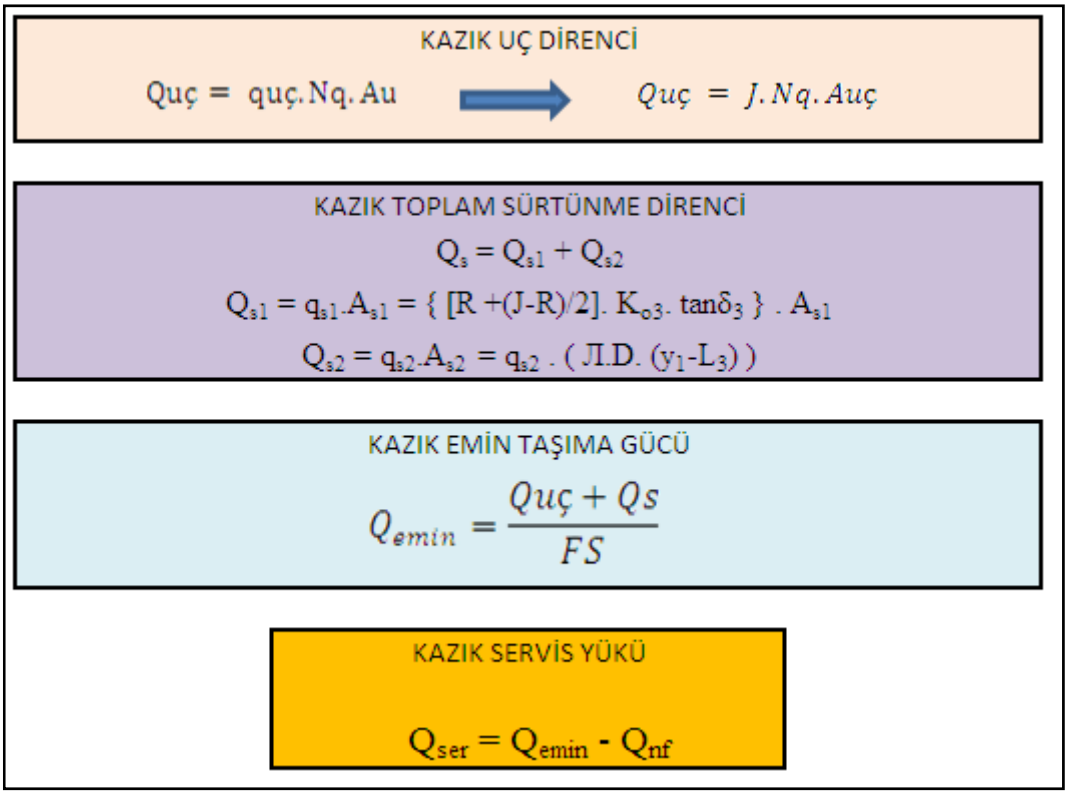
$$Q_{nf} = \left[\frac{\gamma_1.L_1^{\,2}.K_{01}.\tan\delta_1.\pi.D}{2}\right] + q_{sn}.\pi.D.\left(\frac{L.L_1.L_2.\gamma_1.m_v.-(L_2+L_3).S}{L.L_1.\gamma_1.m_v - S}\right)$$

ARA DEĞERLER

$$A = (1-\mu_{s3}{}^2) \qquad B = \left(D + 0{,}175\sqrt{D.L3}\right)$$

$$J = quç = (\gamma_1.L_1 + \gamma_2.L_2 + \gamma_3.L_3) \qquad R = (\gamma_1.L_1 + \gamma_2.L_2)$$

Şekil 7.8. Excel Programında Kullanılan Formüller



Şekil 7.9. Excel Programında Kullanılan Sonuç Formülleri

7.8. Geliştirilen Yaklaşımla Çalışan Excel Programında Aynı Ortamda Değişik Kazık Ebatları İçin Sonuçların Karşılaştırılması

Programlanmış olan Excel sayfası yardımıyla, Şekil 7.10'da gözüken karşılaştırmalı sonuçlar, çap ve boy değişimlerine göre elde edilmiştir.

KAZIK ÇAPI VE BOY DEĞİŞİMİNE BAĞLI KARŞILAŞTIRMALI SONUÇLAR

	D=0,65	m	D=0,80	m	D=1,00	m	D=0,65	m
	L=2+10+5=17	m	L=17	m	L=17	m	L=2+10+8=20	m
KAZIK OTURMASI "S" (m)	0,009	m	0,011	m	0,013	m	0,012	m
KİL TABAKA KONSOLİDASYON OTURMASI "ΔH"	0,144	m	0,144	m	0,144	m	0,144	m
NÖTR NOKTANIN KAZIK UCUNDAN OLAN YÜKSEKLİĞİ "y1"	5,197	m	5,232	m	5,279	m	8,343	m
NÖTR NOKTANIN KİL TABANINDAN OLAN YÜKSEKLİĞİ	0,197	m	0,232	m	0,279	m	0,343	m
KAZIK UÇ DİRENCİ "Quç"	3257	kN	4934	kN	7709	kN	3925	kN
SAĞLAM TABAKADA KAZIK SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs1"	409	kN	503	kN	629	kN	735	kN
KİL TABAKASINDA SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs2"	10	kN	15	kN	22	kN	18	kN
TOPLAM KAZIK SÜRTÜNME DİRENCİ "Qs"	419	kN	518	kN	651	kN	753	kN
KAZIK EMİN TAŞIMA GÜCÜ "Qemin"	1225	kN	1817	kN	2787	kN	1559	kN
KAZIĞA GELEN NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ DİRENCİ "Qnf"	521	kN	640	kN	796	kN	514	kN
KAZIK SERVİS YÜKÜ	704	kN	1178	kN	1991	kN	1045	kN

Çap Artış Oranı %	-	23	54	-
Boy Artış Oranı %	-	-	-	18
Emin Taşıma Gücü Artış Oranı %	-	48	128	27
Negatif Çevre Sürtünmesi Direnci Artış Oranı %	-	23	53	-1,3
Kazık Uç Direnci Artış Oranı	-	51	137	21
Toplam Kazık Sürtünme Direnci Artış Oranı %	-	24	55	80
Nötr Noktanın Kil Tabakasında Kil Tabakasına Oranı %	2	2	3	3
Kazık Oturması Artış Oranı %	-	22	44	33
Servis Yükü Artış Oranı %	-	67	182	48

Şekil 7.10. Excel Programından Elde Edilen Karşılaştırmalı Sonuçlar

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, günümüz inşaatlarında sıkça kullanılan derin temel elemanlarından kazıkların, uygulandıkları zeminlerde karşılaşılabilecek olan bir problemi incelemektedir. Konsolidasyonunu henüz tamamlamamış olan zeminlerin, kazıklarla sürtünme ilişkisi içinde olması durumunda, konsolidasyon oturmaları sebebiyle kazıklarda meydana getirebilecekleri ilave yük olarak tanımlanabilecek olan Negatif Çevre Sürtünmesi problemi, çalışmamızın ana konusunu oluşturmaktadır.

Bu çalışma hazırlanırken sırasıyla kazıklı temeller tanıtılmış, dayanımlarından bahsedilmiş, taşıma güçlerinin hesaplanmaları irdelenmiş ve bu hesaplamalardaki ana faktörlerden olan kazığın uygulandığı zeminde oluşan sürtünme direncinin hesaplanmasına geniş yer verilmiştir. Ardından negatif çevre sürtünmesi problemi detaylı bir şekilde tarif edilmiş, azaltma yöntemleri ve hesap metodları anlatılmıştır. Ve son olarak kohezyonlu zeminlerde drenajsız kohezyona dayalı, zemin ve kazık oturmalarını dikkate alan bir hesap yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşım ile fiktif bir örnek çözümlenmiş, sonuçlar daha önce önerilmiş efektif kuvvetlere dayalı hesap yapan metodların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca geliştirilen yaklaşım, bir Excel sayfasına programlanarak kullanıcıların tercihine sunulmuştur. Bu program aracılığıyla aynı fiktif ortamda kazık ebatlarının değişimine bağlı olarak negatif çevre sürtünmesi ve diğer sonuç detaylarındaki değişimler elde edilmiştir.

Konsolidasyonunu tamamlamış kohezyonlu zeminler kazığı destekleyici yönde çevre sürtünmesi oluştururlar fakat konsolidasyonunu tamamlamamış kohezyonlu zeminler çeşitli etkiler sebebiyle kazık çevresinde negatif çevre sürtünmesi meydana getirebilirler. Bu etkiler zeminin kendi ağırlığı altında kosolidasyonuna devam etmesi, yer altı su seviyesinin düşmesi sebebiyle efektif kuvvetlerde artış, sıkışabilen zeminlerde herhangibir nedenle ilave boşluk suyu basıncı ortaya çıkması, tabaka üzerine yeni bir dolgu tabakası oluşturulması veya çevresine oluşturulması, mevcut kazıklı temel yanında kazık imal edilmesidir.

Negatif çevre sürtünmesi probleminin bağlı olduğu faktörleri kazık özellikleri (cins, en kesit, uzunluk, yüzey prüzlülük, imalat metodu), zemin özellikleri (zemin cinsi, gerilme tarihçesi, sıkışabilirlik, tabaka kalınlığı, taşıyıcı tabakanın kıvamı ve cinsi vb.), zemin hareketlerinin sebepleri ve kazıkların imalat süreleri olarak sıralayabiliriz. Negatif çevre sürtünmesi, kazık oturması ile çevre zemin oturması ilişkisine bağlıdır. Bu oturmaların farkı problemi esas etkileyen faktörlerdendir. Kazık oturmasının fazla olması durumunda bu problemden bahsedilemez fakat çevre zemininin fazla oturması problemin ortaya çıkmasına sebep olur.

Negatif çevre sürtünmesi yükünün hesabı için geliştirilen yaklaşım ile irdelenmiş fiktif problemin sonucunun, diğer çözüm metodlarının sonuçlarıyla karşılaştırırsak; geliştilen yaklaşım drenajsız kohezyona bağlı hesap yapmakta ve diğer metodlara göre güvenilir tarafta sonuç vermektedir. Buna göre geliştirilen yaklaşımla negatif çevre sürtünesi yükü 521 kN, Broms (1981) ile 451 kN, Garlanger Beta (1973) ile 339 kN, Eslami-Fellenius (1997) ile 459 kN, Vesic (1977) ile ise 321 kN olarak belirlenmektedir. Drenajsız kohezyon değeri çok küçük olması sebebiyle herhangi bir adezyon azaltma faktörüne maruz kalmazken, diğer bütün ampirik metodlar zemin cinsine dayalı olarak kesin bir azaltma yapmaktadırlar. Bu sebeple drenajsız kohezyonu düşük killerde alınan sonçlar için geliştirilen yaklaşım daha kritik değer vermektedir. Ayrıca bahsi geçen tüm diğer metodlar ampirik olup, daha önce yapılmış kazık yükleme deneylerine bağlı olarak sonuç verdiklerinden dolayı, değişen zemin şartlarında metodun üretildiği zeminden olan farklılıklar sonucu etkileyecektir.

Geliştirilen hesap yaklaşımı bir Excel sayfasına programlanmıştır. Bu program sayesinde kullanıcılar, suya doygun bir kil tabakası altındaki sağlam zemine giren kazık çevresinde, dolgu sebebiyle oluşacak olan negatif çevre sürtünmesi değerini bulabilmektedirler. Ayrıca nötr noktanın yerini kazık ve zemin oturma esasına bağlı olarak tespit eden program, kazık servis yükünü de sonuç olarak vermektedir. Bu program vasıtasıyla incelenen fiktif problemdeki negatif çevre sürtünmesi, değişen kazık ebatlarına göre irdelenmiş ve sonuçlar tablo halinde sunulmuştur. Bu sonuçları irdeleyecek olursak, kazık çapı D=0,65m iken bu çap 0,80m ve 1,00m olarak değiştirilmiş, ardından sağlam tabaka kalınlığı L_3=5m iken 8m ye çıkarılarak kazık servis yükü ve nötr nokta değişimleri incelenmiştir. Buna göre kazık çapı 0,80m‘ye

çıkarıldığında (çap artış oranı %23) negatif çevre sürtünmesi değeri doğru orantılı olarak %23 artmış fakat emin taşıma gücü daha fazla bir oranla %48 artmıştır(uç direncinin katkısı); kazık oturması %22 ve servis yükü %67 artmıştır. Kazık çapı 1m'ye çıkarıldığında negatif çevre sürtünmesi %53, kazık oturması %44, servis yükü %182 gibi büyük bir artış göstermiştir. Kazık boyunun artırılmasıyla, kazık taşıyıcı tabakaya daha fazla penetre olmuş, bunun sonucu olarak toplam sürtünme direnci %80 artmış ve dolayısıyla kazık kapasitesinin artmasıyla beraber kazık oturmasıda %33 artmıştır; oturmanın artmasına bağlı olarak nötr nokta yukarı kaymış ve negatif çevre sürtünmesi aynı çaptaki daha kısa kazığa göre %1.3 azalmıştır ve kazık servis yükü %48 artmıştır. İncelenen problem bir uç kazıkta gerçekleştiği için çap artışı, boy artışına göre daha büyük servis yükleri sağlamıştır. Fakat problem bir sürtünme kazığı olsa idi, arzulanan şey kazık oturmasının fazla olmasını istemek ve pozitif çevre sürtünemesi ile etkileşimde olan kazık yüzeyinin fazla olmasını istemek olacaktı ki bu da boy artırmanın daha verimli sonuçlar ortaya koyacağını göstermektedir. Geliştirilen yaklaşımda kazık elastik modülü bölen olarak kazık oturma hesabına dahil olduğundan, bu değerin büyümesi kazık oturmasını azaltıcı bir yönde etkide bulunacaktır.

Negatif çevre sürtünmesini önlemenin yolları olarak kazığı bitümle (zift) kaplamak, veya uç kazıklarında kazık kılıfını zeminde bırakarak kazık ile kılıf arasına bentonit yerleştirmek, veya elekto osmosis yöntemini kullanmak olarak sıralanabilir. Fakat pratikte genel olarak kazığı 10 mm bitümle kaplama en yaygın tercih edilen metoddur. Bu kaplamayı kazığın nötr noktaya kadar olan mesafesi için yapmak ise kazık taşıma kapasitesine pozitif etkide bulunabilecek zemin bölümünden (nötr noktanın altı) faydalanmak üzere tercih edilen bir diğer husustur.

Negatif çevre sürtünmesi problemini incelemek ve bu karmaşık etkileşimi daha iyi anlamak açısından yapılabilecekler sıralanmak istenirse, arazi deney sonuçları önerilen hesap metodlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalı ve incelenen arazi şartlarında hangi metodun efektif olduğu saptanmalı; problemli arazi zemin durumunu yansıtan model deneyler yapılarak o koşullar için özel formüller üretilmeli ve etkileşim incelenmeli, problemli arazide değişik ebatlarda kazıklar imal edilerek etkileşimler irdelenmelidir. Ayrıca nötr noktanın zamana bağlı ve diğer başka etkilere bağlı olarak değşimini de incelemek faydalı olabilir.

KAYNAKLAR

[1] Moran, D.(1988), "Pile Foundations", A.A.Balkema / Rotterdam.

[2] Güzeller, E., (1999), Negatif Çevre Sürtünmesinin Kazık Taşıma Gücüne Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Kumbasar, V., Kip,F., (1992), "Zemin Mekaniği Problemleri", Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

[4] Hongkong Hükümeti İnşaat Mühendisliği Departmanı Geoteknik Mühendisliği Ofisi,(2006), Foundation Design And Construction Geo Publication, Sayı:1/2006, s.93-100.

[5] U.S.Aarmy Corps Of Engineers, (1991), Design of Pile Foundations, Engineer Manual 1110-2-2906, Washington.

[6] Bowles, E.J., (1996), Foundation Analysis And Design, 5th Edition, Singapore, s. 891-910.

[7] Burland, J. B., (1973), Shaft Friction of Piles In Clay, Ground Engineering Volume.6, No.3, s. 30-42.

[8] Chandler, R.J., (1968), The Shaft Friction of Piles In Cohesive Soils In Terms of Effective Stres, Civil Engineering and P.W.R., Vol.63, sf. 48-51.

[9] Parry, R.H.G., Swain, C., (1976), Skin Friction On Piles In Clay, University of Cambrige.

[10] Birand,A., (2001), Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi Mühendislik Mimarlık Yayınları, Ankara.

[11] U.S. Naval Facilities Engineering Comand (NAVFAC), (1982), Deep Foundations-Piles, Washington Navy Yard, s. 177-191.

[12] Fellenius,B.H.,(2006), Basics of Foundation Design, Electronic Edition, www.fellenius.net

[13] Tomlinson, M.J., (1973), İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Bülten, Yıl 4, Sayı 12-13, İstanbul, s. 75-94.

[14] Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi, (1991), Bildiriler Kitabı 1. Cilt, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[15] Lambe,T.W.,Garlanger,J.E., Leifer,S.A.,(1974), Prediction and Field Evaluation of Downdrag Forces on a Single Pile, M.I.T. Soil Publication, No:339.

[16] Fellenius,B.H.,(1984), Negative Skin Friction and Settlement of Piles, Second International Seminar, Nanyang Technological Institute, Singapore.

[17] Poulos,H.G.,Davis,E.H.,(1980), Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons Inc., New York.

[18] Tomlinson, M.J., (1981), Pile Design and Construction Practice, Viewpoint Publication, London.

[19] Bakholdin,B.V.,Berman,V.I., (1975), Investigation of Negative Skin Friction on Piles and Suggestions on Its Calculation, Newyork, www.sciencedirect.com

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

[21] Broms,B.B., (1981), Precast Piling Practice, Thomas Telford Ltd., London

[22] Prakash,S.,Sharma,H.D.,(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, Wiley, John & Sons, Incorporated.

[23] Fellenius,B.H.,(1998), Recent Advances In The Design of Piles for Axial Loads, Dragloads, Downdrag, and Settlement, ASCE and Port of NY&NJ Seminar, Urkkada Tech.Ltd,Ottawa, Ontario.

[**24] Poulos,H.G.,Davis,E.H**.,(1975),Prediction of Downdrag Forces in End-Bearing Piles, ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.101, No.GT2,sf.189-204.

[25] Baligh,M.M.,Vivatrat,V.,(1975), A Manual on Prediction Pile Dowwndrag on End Bearing Piles, M.I.T. Research Report R75-38.

[26] Korean Geotechnical Society Journal, (2007), Comparative Study between Design Methods and Pile Load Tests for Bearing Capacity of Driven PHC Piles in the Nakdong River Delta, Vol:23, No:3.

[27] Sharif,A.,(1998), Negative Skin Friction on Single Piles in Clay Subjected to Direct and in Direct Loading, MS Thesis, Concordia University, Canada.

[28] Biraud,J.,L., (2006), Recent Advances About Downdrag on Piles, http://ceprofs.civil.tamu.edu/briaud/

[29] Das,B.M., (1998), Principles of Foundation Engineering Fourth Edition, California State University, USA, p.615-617.

[30] Arıoğlu, E.,Yılmaz,A.O.,Tunçdemir,H.,(2007), Kayaya Gömülü Fore Kazıklar, İstanbul

[31] EUROCODE 7, (1997), Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Berlin, sf.75

[32] DIN1054, (01/2003), Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau , Berlin, p.55

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Kayseri'nin **Develi** ilçesinde doğdu. 1989 yılında Develi Seyrani İlkokulunu bitirdi. 1993 yılında Ankara Özel Arı Ortaokulundan ve 1996 yılında Ankara Özel Arı Fen Lisesi'nden mezun oldu. 2001 yılında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü bitirdi ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Mühendisliği Anabilim Dalı Programı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı.