



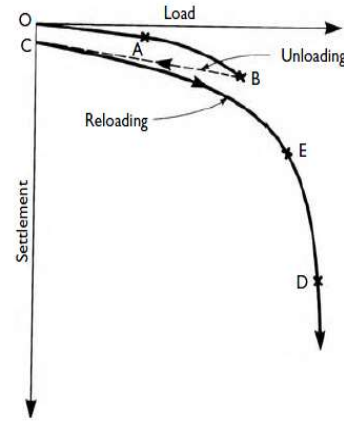
4. DÜŞEY TEK KAZIĞIN NİHAİ TAŞIMA KAPASİTESİ

DOÇ. DR. ERDAL UNCULOĞLU
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
2020



4.1.GÖÇME YÜKÜ VE İZİN VERİLEBİLİR YÜK DEĞERİNİN TANIMLANMASI

Kazık ucunun bastığı zeminde genel kayma göçmesinin olduğu durumdaki yük değeri nihai taşıma kapasitesi olarak adlandırılır (Şekilde D noktası). Ancak bu durum akademik manadaki bir göçmeyi tariflemektedir. Kazıklı bir temelde göçme; birbirine komşu tek kazıklar arasındaki rölatif oturmanın ya da kazık grubunun oturmasının izin verilen sınırları aşması ile yapının fonksiyonlarını yerine getirememesi durumudur. Bu durum Şekilde verilen yük-oturma eğrisindeki E noktası ile temsil edilebilir. Dolayısı ile yapısal anlamda göçme kazığın nihai taşıma kapasitesinin altındaki bir yük değerinde de gerçekleşebilecektir.



Eksenel Düşey Yük Etkisinde Göçme Durumuna Kadar Yüklenen Bir Kazığa Ait Yük-Oturma Eğrisi

Güvenli ya da izin verilebilir kazık yükünün çalışma yükü (tasarım yükü ya da servis yükü) olarak da nitelendirilebilmesi için bu yük altında kazık malzemesinde doğacak gerilmelerin izin verilebilir değerleri aşmaması gerektiği ve beklenen oturmaların izin verilen sınırlar içinde kalacağını gösterilmesi gerektiği açıktır.

Kazık servis yükünün tanımlanmasındaki genel yaklaşım; örselenmemiş durumdaki zeminin fiziksel özelliklerinden yararlanılarak nihai taşıma kapasitesinin hesaplanması ve daha sonra da elde edilen değer bir güvenlik katsayısı ile bölünmesi ile izin verilebilir yük değerinin tanımlanması şeklindedir.

Kazık temellerde, hemen hemen bütün durumlarda, izin verilebilir yük değeri, sadece, işletme yükündeki izin verilen oturma değeri göz önüne alınarak tanımlanmaktadır.

Kazık temellerde, hesaplama yöntemlerinin güvenilirliğindeki belirsizlikler de göz önünde bulundurulmalıdır. Mevcut yöntemlerin göçme yükü değerlerini, tam ölçekli bir yükleme deneyi ile tanımlanmış göçme yüküne göre %60 daha büyük doğrulukta tahmin edebildiği kabul edilmektedir. Bu nedenle; tek kazığın, hesaplanmış nihai taşıma kapasitesi değerinden izin verilebilir yük değeri elde edilirken kullanılan güvenlik katsayısı değerleri büyüktür. BS 8004' e göre güvenlik katsayısı değeri genellikle 2 ile 3 aralığında seçilmektedir.

Bununla birlikte; kazık nihai taşıma kapasitesinin hesaplanmasında mevcut olan belirsizliklerden dolayı bir test kazığı (tasarım sonucu belirlenen kazıklar ile aynı tipte, aynı çapta ve aynı uzunlukta) üzerinde kazık yükleme deneylerinin yapılarak tasarımın doğrulanması gerekmektedir.

Hem kum hem de kil zeminde, çapı 600 mm' ye kadar olan kazıklar üzerinde göçme meydana gelinceye kadar yapılan çok sayıda yüklemeye deneyleri sonucunda; nihai taşıma kapasitesine 2.5 değerinde bir güvenlik katsayısı uygulanarak elde edilecek izin verilebilir yük değerinde kazık başında meydana gelecek oturmaların 10 mm' yi aşmayacağı belirtilmiştir. Çapı 1000 mm' ye kadar olan kazıklar için ise yükleme deneyleri ile tanımlanan göçme yükü ya da nihai taşıma kapasitesi, kazık başında kazık çapının %10'u oturmayacağından neden olan yük değeri olarak kabul edilmektedir.

Kazık ucunun sağlam kayaya bastığı uç kazık durumunda, nihai göçme durumuna güvenlik katsayısı kavramı uygulanmaz. Çünkü; bu durumda, kazık ucu altında yer alan kayada bir kayma göçmesi oluşmadan önce muhtemelen kazık elemanın kendinde bir yapısal göçme meydana gelecektir. İzin verilebilir yük değeri; güvenli basınç gerilmesi, kazık gövdesinde güvenli eğilme gerilmesi ve kazık gövdesindeki elastik sıkışma ile kazık ucu altındaki kayada oluşacak elastik deformasyonlar ve sünme davranışının toplamı olarak ortaya çıkan kazık oturması tarafından idare edilecektir.

Tek kazığın nihai taşıma kapasitesi, $Q_u = Q_b + Q_s$ olmak üzere izin verilebilir yük değeri Q_a , 1 ve 2 no lu eşitlikler ile tanımlanmıştır. Q_b , uç taşıma kapasitesi ve Q_s de gövde taşıma kapasitesidir.

$$Q_a = Q_u / 2.5 \quad (1)$$

$$Q_a = \frac{Q_b}{3} + \frac{Q_s}{1.5} \quad (2)$$

1 ve 2 no. lu eşitliklerden elde edilen yük değerlerinden küçük olanı tasarım yükü olarak seçilir.

16.9.2.1 – Kazıklı temellerin düşey taşıma gücü hesabında, zemin araştırmaları ve yükleme deneyleri sonuçlarından elde edilen zemin özellikleri kullanılarak hesaplanacak *çevre sürtünmesi* Q_s ve *uç direnci* Q_u 'nun hesabında **Tablo 16.4**'te verilen dayanım katsayıları γ_R uygulanacaktır.

Tablo 16.4. Kazıklı Temeller İçin Dayanım Katsayıları

Dayanımın Türü	Dayanım Katsayısı Simgesi	Dayanım Katsayısı Değeri	
		Kazık yükleme deneyi yapılmamış ise	Kazık yükleme deneyi yapılmış ise
Çevre sürtünmesi (basınç)	γ_{Rob}	1.5	1.3
Çevre sürtünmesi (çekme)	γ_{Rsc}	1.6	1.4
Uç direnci	γ_{Ru}	2.0	1.5
Toplam taşıma gücü (basınç)	γ_{Rt}	—	1.4

16.9.2.2 – **Tablo 16.4**'te kazık yükleme deneyi yapılması durumu için verilen dayanım katsayısı değerleri, her bina altında en az bir adet yükleme deneyi ve proje sahasında kullanılan kazıkların en az %1'i üzerinde yükleme deneyi yapılması durumunda kullanılabilir. Bu minimum sayılardan daha fazla deney yapılması halinde, bölgesel deneyimlerin ışığında dayanım katsayılarında en fazla 0.10 kadar azaltma yapılabilir.

16.9.3.4 – Deprem Tasarım Sınıfı DTS = 1, 1a, 2, 2a olan binaların kazıklı temellerinde, en az iki adet statik yükleme deneyi yapılarak tasarım kabullerinin yerinde doğrulandığı kanıtlanacaktır.

4.2.EKSENEL DÜŞEY YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN TAHMİNİ

Düşey tek kazığın nihai taşıma kapasitesi, Q_u , aşağıdaki yöntemlerden herhangi biri kullanılarak tanımlanabilir.

- Statik taşıma gücü eşitliklerinin kullanımı ile
- SPT ve CPT gibi arazi deney sonuçlarına dayalı olarak
- Kazık yükleme deneyleri ile
- Dinamik yöntemler ile

• 4.2.1. Statik Taşıma Gücü Eşitlikleri ile Nihai Taşıma Kapasitesinin Tahmin Edilmesi

Kazık taşıma kapasitesinin statik taşıma gücü eşitlikleri kullanılarak tahmin edilmesi gövde taşıma kapasitesi ve uç taşıma kapasitesinin ayrı ayrı değerlendirilmesi fikrine dayanmaktadır. Kazık taşıma gücü için temel eşitlik aşağıda verilmiştir.

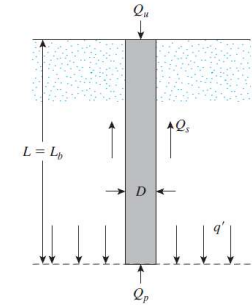
$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad (1)$$

Q_u ; kazığın nihai taşıma kapasitesi,

Q_b ; kazığın nihai uç taşıma kapasitesi,

Q_s ; kazığın nihai gövde taşıma kapasitesi,

W_p ; kazığın ağırlığıdır.



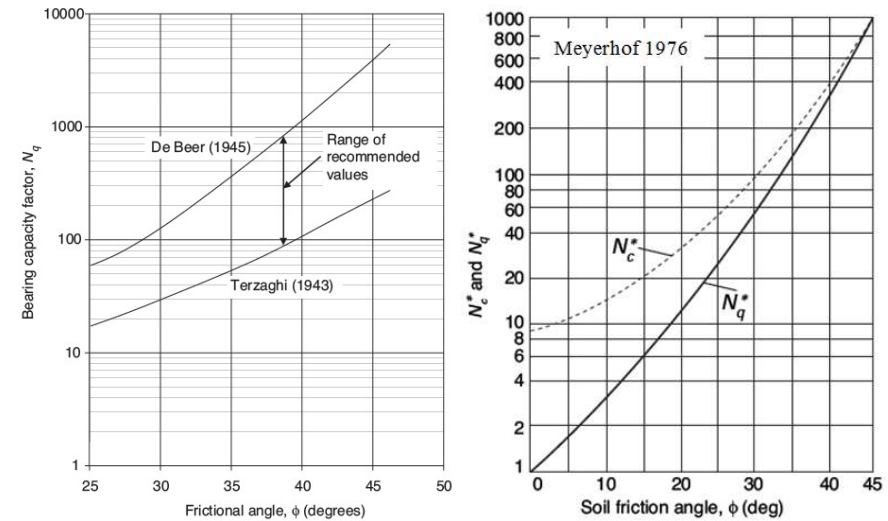
W_p , Q_u 'ya kıyasla küçük olduğundan, genellikle, hesaplamalarda ihmal edilmektedir. Bununla birlikte; deniz tabanından itibaren önemli bir kazık gövde uzunluğunun kullanıldığı derin sulardaki deniz yapılarında kullanılan kazıklar için W_p ağırlığı hesaplamalarda ihmal edilmemelidir.

Kazık için toplam göçme yükü değeri, $Q_u^* = Q_u + W_p = Q_b + Q_s + W_p$ yazılabilir.

Kazık uç taşıma kapasitesi, yüzeysel temellerin taşıma gücü hesabında kullanılan taşıma gücü formülleri yardımı ile hesaplanabilir. Kazık uç kısmının çapı ya da genişliği, yüzeysel temel genişliği ile kıyaslandığında N_γ ' lı terim diğer taşıma gücü terimleri yanında küçük kalacağından ihmal edilebilir. Bununla birlikte; uç kısmı genişletilmiş kazıklar ya da keson temellerin uç taşıma kapasitesi hesaplanırken N_γ ' lı terim ihmal edilmeyebilir.

$$Q_b = A_b (c N_c^* + \sigma_{vb} N_q^* + 0.5 \gamma d N_\gamma^*) = A_b (c N_c^* + q_0' N_q^* + 0.5 \gamma d N_\gamma^*) \quad (2)$$

A_b ; kazık uç kesitinin alanı,
 c ; kazık ucunun bastığı zemine ait kohezyon değeri,
 $\sigma_{vb} = q_0'$; kazık ucu seviyesindeki düşey efektif gerilme değeri,
 γ ; kazık ucunun bastığı zemine ait birim hacim ağırlık,
 d ; kazık ucu seviyesindeki kazık çapı ya da genişliği,
 N_c^*, N_q^*, N_γ^* ; kazık ucunun bastığı zemine ait içsel sürtünme açısının ve bunun yanında da zemin sıkışabilirliği ve kazık geometrisinin fonksiyonu olarak tanımlanan taşıma gücü katsayılarıdır. Bu taşıma gücü katsayıları, şekil ve derinlik faktörlerini içeren taşıma gücü katsayılarıdır. Kazıkların yüzeysel temellere göre derin temeller olmaları nedeni ile yüzeysel temeller için önerilen değerlerden farklı değerlerdir.



Şekil 1. N_c^*, N_q^* Taşıma Gücü Katsayıları

Meyerhof, G. G. (1976). "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations," Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. GT3, pp. 197-228. With permission from ASCE.)

Q_p , kazık gövdesinin yüzey alanı boyunca kazık-zemin ara yüzey kayma mukavemetinin (τ_a) integrasyonu yolu ile elde edilebilir. τ_a , Coulomb denklemi ile tanımlanır.

$$\tau_a = c_a + \sigma_n \tan \phi_a \quad (3)$$

τ_a = kazık-zemin ara yüzeyindeki kayma mukavemeti,

c_a = adhezyon,

σ_n = kazık ve zemin arasındaki normal gerilme,

ϕ_a = kazık ve zemin ara yüzeyi içsel sürtünme açısı

σ_n , normal gerilme değeri düşey gerilme σ_v ile ilişkilendirilerek aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_n = K_s \sigma_v \quad (4)$$

K_s , yanal basınç katsayısıdır. Bu durumda; 3 no.lu eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

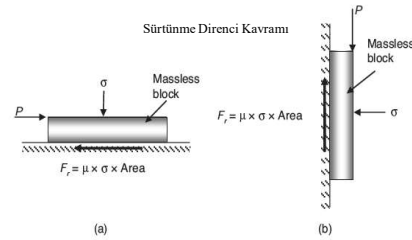
$$\tau_a = c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a \quad (5)$$

Kazığın nihai gövde taşıma kapasite de (6) no.lu eşitlik ile ifade edilebilecektir.

$$Q_f = \int_0^L P \tau_a dz = \int_0^L P (c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a) dz \quad (6)$$

P = kazığın çevresi,

L = kazık gövdesinin (ya da kazık gömülü) uzunluğudur.



Tek kazığın nihai yük taşıma kapasitesi için genel eşitlik aşağıda verildiği gibidir.

$$Q_u = \int_0^L P (c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a) dz + A_b (c N_c + \sigma_{vb} N_q + 0.5 \gamma d N_\gamma) - W_p \quad (7)$$

7 no.lu eşitlik tek kazığın nihai taşıma kapasitesinin tahmin edilmesinde kullanılan genel ifadedir.

Eğer, drenajsız koşullardaki ya da kısa dönem nihai taşıma kapasitesi tahmin edilmek isteniyorsa c , ϕ , c_a ve γ zemin parametreleri drenajsız koşullara uygun olarak elde edilmelidir. Bununla birlikte; σ_v ve σ_{vb} , toplam gerilmeler olmalıdır. Eğer, kum zeminlerdeki kazıkların uzun dönem nihai taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi gerekli ise zemin parametreleri drenajlı değerler olmalı ve σ_v ile σ_{vb} efektif düşey gerilmeler (σ_v' ile σ_{vb}') olmalıdır.

4.2.1. KOHEZYONLU ZEMİNLERDEKİ KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİ

4.2.1.1. Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazıklar

Eğer kil zemin fazla aşırı konsolide değil ise kil zemindeki kazıklar için genellikle drenajsız durumdaki taşıma kapasitesi kritik değer olarak kabul edilir. Eğer kil zemin suya doygun ise drenajsız durumdaki içsel sürtünme açısı $\phi_u = 0$ olur ve ϕ_a açısı da sıfır olarak kullanılabilir. Bununla birlikte; $\phi = 0$ için $N_q = 1$ ve $N_\gamma = 0$ olduğundan 7 no.lu eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilecektir.

$$Q_u = \int_0^L P(c_a)dz + A_b(c_u N_c + \sigma_{vb}) - W_p \quad (8)$$

c_u = kazık ucu seviyesinde kil zeminin drenajsız kohezyon değeri,

c_a = kazık-zemin ara yüzeyindeki drenajsız haldeki adhezyon değeridir.

Kazık uç kesitinde genişleme söz konusu değil ise $A_b \sigma_{vb} \approx W_p$ kabul edilerek eşitlik daha da basitleştirilebilir.

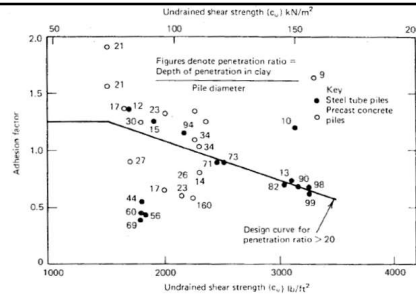
$$Q_u = \int_0^L P(c_a)dz + A_b c_u N_c \quad (9)$$

Drenajsız adhezyon değeri; kazık tipi, zemin cinsi ve kazığın zemine yerleştirilme yöntemi gibi bir çok faktöre bağlı olarak önemli derecede değişkenlik gösterebilir. Literatürde; c_a ve c_u arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacı ile yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

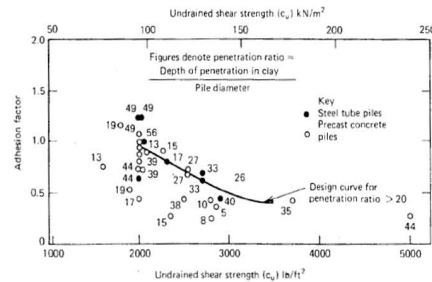
Tomlinson (1970), c_a / c_u değerinin kil zeminin üzerinde yer alan zemin tabakasından ve c_u değerinden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmiştir. Tomlinson, $c_u \geq 48$ kPa için, Tablo 1 ve Şekil 2 ve 3'te gösterilen adhezyon katsayılarını önermiştir. Tablo 1'de görülen penetrasyon oranı (penetration ratio), katı kil tabakasındaki penetrasyon derinliğinin kazık çapına olan oranıdır.

Tablo 1. Katı Kil Zemindeki Çakma Kazıklar için Adhezyon Katsayısı Değerleri

Case	Soil Conditions	Penetration Ratio ^a	c_a/c_u
I	Sands or sandy soils overlying stiff cohesive soils	<20	1.25
		>20	See Fig. 3.2
II	Soft clays or silts overlying stiff cohesive soils	<20 (>8)	0.40
		>20	0.70
III	Stiff cohesive soils without overlying strata	<20 (>8)	0.40
		>20	See Fig. 3.3



Şekil 2. Durum I (Katı-Çok Katı Kohezyonlu Zemin Tabakası Üzerinde Kum ve Çakıl Tabakası Bulunması) için Adhezyon Katsayıları – Figure 3.2.



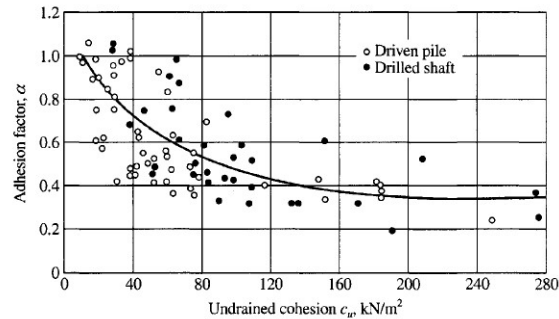
Şekil 3. Durum III (Üzerinde Başka Bir Tabakanın Yer Almadığı Katı-Çok Katı Kil Zemin) için Adhezyon Katsayıları – Figure 3.3.

c_a / c_u ile ilgili delme-yerinde dökme kazıklar için çakma kazıklarda olduğu kadar fazla çalışma sonucu mevcut değildir. Mevcut çalışma verilerinin çoğunluğu da Londra Kili ile ilgilidir. c_p yoğunlaşmış haldeki kohezyon değeridir. Skempton (1959) ve Meyerhof ve Murdock (1953) tarafından elde edilen sonuçlara göre c_a 'nın üst sınırı 96 kPa olarak önerilmiştir.

Tablo 2. Katı Kil Zemindeki Delme Kazıklar için Adhezyon Katsayısı Değerleri

Soil Type	Adhesion Factor	Value	Reference
London clay	c_a/c_u	0.25–0.7 Average, 0.45	Golder and Leonard (1954) Tomlinson (1957) Skempton (1959)
Sensitive clay	c_a/c_r	1	Golder (1957)
Highly expansive clay	c_a/c_u	0.5	Mohan and Chandra (1961)

Dennis ve Olson (1983b), α katsayısı ile ilgili olarak Tomlinson tarafından önerilen bilgilerden yararlanarak α ve c_u arasındaki ilişkiyi veren tek bir eğri geliştirmişlerdir. Şekil' de gösterilen bu eğri gömülü uzunluğu 30 m' den az olan kazıklar için α katsayısının değerinin tahmin edilmesinde kullanılır. Kazık gömülü uzunluğu 30 m' den büyük olduğu zaman α katsayısının değeri azalır. Bu büyüklükteki gömülü uzunluklara sahip kazıklarda gözlenen elastik kısalma, büyük derinliklerde yüzeyel derinliklere göre daha küçük kayma deformasyonları ya da kaymaya neden olur. Araştırmalar; 50 m' den büyük gömülü uzunluklara sahip olan kazıklarda, Şekil' den elde edilen α katsayısı değerlerinin 0.56 katsayısı ile çarpılarak kullanılması gerektiğini göstermiştir. 30 m ile 50 m arasında gömülü uzunluğa sahip kazıklar için ise azaltma katsayısının değerinin 1 ile 0.56 aralığında doğrusal değiştiği kabul edilir.



Şekil 4. Kil Zeminde Gömülü Uzunluğu 50 m' den Az Olan Kazıklar için α Katsayısı Değerleri

Delme-yerinde dökme (deplasman yapmayan) kazıkların imalatı sırasında kuyu çeperlerindeki zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler (örselenme nedeni ile) kazığın gövde taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Zeminde kuyu açılması ile kuyu çeperlerindeki yanıl basınç etkisinde bir rahatlama ya da ferahlama etkisi oluşur. Bunun sonucunda kil zeminde kabarma meydana gelebilir. Boşluk suyunun zemin kütlesi içerisindeki kil yüzeyine taşınması ve yüzeyden sızması söz konusu olur ki bu durumda kil zeminde yumuşama meydana gelir. Delme işlemi, kil zeminde daima bir yumuşamaya neden olacaktır. Eğer; delme işlemi sırasında bentonit kullanılırsa, kuyu çeperlerinde oluşacak yanıl basınç ferahlaması yine oluşabilir ancak çatlaklardan su sızması önlenmiş olur. Bahsedilen bu zemin yumuşaması, sadece, gövde taşıma kapasitesini etkileyecektir. Kazığın uç taşıma kapasitesi bu durumdan etkilenmez.

Skempton; Londra kilinde yer alan delme-yerinde dökme kazıklarda kazık gövde kapasitesi üzerinde yumuşama etkilerini incelemiştir. Yapılan yükleme deneylerinin sonuçlarına göre adhezyon katsayısı değerlerinin 0.3 ile 0.6 aralığında değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmalar sonucunda; adhezyon katsayısı değeri olarak ortalama 0.45 değerinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Skempton; yapılan yükleme deneyleri sonucunda, Londra kilinde mobilize hale gelen birim gövde sürtünme direncinin de 100 kN/m² değerini aşmadığını gözlemiştir. Bu değer, örselenmemiş haldeki zemin numunesi üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değeri, c_u ' nun 0.3 ile 0.45 katı alınarak hesaplanan birim gövde sürtünme direnci için bir üst sınır olarak alınabileceğini belirtmiştir.

Delme-yerinde dökme kazıklarda bentonit çamuru kullanılıyorsa, yükleme deneyinden elde edilmiş bir değer yoksa, adhezyon katsayısı değeri 0.8 katsayısı ile azaltılarak kullanılmalıdır.

Uygulamada, delme kazıklar için sürtünme direncinin maksimum değeri 100 kPa ile sınırlıdır.

Kraft ve Lyons; harç/kil ara yüzeyinde hesaplanacak gövde sürtünmesi için kullanılacak olan adhezyon katsayısı değerinin klasik delme-yerinde dökme kazıklar için kullanılan ile aynı alınabileceğini belirtmişlerdir. Eğer harç zemine basınç altında uygulanırsa, 24 saat sonrasında kazık-zemin ara yüzeyinde adhezyon katsayısı değerinde önemli bir artış gözlenebilir. Oluşabilecek artışın miktarı, yükleme deneyi yapılarak belirlenebilir.

Kil zemindeki kazıkların nihai gövde sürtünme direnci, Q_s , aşağıda verilen eşitlikle yeterli güvenilirlikte hesaplanabilir.

$$Q_s = \alpha c_u A_s$$

α ; adhezyon katsayısı,

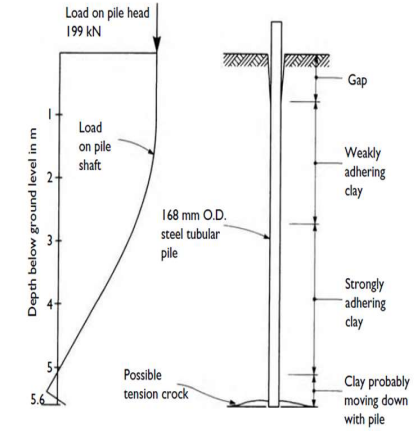
c_u ; kazık gövdesini çevreleyen zeminin örselenmemiş haldeki ortalama drenajsız kayma mukavemeti, A_s ; zemin yüzeyinden kazık ucuna doğru ölçülen ve kazığın gövde taşıma kapasitesine katkı sağlayan kazık gövde yüzey alanıdır.

Adhezyon katsayısı değeri; çok yumuşak killerde 1 ya da daha üstü bir değere sahip olabilirken bu değer çok katı-sert kıvamdaki killerde 0.2 değerine kadar düşebilmektedir. Adhezyon katsayısı değerlerinin kazığın imal edildiği malzeme ile ilişkili olmadığı belirtilmiştir.

Katı kil zemine çakılan kazıkların davranışı ile ilgili olarak yapılmış olan deneysel çalışma ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Katı ve çok katı kıvamdaki Londra kilinde çelik tüp kazıklar çakılmış ve kazıklar çakıldıktan sonra, sırası ile, 1 ay, 3 ay ve 1 yıl sonra yükleme deneyleri yapılmıştır.

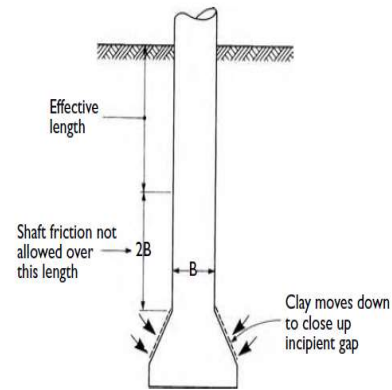
Kazığın zemine çakılması ve bu nedenle zeminin deplasmanından dolayı kazık çevresinde derinliği 8 kazık çapını bulan ve kazık çakıldıktan sonraki 1 yıl içinde dahi kapanmayan boşluklar ya da kazık-zemin ayrılmaları oluşmuştur. Kazık başından itibaren 8 kazık çapı derinlik ile 14-16 kazık çapı derinlik arasında ise kil zeminin kazık yüzeyine kısmen yapıştığı görülmüştür. 16 kazık çapından daha derinlerde ise kil zeminin kazık yüzeyine sıkı sıkıya bağlandığı görülmüştür. Şekil 5' te kazıktan zemine yük transferinin nasıl sağlandığı gösterilmiştir. Kazığın üst kısmında yer alan boşluktan dolayı bu kısımda zemine yük transferi olmamıştır. Yükün büyük çoğunluğu, adhezyonun kil zeminin drenajsız mukavemetinden %20 daha büyük olduğu alt kısımlara transfer edilmiştir. Boşluk kısmı, bazı durumlarda, kazık başlığı yapımı için kilin kazılması ile yok olabilir.



Şekil 5. Kazıktan Katı Kil Zemine Yük Transferi (Stanmore)

Bununla birlikte; delme-yerinde dökme kazıklarda kazığın zeminde teşkili boyunca kazık ile onu çevreleyen zemin arasında boşluk meydana gelmez.

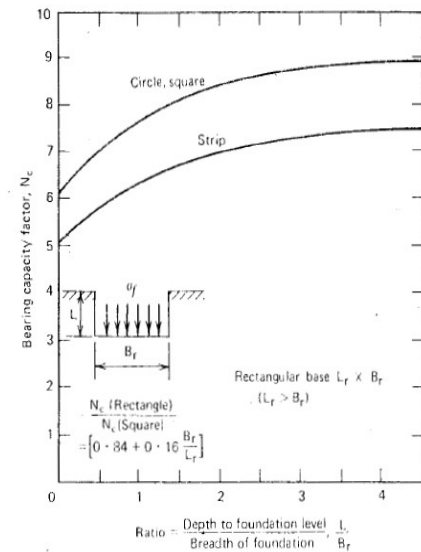
Zemin profili içerisinde servis yükünün tamamının kazığın uç taşıma kapasitesi ile karşılanabileceği çok katı-sert bir tabaka varsa uç kısmı genişletilmiş kazıkların kullanımı ekonomik olabilir. Bununla birlikte; delme işleminin daha derinlere devam ettirilmesinin sakıncalı olduğu durumlarda ya da geçirimsiz kil tabakaları arasında su taşıyan akiferlerin bulunduğu durumlarda da uç kısmı genişletilmiş kazıklar tercih edilebilir. Kil zemindeki uç kısmı genişletilmiş kazıkların gövde taşıma kapasiteleri; gövde çapının iki katı yükseklikte gövde sürtünmesi dikkate alınmayıp kazık gövde uzunluğunun geri kalan kısmı için de 0.3 değerinde bir adhezyon katsayısı kullanılarak hesaplanır.



Şekil 6. Uç Kısmı Genişletilmiş Kazıklarda Gövde Taşıma Kapasitesi için Efektif Gövde Boyu

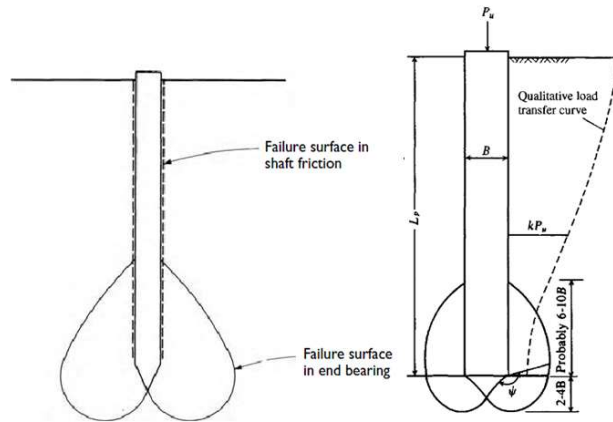
Kohezyonlu zeminler içinde yer alan kazıkların uç taşıma kapasiteleri hesaplanırken N_c taşıma gücü katsayısının değeri Skempton (1951) tarafından dairesel bir alan için önerilen değer olarak göz önüne alınır. Öyle ki; N_c taşıma gücü katsayısının $L/D \geq 4$ durumunda sabit 9 değerine kadar artmaktadır. $N_c = 9$ değeri, Londra Kili üzerinde yapılan deneyler ile doğrulanmış olup uygulamada yaygın kabul görmüştür.

Kazık, taşıyıcı tabaka içerisine en az kazık çapının 5 katı kadar penetre olmuşsa N_c taşıma gücü katsayısı değeri 9 olarak alınabilir.



Şekil 7. Kil Zemindeki ($\phi=0$) Temeller için Taşıma Gücü Katsayıları

Kazık ucu altında örselenme-yoğrulma (remoulding) söz konusu olduğundan kazık uç kapasitesinin hesaplanmasında örselenmemiş durumdaki mukavemeti temsil eden c_u değerinin kullanımı tam anlamı ile doğru değildir. Bununla birlikte; Şekil 8' den de görüldüğü gibi uç taşıma kapasitesinde göçme yüzeyinin büyük kısmı kazığın penetrasyonu nedeni ile kısmen örselenmiş zemin içerisinde yer almaktadır.



Şekil 8. Eksenel Düşey Yük Etkisindeki Kazıklarda Göçme Yüzeyleri

Katı, aşırı konsolide kil zeminlerdeki kazıklar için drenajlı durumdaki taşıma kapasitesi, drenajsız durumdakinden daha kritik olabilir. Bu durumda; drenajlı durumdaki kazık-zemin adhezyonu c_a' nün sıfır olduğu kabul edilip genel taşıma gücü eşitliğindeki N_c ve N_q taşıma gücü katsayıları da ihmal edilebilir.

Bu basitleştirici kabuller sonrası drenajlı durumdaki taşıma kapasitesi için taşıma gücü eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q_u = \int_0^L P \sigma'_v K_s \tan \phi'_a dz + A_b \sigma'_{vb} N_q - W_p$$

σ'_v ; z derinliğindeki efektif düşey gerilme,

σ'_{vb} ; kazık ucu seviyesindeki efektif düşey gerilme,

ϕ'_a ; kazık-zemin ara yüzeyindeki drenajlı (efektif) içsel sürtünme açısı.

Burland (1973); $\beta = K_s \tan \phi'_a$ parametresinin normal konsolide kil zeminler için uygun değerlerinin aşağıdaki ifade ile elde edilebileceğini belirtmiştir.

$$\beta = (1 - \sin \phi') \tan \phi'$$

ϕ' , kil zemin için efektif içsel sürtünme açısı değeridir. ϕ' açısının değeri, 20° ila 30° aralığındadır.

Üstteki eşitlikte yer alan β katsayısının değerleri 0.24 ile 0.29 aralığında değişmektedir.

Meyerhof (1976), katı kil zemindeki çakma kazıklar için $K_s = 1.5 \times K_0$ olarak alınabileceğini belirtmiştir. Delme kazıklar için ise K_s değeri çakma kazıklar için bulunan değer yarısına eşit alınabilmektedir. Aşırı konsolide kil zeminler için $K_0 = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR}$ dir. OCR, aşırı konsolidasyon oranı olup ϕ'_a değeri kil zeminin drenajlı durumdaki içsel sürtünme açısı ϕ' değerine eşit alınabilir.

N_q taşıma gücü katsayısının değeri kum zemindeki kazıklar için kullanılan değer aynı olarak alınabilir.

Zemin mekaniği teorisi olarak göz önüne alındığında nihai gövde sürtünme direnci kazık gövdesi üzerinde etkiyen yatay efektif gerilme ve kazık-kil zemin arasındaki örselenmiş (remoulded) haldeki efektif içsel sürtünme açısı ile ilişkilidir. Diğer bir ifade ile;

$$\tau_s = \sigma'_h \tan \delta_r$$

τ_s ; herhangi bir noktadaki birim gövde sürtünmesi,

σ'_h ; yatay efektif gerilme,

δ_r ; remoulded efektif içsel sürtünme açısıdır.

Yatay efektif gerilme, düşey efektif gerilmeye bağlı tanımlanarak ifade daha da basitleştirilebilir. Bu durumda eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau_s = K \sigma'_{v0} \tan \delta_r$$

K katsayısının değeri, kazığın zemine yerleştirilme süreci ve akabinde yüklenmesi boyunca sürekli değişiklik göstermektedir. Katı kil zemine çakılan çakma kazık durumunda; kazığı çevreleyen kil zeminin deplase olması için şahmerdan düşüşleri ile zemine iletilen gerekli enerji sonucu K değeri başlangıçta oldukça büyüktür. Bununla birlikte; bu anda, kazığın zemine çakılması sırasında meydana gelen yüksek boşluk suyu basınçlarından dolayı σ'_{v0} değeri çok düşüktür.

Delme kazık durumunda; kuyunun delinmesi sırasında zeminde kabarma olacağı için K değeri düşüktür. Ancak; kuyu betonlandığı zaman K değeri de artmaya başlar.

K değerindeki sürekli değişimler, değişken boşluk suyu basınçları ve dolayısı ile σ'_{v0} nedeni ile deneysel katsayılar kullanılmadan ve bu belirsizlikleri göz önüne alan basitleştirilmiş hesaplamalara izin vermeden zemin mekaniği teorisi tek başına kazık tasarımı için uygulanamamaktadır.

4.2.2. KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDEKİ KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİ

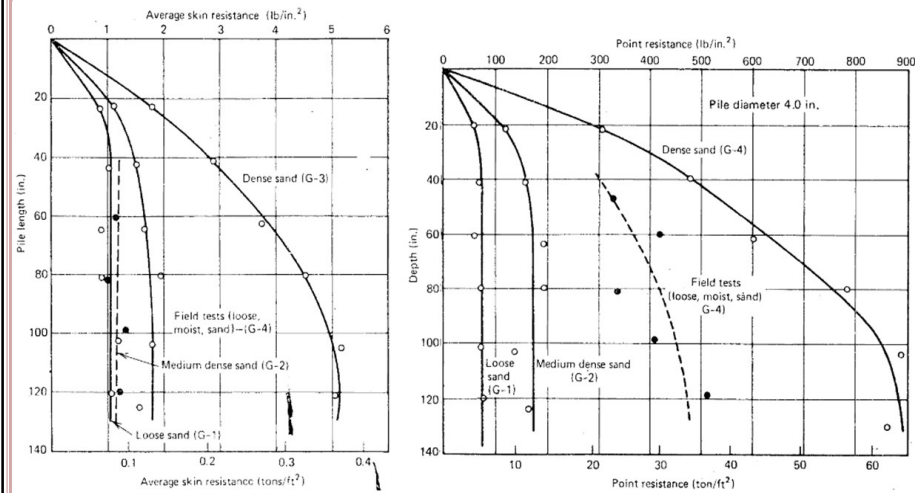
Kohezyonsuz zemindeki kazıkların nihai taşıma kapasitesi 9 no lu eşitlik ile verilen genel taşıma gücü eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q_u = \int_0^L P(c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a) dz + A_b (c N_c + \sigma_{vb} N_q + 0.5 \gamma d N_\gamma) - W_p \quad (9)$$

Eğer; 9 no lu eşitlikte, c_a ve $c N_c$ terimleri sıfır olarak alınır ve $0.5 \gamma d N_\gamma$ terimi de, $\sigma_{vb} N_q$ terimine göre küçük olduğundan ihmal edilirse kum zemindeki kazığın nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$Q_u = \int_0^L P \sigma'_v K_s \tan \phi'_a dz + A_b \sigma'_{vb} N_q - W_p \quad (14)$$

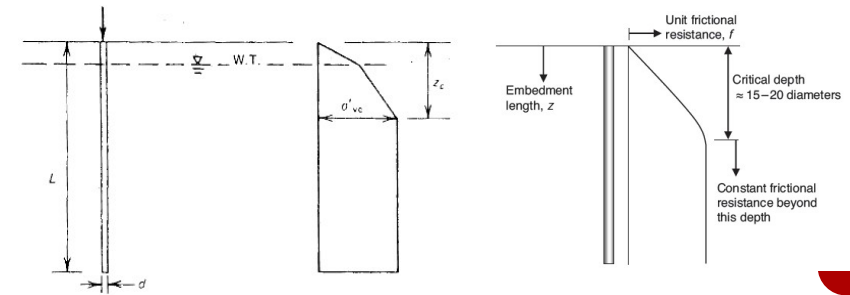
9 ve 14 no lu eşitliklerden anlaşılan, kum zemindeki kazığın hem uç direnci hemde gövde sürtünme direncinin efektif örtü gerilmesinin bir fonksiyonu olduğu ve kazık gömülü uzunluğu boyunca doğrusal olarak artacağıdır. Bununla birlikte; Vesic (1967) tarafından yapılmış olan kapsamlı çalışmalar sonucunda; ϕ açısının fonksiyonu olan belirli bir kazık gömülü uzunluğu ötesinde uç ve sürtünme dirençlerinin hemen hemen sabit kaldıkları ortaya konmuştur. Diğer bir ifade ile kazığın birim gövde sürtünme direnci ve uç dirençlerinin mutlaka derinlikle doğrusal olarak artmadığı ve belirli bir derinliğin ötesinde hemen hemen sabit değerlere ulaştığıdır (Vesic (1967) ve Kerisel (1961)).



Şekil. Gövde Direnci ve Uç Direncinin Kazık Uzunluğu ile Değişimi (Vesic, 1967)

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi σ'_v 'nin kritik z_c derinliğine kadar örtü yükü gerilmesine eşit olduğu kabul edilmektedir. z_c derinliğinin ötesinde σ'_v değeri sabittir. Bu basitleştirilmiş idealize davranış ile ortalama nihai gövde direnci ve nihai uç direncinin belirli bir penetrasyon derinliğinin ötesinde sabit olduğu varsayılmaktadır.

σ'_v ; kazık gövdesi boyunca efektif düşey gerilme,
 $z \leq z_c$ için efektif örtü gerilmesi,
 $z \geq z_c$ için sınır düşey efektif gerilme σ'_{vc}
 σ'_{vb} ; kazık ucu seviyesindeki efektif düşey gerilme,



Şekil. Kum zemindeki Kazığa Bitişik Düşey Gerilmenin Basitleştirilmiş Dağılımı (Vesic, 1967)

Kritik derinlik, L_c ya da z_c , ϕ 'ye bağlı olarak Poulos ve Davis (1980) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$28^\circ < \phi < 36.5^\circ \quad L_c / D = 5 + 0.24 (\phi - 28^\circ) \quad (16)$$

$$36.5^\circ < \phi < 42^\circ \quad L_c / D = 7 + 2.35 (\phi - 36.5^\circ) \quad (17)$$

16 ve 17 no lu eşitliklerden elde edilen sonuçlara göre

$$\phi = 28^\circ \quad L_c / D = 5$$

$$\phi = 36.5^\circ \quad L_c / D = 7$$

$$\phi = 42^\circ \quad L_c / D = 20$$

L_c / D değerini elde etmek için kullanılacak ϕ değerleri Poulos ve Davis (1980) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. ϕ_1 , kazık zemine yerleştirilmeden önceki zemin içsel sürtünme açısı değeridir.

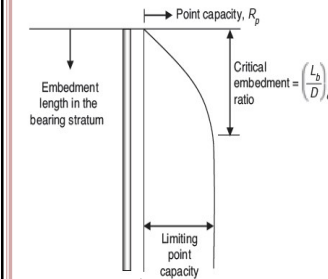
$$\text{Çakma kazıklar için} \quad \phi = 0.75\phi_1 + 10^\circ$$

$$\text{Delme kazıklar için} \quad \phi = \phi_1 - 3^\circ$$

Uç taşıma kapasitesi eşitliğine göre, kum zemin içerisinde yer alan kazığın gömülü uzunluğu arttıkça artan örtü yükü basıncı (σ'_{v0} ya da düşey efektif gerilme) nedeni ile kazığın uç taşıma kapasitesi de artacaktır.

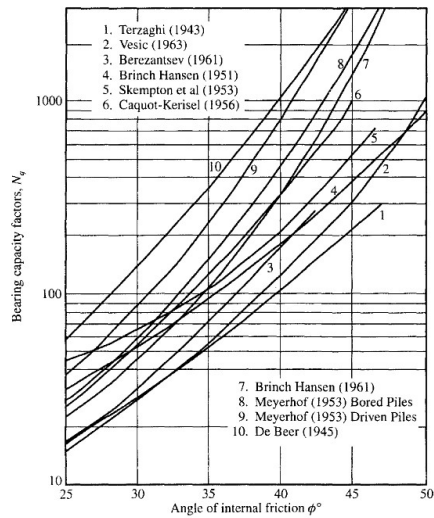
Vesic, instrumente edilmiş tam ölçekli kazıklar üzerinde yapmış olduğu yükleme deneyleri sonucunda artan derinlikle beraber uç direncindeki artışın doğrusal olmadığını artan derinlikle birlikte gerilmadaki artış hızının azaldığını ortaya koymuştur. Pratikteki tasarımlar için kazık penetrasyonunun 10 ila 20 kazık çapı değerinde olduğu derinliklerde gerilmadaki artışın doğrusal olduğu bu derinliklerin altında ise birim uç direncinin sabit değere ulaştığı kabul edilir.

Bununla birlikte; Meyerhof (1976); kazık gömülü uzunluğundaki artış ile birlikte kazığın uç taşıma kapasitesinin arttığını ancak kazığın taşıyıcı tabakadaki uzunluğunun kazık çapına oranının (L_b/D) kritik bir değere ulaştığında uç taşıma kapasitesinin de sınır bir değere ulaşmış olduğunu gözlemiştir. L_b , kazık ucunun içerisinde yer aldığı zemin tabakasıdır.



Şekil. Taşıyıcı Tabaka İçerisinde Artan Kazık Uzunluğu ile Uç Kapasitesinin Artması

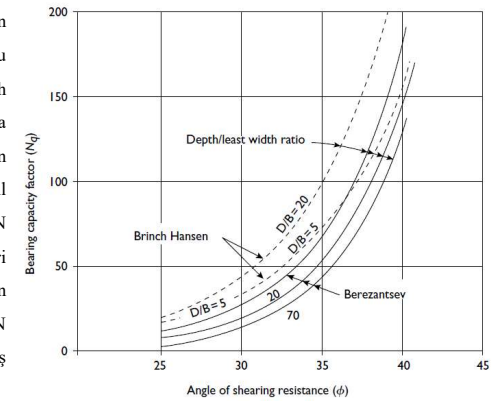
Meyerhof (1976), uç taşıma kapasitesi Q_b 'yi hesaplamak için kritik derinlik oranı L_c/D 'yi de hesaba katmaktadır. Meyerhof'a göre; taşıma gücü katsayıları L_b/D oranı ile birlikte artmakta ve $L_b/D \approx 0.5(L_c/D)$ derinliğinde maksimum değerlerine ulaşmaktadır. L_b , taşıyıcı tabakanın gerçek kalınlığıdır. Örneğin; homojen bir zemin kütleğinde L_b , kazık gömülü uzunluğu L 'ye eşittir. Ancak; homojen olmayan zemin profilleri için $L_b < L$ dir.



Şekil. Dairesel Derin Temeller için Taşıma Gücü Katsayıları (Kazdı, 1975)

Araştırmalardan elde edilen bir diğer sonuç da N_q taşıma gücü katsayısının sadece ϕ' ye bağlı sabit bir değer olmadığı ayrıca L/D oranına da bağlı olduğudur. N_q taşıma gücü katsayısı değeri, kazık ucunun bastığı zemine ait drenajlı kayma direnci açısı, ϕ' ile L/D oranı arasındaki ilişkiye dayanılarak elde edilir. Şekil 33' den de görüleceği gibi farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş olan N_q değerleri geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.

Vesic; Berezantsev ve ark. tarafından önerilmiş olan N_q değerlerinin tasarım için en uygunu olduğunu belirtmiştir. Berezantsev' e alternatif olarak Brinch Hansen kullanılabilir. Kazık uç kesit alanının kare ya da dairesel kesit olduğu durumlarda Brinch Hansen tarafından önerilmiş olan N_q değerleri 1.3 şekil katsayısı değeri ile çarpılarak kullanılmalıdır. SPT N değerleri kullanılarak elde edilen ϕ' değerleri Berezantsev ya da Brinch Hansen tarafından önerilmiş N_q değerleri ile ilişkilendirilirken SPT N değerlerine gerilme düzeltmesi uygulanmamış olmalıdır.

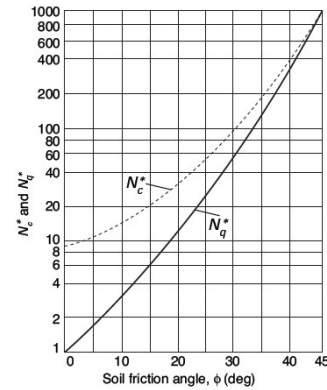


Şekil *. Berezantsev ve Ark. ve Brinch Hansen Taşıma Gücü Katsayıları

Vesic; Berezantsev ve ark. tarafından önerilmiş olan N_q değerlerinin tasarım için en uygunu olduğunu belirtmiştir. Berezantsev' e alternatif olarak Brinch Hansen kullanılabilir. Kazık uç kesit alanının kare ya da dairesel kesit olduğu durumlarda Brinch Hansen tarafından önerilmiş olan N_q değerleri 1.3 şekil katsayısı değeri ile çarpılarak kullanılmalıdır. SPT N değerleri kullanılarak elde edilen ϕ' değerleri Berezantsev ya da Brinch Hansen tarafından önerilmiş N_q değerleri ile ilişkilendirilirken SPT N değerlerine gerilme düzeltmesi uygulanmamış olmalıdır.

Meyerhof (1976); taşıma gücü katsayıları N_c ve N_q 'nin tahmin edilmesine yönelik olarak Şekil' de gösterilen grafiği önermiştir. Kum zeminlerdeki kazıklar için uç taşıma kapasitesi, $c = 0$ olduğundan, $Q_b = A_b \sigma'_{v0} N_q$ olur.

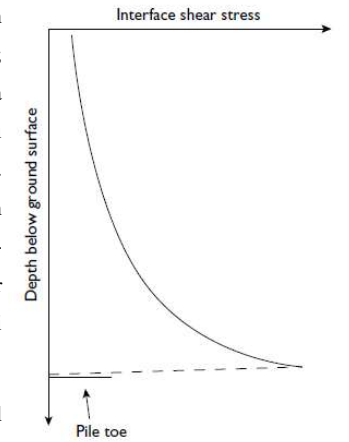
Bununla birlikte; Tomlinson (1986), kazığın zemine çakılması nedeni ile daha yüksek değerli ϕ açılarının kullanımının mantıksız olduğunu belirtmiştir. Kazığın gevşek zemine çakıldığında zemindeki direncin düşük olduğunu ve zeminde az miktarda sıkışma olacağını dolayısı ile kazığın zemine çakılmasının zeminde her zaman için hissedilir bir sıkışmaya neden olmayacağını savunmuştur. Bu nedenle de kazık tasarımında kullanılacak ϕ değerinin kazık zemine çakılmadan önceki, zeminin mevcut ϕ değeri olması gerektiğini söylemiştir. Delme-yerinde dökme kazıklar içinse delme işlemi sırasında zeminde gevşeme olacağından dolayı hem uç direnci hemde gövde sürtünme direnci hesaplarında kullanılacak ϕ açısı değerinin zeminin gevşek haldeki ϕ açısı değeri olması gerektiğini önermiştir. Bununla birlikte; Poulos ve ark. (1980), delme-yerinde dökme kazıklar için $\phi = \phi_1 - 3^\circ$ eşitliğinin kullanılmasını önermişlerdir.



Şekil. Meyerhof (1976) Taşıma Gücü Katsayıları N_c ve N_q

Kazık gövde direncinin değerlendirilmesinde K_s değerinin güvenilir bir şekilde tanımlanması oldukça önemlidir. Çünkü; K_s katsayısının değeri, kazığın zemine yerleştirilmesi sırasında oluşan değişiklikler ve zeminin gerilme tarihçesine bağlı olduğundan doğru değerin elde edilmesi son derece zordur. Çakma kazık durumunda zeminin deplasmanı yatay zemin gerilmelerini orijinal K_0 değerine göre artırmaktadır. Delme-yerinde dökme kazıklar için zeminin delinmesi işlemi sıkı bir kum zeminde gevşemeye neden olacağı için yatay gerilmeyi azaltır.

Kazıklar, orta-sıkı ve sıkı kum zeminlere çakıldıklarında radyal deplasmanlar kazığı çevreleyen zeminin pasif direnci nedeni ile sınırlandırılırlar. Bunun sonucunda da kazık ve kum zemin arasında yüksek içsel sürtünme açıları meydana gelir. Instrumente edilmiş çakma kazıklar üzerinde yapılan deneyler sonucunda Şekil 37' de gösterildiği gibi artan derinlikle birlikte ara yüzey sürtünmesinin üstel olarak arttığı ortaya konmuştur.



Şekil. Kum Zemine Çakılan Kazıkların Gövdesi Boyunca Ara Yüzey Sürtünme Direncinin Dağılımı

K katsayısının değeri; zeminin gerilme tarihçesi, kazık penetrasyon derinliğinin kazık çapına oranı (L/D), kazık geometrisi ve kazığın rijitliği, kazık gövdesinin imal edildiği malzeme etkilerine bağlıdır.

Zeminin gerilme tarihçesi, örselenmemiş durumdaki sükunetteki toprak basınç katsayısı K_0 ile nitelendirilmektedir. Normal konsolide zeminlerde K_0 derinlik boyunca sabit olup zeminin rölatif sıkılığına bağlıdır. Normal konsolide bir kum zemin için tipik K_0 değerleri aşağıda verildiği gibidir.

Rölatif Sıklık	K_0
Gevşek	0.50
Orta-sıkı	0.45
Sıkı	0.35

Eğer zemin aşırı konsolide ise, oluşumları boyunca geçen sürede belli bir zaman bir örtü yüküne maruz kalmışlarsa, K_0 değerleri üstteki tabloda verilen daha büyük olabilir. Bu durumda K_0 değerleri normal konsolide durumdaki değerlerin 1 ile 2 katı aralığında değerler almaktadır.

Zeminin aşırı konsolide olup olmadığına zeminin gerilme tarihçesine dayanılarak ya da SPT veya CPT gibi arazi deneyleri yapılarak karar vermek mümkündür. Normal konsolide zeminlerde yüzeye yakın derinliklerde penetrasyon dirençleri düşükken derinlikle bu direncin kabaca doğrusal olarak arttığı görülür. Aşırı konsolide zeminler ise sıkı derinliklerde yüksek direnç sergilerken, bazı durumlarda derine inildikçe direnç değerlerinde azalma olabilir.

20 no lu eşitlikte verilen τ_s değeri hesaplanırken, kum zeminlerde ve diğer kaba daneli zeminlerde K katsayısı, kazığın tipi ve zemine yerleştirilme yönteminin etkileri de göz önüne alınarak K_0 katsayısı ile ilişkilendirilerek K_s olarak gösterilir. Tipik K_s değerleri Tabloda gösterilmiştir.

$$\tau_s = K \sigma'_{v0} \tan \delta_r \quad (20)$$

Tablo. Yatay Zemin Gerilme Katsayısı, K_s , Değerleri

Installation method	K_s/K_0
Driven piles, large displacement	1–2
Driven piles, small displacement	0.75–1.25
Bored and cast-in-place piles	0.70–1
Jetted piles	0.50–0.7

K_s katsayısının değeri pratik amaçlar için aşağıdaki gibi alınabilir. Kum zeminler için $K_0 = 1 - \sin \phi$ dir.

$K_s = K_0$	Delme ya da Jet Kazıklar
$K_s \approx 1.4 K_0$	Düşük Deplasman Yapan Çakma Kazıklar
$K_s \approx 1.8 K_0$	Büyük Deplasman Yapan Çakma Kazıklar

Gevşek kum zemine çakılan kazıklar, kazık gövdesi çevresindeki ve kazık ucundaki zeminde sıkılaşmaya neden olur. Gövde sürtünme direncinde oluşacak artış için, Tablo' da verilen değerlere göre K_0 ile ilişkili olarak daha yüksek K_s değerleri kullanılabilir.

20 no lu eşitlikte yer alan ara yüzey sürtünme açısı, δ_r , Şekil 32 de gösterilen grafikler yardımı ile belirlenen zeminin ortalama efektif kayma direnci açısının bir katsayı ile çarpılması sonucu elde edilir. δ_r ' yi elde etmek için kullanılacak katsayı değerleri kazık malzemesine de bağlı olarak Kulhwy tarafından Tablo' da verildiği gibi önerilmiştir.

Tablo. Çeşitli Ara Yüzey Koşulları için Kazık/Zemin Sürtünme Açısı Değerleri

Pile/soil interface condition	Angle of pile/soil friction, δ
Smooth (coated) steel/sand	$0.5\phi - 0.7\phi$
Rough (corrugated) steel/sand	$0.7\phi - 0.9\phi$
Precast concrete/sand	$0.8\phi - 1.0\phi$
Cast-in-place concrete/sand	1.0ϕ
Timber/sand	$0.8\phi - 0.9\phi$

Delme-yerinde dökme kazıklar için kuyunun açılması sırasında gerçekleştirilen delme işlemi kazık ucu altındaki zeminde önemli derecelere varabilen gevşemelere neden olacaktır. Bu durumda; uç direncinde ve gövde sürtünme direncinde önemli mertebelere ulaşabilen azalmalar ortaya çıkabilir. O yüzden; hem uç direnci hem de gövde direnci, düşük relatif sıkılık değerleri göz önüne alınarak ($\phi = 28^\circ$ ila 30°) hesaplanmalıdır. Kazık taşıma gücü hesabı yapılırken; N_q ve $\tan\delta_r$ SPT ya da CPT ilişkileri kullanılarak elde edilen ϕ' değerine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Delme işlemine bağlı olarak, tanımlanan ϕ' değerinde azaltma yapılabilir. K_s katsayısı ise Tablo kullanılarak tanımlanabilir. Bu durumda; K_0 katsayısının zeminin gevşemiş halini temsil ettiği kabul edilir.

Sıkı kaba daneli zeminlerdeki kazıkların nihai taşıma kapasitesinin büyük bileşeni uç direncidir. Bununla birlikte; Şekil ** dan da görüldüğü gibi N_q değerleri zeminin kayma direnci açısı değerlerine karşı oldukça hassastır.

Bununla birlikte; kazık ucunun bastığı zeminde çakma nedeni ile oluşacak sıkılaşmayı dikkate almak için daha yüksek ϕ değeri ve buna bağlı olarak da daha büyük N_q değerleri kullanmak alışılmış bir uygulama değildir.

Tomlinson' a göre kazık gömülü uzunluğundan bağımsız olarak, kazığın maksimum uç direnci, q_b , genellikle 11000 kN/m^2 ile sınırlıdır (beton basınç dayanımı / kazık uç kesit alanı gibi düşünülebilir ve güvenlik katsayısını da unutmayalım).

Aynı kohezyonsuz zemin içerisinde yer alan çakma kazığın taşıma kapasitesi delme kazığa göre daha fazladır. Çünkü; delme kazık imal edilirken zeminde örselenme sonucu gevşeme meydana gelmektedir. De Beer (1965)' e göre delme-yerinde dökme bir kazığın uç direnci, çakma bir kazığının yaklaşık üçte biri kadardır.

$$q_{b\text{-delme yerinde dökme}} = (1/3) q_{b\text{-çakma}}$$

Kohezyonsuz zeminin gevşek halini göz önüne almak için $\phi = 28^\circ$ kabulü yapılabilir.

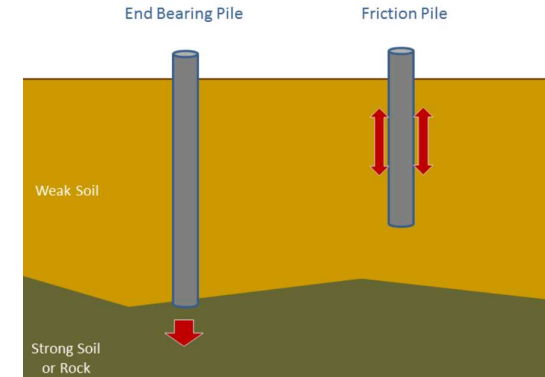
İnstrumente edilmiş kazıklar üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre 11 MN/m^2 ' den daha büyük nihai uç direnci değerine rastlanılmamıştır. Eğer; tasarımda, pik uç direnci 11 MN/m^2 kullanılıyorsa, kazığı derinlemesine orta sıkı ya da sıkı zeminlere çakmaya çalışmak çok anlamlı değildir. Çünkü; gövde sürtünme direncinde elde edilecek küçük bir artışa karşılık kazığın kırılma riski söz konusudur. Daha büyük çaplı ancak rölatif olarak daha kısa kazıklar kullanmak daha küçük çaplı uzun kazıklara göre daha avantajlı olabilir. Ancak; bazı durumlarda, uplift kapasitenin ya da yanallı yüklemeye karşı yeterli kapasitenin sağlanması için kazıkları daha derinlere çakmak gerekebilir.

Eğer; 11 MN/m^2 değerindeki pik nihai uç direnci tasarım için seçilirse kazığın değerlendirilen maksimum servis yükünü karşılamak için önemli miktarda gövde sürtünme direnci üretmesi gerekecektir. Bu durum, gevşek, orta-sıkı kum zeminlerde olası iken sıkı kumlarda ya da orta sıkı, sıkı kumlu çakıllarda mümkün değildir. Orta sıkı, sıkı kumlu çakıllarda (özellikle taşlı çakıllarda) 11 MN/m^2 ' den daha büyük uç dirençleri kullanmak daha uygun olabilir.

Açık deniz petrol platformu (off-shore petroleum platform) yapılarını destekleyen kazıklar, gerekli uplift kapasiteyi gövde sürtünme direnci ile karşılayabilmek için deniz tabanından itibaren oldukça derinlere çakılmalıdır. Gerekli penetrasyon derinliğini sağlayabilmek için genellikle açık uçlu boru kazıklar kullanılmaktadır.

4.2.3. KAYADAKİ KAZIKLARIN EKSENEL YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ

Kazığın bir yarı sonsuz zemin içinde olmayıp tabanının sağlam bir kaya zemine bastığı düşünülebilir. Bu durumda kazık ile zemin arasında göreceli hareket oluşmaz çünkü çevredeki zeminde herhangi bir oturma olmayacağı gibi kazık da oturmaz, bir kolon gibi durur. Bu nedenle direnç toplamının çevre sürtünmesi elemanı oluşmaz ve kazık uygulanan yükü yalnızca tabanından aldığı direnç ile karşılar. Bu kazıklara “Uç Kazığı” denir. Diğer bir tanımla uç kazıkları, yükü kazığın tabanının dayandığı veya içine girdiği sağlam bir tabakaya (kaya veya sıkı kum-çakıl gibi) kazık uç direnci yolu ile aktarırlar ve çevre sürtünmesi bu kazıklarda ihmal edilebilir.



<https://basiccivilengineering.com/wp-content/uploads/2016/11/Untitled.png>

Eğer bir kazık eleman ucu sağlam, çatlaksız (intact) bir kayaya basacak şekilde imal edilebilirse kazığın güvenli çalışma yükü, kazık ucundaki en kesit alanında kazık malzemesinin izin verilebilir çalışma gerilmesi değerine göre belirlenir. Diğer bir ifade ile bu tip bir kazığın taşıma gücü doğrudan doğruya kazığın mekanik dayanımının (betonarme ise bu kesitin basınç dayanımının) bir güvenlik katsayısı ile bölünmesi suretiyle elde edilir. Kazığın burkulmaya karşı kendisini çevreleyen zemin ortamınca desteklendiği kısa bir kolon gibi davrandığı kabul edilebilir.

Kazık eleman bir su ortamı ya da çok yumuşak bir kil tabakası veya akışkan kıvamda bir silt tabakası boyunca kaya ortama basıyorsa o zaman uzun bir dikme eleman gibi davranacağı kabulü ile burkulma davranışı mutlaka göz önüne alınmalıdır. Kayanın bu yüklemeye yenilmeden karşı koyabilmesi, kısmen kayanın basınç mukavemetine ve kısmen de kaya kütleindeki eklemlerin ve fisürlerin sıklığına ve eğimine bağlıdır. Süreksizliklerin arasının kapalı ya da açık olması ya da bozunmuş malzeme ile dolu olması gibi faktörler de davranışını etkilemektedir.

Kaya sağlam ise yatayda ya da yatayla küçük açılarda kapalı dar fisürler varsa bu durumda oldukça yüksek uç taşıma kapasiteleri elde edilebilir. Eğer, yatay ya da yataya yakın çatlakların arası açık (geniş) ise kazık ucu altındaki kaya kütleinde bir miktar yenilmeler oluşacak ancak hareketin miktarı, narin en kesit alanına sahip bir kazık elemanın oluşturduğu etki derinliği kazık ucundan çok derinlere uzanmadığından, ille de büyük olmayacaktır.



([https://en.wikipedia.org/wiki/Joint_\(geology\)/#/media/File:Abiskorock.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Joint_(geology)/#/media/File:Abiskorock.JPG))

Nihai taşıma kapasitesini hesaplamak için aşağıda verilen yöntem kaya formasyonlarındaki arazi deney sonuçları ya da karot numuneler üzerinde yapılmış laboratuvar deney sonuçları ile kazık yükleme deneyleri arasındaki korelasyonlara dayanmaktadır. Kaya formasyonlarındaki eklemlerin aralarındaki mesafenin 600 mm ya da daha büyük olduğu yerlerde ya da eklemlerin sıkıca kapalı olduğu ve kazık imal edildikten sonra da kapalı kaldığı yerlerde nihai uç direnci aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$q_b = 2N_\phi q_{uc}$$

$$\text{Taşıma gücü katsayısı, } N_\phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

Taşıma gücü katsayısında (N_ϕ) kaya kütleinde yer alan eklemlerin neden olduğu değişimler karşılaştırmalı olarak Tablo 4.13' de gösterilmiştir. Ucu zayıf kilit, silttaşı ve kumtaşı basan çakma ve delme-yerinde dökme kazıkların gözlemlenen nihai uç dirençleri kullanılarak yukarıda verilen eşitliğe göre bu uç dirençlere karşılık gelen N_ϕ katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Bu kayaçlar (kilit, silttaşı ve kumtaşı) için Wyllie tarafından önerilen ϕ açısı değerleri 27° ile 34° aralığında olup taşıma gücü katsayısı eşitliğine göre N_ϕ katsayısı değerleri 2.7 ile 3.4 aralığındadır.

Table 4.13 Observed ultimate base resistance values of piles terminated in weak mudstones, siltstones, and sandstones

Description of rock	Pile type	Plate or pile diameter (mm)	Observed bearing pressure at failure (MN/m ²)	Calculated N_ϕ
Mudstone/siltstone moderately weak	Bored	900	5.6	0.25
Mudstone, highly to moderately weathered weak	Plate test	457	9.2	1.25
Cretaceous mudstone weak, weathered, clayey	Bored	670	6.8	3.0
Weak carbonate siltstone/sandstone (coral detrital limestone)	Driven	762	5.11	1.5
Calcareous sandstone weak	Driven tube	200	3.0	1.2
Sandstone, weak to moderately weak	Driven	275	19 ^a	1.75

Note
a From dynamic pile test.

Tablo 4.13' te verilen hesaplanmış N_ϕ değerlerinin, aralarındaki mesafenin geniş olduğu kapalı eklemler içeren kayalar için önerilen değer aralığı 2.7 ile 3.4' e göre önemli derecede düşük oldukları görülmektedir. Elde edilen N_ϕ değerlerindeki azalmanın nedeni büyük ihtimalle deneylerin yapıldığı kaya formasyonlarının eklem özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Eklem aralıklarının ölçüsü kaya kalite göstergesi olan RQD değeridir.

c ve ϕ parametrelerini elde etmek için örselenmemiş zayıf kaya örnekleri üzerinde laboratuvar deneylerinin yapılabildiği durumlarda, Kulhawy ve Goodman kazık ucu altındaki çatlaklı kayaların (jointed rock) nihai taşıma kapasitelerinin aşağıdaki eşitlikle elde edilebileceğini belirtmiştir.

$$q_{ub} = cN_c + \gamma DN_q + \gamma \frac{BN_\gamma}{2}$$

Bu eşitlikte yer alan;

- c ; drenajsız kayma mukavemeti,
- B ; uç genişliği,
- D ; kaya yüzeyinden itibaren uç derinliği (soketlenme durumunda),
- γ ; kaya kütlelerinin efektif yoğunluğu,
- N_c , N_q ve N_γ ; ϕ açısına bağlı taşıma gücü katsayıları olup Şekil 4.30 kullanılarak elde edilir.

Yukardaki eşitlik, sürekli bir temel altındaki kama göçmesi şartlarını temsil etmektedir. Ancak; Terzaghi' nin yüzeysel temeller için taşıma gücü eşitliği ile karıştırılmamalıdır. Yukarda verilen eşitlik şerit bir yükleme için olduğundan cN_c terimi, kare kazıklar için 1.25, dairesel bir kazık ucu için de 1.2 katsayısı ile çarpılmalıdır. Ayrıca; $\gamma BN_\gamma/2$ terimi kare ya da dairesel en kesitli kazıklar için, sırası ile, 0.8 ve 0.7 katsayıları ile düzeltilmelidir. $\gamma BN_\gamma/2$ terimi, cN_c terimi ile karşılaştırıldığında küçük olduğundan çoğunlukla ihmal edilmektedir.

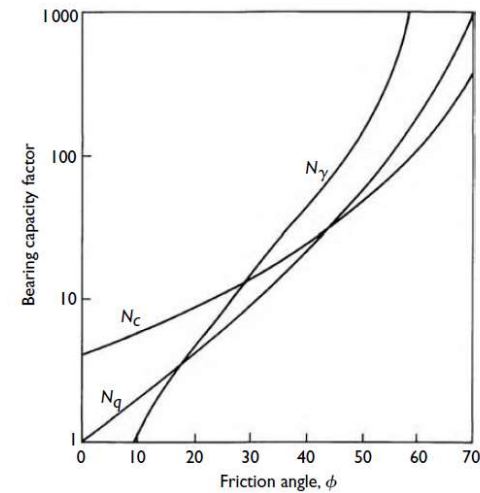


Figure 4.30 Wedge bearing capacity factors for foundations on rock (reprinted from Pells and Turner^(4.42)).

c ve ϕ parametrelerini tanımlamak amacı ile laboratuvar deneyleri için güvenli numunelerin elde edilmesinin zor olduğu durumlarda bu parametrelerin tek eksenli basınç mukavemeti ve RQD ile ilişkilendirilmesi Tablo 4.14' e göre yapılabilir. Kulhawy ve Goodman, Tablo 4.14' te gösterildiği gibi, nihai uç direnci ile RQD değerinin ilişkilendirilebileceğini göstermiştir.

Table 4.14 Ultimate base resistance of piles related to the uniaxial compression strength of the intact rock and the RQD of the rock mass

RQD (%)	q_{ub}	c	ϕ (°)
0–70	$0.33q_{uc}$	$0.1q_{uc}$	30
70–100	$0.33–0.8q_{uc}$	$0.1q_{uc}$	30–60

$q_{ub} = cN_c + \gamma DN_q + \gamma \frac{BN_\gamma}{2}$ eşitliğinden elde edilen maksimum uç direncinin mobilize olması için kazık ucunun muhtemelen kazık çapının %20' si mertebelerde oturma yapması gerekmektedir. Bu nedenle, en az 2.5 değerinde, yeterli bir güvenlik katsayısı değeri kullanılarak servis yükleri etkisindeki oturmaların izin verilebilir sınırlar içinde kalacağından emin olunur.

q_{uc} (uniaxial compression strength) değerleri, çatlaksız kayaya ait karot numuneler üzerinde yapılmış nokta yükleme deney sonuçları (point load strength) kullanılarak tanımlanabilir.

Nokta Yükleme Dayanımı (Point Load Index); bir kayanın mukavemetinin hesaplanmasında kullanılan kabul görmüş bir test yöntemidir. Nokta yükleme deneyinde bir kaya örneği konik iki uç arasında göçme meydana gelene kadar basınca maruz bırakılmaktadır. Nokta yükleme deneyi düzeltilmemiş nokta yük mukavemeti indeksinin (I_s) tanımlanmasına izin vermektedir. Elde edilen değer, standart eşdeğer çap değeri 50 mm için düzeltilmelidir (I_{s50}). Nokta yükleme dayanımı değerinin K gibi bir dönüşüm katsayısı ile çarpılması sonucu numuneye ait serbest basınç mukavemeti elde edilmektedir. Numuneye ait serbest basınç mukavemeti değerinin nokta yükleme dayanımının ortalama 20 – 25 katı kadar olduğu literatürde yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur. Bununla birlikte; çok sayıda farklı kaya türü üzerinde yapılan deneyler özellikle anizotropik kayalarda bu oranın 15 ile 50 aralığında değişebildiğini göstermiştir (Duncan, C. W., 1999).

Serbest Basınç Mukavemeti $q_u = K * I_s$

Gözenekli kireçtaşı, volkanik kayalar ve şist (şeyl – killi yaprak taşı) gibi birkaç kaya birimi haricinde kayaların arazideki dayanımları temel betonunun basınç mukavemetinden daha büyüktür. Ancak; kayanın çok çatlaklı ve çok parçalı olduğu, kaya parçaları arasında kaymaların olduğu gevşek durumdaki kayalar için belirtilen hal geçerli değildir. Kaya ortamlardaki problem, kayanın sağlamlığının tanımlanması ve serbest basınç mukavemeti için çatlaksız parçalardan karot örnekler alınmasıdır.

Kayaların izin verilebilir taşıma kapasitesi, kayanın jeolojisinden (oluşumundan; çatlaklı, ayrılmış, sağlam vb.), kaya tipinden (kireç taşı, tuf, bazalt, granit) ve RQD değerinden etkilenmektedir. Kayaların taşıma kapasiteleri değerlendirilirken genellikle yüksek güvenlik katsayısı değerleri kullanılır. Güvenlik katsayısı değeri bir dereceye kadar RQD değerine de bağlıdır. Şöyle ki; RQD değerinin 0.80 olduğu durumda, RQD değerinin 0.40 olduğu durumda kullanılan güvenlik katsayısı kadar yüksek bir değerin kullanımı gerekmez.

RQD değeri, aşağıda gösterildiği gibi nihai taşıma kapasitesinin azaltılmasında kullanılmadıkça, 0.75' den küçük RQD değerleri için güvenlik katsayısı değeri genellikle 6 ila 10 aralığında bir değer olarak kullanılır.

$$q'_{ult.} = q_{ult.} \times (RQD)^2$$

$$q_a = q'_{ult.} / SF$$

$$SF = 3 \text{ alınabilir.}$$

Kaya kalitesinin derecesi (RQD-Rock Quality Designation), elastisite modülü ve/veya serbest basınç mukavemetinin azaltılmasında ve arazi değerlerinin tahmininde kullanılabilmektedir (Bowles,1996). Kaya sınıfına göre kullanılan azaltma oranları Tablo 1.'te verilmiştir.

Tablo 1. RQD Değerine Göre Azaltma Oranları

RQD	Kaya Tanımı	Arazi / laboratuvar
< 0.25	Çok Zayıf	0.15
0.25 – 0.50	Zayıf	0.20
0.50 – 0.75	Orta	0.25
0.75 – 0.90	İyi	0.30 – 0.70
> 0.90	Çok İyi	0.70 – 1.00

**TABLE 4-11
Range of properties for selected rock groups; data from several sources**

Type of rock	Typical unit wt., kN/m ³	Modulus of elasticity E , MPa $\times 10^3$	Poisson's ratio, μ	Compressive strength, MPa
Basalt	28	17–103	0.27–0.32	170–415
Granite	26.4	14–83	0.26–0.30	70–276
Schist	26	7–83	0.18–0.22	35–105
Limestone	26	21–103	0.24–0.45	35–170
Porous limestone		3–83	0.35–0.45	7–35
Sandstone	22.8–23.6	3–42	0.20–0.45	28–138
Shale	15.7–22	3–21	0.25–0.45	7–40
Concrete	15.7–23.6	Variable	0.15	15–40

*Depends heavily on confining pressure and how determined; E = tangent modulus at approximately 50 percent of ultimate compression strength.

Tablo 4.11' de farklı kaya sınıfları için tipik değer aralıkları sunulmuştur.

Yüksek basınçlı üç eksenli deneylerden elde edilen kaya örneğine ait içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri ile Terzaghi taşıma gücü teorisi kullanılarak da kayaların taşıma kapasitesi tahmin edilebilir. Sağlam kaya (sound rock) için Stagg ve Zienkiewicz (1968) taşıma gücü katsayılarının aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Taşıma gücü formülünde, bu taşıma gücü katsayıları ile birlikte Terzaghi'nin önerdiği şekil katsayıları kullanılır.

$$N_q = \tan^6 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad N_c = 5 \tan^4 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad N_\gamma = N_q + 1$$

Kayalarda içsel sürtünme açısı değeri nadiren 40°' den azdır. Çoğunlukla, içsel sürtünme açısı değerleri 45° ile 55° aralığındadır. Kayaların kohezyon değerleri ise 3.5 ila 17.5 MPa aralığındadır.

Dolayısı ile yukarda verilen taşıma gücü eşitliği kullanıldığında çok yüksek bir nihai taşıma kapasitesi değeri elde edileceği açıktır. Bu durumda; izin verilebilir taşıma gücünün üst sınırı, beton kazıklarda uç kesit alanına göre elde edilen malzeme dayanımı göz önünde tutularak belirlenirken metal kazıklarda ise izin verilebilir basınçtan (metal kazığın) büyük olamaz.

Kayalarda içsel sürtünme açısı değeri zeminlerdekine benzer olarak gerilme bağlıdır. Bununla birlikte; kaya parametreleri ile ilgili olarak birçok kaynak üzerinde yapılan incelemeler sonucunda; kum zeminlere benzer olarak; kireç taşı, kalker (limestone) ve şist (shale) haricinde kayaların çoğunluğunda içsel sürtünme açısı değeri olarak 45° kullanılabilir. Kireç taşı, kalker (limestone) ve şist (shale) için de 38° ile 45° aralığında bir değer alınabilir. Benzer şekilde; birçok durumda, kohezyon için muhafazakar bir değer olarak 5 MPa kullanılabilir ($s_u = 5$ MPa).

Karot yöntemi ile bozulmamış bütün halde kaya örnekleri elde edilemediğinde (ki bu durumda RQD = 0 olacaktır) ortam bir zemin kütlesi gibi değerlendirilmelidir. Taşıma kapasitesi de ϕ ve c parametreleri en iyi şekilde tahmin edilerek taşıma gücü eşitlikleri yardımı ile hesaplanmalıdır (Bowles).



Birçok durumda kayanın izin verilebilir taşıma gücü, bozulmamış bütün haldeki kaya örneklerinden elde edilen, serbest basınç mukavemeti değerinin üçte biri ile onda biri aralığında bir değer olarak kabul edilir. Üçte biri ile onda biri aralığındaki seçimde RQD değeri bir rehber olarak kullanılır. Örneğin; küçük bir RQD değeri için onda bir kullanılır.

Radye ya da tekil temel, direk olarak kaya üzerine oturabilir.

Kaya taşıma kapasitesi içeren birçok durum, kaya içerisinde gövde çapının iki ila üç katı derinlikte soketlenen büyük çaplı delme-yerinde dökme kazıklar ya da pier temeller (drilled piers) gerektirir. Bu tip temellerde, izin verilebilir taşıma gücü, $q_a = q_u$ ila $2.5q_u$ değerlerindedir. q_u , bozulmamış bütün haldeki karot örneklerden elde edilen tek eksenli (ya da serbest) basınç mukavemetidir. Bu değer, q_u değerinin üçte biri ila onda biri şeklinde hesaplanan izin verilebilir taşıma gücü değerinden önemli derecede büyüktür. Taşıma gücü değerindeki bu önemli orandaki artış, pier temelin kaya içerisine gövde çapının iki ila üç katı derinlikte soketlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Üçte biri ila onda biri yaklaşımı ile hesaplanan durumda temel kaya yüzeyinde yer almaktadır.

- Kaya birimlerin iyileştirilmesinde, genellikle, bir seri küçük kuyu açılarak (sondaj kuyusu gibi) kaya ortamdaki çatlakların doldurulması için basınçlı çimento harcı enjekte edilir. harç sertleştikten sonra kaya kütlelerinin bütünlüğü sağlanmış olur. Eklemlerin yeterince harçlanıp bütünlüğün oluşumu, iyileştirme sonrası alınan karot örnekler üzerinde deney yapılarak değerlendirilebilir.
- Kazık gövdesini çevreleyen zemin katı kil ya da kum zemin ise kazığın gövdesi boyunca burkulmaya karşı zemin tarafından desteklendiği kabul edilir. Bu gibi durumlarda, kazığın taşıma kapasitesi, kazığın minimum en kesit alanında kazık malzemesinin güvenli yük değeri kullanılarak tanımlanır. Eğer kazıklar kazık boyunca zayıf zemin tabakalarının bulunduğu profillerde imal ediliyorsa, kazık malzemesindeki mevcut gerilmeye göre servis ya da işletme yükü tanımlamak mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda kazığın kaya içerisine penetre olan uzunluğu boyunca sürtünme direnci ve uç direncinin hesaplanması gereklidir (Murty).
- Rijit kazıklar arasındaki gerilme birikimleri ihmal edilebildiğinden uç kazıkları kullanılarak tasarlanan bir kazık grubunda grup etkisi nedeni ile taşıma gücünde bir azaltma yapılmaz. Diğer bir deyişle grubun taşıma gücü, tek kazıkların taşıma gücünün toplamına eşittir.
- Uç kazıklarının tasarımındaki önemli nokta, kazıkların dayandığı sağlam zeminin tesbitinde yanlıya düşülmesidir. Bazı hallerde sağlam bir tabakaya rastlandığı zannedilebilir, ancak bu, kalınlığı fazla olmayan bir tabaka olabilir ve altında da sıkışabilirliği yüksek, yumuşak kil gibi kalın bir formasyon yer alabilir. Böyle bir durumda, kazıkların uç basıncı dağılımının etkisi ile yumuşak tabaka oturma yaparak, kazıkların da oturmasına sebep olur. İyi bir zemin etüdü, böyle bir yanlıya önler.
- Tek eksenli ya da üç eksenli basınç deneyleri için karot numunelerin bulunması gereklidir. Her iki deney için de $L/d > 2$ olan numuneler kesilerek $L/d = 2$ boyutuna getirilir. Serbest basınç mukaveti ya da eksenel basınç mukavemeti kullanılarak $c = q_u / 2$ şeklinde elde edilebilmesine karşın ϕ açısı elde edilememektedir. Bu nedenle N_c terimi hesaplanamamaktadır. N_c katsayısı için ($\tan^2 45^\circ = 1$), iyi bir tahmin değildir. Yüksek basınçlı üç eksenli deneylerde arazideki gerilme koşullarına göre hücre basıncının benzeştirilmesi önemlidir.

Yapılan karot çalışmaları sırasında alınan numuneler (Boy/Çap), $L/D \approx 1.0$ olarak hazırlanıp tek eksenli basınç deneyleri (UCS) yapılmıştır. ASTM, deney yapılacak silindirik örnekler için L/D oranını 2.0 - 2.5 olarak kabul etmektedir. L/D oranının 2.0 – 2.5 değerinden sonra tek eksenli basınç dayanımlarının hemen hemen sabit kaldığı ifade edilmektedir.

Boyut etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, L/D oranı arttıkça dayanımın düştüğü belirtilmektedir. Bununla birlikte; tuf örnekleri üzerinde yapılan, L/D oranının 1.5'tan 2.5'a kadar değiştiği ancak tek eksenli basınç dayanımlarında önemli bir değişimin gözlenmediği çalışmalar da bulunmaktadır.

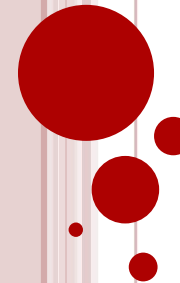
Bu çalışmaların yanı sıra, daha küçük L/D oranına sahip numunelerden elde edilen tek eksenli basınç değerlerinin olması gereken değerlerine dönüştürülmesi için Protodyakonov ve ASTM tarafından, $(L/D)_{\text{sınır}} = 2$ kabul edilerek aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$UCS_2 = 8UCS / (7 + 2 D/L)$$

$$UCS_2 = UCS / (0.88 + 0.24 D/L)$$

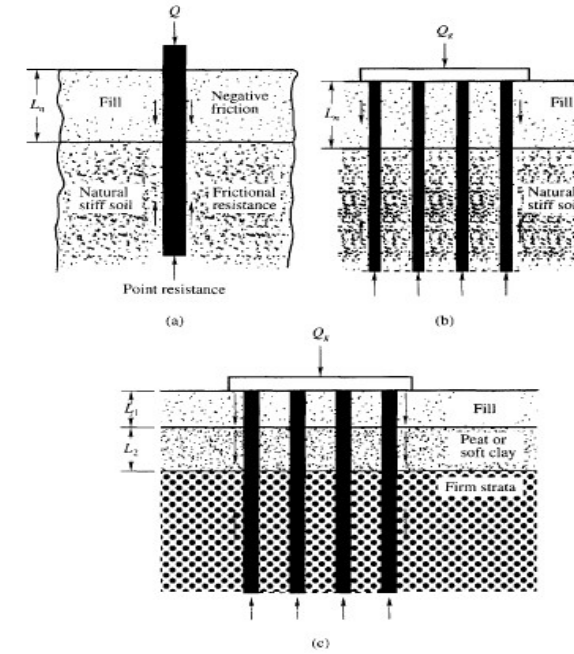


4.2.4. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ



Aşağıdaki şekilde, üstte yer alan yeni yapılmış bir kohezyonlu zemin dolgusu ve devamında da kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamlamış bir zemin tabakasından oluşan zemin profili içerisinde yer alan tek kazık ve kazık grubu görülmektedir. Dolgu tabakası kendi ağırlığı altında konsolide olmaya başladığında kazık gövdesi yüzeyinde de bir sürüklenme etkisi oluşacaktır. Kazık gövdesi yüzeyinde oluşan bu sürüklenme etkisi 'negatif sürtünme' olarak adlandırılır.

Negatif sürtünme, dolgu malzemesi gevşek kohezyonsuz zemin olduğunda da gerçekleşebilir. Bununla birlikte; şekilde gösterildiği gibi dolgu tabakasının Turba ya da Yumuşak Kil tabakası üzerinde yer alması durumunda da negatif çevre sürtünmesi davranışı meydana gelebilmektedir. Bu tip sıkışabilir tabakalar üzerindeki ilave yüklemeler dolguda aşırı oturmalara neden olur. Bunun sonucunda da kazık yüzeyinde sürüklenme etkileri meydana gelir.



Şekil. Kazıklarda Negatif Sürtünme

Negatif çevre sürtünmesi, yer altı su seviyesinin düşürülmesi sonucunda da oluşabilir. Yer altı su seviyesinin düşürülmesi sonucu artan efektif düşey gerilmeler zeminde konsolidasyona neden olacağından oturmalar da kazık gövdesinde sürtünme kuvvetlerinin gelişmesine neden olacaktır. Kazıkların nihai taşıma kapasiteleri hesaplanırken mutlaka göz önüne alınmalıdır. Negatif çevre sürtünmesinin oluşma ihtimalinin olduğu durumda güvenlik katsayısı değeri aşağıdaki eşitlik ile değerlendirilir.

$$F_s =$$

$$\frac{\text{Tek Kazığın Nihai Taşıma Kapasitesi}}{\text{Tasarım ya da Servis Yüğü+Negatif Çevre Sürtünme Yüğü}}$$

Şekil (a)' da gösterildiği gibi dolguda yer alan tek kazık için negatif sürtünme kuvvetinin, F_n , büyüklüğü aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

- Kohezyonlu zemin için

$$F_n = P L_n s$$

- Kohezyonsuz zemin için

$$F_n = (1/2) P L_n^2 \gamma K \tan \delta$$

L_n ; kazığın sıkışabilir malzeme içerisindeki uzunluğu,

s ; dolgudaki kohezyonlu zeminin kayma mukavemeti,

P ; kazığın çevresi,

K ; genellikle, aktif ve pasif toprak basınç katsayıları arasında yer alan, toprak basınç katsayısı,

δ ; $\phi/2$ ile ϕ aralığında değişen sürtünme açısı değeridir.

Kazık Gruplarında Negatif Çevre Sürtünmesi

Kazık Gruplarında Negatif Çevre Sürtünmesi, F_{ng} , aşağıda anlatıldığı gibi hesaplanabilir.

$$F_{ng} = n \times F_n$$

$$F_{ng} = s L_n P_g + \gamma L_n A_g$$

Bu eşitliklerde yer alan;

n ; gruptaki kazık sayısıdır,

γ ; L_n derinliğine kadar kazık grubu içerisinde bulunan zeminin birim hacim ağırlığıdır,

P_g ; kazık grubunun çevresidir,

A_g ; P_g grup çevresi içerisinde kalan kazık grubu kesit alanıdır,

s ; kazık grubu çevresi boyunca yer alan zeminin kayma mukavemetidir.

Birinci eşitlikte; tek kazıklardaki çevre sürtünmesinin bütün kazıklarda eşit olduğu varsayımı ile kazıklardaki negatif çevre sürtünmesinin toplamının grup negatif çevre sürtünmesine eşit olduğunu kabul eder.

İkinci eşitlikte ise kazık çevresi boyunca bir blok kayma göçmesi oluşacağı ihtimali ile kazık grubu içerisindeki zemin hacmi, $\gamma L_n A_g$, de hesaplara dahil edilir.

Bu iki eşitlikten elde edilen değerlerden büyük olanı tasarımda kullanılır.

Dolgu tabakası altında sıkışabilir bir tabakanın bulunduğu durumda (Şekil-c) ise toplam negatif çevre sürtünmesi aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$F_{ng} = n (F_{n1} + F_{n2})$$

$$\begin{aligned} F_{ng} &= s_1 L_1 P_g + s_2 L_2 P_g + \gamma_1 L_1 A_g + \gamma_2 L_2 A_g \\ &= P_g (s_1 L_1 + s_2 L_2) + A_g (\gamma_1 L_1 + \gamma_2 L_2) \end{aligned}$$

L_1 ; dolgu derinliğidir,

L_2 ; sıkışabilir doğal zemin tabakasının derinliği,

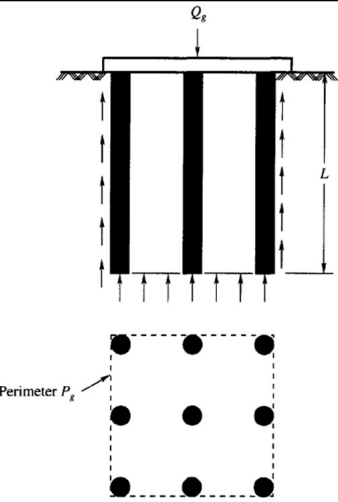
s_1, s_2 ; sırası ile dolgu ve sıkışabilir tabakanın kayma mukavemeti değerleri,

γ_1, γ_2 ; sırası ile dolgu ve sıkışabilir tabakanın birim hacim ağırlık değerleri,

F_{n1} ; dolguda, tek kazığın negatif çevre sürtünmesi,

F_{n2} ; sıkışabilir tabakada, tek kazığın negatif çevre sürtünmesi,

Kazık gruplarının tasarımında, birinci ve ikinci eşitlikle elde edilen değerlerden yüksek olanı kullanılır.



Kare bir kazık grubu, üstte yeni yapılmış bir dolgu tabakası içeren zemin profili içerisinde yer almaktadır. Dolgunun derinliği, $L_n = 3.0$ m dir. Kazık çapı 30 cm olup kazıklar grup içerisinde aralarında (merkezden merkeze) 90 cm mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Serbest basınç mukavemeti, $q_u = 60$ kN/m² ve birim hacim ağırlığı $\gamma = 15.0$ kN/m³ olan kohezyonlu zemin için kazık grubundaki negatif sürtünme yükünü hesaplayınız.

The negative frictional load on the group is the maximum of [(Eqs (15.82) and (15.83)]

(a) $F_{ng} = nF_n$, and (b) $F_{ng} = sL_n P_g + \gamma L_n A_g$,
 where $P_g = 4 \times 3 = 12$ m, $A_g = 3 \times 3 = 9$ m², $c_u = 60/2 = 30$ kN/m²

(a) $F_{ng} = 9 \times 3.14 \times 0.3 \times 3 \times 30 = 763$ kN

(b) $F_{ng} = 30 \times 3 \times 12 + 15 \times 3 \times 9 = 1485$ kN

The negative frictional load on the group = 1485 kN.