

## Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı

**Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU**  
İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### 1. Giriş

Bir yapı sistemi genel olarak iki kısımda tanımlanır. Üst kısım üst yapı olarak adlandırılır. Zeminle üst yapı arasındaki ara bölge de temel adıyla tanımlanır. Bir yapı sistemi üst yapı, temel ve zemin bileşiminden oluşur. Temel, zeminle doğrudan temas halinde olan ve üst yapı yüklerini zemine aktaran aracı yapı kısmıdır. Bir başka deyişle, temel, yapı yüklerini ve yükün dağılımını altta bu yükü taşıyacak zeminin taşıyabileceği şekle dönüştürerek aktaran bir sistemdir. Bu niteliği ile de hem yapıdan hem de zeminden etkilenir. Buna göre, temel tasarımı bir yapı-zemin etkileşimi problemidir.

Temeller iki ana gruba ayrılırlar:

- (1) Yüzeysel temel (Tekil temel, sürekli temel, radye temel)
- (2) Derin temel (Kazıklar, ayaklar ve kesonlar).

Temeller inşa edilecekleri zeminin şartlarına büyük ölçüde bağlıdır. Bazı zeminler sert, bazıları yumuşaktır. Sert zeminler ıslanınca yumuşayabilir, bazıları şişer ve yüzeysel temelleri kaldırabilir, bazıları göçer ve temel içine batar. İyi temel tasarımı tüm olumsuz koşul ve değişimlerde kendisinden beklenen fonksiyonu yerine getirecek şekilde yapılan tasarımdır. Önemli bir yapının temel sisteminin tasarımında yapılan hatalar veya yanlış uygulamalar günün birinde bir şekilde ortaya çıkabilir. Bir yapı ve temeli çeşitli afetlere karşı başarıyla ayakta durabiliyorsa, ancak o zaman başarılı bir tasarım ve uygulama yapıldığı düşünülebilir.

Temel, üst yapı yüklerini taşıyıcı zemin tabakalarına aktarırken zeminde aşırı gerilmeye sebep olmamalıdır. Bu sebeple emniyetli temel tasarımında uygun bir güvenlik sayısı uygulanmalıdır. Kullanılan güvenlik sayısı (i) Temel zemininin kayma göçmesine karşı (ii) Aşırı oturmalara karşı yeterli güveni sağlamalıdır.

Zeminin kayma göçmesine karşı ulaşabileceği en büyük mukavemet (nihai taşıma gücü,  $q_u$ ) olduğuna göre emniyetli taşıma gücü ( $q_a$ ) aşağıdaki iki değerden küçük olanı olarak seçilir.

- (1) Kayma göçmesine göre emniyetli taşıma gücü,  $q_u / GS = q_{a1}$
- (2) Oturma kriterinin izin verdiği emniyetli taşıma gücü,  $q_{a2}$

Nihai taşıma gücü hesabı taşıma göçmesi mekanizması ve bu göçme durumuna ulaştıran statik denge hesabı yapılarak bulunur. Tüm statik denge problemlerinde olduğu gibi göçme mekanizmasının tanımlanmasının ardından bu mekanizmaya etki eden, göçüren kuvvetlere (gerilmeler) karşı, karşı koyan kuvvetler (gerilmeler) tanımlanır. Bu kuvvetlerin karşılıklı tam dengesi göçmeyi gösterir. Yani göçmeyi başlatan güvenlik sayısı 1.0'dir.

Göçmeye karşı koyan kuvvetleri oluşturan zeminin kayma mukavemeti parametreleridir. Bir zeminin kayma mukavemeti, zemin kütesine uygulanabilen en yüksek kayma gerilmesidir. Kayma (göçme) düzlemi boyunca kayma göçmesine sebep olan kayma gerilmeleri o zeminin taşıyabileceği en yüksek kayma gerilmesidir, dolayısıyla da kayma mukavemetidir. Buna göre kayma mukavemeti sınır değerdir. Kayma mukavemeti, plastik denge durumuna karşı gelen değerdir, yani geri dönüşü yoktur ve göçme durumudur.

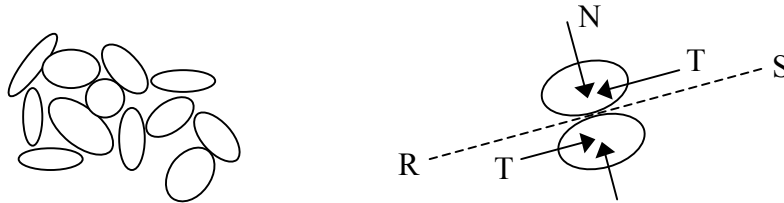
Zeminde kayma mukavemeti zeminin iki özelliği ile oluşur:

- (1) İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ )
- (2) Kohezyon ( $c$ )

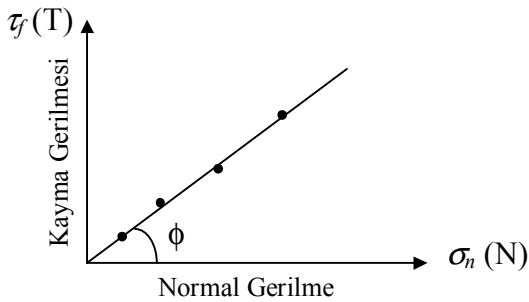
### İçsel Sürtünme Açısı

Zeminin önemli kayma mukavemeti parametresi  $\phi$ 'dir. Çünkü  $c$ 'ye nazaran genel ve tüm zeminler için davranışı kapsayan bir parametredir. Sürtünme birbirleri ile temas halinde olan zemin tanelerinin birbirine dayanmasından ve birbirine gerilme nakletmesinden kaynaklanır. Zemin üç fazlı bir ortamdır. Yani, zemin katı danecikleri, su ve hava zeminin üç bileşenidir. Bu üç bileşenin karışım halinde bulunduğu zemin ortamında bu bileşenlerin birbirlerine göre oranları davranış üzerinde etkilidir ve belirleyicidir. Sürtünmeden kaynaklanan kayma direncinin değeri değme yüzeyine dik etki eden normal kuvvet  $N$ 'ye de bağlıdır.  $T$ 'nin sınır değeri  $N$ 'ye bağlı olarak artar. Kayma düzlemi üzerinde göçme anında etkili olan kayma gerilmesi kayma mukavemetidir. Buna göre kayma mukavemeti aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi$$



Şekil 1: Taneler arası gerilme nakli



$$\sigma_n = \frac{N}{\text{Temas Yüzey Alanı}}$$

$$\tau_f = \frac{T}{\text{Temas Yüzey Alanı}}$$

Şekil 2: Göçme zarfı

### Görünen Kohezyon

Silt ve killerde tane yapısı ve taneleri çevreleyen elektriksel negatif yüke su moleküllerinin tutunması ve taneler arasında bir ara yüzey oluşturarak taneleri birbirine yapıştırması sebebiyle ortaya çıkan ilave bir kayma direnci parametresi vardır. Bu da klasik zemin mekaniğinde kohezyon, günümüz terminolojisinde görünen kohezyon olarak adlandırılır. Normal gerilme etkisi sıfır olsa bile silt ve killer gibi kohezyonlu zeminlerde bir miktar kayma mukavemeti kohezyon sebebiyle bulunur.  $c$  ile gösterilen kohezyonun değeri temiz kum ve çakıllarda sıfırdır, silt ve killerde su muhtevası ve plastisiteye bağlı olarak değişir.

$$\text{Su muhtevası, } w(\%) = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\text{Plastisite indisi, } I_P = w_L - w_P$$

Her iki kayma mukavemeti parametresinin ( $c$ ,  $\phi$ ) etkisi hesaba katılarak kayma mukavemeti (Coulomb denklemi) aşağıdaki gibi ifade edilir.

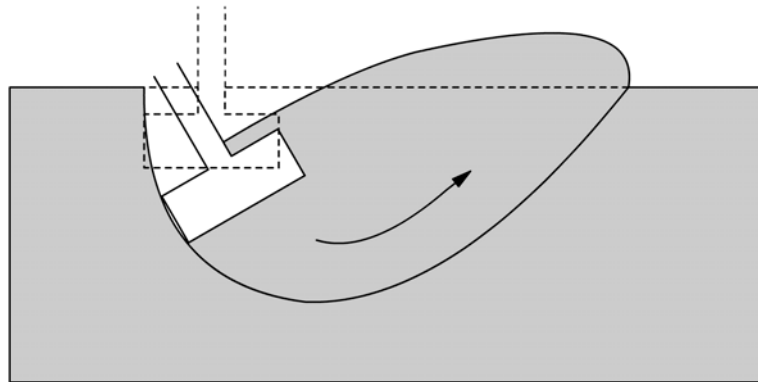
$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

## 2. Yüzeysel Temeller İçin Taşıma Gücü

Temelden aktarılan yüklerin zeminde oluşturduğu kayma gerilmeleri zeminin kayma mukavemetini aşarsa taşıma gücü göçmesi oluşur. Bu tür göçmeler yıkıcıdır ve mutlaka kaçınılmalıdır.

Taşıma gücü göçmeleri üç grupta tanımlanabilir (Vesic, 1975; Day, 2002) (Şekil 4, 5, 6):

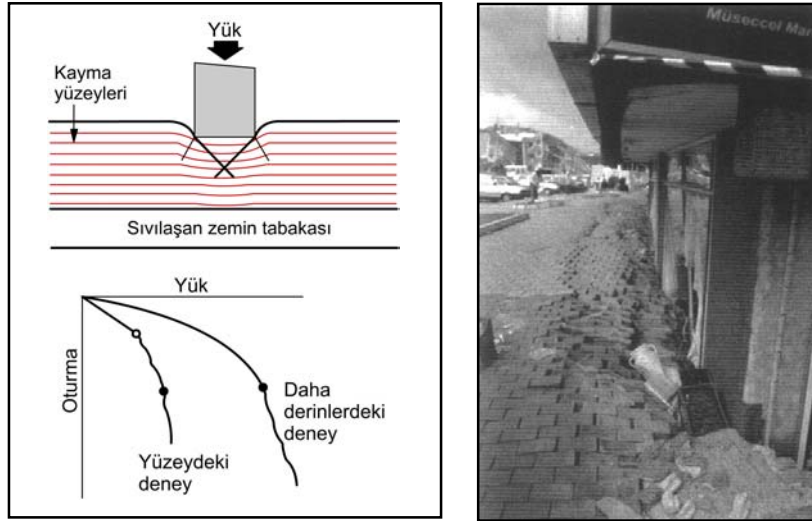
- (1) Genel kayma göçmesi
- (2) Zımbalama göçmesi
- (3) Kısmi (bölgesel) kayma göçmesi



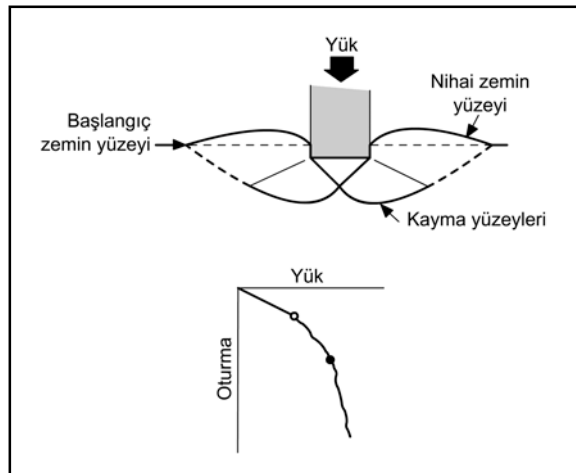
Şekil 3: Taşıma gücü göçmesi (Coduto, 1999)



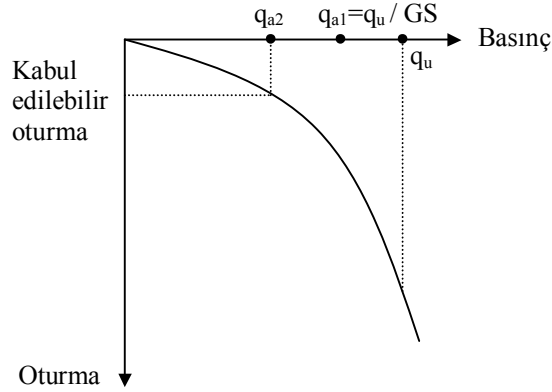
Şekil 4: Genel kayma göçmesi



Şekil 5: Zımbalama göçmesi



Şekil 6: Kısmi (bölgesel) kayma göçmesi



Şekil 7: Taşıma gücü değerlendirmesinde oturma kriteri

Burada tanımlanan kayma göçmeleri ile nadiren karşılaşılır. Binalardaki hasar çoğunlukla taşıma gücü göçmesinden değil oturmaların etkisinden kaynaklanır. Bunun çeşitli sebepleri vardır:

- (1) Doğru yapılmış taşıma gücü hesaplarında etkili kriter genellikle oturma kriteri olmaktadır.
- (2) Doğru parametrelerle kullanıldıkları takdirde mevcut taşıma gücü denklemleri nihai taşıma gücünü oldukça iyi hesaplamaktadır.
- (3) Taşıma gücü hesabı için uygulanan güvenlik sayıları yüksektir. ( $GS = 3.0$ )
- (4) Tüm bunlara ilave olarak şartnameler minimum temel genişliği ve derinliği gibi koşullar tanımlamışlardır.
- (5) Ayrıca şartnameler zemin tiplerine bağlı olarak uygulanabilecek taban gerilmesine de sınırlamalar getirirler.

Diğer taraftan yapı mühendisleri hesap yaparken temel boyutlarını maksimum temel yükünü izin verilen temel taban basıncına (emniyetli taşıma gücü) bölerek bulurlar. Halbuki yapı mühendisinin ölü ve canlı yükler hesabında da güvenlik sayısı bulunmaktadır. Bu da ilave güvenlik sayılarının uygulanması demektir.

Yukarıda sıralanan tüm maddeler, doğru hesaplanan emniyetli taşıma gücünün temel göçmesine karşı yeterli emniyet payına (provizyona) sahip olduğunu ifade etmektedir. Ancak tüm bu maddelerin geçerli olabilmesi için emniyetli taşıma gücünün bu konuda Geoteknik alanında uzman olan mühendislerce ve doğru parametrelerle yapılması gereklidir. Ne yazık ki mevcut uygulama yukarıda tanımlanan özelliklerin çoğunu sağlamamaktadır. Şöyle ki:

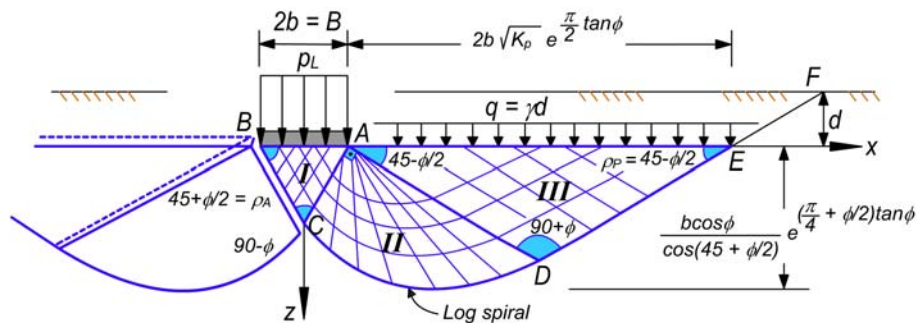
- (1) Emniyetli taşıma gücü değeri yerine zemin emniyet gerilmesi anlayışı hakimdir. Kullanılan terminolojinin fazla önemli olmadığı söylenebilir. Ancak kullanılan isim, arkasındaki anlayışı da etkilemektedir. Standart bir malzeme için belli bir emniyet gerilmesi değeri sunulabilir. Ama zemin standart değil, doğal bir malzemedir, neredeyse her seviyedeki her noktada farklı özellik gösterir. Ayrıca gösterdiği davranış yüklenme şekli, miktarı ve boyutları ile yakından ilgilidir. Emniyetli taşıma gücü sadece zemin özelliklerine değil aynı zamanda temelin boyutları, tipi ve derinliğine bağlı olarak değişecektir. Emniyetli taşıma gücü değerleri bu bilgiler uygulanarak verilmelidir.

- (2) Emniyetli taşıma gücü elde edilirken kullanılan kayma mukavemeti parametreleri ( $c, \phi$ ) oradaki zeminin davranışını yansıtacak şekilde seçilmelidir. Bu değerlerin elde edilmesi için yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinin emniyetli taşıma gücünü verecek olan, yapılacak yapının özelliklerini bilen ve zeminin davranış şeklinin farklı koşullardaki (ıslanma, kuruma, şişme, kayma, uzun süreli ve kısa süreli davranış farklılıkları) değişikliklerini bilen bir geoteknik uzmanının kontrolünde veya bilgisi dahilinde olması önemlidir.
- (3) Ülkemizdeki uygulamaya genellikle konunun uzmanı olmayanlar hakimdir. Bu yüzden oturma kriteri nadiren uygulanmaktadır. Parametre tayini rastgeledir. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen parametrelerin en ufak bir benzerliğinin bulunmadığı örnekler sayılamayacak kadar çoktur. Emniyetli taşıma gücü formülleri bile genellikle yanlış uygulanmaktadır. Hazır bilgisayar programlarına yanlış veriler girilerek yanlış sonuçlar sunulmaktadır. Doğru zemin etüdünün ve değerlendirmesinin yapılamaması sonucunda da yapı mühendisi giderek zeminin özelliklerini tek bir sayıyla ifade etmek gibi bir yanlışlaşmaktadır.
- (4) Tüm bu yanlış uygulamaların sonucu olarak yapılan temel tasarımı hesaplarında kaç güvenlik sayısı kullanıldığını bilebilmek mümkün değildir. Yapı için ne kadar iyi tasarım yapılırsa yapılsın yapının temel kısmı için sadece tahmini hesap yapılmaktadır.
- (5) Bu aksaklıkların esas vebali de inşaat mühendislerinin omuzlarındadır. Çünkü Geoteknik Mühendisliği İnşaat Mühendisliğinin bir anabilim dalıdır. Bütün dünyada da bu böyledir. Yer kabuğunun katmanları ve oluşumuyla ilgilenen veya bunlara ait genel özellikleri ölçen bilim dalları zemini tanısalar bile yapıyla birlikte davranışını tanımazlar. Zemin Mekaniği konusu iyi bir mekanik ve akışkanlar mekaniği bilgisi gerektirir. Jeoloji ve Jeofizik mühendisleri sadece ve sadece geoteknik mühendisliği ihtisası yaparak ve mekanik, akışkanlar mekaniği, statik gibi konulardaki eksikliklerini gidererek bu alanda yeterli birikime sahip olabilirler.

Ne yazık ki İnşaat Mühendisliği kendilerine ait olan Geoteknik alanına sahip çıkamamaktadır. Halbuki doğru uygulamaların yapılabilmesi için, yanlış çözümlerin getirdiği ekonomik ve yaşamsal zararları önlemek için bu sorumluluğu yerine getirme zorunlulukları vardır.

## 2.1. Yüzeysel Temelerde Taşıma Gücü Hesabı (Terzaghi 1943)

Yüzeysel temeller altında göçme mekanizmasının Şekil 8'de görüldüğü gibi gelişeceği düşünülür ve kaydıran kuvvetlerle karşı koyan kuvvetler dengelenerek limit durum için çözüm yapılır.



Şekil 8: Yüzeysel temel altındaki göçme mekanizması

Sürekli bir temel için:

$$q_u (kN / m^2, t / m^2) = \frac{Q_u}{B \cdot L} = c \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma \cdot D_f \cdot N_q$$

- $Q_u$  : Alttaki zeminde kayma göçmesine sebep olan düşey yük ( $kN, ton$ )  
 $B$  : Sürekli temelin genişliği ( $m$ )  
 $L$  : Sürekli temelin uzunluğu ( $m$ )  
 $\gamma$  : Zeminin birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3, t/m^3$ )  
 $D_f$  : Temel çevresindeki zemin yüzeyinden temelin alt taban kotuna düşey uzaklık  
 $c$  : Temel altındaki zeminin kohezyonu ( $kN/m^2, t/m^2$ )  
 $N_c, N_q, N_\gamma$  : Taşıma kapasitesi faktörleri (boyutsuz)

Taşıma gücü formülünde yer alan üç terimin anlamı şu şekildedir:

$c \cdot N_c$  : Temel zeminindeki kohezyonun taşıma gücüne katkısı. Eğer  $c = 0$  olursa, bu terim yok olur

$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$  : Temel zemininin içsel sürtünmesinin taşıma gücüne katkısı. Bu terimde yer alan  $N_\gamma$  içsel sürtünme açısı  $\phi$ 'nin fonksiyonudur.  $\gamma$  değeri temel tabanı altındaki zeminin birim hacim ağırlığıdır.

$\gamma \cdot D_f \cdot N_q$  : Temel tabanı üzerinde yer alan ve temeli çevreleyen sürşarj yükünün taşıma gücüne katkısı. Bu terimde yer alan  $\gamma$  değeri zemin taban seviyesi üzerinde yer alan zeminin birim hacim ağırlığıdır.

Temel tabanı altındaki zeminle temel tabanı üzerindeki zeminin  $\gamma$  değerleri farklı olabilir. Böyle bir durumda ikinci ve üçüncü terimlerde farklı  $\gamma$  değerleri kullanılacaktır. Taşıma gücü faktörleri Tablo 1'de tanımlanmaktadır.

**Tablo 1: Taşıma gücü faktörleri**

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.0	0.0
5	6.50	1.6	0.5
10	8.30	2.5	1.2
15	11.0	3.9	2.6
20	14.8	6.4	5.4
25	20.7	10.7	10.8
30	30.1	18.4	22.4
32	35.5	23.2	30.2
34	42.2	29.4	41.1
36	50.6	37.7	56.3
38	61.4	48.9	78.0
40	75.3	64.2	109.4
42	93.7	85.4	155.6
44	118.4	115.3	224.6
46	152.1	158.5	330.4
48	199.3	222.3	496.0
50	266.9	319.1	762.9

Terzaghi taşıma gücü denklemi kare ve daire şeklindeki temeller için aşağıdaki gibidir:

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (\text{Kare Temel})$$

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (\text{Dairesel Temel})$$

## 2.2. Kohezyonsuz Zeminlerde Taşıma Gücü

Çakıl, kum ve kaya tozu gibi plastik olmayan silt içeren zeminler kohezyonsuz zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerde mukavemetin kaynağı içsel sürtünme ve iç kilitlemedir. İç kilitleme çok sıkı yerleşmiş zeminlere ilave mukavemet etkisi kazandırır. Kohezyonsuz zeminlerde  $c = 0$ 'dır, dolayısıyla taşıma gücü formüllerinde birinci terim yoktur. Kohezyonsuz zeminlerde yeraltı suyunun yeri nihai taşıma gücü değerini etkileyebilir. Kohezyonsuz zeminlerde kumun doymuş hale gelmesinin sürtünme açısı üzerinde fazla etkisi yoktur, yani  $\phi = \phi'$  alınabilir. Fakat yeraltı suyunun yздürme etkisi zeminin mukavemetini azaltır. Bu etki 2.terime ait etkidir. Yeraltı suyu etkisini hesaba katmak için ikinci terimdeki  $\gamma$  değerinin  $\gamma'$  ( $\gamma' = \gamma_{\text{doymuş}} - \gamma_w$ ) ile değiştirilmesi yeterlidir.

## 2.3. Kohezyonlu Zeminlerde Taşıma Gücü

Kohezyonlu zeminlerde (silt ve killer gibi plastik zeminler) taşıma gücü daha düşüktür. Kohezyonlu zeminlerde taşıma gücünün iki durum için iki şekilde elde edilmesi uygundur.

- (1) Toplam gerilme analizi ile (kısa süreli davranış)
- (2) Etkif gerilme analizi ile (uzun süreli davranış)

Toplam gerilme analizinde plastik zeminin drenajsız kayma mukavemeti ( $S_u$ ) kullanılır. Anlamı: Zemin tanesal yapıya sahip bir malzemedir. Aralarında boşluklar vardır. Bu boşluklar doğal ortamın gereği olarak hava, su veya hava ve su ile dolu olabilir. Zemin mekaniği problemlerinin çözümünde zeminin doymuş (boşlukları su ile dolu) olduğu kabul edilir. Kohezyonlu zeminlerin geçirgenliği çok düşüktür ve bu sebeple suyu bünyelerinde tutarlar. Bu yüzden doymuşluk kabulü özellikle kohezyonlu zeminler için uygun bir kabuldür. Doymuş zemin üzerine etki eden bir  $P$  gerilmesi öncelikle boşluklardaki su tarafından alınır ve ilave boşluk suyu basıncı oluşur (Şekil 9). İnce taneli zemin bünyesinde suyun drene olması zaman alacağından yüklemenin ilk zamanlarında zeminin kaymaya karşı gösterdiği direnç sudaki ilave boşluk suyu basıncı ve zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin ortak etkisi ile yani toplam gerilmelere göre oluşur. İlave boşluk suyu basıncının mukavemeti azaltıcı etkisi de elde edilen mukavemet değerine yansır.



Şekil 9: Doymuş zeminde ilave boşluk suyu basıncı kavramı



Yüklemenin uygulanmasına bağlı olarak oluşan pozitif ilave boşluk suyu basıncı her yönde eşit şiddettedir ve zeminin dokusunu bozmaya çalışır. İlave boşluk suyu basıncı değeri zemin dokusunun tanelerin birbirine değmesinden kaynaklanan mukavemetini (gerilmesini) aşarsa kısmi göçme oluşur ve ilerleyerek genel göçmeye yol açabilir. Göçme olmasa bile ilave boşluk suyu basınçları zemin içindeki efektif gerilmeyi azaltacak yönde etki eder. Çünkü zemin bünyesi içindeki toplam basınç iki bileşenle taşınır. Etki eden toplam gerilme değeri aynı kaldığına göre boşluk suyu basıncı artınca efektif basınç azalır.

$$\sigma' = \sigma - u$$

$\sigma$  : Toplam basınç

$\sigma'$  : Efektif basınç

$u$  : Boşluk suyu basıncı

Efektif gerilme, zeminde taneden taneye nakledilen ve zemin tanelerinin birbirine değmesinden, dayanmasından kaynaklanan gerilmelerdir. Zaman ilerledikçe zeminde uygulanan yük altında oluşan ilave boşluk suyu basınçları zemin bünyesindeki suyu harekete geçirir ve su geçirgen yüzeylere doğru harekete geçer. Bunun sonucunda zemin taneleri birbirlerine yaklaşma imkanı bulur ve zemin sıkışır. Bu olaya konsolidasyon adı verilir. Konsolidasyon sonunda zeminin mukavemeti artar.

Zeminin yüklendiği anda suyun hareket edemediği durum “drenajsız durum”, suyun harekete geçerek zeminin sıkışması ise “drenajlı durum” olarak adlandırılır. Tarif olarak, killi zeminlerin ilk yükleme anı tam drenajsız durum, ilave boşluk suyu basınçlarının tamamen sönümlenmesine (sıfır olmasına) yetecek drenajın gerçekleştiği durum da tam drenajlı duruma karşılık gelir.

Kilin geçirgenliğinin çok düşük olması sebebiyle bu iki durum arasında çok uzun bir süre vardır ve bu uzun sürede konsolidasyon süreci gerçekleşir. Tam drenajlı durum ile tam drenajsız durum arasındaki zamanlarda kısmi drenaj vardır.

Buna göre ilk yükleme şartlarını tanımlayan taşıma gücü kısa süreli taşıma gücü değerini verir. Buna karşılık konsolidasyonun tamamlandığı durumdaki taşıma gücü uzun süreli taşıma gücü olarak adlandırılır.

Kısa süreli taşıma gücü toplam gerilmeler cinsinden ifade edilir çünkü toplam gerilmelere göre bulunan parametreler ilave boşluk suyu basıncının mukavemeti azaltıcı etkisini de kapsarlar. Buna karşılık uzun süreli davranışta ilave boşluk suyu basıncı tamamen sönümlenir, taneler birbirine yaklaşır, etki eden yük zemindeki sıkışma ile efektif gerilmeye dönüşür ve zeminin mukavemeti artar.

$S_u$ , Vane deneyi gibi arazi deneylerinden ve laboratuarda yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilebilir. Eğer drenajsız kayma mukavemeti derinlikle sabit kalıyorsa  $S_u = c$  ve  $\phi = 0$ 'dır. Eğer  $\phi = 0$  şartı geçerli ise sürekli temel için taşıma gücü denklemi:

$$q_u = 5 \cdot c + \gamma \cdot D_f$$

veya

$$q_u = 5 \cdot S_u + \gamma \cdot D_f$$

olarak yazılabilir. Tekil Temeller için de taşıma gücü

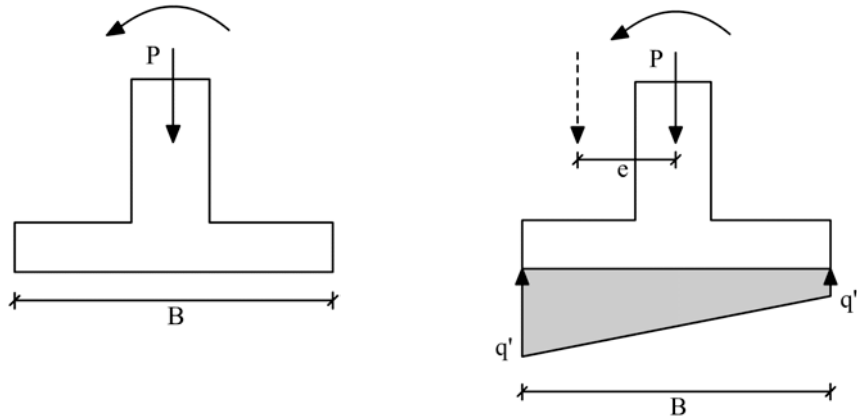
$$q_u = 5 \cdot c \cdot \left( 1 + 0,3 \frac{B}{L} \right) + \gamma \cdot D_f$$

denklemleriyle elde edilir.

Efektif gerilme analizi ile drenajlı kayma mukavemeti parametreleri  $c'$  ve  $\phi'$  bulunur. Bu değerleri elde etmek için deney tamamen drenajlı şartlarda gerçekleştirilir.

- Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli mukavemet genellikle daha büyüktür, uzun süreli davranışta konsolidasyona bağlı olarak mukavemet artar.
- Buna karşılık çok sert veya katı plastik zeminlerde uzun süreli taşıma gücü daha düşüktür. Çünkü drenajsız şartlarda (ilk yükleme sıralarında) negatif boşluk suyu basınçları da mukavemete katkıda bulunur. Ancak zamanla harekete geçen su zeminin genişlemesine ve mukavemetin hızla azalmasına sebep olur.

#### 2.4. Moment veya Eksen Dışı Yükleme Etkisi Altındaki Yüzeysel Temeller



Şekil 10: Moment etkisi altındaki temelde taban basıncı dağılımı

Temelleri ağırlık merkezinden geçecek şekilde düşey yükle yüklemek tercih edilir ama bu mümkün olmayabilir. Üst yapı gereklilikleri yüzünden temel üzerinde moment etkisi de olabilir. Bu moment e eksantrisitesi ile etki eden P kuvveti ile gösterilebilir. Eksantrik Yüklü temelerde temelin bir tarafı diğer tarafından daha fazla yüklenir (Şekil 10).

$$q' = \frac{Q \cdot (B + 6 \cdot e)}{B^2}$$

$$q'' = \frac{Q \cdot (B - 6 \cdot e)}{B^2}$$

- $q'$  : Temel altında en büyük gerilme ( $\text{kN/m}^2$ )  $q' \leq q_{\text{zem}}$  veya  $q' \leq q_a$   
 $q''$  : Temel altında en küçük gerilme ( $\text{kN/m}^2$ )  $q'' \geq 0$   
 $e$  : Eksantrisite (m)  
 $B$  : Temelin genişliği (m)

Genel bir kural olarak eksen dışı yükün,  $Q'$ 'nin temel altında orta üçte birlik bölgede bulunması ( $q'$ ) nün kabul edilemez derecede küçülmesini önler.

## 2.5. Standart Penetrasyon Deneyleri ile Taşıma Gücü Tayini

Kum zeminlerden örselenmemiş numune almak imkansızdır. Bu tür zeminlerin yerleşim sıklıkları davranış üzerinde belirleyicidir. Bu tür zeminlerin özelliklerini yerinde tayin etmek üzere geliştirilen arazi deneyleri giderek tüm zeminler için kullanılabilir hale gelmiştir. Arazi deneyleri içinde en yaygın kullanım bulmuş olan standart penetrasyon deneyidir, ancak konik penetrometrenin kullanımı da hızla yaygınlaşmaktadır.

SPT deneylerine bağlı olarak emniyetli taşıma gücünün hesabı için en uygun denklemler Meyerhof (1974) tarafından verilmiştir. Meyerhof denklemleri ile temelin en fazla 25 mm. (2.5 cm.) oturmasına karşılık gelen emniyetli taşıma gücü değerleri bulunur. Meyerhof tarafından tekil temeller için emniyetli taşıma gücünü hesaplamaya yönelik olarak önerilen denklemler aşağıda verilmektedir:

$$q_a = 12 \cdot N \cdot K_d \quad B \leq 1.22 \text{ m. için}$$

$$q_a = 8 \cdot N \cdot \left( \frac{B + 0.305}{B} \right)^2 \cdot K_d \quad B > 1.22 \text{ m. için}$$

$$K_d = 1 + 0.33 \frac{D}{B} \leq 1.33$$

$$q_a = 25 \text{ mm. oturma için emniyetli taşıma gücü (kN/m}^2\text{)}$$

$$N = \text{SPT darbe sayısı}$$

$$D = \text{Temel derinliği (m)}$$

$$B = \text{Temel genişliği (m)}$$

Bowles, Meyerhof'un formüllerini muhafazakar bulmuştur. Bowles bu denklemleri çok daha büyük emniyetli taşıma gücü elde edecek şekilde değiştirmiştir:

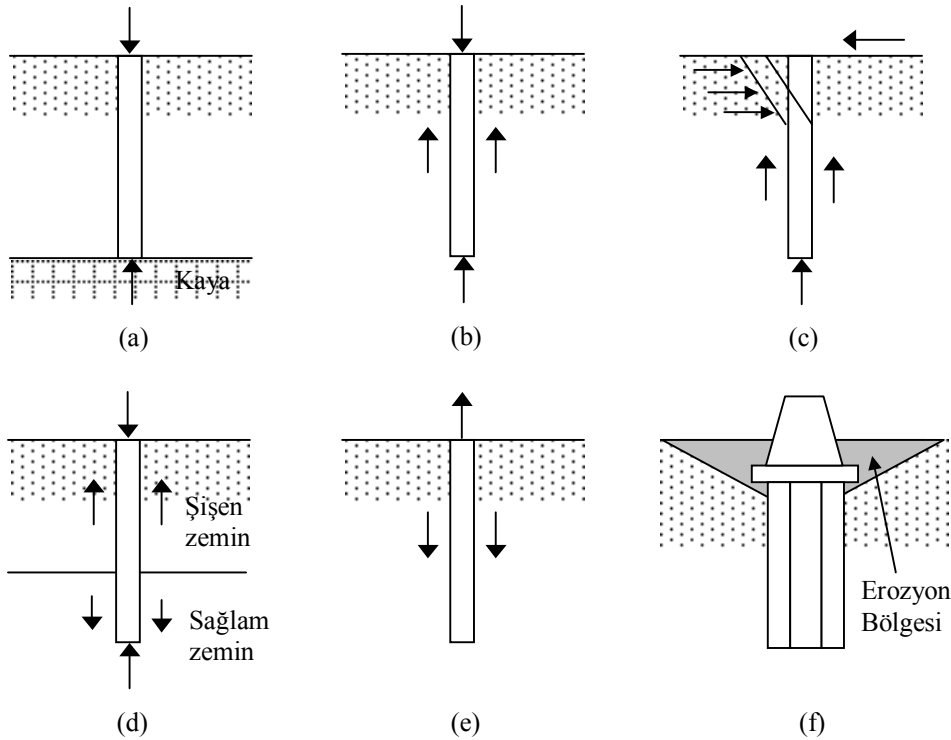
$$q_a = 20 \cdot N \cdot K_d \quad B \leq 1.22 \text{ m. için}$$

$$q_a = 12.5 \cdot N \cdot \left( \frac{B + 0.305}{B} \right)^2 \cdot K_d \quad B > 1.22 \text{ m. için}$$

Bu denklemlerden Meyerhof'u tercih etmek güvenli tarafta kalmak bakımından yararlıdır. Bowles'un önerdiği denklemler tercih edildiği takdirde kullanılan SPT sayısının zemini yeterli seviyede temsil ettiğinden emin olunmalıdır.

### 3. Derin Temeller İçin Taşıma Gücü

Şekil 11’de görüldüğü gibi temel tabanındaki zeminin taşıma gücü aktarılan yükleri yüzeysel temelle karşılamaya yetmiyorsa kazık temeller gibi derin temeller tercih edilir. Temelin derin temel kategorisine girmesi için gereken kriter  $D/B > 1,0$  olmasıdır, yani derinlik genişlikten fazladır. Derin temeller kazık, ayak ve keson şeklinde olabilir. Bunların en yaygın kullanılanı ve davranışı ve hesap yöntemi olarak diğerlerini de kapsayanı kazıktır. Kazıkların çalışma mekanizması buldukları ortamın özelliklerine, imalat şekline ve yüklenme şekillerine göre değerlendirilmelidir. Şekil 11(a)’da görüldüğü gibi zayıf zemin tabakalarının altında ulaşılabilir mesafede kaya gibi sağlam tabaka varsa kazıklar bu tabaka içine soketilir. Bu durumda tüm mukavemetlerini uç direncinden alırlar ve uç kazığı olarak adlandırılırlar.



Şekil 11: Kazıklı temellerin kullanım yerleri

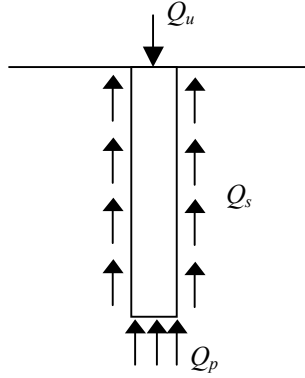
Eğer kaya tabakası ulaşılabilir uzaklıkta değilse orta sıkılıkta ve sert bir zeminde kazık mukavemetini kısmen çevre sürtünmesinden kısmen uç direncinden alır. Şekil 11(c)’de görüldüğü gibi kazıkların düşey yüklere ilave olarak yatay yükleri de taşıması gerekebilir. İstinat yapıları ve yüksek binaların temellerine deprem ve rüzgar yüklerinin etkisi ile yatay yük nakledilebilir.

Kazıklar üst seviyelerde şişen veya göçen zemin olması durumunda ve kaldırma yüklerinin etkisi altında kalacak yapılarda temel olarak kullanılabilir (Şekil 11(d),(e)). Köprü kenar ayakları gibi yapıların altındaki kazıklar da yüzey erozyonu sebebiyle temeli kaybetmemek için inşa edilebilir.

### 3.1. Kazık Tasarım Kriterleri

Kazık davranışı ve kazığın taşıma gücü konusunda günümüze kadar çok araştırma yapılmıştır, ancak hala belirsizlikler mevcuttur. Kazık tasarım ve imalatı konusundaki geniş birikime göre kazık taşıma gücünün belirlenmesi için geçerli belli başlı yaklaşımlar şunlardır:

- (1) Mühendislik analizi-Statik taşıma gücü formülleri: Temel zemin etüd verileri ve laboratuvar deneyleri sonuçları ile uygun parametreler tayin edilir ve kazık davranış mekanizmasına göre geliştirilmiş genel kabul görmüş taşıma gücü denklemleri kullanılır. Bu yaklaşım yüzeysel temeller için uygulanan yaklaşıma benzerdir.
- (2) Arazi yükleme deneyleri: Tüm kazık temel sisteminin inşa edilmesinden önce, farklı zemin özellikleri gösteren noktalarda deney kazıkları öngörülen boyutta ve yöntemle inşa edilerek yükleme deneyine tabi tutulur.
- (3) Kazık çakma direncini esas alan dinamik kazık formülleri uygulanarak taşıma gücü elde edilir.
- (4) Uygulama standartları ve tecrübe doğru tasarımın önemli bileşenlerindedir.



Şekil 12: Kazık taşıma gücü bileşenleri

$$Q_u = Q_s + Q_p$$

$Q_u$  : Kazığın nihai taşıma gücü (Taşıyabileceği toplam en büyük yük)

$Q_s$  : Kazık shaftı ve zemin arasında sürtünmeyle taşınan toplam yük (Şekil 12)

$Q_p$  : Kazık ucu tarafından taşınan toplam yük (Şekil 12)

#### Kazık Uç Mukavemetinin Hesaplanması

Kazık uç mukavemetinin hesaplanması için yüzeysel temellere ait taşıma gücü formülleri kullanılır. Çünkü kazık ucunda oluşan göçme mekanizması yüzeysel temellerin tabanında oluşan ile hemen hemen aynıdır (Şekil13). Buna göre; (kazık için derinlik= $D_f$  yerine uzunluk= $L$  kullanılmıştır)

$$Q_p = q_p \cdot A_p = A_p \left[ c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \right]$$

veya birim alan için

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

$q_p$  : Kazık ucunda birim alan için uç direnci ( $kN/m^2$ )

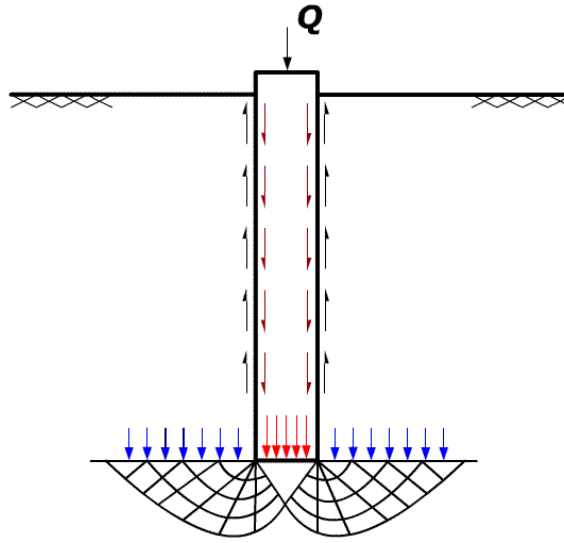
$A_p$  : Kazık uç kesit alanı

$B$  : Taban genişliği, dairesel kazıklarda  $B = D$  (m)

$N_c, N_q, N_\gamma$  :  $f(\phi)$  Taşıma gücü faktörleri (yüzeysel temeller için verilen değerler kullanılabilir.)

$c$  : Kohezyon

$\gamma$  : Zeminin birim hacim ağırlığı



Şekil 13: Kazıkta uç mukavemeti ve çevresel sürtünme mukavemetini tanımlayan mekanizma

Kazık derinliği, çapına göre çok büyük olduğu için  $N_\gamma$  teriminin  $N_q$  terimine göre oldukça küçük olduğu düşünülür ve ihmal edilebilir. Buna göre uç mukavemeti için;

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

formülü kullanılır.

### Kazık Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması

Kazık shaft sürtünme direnci çevre yüzey alanıyla zemin-kazık arası sürtünme direncinin çarpımı olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$Q_s = q_s \cdot A_s = p \cdot L \cdot q_s$$

$Q_s$  (kN) : Çevre sürtünmesi ile taşınan toplam yük

$A_s$  ( $m^2$ ) : Kazık çevresinde sürtünme ile çalışan toplam alan

$q_s$  ( $kN/m^2$ ) : Çevre yüzeyde birim alanda etkili olan sürtünme

$p$  (m) : Kazık shaftının kesit çevre uzunluğu (Dairesel kazıklarda  $p = \pi \cdot D$ )

$L$  (m) : Kazık boyu

### 3.2. Kohezyonsuz Zeminde Kazık Taşıma Gücü

Uç direnci teriminde  $c = 0$  olduğu için kazık taşıma gücü

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p \cdot A_p + q_s \cdot A_s$$

olarak hesaplanır. Bu formülde

$$q_p = \gamma \cdot L \cdot N_q$$

olarak alınabilir. Diğer taraftan kazığın çok uzun olması sebebiyle  $L$ 'nin tam değerinin kullanılması aşırı büyük taşıma gücü verebilir. Bunu önlemek için limit değer ( $q_{p,l}$ ) tanımlaması gerekebilir. Buna göre  $q_p$  en fazla  $q_{p,l}$ 'ye eşit olmalıdır.  $q_{p,l}$  için tipik değerler

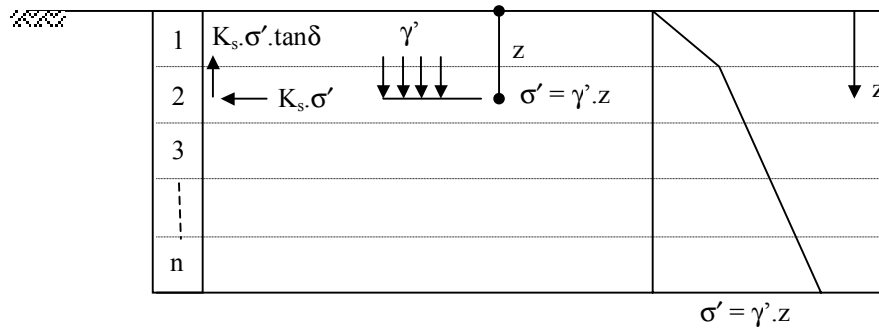
$$q_{p,l} = 25 \text{ kN/m}^2 \text{ (Gevşek kum için)}$$

$$q_{p,l} = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ (Sıkı kum için)}$$

şeklinde verilebilir. Bu kriter de göz önüne alınarak uç direnci

$$Q_p = A_p \cdot (\gamma \cdot L \cdot N_q) \leq A_p \cdot q_{p,l}$$

olarak hesaplanır. Kohezyonsuz zeminde sürtünme direnci hesabında efektif gerilme prensibine dayalı bir yaklaşım uygulanır (Şekil 14).



Şekil 14: Efektif gerilme prensibine göre çevre sürtünmesinin hesabı

Herhangi bir seviyede etkili olan kazık şaftındaki sürtünme direnci

$$q_s = K_s \cdot \sigma' \cdot \tan \delta$$

formülü ile elde edilir. Burada:

$\sigma'$  :  $\gamma z$  : Seçilen derinlikte etkili olan efektif jeolojik yük

$K_s$  : Kazık şaftı üzerinde etkili olan ortalama yatay toprak basıncı katsayısı  
(Tipik  $K_s$  değerleri Tablo 2'de verilmiştir.)

$\delta$  : Çevre sürtünme açısı (kazık malzemesi ve zemin arasında)

Toplam çevresel sürtünme direnci

$$Q_s = A_s \cdot q_s = A_s \cdot K_s \cdot \sigma' \cdot \tan \delta$$

ifadesi ile bulunur. Bu ifadedeki kazık shaftı yüzey alanı,  $A_s$  dairesel kazıklar için

$$A_s = \pi \cdot D \cdot L$$

olarak yazılır.

**Tablo 2: Tipik  $K_s$  değerleri**

Kazık Tipi	$K_s$ değerleri
Beton	$1,5 \pm 10\%$
Boru	$1,1 \pm 10\%$
H - Kesit	$1,6 \pm 10\%$

Sonuç olarak kohezyonsuz zeminlerde toplam kazık taşıma gücü

$$Q_u = A_p \cdot (\gamma \cdot D_f \cdot N_q) + A_s \cdot (K_s \cdot \sigma' \cdot \tan \delta)$$

formülü ile bulunur.

### 3.3. Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p \cdot A_p + q_s \cdot A_s$$

Uç mukavemeti için;

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

Doygun kil zeminde kısa süreli davranış için hesap yapılacaksa drenajsız kayma mukavemeti parametrelerinin kullanılması uygundur.

Bu durumda  $\phi = 0$  ve  $c = c_u$  olur.

$$\phi = 0 \text{ için } N_c = 9.0 \text{ (Derin temeller için uygundur)}$$

$$\phi = 0 \text{ için } N_q \text{ terimi de ihmal edilebilir.}$$

Buna göre kohezyonlu zeminlerde drenajsız şartlardaki kazık uç mukavemeti

$$q_p = 9 \cdot c_u$$

Dairesel kesitli kazıklarda toplam uç mukavemeti



$$Q_p = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot 9 \cdot c_u$$

$D$  : Kazık çapı

$c_u$  : Drenajsız kayma mukavemeti

Uzun süreli taşıma gücü araştırılıyorsa; efektif gerilmelere göre kayma mukavemeti parametreleri  $c'$  ve  $\phi'$  kullanılmalıdır.

O zaman kazık uç direnci formülü ilk verildiği gibi fakat efektif parametrelerle

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

$N_c, N_q = f(\phi')$  olarak bulunur. Çevresel sürtünme direnci için

$$Q_s = A_s \cdot q_s$$

Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli mukavemet hesaplarında kazık shaftı ile zemin arasında adhezyon etkisi drenajsız kayma mukavemeti  $c_u$  ya bağlı olarak elde edilen  $c_a$  parametresi ile tanımlanır. Buna göre  $q_s = c_a$  yazılabilir ve

$$Q_s = q_s \cdot A_s = c_a \cdot (\pi \cdot D \cdot L)$$

olur. Tipik  $c_a$  değerleri Tablo 3 ve Tablo 4'te görülmektedir.

**Tablo 3: Zemin ve kazık malzemesine göre tipik  $c_a$  değerleri**

$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) (Serbest basınç mukavemeti)	$c_a$ (kN/m <sup>2</sup> )	
	Beton veya Ahşap	Çelik
0 – 72	0 – 34	0 – 34
72 – 144	34 – 48	34 – 48
144 – 288	48 – 62	48 – 57
288	62	57

**Tablo 4: Zemin cinsine göre tipik  $c_a$  değerleri**

Zemin Cinsi	$c_a$ (kN/m <sup>2</sup> )
Silt ve yumuşak kil	7 – 30
Çok sert kil	50 – 200
Gevşek kum	12 – 36
Yoğun kum	33 – 67
Sıkı çakıl	50 – 100

Uzun süreli (Drenajlı) hesaplarda çevre sürtünmesi için kohezyonsuz zeminlerinkine benzer bir yaklaşım kullanılabilir veya Meyerhof (1953)'ün önerdiği gibi:

$$q_s = 1.5 \cdot c \cdot \tan \phi \quad (\text{Çakma kazıklar için})$$

$$q_s = c \cdot \tan \phi \quad (\text{Fore kazıklar için})$$

kullanılabilir.

### 3.4. Dinamik Kazık Formülleri

Çakma kazıkların kazık çakma işlemi sırasında zeminin içine batmaya karşı gösterdikleri dirence bağlı olarak taşıma gücünü hesaplamak üzere geliştirilmiş çok sayıda amprik denklem mevcuttur. Bu formüllerin çoğunun temel prensibi çekicinin kinetik enerjisi kazığa nakletmesi esasına dayanır. Çekiçle verilen E enerji girdisinin kazığa çakmak için harcanan enerji ve enerji kayıplarının toplamına eşit olduğu kabul edilir. Bu anlayışla elde edilmiş çok sayıda formül bulunmaktadır.

$$E = P_u \cdot s + \Delta E$$

$\Delta E$  : Enerji kaybı

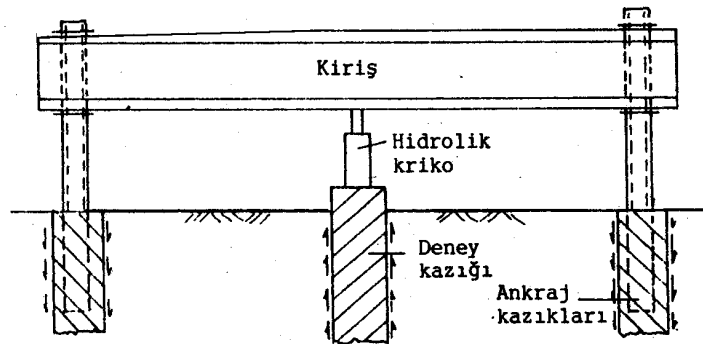
$P_u$  : Kazığın batma direnci

$s$  : Kazık ucunun batma miktarı

### 3.5. Kazık Yükleme Deneyleri

Kazığın taşıma gücünün tayin edilmesi bakımından en güvenilir yöntem yükleme deneyleridir. Deney düzeneği basit özellikleri ile Şekil 15'te görülmektedir.

Yükleme deneyi sonunda kazık kapasitesi öngörülenden farklı ise kazık boyutlarını değiştirme imkanı olur ilave bir yararı da kazık uygulanacak arazinin önceden tespit edilememiş özelliklerinin tespit edilmesidir. Kazık yükleme deneyleri analitik yöntemler veya kazık çakma formülleri ile hesaplanan kazık kapasitelerinin doğrulanması veya düzeltilmesi için yararlı olmakla birlikte, her şart altında doğru sonuç verdikleri zannedilmemelidir.



Şekil 15: Kazık yükleme deneyi

Kazık yükleme deneyinde aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

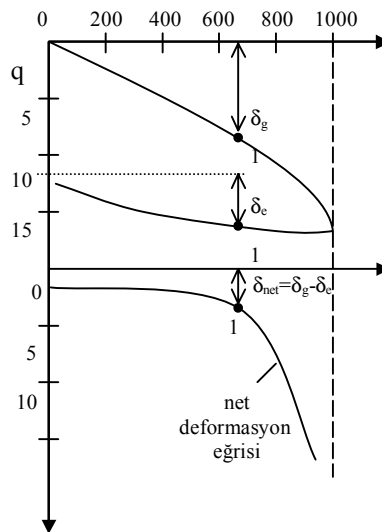
1. Kazık inşası ile yükleme deneyi arasında bir süre geçmelidir. Bu süre granüler zeminler için 3-4 gün, killi zeminler için 1 ay civarındadır. Bu süre çevre zemin çakma sırasındaki örselenmeyle kaybettiği mukavemeti yeniden kazanması için gereklidir. Beton kazıklarda kazık malzemesinin mukavemetinin gelişebilmesi için de minimum bir sürenin geçmesi gereklidir.
2. Kazık yükleme deneyi için seçilen nokta kazık temellerin yapılacağı arazinin genel özelliklerini yansıtacak bir nokta olmalıdır. Çoğu mühendisler bu konuda en düşük mukavemeti elde edebilecekleri noktayı seçerler.
3. Yükleme deneyi yapılan kazığın boyu, çapı ve inşa yöntemi daha sonra yapılacak kazıkların özelliklerini yansıtmalıdır.

Kazığa yükün aktarılma şekli yerel şartnameler veya ASTM tarafından tarif edilmiştir. Genel kurallar kısaca aşağıda verilmiştir:

1. Yük kademeler halinde ve her kademe tasarım yükünün %20-%25'i mertebesinde olacak şekilde uygulanır. Bu kademeler ya belirli zaman aralıkları ile veya belirli bir oturma hızına ulaşıncaya kadar zemin üzerinde tutulur ve sonra yük artırılır.
2. Nihai yük miktarı tasarım yükünün 2 katı olarak tanımlanır. İlk yükleme devresinde bu seviyeye (%200 tasarım yükü) ulaşıldıktan sonra ikinci devrede yükleme göçme yüküne ulaşıncaya kadar devam ettirilir.
3. Tasarımda kullanılan yük genellikle tanımlanan belli bir oturma seviyesine (miktarına) tekabül eden yükün yarısıdır. Bu oturma değeri de çoğunlukla 25 mm olarak seçilir.

Şekil 16'da tipik bir yük oturma ilişkisi görülmektedir. Yükleme %20 artışlarla boşaltma ise 5 adımda gerçekleştirilmiştir, b de kazığa uygulanan yük kademelerine tekabül eden net oturma miktarları görülmektedir. Belli bir noktada örneğin 1 noktasında net oturma =  $\delta_g - \delta_e$

Kazık taşıma gücüne karar verilirken yukarıdaki tanımlanan yöntemlerin en az ikisinin sonuçları kullanılmalıdır. Ayrıca yerel tecrübeye dayalı bilgilerin önemi ihmal edilmemelidir.



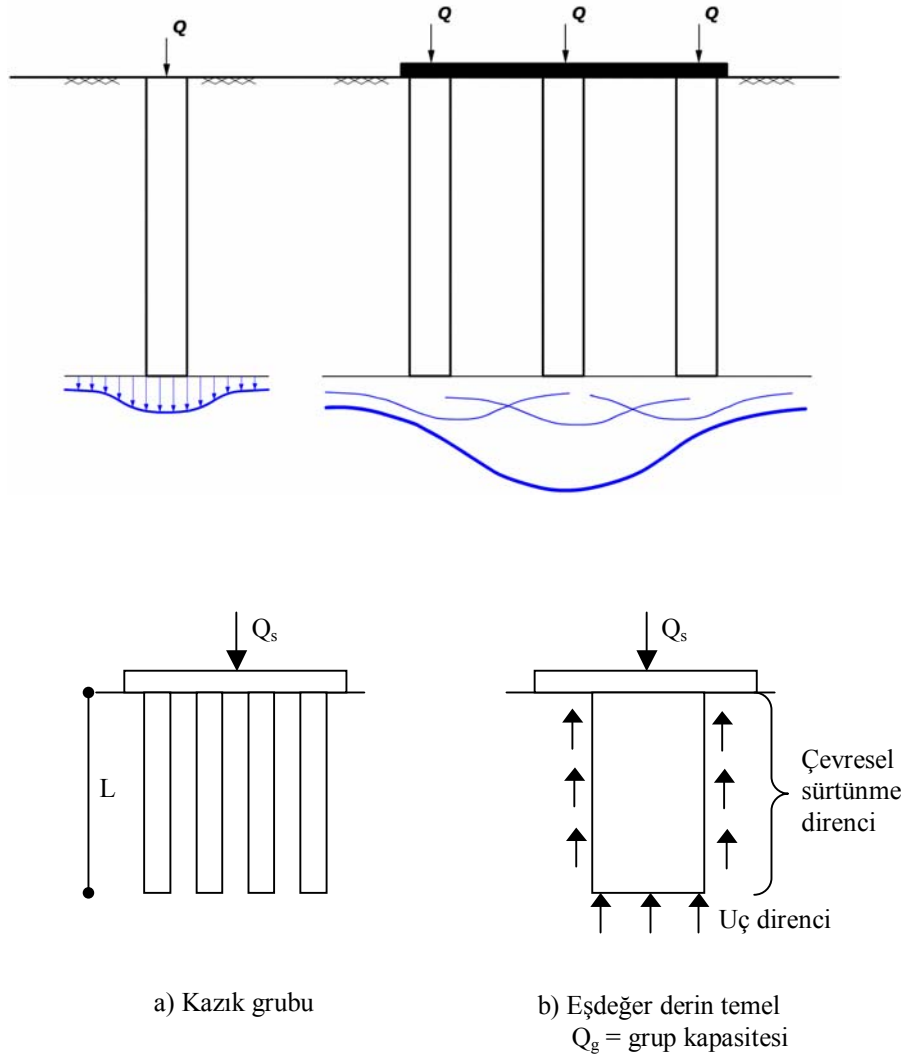
Şekil 16: Kazık yükleme deneyi sonucu

### 3.6. Kazık Grupları

Çeşitli yapı sistemlerine ait kazıklı temeller genellikle kazık grupları şeklinde inşa edilir. Yapı yükü kazık başlığına nakledilir. Eğer kazıklar arasında yeterli mesafe varsa, kazık grup kapasitesi tek tek kazıkların kapasitelerinin toplamına eşittir. Bu bakımdan kazık mesafelerinin en az  $3d-4d$  civarında olması önerilir. ( $d$ : kazık eksenleri arasındaki uzaklık)

Buna karşılık kazıklar birbirlerine yakınsa kazık grup kapasitesi adı altında tüm kazık sisteminin tek bir temelmış gibi zemine yük naklettiği ve temel zemininin bu gerilmeleri karşıladığı anlayışına dayalı hesap yapılır. Grup kapasitesi genellikle tek tek kazıkların kapasitelerinin toplamından çok daha düşüktür. Şekil 17’de kazık grup davranışı görülmektedir.

Kazık grup kapasitesini hesaplamak için kazık grubu tek bir kazıkmış gibi düşünülerek uç direnci ve çevresel sürtünme direncinin toplamı bulunur.



Şekil 17: Kazık grup davranışı

#### 4. Sismik Yükler Altında Taşıma Gücü Kaybı

Depremlerden sonra yapılarda oluşan hasar eğer sıvılaşma ve yoğunluk değişimine bağlı değilse taşıma gücünün sismik etki ile azaltılmasına bağlı olarak açıklanabilir. Günümüz ulusal ve uluslararası uygulamasında deprem etkisi ile ancak sıvılaşma varsa göçme olacağı, bunun dışında taşıma gücü kayıplarının az olacağına inanılmaktadır. Bu anlayışı destekleyen belli başlı görüşler daha önce de belirtildiği gibi

- Yüksek güvenlik sayılarının kullanılıyor olması:  
(Statik taşıma gücü analizlerinde  $GS = 3.0$ )  
(Sismik taşıma gücü analizlerinde  $GS = 5.0$ )
- Oturma kriteri esas alındığında taşıma gücü göçmesine karşı güvenlik sayılarının daha da büyümesi
- Kod ve şartnamelerde yer alan boyut, zemin emniyet gerilmesi gibi ilave sınırlamaların güvenliğe katkısı

olarak tanımlanabilir. Buna karşılık yine de taşıma gücü göçmesi ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. 1999 Kocaeli depreminin etkisi ile İzmit ve Adapazarı'nda oluşan göçmelerin çoğunun sebebi taşıma gücü kaybıdır, ancak ne var ki bunların hepsinin sebebi davranış mekanizmasını pek irdilemeyen bir yaklaşımla “sıvılaşma” zannedilmiştir.

Tasarımda yüksek güvenlik sayıları kullanılmasına rağmen taşıma gücü göçmelerinin oluşmasının çeşitli sebepleri olabilir ve bu etkenler ayrı ayrı veya birleşik olarak etkilidir. Bunlardan belli başlı iki neden, zeminin kayma mukavemetinin gerçek değerinden büyük bulunmuş olması veya yapı yükünün deprem etkisi ile tasarım aşamasında öngörülenden farklı etmesidir.

Taşıma gücü hesabındaki yanlışlıklara arazinin tasarım zamanındakine göre değişmesi de sebep olabilir. Örneğin; yeraltı su seviyesi yükselmiştir ve sıvılaşma olasılığı artmıştır veya yapının yanında bir kazı çukuru açılmıştır ve yapı salınım yaparken bir tarafındaki pasif direnci kaybetmiştir. En sık rastlanan taşıma gücü göçmesi alttaki zeminin sıvılaşması ile ve zımbalama etkisi ile oluşur.

##### 4.1. Sismik Etki İle Taşıma Gücü Kaybını Hesaba Katmak İçin Mevcut Uygulama İle İlgili Düşünceler

Amerikan Yapı Standartı, sismik tasarım yapılırken zemin emniyet gerilmelerinin 1/3 (%30) oranında arttırılarak uygulanmasını önermektedir. Benzer şekilde; Türkiye “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” de temel zemini olarak (A), (B) ve (C) grubuna giren zeminlerde statik yüklere göre tanımlanan zemin emniyet gerilmelerinin deprem durumunda en fazla %25 arttırılabileceğini ifade etmektedir. Bu yaklaşım sismik tasarım yapılırken güvenlik sayısının 5.0 ve daha büyük seçilmesi halinde kabul edilebilir bir yaklaşımdır. Diğer taraftan yönetmelik temel zemini olarak (D) grubuna giren zeminlerde deprem durumunda zemin emniyet gerilmesi ve kazık yükleri arttırılamaz kaydını düşmektedir. Bilindiği gibi (D) grubuna giren zeminler yeraltı su seviyesi altında yumuşak kalın alüvyon, gevşek kum, yumuşak kil, siltli kil gibi zeminlerdir ve bunlar zaten sıvılaşma olasılığı yüksek olan zeminler grubuna girmektedir.

Yukarıda tanımlanan Amerikan ve Türk standartlarında sismik tasarımda statik durum için bulunan zemin emniyet gerilmelerinin artırılması anlayışı uygulamada kullanılan güvenlik sayılarının zaten büyük olduğu kabulüne sığınan bir yaklaşımdır.

Bu önerinin uygulanması özellikle ülkemiz açısından son derece sakıncalıdır. Çünkü sismik analiz için ayrı ve daha yüksek bir güvenlik sayısı kullanarak emniyetli taşıma gücü bulunması gibi bir uygulama Türkiye’de yerleşmiş değildir. Ayrıca aşağıda iki grupta tanımlanan özelliklere dikkat edilmelidir:

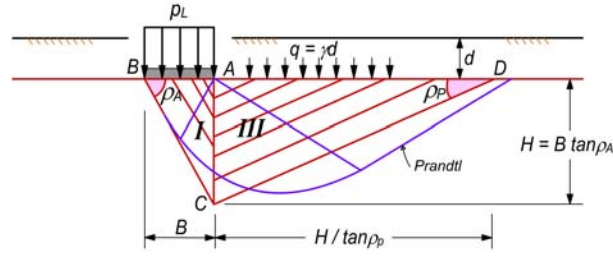
- (1) Standartlardaki öneri (Day 2002)’nin tanımlamasına göre ancak aşağıdaki zeminler için geçerli olabilir:
  - Masif, kristalleşmiş kaya yatakları ve deprem sırasında bütünlüğünü kaybetmeyecek sağlam sedimanter kayalar
  - Sıkı ve çok sıkı granüler zemin
  - Çok yüksek derecede aşırı konsolide kil, katı ve sert killer için geçerlidir.
- (2) Halbuki deprem durumunda;
  - Yapraklanmış ve gevşek kayalar deprem sırasında çatlaklarından ayrılabilir.
  - Aşırı konsolide killer yüzeye yakın bölgelerde yer alıyorsa kolaylıkla plastik akma durumuna geçebilir.
  - Gevşek zeminler sıvılaşma davranışı gösterebilir.
  - Hassas killer kayma mukavemetini büyük ölçüde kaybeder.
  - Yumuşak killer ve organik zeminler tekrarlı yükleme ile plastik akma ile göçerler.

Dolayısıyla (2) maddesinde tanımlanan zeminler için zemin emniyet gerilmesi artışı uygulanmamalı, aksine deprem yükleri altında oluşacak taşıma gücü kaybı için özel hesap yapılmalıdır.

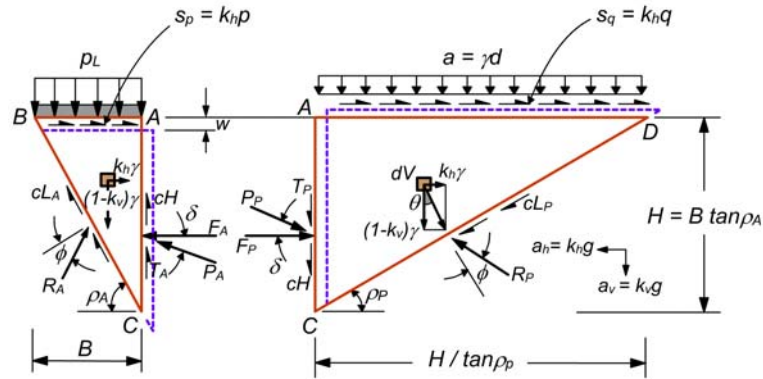
Günümüzün gerek ulusal gerek uluslararası uygulamasında sismik etkiler sebebiyle azalan taşıma gücünü hesaplamak üzere standartlarda herhangi bir öneri veya yöntem bulunmamaktadır. Bu konuda önemli bir çalışma Richards ve diğ. (1993) tarafından yapılmıştır. Son 10-15 yıldır literatürde konuyla ilgili çalışmalar artarak yer almaktadır. Richards ve diğ. (1990) tarafından ortaya atılan sismik taşıma gücü kaybı hesapları davranış mekanizmasını en iyi anlatan açıklama olduğu için tercih edilmiş ve bu konuya dahil edilmiştir. Richards ve diğ. (1993) statik taşıma gücü katsayılarının sismik durum için emsallerini hesaplamış ve tablolar halinde sunmuşlardır. Taşıma gücündeki azalma hem zemin mukavemetinin sismik etki ile azalmasından hem de depremin yarattığı kayma etkisi ile yapıdan veya herhangi başka bir sürşarjdan temele aktarılan yatay kuvvetlerden kaynaklanır.

Tekil temeller, sürekli temeller, radye temeller ve hatta kazık temeller sismik etki ile göçebilir ve bu çoğunlukla sıvılaşmaya atfedilir. Halbuki gözlemler bu göçmelerin kısmi doygun ve hatta sert ve sıkı zeminlerde bile oluştuğunu göstermektedir. Bu durumda sıvılaşma açıklaması geçerli ve/veya yeterli değildir.

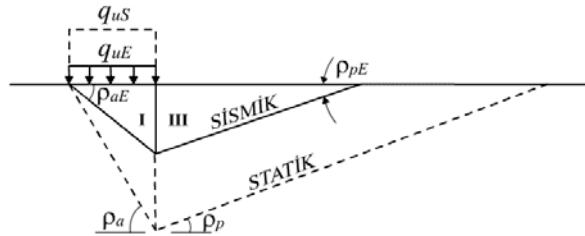
Deprem etkisi ile temel altında oluşan göçme mekanizması değişmektedir. Statik durumda göçme mekanizmasını oluşturan aktif ve pasif kamaları çevreleyen kayma düzlemleri artan ivme ile giderek yataylaşmaktadır. Statik taşıma gücünü hesaplamak için kullanılan aynı Coulomb göçme mekanizmasına dinamik deprem etkileri (yatay ve düşey deprem ivme etkileri) eklenerek deprem durumundaki taşıma gücü faktörleri bulunmaktadır.



Şekil 18: Basitleştirilmiş Coulomb kayma kamaları ( $\delta \neq 0$ ) (Richards ve diğ., 1993)



Şekil 19: Coulomb mekanizması ( $\delta$  sürtünmesinin dikkate alındığı durum) (Richards ve diğ., 1993)



Şekil 20: Statik ve sismik şartlarda taşıma gücü kamaları (Richards ve diğ., 1993'ten uyarlanmıştır)

Daha önce anlatıldığı üzere, Terzaghi (1943)'e göre sürekli temel için statik durumdaki taşıma gücü ( $q_{uS}$ )

$$q_{uS} = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

formülü ile bulunur. Deprem ivmelerinin etkisi yukarıdaki limit denge probleminin içine eklenerek sismik taşıma gücü ( $q_{uE}$ ) formülü

$$q_{uE} = c \cdot N_{cE} + \gamma \cdot L \cdot N_{qE} + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_{\gamma E}$$

olarak elde edilir. Sismik taşıma gücü faktörleri  $N_{cE}$ ,  $N_{qE}$ ,  $N_{\gamma E}$  sembolleriyle tanımlanmıştır. İvme değerlerinin büyüklüğüne bağlı olarak sismik göçme mekanizması giderek

yüzeyselleşir. Son durum olarak zemin temelini altından kayar. Zeminin efektif sürtünme açısı ne kadar küçükse taşıma gücünün sismik azalması o ölçüde hızlıdır.

Statik taşıma gücü faktörleri sadece içsel sürtünme açısının ( $\phi$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanırken, aşağıda verilen dinamik taşıma gücü faktörleri içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), duvar sürtünme açısı ( $\delta$ ), ve yatay ve düşey ivme katsayılarına ( $k_h, k_v$ ) bağlıdır:

$$N_{qE} = \frac{K_{pE}}{K_{aE}}$$

$$N_{cE} = (N_{qE} - 1) \cot \phi$$

$$N_{\gamma E} = \tan \rho_{aE} \left( \frac{K_{pE}}{K_{aE}} - 1 \right)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu denklemlerde;  $\rho_{aE}$  kama açısı,  $K_{aE}$  ve  $K_{pE}$  dinamik etkiler altında kamalar için geçerli olan aktif ve pasif yanal toprak basıncı katsayılarıdır ve Tschebotarioff (1951)'e göre;

$$\rho_{aE} = a + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(1 + \tan^2 a)[1 + \tan(\delta + \theta) \cot a]} - \tan a}{1 + \tan(\delta + \theta)(\tan a + \cot a)} \right)$$

$$K_{aE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right)^2}$$

$$K_{pE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left( 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right)^2}$$

olarak bulunur. Burada  $\theta = \tan^{-1} k_h / (1 - k_v)$  ve  $a = \phi - \theta$  olarak tanımlanmaktadır.  $\delta = \phi/2$  olarak alınmaktadır.  $k_h$  ve  $k_v$  sırasıyla temel hizasında oluşan yatay ve düşey deprem ivme katsayılarıdır. Deprem yüklerinin ilave edilmesi ile temel altındaki aktif ve pasif kamaların geometrisi Şekil 20'de görüldüğü şekilde değişmektedir. Deprem ivmesinin artışı ile aktif itki katsayısı artmakta ( $K_{aE}$ ) ve pasif itki katsayısı ( $K_{pE}$ ) ise azalmaktadır. Deprem ivmesinin kritik bir seviyesinde ise genel akışkanlaşma durumuna ulaşılarak  $K_{aE} = K_{pE}$  ve  $\rho_{aE} = \rho_{pE} = 0$  değerlerine ulaşılmaktadır. Bu durumda zemin temelini altından kaymaktadır.



## Kaynaklar

- ABYYHY - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998).
- BOWLES, J.E. (1997). Foundation Analysis and Design. 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill.
- CODUTO, D.P. (1999). Geotechnical Engineering – Principles and Practices. Prentice Hill.
- DAY, R.W. (2002). Geotechnical Earthquake Engineering Handbook. McGraw Hill.
- RICHARDS, R., ELMS, D.G., BUDHU, M. (1990). “Dynamic fluidization of soils”, journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 5, pp. 740-759.
- RICHARDS, R., ELMS, D.G., BUDHU, M. (1993). “Seismic bearing capacity and settlements of foundations”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 5, pp. 662-674.
- TSCHEBOTARIOFF, G.P. (1951). Foundations, retaining and earth Structures. McGraw-Hill Book Company Inc., NY.
- VESIC, A.S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. Chapter 3 of Foundation Engineering Handbook , Hans F. Winterkorn and Hsai Yang Fang (Eds) Van Nostrand Reinhold.