

## **KISIM 1. KAZIKLAR ve İŞLEVLERİ**

### **1.1. Giriş**

Temeller; tabanlarının zemin içinde oturduğu derinliğe bağlı olarak yüzeysel temeller ve derin temeller olmak üzere iki grup halinde düşünülebilirler. Zemin şartlarının uygun olup izin verdiği hallerde kullanılan yüzeysel temeller; münferit sömel, mütemadi sömel, radye temel adlarını alırlar. “Derin Temel” deyimi ise, genel olarak, derinliği, plan görünümündeki genişliğinin 2.5 mislinden daha fazla olan bir temeli ifade etmek için kullanılır ve kazıklı temeller, kesonlar veya derin ayak temelleri kapsar. Bunların içinde en yaygın olarak kullanılanı bu kitabın konusu olan kazıklı temellerdir. Yüzeysel temeller genellikle derin temellerden daha ekonomiktirler.

Bu nedendir ki temel projelendirilmesinde önce yüzeysel temel yapmanın mümkün olup olmayacağı araştırılır. Bu araştırma sırasında zeminin zayıf olup taşıma gücünün aşıldığının saptandığı durumda yüzeysel temeller yeterli olmazlar. Diğer yandan; bir temel taşıma gücü açısından yeterli olabilir ancak istenilenden fazla oturabilir. Bu hallerde, yükleri daha derine aktarmak ve oturmaların istenen sınırlar içinde kalmasını sağlamak için derin temeller inşa edilir.

### **1.2. Kazıkların İşlevleri**

Kazıklar, temel elemanı olarak görev yaptıklarında üstyapı yüklerini zemine aktarırlar. Bunun dışında, yan yana

yapılmış sıralı kazıklar, gerektiğinde ankraj elemanları ile güçlendirilerek dayanım yapısı olarak projelendirilebilirler. Ayrıca, çekme kuvvetlerini veya yanal yükleri de taşımaları gerekebilir. Aşağıda görüleceği üzere zeminin sıkıştırılmasında aktif rol oynayabilirler.

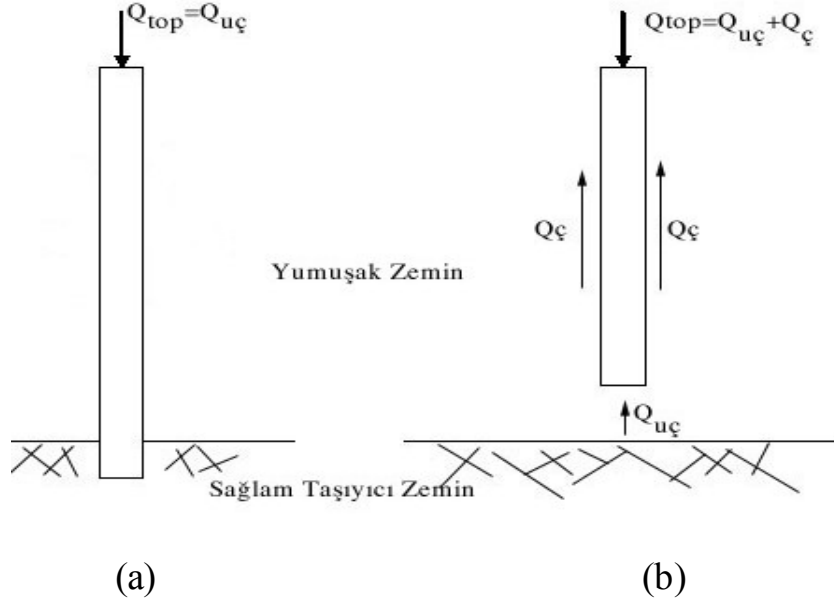
### **1.3. Kazıkların Sınıflandırılması**

Kazıklar bu kitapta, aşağıdaki gruplar içinde sınıflandırılarak göz önüne alınmışlardır:

- Yükleri Taşıma ve İletme Şekilleri,
- İmal Edildikleri Malzemeler,
- İmalat ve Zemin İçine Yerleştirme Yöntemi,
- İşlevlerinin Niteliği.

#### **1.3.1. Yükleri Taşıma ve İletme Şekilleri**

Kazıkların uçları sağlam ve sıkışabilirliği çok az olan bir zemine basıyorsa veya bu zemin içine gömülü ise bu tür kazıklara “Uç Kazığı”, eğer kazık zeminin içinde bulunmakla beraber tabanı ayrıca sağlam bir zemine basmıyor ise bu kazığa da “Yüzer Kazık” veya “Sürtünme Kazığı” denir. “Yüzer Kazık” deyimi, bu kazıkların uçları katı bir zemin katmanına dayanmaksızın zemin içinde bulunmaları durumlarını şeklen çok iyi açıklar.



Şekil 1.1. (a) Uç Kazığı ve (b) Sürtünme Kazığı

Sürtünme ve uç kazıkları Şekil 1.1 de şematik olarak gösterilmiştir. Pratikte kullanılan kazıkların boyları genellikle çaplarının 15 ila 40 misli fazla olur. Zemin etütleri sonucunda, bu boylara karşı gelen derinliklerde sağlam zemin bulunursa uç kazıkları tercih edilir. Pratikte aksenal yük taşıyan uç kazıklarının, sağlam zemin içine genelde çaplarının 1.5 misli bir uzunlukta sokularak soketlenmesi adet olmuştur.

### 1.3.2. Kazıkların Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Yapım Teknolojisi

Kazıklar, yapımları için kullanılan malzemeler ve yapım yöntemleri göz önüne alınarak da sınıflandırılabilirler. Buna göre kazıklar; beton kazıklar, çelik kazıklar, ahşap kazıklar, kompozit kazıklar gibi gelecek paragrafların inceleme konusu olan sınıflara ayrılabilirler. Kazıklar genelde ayrı ayrı firmaların keşfettikleri ve patentlerini almış oldukları yöntemlere göre yapılırlar. Bu nedenle pek çok yapım yöntemi mevcuttur. Bu

yöntemler, patent sahibi firmaların kataloglarında gösterilirler. Genelde birçok alternatif arasından seçim yapılırken, değişik kazık tiplerinin kataloglarını incelemek, maliyet analizi yapmak ve ona göre karar vermek gerekir. Kazıklı temel gerektiren bir yapının temelinin inşaat süresi, yapının genel inşaat maliyetini de etkiler. Bu nedenle maliyet analizlerinde süre mutlaka göz önüne alınmalıdır.

#### 1.3.2.1. ahşap kazıklar

ahşap kazıklar, çok eski zamandan beri kullanılagelmişlerdir: İstanbul Teknik Üniversitesi'nin araştırmalarına göre İstanbul'da Mimar Mustafa Ağa tarafından 1748-1755 yılları arasında yapılan Nur-u-Osmaniye camii kısa ahşap kazıklar üzerine oturmaktadır. Cami'nin sondaj profilleri 8 metrelik yapay dolgu, bunun altında kum-çakıl bantları içeren yeşil renkli kil-marn ve en altta 20-22 metre derinliklerden itibaren de grovak ve şistten oluşan ana - kaya göstermektedir. Yeraltı suyu 16.5 m derinliktedir. Uçları demirli ahşap kazıklar yüzeyden 18 m. derinlikte (su seviyesinin 1.5 m. altında) başlamaktadır ve uzunlukları 2.63 m. dir. Kazıkların üzerine horasan kireçten oluşan bir radye başlık yapılmıştır, kazık tabanları ana kayaya oturmaktadır.

Ahşap kazıklar, hafif oldukları için kolay nakledilebilirler, özellikle killerde kazık-zemin arasında iyi bir adezyon sağlarlar. Su seviyesi altında ömürleri uzundur. Ancak, su seviyesi üstünde mantar ve bazı böcekler tarafından tahrip edilirler. Bu nedenle, üzerlerinde özel işlem yapılmadan su seviyesi üstünde kullanılmamalıdır. Ahşap kazıkların çürümesini önlemek için

kullanılan en etkin yöntem kazığın ahşap malzemesinin liflerine iyice sızabilecek edecek şekilde basınçlı kreozot uygulanmasıdır. Özel tesislerde yapılan bu işlem sırasında deniz suyu altında kalacak kazıklarda 1 m<sup>3</sup> hacme yaklaşık 250 kg kreozot uygulanır.

İtalya'da Venedik şehri çoğunlukla Ahşap kazıklar üzerine oturmaktadır. 1975 yılında başlatılan bir program çerçevesinde buradaki pek çok yapının restorasyonu için kazık boylarının kreozotlanmış ahşap elemanlar kullanılarak uzatılması gerekmiştir. Bu işlem sırasında ekleme yerlerini çelik boru ile kavrayarak desteklemek veya bulonlu çelik levhalarla birleştirmek yoluna gidilmiştir.

Ahşap kazıkları sert zeminlere, sıkı kum-çakıl tabakalarına çakmak zordur. Aşırı çakma halinde uçları veya gövdeleri çatlayabilir ve/veya kırılabilir. Bu nedenle, çakma sırasında kazığın davranışı gözlenmeli, giriş miktarı/tarbe sayısı oranı dikkatle izlenmelidir.

Ahşap kazıkların taşıma gücü yüksek değildir. Yaklaşık olarak 20-25 cm çaplı bir kazığın taşıyacağı yük 200-300 KN civarında düşünülebilir.

#### 1.3.2.2. Betonarme Kazıklar

Betonarme Kazıklar bugün yurdumuzda en çok uygulama alanı bulan kazık tipidir. Birçok değişik teknikte imal edilen bu kazıklardan en yaygın olanlarını iki kategoride düşünmek mümkündür :

a. Önceden dökülerek yapılan ve sonra çakılan kazıklar, (Çakma Betonarme Kazıklar) ve

b. İş Yerinde dökme kazıklar.

Her iki tip kazığın betonunun dayanım gücü kazıkların nakledilmesi ve yerleştirilmesinden önce en az  $2.25 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup> ve çakılmadan önce  $3.50 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup> olmalıdır.

1.3.2.2.a. Önceden Dökme Kazıklar (Çakma Betonarme Kazıklar) Fabrikada önceden dökülen bu kazıklar çakılacakları yerde vinçler vasıtası ile dikilerek bir çakma platformuna konurlar ve üzerlerine düşürülen ağırlıkların sağladığı darbelerle zemine çakılırlar. Bu nedenle bunlara yaygın olarak “Çakma Kazık” denilir. Önceden dökme betonarme kazıklar ya da çakma betonarme kazıklar, genellikle sabit kesitli imal edilirler, uç kısımları sivridir ve genellikle çakma sırasında tahrip olmamaları için bu uçlar çarık denilen bir çelik parça ile korunur. Tokmağın vuracağı kazık başlarına da koruma nedeni ile çelik ve/veya ahşap yastıklar konabilir. Kazıklarda boyuna ve enine demir donatısı yerleştirilir. Bu donatı kazığın taşıyacağı yükleri (moment ve kesme kuvvetleri) karşılamak yanında kazığın vinçlerle ve kancalarla kaldırılıp, yerleştirilmelerinde de güvenliği sağlarlar. Kazığın vinçle kaldırılması sırasında ya en ortadan ya da her iki ucundan uzunluğunun 1/3 mesafesinde askılayarak ve bu sırada diğer ucu yerden dayanak alacak şekilde kaldırmak gerekir. Aksi halde kazık kırılabilir. Minimum demir donatısı oranı %1-%4 arasındadır. Betonarme kazıkların kesiti genellikle daire, kare,

sekizgen şekillerinden biri olmakla beraber özel olarak projelendirilen herhangi bir şekil de olabilir.

Betonarme kazıkların boylarını inşaat sırasında ayarlamak, yani kesmek, kısaltmak veya ek yaparak uzatmak oldukça zor bir işlemdir. Ancak, bazı hallerde kazık uzunluğunu tam olarak ayarlamak mümkün olmayabilir. Kazık boyu kısaltılacağı zaman kısaltılacağı seviyede çevresinde çekiç ile bir oyuk açılarak donatı demirleri ortaya çıkarılır ve kesilir. Kazığın üstte kalan kısmı da koparılarak kesilir. Bu işlem sırasında donatı demirleri, eklenecek üst kısım ile adanans sağlayacak kadar ortaya çıkarılmalı ve bu kısımda kazık betonu kesilerek üst kısma dökülecek betonla demirlerin uygun birleşimi sağlanmalıdır. Ekleme işleminden sonra bu ek yerlerinde kazık çevresine bir çelik manşon konması uygun olur.

Beton kazıkların ömrü pratik olarak uzundur. Bazı özel durumlarda, (örneğin yeraltı suyunun betona zararlı maddeler içermesi, kazığın mevsimlik donma - çözülme olayı yaşanan bir yerde ve zeminde bulunması, devamlı akarsu ve dalga etkisine uğraması v.b gibi) kazık ömrü kısalmıştır. Kazık ömrünü uzatmak için en etkin yol, kazık betonunun kaliteli olarak imalidir. Zemin suyunun kimyasal analizi yapılarak sülfat içeren zemin suyuna rastlanması halinde sülfata dayanıklı çimento kullanılmalıdır. Betonarme çakma kazıklar öngerilmeli olarak da imal edilmektedir. Bu kazıklarda yüksek kaliteli beton kullanıldığından ötürü yük taşıma kapasiteleri normal betonarme kazıklara nazaran daha yüksektir. Öngerilmeli beton kazıklar genellikle boru şeklinde üretilirler. Bu üretim sırasında

santrfüj tezgahlarından yararlanılır. Boru kesidinde hem demir donatısı hem de öngerilmeli çelik teller yer alır.

#### 1.3.2.2.b. İş Yerinde Dökme Kazıklar

Özellikle bu tür kazıkların pek çok firmanın patentleri uyarınca yapılmaları nedeni ile değişik yapım şekli bulunmaktadır. Bu kazıklar iki grupta toplanmış ve sık kullanılanlarından bazı örnekler verilmiştir:

##### i)Yerinde dökme betonarme çakma kazıklar:

Bu tip kazıklar; kaplama borusuz, kaplama borusu yerinde bırakılan, ve kaplama borusu çakılan tiplerde imal edilebilirler. “Kaplama Borusu”, yapım sırasında zemin içinde yapılan kazığı çevreleyerek yerleşmesini sağlayan çelik bir borudur. İç çapı, kazığın dış çapıdır.

Bu şekilde yapılan kazıklar taşıyıcı eleman olabildikleri gibi, zeminleri sıkıştırmak için de kullanılabilirler.

Kaplama borusuz olanlardan “Kompres Kazığı” zemin içinde silindrsel bir çukur açan çelik bir çarığının zemine çakılması ve meydana gelen çukurun betonla doldurulması yolu ile oluşturulur.

“Raymond” kazıklarında ise konik veya silindir şeklindeki bir helisel kaplama borusu, bu borunun içine giren bir çelik mandrelin çakılması ile zemine girer. Sonra mandrel çıkarılır ve kaplama borusunun içi betonlanır. Konik olan kaplama borularının dış yüzü 1/10 eğimindedir. Raymond kazıkları görelî olarak yüksek yükleri (500-900 KN) taşıyabilirler.



Kazık çakılırken kaplama borusu çekip çıkarılan kazık tipine örnek “Franki Kazığı”dır.

Tablo 1.1. Franki Kazıklarının Yapısal Dayanım Gücü

| Kazık Çapı (mm) | Dayanım Gücü (kN) |
|-----------------|-------------------|
| 330-355         | 350               |
| 355-381         | 500               |
| 406-457         | 700               |
| 457-508         | 900               |
| 508-559         | 1100              |
| 584-635         | 1400              |

Franki kazığını oluşturmak için 30-50 cm çapında bir çelik borunun dibine kuru beton veya kum çakıl konarak tokmaklanır. Çelik borunun dibindeki beton tampon gibi çalışarak, boruyu zemin içine doğru sürükler. İstenilen derinliğe inilince, boru içine beton dökülerek tokmaklanır, bu esnada da boru dışarı çekilir. Tokmaklanarak sıkıştırılan malzeme zemin içine sıkıca yerleşerek kazığı oluşturur. Franki kazıkları, killi zeminlerde kullanıldığı gibi, gevşek kumlarda da uygulanabilir. Bazen boru dibine beton yerine kum-çakıl veya taş konarak tokmaklanır.

Örneğin deprem bölgelerinde sıvılaşma gösterebilecek gevşek kumlu zeminlerde bu tip bir işlem zemini sıkıştırıp sıvılaşma potansiyelinin azaltılması için kullanılabilir. İri çakıl ve taş hem taşıyıcı özelliğe sahiptir hem de deprem sırasında oluşacak aşırı boşluk suyu basıncını söndürmede yardımcı olarak sıvılaşma tehlikesini azaltır. Ancak bu tip kazıklar şehir içinde ve binalar yakınında çakma sırasında meydana gelecek şok ve titreşim dikkate alınarak dikkatle ve gerekli önlemler alınarak çakılmalıdır.

“Simplex” kazık tipinde konik bir çelik uç ile arkasındaki kaplama borusu zemine çakılır. Beton dökülürken kaplama borusu çekilir ve uç ise zeminin içinde ve kazık ucunda kalır. Bu, kazık çakma işlemlerinin çok süratli yapılmasını sağlayabilir. “Geliştirilmiş Simplex” kazıkta ise timsah ağzı denen, açılıp kapanabilen özel uçlu bir kaplama borusu zemine çakılır. Sonra beton dökülürken timsah ağzı açılarak boru ile birlikte dışarı çekilir. Dökülen beton tokmaklanarak zemine uyumu sağlanır ve betonda boşluk kalmaması sağlanır.

Yapım şekli ne olursa olsun, bir çakma kazık içine çakıldığı zeminin yerini alır. Diğer bir anlatımla hacmi kadar zemini yerinden eder. Bu nedenle bunlara “deplasman kazığı” veya Türkçe deyimle “Öteleme Kazığı” denir.

#### ii) Yerinde Dökülen Kazıklar (Fore Kazıklar)

Pratikte sıkça “Fore Kazık” (veya “sondaj kazıkları”, “delme kazıkları”) olarak adlandırılan bu kazıklar; delme teknikleri kullanılmak veya boş bir boru çakılmak sureti ile zeminde oluşturulan bir deliğin içine gereğinde donatı da yerleştirilerek

betonla doldurulması yolu ile imal edilen kazıklardır. Fore kazıklar, çakma kazıkların aksine; zeminde yanal bir ötelenme ve buna bağlı olarak komşu zeminde sıkışma yaratmayan kazıklardır: Çok basit olarak tarif etmek gerekirse, önce zeminde bir delik açılır, bu deliğe demir donatı yerleştirilir ve alttan başlamak sureti ile delik betonlanır ve kazık oluşturulur. Bu işlem sırasında kullanılan yöntem ve teknoloji, kazık çapı, uzunluğu, zemin cinsi gibi etmenlere bağlı olarak değişebilir. Kullanılacak yöntem ve teknolojiyi seçerken en önemli unsur ekonomidir. Bu tür kazıklar yurdumuzda çok yaygın bir uygulama alanı bulmuşlardır. Bu nedenle özellikleri hakkında biraz daha geniş bilgi vermek yerinde olacaktır:

Bu kazıkların hem bazı avantajları, hem de dezavantajları vardır. Ayrıca bu kazıkların yapımı sırasında özellikle gözetilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Bu kazıkların avantaj sayılabilecek hususları ile dezavantaj olarak görülebilecek ve yapım sırasında özen gösterilmesi gereken hususlar aşağıda sıralanmıştır:

Avantajlar :

a. Fore kazıklar yapım sıralamasında temel kazısı yapılmadan önce de delinip yapılabirler. Bu işlem inşaat işine hız kazandırır. Bu durumda önce kazıklar oluşturulur. Kazık deliği kazık başlığının oturacağı temel derinliğine kadar cüruf betonla doldurulur, daha derindeki kısımları ise gerçek kazık olarak imal edilir. Cüruf beton kısım, kazık başlığı için gereken kota kadar yapılan kazı ile beraber alınır.

b. Zemin şartları uygun olduğu takdirde kısa zamanda inşa edilebilirler.

c. Büyük çapta ve derinliklerde inşa edilebilirler.

d. Zemin içinde Çakma Kazıkların çakılmasına engel olan taş ve bloklar, fore kazık için delme işlemi yapılırken (balta vs gibi) uygun teçhizat kullanılarak geçilebilir.

e. Delik açılması ve betonlama sırasında çevrede önemli titreşim, sarsıntı yaratmazlar. Bu nitelik, şehir içinde çevre yapıların bu tür etkilere karşı hassas olduğu durumlarda büyük bir avantajdır.

f. Kazıklar yerinde yapıldığı için, gereken malzeme kum, çakıl, su, çimento, demir olup, şantiyede bunların elde edilmesi kolaydır.

d. Gerektiğinde kazık dibinde enjeksiyon veya aşırı tokmaktama ile genişletilmiş bir bölge (soğan) oluşturularak taşıma gücü artırılabilir. Bu işlem kazığın çekmeye karşı dayanımını da artırır.

d.Sondaj deliğinden çıkan zeminin incelenmesi ile istenilen derinliğe inildiği ve istenen sağlam tabakaya erişildiği kolayca kontrol edilebilir.

e.Fore kazıkların boyu delme sırasında çıkarılıp incelenen zeminin niteliği göz önüne alınarak kolayca ayarlanabilir. Bu özellik, çakma kazıklarına göre büyük bir avantajdır.

**Dezavantajlar ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar:**

a. Yağışlı ve kötü havalar delme işlemi aksatır.

b. Beklenmeyen zemin şartları ile karşılaşılması halinde işlerde önemli gecikmeler olabilir. Bu nedenle, fore kazıkların yapılacağı alanda çok detaylı bir zemin etüdü yapılmış olmalıdır.

c. Kazık betonunun hazırlanması ve dökülmesi sırasında çok iyi bir teknik denetimin eksikliği halinde kazıklı sistem istenildiği gibi çalışmayabilir.

d. Yeraltı suyunun varlığı halinde şu nedenlerle özel dikkat gerekmektedir:

Yeraltı suyu beton kalitesini etkileyebilir, özellikle yeraltı suyu akımı olması halinde beton yıkanır ve kazık sağlıklı şekilde yapılamayabilir. Kazık deliği çevresindeki zeminde yıkıntı veya döküntü olabilir. Kazığın ucunun basacağı zeminde kaynama meydana gelerek bu zemini gevşetebilir. Bu durumların hassas zemin etüdüleri ile öngörülmesi ve gerekli önlemlerin alınması esastır.

Fore kazıklar, genellikle “uç kazığı” olarak kullanılırlar. Sert killerde kazık deliği kendini tutar ve deliğin üst 4-5 metresi dışında muhafaza borusu gerekmez. Ancak, kuru olsun, ıslak olsun; kum-çakıl, yumuşak kil, siltli kil, çamur ile yeraltı suyu altındaki silt veya ince kum zeminlerin varlığı, deliğin açılma işlemini zorlaştırabilir ve delik duvarı dengesinin güvenliğini tehdit eder, bu nedenle özel önlem alınması gerekir. Bu tip zeminlerde delik devamlı muhafaza borusu indirilerek açılır. Betonlama bitince borular çekilir. Ancak yeraltı suyunun betonu yıkama tehlikesi olan yerlerde muhafaza borusu içine yerleştirilen daha ince ikinci bir boru dışarı çekilmeden yerinde

bırakılır. Bu boru, yeraltı suyunun basıncını ferahlatarak yıkanmayı önler. Diğer taraftan bu önlemin çevre sürtünmesinin önemli ölçüde azalmasına neden olabileceğini gözden kaçırmamak gerekir.

Zemindeki blok ve taşlar “balta” denilen demir bir tokmağın düşürülmesi ile kırılabilir. Deliğin sondajla açılması sırasında, rotari sondaj ekipmanları, darbeli sondaj ekipmanları, burgular, kovalı sistemler kullanılabilir. Bazı özel makinalar, muhafaza borusunu titreştirerek zemine sokar, veya zeminden çekerler. Titreşim, zeminle boru arasındaki sürtünmeyi azaltır ve borunun rahat girmesini sağlar. Bu makinelerle büyük çaplı kazıklar oluşturulmaktadır. Deliğin betonlanması sırasında, delik içine dökülen beton tokmaklanır ve boru bu esnada dışarı çekilir. Titreşimli muhafaza borusu kullanıldığı hallerde ise, boruyu çekmek ve aynı zamanda betonu sıkıştırmak için basınçlı hava kullanılabilir.

Diğer bir betonlama usulü; de demir donatı deliğe indirildikten sonra bir enjeksiyon borusu ile basınçlı beton basılarak deliğin betonla doldurulmasıdır. Özellikle çevre demir donatısının iç çapı 60 cm. den küçük ise her ne kadar delik ağzından beton dökme ve vibrasyonla sıkıştırma yöntemi uygulanabilirse de yukarıdaki yöntem genelde tercih edilir. Kazığın, tasarımı öngörülen kesit alanını boylu boyunca yer yer incelmeden koruyarak yapımı çok önemli olup, bu yöntemle sağlanabilir. Betonun delik ağzından dökülmesi sırasında doğrudan doğruya betoniyerden veya kürekle beton dökme yoluna gidilmez. Çünkü, bu takdirde delik kenarlarına çarpan beton, toprakla

karışarak özelliğini kaybeder veya demir donatıya çarparak ayrışır. Beton, delik ağzından, tam delik ortasına yerleştirilecek özel kovalar (bena) vasıtası ile dökülebilir. Ancak bu işlem ara vermeden ve bir seferde yapılmalıdır. Su altında beton dökerken, kazık deliğinde hiç su olmamalıdır. Eğer bu sağlanamıyorsa delik, ağzına kadar su ile veya bentonit çamuru ile doldurulmalı ve betonlama en dipten başlayarak yapılmalıdır. Alman şartnamesi, fore kazıklarda kullanılacak betonun en az 350 kg dozda olmasını ve B225 kalitesini sağlamasını şart koşmuş olup, su ağırlığı/çimento ağırlığı oranını 0.6 olarak vermiştir. Bu şartnameye göre bir projede ilk 35 kazıktan kalite kontrolü için altışar adet beton deney küpü alınır. Bunların üçü 7 gün, diğer üçü 28 gün sonra kırılır. Betonun kalitesi, küp dayanımlarının ortalaması üzerinden standard sapması bulunarak saptanır.

Fore kazıkların proje ve inşası sırasında dikkat edilmesi gerekli şartlar ve tavsiyeler detaylı olarak TS 3168'de verilmektedir.

#### 1.3.2.3. Çelik Kazıklar

Bu kazıklar çakma kazık olarak kullanılırlar. Çelik kazıklar H veya I profili veya dairesel boru şeklinde olabilir. Boru şeklinde olanların uçları kapalı veya açık olabilir. Bu boruların içleri betonlanır. Çakma sırasında uçları takviye edilir. Uzatmak gerektiği hallerde perçin, bulon veya kaynak yapılırsa da pek çok şartname kaynak yapımını tercih etmektedir. Bu kazıklar yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uç kazıkları olarak kullanılabilirler. Ancak, yeraltı suyunun zararlı madde

içermesi halinde ve deniz içinde çabuk çürürler. Çürüme, oksijenin varlığına bağlıdır. Bu nedenle bu tür kazıkların ömürleri kumlu zeminlerde uzun olmayabilir, sert ve katı killerde ise oksijenin azlığı nedeni ile uzun süre yaşayabilirler. Çürümeye karşı korumak gerektiği hallerde dışları bitümlü maddelerle kaplanabilir, katodik koruma yapılabilir, veya beton gömlek içine alınabilirler.

#### 1.3.2.4. Kompozit (Karma) Kazıklar

Kompozit kazıklar, birden fazla farklı malzeme kullanılarak yapılan kazıklardır. Genellikle bu tip kazıkların alt kısmı ahşap, üst kısmı da beton veya çelikten oluşur. Ahşap kısım, çürümeden etkilenmeyeceği derinliklere (örneğin yeraltı su seviyesinin tamamen altına) kadar çakılır. Sonra üst kısım beton olarak, şartlara göre gereğinde kaplama borusu yerinde bırakılarak yapılır. Bu tip kazıkların uygulama alanı geniş değildir.

#### 1.3.2.5. Özel Kazıklar

Son yıllarda çeşitli amaçlar için özel kazıklar kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan “Mini Kazıklar“ 10-25 cm çapında olup, foraj yolu ile açılan deliğin basınç altında (gereğinde demir donatı da konarak) betonlanması ile oluşturulurlar. Mini kazıkların taşıma gücü yüksek olabilmektedir. Örneğin; 25 cm çaplı bir kazık 100 kN basınç yükü taşıyabilir. Kısa sürede pek çok kazığın yapılabilmesini öngören projeler için uygun olabilirler. Bina takviyesi için uygun kazıklardır. Ancak bu kazıkların moment taşıma



kapasiteleri yok denecek kadar azdır. Pratikte bu hususa çok dikkat etmek gerekir.

“Zemin Çivilemesi” denilen uygulamada bir anlamda kazık sayılabilecek elemanları doğal zemine çakmak, delik açarak yerleştirmek ve/veya titreşimle sokmak yoluyla zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Örneğin çelik donatı bir delik içine yerleştirilir ve bu delik betonlanır. 4-5 cm. çapında olan bu deliklere kimi zaman delikli bir boru sokularak beton bu boru içine basılır. Delikli boru da zemin içinde kalır. Donatılarla (çivilerle) zeminin etkileşimi oldukça karmaşıktır. Birçok halde bu elemanların zemin dışında kalan kısımlarının üzerine bir tel kafes yerleştirilerek bağlanır ve sonra yüzeye şotkret uygulanır. Bu tür bir zemin çivilemesi bilhassa şev ve kazıların denge güvenliğini artırmak ve mevcut yapıları takviye etmek için uygulanabilir. Bu alandaki deneyim; çivilenmiş zeminlerin monolitik bir blok gibi davrandığını göstermektedir.

“Kum Kazıklar”, zemin iyileştirmesinde kullanılan, fore kazık veya çakma kazık tekniği ile imal edilen ancak demir ve betonun kullanılmadığı tipte kazıklardır. Yumuşak killerde 70-80 cm çaplı, 2-3 m. aralıkla yerleştirilen bu kazıklar hem zemin taşıma gücünü artırmakta hem de oturmaları azaltmaktadır. Zemin iyileştirmesi için ön yüklemeye uygulaması yapılması halinde bu kazıklar zeminin geçirgenliğini arttırarak oturmanın hızlanmasını sağlarlar. Kazıkta kullanılacak granüler malzemenin içine kil tanelerinin girerek özelliğini bozmaması için kazık yapımında kullanılacak kumun dane dağılımı ayarlanmalıdır. Ancak son zamanlarda Geodren fitillerin daha

ekonomik olmaları ve daha kısa sürede çakılmaları nedeni ile bu tür kazıkların uygulanması çok azalmıştır.

Kireç, yumuşak killerin su içeriğini hidrasyon yolu ile azaltan, kil danelerinin zeta potansiyelini azaltarak “Plastiklik İndisi” değerini düşüren çökelmelerine (flokülasyonuna) yol açan, ayrıca zemin daneleri arasında bağlayıcı görevi yapan; dolayısı ile genelde zeminin dayanımını arttıran özelliklere sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle, killi zeminlerin stabilizasyonunda öteden beri kullanılmıştır. “Kireç Kazıklar” da benzer etkileri ile zemin iyileştirmesinde, uygulama alanı bulmaktadır. Bu kazıklar aynen kum kazıklar gibi delikler delinip içine kireç doldurularak imal edilirler. Şev stabilizasyonunda etkili oldukları bilinmektedir. Kazık uçlarında yüksek basınçla kretleme veya kazık ucunda zemini özel gereçlerle keserek kazık ucunu genişletmek yolu ile yapılan kazıklara “soğanlı kazıklar” denilir. Ucu genişletmek, kazığın taşıma gücünü arttırır.

#### **1.4. İmalat Sırasında Zemin İçine Yerleştirme Tarzı**

Kazıkların zemin içinde neden oldukları sıkışma ve ötelenme yönünden sınıflandırılmaları ile “deplasman kazıkları” ve “deplasman yaratmayan kazıklar” tanımları ortaya atılmıştır. “Deplasman kazıkları”, isminden de anlaşılacağı gibi zemin içine çakılırlarken yerini aldıkları zemini yana doğru iterek yer değiştirmeye sebep olan çakma kazıklardır. Diğer bir deyişle çakma işlemi sırasında kazığın zemin içine itilmesi nedeni ile

yanlara doğru sıkışan zeminde bir hacim değişmesi söz konusu olur. Bu tip kazık kategorisine; önceden dökülmüş betonarme çakma kazıklar ile, yukarıda sözü edilen “Franki” kazıkları dahildir.

Çekme kuvveti taşıyorlarsa “Çekme Kazığı”, bir miktar yanal yük karşılamak için eğik çakılmışlarsa “Eğik Kazık” denebilir. Bazı kazıklar, bir kuşaklama kirişi üzerinde ankraj yapılarak dayanım duvarı elemanı olarak görev yaparlar. Bu tür kazıklar; duruma göre birbirleri ile ayrıık durumda olabilecekleri gibi kesişebilirler de. Kesişmeleri halinde kazıklardan biri donatılı, komşusu donatısız olarak yapılırlar. Böyle bir tasarımda önce kazıklar yapılır. Sonra kazı, kademeli olarak devam ederken gereken kademelerde kazıkların meydana getirdiği perde gerekli aralıklarla zemine usulunca ankrajlanır ve son kademe kazı ile beraber perde duvar inşa edilmiş olur.

“Deplasman yaratmayan kazıklar” ise yukarıda tanımlanan, genelde fore kazık olarak bilinen ve zeminde önce bir sondaj deliği açılarak bu deliğin içine beton (gerekirse demir donatılı olarak) yerleştirilmek suretiyle imal edilen kazıklardır. Burada kazığın içine yerleşeceği zemin önceden hafredilmiş olduğundan kazık imal edilirken zeminin ötelenmesi veya sıkışması söz konusu olmaz. Dolayısı ile bunlar “deplasman kazığı” değildirler.

Kazıklar, taşıdıkları yükün niteliğine göre de adlandırılabilirler. Örneğin “Sıkıştırma Kazığı” adı verilen kazıklar gevşek kumlu zeminlerin içine çakılarak meydana gelen şok neticesinde zeminin sıkışmasını sağlarlar.

## **KISIM 2. EKSENEL DÜŞEY YÜK ALTINDA DAVRANIŞ**

## **2.1. Sürtünme Kazıklarının Davranışı**

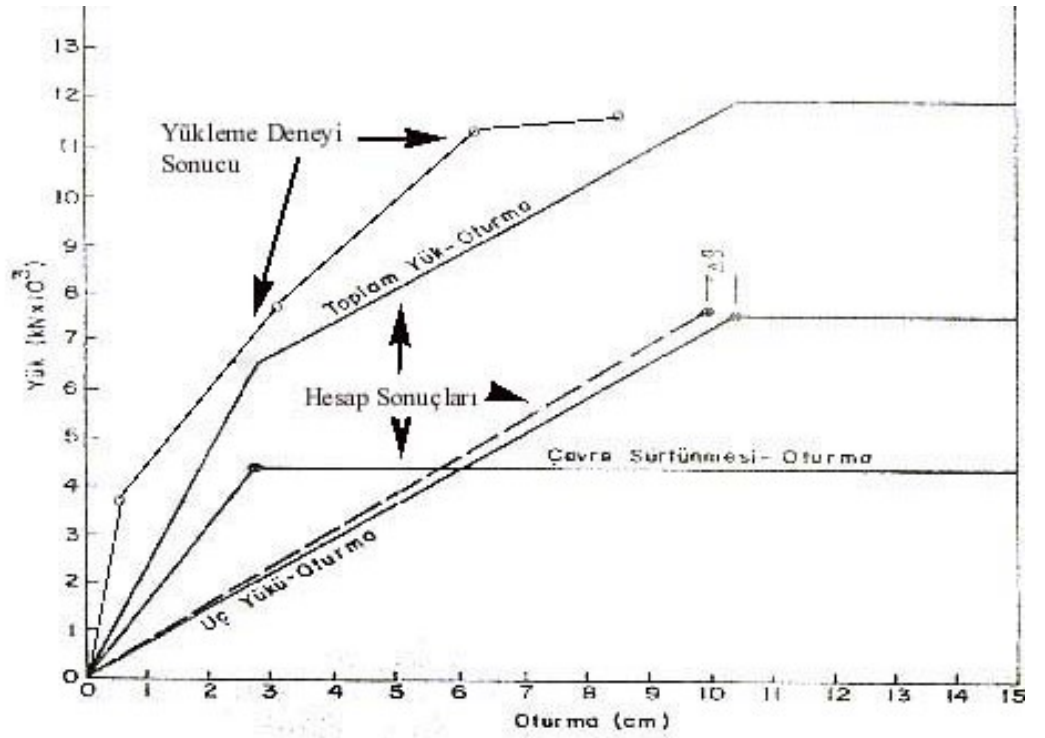
Yarı Sonsuz bir zemin ortamı içindeki bir kazık yüklendiği zaman bir miktar oturur, bu arada kazık yüzeyi-zemin arasındaki sürtünmeden ötürü çevre zemini de oturur ancak kazık zemine kıyasla daha fazla hareket eder. Bu durumda kazık ile zemin arasındaki yüzeyde zeminin aderans özelliği harekete gelir ve sonuçta kazık yüzeyinde oturma yönüne ters yönde bir sürtünme direnci oluşur. Buna “Çevre Sürtünmesi” denir. Bu hareket sırasında kazığın tabanı da dayandığı zemine basarak bu zemini sıkıştırır. Bu eylem sırasında yüzeysel bir temelin tabanındakine benzer şekilde kazık tabanında bir taşıma gücü veya kazıklara özgü deyimle uç direnci oluşur.

### **2.1.1. Çevre Sürtünmesi ve Uç Direnci**

Kazığın çevre zeminine göre yaptığı göresel hareket sonucu doğan bu iki direnç elemanı bu harekete koşut olarak artarlar ve sonunda kendi sınır değerlerine varırlar. Burada ilginç husus şudur: Her iki elemanın sınır değeri farklıdır ve bu değerlere ayrı ayrı oturma değerlerinde ulaşılır. Örneğin genel Alman pratiğine göre oturmaya bağlı olarak oluşan bu direnç elemanlarından “Çevre Sürtünmesi” ( $Q_c$ ) kazığın zemine rölatif olarak çapın yüzde biri kadar, “Uç Direnci” ( $Q_u$ ) ise yüzde onu kadar bir hareketi ile sınır değerlerine ulaşılır. Esasen bu hareket değerleri yaklaşık olup zemin tipine göre değişebilir. Bu iki direnç elemanının toplamına kazığın “Toplam Taşıma Gücü” veya kısaca “Taşıma Gücü” ( $Q_{top}$ ) denir. Oturma ile oluşan direnç, hesap ve deney sonuçları ile Şekil 2.1 da yansıtılmaktadır. İleride kazıkların taşıma gücü konusu

işlenirken işlenecek olan bu konu, tasarım için çok önemlidir. Bu aşamada yalnızca şu noktanın altı çizilecektir:

Tasarlanan pek çok kazık, Şekil 2.1. de görülen çevre sürtünmesinin sınır değerinin altında çalışırlar. Bu nedenle son yıllarda yürürlüğe giren pek çok şartname “Uç Direnci” ve “Çevre Sürtünmesi” bileşenlerine ayrı ayrı güvenlik katsayıları uygulanmasını gerekli görmektedir.



Şekil 2.1. Kazık Davranışı

Şekil 2.1; belli bir kazık için Yük-Oturma probleminin çözülmesine ilişkin olup ilgili hesaplar ileride Kısım 5 de görülecektir.

Bu aşamada bu davranış biçimlerine uygun olarak olarak 1.3.1. paragrafında yük taşıma ve iletme kriterine göre ayrımlayarak görmüş olduğumuz iki ayrı tür kazığı ayrıca davranış itibarı ile de :

i) Sürtünme kazıkları

ii) Uç kazıkları

olarak ikiye ayırabiliriz. Şöyle ki:

Yarı sonsuz ortam içinde olan kazıkların yüklerini hem çevre sürtünmesi hem de uç direnci yolu ile taşıyacakları yukarıdaki açıklamalardan anlaşılmaktadır. Bu kazıklara “Sürtünme Kazığı” denilir. Sürtünme kazıkları “Yüzer Kazık” olarak da bilinirler.

Kazığın bir yarı sonsuz zemin içinde olmayıp tabanının sağlam bir kaya zemine bastığı düşünülebilir. Bu durumda kazık ile zemin arasında yukarıda anlatılan görelî 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 aşağıda incelenecek olan davranış tablosu göz önüne alınmak kaydı ile ihmal edilebilir.

Bu tip kazığın taşıma gücü doğrudan doğruya kazığın mekanik dayanımının (betonarme ise bu kesitin basınç dayanımının) bir güvenlik katsayısı ile bölünmesi suretiyle elde edilir. (Bu Kazık tipleri Şekil 1.1. de gösterilmiştir.)

Doğal olarak kazıklar, üstyapı yükünü temelde zemine nakletmeye uygun gruplar halinde tasarlanır ve yapılırlar. Bu nedenle tasarım için önce tek kazığın davranışı incelenir ve sonra bu incelemeden elde edilen sonuçlar, kazığın grup içinde yer alması nedeni ile meydana gelen değişikliklerin hesaba alınabilmesi amacıyla grup davranışı içinde gözönüne alınır.

Kazıklar, plan görünümünde “Kazık Izgarası” denilen bir plana uygun olarak çakılırlar. Bu ızgara, kare, dikdörtgen, daire, altıgen, sekizgen vb şekillerde olabilir. Bu geometrik şekil üzerinde kazıkların merkezleri planda tesbit edilir ve bu suretle ara mesafeleri belli olur. Ara mesafeler aksi söylenmedikçe merkezden merkeze alınır. “Kazık Izgarası”nın oluşturulmasında doğal olarak üst yapının şekli rol oynar. Dikdörtgen şeklindeki bir bina için bu dikdörtgen, silindirel bir su deposunun dairesel tabanı için ise dairesel biçimde tasarlanır. Bu ızgara, aynı zamanda bütün kazıkların başlarını monolitik, büyük bir yüzeysel temel içinde içine alacak şekilde tasarlanan bir “Kazık Başlığı”nın plandaki görünümü olur. “Kazık Başlığı” esasen tüm kazıkların başlıklarının içine gömüldüğü bir betonarme radyedir. Radye, mekanik açıdan rijit veya esnek olabilir. Kazıkların mekanik davranışı da bu esneklik derecesine göre değişir. Bu hususlara yeri geldiğinde değinilecektir. Tasarıma genellikle kazık başlığı radyenin zemine değmediğı varsayımı ile yaklaşılr. Zira genelde, bu başlığın altındaki zemin, özensiz gevşek dolgudur. Doğal zemin ise, kuruma ya da su etkisi ile oturarak radye tabanından ayrılır. Radyenin, yükün bir kısmını alabilmesi için taban zemininin özel hazırlanması

gerekir. Zemin-radye etkileşiminin tam olduğunun bilindiği bu haller için özel çözüm yöntemleri uygulanır. (Bkz. Kısım 8.)

### **2.1.2.Dirençlerin Kazık Boyunca Dağılımı**

Şekil 1b de gösterilen sürtünme kazıkları, yukarıdaki paragrafta görüldüğü gibi, zemin içinde “asılı” veya “yüzer” bir şekilde bulunurlar ve üstlerine uygulanan yükü zemine çeperlerinde meydana gelen sürtünme direnci ve tabanlarında oluşan uç direnci yolu ile ileterek taşırlar. Böyle bir kazığın uzunluğunun  $l$  ve çapının  $d$  olduğu varsayılabılır. Bu kazıktan çevre zemine yük aktarımının ne şekilde olduğunu saptamanın en kolay yolu kazık başı seviyesinden itibaren kazık eksenı boyunca değişik  $z$  derinliklerine birim deformasyon ölçerler yerleştirmektir. Bu ölçümler sonucunda kazık ekseninde belirlenen kuvvet  $Q(z)$ , derinliğe ( $z$ ) karşı çizilirse, bu yük aktarımının derinlikle değişimi bulunabilir.

Bu eğrinin  $z=l$  derinliğinde işaret ettiği kuvvet  $Q$  yükü taşıyan bir kazık için  $Q_u$  ise çevre sürtünmesi kuvveti  $Q_ç=Q-Q_u$  olacaktır. Buradan  $p$  çevre uzunluğu olmak üzere birim alana gelen çevre sürtünmesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$f_s = -\frac{1}{p} \frac{dQ_ç}{dz} \quad (2.1)$$

$Q_ç(z)$  derinlik boyunca azaldıkça  $f_s$  positif olur. Bunun tersi durum; negatif çevre sürtünmesidir ki bu soruna ileride değinilecektir. Deneysel ölçümlerle saptanan  $Q_ç(z)$  eğrisi kullanılarak kazığın her hangibir  $z$  derinliğindeki düşey ötelenmesi  $\rho(z)$  hesaplanabilir. Bu



hesap için kazığın elastik modülü (E) ile kesit alanı (A) bilinmeli ve kazık başının oturması  $\rho(0)$  da ölçülmüş olmalıdır. Bu durumda aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\rho(z) = \rho(0) - \frac{1}{AE} \int_0^z Q_\zeta(z) dz \quad (2.2)$$

Kazığın değişik derinliklerindeki ötelenme miktarlarını saptamanın diğer bir yolu ise birim deformasyon çubukları kullanmaktır. Bu çubuklar, kazık derinliği boyunca çeşitli derinliklerde kazık gövdesine bağlanmış olan basit çelik çubuklardır. Uzunlukları zemin yüzeyine kadar olduğundan buraya konulan bir ölçüm aracı ile kazık gövdesinde buldukları seviyeye göre ötelenme miktarını saptamak mümkün olmaktadır. Bu durumda; ölçülen ötelenme miktarları  $\rho(z)$ , derinliğe (z) karşı çizilirse (2.2) bağıntısı ile aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$Q(z) = AE \frac{d\rho}{dz} \quad (2.3)$$

Buradan çevre sürtünmesi; (2.1) bağıntısı ile bulunabilir.

Esasen yük aktarımı analizi yapılmasına yönelik olan tüm teorik yöntemler bu şekilde transfer fonksiyonu veya elastik ortam yaklaşımlarından birini takip ederler.

Transfer fonksiyonu yaklaşımında kazık uzunluğu  $l = n l_i$  olacak şekilde  $l_i$  uzunluğunda n eşit elemana bölünür.

Her bir (i) elemanında aksenal yük  $Q_i$  belli olunca çevre sürtünmesi  $f_{si}$  aşağıdaki basit statik bağıntı ile saptanabilir:

$$f_{si} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{pl_i} = \frac{\Delta Q_i}{pl_i} \quad (2.4)$$

Elemanların ağırlık merkezlerinin düşey ötelenmesi zemin ve kazık oturmasının eşit olduğu kabulü ile aşağıdaki mukavemet denklemleri ile bulunabilir:

$$\Delta \rho_i = \rho_{i+1} - \rho_i = \frac{Q_i l_i}{EA} \quad (2.5)$$

Kazık başının oturması  $\rho(0)$  ile kazık ucunun oturması  $\rho(l)$  için bu denklemlere benzer şekilde yazılacak iki bağıntı da eklenir. Bu şekilde  $n+2$  ötelenme miktarına karşı  $n+1$  denklem elde edilir. Aksenal kuvvetler biliniyor ise ve kazık başı / kazık ucu ötelenmesi bilinmekte veya varsayılmakta ise diğer tüm ötelenmeler saptanabilir. Eleman eksen kuvvetleri  $Q_i$  ise ötelenme; transfer fonksiyonu denilen fonksiyonlar aracılığı ile bulunur. Transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1} = f(\rho_i) \quad (2.6)$$

Kimi araştırmacı tarafından değişik transfer fonksiyonları teorik olarak üretilmiştir. Kimi araştırmacı ise bu fonksiyonun deneysel olarak bulunmasını önermektedirler. Literatürde ileri sürülmüş olan bazı transfer fonksiyonlarının açık ifadeleri aşağıda yer almaktadır:

Kezdi (1957) tarafından önerilen yöntem; silo basınçlarını hesaplamakta da kullanılan kemerlenme teorisine dayanmaktadır.

$$f = K_0 \gamma z \tan \phi \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-k\rho}{\rho(0) - \rho} \right] \right\} \quad \text{Kezdi (1957)}$$

$$f = K \left[ \sqrt{\frac{\rho}{\rho(0)}} - \frac{\rho}{\rho(0)} \right] \quad \text{Reese ve arkadaşları}$$

(1969)

$$f = K \gamma_w \left( \frac{\sigma}{p} \right)^n w \left[ 1 - \frac{Rf}{\sigma \tan \delta} \right] \quad \text{Holloway (1975)}$$

Deneysel olarak elde edilen diğer bazı transfer fonksiyonlarına referanslar ise Tablo 2.1 de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Transfer Fonksiyonları

Bunların detaylarına burada girmeye gerek duyulmamıştır. Ancak orijinal yayınlar kaynakça kısmına başvurulabilir. Görüldüğü gibi transfer fonksiyonları bir elemanın ötelenmesi ile o elemandan transfer edilen yük arasında ilişki kurarlar. Bu yaklaşımda bir elemanın davranışında diğer elemanların çevre yüklerinin aktarımından dolayı oluşabilecek sapmalar gözönüne alınmamıştır. Diğer bir anlatımla kazığı çevreleyen zemin; yük-ötelenme açısından doğrusal olmayan bir davranış gösteren yaylarla temsil edilmektedir. Bu yaylar, her elemanın ortasında yer almakta ve birbirlerinden bağımsız davranmaktadırlar. Ancak zemine

|           |                       |      |            |   |
|-----------|-----------------------|------|------------|---|
| her       | Teklif                | Eden | Transfer   | aktarılan yük; yukarıdaki aşağıdaki elemanları etkiler. Dolayısı ile transfer |
| aştırmacı |                       |      | Fonksiyonu |   |
| ve        | Seed ve Reese(1955)   |      | Deneysel   |   |
| da        | Reese (1964)          |      | Deneysel   |   |
|           | Coyle ve Reese (1966) |      | Deneysel   |   |

fonksiyonu fikri; gerçeği tam olarak yansıtamamaktadır.

Bu gerçektışı durumu bir anlamda düzeltebilmek amacı ile elastik ortam teorisini kullanarak yapılan yaklaşımlar söz konusu olmuştur. Bu teorinin uygulanmasında ortamın doğrusal elastik davranan, homojen ve isotrop olduğu varsayımı yapılır. Bu yaklaşımda kazık ötelenme miktarları  $\rho^{wi}$  ile zeminin ötelenme miktarları  $s^{wi}$  farklı kabul edilebilmektedir. Bu ek bir avantajdır. Bu yaklaşım sonunda (2.6) ile genel şekli verilen transfer fonksiyonu bağıntılarının yerine aşağıdaki şekilde n adet denklem gelecektir:

$$s^{w_i} = \frac{d}{E_s} \sum_{j=1}^n I_{ij} f_j + I_{ip} q_p \quad (2.7)$$

buna kazık ucunun oturmasını tanımlayan aşağıdaki denklem de eklenir:

$$w(l) = \frac{d}{E_s} \sum_{j=1}^n I_{pj} f_j + I_{pp} q_p \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde d kazık çapıdır. Çift alt indisli I katsayıları ise i elemanlarının  $Q_j$  kuvvetinin etkisi ile oluşan oturmalara etkin olan katsayılarıdır. Bu katsayılar yarı-sonsuz doğrusal elastik ortam içindeki bir nokta yükün yarattığı gerilme ve ötelenme hesabı için Mindlin (1936) tarafından önerilen çözümler kullanılarak bulunur.

Bu durumda yukarıdaki (2.7) ve (2.8) denklemlerine; kazık ile zemin arasında bir ayrılma olmadığı varsayımı ile ( $\rho^{wi}=s^{wi}$ ) yazılabilen n adet denklem eklenir:

$$\rho^{w_{i+1}} - \rho^{w_i} = \frac{Ql_i}{EA} \quad (2.9)$$

Kazık-zemin ayrılmasının söz konusu olması halinde (2.9) ifadesi:

$$\Delta Q_j = fPl_i \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. Burada f ilgi alanındaki noktada oluşabilecek sınır çevre sürtünmesi değeridir. Literatürde bu yaklaşım ile çözüme yönelmiş olan değişik bazı yöntemler Tablo 2.2 de gösterilmektedir.

Yukarıda sunulan yaklaşımın; bu kitabın ilerdeki kısımlarda görülecek olan çözümlerin oluşturulmasında kimi araştırmacılar tarafından izlenen yolu gösterdiği unutulmamalıdır. Kazıkların davranış mekanizmasını iyice kavrayabilmek için önce gerek sürtünme ve gerekse uç direncinin nitelikleri hakkında fikir sahibi olunması gereklidir.

Tablo 2.2 den de görülebileceği gibi başta Poulos ve çalışma arkadaşları olmak üzere çeşitli ilim adamlarının bu aşamaya kadar özetlenen genel çizgiyi izleyerek ve özellikle sonlu elemanlar yöntemini başarılı çözüm ağları ve sınır şartları ile beraber kullanmaları ile yıllarca sistematik bir şekilde yürütülen çalışmalar sonucunda bu hususta epey yol alınmıştır.

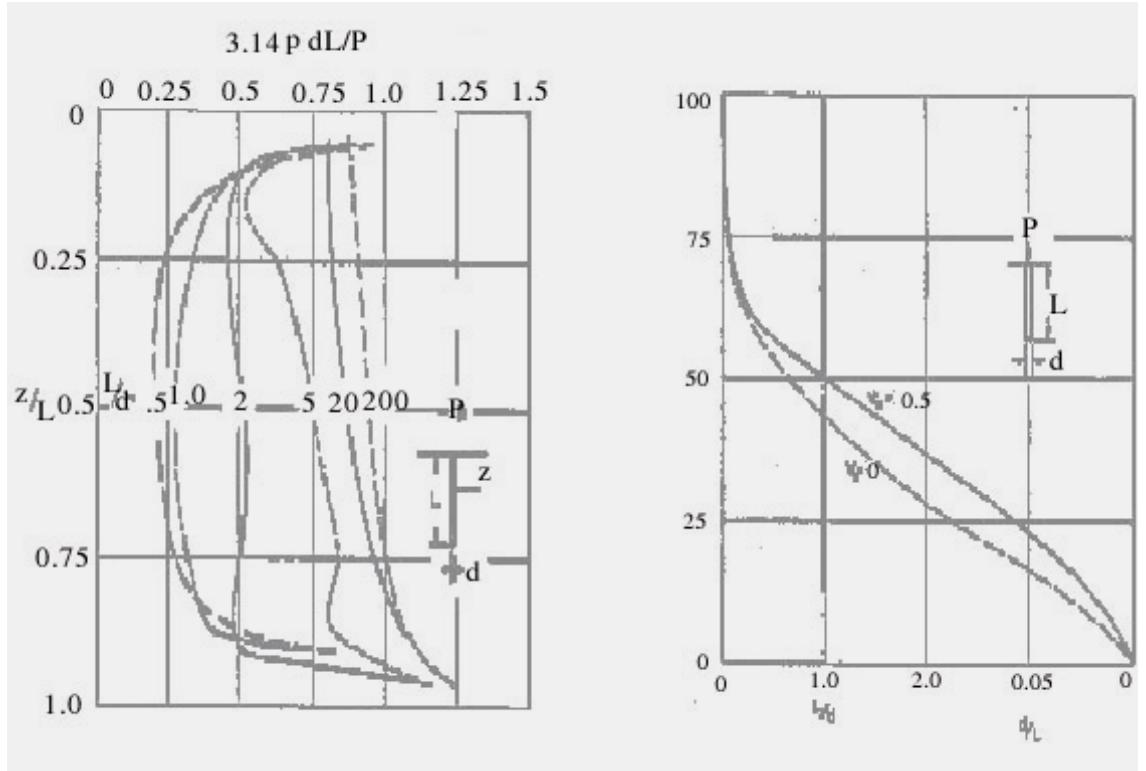
Sürekli ortam mekaniği çözümlerinde poisson oranının 0.5 olarak alınması sıkışamaz bir kazığı, 0 alınması ise düzlem deformasyon çözümünü işaret eder. Aşağıdaki anlatım içinde bu husus hatırlanmalıdır.

Tablo 2.2. Elastik Ortam Yaklaşımı ile Yük Transferi Analizi

| Araştırmacı                     | Yöntemin Özelliği                                     |
|---------------------------------|---|
| D'Appolonia ve Romualdi (1963)  | $\rho(l)=0$ ;kazık-zeminayrılması yok;<br>$E_s=sabit$ |
| Thurman ve D'Appolonia (1965)   | Özel hal; $E_s=sabit$                                 |
| Salaz ve Belzunce (1965)        | $E=\infty$ ; $E_s=sabit$ ; kazık-zemin ayrılması yok  |
| Pichumani ve D'Appolonia (1967) | Gruplar; özel hal; $E_s=sabit$                        |
| Poulos ve Davis (1969)          | $E=\infty$ ; $E_s=sabit$ ; genel hal; $E_s=sabit$     |
| Poulos (1968)                   | Gruplar; genel hal; $E=\infty$ ; $E_s=sabit$          |
| Mattes ve Poulos (1969)         | Genel hal; $E_s=sabit$                                |
| Poulos ve Mattes (1969)         | $\rho(l)=0$ ; genel hal; $E_s=sabit$                  |

|                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| Poulos ve Mattes (1971)      | Gruplar; genel hal; $E_s$ =sabit   |
| Poulos ve Mattes (1971,1974) | Gruplar; genel hal; tabakalı zemin |

Aşağıda Şekil 2.2 ile sunulan çevre sürtünmesi çözümleri bu süreç içinde elde edilmişlerdir. Bu şekil; rijit, sıkışamaz bir kazık için sol tarafta sürtünme direncinin derinliğe göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.2. Rijit Kazık Yüzünde Sürtünmenin Dağılımı ve Tabana Yük Aktarımı (Poulos ve Davis,1968a)

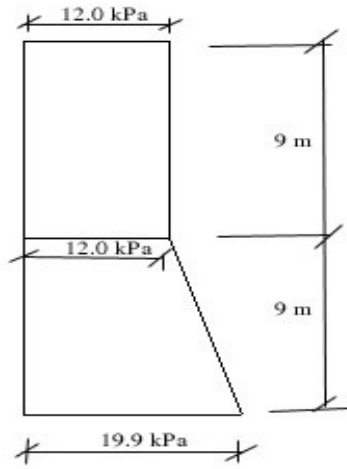


Burada düşey ekseninde  $z$  derinlik,  $L$  kazık boyu olmak üzere boyutsuz derinlik değişkeni  $z/L$  şeklinde gösterilmektedir. Yatay eksen ortalama sürtünme direncini göstermektedir: Bu direnç, kazık yüzeyindeki  $p$  birim sürtünme gerilmesinin kazık yüzeyi ile çarpılmasının kazığa uygulanan  $P$  yüküne bölünmesi ile elde edilmiş olan bir boyutsuz değişken olarak verilmiştir. Çap, uzunluk gibi diğer değişkenler şekilde tanımlanmışlardır. Değişim 0.5 den başlayıp 200 e kadar giden çok geniş bir “narinlik oranı” (kazık uzunluğu/kazık çapı) yelpazesi için ayrı ayrı eğrilerle gösterilmektedir: Pratikte çoğunlukla geçerli olan narinlik oranları göz önüne alındığında (20-35 gibi) zemin yüzeyinden kazık ucuna doğru çevre sürtünme direncinin artan bir eğilim içinde olduğu görülmektedir. (Örneğin: Uygulanan yükün yaklaşık olarak yüzde sekseni gibi bir rakam yüzeye yakın kesimde, yüzde yüz yirmisi gibi bir rakam tabana yakın kesimde görülüyor.) Ancak kazığın yaklaşık yüzde yetmişbeş derinliğe karşı gelen bir kısmında ise bu artışın; görelî olarak daha az olduğu gözlenmektedir. Bu husus, rijit kazıklarda sürtünme direncinin derinlikle uniform bir dağılım gösterdiği varsayımını kabul eden araştırmacıların görüşlerini bir anlamda destekler niteliktedir.

Aynı şekilde sağda; rijit bir kazık için; kazık başındaki toplam yükün kazık tabanına aktarılan miktarı yüzde olarak (zeminin iki değişik poisson oranı için) gösterilmektedir. Bu şekilde dikey eksen, kazık tabanına iletilen yükün toplam kazık yüküne oranını, yatay eksen ise kazık uzunluğunun kazık çapına oranını (narinlik oranını veya dolaylı olarak kazık uzunluğunu) göstermektedir. Bu şekil; yukarıdaki paragrafta işaret edilen pratik narinlik oranları (20-35 gibi) için, toplam yükün tabana aktarılan oranının düşük olduğunu (%5 gibi) ortaya koymaktadır.

### **Örnek 2.1**

120 cm Çapında, 20 m boyunda bir betonarme kazık P=1000 kN yük taşımaktadır. Zeminin Poisson oranı 0.5 dir. Zeminin ve Kazığın elastic modülleri  $E_s=19775 \text{ kN/m}^2$ ,  $E_k=2.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ,  $K=1200$  dür. Çevre sürtünmesi (p) pek çok pratik hesapta kazık boyunca ortalama bir uniform değer olarak düşünülür. Böyle bir ortalama çevre sürtünmesi değeri kavramı ile gerçekler karşılaştırılırsa şu bulunur: Şekil 2.2 ye bakıldığında  $l/d=16.7$  için ortalama çevre sürtünmesinin (p) aşağıda basitleştirilmiş olan bir yamuğun diyagramına indirgenebileceği görülür:



Yamuğun üst ve altındaki  $z/l=2/35=0.06$  2.0 m içinde sürtünme olmadığı görülmektedir.

$z=2.0$  m derinlikte  $z/l=2/35=0.06$   
 $p \approx dL/P=0.76$

$z=18.0$  m derinlikte  $z/l=18/20=0.9$   
 $p \approx dL/P=1.10$ .

$$z=1.0\text{m derinlikte } p = \frac{1000 \times 0.76}{20 \times \pi} = 12 \text{ kN/m}^2$$

$$z=18.0\text{m derinlikte } p = \frac{1000 \times 1.10}{20 \times \pi} = 17.5 \text{ kN/m}^2$$

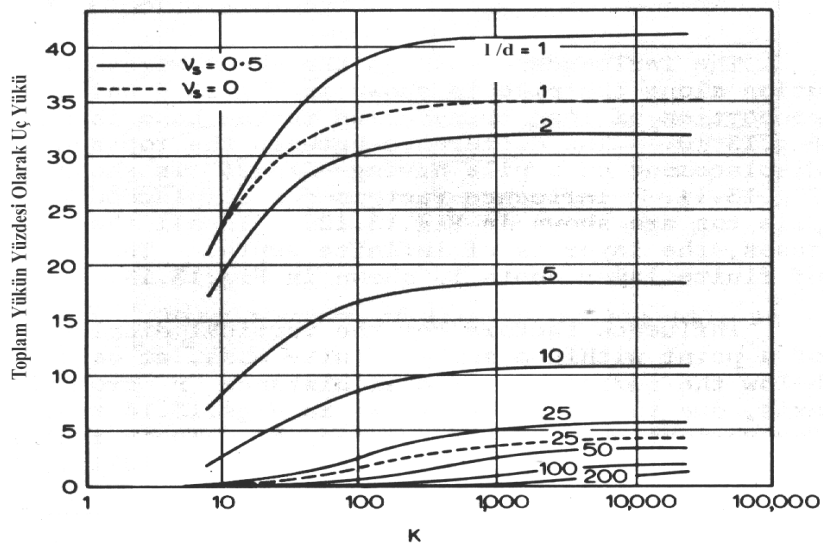
Yamuğun alanı çevre sürtünmesi gerilmesini verecektir:

$$P_s = \int_0^l p(z) dz = 12 \times 9 \times \pi \times 1.2 + \frac{12 + 19.9}{2} \times 9 \times \pi \times 1.2 = 907.6 \text{ kN olur.}$$

Taban basıncı ise Poisson oranının 0.5 olması halinde yükün 0.015 i, 0 olması halinde ise 0.08 i olmaktadır. Bu 150 ila 80 kN değerini verir.

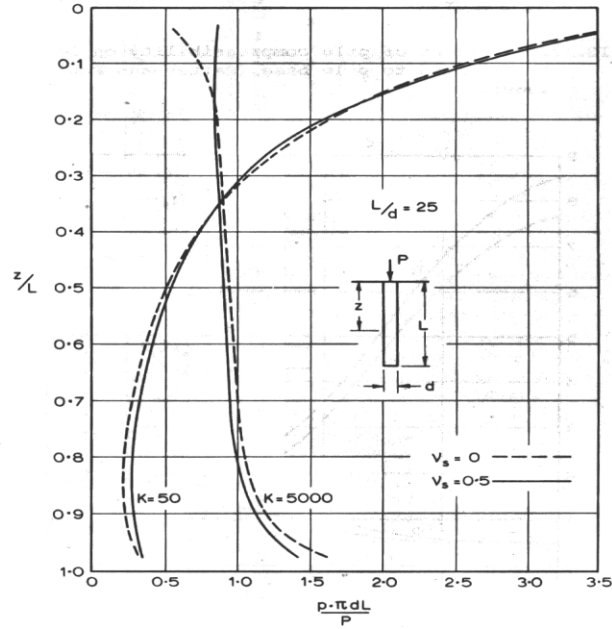
Toplam Yük yaklaşık olarak karşılanmaktadır.

Gerçekte kazıklar, rijit elemanlar değildirler. Sıkışabilir kazıkların davranışı Mattes ve Poulos (1969) tarafından incelenmiş olup Şekil 2.3. de bu tip kazıklar için kazık tabanına yük aktarımı gösterilmiştir. Bu şekilde, yatay ekseninde Kısım 5. de kazıkların oturmaları incelenirken kullanılacak olan bir K katsayısı yer almaktadır. Bu katsayı; kazığın sıkışabilirliğini hesaba ve gösterime almak amacı ile kullanılır ve Kazığın Elastik Modülü ile Zeminin Elastik Modülünün oranının kazık kesit alanı ile çarpımı sonucunda bulunur. Bu halde özellikle pratikte geçerli olan kazık narinlik oranları ( $l/d$ ) ve K (1000-10000) değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 2.2. ile elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında, kazığın sıkışabilirliğinin tabana aktarılan yük oranını ciddi bir şekilde azalttığını ve bu oranın rijit kazığın davranışı içinde yukarıda görülen orandan daha da az olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.3. Sıkışabilir Kazıkta Tabana YükAktarımı (Mattes ve Poulos,1969)

Aşağıdaki Şekil 2.4 ise sıkışabilir bir kazıkta çevre sürtünmesi dağılımını narinlik oranının pratikte çok kullanılan bir değeri olan 25 için göstermektedir. Bu şekilde de Şekil 2.2 de kullanılan semboller kullanılmıştır.  $K=5000$  katsayısı için dağılımın çok değiştiği ancak pratikte geçerli olabilecek bir  $K=5000$  katsayısı için sürtünmenin uniform sayılabileceği görülmektedir.



Şekil 2.4. Sıkışabilir Kazık Yüzünde Sürtünmenin Dağılımı (Mattes ve Poulos,1969)

Yukarıdaki gözlemlerden hareketle bir kazığın çevre sürtünmesinin kazık boyunca uniform olduğu ve uç direncinin ihmal edilebileceği kabulü yapılırsa bir kazığın zemin içindeki hareketi ile oluşan sürtünme direnci, aşağıdaki basit yaklaşımla ele alınabilir:

Yarıçapı  $r_0$  olan kazığın çevresinde oluşan kayma direnci  $p=\tau_0$ ; düşey denge sağlanabilmesi için kazık ekseninden  $r$  yarıçapı uzaklıktaki bir silindrsel yüzey üzerinde  $\tau$  kayma direncini oluşturur. Bu halde basit kayma durumu varsayılarak aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\tau = \frac{\tau_0 r_0}{r} \quad (2.11)$$

Diğer taraftan, birim kayma ötelenmesi  $\gamma$ , oturma  $w$  olmak üzere  $\gamma = dw/dr$  yazılabilir.  $G$  kayma modülü ( $G=\frac{E}{2(1+\nu)}$  kullanılarak (2.11) de yerine konur ve oturma'nın hesaplanması için etki yarıçapı boyunca birim kayma ötelenmesinin integrali alınırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$w = \int_r^{r_m} \gamma dr = \int_r^{r_m} \frac{\tau}{G} dr = \int_r^{r_m} \frac{\tau_0 r_0}{Gr} dr = \frac{\tau_0 r_0}{G} \ln \frac{r_m}{r} \quad (2.12)$$

Burada  $r_m$ , kazık çevresindeki gerilmenin dağılımı erişebileceği maksimum uzaklıktır. Araştırmacılar kayma birim ötelenmesinin sıfır olduğu ( $\gamma =0$ ) durumun geçerli olacağı bu uzaklığın değeri için çeşitli varsayımlar ileri sürmüşlerdir. Örneğin Randolph ve Wroth (1978) bu uzaklığın kazık uzunluğuna eşit olduğunu ileri sürerken Scott (1981) de Kısım 5 de görülecek olan analizine dayanarak bu uzaklığı 25 kazık çapı olarak kabul etmektedir. Esasen, pratikte çok

kullanılan bir narinlik oranı olan  $l/d=25$  için iki araştırmacının görüşleri çakışmaktadır.

Kazığın taşıdığı yük  $P = 2\pi r_0 L \tau_0$  ve dolayısı ile:

$$\tau_0 = P / 2\pi r_0 L \quad (2.13)$$

olduğundan devamla (2.12) bağıntısı kullanılarak kazığın yük-oturma niteliğini tanımlayan bir “yatak katsayısı”:

$$k = \frac{P}{w_0} = \frac{2\pi L G}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (2.14)$$

şeklinde elde edilir. Bu katsayının tanımı “yatak modülü” ile ilişkisi 2.3.1. kısmında açıklanmaktadır. Bununla beraber (2.14) bağıntısından görölmektedir ki; k parametresinin bilinmesi ile kazığın belli bir yük altındaki oturma miktarı saptanabilecektir. Kazık uzunluğu, yarıçapı ve zeminin kayma modülü bilinen özelliklerdir. Gerilme etkisinin erişebileceği uzaklığı tanımlayan  $r_m/r_0$  oranının bilinmesi halinde ise k parametresi kolayca hesaplanabilecektir. Yukarıdaki (2.14) ifadesi; Kısım 5 de (5.19) ve Kısım 8 de istatistiksel olarak elde edilmiş olup  $r_m$  değerini veren (8.4) bağıntılarına ilişkin olarak tekrar ele alınacaktır.

### 2.1.3. Zemin İçinde Gerilme Dağılımı

Kazıklardan evre zemine iletilen gerilmelerin bu ortam içinde yayılmaları üstünde durulmağa değer bir konudur:

Kazıklar gruplar halinde oluşturuldukları için bu grupların başlıklarının altından itibaren yer alan zemin tabakalarına aktarılan gerilmeler, gerek oturma gerekse taşıma gücü açısından incelenmeğe değer. Ayrıca, grup içindeki kazıkların çevresinde

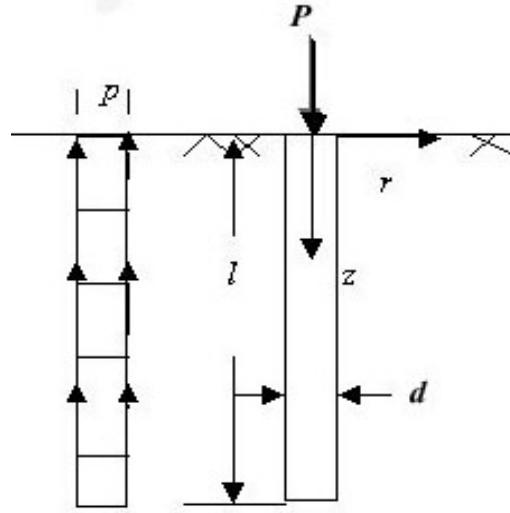
meydana gelen gerilme dağılımı da bu gerilmelerin komşu kazıklardan gelen gerilmelerle yaptıkları girişimlerin incelenmesi bakımından ilginçtir.

Ancak, bu gerilme dağılımının incelenmesinde aşağıdaki zorluklar vardır:

- a. Kazık başlığının taban zemini ile temas halinde olması durumunda gerilme dağılışı karmaşıklaşır.
- b. Kazıklararası gerilme girişimi, gerilme dağılımını karmaşıklaştırır.
- c. Konsolidasyon, tiksotropi, taban suyu seviyesinin değişmesi, zamana bağlı yükler gibi zamana bağlı olaylar, gerilme durumlarını değiştirirler.

Yukarıdaki etmenler bir yana bırakılırsa, gerilme dağılımı zeminin elastik bir yarı ortam olarak kabul edilmesi ile saptanabilmektedir. Yukarıda anlatıldığı gibi bu çözümler, doğrusal elastik yarı ortam içine gömülü bir nokta yükün yarattığı gerilme dağılımı için Mindlin (1936) tarafından verilmiş olan ve (2.9), (2.10) denklemlerine yol açan çözümler aynı şekilde kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yol ile Geddes (1960) tarafından gerçekleştirilmiş olan bir dağılım çözümü aşağıda sunulmaktadır. Bu yaklaşımda:

- a. Kazık yükünün yalnız kazık tabanından yayıldığı,
- b. Yayılımın uniform bir çevre sürtünmesi nedeni ile oluştuğu ve
- c. Çevre sürtünmesinin derinlikle doğrusal olarak arttığı kabulleri ile üç ayrı özüm elde edilmiştir:



Şekil 2.5. Kazık ve Üniform Çevre Sürtünmesi

Bu kitapta 2.1.2 kısmında sunulan gerilme dağılımı hakkında yapılmış olan gözlemler göz önüne alınarak Geddes'in (1960) "ortalama çevre sürtünmesinin kazık boyunca üniform olarak yayıldığı" kabulüne dayanan çözümü sunulmaktadır. Diğer varsayımlara dayanan çözümler ise klasik literatürde mevcuttur.

Bu çözüme göre Kazık-Zemin etkileşimi nedeni ile zemin içinde çevre sürtünmesinden dolayı herhangi bir noktadaki düşey gerilme :

$$\sigma_v = K_z (P/ D^2) \quad (2.15)$$

ifadesi ile saptanır. Bu ifadedeki ve Şekil 2.5. deki semboller aşağıda açıklanmaktadır:

$\sigma_v$  = Düşey Gerilme,



$K_z$  = Gerilme Katsayısı

$P$  = Kazığa Uygulanan Yük

$D$  = Kazık Uzunluğu

$d$  = Kazık Çapı

$x$  = Kazık Ekseninden Uzaklık

$z$  = Yüzeyden İtibaren Derinlik

Gerilme Katsayısı  $K_z$  ;  $M=z/D$ ;  $N= x/D$  boyutsuz değişkenleri ile Tablo 2.3. kullanılarak elde edilir. Bu Tabloda düşey kolonda  $M$  yatay kolonda ise  $N$  yer almaktadır. Ara değerler için enterpolasyon yapılabilir.

Tablo 2.3. Gerilme Katsayısı Değerleri ( $\mu=0.3$ ;Eksi İşareti Sıkışma Gösterir) (Geddes, 1960)

| M/N | 0.00    | 0.02    | 0.04    | 0.06    | 0.08    | 0.10    | 0.15    | 0.20    | 0.50    | 1.0     | 2.0     |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1.0 |         | -6.8149 | -3.4044 | -2.2673 | -1.6983 | -1.3567 | -0.8998 | -0.6695 | -0.2346 | -0.0686 | -0.0076 |
| 1.1 | -1.9219 | -1.8611 | -1.7072 | -1.5134 | -1.3211 | -1.1503 | -0.8368 | -0.6419 | -0.2335 | -0.0728 | -0.0091 |
| 1.2 | -0.9699 | -0.9403 | -0.9166 | -0.8825 | -0.8400 | -0.7922 | -0.6688 | -0.5588 | -0.2292 | -0.0760 | -0.0105 |
| 1.3 | -0.6430 | -0.6188 | -0.6099 | -0.5992 | -0.5850 | -0.5675 | -0.5157 | -0.4597 | -0.2207 | -0.0782 | -0.0120 |
| 1.4 | -0.4867 | -0.4558 | -0.4507 | -0.4461 | -0.4396 | -0.4316 | -0.4063 | -0.3761 | -0.2082 | -0.0796 | -0.0134 |
| 1.5 | -0.3766 | -0.3561 | -0.3533 | -0.3510 | -0.3476 | -0.3432 | -0.3291 | -0.3115 | -0.1934 | -0.0800 | -0.0148 |
| 1.6 | -0.3339 | -0.2895 | -0.2878 | -0.2863 | -0.2843 | -0.2817 | -0.2732 | -0.2621 | -0.1777 | -0.0796 | -0.0160 |
| 1.7 | -0.2864 | -0.2438 | -0.2414 | -0.2399 | -0.2384 | -0.2369 | -0.2313 | -0.2239 | -0.1623 | -0.0784 | -0.0172 |
| 1.8 | -0.2025 | -0.2065 | -0.2054 | -0.2044 | -0.2038 | -0.2026 | -0.1989 | -0.1938 | -0.1479 | -0.0766 | -0.0182 |
| 1.9 | -0.1847 | -0.1794 | -0.1785 | -0.1777 | -0.1768 | -0.1760 | -0.1733 | -0.1696 | -0.1347 | -0.0744 | -0.0191 |
| 2.0 | -0.1634 | -0.1565 | -0.1561 | -0.1556 | -0.1551 | -0.1545 | -0.1525 | -0.1498 | -0.1229 | -0.0718 | -0.0199 |

Grillo'nun (1948) çözümü uyarınca bir sürtünme kazığının  $P$  yükünün dağılarak aynı bir  $\sigma_v$  düşey gerilmesi yarattığı noktaların birleştirilmesi ile elde edilen "Eşdeğer Gerilme Eğrileri" Şekil 2.6 da örnek olarak gösterilmiştir. Bu eğrilere literatürde "Basınç Soğanları" denilmektedir.

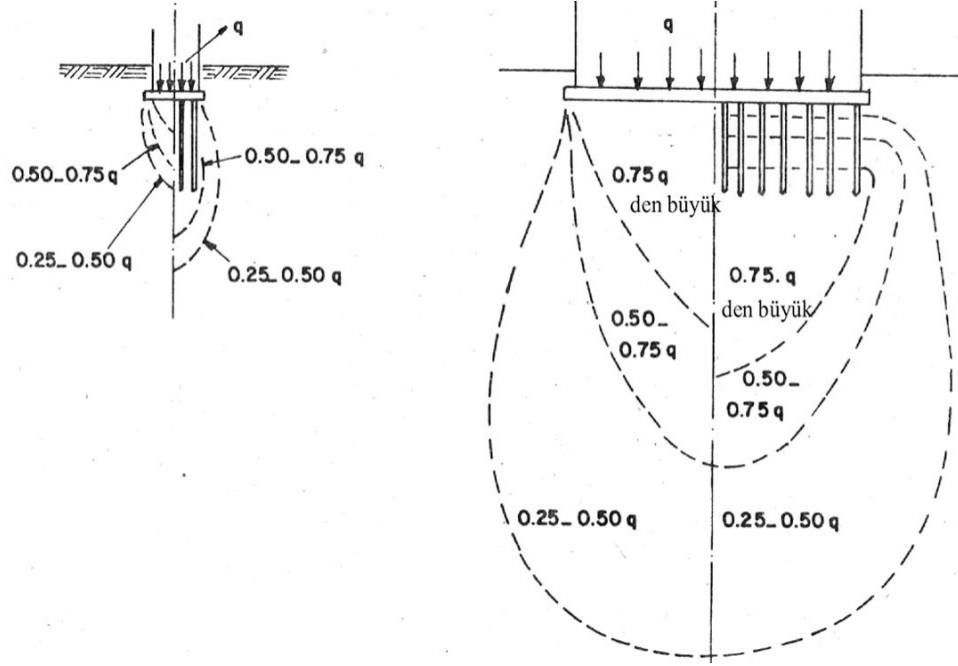


Bir kazık grubu içinde yer alan tek tek kazıkların yukarıdaki şekilde gösterilen “gerilme yörüngeleri”, kazık aralığına bağlı olarak örtüşürler ve tek bir kazığın gerilme soğanı, grup kazıklarının hepsinin beraberce oluşturduğu bir büyük soğana dönüşür. Kazık grubu tabanında ise aynı  $\sigma_v$  gerilmesinin çakıştığı noktalar daha derinlere kayar. Genellikle çamur kıvamında olmayan ancak kazık kullanılmasını gerektiren pek çok yumuşak zeminde, sıkışabilirlik derinlikle azalır. Dayanım ise artar. Bu nedendir ki derinlerdeki daha sağlam tabakaların gerilmelerin önemli miktarını üstlenmesi, dolayısı ile oturmaların azalması ve güvenliğin artması beklenebilir. Diğer taraftan derinleşildikçe daha zayıf zemine girilmesi halinde ise kazıklardan beklenen randımanın alınamayacağı aşıkardır. Zemin etüdü sırasında sondaj derinliklerinin, plan görünümünde yapının kısa boyutunun en az 1.5-2.0 misli olması gereğinin önemi bu şekilde bir kere daha vurgulanmış olmaktadır.

Ancak, yapı genişliğinin kazık boyuna oranla artması halinde kazıklı temellerin yüzeysel temellere göre önemli bir farkı olan bu özellik anlamını kaybedebilir. Bu durum Şekil 2.7 de sol tarafta dar, sağ tarafta ise geniş bir yapının radye veya kazıklı temel üzerine oturtulmaları halleri kıyaslanmak sureti ile görülebilecektir:

Bu şekilde hem sağda hem solda bulunan hallerde (şekillerde) simetri ekseninin solundaki basınç soğan yörüngesi radye temel, sağındaki ise kazıklı temel için geçerlidir. Her iki yapı da aynı bir  $q$  yükünü zemine ileteceklerdir. Kazık boyları aynıdır. Ancak dar bir yapıda kazıklar yükleri derinlere indirirken, geniş yapıda kazıklar bu yapı genişliğine kıyasla yeterli uzunlukta olmadıkları için

yükleri radye temeldeki duruma nazaran zeminin derinliklerine aktarmada etkili olamamaktadırlar. Özetle geniş bir yapıda görel olarak kısa kalan kazıklar nedeni ile kazıklı temel ile radye temel davranışı arasında bir fark olmayabilir. Kazıklı Temel-Radye Temel kıyaslaması yapılırken bu nokta göz önüne alınmalıdır.



Şekil 2.7. Yapı Genişliği-Kazık Uzunluğu Etkileri (Chellis,1961)

Öte yandan, kazık gruplarında, kazıkların zeminde yarattığı gerilme yörüngelerinin birbirine girişimi sonucu, ortadaki kazıkların etrafındaki zeminde oluşan yeni gerilmeler, kenar kazıkların çevresindeki zemine göre daha büyük olurlar. Kazık grubunun esnek bir kazık başlığına bağlandığı kabul edilirse, ortadaki kazıklar daha fazla otururlar. Diğer taraftan, eğer kazık başlığı rijit ise kazıklar eşit miktarda oturmaya zorlanacaklarında dolayı bu durumda en kenardaki kazıkların ortadaki kazıklara göre daha fazla

yük taşınması gerekir. Bu fark % 20-%30 lara kadar ulaşabilir. (Bu hususun mekanizmasına ileride ayrıca değinilecektir. Bkz. Kısım 5.)

Kazıklar arası etkileşim nedeni ile yüzer kazık gruplarında orta kazıkların arasındaki zeminde gerilme birikmesi olacağından dolayı bu alandaki zemin taşıma güçleri yerel olarak aşılabilir. Bu nedenle bir kazık grubunun taşıma gücü, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplanması sonucu bulunan değerden daha küçük olur. Buna “Grup Etkisi” denir ve projelendirmede göz önüne alınması gereken önemli bir husustur. “Grup” etkisini hesaplamak için mevcut yöntemlerden ileride bahsedilecektir. Halen tartışılan bir konu olmakla beraber model kazık deneylerinden elde edilen bilgilere göre kazıklar arasındaki mesafe 8 kazık çapının üstünde ise kazıklar arası etkileşim olmaz. (Bkz. Kısım 5.4.) Bu mesafenin kazık çapının 2 mislinden az olması halinde ise etkileşim o kadar fazla olur ki kazıklar arasındaki zemin kırılma noktasına ulaşarak tamamen plastikleşir ve çevresindeki kazıklarla beraberce bir blok gibi davranır. Diğer taraftan kazık aksları arasındaki uzaklığın artması halinde kazık başlarının üzerinde yer alarak bunları birleştiren kazık radyesindeki moment etkisi artar. Ekonomik olmayan bir yapı meydana gelir. Bütün bu gözlemler tasarımda kazık aksları arasında genellikle 3.5 ila 4.5 kazık çapı aralıkları kullanılmasını adet haline getirmiştir.

### 2.1.5. Örselenmiş Zeminlerde Direnç Değişimleri

#### 2.1.5.1. Thixotropi

Sürtünme kazıklarını yakından ilgilendiren bir başka husus da örselenmiş killerde “zamanla direnç kazanımı” (thixotropy) denen bir olaydır. Killi zeminde sürtünme kazığının çevre

sürtünmesi en fazla kilin kayma dayanımı kadar olabilir: Kazık yüzeyi ile zemin arasındaki yapışkanlık (adhezyon) zeminin kayma dayanımından fazla olsa bile, kazığa zemin dayanımını aşacak şekilde bir yük tatbik edildiği zaman, zemin, kazığın zeminle temas yüzeyine çok yakın bir mesafede kendi içinde yırtılarak kazığın göçmesine neden olur.

Öte yandan killi zeminlerde drenajsız kayma dayanımı zeminin örselenmesi ile önemli ölçüde azalır ancak zamanla yeniden artar. Bu olay “tiksootropy” olarak bilinir. Kazık çakılırken zemin örseleneceğinden dayanımı azalır. Çevre sürtünmesi de zemin dayanımının bir fonksiyonu olduğundan, kazığın zemine çakılmasından hemen sonra, azalan dayanım yüzünden kazığın taşıma gücü de nisbeten düşüktür. Zaman geçip dayanım artınca kazığın taşıyabileceği yük de artar. Bu nedenle, kazıkların taşıma güçlerini saptamak için yapılan ve ileride anlatılacak olan kazık yükleme deneyleri, killi zeminlerde, kazığın yapımından bir zaman geçtikten sonra uygulanmalıdır.

#### 2.1.5.2. Sıvılaşma

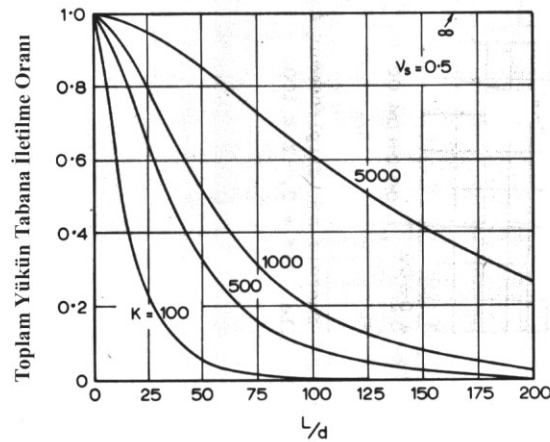
Yeraltı suyu altındaki ince kum ve siltli kumlarda da, kazık çakılırken boşluk suyu basıncı artar. Bu durumda efektif gerilme sıfırlanabilir ve zemin sıvılaşarak direncini kaybeder. Bu geçici bir olaydır. Çünkü boşluk suyu artık basıncı, çakma işleminden sonra zamanla söner ve zemin eski dayanımını yeniden kazanır.

## **2.2.Uç Kazıklarının Davranışı**

### **2.2.1. Yüklerin Aktarılması**

Uç kazıklarının, üzerlerindeki yükü aşağıda bulunan sağlam tabakaya kazık ucu yolu ile naklettiklerinden söz edilmişti. (Bkz.1.3.1.) Çevre sürtünmesinin oluşabilmesi için kazığın belirli bir miktar oturma yapması gerekeceği de yukarıda anlatılmış idi. (Bkz 2.1.1.) Uç kazıklarının rijid oldukları varsayılırsa bu tür bir oturma ancak taban zemininin oturması kadar olabilecektir. Bu hareket ihmal edilebilir mertebede olduğu için çevre sürtünmesi ihmal edilecek kadar az olur. Bu nedenle rijid 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.

Kazıkların sıkışabilir olduklarının kabulü halinde ise uygulanan yükün bir kısmı kazığın sıkışması sonucunda kazık yüzeyi ile zemin arasında meydana gelecek olan farklı oturmanın neden olduğu çevre sürtünmesi ile taşınacaktır; çözüm Tablo 2.2. de gösterildiği gibi Poulos ve Mattes (1969a) tarafından  $\beta(l) = 0$  durumu için gerçekleştirilmiştir. Bu durumda kazık tabanına iletilen yük de azalır. Şekil 2.8, bu durumu göstermektedir.



Şekil 2.8. Sıkışabilir Uç Kazıklarında Uç Yüğü Miktarı  
(Poulos ve Mattes,1969a)

Bu şekil; kazığın narinlik oranına ve K katsayısına bağılı olarak kazık ucuna iletilen yük miktarını göstermektedir. Pratikte sıkça rastlanan  $l/d = 25$  ve  $K=1000$  değeri için tabana toplam yükün % 80 inin iletildiği, gerisinin çevre sürtünmesi elemanınca üstlenildiği görülmektedir.

Uç kazıklarının tasarımındaki en önemli nokta, kazıkların dayandığı sağlam zeminin tesbitinde yanılığa düşülmemesidir. 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 yanılıgyı önler.

**Örnek 2.2.**

Sağlam kaya içine soketlenmiş bir uç kazığının uzunluğu 25 m, çapı 1.0 m, Elastik Modülü  $24 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup> dir ve 5000 kN yük taşımaktadır. Zeminin Elastik Modülü ise  $15 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> dir.

Bu kazığın ucunun güvende olup olmadığını bulunuz.

$$K = E_k / E_s = 1600$$



Şekil 2.8 den  $l/d=25$  olması halinde  $K=1000$  için 0.8 ve  $K=5000$  için 0.96 faktörleri bulunur.  $K=1600$  için enterpolasyonla yük azaltma faktörü 0.82 elde edilir.

Dolayısı ile kazık ucundaki yük:

$0.82 \times 5000 = 4100$  kN dur. Buradaki gerilme

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{4100}{0.25\pi(1.2)^2} = 3625 \text{ kN/m}^2 \text{ bulunur.}$$

Betonun basınç dayanımı 25 Mpa olursa bu değer taban basıncından çok fazla olduğundan kazık tabanında bir kırılmanın söz konusu olmayacağı anlaşılır.

### 2.2.2. Negatif Çevre Sürtünmesi

Kazık davranışında kazığın çevresindeki zeminden daha az veya daha çok hareket etmesi, kazık-zemin arasındaki sürtünmeyi harekete getirir. Kazık, çevresindeki zeminden daha fazla oturursa meydana gelen sürtünme yükün taşınmasına yardım edici yönde oluşur. Bu halde bir “pozitif çevre sürtünmesi” oluşumundan söz etmek olasıdır. Diğer taraftan, kazığın çevresindeki zemin herhangi bir nedenle kazıktan daha fazla oturursa kazığı da beraber sürükleyici etki yapar ve bu etki, taşınan yük ile aynı doğrultuda olur. Bu durumda (2.1.) bağıntısındaki  $Q(z)$  yük fonksiyonu derinlik boyunca artar ve çevre sürtünmesi  $f_s$  negatif olur. Meydana gelen çevre sürtünmesine “negatif çevre sürtünmesi” adı verilir. Negatif çevre sürtünmesi olgusu ile kazığın üzerindeki yükün arttığı anlaşılmaktadır. “Negatif çevre sürtünmesi” kazık projelendirilmesinde üzerinde önemle durulması gereken bir

olaydır. Bu olguya ait analizler ile hesap yöntemleri ileride 3.5 kısmında tanıtılacaktır.

## **2.3. Gözlemler ve Tanımlar**

### **2.3.1 Gözlemler**

2.1.2 paragrafında sunulan iki yaklaşım içinde özellikle elastik yarı ortam teorilerine dayanan çözümler daha fazla kullanılmaktadır. Bu çözümler, nümerik analiz yöntemlerinin bilgisayarlarda kullanılması ile elde edilirler. Ancak; bu işlemin bilinçli gerçekleştirilmemesi halinde bilgisayar denen kara kutu yanlış sonuçlara yol açabilir:

Her şeyden önce karmaşık bir ortamı Elastik Modül ve Poisson oranı gibi iki özelliğe bağlayarak çözmek fazlaca iyimserlik olmaktadır. Birçok zeminin gerilme, gerilme tarihçesi ve zamana bağlı davranış gösterdiği gözden kaçmamalıdır. Örneğin granüler bir zeminde elastik modülün derinliğin kare kökü ile orantılı olarak arttığı bilinmektedir. Ayrıca elastik modül, yükleme ve boşaltma kademelerinde değişik değerler almaktadır. Çakma kazıkların böyle davranan bir ortamda kullanılması halinde yatay yönde gelişecek olan ön yüklemenin, davranışı önemli ölçüde etkileyeceği bilinmelidir.

Elastik teori, sıkışma ve çekme için tek bir elastik modülün varlığını kabul eder; ancak zemin bünyesi çok az çekme gerilmesi taşıyabilir. Diğer yandan yük aktarımının Mindlin çözümü aracılığı

ile hesaplanması sırasında bu çözüm yükün uygulandığı seviyenin üstünde negatif basınç değerleri verir. Bu negatif değerlerin hesap yapılan seviyenin daha üstündeki seviyelerde uygulanan yüklerle oluşan basınç artışları ile telafi edilmemesi halinde zemin bu negatif basınçları iletmez. Sonuçta gerilme dağılımı Mindlin denkleminin bilinçsizce kullanılması halinde elde edilecek olan dağılımdan çok farklı olur. Bu noktaya açıklık getirebilmek amacı ile tartışılması bu aşamaya kadar ertelenmiş olan Grillo'nun (1948) Şekil 2.6 de gösterilmiş olan gerilim dağılımına dönülecektir. Bu şekilde D kazık boyunu, x kazık ekseninden uzaklığı göstermektedir: x/D oranı eksenden boyutsuz uzaklığı vermektedir. Aynı şekilde derinlik de kazık boyunun katları olarak z/D oranı ile gösterilmektedir.

Her hangi bir noktada gerilme hesabı yapmak için boyutsuz sayılar hesaplanarak şekle girildiğinde çevre sürtünmesinden dolayı düşey gerilmeyi hesaplayabilmek için kazığın simetri ekseninin solunda  $C_s$ , uç yükünden ötürü düşey gerilmeyi hesaplayabilmek için ise kazığın simetri ekseninin sağında  $C_p$  olarak tanımlanan etki katsayıları bulunabilmektedir. Bu katsayılar kullanarak gerilmeler aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesaplanabilir:

Çevre sürtünmesi yükü  $Q_c$  nedeni ile:

$$\sigma_z = \frac{Q_c}{D^2} C_s \quad (2.16)$$

Uç Yüğü  $Q_u$  nedeni ile:

$$\sigma_z = \frac{Q_u}{D^2} C_p \quad (2.17)$$

Şekil 2.6 incelendiğinde, kazık ucunun üst seviyelerinde oldukça önemli miktarda çekme gerilmesinin oluşmaması için çevre sürtünmesi yükünün, kazık ucu yükünden en az iki misli büyük olması gerektiği görülecektir. Bu durum ise ancak kohezyonlu zeminlerde görülebilir. Granüler zeminlerde gerçekleşme olasılığı daha azdır. Bu durumlarda bu şekil, gerçeği yansıtmaktan uzaktır.

Diğer taraftan, bu yolu izleyen çözümler kazıkların varlığının, zemin içindeki gerilme dağılımını hiç etkilemediğini kapalı şekilde varsaymaktadırlar. Diğer bir deyişle, zemin kazıkları içermeyen bir yarı sonsuz elastik ortamdır. Özellikle büyük çaplı kazıkların bu ortam içinde meydana getirebileceği “pekiştirme” yeterince etüd edilmemiştir.

Bununla beraber, yukarıda belirtilen eksikliklerden bazıları sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile giderilebilmektedir. Örneğin Ellison ve arkadaşları (1971) bilinear ve ötelenmenin gerilmenin bir fonksiyonu olarak davrandığı bir ortamdaki kazığın davranışını çözmüşlerdir.

Holloway (1975) ise hiperbolik bir gerilme-ötelenme kabulü ile ve basınç, çekme gerilmeleri durumlarında ayrı davranış modeli uygulayarak gerçeğe yaklaşan çözümler geliştirmiştir.

Bu olumlu örnekler son yıllarda daha da artmış olmakla beraber özellikle gerilme- gerilme tarihçesi ve zamana bağlı davranış içeren reolojik modellerin geliştirilmesine halen gereksinim bulunmaktadır.

### 2.3.2. Yatak Modülü ve Yatak Katsayısı

Gerek bu kitapta, gerekse yurdumuzdaki yayınlarda yukarıda (2.14) bağıntısında görüldüğü gibi Zeminin davranışını yaylarla temsil etmek amacı ile “yatak modülü” ve “yatak katsayısı” deyimleri kullanılır. Literatürde aynı k sembolünün değişik nitelikleri tanımlamak için liberal bir şekilde kullanılması, bazı yanlışlara neden olmaktadır. Okuyucunun ileride karmaşa ve yanlışlığı içine düşmemesi amacı ile bu deyimlerin kitap içinde kullanılmasına bu aşamada açıklık getirilmek üzere aşağıdaki tanımlar yapılmaktadır. Bu tanımlarla beraber k değerinin boyutları açıklanırken (K) kuvvet birimini, (U) uzunluk birimini gösterir.

Yatak Katsayısı veya Yatak Modülünün ( $k_0$ ) tanımı şöyle yapılabilir:

Bir plaka yükleme deneyinde P yük, q birim alana düşen yük, A plakanın alanı, y oturma miktarını gösteriyorsa  $k_0$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_0 = \frac{P}{Ay} = \frac{q}{y} \quad (\text{KU}^{-3}) \quad (2.18)$$

bu değere literatürde yaygın olarak kullanılan şekli ile “yatak modülü”, adını veriyoruz. Bu modülün kazıklarda kullanımı kazığın aksenel ve yanal olarak yüklenmesi hallerinde yük-ötelenme ilişkisini tanımlamak için kullanılır. Her iki haldeki plaka yükleme deneyine koşut tanımlar aşağıda verilmektedir:

Eksenini doğrultusunda yüklenmiş bir yüzer kazıkta uç yükü bir tarafa bırakılırsa “yatak modülü” şu şekilde ifade edilebilir:

$$k_0 = \frac{\tau}{y} = \frac{Q}{\pi d l y} = \frac{Q}{l y} \left( \frac{1}{\pi d} \right) \quad (\text{KU}^{-3}) \quad (2.19)$$

Literatürde çoklukla Terzaghi'nin (1955) verdiği bilgilere dayanılarak değişik zeminler için önerilen yatak modülü değerleri vardır. Bunların bilinçsizce kullanılmaları kullanıcıyı yanlış sonuçlara götürebilir. Kitapta bu hususa yeri gelince değinilecektir.

Buradan aşağıdaki “yatak katsayısı” tanımına geçilebilir:

$$k = \frac{k_s}{\pi} = k_0 d = \frac{Q}{l y} \quad (\text{KU}^{-2}) \quad (2.20)$$

Bu ifadede ikinci terim yalnızca bütünlüğü korumak için gösterilmiştir. Fiziksel bir önemi yoktur. Aynı bağıntı kazığın birim uzunluğuna düşen kazık yükü  $Q_l = Q/l$  göz önüne alınarak yazılabilir:

$$k = \frac{Q_l}{y} \quad (\text{KU}^{-2}) \quad (2.21)$$

Burada:

□ □ = Kazık-Zemin Yüzeyindeki Kayma Gerilmesi (Çevre Sürtünmesi),

$y$  = Oturma,

$Q$  =Kazık Yüğü,

$d$  = Kazık Çapı,

$l$  = Kazık Uzunluğu,

$Q_1$ =Kazığın Birim Uzunluğuna isabet eden yüktür.

Yanal yüklenererek kendisini sarmalayan zemine yaslanan kazığın zeminle temas alanının tayini kolay değildir. Bu durumda yatak katsayısı kazığın bir metre derinliği için ifade edilir. Alan bulmak için ise bu bir metre derinlik kazık çapı ile çarpılarak kullanılır. Bu durumda kazıklar için “yatak modülü” aşağıdaki bağıntı ile tanımlanabilir:

$$k_0 = \frac{q}{y} = \frac{Q}{Ay} = \frac{Q}{(1)dy} = \frac{Q}{(1)dy} \quad (KU^3) \quad (2.22)$$

“Yatak Katsayısı” ise:

$$k = k_0d = \frac{Q}{(1)y} \quad (KU^2) \quad (2.23)$$

şeklinde gösterilebilir.

Gerek yanal gerekse aksenal yüklenmiş kazıklarda Modül ve Katsayı değerleri kazık yükleme deneyleri, titreşim deneyleri gibi bağımsız deneylerle bulunabilmektedir. Bu niteliklerin önceden bilinmesi halinde; belli bir ötelenme miktarı için ne kadar yük gerektiği ya da

belli bir yük değerine ulaşılması için kazığının ne kadar ötelenmesi gerektiği bulunabilir. Bu bulgular tersinir olduklarından bunlara ulaşmak için bazı durumlarda yukarıda verilen ifadelerin tersinin kullanılabileceği açıkça görülmektedir.

Diğer taraftan literatürde liberal bir yaklaşımla bir kazığının belli miktar oturması için gereken yük:

$$Q = ky \quad (KU^{-1}) \quad (2.24)$$

ve oturma:

$$y = kQ \quad (UK^{-1}) \quad (2.25)$$

ile tanımlanabilmektedirler. (2.21) (2.23) denklemlerinde görülen birim uzunluk kullanımı nedeni ile bu tanımlar birbirlerine benzemektedirler ve bazen biri diğerinin yerine kullanılmaktadır. Bu kullanım sonucunda bir metre boyutu için denklemlere konulan (1) sayısı nedeni ile sayısal sonuçta da bir değişiklik olmamaktadır. Esasen (2.24) bağıntısı mekanikte tanımlanmış olan “rijitlik” ve (2.25) bağıntısı “esneklik” redörlerini gösterirler. Ancak kazığının yük altında oturma davranışını bir yayın sıkışması ile sembolize eden bu durumlarda “yatak katsayısı” deyimini yerine “yay katsayısı” deyimini daha uygun olacaktır.

### KISIM 3. KAZIKLARIN TAŞIMA GÜCÜ

#### 3.1.Genel

Bir kazığının taşıma gücünü kazık-zemin etkileşimi yönünden belirleyen başlıca iki etken, kazığı çevreleyen zeminin taşıma gücünü oluşturan mekanik özellikleri ile kazığının yapıldığı



malzemenin dayanımını oluşturan mekanik özellikleridir. Bu iki özellik kullanılarak kazık ve zemin ayrı ayrı değerlendirilir ve her ikisinin de uygulanan yük altında sağlam kalacakları kanıtlanır. Tasarım aşamasında öncelikle uygulanan yükün, kazığın yapıldığı malzemeye bağlı olan toplam kesit direncini aşmamasına özen gösterilir. Zemin dayanımı yönünden kazıkların taşıma gücü, önce teorik veya ampirik formüllerle bulunur. Formüller, kazık-zemin etkileşiminin statik dengesini yansıtan veya çakma kazıklarda kazığı çakmak için harcanan enerji ve/veya yapılan işi esas alan bağıntılardır. Kazıkların taşıma güçleri, bunları arazide yüklemek sureti ile de saptanabilir. Bu hususlar, aşağıda incelenecektir.

## **3.2. Statik Kazık Formülleri**

### **3.2.1. Genel**

Bir kazığın çevre zemini açısından toplam taşıma gücü genellikle iki bileşenden oluşur. Bunlar uç direnci  $Q_u$  ve çevre sürtünmesi  $Q_ç$  bileşenleridir.

$$Q_{top} = Q_u + Q_ç \quad (3.1)$$

$Q_{top}$  = Toplam Taşıma Gücü,

$Q_u$  = Uç Direnci

$Q_ç$  = Çevre Sürtünmesi Direnci

olmaktadır. Pratikte 3.1 denklemini ile bulunan değere bir güvenlik sayısı uygulanarak servis yükü elde edilir.

### 3.2.2. Uç Direnci

Uç direncinin niceliği 2.1. paragrafında etraflı olarak anlatılmış idi. Aşağıdaki paragraflarda, bu direncin hesaplanması için varolan belli başlı yöntemler sunulmaktadır:

#### 3.2.2.1. Uç Kazıklarında Uç Direnci

Uç kazıklarının uçları sert bir taşıyıcı zemin içine tesbit olunurlar. Genellikle bu taban zemininin taşıma gücü kazığın yapıldığı malzemenin basınç mukavemetinin üstündedir. Bu nedenle bir uç kazığının toplam taşıma gücü kazığın yapısal kesit direncine eşittir. Yukarıdaki 3.1. formülünde yalnızca  $Q_u$  gözönüne alınır. Grupta  $n$  kazık var ise grubun taşıma gücü  $Q_g = n \times Q_u$  olur.

#### 3.2.2.2. Sürtünme Kazıklarında Uç Direnci

Bu direncin hesaplanması için yapılmış olan çalışmalara kronolojik bir sıra içinde bakılırsa bunların; kazık ucunu bir yüzeysel temelin zeminle dokunma yüzeyi olarak kabul eden yaklaşımlardan başlayarak aynı ilkeye dayanan çeşitlemelerle devam ettikleri söyleyenebilir. Bu direnç Terzaghi (1967) taşıma gücü teorisi kullanılarak dairesel kesitli kazık uçları için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} (1.3cN_c + \gamma L(N_q - 1) + 0.3\gamma dN\gamma) \quad (3.2)$$

$L$  = Kazığın Zemin İçinde Kalan Toplam Boyu,

$c$  = Zeminin Kohezyonu,

$\gamma$  = Zeminin Efektif Birim Hacim Ağırlığı,

$d$  = Kazık Çapı,

$N_\gamma, N_q, N_c$  = Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayılarıdır.

$N_q$  katsayısının denklemlerde  $N_q-1$  olarak alınması, kazığın, net taşıma gücü ifadesinin kullanılması nedeniyledir. Diğer bir deyişle; kazığın yapılabilmesi için çıkarılan veya yer değiştiren zeminin ağırlığını temsil eden bir miktar, taşıma gücünden eksiltilmektedir.

Kare kesitli bir kazık için uç direnci:

$$Q_u = B^2 (1.3cN_c + \gamma L(N_q - 1)) \quad (3.3)$$

olur.  $B$  kare kesitli bir kazığın kesit boyutudur.

Granüler bir zeminde ( $c=0$ ) ise, (3.2) bağıntısında derinlik etkisini gösteren üçüncü terim genellikle birincinin yanında ihmal edilebilir. Bu durumda taşıma gücü ifadesi aşağıdaki şekle girer:

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \gamma L(N_q - 1) = A_p \cdot \sigma'_v \cdot (N_q - 1) \quad (3.4)$$

Terzaghi (1967), taşıma gücü katsayılarını zeminin içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olarak aşağıda Tablo 3.1 de gösterildiği gibi vermiştir.

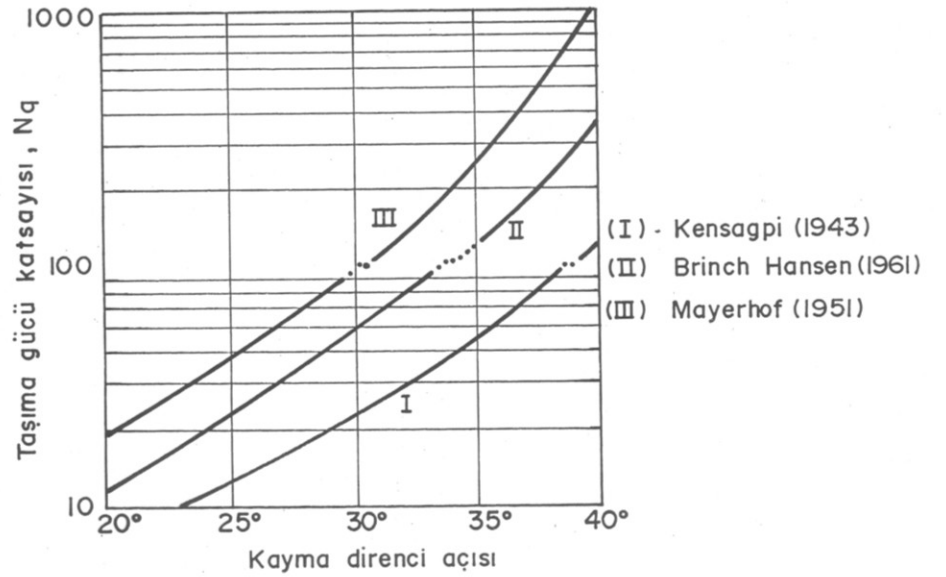
Tablo 3.1. Taşıma Gücü Katsayıları

| Zeminin İçsel<br>Sürtünme<br>Açısı | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ |
|------------------------------------|-------|-------|------------|
| 0°                                 | 5.7   | 1.0   | 0.0        |
| 5°                                 | 7.3   | 1.6   | 0.5        |
| 10°                                | 9.6   | 2.7   | 1.2        |
| 15°                                | 12.   | 4.4   | 2.5        |
| 20°                                | 17.   | 7.4   | 5.0        |
| 25°                                | 25.1  | 12.7  | 9.7        |
| 30°                                | 37.   | 22.5  | 19.7       |
| 35°                                | 57.8  | 41.4  | 42.4       |
| 40°                                | 95.7  | 81.3  | 100.4      |

Kumlarda, kohezyon sıfır alınarak uç direnci:

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} (\gamma L N_q + 0.3 \gamma d N \gamma) \quad (3.5)$$

Burada  $A_p =$  kazık kesit alanı,  $\sigma'_v =$  kazık ucunun bastığı seviyede etkiyen efektif düşey zemin gerilmesidir.  $N_q$  için çeşitli araştırmacıların tavsiye ettiği değerler Şekil 3.1 de beraberce gösterilmiştir. Bu değerler, Terzaghi tarafından verilen değerlerden (Tablo 3.1) farklıdır. Ancak kazık yükleme deneylerinin sonuçlarından yararlanılmak sureti ile geriye hesap yapılarak elde edildikleri için kıymet taşımaktadırlar.



Şekil 3.1. Taşıma Gücü Katsayısı  $N_q$  (Ordemir, 1984)

Yukarıdaki şekilde sunulan Meyerhof eğrisi yıllar içinde değişerek aşağıda Şekil 3.2 de sunulan şekle gelmiştir. Kohezyonlu zeminlerde ise uç direnci:

$$Q_u = \frac{\pi d^2}{4} (1.3c N_c + (D_f - 1)\gamma L) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada taşıma gücü katsayıları Tablo 3.1. den alınarak yerlerine konduklarında:

$$Q_u = 5.82d^2c \quad (3.7)$$

ifadesi bulunur. Zemin kohezyonunu gösteren c değeri yukarıdaki ifadede kullanılırken bir azaltma faktörü ile çarpılabilir. Örneğin fisürlü Londra killeri için zeminin ferahlama davranışı düşünülerek 0.75 faktörü kullanılmıştır.

Diğer taraftan Skempton'un (1951) dairesel temeller için taşıma gücünün derinlikle arttığı şeklindeki bulgusu kullanıldığında yumuşak killi zeminlerde kazık uzunluğunun, kazık çapının 20 katının üstünde olduğu pratik haller için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir:

$$Q_u = 7 d^2 c \quad (3.8)$$

Bazı araştırmacılar uç direnci ( $Q_p$ ) :

$A_p$  = Kazık Ucunun Kesit Alanı,

$q_p$  = Birim Alana Düşen Uç Direnci

olmak üzere aşağıdaki gibi ifade ederler:

$$Q_p = A_p \times q_p \quad (3.9)$$

Granüler-Kohezyonlu bir zeminde toplam uç direnci (3.10) ifadesi ile hesaplanabilir:

$$q_p = A_p (cN_c^* + \sigma_v' N_q^*) \quad (3.10)$$

burada:

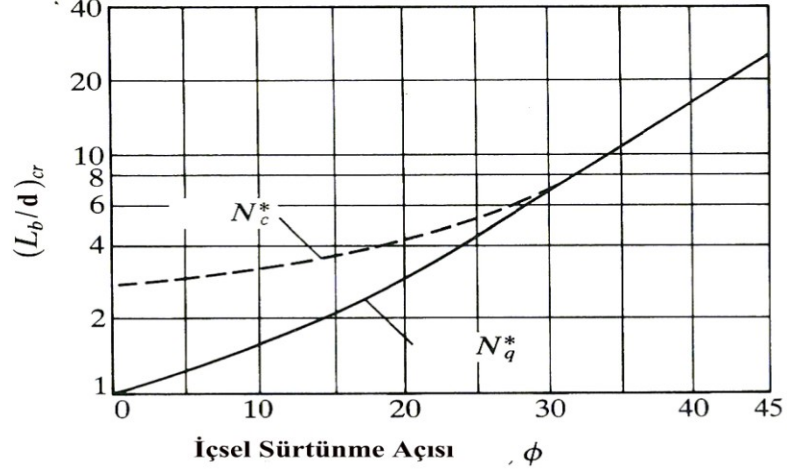
$c$  = Zeminin Kohezyonu,

$\sigma_v'$  = Kazık Ucundaki Düşey Efektif Gerilme,

$N_c^*$ ,  $N_q^*$  = Taşıma Gücü Katsayılarıdır.

Bu ifadedeki taşıma gücü katsayıları kazık ucunun biçim ve derinlik etkilerini yansıtır.

Meyerhof (1979), yukarıda sözü edildiği gibi, granüler zeminlerdeki uç direnci için değişik bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, kazık ucu direncinin derinlikle arttığını ancak belli bir kritik  $L_b$  derinliğinden sonra değişmediğini ifade etmektedir. Bu derinlik; kazık çapı ( $d$ ) cinsinden “Kritik Gömülme Oranı  $(L_b/d)_{cr}$ ” ile ifade edilir. Bu oranın; Şekil 3.2 de gösterildiği şekilde içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olduğu belirtilmektedir.



Şekil 3.2.  $L_b/d_{cr}$  Oranının İçsel Sürtünme Açısına Göre Değişimi

(Meyerhof,  
1979)

Bu durumda granüler zeminlerde ( $c=0$ ) uç direnci aşağıdaki gibi tanımlanır:

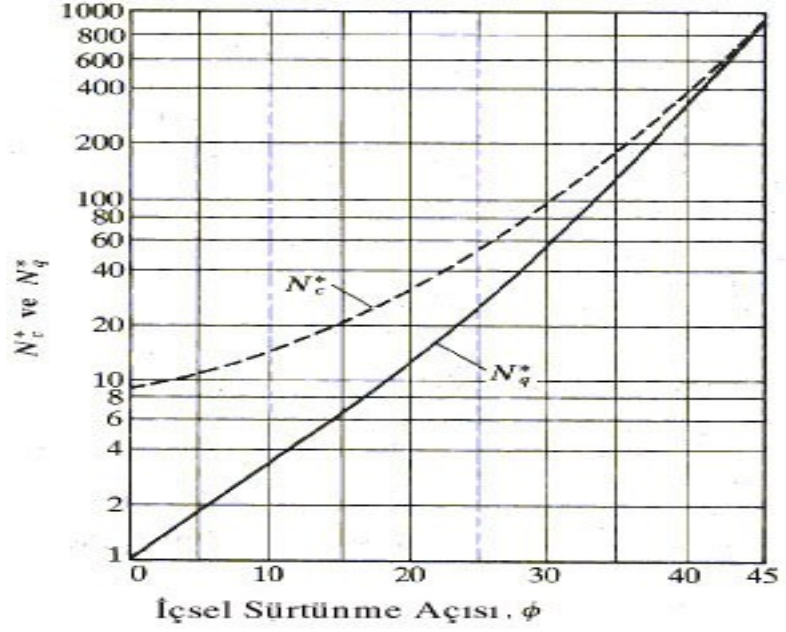
$$Q_u = A_p \cdot \sigma_v' \cdot N_q \quad (3.11)$$

Hesap yapılırken  $\sigma_v'$  değeri Şekil 3.2 kullanılarak bulunur. Bunun için zeminin içsel sürtünme açısı değeri ile abağa girilir ve “Kritik Gömülme Oranı” bulunur. Buradan  $L_b$  saptanır.

$\sigma_v' = (\text{Zeminin Efektif Birim Hacim ağırlığı}) \times L_b$  olur.

$N_q^*$  ise Şekil 3.3. den elde edilir.





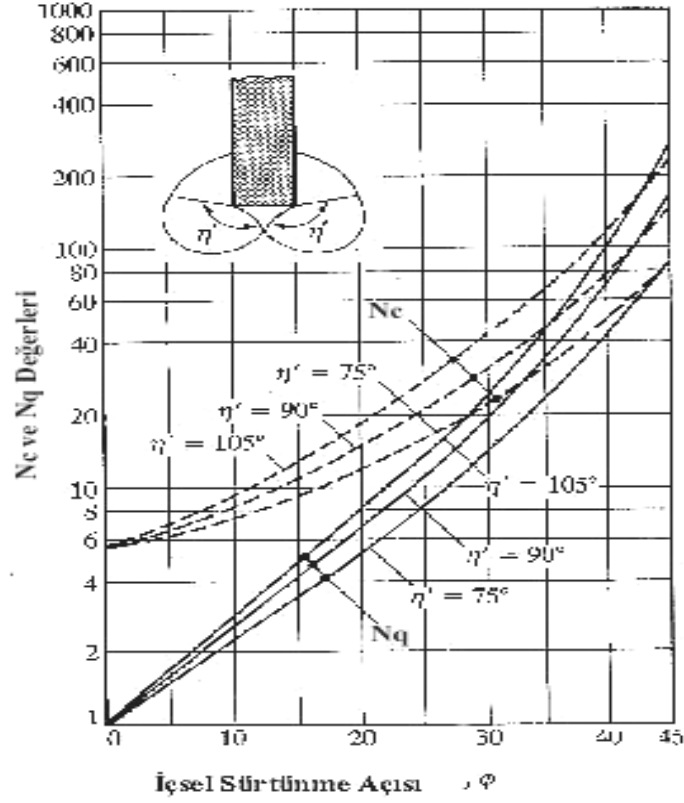
Şekil 3.3.  $N_c^*$  ve  $N_q^*$  Değerlerinin İçsel Sürtünme Açısı ile Değişimi (Meyerhof, 1979)

Suya doymun killer içindeki kazıklarda ise ( $\Phi=0$ ) (3.10) ifadesinden (3.7). ve (3.8) ifadelerine benzer şekilde aşağıdaki ifade elde edilir. Burada  $c_u$  kazık ucunun bastığı zeminin drenajsız direncidir.

$$Q_p = N_c c_u A_p = 9 \cdot c_u \cdot A_p \quad (3.12)$$

Burada pratikte  $N_c$  nin 9 olarak seçilmesinin nedeni  $l/d$  oranı genelde 3 değerinin üstünde olan kazıklarda Skempton (1951) tarafından verilen daire temellerin taşıma gücü ifadesindeki  $N_c$  değerinin bu orandan daha yüksek değerler için 9 olarak aynı kalmasıdır.

Kumlu-Killi Zeminlerde Janbu (1976) (3.10) ifadesini kabul etmekle beraber taşıma gücü katsayılarının kazık ucunda  $\eta'$  açısı ile tanımlanan bir taban göçmesi yüzeyi şekline göre Şekil 3.4 den alınmasını öngörmektedir.



Şekil 3.4 Janbu'nun Taşıma Gücü Değerleri (Janbu,1976)

### 3.2.3. Çevre Sürtünmesi Direnci

Granüler zeminlerde zemin ile kazık arasında fiziksel sürtünme, killi zeminlerde ise adezyon hareketlenmesi nedeni ile çevre sürtünmesi direnci oluşur. Bu direnç, aşağıda görüleceği gibi birim alanda oluşan direncin kazığın çevre yüzeyi ile çarpılması sonucu bir toplam taşıma gücü değerine ulaşır.

#### 3.2.3.1. Genel Formülasyon

Çevre zemini ile kazık çeperi arasındaki çevre sürtünmesinden doğan bu taşıma gücü bileşeni; kazığın içinde

bulunduğu her tabakanın çevre sürtünmesi ayrı ayrı hesaplanıp toplanmak suretiyle bulunur:

Bu anlatım, aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$Q_{\text{ç}} = \sum p \cdot \Delta L_i \cdot f_i \quad (3.13)$$

$p$  = Kazık Enkesidinin Çevre Uzunluğu,

$\Delta L_i$  = Kazığın Değişik Zemin Tabakaları İçindeki Uzunluğu,

$f_i$  = Kazığın Her bir Zemin Tabakası İçindeki Birim Çevre Sürtünmesi değeridir.

(3.13) denkleminde anlaşılabacağı üzere kazığın çevre sürtünme direncini hesaplamak için zeminin birim çevre sürtünmesi değeri olan ( $f_i$ ) nin bilinmesi gerekmektedir.

#### 3.2.3.1.a. **Granüler Zeminlerde** Birim Çevre Sürtünmesi Değerleri ( $f_i$ )

Granüler Zeminler, kazık çevresinde kemerlenme etkisini arttırarak çevre yükünün bir kısmını kazığa daha üst seviyelede aktarırlar. Bu nedenle granüler zeminlerin varlığı halinde bu değerin hesaplanması sırasında gözönünde tutulması gereken bazı özellikler vardır:

1. Kazık yapım yöntemi: Çakma kazıklarda zemin sıkışacağından içsel sürtünme açısının değeri artar.

2. ( $f_i$ ) değeri kritik bir  $D_{cr}=(L'$  derinliğine kadar doğrusal şekilde artar ve bu derinlikten sonra sabit kalır. Bu  $L'$  değerleri  $d$  kazık çapı olmak üzere aşağıdaki gibi alınabilir:

$D_{cr}=(L') =$  Gevşek Kumlar için  $10d$

$D_{cr}=(L')=$  Orta Sıklıktaki Kumlar için  $15d$

$D_{cr}=(L')=$  Sıkı Kumlar için  $20d$

3. Eşdeğer derinliklerde gevşek kumların bünyesinde aşırı yer değiştirmeye neden olan bir kazığın çevresinde oluşan birim sürtünme değeri az yer değiştirmeye neden olan bir kazığın çevresinde oluşan değerden fazladır.

4. Eşdeğer derinliklerde fore kazıkların çevresinde, çakma kazıklara nazaran daha düşük sürtünme değerleri oluşur.

Bu özellikler dikkate alınmak kaydı ile birim çevre sürtünmesi için derinlik ( $z$ ) boyunca aşağıdaki hesap kriterleri verilebilir:

$$L' > z > 0 \quad \text{için} \quad f_i = K_i \cdot \sigma_{vi}' \tan \delta_i \quad (3.14)$$

$$L > z > L' \quad \text{için} \quad f_i = (f_i)_{z=L'} \quad (3.15)$$

Burada:

$K_i =$  (  $i$  ) Zemin tabakasının Efektif Yanal Toprak Basıncı Katsayısı,

$\sigma_{vi}' =$  (  $i$  ) Zemin tabakasında Efektif Düşey Gerilme,

$\delta_i =$  (  $i$  ) Zemin tabakasında Kazık-Zemin arası sürtünme açısıdır.

Tablo 3.2. Kazık Tipine Göre K Değerleri

| <b>Kazık Tipi</b>                     | <b>K</b>                     |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Fore Kazıklar                         | $\approx K_0 = 1 - \sin\phi$ |
| Az Deplasman Yapan Çakma Kazıklar     | $\approx K_0$ ila $1.4K_0$   |
| Yüksek Deplasman Yapan Çakma Kazıklar | $\approx K_0$ ila $1.8K_0$   |

Zemin tabakasının Efektif Yanal Toprak Basıncı Katsayısı (K) değerleri Kazık imal tarzına göre Tablo 3.2. de verilmektedir.

Yüksek deplasman yapan kazıklar için ayrıca aşağıdaki formüller önerilmektedir:

$$K \cdot \tan\delta = 0.18 + 0.0065 D_r \quad (3.16)$$

$$K = 0.5 + 0.008 D_r \quad (3.17)$$

Burada  $D_r$  =Rölatif Sıkılık Derecesidir (%). Tablo 3.3. ve Tablo 3.4 de Kulhawy (1984) tarafından önerilen K ve  $\delta$  değerleri yer almıştır.

Geostatik Toprak Basıncı Basınç Katsayısı  $K_{oi}$  gözönüne alınarak (3.13) bağıntısının (3.14) bağıntısına yerleştirilmesi halinde aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$Q_{\zeta} = \sum \pi d \cdot \Delta L_j \cdot K_{oi} \cdot \sigma'_{vi} \cdot \tan \delta_i \quad (3.18)$$

Tablo 3.3. Geostatik Katsayıya Oranla K Değerleri

| Kazık Tipi                     | K/K <sub>0</sub> |
|--------------------------------|------------------|
| Yüksek Deplasmanlı Çakma Kazık | 1-2              |
| Alçak Deplasmanlı Çakma Kazık  | 0.75-1.75        |
| Fore Kazık                     | 0.71-1           |
| Su Jeti ile Çakılan Kazık      | 0.5-0.7          |

Tablo.3.4. Kazık- Zemin Sürtünmesi Değerleri

| Kazık/Zemin Temas Durumu | Kazık/Zemin Sürtünme Açısı, $\delta$ |
|--------------------------|--------------------------------------|
|                          |                                      |

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Pürüzsüz veya Kaplanmış Çelik/Kum    | $0.5\phi' - 0.7\phi'$  |
| Kaba (ondüleli) Çelik/Kum            | $0.7\phi' - 0.9\phi'$  |
| Önceden Dökülmüş Beton/Kum           | $0.8\phi' - 1.0\phi'$  |
| Yerinde Dökülmüş Beton/Kum           | $1.0\phi'$             |
| Ahşap/Kum                            | $0.8\phi' - 0.9\phi'$  |
| Zemin İçinde Boru Bırakılan Kazıklar | $0.7\phi' - 0.85\phi'$ |

(3.18) bağıntısında aşağıdaki semboller yer almaktadır:

$i$  = Kazık Derinliği Boyunca Kazığı Çevreleyen Değişik Özellikteki Zemin Tabakaları,

$d$  = Kazık Çapı,

$\Delta L_i$  = Kazık Boyunca Kazığın İçinden Geçtiği her bir Zemin Tabakasının Kalınlığı,

$K_{oi}$  = Kazığın içinden geçtiği Zemin Tabakasının Sükunetteki Yatay Toprak Basınç Katsayısı (Geostatik Katsayı),

$\sigma'_{vi}$  = Kazığın İçinden Geçtiği Zemin Tabakasındaki Ortalama Düşey Efektif Gerilme,

$\delta_i$  = Kazığın içinden geçtiği Zemin Tabakasının Kazık-Zemin Arasındaki Sürtünme Açısı.

Geostatik durumda yatay toprak basıncı katsayısı  $K_{oi}$  kumlarda içsel sürtünme açısının ( $\phi'$ ) bir fonksiyonu olup yaklaşık olarak:

$$K_{oi} \cong 1 - \sin \phi' \quad (3.19)$$

alınabilir. (Jaky,1948). Bazı araştırmalara göre bu katsayının daha kesin ifadesi:

$$K_{oi} = (1 - \sin \phi') (OCR)_i^{0.5} \quad (3.20)$$

şeklinde dir. Burada OCR, kil tabakasının aşırı konsolidasyon oranıdır.

Toplam çevre sürtünmesi direnci; yukarıdaki (3.18) bağıntısı kullanılarak,  $\Delta L_i$  kalınlığındaki her ayrı (i) tabakası için hesaplanır ve kazık boyunca toplamı alınır.

#### 3.2.3.1.b. **Kohezyonlu Zeminlerde Çevre Sürtünmesi Direnci**

Bu direnç genelde kilin drenajsız direnci, efektif düşey gerilme, kazık kesidinin şekli, kazık uzunluğu, kazık malzemesi gibi etkenlerin bir fonksiyonudur. Killi zeminlerde yüzeysel sürtünme rolü, adezyon tarafından üstlenilmektedir. Bu tür n tabakalı bir zemin profili için (3.13) ve (3.18) denklemlerinin benzeri aşağıdaki gibidir:



$$Q_{\zeta} = \sum \pi d. \Delta L_i. \alpha_i . c_i \quad (3.21)$$

Bu ifadede diğer katsayılar (3.18) bağıntısındakilere eşdeğer şekilde tarif edilmekle beraber;

$\alpha_i$  = Kazığın İçinden Geçtiği Zemin Tabakasının Adezyon Katsayısını,

$c_i$  = Kazığın İçinden Geçtiği Zemin Tabakasının Drenajsız Kayma Direncini,

göstermektedir.

Bu halde de toplam çevre sürtünmesi direncinin hesabında yukarıdaki (3.21) bağıntısı kullanılarak,  $\Delta L_i$  kalınlığındaki her ayrı (i) tabakası için hesaplanır ve kazık boyunca toplamı alınır.

Adezyon Katsayısı  $\alpha_i$  aşağıda görüleceği gibi çoğu kez drenajsız kayma direncinin bir fonksiyonu olmaktadır:

$$f_{si} = \alpha_i c_{ui} \quad (3.22)$$

$\alpha_i$  = “Adezyon Katsayısı”dır.

Adezyon Katsayısı kohezyonun ( $C_{ui}$ );  $25 > C_{ui} > 90$  (KN/m<sup>2</sup>) sınırları içinde kalan değerleri için aşağıdaki (3.23) ifadesi ile hesaplanabilir:

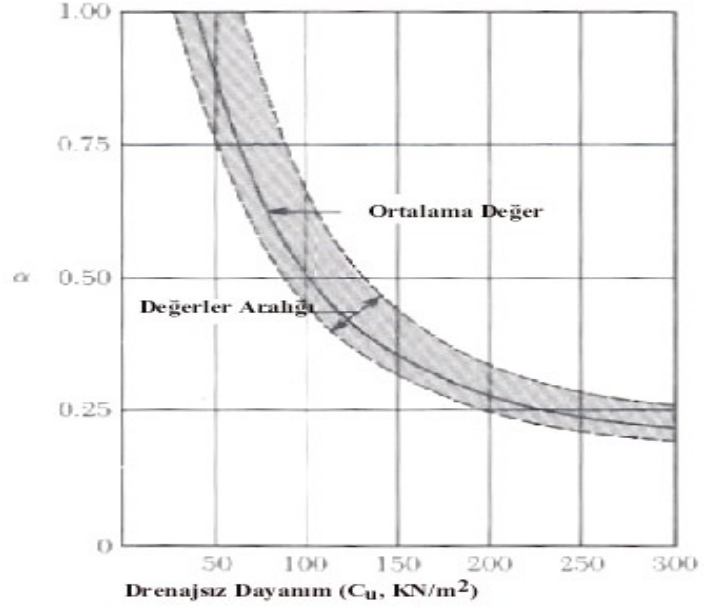
$$\alpha_i = 1 - 0.00615 \times (C_{ui} - 25) \quad (3.23)$$

kohezyonun sınır değer üstündeki; ( $C_{ui} > 90 \text{ KN/m}^2$ ) değerleri için aşağıdaki Tablo 3.5. den bulunan adezyon katsayısı kullanılabilir:

$C_{ui}$  = i tabakasının Drenajsız Kayma Direncidir. Bu değer, aşağıdaki Şekil 3.5 den de alınabilir:

Tablo 3.5. Adezyon Katsayısı  $\alpha_i$

| $C_{ui}$<br>Değeri | $\alpha_i$ Değeri |
|--------------------|-------------------|
| 90                 | 0.60              |
| 100                | 0.58              |
| 150                | 0.42              |
| 200                | 0.35              |



Şekil 3.5. Adezyon Katsayısı Değerleri

Aşağıda Tablo 3.6. da sunulan değerler ise tasarımda kullanılmayan ancak çeşitli zeminlerdeki çevre sürtünmesi değerleri arasında kıyaslama yapılabilmesi için fikir veren değerlerdir:

Tablo 3.6. Yaklaşık Çevre Sürtünmesi Değerleri ( $f_s$ )

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| Gevşek kum           | 25 kN/m <sup>2</sup>     |
| Sıkı kum             | 100 kN/m <sup>2</sup>    |
| Yumuşak kil-<br>silt | 10-30N/m <sup>2</sup>    |
| Kumlu silt           | 20-50 kN/m <sup>2</sup>  |
| Katı kil             | 40-100 kN/m <sup>2</sup> |

Çevre Sürtünmesi hesabı için Vijayvergia ve Focht (1972) tarafından ortaya atılan diğer bir yöntem ( $\lambda$ ) Metodu olarak bilinir. Bu yöntemle göre ortalama adezyon ( $f_{av}$ ) aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanır:

$$f_{av} = \lambda(\sigma_v' + 2c_u) \quad (3.24)$$

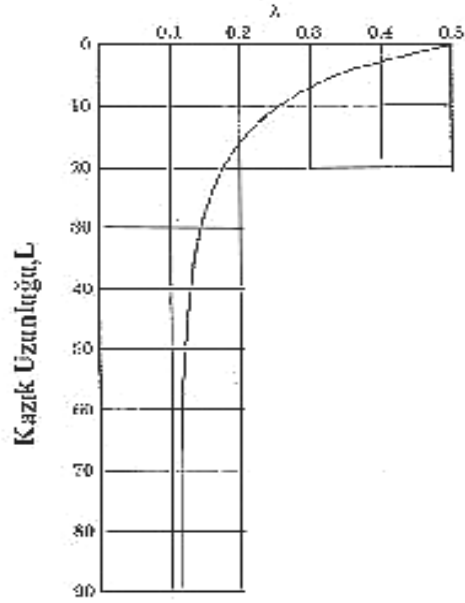
Burada  $\sigma_v'$  = Toplam kazık uzunluğu boyunca hesaplanan ortalama düşey efektif gerilme,

$c_u$  = Ortalama Drenajsız Dayanımdır ( $\phi=0$  hali).

Toplam direnç (3.25) bağıntısı ile verilmiştir.

$$Q_\zeta = p.L.f_{av} \quad (3.25)$$

L kazığın toplam uzunluğu, p enkesit çevresi uzunluğudur.  $\lambda$  değeri Şekil 3.6 da sunulmaktadır.



Şekil 3.6.  $\lambda$  değerinin Kazık Boyunca Değişimi (Vijavergiya ve Focht, 1972)

Efektif Gerilmelere dayanan diğer bir metod Burland (1973) tarafından önerilmiştir ve özellikle kazıkların çevre dirençlerini efektif gerilmeler cinsinden ele aldığından dayanımın uzun süreli değerlendirilmesinde kullanılır:

$$f = \beta \cdot \sigma_v' \quad (3.26)$$

$\sigma_v'$  = Düşey Efektif Gerilme,

$\beta = K \cdot \tan \phi_r$ ,

$\phi_r$  = Yoğrulmuş Kilin Efektif (Drenajlı) İç Sürtünme Açısıdır.

Geostatik katsayı olarak kabul edilen K değeri, (3.20) ve (3.21) ifadeleri kullanılarak (3.26) ifadesinde yerine konursa normal konsolide killer için:

$$f = (1 - \sin \phi_r) \cdot \tan \phi_r \cdot \sigma'_v \quad (3.27)$$

ve ön yüklenmiş killer için:

$$f = (1 - \sin \phi_r) \tan \phi_r \sqrt{OCR} \sigma_v \quad (3.28)$$

bağıntıları elde edilir.

Tablo 3.7 de bu katsayı için verilen diğer bazı değerler yer almaktadır. Bu değerler arazi kazık yükleme deneyleri sonuçlarının geriye dönük analizleri yapılarak elde edilmişlerdir.

Tablo 3.7. Kazık Yükleme Deneylerinden Bulunan Adezyon Katsayıları ( $\alpha$ )

|  | Su İçeriği | (PI) | Direnç(Kpa ) | ( $\alpha$ ) |
|--|------------|------|--------------|--------------|
|--|------------|------|--------------|--------------|

|               |    |       |     |      |
|---------------|----|-------|-----|------|
| Katı kil      | 23 | 35-55 | 120 | 0.44 |
| Katı Kil      | 25 | 20-60 | 120 | 0.62 |
| Masif<br>Şeyl | 15 | 7-16  | 500 | 0.64 |
| Katı kil      | -  | -     | 110 | 0.52 |
| Katı kil      | 19 | 36-46 | 140 | 0.3  |

### 3.2.3.1.c. **Granüler-Kohezyonlu** Zeminlerde Çevre Sürtünme Direnci

Tomlinson (1981), çevre sürtünmesini hesaba katmak için aşağıdaki ifadeyi önermiştir:

$$f_i = \alpha_i c_i + \sigma'_{vi} K_i \tan \delta_i \quad (3.29)$$

Bu ifadede:

$\alpha_i$ =i Tabakasındaki Adezyon Faktörü,

$f_i$ =i Tabakasındaki Kazık-Zemin Arasındaki Birim Alana Düşen Çevre Sürtünmesi,

$\delta_i$  = Kazık-Zemin Arasındaki Efektif Sürtünme Açısı,

$c_i$  = Ortalama Kohezyon,

$\sigma'_{vi}$ =Çevre Sürtünmesinin Hesaplanacağı Tabakadaki Ortalama Düşey Efektif Gerilme,

$K_i$  = Yatay Toprak Basıncı Katsayısıdır.

Burada yatay basınç katsayısı ( $K_i$ ); (3.20) ifadesi ile hesaplanan geostatik katsayı  $K_0$  ile 1.75 arasında bir değerdir. Genellikle  $K_0$  değerine yakın seçilmesi önerilmektedir.

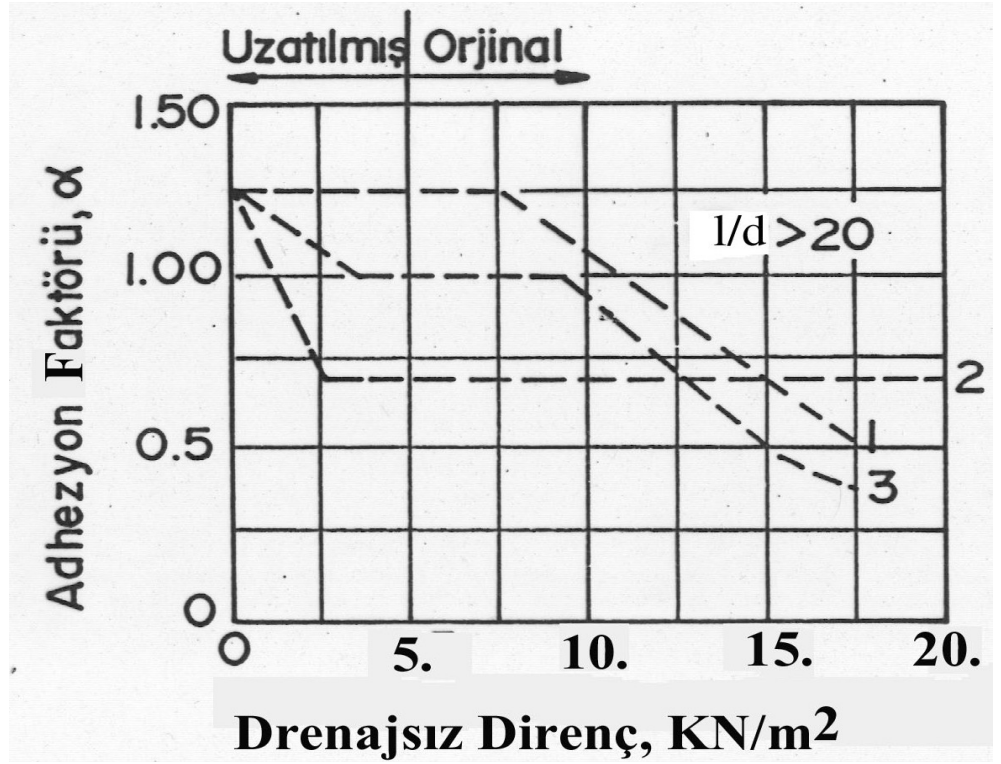
Tomlinson (1981) değişik kohezyonlu zeminlere çakılmış kazıklar için ( $\alpha$ ) değerini aşağıda Şekil 3.7.de tanımlanan Penetrasyon Oranı\* ( $P_0$ ) ye bağlı olarak yukarıda Tablo 3.8. de vermektedir. Aşağıda Şekil 3.7 değişik penetrasyon oranları için adezyon faktörünü göstermektedir.

Tablo 3.8. Zemin Kıvamına Göre Adezyon Faktörü ( $\alpha$ ) (Tomlinson ,1981)

| Zemin Durumu (1,2 ya 3)  | Penetrasyon Oranı, ( $l/d$ ) | Faktör ( $\alpha$ )            |
|--|------------------------------|--------------------------------|
| 1.Sert veya çok sert kohezyonlu zemin üzerinde yer alan kum ve kum-çakıl | $l/d < 20$<br>$> 20$         | 1.25<br>(Şekil 3.7 ye Bakınız) |
| 2.Sert veya çok sert kohezyonlu zemin üzerinde yumuşak kil               | $8 < l/d < 20$<br>$> 20$     | 0.40<br>(Şekil 3.7 ye Bakınız) |



|  |                |                           |
|--|----------------|---------------------------|
| 3.Çok sert veya sert<br>kohezyonlu zemin | $8 < l/d < 20$ | 0.40                      |
|  | $> 20$         | (Şekil 3.7 ye<br>Bakınız) |



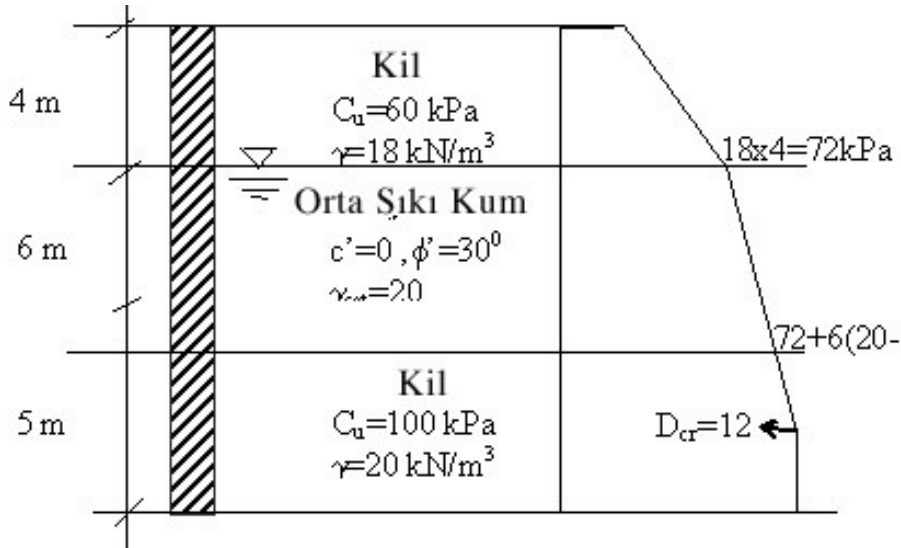
Şekil 3.7. Adezyon Faktörü (Tomlinson ,1981)

### Örnek 3.1

Aşağıdaki Şekilde 800 mm çapında ve 15 m uzunluğunda bir kaba çelikten bir kazık görülmektedir. Zemin şartları şekildeki gibidir. Bu kazığın taşıma gücünü hesaplayınız.

Orta sıklıktaki granüler zeminden ötürü  $D_{c_r}=15 \times \text{çap}=15 \times 0.8=12\text{m}$  ve; kazık-zemin sürtünme katsayısı  $=0.75\phi'$  (Tablo 3.4)

$$D_{c_r}=15 \times 0.8=12\text{m}$$



Nihai taşıma gücü:  $Q_{ult}=Q_p+Q_s$  (Denklem 3.12 kullanılır)

- Uç direnci hesaplanır. Her tabaka için çevre sürtünmesi ( $Q_{s1}$   $Q_{s2}$   $Q_{s3}$ ) ayrı ayrı hesaplanır ve toplanır. Hesaplanmış olan uç direnci buna eklenir:

- $Q_p = N_c \cdot c_u \cdot A_p = 9c_u A_p = 9 \times 100 \times [\pi \times (0.8)^2 / 4] = \underline{452 \text{ kN}}$

- $Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3}$  (Denklem 3.13)

$$Q_{s1} = \alpha \cdot c_u \cdot A_s = 0.8 \times 60 \times (\pi \times 0.8 \times 4) = \underline{483 \text{ kN}} \quad \alpha : (\text{Şekil 3.5})$$

$$Q_{s2} = K_{oi} \cdot \sigma_{vo}' \cdot \tan \delta \cdot A_s \quad K_{oi} \cong 1 - \sin \phi' = 0.5 \quad (\text{Denklem 3.19}) \quad , \quad \delta = 0.75$$

(Tablo 3.4) ve bu nedenle  $\delta = 22.5^\circ$  ,  $A_s = p \cdot L = \text{Çevre alanı} = (\pi \times 0.8) \times 6 = 15.08 \text{ m}^2$

$$Q_{s2} = 0.5 \times [(72 + 133.2) / 2] \times \tan 22.5 \times 15.08 = \underline{320 \text{ kN}}$$

$$Q_{s3} = \alpha \cdot c_u \cdot A_s = 0.58 \times 100 \times (\pi \times 0.8 \times 5) = \underline{729 \text{ kN}} \quad \alpha : (\text{Şekil 3.5})$$

$$\text{Toplam Taşıma gücü} = Q_{ult} = 452 + (483 + 320 + 729) = \underline{1984 \text{ kN}}$$

### 3.3. Dinamik Kazık Formülleri

#### 3.3.1. Genel Esaslar

Çakma kazıklarının taşıma gücü değerlendirmelerinde dinamik kazık formülleri kullanılır. Bu formüller, kazık çakma işlemi sırasında harcanan enerjinin, diğer deyişle mekanik olarak yapılan işin, kazığın zemine giriş miktarı ve zeminde oluşan toplam direnç ile ilgili olacağı savından yola çıkarak elde edilmişlerdir. Dinamik kazık formüllerine geçmeden önce, kazık çakma işlemleri hakkında 1.3.2.2. kısmında yazılanlara ek olarak

çakma işlemine ait bazı bilgiler verilecektir. Bilindiği gibi kazıklar ya bir şahmerdanın kazık başına serbest düşürülmesi ya da buharlı veya dizel motorlu çekiçler kullanılarak çakılırlar. Serbest düşme ile çakılmayan kazıklarda aşağıda verilecek olan (3.30) denkleminde buhar veya dizel enerjisi yer alır.

#### 3.3.1.1. Çakma İşlemleri

Çakma sırasında kullanılan düzeneklere göre kazığın çakılmasını sağlayan enerji kaynağı şekli aşağıda özetlenmiştir:

- i. Serbest düşmeli şahmerdanlarda, tokmak belli bir yükseklikten serbestçe kazık başına düşürülerek kazık darbelenir. Bundan sonra şahmerdan makaraya sarılı halatla kaldırılır ve işlem tekrar edilir.
- ii. Tek tesirli şahmerdan kullanılır ise tokmak serbest düşme ile kazığın başlığına düşürülür, buhar veya basınçlı hava gücü ile yukarı kaldırılır ve işlem tekrar edilir.
- iii. Çift tesirli şahmerdanlarda tokmak hem yukarı kalkarken hem aşağı inişte buhar veya basınçlı hava gücünden yararlanır.
- iv. Dizel motorlu şahmerdanlar da yaygın olarak kullanılan araçlardandır. Bu şahmerdanlarda tokmanın çakma gücü motordaki mazotun patlaması sonucu oluşan enerji ile sağlanır.

Serbest düşmeli şahmerdanlarda tokmak ağırlığı 200-4000 kg arasında değişir. Tek tesirli şahmerdanlarda tokmak ağırlığı 1000-10000 kg, tokmanın atımı 75-100 cm, dakikadaki darbe sayısı 60-70 arasında olabilir. Çift tesirli şahmerdanlarda ise tokmak ağırlığı 2.5-2700 kg, tokmak atımı 12-90 cm, dakikadaki darbe sayısı 90-225 aralığındadır. Dizel motorlu şahmerdanlarda tokmak ağırlığı 910-4400 kg, tokmak atımı 120-240 cm, dakikadaki darbe sayısı 40-60 olabilir.

Kazıklı temel için grup kazıkları çakılmadan önce zeminin kazık çakma yönünden özelliklerini saptayabilmek için deney kazıkları çakılması iyi ve genellikle takip edilen bir uygulamadır. Bazı mühendisler gerek bu deneyin arazide yapılması ve gerekse gerçek kazık çakma işlemi sırasında, kazığı her 10 cm de bir işaretlerler. Bu suretle çakma işlemi süresince kazığın zemin içine batma miktarı hakkında kaba bir fikir sahibi olunur. Deney sırasında darbe sayısı ve bu darbe sayısına koşut olarak batma miktarları hassas ölçümlenerek tesbit edilerek kaydedilir. Batma miktarı (s), darbe başına batma miktarı olarak (mm/darbe) tarif edilir. Bu miktarlar, kazığın battığı derinliğe karşı grafiklenir. Bu grafik, kazığın hangi derinlikte ne kadar zorlandığını gösterir. Kazık, yeterli taşıma gücünün elde edilebileceği derinliğe kadar çakılır. Bu derinliğe Fransızca “red” anlamına gelen “refü” denilir. Refü derinliğinde ulaşılan yükün kazık kesit alanına bölünmesi ile bulunan gerilmenin, kazığın basınç direncini aşmaması gerekir. Bu açıdan; kazık çakma işleminin sonlandırılacağı refü değerine karşı gelen derinlik, dinamik kazık çakma formülleri ile hesaplanır.

### 3.3.1.2. Genel Teori

Kazık çakma formüllerinin elde edilmesinde ortak olan prensipler aşağıda verilmektedir:

( $W_r$ ) ağırlığında bir tokmağın (h) yüksekliğinden düşmesi sonucu harcanan enerji (E), zeminin göçme yükü ( $Q_{ult}$ ) değerine varılıncaya kadar kazığın zemine dalma miktarı (s) ile gösterilerek yapılan işe eşitlenir:

$$E = W_r \times h - e = Q_{ult} \times s \quad (3.30)$$

Burada e enerji kaybını gösterir. Enerji kaybı çakma sırasında oluşan plastik deformasyondan ileri gelir. Uzun zamandan beri pek çok kazık

formülünün üretilmesinin nedeni bu davranışı değişik matematik yaklaşımlar ile ifade etme çabalarıdır. Dinamik kazık formüllerinin yazılmasında, çakma sırasında kazık direncinin değişmeyeceği kabul edilmekle beraber killi zeminlerde bu işlem sırasında zemin örselenir ve direnci azalır. Ayrıca, ince kum ve siltlerde ani darbenin yarattığı ek boşluk suyu basınçları efektif gerilmeyi azaltarak sürtünmeden doğan direnci azaltıcı rol oynar. Bu nedenlerle, ince dane miktarı fazla olan zeminlerle, silt ve ince kumda bu formüller çok güvenilir değildir.

Kazığın içinde kazık çakma sırasında oluşan gerilme yayılması, birçok araştırmacı tarafından incelenmiş, bu olguya ait çeşitli teorik çözümler sunulmuştur.

Kazıkların yük-deplasman davranışı bu yöntemle çözülmüş, taşıma güçleri de bu türlü çözümlerle elde edilmeye çalışılmış olup başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yukarıda özetlenen teorik anlatımın açıklanabilmesi amacı ile temel ilkelere dayanan bir yaklaşım aşağıda verilmektedir.

Kazık başına  $W$  ağırlığında bir şahmerdanın düştüğünü düşünelim. Bu durumda  $z$  değişkeni şahmerdanın alt seviyesinden itibaren gösterilmek üzere:

$$F = -mz^{**} \quad (3.31)$$

değerinde bir atalet kuvveti oluşacaktır. Burada  $m$  kütle,  $z^{**}$  ise ivmeyi göstermektedir. Kazık tabanında da bir  $R$  reaksiyon kuvveti oluşursa, düşey denge denklemi:

$$R = F+W = m (g-z^{**}) \quad (3.32)$$

Diğer taraftan kazık başlığındaki yastık ve diğer eklentilerin k değerindeki bir yay sabiti ile temsil edildiği düşünülduğünde, kazık başının bir  $u_0$  deplasmanı için

$$z = u_0 + R/k \quad (3.33)$$

ifadesi yazılabilir.

Bu ifadenin zamana karşı taraf tarafa tarafa türevi alınır:

$$z^{**} = u_0^{**} + R^{**}/k \text{ bulunur.} \quad (3.34)$$

Bu bağıntı (3.22) bağıntısında yerine konursa:

$$R = m(g - u_0^{**} + R^{**}/k) \quad (3.35)$$

ifadesi elde edilir.

Diğer taraftan kazığın kesit alanı A, Elastik Modülü E, birim deformasyonu  $\epsilon$ , kazık içindeki basınç dalgası yayılım hızı c ve kazıktaki basınç  $\sigma_c$  ise aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\begin{aligned} R &= -\sigma_c A = -AE\epsilon = -AE \partial u_0 / \partial x \\ &= -(AE/c) \partial u_0 / \partial t \end{aligned} \quad (3.36)$$

Burada (3.36) nın (3.35) e yerleştirilmesi ile de aşağıdaki diferensiyel denklem elde edilir:

$$(mAE/kc) u_0^{***} + m u_0^{**} + (AE/c) u_0^* \quad (3.37)$$

Şahmerdana ait olan küçük bir atalet kuvveti ihmal edilir ve terimler yeniden düzenlenirse:

$$u_0^{***} - (kc/A) u_0^{**} - (k/m) u_0^* = 0 \quad (3.38)$$

bağıntısına varılır. Diğer taraftan  $V$  kazık ucu hızını gösterirse:

$$V^{**} + (kc/AE) V^* + (k/m)V = 0 \quad (3.39)$$

ifadesine gelinir. Bu ifade dinamik teori içinde alışılan terimler ile;  $s$  sönüm katsayısı ve  $w$  açısal hızı göstermek üzere:

$$V^{**} + 2wsV^* + w^2V = 0 \quad (3.40)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ( $w$ ) için aşağıdaki ilişkiler yazılabilir:

$$w^2 = k/m \quad (3.41)$$

$$w = kc/AE \quad (3.42)$$

(3.40) denkleminin çözümü aşağıdaki gibidir:

$$V = e^{wst} (A \sin w_d t + D \cos w_d t) \quad (3.43)$$

$$w_d = \sqrt{1 - s^2} \quad (3.44)$$

(3.44) sönümlenmiş açısal hızı göstermektedir. Burada  $A$  ve  $B$  katsayıları başlangıç ve sınır şartları yardımı ile bulunabilir:

Başlangıç anında ve kazık başında  $V(z,t) = V(0,0) = V^*(0,0) = 0$  şartı yazılabilir:

Şahmerdanın darbe sırasındaki hızı  $V_h$  ise (3.33) den  $t=0$  anında  $V^*=0$  olduğu bilinerek:

$$V_h = R^*/k \quad (3.45)$$

ve  $R^*$  (3.36) dan alınarak



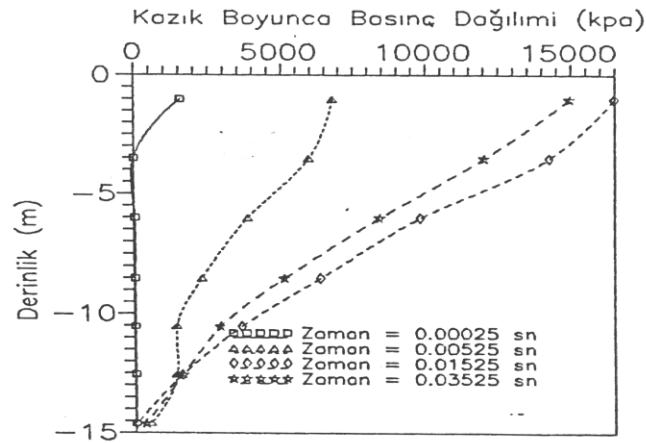
$$V_h = (AE/ck) V^* \quad (3.46)$$

bulunur. Buradan da aşağıdaki (3.47) ifadesine varılır:

$$V^*(0,0) = V_h k_c/AE = 2V_h w s \quad (3.47)$$

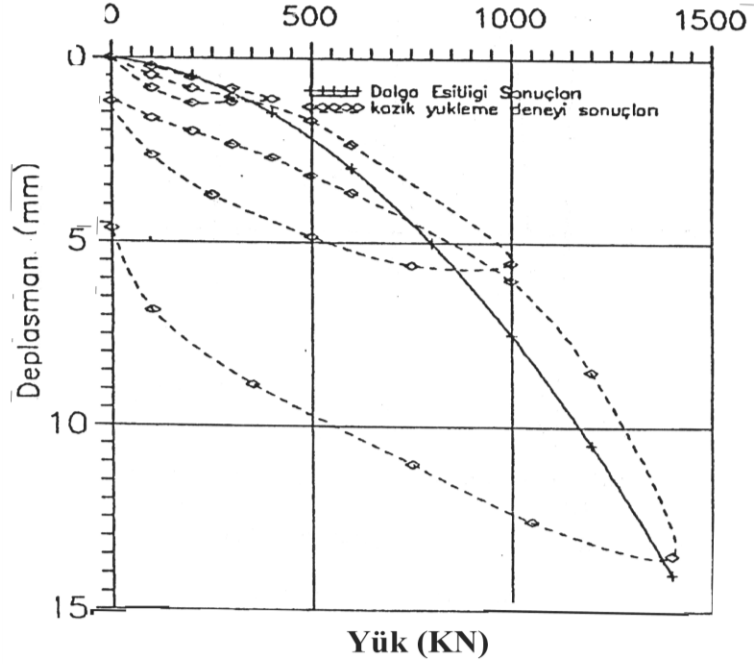
Bu denklemlerle Kazık Başlığı-Yastığı, Şahmerdan veya eşdeğer enerji özellikleri, Kazık boyu ve ağırlığı, zemine penetrasyon miktarı ve darbe sayısı gibi verileri elde olan bir kazık için bir sönümlenme oranı varsayarak hesap yapmak ve kazık içindeki basınç dağılımını saptamak olası olmaktadır. Kazık kesidinin dayanımının bu basıncı karşılaması gereklidir.

Aşağıda Şekil 3.8 de yukarıdaki temel teorinin ODTÜ de daha geliştirilmiş bir düzeydeki biçimine dayanan bir bilgisayar programı ile elde edilen basınç dağılımı gösterilmektedir. 15 metre boyundaki bu kazık refü almak üzeredir, Zaman içinde kazık boyunca basınç dağılımı gösterilmekte olup, kazık kesidinin bu basınçları karşılaması gereklidir.



Şekil 3.8 Çakma Sırasında Basınç Dağılımı (Birand ve Oud,1992)

Şekil 3.9 da ise aynı programla elde edilen yük-oturma davranışının kademeli bir gerçek kazık yükleme deneyi ile karşılaştırılması gösterilmektedir. İki deney sonuçlarının yakınlığı dikkat çekicidir.



Şekil 3.9. Yükleme Deneyi ve Dinamik Çözüm Sonuçları (Birand ve Oud,1992)

### 3.3.2. Çakma Kazıkların Taşıma Gücü Formülleri

Yukarıda sözü edildiği gibi, pek çok (100 ü aşkın) çakma formülü vardır. Aşağıda, uzun yıllar boyunca yapılan deney ve gözlemler sonucunda güvenilirliğinin saptandığı literatürde bildirilmiş olan bazı formüllere yer verilmiştir. Bu formüllerde ortak olan bazı sembollerin anlamları aşağıda listelenmiştir:

$$W_p = \text{Kazığın Ağırlığı,}$$

$$W_r = \text{Tokmak Ağırlığı,}$$

H = Tokmağın Düşme Yüksekliği,

s = Kazığın Zemine Giriş Miktarı (refü)'dür.

Bir çok şartnamede son 30 darbede kaydedilen batma miktarlarının mm olarak ortalaması şeklinde tanımlanır.(mm/darbe),

E = Kazık Malzemesinin Elastik Modülü,

A= Kazığın Kesit alanı,

L= Kazığın Boyu.

### 3.3.2.1. Danimarka Formülü

Bir çalışma, bu formülün her tip kazık üzerinde yapılan kazık yükleme deneyi sonuçları ile 0.81 mertebesindeki bir korelasyon katsayısı dahilinde örtüştüğü, Betonarme Kazıklar için ise aynı sonucun 0.69 olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle Avrupa'da kullanımı oldukça yaygındır.

Formül;  $c_2 = \sqrt{\frac{2 \times W_r \times H \times L}{A \times E}}$  olmak üzere aşağıda verilmektedir:

$$Q_d = \frac{W_r \times H}{s + 0.5 \times c_2} \quad (3.48)$$

Bu deneyin arazide uygulanması sırasında kazığın her 10 cm uzunluğu işaretlenir ve bu miktarın zemine girmesi için gerekli darbe sayısı not edilir..

Deneyden sonra s çakma derinliğine karşı grafiklenir. Çakma işleminin durdurulacağı set miktarı (3.48) yardımı ile hesaplanır. Bu durma

noktasına refü denilir. Darbeleme ile kazığa intikal eden yük kazık enkesit alanına bölünerek kazıktaki gerilme hesaplanır ve kazığın basınç dayanımınının da aşılmasına özen gösterilir.

Bu formül kullanılarak kazık çakılmasına ne zaman son verileceğine (refü) karar verilir.

### **Örnek 3.2**

Kazık Tipi: 200mm iç ve 400 mm dış çapında betonarme boru kazık.

Kazık Uzunluğu: 14.6 m

Tek darbeli çekicinin ağırlığı: 20 KN

Çekicinin Strok'u: 1000 mm

Kazığın Elastik Modülü= $30 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>

Kazığın Basınç Dayanımı 30000 kN/m<sup>2</sup>

Kazığın 1250.0 kN yükü güvenle taşıyabilmesi için gerekli set (s) ne olmalıdır?

Boru Kazığın ağırlığı=  $2.35 \text{ kN/m} \times 14.6 \text{ m} = 34 \text{ kN}$  olarak hesaplanır. Buna çakma şapkasının ağırlığı olan 4 kN eklenir.

$c_2$  için 0.014 değeri bulunur.

$$Q_d = \frac{20.0 \times 1.0}{s + \frac{1}{2} \times 0.014} = 1250 \text{ kN}$$

ve  $s=9$  mm/darbe olarak elde edilir.

Çakma işlemi bu “refü”de durdurulur.

Diğer yandan kazığın basınç dayanımı kullanarak da bir “set” bulunabilir.

Kazık alanı= $0.0942 \text{ m}^2$

Kazık kesidinin basınç dayanımı bilirse (4.1) bağıntısı ile aşılmaması gereken bir set (s) elde edilebilir. Pratikte, kazığın hasar görmemesi için bu değer aşılmaması gerekir:

2 güvenlik katsayısı ile Kazığın dayanabileceği yük=  
 $0.0945 \times 1/2 \times 30000 = 1417 \text{ kN}$

$$Q_d = \frac{20.0 \times 1.0}{s + \frac{1}{2} \times 0.014} = 1417$$

Buradan  $s = 7.1 \text{ mm}$  bulunur. Çakma işlemini kontrol eden set budur ve çakım işlemi bu batmada durdurulur.

### **Örnek 3.3.**

400 mm kenarları olan kare kazıklar 12.5. m ye çakılacaktır. 1.5 tonluk bir tokmak kullanılacaktır. Kazığın güvenli olarak 2000 kN taşıması gereklidir. Bu güvenli taşıma gücünün temini için refü çakma kriteri 5 mm/darbe olarak verilmiştir. Danimarka formülünü kullanarak 1.5 t ağırlığındaki bir tokmağın “kurs” unun (strok) ne olması gerektiğini hesaplayınız. ( $E_{\text{beton}} = 30 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$ )

Kazığın kesit alanı  $0.4 \times 0.4 = 0.16 \text{ m}^2$

$$c_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1.5 \cdot 9.8) \cdot H \cdot 12.5}{0.16 \cdot 30 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{H}{13100}}$$

$$Q = 2000 = \frac{14.7 \cdot H}{0.005 + 0.5 \cdot \sqrt{\frac{H}{13100}}} \Rightarrow H = 1.4 \text{ m}$$

### 3.3.2.2. Sanders Formülü

Sanders formülü Dinamik kazık formülleri arasında en basit olanıdır.  $W_r$  ağırlığındaki tokmağın  $h$  mesafesinden serbest düşmesi ile yapılan işin, kazığın zemine dalma miktarı ile kazığın çakmaya karşı toplam direncinin çarpımına eşit olacağı kabulüne dayanır.

$$Q = \frac{W_r h}{s} \quad (3.49)$$

Bu ifadede çakma sırasında oluşan enerji kayıpları göz önüne alınmamıştır.

### 3.3.2.3. Engineering News Formülü

Bu formül, serbest düşmeli ve tek tesirli şahmerdanlar için:

$$Q = \frac{W_r h}{S + C} \quad (3.50)$$

çift tesirli şahmerdanlar için ise:

$$Q = \frac{E_n}{S + C} \quad (3.51)$$

şeklindedir.  $C$  enerji kayıplarını gösteren bir değerdir. Bu değer serbest düşmeli ve tek tesirli şahmerdanlarda 2.5 cm. buharlı şahmerdanlarda ise 0.25 cm. dir.  $E_n$  ise bir tokmağın darbe sırasında uyguladığı enerji olup,

makina kataloglarında verilir. Engineering News formülünde güvenlik katsayısı 4-10 arasında alınarak emniyetli yük bulunur.

### **Örnek 3.4.**

(Aliğa Petrokimya Tesisleri Temel Tasarım Raporundan (Ordemir ve Birand (1978))

“Strok” u 1000 mm olan 1000 kN ağırlığında 20 kN ağırlığında bir tek tesirli şahmerdan son 30 darbe averajı olarak 0.7 mm/darbe kazık batmasını (set) sağlamaktadır. 6 güvenlik sayısı için taşıma gücünü bulunuz.

$$Q_a = \frac{1}{6} \left( \frac{20 \times 1000}{0.7 + 2.5} \right) = 1042 \text{ kN}$$

#### 3.3.2.3 Brix Formülü:

$$Q = \frac{W_r W_p h}{s(W_r + W_p)^2} \quad (3.52)$$

şeklindedir. Bu formül kullanılarak emniyetli taşıma gücü bulunmak istendiğinde, 3 ile 5 arasında bir güvenlik sayısı uygulanır. Brix formülü sadece serbest düşmeli şahmerdanlar için kullanılmakta olup, daha ziyade ahşap kazıklar için uygundur.

#### 3.3.2.4. Dutch Formülü:

$$Q_1 = \frac{W_r^2 h}{s(W_r + W_p)} \quad (3.53)$$

### **Örnek 3.5.**

İç çapı 200 mm, dış çapı 400 mm olan 14.6 m uzunluğunda bir santrfüj beton kazık “Strok” u 1000 mm olan 1000 kN ağırlığında 20 kN ağırlığında bir tek tesirli şahmerdan ile çakılmakta olup son 30 darbe averajı olarak 0.7 mm/darbe kazık batması (set) gözlenmiştir. Boru Kazığının ağırlığı= 2.35 kN/m dir. 6 güvenlik sayısı için taşıma gücünü bulunuz.

Boru Kazığının ağırlığı= 2.35 kN/mx14.6m=34 kN olarak hesaplanır. Buna çakma şapkasının ağırlığı olan 4 kN eklenir.

$$Q_a = \frac{1}{6} \frac{20^2 \times 1000}{0.7 \times (38 + 20)} = 1642 \text{ kN}$$

#### 3.3.2.5. Ritter Formülü;

$$Q = \frac{W_r^2 x h}{s(W_r + W_h)} + (W_r + W_h) \quad (3.54)$$

şeklinde yazılırlar. Bu formüllerde serbest düşmeli şahmerdan kullanıldığında güvenlik sayısı 10, buharlı şahmerdan kullanılması halinde ise 6 alınabilir.

### **Örnek 3.6.**

(Aliğa Petrokimya Tesisleri Temel Tasarım Raporundan (Ordemir ve Birand (1978))



İç çapı 200 mm, dış çapı 400 mm olan 14.6 m uzunluğunda bir santrfüj beton kazık “Strok” u 1000 mm olan 1000 kN ağırlığında 20 kN ağırlığında bir tek tesirli şahmerdan ile çakılmakta olup son 30 darbe averajı olarak 0.7 mm/darbe kazık batması (set) gözlenmiştir. 6 güvenlik sayısı için taşıma gücünü bulunuz.

Boru Kazığın ağırlığı= 2.35 kN/mx14.6m=34 kN olarak hesaplanır. Buna çakma şapkasının ağırlığı olan 4 kN eklenir.

$$Q_a = \frac{1}{6} \left[ \left( \frac{20^2 \times 1000}{0.7 \times (20 + 38)} + (20 + 38) \right) \right] = 1652 \text{ kN}$$

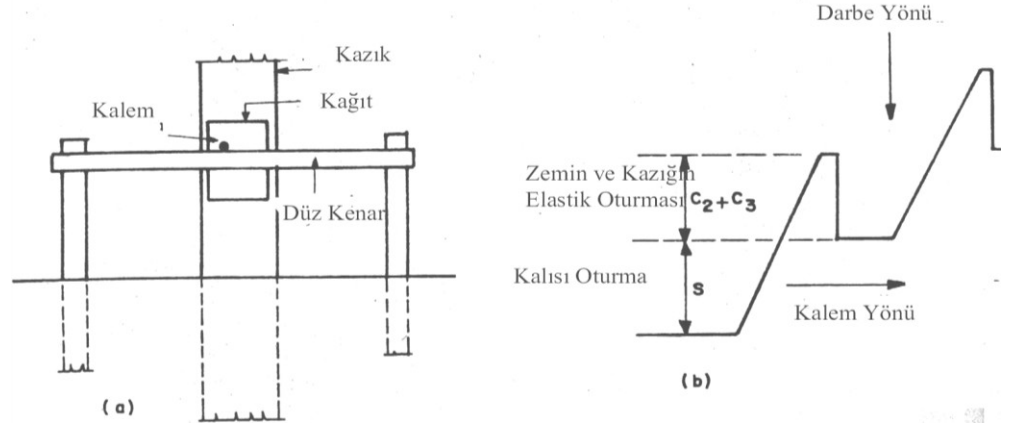
### 3.3.2.6. Hiley Formülü

En çok kullanılan ve enerji kayıplarını diğer en gerçekçi şekilde göz önüne aldığı söylenen formül budur:

$$Q = \frac{e_f W_r h}{s + \frac{1}{2}(c_1 + c_2 + c_3)} \frac{W_r + e^2 W_p}{W_r + W_p} \quad (3.55)$$

Burada,  $e_f$  tokmak etki katsayısıdır ve 0.65 ile 1.00 arasında değişir. Serbest düşmeli şahmerdanlarda 1.00, buharlı şahmerdanlarda 0.90 ve tanbura sürtünme ile sarılan tel halata bağlı tokmaklarda 0.75 alınabilir. Güvenlik sayısı 3 alınabilir. Kazığın çakılması sırasında  $C_2$  ve  $C_3$  değerleri bulunabilir. (Şekil 3.10) Bu işlem için için bir milimetrik kağıt, kazığın üzerine sabitlenir. Kazık çakılırken kalem, milimetrik kağıdın yatay eksenini üzerinde sabit hızda sağa doğru hareket ettirilir. Bu sırada kağıda kazığın düşey hareketi çizilmiş olur.  $C_2$  ve  $C_3$  ölçümleri milimetrik kağıt üzerinden

yapılır.  $C_1$  değeri çakma sırasında kazık başına düşen gerilmeye bağlı olarak kazığın başındaki takozun ve yastığının elastik kısalmasını;  $C_2$  kazığın elastik kısalmasını,  $C_3$  zeminin elastik kısalmasını,  $e$  çarpma sayısını gösterir. Çarpma sayıları (e) Tablo 3.9 dan,  $C_1$  değeri ise Tablo 3.10. dan alınabilir.



Şekil 3.10. Kazık ve Zeminin Elastik Sıkışmaları (Chellis, 1961)

Tablo 3.9. Çarpma Sayısı (e) nin Temsili Değerleri (Chellis,1961)

| Malzeme          | Çarpma Sayısı |
|------------------|---------------|
| Harabolmuş Ahşap | 0             |

|   |           |
|---|-----------|
| Ucu Bozulmamış Ahşap Kazık  | 0.25      |
| Sağlam Ahşap Yastıklı Çelik Kazık                                   | 0.32-0.40 |
| Çelik Başlıklı Çelik veya Beton kazık                               | 0.50      |
| Başlıksız Beton Kazık Üstüne Dökme Demir Tokmakla Vurulması Halinde | 0.40      |

Gerek Tablo 3.9. da verilen Çarpma Sayısı (e) gerekse Tablo 3.10 da verilen  $C_1$  değerlerinin kazık cinsi ve kazığın çakılması sırasında kazık başının durumu ile yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Tablo 3.9. özellikle kazık cinsi ile değişen çarpma sayılarını işaret etmektedir. Tablo 3.10. da ise önce kazıkta çakılma sırasında oluşan gerilme durumuna bakılmakta, bu aşamadan sonra kazığın yapıldığı malzemeye göre ikinci bir ayırım verilmektedir. Çakım sırasında kazık başının zarar görmemesi için baş üzerine yastık vb malzeme konulması gerekir. Kazık başında alınmış olan önleme göre adlandırılan darbe tertibi bu hususu işaret etmektedir. Bir örnek verilmesi gerekirse  $105 \text{ kg/cm}^2$  gerilme altında kalan bir Çelik Kazık ahşap örtülü çelik başlık kullanılarak çakılacaksa, diğer bir deyişle tokmak kazık başındaki bu malzeme üzerine vurulacaksa  $C_1$  değeri 0.30 alınacaktır.

Tablo 3.10 C<sub>1</sub> Değerleri (Chellis,1961)

|  |  |      |      |      |
|--|--|------|------|------|
| Çakma Sırasında Kazık Başına Düşen Gerilme, Q/A (kg/cm <sup>2</sup> )              | 35   | 70   | 105  | 140  |
| Darbe Tertibi  | <b>ÇELİK KAZIK VEYA BORUDA C<sub>1</sub> DEĞERLERİ</b> |      |      |      |
| Doğrudan Kazık Başına  | 0  | 0    | 0    | 0    |
| Ahşap Takozlu, Çelik Örtülü Başlıkla   | 0.10   | .20  | 0.30 | 0.40 |
| 1cm Kalınlığında iki Çelik Levha arasında ½ cm Kalınlığında Fiber Contalı Başlıkla | 0.05   | 0.10 | 0.15 | 0.20 |
| <b>BETONARME KAZIKDA C<sub>1</sub> DEĞERLERİ</b>                                   |  |      |      |      |

|   |               |           |           |               |
|---|---------------|-----------|-----------|---------------|
| Kazık Başımda 1-2cm.<br>Kalınlığında bir<br>Altık ile                                 | 0.06          | 0.13      | 0.20      | 0.25          |
| Kazık Başığı İçinde<br>7.5<br>ila 10 cm<br>Kalınlığında<br>Yastık+DarbeTakoz<br>u ile | 0.18+0.1<br>3 | 0.38+0.25 | 0.56+0.38 | 0.75+0.5<br>0 |
| <b>AHŞAP KAZIKDA C<sub>1</sub> DEĞERLERİ</b>  |               |           |           |               |
| Doğrudan Kazık<br>Başına<br>Darbeleme ile   | 0.13          | 0.25      | 0.38      | 0.50          |

### **Örnek 3.7.**

(Aliğa Petrokimya Tesisleri Temel Tasarım Raporundan (Ordemir ve Birand (1978))

İç çapı 200 mm, dış çapı 400 mm olan 14.6 m uzunluğunda bir santrfüj beton kazık “Strok” u 1000 mm olan 1000 kN ağırlığında 20 kN ağırlığında bir tek tesirli şahmerdan ile çakılmakta olup son 30 darbe averajı olarak 0.7 mm/darbe kazık batması (set) gözlenmiştir. 5 güvenlik sayısı için taşıma gücünü bulunuz.  $e_f=0.85$ . Tablo 3.10 dan

$c_1 = 0.20, c_2 + c_3 = 5.80$  (Şekil 3.10 da gösterilen arazi okuması ile)

$$1/2(c_1 + c_2 + c_3) = 3$$

Boru Kazığının ağırlığı =  $2.35 \text{ kN/m} \times 14.6 \text{ m} = 34 \text{ kN}$  olarak hesaplanır. Buna çakma şapkasının ağırlığı olan  $4 \text{ kN}$  eklenir.

$$Q = \frac{0.85 \times 20 \times 1000}{0.7 + 3} \frac{20 + (0.40)^2 \times 38}{38 + 20} = 6455 \text{ kN}$$

$$Q_a = 1/5 \times 6455 = 1291 \text{ kN}$$

### 3.3.3 Arazi Penetrasyon Deneyleri ile Kazık Taşıma Gücü Tayini

Zemin araştırmaları sırasında yaygın olarak kullanılan Standard Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Hollanda Koni Penetrasyon deneyi (CPT) sonuçları da kazık taşıma gücü tahmininde kullanılabilir. Meyerhof (1976) kumlarda çakma kazıklar için birim uç taşıma gücünü ( $Q_p$ , kN):

$$Q_p = 400 N A_b + 2 N A_s \quad (3.56)$$

birim çevre sürtünmesini ( $F_s$ , kN) ise:

$$F_s = 2 N' A_s \quad (3.57)$$

ampirik ifadeleri ile vermektedir. Bu bağıntılarda:

$N'$  = kazık boyunca SPT deneyinden bulunan ortalama darbe sayısı,

$N$  = kazık ucu civarında ve altındaki zeminde elde edilen

ortalama SPT darbe sayısı,

$A_b$  = Kazığın Taban Alanı,

$A_s$  = Kazığın Yanal Alanı,

olarak alınır.

### **Örnek 3.8.**

15 m boyunda, 0.45 m çapındaki bir kazığın çevresinde SPT(N) değeri 15, tabanında ise 25 darbe olarak bulunmuştur. Kazığın taşıma gücünü hesaplayınız.

$$Q_u = 400NA_b + 2N'A_s = 400 \times 25 \times \pi \frac{(0.45)^2}{4} + 2 \times 15 \times \pi \times 0.45 \times 15 = 1589 + 636 = 2225 \text{ kN}$$

Fore kazıklar için; yukarıdaki ifadelerden bulunan uç mukavemetinin üçte birinin, çevre sürtünmesinin ise yarısının alınması tavsiye edilmektedir. Hollanda koni penetrometresi kullanılması halinde, koni uç mukavemeti ile Standard Penetrasyon Deneyi darbe sayısı (N) arasında çeşitli zeminler için ampirik olarak bulunan ve aşağıda Tablo 3.11. de verilen oranlardan yararlanılabilir. Bu ampirik ifadeler kullanılırken çok dikkatli olmak gerekir. Özellikle SPT darbe sayıları arazideki hatalı ve özensiz uygulamalardan çok etkilenir. Ayrıca, zeminde bulunan iri çakıl, bloklar, SPT(N) darbe sayılarının çok büyük elde edilmesine neden olurlar. Diğer taraftan, bu deney sırasında ince daneli zeminlerin taban suyunun sondaj muhafaza borusu içine sızması sonucu gevşerler ve Penetrasyon Darbe değeri olduğundan düşük görünebilir.

Tablo 3.11. Koni Uç Direnci ile Darbe Sayısı İlişkisi

| Zemin tipi           | Koni Uç Direnci / Darbe Sayısı |
|----------------------|--------------------------------|
| Silt, kumlu silt     | 2                              |
| Kum, az siltli kum   | 3.5                            |
| Çakıllı kum          | 5                              |
| Kumlu çakıl ve çakıl | 6                              |

Gerek statik formüllerle, gerekse ampirik formüllerle bulunan taşıma gücü, bir güvenlik katsayısına bölünerek güvenli taşıma gücü bulunur. Güvenlik sayısı genellikle 2 ila 3 arasında olur.

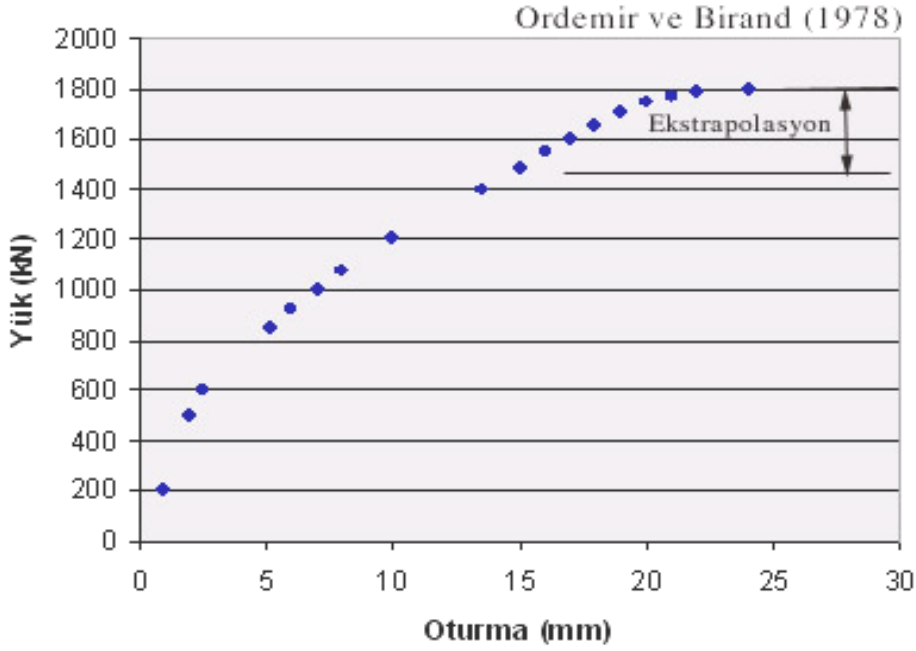
### Örnek 3.9.

Yukarıda Engineering News, Ritter ve Hiley formülleri kullanılarak Aliğa Petrokimya tesisleri temelini kazık tasarımı için elde edilen kimi sonuçlar sunulmuştur. Aynı alanda yapılmış olan bir kazık yükleme deneyi aşağıda gösterilmiştir. Oturma, krikonun yetersizliği nedeni ile 1400 kN yüke kadar okunabilmiştir. Ancak, bu değerden sonra yapılan bir ekstrapolasyon ile kazığın taşıma gücü 1800 kN arasında tahmin edilebilmektedir.



## Kazık Yükleme Deneyi

Aliğa Petrokimya Tesisi



Bu durumda nihai taşıma gücü Ritter ve Hiley formüllerinin verdiği sonuçlar arasına düşmektedir. Dolayısı ile kazığın nihai yükü 1800 kN olarak kabul edilebilir.

### 3.4. Kazıklarda Grup Etkisi ve Grup Taşıma Gücü

Daha önce 2.2.2. kısmında açıklandığı gibi kazık Grubunun Taşıma Gücü, kazıkların grup halinde davranışları düşünülerek hesaplanır. Zira, grup içindeki bir kazık ve çevre zemin, diğer kazıklardan iletilen gerilmelerin etki alanı içinde kalabilir. Bu problemin çözümü için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan biri sürtünme kazıklarında grup etkisini hesaplamak için kullanılan ampirik veya yarı ampirik formüllerdir. Bu formüller kazıklar arası etkileşim nedeni ile grup içindeki kazıkların taşıma güçlerinde meydana gelen azalmayı saptamak amacı ile geliştirilmişlerdir.  $\eta$

sayısı ile gösterilen Grup Verimi, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplanması ile bulunan değerle çarpılarak grup taşıma gücü bulunur. Bu formüllerde genelde, yalnızca kazık-kazık etkileşimi düşünülmüş ve zemin özellikleri gözönüne alınmamıştır.

### 3.4.1. Verimlilik Formülleri

#### 3.4.1.1. Converse-Labarre Formülü

Formüllerden başlıcası ve en çok kullanılanı olan Converse-Labarre formülü aşağıda verilmektedir:

$$\eta = 1 - \theta \left[ \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \right] \quad (3.58)$$

m = Gruptaki Kazık Sırası Sayısı,

n = Bir Sıradaki Kazık Sayısı,

$\theta = \arctan(d/s)$ ; (Derece),

d = Kazık Çapı,

s = Kazık Aralığıdır.

#### 3.4.1.2. 1/8 Etkileşim Kuralı

Bu kuralı kimin ortaya attığı bilinmemektedir. Kurala göre grup içindeki belirli bir kazığın taşıma gücünü azaltmak için önce her komşu kazık için bir adet (1/8) sayısı kazık çapı/kazık aralığı (d/s) oranı ile çarpılır. Bu çarpımdan elde edilen rakam ile kazığın taşıma gücü çarpılır ve etkilenmiş taşıma gücü böylece bulunur.

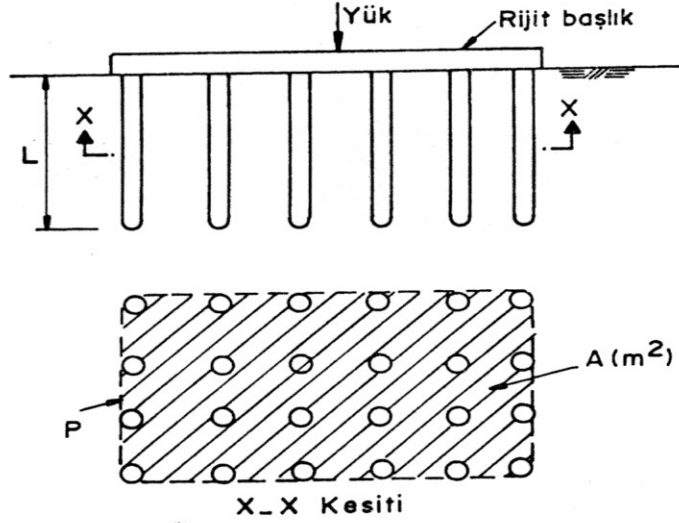
Dikdörtgen ızgara üzerindeki m ve n adet kazıktan meydana gelen bir grup için verim ( $\eta$ ) aşağıdaki formül ile ifade edilebilir:

$$\eta = 1 - \frac{12 + 10(m-2) + 10(n-2) + 8(m-2)(n-2)}{8mn} (d/s) \quad (3.59)$$

Bu formülle hesaplanan verim, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplanması ile bulunan değerle çarpılarak grup taşıma gücü bulunur. Bu formülde de, yalnızca kazık-kazık etkileşimi düşünülmüş ve zemin özellikleri gözönüne alınmamıştır.

#### 3.4.2. Terzaghi Blok Yaklaşımı

Terzaghi ve Peck (1967) kazıklı bir temelin aynen bir “Blok Derin Temel” olarak davranacağı varsayımından hareket ederek bir hesap yöntemi geliştirmişlerdir. Yukarıda 3.4.1.1. ve 3.4.1.2. paragraflarında nakledilen hesap yöntemlerinin, zeminin özelliklerini hesaba katmamakta olduğu açıklanmıştı. Terzaghi ve Peck (1967) yöntemi zemin özelliklerini de hesaba katar. Kazıklı bir temelin blok halinde davranması; her zaman olası bir durum değildir ve bu davranışı önemli ölçüde kazık aralığı etkiler: Temelin hangi kazık aralığındaki aşamada Blok Temel davranışından tek kazık davranışına geçeceği sorusuna kolayca cevap vermek kolay değildir. Bu soruya her durumda geçerli olabilecek hazır bir cevap bulunamaması nedeniyledir ki; Terzaghi ve Peck tek kazığın göçmesi ile blok temelin göçmesi durumlarını ayrı ayrı göz önüne alan bir yaklaşım önermişlerdir. Aşağıda görüleceği gibi bu yaklaşım içinde iki adımlı bir çözüm takip edilir.



Şekil 3.11. Kazıklarda Grup Etkisi (Terzaghi ve Peck,1967)

Yöntem; Şekil 3.11 e bakılarak ve aşağıdaki kabuller ile şöylece açıklanabilir:

1) Kazık başlığı rijittir.

2) Kazık grubu içindeki zemin kazıklarla beraber bir blok olarak davranır.

Terzaghi-Peck metodunda, kazık grubu Şekil 3.11 de gösterildiği gibi derin bir temel gibi düşünülerek toplam taşıma gücü bulunur. Şekil 3.11. e bakılarak blok çevresi ve tabanındaki kuvvetlerin dengesi gözönüne alınırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$Q_B = PLs + Aq_f - AL\gamma \quad (3.60)$$

Burada:

$s$  = Kazık Blokunu Çevreleyen Zeminin Ortalama Kayma Mukavemeti,

$L$  = Zemin İçinde Kalan Kazık Boyu,

$P$  = Kazık Grubunun Plan Görünümdeki Toplam Çevre Uzunluğu,

$A$  = Kazık Grubunun Plan Görünümündeki Alanı,

$\gamma$  = Zeminin Birim Hacim Ağırlığı,

Killi zeminler için (3.60) ifadesinde görülen  $q_f$  (Kazığın oturduğu derinlikteki taşıma gücü):

$$q_f = 1.3 c N_c + \gamma L \quad (3.61)$$

olarak alınabilir.

Yukarıdaki (3.60) denklemi ile bulunan taşıma gücü; (n) gruptaki kazıkların sayısını göstermek üzere, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplamından elde edilen değer olan ( $nQ_{top}$ ) ile karşılaştırılır ve küçük olan değer, kazık grubunun toplam taşıma gücü olarak kabul edilir.

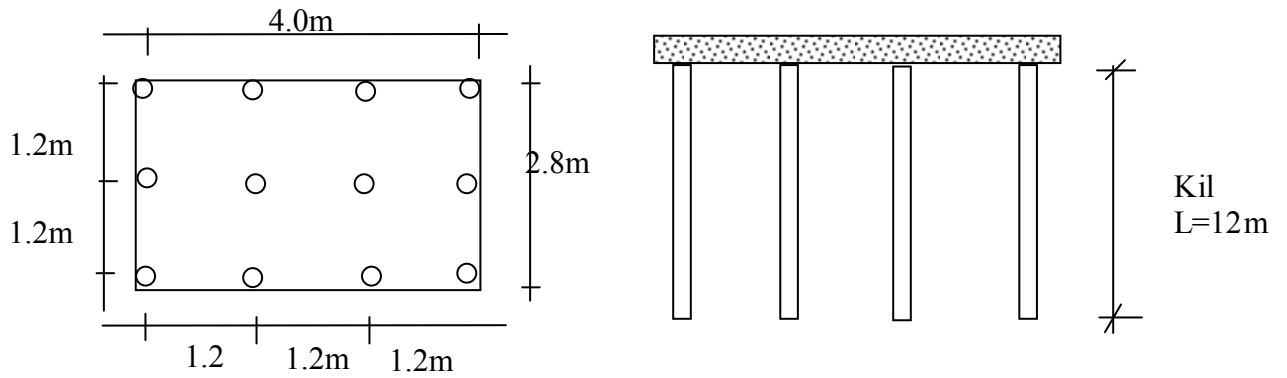
### **Örnek 3.10.**

Şekilde gösterilen kazık grubundaki tek bir kazığın taşıma ucünü aşağıdaki yöntemleri kullanarak bulunuz:

a) Terzaghi-Peck Metodu (Şekil 3.11)

b) Converse-Labarre Formülü (3.58)

Burada iki metot ile yaklaşılr ve hangisinin davranışı kontrol ettiği saptanarak taşıma gücü için o değeri seçilir:



Çap : 400mm

$$C_u=50\text{kPa}, \quad \gamma=18\text{kN/m}^3$$

$$F.S.=2.5$$

- $Q_{\text{top}} = Q_u + Q_\phi$
- $Q_p=9c_uA_u=9 \times 50 \times \pi \times (0.4)^2/4 = 56.5 \text{ kN}$
- $Q_s=\alpha \cdot c_u \cdot A_\phi=0.84 \times 50 \times \pi \times 0.4 \times 12 = 633 \text{ kN}$

$$Q_{\text{top}}=56.5+633=689.5 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all}}=689.5 / 2.5 \cong \mathbf{275.8 \text{ kN}} = 2.5 \text{ Güvenlik Katayısı ile Güğvenilir}$$

YükConverse-Labarre Formülü (3.58)

$$E = 1 - \theta \left[ \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \right]$$

m= sıra sayısı=3

n=bir sıradaki kazık sayısı=4

$$\theta = \arctan(D/s) = \arctan(0.4/1.2) = 18.4^\circ$$

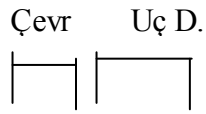
D=Çap

s=merkezden merkeze uzaklık

$$E = 1 - 18.4 \left[ \frac{(4-1)3 + (3-1)4}{90 \times 3 \times 4} \right] = 0.71$$

$$(Q_{all})_{\text{gruptaki tek kazık için güvenli taşıma gücü}} = 275.8 \times 0.71 = \mathbf{195.8 \text{ kN}}$$

Terzaghi\_Peck Metodu:

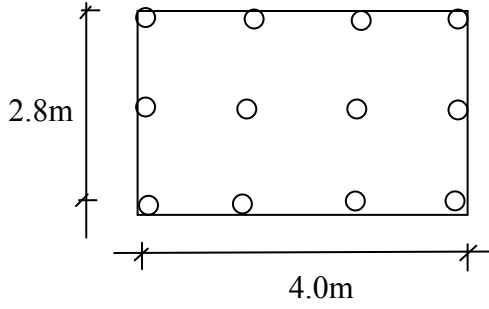


$$(Q_g)_{ult} = pD_f c_u + A(q_{ult})_{net}$$

(Temel Taşıma gücü olarak düşünülür ve Denklem 3.60 a varılır)

$$(q_{ult})_{net} = q_{nf} = c_u N_c$$

$$= pD_f c_u + Aq_{ult} - AD_f \gamma$$



$$p=2(2.8+4.0)=13.6\text{m}$$

$$A=2.8 \times 4 = 11.2\text{m}^2$$

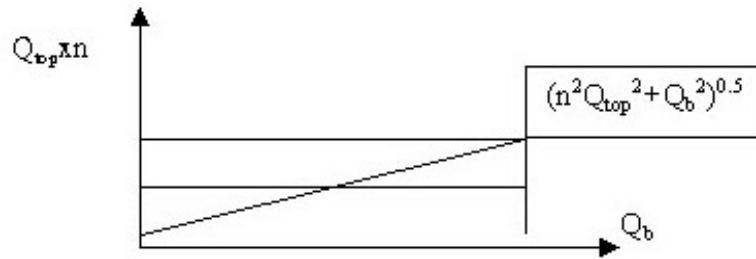
$$Q_g = 13.6 \times 12 \times 50 + 11.2(50 \times 8.6) = 12976\text{kN}$$

$$(Q_{ult})_{\text{tek kazık için}} = 12976/12 = 1081\text{kN}$$

$$(Q_{all})_{\text{tek kazık için izin verilebilir}} = 1081/2.5 = 432.5\text{kN} > 195.8\text{kN}$$

Bu durumda taşıma gücünün hesabında etkin faktörün  $Q_B$  olmadığı anlaşılmıştır. Etkin faktör Converse-Labarre formülünün kullanımı olmaktadır. Bu nedenle tek kazığın taşıma gücü olarak

$$(q_{all})_{\text{tek kazık}} = \underline{\underline{195.8\text{kN}}}$$
 alınır.



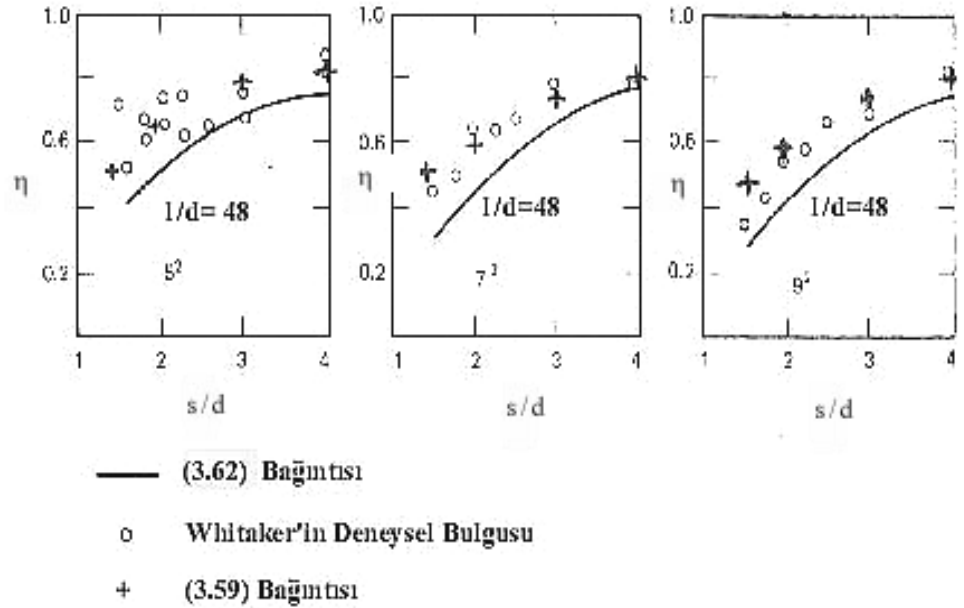
Şekil 3.12. Verim Formülasyonu



Şekil 3.12 de bu iki formülasyondan elde edilen değerler iki dik eksen üzerinde gösterilmişlerdir. Bunların bileşkesi  $(n^2 Q_{top}^2 + Q_b^2)^{0.5}$  ile belirlenir. Kapsadıkları alan ise  $n Q_{top} Q_b$  dir. İstatistiksel olarak alanın bileşkeye bölünmesi ile bulunan ifadenin yeniden düzenlenmesi ile ( $\eta$ ) verimi göstermek üzere aşağıdaki gibi yeni bir verim formülü saptanabilir: (Birand 1998)

$$1/\eta^2 = (1 + n^2 Q_{top}^2) / Q_b^2 \quad (3.62)$$

Bu formül, Şekil 3.13.de sürekli çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Verim Formülleri Sonuçları ve Deneysel Sonuçlar

Şekil 3.13 de Whitaker (1957) tarafından narınlığı  $(l/d)=48$  olan model kazıklardan meydana gelen  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  ve  $9 \times 9$  kazıklı kazık

grupları üzerinde gerçekleştirilmiş olan deneylerden elde edilen verim gözlemi sonuçlarının (3.59) ve (3.62) formülleri ile bulunan verim sonuçları ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre; kazık aralığının  $s = 4d$  değerinden itibaren kazıkların blok davranışından tek kazık davranışına geçtikleri de söylenebilir. Ancak pratikte aralıkların genellikle  $4d$  nin altında olduğu göz önünde tutulmalıdır.

### **3.5. Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaba Alınması**

#### 3.5.1. Negatif Çevre Sürtünmesi'nin Mekanizması

Uç kazıklarının tasarımında göz önüne alınması gereken çok önemli diğer bir olgu ise “Negatif Çevre Sürtünmesi” olayıdır. Yarı sonsuz bir zemin ortamı içinde bulunan bir yüzer kazığın çevresindeki zeminde efektif gerilmenin artması, bu çevre zemininin oturmasını doğurur. Bu oturma sırasında kazığın uç direncinin kazığın oturmasına direnmesi nedeni ile çevre zemini kazıktan fazla oturur ve kazığı kendisi ile beraber aşağı doğru sürüklemek ister. Bu durumda çevre sürtünmesi kazığa uygulanan yük ile aynı yönde etkimeye başlar ve bu nedenle adı “Negatif Çevre Sürtünmesi” olur. Diğer taraftan kazık; derinleştikçe uygulanan yüke kümülatif olarak eklenen bu negatif çevre sürtünmesi yükü nedeni ile hem sıkışarak boy kısalmasına uğrar, hem de oturma artarak sürer. Bu nedenledir ki; kazık başına yakın olan derinliklerde çevre zemini kazığa göre daha fazla otururken belli bir derinlikten sonra kazık çevre zemininden daha fazla

oturmayaya başlayabilir. Bu durumda kazık-zemin farklı oturması belli bir derinlikte sıfırlanır. Bu sıfırlanma konumundaki yatay düzleme “eşdeğer oturma düzlemi” denir. Bu düzlemin altında kalan derinliklerde kazık, çevre zemininden daha fazla oturacağı için ise çevre sürtünmesi pozitif yönde gelişir; uygulanan yüke karşı koymaya başlar. Eşdeğer oturma düzlemi ve kazık ile çevre zemininin görelî oturma durumları Şekil 3.12 de görülmektedir.

Negatif Çevre Sürtünmesi, aşağıdaki durumlar için kısaca gözden geçirilecektir:

a. Kazık Çevresinde kohezyonlu bir dolgunun, bir yüzer kazığı çevreleyen granüler bir zeminin üzerinde bulunması durumu:

Bu durumda, üst kohezyonlu dolgu otururken kazık yüzeyinde oluşan adezyon nedeni ile kazık aşağıya doğru sürüklenmek istenir. Aynı anda sürüş etkisi nedeni ile aşağıdaki granüler zeminin kazık çeperindeki sürtünme direnci de artar. Yüzer kazıklarda bu durum kazığın zemin içine penetrasyonunu zorlaştırır. Uç kazıklarında ise direnç merkezi yukarıdaki kohezyonlu zemine doğru kayar.

b. Granüler bir dolgunun, kohezyonlu bir zeminin üzerinde olması hali:

Bu durumda granüler zeminde bir miktar oturma olmakla beraber, asıl oturma aşağıdaki kohezyonlu tabakada olur. Yüzer kazık boyunun, kohezyonlu, sıkışabilir zemin içinde yeterli uzunlukta olması halinde yukarıda anlatıldığı şekilde belirli bir derinlikten sonra, kazık başına yakın kesimdeki negatif çevre sürtünmesinden doğan ek yüke karşı yönde bir pozitif çevre sürtünmesi doğabilir.

Diğer taraftan, negatif çevre sürtünmesi aşağıdaki etmenlerden biri nedeni ile de oluşabilir:

-Killi bir zeminde, su tablası seviyesinin alçalarak oturmaya yol açması,

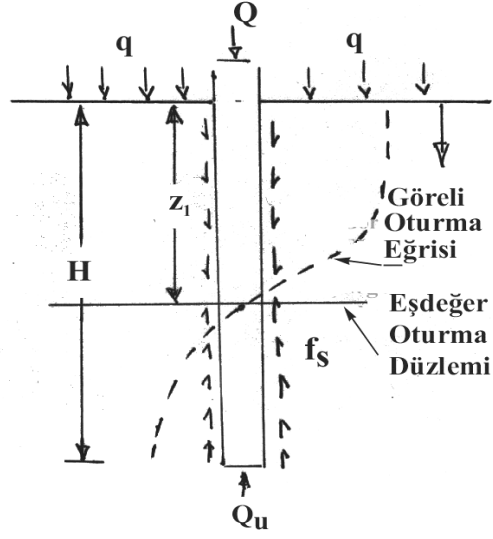
-Kazık çakma veya deney kazıklarının yükleme sırasında kazık boyunun kısılması ve çakma işlemi bitince veya yük boşaltılınca kazık boyunda uzama olması. Bu halde kazığın başına yakın derinliklerde meydana gelen negatif gerilmelerin, daha derinlerde oluşacak positif gerilmelerle (veya uç direncinin artması ile) dengelenmesi olasıdır.

Benzeri durumlar, kazık grupları için de geçerlidir. Bu durumda negatif çevre sürtünmesi, tüm grubu zorlar. Çevre sürtünmesinden dolayı oluşan kuvvetler, ancak çevre sürtünmesi gerilmesinin sınır değerine ulaşıncaya kadar artar ve bu değerden sonra sabit kalır. Projelendirmede bu ek yükün, kazık üzerine uygulanan yüke eklenmesi gerekir.

### 3.5.2. Negatif Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması

Bir yüzer kazık çevresinde oluşan negatif ve positif çevre sürtünmesi, Şekil 3.14. göz önüne alınarak incelenebilir.

Aşağıdaki Şekil 3.14.de görüldüğü gibi, görelî oturma  $z_1$  derinliğine kadar çevre zemininin kazığa göre daha fazla oturduğunu, bu derinlikten sonra ise tersi bir oturma durumunun söz konusu olduğunu göstermektedir. Çevre sürtünmesi de bu işleyişe koşut olarak yönlenmektedir.



Şekil 3.14. Eşdeğer Oturma Düzlemi ve Negatif Çevre Sürtünmesi

Kazık Q yükü altında dengededir. Negatif çevre sürtünmesi nedeni ile oluşacak yeni denge denklemini yazılırsa:

$$p \int_0^{z_1} f_s dz = Q_u + p \int_{z_1}^H f_s dz \quad (3.63)$$

ifadesi elde edilir.

Burada:

Q= Kazığa Uygulanan Yük,

Qu= Uç Direnci,

fs= Birim Çevre Sürtünmesi,

p= Kazık Çevre Alanı,

H= Kazık Boyu

olmaktadır.

Negatif çevre sürtünmesi, pek çok halde çevre zemininin konsolidasyon oturması sonucunda oluştuğu için bu çevre sürtünmesinin efektif gerilmeler kullanılarak hesaplanması uygundur.

Bu durumda:

$$f_s = K_t(q + \gamma' z) \cdot \alpha \quad (3.64)$$

olarak yazılabilir.

$\alpha = 3.2.3.1$  Paragrafında anlatılan adezyon faktörüdür.

$q =$  Kazık Çevresi Zemininin Oturmasına neden olan Sürşarj Yüğü,

$\gamma' =$  Doygun Zeminde Efektif Birim Hacim ağırlığı,

$K_t$  ise yatay toprak basıncı katsayısıdır. Bu katsayı genelde Geostatik Basınç Katsayısı  $K_0$  olarak alınır. Uç direnci yok sayılabilecek bir yüzer kazık için (3.63) ve (3.64) ifadelerinden aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$z_1 = \frac{H}{z_1} \left( \frac{q}{\gamma} + \frac{H}{2} \right) - \frac{2q}{\gamma} \quad (3.65)$$

2. Kısımda yüzer kazıklarda kazık ucuna nakledilen yük miktarları hakkındaki açıklamalar ile Şekil 2.2 ile 2.3 ü tekrara gözlemek

yukarıdaki bağıntının kullanım alanının geniş olduğu fikrini desteklemektedir: Uç direnci genelde, narin kazıklar için ihmal edilebilir. Bu durumda  $z_1$  ve dolayısı ile diğer kuvvetler (3.65) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Ancak uç direncinin ihmal edilemeyeceği durumlarda, kazık ucunun oturmasını yaratan uç direnci, yalnızca görelî oturma miktarlarının ölçümlerle saptanmasını sağlayacak araç-gerecin bulunması halinde bulunabilir. Bu tür bir ölçüm düzeneği yok ise bu kuvvetlerin hesabı yapılamaz.

Çevre zemini oturmasının sürşarj yükü dışında bir nedenle oluşması halinde ise (örneğin su tablasının seviyesinin düşmesi) (3.65) bağıntısında  $q = 0$  olur. Bu durumda  $z_1 = \frac{H}{\sqrt{2}}$  olarak bulunabilir.

Diğer taraftan uç kazıkları düşünülerek klasik yöntemle yapılan hesaplamada ise, eşdeğer oturma düzlemi altında meydana gelebilecek pozitif çevre sürtünmesi göz önüne alınmayarak negatif çevre sürtünmesi tüm kazık boyunca oluşacakmış gibi hesap yapılır. Bu hesap tarzı aşağıda sunulmaktadır:

Kazıklı temeller gruplar halinde oluşturulduklarından ötürü negatif çevre sürtünmesinden ileri gelen ek yükün tüm grup için hesaplanması gereklidir. Bu amaçla, aşağıdaki iki adımlı kıyaslama hesabı yapılır:

- a. Birinci adımda tek kazığa negatif çevre sürtünmesi nedeni ile isabet eden ek yük saptanır ve kazık sayısı ile çarpılır.
- b. Grup taşıma gücünü saptamak için kullanılan Terzaghi bloğu üzerinde oluşan toplam negatif sürtünme direnci hesaplanır. Kazığın ağırlığı ve sanal blok temelin ağırlığı da hesaba katılır.

Negatif Çevre Sürtünmesi nedeni ile oluşan yüklerin hesap yöntemi Şekil 3.15. de gösterilmiştir.

Yukarıdaki birinci adımda sözü edilen tek kazık için toplam uç kuvveti:

$$R = P_N + W + \pi Dsl \quad (3.66)$$

olur. Burada:

$P_N$  = Negatif Çevre Sürtünmesi Kuvveti,

$Q$  = Tek Kazığa Üst Yapıdan Gelen Yük,

$W$  = Kazık Ağırlığı,

$d$  = Kazık Çapı,

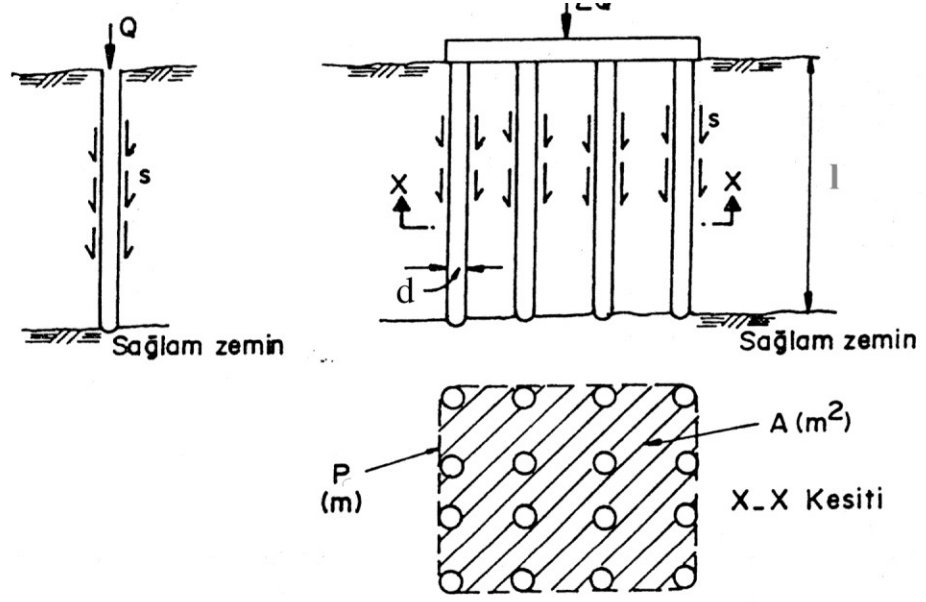
$s$  = Sıkışarak Oturan ve Negatif Çevre Sürtünmesini meydana getiren zeminin kayma direnci,

$l$  = Oturan Zeminin Kalınlığıdır.

Dolayısı ile tek kazığın direncinin ( $P_1$ ) kazık added ( $n$ ) ile çarpımı sonunda bulunan grup değeri  $R_g$  (3.66) ifadesinden yararlanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$R_g = (W + P_N + \pi dls)n \quad (3.67)$$





Şekil 3.15. Negatif Çevre Sürtünmesi

İkinci adımda ise plan görünümünde gruptaki kazıklara teğet olarak alınan blok çevresi uzunluğu (P) olmak üzere:

$$(3.68) \quad R_g = nQ + \gamma l A + P l s$$

şeklinde saptanabilir.

Bu adımlardan sonra 3.5.1 kısmında açıklandığı gibi **olay bir sınır direnç değerine kadar etkin olduğundan (3.67) ve (3.68) denklemleri ile bulunan değerlerden küçük olan değer** kazık grubunun toplam uç direnci olarak alınır. Burada (3.67) ve (3.68) ifadelerinde

$n =$  Gruptaki Kazık Sayısı,

$\gamma$  = Zeminin Birim Hacim Ağırlığı,

$A$  = Kazık Grubunun Plandaki Alanı (Kazık aralarındaki zeminin alanı dahil),

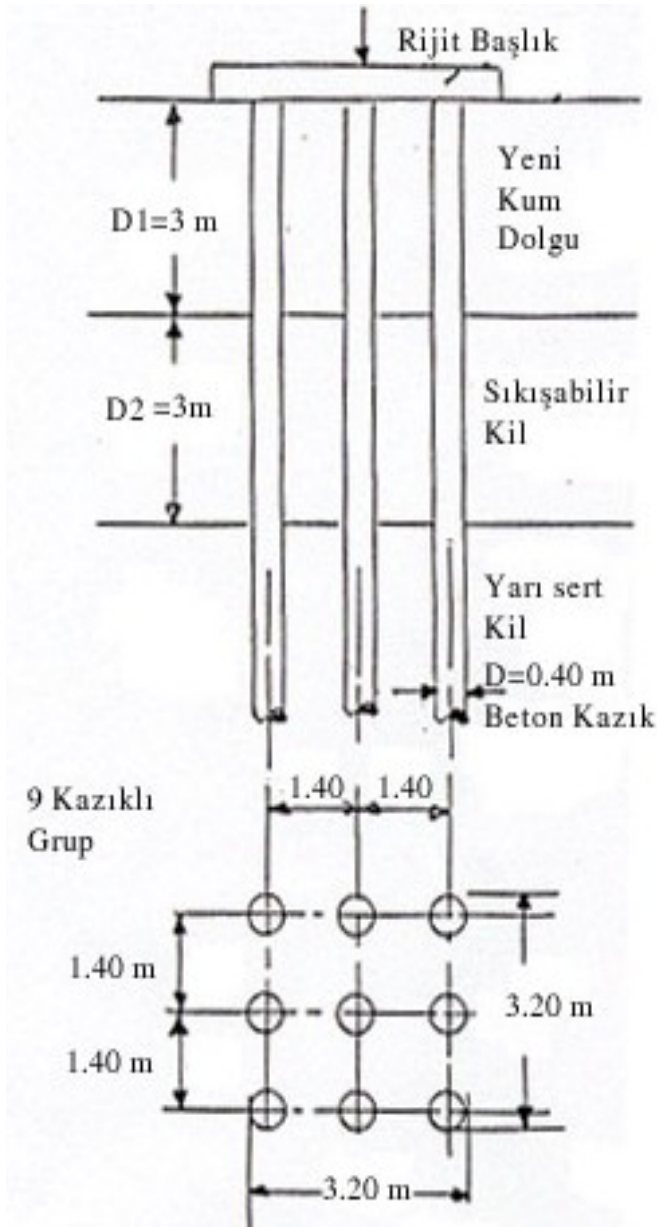
$R_g$  = Grup Taban Yüğü,

olmaktadır.

Diğer taraftan, kazık gruplarında, kazıklar uç kazığı olsa dahi; kazıklararası etkileşimin çevre sürtünmesini azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle, (3.69) bağıntısı kullanılarak yapılacak bir hesabın sonucunun kazık sayısı ile çarpılması ile bulunacak olan değerin tasarımda kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Bu işlem için önce kazık çevresindeki zeminin oturma hesabının yapılması ve kazık başında alınabilecek bir oturma değerinin elde edilmesi gerekecektir. Bu hesap (3.65) bağıntısı kullanılarak yapılacak olan hesapla karşılaştırılabilir. En yüksek yük sınırı ise (3.67) ve (3.68) bağıntıları ile hesaplanabilir.

Bazı özel hallerde, bu hesaplarla bulunan negatif çevre sürtünmesi değerleri çok yüksek sonuçlar verebilir. Bu durumda tarafsız oturma düzleminin oluşma şansı ve yerine bakılarak kazıkları yüzer kazık olarak tasarlamak daha avantajlı olabilir.

### **Örnek 3.11**



Bu problem (3.67) ve (3.68) başlıklarının kullanılmasına bir örnektir.

Uç kazıklarından oluşan kazık grubuna ve çevre zeminine ait bilgiler aşağıdaki şekildedir. Kazık grubu imal edildikten sonra yapılan yeni kum dolgu oturmaya neden olmuş ve negative çevre sürtünmesi oluşmuştur. Bu durumda kazık tasarımında en kritik halde ne kadar bir ek çevre sürtünmesi yükünün hesaba alınması gereklidir?

$$\phi = 17.5$$

$$\phi = 30 \quad f = 2/3 \tan \phi = 0.364 \text{ Zemin-Kazık}$$

$$f = \tan \phi = 0.577 \quad \text{Zemin-Zemin}$$

$$K_a=0.33$$

$$K_0=0.40$$

$$q_u=20 \text{ kN/m}^2 ; C_u=10 \text{ kN/m}^2$$

$$c=10 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma=16 \text{ kN/m}^3$$

$$W=3.14 \times (0.2)^2 \times 24 = 3 \text{ kN/m}$$

I. Tek Kazık Analizi:

D1 tabakası; 3 m kum içinde sürtünme:

$$1/2 \times 17.5 \times 3^2 \times 0.4 = 31.5 \text{ kN/m (Sükunetteki Toprak Basıncı)}$$

Negatif Çevre Sürtünmesi Yüğü:

$$W+F(D1)=9+31.5 \times 0.364 \times 3.14 \times 0.4 = 9+15 = 24 \text{ kN/kazık}$$

D2 tabakası; 3 m kil içinde sürtünme :

$$W+F(D2)=9+3.14 \times 3 \times 0.4 \times 10 = 47 \text{ kN/kazık}$$

Bu durumda kazık başına 53 kN negative çevre sürtünmesi yüğü ve kazıkların ağırlığı da alınırsa 71 kN kuvvet uygulanmaktadır.

II. Kazık Grubunun Analizi

Kazık Başına Gelen Yüğü Hesabı:

$$W+F(D1)=1/9(3.2 \times 3.2 \times 3.0 \times 17.5 + 4 \times 3.20 \times 31.5 \times 0.577) = 86 \text{ kN/kazık}$$

kumda

$$W+F(D2)=1/9(3.2 \times 3.2 \times 3.0 \times 16.0 + 4.0 \times 3.20 \times 3.0 \times 10) = 97 \text{ kN/kazık}$$

kilde

$$\text{Toplam} = 183 \text{ kN/kazık}$$

Tek kazık analizi durumu control etmektedir.

Bu durumda 53 kN/kazık çevre sürtünmesi yüğü hesaba alınır.

### **Örnek 3.12**

Yukarıdaki örnekte “eşdeğer oturma düzlemi” göz önüne alınırsa durum nedir?

Bu durumda (2.1) bağıntısı aracılığı ile eşdeğer oturma düzleminin derinliğini hesaplamak gerekir:

Sürşarj, sonradan eklenen granüler dolgudan ileri gelmektedir

$$q = \gamma \times D1 = 17.5 \times 3 \text{ kN/m}^2$$

$$z_1 = \frac{6}{z_1} \left( \frac{17.5 \times 3}{17.5} + \frac{6}{2} \right) + \frac{2 \times 17.5 \times 3}{17.5}$$

ile  $z_1 = 10$  m bulunur. Bu durumda “düzlem, kazık boyunu aşmaktadır ve etkisi yoktur.

Negatif çevre sürtünmesi için yukarıdaki (3.67) ve (3.68) bağıntıları ile elde edilen ek yüklerin miktarı, çoğu kez tasarımcıyı sıkıntıya sokacak kadar büyük çıkmaktadır. Bunun ana nedeni bu bağıntıların türetilmesinde kazıkların rijid olduğu varsayımının bulunmasıdır. Kısım 2. de Şekil 2.8; bu uç kazıklarının sıkışabilirliğinin göz önüne alınması halinde uç basıncının azaldığını göstermektedir. Poulos ve Mattes’in (1969) kazık sıkışabilirliğini göz önüne aldığı ve zeminin elastic ortam olarak kabul edildiği bir çalışmaya göre negatif çevre sürtünmesi nedeni ile oluşan ek yük aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$P_N = I_N q l^2 R N_T + P_a \quad (3.69)$$

Bu ifadede:

$P_a$  = Kazığın Üstündeki Yük

$P_N$  = Negatif Çevre Sürtünmesi + Kazık Yüğü

$I_N$  = Etki Katsayısı,

$$R = \frac{(1 - 2\nu_s')(1 + \nu_s')}{1 - \nu_s'} \text{ Elastik Katsayı,}$$

$l$  = Kazık boyu,

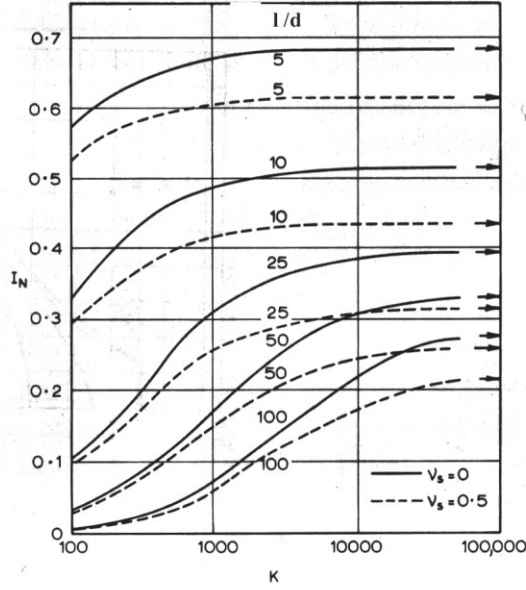
$N_T$  = Kazıkların Geç İmal Edilmesi Nedeni ile Konsolidasyon Düzeltmesi.

En kritik halde  $q$  sürşarjı uygulanan bir üniform zemin için  $N_T = 1.0$  alınabilir. Konsolidasyon şartlarına göre değişen  $N_T$  değeri için pratikte tek yönlü konsolidasyon drenajı halinde 0.95 ve çift yönlü konsolidasyon drenajı halinde 0.80 alınabilir.

Etki katsayısı  $I_N$  aşağıda Şekil 3.16 dan alınabilir.

Bu yaklaşımda çevre zemininin kazık başında  $S_0$  kadar oturduğu ve oturma

miktarının kazık boyunca doğrusal olarak azaldığı ve tabanda sıfırlandığı varsayımı yapılmıştır. Çözümde iki ayrı poisson oranı ile değişik kazık narinlik oranları ( $l/d$ ) kullanılmıştır.



Şekil 3.16. Negatif Çevre Sürtünmesi Etki Katsayısı

(Poulos ve Mattes, 1969 b)

### **Örnek 3.13.**

1000 kN yük taşıyan 10.0 m boyunda bir uç kazığı, efektif poisson oranı 0.4 olan bir zemin içindedir. Zeminde  $K=1000$  ve kazığın narinlik oranı  $l/d=25$  dir. Kazığın beton ezilme direnci  $24000 \text{ kN/m}^2$  dir. Zeminin üstüne sonradan yapılan bir inşaat nedeni ile  $45 \text{ kN/m}^2$  sürşarj gelmektedir.

a. Kazığın ve zeminin elastic olduğunu dikkate alarak toplam çevre sürtünmesi yükünü bulunuz.

b. Kazığın tabanındaki gerilmeyi hesaplayınız ve kazık ucunun ezilip ezilmeyeceğini saptayınız.

Şekil 3.16. dan  $K=1000$ ,  $l/d=25$  için  $I_N=0.30$

$$R = \frac{(1 - 2 \times 0.4)(1 + 0.4)}{1 - 0.4} = 0.25$$

Toplam çevre sürtünmesi yükü:

$$P_{\zeta} = 0.30 \times 45 \times 10^2 \times 0.25 = 337 \text{ kN.}$$

$$\text{Toplam Y\u00fck} = P_N + P_{\zeta} = 1000 + 337 = 1337 \text{ kN.}$$

$$\sigma_b = \text{Gerilme} = \frac{1337}{\frac{\pi(0.4)^2}{4}} = 10640 \text{ kN/m}^2 < 2400 \text{ kN/m}^2 \text{ ezilme yoktur.}$$

## KISIM 4. KAZIK Y\u00dcKLEME DENEYLER\u0130

### 4.1. Genel

\u00dc\u00e7\u00fcnc\u00fc Kısımda, kazık ta\u015fıma g\u00fcn\u00fc statik denge hesaplarına dayanarak saptamaya yarayan form\u00fcller incelenmi\u015ftir. Bu form\u00fcller, akılcı temellere dayanmakla beraber; kazıkların ta\u015fıma g\u00fc\u00e7lerinin en sa\u011flıklı \u015fekilde kazık y\u00fckleme deneyleri ile bulundu\u011fu bilinmektedir. Bu nedenledir ki pek \u00e7ok \u015fartnamede bir kazık grubunu olu\u015fturan her belli sayıda kazık i\u00e7in en az bir adet kazık y\u00fckleme deneyinin yapılması \u015fart ko\u015fulur. Kazıkların d\u00fc\u015fey eksenel y\u00fck ta\u015fıma g\u00fc\u00e7leri d\u00fc\u015fey y\u00fckleme deneyleri, yanal y\u00fck kapasiteleri ise yanal y\u00fckleme deneyleri ile saptanır. Bu terimlerle genelde statik y\u00fckleme deneyleri anlatılır. Oysa kazıklar dinamik y\u00fckler uygulanarak da denenebilirler. Bu kısımda statik deneylere yer verilmi\u015ftir.

Bu kitapta daha \u00e7ok eksenel y\u00fckleme deneyleri \u00fczerinde durulmu\u015f, yanal y\u00fckleme deneylerine ise kısaca de\u011finilmi\u015ftir.

Kazık y\u00fckleme deneyleri ba\u015flıca \u015fu ama\u00e7lar i\u00e7in yapılmaktadır:

- Kazığın ta\u015fıyabilece\u011fi en b\u00fcy\u00fck y\u00fck\u00fc (g\u00f6\u00e7me y\u00fck\u00fcn\u00fc) bulmak,
- Y\u00fck-\u00d6telenme ili\u015fkisini saptamak,



-Kazığın, imalatından sonra kabulünü yapmak.

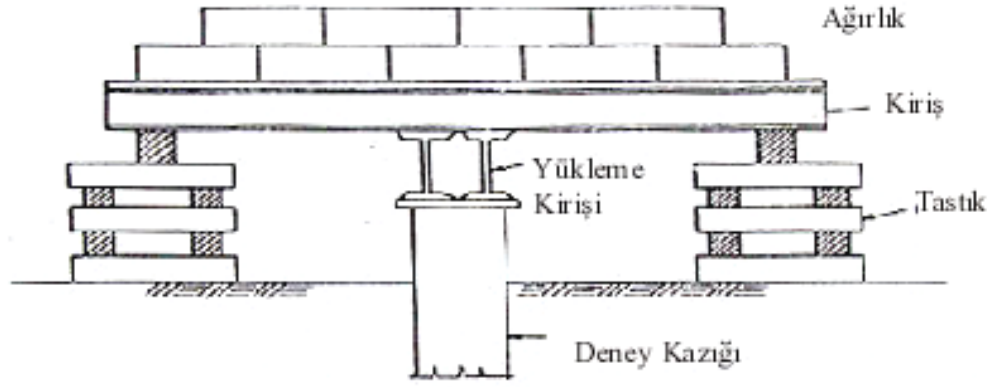
## **4.2. Deneylerin Yapılması**

Deneylerin yapılması için yük uygulanmasını sağlayacak ve oturma miktarlarının ölçülmesine elverecek bir düzenek gereklidir. Aynı zamanda, deneylerde yüklemenin yapılması, zamana bağlı bir programa uygun olarak düzenlenmelidir.

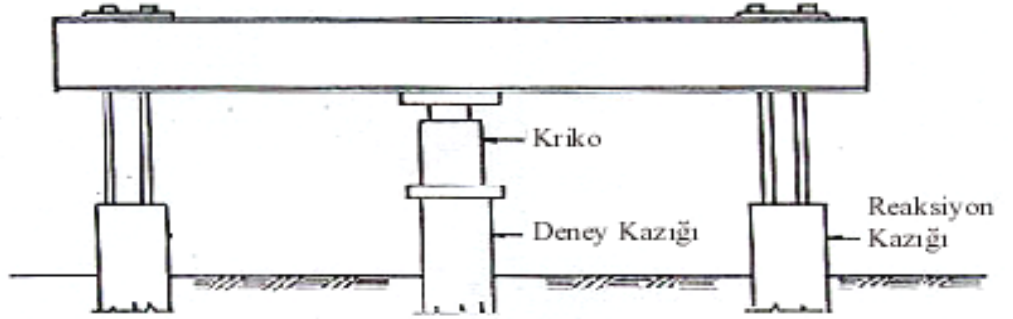
### 4.2.1. Yükleme Düzeneği

Bu deneylerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bir yükleme aracına ve yükleme sırasındaki reaksiyon kuvvetini karşılayabilecek düzeneğe ihtiyaç vardır. Bu amaçlara yönelik olarak kullanılan bazı yöntemler Şekil 4.1. ile 4.3 de şematik olarak gösterilmişlerdir. Burada Şekil 4.1. reaksiyon kuvvetlerinin çok fazla olmayabileceği bir durumda bir platform kullanılarak bu platform üzerine ölü yük (safra) konulması, örneğin çimento torbalarının yığılması ile oluşturulan bir düzeneği göstermektedir. Ölü yük ile yaklaşık 5000 kN değerine kadar yükleme yapılabilir. Yükleme sistemi dengeli olmalı, yatay hareketler önlenmelidir. Eğimli kazıkların yükleme deneyleri ölü yük ile gerçekleştirilemez.

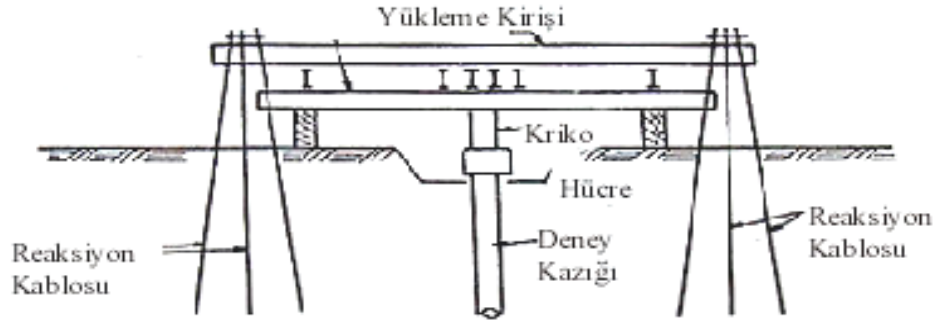
Şekil 4.2 ve 4.3. ile gösterilen durumlarda ise; kriko kullanılarak yük uygulanan ve deney kazığının çevresindeki çekme kazıklarından (veya çekmeye çalışan ankrajlardan) dayanak alan bir yükleme düzeneği bulunmaktadır. Literatürde, çekme kazıkları kullanılması halinde 15000 kN kademesine kadar yükleme yapılabildiği bildirilmektedir. İki kazığın yetmediği durumlarda üç veya dört çekme kazığı kullanılabilir.



Şekil 4.1. Ölü Yük Kullanılarak Kazık Yükleme Deneyi Yapılması



Şekil 4.2. Çekme Kazıkları Kullanılarak Yükleme Deneyi Yapılması



Şekil 4.3. Germe Kabloları Kullanılarak Yükleme Deneyi Yapılması

Çekme kazıkları kullanarak yapılan deneyler ölü yük ile yapılanlara göre genellikle daha ekonomiktir. Bu tür deneyler sırasında aşağıdaki hususlara özen gösterilmelidir:

-Deneyde çekme kazıkları, deney kazığından yeterli uzaklıkta olmalıdır. Bu mesafe en az 1.25 m olarak düşünülmelidir.

-Yükü uygulamakta kullanılan kriko, hesaplanan nihai taşıma gücünden 1.5 ila 2.0 katı fazla yük uygulayabilecek kapasitede olmalıdır. Bu nedenle, deneylere geçilmeden önce, deney kazığının taşıma gücünün Kısım 3.de açıklanan teorik yöntemlerle saptanması uygun olur. Deney sırasında yer alan oturma miktarları, çok sağlıklı ölçümlerle kayda geçirilmelidir.

#### 4.2.2. Ölçümlerin Yapılması

Kazık deneyleri sırasında oturma ölçümleri aşağıdaki yöntemlerden birisi ile yapılabilir:

a) Nivelman aleti ve ölçekli cetvel (eşel) kullanılarak kazık başının hareketi sabit bir röpere göre ölçüm yapılır. Ölçümün sağlıklı olabilmesi için ikinci bir kontrol röper de kullanılır. Okumalarda en az 1 mm'lik bir hassasiyet gereklidir.

b) Oturma, Okuma Saati (komparatör) ve iki ayak üzerine oturan referans kirişleri kullanarak ölçülebilir. Bu yöntemde, Okuma Saatinin çubuğu kazık başına yük uygulamak için yerleştirilen çelik levhaya değil, kazık başına özellikle monte edilmiş olan platform levhalara dayandırılmalıdır. Referans kirişinin oturduğu dayanaklar kazığın hareketinden etkilenmeyecek kadar uzakta; en az 3 kazık çapı veya en az 2 metre uzaklığın büyük olanı seçilerek yerleştirilmelidir. Okumalar 0.02 mm'lik duyarlılıkla alınabilmeli, kazığın olası yana yatma durumunu kontrol edebilmek için en az iki, tecihan dört noktada okuma yapılmalıdır.

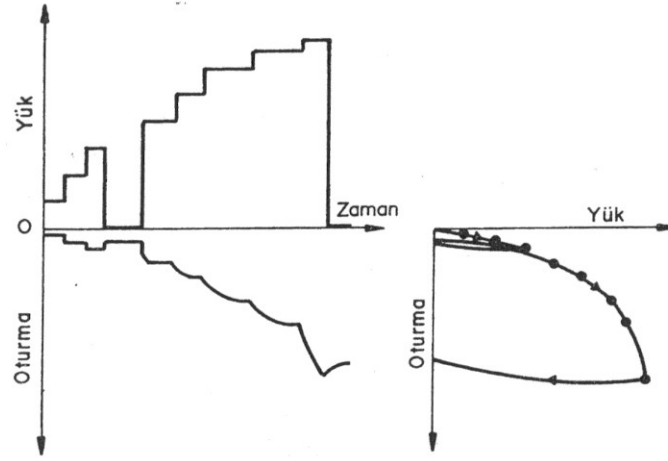
c) Kazık üzerine tesbit edilmiş ölçekli bir cetvele (eşele) karşı yerleştirilen ön gerilme uygulanmış çelik bir tel kullanılarak, kazığın çelik tele göre hareketi ölçülebilir.

Yukarıdaki (b) ve (c) şıklarında sözü edilen yöntemlerin uygulanması sırasında, ölçüm sistemi güneş ve yağmur etkisinden korunmalı, hava sıcaklığı deney süresince ölçülmelidir.

#### 4.2.3. Yükleme Programı

Kazık Yükleme Deneyleri; Kademeli Yükleme Deneyleri, Kademeli Çabuk Deneyler ve Sabit Hızda Delme olarak üç şekilde yapılır. Bunlardan Kademeli Yükleme Deneyleri, uzun süren fakat nihai taşıma gücü yanında oturma miktarlarının da saptanmasının istendiği durumlarda tercih edilir. Adından anlaşılacağı gibi deneyde belirli yükler kademeli olarak yüklenir yine kademeli olarak boşaltılır ve her yük kademesinde oturma hızı belli bir miktara düşünceye kadar beklenir. Bu deneylerde yükleme ve yükü boşaltma sırasında uygulanacak yükler ve her kademedeki uygulanacak bekleme süreleri önceden tesbit edilmelidir. Her kademedeki yük mümkün olduğunca darbesiz, yumuşak bir tarzda

uygulanmalı ve belirli zaman aralıklarında hem yük hem de oturma değerleri ilgili yük ve ötelenme göstergelerinden alınmalıdır. Kademeli yükleme deneylerinde yük her an sabit olmalıdır. Bunun için yükün bir kriko ile tatbik edildiği deneylerde yük göstergesi sürekli olarak izlenmeli ve bir yük azalması durumunda, bu azalma pompa çalıştırılarak giderilmelidir. Her kademedeki oturma okumaları başlangıçta daha sık, deney ilerledikçe daha uzun süreli zaman aralıkları ile yapılır. Her yük kademesinde oturma hızı 20 dakikada 0.1 mm'ye düşüncüye kadar deneye devam edilir. Deneyler sırasında birçok şartnameye göre boşaltma kademelerine de yer verilir ve kazığın emniyetli çalışma yüküne varıldığında son bir boşaltma gerçekleştirilir. Bir kademedeki bir sonraki kademe geçişte uygulanacak artışlar çoğu kez güvenli çalışma yükünün %25'i kadar alınmaktadır.



Şekil 4.4. Kademeli Yükleme Deneyleri Sonuçlarının Gösterimi

Aşağıda Tablo 4.1. de tipik bir kazık yükleme deney planı gösterilmektedir. Bu programdan görüleceği gibi deney, yükleme-boşaltma ve tekrar yükleme kademelerinden oluşmaktadır. Ayrıca kademeli kazık yükleme deneylerinde oturmaların kabul edilebilir bir hıza kadar düşmesini beklemek gerekmektedir. Bu nedenle bu kategorideki deneyler uzun süre alırlar. Bu deneyden elde edilerek kaydedilen değerler; yukarıda Şekil 4.4 de örneği gösterilen yük-oturma-zaman diyagramları şeklinde gösterilir.

Kademeli kazık yükleme deneylerinin uygulanmasına ilişkin detaylar TS 3176'de (Kazık Temellerin Hesap Ve Düzenlenmesinde Genel Kurallar, 1978) verilmektedir. Buna göre, deneyler sırasında ölçülen yük, oturma değerleri ve ölçümlerin alındığı zaman ilgili forma kaydedilmelidir.

Daha kısa sürede sonuç almak istendiği durumlarda, daha hızlı olan kademeli çabuk yükleme deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde yükler hesapla bulunan servis yükünün %200'üne kadar çıkılacak şekilde 30-40 kademe halinde ve 5, 10, 15 dakikalık zaman aralıklarında uygulanır. Bu tip bir deney 2-4 saat içinde bitirilebilir ve nihai taşıma gücü sağlıklı olarak tesbit edilebilir. Bu metodla oturmaların da saptandığı söylenilir. Ancak bulgular ilk yöntem ile bulunanlar kadar gerçekçi olmayabilir

Tablo 4.1. Örnek Kazık Yükleme Deneyi Planı

| Servis Yükünün Yüzdesi Olarak Deney Yüğü | Zaman Aralığı | Kademeler        |
|--|---------------|------------------|
| 25                                       | 1 Saat        | Yükleme Kademesi |

|     |           |                   |
|-----|-----------|-------------------|
| 50  | 1 Saat    |                   |
| 100 | 1 Saat    |                   |
| 75  | 10 Dakika | Boşaltma Kademesi |
| 50  | 10 Dakika |                   |
| 25  | 10 Dakika |                   |
| 0   | 1 Saat    |                   |
| 100 | 6 Saat    | Yükleme Kademesi  |
| 125 | 1 Saat    |                   |
| 150 | 6 Saat    |                   |
| 125 | 10 Dakika | Boşaltma Kademesi |
| 100 | 10 Dakika |                   |
| 75  | 10 Dakika |                   |
| 50  | 10 Dakika |                   |

|    |              |  |
|----|--------------|--|
| 25 | 10<br>Dakika |  |
| 0  | 1 Saat       |  |

Sabit Hızda Delme deneylerinde ise, kazığın krikolar yardımı ile yüklenerek zemine belli bir hızda batırılması sağlanır. Batıran kuvvet ve batma miktarı gözlenir. Bu gözlem sonucu elde edilen yük-oturma diyagramında oturma değerleri belli bir yükte aşırı oturma gösterirler ve eğri keskin bir dönüş yaparak belli bir yük değerini asimptot kabul etme durumuna gelir. Göçme yükü bu yük olarak alınabileceği gibi, aşağıda verilecek olan diğer bir kriterin kabulü ile de saptanabilir. Deneyde kullanılan yükleme krikosunun aksının hareket uzunluğu, deney sonunda ulaşılabilecek oturma miktarı ile krikonun kuvvet aldığı dayanak sisteminin deney sırasında yapacağı yukarı doğru kabarmasının toplamından az olmamalıdır. Bu hareketin büyüklüğüne bir açıklık getirebilmek amacı ile reaksiyon sisteminin hareketinin; ölü yük kullanarak reaksiyon alınan deneylerde 75 mm, çekme kazıkları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise 25 mm dolayında olacağı söylenebilir. Göçme için gerekli penetrasyon (zemine giriş) sürtünme kazıklarında enkesit boyutunun %10'una kadar varabilir. Killi zeminlerdeki sürtünme kazıklarında göçme sırasındaki oturma 25 mm'den az ise 0.75 mm/dakika civarında bir giriş hızı; granüler zeminlerdeki bir uç kazığında ise daha büyük hareketler beklendiği gözönüne alınarak 1.50 mm/dakika'lık bir giriş hızı düşünülebilir. Batırma hızının sabit tutulması kaydı ile yukarıda verilen değerlerin yarısından iki katına kadar olan bir aralıkta, deney sonuçlarının çok değişmeyeceği bilinmektedir. Bu sabit hızın sağlanabilmesi için ise



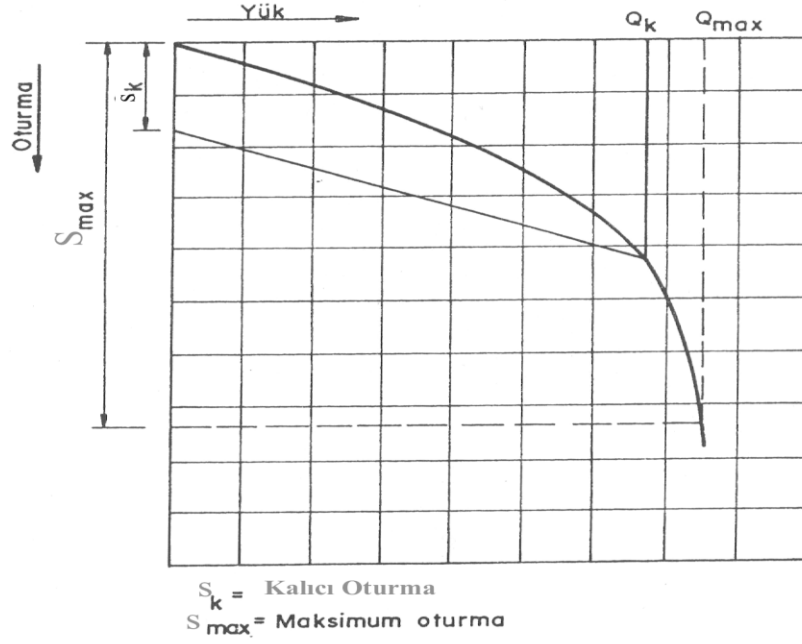
durum deney süresince sürekli şekilde gözlenir. Gerekirse kazığa yüklenen yük pompa ayarları ile değiştirilir. Nihai taşıma gücünün saptanmasında kullanılan bu deneyin avantajı çabukluğudur. Deneylerin boşaltma kademelerinde zeminin doğrusal elastik davranış göstermemesi nedeni ile bir miktar “kalıcı oturma” olmaktadır. Her kademede görülen bu kalıcı veya plastik oturmalar ile toplam oturmalar arasındaki fark ve/veya bu farkın yük ile değişim hızı, kazık yükleme deneylerinin değerlendirilmesi için kullanılan bazı kriterlerde önemli rol üstlenmektedirler.

#### 4.2.4. Önemli Noktalar

Deney kazıkları projede kullanılacak kazıkları yeterli bir şekilde örnekleyebilmeli, gerek malzeme, gerekse yapım açısından onlardan farklı imal edilmemelidir. Kazık yükleme deneylerinin değerlendirilmesinde zemin koşullarının kısa mesafeler içinde farklılıklar gösterebileceği de dikkate alınmalıdır. Diğer önemli bir husus zaman faktörüdür. Kazık yükleme deneyleri kazığın yapımından belli bir süre geçtikten sonra; örneğin TS 3167 uyarınca çakma kazıklarda çakılma işleminin bitmesinden sonra kohezyonsuz zeminlerde en az 3 gün, kohezyonlu zeminlerde ise en az 3 hafta geçtikten sonra yapılmalıdır.

### **4.3. Göçme Yüğü Tayini Yöntemleri**

Şekil 4.5 yükleme deneyi sonunda elde edilebilecek olan tipik bir yük-oturma eğrisini şematik şekilde göstermektedir. Bu eğri kullanılarak kazığın taşıyabileceği en büyük yük olan "göçme yükü" bulunur.



Şekil 4.5. Tipik Yük-Oturma Diyagramı

Bu eğrinin gösterdiği deneyde kazık,  $Q_k$  yüküne kadar yüklenmiş sonra yük tamamen boşaltılmıştır. Bu durumda bir “kalıcı veya plastik oturma,  $S_k$ ” görülmüştür. Kazık, şekilde gösterilmemekle beraber  $Q_k$  yüküne kadar tekrar yüklenmiş ve bu yüklenme sonucunda  $Q_{max}$  ile gösterilen noktada göçmüştür. Bu  $Q_{max}$  yükü kazığın “göçme yükü” veya “nihai taşıma gücü” olmaktadır. Görüldüğü gibi bu yük altındaki oturma, küçük yük kademeleri altında gittikçe daha fazla artarak “akma” ya dönüşmüş bulunmaktadır. Böylece  $Q_{max}$  yükü seviyesindeki oturma da  $S_{max}$  olur ve nihai taşıma gücü  $Q_{max}$  bir güvenlik sayısına bölünerek “güvenli yük” veya “servis yükü” elde edilir.

Tablo 4.2. Yükleme Deneyi Kriterleri

| Kriterin Tanımı | Kriter/Kullanan |
|-----------------|-----------------|
|-----------------|-----------------|

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Toplam Oturma Sınırlaması                                    | En fazla 25 mm (Hollanda)         |
| Plastik Oturma Sınırlaması                                   | 6.30 mm (AASHO)                   |
| Plastik Oturma Sınırlaması                                   | 8.40 mm (Magnet)                  |
| Plastik Oturma Sınırlaması                                   | 12.70 mm (Boston)                 |
| Sınır<br>=(Plastik Oturma/Elastik Oturma)                    | Max. 1.50 (Christiani-Nielsen)    |
| Toplam Oturma/Yük Sınırlaması                                | 6.35 mm/ton (California, Chicago) |
| (Toplam Oturma/Yük) Sınırlaması                              | 0.76 mm/ton (Ohio)                |
| (Toplam Oturma/Yük) Sınırlaması                              | 1.27 mm/ton (Raymond)             |
| (Kademede Elastik Oturma /<br>Kademede Plastik Oturma) Oranı | Maksimum Değer (Szhecy)           |
| (Toplam Plastik Oturma/Yük) Oranı                            | 1.5 mm/ton (Raymond)              |
| Kademe:(Plastik Oturma/Yük) Oranı                            | 4.5 mm/ton (Raymond)              |

Pek çok araştırmacı göçme yükünün saptanması için uzun deneyimler sonucunda çeşitli "göçme yükü" tanımları ve/veya grafik yöntemleri önermişlerdir.  $Q_{max}$  yükünün saptanmasında bu önerilerden biri veya birkaçı kullanılmalıdır. Araştırmacılar, tanımladıkları göçme kriterlerinde kazanılabilir (elastik) veya kalıcı (plastik) oturmalar ile bunların toplamı olan toplam oturma miktarı, oturmanın yük ile artış hızı ve benzeri bulguları baz olarak alırlar.

Aşağıda taşıma gücünün saptanması için kimi araştırmacılar tarafından önerilmiş olan yöntemler ele alınacaktır. Bununla beraber dünyada kullanılmakta olan belli başlı bazı kriterlerin bilinmesi de mühendisin değişik yaklaşımlarla sonuca gitmesini sağlayacağından dolayı yararlı olacaktır. Bu nedenle önce bu “göçme yükü” kriterleri yukarıda Tablo 4.2 de sunulmuş bulunmaktadır. Belirgin yükleme deney yöntemleri aşağıda sunulmaktadır:

#### 4.3.1. Terzaghi Yöntemi

Bu yöntem; pek çok kuruluş tarafından benimsenmiştir ve geniş uygulama alanı vardır. Terzaghi güvenli yükün tanımını aşağıdaki şekilde yapmaktadır:

- a. Kazık güvenli yükün iki katı yükü göçme olmaksızın taşıyabilmelidir.
- b. Bu yükün %50 fazlası altındaki kalıcı oturma ton başına 0.25 mm. den büyük olmamalıdır.

Bu durumda servis yükünün bulunabilmesi için önce göçme yüküne en az 2.0 olan bir güvenlik sayısı uygulanır. Bunu takiben; ikinci şartın sağlanabilmesi için yükleme eğrisi üzerinde servis yükü x1.5 değerinden boşaltma eğrisine bir paralel çizilirse sıfır yük seviyesinde bulunacak olan kalıcı oturma görülerek seçilen servis yükünün yeterliliği irdelenebilir.

#### 4.3.2. Boston Şartnameleri

Bu şartname kademeli yükleme deneylerinin yapılmasını öngörür. Bu deney sonuçlarından 24 saatte 5 mm.’den küçük oturma yaptıran yük bulunur. Bu yükün yarısı kazığın servis yükü olarak kabul edilir.

Diğer bir Boston şartnamesine göre ise yük-oturma eğrisinin “kalıcı oturma” dışlanarak bulunan eğiminin 0.025 mm/kN olduğu noktanın

gösterdiği yük göçme yükü olarak kabul edilir. Bu ikinci şartname, Şekil 4.5.de gösterilen çizim kullanılarak uygulanabilir.

#### 4.3.3. Kazık Çapının Yüzde On'u Kuralı

İngiliz şartnamelerinde görülen bu uygulamada önce kazığın elastik oturması hesaplanır. Yük-Oturma eğrisi üzerinde; hesaplanan elastik oturma çıkarılmak kaydı ile kazık çapının %10'u kadar bir oturmaya rastlayan yük bulunur ve göçme yükü olarak alınır.

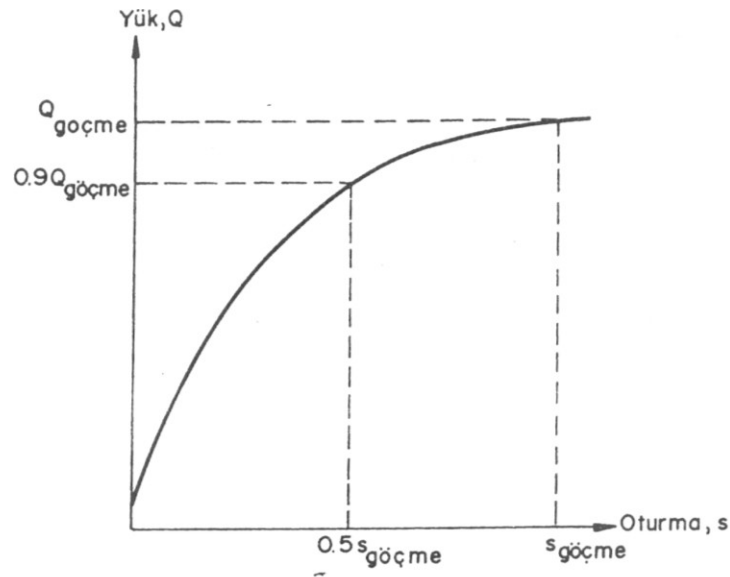
#### 4.3.4. Brinch Hansen Yöntemi

Sabit Hızda Delme yöntemi ile denenen kazıklar için kullanılan bu kriter ile göçme yükünün bulunması için;

a.Şekil 4.6. da gösterildiği gibi yük-oturma eğrisinin incelenmesi ile belirlenen göçme yükünün %90'ına karşılık gelen yük bulunur.

b.Bu yükte gerçekleşen oturma miktarı gözlenir ve bu oturma miktarı iki ile çarpılır.

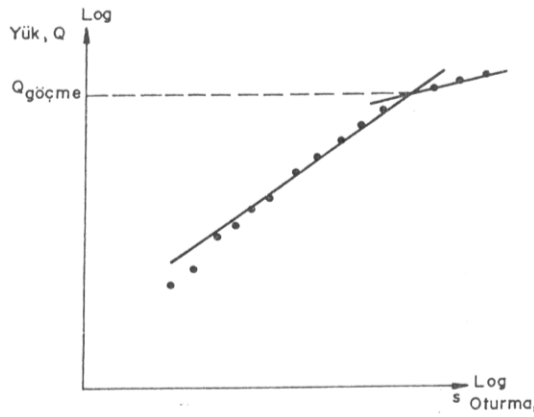
c.Yukarıda b. adımında bulunan oturmaya neden olan yük göçme yükü olarak kabul edilir.



#### Şekil 4.6. Brinch Hansen'in %90 Kriteri

##### 4.3.5. De Beer Yöntemi

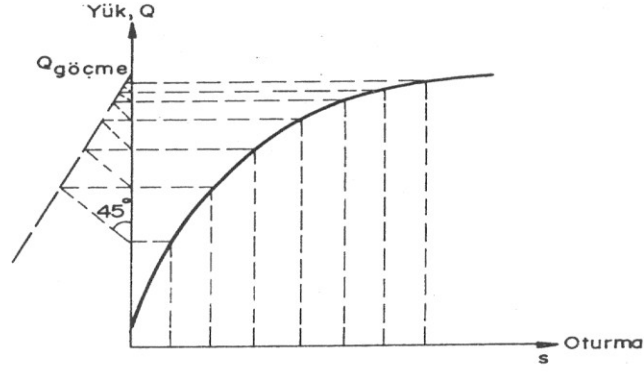
De Beer Yönteminde, kademeli yükleme deneyinden bulunan yük-oturma değerleri Şekil 4.7.de görüntülendiği gibi log-log ölçekte grafiklenir ve iki doğru elde edilir. Bu doğruların kesişme noktası, göçme yükünü verir.



Şekil 4.7. De-Beer Yöntemine Göre Göçme Yükünün Saptanması

##### 4.3.6. Mazurkiewicz Yöntemi

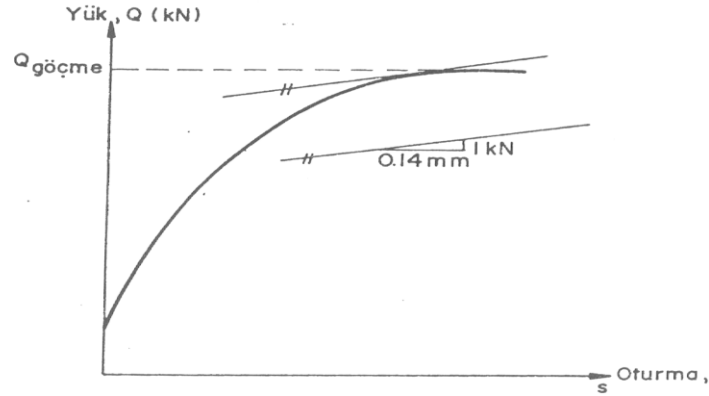
Mazurkiewicz Yönteminde, Yük-Oturma diyagramının oturma eksenini eşit aralıklarla noktalanır. Bu noktalardan yük eksenine paraleller çizilir. Bu paralel çizgilerin yük- oturma eğrisini kestiği yerlerden, oturma eğrisine paralel doğrular çizilir. Bu doğruların yük eksenini kestiği noktalardan, yük eksenini 45 derece açı yapan doğrular çizilir ve oturma eksenine paralel çizilmiş olan bir sonraki doğru ile kesiştirilir. Bu kesişme noktalarını birleştirerek elde edilen doğrunun yük eksenini kestiği yer "göçme yükü" olarak alınır. Bu yöntem Şekil 4.8. da sunulmaktadır.



Şekil 4.8. Mazurkiewicz Yöntemi'nin Uygulanması

#### 4.3.7. Fuller ve Hoy Yöntemi

Fuller ve Hoy Yöntemi, oturma miktarının yük miktarına karşı değişim oranı kavramını esas alan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde göçme yükü, yük-oturma eğrisinin eğiminin  $0.14 \text{ mm/kN}$  olduğu noktanın gösterdiği yük olarak alınır (Şekil 4.9). Bu yöntemde uzun kazıklarda büyük olan elastik boy kısalması nedeni ile  $0.14 \text{ mm/kN}$ 'luk eğim kısa kazıklara göre daha çabuk oluşabilmektedir.



Şekil 4.9. Fuller ve Hoy Yöntemi

#### 4.3.8. Davisson Yöntemi

Kademeli Çabuk Yükleme yöntemi ile denenen kazıkların deney sonuçlarının irdelenmesi için önerilen bu yöntem Şekil 4.10 yardımı ile açıklanmaktadır. Bu metot nihai kazık taşıma gücü olarak  $0.012B_r + 0.1B/B_r + PL/(AE)$  formülü ile hesaplanan oturmaya karşı gelen yükü kabul eder. Bu formüldeki son terim kazığın serbest boyunun elastik sıkışmasıdır. Grafik olarak Yük-Oturma grafiğinin başlangıcına çizilen bir teğete  $x=4+(D/120)$  (mm) ofset ile çizilen ve:

$$Q = \frac{AE}{L}(s - x) \quad (4.3)$$

denklemleri ile ifade edilen doğru ile bu grafiğin kesiştiği yere karşı gelen yük “göçme yükü” (ofset limit yük) olarak tanımlanmıştır. Burada:

B= Kazığın Çapı

$B_r$ = Referans Genişlik = 300 mm

P= Kazık Yüğü

A= Kazığın Kesit Alanı

E= kazık malzemesinin elastik modülü,

L=kazık boyu,

s=oturma miktarı,

D değeri kazığın uç çapıdır. Ucu genişletilmiş kazıklarda genişletilmiş çap olarak alınır. Bu yöntemde tanımlanan ofset yükünün göçme yükü olarak alınması halinde, güvenli tarafta kalan bir değerin kabul edileceği bilinmektedir. Diğer taraftan ofset yükü, çakma kazıklar için önerilmiş olup, delme kazıklarda pratik olmayacak yüksek ve güvenli değerler vermekte olduğu bilinmektedir.



E değeri çelik için 200,000 MPa

Ahşap malzemede çam veya köknar için 11,000 MPa

Betonda ise ASCE kuralları uyarınca  $15,200\sigma_r (f'_c/\sigma_r)^{0.5} f'_c =$  Betonun Silindir Serbest Basınç Direnci ve  $\sigma_r = 0.1$  Mpa olarak alınır.

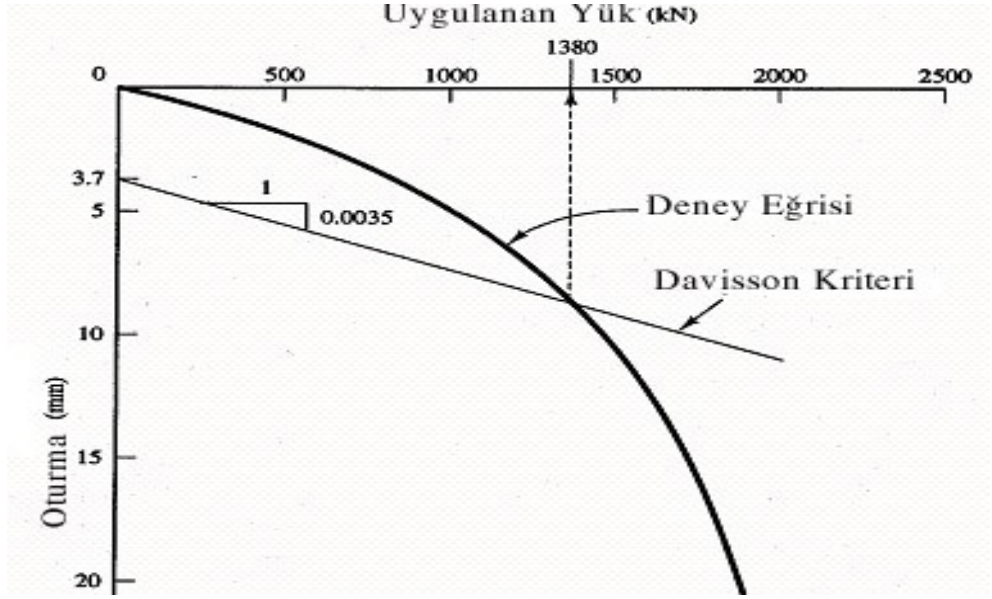
Yöntem, aşağıdaki örnek ile açıklanacaktır:

### **Örnek 4.1.**

Aşağıdaki şekilde gösterilen yük oturma eğrisi 400 mm kare kesitli, 17 m uzun bir beton kazık üzerinde yapılan yükleme deneyinden alınmıştır. (Beton dayanımı  $= f'_c = 40$  MPa). Davisson's metodunu kullanarak bu kazığın taşıma gücünü bulunuz.

$$E = 15,200\sigma_r (f'_c/\sigma_r)^{0.5} = (15,200)(100 \text{ kPa})(40 \text{ MPa} / 0.10 \text{ MPa})^{0.5}$$
$$= 30.4 * 10^6 \text{ kPa}$$

$$0.012B_r + \frac{0.10B}{B_r} + \frac{PL}{AE}$$
$$= 0.012 * 300 + \frac{0.10(400)}{300} + \frac{P(17,000)}{400^2 (30.4 * 10^6) (1 * 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{mm}^2)}$$
$$= 3.7 \text{ mm} + 0.0035P$$



Şekil 4.10. Davisson Yönteminin Uygulanması

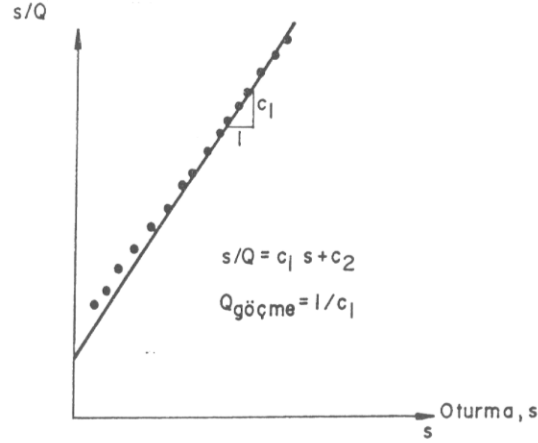
Bu doğruyu Yük-Oturma eğrisi üzerine çizildiğinde kesiştikleri noktadan hareketle  $P_{ult} = 1380$  kN olarak saptanır.

#### 4.3.9 Chin Yöntemi

Chin yönteminde, yük-oturma eğrisinin bir hiperbol ile temsil edildiği varsayımından yola çıkılmaktadır. Bu varsayım matematiksel olarak (oturma/yük) değerlerinin (oturma) değerlerine ilişkisinin bir doğru ile ifade edilmesi sonucunu doğurur. Bu doğrunun eğimi hesaplanarak tersi alınırsa göçme değeri bulunur. Doğrunun denklemi (4.4), göçme yükü ise (4.5) bağıntıları ile verilmektedir.

$$\frac{s}{Q} = c_1 s + c_2 \quad (4.4)$$

$$Q_{göçme} = \frac{1}{c_1} \quad (4.5)$$



Şekil 4.11. Chin Yönteminin Uygulanması

Bu yöntem; kademeli yükleme ve sabit hızla yükleme deneylerinde, oturma okumalarının eşit zaman aralıklarında alınması halinde kullanılabilmektedir. Bu nedenle standart yükleme planlarından elde edilen verilere genellikle uygulanmamaktadır.

#### 4.4. Yükleme Deneyinin Yorumu

Yeterli tecrübesi olan bir mühendisin, kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma eğrisinden kazığın göçme mekanizmasını tahmin edebilmesi ve eğer varsa çatlamış, kırılmış, özürlü yapılmış olan kazıkları ayırt etmesi olasıdır. Şekil 4.12. de Tomlinson (1977) tarafından gösterilen yük-oturma eğrileri ile bu eğrilerin yorumları verilmektedir. Bu yorumlar,

yükleme deney sonuçlarının değerlendirilmesinde olduğu kadar, kazıkların yapımlarında sonraki kabullerinde de mühendise yardımcı olurlar.

a. Şeklinde iyi yapılmış ve normal şartlar altında yüklenen bir sürtünme kazığından elde edilen bir eğri bulunmaktadır.

b. Şeklinde sert-fisürlü bir kil bünyesindeki bir gevrek kırılmadan sonraki ferahlama, toparlanma ve göçme durumu görülmektedir.

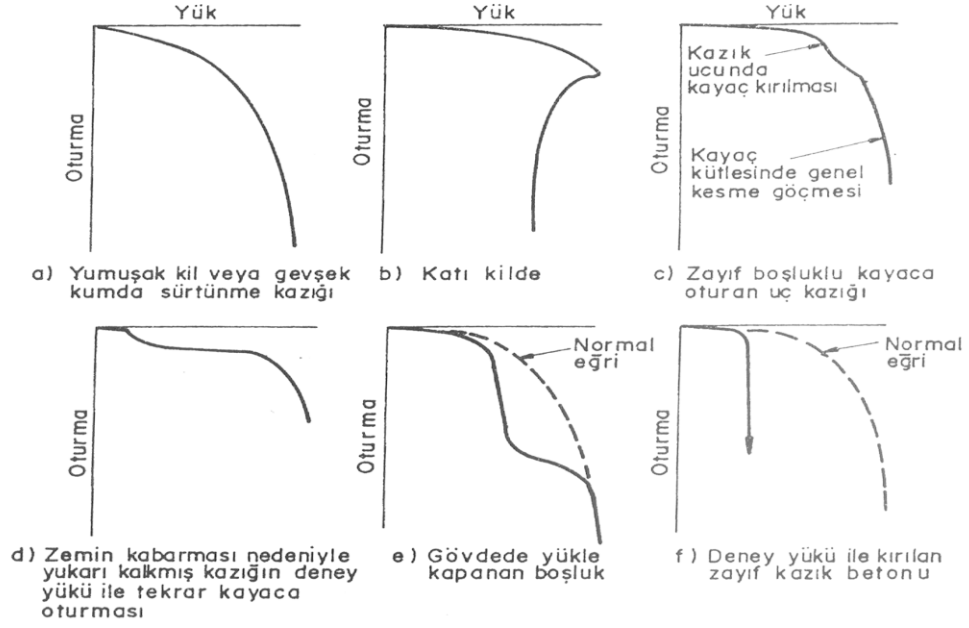
c. Şeklinde zayıf ve boşluklu kayaçlardaki uç kazıklarında karşılaşılabilecek iki hal beraberce gösterilmiştir. Birinci durumda kazık ucundaki gerilme yoğunluğu nedeniyle olabilecek bir kırılma sonucundaki ani oturma ve kazığın kırılmayan kayaca tekrar basması ile takibeden toparlanma sergilenmektedir. İkinci durumda ise aynen a şeklindekine benzer bir göçme söz konusudur.

d. Şeklinde kazı sırasında kabaran zemine yerleştirilen bir kazığın tekrar yerine oturması durumu gösterilmiştir.

e. Şeklinde ise özellikle fore kazıkların dökümü sırasında rastlanan bir yapım hatası nedeniyle kazık bünyesinde boşluk kalması halinde yükleme sırasında bu boşluğun kapanması ve normal yük-oturma davranışına dönülmesi söz konusudur.

f. Şeklinde ise kazık malzemesinin zayıflığı nedeni ile yük altında kazık kesidinde oluşan ani bir göçmeyi yansıtan bir eğri görülmektedir.

Bu durumda e. ve f. şekilleri, yapım hatalarına işaret etmektedirler.



Şekil 4.12. Yük-Oturma Eğrilerinin Yorumu

#### 4.5. Zeminin Elastik Modülünün Kazık Yükleme Deneyi ile Bulunması

Bu paragrafta iletilecek olan konunun teorik temeli bir sonraki kısımda verilmektedir. Ancak zeminin elastik modülünün bulunmasının kazık yükleme deneyleri ile beraber gerçekleştirildiği ve dolayısı ile konunun bu kısımda yer alması gerektiği düşüncesi ile bu kısma alınmıştır. Elastik modülün saptanması için, kazık yükleme deneyi sırasında elde edilen oturma verileri, Elastik Teori aracılığı ile elde edilen oturma denklemlerinde kullanılır. Bu işlem için  $E_s$  zeminin Elastik Modülü ve  $d$  Kazık Yarı Çapı olmak üzere kazığın elastik oturma denklemi yazılır:

$$\rho = \frac{QI}{E_s d} \quad (4.6)$$

Burada  $R_A$  kazığın kesit alanının kazık dış çevresi içinde kalan alana oranını gösterir. Kazık enkesidinin dolu olması halinde  $R_A = 1$  olur.  $Q$  kazık yükü,  $E_s$  zeminin elastik modülü,  $d$  kazık çapıdır.  $I$  ise hesap şekli Kısım 5 de anlatılan ve aşağıdaki ilişki ile tanımlanan “Oturma Etki Katsayı”sıdır.

$$I = I_0 R_k R_v R_b, \quad (5.7)$$

Bu denklemlerle beraber Kazık-Zemin göreceli esnekliğini tanımlayan :

$$K = \frac{E_p}{E_s} R_A \quad (4.7)$$

denklemleri kullanılır.

Bu hesap, bir örnek ile açıklanacaktır.

### **Örnek 4.2**

Çapı 1.2 m olan dolu-dairesel kesitli bir kazık için  $I_0=0.1$ ,  $R_v=0.93$ ,  $R_b=0.80$  olarak bulunmuştur. Kazığın Çevre Sürtünmesi Direnci = 4200 KN; bu yükte kazığın oturması ise 25 mm dir. Kazığın Elastik Modülü  $21 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup> dir.

Kısım 5 de anlatılan (5.8) ile:

$$\rho = 0.025 = 4200 \times 0.1 \times 0.93 \times 0.80 \times R_k / 1.2 E_s =$$

$$E_s = 10416 R_k$$

(4.7) ile:

$$K = 21 \times 10^6 / E_s$$

elde edilir.

A ve B denklemlerinin beraberce çözümü en kolay şekilde aşağıdaki Tablo 4.3 aracılığı ile yapılabilir. Burada K ile  $R_k$  nın arasındaki ilişki, Kısım 5 de verilen abaklar yardımı ile bulunabilir. Aşağıda gösterilen Tabloda A ve B denklemleri ile hesaplanmış olan  $E_s$  değerleri düşey ve K değerleri yatay eksen olarak alınan bir grafikte gösterilirse, kesişme noktası ortak çözümü, diğer bir deyişle  $E_s$  değerini verecektir. Değer, bu suretle  $10700 \text{ KN/m}^2$  olarak saptanabilir.

Tablo 4.3. Elastik Modül Bulunması

| <b>K</b> | $R_k$ | $E_s$ (A Denklemi ile) | $E_s$ (B Denklemi ile) |
|----------|-------|------------------------|------------------------|
| 10000    | 1.0   | 10416                  | 2100                   |
| 5000     | 1.03  | 10728                  | 4200                   |
| 2000     | 1.05  | 10937                  | 10500                  |
| 1000     | 1.10  | 11458                  | 21000                  |
| 500      | 1.30  | 13541                  | 42000                  |

|     |      |       |        |
|-----|------|-------|--------|
| 100 | 1.64 | 17082 | 210000 |
|-----|------|-------|--------|

#### **4.6. Kazıkların Bütünlük (Integrity) Deneyleri**

Bu paragrafın konusu kazıkların bütünlük deneyleridir. Kazıkların yapımları, yerinde dökümleri ve/veya çakımları sırasında standartlara uygun imal edilmemiş veya hasara uğramış olmaları her zaman bir olasılıktır. Bütünlük deneyleri kazıkların hangi yöntemle olursa olsun, imalatları sırasında hasar görüp görmediklerinin anlaşılması için yapılır. Birçok şartname bu tür deneyi kabul koşulu olarak görmektedir. Bu durumda deney, grup kazıkları içinden şartnamede belirtilen sayıdaki ve yerdeki kazık üzerinde yapılır. Aşağıda, bu tür deneyler kısaca sunulmaktadır.

##### **4.6.1.Karot Alma**



Kazıkların hasarlı olup olmadığını anlamının bir yolu kazıktan elmas uçlu karotiyerle karot almaktır. Karotlar kazık eksenini boyunca alınır ve bu şekilde kazık boyunca yapısal homojenlik incelenir. Bu karotlar, şartnamelerde uygun görülen kimyasal veya fiziksel deneylerle değerlendirilirler.

Diğer bir yöntem ise kazık içine darbeli bir sistemle delik açıp (percussion drilling) buradan gözlem yapabilecek bir araç (örneğin TV kamerası veya video) yardımı ile kazık iç yapısının incelenmesidir. Bunun için 100 mm çaplı bir deliğe ihtiyaç vardır.

#### 4.6.2.Kazı Yaparak Kontrol

Temel altına açılan küçük çaplı tünellerden yararlanarak kazıkların durumunu gözlemek mümkündür. Bu işlem sırasında kazığın hasar görmemesine dikkat edilmelidir. Burada önemli bir kısıtlama yeraltı su seviyesi altında yöntemin uygulama olanağı bulunmamasından doğacaktır. Yeraltı suyunun indirilmesi düşünülürse bunun kazıkta yaratacağı negatif sürtünme gözönüne alınmalıdır.

#### 4.6.3.Dinamik Yöntemler

Dinamik yöntemler, kazıktaki dalga hızı ölçümüne dayanır.

##### 4.6.3.1. Kazıklarda Darbe Etkisi ve Darbeleme Deneyi

Çakma kazıkların mekaniği için de geçerli olan ve teorik temeli Paragraf 3.3.1.2. de anlatılan bu yöntemde kazığın başı bir çekiçle darbelenir. Darbeden dolayı meydana gelen basınç dalgası, kazık boyunca aşağıya doğru hareket eder. Dalga hareketi kazık başına yerleştirilmiş olan bir akselerometre aracılığı ile izlenir. Ölçüm aracına önce yüzey dalgaları

(Rayleigh dalgaları) daha sonra da kazık alt ucuna ulaşarak oradan yansıyan, veya kazıkta çatlak gibi bir süreksizlik varsa buradan yansıyan dalga varır, bu dalgalar kaydedilir. Bu kayıttan, kazıkta bir süreksizlik (çatlak) olup olmadığı, kazık kesidinde bir genişleme veya daralma olup olmadığı anlaşılabilir. Ayrıca yaklaşık kazık boyu da hesaplanabilir. Ölçümler ile saptanan dalga kayıtlarının yorumu uzmanlık gerektirir. Bu yöntemi özellikle fore kazıklarda kesin sonuçlar veren bir yaklaşım olarak algılamamak gerekir.

#### 4.6.3.2. Titreşimli Deneyler

Kazıklar üzerinde titreşimli veya darbeli deneyler yapılarak çeşitli sonuçlar elde edilebilir. Bu paragrafta, bazı yöntemlere kısaca değinilecektir.

##### 4.6.3.2.a. Düşey Titreşimli Deneyler:

Bu deneyde kazık başına yerleştirilen m kütleli bir motor düşey harmonik titreşim yaratır ve kazığa eksen doğrultusunda bir F kuvveti uygulanır:

$$F = F_0 \sin \omega t = m \alpha \quad (4.8)$$

Burada:

$\alpha = \alpha_0 \sin \omega t$  = Kitlenin İvmesi,

$\omega$  = Açısal Hız,

$F_0$  = Kuvvet Genliği,

$\alpha_0$  = Kontrol Edilen İvme Genliğidir.

Motordan verilen bir sinyalin beslediği regülatör ile  $\alpha_0$  sabit tutulur. Kazık başı motor ile aynı frekansta titreşir.  $F_0$  değeri ise  $F$  kuvveti belli bir "f" frekansında ölçülerek saptanır. Kazık başının ani hızı  $V$  de sürekli ölçülerek,  $V_0$  hız sabiti bulunur:

$$V=V_0 \sin \omega t +K \quad (4.9)$$

$V_0/F_0$  oranı “mekanik giriş modülü” olarak bilinir. Deneylerde titreşim frekansı 20-1000 Hz arasında değiştirilir ve  $V_0/F_0$  değeri frekansa karşı çizilir. Bu grafiğin şeklinden kazığın sağlamlığı, kazık boyu, eğrinin başlangıç eğiminden kazık/zemin rijitliği hakkında bilgi edinilebilmektedir.

#### 4.6.3.2.b. Yatay Titreşimli Deneyler:

Kazığın yatay yüklenmesi söz konusu olduğundan bu kısımdaki ifadelerin temelleri ileride Kısım 6 da ele alınan konular içinde mevcuttur. Bu deneylerde amaç, kazığın yatay yük altındaki davranışını saptamak amacıyla yönelik olarak kullanılan bazı kazık-zemin etkileşim özelliklerini bulmaktır. Bu deneylerde genellikle kazık başına sıkıca bağlanarak yerleştirilen ve harmonik titreşim yaratan iki bloktan oluşan bir aygıt kullanılır. Bloklar bir elektrik motorundan aldıkları güç ile kazığın düşey eksenini etrafında birbirlerine aksi yönlerde aynı açısal hızla dönerler. Bu sırada karakteri bir sinüs eğrisi ile tanımlanabilecek şekilde ve arzu edilen frekansta yaratılan merkezkaç kuvveti kazığı, zemine doğru bastırır. Kuvvet genliği, frekansın karesi ile orantılıdır. Kazık başına bir hız detektörü monte edilir ve hız ( $V$ ) ölçülür. Tipik bir aygıtın kütlesi 50 kg, Çapı 50 cm, yüksekliği 20 cm dir. Deneyde kullanılan frekans aralığı ise 1

ila 14 Hertz'dir. Aşağıdaki ifadelerde E; Kazığın Elastik Modülünü, I; Eylemsizlik Momentini, d; çapını gösterir.

Merkezkaç kuvvet aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F_{ef}=(1/\sqrt{2})\times 10000\times (f/10)^2 \quad (\text{Newton}) \quad (4.10)$$

Burada f = Hertz olarak frekans'dır. Kazık başının ötelenmesi sonucu olarak (2.23) denkleminde gösterilen yatak katsayısı (k), ölçülen kazık başı hızı, merkezkaç kuvvet ve devir hızı (w) kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunur:

$$k= V/(F_{ef}\cdot w) \quad (\text{m/newton}) \quad (4.11)$$

Deney sırasında devir hızı değiştirilir ve yatak katsayısının değişimi gözlenir. Deneysel olarak bulunan bu yatak katsayısı değeri aşağıdaki denklemlerden durumu uygun olana yerleştirilerek kazığın 6. Kısımında (6.34) bağıntısı ile gösterilen ve "Elastik Uzunluğunun (R) tersi olan  $\square$  değeri" hesaplanabilir.

Tamamı zeminin içinde olan kazıklar için:

$$k= \quad \quad \quad 0.5 \quad \quad \quad EI\square^3 \quad (4.10)$$

bir kısmı zemin yüzeyi üstünde kalan kazıklar için ise:

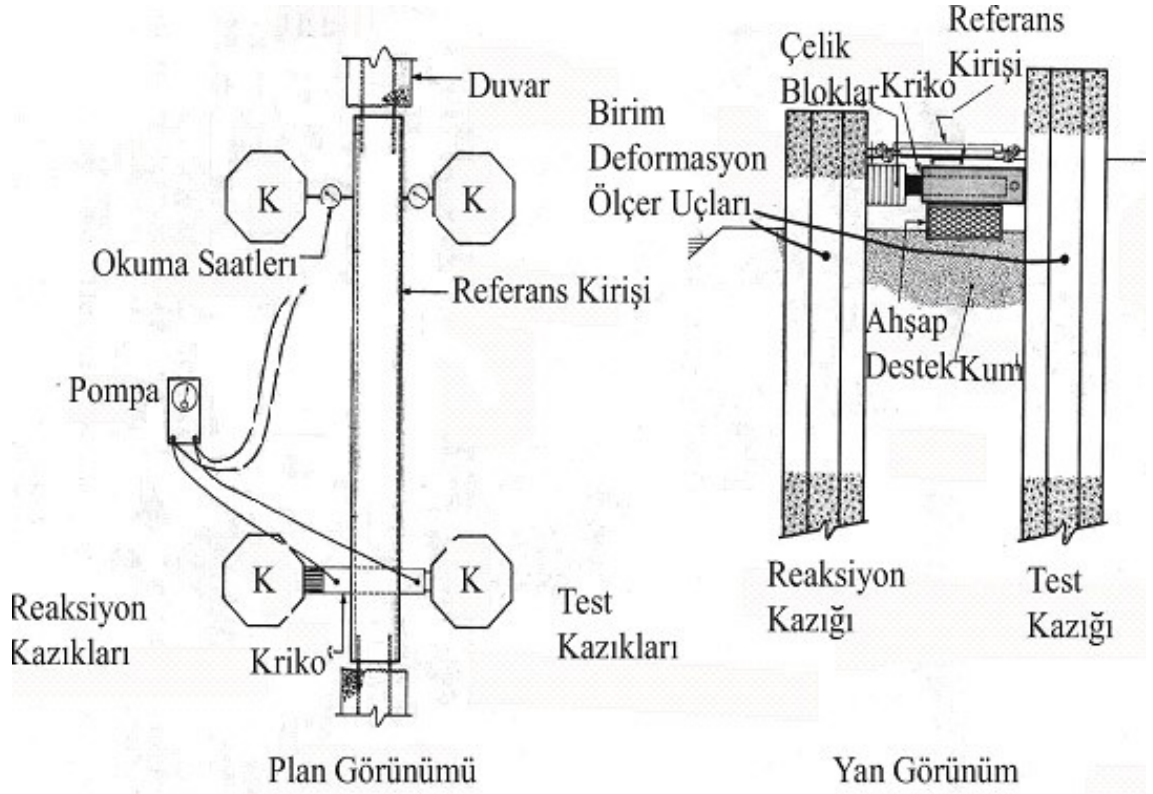
$$k=(1+2a\beta)/(2EI\beta^3)$$

(4.12)

ifadeleri kullanılır. Deney verileri kullanılarak “yatay katsayısı,  $k_0$ ”;  $\beta = \sqrt{\frac{EI}{k_0 d}}$  denklemi yardımı ile hesaplanabilir. Deney düzeneği ile yatay ötelenme ölçülür ise yatak modülü  $\beta^3$  bağıntısı kullanılarak doğrudan bulunur.

#### 4.7. Yanal Yükleme Deneyleri

Yanal yük taşıyacağı bilinen kazıklarda, yanal yükleme deneyleri de yapılır. Bu deneylerde kullanılan en elverişli düzenek, iki kazığı yan yana çakıp aralarına konulacak bir kriko ile yük uygulamak ve referans kirişi ve okuma saatleri aracılığı ile ötelenme miktarlarını saptamaktır. Gerektiğinde kazıkların yapısal davranışı hakkında bilgi alabilmek amacı ile daha başka ölçüm gereçleri kullanılabilir. Bu türlü yükleme düzenekleri ve kullanılan yük aralıkları ile diğer bilgiler literatürde mevcuttur. (Wasti ve Arkadaşları, 2000). Kapsamlı bir deney düzeneği ve uygulanma şekli hakkında kısa bir bilgi verilebilmesi amacı ile bir uygulamadan alınan ve aşağıda Şekil 4.13 de gösterilen bir deney örneği sunulmaktadır (Diaz ve arkadaşları, 1984): Deney, özel bir kazık düzeni ile yapılmıştır. Örnekte uygulayıcı; detaylı bilgi alabilmek amacı ile değişik tür gereçler aynı zamanda kullanmıştır. Örnek bu bakımdan ilginçtir.



Şekil 4.13. Yanal Yük Düzeneği

(Diaz ve arkadaşları, 1984)

Deney Los Angeles limanındaki bir şevli dolgu üzerine yapılacak olan rıhtımın kazıklarının şevli dolguda ne şekilde davranacaklarını tesbit etmek amacı ile yapılmıştır.

Bu deneyde iki adet test kazığı bir sıraya çakılmışlardır. Her deney kazığınının 1.8 metre arkasına ölçüm gereçleri ile donatılmış bir reaksiyon kazığı çakılmıştır. Bütün kazıklar 24.4 m uzunlukta olup aynı yapım yöntemleri ile yapılmışlardır. Kazıklar arasında doğal kum zemin vardır. Kazık ızgarası şekilde görülmektedir.

Her test ve reaksiyon kazığı için kullanılmış olan gereçler şunlardır:

1. Çubukları 25 ve 50 mm hareket edebilen iki adet 0.025 mm duyarlılıklı ölçüm saati.

2. Her kazığın eksenine boyunca yerleştirilmiş olan 69.9 mm çaplı inklinometre.

Bu inklinometre yükleme eksenine paralel ve dik yönde okuma alınmasına uygun olarak konulmuştur.

3. 10 adedi donatı demirlerine 10 adedi kazık yüzüne yapıştırılmış olan birim deformasyon ölçerler. (streyn gage)

4. Kazıklar 508 mm yürüyebilen bir hidrolik kriko ile yüklenmişlerdir. Yük elle kontrol edilebilir bir elektrik pompası ile uygulanmıştır.

5. Basınç, deneyden hemen önce kalibre edilmiş ve pompaya seri bağlanmış bir manometre ile gözlenmiştir.

Kazık başı ötelenme miktarları, bir referans kirişine göre saptanmışlardır. Şekilden görüleceği gibi reaksiyon kazığına yükün düzenli iletilebilmesi için çelik levhalarla dayanak sağlanmıştır. Kriko, yumuşak bir ahşap destek üzerine oturtulmuştur.

Deney sırasında dakikada yaklaşık 18 KN yük uygulanmıştır. Kazık başlarındaki ötelenme yüklenme sırasında bir dakika aralıklarla okunmuştur. Her yük kademesinde birim deformasyon ölçer okumaları dijital olarak kayıt edilmiştir. Her kademedeki okuma kazık başı hareketi duruncaya kadar sürdürülmüştür. Bu aşamada, bütün gereçlerdeki okumalar alınarak kaydedilmiştir. Bu noktada yük dakikada 18 KN boşaltılmış, kazık başı hareketinin dengeye gelmesi gözlenmiş ve yük istenilen kademelerde tekrar arttırılmıştır. İnklinometre kullanılarak kazığın değişik noktalardaki eğimi saptanmış ve bu bulgular kullanılarak ankastrelik noktası ötelenmeleri bulunmuştur. Ayrıca elde edilen veriler kullanılarak kazığın bünyesinde oluşan gerilmeler gerekli

mekanik denklemleri yardımı ile bulunmuştur. Yük-Ötelenme gözlemlerinden elde edilen bulgular, teorik verilerle karşılaştırılmıştır.

## **KISIM 5. EKSENEL YÜK ALTINDA OTURMA**

### **5.1. Genel**

Kazıklı bir temelin oturması, taşıma gücü kadar önemlidir. Zira bir temelin güvenliği; göçme güvenliğinin sağlanması yanında, izin verilebilir miktarların ötesinde oturmamasını gerektirir. Kazıkların oturma teorileri; kazık-zemin ortamının matematiksel olarak modellenmesine dayanırlar. Bu modellerde kazığı çevreleyen zeminin davranışı için aşağıdaki kabullerden biri geçerli olmuştur:

- a. “Doğrusal Elastik Davranış Gösteren Ortam”,
- b. Zemini temsil eden bir “Yaylar Sistemi”,
- c. Ortamın Birim Deformasyon Enerjisi.

Üçüncü gruptaki varsayımlara dayanan yöntemler son yıllarda gelişme göstermektedirler. Ayrıca, oturma hesapları için geçmiş gözlemlere dayanarak geliştirilmiş ampirik hesap yöntemleri de vardır. Ancak günümüzde mühendislik uygulamaları ilk iki grupta tanımlanan bulunan çözümleri kullanmaktadır. Bu kısımda tek ve grup halindeki kazıkların oturmalarının hesap yöntemleri yukarıdaki sıra ile ele alınmıştır. Bu aşamada şu hususa dikkat çekilmesi gerekli görülmektedir:

Belli bir grup yükü altında grup içindeki kazıkların hepsinin yükü eşit paylaştıkları veya hepsinin aynı miktarda oturdukları gibi peşin hükümler



geçerli değildir: İlerideki paragraflarda görüleceği gibi bu davranış kazık başlığının rijitliğine bağlıdır.

## **5.2. Doğrusal Elastik Ortam Yaklaşımı**

Yukarıda, bir kazığın güvenliğinin sağlanabilmesi için göçme ve oturma sorunlarının beraberce ele alınması konusuna dikkat çekilmiş idi.

Zeminin içinde bulunan bir cisme kuvvet uygulandığında bu kuvvete karşı bir reaksiyonun doğması, cisim ile zemin arasında rölatif bir hareketin meydana gelmesine bağlı bulunmaktadır. “Doğrusal Elastik-Plastik Sürekli Ortam” teorisinin kullanılması halinde; kazıkların uç ve çevre dirençlerinin yukarıdaki ilke doğrultusunda doğması ve gelişmesi ile oturma miktarları arasındaki ilişkiyi yansıtan yük-oturma eğrileri bulunur ve bu eğrilerin süperpozisyonu ile toplam yük-oturma eğrisi elde edilerek kullanılır. Bu ilişkiler Kısım 2 de tartışılmış ve Şekil 2.1 de gösterilmiş idi. Esasen Şekil 2.1; aşağıda bu yöntemle çözülecek olan bir örneğin sonuçlarını yansıtmaktadır. Göçme ve oturma davranışının beraberce ele alınması için güvenlik sayılarının seçiminde bu tür eğrilerin kullanımı ön planda yer almaktadır.

### **5.2.1. Tek Kazığın Davranışı**

Kazıkların yük altındaki oturma davranışı, göçme yükü sınırına kadar doğrusal elastik davranış ve takiben plastik davranış varsayımı ile oldukça sağlıklı bir şekilde yansıtılabilmektedir. Bu yaklaşım; konuya eğilen pek çok ilim adamı arasında özellikle araştırmacılar Poulos, Davis ve Mattes tarafından sonlu elemanlar metodu kullanılarak, pek çok değişkenin incelemeye alındığı çok sayıdaki sistematik çalışmalar sonucunda elde

edilen sonuçlara dayanmaktadır. Bu çalışmaların temelleri 2.1.2 kısmında verilmiş ve yapılan belli başlı çalışmalar Tablo 2.2. de listelenmiş idi. Bu çözümler önce yarı sonsuz, hacimsel değişikliğe uğramaksızın doğrusal elastik davranış gösteren bir zemin ortamı düşünülerek (Poisson Oranı =  $v_s = 0.5$ ) elde edilmişlerdir. Sonradan bu çözüm, kazığın sıkışabilirliği, kazık ucu zemininin rijitliği gibi nitelikleri gözönüne alan “Düzeltilme Faktörleri” yardımı ile genelleştirilmiştir. Bu düzeltme faktörleri, kazığın Geometrisi ile Mekanik özelliklerini yansıtan “Boyutsuz Değişkenler” e bağlanarak pratikte kullanışı kolay olan abaklar şeklinde sunulmuşlardır. Bu kısımda teorik esasları 2.1.2. paragrafında sunulmuş bulunan çözüm sonuçlarının pratikte kullanımına değinilecektir. Aşağıda öncelikle, “boyutsuz değişkenler”in ve “düzeltilme faktörleri”nin tanımı yapılmaktadır. Bu tanım içinde “düzeltilme faktörleri” arasında alt indeksi ne olursa olsun C harfi ile gösterilenlerin; toplam kazık yükünün çevre sürtünmesi ile uç direnci arasındaki dağılımını etkileyen faktörler, R ile başlayanların ise Kazığın oturmasına etki eden faktörler olduğunun bilinmesi konunun anlaşılması açısından yararlı olacaktır.

Kazığın oturmasını etkileyen kazık ve zemin özellikleri şunlardır:

Kazık Çapı,  $d$ ,

Kazık Boyu,  $L$ ,

Kazığın Elastik Modülü,  $E_p$ ,

Zeminin Elastik Modülü,  $E_s$ ,

Zeminin Poisson Oranı,  $v_s$ .

Boyutsuz değişkenler aşağıda gösterilmektedirler:

$$\frac{L}{d} = \text{Kazık Uzunluğu/Kazık Çapı,}$$

$\frac{d_b}{d} =$  Soğanlı Kazıklarda Kazık Uç Çapı/Kazık Çapı oranı (Soğansız kazık için = 1),

$K = \frac{E_p}{E_s} =$  Kazık Elastik Modülü/Zemin Elastik Modülü;

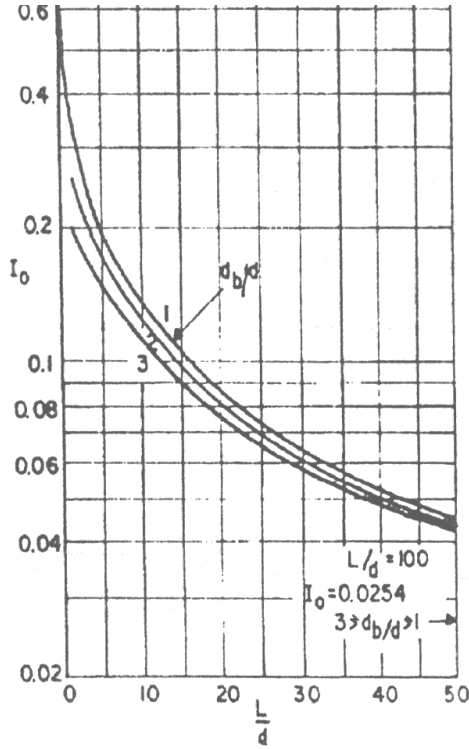
$R_A =$  Kazığın Kesit alanının kazık dış çevresi içinde kalan alana oranı =  $A_p / (\pi d^2/4)$ ; dolu kazık kesidi halinde  $R_A = 1$

Düzeltilme faktörleri Tablo 5.1. de listelenerek açıklanmakta ve değerleri boyutsuz değişkenlere bağlı olarak Şekil 5.1 ile Şekil 5.8 de sunulmaktadır.

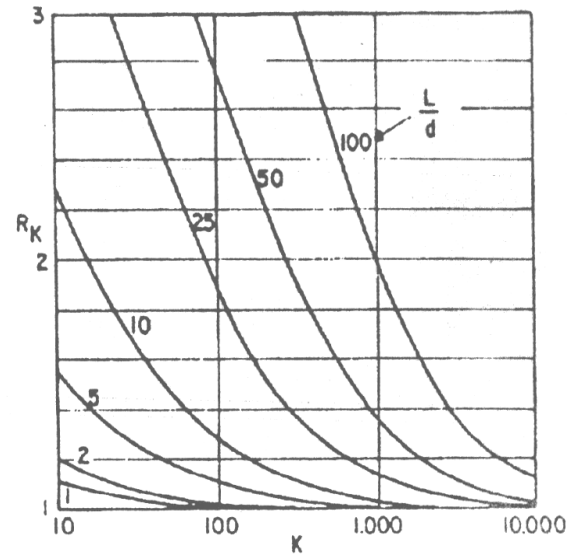
Tablo 5.1. Düzeltme Faktörleri ve Açıklamalar

| Faktör    | Açıklama ve Kullanıldığı Bağntı No.   |
|-----------|---|
| $\beta_0$ | (Uç yükü /Toplam yük) Oranı : Elastik çözümden elde edilen orandır. (5.3)                             |
| $C_k$     | Uç basıncının kazık sıkışabilirliği gözönüne alınarak düzeltilmesi için. (5.3)                        |
| $C_b$     | Kazığın ucunun çevre zemininden farklı bir zemine basması halinde uç basıncı düzeltilmesi için. (5.3) |
| $C_v$     | Zeminin Poisson Oranının 0.5 dışındaki değerlerinde uç basıncı düzeltilmesi için. (5.3)               |

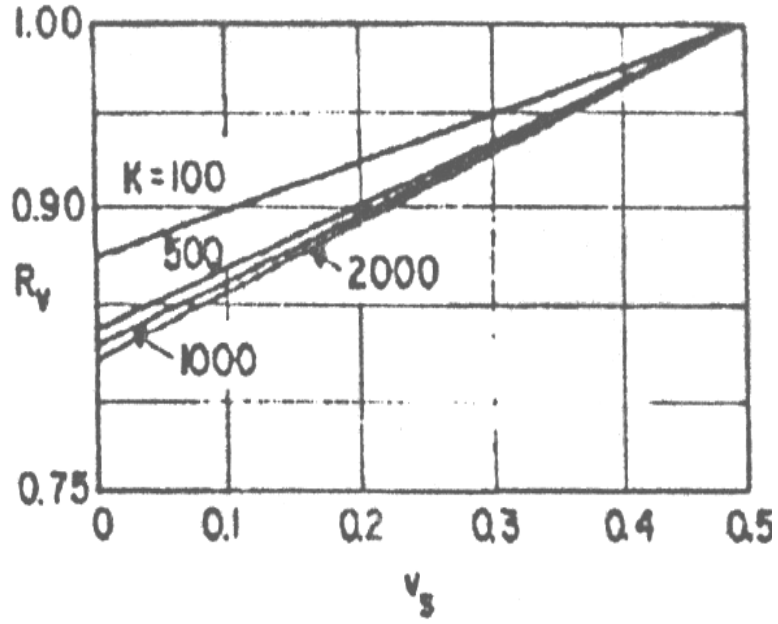
|       |   |
|-------|---|
| $I_0$ | Oturma Etki Katsayısı. (5.8)  |
| $R_K$ | Kazığın Sıkışabilirliğinin gözönüne alınması için yapılan düzeltme (5.8)                              |
| $R_v$ | Oturmada Zeminin Poisson Oranı Düzeltmesi: (0.5 dışındaki değerler için). (5.8)                       |
| $R_b$ | Oturmada taşıyıcı zemin için düzeltme: Kazığın tabanda farklı bir zemine basma düzeltmesi için. (5.8) |



Şekil 5.1.  $I_0$  Katsayısı



Şekil 5.2.  $R_K$  Katsayısı

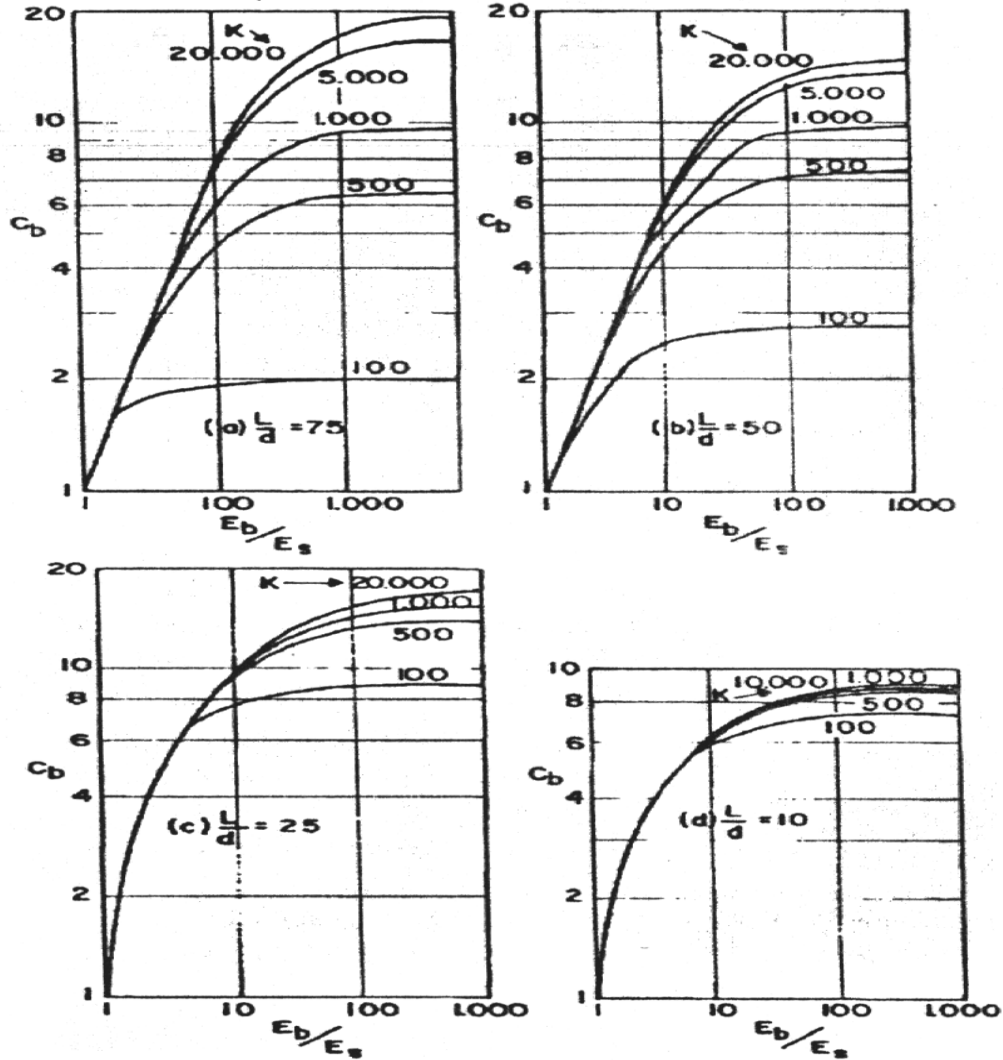
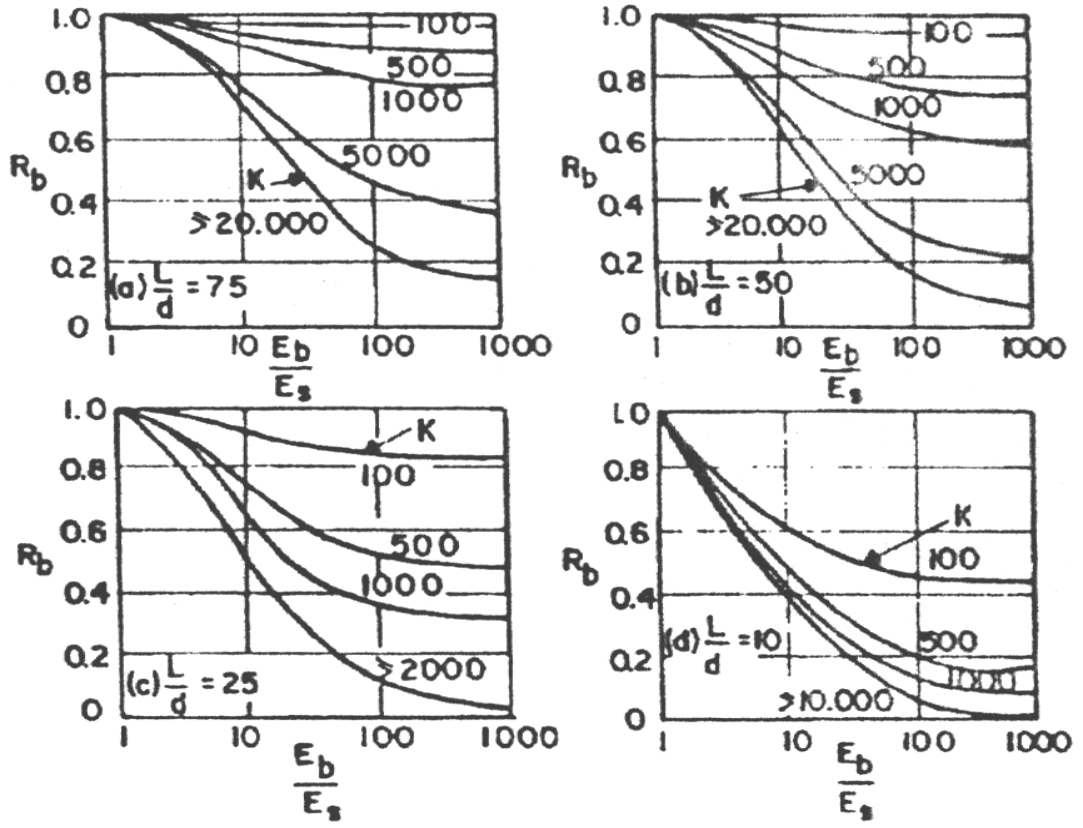


Şekil 5.3. Poisson Oranı Düzeltmesi

Bir kazığa uygulanan toplam yükün bir kısmının çevre sürtünmesi, bir kısmının uç direnci ile karşılandığı bilinmektedir. Teori, bu bileşenlerinin her birinin kendi akma sınırına kadar doğrusal-elastik biçimde davrandıklarını varsaymaktadır. Bu nedenle gerek dirençlerin miktarları, gerekse kazığın oturması, yukarıdaki faktörlere bağlı olmaktadır.

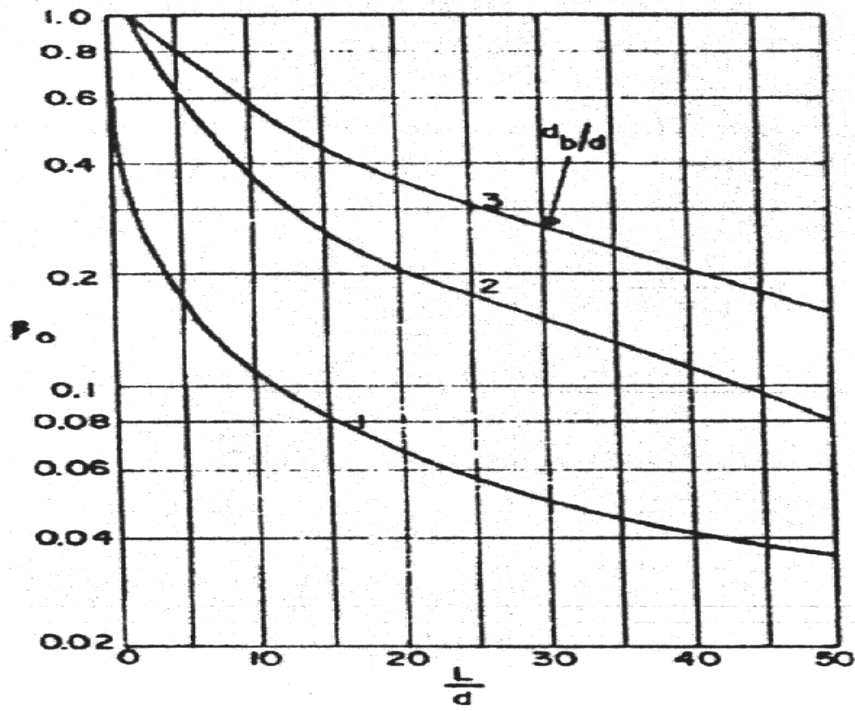
Bir kazığın yük altında oturmasının mekaniği incelenirken aşağıdaki elemanların ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir:

- a. Kazığın Uç direnci nedeni ile oturması.
- b. Kazığın Çevre Sürtünmesi Nedeni ile Oturması
- c. Çevre sürtünmesinin akma sınırının aşılmasından itibaren tam olarak etkiyen uç basıncı nedeni ile kazığın boyunda oluşan elastik boy kısalması.



Şekil 5.4. Değişiklik Kazık Narınlıkları İçin  $R_b$  Oranı

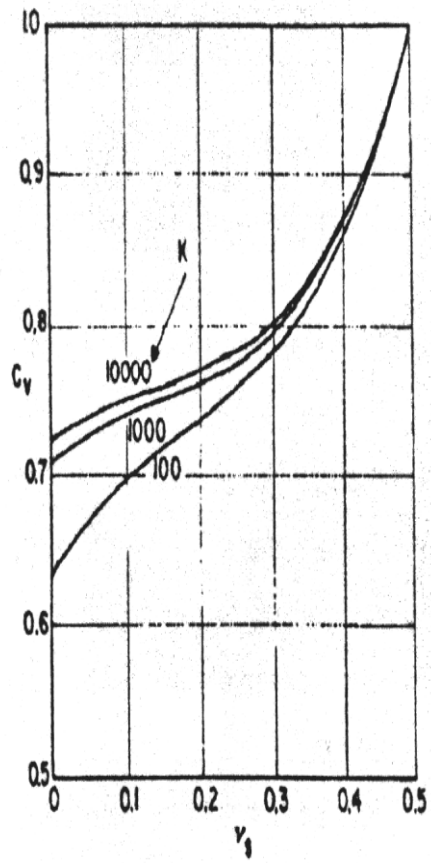
Şekil 5.5. Uç Yüğü İçin Taban Modülü Düzeltme Katsayısı

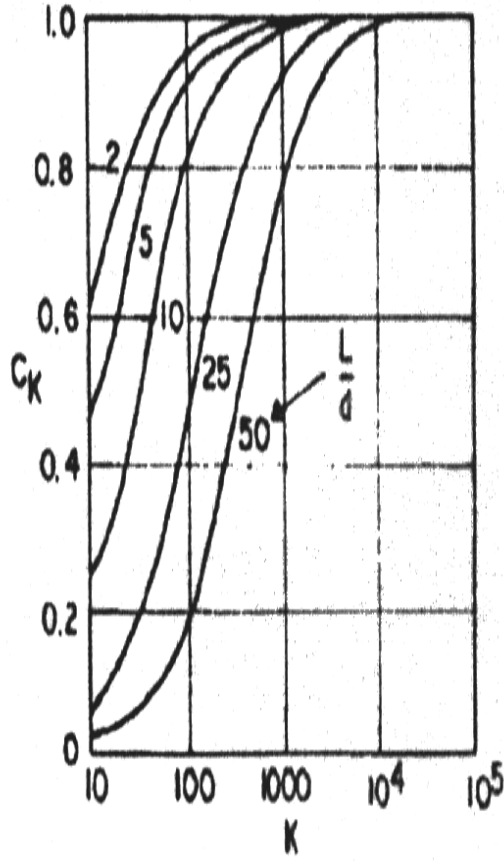


Şekil 5.6. Uç Yüğü İçin  $\beta_0$  Oranı









Şekil 5.7. Uç Yüğü için Sıkışabilirlik Poisson Oranı Düzeltme Katsayısı

Şekil 5.8. Uç Yüğü için Düzeltme Katsayısı

(Not: Yukarıdaki Abaklar Poulos ve Davies (1980) den alınmışlardır.)

Çevre sürtünmesi yükü ( $Q_c$ ) - Uygulanan Yük ( $Q$ ) ilişkisi şöyle verilmektedir:

$$Q_c = (1-\beta) Q \quad (5.1)$$

Uç direnci yükü  $Q_u$  -Uygulanan Yük  $Q$  ilişkisi ise aşağıdaki gibidir:

$$Q_u = \beta Q \quad (5.2)$$

Diğer yandan  $\beta$  parametresi uç yükünün toplam yüğe oranıdır ve:

$$\beta = \beta_o \times C_k \times C_v \times C_b \quad (5.3)$$

ilişkisi ile ve bu ilişkideki  $C_b$ ,  $\beta_o$ ,  $C_k$ ,  $C_v$  parametreleri sırasıyla Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8 kullanılarak bulunur.

Toplam yük:

$$Q = Q_\varphi + Q_u \quad (5.4)$$

olur. Kazığın nihai taşıma gücü  $Q_n$  de aynı şekilde

$$Q_n = Q_{\varphi n} + Q_{un} \quad (5.5)$$

$Q_{\varphi n}$  ve  $Q_{un}$  nihai çevre direnci ve nihai uç direncidir. Toplam kazık direncinin bu her iki bileşenin de kendilerinin bu akma sınırlarına kadar doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilir. Bu anlayışla kazığın çevre sürtünmesi-oturma ilişkisi, çevre sürtünmesi direncinin akma nedeni ile tükenmesine kadar şöyle ifade edilir:

$$\rho_\varphi = \frac{I}{E_s d} \cdot \frac{Q_\varphi}{1-\beta} \quad (5.6)$$

Aynı şekilde kazığın uç yükü-oturma ilişkisi, uç direncinin akma nedeni ile tükenmesine kadar şöyle ifade edilir:

$$\rho_u = \frac{I}{E_s d} \cdot \frac{Q_u}{\beta} \quad (5.7)$$

Toplam Oturma Etki Katsayısı  $I$  aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$I = I_0 R_k R_v R_b, \quad (5.8)$$

Bu formüldeki  $I_0$ ,  $R_k$ ,  $R_v$ ,  $R_b$ , Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 kullanılarak elde edilir.

Burada dikkat edilecek husus kazık ucunun oturma hesabında da (uç zemininin kazık yanđ zemininden daha sıkı olması halinde dahi) kazık çevresi zeminin Elastik Modülünün kullanılması hususudur. Bu; ana çözümün isotrop, homojen bir yanđ ortam kabulü ile yapılmasının doğal sonucudur. Taban zemininin değişik olması halindeki düzeltmeler  $R_k$  katsayısı ile ayrıca yapılmaktadır.

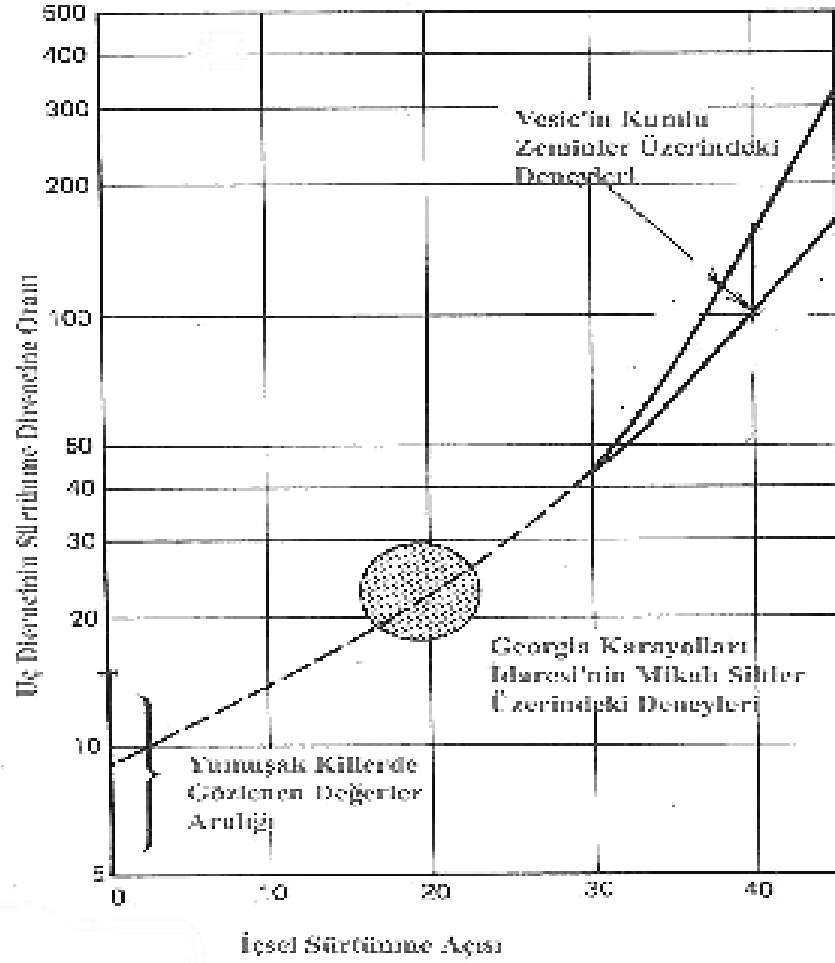
Bir grafikte nihai uç direnci ve evre direnci ( $Q_{un}$  ve  $Q_{n}$ ) kullanılarak hesaplanan kazık oturmaları bu yüklere karşı noktalanarak başlangıç noktasına birleştirilirse “Kazık Yükleme Eğrileri” elde edilir. (Bkz. Şekil 2.1.) Servis yükünün hesabında bu eğriler yardımı ile evre sürtünmesi ve uç direnci bileşenlerine ayrı ayrı güvenlik katsayıları uygulanabilir. Bu husus Avrupa Şartnamelerinde (Eurocode) üzerinde durulan hususlardan biridir.

Uç yükü nedeni ile oluşan oturma miktarına, kazığın yükleme sırasında ve evre direnci aşıldıktan sonra nihai uç direncine kadar doğrusal

elastik davrandığı varsayımı ile ( $\Delta\rho$ ) boy kısalması da aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır ve eklenir:

$$\Delta\rho = \left[ Q_{un} - \frac{Q_{\phi n} \beta}{1 - \beta} \right] \frac{1}{A_p E_p} \quad (5.9)$$

Burada  $A_p$  ve  $E_p$  kazığın kesit alanı ve elastik modülüdür. Her iki yük-oturma eğrisinin süperpozisyonu ile toplam yük-oturma eğrisi elde edilir. Sürtünme ve uç dirençlerinin hesabından sonra bu hesaplanan değerlerin bir irdelemesi yapılmak istenebilir. Bu irdeleme; araştırmacı Vesic'in (1967) genelde granüler zeminler ve kısmen yumuşak killer için yayınladığı bir bulgu kullanılarak yapılabilir. Vesic, granüler zeminler için birim uç direnci ve birim çevre sürtünmesinin oranını, içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olarak vermektedir. Bu oran, kazık boyutundan bağımsızdır. Ancak, granüler zeminin görelî sıklığına bağlıdır. Bulgular Şekil 5.9 da sunulmaktadır. Şekilde; çataldan sonra ayrılan aşağıdaki eğri, çakma kazıklar için, yukarıdaki ise her türlü gömülü yapı için kullanılabilir. Yumuşak killer için de bir değerler aralığı ayrıca işaretlenmiştir. Karşılaştırma için Kısım 3 de verilen yöntemlerle Kazığın uç ve çevre dirençlerinin hesabından sonra, bu değerler, kazığın uç alanı ve yanal alanına bölünerek birim değerler ve bunların oranı saptanabilir. Bu hesaplarda kullanılacak olan içsel sürtünme açısı, efektif gerilmeler kullanılarak bulunan açı olmalıdır.



Şekil 5.9. Üç Direnci - Çevre Sürtünmesi Oranı

### 5.2.2. Kazık Grubunun Davranışı

Kısım 2 de 2.2.1 paragrafında kazıkların çevresinde oluşan gerilme dağılımı anlatılmış idi. Bu dağılımın incelenmesi, kazıklararası bir gerilme girişiminin olacağını açıkça göstermektedir. Kazık Gruplarının oturması; kazıklar arası etkileşim ve ayrıca yükleme alanının görelî büyüklüğü nedeni ile grup içindeki tek kazığın oturmasından fazla olur. Kazık başlığının rijitliği de gerek gruptaki tek tek kazıklara gelen yükleri, gerekse oturmaların büyüklüğünü etkiler. Kazık gruplarının oturmasını hesaplamak için önce literatürde var olan bazı bağıntılara değinilecektir. Bu bağıntılar

içinde sıklıkla rastlanan bir bağıntı Skempton (1953) tarafından kum içindeki çakma kazıklar için verilen (5.10) bağıntısı, bir diğeri ise Meyerhof (1979) tarafından verilen (5.11) bağıntısıdır:

$$\rho_g = \frac{(4B+9)^2}{(B+12)^2} \rho_i \quad (5.10)$$

Burada B = Kazık Grup Genişliği, (feet) dir.  $\rho_i$  (feet) gruptan kazığa gelen ortalama yük altında tek kazığın oturma değeridir.

$$S_g(mm) = \frac{0.92\sqrt{Bg}}{N_c} I_x q \quad (5.11)$$

Burada  $S_g$  (mm) olarak oturma, q ise birim alana gelen yük olup gruba gelen yükün grup alanına bölünmesi ile bulunur.  $B_g$  grup genişliği,  $N_c$  kazık ucu zemini için düzeltilmiş Standard Penetrasyon Değeridir. Bu bağlamda I;

$$I = 1 - \frac{L}{8Bg} \quad (5.12)$$

olarak ifade olunan bir etki katsayısıdır. Diğer bir bağıntı Vesic (1967) tarafından ortaya atılmış olup:

$$\rho_g = \sqrt{\frac{Bg}{Bx\rho_i}} \quad (5.13)$$

şeklindedir. Burada  $\rho_g$  grup oturması,  $B_g$  grup genişliği, B tek kazığın çapı,  $\rho_i$  grup içindeki bir tek kazığın 5.2.1. paragrafında anlatılan yöntemlerle hesaplanan oturmasıdır.

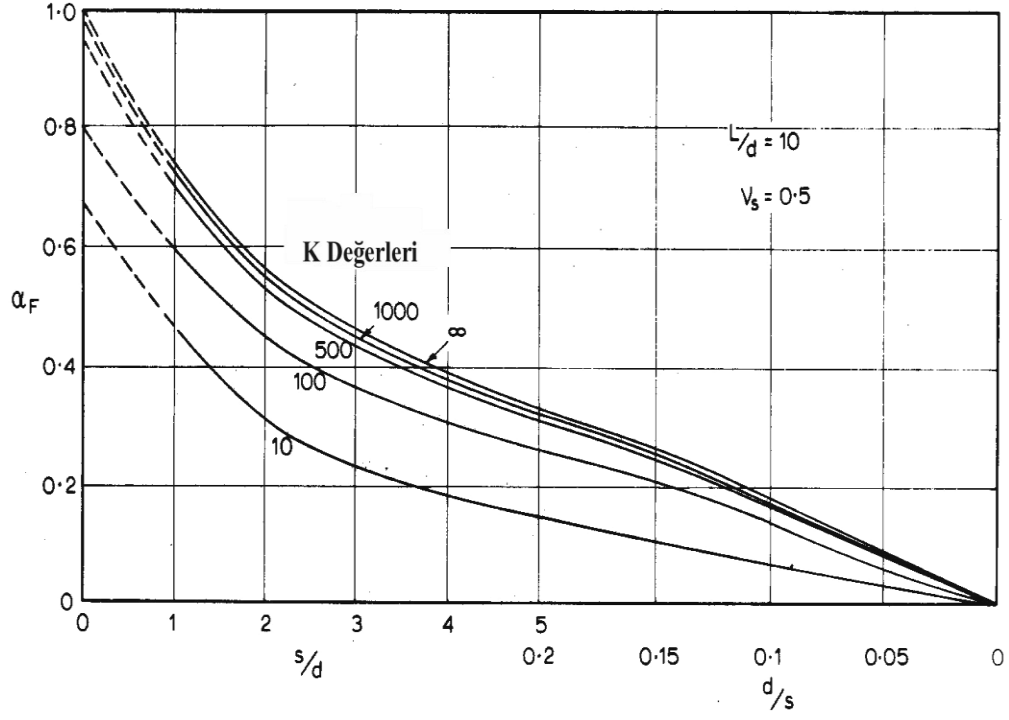
Araştırmacılar Paulos, Paulos ve Mattes, yukarıdaki 2.1 paragrafında tek kazıklar için anlatılan yöntemlerle yapılan analizler sonucunda grup içindeki kazıkların karşılıklı etkileşim katsayılarını hesaplamış ve boyutsuz parametrelere dayanan abaklarda vermişlerdir.

Bu abaklarda kazıklar arası etkileşim parametresi olarak tanımlanan  $\alpha_F$ ; kazık aralığı / kazık çapı; (s/d), kazık boyu/kazık çapı; (L/d), ve kazık-zemin elastik modüllerinin oranı K ya bağlı olarak gösterilmektedir. Etkileşim parametresi  $\alpha_F$  aşağıda tanımlanmıştır:

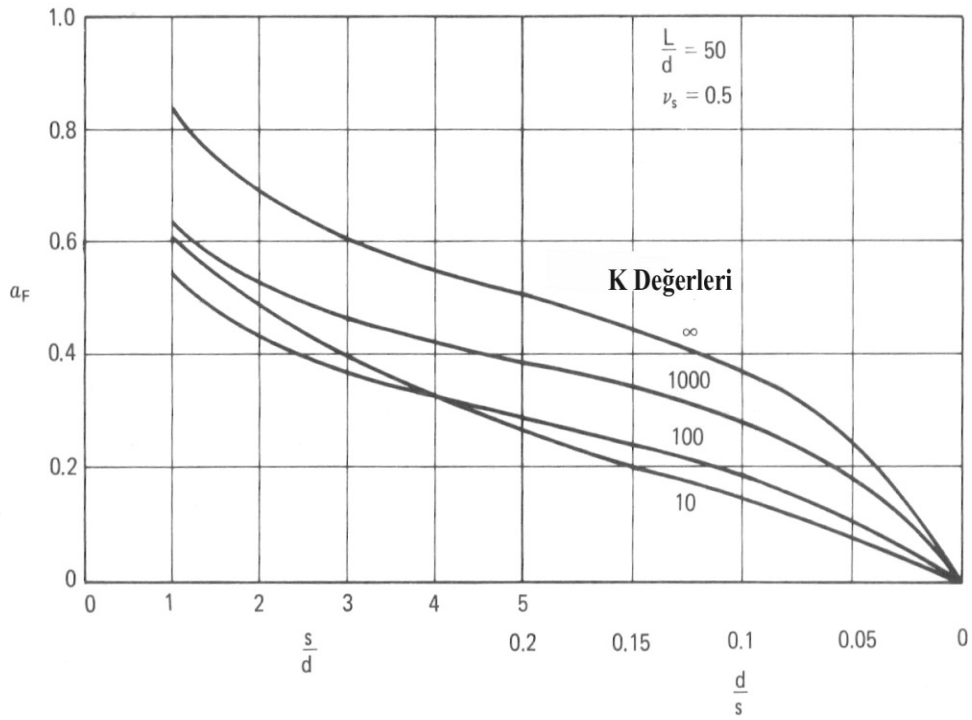
$$\alpha_F = \frac{\text{(Kazığın Komşu Kazıklar Etkisi ile İlave Oturması)}}{\text{(Kazığın Kendi Yüğü Altında Oturması)}}$$

Bu Parametre değişik L/d oranları için kazık aralığı (s) nin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.10 ila 5.12 de verilmektedir. L/d oranının ara değerleri için enterpolasyon yapılabilir.

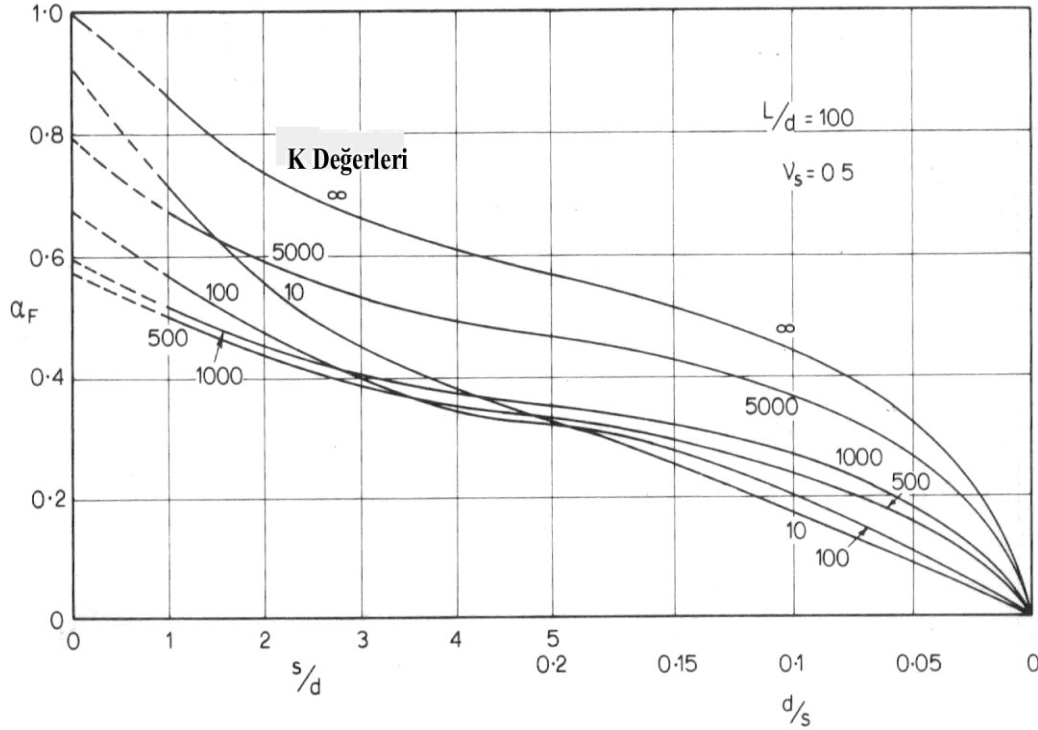




Şekil 5.10. Etkileşim Parametresi ( $\alpha_F$ ):  $L/d = 10$  (Poulos ve Davis, 1980)



Şekil 5.11. Etkileşim Parametresi ( $\alpha_F$ ):  $L/d = 50$  (Poulos ve Davis,1980)

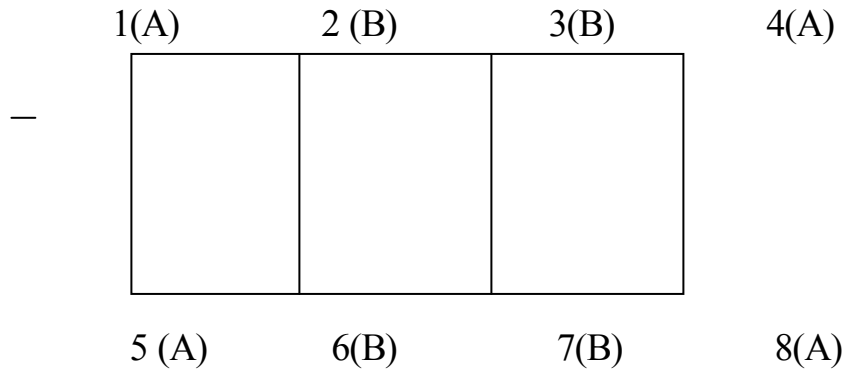


Şekil 5.12. Etkileşim Parametresi ( $\alpha_F$ ):  $L/d = 100$  (Poulos ve Davis,1980)

Etkileşim parametresi  $\alpha_F$  grup içinde etkileşim konumları itibarı ile aynı davranışı göstermesi beklenen kazıklar gruplandırılarak her grubu temsil eden bir kazık için diğer kazıkların etkisinin tek tek ele alınması ve sonra bu etkilerin toplanması şeklinde uygulanır.

Yukarıdaki Şekiller aşağıdaki nitelikleri içeren Etkileşim Parametrelerine aittir.

Örneğin; aşağıdaki Şekil 5.10 da şematik olarak gösterilen 8 kazıklı kazık ızgarasında ayrı davranış beklenen A ve B kazıklarını ayırabiliriz zira köşe kazıkları diğerlerinden ayrı davranış göstereceklerdir:



Bu durumda örneğin 1(A) kazığı ve diğer benzeri A kazıkları için oturma:

$$\delta_A = \rho_1 [P_A + P_A(\alpha_5 + \alpha_4 + \alpha_8) + P_B(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_6 + \alpha_7)] \quad (5.14)$$

olur . Burada  $\rho_1$ , grup içindeki tek kazığın birim yük altındaki oturmasıdır.  $P_A$  ve  $P_B$  ise iki ayrı tip kazığın toplam grup yükünden üzerlerine aldıkları yüküdür. Aşağıda oturma hesaplarının yapılışı bir örnek ile açıklanmaktadır:

Örnek, bir köprü ayağı altındaki kumlu zemin içinde imal edilen fore kazık grubunun incelenmesidir. İncelenen grup, statik düşey yükler yanında deprem vs. gibi diğer yük kombinasyonları da göz önüne alınarak

tasarlandığından, bu örnekte görülen düşey proje yükleri, taşıma güçlerinin oldukça altındadır. Ancak, örnek çözümün amacının, oturma hesap yöntemini anlatmak olduğu unutulmamalıdır.

### **5.3. Örnek: Tek Kazık için Oturma Hesapları**

Bu bahis, örnekle açıklanacaktır:

#### **Örnek 5.1**

Tek kazığın Uç Nihai Direncinin  $P_{un} = 7464$  kN ve Nihai Çevre Sürtünmesi Direncinin  $P_{cn} = 4407$  kN olduğu bilinmektedir (Bu hesaplar inceleme konusu dışında olduğundan buraya alınmamıştır). Oturma hesapları için Şekil 5.1-Şekil 5.8 kullanılmıştır.

Kazık ve Zeminin Özellikleri şunlardır:

$$l = 20 \text{ m}$$

$$d = 1.2 \text{ m Ünliform}$$

$$E_s = 17500 \text{ KN/m}^2$$

$$E_b = 55000 \text{ KN/m}^2$$

$$K = 1200$$

$$v_s = 0.3$$

5.3.1. Oturma - Uç Yüğü İlişkisi:

$$E_b/E_s = 3.15 ; L/d = 16.7 ; d_b/d = 1.0; \quad K = 1200; v_s = 0.30 \text{ alınır}$$

$I_o = 0.1$ ;  $R_k = 1.05$ ;  $R_v = 0.93$ ; Şekil 5.8 den ve enterpolasyon ile  $R_b = 0.80$  bulunur. Diğer taraftan (5.8) bağıntısı ile  $I = 0.078$  bulunur ve (5.7) bağıntısından nihai uç taşıma gücündeki oturma değeri:

$$\rho_{\text{çn}} = \frac{7464 \times 0.078}{17500 \times 1.2 \times 0.276} = 0.10 \text{ m}$$

olarak hesaplanır.

Bu miktara Kazık Boyunun Elastik Kısalması nedeni ile bulunacak oturma eklenir. Bu hesap da (5.9) bağıntısına göre aşağıdaki gibi yapılır:

$$\Delta\rho = \left[ 7464 - \frac{4407 \times 0.276}{1 - 0.276} \right] \frac{20}{1.13 \times 21 \times 10^6} = 0.0048 \text{ m}$$

Bu suretle toplam uç oturması 0.1048 m olur.

### 5.3.2. Oturma-Çevre Sürtünmesi İlişkisi:

Şekil 5.5 ile Şekil 5.8 kullanılırsa  $\beta_o = 0.078$ ;  $C_k = 0.95$ ;  $C_v = 0.80$  ile  $C_o = 4.67$  bulunur ve (5.3) ifadesi ile  $\beta = 0.276$  olur. Oturma (5.6) bağıntısı kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\rho_{un} = \frac{0.078 \times 4407}{17500 \times 1.20(1 - 0.276)} = 0.0275 \text{ m}$$

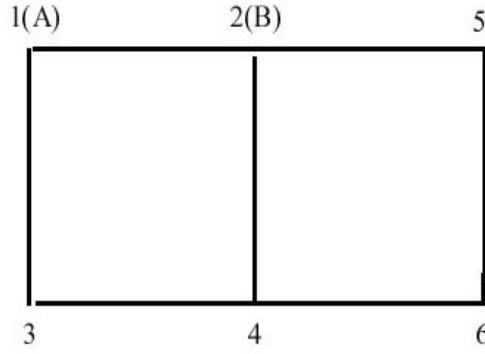
Bu değerlerin kullanılması sonucunda Çevre Sürtünmesi Direnci ile Uç Direnci-Oturma ve bunların süperpozisyonu ile elde edilen Toplam Yük-Oturma ilişkisi Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Aynı Şekil, kazık üzerindeki yükleme deneyi sonuçlarını da göstermektedir. Bu hesap ve sonuçlar Whitaker ve Cooke (1966) tarafından Londra Kili üzerinde yapılan deney ve hesaplarla elde edilenleri anımsatmaktadır.

Literatürde d kazık çapı olmak üzere çakma kazıklar için uç direncinde akma sınırına yaklaşık 0.08d ile 0.10d, geniş çaplı fore kazıklar için ise en fazla 0.3d ye varan oturma mertebesinde varılabileceği belirtilir. Örneğimizde bu değer 0.87 d olmaktadır.

### **Örnek 5.2**

### 5.3.3. Kazık Grubu için Oturma Hesabı ve Grubun Davranışı:

Örnek 5.1.de ele alınan kazıklardan 6 adedi ile oluşan kazık ızgarası şematik olarak aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 5.13 Kazık Grubu Planı

İncelenen grupta 6 kazık vardır. Toplam Grup Yüğü 21561 KN dur. Kazık aralıkları 1-2-5 aksında 4.27 m 1-3 aksında 4.80 metredir. Köşe kazıkları, ortadaki kazıklardan ayrı davranacaklardır. Bu nedenle köşe kazıklarının yükü  $P_A$  ve ortadakilerin yükü ise  $P_B$  olacaktır. Bu halde kazıkların karşılıklı etkileşim katsayıları,  $\alpha_F$ ;  $1/d$ ;  $s/d$ ;  $K$  değerleri ve Şekil 5.10-5.11 kullanılarak her kazık için bulunur ve (5.14) bağıntısında yerine konur ise:

$$\rho_A = \rho_1 [P_A (0.35 + 0.28 + 0.44) + P_B (0.47 + 0.38) + P_A]$$

$$\rho_s = \rho_1 [P_A (0.47 + 0.47 + 0.38 + 0.38) + P_B (0.44) + P_B]$$

ilişkileri elde edilir. Bu ilişkiler sadeleştirilir ise (5.15) denklem takımı elde edilir:

$$\frac{1}{\rho_1} \begin{Bmatrix} \rho_A \\ \rho_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.07 & 0.85 \\ 1.70 & 1.44 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_A \\ P_B \end{Bmatrix} \quad (5.15)$$

Şekil 2.1. incelendiğinde kazıkların servis yüklerinin de A noktasına karşı gelen 6500 kN değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle tek kazığın birim yük altında oturması (2.25) bağıntısı ile gösterilen şekli ile:

$$\rho_1 = \frac{\rho_{sA}}{P_{sA}} = \frac{0.0275}{6500} = 4.23 \times 10^{-6} \quad \text{olur.}$$

Kazık başlığının esnek olması halinde grup merkezindeki kazıkların biraz daha fazla oturması ve kazıkların toplam yükü eşit paylaşmaları beklenir. Bu durumda bulunan birim oturma değeri (5.15), (5.16) bağıntılarında yerine konursa ayırım yapılan kazık tipleri için aşağıdaki oturma değerleri bulunur:

$$\rho_A = 0.054 \text{ m} \quad \rho_s = 0.058 \text{ m}$$

Bu halde ortadaki kazıkların köşe kazıklara nazaran %7.5 kadar daha fazla oturduğu gözlenmektedir.

Diğer taraftan kazık başlığının rijit olması halinde ise başlık, kazıkları eşit oturmaya zorlar. Bu halde  $\rho_A = \rho_B$  olur. Bu durumda (5.15) ve (5.16) bağıntıları ve düşey denge durumundan ötürü:

$$2P_A + 4P_B = 21561 \text{ kN olduğu gözönüne alınarak};$$

$$P_A = 5201 \text{ kN}; P_s = 2789 \text{ kN bulunur.}$$

Görülüyor ki bu durumda köşe kazıklar orta kazığa nazaran %86 daha fazla yüklenmişlerdir. Oturmaların eşit olduğu bu haller için grup içinde etkileşim açısından benzer davranışı gösteren kazıkları gruplamak ve bunlar için denklemler yazmak sureti ile daha fazla kazık içeren

gruplardaki kazıklar arasında yük dağılımını incelemek olasıdır. Bu türlü denklemler aralarında eşitlenerek çözüme kolayca ulaşılabilir.

Rijit başlıklı ve çok derin bir üniform zemin tabakası içinde yer alan kazık gruplarında, aşağıdaki gibi bir “Oturma Oranı” tarif edilebilir:

$$R_s = \text{Oturma Oranı} = (\text{Grubun Ortalama Oturması})/(\text{Tek Kazığın Grup Ortalama Yüğü Altında Oturması})$$

Oturma oranı  $R_s$  kazık grubunun bir rijit blok olarak bir yay üzerine yerleştirildiği ve grup ortalama yükü ile yüklendiği düşünülürse; (2.25) esneklik ve rijitlik redörlerinin çarpımına eşit olmaktadır. Örneğimizdeki grubun (5.15) bağıntısı ile oturma miktarı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\rho_A = \rho_B = (2.07 \times 2999 + 0.85 \times 4782) \times 4.23 \times 10^{-6} = 0.043 \text{ m}$$

Diğer taraftan; grup ortalama yükü 6 kazıklı bu grup için

$$P_{av} = 21561/6 = 3593.5 \text{ KN dır.}$$

Bu yük altında grup içindeki tek kazığın oturması aşağıdaki gibi olur:

$$\rho = 3593.5 \times 4.23 \times 10^{-6} = 0.0152 \text{ m}$$

Bu durumda oturma oranı  $R_s$  aşağıdaki gibi saptanır:

$$R_s = 0.043/0.0152 = 2.83$$

Yukarıda tarif edilen Rijitlik Katsayısı,  $K$ , Kazık Narinlik Oranı  $L/d$ , ve Oturma Oranı  $R_s$  e bağlı olarak kare ızgara üzerine planlanmış çeşitli kazık gruplarının oturma hesapları için Tablo 5.2. kullanılabilir. Esasen, ızgara şeklinin, grup oturması üzerindeki etkisinin fazla olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle Tablo, diğer kazık ızgaraları üzerinde düzenlenmiş gruplara da sınırlı bir hata ile uygulanabilir.



Tablo 5.2. Çeşitli Gruplar İçin Oturma Oranları (Poulos,1968)

| Gruptaki Kazık Sayısı | L/d | s/d | K | 4    |      |      |      | 9    |      |      |      | 16   |      |      |      | 25   |      |       |       |
|-----------------------|-----|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                       |     |     |   | 10   | 100  | 1000 | ∞    | 10   | 100  | 1000 | ∞    | 10   | 100  | 1000 | ∞    | 10   | 100  | 1000  | ∞     |
| 10                    | 2   |     |   | 1.83 | 2.25 | 2.54 | 2.62 | 2.78 | 3.80 | 4.42 | 4.48 | 3.76 | 5.49 | 6.40 | 6.53 | 4.75 | 7.20 | 8.48  | 8.68  |
|                       | 5   |     |   | 1.40 | 1.73 | 1.88 | 1.90 | 1.83 | 2.49 | 2.82 | 2.85 | 2.26 | 3.25 | 3.74 | 3.82 | 2.68 | 3.98 | 4.70  | 4.75  |
|                       | 10  |     |   | 1.21 | 1.39 | 1.48 | 1.50 | 1.42 | 1.76 | 1.97 | 1.99 | 1.63 | 2.14 | 2.46 | 2.46 | 1.85 | 2.53 | 2.95  | 2.95  |
| 25                    | 2   |     |   | 1.99 | 2.14 | 2.65 | 2.87 | 3.01 | 3.64 | 4.84 | 5.29 | 4.22 | 5.38 | 7.44 | 8.10 | 5.40 | 7.25 | 9.28  | 11.25 |
|                       | 5   |     |   | 1.47 | 1.74 | 2.09 | 2.19 | 1.98 | 2.61 | 3.48 | 3.74 | 2.46 | 3.54 | 4.96 | 5.34 | 2.95 | 4.48 | 6.50  | 7.03  |
|                       | 10  |     |   | 1.25 | 1.46 | 1.74 | 1.78 | 1.49 | 1.95 | 2.57 | 2.73 | 1.74 | 2.46 | 3.42 | 3.63 | 1.98 | 2.98 | 4.28  | 4.50  |
| 50                    | 2   |     |   | 2.43 | 2.31 | 2.56 | 3.01 | 3.91 | 3.79 | 4.52 | 5.66 | 5.58 | 5.65 | 7.05 | 8.94 | 7.26 | 7.65 | 9.91  | 12.66 |
|                       | 5   |     |   | 1.73 | 1.81 | 2.10 | 2.44 | 2.46 | 2.75 | 3.51 | 4.29 | 3.16 | 3.72 | 5.11 | 6.37 | 3.88 | 4.74 | 6.64  | 8.67  |
|                       | 10  |     |   | 1.38 | 1.50 | 1.78 | 2.04 | 1.74 | 2.04 | 2.72 | 3.29 | 2.08 | 2.59 | 3.73 | 4.65 | 2.49 | 3.16 | 4.76  | 6.04  |
| 100                   | 2   |     |   | 2.56 | 2.31 | 2.26 | 3.16 | 4.43 | 4.05 | 4.11 | 6.15 | 6.42 | 6.14 | 6.50 | 9.92 | 8.48 | 8.40 | 10.25 | 14.35 |
|                       | 5   |     |   | 1.88 | 1.88 | 2.01 | 2.64 | 2.80 | 2.94 | 3.38 | 4.87 | 3.74 | 4.05 | 4.98 | 7.54 | 4.68 | 5.18 | 6.75  | 10.55 |
|                       | 10  |     |   | 1.47 | 1.56 | 1.76 | 2.28 | 1.95 | 2.17 | 2.73 | 3.93 | 2.45 | 2.80 | 3.81 | 5.82 | 2.95 | 3.48 | 5.00  | 7.88  |

Tablonun kullanımında önce narinlik oranı L/d ve kazık aralığı s/d kullanılarak gruptaki kazık sayısına karşı gelen (4,9,16,25) gerekli satır bulunur. Geçerli K değeri kullanılarak oturma oranı seçilir. Değerler arasında doğrusal enterpolasyon yapılabilir. Ayrıca bu tablodaki Oturma Oranları, daha fazla kazık içeren gruplar için aşağıdaki formül kullanılarak ekstrapole edilebilir:

$$R_s = (R_{25} - R_{16})(\sqrt{n} - 5) + R_{25} \quad (5.16)$$

### **Örnek 5.3**

Bir grupta  $L/d=25$ .  $s/d=5$ ,  $K=1000$  olsun. Buradan  $R_{25}=6.50$  ve  $R_{16}= 4.96$  bulunur. Bu bulgular (5.16) bağıntısına yerleştirilerek:

$$R_{40} = (6.50 - 4.96)(\sqrt{40} - 5) + 6.50 = 8.53$$

bulunur. Burada  $R_i$  gruptaki kazık sayısına göre Tablodan alınan oturma oranı,  $n$  ise hesabı yapılmak istenen gruptaki kazık sayısıdır.

### Örnek 5.4.

(Ampirik Bağıntılarla Hesap)

Bu hesaplar, yukarıdaki yöntemle hesaplanan tek kazık esneklik katsayısı  $4.23 \times 10^{-6}$  değeri gerekli hallerde kullanılarak yukarıda sözü edilen ampirik (5.10), (5.11), (5.13) bağıntıları ile yapılırsa şu sonuçlar alınır:

**Skempton:**

$$7.66 \times 4.23 \times 10^{-6} \times 21561/6 = 0.116 \text{ m}$$

**Meyerhof :**

Kazık Ucu SPT(N) değeri 25 dir.  $I= 0.583$  olarak hesaplanır. Grup alanı  $A= 9.74 \times 6.00 = 58.4 \text{ m}^2$  dir. Basınç 369 Kpa olur. Buradan Oturma = 0.019 m olur.

*Vesic:*

Bu yöntemaşağıdaki gibi uygulandığında oturma miktarı:

$$\sqrt{\frac{4.8}{1.2 \times 3595.3 \times 4.23 \times 10^{-6}}} = 0.018 \text{ m}$$

olmaktadır.

#### **5.4. Oturma Hesabının Yay Modeli ile Yapılması**

##### 5.4.1. Genel

Bu yöntemin esası; kazık çevresindeki zeminin gerilme-ötelenme davranışını yaylar ile temsil ederek tanımlamaktır. Bu sembolik yayların davranışını simgeleyen bağıntılar Kısım 2.3.2 de verilmiştir. Ötelenmenin yük ile değişimini doğrusal veya doğrusal olmayan davranış biçimi ile tarif edecek şekilde tanımlanabilirler. Kazıklı temellerin davranışına bu tür bir çözüm yaklaşımı; yüzeysel temellerin yapı-zemin etkileşimi problemini çözmek için çalışan Winkler adlı bir bilim adamı tarafından ortaya atılmıştır. Bu nedenle modele “Winkler Modeli” de denir. Bilindiği gibi, grup içindeki kazıklar komşu kazıkların da etkisi altında kaldıklarından, grup davranışını kazıkların görelî rijitliği, narinlik oranı, kazık aralıkları vb etmenler etkilemektedirler. Aşağıda sunulan yaklaşım, gerek tek kazığın gerekse kazık gruplarının oturmalarını saptamak için bir bilgisayar programının geliştirilmesine elverişlidir.

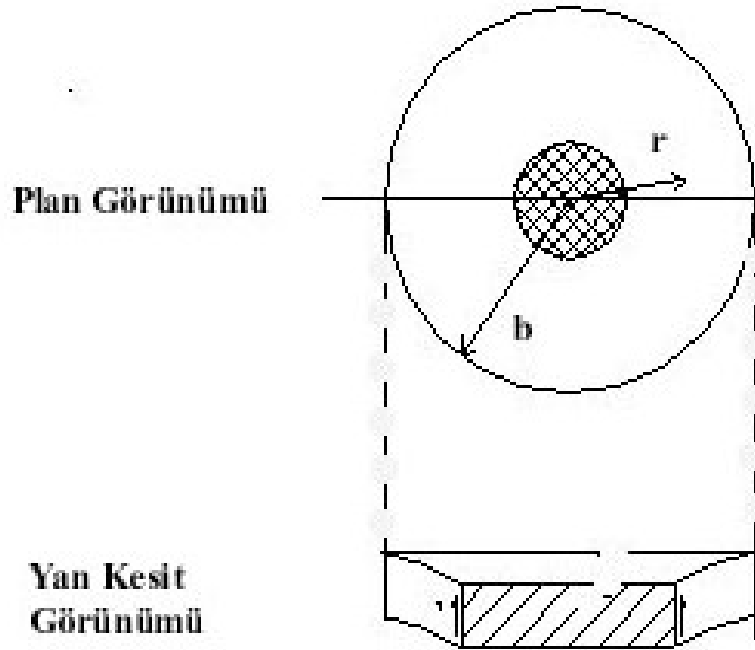
##### 5.4.2. Teori

Bu kısımda özetlenen yaklaşımda eksenel yük altındaki tek kazığın rijit davrandığı kabulü yapılır. Kazık ucuna gelen yükler ihmal edilir ve kazık yükünün yalnızca çevre sürtünmesi ile karşılandığı varsayılır. Bu nedenle aşağıdaki tanımlamada kayma gerilmeleri esas alınacaktır. Kayma gerilmeleri, kazık yüzeyinde harekete gelen sürtünme direncini ve/veya çeper yakınındaki kayma gerilmesini de simgelemekle beraber, aşağıdaki genel teorik anlatımda kayma gerilmesi sözcüğünün kullanılması uygundur.

Bu yaklaşımda kazık tabanını temsil eden yatay bir kazık dilimi; Şekil 5.14 de plan görüntüde taranarak gösterilen (a) yarıçaplı, birim kalınlıktaki rijit bir disk gibi düşünülebilir.

#### 5.4.3. Tek Kazık Analizi

Aşağıdaki Şekil 5.14 de taralı alan a yarı çapındaki rijit diski, r disk ekseninden uzaklığı ve b ise diskin ekseninden itibaren etki yapabileceği maksimum mesafeyi göstermektedir.



Şekil 5.14. Kazık Tabanını Temsil Eden Disk

**Bu durumda kazığın taşıdığı aksenal yük nedeni ile eksenenden r uzaklığında oluşan düşey ötelenme (w) aşağıdaki diferensiyel denklem yardımı ile bulunabilir:**

$$\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} = 0 \quad (5.17)$$

Belli bir kazıktan b uzaklığına gidildiğinde düşey ötelenme sıfır olacaktır.

Ara mesafeleri eşit olan bir kazık grubu düşünüldüğünde b yarıçapı ile tayin edilen dairenin içindeki alanda bulunan kazıklar bu kazık tarafından etkilenecek, bu daire dışında kalan diğer kazıklara etki taşınmayacaktır. Kazığın zemin içindeki oturmasının kazık yüzeyindeki basit kayma gerilmesi nedeni ile olduğu varsayılabılır.

Bu varsayım ile (5.17) denkleminin çözümü;  $w_0$  kazık-zemin yüzeyindeki oturma değeri olmak üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$w = w_0 \left(1 - \frac{\ln \frac{r}{a}}{\ln \frac{b}{a}}\right) \quad (5.18)$$

Bu; kazık yüzeyinde ( $r=a$ )  $w=w_0$  ve kazık ekseninden b uzaklıkta ( $r=b$ )  $w=0$  olan bir fonksiyondur.

Kazık yüzeyindeki kayma gerilmesi ( $\tau_0$ ) aşağıdaki analiz ile elde edilir:

$$2\pi a \tau_0 = 2\pi r \tau$$

G kayma modülü kullanılarak Birim Kayma Deformasyonu şöyle yazılır:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{a \tau_0}{Gr} ;$$

Oturma ( $w_0$ ):

$$w_0 = \int_a^b \gamma dr = \int_a^b \frac{a \tau_0}{G} \frac{1}{r} dr = \frac{a \tau_0}{G} \ln \frac{b}{a} \quad (5.19)$$

olur ve buradan kazık yüzeyindeki kayma gerilmesi:

$$\tau_0 = \frac{Gw_0}{a \ln \frac{b}{a}} \quad (5.20)$$

elde edilir.

Diğer taraftan, (5.20) denklemi düzenlenerek disk-zemin yatak modülü ( $k_0$ ) için aşağıdaki ifade bulunur:

$$k_0 = \frac{\tau_0}{w_0} = \frac{G}{a \ln \frac{b}{a}} \quad (5.21)$$

Scott (1981) bu problem için sürekli ortam çözümleri ile elde edilen sonuçlar ile yatak modülü yaklaşımı ile elde edilen sonuçları kıyaslamıştır. Bu kıyaslama sonucunda aşağıdaki bağıntı ile ifade edilen yatak modülünün kullanılması halinde iki çözümün çok yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir:

$$k_0 = \frac{G}{4a} \quad (5.22)$$

Yukarıdaki iki denklemin kıyaslanması sonucunda  $\ln(b/a)$  oranının 4 olduğu görülür, buradan da  $b/a$  oranı yaklaşık 50 olarak bulunur. Bu, 50 kazık yarı çapı aralığının dışında kalan kazıkların karşılıklı etkileşim

göstermeyeceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, bir grup içinde karşılıklı etkileşen kazıkların grup davranışı hesaplarında 50 kazık yarıçapı mesafe içinde olacakları kabul edilir. Diğer taraftan Randolph (1978); b mesafesinin bir kazık boyu olduğunu söylemektedir. Bu bulgu; pratikte çok kullanılan bir kazık narinlik oranı olan (kazık boyu/kazık çapı)  $l/d=l/2a=25$  için yukarıdaki etki mesafesini vermekte ve aynı sonuca varılmaktadır. Bu nedenlerle yukarıda (5.22) ifadesi ile verilen yatak modülünün tasarımda kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Kayma modülü ile Elastik modül arasındaki ilişkiyi veren:

$$E = \frac{G}{2(1+\nu)}$$

bağlantısı (5.22) bağlantısı ile birleştirilirse Poisson Oranı olan  $\nu$  için yatak modülü  $k_0=0.67(E_s/a)$  elde edilir. Poulos ve Davis (1980), Narinlik Oranı  $l/d= 25$  olan yanal yüklenmiş ankastre başlı kazıklarda yatak modülü olarak  $k_0=0.82E_s/d$  kullanıldığında sürekli elastik ortam çözümlerine yaklaşıldığını belirtmektedir.

Diğer taraftan yatak modülü; kazık yükünün (F) çevre sürtünmesi ile uniform olarak karşılandığı kabulü ile, (5.21) ifadesi kullanılarak ve L kazık boyunu göstermek üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$k = \frac{\tau_0}{w_0} = \frac{F}{2\pi a L w_0} = \frac{G}{a \ln \frac{b}{a}} \quad (5.24)$$

Yukarıda açıklanan bulgular çerçevesinde kazığın etkisinin maksimum 50 kazık yarıçapı (25 çap) mesafesinde olacağı kabul edilirse yatak katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$k_0 = \frac{F}{Lw_0} = \frac{2\pi G}{\ln 50} = 1.61G \quad (5.25)$$

Aşağıdaki yaklaşımda, ele alınacak bir tek kazığın oturması, yatak katsayısına bağlı olarak ifade edilecek, sonra kazık gruplarının çözümü için bu ifadeler; grup içindeki diğer kazıkların eldeki kazık üzerindeki etkileri göz önüne alınarak gerekli düzeltmelerle geliştirilecektir. Bu düzeltmeler sonucunda genellikle tek kazığın yatak katsayısı olan k değeri grup içinde azalır (yumuşar) ve bu durumda kazık grubu daha fazla oturur.

#### 5.4.4. Grup Analizi:

Bir kazık grubu, kazıkların birbirlerine bir kazık başlığı ile bağlanarak oluşturulur. Bu başlık ile zemin arasında boşluk vardır. Bu nedenle kazık başlığının zemin-kazık etkileşimine katkıda bulunması söz konusu değildir. Bu yaklaşımda, gruplar, rijid kabul edilen kazıkların sayılarına göre sınıflandırılırlar. Genellikle genişlikleri kazık boylarının üstünde olan kazıkları bağlayan kazık başlıkları esnek olur. Bu durumda kazıklar toplam grup yükünü eşit olarak paylaşırlar. Diğer taraftan genişlikleri kazık boyundan küçük olan kazıkların başlıkları rijit sayılabilir. Bu kazıklarda başlığın zorlaması ile tüm kazıklar eşit miktarda otururlar ancak bu durumda herbir kazığa gelen yük farklı olur. Kesin bir yargı olmamakla beraber kare ızgaraya oturan 4, 9, 16, 25 adet kazık “Küçük



Grup” olarak adlandırılır. Bundan daha fazla kazık içeren gruplara ise “Büyük Grup” denir. Bu durum, iki kategoriye ayrı ayrı inceleme gereksinimini doğurmaktadır.

Kazık başlığının rijitliği; grubun genişliğinin kazık boyuna oranına bağlı olduğu kadar, kazık aralığına, kazık başlığının yapısal rijitliğine, zemin özelliklerine de bağlıdır. Basit bir yaklaşımla kazık başlığı rijitliği için kazık başlığının birim genişliği için s kazık aralığı olmak üzere  $K_B = s/E_B I_B$  hesaplanabilir ve bir yargıya varılabilir. Burada  $E_B I_B$  başlığın kesit modülüdür.

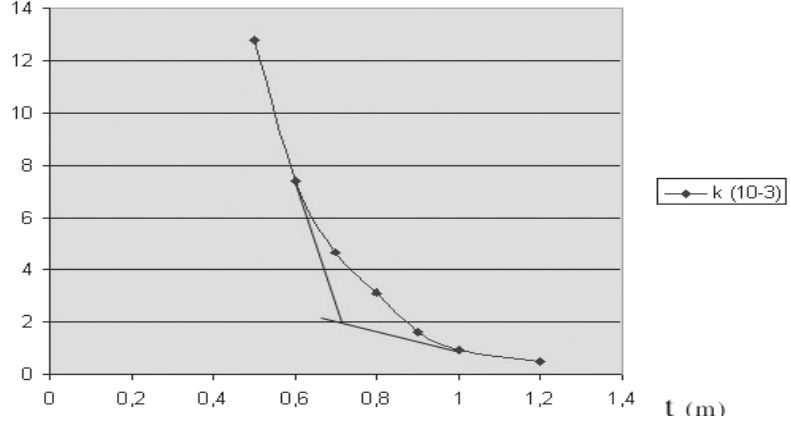
### **Örnek 5.5.**

Kazık Çapı  $d=1.00$  m, Kazık aralığı  $s= 4.d$ , Başlığın Elastik Modülü  $E_B$   $30 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup> olsun.olsun.

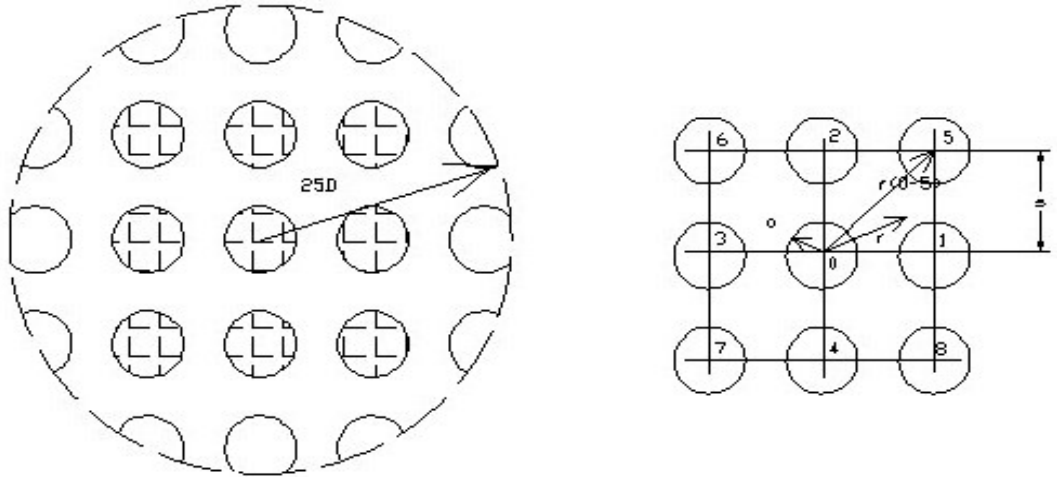
$$K_B = \frac{4xd}{\frac{E_B I_B t^3}{12}} = \frac{48d}{30 \times 10^6 \times t^3} = 1.6 \times 10^{-6} \frac{1}{t^3}$$

Başlık kalınlığı etkin olmaktadır. Buradan aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

|                  |      |     |      |      |     |      |      |
|------------------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| t (m)            | 0.5  | 0.6 | 0.7  | 0.8  | 1.0 | 1.2  | 1.5  |
| $K_B$ ( $10^6$ ) | 12.8 | 7.4 | 4.66 | 3.12 | 1.6 | 0.92 | 0.47 |



Buradan görüldüğü gibi 0.7 m den daha kalın olan başlıklar bu grup için rijit kabul edilebilir.



Büyük Grup

Küçük Grup

Şekil 5.15. Büyük ve Küçük Kazık Grupları

#### 5.4.4.1. Büyük Grup Analizi

Büyük grup analizi halinde tek kazık davranışının temsili için kullanılan elastik disk analizi grup içinde bulunan bir kazığın davranışını tanımlamak için de karşılıklı olarak kullanılmaktadır. Büyük gruplarda

kazık sayısı sonsuz olarak düşünülür. Bu, grup içindeki herhangi bir kazığın diğer herhangi bir kazıkla karşılıklı etkileşim içinde olacağı sonucunu getirir. Bu durumda aksel F yükü taşıyan birim kalınlıktaki bir diskin, 25 çaplık bir etki alanı içinde (5.19) denkleminin kullanılması ile (dikkat edilmelidir ki dilendiğinde bu etki alanı aynı teori içinde değiştirilebilir) aşağıdaki oturmayı oluşturacağı görülebilir:

$$w\left(\frac{r}{a}\right) = w_0 \left(1 - \frac{\ln \frac{r}{a}}{\ln 50}\right) \quad (5.26)$$

Burada  $a$  kazık yarıçapı,  $w_0$  ise  $F_i$  kuvveti nedeni ile bu kuvvetin uygulandığı kazığın başında oluşan oturmadır. Bu durumda, 0 merkez konumundaki bir  $F$  yükünün  $r/a$  uzaklıktaki 1 konumunda  $w_{10}$  oturmasını meydana getirdiğini ve evrik teori gereğince 1 konumundaki bir  $F$  yükünün de 0 konumundaki bir kazığa  $w_{01}$  oturması meydana getireceği söylenebilir. Diğer bir deyişle bir büyük grupta toplam grup yükünün kazık sayısına bölünmesi ile bulunan değer her kazığa eşit olarak dağıldığı varsayılan  $F_i$  kuvveti ise bu kuvvet grup içinde etkilediği kazığın oturmasını doğurduğu gibi diğer kazıkların oturmasına da etki eder. Oturma hesabı için ortadaki bir kazık göz önüne alınır ve bu kazığın oturma hesabı, 25 kazık çapı etkileşim mesafesi içinde olan diğer bütün kazıkların etkisi de gözönüne alınarak yapılırsa grupta  $n$  kazık olması halinde oturmaların toplamı olan  $w_n$  aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$w_n = w_0 \left(1 + \sum_1^n 1 - \frac{\ln \frac{r_n}{a}}{\ln 50}\right) \quad (5.27)$$

Burada  $r_n$  grup içindeki  $n$  inci kazığa olan yarıçap mesafesidir. Grup içinde diğer kazıkların etkisi ile “yumuşamış” olan kazığın yatak katsayısı:

$$k_n = \frac{F}{Lw_n} \quad (5.28)$$

şeklinde yazılabilir. Bu; tek kazığın yatak katsayısına oranlanırsa büyük grupta yer alacak olan bir tek kazığın yatak katsayısı  $k$  ile grup içinde etkileşim altındaki kazığın yatak katsayısı  $k_n$  arasında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

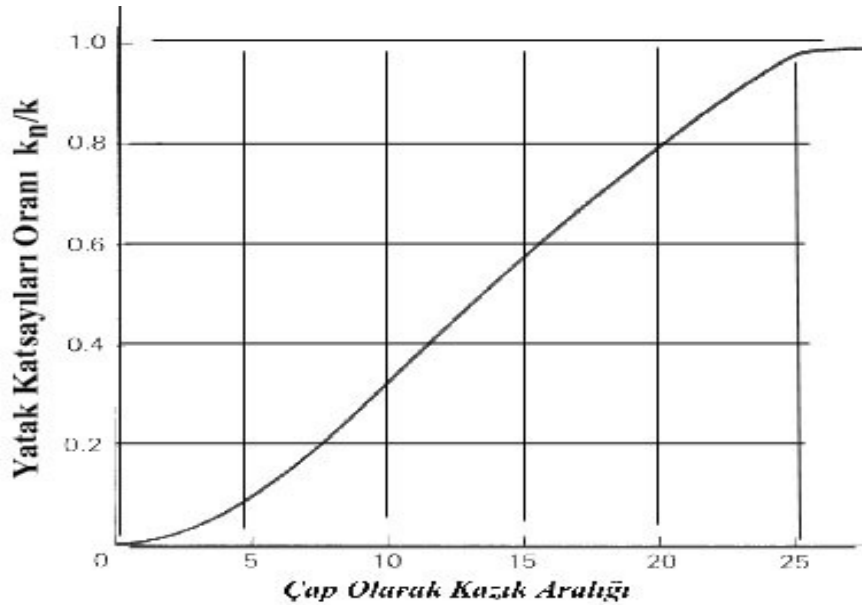
$$\frac{k_n}{k} = \frac{1}{1 + \sum_1^n \left(1 - \frac{\ln \frac{r_n}{a}}{\ln 50}\right)} \quad (5.29)$$

Grup içindeki bir kazığın değiştirilmiş yatak katsayısı  $k_n$  yi  $k$  cinsinden bulmak için kullanılan bağıntı budur. Bu denklemin uygulanabilmesi için büyük grupta etki alanı içindeki kazık sayısının bilinmesi gerekir. Bu ise kazıkların ara mesafesine bağlıdır. Kazık aralıklarının küçük olması halinde 25 çaplık alana daha fazla kazık girmesi sağlanacak, (5.29) denklemindeki toplama çok sayıda kazık girerek karşılıklı etkileşecektir. Bu durumda yatak katsayıları oranı düşecektir. Kazık aralıklarının 25 çap veya daha fazla olması halinde ise oran bir limit değer olarak 1.0 olur. Bu durum ise tek kazık halini gösterir. Bu denklemin kullanılması ile grubun istenilen

yerindeki kazık için yumuşamış yatak katsayısı bulunabilir ve o kazığın oturma miktarı hesaplanabilir.

Bu yaklaşımın başka etkileşim aralıklarının kullanımına ve/veya (5.21) denklemi ile verilen bağıntı dışındaki bağıntıların kullanımına açık olduğu gözden kaçmamalıdır. Yaklaşımın bu özelliği, bir araştırma aracı olarak kullanılmasına olanak sağlayacak niteliktedir.

Aşağıda Şekil 5.16, (5.29) denklemi kullanılarak saptanan ( $k_n/k$ ) oranını kazık aralığına bağlı olarak göstermektedir. Bu eğri kullanılarak saptanacak oran yardımı ile grup içindeki tek kazığın oturma miktarının bilinmesi halinde grup oturması kolayca bulunabilir.



Şekil 5.16. Kazık Aralığı-Yatak Katsayısı Oranı, ( $k_n/k$ )

### **Örnek 5.6.**

Bu yöntem yukarıdanberi ele aldığımız örneğimize  $s/d = 4$  olduğu kabulü ile uygulanabilir:

Tek kazığın yatak katsayısı (5.24) ve (5.25) ifadeleri ile bulunabilir ve buradan tek kazığın oturma miktarı hesaplanır:

$$y_i = w_0 = \frac{F}{L \times 1.606G} = \frac{3593}{20 \times 1.61 \times 21230} = 0.0053m$$

Şekil 5.16. den kazık aralığı için oran 0.6 olarak bulunur ve:

$0.06 = \frac{\tau_G y_i}{\tau_i y_G}$  yazılır. Buradan Grubun oturması  $b/a=50$  ise :

$$y_G = \frac{\tau_G y_i}{0.06 \tau_i} = \frac{\frac{3593 \times 9 \times 0.0053}{\pi b \times 20}}{\frac{0.063 \times 3593}{\pi a \times 20}} = 0.015m \text{ olur.}$$

#### 5.4.4.2. Küçük Grup Analizi

Kare ızgaraya oturan ve rijit bir başlıkla birleştirilmiş oldukları kabul edilen 4, 9, 16 ve 25 adet kazık “Küçük Grup” olarak adlandırılır. Rijit bir başlığın mevcudiyeti nedeni ile kazıkların eşit oturacağı fakat toplam grup yükünü eşit olarak paylaşmayacakları 5.3.1.2. kısmında görülmüş idi.

Bu kısımda, yaklaşımın inceliklerini açıklamak amacı ile yalnızca 9 kazıktan oluşan 3x3 lük bir gruba ilişkin analiz anlatılacaktır. Grup, Şekil 5.15 de sağda gösterilmektedir. Ana denklem (5.19 ve 5.20) ifadelerinin  $F_i$  herhangi bir kazığa gelen yük olmak üzere aşağıdaki şekilde yazılıdır:

$$w\left(\frac{r}{a}\right) = \frac{F_i}{2\pi GL} \ln \left\{ \frac{\frac{b}{a}}{\frac{r}{a}} \right\} \quad (5.30)$$

(5.30) bağıntısı, merkezdeki “0” kazığına (disk)  $r/a$  yarı çapı mesafedeki  $F_i$  yükünün uygulanmasından dolayı oluşan oturmayı gösterir. Bu denklemde  $r/a=b/a$  durumunda  $w(r/a)=0$  ve  $r=a$  durumunda (5.24) denkleme dönülür.

Grup içindeki bazı kazıkların plandaki konumları nedeni ile aynı etkileşimi gösterecekleri görülmektedir. Bu nedenle gruptaki kazıklar aldıkları yük açısından üç kategoriye ayrılabilirler. Bu gruplar ve analizde kullanılan notasyon şöyledir:

Orta Kazık 0,

Orta Kenar Kazıklar 1,

Köşe Kazıklar 5,

Kazıkların merkezden merkeze aralıkları  $s$  olarak gösterilmektedir.

Kazık kuvvetlerini bulmak için aşağıdaki denge denklemleri kullanılır:

a. Düşey Kuvvet Dengesi için:

$$F_0 + 4 F_1 + 4 F_5 = F \quad (5.31)$$

Burada  $F$  kazık başlığı üzerindeki toplam kuvvettir. (5.31) denklemini  $F_i/F$  şeklinde taraf tarafa  $F$  ile bölünerek boyutsuz hale getirilebilir:

$$F_0 + 4 F_1 + 4 F_5 = 1 \quad (5.32)$$

0, 1, ve 5 olarak tanımlanan kazık kategorilerindeki kazıkların oturmaları (5.30) denklemleri aracılığı ile aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w_0 = \frac{1}{2x\pi xG} \left[ F_0 \ln \frac{\left(\frac{b}{a}\right)}{1} + 4xF_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xs}\right) + 4xF_5 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xs\sqrt{2}}\right) \right] \quad (5.33)$$

$$w_1 = \frac{1}{2x\pi xG} \left[ F_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{1}\right) + F_0 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xs}\right) + 2xF_5 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2s}\right) + 2F_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2s\sqrt{2}}\right) + 2F_5 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xsx\sqrt{5}}\right) + F_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{4xs}\right) \right] \quad (5.34)$$

$$w_5 = \frac{1}{2x\pi xG} \left[ F_5 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{1}\right) + 2xF_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xs}\right) + F_0 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2s\sqrt{2}}\right) + 2F_5 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{4s}\right) + 2F_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{2xsx\sqrt{5}}\right) + F_1 \ln \left(\frac{\frac{b}{a}}{4xs\sqrt{2}}\right) \right] \quad (5.35)$$

Kazık başlığının rijit olması nedeni ile kazıklar eşit miktarda oturacağından: (5.33) ve (5.34) denklemleri eşitlebilir:

$$w_0 - w_1 = 0 \quad (5.36)$$

ayrıca (5.34) ve (5.35) denklemleri eşitlenirse ;



$$w_0 - w_5 = 0 \quad (5.37)$$

denklemleri elde edilir. Bu sırada (5.36) ve (5.37) denklemlerinde  $2\pi G$  ve  $\ln(b/a)$  terimleri karşılıklı olarak iptal edilebilir. Diğer denge denklemleri yine  $F_i/F$  şeklinde taraf tarafa  $F$  ile bölünerek aşağıdaki şekli alırlar:

$$F_0 \ln(2s) + F_1 \ln(2/s) + F_5 \ln(5/4) = 0 \quad (5.38)$$

$$F_0 \ln(2\sqrt{2}s) + F_1 \ln(5) + F_5 \ln(\sqrt{2}/s) = 0 \quad (5.39)$$

Bu aşamadan sonra (5.32), (5.38), (5.39) denklemlerinin ortak çözümü ile herhangi bir kazık aralığı ( $s$ ) değeri için Kuvvet Oranları  $F_i/F$  ve  $F_i$  yükleri bulunur. Kazıkların oturma miktarları aynı olduğundan (5.33), (5.34) veya (5.36) denklemlerinden istenilen biri kullanılarak grubun boyutsuz oturması ( $w' = 2\pi Gw/F$ ) bulunur. Bu değerden ise grup içindeki bir kazığın etkileşim nedeni ile değişmiş olan yatak katsayısı ( $k_i$ ) elde edilir:

$$k_i = \frac{2\pi GF}{w} k_i \quad (5.40)$$

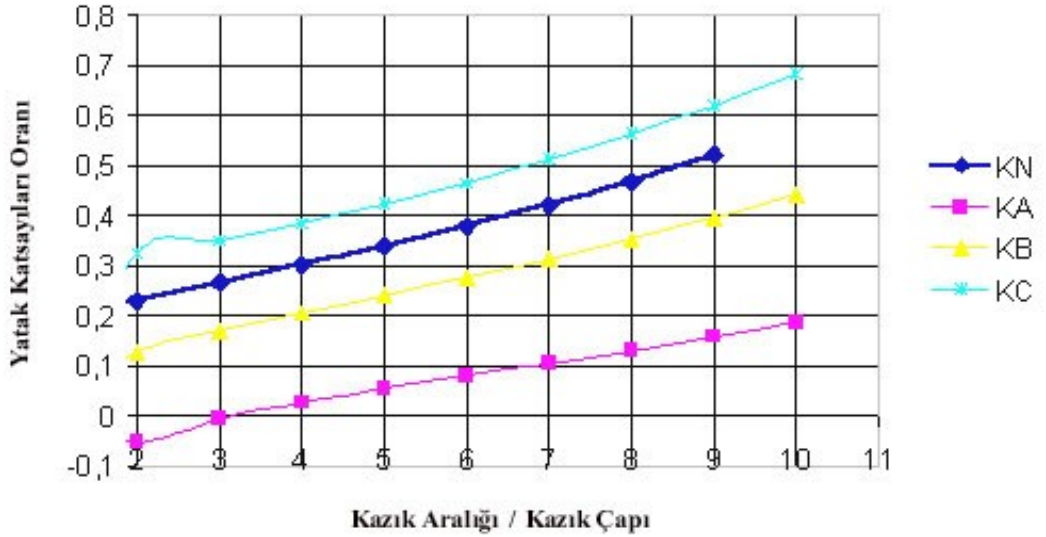
tek kazık için ise (5.25) ile:

$$k = \frac{2\pi G}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} k \quad (5.41)$$

ifadesi geçerlidir. Denklem (5.40) (5.41) ye bölünürse büyük gruptak olduğu gibi küçük gruptaki bir kazığın etkileşim nedeni ile değişmiş olan yatak katsayısının tek kazığın yatak katsayısına oranı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{k_i}{k} = \frac{F_i}{w' \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5.42)$$

Bu son denklem aynen yukarıda büyük grupta olduğu gibi kullanılarak kazık başlarının oturması hesaplanır.



Şekil 5.17 Kazık Yatak Katsayıları Oranları (Kıldır,1998)

Şekil 5.17 bu yöntemle 9 kazıklı grup için değişik kazık aralıkları seçilerek hesaplanmış olan etkileşime uğramış kazık yatak katsayılarının; grup dışındaki etkilenmemiş kazık yatak katsayısı oranlarını göstermektedir. Bu hesaplarda; kenar orta kazık için bulunan değerlerin kullanılması gerek model testleri ve gerekse elastik yarı ortam mekaniği çözümleri ile daha yakın çözümler vermektedir. Bu şekilde eğriler en alttan başlamak üzere KA merkez kazığın, KB kenar orta, KC köşe kazık için yatak katsayısı oranlarını vermektedir. KN ise ortalama yük için verilmiştir. Burada görülen ilginç nokta, küçük kazık aralıklarında merkez kazığın negatif yük alması olmaktadır. Bu durum için, bu kazığın çakılmasına gerek olmayacağı yargısına varılabilir. Burada sunulan yöntem, diğer küçük kazık grupları için (örneğin 25 kazık) da uygulanabilir.

### 5.5. Rus Şartnamesine Göre Hesap

Bu şartname, oturma hesabı için bir sanal radye öngörmektedir. Bu radyenin boyutları Şekil 5.18 de gösterilmiştir:

-Kazık uçlarında AB düzlemi,

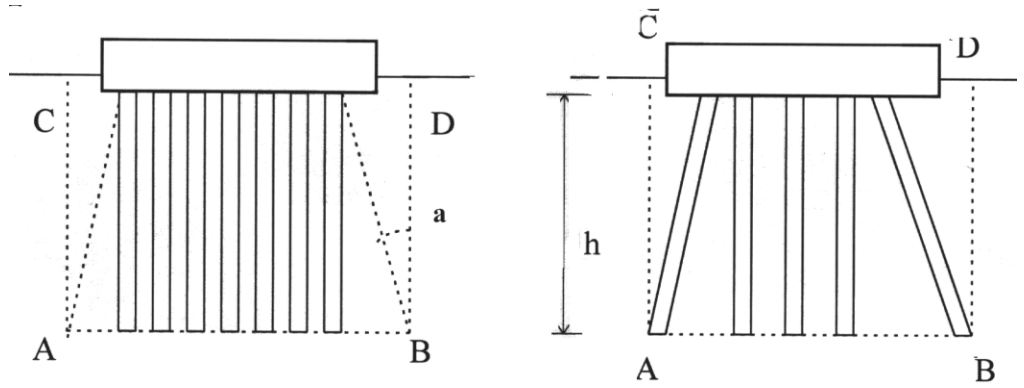
-AB düzleminde yanlarda en dış kazığın dışından itibaren  $h \tan (\Phi/4)$  mesafede olmak üzere AC ve BD kenarları,

-Eğik kazık olması halinde kenarlarda en dış eğik kazıkların ucundan geçmek üzere yerleri yeniden saptanan AC ve BD kenarları ile

tesbit olunur.

$\Phi$  açısı Kazıkların çevresinde olan bütün zeminlerin içsel sürtünme açılarının ağırlıklı ortalamasıdır. Oturma hesaplarında bu sanal radyenin ağırlığı; kazık başlığının, kazıkların ve içerdiği zeminin ağırlığına eşittir.

Bu kazıklı temelin yakınında en az 2 m yüksekliğinde bir dolgu veya bu yüke eşdeğer yük uygulayacak yapı varsa ve aynı zamanda temelin altında yumuşak çamur veya organik zemin bulunuyorsa, radyenin alt boyutu küçültülür ve AC, BD kenarları yanlarda en dış kazığın dışından itibaren  $h_{mt} \tan(\Phi/4)$  mesafede olmak üzere yerleştirilir.



Şekil 5.18 Rus Şartnamesi Uygulaması

Burada  $h_{mt}$  kazıkların tabanından yumuşak kil veya organik zeminin alt düzeyine kadar olan mesafedir. Bu şartnameye göre toplam oturmanın hesabı; sanal radye tabanından itibaren yayılacak gerilmeler ve zeminin sıkışabilirliği göz önüne alınarak alt tabakalar için oturma hesaplarının tek tek yapılarak toplanmasını öngörmektedir. Bu, aşağıdaki bağıntı ile gösterilebilir:

$$s = \beta \sum_1^n \sigma_i h_i E_i S \quad (5.43)$$

Burada:

$\beta$  = Boyutsuz bir katsayıdır. Genellikle = 0.8 alınır.

$\sigma_i$  ve  $h_i$ ; i tabakasının ortasındaki düşey gerilme ve tabaka kalınlığıdır.

$E_i$  = i tabakasının Elastik Modülüdür.

n = Tabaka Sayısıdır.

Oturma hesaplarının; sanal radyenin simetri ekseninde hesaplanacak olan düşey gerilme miktarının; efektif örtü yükünün % 20 sine eşit olduğu derinliğe kadar gözönüne alınacak bir zemin derinliği için yapılması önerilmektedir. Toplam yükün sanal radye tabanı oturma hesaplarının yüzeyinden itibaren Düşey/Yatay = 2/1 eğim ile büyütülecek bir prizma tabanına yayılması öngörülmektedir. Şartnameye göre bu zemin derinliği içinde Elastik Modülü 5 Mpa değerinin altında değere sahip bir zemin bulunuyorsa bu kez düşey gerilme miktarının efektif örtü yükünün % 10 una eşit olduğu derinliğe kadar gözönüne alınacak bir zemin derinliği için yapılması tavsiye olunmaktadır.

### Örnek 5.7.

Örnek 5.2.nin kazık ucunda (SPT)N=25 olması durumunda bu yöntem ile çözümü:

a.Kazık ucundaki SPT(N)=25 değeri; Kezdi tarafından önerilen  $\Phi = \sqrt{20N} + 15$  ampirik formülünde yerine konularak  $\Phi = 37$  derece bulunur.

b.Kazık grubunun dış çevre boyutları  $2 \times 4.27 + 1.2 = 9.74$ m ve  $2 \times 4.80 + 1.2 = 10.8$  m dir. Sanal radyenin boyutları  $9.74 + 2 \times (\tan 37/4) \times 20 = 16.25$ m ve  $10.8 + 2 \times \tan(37/4) \times 20 = 17.3$  m dir. Sanal radyenin alanı  $= 17.3 \times 16.25 = 281$  m<sup>2</sup> dir. Sanal radye seviyesinde gerilme Grup Yüğü 21561 kN olduğuna göre  $21561/281 = 76.7$  Kpa olmaktadır. Sanal taban yüzeyinden itibaren Düşey/Yatay=2/1 gerilme dağılımı uygulanarak düşey örtü yükünün % 20 sine karşı gelen etkilenen derinlik

12 m olarak tesbit edilir. Bu derinlikte yük yayıldığında boyutlar 17.3+6=23.3.m ve 16.25+6=22.25 m dir. Gerilme ise 41.6 kPa. Olur. Ortalama gerilme olan 59.0KPa alınır ve  $E_s = 55200$  Kpa değeri kullanılarak oturma= $\frac{\sigma_i h_i}{E_i} = 59 \times 12/55200= 0.01338$  m olarak hesaplanır.

### 5.6.Randolph ve Wroth Yöntemi

Kazıkların Oturmalarını Saptamak için Randolph ve Wroth (1978) zemin içindeki kazığın sıkışabilirliğini de gözönüne alarak aşağıdaki çözümü önermişlerdir:

1. Kazığın Eksenel Yük Altında Sıkışması:

Q yükü ile yüklenmiş  $r_0$  yarıçaplı ve  $E_p$  elastik modülü olan bir kazık boyunca belli bir derinlikte kazıkta birim deformasyon ( $\epsilon_z$ ) oturmanın (w) olduğu düşünülerek:

$$\epsilon_z = -\frac{dw}{dz} = \frac{Q}{\pi r_0^2 E_p} \quad (5.44)$$

şeklinde yazılabilir. Kazık yükünün çevre zemine aktarılması  $\tau_0$  kazık çeperindeki kayma gerilmesini gösterirse:

$$\frac{dQ}{dz} = -2\pi r_0 \tau_0 \quad (5.45)$$

ilişkisi ile gösterilebilir.  $\zeta = \ln \frac{b}{a}$  ise (Bkz.5.4.4);

Buradan (5.20) bağıntısındaki oturma (w)- kayma gerilmesi ( $\sigma_0$ ) ilişkisi kullanılarak:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} = \frac{2G}{\zeta E r_0^2} w \quad (5.46)$$

bulunur. Bu denklemin çözümü:

$$\frac{Q}{G_l r_0 w_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \frac{2\pi\rho \tanh \mu l}{\zeta} \frac{l}{\mu l} \frac{l}{r_0}}{1 + \frac{4\eta}{\pi\lambda(1-\nu)\xi} \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \frac{l}{r_0}} \quad (5.47)$$

şeklindedir.

Bu çözümdeki boyutsuz parametreler özetlenirse:

$\square \square d_b/d =$  Kazık Ucu Çapı/Kazık Çapı (Soğansız kazık için=1.0),

$\xi = G_l/G_b =$  Zeminin Ortalama Kayma Modülü/ Kazık Tabanı Zemininin Kayma Modülü,

$\square \square G'/G_l =$  Zeminin Kayma Gerilmesinin Derinlikle Değişimi,

$\square \square E_p/G_l =$  Kazık-Zemin Rijitlik Oranı,

$\zeta = \ln(a/b) =$  Kazığın Etki Yarıçapının Ölçüsü,

$\mu l = \sqrt{\frac{2}{\zeta (l/r_0) \lambda}} =$  Kazık Sıkışabilirliğinin Ölçüsü.

Toplam yükün (Q) çevre sürtünmesinin (Q<sub>ç</sub>) aldığı yük payından geri kalarak kazık tabanına iletilen yük (Q<sub>u</sub>) aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{1}{\cosh \mu l}}{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \frac{2\pi\rho \tanh(\mu l)}{\xi} \frac{l}{\mu l} \frac{1}{r_0}} \quad (5.48)$$

Yukarıdaki denklemde  $l/r_0 > 3\sqrt{\frac{E}{G_l}}$  olması durumunda  $\tanh(\square\square)$  1.0 a yaklaşır. Bu halde denklem şu şekli alır:

$$\frac{Q}{wr_0G_l} = \pi\rho \sqrt{\frac{2\lambda}{\xi}} \quad (5.49)$$

Bu durumda kazık tabanına iletilen yük olmadığından ötürü kazığın boyu oturmayı etkilemez.

Diğer taraftan,  $\frac{l}{r_0} < 0.5\sqrt{\frac{E}{G_l}}$  olursa denklem şu şekli alır:

$$\frac{Q}{wr_0G_l} = \frac{4r_bG_b}{(1-\nu)r_0G_l} + \frac{2\pi G' G}{G_l r_0} \quad (5.50)$$



Bu denklem rijid bir kazık için gerçekçi bir yay katsayısı saptanmasını olanaklı kılar. Tek kazık için verilen bu yöntem, araştırmacılar tarafından kazık gruplarına uygulanmak üzere genişletilmiş ise de bu gelişme burada yer almayacaktır.

Ancak aşağıda verilen yöntem, yukarıdaki çözüm ile elde edilen yay katsayısını temel alarak çözüme ulaşmaktadır.

### 5.7. Butterfield-Douglas Yöntemi ile Hesap

Butterfield-Douglas (1981) tarafından önerilmiş olan bu yöntemin teorik temeli yukarıda 5.4. kısmında verilmiş olan bilgilere dayanmaktadır.

Bu yöntemde değişime uğramamış kazıkların yatak katsayılarının toplamı bir verim faktörü ile çarpılarak kazık grubu için geçerli bir yatak katsayısı elde edilmektedir.

$K_w$  grup yatak katsayısını göstermek üzere:

$$K_w = \eta_w n k \quad (5.51)$$

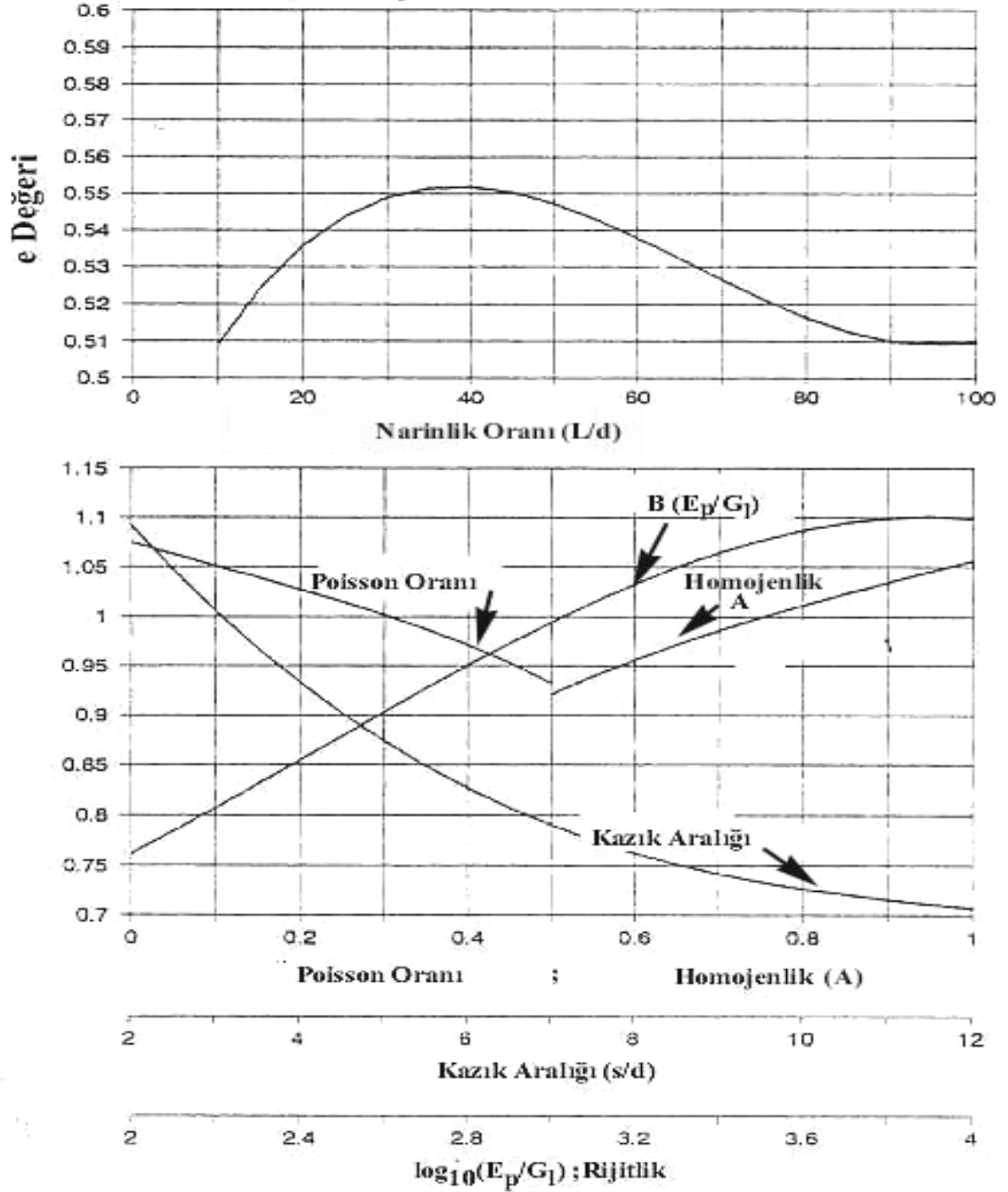
yazılır.

Burada  $\eta_w$  Verim Faktörü,

$n$  = Gruptaki Kazık Sayısı,

$k$  = Grup Etkileşimine Uğramamış Kazığın Yatak Katsayısı,

olur.



Şekil 5.19. “e” Parametresi ve Düzeltme Faktörleri

Bu uygulamanın geliştirilmesi için araştırmacılar aynı kısımda çözülen örnek ile beraber tanımlanan (5.51) ifadesindeki verim katsayısının pek çok değişken göz önüne alınarak belirlenmesini sağlamışlardır. Bu bağlamda aşağıdaki bağıntı önerilmiştir:

$$\eta_w = n^{-e} \quad (5.52)$$

Bu bağıntıda  $n$  gruptaki kazık sayısı,  $e$  ise verimi tanımlayan bir üs olarak kullanılmaktadır. Çözüm, Şekil 5.19 da görülen abaklarla yapılır. Abaklar aşağıdaki şekilde kullanılırlar:

Yöntem uyarınca önce üstte yer alan abaktan kazığın narinlik oranı kullanılarak global “ $e$ ” değeri saptanır. Aşağıdaki abakta, yatay eksenlerde görülen parametrelerin “ $e$ ” değerini düzeltmek için kullanılan eş eğrileri yer almaktadır. Yatay eksenler üzerinden parametre değerleri ile bu eğrilere girildiğinde düşey eksende düzeltme faktörleri bulunabilmektedir. Tüm faktörlerin “global  $e$ ” ile çarpılması sonucu düzeltilmiş “ $e$ ” bulunmakta ve (5.52) bağıntısında yerine konularak verim faktörü bulunmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki parametreler kullanılmaktadır:

$G$  = Zeminin Ortalama Kayma Modülü,

$d$  = Kazığın Çapı,

$L$  = Kazık Uzunluğu,

$L/d$  = Narinlik Oranı,

$A$  = Kazık Çevresi Zemininin Ortalama Kayma Modülünün Kazık Tabanı Zemininin Kayma Modülüne Oranı ,  $G/G_u$

$B$  = Kazık Elastik Modülünün Kazık Çevresi Zemininin Ortalama Kayma Modülüne Oranı,  $E_p/G_1$

$s/d$  = Kazık Aralığı/Kazık Çapı Oranı,

olmaktadırlar.

Abak ortalama bazı değerler kullanılarak hazırlanmıştır. Bu değerler sırası ile  $L/d=25$ ;  $\nu= 0.3$ ;  $s/d=3$ ;  $B=1000$  dir. Bu değerler dışında değerler kullanılarak yapılacak olan d¼zeltmelerde sapma olabilecektir. Ancak t¼m olasılıklar g¼z ¼n¼ne alındığında  $K_w$  değerindeki sapmanın y¼zde 10 ila en fazla 20 mertebesinde olacağı bildirilmektedir.

### **rnek 5.8.**

Yukarıdaki paragraflarda ¼z¼len ¼rnek bu y¼ntemle de ¼z¼lmektedir.

1. Kazığın sıkışabilirliğini de i¼eren Randolph-Wroth y¼ntemi uygulanır. (5.47) denklemindeki katsayılar aşağıdaki gibi bulunur:

$$\square\square G'/G_1=0.66; \square\square E_p/G_1=1200; \zeta=\ln(a/b)=3.9; \xi = G_1/G_b=0.66; \mu l=0.682$$

2. Bu değerler (5.47) denkleminde yerine konularak kazık başının oturma miktarını tanımlayan yatak katsayısı saptanır:

$$k=(P/w_0) =352 \text{ KN/mm}$$

3.Butterfield-Douglas y¼ntemine ge¼ilir: Kazık aralığı  $s=4.27\text{m}$  alınır  $s/d=4.27/1.20=3.56$  olur.  $\eta_w=6^{-e}$  dir.

Burada (5.51) ve (5.52) bağıntıları kullanılarak  $e=0.52$   $\eta_w=0.39$  bulunur.

Grup Katsayısı ise  $\square_w= 352 \times 6 \times 0.39=823 \text{ kN/mm}$  olur.

Buradan Grubun Oturması= $Q_g/\square\square_w=21561/823=26 \text{ mm}$  olarak bulunur.

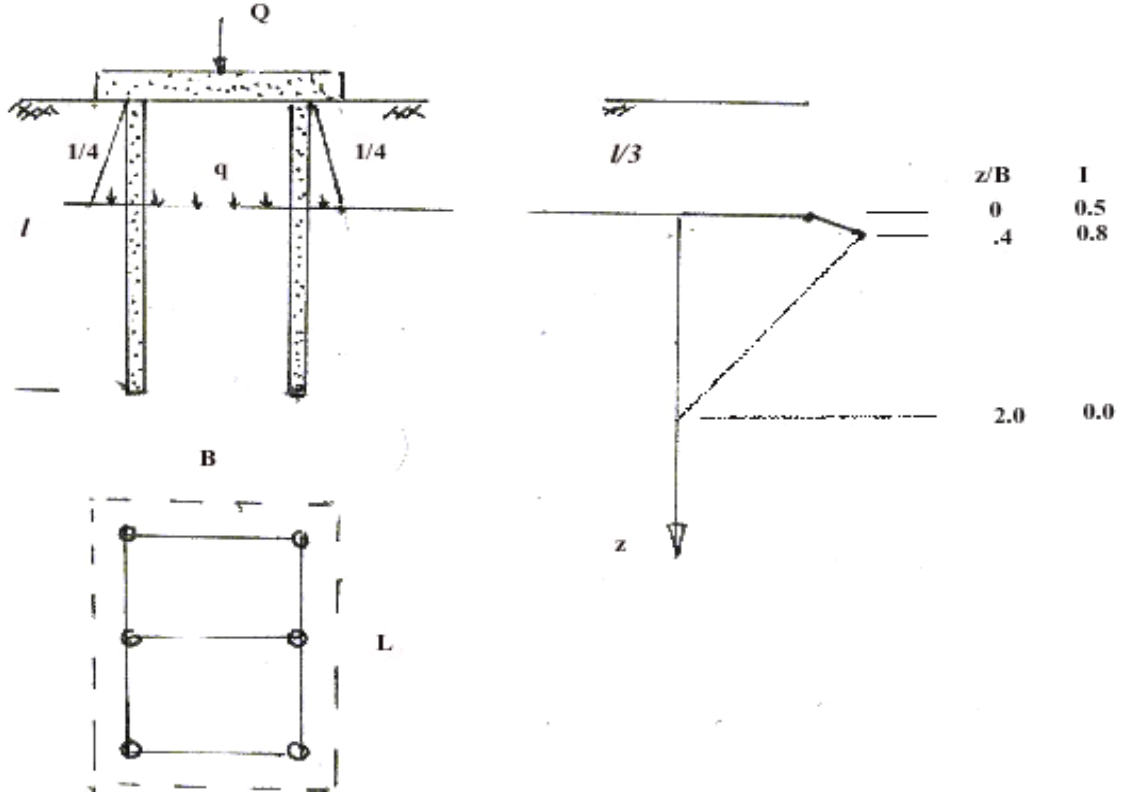
### **5.8. Birim Deformasyon Y¼ntemi ile Hesap**

Schmertmann, yarı sonsuz bir elastik zemin ¼zerine oturan bir temelin simetri eksenini boyunca derinlikle değişen d¼řey birim deformasyon

eğrisini basitleştirerek vermiştir. Burada birim deformasyon etki katsayısını zemin yüzeyinde 0.5, grup ızgarasının küçük boyutunun yüzde 40 derinliğinde 0.78 ve küçük boyut derinliğinde ise 0 olacak şekilde göstermiştir. Bir kazık grubunun oturması bu birim deformasyon tesir katsayısı diyagramı ile Randolph (1993) tarafından önerilen bir yol izlenerek hesaplanabilir. Bu hesapta grup yükü, kazık başından itibaren kazık boyunun üçte biri derinlikte tasarlanan sanal bir radye üzerinden dağıtılır. Sanal radyenin eni ve boyu düşeyde 4, yatayda 1 alınacak bir eğim ile bu derinlikte saptanır. Toplam yük bu boyutlar kullanılarak hesaplanan radye alanına bölünerek yayılı radye yükü saptanır. Birim deformasyon tesir katsayısı diyagramı alanı ile dağılı yükün çarpımı ve sonucun zeminin elastik modülüne bölünmesi ile toplam oturma hesaplanır. Uygulama, Şekil 5.20 de gösterilmektedir. Yük dağılımında yukarıda açıklanan Rus şartnamesine benzer bir yol da izlenebilir ve takiben oturma hesapları tesir katsayısı yöntemi ile yapılabilir.

Bu yöntem, Rus şartnamesinde olduğu gibi zeminin heterojen olması durumunda her tabaka için hesaplanacak oturma toplamı alınarak nihai oturmanın bulunabilmesine olanak tanımaktadır. Bu durumda aşağıdaki (5.53) bağıntısı geçerli olacaktır:

$$s = \beta q \sum_1^n \frac{I_i}{E_i} \quad (5.53)$$



Şekil 5.20. Birim Deformasyon Yöntemi

(5.53) bağıntısında  $\beta$  katsayısı genellikle 0.8 alınır.

### Örnek 5.9.

Örneğimizde sanal radye alanı 280 m<sup>2</sup>, sürşarj  $q = 21561/280 = 77$  Kpa dır. Tesir alanının hesabı ile  $\sum_1^n I_i = 5.2$  bulunur.  $E_s$  kazık tabanındaki değer olan 55200 Kpa alınırsa oturma (5.53) ifadesine göre  $77 \times 5.2 / 55200 = 0.007 \text{ m} = 7$  mm elde edilir.

### 5.9. Gerilme Dağılımı Kullanılarak Hesap

2.1.3. Kısmında Doğrusal Elastik Davranan Homojen bir Zemin Ortamı içindeki kazıklarda çevre sürtünmesi nedeni ile oluşan gerilme dağılımı anlatılmış idi. Oturma, bu gerilme dağılımı kullanarak hesaplanabilir. Kazıklardan tek tek intikal eden gerilme miktarları toplanır, oturma aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\rho_g = \sigma l / E \quad (5.54)$$

Aşağıda sunulan uygulama oturmanın, kazık ucuna yansıyan yük ihmal edilerek yalnızca çevre sürtünmesi nedeni ile oluştuğu varsayımına dayanmaktadır. Yöntem, yukarıdaki kazık grubunun çözümü ile sunulmaktadır:

### **Örnek 5.10.**

Esnek radye kabulü ile tek kazığa gelen yük 3593 KN dur. Gerilme, Tablo 2.1. ile (2.5) bağıntısı kullanılarak kazık tabanı seviyesinde ve kazık ızgarasının merkezinde hesaplanırsa dört köşe kazıkta 22.5 Kpa, iki orta kazıktan ise 21.1 Kpa olmak toplam  $\sigma = 43.6$  Kpa uygulandığı görülür. Oturmanın, çevre sürtünmesi nedeni ile oluştuğu göz önüne alınarak grup dış genişliği olan  $B= 9.74$  m nin kazık tabanından itibaren  $1.5B$  kalınlığı içinde gerçekleşeceği varsayımı ile tabandaki elastik modül 55200 kullanılırsa (5.54) ifadesi ile hesaplanan oturma  $\rho_g = 43.6 \times 14.6 / 55200 = 0.007 \text{m} = 7 \text{mm}$  olmaktadır.

## **5.10 Gözlemler**

Bu incelemede granüler zemin içindeki kazıkların gerek tek ve gerekse grup halindeki oturma hesap yöntemleri anlatılmıştır. Önce Doğrusal-Elastik ortam kabulü ile ve ampirik yöntemler kullanılarak bir örnek problem çözülmüştür. Kazık Yük-Oturma eğrilerinin elde edilmesi ve oturma analizinde kullanılmasına açıklık getirilmiştir. Bundan sonra ampirik bağıntılar, yatak katsayısı ve diğer yöntemler kullanılarak elde edilen çözümler sergilenmiştir.

Rijit kazık başlığı hali için yapılabilecek bazı gözlemlerin kaydedilmesi doğru olur: Köşe kazıklarının diğer kazıklara göre daha fazla yüklenebileceği anlaşılmaktadır. Bu yük artışı bazı hallerde 3 katına kadar çıkabilir. Projelendirme sırasında bu hususun gözönüne alınması yararlıdır. Kazık başlığının mümkün olduğunca esnek tutulmasında ve başlığın bir miktar yük almasında yarar görülmektedir. Bu halde daha fazla yük taşıyan köşe kazıkların daha az yük taşıyan orta kazıklara nazaran daha büyük bir değişmiş yatak katsayısı gösterecekleri anlaşılmaktadır. Üç-beş kazık çapı aralıklı tasarlanmış rijit başlıklı gruplardaki bazı kazıklarda Şekil 17 de görülen çekme kuvvetleri hesaplanabilmektedir. Bu gözlem sonucunda bu kazıkların grubun taşıma gücünü etkilemeden ortadan kaldırılacakları anlamı çıkarılabilir. Ancak, kazık başlığının mutlak rijit olması beklenmeyeceğinden bu sonuç doğmayacaktır.

Diğer taraftan, kazıkların birbirleri ile girişimde buldukları en büyük etkileşim mesafesinin 25 çap olduğu konusu tartışmaya açıktır. Bu sonuç, elastik disk analizinden ve ayrıca Scott'un ciddi çalışmaları sonucunda ortaya atılmaktadır. Ancak, Whitaker (1957) tarafından gerçekleştirilen model deneyleri, bu mesafenin 9 kazıklık bir grup için (3x3) en fazla 8 çap olduğunu göstermektedir. 3.4.1.3. paragrafında verilen kazık verim formülleri de bu oranın 8 çap olduğunu gösterir yöndedir. Bu husus gerek



model, gerekse iyi planlanmış arazi deneylerinin artması ile daha açıklığa kavuşacaktır.

Tablo 5.3. değişik yöntemler ile yapılan hesapların sonuçlarını içermektedir. Bu tablonun incelenmesi, çok aşırı sonuç veren Skempton bağıntısı bir yana bırakılırsa oturmanın yüksek sonuç veren üç ve daha düşük sonuç veren 5 yöntem hesaplarının ortalamaları ile 20 mm ila 40 mm arasında olacağı söylenebilir. Pratikte oturmaların birkaç değişik yaklaşımla saptanmasının yararlı olacağı görülmektedir.

| a | Sıra | Yöntem            | Denklem No. | Oturma (mm) |
|---|------|-------------------|-------------|-------------|
|   | 1    | Skempton          | (5.10)      | 116         |
|   | 2    | Poulos-Davis      | (5.15)      | 43          |
|   | 3    | Rus Şartnamesi    | (5.43)      | 13          |
|   | 4    | Gerilme Dağılımı  | (5.54)      | 7           |
|   | 5    | Meyerhof          | (5.11)      | 19          |
|   | 6    | Vesic             | (5.13)      | 18          |
|   | 7    | Birim Deformasyon | (5.46)      | 7           |

|      |   |                         |        |    |       |
|------|---|-------------------------|--------|----|-------|
| 5.3. | 8 | Yay Modeli              | (5.28) | 15 | Tablo |
|      | 9 | Butterfield-<br>Douglas | (5.51) | 26 |       |

Oturma Hesaplarının Sonuçları

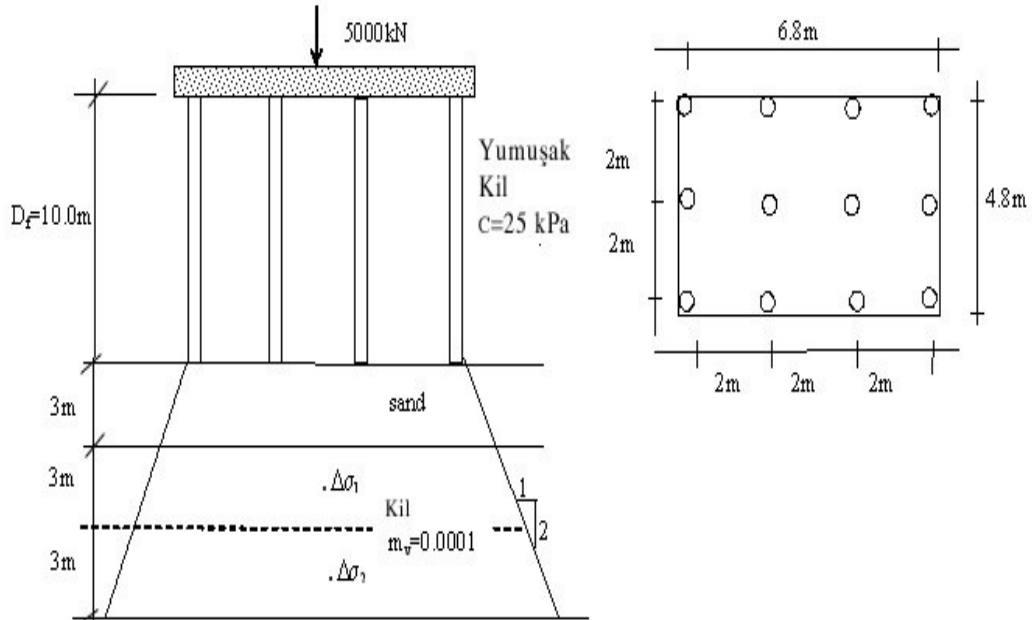
### 5.11. Klasik Yöntemle bir Oturma Probleminin Çözümü

Bu tür çözümde kazıklı temelin 2/3 derinliğinde bir radye olduğu varsayılır. Yük, bu sanal radyeden itibaren dağıtılır ve bilinen yöntemlerle oturma hesaplanır. Kimi araştırmacı, hesabı 2:1-(D:Y) basınç dağılım diyagramı ile dağıtmayı uygun bulur. Bu arada 4:1-(D:Y) dağıtma ile arazi gözlemlerine yakın sonuçlar alınabildiği de bilinmektedir.

### **Örnek 5.11**

10 m uzunluğundaki 12 kazıktan oluşan bir grup, kum tabaka üzerine oturmaktadır. Kazıkların çapı 0.80 m dir. Merkezden merkeze 2.0 m aralıkla çakılmışlardır. Kazık başlığı üzerinde başlık yükünü de içeren 5000 kN yük vardır. Grup geometrisi, zeminin özellikleri ve kazıklı temelin görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Burada oturma miktarı 2:1-(D:Y) basınç dağılım diyagramı kullanılarak hesaplanacaktır.



Kazık alanında ortalama gerilme:

$$\Delta\sigma = 5000/(6.8 \times 4.8) = 153.2 \text{ kN/m}^2$$

2:1 dağılıma ile kil zemini 3.0 er metrelik iki katmana ayırdığımızda üst katmanın ortasındaki gerilme :

$$\Delta\sigma_1 = 5000/((6.8+4.5) \times (4.8+4.5)) = 47.6 \text{ kN/m}^2$$

alt katmanın ortasındaki gerilme:

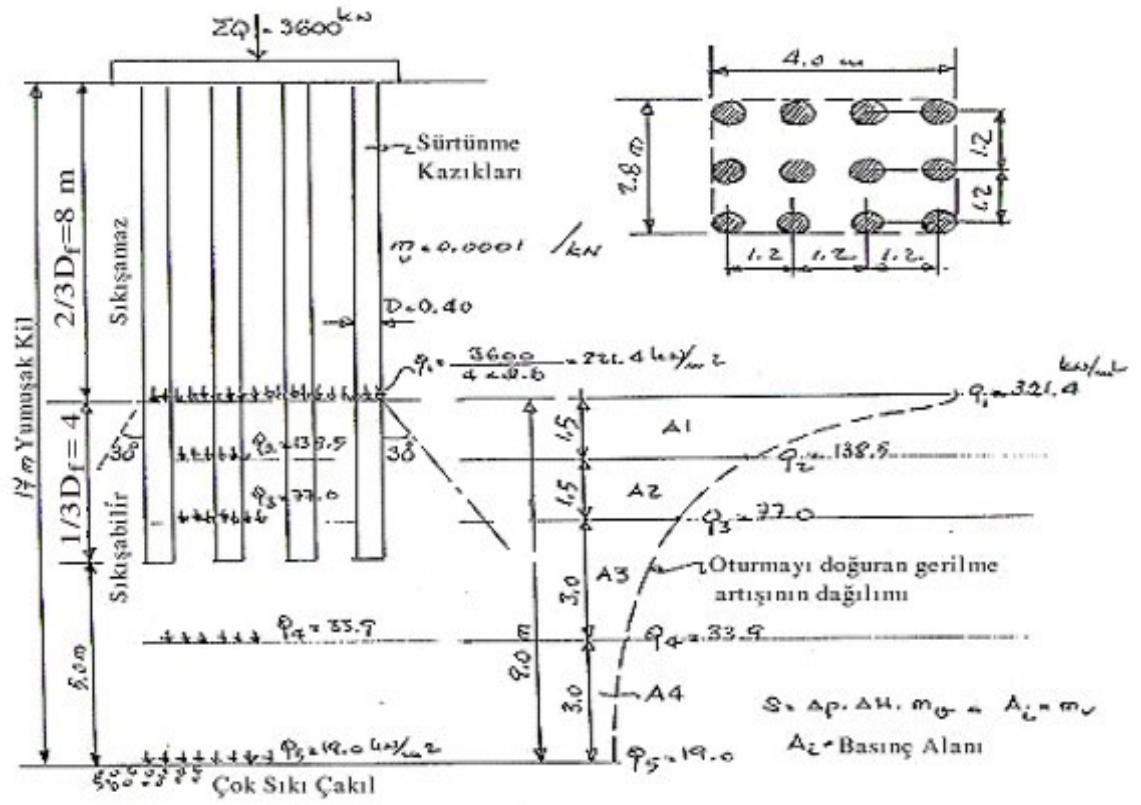
$$\Delta\sigma_2 = 5000/((6.8+7.5) \times (4.8+7.5)) = 28.4 \text{ kN/m}^2$$

Buradan Hacimsel Sıkışma Modülü  $m_v$  kullanılarak oturma miktarı s:

$$s = 3 \times 0.0001 \times (47.6 + 28.4) = 0.0228 \text{ m} = 2.28 \text{ cm bulunur.}$$

### Örnek 5.12

Aşağıdaki Şekilde gösterilen grup, yumuşak bir kil zemin içindedir. Böyle bir grubun oturma miktarı; grup yükünün kazık boyunun 2/3 ü derinliğinde olduğu varsayılan bir radyenin üzerine etki ettiği varsayımı ile yapılır. Bu derinlikten itibaren 30 derecelik bir açı ile yayıldığı varsayılan basınç, derinlikle dağıtılır ve örneğin A1, A2, A3 ve A4 ile gösterilen dört tabakadaki etkisi toplanarak toplam oturma bulunur. Bu tabakaların ortasında oluşan basınç; dağılım ile saptanmış ve  $q_1, q_2, q_3, q_4$  olarak gösterilmişlerdir.



Hesap aşağıdaki gibidir:

$$A_1 = \frac{1}{2} (321.4 + 138.5) \times 1.5 = 345 \text{ kN/m}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} (138.3 + 77.0) \times 1.5 = 162 \text{ kN/m}$$

$$A_3 = \frac{1}{2} (77.0 + 33.9) \times 3.0 = 166 \text{ kN/m}$$

$$A_4 = \frac{1}{2} (33.9 + 19.0) \times 3.0 = 345 \text{ kN/m}$$

$$s_1 = 345 \times 0.0001 = 0.0345$$

$$s_2 = 162 \times 0.0001 = 0.0162$$

$$s_3 = 166 \times 0.0001 = 0.0166$$

$$s_4 = 79 \times 0.0001 = 0.0079$$

$$s = 0.0752 \text{ m} = 7.52 \text{ mm}$$

Oturmanın hemen yarısının yukarıdaki 1.50 m lik kilin sıkışmasından olduğuna dikkat edilmelidir.

## KISIM 6. YANAL YÜK TAŞIYAN TEK KAZIĞIN DAVRANIŞI

### 6.1. Yanal Yük Taşıyan Kazıkların Çözüm Yolları Hakkında Genel Görüşler

Bu kısımda yanal yük taşıyan tek kazıkların davranışı ele alınacaktır. Bu problemin çözümü için değişik yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler içinde pratikte en fazla geçerlilik kazanmış olanları aşağıda açıklanacaktır. Tek kazığın yanal yüklere karşı dayanımının hesabında genelde üç yaklaşım tarzı vardır:

Birinci yaklaşım Broms (1964a ve 1964b) ve sonra Brinch Hansen (1961) tarafından ortaya atılmış olup; kazığın mekanik ve dayanım özelliklerini ve kazık üzerine gelen zemin yanal basınçlarını statik ilişkiler ve limit dayanım ilkeleri içinde ele alarak çözüm sunan bir yöntemdir. İkinci yaklaşım; zeminin gerilme-ötelenme ilişkisini zemini temsil eden yayın mekanik özelliklerine bağlayarak tanımlamaktadır. Bu durumda kazık çevresindeki zemin, yaylarla temsil edilir.

Yayın mekanik özelliği ise, ötelenme ile yük arasındaki ilişkiyi doğrusal veya doğrusal olmayan bir davranış biçimini tarif edecek şekilde tanımlanabilir. Yukarıda da söz konusu edildiği gibi mühendislik dilinde, bu yay özelliklerine “yatak katsayısı” denir. Tekrarlayalım ki bu tür çözüm ilk defa, yüzeysel temellerin yapı-zemin etkileşimi problemini çözmek için Winkler adlı bir bilim adamı tarafından ortaya atılmıştır ve bu nedenle modele “Winkler Modeli” de denir. Modellerde iki husus önem kazanmaktadır.

Bunlardan birincisi kazık boyunca herhangi bir derinlikte kazık ile zemin arasındaki gerilme-ötelenme ilişkisinin niceliği, ikincisi ise bu

ilişkinin kazık boyunca derinlikle değişmesinin niceliğidir. Tarihsel açıdan bakılırsa; konuya yapılan ilk yaklaşımlardaki modeller kazık boyunca herhangi bir derinlikte yük ile ötelenme arasında doğrusal davranış ilişkisi olduğu kabulüne dayandırılmışlardır. Daha sonraki yıllarda ise, aynı niteliğin tanımı için p-y eğrileri olarak bilinen ve zemin-kazık etkileşimini doğrusal olmayan davranış biçimleri ile kil, kum vb zeminler için özgün şekilde ifade eden modeller ortaya atılmıştır. İlerleyen yıllarda ise p-y eğrilerinin uygulama sonuçlarını çeşitli kazık-zemin durumlarında gözleyen bazı araştırmacılar bu sonuçları istatistik analizler ile elde ettikleri bulgularla tanımlamış ve yeni pratik yöntemler önermişlerdir.

Yukarıda açıklandığı gibi bu yaklaşımlardaki ikinci husus, yatak katsayısının kazık derinliği boyunca sabit olup olmadığı ve eğer sabit değilse nasıl değişeceği sorusudur: Bu katsayısının öngeriilmeye uğramış zeminlerde derinlikle değişmeyen, yumuşak kil ve granüler zeminlerde ise derinlikle değişen özellikte olduğu kabul edilir. Araştırmalar, bu ikinci halde derinlikle doğrusal orantılı bir değişim kabulü ile yapılan hesapların pratikte yeterli olduğu sonucuna varmışlar ve bu varsayımdan hareket eden çözümler üretmişlerdir. Üçüncü yöntem ise kazık-zemin etkileşimini sürekli ortam mekaniği çözümleri çerçevesinde görmektir. Tasarım ve analiz açısından yararlı olan pek çok çözüm; bu yolu izleyen araştırmacıların yıllar boyunca devam ettirdikleri sistematik çabaların sonucudur. Bu çözümlerin son yıllarda ortaya atılanları; genelde doğrusal elastik davranan bir zemin ortamının kabulü ile ve sonlu elemanler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir.

Bu kitapta elastik ortam çözümleri kapsamında, ankastre başlı kazıklar için varolan çözüm yöntemlerine yer verilmiştir. Mühendislik uygulamaları açısından, kazık başlığına eklemelerle bağlı varsayılan kazık

gruplarının çözümünün kolaylığına karşıt olarak pratikte ankastre başlı kazık çözümlerinin anlamlı oldukları açıktır. Kısımın sonunda, bu çözüm yöntemi ile elde edilen bazı sonuçlar “yatak katsayısı” kabulü ile elde edilen kimi çözüm sonuçları ile karşılaştırılmışlardır.

Yanal yük taşıyan kazıklı temellerin tasarımı için önce grup için tasarlanan bir kazığın boyu ve kesidi saptanır. İkinci aşamada, kazıkta meydana gelen kesme kuvveti, moment, dönme ve ötelenme hesaplanır ve kazığın yeterli olup olmadığı sorgulanır. Örneğin hesaplanan ötelenme şartnameye uyuyorsa bu defa ötelenme-zemin reaksiyonu ilişkilerine başvurulur yanal yükten dolayı yatay zemine yaslanan kazığın, zeminin taşıma gücünü zorlayıp zorlamadığı kontrol edilir. Bu aşamada sonuç olumlu ise tek kazığın yanal taşıma gücü belirlenmiş ve kazık bu açıdan bakılarak tasarlanmış olur. Bu değer bir güvenlik sayısına bölünerek servis yükü saptanır. Yapıdan aktarılacak toplam yatay kuvvet bu kapasiteye bölünerek bir grupta kaç kazık olması gerektiği saptanır. Bu aşamadan sonra grup içindeki kazıklararası etkileşim nedeniyle belirecek olan taşıma gücü değişiklikleri gözönüne alınarak kazıkların grup içinde kullanılmasına yönelik hesaplar yapılır; ötelenme ve kazık kuvvetleri hesapları kazık grubu için yinelenir. Bu çözümlerde gerekli hallerde kazığın kazık başlığına bağlanması “serbest” veya “ankastre” olarak tanımlanır. Kazıklı temellerin yapımı açısından bu deyimlerin anlamları Kısım 7 de ayrıca açıklanacaktır. Bu Kısımda yukarıda ana hatları verilen yaklaşımlar içinde en belirgin görülen yöntemler sunulacaktır.

## **6.2. Broms Yöntemi**

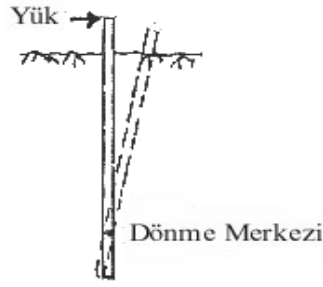
### **6.2.1. Genel**



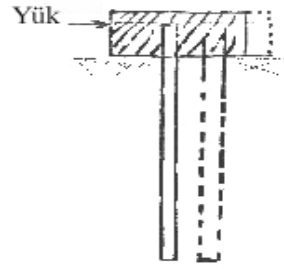
Bu yöntem (Broms 1964a,1964b) tarafından yanal yük taşıyan kazıkların nihai taşıma gücünü saptamak amacı ile teklif edilmiştir. Teori bu amaca “limit veya sınır değer” kavramı ile yaklaşmaktadır. Dayanım yapılarının davranışında olduğu gibi yanal yük taşıyan bir yapı zemini zorladığında zemin gerilmeleri zeminin limit basınç dayanımına (bir diğer deyişle göçme gerilmesine veya taşıma gücüne) doğru bir artış gösterir. Limit durumda ise genellikle pasif gerilme durumuna varılır ve yapı üzerindeki zemin reaksiyonu pasif basınç olur. Diğer taraftan; zeminle etkileşmekte olan kazıklar da ötelenmeye uğrar ve eğilirler. Bu sırada kazığın kritik bir kesidindeki moment dayanım momentini aşarsa kazık o kesitte kırılır ve bir “plastik mafsal” oluşur. Ancak kazığın teorik anlamı aşağıda belirtilecek olan “boyu” bu davranışı etkiler. Bu etkiye ek olarak kazık başının serbestliğinin rolü gözönüne alınmalıdır: Kazık başı kazık radyesi ile monolitik bir bağlantı oluşturur. Bu bağlantı; yapıım şekline bağlı olarak kazık başının üst yapıdan uygulanan moment nedeni ile dönmesine izin verebilir veya vermeyebilir. Kazıkların davranışına ilişkin olan bütün bu kavramlar yalnızca Broms’un teorisi için değil, hemen her yaklaşımdaki tanımlar için geçerlidir. Bu hususlar, aşağıdaki Şekil 6.1 aracılığı ile açıklanacaktır:

Şekil 6.1 (a) ve (b), belli bir zemin içindeki analitik anlamı aşağıdaki aşamalarla açıklanacak olan “kısa” kazıklar olsun. Birinci halde kazık başı dönmesine izin verilmektedir, ikinci halde ise dönme yasaklanmış durumdadır. Bu durumdaki bir kazık Şekil 6.1 (a) da gösterildiği birinci halde yanal yük altında bir dönme merkezi etrafında döner ve merkezin üstünde kalan kısım ile altında kalan kısım komşu zemine şekilde görüldüğü yönlerde yüklenir.

Şekil 6.1(b) de gösterilen ankastre başlı kazık ise bir rijit bütün olarak yükün uygulandığı yönde hareket eder ve kazık boyu boyunca önündeki zemine yüklenir. Her iki durumda hareket biçimlerinin farklılığı nedeni ile kazık boyunca basıncın dağılımı değişik olur. Bu basınç dağılımının niteliği zeminin cinsine de bağlıdır. Broms, çözümleri Granüler ve Kohezyonlu zeminler ayrımı içinde vermiştir. “Kısa Kazık” halinde göçme; zeminin limit direncine erişildiğinde görülür; dolayısı ile bu halde bir zemin göçmesi söz konusudur.

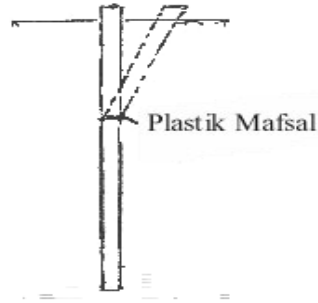


6.1(a) Serbest Başlı Kazık

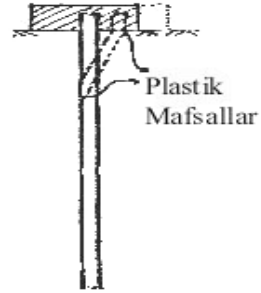


6.1(b) Ankastre Başlı Kazık

Şekil 6.1 Kısa Kazıklarda Hareket



6.2. (a) Kazık Boyunda Plastik Mafsall



6.2. (b) Kazık Boyunda ve Başında

Plastik Mafsall

Şekil 6.2. Orta ve Uzun Kazıklarda Mekanizma

Şekil 6.2.a ve 6.2.b de ise kazık boyunun bir miktar uzadığı varsayılmıştır. Bu halde yanal yük altındaki serbest başlı bir kazığın tek bir merkez etrafında rijit bir tüm olarak dönmesi zorlaşır ve kazıkta maksimum moment kesidinde moment dayanımına varıldığında bir plastik mafsallık meydana gelir, diğer bir deyişle kazık kırılır. Kazık başının ankastre olması durumunda ise kazık başı kesidindeki negatif momentin kazığın moment dayanımına varması ile kazık aynı şekilde kırılmakta ve kazık başında bir plastik mafsallık oluşmaktadır. ( Kazığın yükün ters tarafındaki dış yüzünde basınç gerilmesi yaratan moment pozitif olmaktadır.) Bu durumdaki bir kazığın boyuna “orta boy” denmektedir. Bu ankastre başlı kazığın boyunun bir miktar daha uzatıldığı düşünüldüğünde ise plastik mafsallık yalnızca kazık başında değil, daha derindeki bir kesitte de bu kez pozitif momentin kazığın moment dayanımına varması ile oluşacaktır. Kazığın kırılmasını gösteren bu haller Şekil 6.2 a. ve b. de gösterilmektedir.

Bu yaklaşıma göre göçme; ya yalnızca zemindeki basıncın zemin dayanımını aşması sonucunda zeminin göçmesi ya da zemin gerilmesi zeminin taşıma gücü olarak tanımlanabilecek olan limit değerde iken kazıkta oluşan maksimum momentin kazık kesidinin moment dayanımını aşması ile oluşmaktadır. Teori, yüklenen zeminin niteliğine göre; nihai taşıma gücünü yaratacağı varsayılan zemin direncinin kabulü ile başlamaktadır. Bunu takiben kazık-zemin etkileşmesi sonucunda kazıkta plastik mafsalların oluşmasını öngören limit teoriyi; statik denge yaklaşımları ile kapsayan çözümler önerilmektedir. Pratik bakımdan çok elverişli çözüm olanakları sunduğu için yanal yük taşıyan kazıkların nihai taşıma gücünün bu yöntemle hesaplanması uygun görülmektedir. Broms

kazık yüküne bağı olarak oluşan kesit kuvvetleri ve ötelenme miktarlarının hesapları için de çözümler önermiştir. Ancak bu çözümler daha sonra sunulacak olan ve yatak katsayısını kullanan yöntemlerden farklı olmamaları nedeni ile burada verilmeyecektir. Yukarıda açıklanan mantık dizinine koşut olarak bu yöntem aşağıdaki kategorilere ayrılarak incelenir:

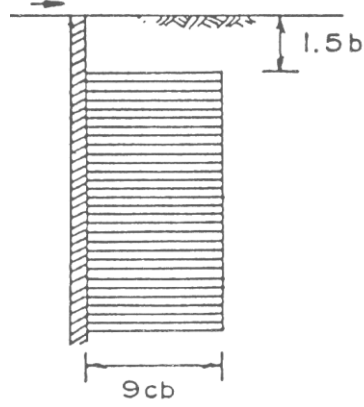
- a. Kohezyonlu zemin içindeki “uzun” kazıklar,
- b. Kohezyonlu zemin içindeki “kısa” kazıklar,
- c. Granüler Zemin içindeki “uzun” kazıklar,
- d. Granüler zemin içindeki “kısa” kazıklar,

Çözümler ayrıca yukarıdaki her hal için kazığın kazık başlığına mafsallı veya ankastre olup olmasına bağı olarak değişmektedir.

## 6.2.2. Kohezyonlu Zemin İçindeki Kazıklar

### 6.2.2.1. Kohezyonlu Zeminde Limit Zemin Direnci

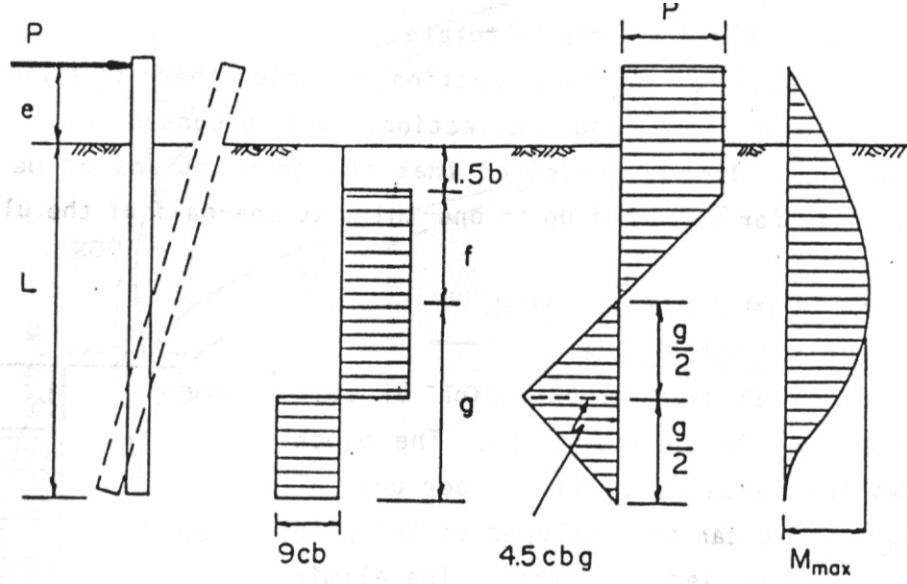
Broms, yumuşak bir kil içindeki bir kazığın yatay yük altındaki nihai taşıma gücünü hesaplayabilmek için basitleştirilmiş bir zemin profilinde bir limit direnç dağılımını benimsemiştir. Bu dağılım; b kazık çapını, c zeminin drenajsız direncini (kohezyon) göstermek üzere kazık başı seviyesinden itibaren 1.5b derinliğe kadar sıfır ve bu derinlikten kazık tabanına kadar sabit olarak 9c kabul edilen bir şekilde alınmaktadır. Bu tanımlama Şekil 6.3. de verilmektedir.



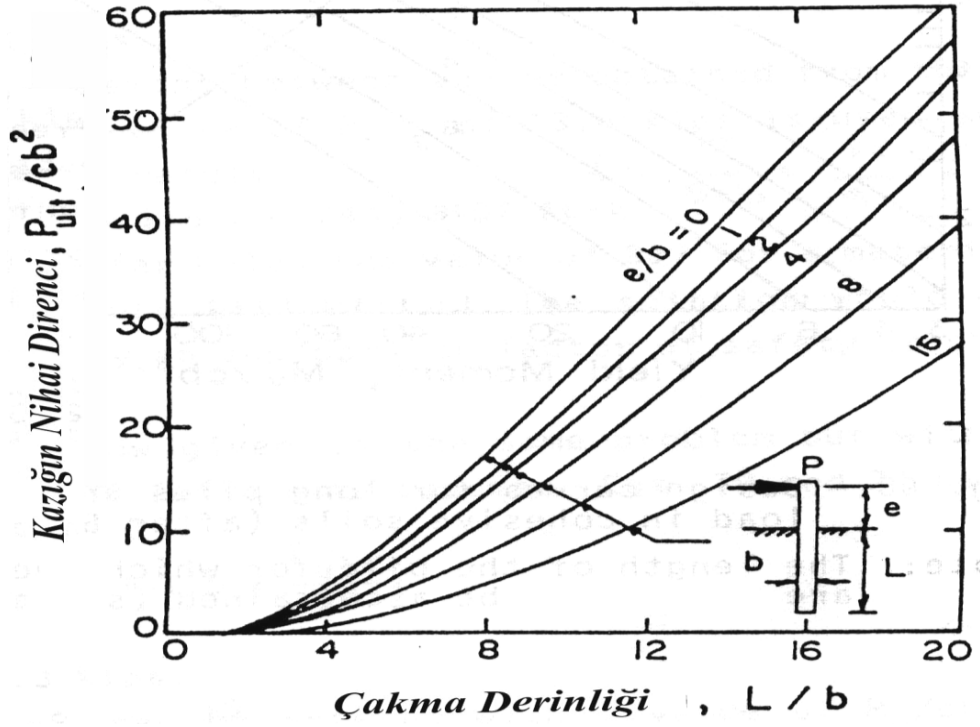
Şekil 6.3. Yumuşak Zeminde Kabul Edilen Limit Zemin Direnci (Broms 1964a)

#### 6.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Serbest Başlı Kazıklar

Şekil 6.4; 6.2.1. kısmında sözü edilen başlangıç uzunluğundaki serbest başlı kısa bir kazık için verilmiştir. Kazıkta meydana gelen Kesme kuvvetlerinin ve Momentin kazık boyunca değişimi bu şekilde gösterilmiştir. Kısa bir kazık, rijit bir tüm olarak hareket eder ve döner. Bu nedenle Şekil 6.4 de gösterilen kesit kuvvetleri, statik denge denklemleri yardımı ile kolayca hesaplanabilir. Ancak, bu kuvvetlerin değişimini gösteren denklemlerin burada verilmesine gerek görülmemiş olup bu kısa kazık hali için çözüm sonuçları, Şekil 6.5 de verilen abakta yansıtılmıştır. Bu abaklarda  $e$  kazığın zemin yüzeyi üzerinde kalan uzunluğunu,  $L$  boyunu,  $b$  çapını,  $P_{ult}$  taşıyabileceği limit yükü (nihai yanal direnç) göstermektedir.

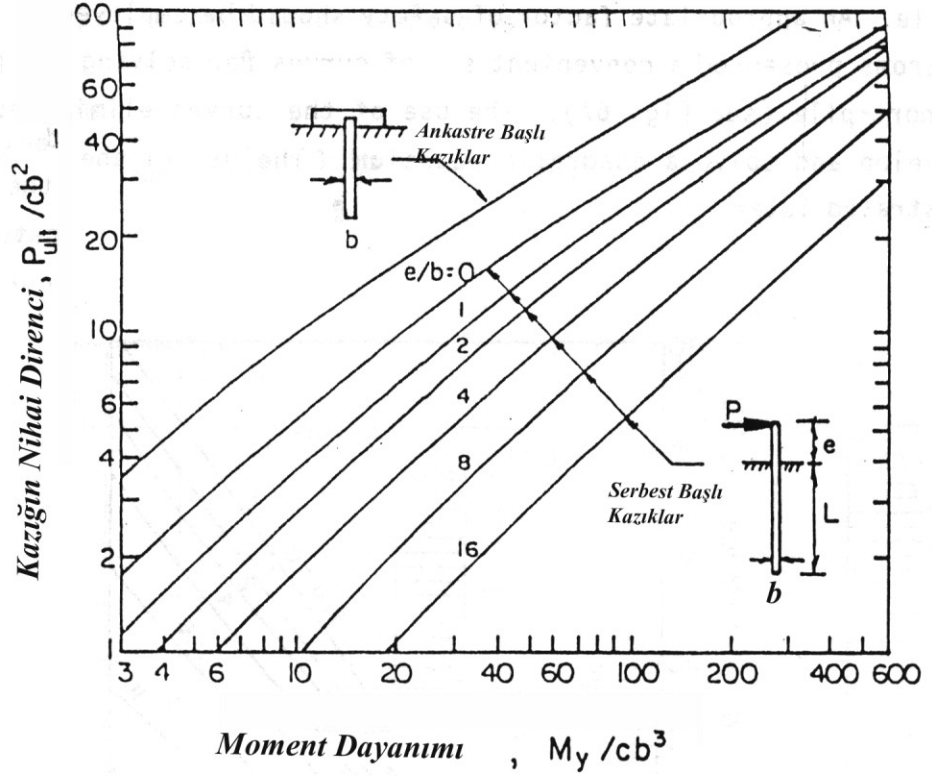


Şekil 6.4. Yumuşak Kil Zemin İçindeki Serbest Başlı bir Kısa Kazık Boyunca Kesme Kuvveti ve Moment Diyagramları (Broms 1964a)



6.5. Serbest Başlı Kısa Kazığın Limit Yüğü (Broms 1964a)

Kazık boyu uzatıldığında; kazıkta maksimum momentin oluştuğu enkesidin tümü üzerindeki betonarme çeliğinde akma sınırına varıldığında bu enkesitte bir Plastik mafsal oluşur. Bu durumda mafsalın oluşacağı derinlik  $1.5b+f$  ile gösterilmiştir. Varılan çözüm; kazığın kesitteki moment direnci  $M_y$  ile gösterilerek Şekil 6.6 da “serbest başlı kazıklar” olarak tanımlanan eğri takımını içeren bir boyutsuz değişkenler abağı ile sunulmuştur.



Şekil 6.6. Uzun Kazığın Limit Yüğü Şekil 6.3. (Broms 1964a,1964b)

Yukarıda değinildiği gibi kazık boyu uzadığında çözüm; kazık kesidinin dayanım momentine bağlı olarak elde edilebilir. Bu aşamada cevaplanması gereken soru, belli bir tasarım için kazığın uzun veya kısa olduğunun tasarımın başlangıcında nasıl bilinebileceğidir. Bu husus, şu şekilde saptanır:

Hesaplara kısa kazık kabulü ile başlanır. Bu durumda Şekil 6.4 e bakılarak Maksimum Moment için:

$$M_{\max} = P(e + 1.5b + f) - 9cbf^2 / 2 \quad (6.1)$$

ifadesi yazılabilir. Diğer taraftan kesme kuvvetinin sıfır olduğu derinlik :

$$f = P / 9cb \quad (6.2)$$

olduğundan

$$M_{\max} = P(e + 1.5b + 0.5f) \quad (6.3)$$

elde edilir.

$P_{ult}$  kısa kazık kabulü ile Şekil 6.5. den elde edilip (6.3) denkleminde yerine konularak maksimum moment  $M_{\max}$  saptanır. Bu değer Şekil 6.6 dan elde edilecek olan kesit dayanım momentini  $M_y$  ile karşılaştırılır. Eğer maksimum moment, kesit dayanım momentinin altında ise plastik mafsall



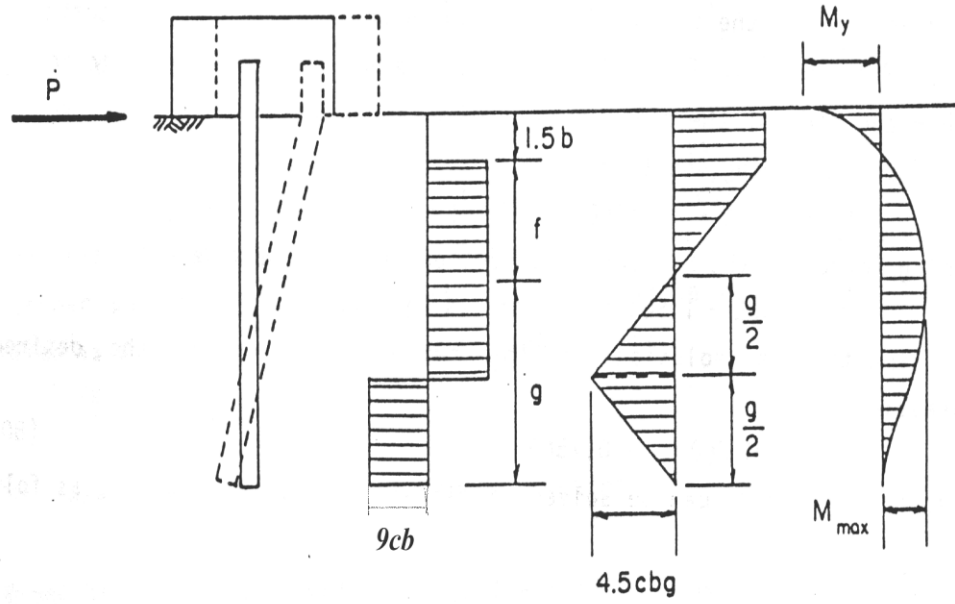
oluşmayacak demektir, kazık kısadır ve zemin göçmesi hali geçerli olur, aksi halde uzun kazık halinin geçerli olacağı anlaşılır. Bu ikinci halde ise iki bilinmeyen  $f$  ve  $P=P_{ult}$ ; kesit dayanım momenti  $M_y$  maksimum moment  $M_{max}$  değerine eşit alınıp (6.2) ve (6.3) denklemleri beraberce çözülerek bulunurlar ve nihai taşıma gücü  $P_{ult}$  değeri saptanmış olur. Bu değere, uygun bir güvenlik katsayısı uygulanarak servis yükü bulunur. Bu çözüm için (6.2) ve (6.3) denklemlerinin ortak çözümü yerine Şekil 6.6. da gösterilen abak kullanılabilirse de logaritma skalası nedeni ile okumalar sağlıklı olmayabileceğinden hesaplama yöntemi tercih olunmaktadır. Abak bir sağlama için kullanılır.

#### 6.2.2.3 Kohezyonlu Zeminlerde Ankastre Başlı Kazıklar

Kısa bir kazık olması halinde kazık, eğilip bükülmeksizin zemin içinde hareket eder, limit zemin gerilmesi durumuna kazık başından itibaren  $1.5b$  uzunluğu dışında bütün kazık boyunca aynı değerde ulaşılır. Bu durum için Şekil 6.1b ve 6.7 göz önüne alınarak bir denge denklemi yazılabilir ve limit direnç saptanabilir:

$$P_{ult} = 9cb(L-1.5b) \quad (6.4)$$

Kazığın uzun bir kazığa doğru geçişi hali Şekil 6.7 ye bakılarak izlenebilir.



Şekil 6.7. Ankastre Başlı bir Kazıkta Kesit Kuvvetleri

Bu halde belli bir uzunluğa gelindiğinde plastik mafsal kazık başında oluşacaktır. Bu anda kazık başında dönme gerçekleşebilecek ve kazığın kalan boyu rijit olarak hareket edecektir. Bu durum “orta uzun” kazık olarak tanımlanmaktadır. Maksimum Momentin görüldüğü yerde (kesme kuvvetinin sıfır olduğu kesit) Maksimum Moment ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$M_{max} = P(1.5b+f) - f(9cb)(f/2) - M_y \quad (6.5)$$

(6.2) ifadesi kullanılarak:

$$M_{max} = P(1.5b+0.5f) - M_y \quad (6.6)$$

ve kazığın alt kısmındaki kesme kuvveti diyagramı kullanılarak:

$$M_{\max} = 2.25 cbg^2 \quad (6.7)$$

bulunur.  $P_{\text{ult}}$  in hesabı için gerekli diğer iki denklem:

$$L = 1.5b + f + g \quad (6.8)$$

$$f = P/9cb \quad (6.9)$$

ile sağlanır.

Diğer taraftan kazık biraz daha uzatılması halinde ise yukarıda açıklandığı gibi maksimum moment kesidinde ikinci plastik mafsallı oluşacaktır. Bu aşama ise “uzun kazık” olarak tanımlanmaktadır. Bu halde ise (6.6) denkleminde  $M_{\max} = M_y$  olur ve

$$P = \frac{2M_y}{(1.5b + 0.5f)} \quad (6.10)$$

denklemini elde edilir. Yukarıdaki (6.9) ve (6.10) denklemleri uzun kazığın limit taşıma gücünü saptamak için kullanılabilirler. Bu değeri bulabilmek için Şekil 6.6. abağı içinde ayrı bir eğri de verilmiştir. Ancak bu eğri

yalnızca “uzun” kazıklar için geçerli olduğundan ancak kazığın “uzun” olduğunun saptanmasından sonra kullanılabilir. Bu saptama ise yukarıda serbest başlı kazık için anlatılan hesap yoluna benzer şekilde aşağıda anahtarları verilen sıra içinde yapılabilir.

Şekil 6.7 de zemin direncinin yalnız kazığın sağında olduğu varsayılarak kazık ucunda moment alınırsa

$$PL-9cb(L-1.5b)(L-1.5b)/2- M_y = 0 \quad (6.11)$$

ve yatay denge düşünülerek (6.4) denkleminin aynısı olan:

$$P-9cb(L-1.5b)= 0 \quad (6.12)$$

elde edilir. Bu iki denklemin beraberce çözümü:

$$P_{ult} = M_y / (0.5L+0.75b) \quad (6.13)$$

denklemini verir.

Bu sıra ile (6.4) ve (6.13) denklemlerinin yan yana çözülmesi sonucunda L ve  $P_{ult}$  beraberce bulunur. Bu şekilde kısa kazıktan orta uzunluktaki kazığa geçiş boyu tesbit edilebilir. Orta boy kazık davranışından uzun kazık davranışı aşamasına geçiş sınırını saptamak için ise (6.6), (6.7), (6.8)

ve (6.9) denklemleri  $M_{max} = M_y$  alınarak kullanılabilirler ve L ile  $P_{ult}$  beraberce saptanabilirler.

Özetlemek gerekirse, davranışın değiştiği bu uzunluklar, analizin uygulandığı kazığın boyu ile karşılaştırılarak nihai yük  $P_{ult}$  sözkonusu zemin ve kazık için aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunabilir:

Kısa kazıklar için (6.4)

Orta boy kazıklar için (6.6) ila  
(6.9)

Uzun Kazıklar için (6.9) ve  
(6.10)

### 6.2.3. Granüler Zemin İçindeki Kazıklar

#### 6.2.3.1. Granüler Zeminde Zemin Limit Direnci

Kohezyonlu zeminlerde olduğu gibi bu halde de iki göçme tarzı düşünülebilir: Bunlar zeminin göçmesi ile kazıkta plastik mafsall oluşması sonucunda kazık göçmesidir. Broms bu tür zeminlerde zeminin taşıma gücünü Rankine pasif basıncının üç misli olarak kabul etmiştir.

Bu duruma göre z zemin yüzeyinde itibaren derinliği göstermek kaydı ile birim kazık uzunluğundaki direnç aşağıdaki gibidir:

$$p_z = 3\gamma b z K_p \quad (6.14)$$

Burada:

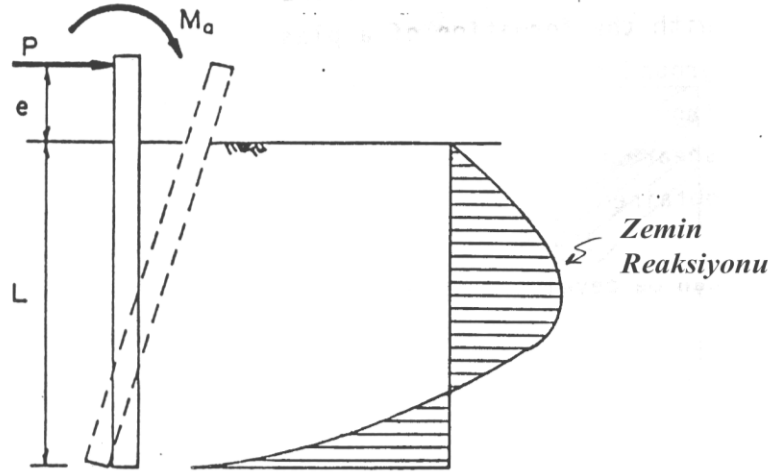
b = kazık çapı,

$\gamma$  = zeminin birim hacim ağırlığı,

$K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$  = Rankine Pasif Zemin basıncı katsayısı,

$\phi$  = Zeminin içsel sürtünme açısıdır.

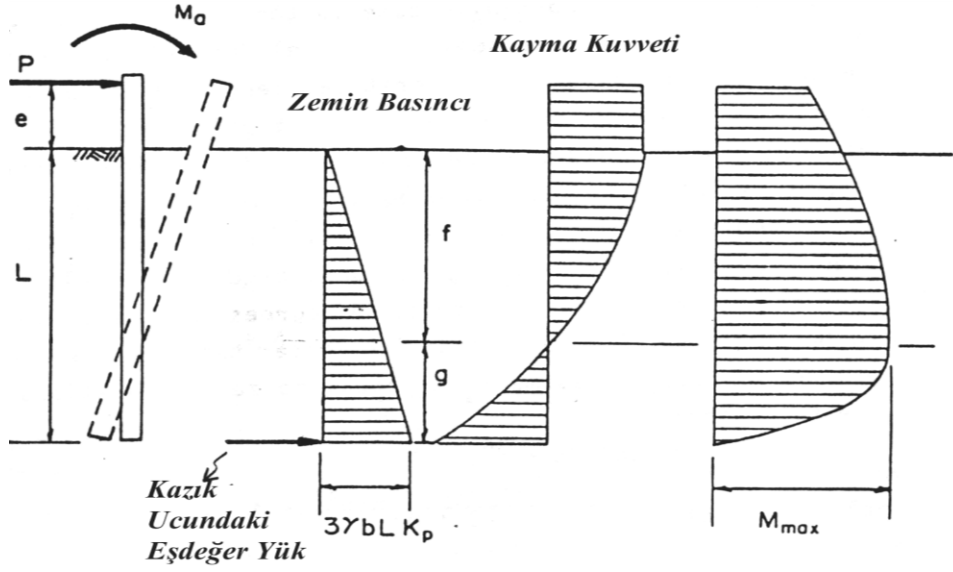
Kısa kazıkta zemin göçmesi görülür. Zemin reaksiyonunun derinlikle değişimi Şekil 6.8. de gösterilmiştir. Bu Şekilde kazık başında bir  $M_a$  momentinin gösterilmesi Broms'un izlediği yöntemle bu metinde sadık kalınması sonucudur. Zira kazığa hem  $P$  hem de  $M_a$ 'nın etkimesi halinde  $e$  değerinin arttırılması statik eşdeğerlilik açısından yeterli olacaktır.



Şekil 6.8. Granüler Zeminde Dönme Yapabilen Kısa Kazık ve Zemin Reaksiyonu

Davranış Şekil 6.9. de görülmektedir. Zemin, kazığın dönerek kendisine yüklenmesi sonucunda dönme merkezine kadar olan boy içinde zemin taşıma gücü sınırına varılması ile göçecektir. Kazık ucunda oluşan pasif basınç, Şekil 6.9 da gösterildiği gibi bir eşdeğer nokta yük ile temsil edilmektedir.

### 6.2.3.2. Granüler Zeminde Serbest Başlı Kısa Kazıklar



Şekil 6.9. Dönme Yapabilen Kısa Kazıkta Kesit Kuvvetleri

Kazık ucunda aşağıda gösterildiği gibi moment alınırsa:

$$P(e+L)+M_a = (3\gamma bLK_p)(1/2L)(1/3L) \quad (6.15)$$

Sıra ile  $M_a$  nın sıfıra eşit olması halinde ve  $P$  nin sıfıra eşit olması hallerinde ise:

$$P = \frac{\gamma b L^3 K_p}{2(e+L)} \quad (6.16)$$

$$M_a = 0.5 \gamma b L^3 \quad (6.17)$$

elde edilir.

Denklem (6.15) ile (6.17) zemin göçmesini oluşturacak bir Yük veya Moment değerini veya bu ikisinin bileşimini bulmak için kullanılabilirler. Bunu takiben f derinliğindeki Maksimum moment bulunarak kazığın moment kapasitesi ile karşılaştırılabilir.

Kayma kuvvetinin sıfır olduğu kesitte moment maksimum olacağından f mesafesi aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$P - (3fbK_p\gamma)(f/2) = 0 \quad (6.18)$$

(6.18) ifadesinden f aşağıdaki şekilde bulunur:

$$f = 0.816(P/b K_p\gamma)^{0.5} \quad (6.19)$$

Şekil 6.7 ye bakılarak maksimum pozitif moment aşağıdaki gibi saptanır:

$$M_{\max} = P(e + f) - \frac{K_p\gamma bf^3}{2} + M_a \quad (6.20)$$

veya (6.18) ifadesini (6.20) de yerine koyarak:



$$M_{\max} = P(e + f) - \frac{Pf}{3} + M_a \quad (6.21)$$

bulunur. Servis yükü seçimi için uygun bir güvenlik faktörü kullanılmalıdır.

#### 6.2.3.3. Granüler Zeminde Serbest Başlı Uzun Kazıklar

Kazık boyunun uzaması ile kazık boyunca g derinliğinde bir plastik mafsall oluşacaktır. Bu durumda f değeri (6.19) denkleminde elde edilir ve (6.21) yardımı ile  $M_a=0$  kabulü yapılarak:

$$P_{ult} = \frac{M_y}{e + 0.544 \sqrt{\frac{P_{ult}}{\gamma b K_p}}} \quad (6.22)$$

bulunur. Bazı hallerde kısa kazık halinden uzun kazık haline geçiş durumu için bir çözüm gerekebilir. Bu durumda en kısa yol kısa kazık ile başlayıp bulunan maksimum momenti kazığın moment dayanımı ile karşılaştırmaktır. Kazığın moment dayanımı maksimum momentin altında ise uzun kazık çözümleri geçerli olacaktır.

#### 6.2.3.4. Granüler Zeminde Ankastre Başlı Kısa Kazıklar

Ankastre başlı kısa bir kazık aynen ilk bulunduğu konumu koruyarak dönmeksizin ötelenecektir. Bu durumda (6.14) denklemini kullanıldığında yatay kuvvet dengesi basit bir sonuç vermektedir:

$$P=1.5\gamma L^2 b K_p \quad (6.23)$$

(Birand, 2000) de bu durumdaki kazıklarda ötelenme hesaplarının yapılma yöntemleri ile direncin ötelenmeye bağlı olarak oluşumu teorik olarak açıklanmış ve bulgular, model deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kazık boyunun uzaması durumunda ise ara bir uzunlukta kazık başında bir plastik mafsal oluşur. Bu durumda kazık başında dönme olur ve kazık rijit olarak hareket eder. Bu durumdaki zemin reaksiyonu Şekil 6.9 ile de temsil edilebilir. Limit yük kazık ucunda moment alınarak bulunabilir:

$$P_{ult} = \frac{M_y}{L} + 0.5\gamma L^2 K_p \quad (6.24)$$

Burada (6.24) P ve L için aşağıda uzun kazık davranışı paragrafında açıklanacağı şekilde çözümler ve ara uzunluk değeri ile bu değerdeki nihai yük beraberce saptanır.

#### 6.2.3.5. Granüler Zeminlerde Ankastre Başlı Uzun Kazıklar

Bu durumda hem kazık başında bir negatif moment (-M) hem de kazık boyunca f derinliğinde bir positif moment (+M) nedeni ile iki plastik mafsal oluşacaktır. Burada f değeri (6.19) denkleminde elde edilir. F noktası etrafında moment alındığında nihai yük değeri için aşağıdaki denklem bulunur:

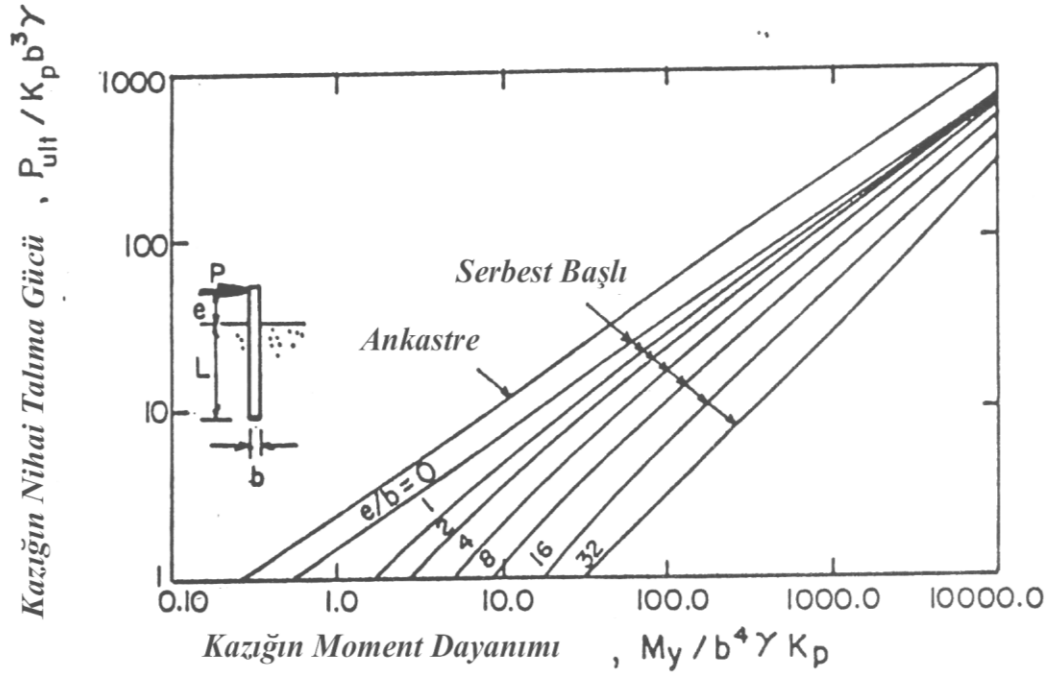
$$P_{ult} = \frac{M_y(+)+M_y(-)}{e+0.544\sqrt{\frac{P_{ult}}{\gamma b K_p}}} \quad (6.25)$$

Sık rastlanan bir durum olmamakla beraber kesit donatısının simetrik olmaması durumu düşünülerek kazığın moment dayanımının positif ve negatif momentler için iki yönde farklı olabileceği olasılığına dikkat etmek gerekir.

Broms, Granüler zeminlerdeki uzun kazıklar için Şekil 6.10 da gösterilen tasarım abağını vermiştir. Ancak bu abağın kullanılabilmesi için kazığın gerçekten uzun kazık olup olmadığının kontrolü gerekir. Bu işlem şu şekilde yapılır:

-6.23 ve 6.24 denklemleri beraberce çözülerek  $P_{ult}$  ve L bulunur.

-Davranışın kısa kazık davranışından orta boy kazık davranışına geçişindeki kazık boyu değerini bulmak için (6.24) denklemindeki  $P_{ult}$  değeri (6.25) denklemindeki değere eşitlenir ve bu yol ile sınırdaki L ve  $P_{ult}$  değerleri saptanır.



Şekil 6.10. Granüler Zeminlerdeki Uzun Kazıklar için Tasarım Abağı (Broms 1964a,1964b)

Yukarıdaki Şekil 6.6. ve Şekil 6.8 de gösterilen tasarım abaklarında ankastre başlı kazıklar için ayrıca birer eğri verilmiştir. Ancak, bu eğriler ait oldukları “uzunluk” kategorisi saptandıktan sonra ve genellikle ön tasarım veya hesapların sağlanması aşamasında kullanılırlar. Hesapların, denklemlerin çözülmesi aracılığı ile gerçekleştirilmesi tercih edilir.

#### 6.2.4. Örnekler

##### **Örnek 6.1.** Kohezyonlu Zeminde Serbest Başlı Kazık:

İşaret Levhası Taşıyan Bir Kazık

Kazık-Zemin Özellikleri:

300 mm Dış Çaplı Çelik Boru Kazık, Et kalınlığı =194 mm,  
Uzunluk=2660 mm

Moment Dayanımı = 439 KNm, Kazık Başından Serbest Mesafe = 660 mm

Zemin Drenajsız Direnci = 41.7 KN/m<sup>2</sup>

Çözüm:

1. Kazığın “kısa kazık” olduğu kabul edilerek çözüme geçilir:

$L/b = 8$ ;  $e/b = 2$  değerleri ile Şekil 6.5. kullanılarak  $P_{ult}/cb^2 = 13.5$  bulunur.

Buradan  $P_{ult} = 13.5 \times 41.7 \times 0.09 = 50.7$  KN olur.

Bu abağı kullanmak yerine bu sonuç (6.2), (6.3),(6.7),(6.8) ifadeleri kullanılarak da bulunabilir.

(6.2) ifadesinde  $P_{ult}$  yerine konursa  $f = 50.7/9 \times 41.7 \times 0.30 = 0.45$  m hesaplanır.

Buradan da  $M_{max} = 50.7(0.66 + 1.5 \times 0.30 + 0.5 \times 0.45) = 67.7$  KNm bulunur.

Bu değer moment dayanımı olan 439 KNm nin altında olduğundan kazığın “kısa kazık” sınıfına girdiği ve “zemin göçmesi” halinin geçerli olacağı sonucuna varılır.

Bu nedenle bulunan  $P_{ult}$  uygun bir güvenlik sayısına bölünerek servis yükü saptanır.

2. Çözümü daha da ileriye götürmek için kazık kırılması durumu öngörülür ve kazık boyu uzatılır: Kazık kırılması durumunda maksimum moment kesidinde kırılma momentine ulaşılacak ve kazık yükü nihai kazık yükü olacaktır. (6.3) denklemi ile:

$439 = P_{ult}(0.66 + 1.5 \times 0.30 + 0.5 \times 0.45)$  ve buradan sınırlı kazık yükü 328 KN olarak bulunur, uygun bir güvenlik katsayısı uygulanarak servis yüküne geçilir.

Şimdi kazık boyunun “uzun” kazık olması için gerekli boyu kontrol edelim:

(6.2) denklemi ile  $f = 328 / 9 \times 41.7 \times 0.30 = 2.91$  m bulunur. (6.7) den dayanım momenti kullanılarak  $439 = 2.25 \times 41.7 \times 0.30 g^2$  ile  $g = 3.94$  m elde edilir. Buradan ise (77) ile

$L = 1.5 \times 0.30 + 2.91 + 3.94 = 7.35$  m hesaplanır. Bu suretle kazık boyu bu uzunluğun üstünde ise kazık “uzun kazık” davranışı gösterecek ve mekanizmaya zemin göçmesi değil kazık kırılması durumu hakim olacaktır.

### **Örnek 6.2.** Kohezyonlu Zeminde Ankastre Başlı Kazık:

Kazık-Zemin Durumu:

0.37 m genişliğinde çelik 14HP89 profil kazık. Uzunluk=17 m. Dayanım momenti 675 KNm. Zeminin drenajsiz dayanımı) 100 Kpa, yatay yük zemin seviyesinde uygulanmaktadır.

Davranış değişimi görülen kazık uzunlukları saptanacaktır.

Çözüm:

“Kısa” kazıktan “Orta” kazığa geçiş boyu:

(6.4) ve (6.13) denklemleri yazılırsa:

$$P_{ult} = 9 \times 100 \times 0.37 (L - 1.5 \times 0.37)$$

$$P_{ult} = 675 / (0.5L + 0.75 \times 0.37)$$

Yanyana çözülür, buradan  $L= 2.09\text{m}$  ve  $P_{ult} =511 \text{ KN}$  bulunur.

“Orta” kazıktan “uzun” kazığa geçiş boyu

$$(6.6) \text{ ile } P_{ult} =1350/0.555+0.5f$$

$$(6.7) \text{ ile } g=(675/2.25 \times 100 \times 0.37)^{0.5} =2.85 \text{ m}$$

$$(6.8) \text{ ile } L=(1.5 \times 0.37+f+2.85)=3.4+f$$

$$(6.9) \text{ ile } P_{ult} =9 \times 100 \times 0.37f=333f$$

sırası ile kullanılarak  $L=5.5\text{m}$  ve  $P_{ult} =709 \text{ Kn}$  bulunur. Bulunan sınır uzunluk kazık boyu olan 17 m den küçük olduğundan kazığın “uzun kazık” kategorisinde olduğu anlaşılır. Şekil 6.6. da ankastre kazık için verilen eğrinin kullanılması durumunda ise  $M_y/cb^3=133$  ile  $P_{ult} /cb^2=58$  bulunur ve  $P_{ult} =794 \text{ KN}$  elde edilir. Bu, yukarıdaki değere yakındır. Ancak görüldüğü gibi bu bulgu abağın kullanıcıya bağlı olarak okuma sıhhatine göre değişik sonuçlar verebilecektir.

### **Örnek 6.3.** Granüler Zeminde Ankastre Başlı Kazık

Burada Örnek 6.2 de incelenmiş olan kazık granüler bir zemin içinde incelenecektir. Zeminin içsel sürtünme açısı  $\phi= 36^0$  birim hacim ağırlığı ise  $\gamma=18.9 \text{ KN/m}^3$  dür.

Davranış değişimi görülen kazık uzunlukları saptanacaktır.

“Kısa” kazıktan “orta” kazığa geçiş boyu:

$$(6.23) \text{ ile } P_{ult} =1.5 \times 18.9 \times L^2 \times 0.37 \times \tan^2 63 = 40.4 L^2$$

$$(6.24) \text{ ile } P_{ult} =675/L+0.5 \times 18.9 \times 0.37 L^2 \tan^2 63 =675/L+13.46 L^2$$

Bu iki denklemin ortak çözümü  $L=2.92 \text{ m}$  ve  $P_{ult} =344.4\text{KN}$  verir.

“Orta” kazıktan “uzun” kazığa geçiş boyu:

$$(6.24) \text{ ile } P_{ult} = 675/L + 13.46L^2$$

$$(6.25) \text{ ile } P_{ult} = 1350 / [0.105x(P_{ult})^{0.5}]$$

Bu iki denklemin beraberce çözümü  $P_{ult} = 548.8$  ve  $L = 5.6$  m verir.

Bu ise eldeki kazığın uzun kazık olduğunu gösterir ( $5.6m < 17m$ )

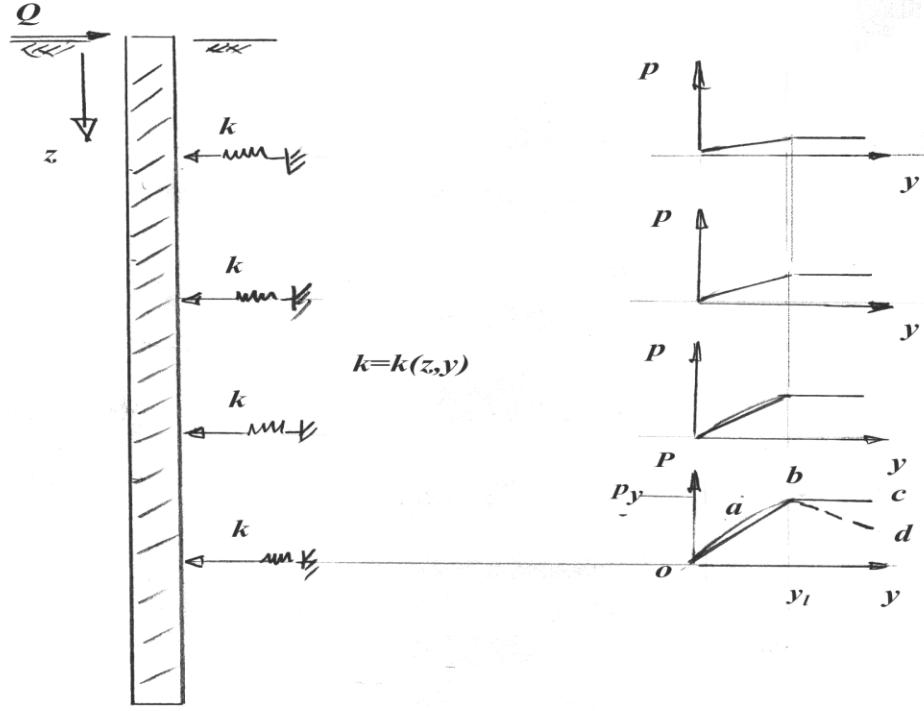
Burada Şekil 6.10 da bulunan ankastre başlı kazık eğrisine  $M_y/b^4 \gamma K_p = 495$  ile girilerek  $P_{ult} = 552$  KN bulunabilir. Burada da abağın sıhhatli okuma derecesine göre sonuç alınacağı görülmektedir.

### **6.3. Yatak Katsayısı Kullanılan Çözüm Yöntemleri**

#### **6.3.1. Genel Teorik Yaklaşım**

Yanal yük taşıyan bir kazık ötelenirken kendisini çevreleyen zemine yüklenecektir. Yukarıda 6.1. paragrafında açıklandığı gibi bu etkileşmeyi matematiksel olarak ifade edebilmek için zemin; kazık boyunca belirli aralıklarda yerleştirilen ve uygulanan yükü sıkıştırarak üstlenen yaylarla temsil edilir. Bu yayların zemini temsilinde iki önemli husus bulunmaktadır: Birincisi, yay sertliğinin (rijitliğinin) derinliğe göre değişmesi, ikincisi ise belli bir derinlikteki yayın sertliğinin ötelenme ile değişmesidir. Bu hususlar Şekil 6.10 aracılığı ile açıklanacaktır:





Şekil 6.10. Yanal Yüklenen bir Kazıkta Zemin Davranışının Temsili

Burada, bir kazık boyunca zemini temsil eden yayların davranışı görülmektedir. Bu yayların nitelikleri aşağıda açıklanmaktadır:

1. Belli bir derinlikte, kazığın ötelenme sırasında zemine yüklenmesi ile zemindeki gerilme artacak ve en sonunda  $p_y$  ile gösterilen taşıma gücüne varacaktır. Bu ilişki genel olarak Şekil 6.10 daki en alt yay elemanında gösterilmiştir. Olgu, diğer elemanlarda aynıdır. Zemin davranışını temsil eden yatak katsayısının doğrusal olmayan bir matematiksel ilişki ile temsil edilmesi de olağandır. Bu hal şekilde  $oabd$  eğrisi ile gösterilmiştir. Zemin, taşıma gücüne kadar  $oab$  eğrisi ile gösterilebilecek bir davranış gösterir: Diğer taraftan Şekil 6.10 da kazık boyunca derine doğru gidildikçe, aynı ötelenme miktarına ulaşabilmenin daha fazla yük gerektirdiği

görülmektedir. Bir diğer deyişle yay katsayısı derinlikle sertleşmektedir. Yukarıda anlatılan davranış aşağıdaki genel ifade ile gösterilebilir:

$$p=k(z,y) y \quad (6.26)$$

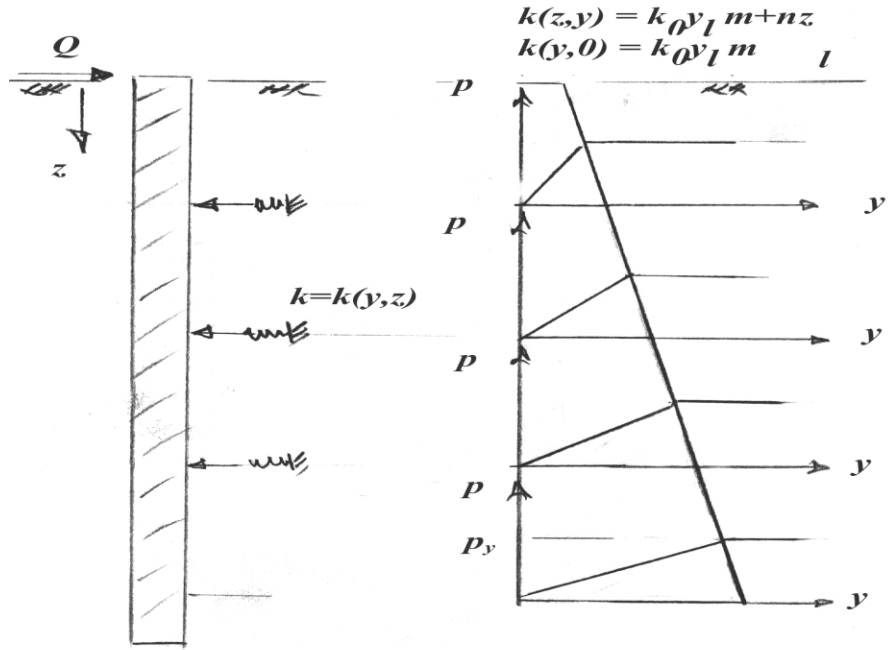
Bu durumları tensil eden eğrilere genel olarak p-y eğrileri adı verilir. Araştırmacılar, değişik zeminler için ayrı ayrı p-y eğrileri önermişlerdir. Bu eğrilerin özellikleri aşağıda ayrıca incelenecektir. Ancak, analiz kolaylığı açısından Şekil 6.10 da ob doğrusu ile gösterildiği gibi doğrusal bir davranışın varlığı kabul edilebilir. Bu durumda belli bir z derinliğinde  $k_0$  zemin yatak modülünü,  $p_z$  bu derinlikteki gerilme ve y ötelenmeyi göstermek üzere:

$$p_z =k_0 y \quad (6.27)$$

ilişkisi yazılabilir. Bu denklemde  $k_0$ ; değeri değişik yollarla tayin edilebilen “yatak modülü” olarak adlandırılır.

2. Şekil 6.11 de ise, doğrusal elastik-plastik davranışı temsil eden yay elemanlarının yer aldığı bir durum gösterilmektedir. Bu durum, özellikle granüler zeminler ve yumuşak killi-siltli zeminlerin davranışını temsil etmek için için çokça kullanılan bir modeldir. Şekil 6.11. de gösterilen kazıkta bir yayın bulunduğu düğüm noktası elemanına p yanal basıncının uygulandığı düşünülerek (6.26) denklemi yatak katsayısının derinlikle değişimini de içermek üzere şu şekli ile yazılabilir:

$$p = k_0 z^n \quad (6.28)$$



Şekil 6.11. Doğrusal Elastik-Plastik Davranış

veya  $k(z,y)$  nin değişimi Şekil 6.11 de gösterilen ilişkideki gibi kabul edilebilir. Diğer taraftan, kazık kesidindeki moment basınç ile ilişkilendirilerek:

$$\frac{d^2 M}{dz^2} = pd = k_0 dy = ky \quad (6.29)$$

yazılabilir. Burada  $d$  kazık çapı,  $M$  kesit momentidir.  $k$  deneyle saptanan yatak katsayısının kazık çapı ile çarpılarak basınç birimi cinsinden ifadesidir. Diğer taraftan  $E$  kazığın Elastik Modül,  $I$  eylemsizlik momenti olmak üzere

$$\frac{d^2 M}{dz^2} = -EI \frac{d^4 y}{dz^4} \quad (6.30)$$

geçerlidir. Derinlikle değişen yay katsayısı  $k_n = k z^n$  olursa (6.27) ile (6.30):

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + k_n z^n y = 0 \quad (6.31)$$

verir. Bu denklem, aşağıdaki  $w$  ve  $x$  boyutsuz değişkenleri kullanılarak yapılan işlemle boyutsuz bir hale getirilebilir:

$$w = \beta y ; \quad x = \beta z \quad \beta (L^{-1})$$

$$dw = \beta dy ; \quad dx = \beta dz$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{k_n}{EI} \frac{x^n}{\beta^n} \frac{w}{\beta^4} = 0 \quad (6.32)$$

burada:

$$\frac{k_n}{EI} = \beta^{(4+n)} \quad (6.33)$$

olmaktadır. Burada kullanılan  $\beta$  parametresinin tersine “Kazığın Karakteristik Boyu veya Elastik Boyu” denilir. Bu genellikle  $R=1/\square\square$  olarak gösterilir, ayrıca  $k_n$  (6.29) ifadesindeki  $k$  ile eşdeğerdir.

(6.32) denkleminin analitik çözümü yalnızca derinlikle sabit kalması hali için Hetenyi tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu durumda  $n=0$  alınır ve (6.33) ifadesinden;

$$\beta=(k_n/EI)^{0.25}$$

(6.34)

elde edilir. (6.33) ifadesinde  $n=1$  alınırsa derinlikle değişen bir yatak katsayısı hali kabul edilmiş olur. Bu problem Matlock ve Reese (1960) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bir diğer çözüm ise (6.33) denkleminde  $n= 0.5$  kabulü ile yarı sonsuz bir kazık için nümerik bir metodla gerçekleştirilmiştir. (Franklin ve Scott (1979). Yukarıda belirtildiği gibi birinci hal ön yüklenmeye maruz kalmış killi zeminler, ikinci hal ise granüler zeminler ve yumuşak killi-siltli zeminlerin davranışını temsil etmek için kullanılmaktadır. Üçüncü hal ise, granüler zeminlerde kullanılması önerilen bir yöntemdir. Ancak birinci ve ikinci yöntemlerin kullanılması daha yaygındır ve uygulama açısından yaterli sayılmaktadır. Bu iki yöntem aşağıda anlatılacaktır. Diğer taraftan, bilgisayar çözümlerinde, yayların yerleştirildiği düğüm noktalarındaki yatak katsayısının değerlerinin kolayca hesaplanabilmesi yararlı olmaktadır. Gerek üçüncü yöntemin kullanımına bu açıdan katkıda bulunabilecek gerekse genelde bu problemlerin çözümü için bilgisayar

programlamasına yardımcı olabilecek nitelikte geliştirilmiş bir yaklaşım da ayrıca sunulacaktır.

Yay katsayısının granüler zeminler ile yumuşak killerde ve siltlerde derinlikle değişmesinin nedeni aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Bu tür zeminler; üzerlerindeki efektif örtü yükü, doğal çökme ve konsolidasyon olayları nedeni ile derinlikle değişen bir direnç artışı gösterirler. Bu nedenle, derine gittikçe kazığın ötelenme miktarı azalır ve buna bağlı olarak zemin reaksiyonunu temsil eden yay katsayısı sertleşir. Aynı yük altında enkesiti derinlikle değişmeyen kazıkların yanal ötelenme miktarları kazık boyunca derinleşildikçe azalır. Bu azalma ilk başlarda çok hızlı gelişir. Sonraları, olay yavaşlar, kazığın “karakteristik boyu, ( $R=\beta^{-1}$ )” olarak adlandırılan boyutsuz uzunluğun ötesinde, ötelenmeler etkilenmez. Bu uzunluk, yukarıdaki (6.33) denkleminde de açıkça görüldüğü gibi doğal olarak kazığın rijitliği ( $EI$ ) ın ve zeminin yatak modülü “ $k_0$ ” ın bir fonksiyonu olacaktır. Kazık rijitliği arttıkça ( $R$ ) artar, zeminin sertliği arttıkça ise ( $R$ ) azalır.

Bir kazığın, boyunca oluşacak dönmelerden dolayı oluşacak olan ötelenmelerinin, rijit bir kitle olarak ötelenmesine kıyasla ihmal edilebileceği kadar rijit olması halinde ise bu kazığa “rijit kazık” denir. Bu aşamada soyut denilebilecek olan bu kavram, aşağıda somut anlatımını bulacaktır.

### 6.3.2. “Yatak Katsayısı”nın Saptanması

Zemini yaylarla temsil etmek sureti ile ortaya atılan teorik yaklaşım, aslında bir sürekli ortam problemini çözmek iddiasındadır. Homojen ve isotrop bir elastik ortamın özelliklerini tanımlayan iki parametre Poisson

Oranı ve Elastik Modüldür. Ayrıca ortam süreklidir. Böyle bir ortamın, tek bir katsayı ile ve süreksiz bir yaklaşımla tanımlanması, aslında güç bir uğraştır. Güçlük, ortam temsilindeki değişken uyumsuzluğunun yanısıra ortamın gerçek tanımını yapacak bir yatak katsayısının tayinindeki zorluktan ileri gelmektedir. Yatak katsayısının kullanımı ile elde edilen çözümlerin sağlıklı olup olmadığı, doğru bir yatak katsayısının seçilmesinin çözümü sürekli ortam mekaniği ile elde edilen sonuçlara ne ölçüde yaklaştırdığı konusu halen tartışılmaktadır. Bununla beraber, gerek bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiş olan çözümlerin arazi gözlemleri ile ve gerekse sürekli ortam çözümlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması, özenle saptanmış yatak katsayılarının kullanılmalarda halinde varılan çözümlerin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Aşağıda yeri gelince bir özel kıyaslama yapılarak bu soruna ayrıca açıklık getirilmeye çalışılacaktır.

Tablo 6.1 de, yatak katsayısının çeşitli zeminlerdeki büyüklüğü hakkında bir fikir verebilmek amacıyla bir tablo sunulmaktadır. Bu Tablo, büyüklükler hakkında bir fikir verebilmek ve ileride anlatılacak olan yöntemler sonucunda bulunacak değerleri karşılaştırmak amacıyla verilmektedir. Tasarım için bu değerlerin doğrudan kullanımından kaçınılmalıdır.

Tablo 6.1. Değişik Zeminlerin  $k_0$  Değerleri

| Zemin Cinsi                          | Yatak Katsayısı<br>$k_0$ , (KN/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------------|---|
| Gevşek Kum                           | 4800-16000                                      |
| Orta Sıkı Kum                        | 9600-80000                                      |
| Sıkı Kum                             | 64000-128000                                    |
| Killi Orta Sıkı Kum                  | 32000-80000                                     |
| Siltli Orta Sıkı Kum                 | 24000-48000                                     |
| Killi Zemin ;Taşıma Gücü<200 Kpa     | 12000-24000                                     |
| Killi Zemin ;200<Taşıma Gücü<800 Kpa | 24000-48000                                     |
| Killi Zemin ;Taşıma Gücü>800 Kpa     | >48000  |

Kazıklar için yatak katsayısının saptanmasında akılcı ve kullanışlı olduğuna inanılan yollar ile pratikte kullanılmalarının yararlı olabileceğine inanılan diğer bazı ifadeler aşağıda yer verilmektedir.

Bu bağlamda; izin verilebilir belirli bir ötelenme miktarında ( $y_1$ ) kazığın taşıma gücüne ( $p_1$ ) varıldığı hipotezi kullanılarak (6.27) bağıntısı şöyle geliştirilebilir:

Şekil 6.11 e bakılarak zeminin taşıma gücünün derinlikle değişmesi şu şekilde yazılabilir:



$$p_y(z) = a + bz^n \quad (6.35)$$

bu durumda yatak katsayısı şu şekilde tanımlanabilir:

$$k(z, y) = \frac{p}{y} = \frac{a + bz^n}{y} \quad (6.36)$$

Diğer taraftan p ve y nin sınır değerlerine varması durumunda (6.36) şu şekile girer:

$$k(z, y_i) = \frac{p_i}{y_i} = \frac{a + bz^n}{y_i} \quad (6.37)$$

Bu denklemde a ve b zeminin taşıma gücünü belirleyen parametrelerdir. Örneğin a, sığ temellerin taşıma gücü ifadesindeki  $N_\gamma$  veya kil için  $cN_c$  parametresini de içine alan terimi, ve b ise  $N_q$  parametresini de içeren terimi gösterebilir. Bu denklemde n yatak katsayısının derinlikle değişimini gösteren bir üs olmaktadır. Kullanımda genellikle 1 veya 0 olur. 1 olması hali granüler zeminler ve yumuşak killer için geçerlidir. 0 olması hali ise ön yüklemeye uğramış killer için söz konusu olur. Zemin sertliğinin derinliğin kare kökü ile değiştiği varsayılan bazı hallerde ise  $n=0.5$  alınabilir.

Genelde aşağıdaki ifadelerde şu semboller kullanılacaktır:

$E_v(z)$ = Zeminin derinlikle artan Düşey Elastik Modülü,

$E_h(z)$ = Zeminin derinlikle artan Yatay Elastik Modülü,

$E_0$ = Zeminin referans Elastik Modülü,

$K_0$ = Geostatik Katsayı,

$\gamma$  = Zeminin Birim Hacim ağırlığı,

$\gamma_w$ =Suyun Birim Hacim ağırlığı,

$d$  = Kazık Çapı,

$z$ = Kazık Boyunca Derinlik,

$E_s$ =Zeminin Elastik Modülü,

$E$ = Kazığın Elastik Modülü,

$I$ =Kazığın Eylemsizlik Momenti,

$C_u$ = Zeminin Drenajsız Dayanımı,

$\nu_s$ =Zeminin Poisson Oranı,

$m_v$ = Zeminin Hacimsel Sıkışabilirlik Katsayısı

Genelde granüler zeminlerde ve özellikle Kum ve kaba Siltlerde çevre basıncı ile arttığı bilinen zeminin Elastik Modülü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E_v(z) = E_0 \sqrt{\frac{(1+2K_0)\gamma z}{3\gamma_w d}} \quad (6.38)$$

Bu yaklaşımda (6.37) ifadesindeki  $a$  katsayısı, zemin yüzeyinde çevre basıncının düşüklüğü nedeni ile sıfır değerini almaktadır. Bu nedenle kazık çapına yakın bir derinlikte alınacak bir referans modülün ( $E_0$ ) daha geçerli olacağı varsayılacaktır.

Ortotrop bir zeminde düşey ve yatay yöndeki elastiklik modülleri bir m oranı ile bağlanabilir:

$$m = E_v(z)/ E_h(z) \quad (6.39)$$

Yanal yüklenmiş d çapındaki bir kazığın y yatay ötelenmesinin, birim deformasyon  $\epsilon_x$  ile aşağıdaki şekilde ilişkilendirildiği bilinmektedir. (Prakash ve Kumar.1996)

$$y(z) = 1.5d \epsilon_h \quad (6.40)$$

(6.39) ve (6.40) denklemleri (6.38) denkleminde kullanılarak;

$$k_h(z) = \frac{E_0}{1.5dm} \sqrt{\frac{(1+2K_0)\gamma}{3\gamma_w}} \sqrt{\frac{z}{d}} \quad (6.41)$$

elde edilir. Yukarıdaki (6.38) ifadesi ile orta sıklıktaki isotrop bir granüler zemin için kazık çapı derinliğinde hesaplanan bir referans modülü yaklaşık olarak, narinlik oranı 10 olan bir kazığın tabanında 3.5, 25 olan bir kazığın tabanında 5, 45 olan bir kazığın tabanında ise 7 katına yükselmektedir. Sonuçta elde edilen (6.41) denklemi, çeşitli derinliklerdeki yatak katsayısı değerlerinin kolayca elde edilerek numerik analizlere uyarlanabilmesini sağlarlar.

Bazı araştırmacılar elastik ortam çözümlerinden elde edilen verilerden hareket ederek yatak katsayısının tayinine çabalamışlardır. Bazı araştırmacılar kazığın ötelenmesini, bazıları maksimum moment değerini yay katsayısı kullanarak elastik ortam çözümlerinden elde edilen sonuçlara yaklaştırmaya çalışmışlardır. Bu bağlamda şuna dikkat etmek gerekir ki bu şekilde saptanan bir yatak katsayısı, tanımını için kullanılmış olan verilerin ait olduğu nitelik için geçerli olabilir. Örneğin Biot (1937) ve sonra Vesic (1961,1973) tarafından verilen aşağıdaki ifade kullanıldığında, kesit kuvvetleri ve ötelenme miktarları için elastik ortam çözümleri ile elde edilen sonuçlar ile yatak katsayısı kullanılarak bulunan çözümler arasındaki hata payının %10 civarında olacağı gösterilmiştir.

$$k = \frac{0.65}{d} \sqrt[12]{\frac{E_s d^4}{EI} \left( \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \right)} \quad (6.42)$$

Diğer yandan yine aşağıda önerilen ifade ise her iki yöntemle saptanan Maksimum Moment bulgularını yakınlaştırdığı bilinir:

$$k = \frac{0.95 E_s}{1-\nu_s^2} \left( \frac{E_s d^4}{(1-\nu_s^2) EI} \right)^{0.108} \quad (6.43)$$

Zeminin özellikleri için ortalama geçerli değerler kabul edilip (6.41) bağıntısında yerine konularak yapılan bir hesap kazık çapı (d) kadar bir derinlikte:

$$k_0 = \frac{0.688E_0}{d} \quad (6.44)$$

bağıntısını verir. Bu derinlikteki modül değerleri, kazıkların yanal ötelenmesi üzerinde çok etkili olmaktadır. Davisson ve Gill (1963) in bulguları uyarınca bu nedenle, bu değer üzerinde durulmaya değer görülmektedir.

Killi zeminler için Davisson (1970), kilin sertliğine göre  $M=67-200$  olmak üzere:

$$k = M \frac{C_u}{d} \quad (6.45)$$

bağıntısını önermektedir.  $C_u$ =Drenajsız kayma dayanımı,  $d$  kazık çapıdır.

Poulos ve Davis (1980), Narinlik Oranı  $l/d = 25$  olan yanal yüklenmiş ankastre başlı kazıklarda yatak modülü olarak:

$$k = k_0 d = 0.82E_s \quad (6.46)$$

ilişkisi ile saptanan yatak katsayısının ankastre başlı, rijit bir kazık için kullanılması halinde bulunan ötelenme miktarının elastik teori ile bulunandan değerden çok farklı olmadığını anlatmaktadır.

Scott (1981) ise aynı ifadeyi:

$$k = E_s \quad (6.47)$$

şeklinde kullanarak her iki çözüm ile yakın sonuçlar elde etmiştir. Esasen (6.42) ifadesinde 12 ci kök teriminin hesap sırasında kullanımı benzer bir sonuç verir. Konsolidasyon deneyi aracılığı ile bulunan Elastik Modülün yukarıdaki denklemlerde kullanılması ile “yumuşak” ve efektif gerilmelere dayanan yatak katsayıları elde edilmektedir. Burada  $\sigma_1 = \sigma_3$  ise:

$$E_s = \frac{3(1-2\nu)}{m_v} \quad (6.48)$$

$\sigma_1 = K_0 \sigma_3$  ise:

$K_0$ =Geostatik Zemin Gerilmesi Katsayısı

$$E_s = \frac{1-2\nu}{m_v} \frac{1+\nu_s}{1-\nu_s} \quad (6.49)$$

bağıntısı kullanılır.

Bu katsayı; üç eksenli basınç deneyleri yardımı ile de bulunabilir: Bu durumda ilgili derinliğ karşı gelen bir hücre basıncında yapılmış olan bir

deneyde genellikle pik gerilmenin yüzde ellisindeki birim deformasyon değeri kullanılarak sekant modülü  $E_{50}$  hesaplanır. Hesaplanan bu değer Broms tarafından önerilen:

$$k_0 = \frac{1.67E_{50}}{d} \quad (6.50)$$

ifadesinde yerine konulması ile yatak katsayısı hesaplanabilir.

Bu katsayının saptanması için özenle bulunarak değerlendirilmesi halinde Granüler Zeminlerde doğru sonuçlar veren ve yurdumuzda kullanımı yaygın olan “Standard Penetrasyon Deneyi” sonuçları da çok sayıda ilişki içinde önerilmiştir. Bu deney sonuçlarının kullanımında bir Elastik Modül tayini ve yukarıdaki denklemlerde kullanılması yönünde aşağıdaki bağıntılar yararlı olabilir:

$$E_s = 650 N \quad (\text{KN/m}^2) \quad (6.51)$$

$$E_s = 35000N \text{ ila } 50000N \quad (\text{KN/m}^2) \quad (6.52)$$

Kohezyonlu zeminlerde bu ilişkilerin kullanımından kaçınılmalıdır.

Bilindiği gibi yatak katsayısının derinlikle artması hali (6.31) ifadesinde  $n=1$  durumunda ortaya gelmekte ve granüler zeminler için geçerli sayılmaktadır. Bu durumda yatak katsayısını  $\eta_h$  ile gösteren Terzaghi bu katsayı için bazı değerler vermiş, Scott (1981) tarafından bu değerlerin

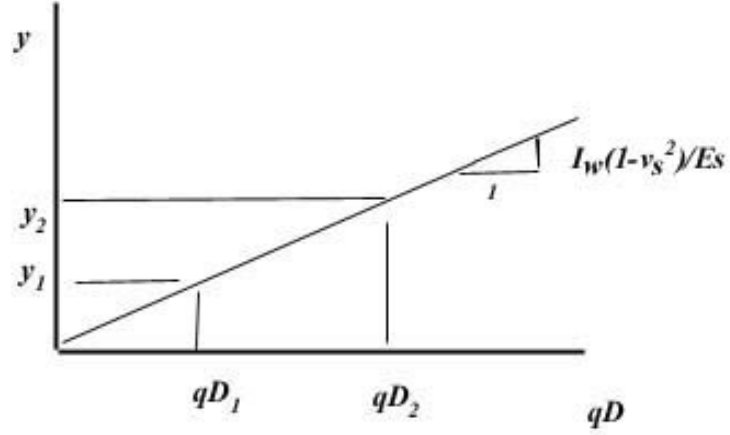
yarısının kullanılmasının daha uygun olacağı gösterilmiştir. Scott tarafından önerilen değerler aşağıda Tablo 6.2 de verilmektedir:

Tablo 6.2. Granüler Zeminler için Yatak Katsayısı,  $\eta_h$  (kN/m<sup>3</sup>)

|                 |        |             |
|-----------------|--------|-------------|
| Kuru veya Islak | Gevşek | 1800-2200   |
|                 | Orta   | 5500-7000   |
|                 | Sıkı   | 15000-18000 |
| Su altında kum  | Gevşek | 1000-1400   |
|                 | Orta   | 3500-4500   |
|                 | Sıkı   | 9000-12000  |

Yatak katsayısı plaka yükleme deneyleri yapılarak da bulunur. Bu deneyde, genellikle iki ayrı çapta plaka yüklenir. Bu iki ayrı çapta plaka ile yapılan yükleme deneyinde, her iki plaka için de yük-oturma eğrisinin doğrusal davranıştan ayrıldığı oturmaya karşı gelen yayılı yük değeri  $q$ , plaka çapı  $D$  ile çarpılır ve ölçülen oturma miktarına ( $y$ ) karşı grafiklenir.





Şekil 6.12. Yatak Katsayısının Plaka Deneyi ile Bulunması

Bu durum, Şekil 6.12 de gösterilmektedir. Elastik Teori  $I_w$  etki katsayısı,  $\nu_s$  zeminin poisson oranı olmak üzere oturma için:

$$y = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} I_w qD \quad (6.53)$$

ifadesini vermektedir. Bu nedenle yukarıdaki doğrunun eğiminin tersi alınarak yatak katsayısı bulunur.

$$k = \frac{q}{y} = \frac{E_s}{I_w(1 - \nu_s^2)D} \quad (6.54)$$

Bu kısımda bulunan tüm yatak katsayıları, tekrarlı yüklerin varlığı halinde; örneğin off-shore platformları ve deprem durumunun analizi için %50

mertebesinde azaltılır. Esasen bu husus, dikkatle hazırlanmış olan bilgisayar programlarının bir parçasıdır.

### 6.3.3. Yatak Katsayısı Kullanılan Çözüm Yöntemleri

#### 6.3.3.1. Hetenyi'nin Yöntemi

Hetenyi (1946), Winkler tarafından ortaya atılan “zeminin yaylarla temsil edilmesi teorisini” kazıklara uygulamıştır. Elde edilen analitik çözüm önce yarı sonsuz bir ortam içindeki yarı sonsuz boyda kazıklar için geliştirilmiş ve sonra boyları sınırlı olan kazıklara uygulanmıştır. Birinci halde trigonometrik ve ikinci halde hiperbolik fonksiyon açılımları ile verilen bu çözüm bağıntıları bu Kısımda verilmeyecek, ancak pratik çözümler için geçerli olan yollara işaret edilerek gerekli veriler sunulacaktır. Hetenyi'nin bu çözümü; ön yüklenmeye uğramış killer için geçerlidir. Yukarıda (6.28), (6.31), (6.33) denklemlerinde  $n=0$  alınması ile temsil edilirler.

Yanal yük altındaki bir kazığın çözümü, kazık boyunca enkesitte meydana gelen momentlerin ve ötelenmelerin hesaplanmasını gerektirir:

Özellikle kazık başının ötelenme miktarı pek çok şartnamede bir sınır şartı olarak verildiğinden önem taşımaktadır. Kesit Momentleri ve yükler bilindikten sonra kesme kuvvetleri kolayca hesaplanabilir. Kazığın zemine yüklenmesi sonucunda oluşan zemin gerilmesi; kazık boyunca yay katsayıları ile kazığın yanal ötelenme miktarı çarpılarak kolayca bulunur. Bu şekilde saptanan değerlerin, taşıma gücünü aşmaması gerekir. Kazık başında saat yönünde moment meydana getiren yük ve bu yük yönündeki ötelenme positif kabul edilir; saat yönündeki moment ise negatiftir. Kazık başlarının radye ile birleşim yerlerinin ankastre kabul edilmesi halinde bu

noktada dönme ( $\theta$ ) sıfır olur ve kazık başındaki yanal yük nedeni ile saatin aksi yönünde bir moment ( $+M_0$ ) meydana gelir. Yukarıdaki konvansiyona göre bu moment positif olacağından kazık boyunca moment diyagramı çizilirken bu hususa dikkat edilmesi gerekir. Diğer taraftan kazık başındaki positif yatay yük, zeminin üst seviyesinden ( $e$ ) mesafesinde etkiyorsa bu nedenle kazık başında  $-M_0=eH$  kadar bir negatif momentin oluştuğuna dikkat edilmelidir.

Kesitlerdeki kuvvet ve ötelenmeler, aşağıda verilen denklemlerle tanımlanmışlardır: Zemin seviyesinin kazık başı seviyesinde olduğu varsayılmaktadır. Burada birinci alt indis sonucu, ikinci alt indis ise nedeni gösterir.

Kazık Başında Yatay Yük (H) Etkisi Nedeni ile Ötelenme (y):

$$y = \frac{2H\beta}{kd} K_{yh} \quad (6.55)$$

Kazık Başında Yatay Yük (H) Nedeni ile Moment (M):

$$M = -\frac{H}{\beta} K_{mh} \quad (6.56)$$

Kazık Başında Moment ( $M_0$ ) Etkisi Nedeni ile Ötelenme (y):

$$y = \frac{2M_0\beta^2}{kd} K_{ym} \quad (6.57)$$

Kazık Başında Moment ( $M_0$ ) Etkisi Nedeni ile Moment ( $M$ ):

$$M = M_0 K_{mm} \quad (6.58)$$

Hesaplar; yukarıdaki bağıntılar kullanılarak aşağıda Tablo 6.3 ila Tablo 6.6 dan alınan katsayılar yardımı ile yapılır. Tabloların kullanımı için izlenecek adımlar aşağıda özetlenmiştir.

- (6.33) denkleminde  $n = 0$  alınarak (6.34) elde edilir. Buradan  $\beta$  değeri hesaplanır.
- $\beta$  değeri kazığın boyu ile çarpılarak  $\beta l$  değeri bulunur.
- Bulunan  $\beta l$  değerine uygun olan Tablonun kullanılması gereklidir. Tablolar arasında gerekli hallerde enterpolasyon yapılabilir.
- Hesap yapılmak istenilen kazık derinliği ( $z$ ), kazık boyu ( $l$ ) ye bölünerek boyutsuz derinlik bulunur ve Tabloya bu değer ile girilir. Tablodaki diğer başlıklar formüllerde kullanılacak olan katsayıları göstermektedirler. Bunlar kolaylık açısından tekrarlanırsa sırası ile:

$K_{yh}$  = Kazık başındaki bir  $h$  kuvveti nedeni ile yatay ötelenme,

$K_{mh}$  = Kazık başındaki bir  $h$  kuvveti nedeni ile oluşan kesit momenti,

$K_{ym}$  = Kazık başındaki bir  $M$  momenti nedeni ile yatay ötelenme,

$K_{mm}$  = Kazık başındaki bir moment nedeni ile oluşan kesit momenti,

katsayılarıdır.

- Bu katsayılar yukarıdaki formüllerde yerine konularak hesap tamamlanır.
- $\beta l$  değeri için 5 den büyük değerler bulunması halinde katsayılar bu tabloda gösterildiklerinden daha başka değerler almaz,  $\beta l=5$  değerindeki sayıları ile aynı kalırlar. Bu nedenle bu durumda Tablo 6.6. kullanılır.

Tablo 6.3.  $\beta l = 2$  için Katsayılar

| $2z/l$ | $K_{yh}$ | $K_{mh}$ | $K_{ym}$ | $K_{mm}$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0000 | 1.1376   | 0.0000   | -1.0762  | 1.0000   |
| 0.0625 | 0.9964   | 0.1080   | -0.8807  | 0.9836   |
| 0.1250 | 0.8586   | 0.1848   | -0.6579  | 0.9397   |
| 0.1875 | 0.7264   | 0.2347   | -0.4644  | 0.8751   |
| 0.2500 | 0.6015   | 0.2620   | -0.2982  | 0.7959   |
| 0.3125 | 0.4848   | 0.2704   | -0.1569  | 0.7073   |

|        |         |        |         |        |
|--------|---------|--------|---------|--------|
| 0.3750 | 0.3764  | 0.2637 | -0.0376 | 0.6138 |
| 0.4375 | 0.2763  | 0.2452 | 0.0624  | 0.5191 |
| 0.5000 | 0.1838  | 0.2180 | 0.1463  | 0.4262 |
| 0.5625 | 0.0981  | 0.1851 | 0.2168  | 0.3379 |
| 0.6250 | 0.0182  | 0.1491 | 0.2767  | 0.2564 |
| 0.6875 | -0.0571 | 0.1125 | 0.3286  | 0.1834 |
| 0.7500 | -0.1288 | 0.0776 | 0.3747  | 0.1208 |
| 0.8125 | -0.1981 | 0.0468 | 0.4171  | 0.0698 |
| 0.8750 | -0.2659 | 0.0222 | 0.4572  | 0.0318 |
| 0.9375 | -0.3330 | 0.0059 | 0.4963  | 0.0082 |
| 1.0000 | -0.3999 | 0.0000 | 0.5351  | 0.0000 |

Tablo 6.4.  $\beta l = 3$  için Katsayılar

| $2z/l$ | $K_{yh}$ | $K_{mh}$ | $K_{ym}$ | $K_{mm}$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| -----  | -----    | -----    | -----    | -----    |
| 0.0000 | 1.0066   | 0.0000   | -1.0004  | 1.0000   |
| 0.0625 | 0.8210   | 0.1543   | -0.6589  | 0.9690   |

|        |         |        |         |        |
|--------|---------|--------|---------|--------|
| 0.1250 | 0.6459  | 0.2508 | -0.3854 | 0.8913 |
| 0.1875 | 0.4882  | 0.3018 | -0.1743 | 0.7862 |
| 0.2500 | 0.3515  | 0.3184 | -0.0184 | 0.6684 |
| 0.3125 | 0.2371  | 0.3101 | 0.0905  | 0.5491 |
| 0.3750 | 0.1444  | 0.2850 | 0.1607  | 0.4360 |
| 0.4375 | 0.0716  | 0.2496 | 0.2002  | 0.3339 |
| 0.5000 | 0.0164  | 0.2091 | 0.2162  | 0.2458 |
| 0.5625 | -0.0242 | 0.1673 | 0.2147  | 0.1728 |
| 0.6250 | -0.0529 | 0.1272 | 0.2011  | 0.1148 |
| 0.6875 | -0.0727 | 0.0908 | 0.1793  | 0.0709 |
| 0.7500 | -0.0861 | 0.0594 | 0.1524  | 0.0396 |
| 0.8125 | -0.0953 | 0.0340 | 0.1227  | 0.0189 |
| 0.8750 | -0.1021 | 0.0154 | 0.0916  | 0.0069 |
| 0.9375 | -0.1077 | 0.0039 | 0.0599  | 0.0014 |
| 1.0000 | -0.1130 | 0.0000 | 0.0282  | 0.0000 |

Tablo 6.5.  $\beta_1=4$  için Katsayılar

| $2z/l$ | $K_{yh}$ | $K_{mh}$ | $K_{ym}$ | $K_{mm}$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
|--------|----------|----------|----------|----------|

|        |         |        |         |         |
|--------|---------|--------|---------|---------|
| 0.0000 | 1.0008  | 0.0000 | -1.0015 | 1.0000  |
| 0.0625 | 0.7550  | 0.1926 | -0.5624 | 0.9472  |
| 0.1250 | 0.5323  | 0.2907 | -0.2409 | 0.8229  |
| 0.1875 | 0.3452  | 0.3218 | -0.0220 | 0.6673  |
| 0.2500 | 0.1979  | 0.3093 | 0.1136  | 0.5082  |
| 0.3125 | 0.0890  | 0.2717 | 0.1855  | 0.3626  |
| 0.3750 | 0.0140  | 0.2226 | 0.2118  | 0.2397  |
| 0.4375 | -0.0332 | 0.1715 | 0.2079  | 0.1430  |
| 0.5000 | -0.0590 | 0.1243 | 0.1858  | 0.0720  |
| 0.5625 | -0.0692 | 0.0843 | 0.1545  | 0.0242  |
| 0.6250 | -0.0687 | 0.0529 | 0.1200  | -0.0043 |
| 0.6875 | -0.0615 | 0.0299 | 0.0858  | -0.0178 |
| 0.7500 | -0.0505 | 0.0147 | 0.0538  | -0.0206 |
| 0.8125 | -0.0376 | 0.0057 | 0.0242  | -0.0166 |
| 0.8750 | -0.0239 | 0.0014 | -0.0033 | -0.0096 |
| 0.9375 | -0.0101 | 0.0001 | -0.0296 | -0.0029 |
| 1.0000 | 0.0038  | 0.0000 | -0.0555 | 0.0000  |



Tablo 6.6.  $\beta_1=5$  için Katsayılar

| $2z/l$ | $K_{yh}$ | $K_{mh}$ | $K_{ym}$ | $K_{mm}$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0000 | 1.0003   | 0.0000   | -1.0003  | 1.0000   |
| 0.0625 | 0.6964   | 0.2249   | -0.4715  | 0.9211   |
| 0.1250 | 0.4342   | 0.3131   | -0.1210  | 0.7472   |
| 0.1875 | 0.2317   | 0.3155   | 0.0840   | 0.5472   |
| 0.2500 | 0.0901   | 0.2716   | 0.1818   | 0.3620   |
| 0.3125 | 0.0013   | 0.2093   | 0.2084   | 0.2111   |
| 0.3750 | -0.0466  | 0.1461   | 0.1930   | 0.1002   |
| 0.4375 | -0.0659  | 0.0915   | 0.1575   | 0.0267   |
| 0.5000 | -0.0671  | 0.0494   | 0.1163   | -0.0161  |
| 0.5625 | -0.0584  | 0.0203   | 0.0778   | -0.0361  |
| 0.6250 | -0.0456  | 0.0026   | 0.0461   | -0.0409  |
| 0.6875 | -0.0321  | -0.0063  | 0.0223   | -0.0365  |
| 0.7500 | -0.0197  | -0.0088  | 0.0055   | -0.0276  |
| 0.8125 | -0.0090  | -0.0075  | -0.0059  | -0.0175  |
| 0.8750 | 0.0002   | -0.0044  | -0.0139  | -0.0086  |
| 0.9375 | 0.0086   | -0.0014  | -0.0201  | -0.0023  |
| 1.0000 | 0.0167   | 0.0000   | -0.0259  | 0.0000   |

(6.59) denkleminde  $K_{\theta h}, K_{\theta m}$  sırası ile yatay yük ve moment nedeni ile kazık başında ( $z=0$ ) oluşan eğimin hesabı için uygulanan katsayılarıdır. Bunlar değişik  $\beta l$  değerleri için aşağıda Tablo 6.7.de verilmektedirler.

Tablo 6.7. Kazık Başı Seviyesinde ( $z=0$ ) Eğim Katsayıları

|             | $K_{\theta m}$ | $K_{\theta h}$ |
|-------------|----------------|----------------|
| $\beta l=2$ | 1.0762         | 1.1341         |
| $\beta l=3$ | 1.0038         | 1.0004         |
| $\beta l=4$ | 1.0021         | 0.9488         |
| $\beta l=5$ | 1.0002         | 1.0003         |

Kazık başının ankastre olması halinde; kazık radyesinin yatay yük yönündeki hareketi nedeni ile meydana gelen ters moment, bu noktada dönmenin sıfır olacağını gösteren aşağıdaki denklem aracılığı ile hesaplanır. Bu hesap için yukarıdaki Tablo 6.7 de verilen katsayılar kullanılır. Çözümlerin doğrusal olması nedeniyle moment diyagramı çizilirken süperpozisyon yapılabilir; dolayısı ile bu momentler ana moment diyagramına cebirsel olarak eklenir.

$$M_0 = -\left(\frac{H}{2\beta}\right) \frac{K_{\theta h}(z=0)}{K_{\theta m}(z=0)} \quad (6.59)$$

Kazıklar Tablo 6.8. uyarınca sınıflandırılır. 6.2 paragrafında anlatıldığı şekilde uzun (esnek) ve kısa (rijit) olmak üzere ayrılır. Bu çözümde de “Uzun” kazıklarda kazığın, “kısa” kazıklarda ise zeminin göçmesi ana etkindir.

Tablo 6.8. Kazık Tiplerinin Tanımı ve Sınır Çözümler

| Serbest Başlı Kazık |                 |  | Ankastre Başlı Kazık |                 |                       |
|---------------------|-----------------|--|----------------------|-----------------|-----------------------|
| $\beta l$ Değeri    | Tanım           | Çözümler:<br>Ötelenme ve<br>Dönme                                  | $\beta l$ Değeri     | Tanım           | Çözümler:<br>Ötelenme |
| $\beta l < 1.5$     | Rijid<br>(Kısa) | $y = \frac{4H(1+1.5e/l)}{kdl}$ $\theta = \frac{6H(1+2e/l)}{kdl^2}$ | $\beta l < 0.5$      | Rijid<br>(Kısa) | $y = \frac{H}{kdl}$   |

|                 |                 |                                       |                 |                 |                          |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| $\beta l > 2.5$ | Esnek<br>(Uzun) | $y = \frac{2H\beta(1 + \beta H)}{kd}$ | $\beta l > 1.5$ | Esnek<br>(Uzun) | $y = \frac{\beta H}{kd}$ |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|

### **Örnek 6.4.**

Aşağıda bir örnek verilmektedir:

Bu çözümü elastik çözümlerle de kıyaslayabilmek için yatak katsayısı zeminin elastik modülüne eşit alınmıştır. ( $k = E_s = 10000 \text{ KN/m}^2$ )

Ankastre başlı kazık:  $L=45 \text{ m}$ ,  $d=1.2 \text{ m}$ ,  $E=20.6 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ ,  $I=0.102 \text{ m}^4$ ,  
 $EI=2.06 \times 10^6$ ,  $H=676 \text{ KN}$ , Drenajsız Direnç=  $50 \text{ Kpa}$ ,  $k_n=25000 \text{ KN/m}^3$

Yatay Yük=  $676 \text{ KN}$

Kazık başlığının ötelenme miktarının bulunması ile kazık boyunca derinlikte oluşacak maksimum moment ve derinliğinin bulunması istenmektedir.

Çözüm:

$$\beta = (10000/4 \times 2.06 \times 10^6)^{0.25} = 0.186 \text{ m}^{-1}$$

$\beta l = 8.4 > 1.5$  Bu nedenle Tablo 6.7 uyarınca Kazık Esnek (Uzun) Kazık Sınıfına girer.

Bu nedenle kazığın “kınılması”, “zemin göçmesine” öncelik alır.

Aynı tabloda verilen bağıntı kullanılarak ankastre kazık başı ötelenmesi:

$$y = \frac{\beta H}{kd} = 676 \times 0.186 / 10000 = 0.0125 \text{ m} = 12.5 \text{ mm} \text{ olarak saptanır.}$$

Derindeki Maksimum Moment önce kazığın serbest başlı olduğu düşünülerek bulunur:

Tablo 6.6 ile  $(K_{mh})_{\max} = 0.3155$  ve  $M_{\max} = -(H/\beta) (K_{mh})_{\max} = 1146 \text{ KNm}$ . Aynı Tablodan bu değer  $2z/l = 0.1875$  boyutsuz derinliğinde olduğu görülür. Buradan maksimum momentin oluşacağı derinlik  $z = 4.21 \text{ m}$  olarak bulunur. Kazık başındaki ters moment (6.59) denkleminde katsayıları yerine konarak saptanır :

$M_0 = -(676/2 \times 0.186)(1.0003/1.0002) = -1817 \text{ KNm}$ . ( Bu moment kazık başında oluşan maksimum momenttir ve donatının konulmasında esas rolü üstlenir.)

Bu moment derinlikle dağıtılsa  $2z/l = 0.1875$  m derinlikte  $-994 \text{ KNm}$  olur ve burada yükten dolayı oluşan  $213 \text{ KNm}$  moment ile toplanarak  $-780 \text{ KNm}$  bulunur. Bu moment süperpozisyonu kazık boyunca yapılarak derinlikle moment diyagramı elde edilebilir. Kazık başında oturma katsayısı (esneklik redörü)  $k_x = y/H = 0.0125 / 676 = 1.85 \times 10^{-5} \text{ m/KN}$  olmaktadır. Burada  $k_x$ , kazık başı ötelenmesi için bir esneklik katsayısı veya redördür. 2. Kısımda tanımlanmış olan ve ilerideki paragraflarda da benzerleri görülecek olan bu redörler (veya tersleri olan rijitlik redörleri) nümerik analizlerde kullanılırlar. Moment diyagramının tümü momentin genellikle kazık boyunun yukarıdan yaklaşık üçte birinde sönümlendiğini gösterir. Genellikle geçerli olan bu husus donatı hesaplarında gözönüne alınabilir ve donatı buna göre minimum donatı seviyesine indirilerek ekonomi sağlanabilir. Ancak bu husus şartnamelere bağlıdır.

Kazık başının zemine yaslanması sonucunda zeminde oluşacak basınç hesaplanarak zeminin aşırma gücü ile karşılaştırılabilir:

$$p_s = k_x y = 10000 \times 0.0125 = 125 \text{ KN/m}^2. \quad q_u = 50., \quad c = 5.7 \times 50 = 285 \text{ KN/m}^2$$

Güvenlik Faktörü=2.28

### 6.3.3.2. Matlock-Reese Yöntemi

Yukarıda (6.33) denkleminin  $n=1$  durumu için Matlock ve Reese (1960) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözüldüğü belirtilmiş idi. Ayrıca bu durumun yatak katsayısının derinlikle doğrusal değişimini yansıttığı ve bu hali ile yumuşak killi siltli ve granüler zeminler için geçerli olduğu da açıklanmış idi.

Bu durumda (6.33) ile ve karakteristik uzunluk için  $T$ , yatak katsayısı için Tablo 6.2 de gösterilen  $\eta_h$  terimi kullanılarak:

$$T = (EI/\eta_h)^{0.2} \quad (6.60)$$

elde edilir. Matlock-Reese çözümü bu kısımda analitik detaylara girilmeksizin sunulacaktır. Yöntemin tanıtılmasında aşağıdaki tanımlar kullanılacaktır:

$H$ = Kazık Başı Yanal Yüğü,

$M$ = Kazık Başı Momenti,

$y_A(z)$ =  $H$  Yüğü Nedeni ile Ötelenme,

$y_B(z)$ = Kazık Başı Momenti  $M$  Nedeni ile Ötelenme.

Ötelenmenin küçük olduğu varsayımı ile süperpozisyon yapılabileceği kabul edildiğinden kazık başında moment ve yük etkisi ile oluşan ötelenmeler:

$$y(z) = y_A(z) + y_B(z) \quad (6.61)$$

ile tanımlanabilir. Diğer taraftan yanal yük ve moment etkilerini yansıtan yay katsayıları ( $UK^{-1}$ ) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$(k_{yh})_A = y_A/H = (z, T, L, k, EI)$$

$$(k_{yh})_B = y_B/M = (z, T, L, k, EI)$$

Buradaki terimler kuvvet (F) ve uzunluk (L) birimleri altında boyutsuz gruplar içinde sınıflandırılarak şu ifadeler elde edilir:

$$\text{Boyutsuz Derinlik} = z/T = Z$$

$$\text{Boyutsuz Maksimum Derinlik Sayısı} = l/T = Z_{\max}$$

$$\frac{kT^4}{EI} = \text{Zemin Modülü Fonksiyonu} = \Phi(Z)$$

$$\frac{y_A EI}{HT^3} = \text{Yanal Yük için Boyutsuz Ötelenme Sayısı} = C_y$$

$$\frac{y_B EI}{MT^2} = \text{Moment için Boyutsuz Ötelenme Sayısı} = C_m$$

Son iki eşitlikten alınan terimler (6.61) de yerine konularak ötelenmenin derinlikle değişimi için:

$$y(z) = C_y \frac{HT^3}{EI} + C_m \frac{MT^2}{EI} \quad (6.62)$$

bulunur. Momentin derinlikle değişimi için :

$$M(z) = A_m HT + B_m M \quad (6.63)$$

Eğimin derinlikle değişimi için ise:

$$\theta(z) = A_\theta \frac{HT^2}{EI} + B_\theta \frac{MT}{EI} \quad (6.64)$$

elde edilir.

Kazık başının serbestliği:

Pratik hallerde genelde karşılaşılan bir durum olarak kazık başının ankastre olup dönmeye izin verilmemesi halinde bu kesimde eğim sıfır olur ve (6.64) ile kazık başında ( $z=0$  için) tayin edilecek olan bir  $A_B$  sayısı

$A_B = \frac{M}{HT} = -\left(\frac{A_\theta}{B_\theta}\right)_{z=0}$  bulunabilir ki aşağıdaki Tablo 6.12 ile eğimin sıfır

olması halinde  $M/HT = 0.93$  elde edilir. (6.62) bağıntısı ile de:

$$\begin{aligned} y &= \frac{HT^3}{EI} (C_y - C_m A_B) \\ &= \frac{HT^3}{EI} (C_y - 0.93 C_m) \end{aligned} \quad (6.65)$$

bulunur. Görölmektedir ki  $A_B=0$  halı, serbest başlı bir kazık için geçerlidir.



$$B_A = (C_y - 0.93C_m) \quad (6.66)$$

yazılarak ankastre başlı bir kazık için ötelenme bağıntısı:

$$y = \frac{B_A H T^3}{EI} \quad (6.67)$$

şeklini alır. Yukarıda açıklanan yolun izlenmesi sureti ile ankastre başlı bir kazık için moment denklemi yazılabilir ve buradan aşağıdaki Birleşik Moment Sayısı bulunur:

$$A_m^* = A_m - 0.93 B_m \quad (6.68)$$

Bu suretle moment dağılımı:

$$M = A_m^* H T \quad (6.69)$$

Bağıntısı ile hesaplanır.

Yukarıdaki denklemlerde bulunan katsayılar aşağıda verilen Tablo 6.9. ile Tablo 6.11 kullanılarak elde edilir. Tabloların kullanımı için izlenecek adımlar aşağıda özetlenmiştir.

a. (6.33) denklemi  $n = 1$  alınarak (6.60) elde edilir. Buradan T değeri hesaplanır.

b. Kazığın boyu  $l$ ,  $T$  değerine bölünerek  $Z_{\max}$  değeri bulunur.

c. Bulunan  $Z_{\max}$  değerine uygun olan Tablonun kullanılması gereklidir. Tablolar arasında gerekli hallerde enterpolasyon yapılabilir.

d. Hesap yapılmak istenilen kazık derinliği ( $z$ ), karakteristik boy ( $T$ ) ye bölünerek boyutsuz derinlik bulunur ve ilgili Tabloya bu değer ile girilir.

Tablodaki özellikler formüllerde kullanılacak olan katsayıları göstermektedirler. Bunlar sırası ile:

$C_y$  = Kazık başındaki bir  $H$  kuvveti nedeni ile yatay ötelenme,

$C_m$  = Kazık başındaki bir  $M$  momenti nedeni ile oluşan yatay ötelenme,

$A_m$  = Kazık başındaki bir  $H$  yükü nmedeni ile oluşan kesit momenti,

$B_m$  = Kazık başındaki bir moment nedeni ile oluşan kesit momenti,

katsayılarıdır.

d. Bu katsayılar yukarıdaki formüllere uygulanarak hesap tamamlanır.

Diğer taraftan:

- $Z_{\max}=4$  değerinden daha büyük sonuçlar için katsayılar bu tabloda gösterildiklerinden daha başka değerler almaz, aynı kalırlar. Bu nedenle bu durumda Tablo 6.11 kullanılır.

-Ankastre başlı kazıkların başında yatay ötelenme nedeni ile oluşacak başlık momenti katsayıları  $A_B$  Tablo 6.12 de verilmiştir. Bu katsayı kazık başının kısmen dönmesi halinde başka başka değerler alabilir. Örneğin Davisson (1970) pratik haller için 0.4-0.5 kullanılabileceğini ileri sürmüştür. Bu değer için pozitif ve negatif momentler yaklaşık olarak eşit olur.

Tablo 6.9.  $Z_{\max} = 2$  için Katsayılar

| $Z=z/T$ | $C_y$ | $C_m$ | $A_m$ | $B_m$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00    | 4.75  | 3.40  | 0.00  | 1.00  |
| 0.10    | 4.45  | 3.20  | 0.10  | 0.99  |
| 0.20    | 4.43  | 3.00  | 0.20  | 0.98  |
| 0.30    | 3.90  | 2.60  | 0.26  | 0.97  |
| 0.40    | 3.50  | 2.30  | 0.38  | 0.96  |
| 0.50    | 3.15  | 2.00  | 0.46  | 0.93  |
| 0.60    | 2.85  | 1.80  | 0.50  | 0.91  |
| 0.70    | 2.60  | 1.55  | 0.52  | 0.88  |
| 0.80    | 2.25  | 1.25  | 0.53  | 0.84  |
| 0.90    | 2.00  | 1.10  | 0.52  | 0.78  |
| 1.00    | 1.70  | 0.90  | 0.50  | 0.70  |
| 1.20    | 1.10  | 0.40  | 0.41  | 0.48  |
| 1.40    | 0.55  | -0.30 | 0.28  | 0.32  |

|      |       |       |      |      |
|------|-------|-------|------|------|
| 1.60 | 0.00  | -0.70 | 0.14 | 0.20 |
| 1.80 | -0.40 | -1.00 | 0.07 | 0.08 |
| 2.00 | -1.00 | -1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3.00 | -1.00 | -1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4.00 | -1.00 | -1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | -1.00 | -1.00 | 0.00 | 0.00 |

Tablo 6.10.  $Z_{\max} = 3$  için Katsayılar

| $Z=z/T$ | $C_y$ | $C_m$ | $A_m$ | $B_m$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00    | 2.75  | 1.90  | 0.00  | 1.00  |
| 0.10    | 2.65  | 1.75  | 0.10  | 1.00  |
| 0.20    | 2.40  | 1.55  | 0.20  | 1.00  |
| 0.30    | 2.20  | 1.40  | 0.28  | 1.00  |
| 0.40    | 2.00  | 1.25  | 0.38  | 0.98  |
| 0.50    | 1.85  | 1.05  | 0.46  | 0.97  |
| 0.60    | 1.70  | 0.90  | 0.56  | 0.96  |

|      |       |       |      |      |
|------|-------|-------|------|------|
| 0.70 | 1.55  | 0.80  | 0.66 | 0.95 |
| 0.80 | 1.40  | 0.70  | 0.70 | 0.92 |
| 0.90 | 1.25  | 0.55  | 0.71 | 0.89 |
| 1.00 | 1.10  | 0.40  | 0.72 | 0.85 |
| 1.20 | 0.95  | 0.30  | 0.73 | 0.78 |
| 1.40 | 0.70  | 0.15  | 0.66 | 0.69 |
| 1.60 | 0.50  | 0.55  | 0.60 | 0.58 |
| 1.80 | 0.30  | 0.00  | 0.54 | 0.45 |
| 2.00 | 0.20  | -0.10 | 0.46 | 0.34 |
| 3.00 | -0.30 | -0.40 | 0.00 | 0.00 |
| 4.00 | -0.30 | -0.40 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | -0.30 | -0.40 | 0.00 | 0.00 |

Tablo 6.11.  $Z_{\max} = 4$  için Katsayılar

| $Z=z/T$ | $C_y$ | $C_m$ | $A_m$ | $B_m$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00    | 2.435 | 1.623 | 0.000 | 1.000 |

|      |        |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 0.10 | 2.273  | 1.453  | 0.100  | 1.000  |
| 0.20 | 2.112  | 1.293  | 0.198  | 0.999  |
| 0.30 | 1.952  | 1.143  | 0.291  | 0.994  |
| 0.40 | 1.796  | 1.003  | 0.379  | 0.987  |
| 0.50 | 1.644  | 0.873  | 0.459  | 0.976  |
| 0.60 | 1.496  | 0.752  | 0.532  | 0.960  |
| 0.70 | 1.353  | 0.642  | 0.595  | 0.939  |
| 0.80 | 1.216  | 0.540  | 0.649  | 0.914  |
| 0.90 | 1.086  | 0.448  | 0.693  | 0.885  |
| 1.00 | 0.962  | 0.364  | 0.727  | 0.852  |
| 1.20 | 0.738  | 0.223  | 0.767  | 0.775  |
| 1.40 | 0.544  | 0.112  | 0.772  | 0.688  |
| 1.60 | 0.381  | 0.029  | 0.746  | 0.594  |
| 1.80 | 0.247  | -0.030 | 0.696  | 0.498  |
| 2.00 | 0.142  | -0.070 | 0.628  | 0.404  |
| 3.00 | -0.075 | -0.089 | 0.225  | 0.059  |
| 4.00 | -0.050 | -0.028 | 0.000  | -0.042 |
| 5.00 | -0.009 | 0.000  | -0.093 | -0.026 |

Tablo 6.12. Ankastre Kazık Başı için Moment Katsayıları

| $Z_{\max}$    | $A_B$ |
|---------------|-------|
| 2             | -1.06 |
| 3             | -0.97 |
| 4             | -0.93 |
| 5 ve yukarısı | -0.93 |

### **Örnek 6.5.**

Yukarıda 6.3.3.1. kısmında özellikleri verilen kazık bu kez yatak katsayısının derinlikle değiştiği varsayımı ile örneklenmektedir:

Ankastre başlı kazık:  $l=45$  m,  $d=1.2$  m,  $EI=2.06 \times 10^6$  KN.m<sup>2</sup>,  $\eta_h = 1841$  KN/m<sup>3</sup>, Yatay Yük= 676 KN

- Kazık başının dönmesine izin verilmemesi durumunda kazık uzunluğunun 1/6 sı boyunca derinlikle oluşacak moment dağılımının bulunması ile,
- Kazık-radye birleşimindeki pratik bir hal için izin verilebilir ötelenmesinin kazık çapının %2 sini geçmemesi istenilmektedir.

a. (6.60) dan  $T=4.07m$ ,  $Z_{max}= 11 > 4$  Uzun (Esnek) Kazık , Tablo 6.11 kullanılır.

Kazık Başındaki ters Moment=  $0.93HT= 2558$  KNm olur.

Bir Tablo yapılır ve moment superpozisyonu sonuçları burada gösterilir:

| $Z=z/T$ | $z$ (m) | $A_m$ | $B_m$ | $A^* m$<br>(6.98) | $M(KN.m)$<br>(6.69) |
|---------|---------|-------|-------|-------------------|---------------------|
| 0.2     | 0       | 0     | 1.0   | -0.93             | -2558               |
| 0.4     | 0.814   | 0.198 | 0.999 | -0.73             | -2008               |
| 0.6     | 2.44    | 0.532 | 0.960 | -0.36             | -990.4              |
| 0.8     | 4.0     | 0.723 | 0.853 | -0.06             | -178.8              |
| 1.      | 5.69    | 0.772 | 0.688 | 0.13              | 36.58               |
| 1.4     | 7.32    | 0.696 | 0.498 | 0.23              | 640.9               |

b. (6.66) ve (6.67) denklemleri kullanılır:

Pratik durum için  $A_B=0.5$  alınırsa  $C_y=2.435$  ve  $C_m=1.623$  kullanılarak  $B_A=0.925$  bulunur. İzin verilebilir yük miktarı= $H_a=[0.206 \times 10^7 / 0.925(4.07)^3]0.02 \times 1.2=792$  KN olarak belirlenir. Ortalama kazık yükü olan 676 KN altında ise ötelenme  $0.925 \times 676 \times (4.07)^3 / 0.206 \times 10^7 = 0.0196m$  veya 20 mm bulunur. Buradan da kazık başında bir esneklik redörü saptanabilir:

$$k_x = 0.0196 / 676 = 2.9 \times 10^{-5} \text{ m/KN} \quad (UK^{-1})$$



### 6.3.3.3 p-y Eğrileri ve Kritik Yük Yöntemi (KYM)

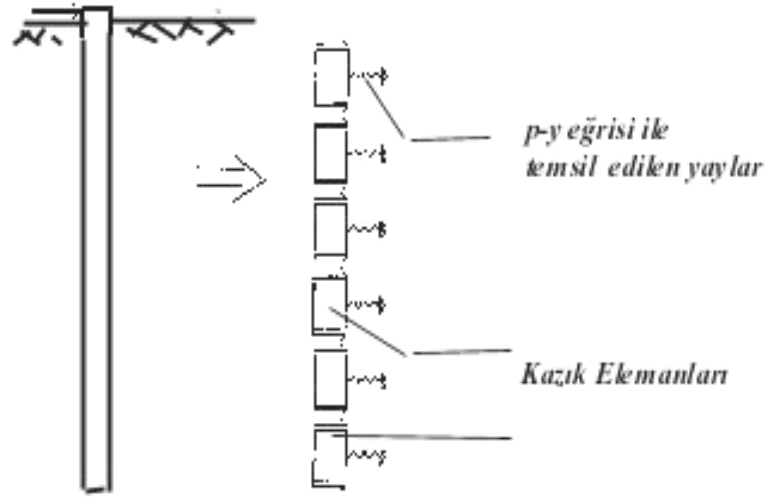
Birçok pratik halde yanal yüklenmiş kazıkların çoğu “uzun” kazıklardır; zeminin göçme yüküne göreli olarak daha büyük ötelenme miktarları ile ulaşılır ve bu nedenle tasarım; maksimum kesit momenti ile izin verilebilir ötelenme miktarlarına bağlı olarak yapılır. Bu nedenle maksimum moment ile kazık başı ötelenme miktarlarının bilinmesi gerekir.

Yukarıda 6.3.1 paragrafında Şekil 6.10 kullanılarak kazık-zemin etkileşmesindeki doğrusal olmayan davranış biçiminden söz edilmiş idi. Bu yaklaşımda bir kazık elemanında  $p$  kazık-zemin arası basıncı,  $y$  ise ötelenmeyi gösterir şekilde çizilen eğrilere  $p$ - $y$  eğrileri denilmektedir. Dilenirse bu eğrilerin, doğrusal davranış göstermeyen yay parametrelerini temsil ettiği söylenebilir. Araştırmacılar, bu yöntem izlenerek varılan bulguların, arazi ölçümlerine yakın olduğunu ileri sürmektedirler.

Diğer taraftan, Duncan ve arkadaşları (1994) ile Evans ve Duncan (1982) tarafından önerilen ve “Karakteristik Yük Metodu, KYM” olarak tanımlanacak olan diğer bir yöntem ise  $p$ - $y$  yöntemi uygulamasından elde edilen veri tabanı üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan bir yaklaşımdır. Bu paragrafta önce  $p$ - $y$  metodu kısaca tanıtılacak, sonra KYM yöntemi ile hesaplama şekli sunulacaktır.

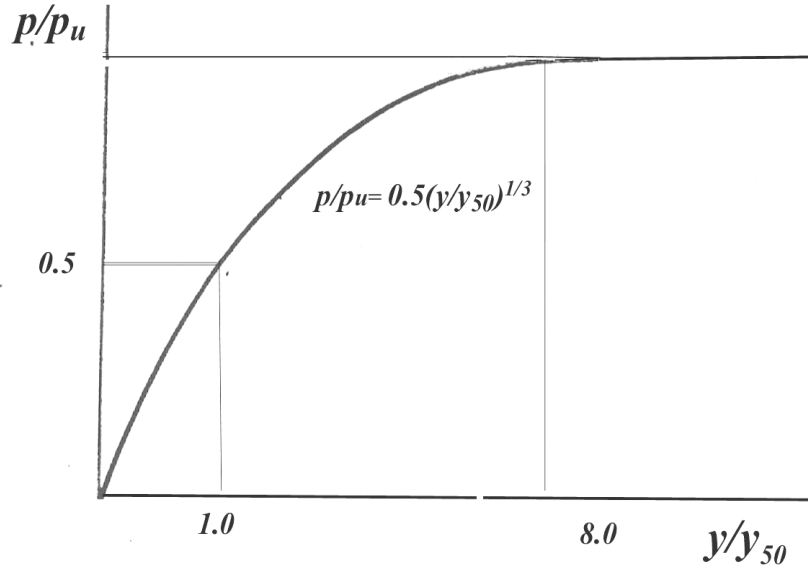
Kazık,  $p$ - $y$  metodu uygulamasında Şekil 6.13 de gösterildiği gibi elemanlara bölünür. Elemanlar arasında kesme kuvvetleri etkir; zeminin elemanlara reaksiyonu ise yaylarla gösterilir. Doğrusal olmayan bir davranışı sergileyen bu modelleme ile yay rijitliği  $k(z,y)$ ; ötelenme ile değişiminin temsil edilmesi açısından  $p$ - $y$  eğrileri ile gösterilmiş olurlar.  $p$ - $y$  eğrilerinin karakteristikleri, ayrı elemanlar üzerine Şekil 6.10 da gösterildiği gibi değiştirilerek uygulanabilir, bu suretle  $k(z,y)$  değişkeninin

derinlikle değişimi de gözönüne alınabilir. Değişik zeminler için teklif edilmiş çeşitli p-y eğrileri bulunmaktadır. Bunlar yumuşak killi zeminler, su tablasının altında ve üstünde kalan katı kıvamdaki killi zeminler, su tablasının altındaki ve üstündeki granüler zeminler, ve bu tür zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını yansıtan eğriler ile kaya zeminler için verilmişlerdir.



şekil 6.13. Kazık, Elemanlar ve p-y Yayı

Bu eğrilerin niteliğini bir örnek ile açıklayabilmek amacı ile su tablası altında bulunan bir yumuşak killi zemin için teklif edilen p-y eğrisi şekil 6.14 de gösterilmektedir.



Şekil 6.14. Su Altındaki Yumuşak Kil için p-y Eğrisi  
(Statik Yükleme Hali)

Killi zeminlerde olsun, granüler zeminlerde olsun bu eğrilerin tanımlanabilmesi için dayanım parametrelerine gereksinim vardır. Şekil 6.14 ün incelenmesinden kolayca anlaşılacağı gibi ilgili davranış, lineer olmayan elastik ve plastik bir biçimde ve boyutsuz değişkenler aracılığı ile sunulmaktadır.

Şekil 6.14 de gösterilen eğriyi elde etmek için şu yol izlenir:

- Drenajsız dayanımın ve efektif birim hacim ağırlığının derinlikle değişimi saptanır. Tercihan üç eksenli basınç deneyleri yardımı ile pik gerilmenin yüzde ellisindeki birim ötelenme mertebesi  $\varepsilon_{50}$  bulunur. Üç eksenli deneylerin kolayca yapılamayacağı hallerde, değişik zeminler için bu değerleri literatürde veren tablolar kullanılabilir.

b. Kazığın birim uzunluğu için zeminin nihai dayanımı aşağıda verilen bağıntılardan elde edilen küçük değer alınarak saptanır:

$$P_u = \left(3 + \frac{\gamma'}{c}x + \frac{J}{b}x\right)C.b \quad (6.70)$$

$$P_u = 9C_b \quad (6.71)$$

burada;

x: zemin yüzeyinden itibaren derinlik,

$\gamma'$ : zemin yüzeyinden x derinliği arasında kadar ortalama efektif birim hacim ağırlığı,

C: x derinliğindeki drenaajsız dayanım,

b: kazık genişliği (veya çapı),

J: Ampirik bir Katsayı (deneysel olarak yumuşak killer için 0.5, orta sert killer için 0.25) olmaktadır.

$P_u$  değeri bir p-y eğrisinin kullanımı gereken her derinlik için saptanır.

c. Nihai zemin direncinin yarısı değerine karşı gelen  $y_{50}$  ötelenmesi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50}b \quad (6.40 \text{ ifadesinin benzeridir}) \quad (6.72)$$

d. Bu durumda p-y eğrisini tanımlayan noktalar aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur:

$$(P/P_u)=0.5(y/y_{50})^{1/3}$$

(6.73)

e.  $y = 8y_{50}$  değerinden büyük olan ötelenme değerleri için p sabittir.

Tarif edilmiş olan bu yöntem, elle hesaplama imkanının yanısıra ve belki daha da önemli olarak, bilgisayarda doğrusal olmayan programlama yolunu açmaktadır. Bu yol kullanılarak yapılan çalışmaların literatürde gözlenen sonuçları etkili ve yararlı olmuştur.

Bu tür çalışmaların bir ürünü olan KYM metodu ise yanal yük taşıyan kazıkların davranışını boyutsal analiz yöntemiyle ve davranış parametrelerini de boyutsuz değişkenlere bağlayarak çözümlenmektedir. Kazık boyunca moment dağılımı ile kazık başı ötelenmesi bu yolla hesaplanabilmektedir.

KYM gerek kohezyonlu ve gerekse granüler zeminler içindeki pek çok sayıda ankastre ve serbest başlı kazık üzerinde p-y yöntemi ile çözümler yaparak elde edilen sonuçları boyutsuz değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerini tanımlamak yolunda kullanmak sureti ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem aşağıdaki problemlerin çözümünde kullanılmaktadır:

a. Zemin yüzeyi seviyesinde yanal yüklenmiş ankastre ve serbest başlı kazıklar ile kazık başlığının üzerindeki bir seviyede yük alan kazıkların zemin yüzeyi seviyesindeki ötelenme miktarlarının bulunması.

b. Yukarıdaki yüklenme şartlarında oluşabilecek maksimum moment miktarının ve yerinin saptanması.

Boyutsuz değişkenlerin kullanılması ile; pek çok sayıdaki gerçek durumun tek bir ilişki içinde temsil edilmesi sağlanmaktadır. Bu boyutsuz değişkenler; yük miktarlarının “Karakteristik Yük” adı verilen “ $P_c$ ” ye moment miktarlarının “Karakteristik Moment” denilen “ $M_c$ ” ye, ötelenme miktarlarının ise kazık genişliği “ $D$ ” (veya çapı  $d$ ) ye bölünmesi ile türetilmişlerdir. Aşağıda verilen “karakteristik yük” ve “karakteristik moment” ifadeleri pek çok deneme-yanılma girişiminden sonra geliştirilmişlerdir. Bu ifadeler hem derin temelin davranışını belirleyen çap ve rijitlik gibi yapısal, hem de dayanım ve gerilme-deformasyon ilişkileri gibi zeminin davranışını da içeren özellikleri kapsamaktadırlar.

Yöntemde kullanılan “karakteristik yük” ve “karakteristik moment” ifadeleri şunlardır:

Killi Zeminlerde:

$$P_c = 7.34D^2 (E_p R_1) \left( \frac{S_u}{E_p R_1} \right)^{0.68} \quad (6.74)$$

$$M_c = 3.86D^3 (E_p R_1) \left( \frac{S_u}{E_p R_1} \right)^{0.46} \quad (6.75)$$

Kumlu Zeminlerde:

$$P_c = 1.57D^2 (E_p R_1) \left( \frac{\gamma' D \phi' K_p}{E_p R_1} \right)^{0.57} \quad (6.76)$$

$$M_c = 1.33D^3 (E_p R_1) \left( \frac{\gamma' D K_p \phi'}{E_p R_1} \right)^{0.40} \quad (6.77)$$

burada:

$P_c$  = Karakteristik Yük,

$M_c$  = Karakteristik Moment,

$D$  = Kazığın Genişlik veya Çapı,

$E_p$  = Kazığın Elastik Modülü,

$R_1$  = Eylemsizlik Momenti Oranı = Kazık Kesidinin Eylemsizlik Momentinin Dolu Kesidin Eylemsizlik Momentine Oranı (dolu kesitli kazıklar için 1),

$S_u$  = Kilin Drenajsız Dayanımı,

$\gamma'$  = Granüler Zeminin Efektif Birim Hacim Ağırlığı,

$\phi'$  = Granüler Zeminin Efektif İçsel Sürtünme Açısı (derece),

$K_p$  = Rankine Pasif Toprak Basıncı Karakteristik Yük Katsayısı,

$M_{max}$  = Kazık boyunca Maksimum Kesit Momentidirler.

$P_c$  veya  $M_c$  değerlerinin gerçekçi olarak saptanabilmesi yönünde bu yöntem bulgularını p-y yöntemi bulguları ile kıyaslamak için yapılmış olan

çalışmalar, direnç parametreleri  $S_u$  veya  $\phi'$  değerlerinin kazık çapının 8 misli derinliği içinde araştırılarak bulunan değerlerin ortalamalarının alınmasının optimum çözüm için yararlı olacağını ortaya koymuştur.

Bu yaklaşım, Brettmann ve Duncan'ın çalışması ile (1996) daha pratik bir şekle getirilmiştir:

KYM nin ilk aşamalarında sunulmuş olan kazık başı yük-ötelenme ve moment-ötelenme verileri, bu araştırmacılar tarafından doyurucu bir yakınlık içinde aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmişlerdir: Bu bağıntılardaki a, b katsayıları değişik kazık başı durumları ve zemin türleri için aşağıda Tablo 6.13, Tablo 6.14 ve Tablo 6.15 de sunulmuştur (\*):

Burada:

$y_t$ =Kazık Başı Ötelenmesi,

$P_t$ = Kazık Başı Yüğü,

$M_t$ =Kazık Başı Momenti,

a, b= regresyon katsayıları,

olmaktadır. Ayrıca bu bağıntılardan elde edilen veriler de her bir hal için Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 de gösterilmişlerdir.

---

(\*Orijinal yayında Tablolarda görülen yanlışlar “Geoteknik Mühendisliğinde Bilgisayar Uygulamaları” dersimi almakta ve bu çözümü bilgisayar ortamına taşımakta olan **Tüter ve Sultanoğlu** (1996) tarafından fark edilmiş ve dönem projelerinde düzeltilmiştir. Aşağıda bu düzeltilmiş durum verilmektedir)

---

$$(Y_t/D) = a(P_t/P_C)^b \quad (6.78)$$

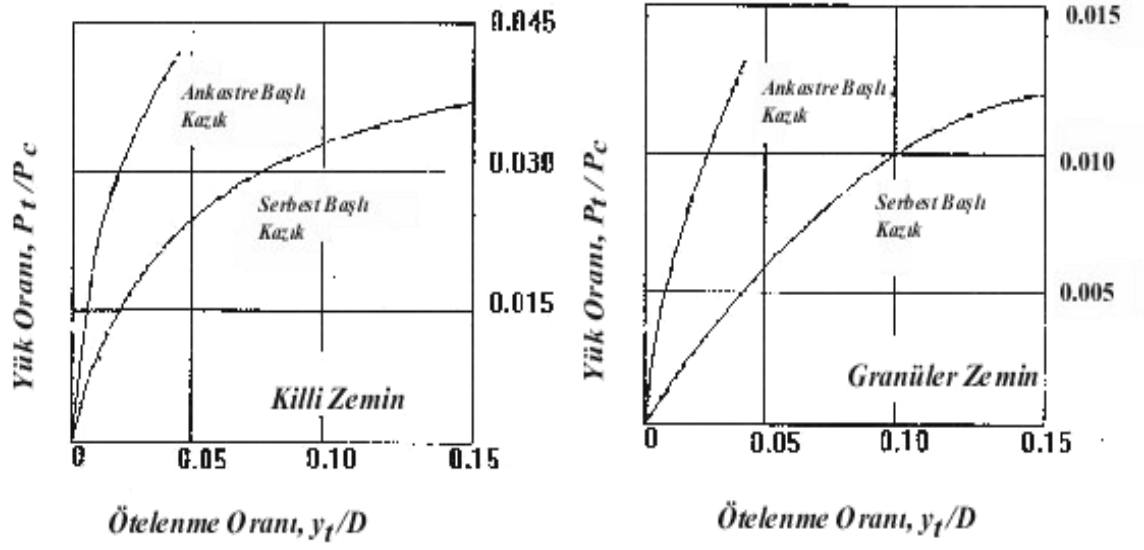


Tablo 6.13. (6.78) ifadesinde a, b Değerleri

| Katsayı | Killi Zemin |              | Granüler Zemin |              |
|---------|-------------|--------------|----------------|--------------|
|         | Serbest Baş | Ankastre Baş | Serbest Baş    | Ankastre Baş |
| a       | 50          | 14.0         | 119            | 28.8         |
| b       | 1. 822      | 1. 846       | 1.523          | 1.50         |

**Örnek 6.6.**

6.3.3.2. paragrafındaki örnek kazık için öngörölmüş olan 0.02 d miktarında kazık başı ötelenmesini geçmeyecek olan yük, zeminin drenajsız dayanım değeri 50 Kpa alınarak 762 KN hesaplanır. Bu değerin Matlock-Reese yöntemi ile hesaplanmış olan değere çok yakın olduğu görölmektedir.

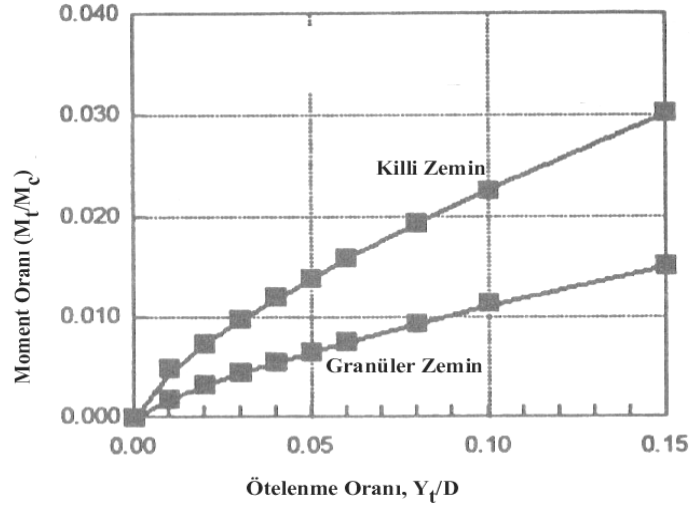


Şekil 6.15. (6.78) İfadesinden Elde Edilen Yük-Ötelenme Eğrileri (Duncan ve Arkadaşları,1994)

$$(Y_t/D) = a(M_t/M_C)^b \quad (6.79)$$

Tablo 6.14 (6.79) İfadesinde a, b Değerleri

| Katsayı | Killi Zemin | Granüler Zemin |
|---------|-------------|----------------|
| a       | 21.0        | 36.0           |
| b       | 1.412       | 1.308          |



Şekil 6.16. (6.79) İfadesinden Elde Edilen Moment-Ötelenme Eğrileri

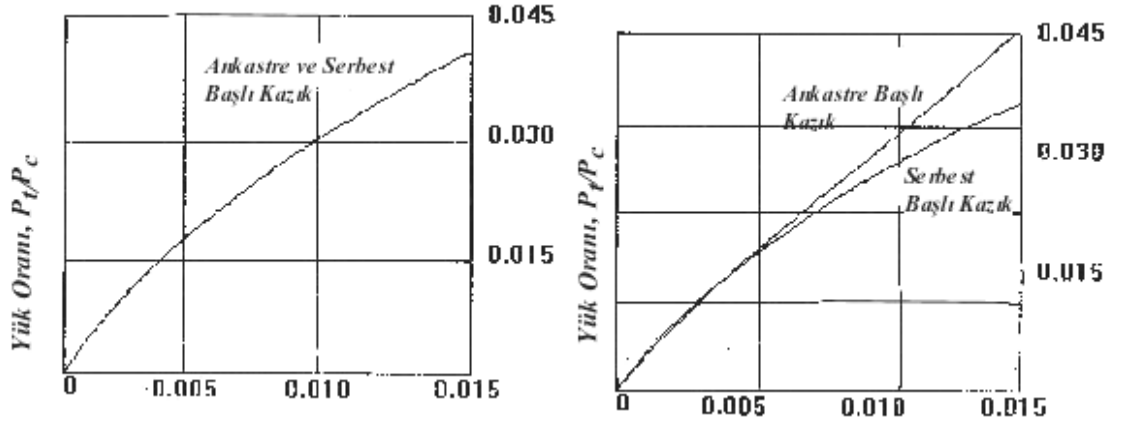
(Duncan ve Arkadaşları,1994)

$$(P_t/P_C) = a(M_{\max}/M_C)^b \quad (6.80)$$

Tablo 6.15 (6.80) İfadesinde a, b Değerleri

| Katsayı | Killi Zemin |              | Granüler Zemin |              |
|---------|-------------|--------------|----------------|--------------|
|         | Serbest Baş | Ankastre Baş | Serbest Baş    | Ankastre Baş |
| a       | 1.22        | 1.63         | 0.425          | 0.668        |

|   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| b | 0.792 | 0.860 | 0.762 | 0.839 |
|---|-------|-------|-------|-------|



Şekil 6.17. (6.80) İfadesinden Elde Edilen Yük-Ötelenme Eğrileri (Duncan ve Arkadaşları,1994)

Kazığa zemin seviyesinde bir yanal yük uygulandığında ötelenme veya maksimum moment bu denklemlerle bulunmak istendiği zaman önce (6.74) ila (6.77) bağıntılarından “karakteristik” parametre bulunur. Bu parametre yukarıdaki denklemlerde yerine konularak bilinmeyen değer hesaplanır. Aynı denklemlerle tersine hesap da yapılabilir.

Serbest başlı bir kazığa zemin yüzeyi üzerindeki bir seviyede uygulanan yanal yük nedeni ile zemin yüzeyi seviyesinde hem yanal yük hem de moment bulunacaktır. Bu seviyedeki ötelenme, bu iki etkenin bileşiminden oluşacaktır. Yük-ötelenme ilişkisi doğrusal olmadığından çözümde doğrusal olmayan bir süperpozisyonun yapılması gerekir. Bu işlem için Şekil 6.18 de şematik olarak gösterilen adımları izlemek uygun olacaktır:

- a. Yalnızca yükten dolayı ve yalnızca momentten dolayı meydana gelen kazık başı ötelenmesi yukarıda anlatılan şekilde hesaplanır. (Şekil 6.18 : 1 ve 2)
- b. Yükten dolayı oluşan ötelenmeyi aynen meydana getirecek olan moment (eşdeğer moment) ve momentten dolayı oluşan ötelenmeyi aynen meydana getirecek yük (eşdeğer yük) tersine hesapla bulunur. (Şekil 6.18 : 3 ve 4)
- c. Gerçek yük ile eşdeğer yükün toplamının oluşturacağı kazık başı ötelenmesi ile gerçek moment ve eşdeğer moment toplamının oluşturacağı kazık başı ötelenmesi hesaplanır. (Şekil 6.18 : 5 ve 6)
- d. Bileşik kazık başı ötelenmesini bulmak için c adımında hesaplanan değerlerin ortalaması alınır. Bu husus aşağıdaki bağıntı ile gösterilmektedir:

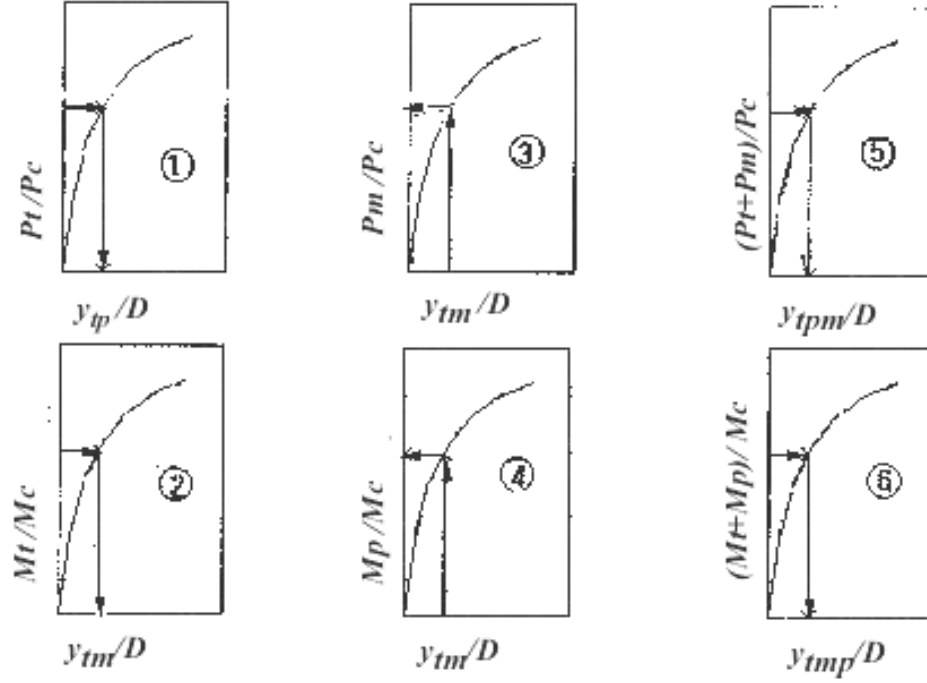
$$y_{ym} = 0.5 (y_{tpm} + y_{tmp}) \quad (6.81)$$

burada:

$y_{ym}$  = Yük ve Moment Nedeni ile Zemin Seviyesinde Oluşacak Ötelenme,

$y_{tpm}$  = Zemin Seviyesinde Gerçek ve Eşdeğer Yük Nedeni ile Bulunan Ötelenme,

$y_{tmp}$  = Zemin Seviyesinde Gerçek ve Eşdeğer Moment Nedeni ile Bulunan Ötelenmedirler.



Şekil 6.18. Doğrusal Davranış Göstermeyen Moment ve Yük Bileşimi

Yukarıda yanal yüklenen kazık davranışını anlatan bahislerde görüldüğü gibi kazık başının ankastre olması halinde en büyük moment (ters moment) bu kesitte oluşur. Bu durumda, ters moment kazık başına uygulanmak suretiyle tüm değerler yukarıdaki gibi hesaplanır. Zemin seviyesinden daha üst bir seviyede bulunan bir yanal yüklenmiş olan serbest başlı kazıklarda maksimum moment ankastre başlı kazıkların aksine; kazığın belli bir derinliğindeki kesitte oluşur. Bu durumda momentin derinlikle değişimi Matlock-Reese bağıntıları kullanılarak bulunabilir. Ancak bu yaklaşımda yük ve moment nedeni ile zemin seviyesinde oluşacak ötelenme değeri  $y_{ym}$  nin KYM yöntemi ile bulunmasından sonra “karakteristik uzunluk, T”

I =kazığın eylemsizlik momenti,

E= Kazığın Elastik Modülü

Olmak üzere aşağıdaki bağıntı yardımı ile deneme-yanılma hesabı yapılarak bulunacaktır:

$$y_{ym} = \frac{2.43P_t T^3}{EI} + \frac{1.62M_t T^2}{EI} \quad (6.82)$$

T değerinin bulunmasından sonra 6.3.2.2. paragrafındaki gibi aşağıdaki ifade kullanılarak kazık boyunca moment dağılımı hesaplanır:

$$M_z = AP_t T + BM_t \quad (6.83)$$

A ve B katsayıları aşağıda Tablo 6.16. da gösterilmişlerdir.

Tablo 6.16. Moment Katsayıları

| z/T | A    | B    |
|-----|------|------|
| .00 | 0.00 | 1.00 |
| 0.5 | 0.46 | 0.98 |
| 1.0 | 0.73 | 0.85 |

|     |      |      |
|-----|------|------|
| 1.3 | 0.77 | 0.73 |
| 1.5 | 0.76 | 0.64 |
| 2.0 | 0.63 | 0.40 |

(Duncan ve Arkadaşları,1994)

burada:

$M_z = z$  Derinliğindeki Moment,

A, B = Boyutsuz Moment Katsayılarıdır.

Kazık başına zemin yüzeyinde yalnızca yanal bir yük uygulanırsa maksimum moment  $z=1.3 T$  derinliğinde görülür. Aynı şekilde yalnızca bir moment uygulanırsa, bu moment maksimum moment olur. Zemin seviyesinden yukarıdaki bir seviyede yanal yük uygulanması halinde ise maksimum moment  $z=0$  and  $z=1.3T$  arasında bir derinlikte görülür. KYM uygulamasında en büyük sınırlama bu metodun ancak uzun (esnek) kazıklara uygulanabilmesi hususudur. Değişik zemin ve kazık özellikleri için yöntemin geçerli olabileceği minimum uzunluklar aşağıda Tablo 6.17 de verilmiştir:

Tablo 6.17. Asgari Uzunluklar

| Zemin Cinsi | Kriter | Asgari Uzunluk |
|-------------|--------|----------------|
|-------------|--------|----------------|



|     |   |        |
|-----|---|--------|
| Kil | $E_p R_1 / S_u = 100000$                      | 6 çap  |
| Kil | $E_p R_1 / S_u = 300000$                      | 10 çap |
| Kil | $E_p R_1 / S_u = 1000000$                     | 14 çap |
| Kil | $E_p R_1 / S_u = 3000000$                     | 18 çap |
| Kum | $E_p R_1 / (\gamma' D \phi' K_p) = 1$<br>0000 | 8 çap  |
| Kum | $E_p R_1 / (\gamma' D \phi' K_p) = 4$<br>0000 | 11 çap |
| Kum | $E_p R_1 / (\gamma' D \phi' K_p) =$<br>200000 | 14 çap |

Uzunlukların Tabloda gösterilen değerlerin altında olması halinde doğru sonuçlar elde edilemeyecektir. Üniform bir zemin içindeki “kısa” kazıklar, KYM den elde edilen sonuçlara kıyasla daha fazla ötelenirler, moment değerleri ise daha düşük olur.

#### 6.3.3.4. Tasarımda Yatak Modüllerinin Düzeltilerek Kullanılması Yöntemi

Yanal yüklenmiş kazıkların Yatak Modülü Kullanılarak yapılan tasarımı için bu modülün doğru olarak saptanması önem taşımaktadır.

Modül, genel olarak zemin cinsine göre literatürde verilen tablolardan seçilmekte, ayrıca zemin deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak değişik yöntemlerle yapılan hesaplarla irdelenmekte ve bir sonuca ulaşılmaktadır. Ancak, modülün bulunmasında gösterilen tüm

titizliğe rağmen, bir yanal yükleme deneyinin yapılmış olması durumu dışında, kullanılan değerlerin ne kadar gerçekçi olduğu bilinmediğinden sonuçlardaki hata düzeyini tahmin dahi edilememektedir. Ancak, kazık yükleme deneylerinin sonuçları ile yapılan kıyaslamalar hesaplanan ötelenme miktarlarının, gözlenen miktarların çok üstünde olduğunu göstermektedir. Bu durum, modül değerinin gerçekçi olmamasının yanı sıra yük-ötelenme davranışının yapılan kabullerin aksine doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu paragrafta anlatılan yöntem; sınırlanan bir yatak modülü değeri ile elde edilen ötelenme değerinin p-y eğrisi aracılığı ile düzeltilerek yeni bir yatak modülü elde edilmesi ve bu sürecin tekrarlanmasına dayanır ve gerçekçi bir yatak modülünün saptanmasına yönelik olduğundan tasarımdaki hata payını azaltabilecektir.

Yöntem, pratikte genellikle kullanılan esnek kazıklar için geçerlidir.

Yukarıda 6.3.3.2. paragrafında Yatak Modülünün kazığın derinliği boyunca artması durumunda beliren problemin Matlock ve Reese (1960) verilen çözümü sunulmuş idi. Momentin derinlikle değişimi için (6.63) ve Eğimin derinlikle değişimi için ise (6.64) bağıntısı verilmiş olup bu bağıntılardaki moment değişimini yansıtan  $A_m$  ve  $B_m$  katsayıları da tablolarda verilmiştir. Buradaki yöntemin uygulanması için katsayıların kazık başındaki ( $Z=0$ ) değerleri yeterlidir. Uygulama aşağıda belirtilen iki adımda yapılır:

Adım 1. Yay Katsayısının Düzeltilmesi

Kazığın davranışını tanımlayan bir “eşdeğer konsol uzunluğu,  $l_e$ ”  $l_e = \frac{EI\theta}{M}$

şeklinde tanımlanır (Bkz. Kısım 9) ve (6.64) ifadesi ile gösterilen kazık başındaki ( $z=0$ ) dönmeye eşitlenirse:

$$\theta(0) = A_{\theta} \frac{HT^2}{EI} + B_{\theta} \frac{MT}{EI} = \frac{l_e M}{EI} \quad (6.84)$$

bağıntısına varılır.

Buradan hareketle yukarıdaki  $A_B$  değeri “eşdeğer konsol uzunluğu,  $l_e$ ” cinsinden

$$A_B = \frac{M}{HT} = -\left(\frac{A_{\theta}}{B_{\theta}}\right)_{z=0} = \frac{A_{\theta} T}{l_e - B_{\theta} T} \quad (6.85)$$

şeklini alır. Pratikte eşdeğer konsol kazığının boyunun ne alınması konusundaki görüşler, Kısım 9 da özetlenmiştir. Bu değer bir ilk yaklaşım olarak  $l_e=1.75T$  alınabilir. Uzun (esnek) bir kazığının varlığı halinde  $Z_{max}>4$  olur. Pratikte kullanılan narin kazıkların çoğu için bu durum geçerlidir, ancak durumun geçerliliğinin tasarım sırasında hesapla doğrulanması uygun olur.  $Z_{max}>4$  durumu için kazık başı seviyesinde ( $z=0$ );  $A_{\theta}=-1.623$  ,  $B_{\theta}=-1.750$ ,  $C_m=1.623$ ,  $C_y=2.435$  katsayı değerleri geçerlidir. Ankastre başlı kazıklarda kazık başındaki karşılama momentinin değeri çok önemlidir. En katı teorik yaklaşımla kazık başının dönmesine izin verilmemesi halinde bu kesimde eğim sıfır olur. Bu halde  $A_B= 0.93$  elde edilir ve bu değer (6.65) denkleminin elde edildiği şekilde kullanılabilir. Ancak Davisson (1970), pratikte kazık başının hiç dönmemesinin olası olmadığını ve gerçekteki haller için bu değer 0.4 ile 0.5 arasında olacağını yazmaktadır. Buradaki kapsam içinde ankastre kazık hali için 0.45 değeri kullanılacak ve bu değer gerçekçiliği irdelenecektir. Kazık başının mafsalı olması halinde ise  $A_B = 0$  olur.

Kazık başındaki katsayıların yukarıdaki

$$B_A = (C_y - 0.93C_m)$$

(6.66)

denkleminde kullanılması ile  $B_A=1.70$  bulunur. Diğer yandan yukarıda değerleri verilmiş olan  $A_0, B_0$  katsayıları (6.84) denkleminde kullanılarak ve  $l_e=1.75T$  alınarak da aynı sonuca varılabilir. İki yol ile aynı sonuca varış,  $l_e=1.75T$  kabulünün uygun olduğunu gösterir. Bu şekilde derinlikle ötelenmenin değişimi:

$$y(z) = 1.70 \frac{HT^3}{EI} \quad (6.86)$$

olarak bulunur.

## Adım 2. p-y Eğrilerinin Devreye Alınması

Bu aşamada bir önceki paragrafta tanıtılan (p-y eğrisi) konusuna dönecek ve kısaca bir tekrar yapılacaktır. Bilindiği üzere

$$y_{50} = 2.5 \quad d \quad \epsilon_{50} \quad (6.72)$$

bağıntısı kullanılır. Bir  $p/p_{ult}-y/y_{50}$  eksenleri ile tanımlanan grafikte p-y eğrisini tanımlayan noktalar ise:

$$\frac{P}{P_{ult}} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (6.73)$$

bağıntıları ele alınır,  $p/p_{ult}$  değerinin ötelenmenin  $y=8y_{50}$  değerinden sonra sabit olduğu kabulü yapılır. (6.73) de endis  $1/2$  ila  $1/4$  arasında değişebilir. taşıma gücü  $p_{ult}$ :

$$p_{ult}=9 C_u d \quad \text{-(6.70)}$$

ya da

$$p_{ult} = \left(3 + \frac{\gamma' z}{C_u} + \frac{Jz}{d}\right) C_u \quad \text{(6.71)}$$

bağıntılarından bulunan değer küçüğü olarak kabul edilir.

Çözüm için bir kazık çapı derinliğindeki p-y eğrisinin kullanılması uygun olur. Esasen, kazığın ilk 1-3 kazık çapı derinliğindeki etkileşim, davranışı büyük ölçüde tayin ettiği için eğrinin de bu derinliklerde hesaplanması uygundur. Laboratuarda üç eksenli deneyleri için örselenmemiş örneklerin alınmasında bu noktaya dikkat edilmelidir.

Aşağıda yöntemin uygulanması ve kimi kazık yükleme deneyi sonuçları ile kıyaslanmasını ele alan örnekler sunulmaktadır.

## ÖRNEKLER

İki ayrı kazık yükleme deneyi sonucu kullanılmıştır. Bunlardan birincisi Tassios (1963) de yayınlanmıştır. Pratikte deney zorlukları nedeni ile ankastre başlı kazıklar üzerinde yapılmış deney sonuçlarına pek rastlanmaz. Bu nedenle, Atina'da inşa edilmekte olan bir binanın bodrumundaki bir

kirişli temel sistemine bağlı bir kazık üzerinde uygulanan deneyin sonuçları dikkate değer bulunmuştur. İkinci örnek, serbest başlı bir kazığın davranışını yansıtmaktadır. Platis (1988) de yayınlanmıştır.

### **Örnek 6.7.**

Tassios (1963): Ankastre Başlı Betonarme Fore Kazık. Kazık Çapı=1.25 m; Kazık Uzunluğu=32 m; Kazık Elastik Modülü= $24 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>

Zemin Kumlu Kil, SPT(N)=10;  $C_u=80$  kN/m<sup>2</sup>; Zeminin Birim Hacim Ağırlığı=16 kN/m<sup>3</sup>

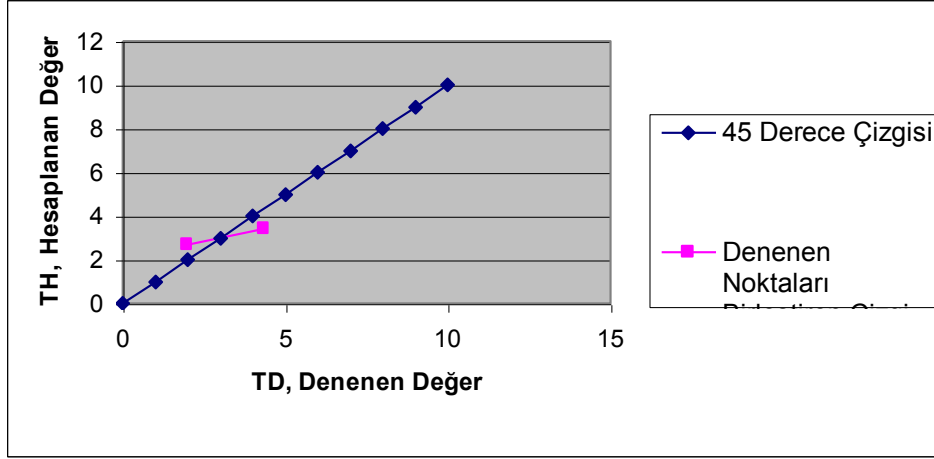
Duncan ve diğerleri (1964) den p-y eğrisi için değerler:  $\epsilon_{50}=0.010$ ;  $J=0.25$ ; p-y eğrisinin elde edildiği derinlik=  $d= 1.25$  m;

Bu değerlerle p-y eğrisi kullanılarak (6.73) ile::

$$p = 180 \left( \frac{y}{0.0218} \right)^{0.25}$$

şeklinde yazılabilir. Önerilen Yöntemi açıklamak için örnek hesap  $H=500$  kN yük değeri için yapılacaktır. Yukarıda sözü edildiği gibi  $A_B= 0.45$  alınmıştır.

İlk modül değeri olarak Tablo 6.2. de verilen değerlerden  $\eta_h=1840$  kN/m<sup>3</sup> seçilirse T değeri 4.348 m ötelenme  $y=0.024$  m bulunur. Bu değer, (6.73) bağıntısına konduğunda  $p=184.9$  kN/m<sup>2</sup> gerilme değeri elde edilir. Buradan yeni modül  $\eta_h=184.9/0.024 \times 1.25=6113.7$  kN/m<sup>3</sup> ve elastik uzunluk  $T= 3.42$  m bulunur. Bu kez örneğin  $T=2.0$  m değeri ile aynı yol izlenerek yeni T bulunur. İşlemi pratik şekilde sonlandırmak için sınanan ve bulunan değerler grafiklenir ve bulunan iki nokta birleştirilir. Bu şekilde elde edilen doğrunun 45 derece hattı ile kesişme noktası aranan T yi verir. Bu yöntem, Şekil 1 de gösterilmektedir.



Şekil 1 Grafik Yöntem Birand (2005)

Diğer yandan, sınanan ve hesaplanan değerler kullanılarak basit bir doğru denklemi elde edilebilir ve  $T_H=T_D$  şartının varlığı da göz önüne alınarak:

$$T_H - T_{H2} = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{D1} - T_{D2}} (T_D - T_{D2})$$

Bağıntısı elde edilir. Bu şekilde elde edilen doğru denkleminin 45 derece eğimi olan doğru ile kesişme noktası aranan T yi verir. Bu bağıntıdaki değerler aşağıdaki gibidir:

$T_H$ = Hesaplanan T Değeri

$T_D$ =Denenen T Değeri

$T_{D1}$ = İlk Denenen T değeri

$T_{D2}$ = İkinci Denenen T değeri

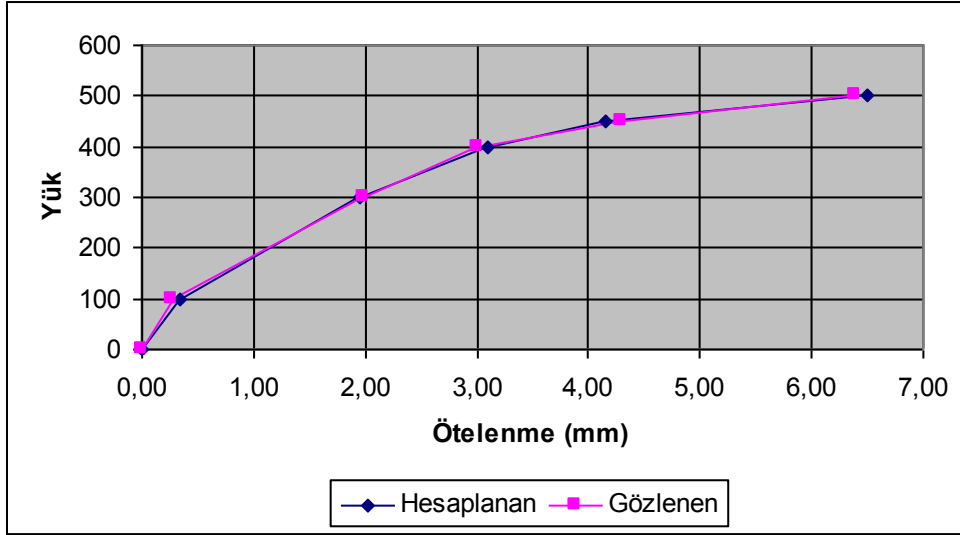
$T_{H1}$ = İlk Denenen T değerine karşı hesaplanan T değeri

$T_{H2}$ =İkinci Denenen T değerine karşı hesaplanan T değeri.

P= Basınç,

T= Elastik Uzunluk

Hesaplar, diğ er yükler için tekrarlanır. Sonuçlar Yük-Ötelenme grafiğ i olarak elde edilir Ö rnek için bulunan sonuçlar, Ş ekil 2 de kazık deney sonuçları ile beraber sunulmaktadır.



Ş ekil 2. Ö rnek 1 de Gö zlem ve Hesap Sonuçları

Birand (2005)

Aş ağıdaki noktaya değ inmekte yarar vardır:

Ö rneğ in bu yöntem kullanılmayıp literatürden alınan  $\eta_h=1840 \text{ kN/m}^3$  değ eri ile hesap yapılırsa idi 500 kN yük için pratikteki hesaplarda pek çok kez görüldüğü gibi  $A_B= 0.93$  kullanımı ile ö telenme 13.2 mm olarak gerçeğ in iki misli mertebesinde hesaplanmış olacaktı.  $A_B= 0.45$  pratik değ eri ile hesaplansa 24 mm bulunacaktı.

### **Ö rnek 6.8**

Platis (1988) Serbest Başlı Betonarme Fore Kazık. Kazık Ç apı=1.00 m; Kazık Uzunluğ u=40 m; Kazık Elastik Modülü= $24 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$

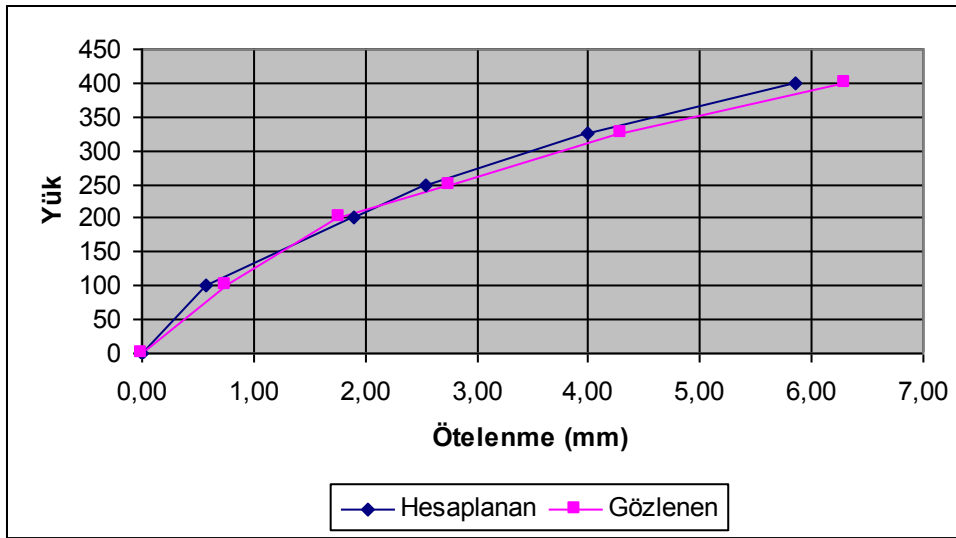


Zemin Kumlu Kil Dolgu, SPT(N)=21;  $C_u=180 \text{ kN/m}^2$ ; Zeminin Birim Hacim Ağırlığı=16 kN/m<sup>3</sup>.

p-y eğrisi yine aşağıdaki gibi elde edilir.

$$p = 325 \left( \frac{y}{0.0175} \right)^{0.25}$$

Bu halde kazık başı serbest olduğundan ve yalnızca yanal yük bulunduğundan (6.62) denkleminde  $M=0$  olur. Hesaplar, denklemin yalnızca ilk terimi kullanılarak yapılır. Örnek 1 de anlatılan şekilde yürütülen deneme-yanılma yöntemi ile bulunan sonuçlar Şekil 2 de sunulmaktadır.



Şekil 3. Örnek 2 de Gözlem ve Hesap Sonuçları

Birand (2005)

#### 6.4. Çift Tabakalı Zeminler için Davisson-Gill Teorisi

Bu yöntem (Davisson ve Gill, 1963) iki tabakadan oluşan bir zemin kitlesi içinde yanal yüklerle yüklenmiş bir kazığın davranışını incelemekte ve önemli pratik sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu iki tabaka, çeşitli

nedenlerle oluşabilecek doğal durumları yansıtmaktadır. Çoğu kez homojen bir killi zemin yüzeyi kuruma nedeni ile daha sertleşmektedir. Alüvyon zeminlerde, yüzeyde granüler, derinlerde silt-kil karışımları görmek olasıdır. Aynı hal tersine olabilir, pek çok durumda su birikintileri içindeki çökeller, yüzeyde yumuşak olup derinlikle sertleşirler.

Diğer yandan yumuşak zemin içinde olup fazla ötelenme gösteren kazıkların baş seviyesinden itibaren yumuşak zemin bir miktar sıyrılıp yerine sıkı bir dolgu yapılabilir. Bu; aşırı ötelenmeyi önleyecek ve moment miktarını azaltacak bir pratik bir önlemdir.

Araştırmacılar çözümü; zamanın ünlü yöntemlerinden birisi olan analog bilgisayar programı aracılığı ile gerçekleştirmişlerdir. Bu metinde yöntemin tüm ayrıntılarına girilmeyecek, yaklaşımın ana esasları ortaya konacak, araştırmacıların vardıkları çok önemli bazı sonuçlar sunulacak ve sonra pratik çözüm yolu açıklanacaktır.

Gerekli semboller aşağıda listelenmektedir:

$k_1$ =Üstteki Zemin Tabakasının Yatak Modülü,

$k_0$ = Alttaki Zemin Tabakasının Yatak Modülü,

$L$ = Kazığın Zemin İçinde Kalan Boyu,

$\square$ =Üst Tabaka Kalınlığının Kazığın Zemin İçinde Kalan Boyuna Yüzde Olarak Oranı. (Çözüm %0 ila %20 arasındaki değerler içermektedir.)

$c = k_1 / k_0$  (Çözüm  $c$  için 0 ila 20 aralığını kapsamaktadır.)

$$R = 1 / \square = \sqrt[4]{\frac{EI}{k_0}} \quad (6.34) \text{ bağıntısı ile verilen elastik boy.}$$

$z$ = Derinlik,

$l = z/R$ =Boyutsuz Derinlik,

$l_{\max}=L/R$ =Kazığın boyunun boyutsuz ifadesi.

Davranışı tanımlayan ve analog bilgisayar programı ile çözülmüş olan denklem, kazık başında aksenal bir yük olan N yükünü de içermek ve diğer değişkenler 6.3.3.2. kısmında tanımlanmış olan boyutsuz değişkenler olmak kaydı ile şöyledir:

$$EI \frac{d^4 y}{dl^4} + N \frac{d^2 y}{dl^2} + \frac{k_1}{k_0} y = 0 \quad (6.87)$$

Bu denklem uyarınca aksenal N yükünün kazıkta bir burkulmaya neden olabileceği düşünülebilir. Burkulma konusu, ileride ayrıca işlenecektir. Genellikle kazığın güvenli servis yükü burkulma kritik yükü olarak tanımlanan  $P_{cr}$  nin %10 unu aşmıyorsa, N yükü ihmal edilebilir. Çözüm  $k_0=k_1$  durumunda homojen bir zemin için verilmiş olmaktadır ve sonuçlar yukarıda yatak katsayısı kavramına dayalı olarak verilmiş olan çözümlerle aynı olacaktır. Diğer bir deyişle (6.87) denklemi, Hetenyi ve Matlock-Reese'in tasarladığı davranış biçimlerini de ilke bazında kapsamına alarak tanımlamaktadır.

Aşağıdaki anlatımda, yanal etkiler incelenirken N yükünün etkisi ihmal edilmiştir. R boyutsuz uzunluğu; (6.34) denklemi ile ve bu denklemde yatak modülü için alttaki zemin tabakasının modülü  $k_0$  alınmak üzere hesaplanır.  $R>4$  halinde bütün çözümler aynı olmaktadır. Bilindiği gibi pek çok kazık aslında en azından 4R uzunlukta tasarlanırlar. Bu nedenle  $l_{\max}=4R$  durumuna karşı gelen çözümler önem kazanmaktadır. Araştırmacılar, bu çalışmalarını sonucunda aşağıda sunulan çok önemli yargılara varmışlardır:

- a. İki tabakalı bir zemin profilinde yüzeyde; alttakine nazaran daha sert bir kil olması halinde bu zemin içindeki bir kazığın başında yatay yük nedeni ile oluşacak ötelenme miktarı azalır. Ancak, bu etki, yüzeydeki sert kilin kalınlığının  $0.2 R$  den daha fazla olması halinde artış göstermez. Bu kalınlık değeri ise birkaç kazık çapı mertebesinde bir değerdir.
- b. Kazık başının ötelenme değeri  $c$  katsayısının artması ile azalır; ancak bu azalma eğilimi,  $c$  değerinin 5 den fazla olması halinde yavaşlar.
- c. Yüzeyden itibaren  $0.2 R$  ila  $0.4 R$  derinlik içinde bulunan zemin, yanal yük taşıyan bir kazığın davranışını çok önemli ölçüde etkilemektedir.
- d. Yukarıda  $c$  maddesinde sözü edilen durum nedeni ile yatak katsayısı değerinin  $0.2R$  ila  $0.4R$  derinlik içinde yapılacak titiz araştırmalar ile saptanması gereklidir.

Tablo 6.18 de kazık başı şartına koşt olarak kazık boyunca meydana gelen moment ve ötelenmeyi ifade eden denklemlere yer verilmiştir. Şekil 6.20 ila 6.24 ise bu denklemlerde kullanılması gereken moment ve ötelenme etki katsayılarını göstermektedir. Bu şekillerde; Tablo 6.18 de gösterilen kazık başı şartlarındaki ötelenme ve moment miktarları boyutsuz derinlik değişkeni  $l=z/r$  boyunca ve  $c$  nin 0 ila 20 aralığındaki 10 ayrı değeri için gösterilmektedir.  $M$  ile gösterilen eğriler Moment;  $y$  ile gösterilen eğriler ise ötelenme etki katsayılarını gösteren eğrilerdir. Tablo 6.18 de görülen değişkenler ve katsayılar aşağıdaki gibidir:

$(M_l)$  =Kazık Boyunca Moment,

$(y_l)$  =Kazık Boyunca Ötelenme,

$M_{lm}$ ;  $M_{lq}$  = Serbest Başlı Kazıkta Kazık Başı Momenti ve Yanal Yükü Nedeni ile Oluştan Momenti Belirleyen Katsayı,

$y_{lm}$ ;  $y_{lq}$  = Serbest Başlı Kazıkta Kazık Başı Momenti ve Yanal Yüğü Nedeni ile Oluşan Ötelenmeyi Belirleyen Katsayı,

$M_{lf}$  = Ankastre Başlı Kazıkta Kazık Başı Momenti ve Yanal Yüğü Nedeni ile Oluşan Momenti Belirleyen Katsayı,

$y_{lf}$  = Ankastre Başlı Kazıkta Kazık Başı Momenti ve Yanal Yüğü Nedeni ile Oluşan Ötelenmeyi Belirleyen Katsayıdır.

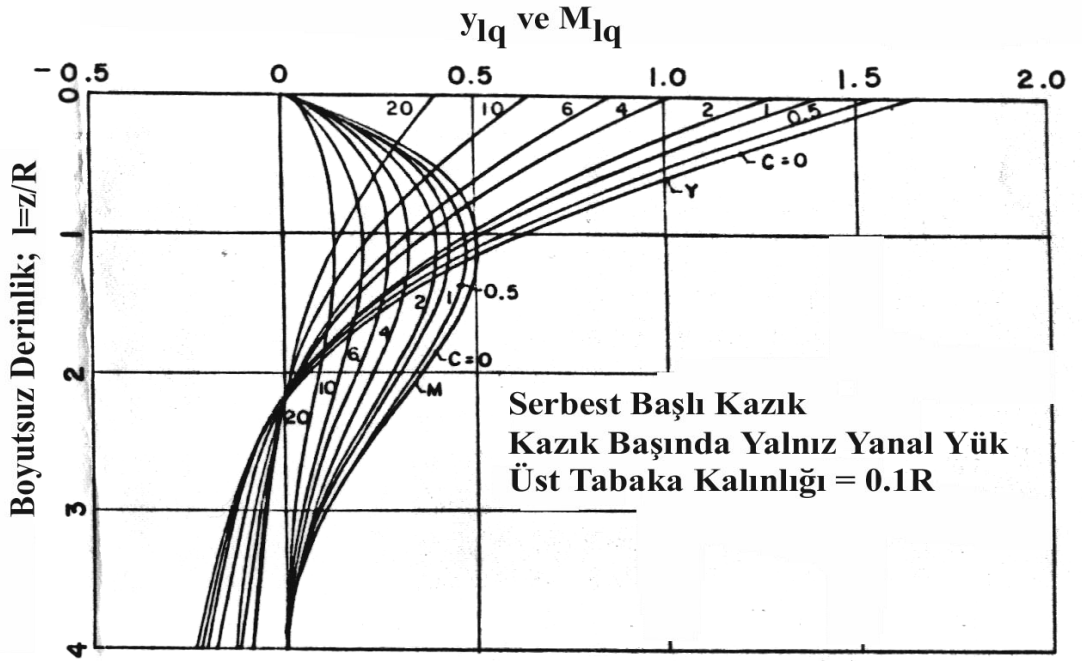
$c$  = Yukarıda açıklandığı gibi  $k_1/k_0$  oranıdır.

Tablo 6.18. Şekillerde Görülen Semboller

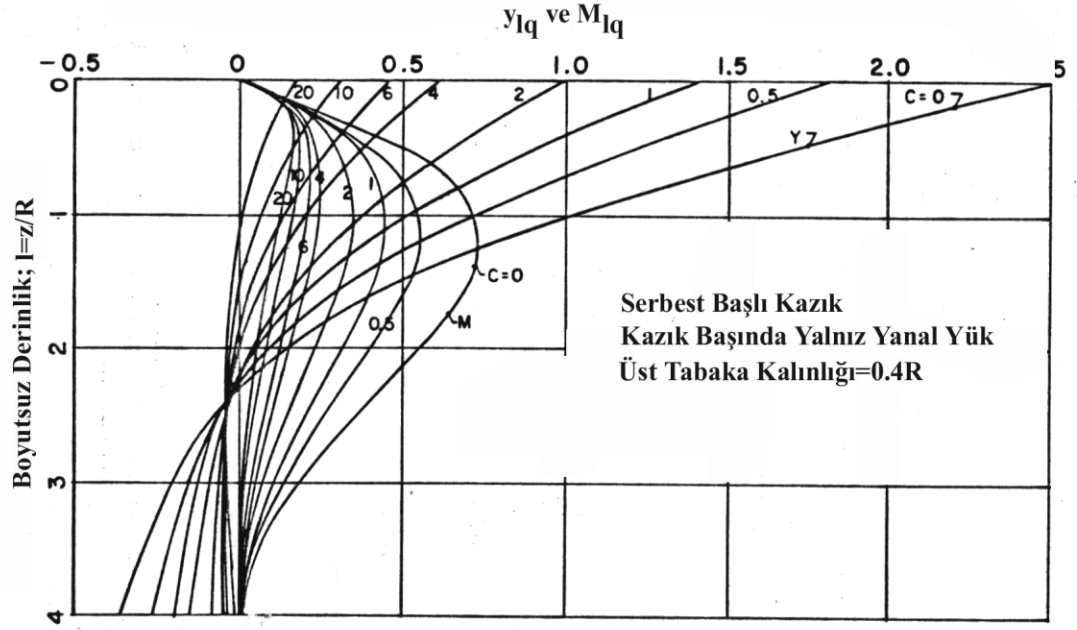
| Kazık Başındaki Yüğü Tipi | Serbest Başlı Kazıkta Moment( $M_1$ )veya Ötelenme ( $y_1$ ) | Ankastre Başlı Kazıkta Moment( $M_1$ ) veya Ötelenme( $y_1$ ) |
|---------------------------|--|---|
| Moment (M)                | $M_1 = M$<br>$M_{lm}$<br>$y_1 = M y_{lm} R^2 / EI$           | --  |
| Kesme Kuvvetleri (Q)      | $M_1 = M_{lq} R$<br>$y_1 = Q y_{lq} R^3 / EI$                | $M_1 = Q$<br>$M_{lf} R$<br>$y_1 = Q y_{lf} R^3 / EI$          |

(Not:Aşağıdaki Şekiller (Davisson ve Gill,1963) yayınından alınmışlardır.)

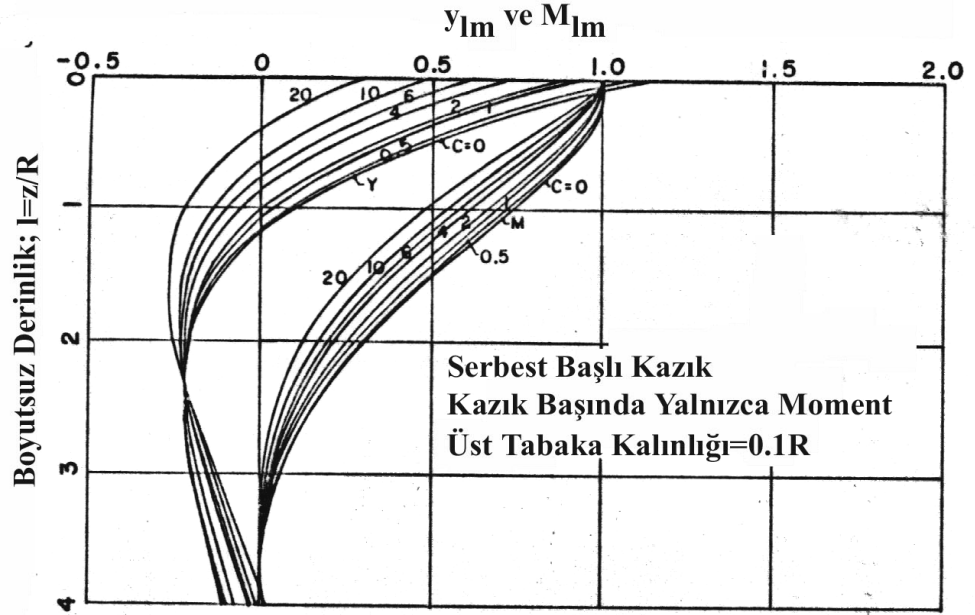
Aşağıdaki şekillerde  $c=0$  serbest kısmı üst tabaka kalınlığına eşit olacak bir konsol kazığı  $c = 1$  ise çözümü Matlock ve Reese tarafından gerçekleştirilmiş olan isotrop zemin içindeki bir kazığı yansıtmaktadır. Bu nedenle bu çözümler genel ve kapsamlı bir durumu ortaya koyarlar.



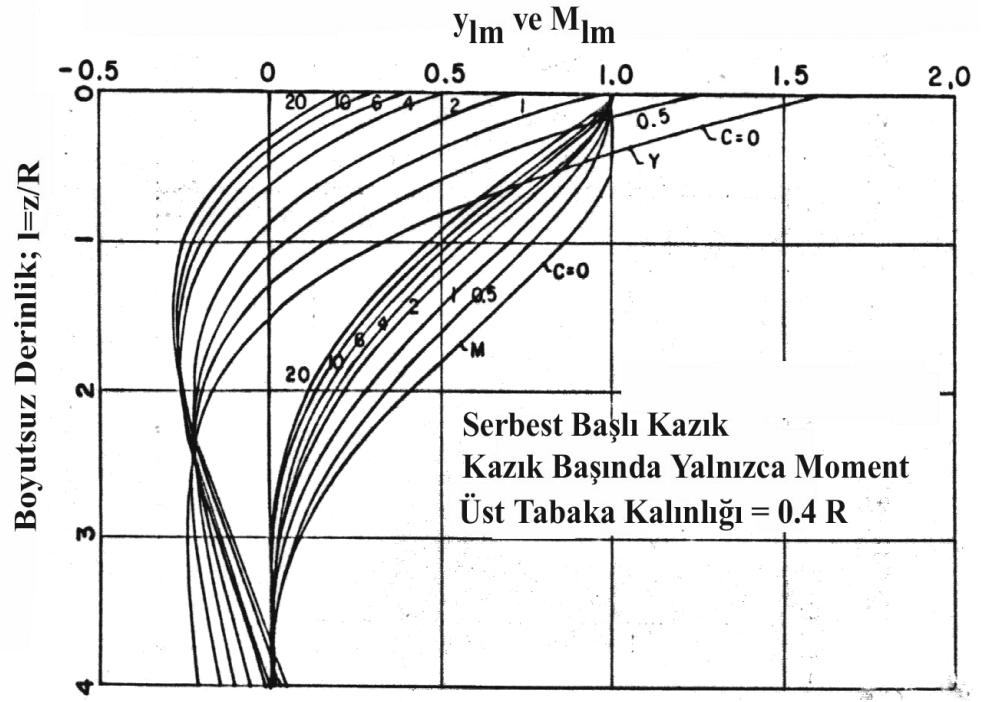
Şekil 6.20. Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi



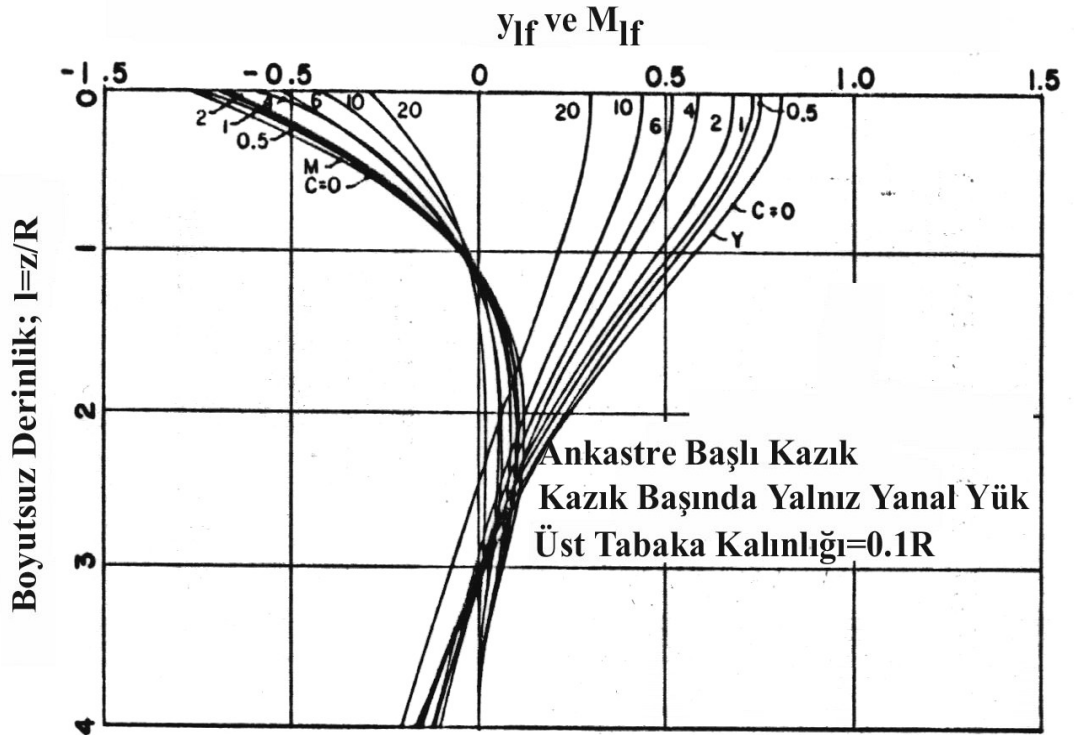
Şekil 6.21. Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi



6.22 Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi

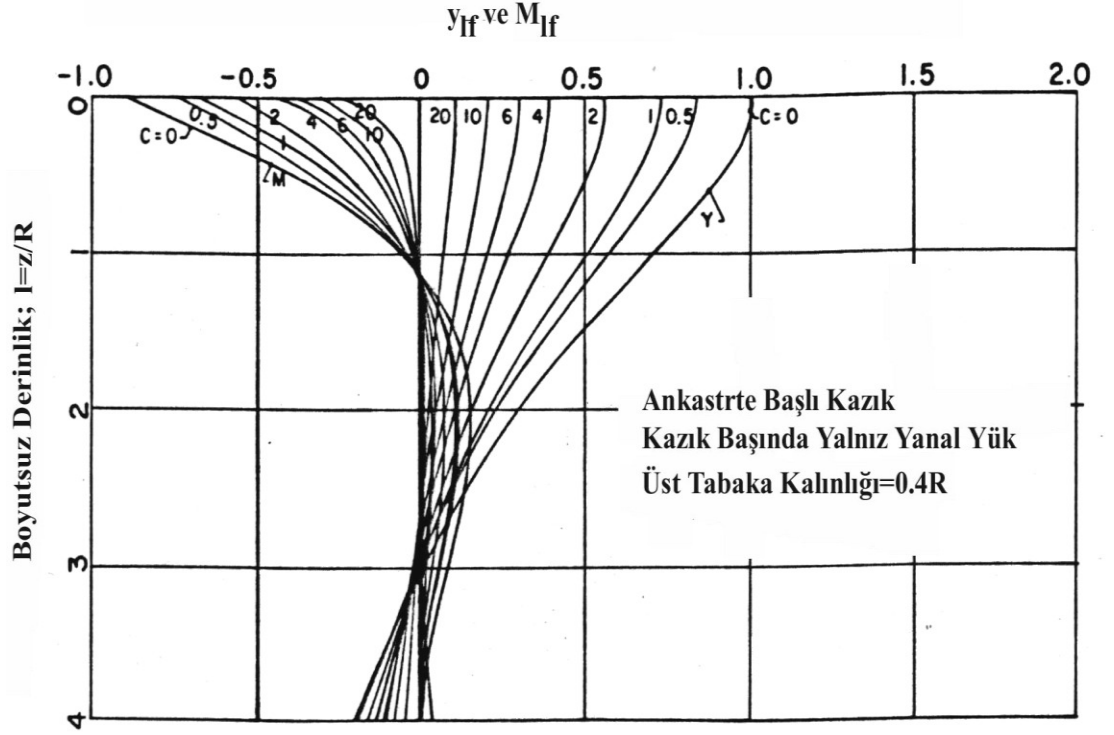


6.23 Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi





Şekil 6.24. Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi



Şekil 6.25. Ötelenme ve Momentin Derinlikle Değişimi

### **Örnek 6.9.**

Çelik bir kazığın çapı 30.5 cm, uzunluğu 9.15 m dir. Ankastrte başlı olan bu kazığa kazık başında 90 KN yanal yük uygulanacaktır.

Kazığın Eylemsizlik Momenti  $11625 \text{ cm}^4$  ve Elastik Modülü  $21 \times 10^7 \text{ KN/m}^2$  dir.

Kazığa komşu olan zemin profilinde aşağıda  $k= 350 \text{ KN/m}^2$  olan çok kalın bir zemin ile yukarıda 60 cm kalınlığında ve  $k=1750 \text{ KN/m}^2$  olan bir yumuşak zemin bulunmaktadır.

a.Ötelenme ve Moment Maksimum değerlerinin hesabı istenilmektedir:

b. Üst tabaka sıyrılır ve yerine  $k=7000 \text{ KN/m}^2$  sert zemin konursa durum ne olur?

Çözüm:

a.  $C=1750/3500=0.5$

$R=162.5 \text{ cm}$

Yumuşak Zeminin boyutsuz kalınlığı  $=l=z/R= 0.60/1.62=0.369$

Bu durumda üst tabaka kalınlığı için  $0.4 R$  kullanılır.

Bu kazıkta maksimum moment ve ötelenme kazık başı seviyesindedir.

Şekil 6.25 de  $C=0.5$  için

$M_{lf}=-0.7$   $y_{lf}=0.8$  bulunur. Buradan  $M_l=-102 \text{ KNm}$  ve  $y_l=0.16 \text{ m}$  bulunur.

b.  $c=7000/3500=2$  aynı şekilden  $M_{lf}=-0.53$  ve  $y_{lf}=0.53$

Bu durumda Ötelenme orijinal değerinin %66 sına ve Moment ise %76 sına inerler.

### 6.5. Elastik Teori ile Çözüm

Poulos ve Davis (1974) kazıkların oturması konusunu inceledikleri gibi, yanal yüklenmiş, isotrop ve homojen bir ortam içindeki kazıkların davranışını da sürekli doğrusal elastik ortam teorisi ile ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. 6.1 paragrafında açıklandığı şekilde bu yöntemin gerekli kısımları incelenecektir. Ötelenme değerlerinin saptanmasında pratik açıdan en önemli husus kazık başı dönme miktarlarıdır. Zira “ankastre” bir kazık, 7. Kısımda yeterli şekilde açıklanacağı gibi daha fazla yük taşımakta ve ötelenme miktarı da sınırlanmaktadır. Bu nedenle; tasarım ve yapım aşamalarında kazık başının

ankastre olmasına özen gösterilmesini beklemek doğaldır. Bu kısımda “ankastre” başlı ve zemin seviyesinde yüklenmiş olan kazıkların ötelenme değerlerinin hesap yolu açıklanacaktır. Bu bilgiler, özellikle diğer yöntemlerle bulunan kazık başı ötelenmesi değerlerinin bir karşılaştırılmasının yapılabilmesini de olası kılacaktır. Bu paragrafta derinlikle değişmeyen modül için çözümler sunulacak, sonra derinlikle değişen modül çözümleri ele alınacaktır. Bu çözümlerde kullanılan anahtar parametre yukarıdaki birinci hal için (6.88), ikinci hal için ise (6.89) bağıntıları ile yansıtılmaktadır. Bu yöntemde ötelenme, moment gibi çözümlenmiş olan her türlü çözüm sonucu bu bağıntılar yolu ile tanımlanan boyutsuz  $K_R$  veya  $K_N$  parametrelerinden birine bağlı olarak sunulmuştur:

$$K_R = \frac{EI}{E_s l^4} \quad (6.88)$$

$$K_N = \frac{EI}{N_h l^5} \quad (6.89)$$

Burada:

$I$ = Kazığın Eylemsizlik Momenti,

$E$ = Kazığın Elastik Modülü,

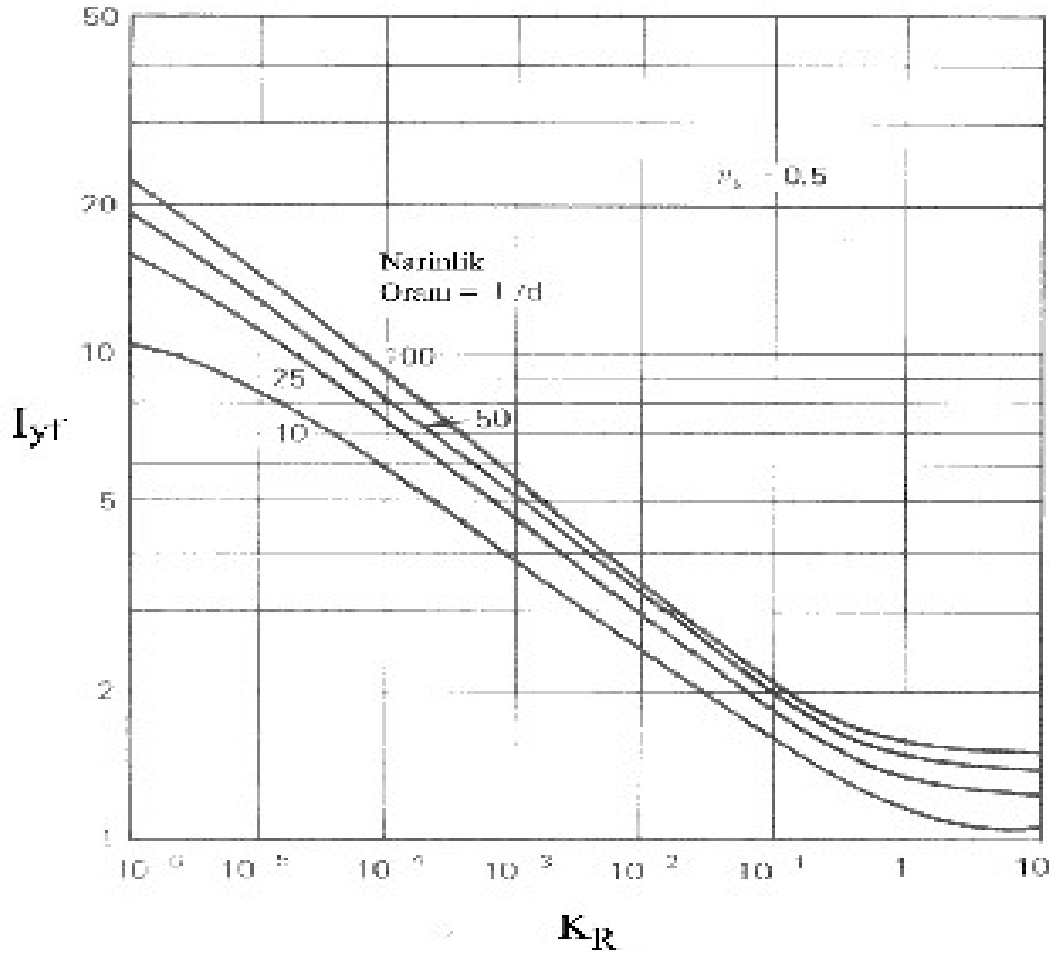
$l$ =Kazık Boyu,

$E_s$  =Zeminin Elastik Modülüdür.

$N_h = \eta_h = 6.3.2$ . Paragrafında tanımlanan ve Tablo 6.2 de sunulan yatak katsayısıdır.

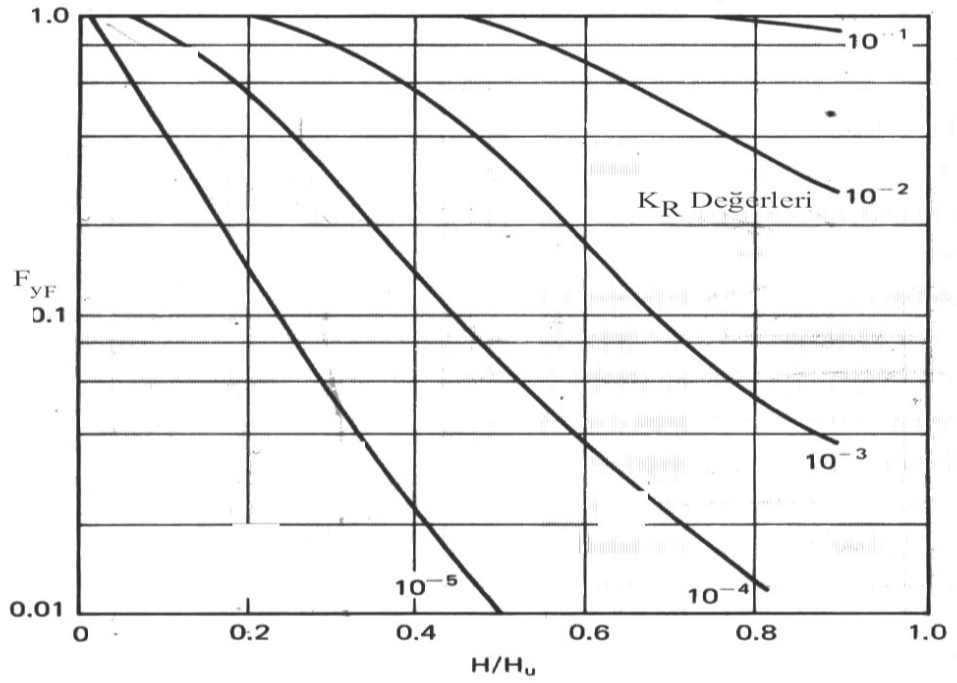
K değerinin azalması durumunda kazık daha esnek, artması durumunda daha rijit davranır. Yukarıdaki K parametrelerine bağlı olarak derinlikle değişmeyen ve değişen zemin özellikleri için çözümlenmiş bulunan ötelenme faktörü  $I_{yf}$  ( $I'_{yf}$ ), ve değişik kazık narinlik oranlarının bir fonksiyonu olarak Şekil 6.26 ve Şekil 6.28 de gösterilmiştir. Bu iki ayrı halde kazığın zemine yaslanması nedeni ile komşu zeminde meydana gelebilecek bir plastik akma ise Şekil 6.27 ve Şekil 6.29 kullanılarak hesaba alınmaktadır.

(Not:Bu paragrafta gösterilen tüm şekiller Poulos ve Davis,1980 yayınından alınmışlardır.)

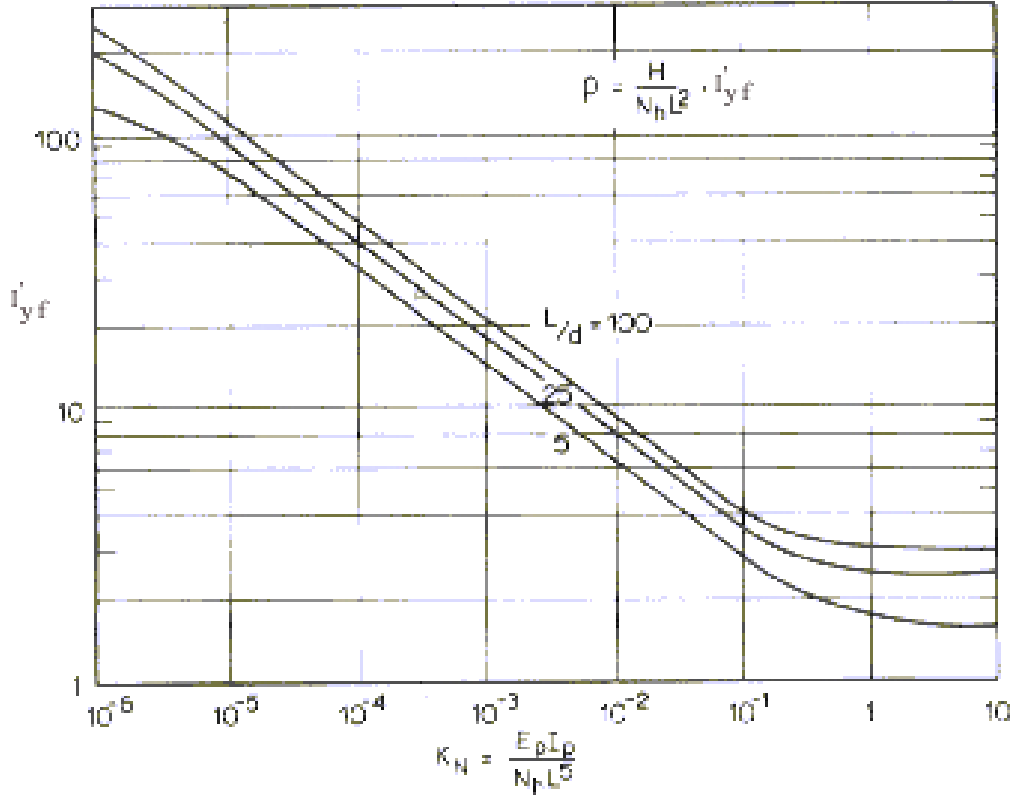


Şekil 6.26. Ankastre Başlı Kazıkta

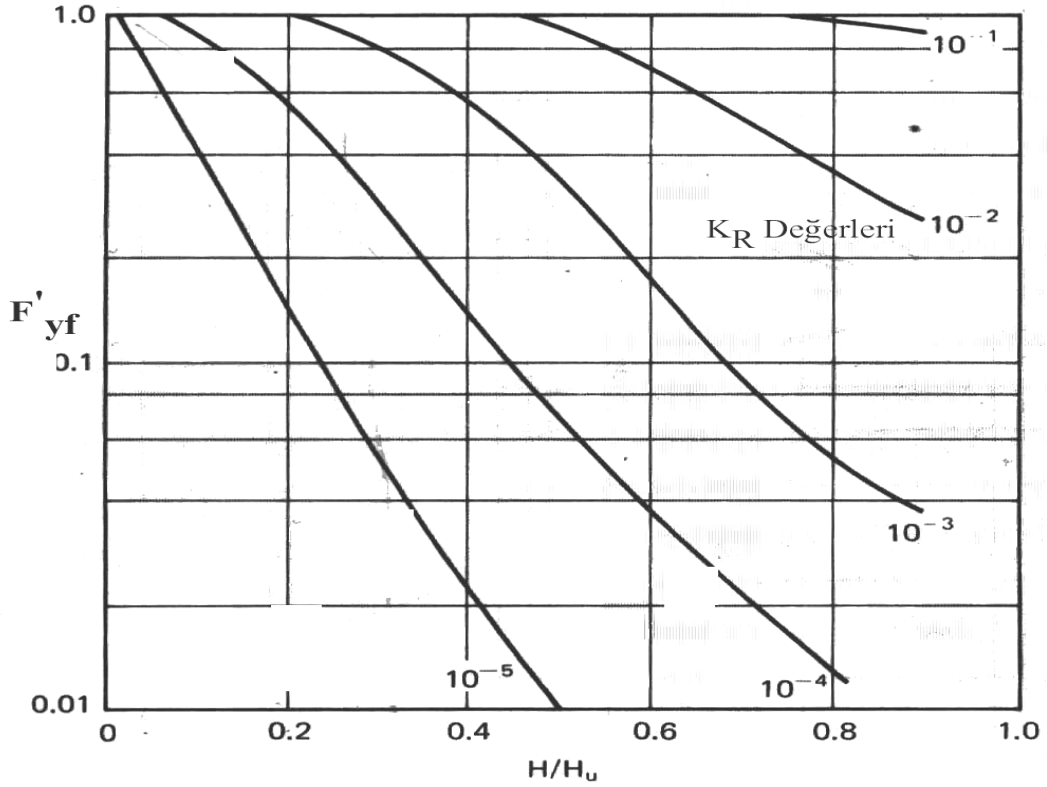
Kazık Başı Ötelenmesi Tesir Katsayısı ( $E_s=Sabit$ )



Şekil 6.27. Zemin Göçmesi için Düzeltme Katsayısı ( $E_s=Sabit$ )



Şekil 6.28. Ankastre Başlı Kazık Kazık Başı Ötelenmesi Tesir Katsayısı  
( $E_s$ =Değişken)



Şekil 6.29. Zemin Göçmesi için Düzeltme Katsayısı (Es=Değişken)

Şekil 6.26 ile Şekil 6.29 un kullanılması için önce geçerli olan K değeri bulunur. Bu değer kullanılarak Şekil 6.26 veya Şekil 6.28 aracılığı ile Ötelenme Faktörü  $I_{yf}$  ( $I'_{yf}$ ) bulunur. Sonra Servis Yüğü (H) Göçme Yüğüne ( $H_u$ ) Bölünerek Şekil 6.27 ve Şekil 6.29 de gösterilen abağa  $H/H_u$  değerleri ile girilir ve zeminin göçme yüküne yaklaşmayı temsil eden bir  $F_{yf}$  ( $F'_{yf}$ ) değeri bulunur. Aşağıdaki bağıntı ile  $E_s$ =Sabit durumu için kazığın başının ötelenmesi hesaplanır: (Değişken Modül için benzer denklem Şekil 6.28 dedir.)

$$\rho_{yf} = \frac{H I_{yf}}{E_s l F_{yf}} \quad (6.90)$$

Kazığın yanal taşıma gücünün bulunması için özel bir durumu burada belirtmek gereklidir:

Poulos-Davis, teorik yaklaşımlarındaki boyutsuz çözümlerinde referans olarak kısa (rijit) bir kazığın göçme yükünü almışlardır. Bu nedenle, yapılan hesaplar sonucunda kazık “uzun” (esnek) bir kazık olarak belirlense dahi, abakları kullanabilmek için zemin göçmesi durumunu yansıtan kısa kazık göçme yükü geçerli olacak ve  $H_u$  değeri bu değere eşit kabul edilecektir. Araştırmacılar, Elastik Modülü derinlikle sabit bir değer olarak kabul ederek yaptıkları çözümde zeminin taşıma gücünü de derinlikle sabit kabul etmişlerdir. Dolayısı ile ön yüklenmiş killi zeminler için geçerli olduğu bilinen bu hal için kazığın yanal taşıma gücü, yukarıda 6.2 paragrafında anlatılan Broms teorisi kullanılarak bulunur. Ancak araştırmacılar, derinlikle değişen elastik modül çözümlerinde zeminin taşıma gücünün de derinlikle doğrusal olarak değiştiğini varsaymışlardır. Bu durumda referans yine kısa kazığın göçme yükü olmakla beraber, göçme yükünü saptamak için “Broms Yöntemi” nin formülasyonu bir miktar değişmiş ve aşağıdaki bağıntının kullanılması önerilmiştir:

$$H_u = 0.5 p_1 d l \quad (6.91)$$

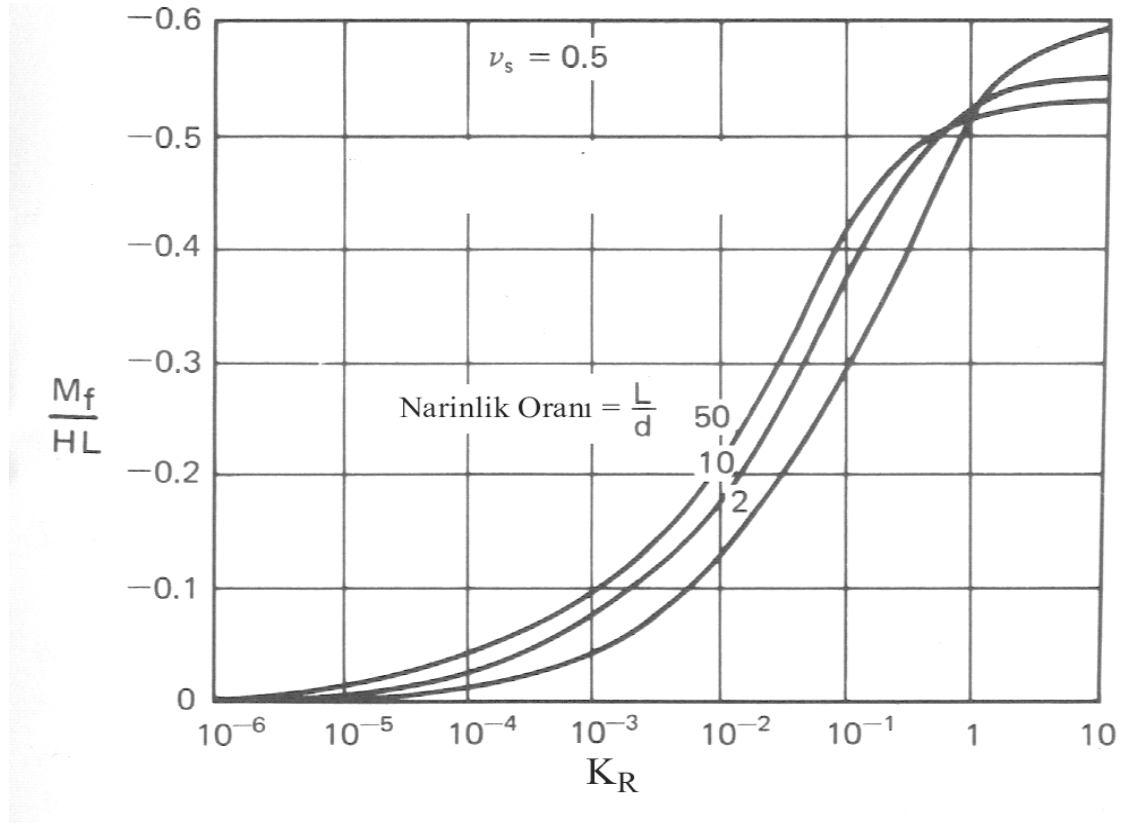
Burada:  $d$ = Kazık Çapı,  $l$ = Kazık Boyu,  $p_1$ = Zeminin Taşıma Gücüdür.

$p_1$  değeri killi zeminler için  $c$  kohezyonu göstermek üzere  $cN_c = 9 c$  olarak alınır.

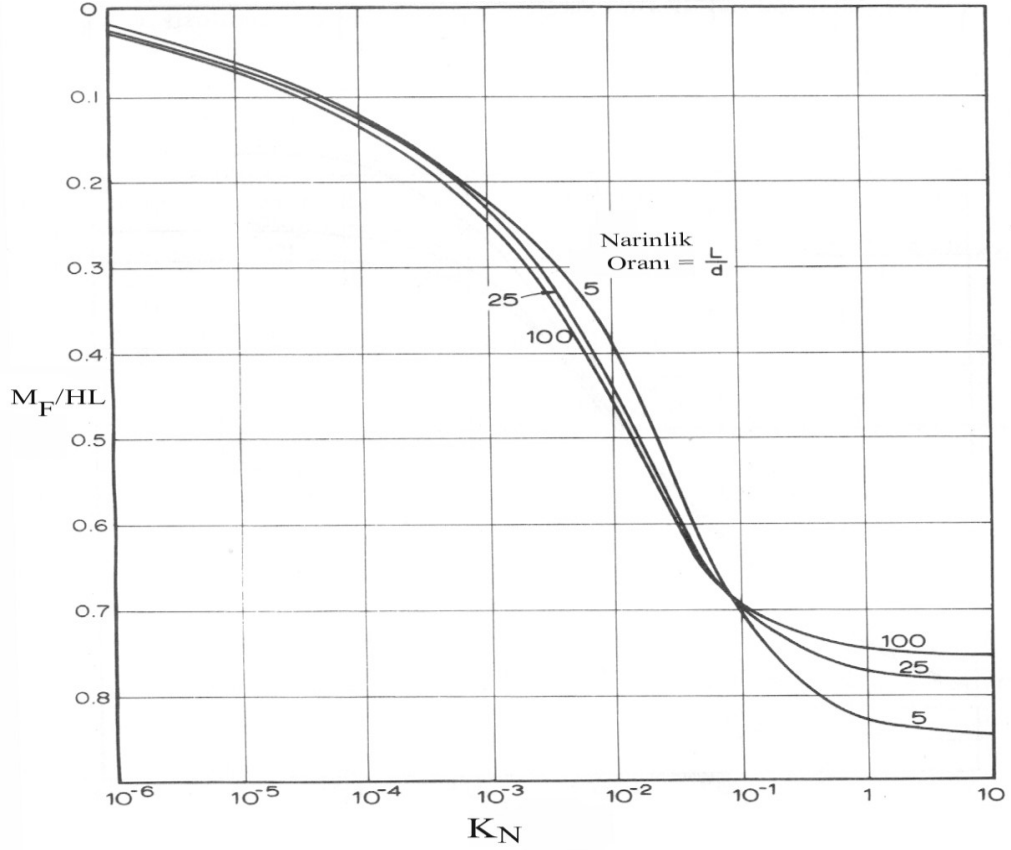
Granüler zeminler için ise taşıma gücü  $p_1$ , pasif direnç kullanılarak saptanır. Bu nedenle Broms’un ankastre başlı kazıklar için geliştirdiği



yöntem bu halde geçerli sayılabilir ve (6.23) bağıntısı kullanılarak hesap yapılabilir. Diğer taraftan, söz konusu kazıklarda en büyük moment  $M_F$  radyenin yanal yük altındaki hareketi nedeni ile kazık başında meydana gelmektedir. Bu moment, yukarıdaki iki hal için Şekil 6.30 ve Şekil 6.31 kullanılarak hesaplanabilir. (H=Yük, L= Kazık Boyu)



Şekil 6.30. Ankastre Başlı Kazıkta Kazık Başı Momenti(Es=Sabit)



Şekil 6.31. Ankastre Başlı Kazıkta Kazık Başlı Momenti( $E_s$ =Değişken)

### **Örnek 6.10.**

6.3.3.1 kısmında yatak katsayısının derinlikle değişmesi hali için örnek verilen kazığın çözümü verilecektir. Broms'un "kısa kazık" yaklaşımı ile ve (6.91) bağıntısı kullanılarak yanal taşıma gücünün  $H_u = 12150$  KN olduğu bulunur. Kazık yükü 676 KN olduğundan  $H/H_u = 0.055$  olur. (6.88) bağıntısı ile  $K_N = 6 \times 10^{-6}$  hesaplanır ve Şekil 6.27 den  $I_{yf} = 100$  ve Şekil 6.28 den  $F_{yf} = 1.0$  bulunur. Bu değerler (6.90) bağıntısında yerlerine konularak yukarıda önce  $k_x = y/H = 2.7 \times 10^{-5}$  m/KN bulunur. ( $\rho = y$ ) Kazık yanal

yükü yerine konulduğunda ötelenme  $y= 0.018$  m veya 18 mm olarak saptanır.

Zemin modülünün derinlikle değişmediği hal için hesaplar aşağıdaki gibidir:

$K_R=5 \times 10^{-5}$  olur.  $I_{yf}=9.5$  ve  $F_{yf}=1.0$  kullanılırsa  $y=14.2$  mm,  $k_x= 2.11 \times 10^{-5}$  m/KN bulunur. Aynı problemin, 6.3.3.1 paragrafında Hetenyi yöntemi kullanılarak çözülmüş olduğu anımsanmalıdır. Hetenyi yöntemi ile, kazık başı ötelenmesi 12.5 mm olarak hesaplanmış idi. Poulos Davis yöntemi ile varılan sonuç Hetenyi yöntemi ile bulunan değere bölünürse  $14.2/12.5= 1.14$  oranı elde edilir. Bu oranın bir sonraki 6.6. paragrafında Tablo 6.20 de bulunan ankastre başlı esnek kazıklar için verilen sonuçlarla karşılaştırılması yararlı olacaktır.

### **6.6. Bir Karşılaştırma: Elastik Teori ve Hetenyi Çözümleri**

Bu aşamaya kadar sergilenen bilgilerden kolayca görülebileceği gibi ön yüklenmeye uğramış killi zeminlerin çözümü için Hetenyi metodu ve “yatak katsayısı” kullanılmaktadır. Aynı tür zeminler için Poulos-Davis yöntemi de izlenebilir. Yukarıda da açıklandığı gibi yatak katsayısı kullanılarak elde edilen sonuçlarla daha kesin olduğu varsayılan elastik ortam teorisi kullanılarak elde edilen sonuçların kıyaslanması merak konusudur. Dolayısı ile pratik açıdan da ilginç görüldüğü için ankastre ve serbest başlı kazıkların bu iki yöntemle hesaplanan kazık başı ötelenmelerinin bir kıyaslanması yapılmıştır:

Karşılaştırmanın yapılması amacı ile (6.47) bağıntısı (6.88) bağıntısında yerine konularak  $k=k_0d=E_s$  kabul edilmek sureti ile (6.34) bağıntısının ortak çözümünden aşağıdaki ilişki elde edilir:

$$\beta l = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt[4]{K_R}} \quad (6.92)$$

Karşılaştırmada birinci adımda Hetenyi çözümlerinde Tablo 6.3 ila Tablo 6.6. kullanılarak  $z=0$  durumunda  $\beta l$  değerinin 2,3,4 olması hallerinde gerek ankastre ve gerekse serbest başlı kazıkların kazık başı ötelenmeleri hesaplanmıştır. Bu hesaplar için adıgeçen tablolarda bulunmayan kazık başı dönme katsayıları aşağıda Tablo 6.19 da sunulmaktadır. Bu yöntemde kazığın narinlik oranı hesaba alınmaz. Poulos-Davis yönteminde ise bu oran da bir etmendir. Bu nedenle önce (6.92) ifadesi kullanılarak yukarıdaki  $\beta l$  değerlerine karşı gelen  $K_R$  değerleri bulunmuş, bunu takiben de bu değerler elastik Poulos- Davis yöntemi içinde kullanılarak aynı değişkenlerin değerleri saptanmıştır. Hetenyi yöntemi ile yapılan hesaplarda, kazık başının ankastrelik katsayısı aşağıdaki ilişki ile bulunabilir:

$$K_{yf} = 2K_{yh} - \frac{K_{\theta h}}{K_{\theta M}} K_{yM} \quad (6.93)$$

Buradan bu yöntemle ankastre bir kazığın kazık başı ötelenmesi:

$$y_f = K_{yf} \frac{H\beta}{k} \quad (6.94)$$

olacaktır. Burada:

$K_{yh}$ ,  $K_{ym}$  ve  $k = k_0d$  = Hetenyi teorisinin anlatımındaki anlamı taşırlar.

$K_{yf}$  = Kazık Başı Ankastrelilik katsayısı,

$K_{\Theta m}$  = Moment nedeni ile Dönme,

$K_{\Theta h}$  = Yatay Yük Nedeni ile Dönme,

olmaktadır.

Tablo 6.19. Kazık Başı Dönme Katsayıları ( $z=0$ )

| $\beta l$      | 2.0    | 3.0    | 4.0    | 5.0    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| $K_{\Theta h}$ | 1.1341 | 1.0004 | 1.0015 | 1.0003 |
| $K_{\Theta m}$ | 1.0762 | 1.0038 | 1.0021 | 1.0002 |

Serbest başlı bir kazığın başının ötelenme miktarı Hetenyi yönteminde (6.55) bağıntısı ile saptanır. Aynı değer, Poulos-Davis yöntemine göre ise:

$$y = \frac{H}{E_s l} I_{yh} \quad (6.95)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada diğer semboller olağan anlamları taşırlar.  $I_{yh}$  serbest başlı kazık için  $K_R$  değerinin fonksiyonu olan bir tesir katsayısıdır. Ötelenme miktarlarının saptanması için  $K_R$  değerlerinin fonksiyonu olan tesir katsayısı  $I_{yh}$  değerlerini serbest başlı kazıklar için gösteren abaklar bu metinde verilmemiş, ancak bu abaklardan (6.90) ila (6.94) bağıntıları ve Tablo 6.19 daki bilgiler kullanılarak elde edilen katsayılar Tablo 6.21 de verilmişlerdir. Ankastre başlı kazıklar için katsayılar ise Şekil 6.25 den alınmışlardır. Yukarıda açıklanan yol izlenerek hesaplanan ötelenme miktarları, karşılaştırma amacı ile oranlanmış ve bu oranlar Hetenyi yöntemi için  $h$ , Poulos-Davis yöntemi için ise  $p-d$  alt indisleri ile ankastre başlı kazıklar için Tablo 6.20 de, serbest başlı kazıklar için ise Tablo 6.21 de listelenmişlerdir. Karşılaştırmanın, değişik narinlik oranları için yapıldığı görülecektir.

Tablo 6.20. Ankastre Başlı Kazıklar için Katsayılar ve Karşılaştırma

| $\beta l$ | $K_{yf(h)}$<br>(6.89) ile | $K_R$<br>(6.88)<br>ile | $I_{yf(p-d)}$ (Şekil 6.25) |            | $y_{p-d}/y_h$ |            |
|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------|------------|---------------|------------|
|           |                           |                        | $l/d = 25$                 | $l/d = 50$ | $l/d = 25$    | $l/d = 50$ |
| 2.0       | 1.4111                    | 0.0156                 | 2.9                        | 3.1        | 1.03          | 1.10       |
| 3.0       | 1.016                     | 0.0031                 | 4.25                       | 4.7        | 1.39          | 1.54       |
| 4.0       | 1.007                     | 0.00097                | 5.0                        | 5.5        | 1.24          | 1.37       |

|     |     |        |     |     |      |      |
|-----|-----|--------|-----|-----|------|------|
| 5.0 | 1.0 | 0.0004 | 6.3 | 6.9 | 1.28 | 1.38 |
|-----|-----|--------|-----|-----|------|------|

Tablo 6.21. Serbest Başlı Kazıklar için Katsayılar ve Karşılaştırma

| $\beta l$ | $K_{y(h)}$<br>(6.55)ile | $K_R$<br>(6.88)ile | $I_{yh(p-d)}$ |          | $y_{p-d}/y_h$ |          |
|-----------|-------------------------|--------------------|---------------|----------|---------------|----------|
|           |                         |                    | $l/d=25$      | $l/d=50$ | $l/d=25$      | $l/d=50$ |
| 2.0       | 1.1376                  | 0.0156             | 5.0           | 5.5      | 1.10          | 1.21     |
| 3.0       | 1.0066                  | 0.0031             | 7.0           | 7.5      | 1.16          | 1.25     |
| 4.0       | 1.0008                  | 0.00097            | 8.0           | 9.0      | 1.00          | 1.12     |
| 5.0       | 1.0003                  | 0.0004             | 11.0          | 12.5     | 1.10          | 1.25     |

Tabloların incelenmesi her iki yöntemin; kazığın narinlik oranının 25 olması durumunda özellikle serbest başlı “uzun” kazıklar ile ankastre başlı “kısa” ya yakın kazıklar için benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. (6.92) bağıntısının türetilmesinde kullanılan  $k=k_0d=E_s$  kabulü yerine (6.46) ifadesindeki  $k=k_0d=0.82E_s$  konularak bulguların daha da yaklaşmış olduğunu görmek, okuyucu için iyi bir eksersiz olabilir.

## 6.7.Brinch Hansen Yöntemi

Brinch Hansen Kısa-Rijit kazıklar için c-ø zeminlerde toprak basıncı teorisine dayanan bir yöntem önermiştir. Bu yöntem; yükün uygulama noktası çevresinde tüm uygulanan ve karşı koyan yüklerin momentlerinin alınarak dönme merkezinin saptanmasına dayanır. Bunu takiben yatay yüklerin sıfır olması gereğinden hareketle yanal dayanım saptanır. Buna göre her hengibir derinlikteki nihai dayanım  $P_{xu}$  aşağıdaki ifade ile elde edilir:

$$P_{xu} = \bar{\sigma}_{vx} K_q + cK_c \quad (6.96)$$

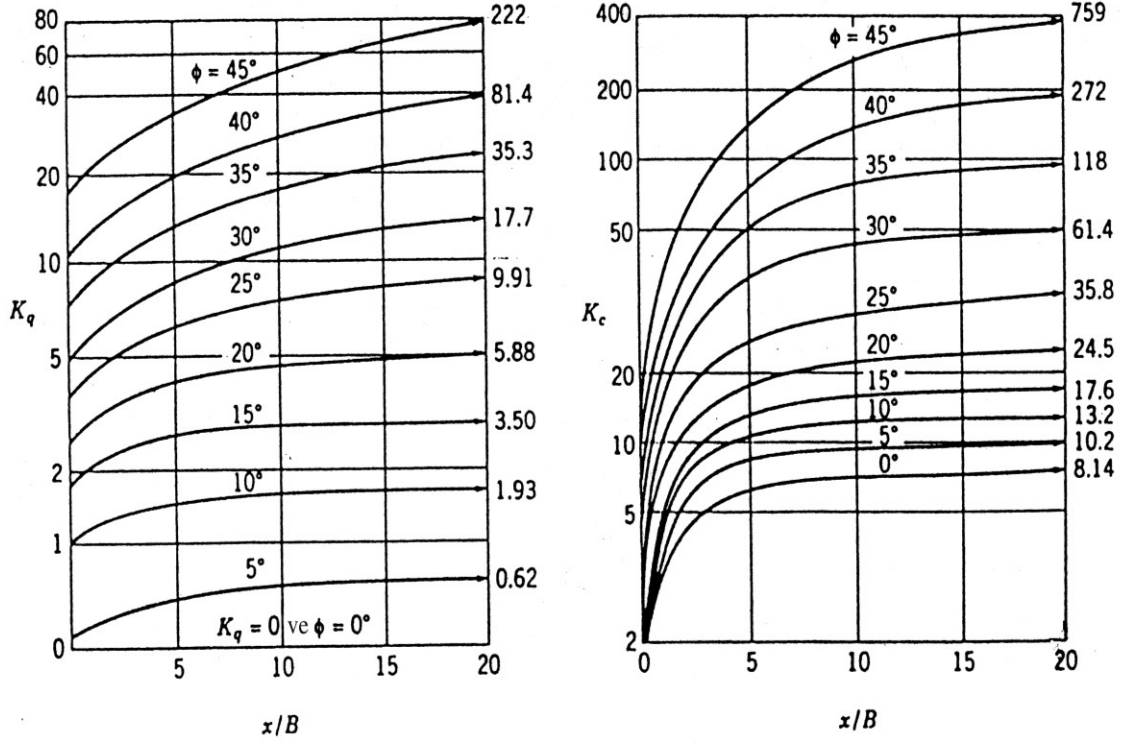
Burada  $\bar{\sigma}_{vx}$  =DüşeyEfektif Örtü Yüğü

c= Zeminin Kohezyonu

$K_c$  ve  $K_q$ =f ve x/B nin Şekil 6.32 de gösterilen eğrilerden elde edilen değerlerdir.

Yöntem tabakalı ve üniform zemin koşullarında uygulanabilir. Ani yükler için (dalga hareketi vb) f=0 ile drenajsız dayanım analizi, uzun vade problemlerinde ise efektif dayanım parametrelerinin kullanılması uygundur.





Şekil 6.32. Brinch Hansen Abağı

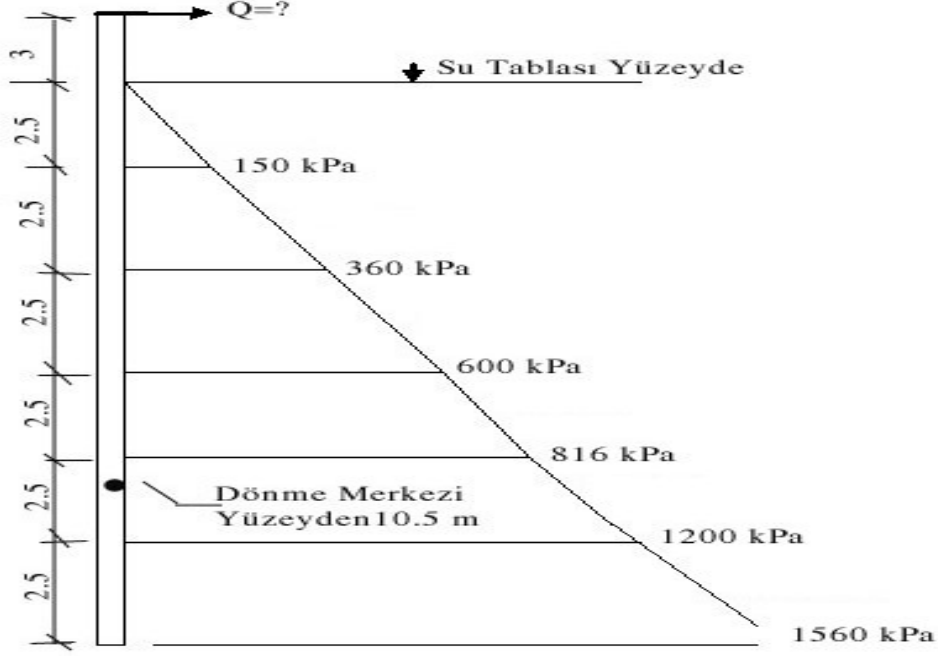
### Örnek 6.11

18 m uzunluğunda 1.0 m çaplı bir öngermeli betonarme kazık granüler zemin içine inşa edilmiştir. Kazığın üç metrelik kısmı zeminin dışında olup, gömülü uzunluk 15 metredir. Zeminin içsel sürtünme açısı  $30^0$ , Suyu Doygun Birim hacim ağırlığı  $18 \text{ kN/m}^3$  dür. Taban suyu yüzeydedir. R rijit olduğu saptanan bu kazığın taşıyabileceği yük miktarını 2.5 Güvenlik Sayısı ile hesaplayınız.

Kazığın zemin içinde olduğu derinlik yüzeyden itibaren x ile gösterilerek Şekil 6.32. kullanılır ve kazık boyunca yük, aşağıdaki Tabloda gösterildiği gibi saptanır:

| x (m) | x/d | $\sigma'_{vx}$ (kPa) | $K_q$ | $P_{xu}$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|-------|-----|----------------------|-------|-------------------------------|
| 2.5   | 2.5 | 20                   | 7.5   | 150                           |
| 5.0   | 5   | 40                   | 9.0   | 360                           |

|      |      |     |      |      |
|------|------|-----|------|------|
| 7.5  | 7.5  | 60  | 10.  | 600  |
| 10   | 10   | 80  | 10.2 | 816  |
| 12.5 | 12.5 | 100 | 12.  | 1200 |
| 15   | 15   | 120 | 13.  | 1560 |



Hesaplanan değerler şekilde görülmektedir.

Dönme merkezinin yüzeyden 12.5 m aşağıda olduğu kabulü ile Q yükü çevresinde moment alınarak bir hesap yapılırsa:

$$+M=150 \times 5.0 \times 5.5 + 600 \times 5.0 \times 10.5 + 1008 \times 2.5 \times 14.25 = 71535 \text{ kNm}$$

$$-M=1380 \times 2.5 \times 16.75 = 57787 \text{ kNm}$$

olur. Fark fazladır. Bu kez 10.5 derinliği ile hesap yapılırsa:

$$\frac{1}{2}(816 + 983) \times 0.5 \times 13.25 = 5959 \text{ kNm fark olduğu görülür.}$$

Bu, +M den çıkarılır ve -M e eklenirse

$$+M=65576 \text{ kN,m}$$

$$-M=63756 \text{ kNm bulunur.}$$

Değerler yakın olduğundan kabul edilebilir.

Bu durumda bulunan dönme noktası etrafında moment alınırsa:

$$Q_u \times 13.5 = 150 \times 5.0 \times 8.0 + 600 \times 5.0 \times 3.0 - 1200 \times 4.5 \times 2.0 = 4200 \text{ kNm}$$

$Q_u=4200/13.5=311$  kN olur.

Güvenlik Katsıyısı uygulanarak:

$311/2.5=124.4$  kN

( Not: Tüm hesaplar m tul üzerinden yapılmalıdır. Bu örnekteki momentler kNm/m dir. Kazık çapı 1.0 m olduğundan bir fark görülmemektedir.

## **KISIM 7. GENEL YÜK TAŞIYAN KAZIK GRUPLARI**

### **7.1. Genel**

Kazıkların ve kazık gruplarının düşey yükler altında oturma ve taşıma güçleri ile tek kazıkların yanal yüklere karşı davranışları bu aşamaya kadar çeşitli yönleri ile incelenmiştir. Bu kısımda ise kazık gruplarının yanal yük altındaki davranışları ve bu alandaki çözümler incelenecektir:

Tarih içinde, kazıklı temellerin tasarımı ve analizi için önerilen çözüm yöntemleri aşamalar göstermiştir. Aşağıda görüleceği gibi kazık gruplarının çözümünde kullanılan klasik yaklaşım, temel statik kuralların kazık ve radye davranışı hakkında bazı varsayımlar yapılarak uygulanmasıdır. Kısım 6 da incelenmiş olan yanal yük altındaki tek kazıkların çözümüne ilişkin yöntemler çok eski tarihlerden başlayarak gelişmiş ve bu günkü olgunluk düzeyine ulaşmışlardır. Klasik yöntemin kullanıldığı tarihlerde, kazıkların basitleştirici varsayımlara yer verilmeksizin çözümü için gerekli olan genel teori Hrennikof (1950) ve diğer bilim adamlarınca üretilmiş idi. Elle çözüm yapılmasının zorluğu karşısında çözülemeyen denklemlerin çözümleri bilgisayarların gelişmesine kadar beklemek zorunda kalmışlardır. Ancak şurası da var ki bu gün yaşayan pek çok önemli yapı eski denilen klasik yöntemlerle tasarlanmış ve hayata geçirilmiştir.

Yeni hesap yöntemlerinin sunduğu olanaklar sayesinde, aynen aksnel düşey yük taşıyan kazıklarda olduğu gibi yanal yüklenen kazıklarda da ötelenme ve dönme miktarlarının sağlıklı olarak öngörülebilmesi aşamasına gelmiştir. Bu gün yapılar, yalnızca göçmeye karşı güvenlik düşünülerek değil; deplasman miktarı sınırlarının sağlanması açısından da irdelenerek tasarlanmakta, şartnemeler de bu hususu hükmetmektedirler. Bu nedenle günümüzde çözümler, yapı ile zeminin etkileşimi problemini çözmeye yönelik metotlar ile gerçekleştirilmektedir. Kazık gruplarının tasarımında kullanılan bu yeni yöntemlerin ana fikri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Aynen düşey aksnel yük taşıyan kazıkların davranışında olduğu gibi yanal yük taşıyan bir grup içindeki kazıklar arasında da etkileşim söz konusudur. Bu etkileşim; grup taşıma gücü açısından olsun, ötelenme miktarları açısından olsun, genel adı ile “verim katsayısı” denilen etkileşim faktörlerinin kullanımı ile belirlenir:

Taşıma gücü hesabında önce düşey bir kazığın taşıyabileceği güvenli yanal yük saptanır, kazık sayısı ile çarpılır, elde edilen sonuca verim katsayısının uygulanması ile taşıma gücü bulunur. Ötelenme hesapları için de benzeri bir katsayı uygulanır. Yaklaşımda aynen aksnel düşey yük taşıyan kazık gruplarının davranışında olduğu gibi 9 veya daha az kazık barındıran gruplara “küçük”, bundan daha fazla kazığa sahip olan gruplara ise “büyük” gruplar denilmektedir. Küçük gruplarda çözüm yöntemleri, model deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara dayandırılmışlardır.

Büyük grup analizi halinde ise, tek kazık davranışının analizi için kullanılan ve 5.4.3 ve 5.4.4 paragraflarında açıklanmış olan elastik disk analizi fikri; grup içinde bulunan bir kazığın davranışını tanımlamak için de kullanılmaktadır. Büyük gruplarda kazık sayısı sonsuz olarak

düşünülür. Teoride kazıklar arası etkileşim uzaklıkları aynen düşey aksenal yük taşıyan kazık gruplardaki gibidir. Etkileşim denklemleri ise tamamen benzer olup düşey yükler yerine yanal yükler kullanılarak türetilmişlerdir. Bu nedenlerle bu kısımda teorik söyleme 5. Kısımda verilen ayrıntılarda girilmeyecek, daha ziyade pratik sonuçlar açıklanacaktır. Aşağıda önce Klasik Yöntem sunulacak, bunu küçük kazık gruplarında uygulanan basit hesap yöntemleri izleyecek, takiben çok sayıdaki kazıkların bulunduğu gruplar için geliştirilmiş olan bazı yöntemlere yer verilecektir.

## **7.2. Klasik Yöntem**

Bu yaklaşımda statik kuralları en basit şekliyle uygulanarak çözümler elde edilir.

### **7.2.1. Kazıklara Yük Dağılımı**

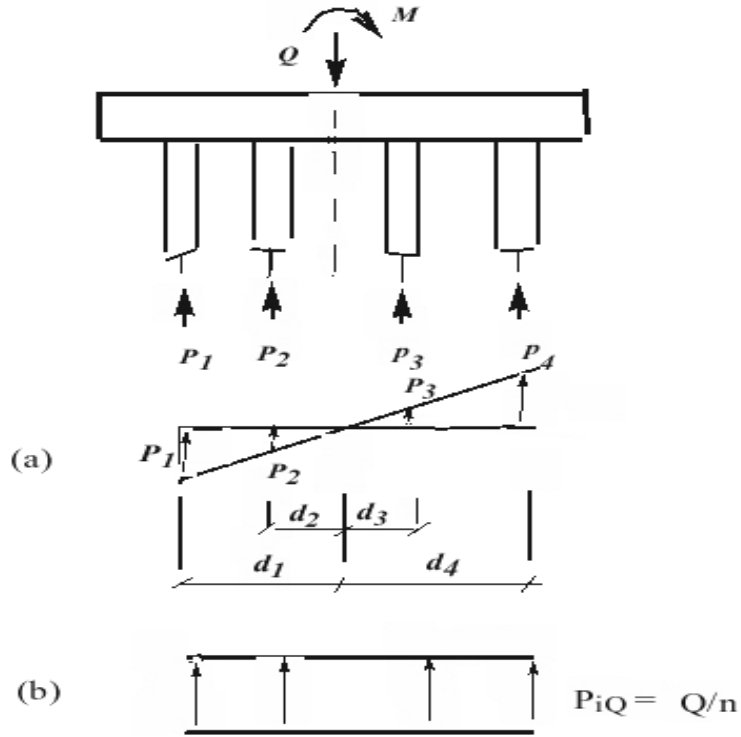
Kazık grubunun uygulanan grup yükünü taşıyıp taşıyamadığının bulunması için tek bir düşey kazığın taşıyabileceği yanal yük saptanır ve gruptaki kazıkların sayısı ile çarpılır. Bu şekilde bulunan toplam direnç uygulanan yükü güvenli şekilde taşıyamıyorsa kazık sayısı artırılır ve/veya bazı kazıklar yüke karşı eğimli olarak tasarlanarak bu eğik kazıkların yatay kuvvetin bir kısmını alması sağlanır. Ön tasarımda kaba bir hesap yapabilmek için düşey kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi genellikle 50 KN alınır. Bazı şartnameler ise bu değeri kazığın düşey taşıma gücünün % 5 i ile sınırlamaktadır. Bu yaklaşımda bir kazık grubunu etkileyen kuvvetler ile kazık reaksiyonlarını içeren bir kuvvet poligonunun doyurucu şekilde kapanması, tasarım için yeterli sayılmaktadır. Kazık radyesinin rijit olduğu kabul edilir. Yaklaşımdaki en önemli varsayım kazık başlarının

kazık radyesine mafsallı bir bağlantı ile bağlandıklarıdır. Dolayısı ile bu kesimde moment sıfır olmaktadır. Eğik kazıkların varlığı halinde bu kazıklar, kazık radyesine uygulanan momentin kazıklara dağıtılması hesabı yapılırken düşey kabul edilirler. Ancak, kazığın güvenli yükünün saptanması, kazıklardaki aksel kuvvetin hesaplanması ile yapılır. Bu yöntemle; kazık grubunun ötelenmesi hakkında hareket yörüngesi denilebilecek çizim yöntemlerine dayanan yaklaşımların dışında bir hesap yapmak olası değildir. (Böyle bir yöntemle çözülmüş bir örnek bu Kısımın sonunda yöntemin tarihi öneminden ötürü verilmektedir.)

Genel Yüklenmiş bir kazık sisteminde üst yapıdan kazık radyesine iletilen moment, düşey yük ve yanal yük kazıklara dağıtılır. Kazık başlarının mafsallı olduğunun kabulü nedeni ile kazıklar eşit yanal yük taşırlar. Bu kuvvet, radyeye uygulanan toplam yanal yükün kazık sayısına bölünmesi ile bulunur. Kazık radyesinin rijit ve kazık başlarının mafsallı olması kabulleri ise kazıkların, radyenin ağırlık merkezine uygulanan yatay ve düşey yükleri eşit, momentten ileri gelen düşey yükleri ise yük merkezine olan uzaklığa orantılı olarak taşıyacağı sonucunu doğurur. Bu ilkeler aşağıda Şekil.7.1 yardımı ile açıklanmaktadır. Bu şekilde dört kazığın bağlandığı bir kazık radyesi görülmektedir. Kazıklar ile radye arasındaki açı 90 derecedir. Şeklin solundan başlamak üzere her kazığın grup başlığının ağırlık merkezine uzaklığı  $d_1, d_2, d_3$  ve  $d_4$  ile, kazık yükleri ise  $P_1, P_2, P_3$  ve  $P_4$  ile gösterilmiştir. Düşey yük (Q) ve moment (M) etkisi ile oluşan kazık yükleri şu şekilde hesaplanabilir:

Şekil 7.1 a ya bakılarak cebirsel olarak moment dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$M = P_1d_1 + P_2d_2 + P_3d_3 + P_4d_4 \quad (7.1)$$



Şekil 7.1. Kazıklara Yük Dağılımı

ancak bu şekilde aşağıdaki geometrik ilişki geçerlidir:

$$\frac{P_1}{d_1} = \frac{P_2}{d_2} = \frac{P_3}{d_3} = \frac{P_4}{d_4} \quad (7.2)$$

buradan aşağıdaki bağıntı bulunur:

$$P_2 = P_1 \frac{d_2}{d_1}; P_3 = P_1 \frac{d_3}{d_1}; P_4 = P_1 \frac{d_4}{d_1} \quad (7.3)$$

ve

$$M = P_1 \frac{d_1^2}{d_1} + P_1 \frac{d_2^2}{d_1} + P_1 \frac{d_3^2}{d_1} + P_4 \frac{d_4^2}{d_1} \quad (7.4)$$

elde edilir. Bu ilişkiden  $P_1$  için çözüm:

$$P_1 = \frac{Md_1}{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2} \quad (7.5)$$

şeklinde elde edilir. Bu bağıntı diğer kazıklar için de yazılabileceğinden genel olarak:

$$P_{im} = \sum \frac{Md_i}{d_i^2} \quad (7.6)$$

bağıntısının geçerli olacağı görülmektedir.

Yukarıdaki (7.5) bağıntısı örnek olmak üzere 4 kazık için türetilmiş olmakla beraber son (7.6) bağıntısı çok sayıda kazık olması halinde her kazığa moment nedeni ile uygulanacak olan yükü göstermektedir.

Bu şekilde Moment dengesi ile bulunan ifadeye Şekil 7.1 b de gösterildiği gibi düşey yüklerin denge denklemi yazılarak bulunacak olan yük eklenir:

$$Q = n P_{iQ} \quad (7.7)$$



Bu şekilde yük dağılım denklemi:

$$P_i = P_{iQ} + P_{iM} = \frac{Q}{n} + \frac{Md_i}{\sum_1^n d_i^2} \quad (7.8)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada:

n= Kazık Sayısı,

$\sum d_i^2$ = Kazıkların, kazık ızgarasının geometri merkezine uzaklıklarının karesinin toplamıdır

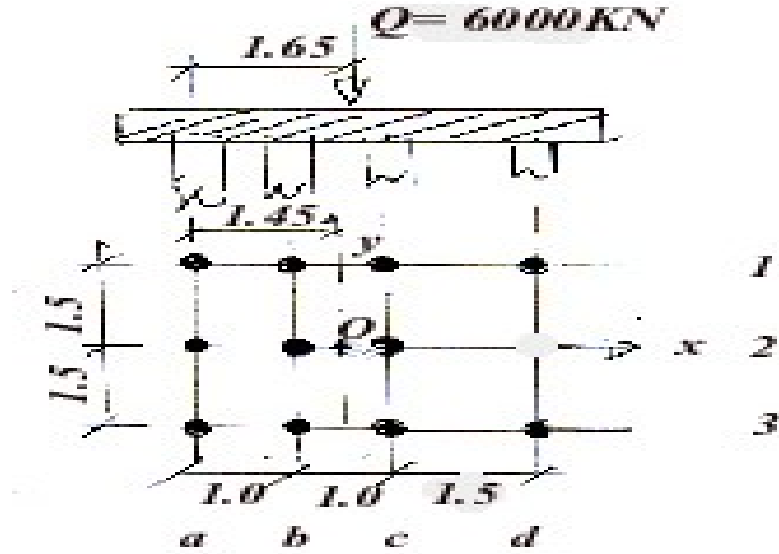
Bu değere kazık ızgarasının eylemsizlik momenti denmektedir.

$d_i$ = Taşıdığı düşey yükün saptanması istenilen kazığın kazık ızgarasının ağırlık merkezine (geometri merkezine) uzaklığı olmaktadır.

Bu konuda aşağıda Şekil 7.2 de gösterilen örnek verilmektedir:

### **Örnek 7.1.**

Kazık başlığı 6000 KN yük taşımaktadır. Kazık ızgarasında 11 kazık vardır. Kazık ızgarasının geometrik merkezi, şekilde O ile gösterilmiş olan yük merkezinden (yük bileşkesinin etkime noktası) farklıdır. Bu nedenle kazık radyesindeki moment  $M_y = e_x Q$  olmaktadır.



Şekil 7.2 Örnek

Çözüm:

1. Kazık Izgarasının Geometrik Merkezinin Bulunması (O Noktası):

A kenarı etrafında moment alınarak merkezin a aksından 1.45 m uzaklıkta olduğu bulunur:

$$x_a = \frac{3x_1 + 3x_2 + 2x_3.5}{11} = 1.45m$$

Bu durumda yük aşağıdaki eksantrik uzaklıkla etkir:

$$e_x = 1.65 - 1.45 = 0.20 \text{ m}$$

2. Kazık Izgarasının Eylemsizlik Momenti:

$$I_y = \sum x_i^2 = 3x_1^2 + 3x_2^2 + 3x_3^2 + 2x_4^2 = 3 \times 1.45^2 + 3 \times 0.45^2 + 3 \times 0.55^2 + 2 \times 2.05^2 = 16.23 \text{ kazık-m}^2$$

3. Moment:

$$M_y = 6000 \times 0.2 = 1200 \text{ KN.m}$$

4. Kazık Yükleri:

$$Q_{a1} \text{ ila } Q_{a3} = \frac{6000}{11} - \frac{1600}{16.23} \times 1.45$$

$$Q_{d1} \text{ ila } Q_{d3} = \frac{6000}{11} + \frac{1600}{16.23} \times 2.05$$

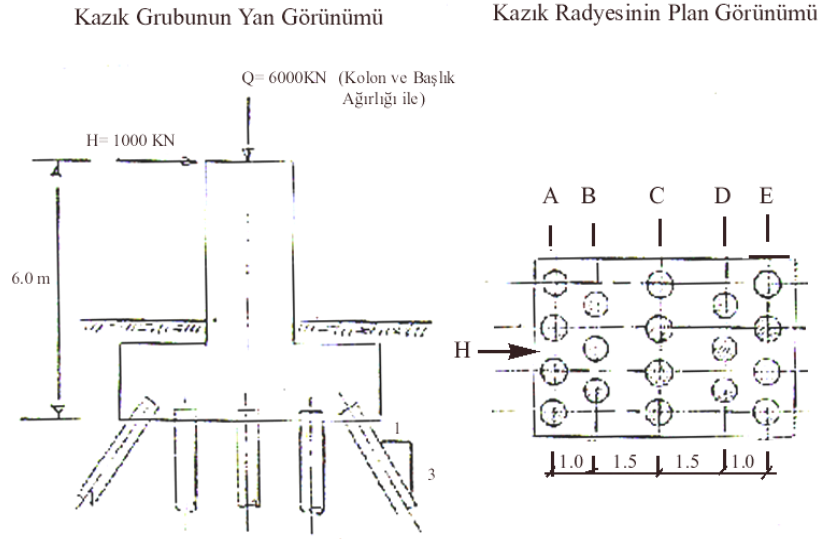
olur, b ve c akslarındaki kazık yükleri benzer şekilde bulunur.

### 7.2.2. Genel Yüklenme Durumu ve Eğik Kazıklar

Yukarıda 7.2.1. paragrafında açıklanan klasik yöntemin yatay yüklerin varlığı halindeki uygulama şekli bu paragrafta bir örnek ile açıklanacaktır:

#### **Örnek 7.2.**

Şekil.7.3 de 18 kazık ile tasarlanmış bir grup görülmektedir. Kazıklar A ile E harfleri ile gösterilen akslar üzerindedirler. A ve E akslarında bulunan kazıklar 1 yatay 3 düşey eğim ile tasarlanmıştır.



Şekil 7.3. Eğik Kazıklı Bir Kazık Grubu

Grup 1000 KN yatay ve 6000 KN düşey yük taşıyacaktır. Ayrıca kazık başlığında yatay yükün oluşturduğu 6000 KN.m lik bir moment etkiyecektir. Kazıkların güvenli taşıma gücü 600 KN olarak verilmiştir. Her kazık 25 KN yatay yük taşıyabilmektedir. Tasarımın yeterliliğinin kontrolü istenmektedir.

Bu kontrol aşağıdaki yol izlenerek gerçekleştirilir:

a. Kazık Grubunun C eksen (simetri eksen) etrafında “eylemsizlik momenti” nin saptanması:

$$(2.5^2 \times 4 + 1.5^2 \times 3) \times 2 = 63.5 \text{ kazık.m}^2$$

b. Düşey Kazık Yüklerinin (7.8) bağıntısına göre hesaplanması:

$$Q_A = \frac{6000}{18} - \frac{6000}{63.5} \times 2.5 = 97 \text{ KN}$$

$$Q_B = \frac{6000}{18} - \frac{6000}{63.5} \times 1.5 = 192 \text{ KN}$$

$$Q_C = \frac{6000}{18} = 333 \text{ KN}$$

$$Q_D = \frac{6000}{18} + \frac{6000}{63.5} \times 1.5 = 476 \text{ KN}$$

$$Q_E = \frac{6000}{18} + \frac{6000}{63.5} \times 2.5 = 569 \text{ KN}$$

c. Kazıklarda Eksenel Yüklerin Bulunması:

Eğik Kazıklar için  $\text{tg } \alpha = 1/3$  ve  $\cos \alpha = 0.948$

$$P_A = 97 / 0.948 = 102 \text{ KN}$$

$$P_B = 192 \text{ KN}$$

$$P_C = 333 \text{ KN}$$

$$P_D = 476 \text{ KN}$$

$$P_E = 569 / 0.948 = 600 \text{ KN}$$

Bu hesap, aksel kazık yükünün izin verilen en yüksek aksel yük olan 600 KN değerini aşmadığını göstermektedir. Bu bakımdan tasarlanan grup yeterlidir. Bu aşamadan sonra yatay kuvvetler dengesinin incelenmesi gerekir.

d. Dengelenmemiş yatay kuvvet bir kuvvet poligonu çizilerek veya aşağıdaki gibi doğrudan bulunur:

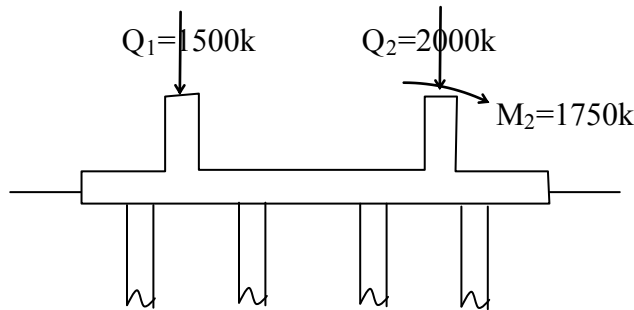
Kazık Başına Etkiyen Toplam Yatay Kuvvet  $H_t$  ;  $H= 1000$  KN ile A sırasındaki eğik kazıkların taşıdığı düşey kuvvetin yatay bileşkesinin toplamıdır:

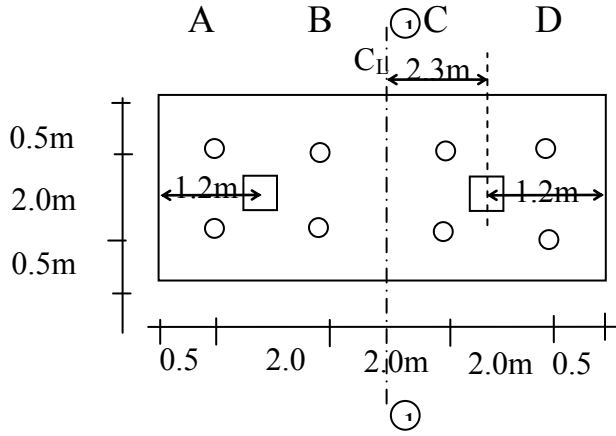
$$H_t = 1000 + 4 \times 97 \times (1/3) = 1129 \text{ KN}$$

Bu kuvvetlere karşı koyan kuvvet ise kazıkların toplam yatay direnci ile E sırasındaki eğik kazıkların taşıdığı düşey kuvvetin yatay bileşkesinin toplamıdır.

$18 \times 25 + 4 \times 569 \times (1/3) = 1208$  KN Bu durumda, yatay kuvvetlerin karşılandığı sonucuna varılır ve grup tasarımının yeterli olduğu söylenebilir.

### Örnek 7.3.





Yukarıdaki Şekilde gösterilen grupta maksimum ve minimum kazık yüklerini hesaplayınız.

$$\Sigma Q = 3500 \text{ kN}$$

$$e = \frac{1}{3500}(2000(2.3) + 1750 - 1500 \times 2.3) = 0.83 \text{ m}$$

$$M = \Sigma Q_x e = 3500 \times 0.83 = 2900 \text{ kN.m}$$

$$I_{1-1} = 2 \times (2 \times 1^2 + 2 \times 3^2) = 40 \text{ kazık-m}^4$$

→ Kazıklardan ötürü:

$$Q_i = \Sigma Q / n \pm M x d_i / I$$

$$Q_D = 3500/8 + 2900 \times 3.0 / 40 = 655 \text{ kN (maksimum)}$$

$$Q_A = 3500/8 - 2900 \times 3.0 / 40 = 220 \text{ kN (minimum)}$$

### 7.3. Yeni Yöntemler

### 7.3.1. Küçük Gruplar

Yukarıda açıklandığı gibi 9 kazıklı bir grubu ve daha az sayıdaki kazıklardan oluşan bir grubu kapsıyan çözümler, model deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanılarak Prakash (1967,) Prakash ve Saran (1967) tarafından önerilmişlerdir. Bu önerim, granüler ve kohezyonlu zeminler için iki ayrı grupta sunulmuşlardır:

#### 7.3.1.1. Granüler Zeminler

Bu halde önce grup elemanı olan tek kazığın taşıma gücü saptanır. Bu taşıma gücü bir “Grup Verim Faktörü,  $G_e$ ” ile çarpılır. Bu şekilde grup içindeki taşıma gücü elde edilmiş olur. Bu değer gruptaki kazık sayısı ile çarpıldığında grubun taşıma gücü elde edilir. Bu ilişkiyi gösteren bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$G_e = \frac{(Q_u)_g}{nQ_u} \quad (7.9)$$

Burada semboller şunları göstermektedir:

$(Q_u)_g$ = Güvenli Grup Yüğü,

$n$ = Gruptaki Kazık Sayısı (  $n=9$  veya daha az)

$Q_u$ = Tek kazığın yanal taşıma gücü.

Tablo 7.1 Verim Faktörü

|     |   |   |   |   |
|-----|---|---|---|---|
| s/d | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---|---|---|---|

|       |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|
| $G_e$ | 50 | 60 | 68 | 70 |
|-------|----|----|----|----|

“Grup Verim Faktörü” yukarıda Tablo 7.1 de kazık aralığının (s) kazık çapına (d) oranının bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Ara değerler için enterpolasyon yapılabilir.

Grubun yanal ötelenmesini hesaplayabilmek amacı ile grup içindeki kazıkların etkileşimi nedeni ile “yumuşamış” olan bir yatak katsayısının kullanılması fikri yatay yüklenmiş kazık gruplarının çözümünde de yer almaktadır. Tek kazık için saptanmış olan yatak katsayısının kazık gruplarında kullanılabilmesi amacı ile “Grup Azaltma Faktörleri,  $F_G$ ” kullanılır. Bu kullanım için önce değeri derinlik boyunca sabit olan veya değişen yatak katsayısı ( $k_{h1}$  veya □□□Kısım 6 da sergilenen yöntemlerle bulunur. Bulunan katsayı ile grup azaltma faktörünün çarpımı; grubun yatak katsayısını verir. Bu durumda:

$k_{hn}$  =Grup yatak katsayısı,

$k_{h1}$  =Tek Kazığın yatak katsayısı olmak üzere:

$$k_{hn} = k_{h1} \times F_G \quad (7.10)$$

olur. Grubun ötelenmesi; grup yükünün grup yatak katsayısına bölünmesi ile hesaplanır. Grup azaltma faktörleri Tablo 7.2 de gösterilmişlerdir:

Tablo 7.2. Grup Azaltma Faktörleri

|          |              |
|----------|--------------|
| Yüklenme | Grup Azaltma |
|----------|--------------|



| Yönündeki Kazık Aralığı (Çap) | Faktörü $F_G$ (%) |
|-------------------------------|-------------------|
| 3d                            | 25                |
| 4d                            | 40                |
| 6d                            | 70                |
| 8d                            | 100               |

Yukarıdaki (7.10) denkleminin kullanılabilmesi için kazıklar kazık ızgarasına; yükün uygulandığı yöne dik yönde en az 2.5 kazık çapı aralığında yerleştirilmelidir.

#### 7.3.1.2. Kohezyonlu Zeminler

Kohezyonlu zeminlerde bulunan gruplarda da taşıma gücü tayininde kullanılacak olan “Grup Verim Faktörü”,  $G_e$  (7.9) bağıntısındaki gibi tanımlanmıştır. Grup Verim Faktörü değerleri Tablo 7.3. de değişik büyüklükteki gruplar için verilmektedir.

Grubun yanal ötelenmesinin hesabında ise zeminler arasında ayırım gözetilmemiştir. Granüler zeminlerdeki gruplar için önerilmiş olan (7.10) bağıntısı Tablo 7.2 de bulunan değerlerle beraber kullanılmaktadır.

#### **Örnek 7.4.**

Bu aşamada verilecek olan örnek, yukarıdaki yaklaşımın esaslarını sergileyecektir:

Veriler: Drenajsız Direnci  $50 \text{ KN/m}^2$  olan Killi Zemin içinde 45 m boyunda kazıklarla tasarlanmış bir grup vardır. Kazık çapı 1.20 m,

$EI=0.206 \times 10^7 \text{ KNm}^2$ , dayanım momenti  $M_y=5000 \text{ KNm}$ , zeminin yatak katsayısı  $\kappa_h=1841 \text{ KN/m}^3$  dir. GrupYükü= 6081 KN, izin verilen ötelenme miktarı= 40 mm dir. Kazık ızgarası kazık aralıkları 4.80 m olmak üzere 3x3 kare olarak tasarlanmıştır. Kazık başları ankastredir. (Bkz 7.5)

Tablo 7.3 Verim Faktörü

| Verim Faktörü, $G_e(\%)$ |          |          |                |
|--------------------------|----------|----------|----------------|
| s/d                      | 2x2 Grup | 3x3 Grup | Tavsiye Olunan |
| 3.0                      | 42       | 39       | 40             |
| 3.5                      | 50       | 42       | 45             |
| 4.0                      | 57       | 44       | 50             |
| 4.5                      | 61       | 47       | 55             |
| 5.0                      | 63       | 48       | 55             |
| 6.0 <sup>(*)</sup>       | -        | -        | 65             |
| 8.0 <sup>(*)</sup>       | -        | -        | 100            |

(\*) Ekstrapole Edilmiş Değerlerdir.

Tek kazık için Matlock-Reese Yaklaşımı kullanılacaktır. Burada ankastre başlı bir kazık için kazık başında pratik olarak  $A_B=0.5$  alınırsa  $B_A=0.925$  olur.  $C_y=2.435$  ve  $C_m=1.623$  alınır.

a. Tablo 7.2 den grup azaltma faktörü 0.40 alınarak grup için “elastik uzunluk” aşağıdaki gibi bulunur:

$$T_G = \sqrt[5]{\frac{0.206 \times 10^7}{1841 \times 0.40}} = 4.89m \text{ Uzun kazık olduğu anlaşılır.}$$

Grubun izin verilebilir yükü ise aynen 6.Kısımdaki (6.67) bağıntısının eşdeğeri olan:

$$H_G = \frac{y_i E I n}{B_A T_G^3} = \frac{0.040 \times 0.206 \times 10^7 \times 9}{0.925 \times 4.89^3} = 6856KN > 6084KN.$$

ifadesinin kullanımı ile bulunur. Grubun yüke karşı güvenli olduğu görülmektedir.

b. İzin verilebilir ötelenmenin, zeminde yaratacağı basınç:

$$p_s = z y_i \square_h = 1841 \times 1.20 \times 0.04 = 88.4 \text{ KN/m}^2$$

Zeminin taşıma gücü 3.0 güvenlik katsayısı kullanılarak:

$$q_u = c N_c / 3 = 50 \times 5.7 / 3 = 95 \text{ KN/m}^2 > 88.4. \text{ bulunur. Yeterlidir.}$$

c. Broms yöntemi ile tek kazığın yanal taşıma gücü 1800 KN olarak bulunur.

d. 3x3 grup için Tablo 7.3 den verim faktörü  $G_e = 0.44$  alınır.

Buradan 9 kazıklı grubun yük kapasitesi:

$$H_G = 1800 \times 9 \times 0.44 = 7128 \text{ KN olur.}$$

Güvenlik Katsayısı =  $7128 / 6084 = 1.17$  olarak saptanır. Yeterlidir.

### 7.3.2. Büyük Gruplar

Büyük grup olarak adlandırılan ve 9 kazıktan fazlası ile tasarlanan kazık gruplarının hesabı için aşağıdaki yöntemler sunulmaktadır:

#### 7.3.2.1. Scott Yöntemi:

Bu çözüm kullanılarak elde edilen sonuçlar 5.4.4.1. kısmında sunulan teorik yaklaşımın ve bu yaklaşım içinde görülmüş olan (5.24) ile (5.30) denlemlerinin düşey yükler yerine yanal yükler alınarak tekrarı olarak kabul edilebilir. Bu nedenle teorik ayrıntılar ve denklemler üzerinde durulmayacaktır. Yaklaşımın amacı şu şekilde açıklanabilir:

Kazık başlığı rijit kabul edilmektedir, dolayısı ile tüm kazıklar aynı ötelenmeyi göstereceklerdir. Bu bağlamda yapılacak rijid disk analizi ile tek kazığın grup içindeki etkileşme sonucunda yumuşayan yatak katsayısı saptanarak bu katsayının kullanılması ile kazıkta oluşacak ötelenme ve kesit kuvvetleri bulunabilmektedir. Yaklaşımında H kazığa uygulanan yanal yüküdür. Yay Katsayısı ise a yarıçap, b etkileşim alanının yarıçapı,  $E_s$  zeminin Elastik Modülü,  $\nu_s$  zeminin Poisson Oranı, y yanal ötelenme olmak üzere bir çok özelliğin bir fonksiyonudur. Sonuç şöyle ifade edilebilmektedir:

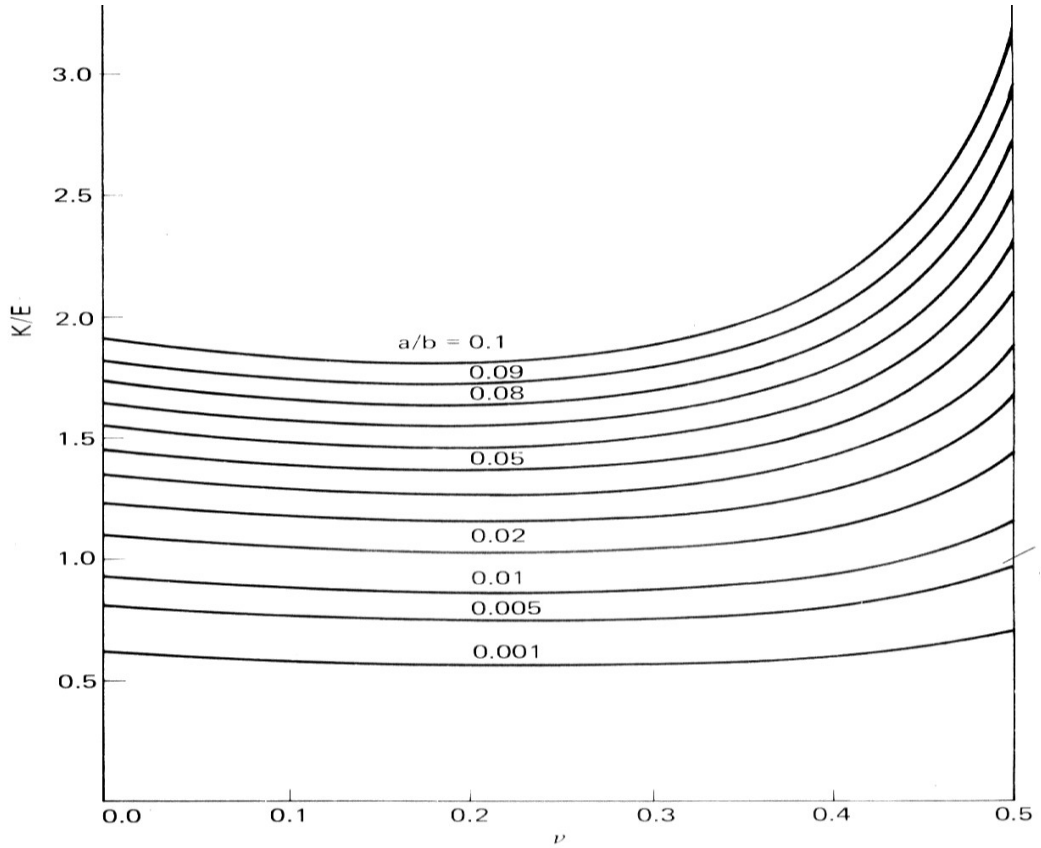
$$H = k(a/b, E_s, \nu_s) y$$

Fonksiyon A

Şekil 5.15 de gösterilen ve bu kez zemin içinde düşey konumda olduğu ve yatay yüklendiği düşünülen disk için uygulanan teorik yaklaşımın Fonksiyon A ile yansıtılan çözüm sonuçları Şekil 7.4 de verilmektedir:

Bu şekilde  $a=d/2$  kazık kesidinin yarıçapıdır. Çözüm; Poisson Oranı  $\nu_s$  in bir fonksiyonudur ve rijid diskin; Elastik Modülü  $E_s$  olan bir ortam

içindeki hareketini eşdeğer bir yay katsayısı olan  $k$  ile yansıtmaktadır. Çözümde görüldüğü gibi etkileşim mesafesi  $a/b=50$ , poisson oranı  $\nu_s=0.3$  olursa  $k/E_s=1$  olmaktadır. Bu gözlem, Kısım 6 da kullanılan (6.47) bağıntısının bu çözüm kapsamında gözlenen ayrı bir dayanağını gösterir. Tek kazık için bulunmuş olan yay katsayısının kazıkların grup içindeki etkileşimi sonucunda yumuşamasının söz konusu olduğu bilinmektedir.



Şekil 7.4. Rijid Disk için Yanal Ötelenme İlişkisi

Yumuşama, belirli bir etkileşim mesafesi  $b$  içindeki her kazığın etkileşerek ötelenmesi ile elde edilen ve (5.27 ila 5.29) ifadelerinin bu çözümdeki karşıtı olarak görülebilecek olan aşağıdaki bağıntı ile belirlenir:

$$\frac{k_{hn}}{k_{h1}} = \frac{u_1}{\sum_{j=1}^{j=n} u_j} \quad (7.11)$$

Bu bağıntıda;

$K_{hn}$ = Kazık Grubunun Yatay Yay Katsayısı,

$K_{h1}$ = Tek Kazığın Yatay Yay Katsayısı,

$u_j$ = Yatay Yerleştirilmiş Diskin Ötelenmesi,

$\sum u_j$ = Etkileşim mesafesi içindeki ötelenmelerin toplamıdır.

Bu bağıntıda, ötelenmeyi gösteren terim (5.27) ifadesindeki gibi açık ifadesi ile yer alamamaktadır. Çözümde,  $\sum u_j$  terimi ile etkileşim mesafesi içindeki ötelenmelerin toplamı alınmış ancak çok karmaşık bir problem olan elastik ortam içinde rijid disklerin karşılıklı etkileşmesi göz önüne alınmamıştır. Bu kabulden dolayı meydana gelebilecek hatanın ihmal edilebilir büyüklükte olacağı bilinmektedir.

Etkileşim mesafesinin 25 çap ve 10 çap olması hallerinde (7.11) ifadesinin uygulanması ile elde edilen  $k_{hn}/k_{h1}$  oranları değişik kazık aralıkları için Tablo 7.4. de sunulmaktadır.

Etkileşim uzaklığının 25 çap veya 10 çap alınması halinde her bir etkileşim mesafesi için etkileşen kazık sayısı farklı olmakta ve “yumuşama” oranı değişmektedir.

Prakash'ın (1967) yukarıda 7.2 paragrafında sözü edilen model deney sonuçları  $b/d = 10$  ( $b/a=20$ ) etkileşim uzunluğu için yukarıda Tablo 7.4 de verilen teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 7.5 de

gösterilmektedir. Bu karşılaştırma 7.5d kazık aralığı uyum noktası olarak seçilmek sureti ile yapılmıştır: Şöyle ki: Bu noktada  $k_{hn}/k_{h1}$  değeri Tablo 7.4 den 0.81 7.5 d kazık aralığında Şekil 7.5 den bulunan  $k_{hn}$  değeri 16 dır. Bundan sonra örneğin 5d aralığındaki  $k_{hn}/k_{h1}$  oranı Tablo 7.4 den 0.50 olarak alınmıştır. Bu değere karşı gelen  $k_{hn} = 16(0.5/0.81) = 9.9$  bulunarak ve Şekil 7.5 e işlenmiştir. Aynı hesaba diğer aralıklar için devam

|                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| Etkileşim Mesafesi $i=b/d=10$ | Etkileşim Meafesi $i=b/d=25$ |
|-------------------------------|------------------------------|

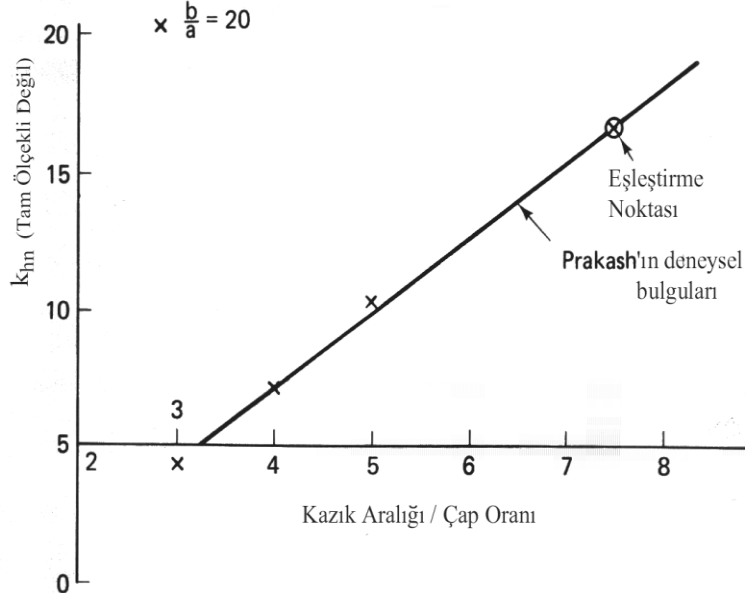
edilmiştir. Bulgular, önerilen teorinin; kazıklar arası uzaklığın kazık çapının 20 katı olması halinde Prakash'ın deneysel bulguları ile çakıştığını gösterir.

Tablo 7.4. Yanal Yay Katsayısı Oranları

| Kazık Aralığı<br>(d) | Etkileşen<br>Kazık Sayısı | (G <sub>e</sub> )<br>k <sub>hn</sub> /k <sub>h1</sub> | Kazık Aralığı<br>(d) | Etkileşen<br>Kazık Sayısı | (G <sub>e</sub> )<br>k <sub>hn</sub> /k <sub>h1</sub> |
|----------------------|---------------------------|---|----------------------|---------------------------|---|
| 10                   | 1                         | 1   | 25                   | 1                         | 1   |
| 7.5                  | 5                         | 0.8146  | 18.75                |                           | 0.8551  |
| 5                    | 9                         | 0.5065  | 12.5                 | 9                         | 0.5784  |
| 4                    | 21                        | 0.3533  | 10                   | 21                        | 0.4230  |
| 3                    | 37                        | 0.2138  | 7.5                  | 37                        | 0.2674  |
| 2                    | 69                        | 0.0989  | 5                    | 69                        | 0.1283  |
| -                    | -                         | -   | 2.5                  | 305                       | 0.0326  |

Şekil 7.4; bu etkileşim uzaklığının geçerli bir değer olduğu varsayımı ile ve zeminin poisson oranı için 0.3 kabulü ile yay katsayısı değerinin  $k_{h1}=1.40 E$  alınabileceğini göstermektedir. Hatırlanacağı üzere bu değere eksenel yüklenmiş kazıkların oturmaları problemi için de 20d alınarak varılabiliyordu. Ancak bu 20d değerinin kesin kabulü için yukarıdakine benzer çok sayıda deney verisine gereksinme olduğunu da söylemek gerekir.





Şekil 7.5. Yöntem Karşılaştırması

### 7.3.2.2. DIN Yöntemi

Alman DIN 4014 şartnamesi, yanal yük taşıyan kazık gruplarında gerek başlığa bağlanmış olan kazıklara yük dağılımı, gerekse yumuşamış yatak katsayılarının bulunması açısından ilginç bir yöntem önermektedir. Bu yöntem aşağıda açıklanacaktır:

Şekil 7.6 da bir kazık grubu ve gruba uygulanan yanal yük görülmektedir.

Grup yükü, kazıklara aşağıdaki (7.12) bağıntısı uyarınca dağıtılır:

$$\frac{H_i}{H_G} = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i} \quad (7.12)$$

Burada:

$H_G$ = Grup Yüğü,

$H_i$ = Bir grup kazığına isabet eden yük,

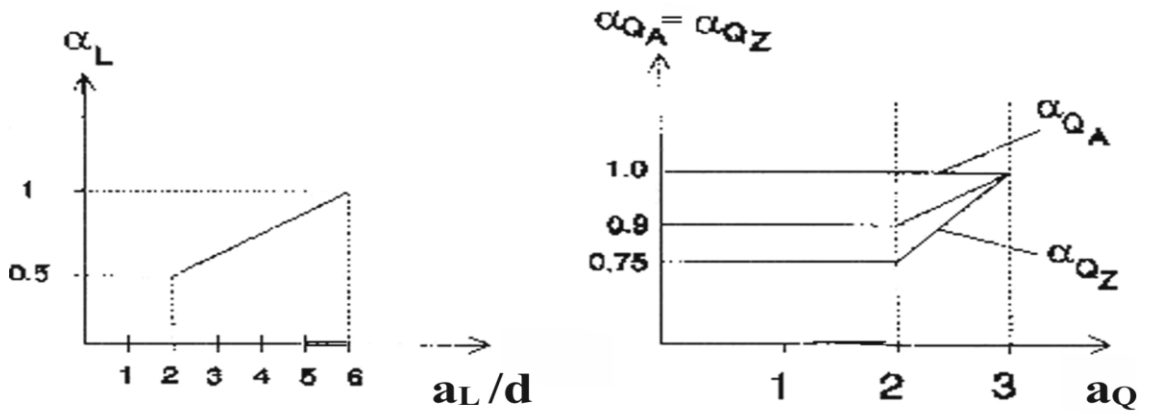
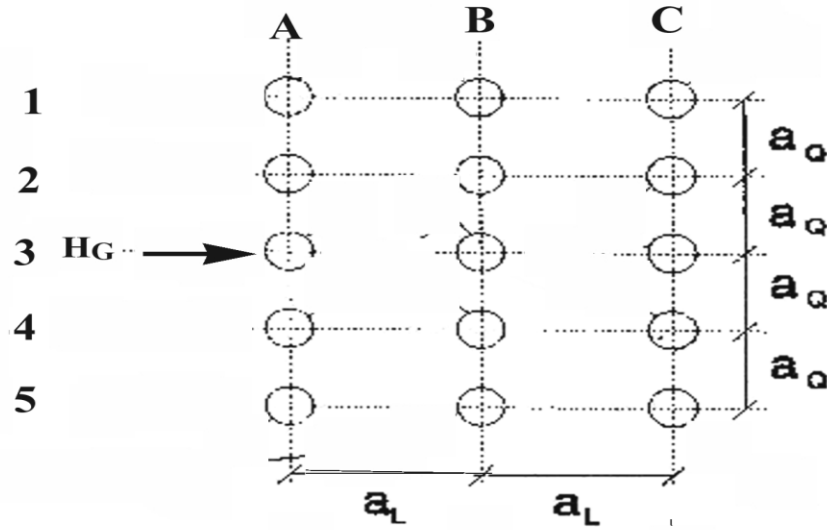
$\alpha_i = \alpha_L \times \alpha_Q$ =Kazık Aralığına bağılı bir Dağıtım Katsayısı,

$\sum \alpha_i$ = Dağıtım Katsayıları Toplamı,

olmaktadır.

Kazıklar Kazık Izgarası üzerinde yatayda  $a_L$  ve düşeyde  $a_Q$  aralıklarındadır. Dağıtım katsayıları  $\alpha_L, \alpha_{QA}$  ve  $\alpha_{QZ}$ , şeklin altındaki abaklarda bu aralıkların bir fonksiyonu olarak görülmektedirler. Yük dağıtım hesabı şekle bakılarak aşağıdaki gibi yapılır:

- Kazık aralıkları  $a_L$  ve  $a_Q$  ile kazık çapı  $d$  kullanılarak aşağıda Şekil 7.6 da verilmiş olan abaklara girilir ve buradan yük dağıtım katsayıları  $\alpha_L$  ve  $\alpha_{QZ}$  ve/veya  $\alpha_{QA}$  saptanır.
- Aşağıda gösterilen Tablo 7.5 e başvurulur kazık ızgarasının akslarında bulunan kazıkların yük dağılım katsayıları yukarıdaki bulgular kullanılarak hesaplanır. Bunlar (7.12) bağıntısındaki  $\alpha_i$  katsayılarıdır.
- Bu şekilde saptanan katsayılar toplanır ve (7.12) bağıntısındaki  $\sum \alpha_i$  elde edilir. Toplam grup yükü bu bağıntı kullanılarak kazıklara dağıtılır.
- Bu dağılımda  $a_L/d$  ve  $a_Q/d$  aralıklarının 2 den az olması uygun görülmemektedir. Tasarımda bu husus gözetilmelidir.
- Şartname Şekil 7.6 nın simetrik olmayan haller için de akla yatkın bir şekilde kullanılabileceğini söylemektedir.



Şekil 7.6. DIN 4014 Şeması

Buna göre örneğin A-1, A-5, B-1, ve B-5 kazıklarının yük dağılım katsayısı  $\alpha_L$  ve  $\alpha_{QA}$  katsayılarının çarpımıdır.

Tablo 7.5 Yük Dağılım Matrisi Tablosu

| ar | Aksl | A                           | B                           | C  |
|----|------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| 1  |      | $\square_{LX} \square_{QA}$ | $\square_{LX} \square_{QA}$ | $\square \square \square \square_{QA}$                 |
| 2  |      | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square \square \square \square_{QZ}$                 |
| 3  |      | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square \square \square \square \square_{QZ}$         |
| 4  |      | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square_{LX} \square_{QZ}$ | $\square \square \square \square \square_{QZ}$         |
| 5  |      | $\square_{LX} \square_{QA}$ | $\square_{LX} \square_{QA}$ | $\square \square \square \square \square \square_{QA}$ |

Bu yöntemle grup etkileşimi nedeni ile yumuşamış olan yay katsayıları aşağıdaki şekilde bulunur:

a. Yatak Modülünün Derinlikle Değişken Olması Durumu:

Kısım 6 da görülmüş olan modülün derinlikle değişme fonksiyonu bu kez:

$$k_{\varepsilon}(z) = \frac{\eta_{he} z}{d}$$

şeklinde verilmektedir. Yumuşamış modül  $\eta_{hi}$  ise aynı Kısımda anlatılan:

$$T = 5 \sqrt{\frac{EI}{\eta_{hE}}} \quad (6.60)$$

bağıntısı kullanılarak bulunan (T) elastik uzunluk değerinin aşağıdaki durumlarına uyan bağıntılarla değiştirilmesi ile saptanır:

Kazık boyu l nin elastik uzunluğa oranı  $l/T > 4$  olması durumunda bağıntı:

$$\eta_{hi} = \alpha_i^{1.67} \cdot \eta_{hE} \quad (7.13)$$

$l/T < 2$  olması durumunda ise :

$$\eta_{hi} = \alpha_i \eta_{hE} \quad (7.14)$$

olmaktadır.  $l/T$  nin bu iki değeri arasındaki değerler için enterpolasyon yapılabilir.

b. Yatak Modülünün Derinlikle Sabit Olması Durumu:

Kısım 6 da görülmüş olan modül:

$$k_{h0} = \text{sabit} \quad (7.15)$$

şeklinde verilmekte ve yumuşamış modül  $k_{si}$  aynı Kısımda anlatılan:

$$R = \beta^{-1} = \sqrt[4]{\frac{EI}{k_{h0}d}} \quad (6.34)$$

bağıntısı kullanılarak bulunan elastik uzunluk R değerinin aşağıdaki durumları uyarınca verilen bağıntılarla saptanır:

$1/R > 4$  olması durumunda bağıntı:

$$k_{si} = \eta_i^{1.33} \cdot k_h \quad (7.16)$$

$1/R < 2$  olması durumunda ise:

$$\eta_{hi} = \eta_i k_h \quad (7.17)$$

olmaktadır.  $R=1/\beta$  nın bu iki değeri arasındaki değerler için enterpolasyon yapılabilir.

Bu şartname hükümleri uyarınca hesaplanan yumuşamış modüller, kazığın kesit kuvvetlerinin hesaplarında önceki bahislerde açıklanan yöntemler çerçevesinde kullanılırlar. Aşağıda bu şartnamenin uygulanmasına yönelik bir örnek verilmektedir.

### **Örnek 7.5.**

5x5 lik 3.6 m aralıklı kare bir ızgara üzerinde uzunluğu 30 m, çapı 1.2 m olan kazıklarla bir grup tasarlanmıştır. Grup 12500 KN yük taşıyacaktır. Zemin ön yüklenmeye uğramış killi bir zemindir. Zemin ve kazığa ait

diğer özellikler aşağıdadır. Semboller şimdiye kadar kullanılanların aynıdır:

$$k=50000 \text{ KN/m}^2, C_u=125 \text{ KN/m}^2, E= 26 \times 10^6 \text{ KN/m}^2, I=0.102 \text{ m}^4$$

1. Yük Dağıtım Katsayıları:

$$a_L=a_Q=3.6 \text{ m } a_L/d=a_Q/d=3$$

$$\text{Abaktan } \alpha_L= 0.625, \alpha_{QA}=\alpha_{Qz}=1.0$$

Kazık Dağıtım Katsayıları aşağıdaki Tabloda gösterilmiştir.

| Kazık Yeri | Kazık Adedi | Katsayılar                    | $\alpha \alpha \alpha \alpha \alpha \alpha \alpha \alpha_i$ |
|------------|-------------|-------------------------------|---|
| Kenar      | 8           | $\alpha_L \times \alpha_{QA}$ | $8 \times 0.625 \times 1 = 5$                               |
| Orta       | 12          | $\alpha_L \times \alpha_{Qz}$ | $12 \times 0.625 \times 1 = 7.5$                            |
| Arka Köşe  | 2           | $\alpha_{QA}$                 | $2 \times 1 = 2$  |
| Arka Orta  | 3           | $\alpha_{Qz}$                 | $3 \times 1 = 3$  |
| Toplam     | 25          | $\alpha \alpha_i$             | 17.5  |

2. Tablodaki dağıtım matrisi ile bütün kazık yükleri bulunabilir. Ancak en büyük yük arka kazıklardadır ve değeri:

$$H_{\max} = (\alpha_i / \alpha \alpha_i) \times H_G = 714.3 \text{ KN olur.}$$

$$\beta^{-1} = (EI/k_h d)^{0.25} = 3.64 \text{ m ve } 1/\beta^{-1} = 12.3 > 4.$$

Bu nedenle Yumuşamış Yay Katsayısı:

$$k_{si} = \square_i^{1.33} \cdot k_h = 1^{1.33} \times 50000 = 50000 \text{ KN/M}^2$$

$\beta = 0.387$  ve  $\beta l = 11.6 > 5$  Bu nedenle Hetenyi'nin  $\beta l = 4.0$  için geçerli tablosu kullanılarak kesit kuvvetleri ve ötelenme miktarları hesaplanabilir.

3. Kazık Başında Ters Moment:

$$M_F = \frac{1}{2 \times 0.274} \frac{1.007 \times 714.3}{1.0002} = 1303.6 \text{ KN.m}$$

Kazık Başı Ötelenmesi:

$$y = y_H + y_M = \frac{2 \times 0.274 \times 1.0003 \times 714.3}{50000 \times 1.2} - \frac{2 \times 1.0003 \times 0.274^2 \times 1303.6}{50000 \times 1.2} = 0.0032 \text{ m} = 3.2 \text{ mm}$$

olarak hesaplanır.

### 7.3.2.3. Kritik Yük Yöntemi (KYM)

Bu yöntem, Kısım 6. da görülmüş olan KYM yönteminin kazık gruplarına uygulanmasıdır. Ooi ve Duncan (1994) tarafından ortaya atılan yöntem bir bakıma bir evvelki yöntemin devamı olmakla beraber, bazı özellikleri itibarı ile Focht ve Koch (1973) ün yaklaşımından da esinlenmiştir. Bu yaklaşımda grup içinde belli bir yük altında bulunan bir kazığın grup dışında tek başına bulunduğu duruma oranla daha fazla ötelenme göstereceği ve maksimum eğilme momentinin de daha fazla olacağı öngörülmektedir. Bu öngörü sonucunda, bir “Ötelenme Yükseltme Faktörü  $C_y$ ” ile bir “Moment Yükseltme Faktörü,  $C_m$ ” tanımlanmaktadır.

Ooi ve Duncan (1994) tarafından yayınlanan çalışmada yöntemin model deneyleri sonuçları ve diğer teorik çözümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmış ve çözümün doyurucu olduğu gösterilmiştir.



Bununla beraber bu yaklaşımın da bazı kısıtlılıkları bulunmaktadır. Bunlardan ilerde söz edilecektir.

Bu yöntem, aşağıdaki adımların izlenmesi ile uygulanır:

1. Kazık başı ötelenmesi  $y_s$  ve maksimum moment  $M_s$ ; tek kazıkların yanal yük altındaki davranışlarının çözümünü veren KYM yöntemi ( Bkz.6.3.3.3.) uygulanarak bulunur. Bu uygulama sırasında tek kazığa; kazık grup yükünün kazık sayısına bölünmesi ile bulunan ortalama yük uygulanır.

2. Grubun ötelenmesi ile grup içindeki bir kazığa gelen maksimum moment aşağıdaki bağıntılar yardımı ile saptanır:

$$y_g = C_y y_s \quad (7.18)$$

$$M_g = C_m M_s \quad (7.19)$$

Bu bağıntılarda:

$y_g$ = Grup Ötelenmesi

$M_g$ = Gruptaki bir Kazıkta Görülecek Olan Maksimum Moment (Tasarım Momenti),

$y_s$ = Tek kazık için Hesaplanmış olan Kazık Başı Ötelenmesi,

$M_s$ = Tek Kazık için Hesaplanmış olan Maksimum Moment,

$C_y$ = Ötelenme Yükseltme Faktörü,

$C_m$ =Moment Yükseltme Faktörü,

olmaktadır. Yükseltme Faktörleri aşağıdaki bağıntılarla tanımlanır:

$$C_y = \frac{A + N_{pile}}{B\left(\frac{s}{d} + \frac{P_s}{CP_N}\right)} \quad (7.20)$$

$$C_m = (C_y)^n \quad (7.21)$$

(7.20) ve (7.21) bağıntılarında görülen ve yukarıda tanımlanmayan diğer terimler, zemin cinsine bağlıdır. Bunların değerleri veya ilgili bağıntıları aşağıda Tablo 7.6. da gösterilmektedir.

Bu Tabloda:

“ $S_u$  = Kilin drenajsız direnci,

$K_p$  = Kum için Pasif Basınç Katsayısı =  $\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ ,

$P_g$  = Grup Yüğü,

$\gamma$  = Kumun Birim Hacim Ağırlığıdır.

Tablo 7.6. İlgili Terimler

| Katsayı | Zemin |     |
|---------|-------|-----|
|         | Kil   | Kum |
| A=      | 16    | 9   |
| B=      | 5.5   | 3   |

|             |                     |                     |
|-------------|---------------------|---------------------|
| $C=$        | 3                   | 16                  |
| $P_N =$     | $S_u \times d^2$    | $K_p \gamma d^3$    |
| $n=$        | $(P_s/150P_N)+0.30$ | $(P_s/300P_N)+0.65$ |
| $P_s=$      | $P_g / N_{pile}$    |                     |
| $N_{pile}=$ | Kazık Sayısı        |                     |

### **Örnek 7.6.**

Bu paragrafta açıklanan konudaki örnek, 7.3.3.2. paragrafında verilen kazık grubu olacaktır.

(6.74) bağıntısı ile  $P_c=66489$  bulunur ve buradan tek kazık için kazık başı ötelenmesi (6.78) bağıntısı kullanılarak 1.7 mm olarak saptanır.

(7.20) bağıntısına Tablo 7.6 dan alınan terimler ile grubun özelliklerine ilişkin değerler konularak  $C_y=1.9$  hesaplanır.

Buradan grup ötelenmesi  $1.9 \times 1.7 = 3.2$  mm olarak bulunur. Bu değer 7.3.3.2 paragrafında bulunanla karşılaştırılabilir.

Bu yöntemin kullanımında aşağıdaki hususlar gözönüne alınmalıdır:

a. Yöntem, kare ızgaralar için geliştirilmiştir. Bununla beraber dikdörtgen ızgaralarda da ortalama açıklıklar kullanılarak uygulanabilir.

a. Yöntem, eğik kazıklarla tasarlanmış olan gruplara uygulanamaz.

b. Teorik yaklaşımda kazık başlarının ankastre olduğu kabulü yapılmıştır. Pratikte durumun farklı olabileceği daha önce de tekrarlanmıştı. Ancak grup hesabının, tek kazık başının ötelenme miktarına bağlı olduğu açıktır. Bu gerçekten yola çıkılarak tek kazığın kazık başı ötelenmesi hesabının, kazık başının belirli bir mikter dönmesine izin veren bir yöntemle hesaplanması halinde; yöntem bu durumu kapsamış olacaktır.

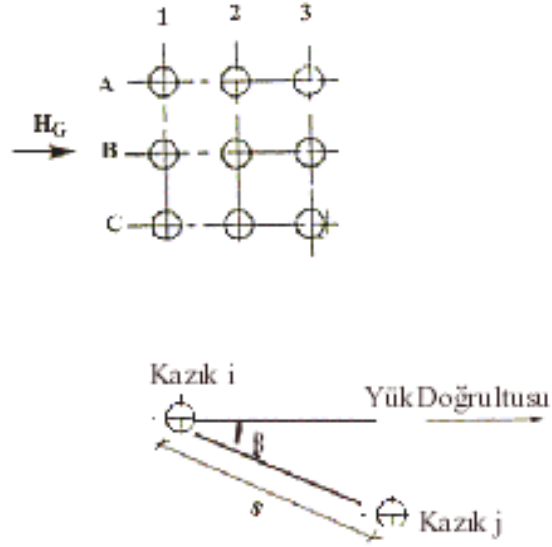
c. Bu yöntem kare ızgaralar için geliştirilmiş olduğundan kazık yükünün uygulanma yönünden bağımsız olarak sonuç vermektedir. Grubun dikdörtgen bir ızgaraya oturması halinde ise ızgaranın dış boyutlarının birbirlerinden çok farklı olmaması halinde yükün uygulanma yönünden bağımsız olarak benzer sonuçlar alınabilir.

d. Yöntem “uzun” ve üniform zemin içinde bulunan kazıklar için türetilmiştir. Zemin özelliklerinin derinlikle değişmesi halinde 8 çap derinlik içindeki özelliklerin kullanılması yeterli sonuçlar verebilecektir.

#### 7.3.2.4. Elastik Teori ile Çözüm

Poulos (1971) yanal yüklenmiş kazık grupları içindeki kazıkların etkileşim problemini elastik sürekli yarı ortam teorilerini ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözümlenmiştir. Çözümde kazıklarda 21 eleman kullanılmıştır. Çözümler zeminin poisson oranı için (hacim değişimi olmayan veya drenajsız zemin ortamı)  $\nu=0.5$  alınarak gerçekleştirilmiştir. Sürekli ortam kabulü yapıldığından ve zemin-kazık ayrılması ve/veya göçmesi dışlandığından dolayı elemanlarda kazık ötelenmesi ile zeminin ötelenmesinin eşit olduğu varsayılmıştır. Bu

çözümlerin incelenmesi; kazık başları ankastre olarak inşa edilmiş grupların daha fazla yükü daha az bir ötelenme ile taşıdıklarını ortaya koymuştur. Çözüm; 6.5 paragrafında görülen öğretiye koşut olarak yürütülen bir mantıkla yapılmıştır. Bu kısımda “ankastre” başlı kazıklarda oluşan grupların ötelenme değerlerinin hesap yolu Şekil 7.7. ye bakılarak açıklanacaktır:



Şekil 7.7. Kazık Grup Şeması

Hesaplarda, rijit radyeye bağlı olan her kazığın aldığı yükün birbirinden farklı olduğu göz önüne alınmaktadır. Diğer taraftan kazık grubundaki kazıkların geometrik konumu nedeni ile bazı kazıklar aynı yükü taşıyacaklardır. Örneğin Şekil 7.7 de A1, A3, C1, C3 kazıkları eşit yük taşıyacaklardır. Bu durumda her kazık, aldığı yük nedeni ile ötelenecek, bu ötelenmeye, diğer kazıklardan ulaşan yükler nedeni ile oluşan ötelenme miktarları da eklenecektir. Bir kazığa diğerlerinden gelen yük miktarı ise kazıkların arasındaki mesafeye ( $s$ ), kazık narinlik oranına ( $l/d$ ), yük doğrultusu ile karşılıklı etkileşen kazıkları birleştiren hat arasında “sapma

açısı” ( $\beta$ ) ve “Kazık Esneklik Faktörü ( $K_R$ )” adı verilen boyutsuz parametreye bağlı olan “Etkileşim Katsayısı ( $\alpha_{kj}$ )” nin kullanımı ile bulunmaktadır.

Esneklik Katsayısı ( $\alpha_{kj}$ ), aşağıdaki oran ile tanımlanır:

( $\alpha_{kj}$ ) = Etki yapan (j) kazığının yansıttığı yük nedeni ile oluşan ilave ötelenme / Etkilenen (k) kazığının kendi taşıdığı yük nedeni ile ötelenmesi.

Kazıkların grup içindeki etkileşimlerinin çözümleri yukarıdaki değişkenlerin fonksiyonu olarak elde edilmişlerdir. Bu sonuçlar, bir önceki kısımda da sözü edilmiş olan “Kazık Esneklik Faktörü” ( $K_R$ ) ye bağlı olarak abaklarda verilmişlerdir:

$$K_R = \frac{EI}{E_s l^4} \quad (6.85)$$

Bu bağıntıda görülen semboller bir kez de burada tekrarlanacaktır:

E= Kazığın Elastik Modülü,

I=Eylemsizlik Momenti,

$E_s$ =Zeminin Elastik Modülü,

l = Kazığın Boyu,

olmaktadır.

Yukarıdaki tanımlar kullanılarak ötelenmeye etkiyen kazıklararası etkileşmeyi içeren bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y_k = k_x \left[ \sum_{j=1}^{j=n} H_j \alpha_{yfkj} + H_k \right] \quad (7.22)$$

Bağıntıdaki toplam alınırken j nin k ya eşit olmadığı bilinmelidir.  $k_x$  ise esneklik redörüdür. Tanım burada tekrarlanırsa  $\alpha_{yfkj}$  ise j kazığındaki etkiden dolayı k kazığına gelen ilave yük oranını gösterir. Diğer taraftan statik yatay denge aşağıdaki eşitliğin sağlanmasını gerektirir:

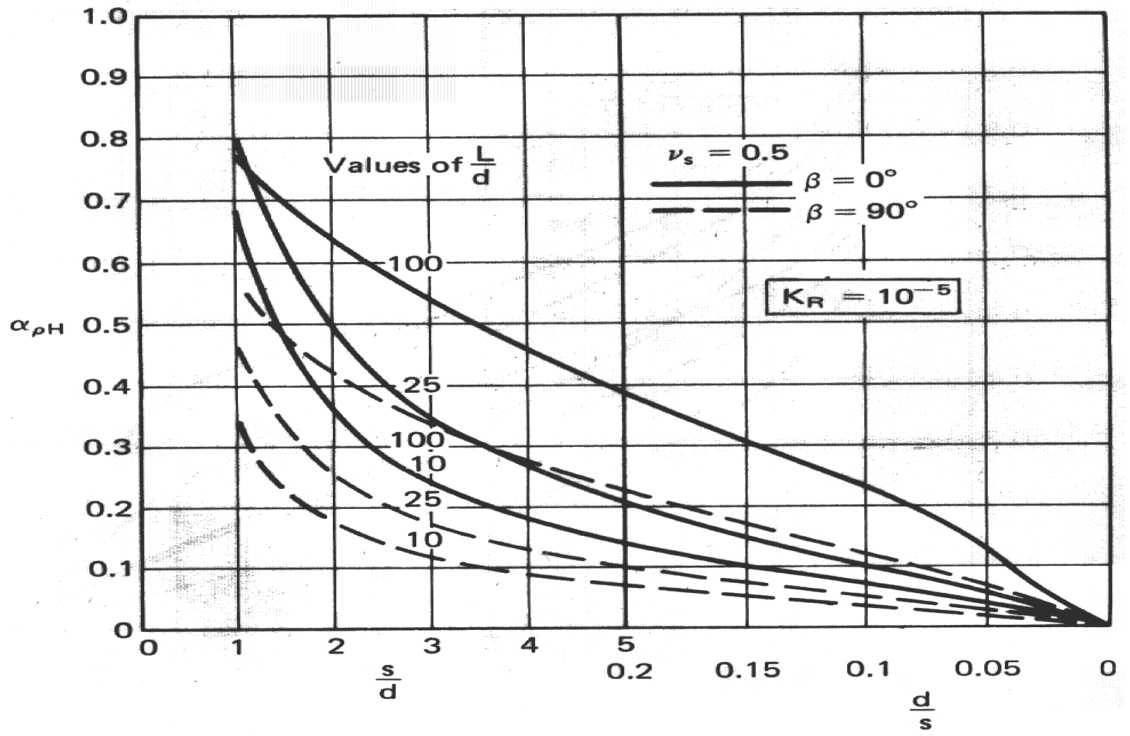
$$H_G = \sum_1^n H_j \quad (7.23)$$

Etkileşim katsayıları Poulos(1971) den alınmış olan Şekil 7.8 ile Şekil 7.11 da gösterilen abaklarda  $K_R$  nin dört ayrı değeri için verilmektedir. Bu şekillerde yanal yükün doğrultusu ile etkileşen kazıkların kazık ızgarasındaki eksenleri arasındaki sapma açısı ( $\beta$ ) değerleri için iki ayrı eğri takımı vardır. Çözümler bu açının 0 ile 90 derece değerleri için verilmiş olup ara değerler için enterpolasyon yapılır. Zeminin yatak modülünün derinlikle değişmesi veya aynı kalması durumları aynı abaklarla çözülebilmektedir. Bu nedenle (6.86) ve (6.87) ifadelerinde  $K_N=K_R$  alınabilmektedir.

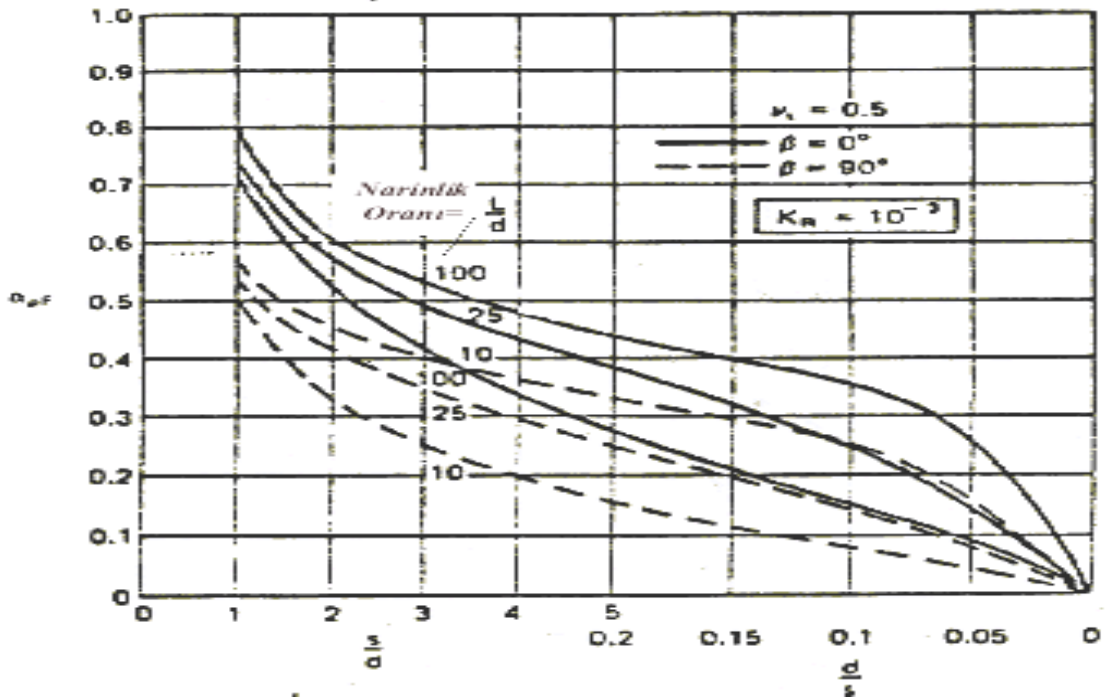
Kazıkların grup yükünü eşit olarak paylaştıkları varsayılırsa n kazık sayısını  $H_G$  grup yükünü göstermek üzere herbir kazığa isabet eden yük:

$$H_j = H_G/n \quad (7.24)$$

olacaktır.

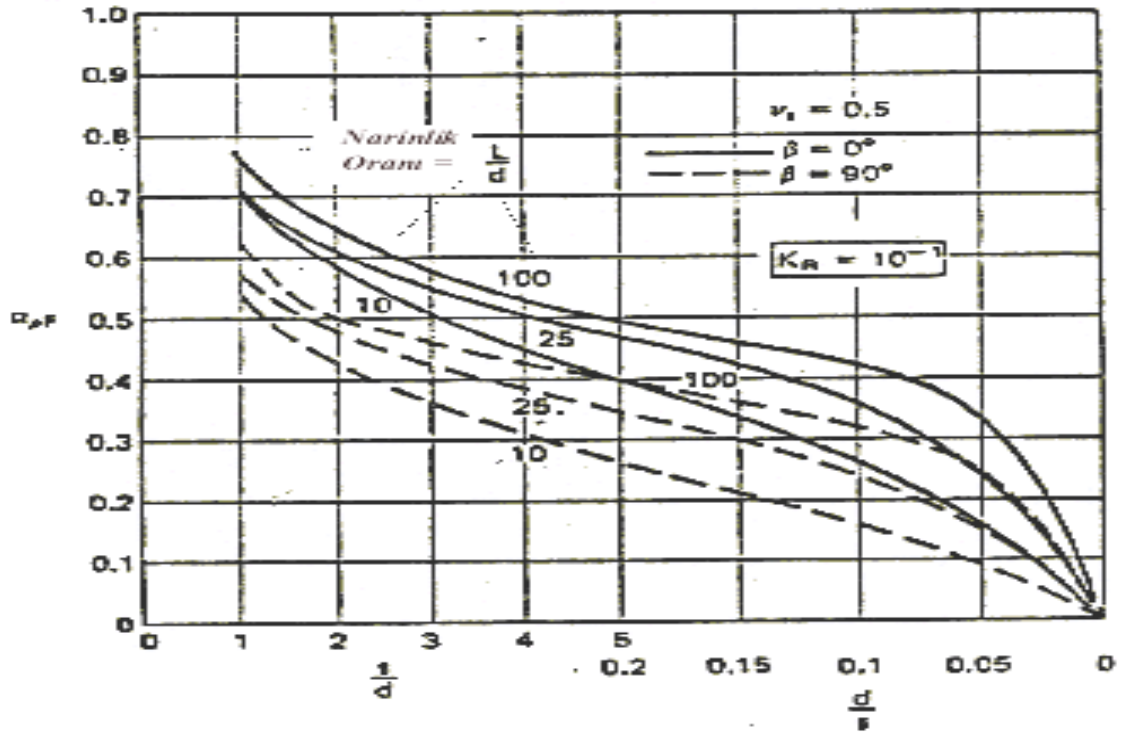


Şekil 7.8. Etkileşim Katsayıları ( $K_R = 10^{-5}$ )

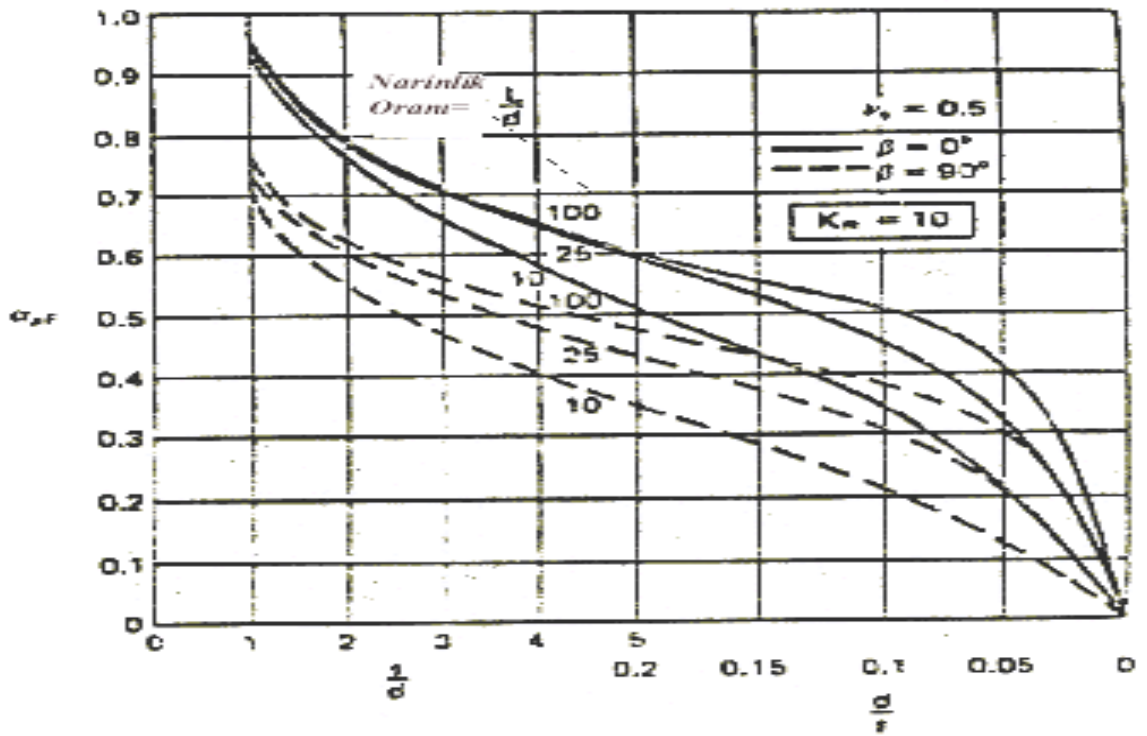




Şekil 7.9. Etkileşim Katsayıları ( $K_R = 10^{-3}$ )



Şekil 7.10. Etkileşim Katsayıları ( $K_R = 10^{-1}$ )



### Şekil 7.11. Etkileşim Katsayıları ( $K_R = 10^{-10}$ )

Bu kez (7.22) bağıntısı  $H_J = H_K$  alınarak yazılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$y_K = y_G = k_x \frac{H_G}{n} \left(1 + \sum_{j=1}^{J=n} \alpha_{kj}\right) = k_x \frac{H_G}{n} R_R \quad (7.25)$$

Bu bağıntıda  $R_R$  “Grup Ötelenme Faktörü” olarak adlandırılır ve görülebileceği gibi (7.10) bağıntısı ile gösterilen Grup Azaltma Faktörünün benzeridir.

Yukarıdaki hususlar bir örnekle açıklanacaktır:

#### **Örnek 7.7.**

Şekil 7.7. de gösterilen grup, kazıklar arasında 4.8 m aralık olacak şekilde tasarlanmıştır. Yanal yük 6084 KN dur. Kazık çapları 1.2 m, narinlik oranı 25,  $K_R$  katsayısı  $10^{-5}$  dir.

A1 Kazığı başının ötelenmesi hesaplanacak ve grup için hesap yöntemi gösterilecektir:

Şekil 7.7. ye bakıldığında A1,A3,C1,C3 kazıklarının ızgara üzerindeki konumları nedeni ile aynı bir  $H_1$  yükünü alacakları söylenebilir. Aynı şekilde A2 ve C2 kazıkları  $H_2$ ; B1 ve B3 kazıkları  $H_3$ ; B2 kazığı ise  $H_4$  yükünü alacaktır. Gruptaki tüm kazık başlarının yan al ötelenmesi ise eşit ve  $y$  kadar olacaktır. Bu durumda 4 Yük ve 1 Ötelenme olmak üzere 5 bilinmeyen bulunmaktadır. Bu bilinmeyenleri bulabilmek için gerekli olan

denklemlerden birisi (7.22) olabilir, diğçerleri için ise (7.23) bağıntıları kullanılabilir.

(7.22) bağıntısı ile

$$H_G = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 6084 \text{ olur.}$$

A1, A3, C1, C3 kazıklarının  $H_1$  yükü altındaki ötelenmeleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

Tablo 7.7. Yük Dağılımı

| Yük Tipi | Kazık | S/d  | $\square$ | $\square \square \square_{kj}$ |
|----------|-------|------|-----------|--------------------------------|
| $H_1$    | A1    | 0    | -         | -                              |
|          | A3    | 8    | 0         | 0.2                            |
|          | C1    | 8    | 90        | 0.13                           |
|          | C3    | 11.3 | 31.8      | 0.02                           |
| $H_2$    | A2    | 4    | 0         | 0.38                           |
|          | C2    | 8.9  | 63.5      | 0.11                           |
| $H_3$    | B1    | 4    | 90        | 0.2                            |
|          | B3    | 8.9  | 26.6      | 0.15                           |
| $H_4$    | B2    | 5.65 | 45        | 0.20                           |

Etkileşim durumunu kolayca görebileceğimiz Tablo 7.7. den:

$$y_1=y=k_x[H_1(0.2+0.13+0.02)+H_2(0.38+0.11)+H_3(0.2+0.15)+H_4(0.20)+H_1]$$

bulunur. Eşit yük taşıyan diğer kazık alt grupları için de 3 denklem daha yazılabilir ve denklem takımı çözülür.

Sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$H_1 =845 \text{ KN}; H_2 =\mathbf{710} \text{ KN}; H_3 =439 \text{ KN}; H_4 =169 \text{ KN}$$

Kazık başlarının ötelenme miktarları eşit olduğundan bu aynı zamanda grubun ötelenme değeri olmaktadır. Bu grup örneği, Kısım 6 da tek kazıklar için Hetenyi, Matlock-Reese, Poulos-Davis tarafından ortaya atılmış olan çözümlerin sonunda verilmiş olan tek kazıkların kullanımı ile tasarlanmış bir örnektir. Tek fark, kazık boyunun 45 m yerine 25 metre alınmasıdır. Çözüm, yukarıda sözü edildiği gibi  $K_R=K_N$  alınarak gerçekleştirilmiştir.

Elastik Teori kullanılarak yapılan çözümlerde derinlikle değişen modül için  $K_R=K_N =6 \times 10^{-6}$  ve derinlikle sabit kalan modül için ise  $5 \times 10^{-5}$  bulunmuş idi. Bu çözümde  $10^{-5}$  alınmıştır. Esnek bir kazık için bu farklılıklar, çözümde çok büyük değişikliklere yol açmazlar. Bu nedenle buraya kadar çözülen örneklerde bulunmuş olan  $k_x$  esneklik redörü değerlerini ve bu değerler kullanılarak bulunan ötelenme değerlerini gözden geçirmek yerinde olur. Bunlar aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir:

Tablo 7.8. Değişik Yöntemlerle Bulunan Ötelenme Miktarları

| Yöntem | $k_x$ | Ötelenme (mm) |
|--------|-------|---------------|
|--------|-------|---------------|

|                          | (m/KN)                | Tek Kazık | Grup |
|--------------------------|-----------------------|-----------|------|
| Hetenyi                  | $1.85 \times 10^{-5}$ | 12.5      | 31   |
| Matlock-Reese            | $3 \times 10^{-5}$    | 20.       | 50   |
| Elastik. T.Sabit Modül   | $2.11 \times 10^{-5}$ | 14.2      | 35   |
| Elastik. T.Değişk. Modül | $2.7 \times 10^{-5}$  | 18.       | 45   |

Tablodan Matlock-Reese yöntemi için verilen redör kullanılarak ötelenme miktarı şöyle bulunur:

$$y = 3 \times 10^{-5} [1.35 \times 845 + 0.49 \times 710 + 0.35 \times 439 + 0.2 \times 169] = 0.05 \text{ m} = 50 \text{ mm}$$

Bu grup, kazıkların grup yükünü eşit paylaştıkları varsayımı ile de çözülebilir:

Bu durumda:

$n$  kazık sayısını,  $H_G$  grup yükünü göstermek üzere herbir kazığa isabet eden yük (7.24) uyarınca yazılır ve çözüm (7.25) bağıntısı ile şu şekilde bulunur:

$$y_G = k_x \frac{H_G}{n} R_R$$

$$R_R = \sum_{j=1}^{j=n} \alpha_{y/fkj} + 1 = 2.19$$

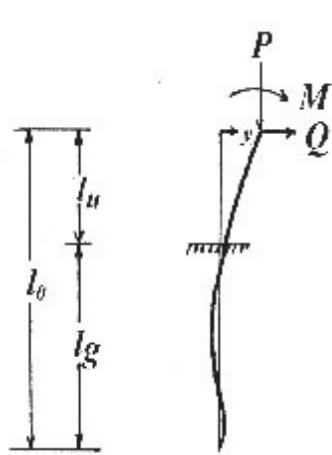
$$y_G = 2.7 \times (6084/9) \cdot 2.19 = 0.0435 = 43.5 \text{ mm veya } 44 \text{ mm}$$

(7.25) bağıntısına göre bu problemde örneğin; kabul edilebilir ötelenmenin 25 mm olduğu şart koşulmuş ise grup yükünün 3450 KN değerine indirilmesi gerekir.

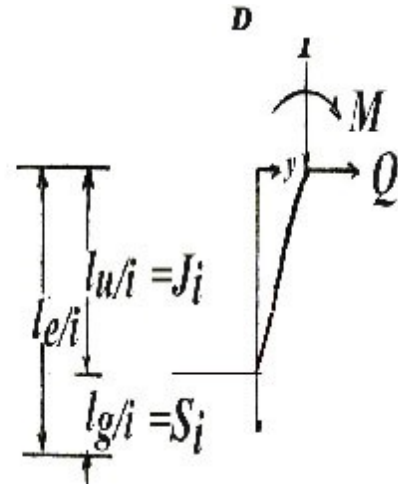
#### 7.4.Kazıklarda Burkulma

Kazıklarda burkulma nedeni ile göçme, oldukça nadir görülen bir olay olmakla beraber, özellikle yumuşak zeminlerdeki narin kazıklar için bir değerlendirme yapılması uygun olabilir. Burkulma, yanal yük ve/veya moment ve düşey yük altında bulunan kazığın simetri ekseninin düşeyden kayması ile oluşan yük eksantrisitesinin etkisi ile meydana gelir. Burkulma olasılığı kazığın, zemin seviyesinde etkiyen yüklere kıyasen zemin seviyesi üstünde serbest bir uzunluğu bulunması ve yüklerin bu uzunluk ucunda uygulanması halinde daha büyük olur. Burkulma hesapları ise kazık-zemin sistemini Kısım 6 da anlatılan yay katsayıları ile örnekleyerek veya elastik ortam teorisi kullanılarak yapılır.

Bu kısımda, kazık-zemin sistemini yay katsayıları ile örnekleyen yöntemle yer verilecektir. Bu yöntemde gerçek kazık; zemin içindeki boyu eşdeğer bir uzunluk ile temsil edilen bir “eşdeğer konsol kiriş” haline dönüştürülür. Şekil 7.11 de gerçek kazık görülmektedir. Şekil 7.12 de ise eşdeğer konsol kiriş görülmektedir. Bu kirişin toplam uzunluğu  $l_e/i$ , serbest boyu  $l_q/i$  ve zemin içindeki boyu ise  $l_g/i$  dir.



Şekil 7.11. Kazık



Şekil 7.12. Eşdeğer Konsol

Kazık

Tablo 7.9 . Kazık ve Eşdeğer Konsol Kazık

| Kazık ve Eşdeğer Konsol Kazık Boyutları |             |                    |                |               |                    |
|---|-------------|--------------------|----------------|---------------|--------------------|
| Gerçek Kazık                            |             |                    | Boyutsuz Kazık |               |                    |
| Boy                                     | Serbest Boy | Zemin İçindeki Boy | Boy            | Serbest Boy   | Zemin İçindeki Boy |
| $l_0$                                   | $l_u$       | $l_g$              | $l_e/i$        | $J_i = l_u/i$ | $S_i = l_g/i$      |

Burkulma hesapları Şekil 7.12 de gösterilen konsol giriş üzerinde yapılır. Burkulmanın oluşacağı yük ( $P_{cr}$ ) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4(S_i + J_i)^2 i^2} \quad (7.26)$$

Burada,

$E$  = Kazığın Elastik Modülü,

$I$  = Kazığın Eylemsizlik Momenti,

$S_i = l_g/i$  = Şekil 2 de gösterilen kazığın zemin içinde kalan eşdeğer boyu,

$J_i = l_u/i$  = Şekil 2 de gösterilen kazığın serbest eşdeğer boyudur.

Yukarıda  $i$  yatak katsayısının derinlikle değişmediği zeminlerde aşağıdaki (6.34) ve (6.60) bağıntılarında ifade edildiği gibi  $i=R=\square^{-1}$  şeklinde, yatak katsayısının derinlikle değiştiği zeminlerde ise  $i=T$  şeklinde alınır. Değeri ilgili kısımda anlatılan hususlar uyarınca ilgili zemin tipine bağlı olarak saptanabilir. Tanım Şekil 7.11 ve 7.12 de gösterilmiştir.

Bu durumda 6 Kısımda görüldüğü gibi:

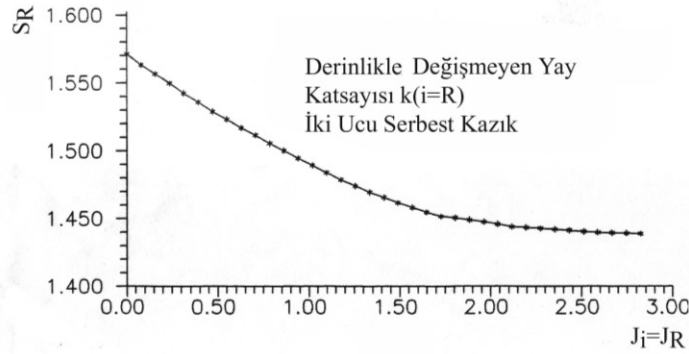
$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{k_0 d}} \quad (6.34)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{\eta_h}} \quad (6.60)$$

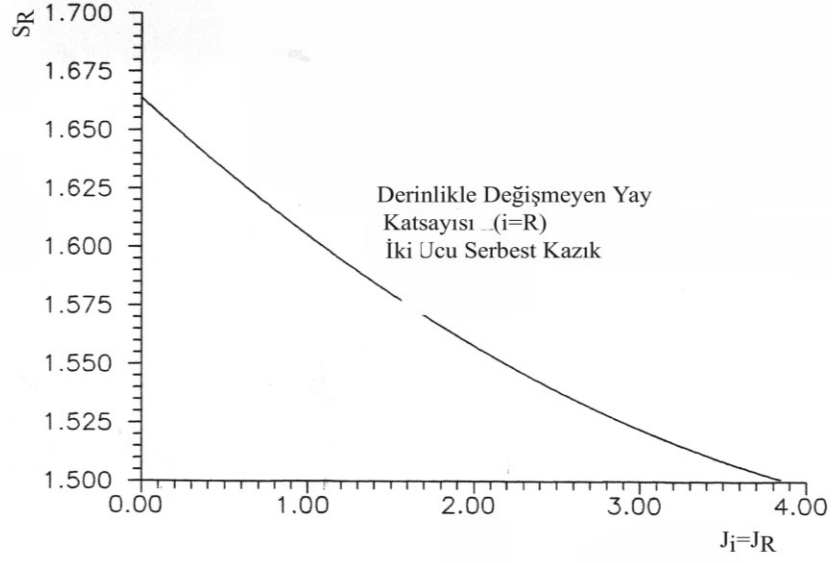


olacaktır. Burkulma durumunda, kazık başlarının mafsallı veya ankastre olması önem taşımaktadır. Kazığın tabanı genelde serbest kabul edilebilir. Bu durumda kazık başı için iki hal söz konusu olabilmektedir:

Birinci durumda, kazık kazık başlığına tam anlamı ile ankastre haldedir. İkinci halde ise kazık başlığı-radye eklemünde dönme olasıdır. Pratikte kazık burkulmasına karşı güvenlik birinci halde daha fazladır. Ancak, bazı hallerde kazık başlarındaki kırılma nedeni ile veya bilinçli yapım sonucunda başlık mafsallı olabilir. Bu durumun gözönüne alınması gereklidir. Kazığın zemin içinde kalan eşdeğer boyu, eşdeğer konsol boyunun bir fonksiyonudur. Aşağıda Şekil 7.13 ila Şekil 7.15 yatak katsayısının değişim niteliğine ve kazık uçlarının serbestliğine bağlı olarak bu fonksiyonu gösteren eğrileri içermektedir.

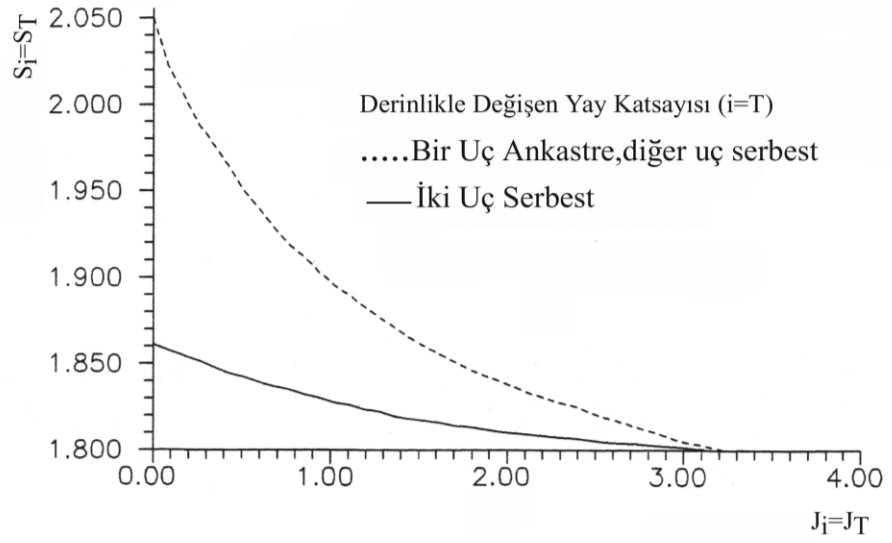


Şekil 7.13. Sabit Katsayı Durumu, İki Ucu Serbest Kazık



(Not  $J_R > 3.85$ ;  $S_R = 1.50$ )

Şekil 7.14. Sabit Katsayı Durumu, Tek ucu Serbest Kazık



(Not:  $J_T > 3.15$ ;  $S_T = 1.8$ )

Şekil 7.15. Derinlikle Değişen Katsayı Durumu

Tasarım, zemin cinsine ve dolayısı ile yatak katsayısının niteliğine göre, aşağıdaki sıra ile yapılır:

- a. Kazığın karakteristik boyu (6.34) ve (6.60) bağıntıları yardımı ile saptanır.
- b. Serbest eşdeğer boy  $S_i$  veya  $J_R$  saptanır.
- c. Şekil 7.13 ile Şekil 7.15 de verilen eğriler yardımı ile  $S_i$  (duruma göre  $S_R$  veya  $S_T$ ) bulunur.
- d. Burkulma değeri, (7.26) bağıntısı aracılığı ile saptanır.

### **Örnek 7.8.**

30 cm çapında ve 35 metre uzunluğunda ve  $EI= 11910$  KNm olan bir kazığın ilk 8 metresi çok yumuşak kil zemin içerisindedir. Zeminde yatak katsayısı her metre derinlik ile  $24000$  kN/m<sup>2</sup> artmaktadır. Ankastre kazık başı durumu için burkulma yükünü bulunuz.

Çok yumuşak kil içindeki kazık uzunluğu serbest kabul edilirse:

$T=0.869$  m ile  $J_T = l_u/T = 9.2$  m bulunur. Buradan Şekil 7.15 ile  $S_T=1.80$  bulunur.

(7.26) bağıntısı ile:

$$P_{CR} = \frac{11910\pi^2}{4(9.2+1.5)^2(0.869)^2} = 340 \text{ KN}$$

bulunur.

Yukarıdaki hesapta eksenel yükün kazık boyunca tüm kesitlerde aynı olacağı varsayımı yapılmıştır. Oysa, yükün bir bölümü çevre sürtünmesi yolu ile zemine aktarılmaktadır. Bu durum aşağıdaki yaklaşımla gözönüne alınabilir ve daha gerçekçi bir çözüme varılabilir:

Kazık boyunca aksenal yük dağılımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{p}{p_0} = \left\{1 - \psi \frac{x - l_u}{l_g}\right\} \quad (7.27)$$

Burada P kesitteki aksenal yük, P<sub>0</sub> ise kazık başındaki yüküdür.

x=Kazık başından itibaren kazık eksenini boyunca mesafe,

Ψ ise yük dağılım katsayısıdır. Kısım 2 ve 5 de yük dağılımı konusunu işleyen yöntemler ile Ψ parametresi kolayca saptanabilir.

Yatak Katsayısı derinlikle değişmeyen zeminler ve bir ucu serbest diğer ucu ankastre kazık durumu için burkulma yükü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$P_{cr} = \frac{V_{cr} EI}{R^2} \quad (7.28)$$

Burada V<sub>cr</sub> esnek veya “uzun” bir kazık için aşağıdaki tablodan alınabilir:

Tablo 7.10.V<sub>cr</sub> Değerleri

| Ψ               | 0   | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 |
|-----------------|-----|------|------|------|------|
| V <sub>cr</sub> | 1.2 | 1.3  | 1.7  | 2.4  | 3.5  |

Yatak Katsayısı derinlikle değişen zeminler ve bir ucu serbest diğer ucu ankastre kazık durumu için burkulma yükü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$P_{cr} = \frac{V_{cr} EI}{T^2} \quad (7.29)$$

Burada  $V_{cr}$ , esnek veya “uzun” bir kazık için aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir:

$$V_{cr} = 1.9 + 1.1 \square \quad (7.30)$$

### **Örnek 7.9.**

Yukarıdaki kazık için burkulma yükü bu yolla saptanırsa (7.30) ile  $V_{cr} = 2.175$  ve (7.29) ile  $P_{cr} = 34302$  KN olur.

Bu basit örnek, pratikte burkulma sorununa niçin sık rastlanmadığını açıklamakta

## **7.5. Kazık Başlığı Hakkında**

### **7.5.1. Kazık Başlığı (Radyesi) Hakkında Bilgiler**

Kazık grubundaki kazıklar, bir radyeye bağlanırlar. Kazıkların bu radyeye bağlantı Şekli, gerek ötelenme ve gerekse grup taşıma gücü açısından önem taşımaktadır. Gerek ötelenme miktarları gerekse kazık boyunca rastlanan maksimum moment kazık başında izin verilen dönmenin

azaltıldığı ölçüde azalmaktadır. Bu durumda kazık başında meydana gelen ters moment en büyük moment olmaktadır.

Böyle olmakla beraber, kazık başlıkları hakkında yapılmış araştırma ve deneysel çalışma sayısı, genelde yapılmış olan diğer çalışmalara nazaran çok azdır. Radye kalınlığının ne olması gerektiği, kazık başı-radye bağlantılarının şekli, kullanılacak donatı miktarı, donatının radye içinde konulacağı yer (radye altı, radye üstü, her ikisi gibi) hakkında Avrupa'da (Eurocode) bazı veriler olmakla beraber ABD'deki pek çok eyalette ayrı ayrı ve bazı hallerde biribiri ile çelişen şartnameler vardır. Konunun dağınık olması her şeyden önce problemin oldukça karmaşık olmasının bir sonucudur. Bilindiği gibi, radye rijidleştikçe, kazıkların aksenel yükleri eşitlikten uzaklaşacak ve radyeyi eşit olmayan kazık yükleri etkileyecektir. Diğer taraftan, bina yüklerini radyeye ileten yapı elemanlarının geometrik merkezlerinin, yük merkezi ile çakışmaması durumunda bu karmaşıklık artmaktadır. Yatay yüklerin karşılanması için öngörülen eğik kazıklar sorunun diğer bir parçasıdır. Üst yapı elemanları ile kazıkların radyeye bağlandığı yerlerin yakın olması durumlarında gerek kesme kuvvetleri gerekse momentler için yapılan hesaplarda kritik kesitlerin nerelerde alınması gerektiği ayrıca tartışma konusudur. Bu durum; bir bakıma kazıklı temel yapımında kullanılan ve özel patentler ile uygulanan çok sayıdaki yapım metodunun varlığı, bir bakıma da bu konunun yapı mühendisliği ile geoteknik mühendisliği alanları arasına sıkışmış olması nedenleri ile gereken ilgiyi görmemiştir. Bu konudaki genel gözlem, bu probleme düşey yük taşıyan bir yüzeysel temel gibi yaklaşıldığını ortaya koymaktadır. Bu durumda hesaplar genellikle kazıkları dayanak noktaları olarak kabul eden bir sürekli şerit girişin hesabına indirgenmekte, donatı da bu hesaptan elde edilemeyen sonuçlara göre düzenlenmektedir. Bu

paragrafta değişik şartnemelerdeki kuralların önemli görülenlerinin incelenmesi sonucunda geliştirilen bazı öneriler yer almaktadır.

ABD eyaletlerinin değişik şartnemelerine bakıldığında radye kalınlığının 0.60 m den başlayarak 1.0 metre kalınlığa kadar olmasının istenildiği görülmektedir. Aynı şekilde kazık başlarının radye içine gömülme miktarı şartnameye göre 150 mm ile 600 mm arasında değişmektedir. Kazık-radye ekleminde donatı şekli düz, etriyeli veya spiral donatı, bükülmüş kancalı donatı gibi çok değişik hükümler içermektedir. Aynı dağınıklık, donatının konacağı yer konusunda da karşımıza çıkmaktadır. Örneğin Pensilvanya eyaleti donatının; radye içinde gömülü olan kazık başının üstüne, Michigan eyaleti ise hem radye altında hem gömülü kazık başı üstünde bulunmasını koşullamaktadır. Amerikan Eyalet Kara Yolları Birliği (AASHTO) (1977) ise kazık radye sisteminin donatılma şekline aynen bir yüzeysel temelin donatılması şeklinde yaklaşmaktadır. Bu birlik çelik kazıklarda kazık başının en az 300 mm ve fore kazıklarda ise en az 150 mm gömülmesini öngörmektedir. Radye tasarımı, radyenin kalın oluşu nedeni ile genelde kesme kuvvetlerinin ön aldığı bir problem olmaktadır. Bu nedenle aynı şartname ACI 318-77 (1981) nin kullanılmasını öngörmektedir. Kazık başı üzerinde bükülmüş donatı kullanılarak yanal destek verilmeye çalışılmaktadır. İngiltere Çimento Araştırma Enstitüsü, (1983) donatının kazık başlarının üzerinde bükülmesinin, bunların bir grid içinde kazık başı üzerine yerleştirilmesinden daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Yukarıda değinildiği gibi tüm bu öneriler, eksenel yükleri göz önüne almakta ve soruna yüzeysel bir temelin davranışına bakar şekilde yaklaşmaktadırlar.

Yanal yüklerin uygulandığı az sayıdaki bire bir ölçekli deneylerde ise aynı şartlarda donatılmış ankastre başlı bir kazığın serbest başlı bir kazığa

kıyasla iki misline yakın bir yük taşıdığı ve bu sırada baş ötelenmesinin de yarıya indiği gözlenmiştir. Bu deneylerde ayrıca, eklem donatısının radye tabanına konmasının kazık ile radye arasındaki ayrışmayı önlediği ve bu nedenle önerilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Kazık ile radye arasındaki ayrışma, kazık başının gömülü durumdan çıkarak serbestleşmesini olası kılmaktadır. Bu tür bir deneyde iki HP 8x36 çelik kazık radye içine 300 mm gömülmüşler, biri radye tabanında diğeri ise kazık başının 150 mm üstünde grid donatı ile donatılmışlardır. Bu deneyde radye tabanına birim deformasyon ölçerleri yerleştirilmiş, bu suretle tabandaki gerilmeler gözlenmiştir. Donatı kazık başı üstüne yerleştirilmiş olan kazık, kazık radye ayrışması sonucunda yüksek ötelenme göstermiş, tabanda çatlaklar oluşmuştur. Bu durumda betonda ezilme gözlenmemiştir. Diğer kazık ise aynı yüklerde, ayrışan kazığın yarısı kadar bir ötelenme ile normal davranış göstermiştir. Diğer taraftan, ayrışma gösteren kazığın radye tabanındaki gerilme miktarları ayrışmanın verdiği ferahlama nedeni ile diğerinin yarısı kadar olmuştur.

Bu bulgulara rağmen, pratikte çok rastlanan bir uygulama, donatının gömülü kazığın başının üstüne yerleştirilmesidir. Bu uygulama genellikle imalat sırasında donatının kolayca yerleştirilmesi, betonun kolayca dökülmesi, zımbalama olayına karşı bir önlem olduğunun düşünülmesi ve baş üstündeki yük dağılımının daha düzgün olduğunun varsayılması gibi nedenlere dayanır. Ancak bu yaklaşımda yine genel bir alışkanlık olarak kazık-radye etkileşiminde yalnızca kazıklara gelecek olan aksenal yüklerin düşünülmesi ağırlık taşımaktadır. Tüm bu pratik sorunlara karşın, tasarım sırasında kazık başı genellikle “sonsuz rijit” bir radyeye bağlanmış olarak kabul edilmekte ve hesaplar bu varsayıma göre yapılmaktadır.

### 7.5.2. Öneriler



Aşağıdaki hususlar, başarılı olacağı düşünülen bir kazık başlığı-kazık sisteminin yapımı yönünde öneriler olarak kabul edilmelidirler:

1. Bir çok şartname kazık başı üstündeki radyenin enkesidinde radyenin hem üstte hem altta donatı olmasını öngörmektedir. Bu öneriye uyulması, birçok sorunu ortadan kaldırabilecek niteliktedir.

2. Radye donatısı için pas payları en az 75 mm olacaktır. Kazık başlarının kazık içine en az 75 mm girmeleri önerilir. Ancak, bir kazık başının rijit sayılabilmesi ve hesapların bu varsayıma göre yapılabilmesi için bu gömülme miktarı 300 mm dir. Kazık başlarının 75 mm gömülmesi halinde ayrılmayı önlemek için bu 75 mm nin üzerine mutlak surette donatı konulmalıdır. Maksimum moment için bulunan donatı, kazık başlarından itibaren, kazık uzunluğunun en üçte birine kadar her yönde eğilmeyi karşılayacak şekilde yerleştirilmelidir. Donatı bu derinlikten sonra moment diyagramındaki değerler gözönüne alınarak minimum donatı seviyesine indirilebilir.

3. Kazık başının başlık içine 75 mm den fazla gömülmesi halinde radye tabanında altta bulunan donatı kazık çevresinde dolandırılmalıdır. Bu önlem ayrılmayı önleyecektir.

4. Kazık radyesinin kalınlığı, gömülü kazık başlarının en üst seviyesinden itibaren en az 300 mm alınmak ve ayrıca 2. maddede önerilen pas payları eklenmek sureti ile saptanır.

5. Kazık radyesinin boyutları, ızgaradaki en dış kazıkların dış yüzlerinden itibaren en az 150 mm dışarıda olacak şekilde saptanmalıdır. Bu, tercihan 300 mm olabilir.

6. Çekmeye çalışması olası kazıklar için özel kesme kuvveti bağlantıları tasarlanmalıdır.

Bowles (1990), kazık başlarının hesaplanması için bir bilgisayar programı önermektedir. Bu program, geliştirilmeye açık olmasına karşın, ilginç görülmektedir.

### **7.6. Bir Grafik Yöntem**

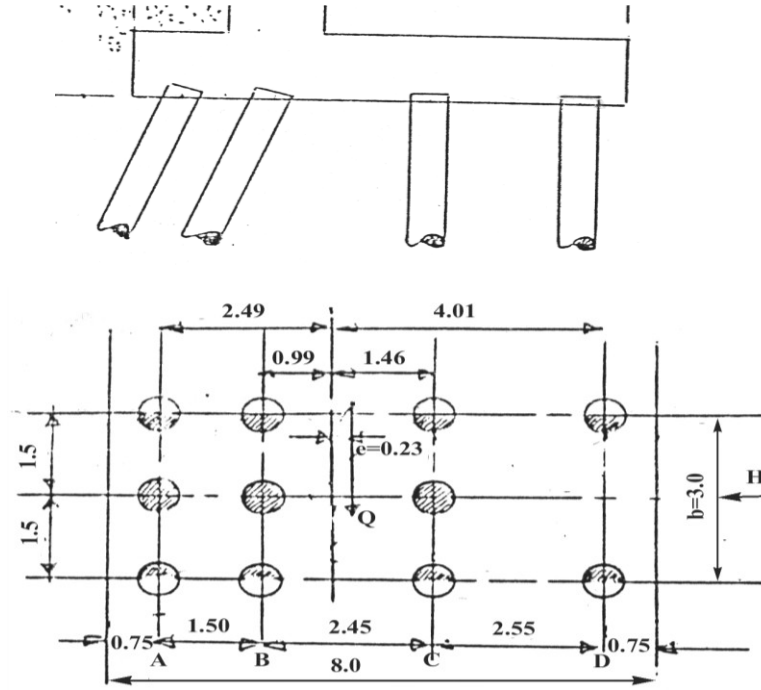
Bu paragrafta bir kazık grubunun gerek yük gerekse ötelenme miktarlarının grafik bir yöntemle saptanması ele alınmaktadır. Bu tür yöntemlerin tarih boyunca pek çok mühendislik yapısının tasarımı için kullanıldığını hatırlamak yararlı olacaktır. 1962-1963 döneminde ODTÜ de rahmetli Profesör İsmet Ordemir hoca'nın asistanı iken, aşağıda verilen örnek; öğrencilerin uygulama problemlerinden birisi idi.

#### **Örnek 7.10.**

Örnek, bir dayanım yapısından gelen yüklerin kazıklı bir temel sistemi ile zemine aktarılmasını konu almaktadır. Kazık ızgarasının geometrisi, başlığa uygulanan yükler ve diğer veriler Şekil Ö.7-1 de gösterilmiştir. Kazık ızgarasında A ve B sıralarında yatayda 1 düşeyde 3 eğimli kazıklar, C ve D sıralarında ise dik kazıklar vardır. Tüm uzunluklar metre cinsindedir. Kazıkların her biri 60 KN yatay yük taşıyabilmektedir ve düşey yükleme deneyi sonuçlarına göre 1000 KN eksenel yük altında 10 mm oturacakları saptanmıştır.

Temele üst yapıdan taşınan yükler şöyledir:

Yatay H Yüğü Izgaranın ağırlık merkezine  $3m \times 432 \text{ kN/m} = 1296 \text{ KN}$  (3 metre genişlik ile etkir), Q yükü ise ağırlık merkezinin sağında  $e=0.23 \text{ m}$  eksantrik olarak etkiyen  $1668 \text{ KN/m}$ .



Şekil Ö7-1. Kazık Izgarası ve Yükler

Kazıkların Eylemsizlik Momenti 3 metrelik bir genişlik üzerinden hesap yapılacağına göre A,B,C sıralarında 2 şer ve D sırasında 1 kazık olduğu hesaba alınarak aşağıdaki gibi bulunur:

$$2(2.49^2+0.99^2+1.46^2)+1 \times 4.01^2=34.7 \text{ kazık.m}^2 .$$

Kazık yükleri (7.8) denklemi ile:

$$Q = \frac{1668 \times 3}{7} \pm \frac{0.23 \times 1668 \times 3}{34.7} d$$

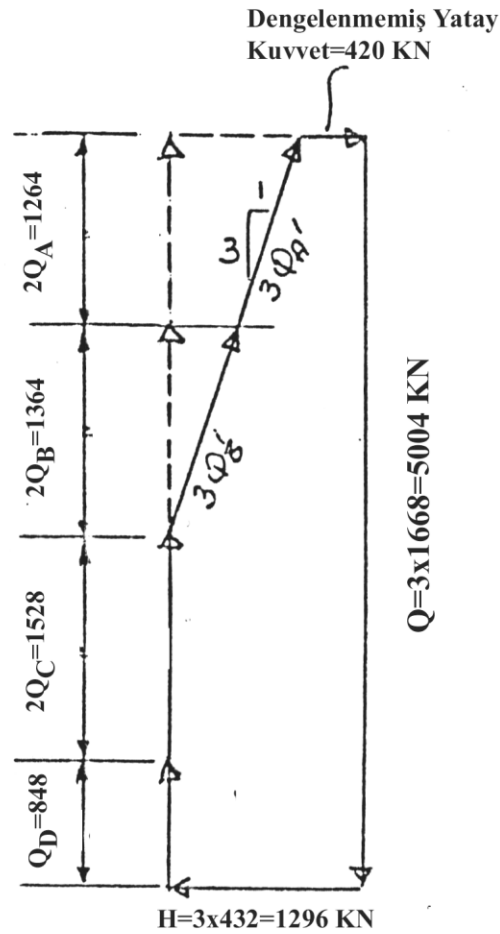
şeklinde gösterilebilir. Buradan  $Q_A=632; Q_B=682; Q_C=764; Q_D=848$  KN olarak bulunurlar. Eğik kazıkların taşıdığı aksenal yük  $1/3$  eğim için  $\sin(31.4^\circ)=0.95$  olduğuna göre:

$$Q'_A=632/0.95=665 \text{ kN ve } Q'_B=682/0.95=718 \text{ KN olur.}$$

Dengelenmemiş yatay yük şöyle bulunur:

Etkin olan 4 kazık vardır. Bunlar  $2 \times 631 = 1261$  kN ve  $2 \times 681 = 1362$  kN olmak üzere toplam 2623 kN yük taşırlar. Bu, 3.0 m lik cephede olmaktadır. Dolayısı ile 1.0 metrede taşınan yük  $= 1623/3 = 875$  kN/m olur. Etkiyen yük metrede 1296 kN/m dir. Eğik kazıkların alamadığı (dengelenmemiş) yük  $= 1296 - 875 = 421$  kN dur Diğer yandan her bir kazık 60 kN yanal yük taşıyabilmektedir. 7 adet etkin kazık için  $7 \times 60 = 240$  kN açık bu şekilde kapanmaktadır. Bu durumda sistemin dengede olduğu söylenir.

Bu hesaplar, uygun bir ölçek alınarak Şekil Ö.7.2 de gösterildiği gibi çizilen vektöriyel bir kuvvet poligonu üzerinde şu şekilde gösterilebilir:



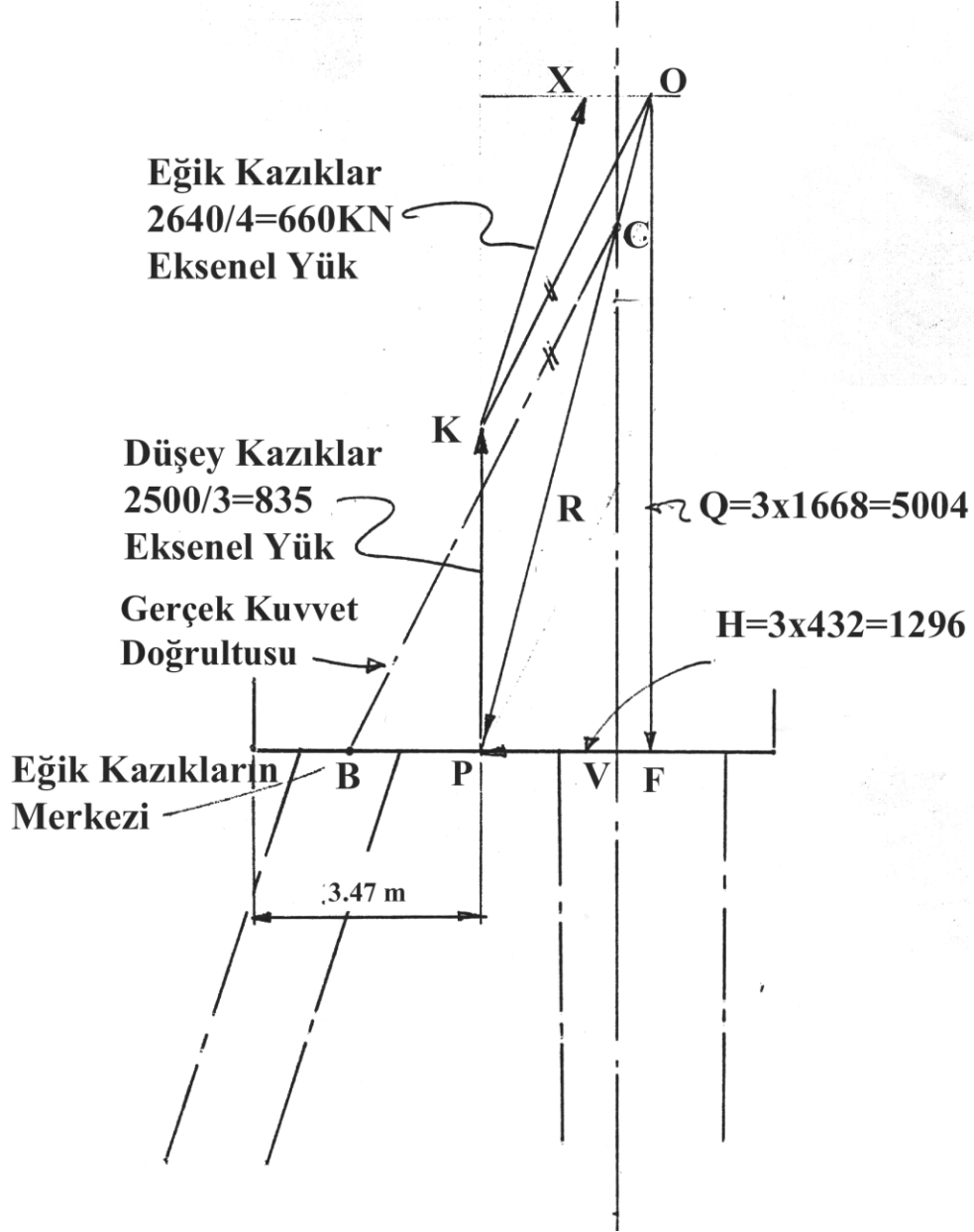
## Şekil Ö.7.2

Aynı hesaplar, bu kez ötelenme miktarları da bulunmak kaydı ile Culmann konstrüksiyonu adı verilen grafik yöntemle de yapılabilir:

Konstrüksiyon Şekil Ö.7.3 de görülmektedir. Bu işlem aşağıdaki adımlar izlenerek yapılır:

- a. Temelin yan görünüşü bir ölçeğe göre çizilir. Düşey ve yatay yüklerin hesabından sonra bu kuvvetler bir kuvvet ölçeğine uygun şekilde vektöriyel olarak gösterilir. Bunların bileşkesinin temeldeki uygulama noktası P noktasıdır.
- b. Şekilde Yükler OF, FP ve bileşke OP olarak görülmektedir.
- c. Eğik ve düşey kazıkların ağırlık merkezleri saptanır. Örneğin bu örnekte bu; eğik kazıklar için iki eğik kazığın ortası olan B noktası ( $2x0=0$ ), düşey kazıklar için ise  $1x2.55=2.55$ ;  $2.55/3= 0.85$  m olarak C aksından uzaklığı hesaplanan V noktasıdır.
- d. Düşey kazıkların ağırlık merkezi olan V noktasından çizilecek bir düşey ortak kuvvet bileşkesi vektörü, OP bileşke vektörünü C noktasında keser. Bu suretle C noktası ile eğik kazıkların ağırlık merkezi olan B noktasını birleştiren CB doğrusu, eğik kazıkların gerçek kuvvet doğrultusunu gösteren doğru olarak ortaya çıkar.
- e. Düşey reaksiyon vektörünün şiddeti bellidir, bu vektör P uygulama noktasından PK olarak düşey bir doğru şeklinde çizilir.
- f. Kuvvet polignunu kapatmak için eğik kazıkların karşıladığı kuvvetin yerini alması gerekir. Bu kuvvetin doğrultusu doğal olarak gerçek kuvvet eğimi BG ye paralel KX doğrusu olacaktır. Bu doğrultu O noktası

düzeyinde dengelenmemiş yatay kuvvet miktarını XO olarak gösterir. Tüm kuvvetler grafik çözümde kullanılan ölçeğe göre saptanabilir.



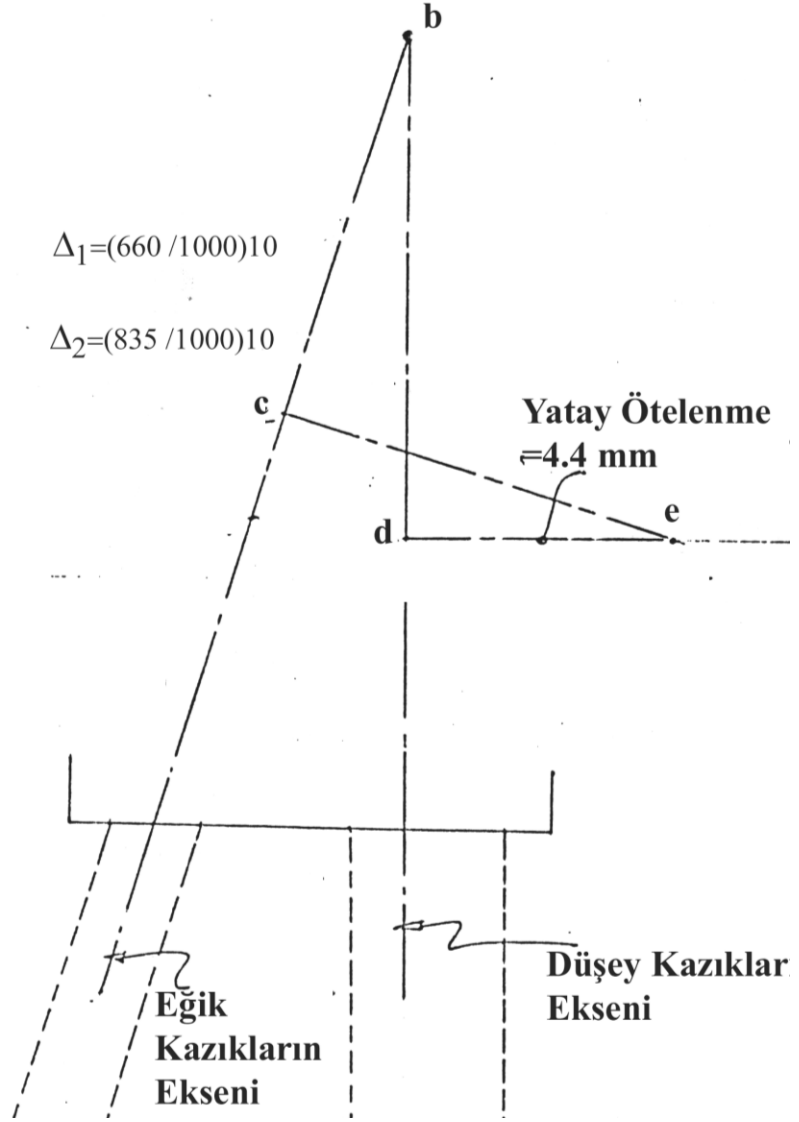
Şekil Ö.7.3

g. Şekil Ö. 7.4 sistemdeki hareketi göstermektedir. Bu grafik çizilirken hem kazıklı sistemin boyutları, hem ötelenme miktarları birer ölçek ile gösterilir. Örneğin boyutlar için  $1\text{cm}=100\text{ cm}$  ve hareket miktarları için  $0.1\text{ cm}= 1\text{ cm}$  gibi.

f. Kazıklar aksenal yükler altında aksenleri doğrultusunda otururlar. Yükleme deneyine göre 1000 KN aksenal yük altında 10 mm oturacakları bilinmekte olduğundan aksenal hareketler ( $\square\square\square 6.6$  ve  $8.35\text{ mm}$  olarak Şekilde de gösterildiği gibi hesaplanır ve kazıkların oturmaları doğrultusunda hareket vektörü olarak çizilir.

d. Diğer taraftan kazıklı sistem kinematik ilkelerine göre O noktasını pivot olarak hareket eder. Bu durumda eğik kazıklar OC e dik ve düşey kazıklar ise OD ye dik doğrultuda hareket ederler.

Bu hareketlerin yatay doğrultudaki bileşkesi DE dir. Ölçek kullanılarak yatay ötelenme saptanabilir. Örneğimizde  $4.4\text{ mm}$  olmuştur.



Şekil Ö. 7.4

## KISIM 8. KAZIK - RADYE SİSTEMLERİ

### 8.1. Genel

#### 8.1.1. Sistemin Açıklanması



Kitapta bu kısma kadar verilen bilgilerde ve yapılan analizlerde kazık başlığının zeminle etkileşmediği varsayılmaktadır. Kazık başlığı esas itibarı ile bir radyedir. Radye altındaki zeminin yumuşak kil veya gevşek kum olması halinde rötire veya oturma nedeni ile zeminin radye ile temasının kesilmesi olasıdır. Bu nedenle hesapların kazık-radye-zemin etkileşimi olmadığı varsayımı ile yapılması normal görülebilir. Diğer yandan radyenin zeminle etkin bir temas durumunda kalması halinde kazıklı temel; üstyapı yükünü zemine hem kazıklar hem de radye ile aktarır. Bu durum kazıklı temel-zemin etkileşmesine ve bu etkileşmeyi içeren tasarıma yeni bir yaklaşım getirilmesini öngörmektedir. Bu yaklaşım çerçevesinde temel sistemine genel bir adlandırma ile Kazık-Radye Sistemi denebilir.

Kazık-Radye sistemlerine gereksinim; çoğu kez temel zemininin taşıma gücünün üstyapı yükünü bir kazıksız radye temel ile taşıyabildiği, ancak oturma miktarlarının öngörülenlerin üstünde gerçekleştiği durumlarda ortaya çıkar. Bu durumlarda meydana gelen farklı oturmalar radyeyi zorlar. Bir kazık radye sistemi hem oturma miktarlarını azaltmak ve hem de radyedeki farklı oturmaları gidermek gibi iki belirli işlevi yerine getirir.

### 8.1.2. Yapım-Tasarım Önlemleri

Bu sistemin zeminle sağlıklı bir etkileşme içine girebilmesi için kazıklı temel uygun bir şekilde hazırlanmalıdır. Bunun gerçekleştirilebilmesi için önce yüzeydeki zemin 1-2 metre sıyrılır. Bu işlemden sonra temizlenmiş yüzeye kalınlığı 0.50 m ila 0.70 m arasında değişen kum-çakıl bir şilte sıkıştırılarak serilir. Kazıklar çakılır ve kazık başlarında gerekli filizler bırakılır. Bu şilte üzerine 0.15- 0.20 m lik bir tesviye betonu atılır. Radye-Kazık sisteminin başlığı bu tesviye betonunun

üstüne dökülür. Kazık başlarının üst kotunun, radyeye bağlanacağı kot gözönüne alınarak saptanması gerekir.

Basit bir şekilde yapılacak bir hesapla grupta gerekli kazık sayısı saptanmalı, bu kazıklar planda tasarlanan ızgara üzerine yerleştirilmeli ve Kazık-Radye hesapları bundan sonra yapılmalıdır. Bu hesap için (3.62) bağıntısının kullanılması uygun olur.

Diğer taraftan, kazık ızgarasının ve radyenin tasarımı sırasında üstyapı yüklerinin gözönünde tutularak radyede meydana gelebilecek eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin aşağıda verilen bilgilerden yararlanılarak en alt düzeye indirilmesi uygun olacaktır. Bu tasarım sırasında önemli olan hususlar şunlardır:

- a. Kazık-Radye beraber çalışsa dahi, 5. Kısımda anlatıldığı gibi rijid bir radye altındaki kazık gruplarında köşelerdeki kazıkların yüklerinin, ortalama kazık yükünün çok üstüne çıkabileceği göz önüne alınmalıdır.
- b. Diğer taraftan, radyenin esnek olması durumunda ise radye ortasının kenarlara oranla daha fazla oturacağı bu nedenle farklı oturmaların radyeyi zorlayacağı da hatırlanmalıdır.

Bu hususlar, radyenin boyutları ve mekanik özellikleri ile temel zemininin mekanik özelliklerini kapsayan ve Radye rijitliği denilen kavramla yakından ilişkilidir. Bu ilişkiler, aşağıda analitik olarak ortaya konacaktır.

## **8.2. Teori**

### **8.2.1. Hesap Yöntemi**

Kazık-Radye sistemlerinin hesabı, çeşitli yaklaşımlarla yapılabilmektedir. Bunlar arasında son zamanda Sonlu Elemanlar ve Sonlu Grid, Sonlu Elemanlar yaklaşımları ön almışlardır.

Bu Kısımda daha basit ve bununla beraber geçerliliği yerinde ölçümlerle büyük ölçüde gözlenmiş bir yaklaşıma yer verilecektir:

Salt kazıklı bir temelin yük-oturma ilişkisini kazıklı temel-zemin için bir yay katsayısı  $k_k$ , salt bir radyenin oturma ilişkisini de radye-zemin için bir yay katsayısı  $k_r$  kullanarak yazmak olasıdır. Diğer yandan kazık-radye sisteminde kazık çevresindeki gerilme nedeni ile radyede bir ek oturma, radye tabanındaki gerilme nedeni ile de kazıkta bir ek oturma görülecektir. Bu ek oturma miktarları da sırası ile bu iki yapı elemanı arasındaki  $\alpha_{rk}$  ve  $\alpha_{kr}$  etkileşim faktörleri kullanılarak gösterilebilirler. Bu mantığın bir sonucu olarak  $P_k$  toplam yükten kazığın aldığı yük olmak üzere kazığın kendi yükü altındaki oturmasını  $P_k/k_k$  ve  $P_r$  radyenin taşıdığı yük olmak üzere kazığın radyenin etkisi ile oturmasını ise  $\alpha_{kr}P_r/k_r$  olarak göstermek doğal olacaktır. Bu iki bileşenin toplamı ise kazığın toplam oturmasını gösteren denklemi verecektir. Aynı mantık, radyenin oturması için yürütülerek ikinci bir denklem yazılabilir. Bu durumda:

$w_k$  = Salt Kazıklı Temelin Oturması,

$w_r$  = Salt Radyenin Oturması,

$k_k$  ve  $k_r$  = Kazıklı Temelin ve Radyenin Yay (Rijitlik) Katsayıları,

$\alpha_{rk}$  ve  $\alpha_{kr}$  = Kazık-Radye Etkileşim Faktörleri,

$P_k$  = Toplam Yükten Kazıkların Aldığı Yük,

$P_r$  = Toplam Yükten Radyenin Aldığı Yük,

olmak üzere Kazık-Radye sisteminin etkileşimi bu iki denklemi kapsayan aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$\begin{Bmatrix} w_k \\ w_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_k & \alpha_{kr}/k_r \\ \alpha_{rk}/k_k & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_k \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (8.1)$$

Karşılıklılık teoremi uyarınca (8.1) ifadesinde ters diagonal üzerindeki terimlerin eşitliliği nedeni ile etkileşim faktörleri arasında:

$$\alpha_{kr} = \alpha_{rk} \frac{k_r}{k_k} \quad (8.2)$$

bağıntısı vardır. Bu yaklaşımda etkileşim faktörleri, gerek 2. Kısımda (2.12) denklemi ile gerekse 5. Kısımda niteliği açıklanmış olan ve (5.17) denkleminin çözümünü teşkil eden:

$$w = w_0 \begin{bmatrix} \ln \frac{r}{a} \\ 1 - \frac{a}{b} \\ \ln \frac{r}{a} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

bağıntısı kullanılarak saptanır. Bu işlem için kazık radyesi, her kazığın başına bağlı birer rijid disk gibi düşünülebilir. Bu durumda (5.19) denklemindeki kazık yarıçapı  $a$  kazık-radye sistemindeki gerçek kazık yarıçapı  $r_0$  ile, maksimum etkileşim mesafesi  $b$  ise,  $r_m$  sembolü ile gösterilir. Disk için alınacak olan etkileşim uzaklığı  $r$  ise her bir kazığa radye

alanından isabet eden alanın yarıçapı  $r_c$  dir. A kazık radyesinin alanı, n kazık sayısı ise  $r_c = \sqrt{\frac{A}{n\pi}}$  olarak hesaplanır.

Yukarıdaki anlatım sonucunda; Etkileşim Faktörlerinin aşağıdaki bağıntı ile ifade edileceği görülebilir:

$$\alpha_{pr} = 1 - \frac{\ln \frac{r_c}{r_0}}{\ln \frac{r_m}{r_0}} \quad (8.3)$$

(2.14) ifadesinde de görülen (8.3) ifadesindeki  $\ln(r_m/r_0)$ ;  $r_m$  teriminin bu terim için gözlenmiş olan değerlerin uyumlandığı bir eğriden elde edilen bağıntının konulması ile aşağıdaki şekilde temsil edilebileceği gösterilmiştir:

$$\ln \frac{r_m}{r_0} = \ln \frac{\{0.25 + (2.5A(1 - \nu_s) - 0.25B)\}L}{r_0} \quad (8.4)$$

Buradaki semboller aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

G = Zeminin Ortalama Kayma Modülü,

L=Kazık Uzunluğu,

A=G/G<sub>f</sub>=Kazık Çevresi Zemininin Ortalama Kayma Modülünün Kazık Tabanı Zemininin Kayma Modülüne Oranı,

$B=G_b/G_L$ =Kazık Tabanı Zemininin Kayma Modülünün bu Seviyenin Altında Yer Alabilecek bir sert Zeminin Kayma Modülüne Oranı, (uç kazıkları için).

Kazık-radye sistemlerinin davranışı özellikle yüzer kazıklı gruplar için önem taşır. Bu durumda  $B=1$  olur. Ayrıca pratik bir çözüm için zeminin kayma modülünün derinlikle değişmediği varsayımı ile  $A=1$  alınmasının sonuçlara büyük etki yapmadığı bilinmektedir. Bu şartlar altında (8.4) ifadesi:

$$\ln \frac{r_m}{r_0} = \ln \frac{2.5(1-\nu_s)L}{r_0}$$

şeklini alır ve:

$$r_m = 2.5(1-\nu_s)L \quad (8.5)$$

bulunur. Etkileşimin olacağı her noktada kazığın ve zeminin aynı oturmayı göstereceği düşüncesi ile  $w_k=w_r$  olacağı öngörülür ve (8.1) denkleminin (8.2) yerleştirilirse Radye-Kazık sisteminin global “yay katsayısı,  $k_{kr}$ ” için (8.6) denklemi elde edilir:

$$k_{kr} = \frac{k_k + (1-2\alpha_{kr})k_r}{1 - \alpha_{rk}^2 \frac{k_r}{k_k}} \quad (8.6)$$

Ayrıca sistemde kazıklar ile radyenin arasındaki yük dağılımını göstermek için aşağıdaki (8.7) denklemi de bulunur:

$$\frac{P_r}{P_p + P_k} = \frac{(1-\alpha_{rk})k_r}{k_k + (1-2\alpha_{kr})k_r} \quad (8.7)$$

$P_r$  = Radyenin Taşıdığı Yük

$P_k$  = Kazıkların Taşıdığı Yük

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan kazık grubu yay katsayısı  $k_r$ , kazık grubunun oturmasının 5. Kısımda anlatılmış olan yollarla bulunması ve grup yüküne bölünmesi ile hesaplanır. Radyenin yay katsayısı  $k_r$  ise planda eni B boyu L olan dikdörtgen bir radye için :

$$k_{r1} = \frac{G}{(1-\nu_s)} \beta \sqrt{BL\eta} \quad (8.8)$$

dairesel radye için ise yatak modülü:

$$k_{r2} = \frac{2.5G}{(1-\nu_s)d_e} \eta \quad (8.9)$$

şeklinde hesaplanabilir.  $\frac{2Gd}{1-\nu_s}$  ile tanımlanan yay katsayısı ile eşdeğerdir.

Burada  $\eta$  bir derinlik tesir faktörüdür ve radyenin oturduğu derinlik h olmak üzere:

$$\eta = 1 + 1.2(1-\nu) \frac{h}{d} \quad (8.10)$$

denklemleri ile hesaplanır. Dikdörtgen bir radye için (8.9) bağıntısında  $d_e = 2(BL/\square)^{0.5}$  olarak da alınabilir.  $\square$  ise kare bir radye için 1.0; boy/en oranı 10 olan bir radye için ise 1.4 değeri arasında yaklaşık olarak boy/en oranı ile doğrusal şekilde değişir.  $A = n\pi r_c^2$  eşitliği ile hesaplanan kazık başına düşen alan payının yarı çapı  $r_c$  kullanılarak yapılan hesap sonucunda  $r_c/r_o \leq 4$  bulunursa bu küçük bir radyeye işaret eder. Küçük bir radye toplam yükün büyük bir kısmını taşısa dahi global temel yay katsayısı üzerinde büyük bir etki yapmaz.

(8.9) ifadesinde görülen  $d_e$ ; radyenin esneklik çapıdır. Radye-Zemin etkileşmesi sırasında, radyenin eşdeğer çapını ( $d_e$ ) gösterir. Bu nedenle ki, radyenin yay katsayısı bulunurken bu eşdeğer çapın kullanılması gerekir.

Bu çap aşağıdaki bağıntı ile gösterilir:

$$d_e = \frac{2t}{\pi} \sqrt[3]{\frac{E_r}{E_s}} \quad (8.11)$$

Burada:

$t$  = Radye Kalınlığı,

$E_r$  = Radyenin Elastik Modülü,

$E_s$  = Zeminin Elastik Modülüdür.

Bu yaklaşım uyarınca bu çapın, radye çapından daha küçük olması halinde radye esnek, büyük olması halinde ise rijid sayılır.

Radyenin eğilme momenti  $D$ , aşağıdaki ifade ile bulunur:



$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu_s^2)} \quad (8.12)$$

Bu bağıntı kullanılarak bulunan değer, aşağıdaki ifadede yerine konularak radyenin elastik uzunluğu  $\beta$  saptanır:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{D}{k_r}} \quad (8.13)$$

Bu yaklaşımın bir savına göre  $\beta$  değerinin beş katından daha uzak mesafelerde, radye üzerinde bulunan yükler arasında etkileşim olmayacaktır.

Radye için yay katsayısı değeri Brown (1969,1975) tarafından verilen ve radye merkezi altındaki oturma ile merkez-kenar altındaki farklı oturmaya içeren denklemler yardımı ile ortalama oturmaya hesaplayarak toplam yükü bu miktara bölmek sureti ile de bulunabilir. Temel mühendisliği kitaplarında geleneksel olarak yer alan bu ifadeler burada verilmemiştir.

Diğer taraftan, radyede oluşacak hareketler radye-zemin etkileşmesi sonucunda meydana geldiğinden radye ile zeminin görelî niteliklerini yansıtacak bir “görelî rijitlik” Brown (1969,1975) tarafından önerilen ifadeler yardımı ile bulunur:

Dairesel radyeler için görelî rijitlik:

$$k_{rr} = \frac{2(1 + \nu_r)E_r}{G_s} \left(\frac{t}{a}\right)^3 \quad (8.14)$$

ve dikdörtgen radyeler için görelî rijitlik:

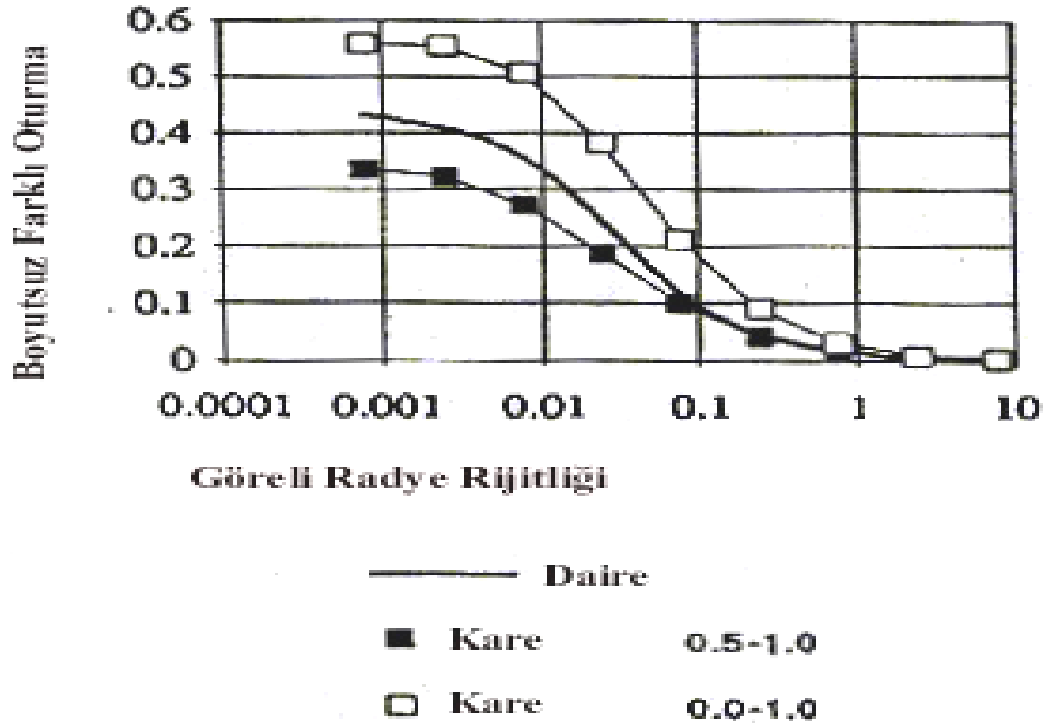
$$k_{rd} = \frac{2(1 + \nu_r)E_r}{G_s} \frac{4}{3} \frac{B}{L} \left(\frac{t}{a}\right)^3 \quad (8.15)$$

bağıntıları ile verilir. Burada  $t$  radye kalınlığı,  $L$  ile  $B$  ( $L > B$ ) dikdörtgen bir radyenin uzunluk ve genişliği,  $a$  dairesel bir radye için yarıçap, kare veya dikdörtgen bir radye için ise alanı bu tabanın alanına eşit olan bir dairenin yarıçapıdır.  $E_r$  ve  $G_s$  radye ve zeminin elastiklik ve kayma modülleri,  $\nu_r$  ise radyenin poisson oranıdır. Brown'ın bu çalışmasının sonuçları  $K_{rd} \leq 0.08$  in altında olması halinde radyenin esnek,  $K_{rd} \geq 5.0$  olması halinde ise rijid sayılabileceğini göstermektedir. Aradaki değerler esneğe yakın rijid veya rijide yakın esnek durumlardır.

Bilindiği gibi tamamen esnek olan bir radye tabanında oturma profili, radye merkezinde maksimum olup kenarlara doğru azalan bir çanak şeklini andırır. Tamamen rijid olan bir radye tabanındaki oturma miktarları ise eşittir. Birinci durumda taban basıncı üniform, ikinci halde ise kenarlarda teorik olarak sonsuz değere ulaşan ve merkeze doğru rijidlikle değişen bir profil gösterir.

Bu durum, Brown (1969,1975) tarafında verilen Şekil 8.1 de kare ve dairesel radyeler altındaki farklı oturma miktarlarını (boyutsuz şekilde gösterebilmek amacı ile) radye ortasındaki oturma miktarına oranlayarak yukarıdaki denklemler ile hesaplanan görelî radye rijitliklerinin fonksiyonu

olarak gösterilmektedir. gösterimde 0.5-1.0 ile tanımlanan eğri; kare şeklindeki bir radye için verilmiştir. Bu radyenin simetri ekseninden itibaren radye genişliğinin  $\frac{1}{4}$  mesafesindeki boyutsuz oturma miktarı ile radye kenarındaki boyutsuz oturma miktarının farkını; 0.0-1.0 ile tanımlanan eğri ise radye merkezinin boyutsuz oturma miktarı ile radye kenarının boyutsuz oturma miktarı arasındaki farkı vermektedir. Dairesel radye için ise yalnızca merkez ve çevre arasındaki boyutsuz oturma farkları verilmektedir. Burada radye merkezinin oturması ve farklı oturmalar, Brown tarafından önerilmiş olan yarı sonsuz elastik ortam içindeki oturma miktarlarını belirleyen denklemler uyarınca hesaplanmıştır. Yukarıda açıklandığı gibi bu hesaplar yapılırken kare şeklindeki radyelerin eşdeğer yarıçapı; radye tabanının alanına eşit alanı içeren bir dairenin yarıçapıdır. Bu durum iki görelî rijitlik arasında  $k_{rr}=13.1 k_{rd}$  ilişkisini geçerli kılar.



Şekil 8.1. Görelî Rijitlik

Diğer taraftan Randolph ve Clancy (1993) araştırmaları sonucunda elde ettikleri bazı sonuçları kazık gruplarını aşağıdaki bağıntıya göre sınıflandırarak açıklamaktadırlar:

$$R = \sqrt{\frac{ns}{L}} \quad (8.16)$$

Burada  $n$  gruptaki kazık sayısı,  $s$  kazık aralığı,  $L$  kazık boyudur. Araştırmacılar tarafından, pek çok sayıda kare şeklindeki kazık grubunun incelenmesi ile Göreli Rijitliği 0.01 ve daha az olan ve “esnek” durum gösteren kare radyelere bağlı kazık sistemlerinde (bu durumda kazık yüklerinin eşit olduğunu hatırlayalım), boyutsuz farklı oturma miktarlarının  $R$  nin bir fonksiyonu olarak  $0 < R < 4$  değerleri arasında 0 değerinden itibaren doğrusal bir artış gösterdiği ve  $R=4$  değerinden itibaren ise Şekil 8.1. de gösterilen sınırlara ulaştığı saptanmıştır. Bu durumda boyutsuz farklı oturma  $\Delta w/w$  bir ilk yaklaşım olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\frac{\Delta w}{w} = f \frac{R}{4} \quad R < 4$$

ve

(8.17)

$$\frac{\Delta w}{w} = f \quad R > 4$$

Burada  $\square$  w boyutsuz farklı oturma, w merkezdeki oturma olup, f ise Şekil 8.1 uyarınca radye merkezinden kenara olan yarı mesafe için 0.3 ve merkezden kenara olan mesafe için ise 0.5 olmaktadır. Benzer hesap, planda kare olan radyeler için de geçerli olur.

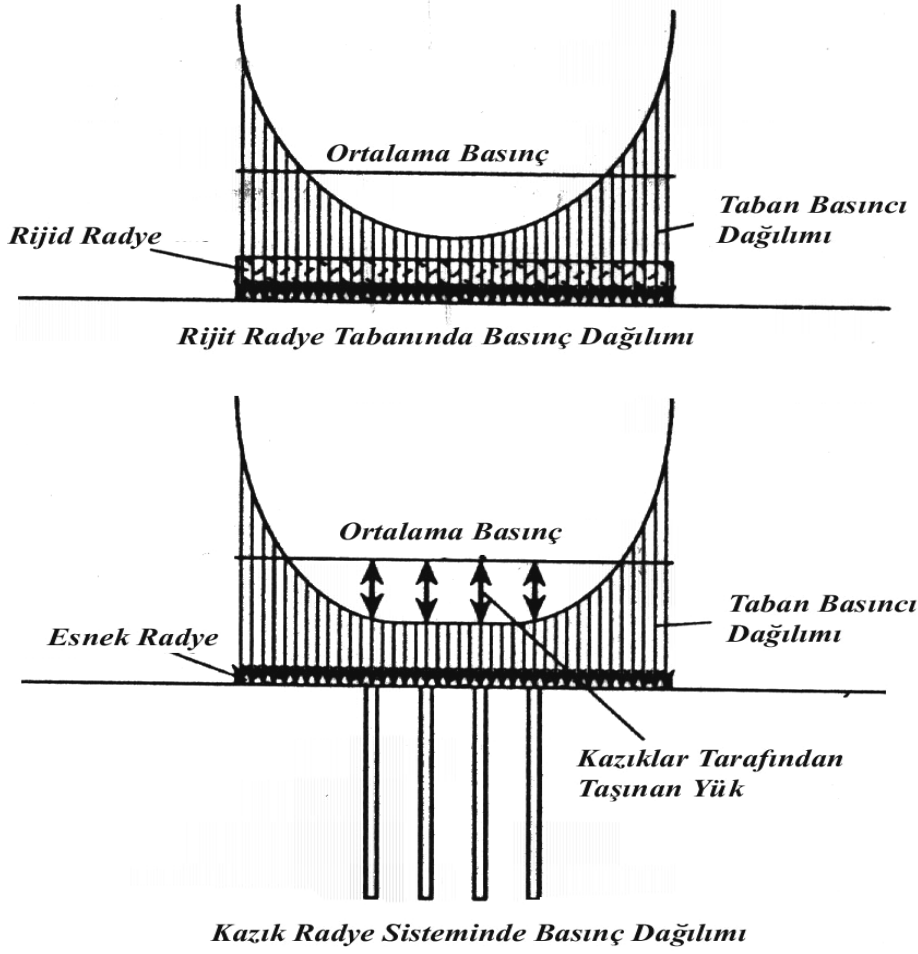
Orta değerlerdeki görelî rijitlik değerleri için ise aynen bir radyede olduğu gibi farklı oturmalar azalacaktır. Randolph ve Clancy(1993) bu tür grupların aynen kazıksız radyeler gibi ele alınmasını önermektedirler: Öneriye göre bu hallerde görelî farklı oturmalar Şekil 8.1 ile saptanabilir ve sonra  $k_r/k_{kr}$  oranı ile düzeltilerek gerçeğe yaklaştırılabilirler.

### 8.2.2. Gözlemler ve Öneriler

Genelde Radye-Kazık sistemlerinin, taşıma gücü nisbeten yüksek olan zeminlerde uygulandığı yukarıda belirtilmişti. (8.14) ve (8.15) denklemlerinden kolayca hesaplanabileceği gibi pratikte kullanılan radye kalınlıkları ve genişlikleri için (örneğin 0.70 m ve 25 m gibi) fevkalade sert olmayan zeminlerde radyeyi rijit kılar. Bu durumda farklı oturmalar önlenmekle beraber kenar kazıklar aşırı yüklenebilecektir. Bu yüklenmenin, ortalama değer 3 misli veya daha fazla olabileceği Kısım 5. deki anlatıma başvurulabilir. Diğer taraftan, çok geniş kazık-radye sistemlerinde ise esneklik sağlanabilecek ve kazıklar eşit yük alabilecek, ancak farklı oturmalar artarak radyeyi zorlayacaktır. Bu durumlar kazık-radye sistemlerinin tasarımında aşağıda açıklanan bir yaklaşımın faydalı olabileceğini göstermektedir:

Şekil 8.2. de verilen iki ayrı şekil ile iki değişik temel sisteminde taban basıncı dağılımı gösterilmektedir. Rijit bir radye altında radye kenarlarına yaklaşıldıkça ortalama basıncın çok üstünde değerlere erişilmektedir. Bu gösterime paralel olarak yukarıdaki şekilde rijit bir radyenin tabanında oluşabilecek basınç dağılımı da gösterilmiştir. Aynı şekilde esnek bir

radyenin altında ise ortalama basınca eşit dağılan uniform bir taban basıncı oluşması söz konusudur. Bu durumda rijit bir kazık-radye sistemi için bir önceki paragrafta açıklanan sakıncaları giderebilmek amacı ile kazıkları; alacakları yük miktarını güvenlik sayılarını 1.0 değerinin az üstünde olacak şekilde tasarlayarak radyenin orta kısımlarına yerleştirmek uygun bir yaklaşım olacaktır. Bu durumda rijit radyenin taban basınç dağılımı; bir esnek radyenin taban basınç dağılımına yaklaşır, farklı oturmalar da azaltılabilir. Bu tasarım (8.7) bağıntısı kullanılarak birkaç deneme yanılma ile son aşamasına kadar tasarlanabilir.



Şekil 8.2. Basınç Dağılımı ve Tasarım Yaklaşımı

### 8.2.3. Örnek 8.1

Yukarıdaki hususları açıklamak amacı ile aşağıdaki örnek verilmektedir: Bu örnekte bir silonun kazıklı temel sistemi söz konusudur. Silo, 15.5 metre çapındadır. Kazıklar, aynı ortalama çapta olduğu kabul edilebilecek 50 cm kalınlığında bir sekizgen betonarme radye üzerine yerleştirilmişlerdir. Bu sekizgen radye başlık doğal zeminin 1 metre sıyrılmasından sonra sıkıştırılarak yerleştirilmiş olan 20 cm. stabilize malzeme üstüne atılan 10 cm. kalınlığında bir grobeton üzerine

dökülmüştür. Sekizgen radye başlığının üzerine ise 35 santim kalınlığında bir silo temeli atılmış ve silo bu bileşik temel üzerine dökülmüştür. Kazıklar 22.5 metre uzunlukta ve 45 cm çapındadır. Yeraltı suyu düzeyi çok düşük olup hesaba alınmasına gerek yoktur. Şartname 25 mm oturma sınırını öngörmektedir.

Radye ve zeminin özellikleri aşağıdaki gibidir:

Zeminin Elastik Modülü:  $E_s=16250 \text{ KN/m}^2$

Zeminin Poisson Oranı:  $\nu_s=0.4$

Zeminin Kayma Modülü:  $G=6015 \text{ KN/m}^2$

Zeminin Drenajsız Direnci:  $c_u= 60 \text{ KN/m}^2$

Radyenin ve Kazığın Elastiklik Modülü:  $E_r=24 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$

Radyenin Poisson Oranı:  $\nu_r= 0.5$

Toplam Yük:  $Q=23800 \text{ KN}$

Yayıllı Yük:  $q=126.1 \text{ KN/m}^2$

Tek Kazığın Nihai Taşıma gücü:  $Q_{top}=790 \text{ KN}$

Bu sistem, değişik kazık sayıları ile tasarlanmış kazıklar için aşağıda irdelenmektedir:

$n=74$  Kazıklı bir Sistem Düşünülürse:

1. Yukarıdaki verilerden

$K= 1333$  ;  $s/d= 4$ ;  $l/d = 50$ ;

Tek Kazığın Taşıdığı Ortalama Yük= $23800/74=312.3 \text{ KN}$

Kazığın Güvenlik Katsayısı=  $790/312.3=2.46$

2. Yalnız Radyenin Taşıma Gücü



$$q_a = cN_c = 5.7 \cdot c_u = 5.7 \times 60 = 342 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Radyede Yayılı yük} = q = Q/A = 126.1 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Radyenin Güvenlik Katsayısı: } q_n/q = 342/126.1 = 2.7$$

Bu durum, bir radyenin yalnız başına siloyu taşıyabileceğini ve taşıma gücü açısından kazıklı temele gereksinme olmadığını göstermektedir.

### 3. Yalnız Radyenin Rijitliği:

Radyenin elastik çapı (8.11) ile 14.5 m. olmaktadır. Bu değer radye çapına yakın, ancak küçüktür ve radyenin rijide yakın ancak esnek olduğunu gösterir. (8.9) denklemi ile ve yukarıdaki çap kullanılarak  $k_{r2} = 1728.5 \text{ KN/m}^3$  bulunur.

(8.14) kullanılarak yapılan hesap da görelî rijitlik için 0.29 değerini vermektedir. Bu sonuç da varılan yargıyı destekler.

Bu görelî rijitlik değeri ile Şekil 8.1 e başvurulduğunda görülebildiği kadarı ile farklı oturmanın %2 civarında olabileceği anlaşılmaktadır. Brown (1969,1975) tarafından önerilen denklemler aracılığı ile yapılan hesaplar, oturmanın merkezde 95 mm ve farklı oturmanın ise 17.6 mm olacağını göstermiştir. Bu durumda ortalama oturma 86.2 mm olmaktadır. Kenarda ise oturma 77.4 mm olacaktır. Toplam yük ortalama oturmaya bölünürse  $k_{r2} = 1463 \text{ KN/m}^3$  bulunur.

### 4. Yalnız Radyenin Elastik Oturması

Bu hesap için yukarıda bulunan iki ayrı  $k_{r2}$  değeri arasında bir seçim yapılması gerekir. Temelde silo temeli ile kazık radyesi başlığının varlığı daha rijid bir yayın seçimini uygun göstermektedir. Bu nedenle  $k_{r2} = 1728.5 \text{ KN/m}^3$  değeri kullanılacaktır:

$$\square_r = 126.1/1728.5 = 0.073 \text{ m} = 73 \text{ mm} > 25 \text{ mm.}$$

Bu oturma değerinin Brown (1969,1975) tarafından önerilen denklemler aracılığı ile yapılan hesaplar sonucunda elde edilen değerden daha küçük olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Bu durumda oturma kontrolü için kazık gerekir.

Bu nedenle kazık-radye sistemi denenecektir.

5. Salt Radyenin Yay Katsayısı:

$$k_r = 23800/73 = 326 \text{ KN/mm}$$

6. Gruptaki Tek Kazığın ve Kazık Grubunun Oturması ve Salt Kazık Grubunun Yay Katsayısı:

$l/d = 50$  olan 74 Kazıklı sistemde tek kazığın oturması için:

$$\rho_i = \frac{Q_i I}{E_s d} \text{ denklemini kullanılırsa (5.8) ile:}$$

$$I = I_o R_k R_v R_b = 0.04 \times 1.05 \times 0.96 \times 1.0 = 0.04$$

$$Q_i = 23800/74 = 321.6 \text{ KN}$$

$$\rho_i = \frac{Q_i I}{E_s d} = \frac{321.6 \times 0.04}{18000 \times 0.45} = 1.6 \text{ mm olarak saptanır.}$$

Kazık Grubunun Oturması  $s/d = 4$  ve  $K = 1333$  için Tablo 5.2 ve (5.16) bağıntısı kullanılarak:

$$R_s = (6.64 - 5.11)(\sqrt{74 - 5}) + 6.64 = 12$$

$$\square_G = 12 \times 1.6 = 19.2 < 25 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Buradan görüldüğüne göre 74 kazıklı bir salt kazıklı temel oturma miktarlarını istenilen oturma düzeyinin altına çekmiştir. Ancak bu sayıda kazık ekonomik bir çözüm müdür ve kazık sayısı kazık-radye sisteminin araştırılması ile azaltılabilir mi? sorusunun yanıtlanması gerektiğinden hesaplara bu yönde devam edilecektir.

Salt Kazıklı Temel sistemi için yay katsayısı:

$$k_k=23800/19.2=1239 \text{ KN/mm olmaktadır.}$$

7. Kazık-Radye Sistemi:

Kazık-Radye Sisteminde her bir kazığa düşen kazık başlığı yarı çapı (rijid disk alanı)

$$r_c = \sqrt{\frac{A}{n\pi}} = \sqrt{\frac{188.7}{74 \times \pi}} = 0.90 \text{ m}$$

şeklinde hesaplanır. Maksimum etki uzaklığı (8.5) ile 33.7 m olarak bulunur.

Bundan sonra (8.3) kullanılarak etkileşim katsayısı  $\square_{pr} = 0.723$  ; (8.6) kullanılarak kazık radye rijidliği  $k_{kr} = 1275 \text{ KN/mm}$  bulunur.

Buradan kazık-radye sisteminin oturma miktarı:

$$\square_{kr} = 23800/1275 = 18.7 \text{ mm} < 25 \text{ mm hesaplanır.}$$

Kazıklar ile radye arasındaki yük paylaşımı ise (8.7) bağıntısı kullanılarak:

Kazıkların toplam yükün %92.2 ve radyenin ise % 7.8 ini aldıkları bulunur.

Bu durumda tek kazığın aldığı yük  $Q_1 = 0.922 \times 23800/74 = 296.5 \text{ KN}$ ;

Güvenlik Sayısı =  $790/296.5 = 2.66$  olur.

Görüldüğü gibi bu durumda oturma salt kazıklı temel durumuna göre bir miktar azalmıştır.

Kazıkların taşıma güçlerinin %37.5 kadarını kullandıkları görülmektedir.

8. Bir Kazık-Radye Sisteminde Kazık sayısı azaltılarak, bu kullanım artırılabilir; bu suretle yükün bir miktarı daha radyeye aktarılmış olur ve sistemde ekonomi sağlanır. Bu durumu araştırmak için kazık uzunluğu ve

çapını değiştirmeksizin kazık sayısını %30 azaltarak 52 kazıklı bir kazık radye sistemini irdeleyebiliriz:

Bu kazıklar ızgaraya, merkeze daha fazla yaklaştırılmak üzere  $s/d=4$  aralığını koruyarak kolayca yerleştirilebilir:

Yukarıdaki hesaplar, yalnızca kazık sayısı değiştiğinden kolayca tekrarlanabilir.

Bu tekrarlama ile aşağıdaki sonuçlara varılır:

$$\sigma_i = 2.26 \text{ mm}$$

$$R_s = 10; \sigma_G = 22.6 \text{ mm}$$

$$k_k = 1053 \text{ KN/mm}$$

$$r_c = 1.074 \text{ m}$$

$$\sigma_{kr} = 0.687$$

$$k_{kr} = 1090 \text{ KN/mm}$$

$$\sigma_{kr} = 21.8 \text{ mm} < 25 \text{ mm}$$

Yük Paylaşımı:

Kazıklar Toplam Yüğü % 11.1 ve Radye %88.8 oranında paylaşmaktadırlar.

Bu durumda tek kazığın aldığı yük  $Q_i = 406.8 \text{ KN}$

Kazık için güvenlik sayısı = 1.94 ve kazık taşıma gücünün %51 kadarını kullanmaktadır.

Bu durumda, oturma miktarı artmakla beraber şartname sınırının altındadır. Kazık güvenliği yeterlidir. Ancak bu yeterlilik, toplam yükün kazıklara eşit dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Oysa radye rijid olduğundan kenar kazıkların alacağı yük ortalamanın üstünde olabilecektir. Bu durumda

kazıkları Şekil 8.2 de gösterildiği gibi ızgara merkezine yakın şekilde yerleştirerek yük dağılımını olabildiğince eşitlemek uygun olacaktır.

9. Tasarım sırasında kazık sayısını azaltırken kısa bir hesapla durumu irdelenmek için aşağıdaki yol izlenebilir:

$n=74$  kazık ile grup kazıkları taşıma güçlerinin %37 sine kadar yüklenmekte idiler.

$n=52$  kazık için bu kabaca  $0.37 \times 74 / 52 = 0.53$  varsayılabilir.

Bu durumda toplam yükün kazıklar tarafından taşınacak miktarı :

$P_k = 0.53 \times 790 \times 52 = 21772$  KN ve radye tarafından taşınacak miktarı :

$P_r = 23800 - 21772 = 2028$  KN olur.

Radyenin oturması:

$\square_r = 2028 / 326 = 6.32$  mm bulunur.

Kazıklar için ise çevre sürtünmesinin 0.01 d kadar bir oturma sonucunda tükeneceği ve taşıma gücünün % 53 ünün kullanıldığı kabulü ile ve  $\square_{kr}$  için gerekli hesap yapılarak:

$\square_{\square} = R_s \times 0.01 d \times 0.53 \times \square_{kr} = 10 \times 0.1 \times 450 \times 0.53 \times 0.687 = 16.4$  mm elde edilir.

Buradan toplam oturma:

$\square_{kr} = 16.4 + 6.32 = 22.6$  mm bulunur. Bu değer yukarıdaki kesin hesap ile bulunan 21.8 mm ye yakın olduğu görülebilir. Aynı hesapların  $n=40$  kazık için yapılması bir ekzersiz olarak okuyucuya bırakılmıştır. Ancak, bu hali de kapsayan çözümlerin sonuçları aşağıda Tablo 8.1 de yansıtılmaktadır:

Tablo 8.1 Kazık-Radye Sistemi Hesap Sonuçları

| Temel Şekli            | Oturma (mm) | Taşıma Gücü/Yük (%) |
|------------------------|-------------|---------------------|
| Salt Radye             | 73          | -                   |
| 74 Kazıklı Temel       | 19.2        | 40.7                |
| 74 Kazıklı Kazık-Radye | 18.7        | 37.5                |
| 52 Kazıklı Temel       | 22.6        | 57.9                |
| 52 Kazıklı Kazık-Radre | 21.8        | 51                  |
| 40 Kazıklı Temel       | 23.6        | 75.7                |
| 40 Kazıklı Kazık-Radye | 22.6        | 66                  |

Kazık Raduye sisteminde, radyenin görelî rijitliğinin hesabı sonucunda rijid bir radye ile karşılaşıldığında kazıkların;ızgara merkezine yakın yerleştirilseler dahi taşıma güçlerinin %50 sini geçmeyecek şekilde tasarlanmaları uygundur. Bu nedenle yukarıda 52 kazıklı bir sistemin uygun olacağı söylenebilir.

## **KISIM 9. BİLGİSAYARLA ÇÖZÜMLERİN DAYANAKLARI**

### **9.1.Genel Yaklaşım**

Kazık gruplarının yalnızca düşey yük, yanal yük veya moment etkisinde olmadıkları, bu faktörlerin tümünün bir kombinasyon içinde

kazık radyesi üzerinde etkiğiği bilinmektedir. Bu durumda ortaya çıkan problemin çözümü için bu kısımaya kadar anlatılmış olan temel kavramları esas alan, ayrıca karmaşık denklemlerin çözümünün gerçekleştiren çeşitli nümerik analiz yöntemlerine dayanan ve bilgisayarların kullanımını gerektiren programlar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bazı çözüm yaklaşımlarının matematiksel dayanakları esasen Kısım 2. de açıklanmış idi. Ancak bilgisayarı ve çözüm için kullandığı programı bir “kara kutu” olarak görmek ve programlamanın dayandığı temelleri bilmemek, mühendislik mantığı açısından doğru olmadığı gibi çoğu kez yanlış, eksik ya da çok tutucu çözümleri beraberinde getirir. Mühendislik özümünde “Kara Kutu” lardan elde edilen sonuçların basit yöntemler kullanılarak elde edilen bulgularla karşılaştırılarak sonuçların mantık ölçülerine en azından mertebe açısından uygun olup olmadığı irdelenir.

Bu nedendir ki Kısım 2. de kapsanamayan ve özellikle sıkça okunan kitaplarda rastlanan bazı çözümlerin dayandığı mantık kavramlarının genel hatları ile bilinmesinde yarar görölmektedir. Bu Kısım bu konuda bilgiler içermektedir.

## **9.2. Bilgisayar Programlarının Dayanakları**

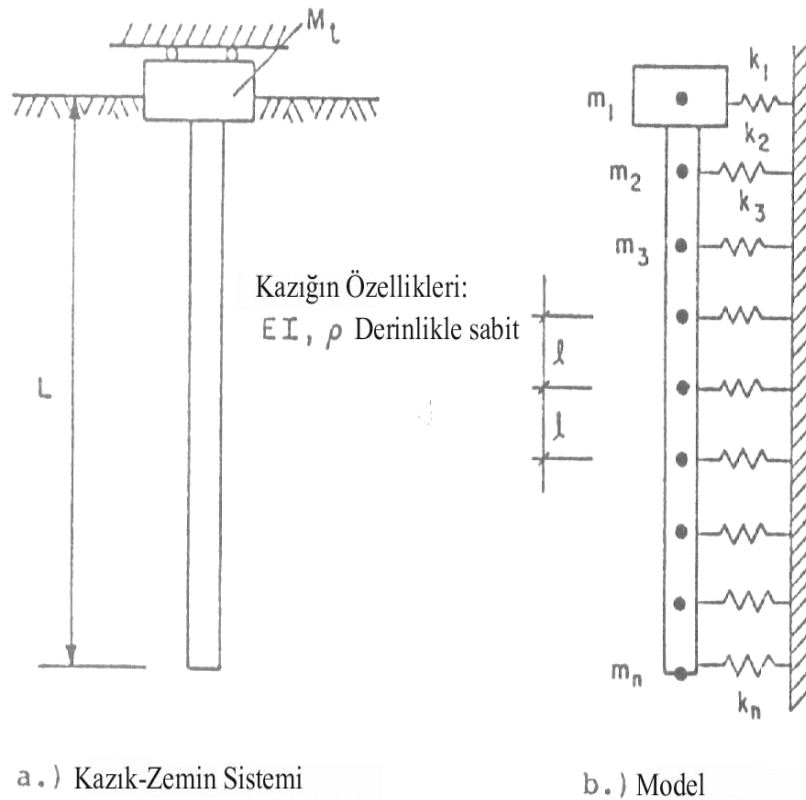
### **9.2.1. Tek Kazık özümünde Nümerik Metodlar**

Teorik pek çok özüm, Kısım 6 da anlatılmış olduğundan aşağıda kısa olarak çözümlemeye bilgisayar programları aracılığı ile yönelen bazı nümerik metotların dayanakları gözden geçirilecektir. Bu anlamda bazı teorik yaklaşımlar, Kısım 2 de anahatları ile gözden geçirilmişlerdir.

Kazıkların çözümünde kullanılan nümerik yöntemler, genellikle kazığı parçalara (elemanlara) bölerek parça uçlarındaki kesme kuvveti, moment,

ötenme ve dönme gibi özellikleri, kazık parçasını çevreleyen zemin ile etkileştirdikten sonra denge denklemleri ve süreklilik ilkeleri doğrultusunda formülleştiren yaklaşımlardır.

Örneğin Şekil 9.1 böyle bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu şekilde  $L$  boyundaki kazık  $l$  uzunluğundaki parçalara bölünmüştür. Zemin her parça için yaylarla temsil edilmektedir. Burada yatak katsayıları, Kısım 6.3 de anlatılan ve (6.27) ifadesi ile genel şekli gösterilmiş olan fonksiyonlar ile tanımlanabilirler. Denklemler, değişik nümerik analiz yöntemleri ile yazılabilirler. Kısım 6 da sonuçları verilmiş olan Matlock-Reese çözümleri bu tür bir modelleme ile ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözüme ulaşmıştır. Diğer bir yaklaşım örneğinde  $v, \theta, M, V$  sıra ile ötenme,



Şekil 9.1. İdealize Edilmiş Kazık- Zemin Sistemi



dönme, moment ve kesme kuvvetini gösteriyor ise aşağıda yazılan Transfer Matrisi çözümde kullanılabilir:

$$\begin{Bmatrix} v \\ \theta \\ M \\ V \end{Bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} 1 & l & \frac{l^2}{2EI} & \frac{l^3}{6EI} \\ 0 & 1 & \frac{l_i}{EI} & \frac{l_i^2}{2EI} \\ 0 & 0 & 1 & l \\ -k & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ \theta \\ M \\ V \end{Bmatrix}_i \quad (9.1)$$

Bu matris, kısa bir yazılımla aşağıdaki gibi gösterilebilir:

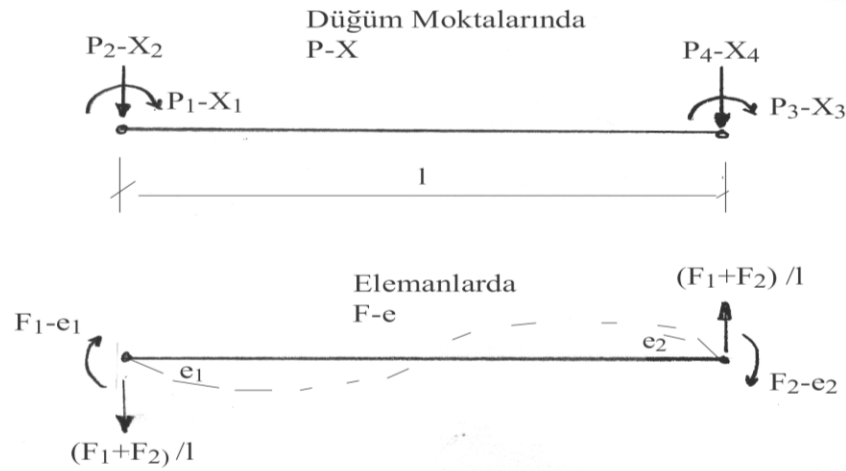
$$\{X_{i+1}\} = T_i \{X_i\} \quad (9.2)$$

Transfer matrislerinin kazık boyunca elemanlarda tekrarlı olarak kullanılması ile kazık ucundaki sınır şartlarına iterasyonla uyum sağlanarak çözüme varılabilir. Bu durumda üst ve alt parçalardaki vektörler şu ilişki içindedirler:

$$\{X_n\} = [T_{n-1}] [T_{n-2}] \dots [T_2][T_1][X_1] = [T] \{X_1\} \quad (9.3)$$

$\{X_i\}$  vektörleri kesit kuvvetlerini,  $[T_i]$  vektörleri ise özellikleri kapsar. Bu bağıntıda  $[T]$  haliyle global transfer matrisi olmaktadır. Şekilde gösterilmiş olan ankastre başlı kazık halinde baş momenti ve ötelenmesi bilinmeyenlerdir. Bu bilinmeyenlere birim değer verilerek diğer uçtaki sınır şartlarına deneme-yanılma ile yaklaşılarak çözüm elde edilebilir.

Bowles (1975) tarafından kullanılan bir yaklaşım da tek boyutlu sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yaklaşımda kazık Şekil 9.1 de gösterildiği gibi parçalara (elemanlara) bölünür. Elemanlardaki ve eleman uçlarındaki kuvvetler Şekil 9.2. de gösterilmişlerdir. Eleman uçlarına bilindiği gibi düğüm noktaları denilir. Bu gösterime p-x notasyonu denmektedir. Kodlamada kazık üzerindeki bir i parçasındaki (elemanındaki) Moment-Dönme  $P_i-X_i$  ile, Kuvvet-Ötelenme ise  $F_i-e_i$  ile gösterilmektedir.



Şekil 9.2. Eleman ve Düğüm Noktası Durumu

Örneğin Bowles, bu yöntem ile kurmuş olduğu bilgisayar programında kazık elemanları ile etkileşen zemini temsil eden yay katsayılarının saptanması için Kısım 6 da açıklanan (6.37) ifadesini kullanmaktadır.

### 9.2.2. Kazık Grubunun Genel Çözümü

Kazık gruplarının genel çözümleri çoğu kez Hrennikof (1950?) tarafından verilmiş olan denklemlere dayanmaktadır. Bu denklemlerin çözümleri, bilgisayar çağını beklemiştir. Çoğu çözüm kazık-radye

bağlantısındaki esneklik veya rijitlik redörlerinin (Yay Katsayılarının) saptanmasını temel almaktadır. Saul (1968) bir matris ifadesi önermiştir. Çözümde genellikle kazık radyesi rijit kabul edilmektedir.

Bu çözümler Reese (1970) ve Bowles (1974) tarafından bilgisayar ortamına uygulanabilecek ifadeler ile programlaştırılmışlardır. Bu programlarla çözümün esası aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kazık grubunun üç yönde etkiyen dış kuvvetlerin ve momentlerin etkisi altında olduğu göz önüne alınır. Bu kuvvetlerin, üç yönlü bir koordinat ekseninin orijininde etki ettikleri kabul edilir. Kazık grubunun simetrik olması halinde bu nokta aynı zamanda başlığın geometri merkezidir. Belli bir kazık ve zemin problemi için önce grupta yer alacak olan tek kazığın zeminle etkileşmesi problemi Kısım 6. da kapsamlı bir şekilde gösterilen çözümlere dayanarak elle, veya bu bilgilere dayanan bir bilgisayar programı aracılığı ile veya kazığı bir önceki paragrafta değinildiği gibi elemanlara ayıran bir bilgisayar programı uygulanarak yapılabilir. Kazık kesidinin simetrik olmayışı nedeni ile en genel halde her üç yönde değişik değerler alabilecek olan redörler bu şekilde saptanabilir. Bazı bilgisayar programları bu redörleri, tek kazığı çözerken elde ederek belleklerinde saklarlar ve kazık grubunun çözülmesi için gerekli analizde otomatikman kullanırlar. Ancak, birçok program ise, mühendisin yapacağı varsayımlara göre çok değişebilecek olan bu redörlerin el çözümü ile elde edilip, kazık grubu çözümü sırasında tek tek beslenmesini öngörürler. Genel bir kazık grubu çözümünün gerçekleştirilebilmesi için grup kazıklarının baş kotları, çapları, ara mesafeleri, uzunlukları, eğimleri ile üç boyutlu koordinat sisteminin orijinine göre koordinatları ve kotları bilinmelidir. Bu bilgiler bilgisayar veri tabanında bulunmalıdır. Bu tür bilgileri içeren veri matrisine “Geometri Matrisi” denilecektir. Diğer taraftan, yine her üç

yöndeki kazık-zemin etkileşmesinin kazık-radye bağlantısında meydana getirdiği moment-dönme, yük-ötelenme ve benzeri olguları yansıtan redörlerin de yine bilgisayarın belleğinde olması gerekir. Bu redörleri içeren matrise ise “Rijitlik Matrisi” denilecektir. Grupta (n) adet kazık olduğu varsayılırsa yukarıda bir grup kazığı için verilmiş olan matrisler hepsini içerecek olan bir “global matris” in elemanları olarak bu matris içindeki adreste yer alacaklardır. Grubun çözümü sırasında bu (n) kazığın içinden bir (i) kazığı için bu kazığın global geometri matrisindeki elemanları yardımı ile kazık radyesini koordinat orijininde etkileyen toplam kuvvetlerin kazık başlarına nasıl ulaştığı saptanır, (örneğin eğimli kazıklarda ne kadarı aksenel yük, ne kadarı kesme kuvveti gibi) sonra bu kazığa ulaşan kuvvetler saptanmış redörlerle etkileşerek ne miktar oturma, dönme, ötelenme olacağı saptanabilir.

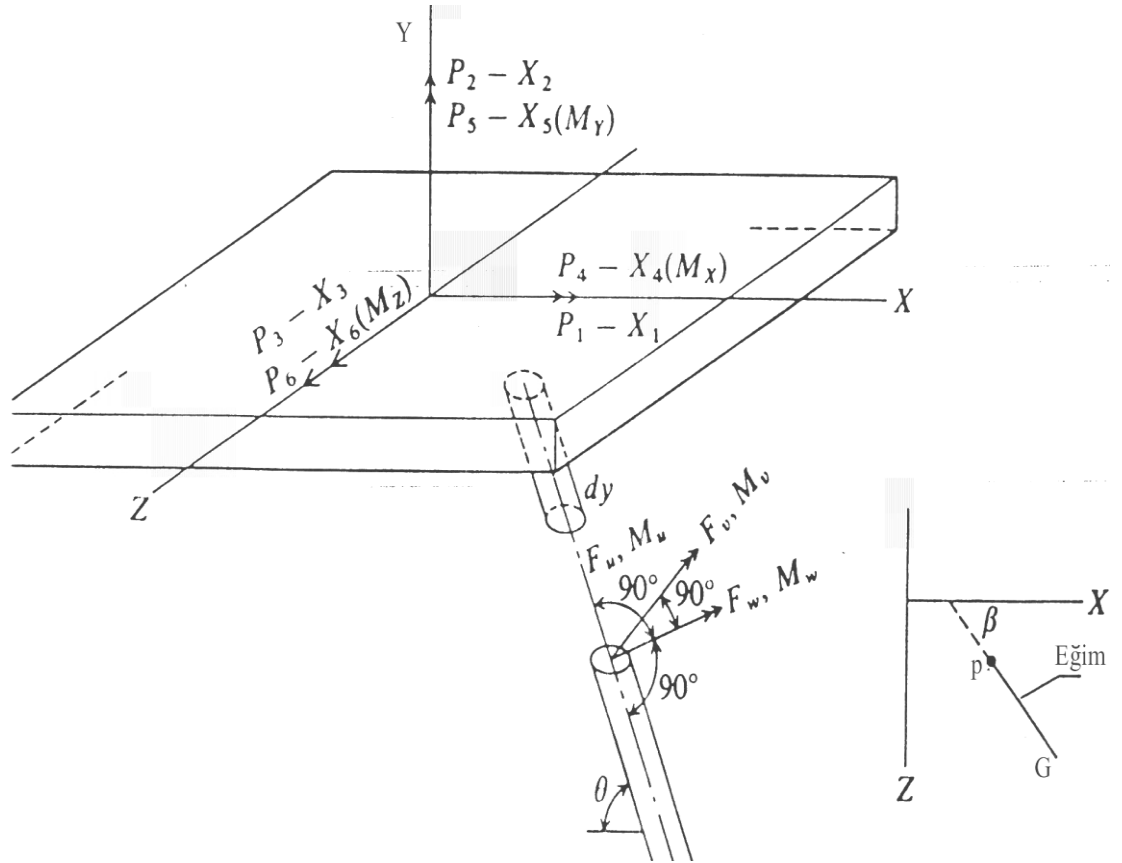
### 9.2.3. Genel Formülasyon

Bu paragrafta anlatıma yukarıda nakledilenler matematik ifadeler şekline getirilerek devam edilecektir:

Şekil 9.1. genel yükler altındaki bir kazık başlığını ve bu başlığa bağlı olan (n) adet grup kazığı içindeki bir (i) kazığını göstermektedir. Kazık genel hali ile alınmıştır, enkesitte eni ve boyu farklıdır. Kazık grubuna kazık radyesi üzerinde x,y,z eksenlerinin başlangıcı olan koordinat orijininde  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  momentleri ile  $P_x, P_y, P_z$  kuvvetleri etkimektedir. Tüm moment tanımlamalarında vektör tanımlaması ve sol el kuralı geçerlidir. (i) kazığının eğik bir kazık olduğu varsayılırsa, bu kazığın başının x-z düzlemi üzerindeki izdüşümü P noktası, kazığın ekseninin bu düzlem üzerindeki izdüşümü ise PG olmakta ve bu doğru, x eksenini ile  $\alpha$  açısı ( $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ) yapmaktadır. Grup yükleri nedeni ile kazık eksenini doğrultusunda  $F_u$  kuvveti ve  $M_u$  momenti, kazık eksenini normal olarak

kabul eden düzlemde ise  $F_w$  kuvveti ile,  $M_w$  momenti, x-z düzlemine paralel düzlem üzerinde ve  $F_w$  kuvvetine dik olacak şekilde  $F_v$  kuvveti ile  $M_v$  momenti etkimektedir.

Kazığın, üç boyutlu düzlemdeki konumunu belirleyen koordinatlar ve eğimini belirleyen doğrultu kosinüsleri gibi geometriye bağlı nitelikler bir 6x6 elemanlı [A] "Geometri Matrisi" ile belirlenmiştir.



Şekil 9.1. Genel Yükleme Durumu

Bu durumda, yukarıdaki anlatıma koşul olarak grup içindeki bir (i) kazığı için aşağıdaki matematik bağıntılar yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} P'_x \\ P'_y \\ P'_z \\ M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} F_u \\ F_v \\ F_w \\ M_u \\ M_v \\ M_w \end{Bmatrix} \quad (9.4)$$

Kısaca :

$$\{P\} = [A]\{F\} \quad (9.5)$$

Burada:

$\{P\}$  = Radyeye Etki eden Kuvvetler vektörü,

$\{F\}$  = Kazık-Radye bitişimindeki kuvvetler vektörü,

$[A]$  = Geometri Matrisi

olmaktadır.

Diğer taraftan, kazık başındaki kuvvetleri ötelenme, eğim ve dönme hareketlerine bağlayan ve yukarıda sözü edilen redörleri içeren bir rijitlik (veya esneklik) matrisi gerekmektedir. Rijitlik ve esneklik matrisleri birbirlerinin evriği olduklarından neden-sonuç ilişkileri yük-ötelenme (dönme) veya ötelenme (dönme)-yük şeklinde yazılabilir. Bu anlatımda rijitlik ilişkisi kullanılacaktır.

Rijitlik Matrisi  $[C]$  aşağıdaki gibidir:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 & c_{26} \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{53} & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & c_{62} & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

Yukarıdaki (9.6) matrisi eleman notasyonu ile  $c_{jk}$  şeklinde gösterilebilir. Bu matrisdeki her eleman kazık başı kuvvetlerini kazık başının üç yönlü (dönme, ötelenme) hareketine bağlayacak denklemin belkemiğini oluşturur. Kazığın dairesel veya kare kesitli olması halinde  $[C]$  matrisinde  $c_{22}=c_{33}$ ;  $c_{26}=c_{35}$ ;  $c_{53}=c_{62}$ ;  $c_{55}=c_{66}$  olur.

Bu matrisin elemanlarından bazıları kolayca hesaplanabilir. Örneğin kazık boyunun kısalmasını yöneten  $c_{11}$  elemanı bir uç kazığı için çevre sürtünmesinin derinlikle doğrusal artış göstereceği varsayımı ile:

$$c_{11} = 2EI/l \quad (9.7)$$

olarak bulunabildiği gibi Kısım 5 de anlatılan oturma hesap yöntemleri ile bulunan oturma miktarının, yük miktarına bölünmesi ile elde edilecek bir redör de kullanılabilir. Aynı şekilde  $c_{44}$  burulma elemanı:

$$c_{44} = \Omega G J/l \quad (9.8)$$

kullanılarak hesaplanıp yerine konabilir.

Burada:

$\Omega$  = genellikle 2.5 alınabilecek bir etki katsayısı,

$G = E/(1+2\mu)$  olarak alınabilecek olan Kazığın kayma modülü,

$J$  = Kazığın Burulmaya Karşı Eylemsizlik Momenti,

$l$  = kazık boyu,

olmaktadır.

Kazığın Burulmaya Karşı Eylemsizlik Momenti  $J$  kazık şekline bağlıdır. Bir dairesel kesit için  $\pi d^4/32$  değerini alır. Diğer kesit şekilleri için  $J = kA^4/J_G$  yazılabilir Burada  $k$  aşağıdaki tabloda gösterilen bir katsayı olarak alınabilir.  $J_G$  ağırlık merkezi etrafında polar eylemsizlik momenti,  $A$  kesit alanıdır.

Tablo 9.1. Eylemsizlik Momenti Katsayısı

| Şek | Eşkenar<br>Üçgen | Kare   | Daire  |
|-----|------------------|--------|--------|
| k   | □□□□□□           | □□□□□□ | □□□□□□ |

Tüm değişik şekiller için ortalama  $k$  değeri 0.025 dir. Bu değer kullanıldığında hata payı %10 olur.

Diğer taraftan Kısım 6 da pek çok örnekleri verildiği şekilde ankastre bir kazık başının ötelenmesi ile ilgili iki eleman (redör) daha  $x$  eksen ve  $y$  eksen doğrultularında kazığın ötelenme hesapları yapılarak bulunabilir. Bunlar  $c_{33}$  ve  $c_{22}$  elemanlarıdır. Diğer taraftan; kazık başına moment



uygulanır ve bu momentin uygulanması ile oluşabilecek olan ötelenmeye izin verilmezse momentin oluşacak dönmeye oranı ile x ve y eksenleri göz önüne alınarak  $c_{53}$  ve  $c_{62}$  redörleri, takiben de bu momentin yaratacağı ötelenme değeri hesaplanarak bu ötelenmeyi engelleyecek reaksiyon bulunur ve ötelenme değerine bölünürse  $c_{55}$  ve  $c_{66}$  redörleri saptanır. Yukarıda 9.2.1 paragrafında açıklandığı gibi bu redörler tek kazığın çözümünü gerçekleştirebilen bazı bilgisayar programları yardımı ile ve kazığa sıra ile gerekli yanal yük ve momentleri uygulayarak bulunan dönme veya ötelenme miktarları ile saptanabilir. Grup davranışını çözen bazı programlar bu redörleri bu işlemde sonra belleklerinde saklarlar ve kazık grubunun çözülmesi için gerekli analizde otomatikman kullanırlar. Ancak, birçok program ise, mühendisin yapacağı varsayımlara göre çok değişebilecek olan bu redörlerin önce elde edilip (örneğin (9.5) bağıntısı ile), kazık grubu çözümü için gerekli programın uygulanması sırasında tek tek beslenmesini öngörürler.

Kazık başının üç yönlü dönme ve ötelenme hareketleri  $\{e\}$  vektörü ile gösterilirse :

$$\{F\} = [C] \{e\} \quad (9.9)$$

olur. Burada:

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{Bmatrix} \quad (9.10)$$

şeklindedir. İlk üç eleman üç yöndeki ötelenmeyi, son üç eleman ise üç yöndeki dönme gösterir. Diğer taraftan, kazık başının koordinat orijinine göre yaptığı global ötelenme ve dönme hareketlerinin miktarlarını gösteren kolon matrisine (vektör)  $\{X\}$  denir ise bu değerler, yukarıdaki (i) kazığının başının ötelenmelerine:

$$\{e\} = [A^T] \{X\} \quad (9.11)$$

bağıntısı ile ilişkilendirilirler.  $[A^T]$ ,  $[A]$  matrisinin devrik matrisi olmaktadır. (9.6) ve (9.8) bağıntıları ile:

$$\{F\} = [C] \{e\} = [C] [A^T] \{X\} \quad (9.12)$$

ve (9.2) ile:

$$\{P\} = [A] [C] [A^T] \{X\} \quad (9.13)$$

elde edilir. Burada  $[A]$   $[C]$   $[A^T]$  matrislerinin çarpma işlemi yapıldıktan sonra denklem  $\{X\}^{-1}$  şeklinde evrilerek  $\{X\}$  değerleri bulunur. Takiben (9.11) bağıntısı ile de kazık başı hareketleri (ötelenme, dönme) saptanabilir.

Bu noktada,  $[A]$  ve dolayısı ile  $[A^T]$  matrislerinin; kazığın orijine göre konumunu tanımlayan elemanları içermesi nedeni ile (9.9) bağıntısının doğrudan evrilemediğine dikkat edilmesi gerekir.

Grup içindeki bir (i) kazığı için geçerli olan çözüm matrisi, n adet kazık içeren bir grup için kazık ızgarası düşünülerek kurulan nxn global matrisinin bir elemanı olarak çözüme katkıda bulunacaktır.

### **9.3. Eşdeğer Konsol (Kazık)**

#### **9.3.1.Genel**

Kazıklarda Burkulma konusu 7.4. kısmında işlenirken açıklanmış olan eşdeğer konsol kazık kavramı, kazıkların genel yükleme altındaki davranışlarının çözümlenmesinde de kullanılabilir. Sözü edilen kısımda ilgili konunun kendisine özgü notasyonları içinde tanımlanmış olan eşdeğer konsol kazık fikri; bu kısımda eşdeğer kazık konsol boylarının değişik yöntemler kullanılarak bulunması ve sonuçta yanal yükler altında olan kazık gruplarının davranışlarının çözümlenmesi açısından tekrar ele alınarak sunulacaktır.

Kısım 7 Şekil 7.12 de görülen bir kazığın başına bu kuvvetlerin etki etmesi durumunda gerek kazık başının ötelenmesinin, gerekse dönmesinin hem etkiyen yanal yükün ve hem de momentin bir fonksiyonu olduğu görülmüş idi.

Bu problem pek çok şekilde çözülebilir. Örneğin Betty-Castigliano iç enerji ilkeleri doğrultusunda enerji ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^l M^2 dx \quad (9.14)$$

Bir konsol kiriş veya kazık düşünülürse M moment, H yanal yük, x yük uygulama noktasından olan uzaklık  $M_F$  kazık başı ankastrelik momenti olmak üzere:

$$M = Hx - M_F \quad (9.15)$$

Adıgeçen ilkeye göre kazık başı deplasmanı, (9.11) ifadesi ile iç enerji bulunarak yüke göre kısmi türevi alındığında:

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{2EI} \int_0^l \frac{\partial U}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial H} dx = \frac{1}{2EI} \int_0^l 2M \frac{\partial M}{\partial H} dx = \\ &= \frac{1}{2EI} \int_0^l 2(Hx - M_F)(x) dx = \frac{Hl^3}{3EI} - \frac{M_F l^2}{2EI} \end{aligned} \quad (9.16)$$

olarak yazılabilir.

Aynı şekilde bir işlem kazık başı dönmesi  $\theta$  için yapılırsa:

$$\theta = \frac{1}{2EI} \int_0^l \frac{\partial U}{\partial M} dx = \frac{1}{2EI} \int_0^l 2M dx = \frac{1}{2EI} \int_0^l (Hx - M_F) dx = \frac{Hl^2}{2EI} - \frac{M_F l}{EI} \quad (9.17)$$

elde edilir. Yukarıdaki (9.17) denklemi, grup içindeki bir (i) tek kazığının kazık başındaki yükler altındaki davranışını göstermektedir.

### 9.3.2. Eşdeğer Konsol Kazığının Boyunun Belirlenmesi

Bir konsol kirişin davranışına dayanarak çözüm elde edebilmek için kazığa özgül eşdeğer bir konsol boyu ( $l_b$ ) bulunması gerekecektir. Bu bulguya nasıl ulaşılabileceği aşağıda görülecektir. Ancak mekanik kavramların kullanılması ile elde edilen ifadeler eşdeğer boyun kullanımı amacı ile yazıldıklarında  $l=l_b$  olacağı bilinmelidir.

Diğer taraftan kazık boyunun kısalması aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\delta = \frac{Pl_c}{AE} = \int_0^l \frac{P(\lambda)}{AE} d\lambda \quad (9.18)$$

Burada  $l_c$  basınç yükü altındaki eşdeğer kazık boyu,  $P(\lambda)$  kazık boyunca çevre sürtünmesinin değişimini gösteren bir fonksiyondur. Bu değişimin derinlikle doğrusal olması durumunda  $l_c=l/2$  olur. Bu uzunluk kazık aksenal yükü altında Kısım 5 de anlatılan oturma hesap yöntemleri ile bulunan oturma miktarını oluşturacak bir boy olarak da alınabilir. Örneğin

ilgili kısmın notasyonu ile  $\frac{I}{E_s d} = \frac{l_c}{E_p A}$  yazılırsa eşdeğer boy olarak  $l_c = 0.785l \frac{E_p}{E_s}$  bulunur.

(9.18), (9.16) ve (9.17) ifadeleri  $l=l_b$  bir matrix denklemi olarak yazılırsa:

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{l}{AE} \\ 0 & \frac{l_b^3}{3EI} & -\frac{l_b^2}{2EI} \\ 0 & \frac{l_b^2}{2EI} & -\frac{l_b}{EI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ Q \\ M \end{Bmatrix} \quad (9.19)$$

elde edilir. Bu, esneklik matrisi kullanılarak türetilmiş bir yazım şeklidir. Kazıkların kazık radyesine gömülü olduğu hallerde yanal yük altındaki bir kazık başı ötelenmesi halinde  $M = M_F$  olacağı bilinmektedir.

(9.16) bağıntısındaki matrisin evrimi ile yük- ötelenme ilişkilerini rijitlik matrisi ile veren aşağıdaki ifade bulunur:

$$\begin{Bmatrix} P \\ Q \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l_b^3} & -\frac{6EI}{l_b^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l_b^2} & \frac{4EI}{l_b} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (9.20)$$

Kazığın eşdeğer eğilme boyu aşağıdaki şekilde saptanabilir:

Bilindiği gibi kazık başında etkiyen moment ve yanal yük ayrı ayrı ötelenmeye ve dönmeye neden olurlar: Bu ötelenme ve dönme miktarlarının yay parametresinin derinlikle sabit olması veya değişmesi hallerine göre Kısım 6.3.3.1 ve Kısım 6.3.3.2 de anlatılmış olan Hetenyi veya Matlock-Reese yaklaşımları uyarınca gösteren bağıntılardan elde edilen redörler; eşdeğer kazık için yukarıda bulunmuş olan redörlere eşitlenebilir: Burada “uzun kazıklar” söz konusu olduğundan Hetenyi veya Matlock-Reese yaklaşımındaki  $K_{yh}$  ve benzeri katsayılar 1.0 alınmışlardır. Bu eşitleme işlemi sonuçları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{2\beta}{k} = \frac{l_b^3}{3EI} \quad (9.21)$$

$$-\frac{2\beta^2}{k} = \frac{l_b^2}{2EI} \quad (9.22)$$

(6.34) ifadesi de göz önüne alınarak (9.18) bağıntısından:

$$l_b = \sqrt[3]{\frac{6EI}{k}\beta} = \frac{1.142}{\beta} \quad (9.23)$$

(9.18) ve ayrıca (9.19) bağıntılarından:

$$l_b = \beta \sqrt{\frac{4EI}{k}} = \frac{1}{\beta} \quad (9.24)$$

bulunur. Bu yaklaşıma benzer şekilde Matlock-Reese yaklaşımı ile ve (6.60) bağıntısı da göz önüne alınarak:

$$\frac{C_y T^3}{EI} = \frac{l_b^3}{3EI} \quad (9.25)$$

$$-\frac{C_m T^2}{EI} = \frac{l_b^2}{2EI} \quad (9.26)$$

$$\frac{A_\theta T^2}{EI} = \frac{l_b^2}{2EI} \quad (9.27)$$

$$\frac{B_\theta T}{EI} = -\frac{l_b}{EI} \quad (9.28)$$

yazılır. Kazık başında  $z=0$  için  $C_y=2.435$ ;  $C_m=1.623$ ;  $A_\theta=-1.623$ ;  $B_\theta=-1.750$  dir. Bu değerler yukarıdaki dört bağıntıda yerlerine konularak kullanılarak  $l_b=1.94T$ ;  $1.80T$ ;  $1.80T$  ve  $1.75 T$  bulunur. Ortalama değer olarak  $l_b=1.82T$  kullanılabilir.

Bir örnek olması açısından (9.17) bağıntısındaki matris evrilir ve (9.22)-(9.25) bağıntıları kullanılırsa rijitlik matrisi kullanılarak yazılan bağıntı şöyle olur:

:

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{E_s d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_y T^3}{3EI} & \frac{C_m T^2}{2EI} \\ 0 & \frac{T^2 A_\theta}{EI} & \frac{TB_\theta}{EI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ Q \\ M \end{Bmatrix} \quad (9.29)$$

Matris elemanlarının katsayıları,  $z=0$  için yukarıda belirlenen değerleri alırlar. Bu matris yukarıdaki (9.3) matrisinin evrik eşdeğeridir. Bilgisayar programlamasında bu matris aynen (9.2.3) kısmında anlatıldığı gibi kazık grubunun global matrisi içinde tek kazığın davranış matrisi olarak yerini



alır. Bu aşamadan sonra (9.11) ile (9.13) bağıntıları ile gösterilmiş olan aşamalar tamamlanır ve çözüm aynı kısımda açıklandığı şekilde gerçekleşir.

Bilgisayar programları ile yapılacak olan çözümlerde, bilgisayara beslenecek olan redörlerin saptanması aşaması büyük önem taşır. Bu nedenle bu konuda bazı örneklerin verilmesi uygun olacaktır.

### 9.3.3. **Örnek 9.1.** (Modülün Derinlikle Değişmediği Durum)

$$E_p=108 \text{ Kn/m}^2$$

$$E_s=105 \text{ KN/m}^2$$

$$D=1.0\text{m}$$

$$l=50 \text{ m}$$

Kazık başına 100 KN yatay yük, 100 KN düşey yük ve 100 KNm ters moment geldiği varsayılmaktadır.

(6.43) bağıntısı ile  $k= 88830 \text{ KN/m}^2$  bulunur. Bu, bir yanal kazık yükleme deneyi ile bulunan 88300 değerini doğrulamaktadır.

Buradan (6.34) bağıntısı ile  $\square=0.26$  elde edilir.

Kazık başı ötelenmesi moment ve yük göz önüne alınarak:

$$y = \frac{2\beta}{k} K_{yh} H - \frac{2\beta^2}{k} K_{yM} M = 4 \times 10^{-4} \text{ m olur (K katsayıları yaklaşık 1.0 olmaktadır.)}$$

Eşdeğer Konsol ise  $l_b = 1.142/\square = 4.41\text{m}$  olur.

(9.13) ifadesi ile  $y=3.85 \times 10^{-4}$  bulunur.

Diğer taraftan kazık başının dönmesi:

$$\theta(z) = \frac{2H\beta^2}{k} K_{\theta H} - \frac{4M\beta^3}{k} K_{\theta M} \text{ şeklindedir.}$$

$$\frac{M\beta}{H} = \frac{K_{\theta H}}{K_{\theta M}} = A_B$$

yazılırsa teorik olarak bu dönmeye izin verilmemesi halinde kazık başının ötelenmesi için  $\alpha_1=2$  ila  $\alpha_1=4$  ve üstü değerler için  $A_B$  nin 1.054 ila 1.0 arasında değişmekte olduğu göz önüne alınarak hesap yapılabilir. Ancak Kısım 6 da da sözü edildiği gibi  $A_B$  pratikte 0.5 alınabilmektedir.

Bu durumda ötelenme miktarının izin verilebilir bir değer olan  $y_1$  olabilmesi için maksimum yanal yük değerinin:

$H_a=ky_1/\alpha$  olması gerektiği bilinmektedir. Buradan eşdeğer konsol çözümüne geçildiğinde rijitlik redörünün  $y/H=\alpha/k=l_b^3/3EI$  olacağı açıktır. Bu değerlerle yapılacak işlem sonucunda eşdeğer konsol boyu için  $l_b=0.9096/\alpha^2$  m bulunur. Bu değer kullanılarak yapılan ötelenme hesabı ile bu değer  $1.69 \times 10^{-4}$  m olarak saptanır.

### **Örnek 9.2.** (Modülün Derinlikle Değiştiği Durum)

Zeminin granüler bir zemin olduğunu ve yay parametresinin derinlikle  $\eta(z)=88300 z$  şeklinde değiştiğini varsayarak ve T değeri için (6.33) ifadesi kullanılarak çözüm tekrarlanırsa ötelenme:

$$y = \frac{C_y T^3}{EI} H - \frac{C_m T^2}{EI} M = 3.9 \times 10^{-4} \text{ m olur.}$$

Eşdeğer konsol kazığının boyu  $l_b=1.94T = 4.32$  m bulunur. Bu değer kullanılarak yukarıdaki gibi hesaplanan kazık başı ötelenmesi ise  $3 \times 10^{-4}$  m dir.

Ancak, aynı hal için (6.64) bağıntısından yararlanılarak pratik bir yaklaşım için  $A_\theta/B_\theta=0.5$  alınır:

$$\frac{\frac{A_\theta T^2}{EI}}{\frac{B_\theta T}{EI}} = \frac{\frac{l_b^2}{EI}}{\frac{l_b}{EI}}$$

yazılabilir ve buradan:

$l_b=T= 2.23$  m bulunur.

Bu sonuç ile kazık başı ötelenmesi  $2.4 \times 10^{-5}$  m olarak hesaplanır.

Yukarıdaki çözümler, bulunan ötelenme değerlerinin yakın olduğunu ancak aynı olmadığını göstermektedir. Bu bulgu; bilgisayar programlarına veri olarak girilmesi gereken değişik redörlerin etkisinin araştırılması gereğine işaret etmektedir.

### 9.3.2. Programlamanın Amaçları :

Bu kısımda son olarak bu konuda önemli olan diğer bir hususa değinilmesi gerekmektedir:

Bilgisayarlarla problem çözümü için yapılan programlar, yalnızca belirli bir problemi çözmek için kullanıldıkları gibi mühendislerin tasarımda kullanacakları abaklarınve Tabloların hazırlanmasında da kullanılırlar. Bunu gerçekleştirmek için problem genelde tanımlanır. Bunu takiben değişik geometri gösteren durumlar için çözüm planlanır. Program geliştirildikten sonra Zeminin ve Yapının; problemi çözmek için gerekli olan pek çok mekanik özellikleri, belli sınırlar içinde yeterli sayıda değerler olarak beslemek sureti ile sonuçlar bulunur. Bu sonuçlar, uygulamacının kolaylıkla kullanabileceği Abaklar veya Tablolar haline getirilir. Bu işlem sırasında gerek bağımlı değişkenler ve gerekse bunları kontrol eden bağımsız değişkenler, boyutsuz parametreler haline getirilerek sunulur. Bu kitapta pratikte kullanılması amacı ile verilen pek çok bu tür abak veya tablo vardır. Aynı şey, pek çok kitap, yayın vb için de geçerlidir. Tasarımcı, bu tür Tablo ve Abakları kullanırken bunların hangi programla, hangi baza dayanılarak ve hangi kullanım sınırları için önerildiğini bilmelidir. Aksi halde, yanıltıcı sonuçlara ulaşılması kuvvetli bir olasılıktır.

## **Kısım 10. Birinci Prof. İsmet Ordemir Konferansı :**

### **Şişen Zeminler ve bu Zeminlerde Kazıkların Davranışı**

#### **10.1.Giriş**

Bu kısımda, rahmetli hocamız Prof. İsmet Ordemir' in anısına düzenlenmiş olan Konferans tebliğimi aynen sunuyorum. Bu tebliğde zeminlerin şişme olayı açıklanmış ve sonra üzerinde merhum hoca ile beraber çalıştığımız bir kazıklı temel probleminin çözümü sunulmuştur. Şişme konusu son derece geniş bir konu olduğundan bu konunun belkemiği sayılabilecek olan hususlar ayrıntılara girilmeksizin sergilenmeye çalışılmıştır. Bu konu hakkında daha fazla bilgi edinmek isteyenler için geniş bir kaynakça kısmın sonunda “Zeminlerin Şişmesi Konusu Hakkında Kaynakça” adı ile ayrıca verilmiştir.

#### **10.2. Zeminlerde Şişme Olayı**

Şişme olayına genellikle şişmeye uygun minerolojik yapıda olup, suya doymun olmayan killi zeminlerde rastlanmaktadır. Bu türlü zeminler, suya açtırlar. Su emme potansiyelleri yüksektir, bu nedenle açıklıklarını giderinceye ve doymunluk derecesine varıncaya kadar suyu emerler; bu arada hacimleri artar. Bu hacim artması; mekanik açıdan bakıldığında zemin bünyesindeki efektif gerilmenin azalması sonucunda oluşur. Bu olay, genellikle iklim bakımından buharlaşma hızının yağış hızından daha fazla olduğu kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde çoğunluktadır. Yurdumuzda Orta ve Güney Doğu Anadolu bu olaya aday olabilecek iklim bölgeleridir. Şişen zeminlerin yaptıkları hasar çok büyüktür. ABD

de 1973 yılında yapılan bir çalışmaya göre bu rakam deprem ve kasırgalarının toplam hasarının iki misli olarak belirlenmiştir. (Jones ve Holtz,1973). Yurdumuzda benzer çalışmalar olmadığı için bu türlü hasarlar hakkında birşey söylemek mümkün olmamaktadır.

### **10.3. Şişme Potansiyeli ve Şişme Miktarı**

#### **10.3.1. Genel**

Şişen zeminlerin etüdünü yaparken iki ayrı anlamı vurgulamak gerekir. Bunlardan birincisi zeminin “Şişme Potansiyeli” dir. İkincisi ise “Şişme Miktarı” dır. Birinci kavram, zeminin en fazla ne kadar şişebileceğini gösterir. Bu; bir tür maksimum değerdir. İkincisi ise zeminin gerçekte ne kadar şişme gösterdiğidir. Genellikle “Şişme Potansiyeli” bir zeminin zemin sınıflandırması için kullanılan özelliklerine bağlı olarak olası şişme büyüklüğü açısından sınıflandırılması için kullanılır: Şişme nedeni ile yapılarda olabilecek hasar göz önüne alınarak belli şişme yüzde aralıkları düşünülür ve bu yüzde aralıkları “Yüksek”, “Orta”, “Az” şişme kademeleri olarak adlandırılır. İkinci kavram ise bir zeminin ne kadar şişeceğini, belli yöntemler kullanılarak hesaplanması sonucunda bulunan değeri yansıtır.

#### **10.3.2. Teorik Bilgiler**

Şişme Potansiyeli aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- 1) Kil Miktarı ve Kilin Kompozisyonu, ( $\square \square$ )
- 2) Laboratuvardaki Sıkıştırma Yöntemi veya Arazideki Gerilme Tarihçesi Sonucunda Kil Daneciklerinin Yönlenmesi ( $\eta$ )

### 3) Zeminin Boşluk Suyunun Elektrolit Yoğunluğu ( $\mu$ )

Yukarıdaki faktörler, zeminin fizikoşimik yapısını oluştururlar ve zemindeki fizikoşimik iç potansiyel enerjiyi ( $\phi_f$ ) yaratırlar. (Seed, Mitchell ve Chan, 1962)

Diğer yandan, bir zeminin şişme potansiyelinin ne kadarının gerçekleşebileceği aşağıda belirtilen fiziksel faktörlere bağlıdır:

- 1) Suya Doygunluk Derecesi, (S)
- 2) Zemin Üzerindeki Yük ( $\sigma$ ),
- 3) Zemin Boşluğundaki Hava ve Suyun Basınçlarının farkı ( $u_a - u_w$ ),

Bu aşamada altı çizilmesi gereken diğer bir husus ise bir zeminin şişebilmesi için suyun gerekli olduğudur. Su, bu nedenle yukarıdaki faktörler arasında gösterilmemiştir.

Fiziksel faktörler, iç potansiyel enerjinin ne kadarının mekanik iş yapabileceğini denetlerler.

Şişme olayı sırasında zemin, üstündeki yükü zorlayarak bir “mekanik iş” yapar. Bu mekanik iş, kil bünyesinde beliren ve bu faktörlerin fonksiyonu olan iç enerji ( $\phi_f$ ) harcanarak yapılır. Ancak, iç enerjiyi yaratan faktörleri rakamsal olarak ifade etmek çok zor ve çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Diğer yandan, yaratılan iç enerji; kendisini ölçülebilir bir özellik olan zeminin “Emme Basıncı,  $u_a - u_w$ ” olarak gösterir.

“Emme Basıncı” fikri, 1965 yılında Avustralya’da yapılmış olan konferansının sonundaki inceleme paneli bildirisi (Statement of Review Panel, 1965) ile aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

“Zeminin boşluk suyunun ve zemin içinde suyun akımını sağlayan hidrolik eğimin somut ifadesi olarak ( $\phi_f$ ); boşluk suyunun serbest enerjisinin saf ve

serbest suyun serbest enerjisine kıyasla düşünülmesi ile mümkündür.”  
Pratik olarak şu söylenebilir:

Suya aç olan bir zemin su ile temasa geldiğinde suyu emer. Bu olay zemin boşluğunda atmosfer basıncının altında (negatif) bir basınç olduğunu işaret etmektedir. Yukarıdaki enerjiyi temsilen beliren “Eşdeğer Toplam Emme” Termodinamik kuralları uyarınca aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$\tau^0 = \frac{1.068RT}{v} \log_e \frac{p}{p_0} \quad (10.1)$$

Burada:

$\square^0$ =Toplam Emme Basıncı,

v=Bir mol Sıvı Suyun Hacmi, 18.02 cc .

p=Boşluk Suyunun Buhar Basıncı,atm.

$p_0$ =Serbest Saf Suyun Buhar Basıncı, atm.

R=İdeal Gas Sabiti 82.06 cc-atm 1/<sup>0</sup>K

T= Mutlak Isı, <sup>0</sup>K

Rölatif buhar basıncının (p/p<sub>0</sub>) doğrudan doğruya zemin yüzeyinin rölatif nemini gösterdiği düşünüldüğünde buharlaşma-emme basıncı bağlantısı (Wilson ,1997) ve aşağıda değinilecek olan iklim koşullarının rolü açıklık kazanmaktadır. Bu bakımdan arazide hidro-termodinamik kurallar önem taşır ve hidroloji uzmanları ile ortak çalışmayı gerektirir. Emme basınçları çok yüksek değerlere varabilir. Bu basınçların ölçülmesi için çok değişik laboratuvar ve arazi yöntemi bulunmaktadır. (Fredlund, 2001)

Zemindeki toplam emme basıncı, “Matrik Emme Basıncı,  $\square \square_m$ ” ile “Osmotik Emme Basıncı, ( $\square_0$ )” dan oluşur.

“Osmotik Emme Basıncı” yukarıda şişme potansiyelini kontrol ettikleri açıklanan faktörlerin bir fonksiyonudur.

$$\tau_0 = \tau_0(\lambda, \eta, \mu) \quad (10.2)$$

Bu faktörler aynı zamanda zeminin sınıflandırılmasına yarayan Atterberg Limitleri’ ni kontrol ederler. Bu nedendir ki şişme potansiyelinin sınıflandırılması da aynı faktörlere bağlı özellikler yardımı ile yapılabilmektedir.

Matrik basınç ise;

w= Su İçeriği,

e= Boşluk Oranı olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\tau_m = \tau_m(S, \sigma, -u_w) \quad (10.3)$$

veya doygunluk derecesi (S); su içeriği (w) ve boşluk oranı (e) cinsinden ifade edilir ve negatif boşluk suyu basıncı, boşluk havasının basıncı baz alınarak yazılırsa:

$$\tau_m = \tau_m(w/e, \sigma, u_a - u_w) \quad (10.4)$$

Şişme sırasında toplam emme basıncı değişir. Bu değişim matrik ve osmotik bileşenler ile şöyle ifade edilir:



$$d\tau_0 = d\tau_m + d\tau_0$$

(10.5)

$$d\tau_0 = \frac{\partial \tau_m}{\partial S} dS + \frac{\partial \tau_m}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial \tau_m}{\partial (u_a - u_w)} du_w + \frac{\partial \tau_0}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial \tau_0}{\partial \eta} d\eta + \frac{\partial \tau_0}{\partial \mu} d\mu$$

(10.6)

(10.2) ila (10.6) denklemleri tüm faktörlerin şişme olayı üzerindeki etkisini açıklarlar. Bazı araştırmacılar, (10.6) bağıntısındaki terimlerin toplam emme basıncına etkisini tek tek araştırmaya çabalamışlardır.

Osmotik Basınç bileşenini en fazla etkileyen faktör elektrolit konsantrasyonu (□□□dur.

(Snethen, 1980), Emme Basıncının; (10.1) denklemini belirleyen teori yardımı ile geliştirilen ve rölatif neme göre kalibre edilen milivoltmetreler (psikrometreler) ile ölçülebildiğini göstermiştir.

Johnson (1980), şişme olayında osmotik basınç bileşeninin etkisinin fazla olmadığını söylemektedir. Bu doğru bir gözlemdir. Zira, arazideki bir zeminde bu basıncı kontrol eden boşluk suyu elektrolit konsantrasyonu, gerilme tarihçesi gibi faktörlerin büyük ölçüde değişmediği söylenebilir. Yalnızca, kil daneciklerinin yönlenmesi, şişme olayına bağlı olarak bir miktar değişebilir.

Bu bağlamda şu noktayı işaret etmek gerekir ki, emme basıncı, toplam gerilmeler ve boşluk suyu basınçlarını biribiri ile ilişkilendiren ve genellikle şişme olayını çözümlenekte kullanılan önemli bağıntılar, (10.6) bağıntısının ilk üç terimi cinsinden, diğer bir deyişle “matrik emme basıncı” bileşenini ön plana alan bileşenleri içerirler.

Bu bağıntılardan belli başlı ikisi Bishop (1959) ve Croney, Coleman ve Black (1958) olup aşağıda verilmektedirler:

$$\tau_0 = u_w + \alpha\sigma \quad (\text{Croney,Coleman ve Black,1958}) \quad (10.7)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (\text{Bishop,1959}) \quad (10.8)$$

Burada:

$\bar{\sigma}$  =Efektif Gerilme,

$\sigma$  Toplam Gerilme,

$u_a, u_w$  =Boşluk Havasının ve Boşluk Suyunun Basınçları,

$\alpha$  = Toplam Emme Basıncı,

$\chi$  = Parametrelerdir.

(10.3), (10.4) bağıntıları ile (10.8), (10.9) bağıntılarının benzerliğine dikkat edilmelidir.

Her iki denklemdeki  $\chi$  ve  $\alpha$  parametreleri emme gerilmesi tayininde kullanılan belli araçlarla yapılan ölçümlerle elde edilebilmektedirler.

(10.7) denklemi kullanılarak ve emme basınçları ölçülerek bir Ankara zemininin davranışının incelenmesi Elias (1967) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Şişme sırasında emme basıncı şişmeyi kontrol eder. Şişme, zeminde hacim değişmesi olarak ortaya çıkar. Bu nedenle üç boyutlu uzayda her yönde birim deformasyon görülür. Bu anlatımda konuyu basitleştirmek amacıyla tensöriyel bağıntılardan kaçınılmış olup tek yönlü şişme olayı üzerinde durulmuştur. Konu daha geniş şekli ile arandığında (Blight,1965; Fredlund,1977) ye bakılabilir.

Şişme sırasında oluşan birim deformasyon, efektif gerilmenin bir fonksiyonu olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta H}{H} = f(\bar{\sigma}) \quad (10.9)$$

(10.8) denklemi ise literatürde yaygın olarak yer almış olup özellikle efektif gerilmeyi hacim değişiklikleri (Fredlund, 1977,1979) ve/veya kayma dayanımı (Bishop ve Blight,1963; Bishop ve Donald,1961) ile ilişkilendirmesi açısından beğeni kazanmıştır. Bağıntıda ( $u_a - u_w$ ) terimi doğrudan doğruya şişme olayını kontrol ettiği bilinen emme basıncı ( $\square_0$ ) dır.  $\square - u_a$  terimi ise toplam gerilmeyi göstermektedir. (10.2) bağıntısı göz önüne alınır ve sabit bir toplam gerilme altında efektif gerilmelerin şişme basıncının fonksiyonu olduğu düşünülürse orijinal kalınlığı H şişme miktarı  $\square H$  olan bir zemin için aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

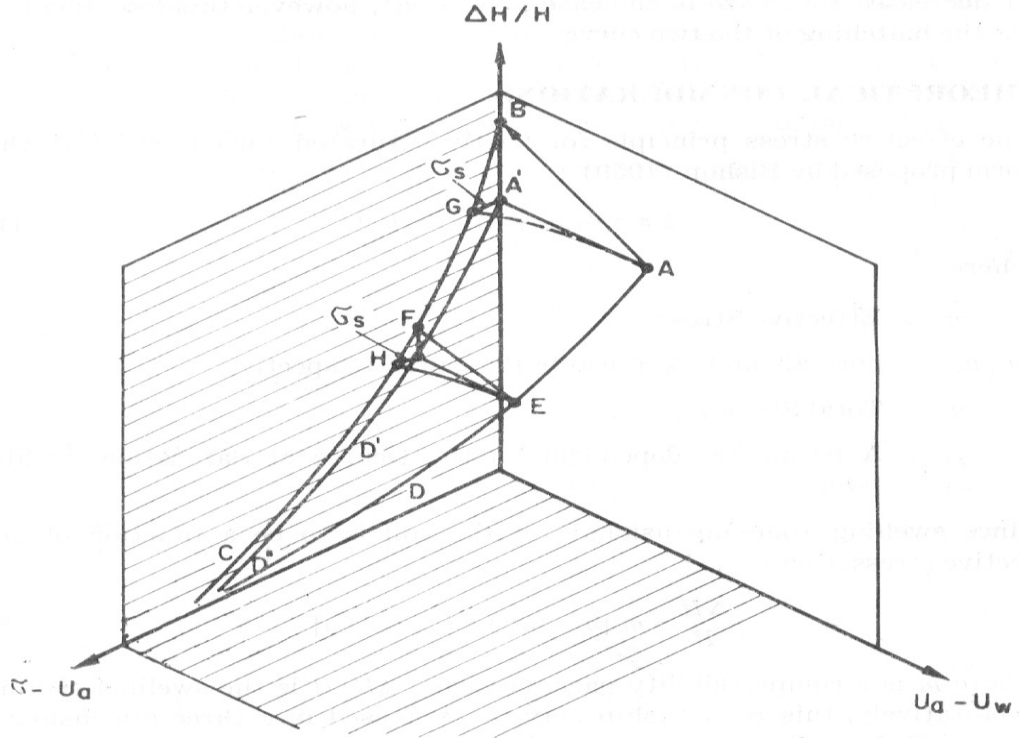
$$\frac{\Delta H}{H}(\bar{\sigma}) = \frac{\Delta H}{H}[(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \quad (10.10)$$

Bishop denkleminde  $\chi$  parametresi; suya doğgun bir kil için 1.0, tamamen kuru olan bir kil için ise 0.0 değerini alır. Parametrenin bu aralık içindeki değişimi doğgunluk derecesinin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. (Bishop ve Donald,1961; Bishop, 1959) . Bu fonksiyon, zeminin cinsine bağlıdır. Bu nedenle suya doğgun (S=1.0) ve kuru (S=0) zeminlerde aşağıdaki efektif gerilme formülleri elde edilir:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_w \quad S=1.0 \quad (10.11)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a \quad S=0.0$$

(10.12)



Şekil 10.1. Üç Boyutlu Şişme Diyagramı

(10.10) fonksiyonu, yukarıda Şekil 10.1 ile gösterilen bir üç boyutlu uzay diyagramında gösterilebilir:

.Bu şekilde şişme  $\Delta H/H$ ;  $(u_a - u_w)$  ve  $\sigma - u_a$  değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak görülmektedir. Diyagramın detayları aşağıdaki paragrafta odömetrede uygulanan şişme deneyleri ile beraber tanıtılacaktır.

### 10.3.3. Şişen Zeminleri Sınıflandırma ve Şişme Miktarı Tayini Yöntemleri

Killi bir zeminin Şişme Potansiyeli değişik yöntemlerle saptanabilir. (Seed, Mitchell ve Chan, 1962; Seed, Mitchell ve Lundgren 1962; Seed, Raymond, Lundgren 1962; Van der Merwe, 1964; Shiming, 1984; Çokça 1991).

Şişme Potansiyel Sınıflandırma yöntemleri 10.3.2. paragrafında açıklanan nedenlerle genel olarak zeminlerin indeks özelliklerini kullanan yöntemlerdir. Bu yöntemler içinde “Şişme Potansiyeli” ile “Şişme Miktarını” ayıran, ancak birbirini takiben kullanan ve basit bir yöntem olan Van der Merwe (1964) sistemi, konuyu etkin bir şekilde gösterebileceği için ancak bütünlüğü bozmamak amacı ile tebliğin en sonunda Ek 1 olarak sunulmuştur.

Şişme miktarı tayininde ise iki ayrı yol izlenebilir:

1. Belli bir Gerilme İzini Takip Ederek Yapılması Önerilmiş Olan bir Laboratuvar Deney Metodunun Kullanılması (Bishop and Donald 1961; Jennings and Knight 1957)
2. Psiometrik Teorinin Teorik veya Ampirik Bulgulara Dayanılarak Kullanılması ve/veya Emme Basıncı-Su Akımı Olayının Çözümlerine Dayanan Yöntemler.

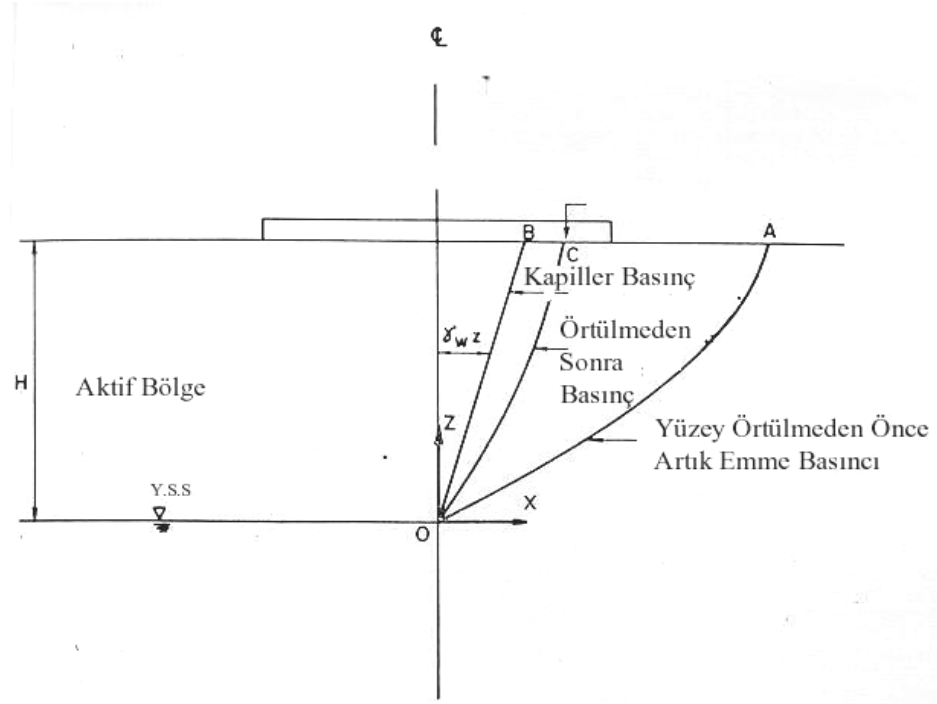
(Snethen 1980, 1984 ; Croney, Coleman, Black 1958)

#### 10.3.4. Arazide Şişme Olayı ve İklim Koşulları

Şişme potansiyelinin arazide nasıl harekete geldiği aşağıda Şekil 10.2 ile açıklanacaktır.

Zeminin şişmesinin efektif gerilmelere bağlı olarak nasıl geliştiği yukarıda açıklanmış idi. Şekil 10.2, uniform bir zemin içindeki şişme basınçlarını göstermektedir. Kapiller basınç OB ile gösterilmiştir.

Taban suyu seviyesinin zemin yüzeyine yakın olması ve zeminin kapiller su ile bu alanda doymuş olması durumunda zemin, atmosfer basıncının altında ve su tablasından itibaren ölçülecek bir z yüksekliğinde  $-\square_w z$  emme basıncını taşır.



Şekil 10.2. Zeminde Emme Basıncı Profiline Değişimi

Bu durumda (20.11) ifadesi gereği efektif gerilme:

$$\sigma = \bar{\sigma} + u_w \quad (10.13)$$

şeklini alır.

10.2 paragrafında şişen zeminlerin potansiyellerinin harekete geçebilmesi için gereken iklim koşullarının yarı kurak koşullar olması gereğine işaret edilmiş idi. Bu koşullar altında buharlaşmanın etkisi ile ve geo-hidrotermodinamik koşulların öngördüğü buharlaşma-yoğunlaşma yasalarına bağlı olarak, zeminin emme basıncı Şekil (10.2) de OA ile gösterildiği gibi kapiller gerilmenin üstündedir. Adına konsolidasyon teorisindeki deyimden esinlenerek “artık emme basıncı” diyebileceğimiz bu

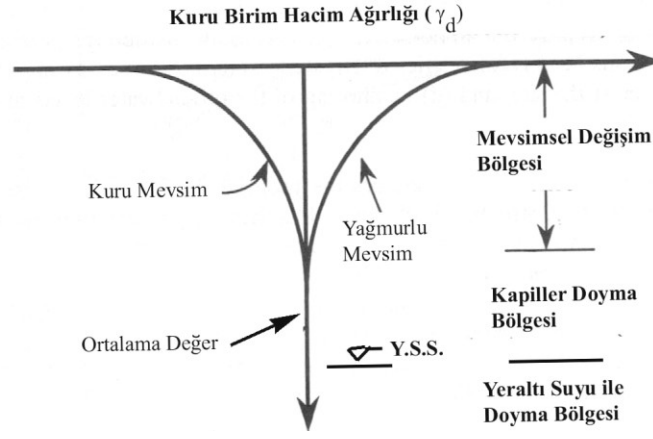
basınç, doğal zeminlerde yağmurlu mevsimlerde azalarak büyük olasılıkla “kapiller emme basıncı” civarlarında veya infiltrasyonun çok etkin olması halinde sıfır emme basıncında dengeye gelecektir. Kurak mevsimlerde artacaktır. Buna bağlı olarak zemin, (10.10) denklemi uyarınca aynen nefes alıp veren bir insanın göğsü gibi kurak havada büzülecek ve yağışlı havada şişecektir. Bu olay, ODTÜ yerleşkesi arazisindeki bir düzeneğe gözlemlenmiştir. (Omay, 1970)

Mühendislik açısından; yaz aylarında inşa edilmiş olan küçük bir ev, bir yol kaplaması; zeminin yüzeyini kaplayarak buharlaşmayı önler. Bu durumda zeminin su içeriği artar, emme basıncı OC çizgisi ile gösterilen duruma gelir: Sonuçta zemin şişme eğilimi gösterir, şişemezse; yapı üzerine şişme basıncı uygular. OC hattı ile belirlenen emme basıncına karşı gelen nihai su içeriği profiline “Denge Su İçeriği” adı verilir. Bu tür problemlerin çözümünde, ilk durumu gösteren OA profili ile “Denge Su İçeriği” profilinin bilinmesi önemlidir.

Zeminde yukarıda tanımlanan olaylar sırasında oluşan emme basınçlarının zemin içindeki dağılımı sonlu farklar yöntemine dayanan bir bilgisayar programı aracılığı ile çözülmüş, ve bu durumlarda yapılacak mühendislik hesapları için gereken boyutsuz abaklar elde edilmiştir. Aynı çalışmada, arazide gözlenen denge su içeriği profili (Elias,1967) ile teorik olarak elde edilen denge su içeriği profili kıyaslanmıştır. (Öner ve Birand, 1978)

Şekil 10.3. yukarıda anlatılan mevsimsel kabarma-büzülme nedeni ile ortaya gelen mevsimsel değişimin kuru birim hacim ağırlığına, diğer bir deyişle hacim değişikliğine etkisini göstermektedir.

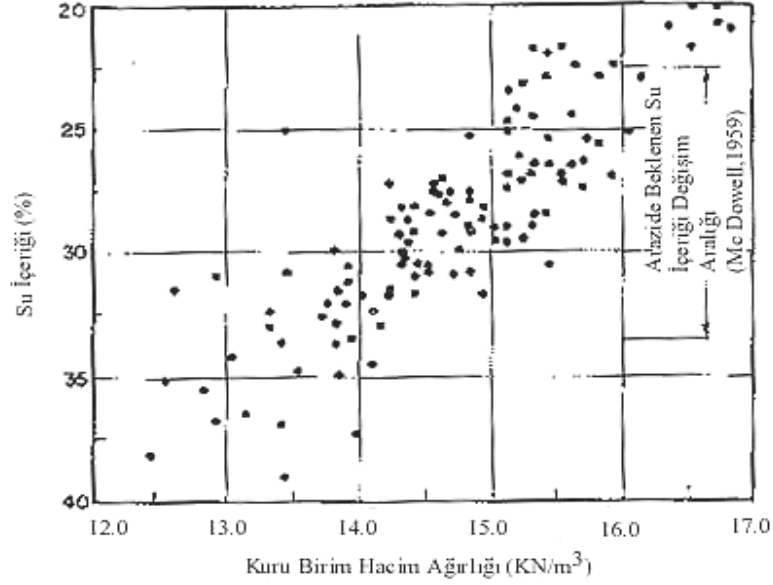




Şekil 10.3. Zeminde Mevsimsel Hacim Değişmesi

Bu şekilde yarı kurak-kurak bir yörede kapiller bölgenin üstünde yüzeyden “aktif derinlik” e kadar uzanan ve “mevsimsel değişim tabakası” adı verilen zemin kalınlığı içinde hacim değişimi görülmektedir. Kurak bölge olması nedeni ile yeraltı suyu seviyesinin çok derinlerde olduğu durumda bu hal geçerli olur. Şişmenin mekaniği aynen yukarıda anlatıldığı gibidir. Ankara'nın yarı-kurak, kurak bir bölge olması nedeni ile (Özmelek,1974) birçok yöresinde bu hal geçerlidir.

Şekil 10.3 ile açıklanan olayı Ankara zeminleri için gösteren Şekil 10.4.; Ankara zeminlerinde değişik zamanlarda rastgele alınmış nünunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının su içerikleri ile ilişkisini göstermektedir.



Şekil 10.4. Kuru Birim Hacim Ağırlığının Su İçeriği ile Değişimi

Bu; mevsimler boyunca zeminin kuruma-ıslanma nedeni ile nefes almasının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Mc Dowell (1959); zemin yüzeyinin bir yapı ile kaplanması halinde beklenebilecek su içeriği değişiminin sınırlarını zeminin Likid Limiti cinsinden vermektedir. Bu limitler de Ankara Kilinin ortalama Likit Limit değerleri (Sürgel,1976) kullanılarak şekilde gösterilmiştir. Bu şekilde, yüzeyi kaplanan bir zeminde boşluk oranı (e) su içeriği (w) ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$e_0 = e_0 + I_w w = 0.7 + 0.28w \quad (10.14)$$

Bu denklemde  $I_w = \frac{\Delta e}{\Delta w}$  değerine “Zeminin Su Emme Eğilimi Endisi” Birand (1976) adı verilmekte ve indis; Şişme Potansiyeli saptanması için önerilen bir yöntemde kullanılmaktadır. (Birand 1971, 2001). Bu endisin içeriği, (10.4) bağıntısına başvurulduğu zaman daha iyi anlaşılabilir: Belli

bir toplam yük altında, emme basıncının ve şişmenin bu endis cinsinden ifade edilebileceği görülmektedir.

#### **10.4. Şişme Miktarı Tayini için Laboratuvar Odömetre Deneyleri**

##### 10.4.1. Odömetre Deney Tipleri

Şişme miktarlarının saptanması için kullanılan, kontrollü emme ve benzeri girift ve pahalı deneylerin yanısıra yaygın şekilde kullanılan deneyler odömetre deneyleridir. Bu deneyler, gerek odömetre aracının hemen her laboratuvarında bulunması, kullanımının genelde yaygın olarak bilinmesi ve doğrudan doğruya 10.3.2. paragrafında açıklanan gerilme-hacim değişikliği ilişkilerini yansıtarak mühendise hitap etmesi açısından çokça kullanılmaktadır.

Deneylerin uygulama şekilleri Şekil 10.1 e başvurularak aşağıdaki şekillerde açıklanabilir:

- a. Bir zemin nümunesi odömetreye yerleştirilir ve arazideki örtü toplam gerilmesine yüklenir. Şekil 10.1 de bu durum örneğin A veya E noktası ile gösterilebilir. Bu nümune suya boğulur ve şiştikçe bu şişmeye izin verilmeyecek şekilde yüklenir. Bu yüklemenin izi  $\square H/H = \text{sabit}$  olmak kaydı ile bir  $[(\square - u_a); (u_a - u_w)]$  düzlemi üzerinde gerçekleşir ve AG veya EH olur. Yükleme izi G ve H noktalarında  $[(\square - u_a); (\square H/H)]$  düzlemi üzerine varır.
- b. Benzer bir nümune A veya E noktasından başlayarak sabit sürşarj yükü  $\square \square - u_a$  altında suya boğulur, ve şişme gözlenir. Bu;  $\square$  bir  $[\square H/H; (u_a - u_w)]$  düzlemi üzerinde gerçekleşir ve yüklenme izi AB veya EF olur. İz B ve F noktalarında  $[(\square - u_a); \square \square H/H]$  düzlemi üzerine düşer. Bu deney sonudur, zemin doymuştur ve  $(u_a - u_w)$  bileşeni sıfıra yaklaşmıştır. Şişme miktarı (örneğin A'B) saptanabilir. Zemin B ile gösterilen bu durumdan itibaren

$[(\square - u_a); (\square H/H)]$  düzlemi üzerinde yüklenirse doymuş bir nümunenin konsolidasyon deneyine yakın bir davranış gösterecektir.

c. EF, EH izleri üzerinden yüklenen bir zeminin üzerindeki yük F veya H noktalarından sonra azaltılabilir. Bu durumda doymuş nümunenin şişmesi gözlemlenebilir ve şişme endisi saptanabilir. Bu iki endis değeri biraz farklı olacaktır. Problemin niteliğine göre kullanılması uygun olur.

d. Zemin, başlangıçta su verilmeksizin doğal su içeriğinde örneğin AE izi üzerinden yüklendikten sonra suya boğulabilir. Bu yaklaşıma “tek nokta” metodu denilmektedir. ( Bu deneyler, emme basıncının da ölçüldüğü düzenekler ile yapılabilir. Ayrıca özel gereçlerde emme basıncı kontrol edilerek gerçekleştirilebilir.)

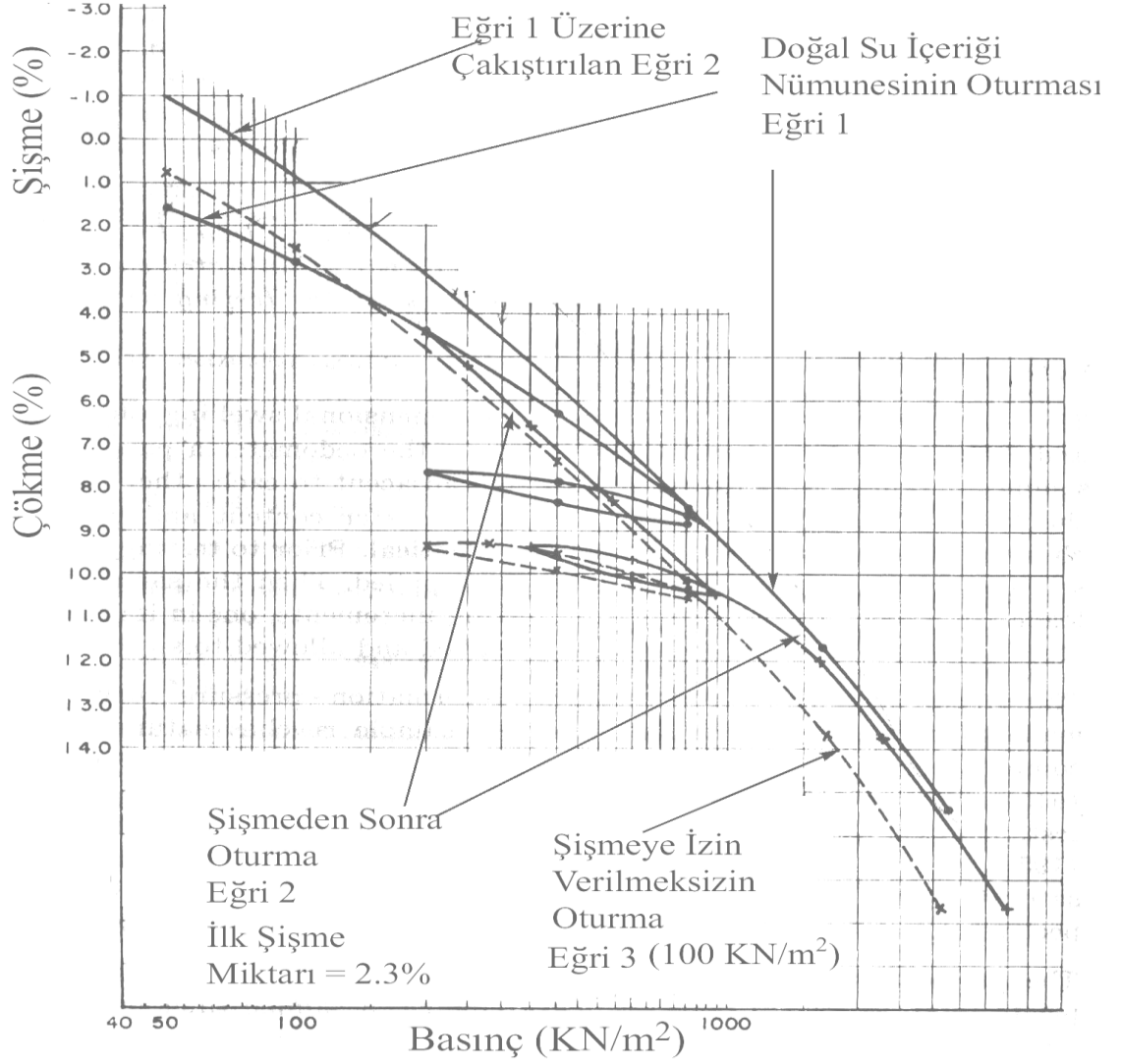
#### 10.4.2. Çift Odömetre Deneyleri ve Kınık Kili (Ankara) Üzerinde Uygulama

Çift Odömetre deneyi, Jennings ve Knight (1957,1958) tarafından önerilmiştir.

Çift Odömetre deneyi, aynı şartlardaki biri doymamış ikincisi şişme sonucunda doymuş iki nümune üzerinde yapılan bir deneydir. Şişen zeminlerde özellikle Avustralya (Burland,1965), Güney Afrika (Blight, 1965; Blight ve de Wet, 1965), Suudi Arabistan (Erol,1981;1989,1990) gibi memleketlerde uygulanarak ve arazi bulguları ile karşılaştırılarak olumlu sonuçlar alınmıştır.

Kınık kili Ankara şehir merkezine 35 km kadar uzaklıkta bulunan ve yüksek şişme potansiyeline sahip olan bir zemindir. Homojen bir yapıda olan bu kilin özellikleri kısaca ve ortalama değerlerle Likid Limiti 60, Plastiklik Endisi 42, Doğal Su İçeriği 25%, Aktivitesi 1.8 olarak verilebilir. Bu kil ile ilgili bilgiler Ordemir ve arkadaşları (1975) tarafından bildirilmiştir.

Kıvık kili üzerinde yapılan özel odömetre deneyleri Şekil 10.4 ve Şekil 10.5 de gösterilmektedir. (Birand 1978)



Şekil 10.5. Odömetre Deneyleri

Şekil 10.5 de üç tür odömetre deneyi gösterilmektedir. Bu deneyler birbirine çok yakın konumlardaki üç nümune üzerinde uygulanmış olan deneylerdir.

Deneyle, Şekil 10.1 de sunulan ve şişme olayını efektif gerilmelerin iki ayrı bileşenin değışimini ile açıklayan üç boyutlu diyagramdaki eğriler ile şu şekilde kıyaslanabilir:

Eğri 1 üç boyutlu diyagramda AEDD' ile gösterilen doğal su içeriğindeki bir nümunenin A D D'' ile gösterilen sıkışma izinin odömetre deneyini fiziksel olarak yansıtan  $[\square -u_a ; \square H/H]$  düzlemindeki izdüşümünü yansıtmaktadır.

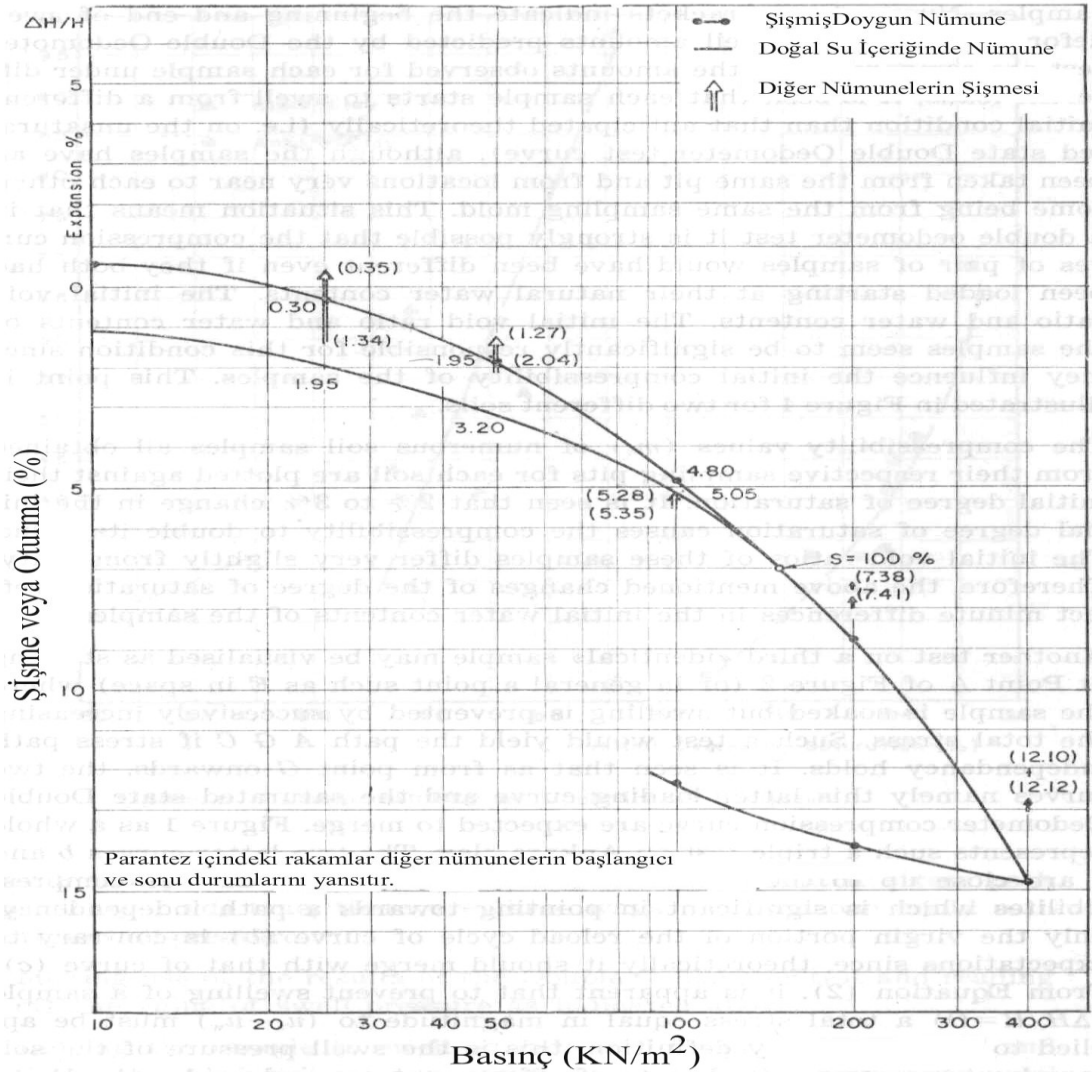
Eğri 2, suya boğulmak sureti ile çok küçük bir yük altında şişirilen (AB izi) ve sonra yüklenen bir nümunenin davranışını aynı düzlemde temsil eden ABGFHC eğrisidir.

Eğri 3 ise aynı bir küçük yük altında suya boğulmakla beraber şişme görüldükçe basıncı arttırmak sureti ile şişmeye izin verilmeyen durumu yansıtmaktadır. Bu halde yükleme izinin ABGHC olması beklenir. Bunun böyle olması haline deneylerin yapılışında "yükleme izi bağımsızlığı" adı verilir. Diğer bir anlatımla; deneyde nümunenin davranışı, deneylerin hangi yolla yapıldığından bağımsız olarak belirecektir demektir. Bu iki eğrinin birbirine oldukça yakın konumda buldukları görülmektedir. Bu nedenle böyle bir bağımsızlıktan söz etmek olasıdır.

Bu deneyde yukarıdaki deney yöntemlerinden elde edilen Eğri 2 nin Eğri 1 üzerine çakıştırılması ile elde edilen ikiz eğri kullanılmaktadır.

Şekil 10.1 bu iki eğrinin şişmeye izin verildikten sonra yüklenen nümunenin izlediği BGFHC ve doğal su içeriğindeki yarı doymun nümunenin  $[\square -u_a; \square H/H]$  düzlemindeki izdüşümü A'D D'' izini yansıtır. Bu son deney sırasında sürekli olarak yüklenen nümune, yüksek yük kademelerine varıldığında sıkışarak gerek zemin boşluğundaki havanın havanın dışarı atılması, gerekse Henry kanunu uyarınca hava kabarcıklarının su içinde erimesi sonucunda doymunluğa yaklaşacaktır. Ancak; bu iki iz incelendiğinde, aralarındaki ilişkinin  $[\square -u_a; \square H/H]$

düzlemi üzerinde  $\sigma - u_a$  yönünde zeminin şişme basıncı  $\sigma_s = \chi(u_a - u_w)$ , ve  $\sigma H/H$  yönünde ise birim şişme deformasyonu  $\sigma H/H$  olduğu sonucuna varılır. Demek oluyor ki belli bir  $\sigma - u_a$  toplam gerilme değerinde, örneğin A' noktasında, zemin şişmeye bırakılırsa, A'G ile gösterilen bir emme basıncı azalması söz konusu olacaktır. Bu ise efektif gerilmeye bir azalmaya işaret etmektedir. Bu nedenle Çift odömetre deneyi ile, arazide herhangi bir  $\sigma - u_a$  toplam gerilmesi (veya örtü yükü) altında kalınlığı belli olan bir zemin elemanının şişme miktarı ve bu şişme olurken meydana gelecek olan efektif gerilme bulunabilecektir.



## Şekil 10.6. Kınık Kilinde Çift Odömetre Deneyi Sonuçları

Şekil 10.6., Şekil 10.5. de gösterilen odömetre deneylerinden elde edilen eğrilerin durumunu, tekrar yükleme çemberleri ile şişmeye izin verilmeyen deney olmaksızın göstermektedir. Bu deneylere paralel olarak, bazı nünuneler doğrudan doğruya çeşitli yüklere yüklenmiş ve bu yükler altında suya boğularak “tek nokta” deneyleri uygulanmış, bu suretle zeminin “yükleme izi bağımsızlığı” bu yöntemle de bir kere daha araştırılmıştır. Tek nokta deneylerinin şişme izleri oklarla gösterilmiştir. Bu davranıştan anlaşılacağı gibi Kınık Kilinin yükleme izinden bağımsız davrandığı kesinlikle doğrulanamaz ise de şişme miktarlarının birbirlerine yakın oluşu bu yöndeki bir olguyu güçlendirmektedir. Diğer yandan, davranışın her iki halde de aynı olmayışı, nünunelerin ilk konumlarında aynı boşluk oranında olmayışları ve görelî sıkışabilirlikleri gibi nedenlerle de açıklanabilmektedir. (Birand,1978). Şeklin incelenmesi ile; aktif derinliğin 11.2 m olacağı hesaplanmaktadır.

Yukarıda, hacim değişmesinin yalnız şişme olarak görüldüğü haller incelenmiştir. Ancak, Ankara yöresinde silt oranı yüksek olan bazı killi zeminler, yüksek toplam gerilmeler altında “İç Yapı Çökmesi” göstermişler ve hacimleri küçülmüştür. (Akbat,1972; Yüncü,1972; Çalışan,1987; Birand ve Primkulov, 2001). Mekaniği belli ölçüde yukarıda açıklanan faktörlere; ancak büyük ölçüde kayma gerilmesi ve kayma dayanımı davranışını ilgilendiren bu konuya burada girilmemiştir.

### **10.5. Şişen Zeminlerde Kazık-Zemin Etkileşmesi**

#### **10.5.1. Teori**

Şişen bir zeminin hacminin her yönde genişleyebileceğini ve bu nedenle temas içinde olduğu cisimleri aynı yönlerde sürükleyebileceğini



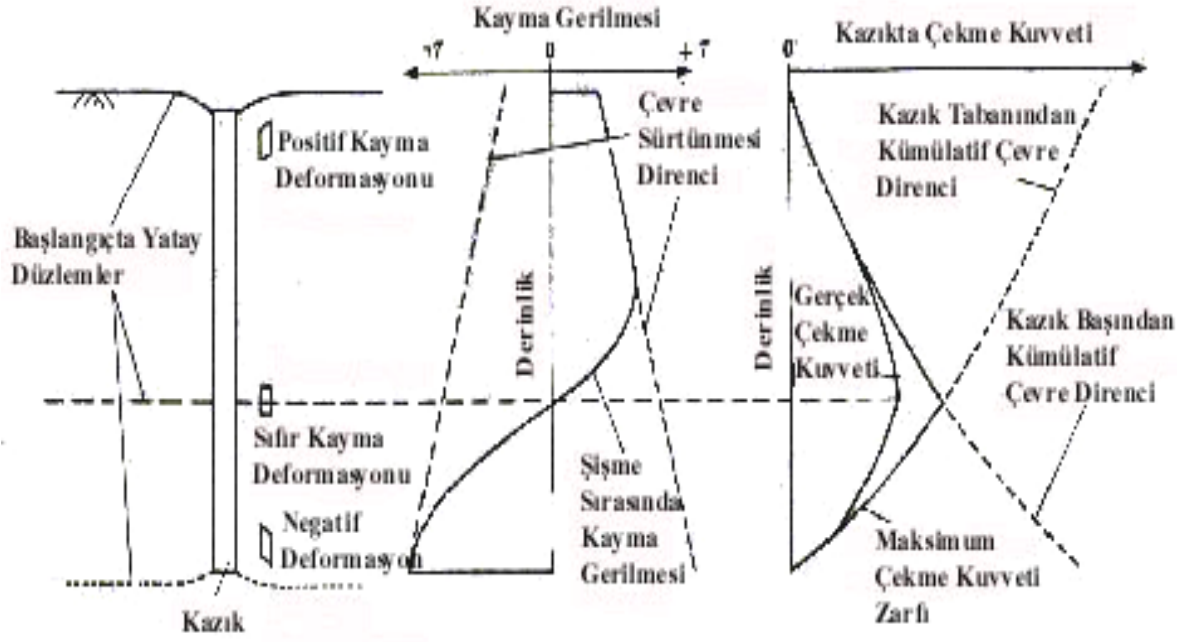
hatırlamak gerekir. Bu durumda şişen bir zeminin içindeki yük taşımayan bir kazığın denge sağlayabilmesi için kazığın çevre sürtünmesi  $f(z)$  nin kazık boyunca derinlikle değişimini,  $d$  kazık çapını,  $l$  kazık boyunu göstermek üzere:

$$\pi d \int_0^{l_t} f(z) dz - \pi d \int_{l_t}^l f(z) dz = 0$$

(10.15)

denkleminin sağlanması gerekir. Burada  $l_t$ , bu tür yapı-zemin etkileşimi problemlerinde görülebilen bir tarafsız düzlemin kazık başından uzaklığını işaret eder. Bu tarafsız düzlemin üzerinde kazık-zemin arasındaki kayma deformasyonu pozitif, altında ise negatif olmakta, denge bu şekilde sağlanmaktadır.

Çevre sürtünmesinin derinlikle değişmediği bir  $f(z)=f_0$  durumu için (10.15) denkleminin kullanılması ile  $l_t=l/2$  ve bu özelliğin derinlikle doğrusal değiştiği  $f(z)=f_0 z$  durumu için ise  $l_t=l/\sqrt{2}$  bulunur.



Şekil 10.7. Şişen bir Zeminde Kazık-Zemin Etkileşmesi

Yukarıda kısaca sözü edilen mekanizma Şekil 10.7. de etraflı olarak görülmektedir. Bu şekile göre tarafsız düzlemin üstünde kazık zemine göre oturmakta, altında ise kabarmaktadır. Bu nedenle şişme sırasında kayma direncinin tarafsız düzleme göre işaret değiştirdiği açıktır. Tarafsız düzlemin konumunu ve kazığa uygulanabilecek en yüksek çekme kuvvetini bulabilmek için; çevre direncini kazığın başından ve tabanından itibaren kümülatif şekilde toplamak yeterlidir. Bu şekilde elde edilen eğriler, kazığa uygulanabilecek maksimum çekme kuvvetinin zarfını verecektir. Diğer taraftan her iki kümülatif toplamın zarfının kesiştiği yerdeki düzlem ise tarafsız düzlem olacaktır. Kazık boyunca tarafsız düzleme yaklaşıldıkça kazık-zemin görelî hareketi sıfırlanmaktadır. Dolayısı ile bu bölgelerde kazığın aldığı yük azalacaktır. Bu nedenle gerçek çekme kuvveti, zarf ile bulunan kuvvetten daha az olur.

Şekil 10.7.de gösterilmemekle beraber, kazık boyunca şişme miktarlarının bilinmesi durumunda bu miktarların kazık başından kazık tabanına ve kazık tabanından kazık başına kadar alınan kümülatif toplamlarının derinliğe göre çizilmesi ve bu iki eğrinin kesişme noktasının bulunması da tarafsız düzlem'in yerini saptamak için kullanılabilir.

Bu türlü bir problemin çözümünde, kazığı ve zemini belli uzunlukta elemanlara ayırarak hesap yapmak uygun olmaktadır.

Diğer taraftan, şişen zeminden kazıklara gelen kuvvet aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanabilir:

$$P_i = \alpha_s K_0 \alpha \alpha \alpha d l_i \quad (10.16)$$

Burada:

$\alpha_s = \chi(u_a - u_w)$  = Şişme Sırasındaki Efektif Gerilme Değişmesi,

$K_0$  = Geostatik Basınç Katsayısı,

$\alpha$  = Aderans Faktörü,

$\alpha \alpha$  = Ferahlama Faktörü,

$d$  = Kazık Çapı,

$l_i$  = Kazık elemanının boyudur.

Ankara killlerinde, oluşumları ve derinlikle değişen yönleri jeolojik devirlerdeki kuruma olaylarının mekaniğine dayandırılan (Özkan,1987) fisür ve çatlaklar bulunmaktadır.

ODTÜ de yapılan bir çalışmaya göre fisürlü killerde yanal basıncın fisürlerin daralması ile ferahlayabileceği düşüncesi ile  $\alpha \alpha \alpha \alpha$  faktörü 0.6 civarında alınabilir. Yanıkömeroğlu,1990). Şişme potansiyeli olan fisürsüz killerde bu faktörün 1.0 alınması uygundur. Çekme gerilmesi altında bulunan bir kazıkta, betonun çatlayarak gerilmeyi betonarme demirine aktaracağı bilinmektedir. Bu nedenle, güvenlik hesaplarında betonarme

demirinin akma sınırını dikkate alınmalıdır. Diğer yandan  $f(z)$  kazık-zemin yüzeyinde derinlik boyunca oluşabilecek en yüksek çevre sürtünmesi değeri olmak üzere bu durumdaki bir kazığa yansıyacak en büyük yükün:

$$P_m = 0.5 \left[ \pi d \int_0^l f(z) dz \right]$$

(10.17)

olacağı açıktır. Bu kural, gerçek çekme kuvvetinin hesabında bir kriter olur. Kazıklardan zemine yapılan bu kuvvet aktarımı zeminin hareketini engelleyerek; kazıklar arasında bulunan zeminin şişmesinin, kazıklardan uzakta bulunan zeminin şişmesine oranla daha az olmasına neden olur. Kare bir kazık ızgarasının  $s$  kazık aralığı ile tasarlandığı düşünülürse bu durumda zemine kazıktan yansıyan gerilme ortalama bir hesapla  $P_i/s^2$  olacaktır. Bu halde zeminin şişme miktarlarının hesabında bu gerilmeden dolayı meydana gelen hareketin hesaplanması ve zeminin şişme miktarının düzeltilmesi gerekmektedir.

Diğer yandan, kazığa yansıyan ve (10.16) bağıntısı ile hesaplanan kuvvetlerin kazık boyunda değişiklik meydana getireceği de göz önüne alınmalıdır. Bu değişiklik, çok yüksek şişme basıncı gösteren killerin varlığı durumunda önem taşır.

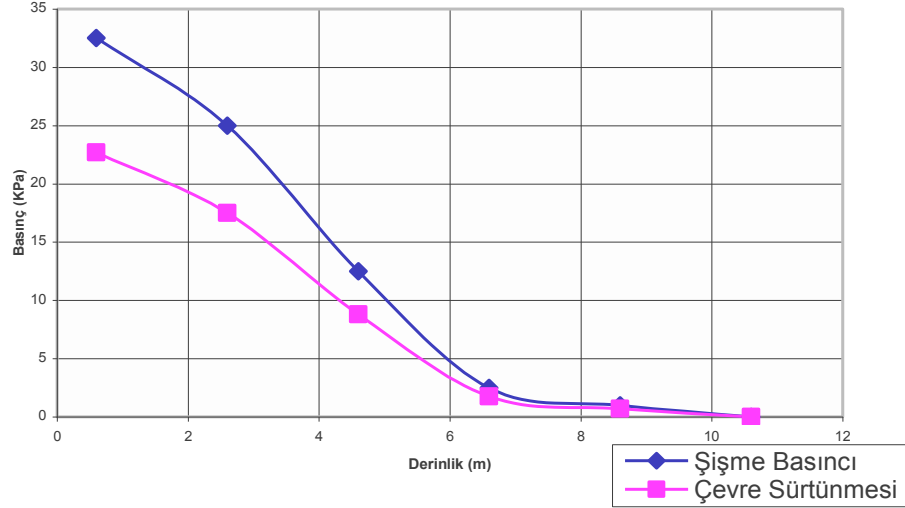
#### 10.5.2. **Örnek 10.1** Kınık Kili İçindeki Bir Kazıklı Temel

1970 li yıllarda Ankara şehrine su getirmek amacı ile tasarlanan sistem içinde şehrin Kınık ve İvedik bölgelerinde su tasfiye tesislerinin yapılması gündeme gelmiştir. Bu tesislerin temellerinin tasarlanması için değişik kuruluşlarca önerilen tekliflerin değerlendirilmesi sırasında killerin şişme problemi gündeme gelmiş ve kazık-zemin etkileşmesi incelenmiştir. kazı

nedeni ile Dekantör temelleri için önerilen kazıklar, net yük taşıyamamakta olup yalnızca şişen zeminlere karşı bir önlem olarak önerilmişler idi. Önerilen temel sisteminde 1 m çapında ve 12 m uzunluğunda fore kazıklar bulunmakta idi. Kazıkların yapımında zamanın şartları doğrultusunda beton B160 ile  $1400 \text{ Kg/cm}^2$  çekme dayanımı olan demir kullanılacak idi. Kazıkların Elastik modülü  $24 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$  olarak kabul edilebilir.

Yukarıda açıklanan teorik bilgilerin kullanıldığı ve bir miktar genişletildiği bu örnek, konunun kapsamının ve detaylarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda sunulmaktadır. İncelemede, en kritik durum olan zeminin tamamen doygun hale gelerek tüm şişme potansiyelinin aktif hale gelmesi göz önüne alınmıştır. Ankara civarındaki Geostatik Katsayı  $K_0 = 1.0$  alınır. Birand A.A., (1977). Aderans Faktörü  $\alpha = 0.7$  alınmış olup, yağlı bir kıvamda olan bu zemin için ferahlama faktörü 1.0 kabul edilmiştir. Bu problemin incelenmesi için Şekil 10.6. da sunulan Çift Odömetre Deneyi sonuçları kullanılacaktır. Hesapların yapılmasında, aktif derinliğe kadar olan mesafe boyunca kazık 1.2;2.0;2.0;2.0;2.0;2.0 m uzunlukta elemanlara bölünmüştür.

Şekil 10.8. Çift Odömetre deneyinden,  $\sigma - u_a$  ekseninde her kazık elemanının merkezi seviyesine karşı gelen şişme basıncı  $\sigma_s$  değeri ile çevre sürtünmesi değeri  $f(z) = K_0 \alpha \sigma_s$  değerinin derinlikle değişimini göstermektedir. Şişme basıncı değerleri, her kazık elemanının merkezi seviyesindeki toplam gerilme kullanılarak deney sonucu grafiklerinden iki eğri arasındaki  $\sigma_s$  değerinin saptanması ile elde edilmişlerdir.



Şekil 10.8. Şişme Basıncı ve Çevre Sürtünmesinin Derinlikle Değişimi

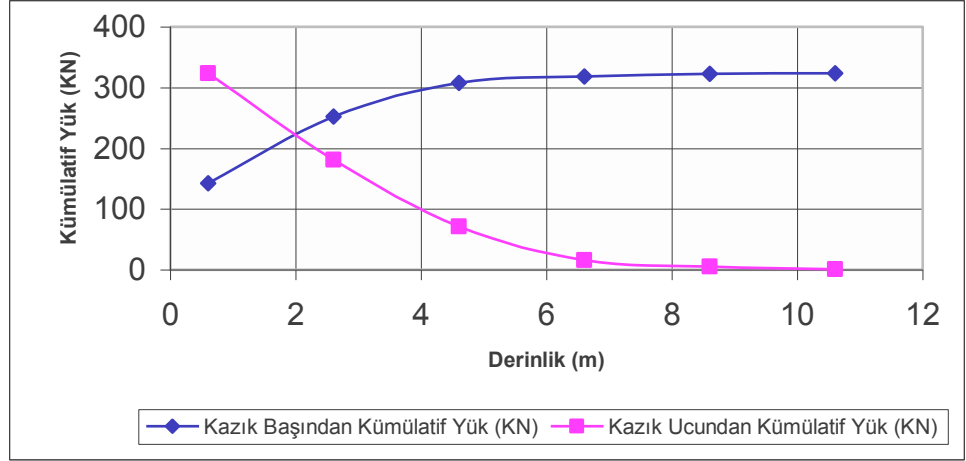
Buradan çevre sürtünmesinin derinlikle değişimi için:

$$f(z) = 22.75 - 7.19\sqrt{z} \quad (10.18)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade (10.15) denkleminde kullanılarak tarafsız düzlemin derinliği için  $l_t=2.5$  m elde edilir.

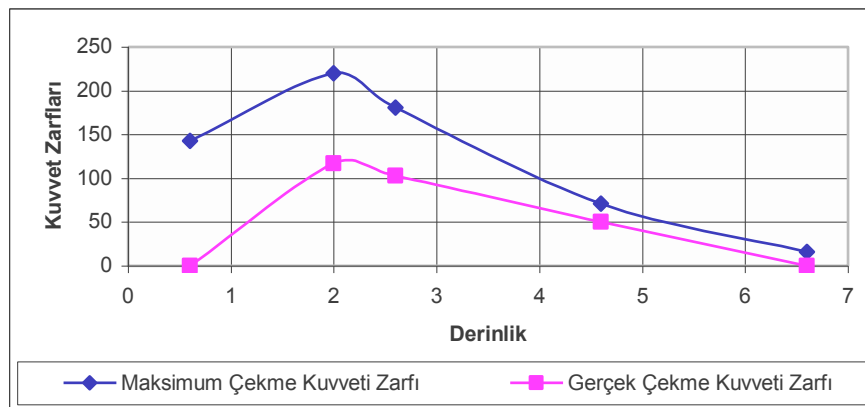
Aynı ifade (10.17) denklemine konulursa 11.2 m lik aktif derinlik kullanılarak maksimum kazık yükü  $P_m=117$  KN bulunur.

Şekil 10.9. herbir kazık elemanı için (10.16) bağıntısı aracılığı ile hesaplanmış olan Kazık Kuvveti  $P_i$  nin kazık başından ve kazık ucundan alınan kümülatif toplamalarını göstermektedir. Bu Şekil, tarafsız düzlemin 2.0 m derinlikte olduğunu belirlemektedir.



Şekil 10.9. Derinlik ve Kümülatif Yük

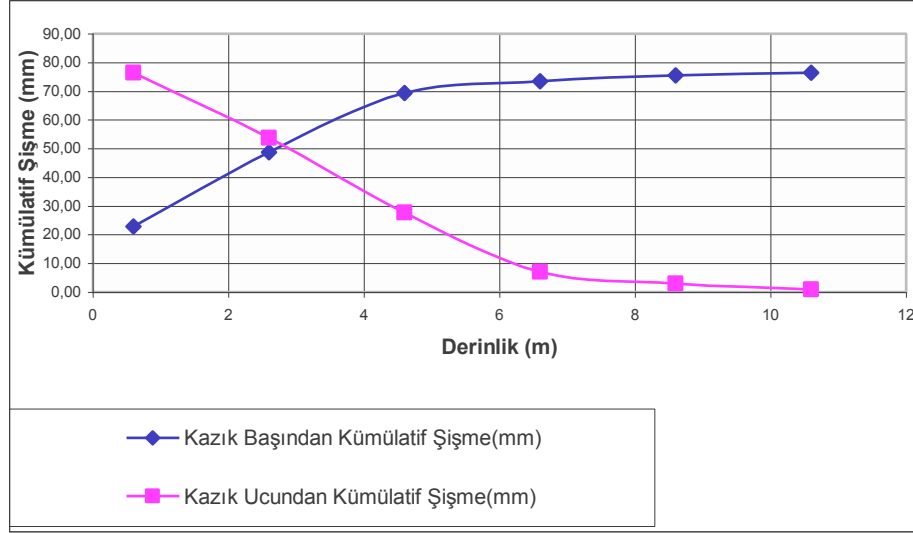
Şekil 10.10; Şekil 10.9 kullanılarak elde edilmiş olan maksimum çekme kuvveti zarfını göstermektedir. Diğer taraftan en yüksek yük seviyesinin 117 KN olduğu bilindiğinden bu değer kullanılarak zarfın içine “gerçek” çekme kuvveti zarfı yerleştirilmiştir. Bu yerleştirme ancak zarfın tepesindeki derinliğe ve ileride görülecek olan Şekil 10.12 ye kıyasen kullanılan mühendislik bonsansına dayanılarak uygulandığı için ikinci zarfa tamamına gerçek demek doğru olmamakla beraber bu tahminin gerçeğe yakın olacağı da anlaşılmalıdır.



Şekil 10.10. Kuvvet Zarfları

Şekil 10.11. kazık ucundan ve kazık başından itibaren kümülatif şişme miktarı grafiklerini vermektedir. Bu şekildeki şişme miktarlarını elde etmek için önce kazığın her elemanının orta noktasına isabet eden derinlikteki  $\sigma - u_a$  değerlerine karşı gelen şişme miktarları Çift Odömetre deneyi sonuçlarından bulunmuştur. Bu, kazıkların bulunmadığı ortamdaki şişmeyi yansıtır. Kazıklar, rölatif hareket yönlerine koşut olarak yüzey sürtünmeleri nedeni ile şişmeye çabalayan zemini engelleyecek veya şişmeyi arttıracak bir etki yaparlar. Bu etkiyi hesaba almak için kazığın her elemanının aldığı yük Şekil 10.10. daki gerçek kuvvet zarfı kullanılarak elde edilmiş ve kazığın çevresindeki zeminin alanı olan  $s^2=5 \times 5=25 \text{ m}^2$  ye bölünmüş ve kazığın zemine naklettiği yük  $(\sigma - u_a)$  bulunmuştur. Bu basınç nedeni ile beliren hareket miktarları; Çift Odömetre Deneyi eğrisine ilgili derinlikteki  $(\sigma - u_a)$  değeri ile girilerek  $(\sigma - u_a) \times P$  gerilme değerleri için hesaplanmıştır. Bu miktarlar, tarafsız düzlemin yerine kıyaslanarak bir önceki adımda elde edilen şişme miktarlarına eklenmiş veya çıkarılmıştır. Bu şekilde belirlenen net hareketler kazık başından ve kazık sonundan başlamak üzere kümülatif olarak toplanmış ve Şekil 10.11 de gösterilen kümülatif hareket eğrileri elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen eğrilerin kesişme noktası, tarafsız düzlemin 2.5 m de bulunduğunu göstermektedir. Bu (10.18) ve (10.15) bağıntılarının kullanımı ile elde edilmiş olan değere eşittir. Şekil 10.11 de tarafsız düzlem düzeyindeki hareket miktarının 50 mm olduğu görülmektedir. Bu miktar baz alınarak tarafsız düzleme göre hesaplanacak olan hareket miktarları, kayma deformasyonları açısından açıklayıcı olacaktır.



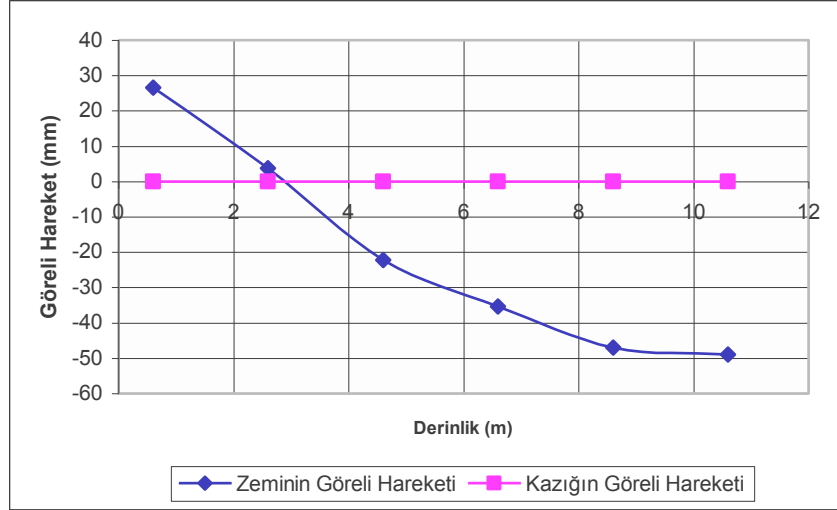


Şekil 10.11. Kümülatif Şişme

Bu durum, Şekil 10.12. de sunulmaktadır. Kazıkta, yük nedeni ile meydana gelebilecek deformasyon da gerçek çekme kuvvetleri ile hesaplanabilir. Bu kuvvetin kümülatif toplam değerleri kazık başından ve tabanından itibaren saptanabilir ve aynı şekilde gösterilebilir.

Görüldüğü gibi kazığın gerçek yük zarfı kullanılarak hesaplanan sıkışması ihmal edilebilir büyüklüktedir. Bu nedenle zeminin hareketi ile kazığın hareketi arasındaki fark, pratikte yalnızca zeminin hareketi olarak belirmektedir. Şişme basınçlarının daha fazla olduğu ve/veya aktif derinliğin ve kazık boyunun daha uzun olması halinde görelî hareketin daha fazla olması beklenir.

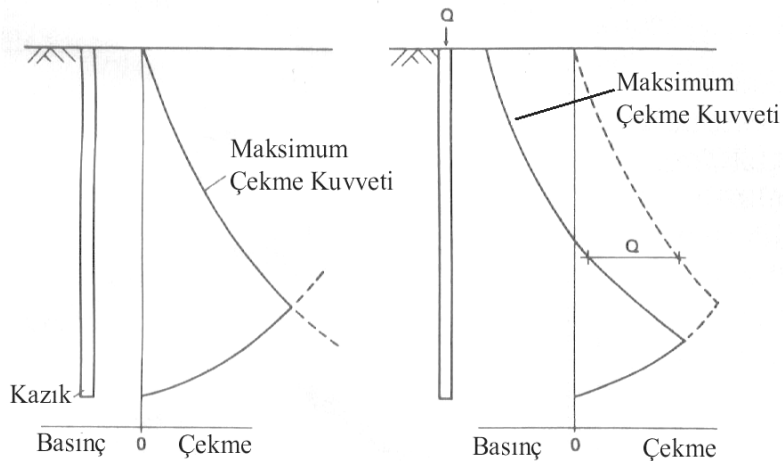
Kazığın çekme yüküne karşı güvenliği ise yüzde bir donatı düşünülerek 1099 KN olarak bulunur. Kazık, bu bakımdan güvendedir.



Şekil 10.12. Göreli Hareketler

Kazık başında bir yük olması halinde hesaplar aynı olmakla beraber Şekil 10.13. de görüldüğü gibi Maksimum Çekme Kuvveti Profili kazık başı yükü  $Q$  kadar bir deplasmana uğrar. Tarafsız düzlem aşağıya doğru kayabilir. Bu durumda maksimum yük aşağıdaki gibidir:

$$P_m = \frac{1}{2} \left\{ \pi d \int_0^l f(z) dz - Q \right\} \quad (10.19)$$

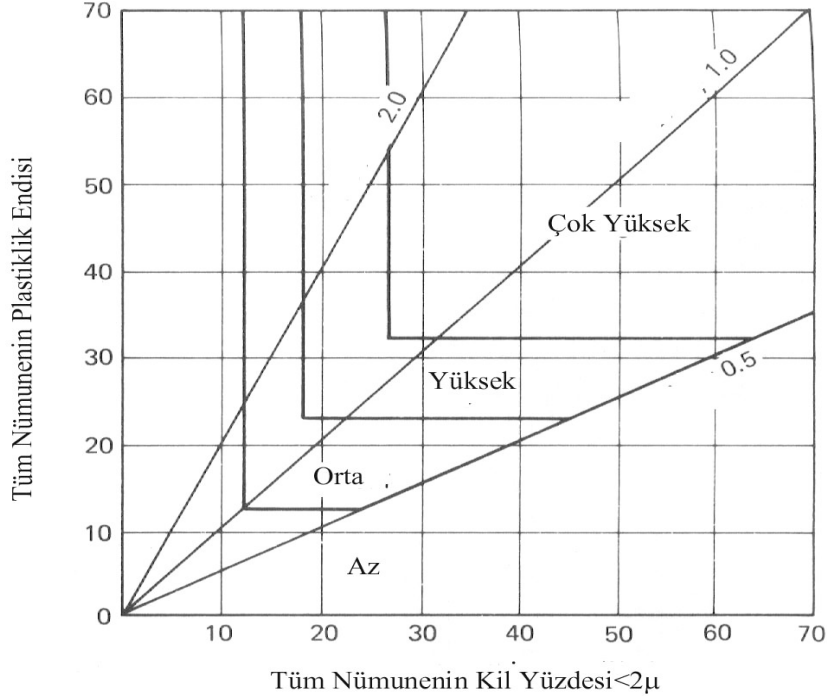


Şekil 10.13. Kazık Başına Kuvvet Uygulanması Durumu

Not: Yukarıda sunulan problemin çözümü için bir öneri de “piston kazıklar” idi. Burada içeride aktif derinliğin çok altına (25.0m) inen bir kazığın dışına iç kazığın üzerinde hareket edebilecek bir boru kazığın yerleştirilmesi önerilmekte idi. Bu önerinin düşünülmesi okuyucu için güzel bir eksersiz olabilir.

### Ek.10.1. Bir Yöntem: Van der Merwe Sistemi

Van der Merwe (1964) sistemi “Şişme Potansiyeli” ile “Şişme Miktarını” ayırmakta; önce “Şişme Potansiyeli” ni basit bir yolla bulmakta; sonra bu bulgu ile bazı ampirik gözlemleri kullanarak “Şişme Miktarını” saptamaktadır. Bunun için önce zeminin Plastiklik İndisi ve Kil İçeriği Yüzdesi ile Şekil Ek 10.1. e başvurulur ve buradan “Şişme Potansiyeli” saptanır.



Şekil Ek 10.1. Van der Merwe Abağı

Bu işlemi takiben zeminin “Potansiyel Kabarabilme” katsayısı PE aşağıdaki Tablo E 10.1 den alınır ve aşağıdaki A10.1 denklemine yerleştirilir.

Tablo E 10.1. “Potansiyel Kabarabilme” Katsayısı (PE)

| Şişme Potansiyeli | Potansiyel Kabarabilme Katsayısı (PE)<br>(Kabarılma Miktarı/Zemin Kalınlığı)<br>(cm/m) |
|-------------------|--|
| Çok Yüksek        | 0.0250   |
| Yüksek            | 0.0125   |
| Orta              | 0.0062   |
| Az                | 0  |

$$s = \int_{z_2}^{z_1} F(PE) dz \quad (E 10.1)$$

burada:

$z_1$  ve  $z_2$  şişen tabakanın metre olarak alt ve üst derinlikleridir. (Tabaka kalınlığı =  $H = z_2 - z_1$ )

$s$ =Şişme Miktarıdır. (m)

$F$ =  $z$  derinliğindeki şişmenin yüzeydeki şişmeye nazaran azalmasını temsil eder ve aşağıdaki denklemlerle bulunur:

$$F = e^{-z/k}$$

Burada  $z$  derinlik,  $k$  ise metre olarak aktif derinliktir.

Güney Afrikanın bazı zeminleri için Van der Merwe tarafından  $k=7.0$  m olarak önerilen bu derinlik Kınık Kili için örneğimizde  $k=11.2$  m olarak saptanmış idi. Genelde ODTÜ kampüsü killeri için ise  $k= 6.0$  m alınabilir.

### **Zeminlerin Şişmesi Konusunda Kaynakça**

Abbasoğlu, C., 1971, “ Ion Exchange Process Affecting Swelling and Other Properties of Ankara Clay “, M.S.Thesis, METU, Civil Engineering Department, 78 pages.

(AFNOR), L'Association Francaise De Normalisation Juillet (1980), “Essai Au Bleu De Methylene”, P18-592, Afnor 80181, Paris La Defence.

Aitcheson, G.D. and Richards, B.G. (1965) “Techniques Adopted for the Measurement of Moisture Variables,” Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils, Australia: Butterworth, pp. 191-205.

Akbay, Ö.Ü., 1972, “ The Influence of Saturation on Volume Change Characteristics of Ankara Clay Under Various Surcharge Pressures”, M.S. Thesis, METU, Civil Engng. Dept., 53 pages.

Arda, Ş.,1966, “ Preconsolidation of Ankara Clay”, M.S. Thesis, METU Civil Engng Dept., 58 pages.

Bandyopadhyay, S.S., 1981, “ Prediction of Swelling Potential for Natural Soils”, Proc. ASCE J. GE Div., Vol.107, No.5, pp.658-661.

Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R. (1969) “Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proc. Paper 6338.

- Beaulieu, J., 1979, “ Identification Geotechnique de Materiaux Argileux Naturels Par La Mesure de Leur Surface au Moyen du Bleu de Methylene”, These Pour Obtenir le Titre de Docteur 3e Cycle, L’Universite de Paris-Sud, Centre d’Orsay, 132 papiers.
- Bensted, J., 1985, “ Application of the Methylene Blue Test to Cement Raw Materials”, J. Chem. Tech. Biotechnol., 35A, pp.181-184.
- Birand, A., 1963, “ Study of the Characteristics of Ankara Clays Showing Swelling Properties”, M.S. Thesis, METU, Civil Engineering Department, 40 pages.
- Birand, A., 1965, “Recent Views on the Behaviour of Clay- Water Systems “, METU, Faculty of Engineering, Publication no. 11 , 18 pages.
- Birand, A.A. (1963), “Swelling Properties of Ankara Clay”, M.S. Thesis, Faculty of Engineering, Middle East Technical University (METU), Ankara, pp.60.
- Birand, A.A. (1965) “Investigation of Swelling Potential of Clayey Soils,” METU Engineering Faculty Pub. No.12.
- Birand, A.A. (1978) “A Contribution to the Double Oedometer Testing of Expansive Soils,” Invited Jubilee Paper Published in Honor of Prof. Peynircioglu. Publication of Turkish National Committee of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul: İTÜPress.
- Birand, A.A., 1976, “ Presentation of a Case of Damage to an Airfield Pavement”, METU Journal of Pure and Applied Sciences, Vol.9, No.1, pp.99-111.
- Birand, A.A., 1976, “ Propensity to Water Intake- A Method for the Prediction of the Expansiveness of Soils”, METU Journal of Pure and Applied Sciences, Vol.9, No.3, pp.367-397.

Birand, A.A., 1977, “ Ankara Yöresi Zeminlerde Ön Yükleme Isotropisi”, 4. Tubitak Teknik Kongresi, Altinyunus, İzmir, pp.277-287.

Birand, A.A.,(2001) “Prediction of the Expansiveness of Soils” Invited Jubilee Paper in Honour of Prof. Ergün Toğrol Publication of Turkish National Committee of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul: İTÜPress.

Birand, A.A. and Primkulov, A., (2001) “On the Behaviour and Identification of Collapsible Soils” Proceedings XV. Inter Conf. Soil Mech. and Geotechnical Eng. İstanbul Vol. 1.

Bishop, A.W. (1960) “Discussion and Closing Remarks,” Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, London: Butterworth.

Bishop, A.W. and Blight, G.E. (1963) “ Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils,” Geotechnique, London, Vol. 13, pp. 177-197.

Bishop, A.W. and Donald, I.B. (1961) “ The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus.” Proceedings of Fifth International Conference Soils Mechanics, Vol.1 pp. 13-21.

Bishop, A.W., (1959) “The Principle of Effective Stress” Teknisk Ukeblad, 39; pp. 859-863.

Blight, G.E. (1965) “A Study of Effective Stresses for Volume Change,” Symposium on Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Australia. Butterworths

Blight, G.E. and DeWet, J.A. (1965) “The Acceleration of Heave by Flooding,” Proceedings, Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Australia:Butterworth.

Blight, G.E. and Williams, A.B., 1971, “ Cracks and Fissures by Shrinkage and Swelling”, Fifth Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luanda, Angola, (Portugusse West Africa), August, pp.1-7.

Bolt, G.H. (1956) “Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clay,” *Geotechnique*, Vol. 6, No.2.

Bozozuk, M. (1972) Downdrag Measurements on a 160ft. Floating Pipe Test Pile in Marine Clay. *Canadian Geot. J.* Vol. 9 No.2, pp. 127-136.

Brackley, I.J.A., (1983), “ An Emprical Equation For the Prediction of Clay Heave”, *Proc. 7th Int. Asian Reg. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.8-14.

Brindley, G.W. and Thompson, T.D., 1970, “ Methylene Blue Absorption by Montmorillonites. Determination of Surface Areas and Exchange Capacities With Different Initial Cation Saturations ( Clay-Organic Studies XIX), *Israel Journal of Chemistry*, Vol.8, pp. 409-415.

Brooks, C.S., 1964, “ Mechanism of Methylene Blue Dye Adsorption on Siliceous Minerals”, *Kolloid Zeitschrift*, Vol.199, No.1, pp.31-36.  
Building Research

Board Panel, Federal Housing Administration (1968) “Chemical Soil Stabilization,” *National Academy of Sciences*.

Burland, J.B. (1977) “Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils,” *Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils*, Australia: Butterworth, pp.270-278.

Burland, J.B., (1977) “ Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils”, *Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, Australia, Butterworths, pp.270-278.



Chen, F.H. (1965) "The Use of Piers to Prevent the Uplift of Lightly Loaded Structures founded on Expansive Soils," Proceedings, 1st International Conference on Expansive Soils, College Station, Texas.

Chen, F.H.,1968. "Foundations on Expansive Soils", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford- New York ,280 pages

Coleman, J.D. (1965) "Geology, Climate and Vegetation as Factors Affecting Soil Moisture," Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Australia: Butterwoth.

Collin, L.E. (1953) A Preliminary Theory for the Design of Underreamed Piles. Trans. Southern African Institution of Civil Engineers, Vol. 3 No.11

Croney, D., Coleman, J.D. and Black, W.P.M. (1958) "Movement and Distribution of Water in Soil in Relation to Highway Design and Performance—Water and its Conduction in Soils," Highway Research Board, Special Report No. 40, Washington, D.C. , pp.226-52.

Çalışan, Ö.F., (1987), " A Study on Volume Change Behaviour of Silt Added METU Clay", M.S. Thesis, METU Civil Engng. Dept., 55 pages.

Daksanamurthy, V. and Raman, V., (1973) " A Simple Method of Identifying an Expansive Soil", Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.13, No.1, pp.97-104.

Damla, Ö.R., (1976) " Prediction of Swelling Potential and Swelling Pressure From the Double Oedometer Test", M.S. Thesis, METU, Civil Engng. Dept., 33 pages.

Davidson, L.K., Demirel, T. And Handy, R.L. (1965) "Soil Pulverization and Lime Migration in Soil-Lime Systems," Highway Research Record, Vol.92, pp. 103-126.

Dawson, R.F., (1989) “ Modern Practices Used in the Design of Foundations for Structures on Expansive Soils”, Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol.54, No.4., Oct., pp.67-87.

De Bruijn, C.M.A. (1967) “Laboratory Psychrometer/Cyroscope and Portable Psychrometer for Measuring Moisture Potentials of Soil Samples,” SMFE 4th Regional Conference for Africa, Cape Town.

De Bruyn, C.M.A., Collins, L.E. and Williams, A.A.B., (1957) “ The Specific Surface, Water Affinity and Potential Expansiveness of Clays”, Clay Minerals Bulletin, Vol.3, pp.120-128.

Dhowian, A.W., Ruwaih, I.E., Youssef, A.F. and Erol, O., (1984) “Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in the Kingdom of Saudi Arabia “, First Progress Report, Saudi Arabian National Center for Science and Technology, Contract No. AT-5-88, 253 Pages.

Donaldson, G.W. (1967), The Measurement of Stresses in Anchor Piles. Proc. 4<sup>th</sup> Regional Conf. for Africa on Soil Mech and Foundation Eng. Vol. 1, pp. 253-256.

Donaldson, G.W. (1975) “Types of Foundation for Expansive Soils,” Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, 6th Regional Conference for Africa, Durban.

Driscoll, R., (1983) “ The Influence of Vegetation on the Swelling and Shrinking of Clay Soils in Britain”, Geotechnique, Vol.33, No.2, pp.93-105.

Doruk, M., (1968) “ Swelling Properties of Clays on the METU Campus”, M.S. Thesis, METU, Civil Engng. Dept., 46 pages.

- Elias, M. (1967) "An Investigation of Moisture Movement in Soils and the Concept of Equilibrium Moisture Distribution with its Bearing on Pavement Performance"
- El-Sohby, M.A. and Mazen, D., (1983) "Mineralogy and Swelling of Expansive Clayey Soils", *Geotechnical Engineering*, Vol.14, pp.79-87.
- Emodi, B.S., (1946) "The Adsorption of Dyestuffs by Montmorillonite", *Clay Minerals Bull.*, 3, pp.76-79.
- Erol,O.,(1990) "Gerçek Kabarmaların Şişme Ödometre Metodu ile Karşılaştırılması" *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi*, Boğaziçi Üniversitesi, Cilt 1, ss.1-8.
- Erol, O.,Dhowian,A., ve Youssef,A.F., (1989) "A Comparative Study on Observed and Predicted Heave" *Journal of Engineering Sciences*. Vol15, No. 1
- Erol,O., Youssef,A.F., Dhowian,A., (1981) "Swelling Potential of Medina Clays"
- Proceedings, Sym. on Geotechnical Problems in Saudi Arabia*
- Fairbairn, F.E. and Robertson, R.H.S., (1956), "Liquid Limit and Dye Adsorption", *Clay Minerals Bulletin*, Vol.17, 3., pp.129-136.
- Fawcett, R.C. and Collis-George, N. (1967) "A Filter Paper Method of Determining the Moisture Characteristics of Soils," *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, Vol.7.
- Fourin, L., Millon-Devigne, P. and Lan, T.N., (1989) "Essai au Bleu et Nocivite des Montmorillonites dans les Materiaux Composites", *Bulletin de L'Association Internationale de Geologie de l'Ingenieur*, No.40, Paris, pp.91-96.

Fredlund, D.G. (1979) "Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils," Second Canadian Geotechnical Colloquium, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16 pp. 121-139.

Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977) "Stress State Variables for Unsaturated Soils," ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 103 (GT5), pp. 447-466.

Fredlund, D.G., Hanau, J.U. and Filson, H.L. (1980) "The Prediction of Total Heave," 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.2, Denver.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., (1993) "Soil Mechanics for Unsaturated Soils"

John Wiley and Sons. NY. 560 pages

Fredlund, D.G., (2001) "TC6 Committee Report on Laboratory Testing of Unsaturated Soils" Proceedings XV. Inter Conf. Soil Mech. and Geotechnical Eng. İstanbul

Furtun, U., (1989) "An Investigation on Ankara Soils With Regard to Swelling", M.S. Thesis, METU, Civil Engng. Dept., 151 pages.

Grim, R.E., (1953). "Clay Mineralogy ", Mc Graw- Hill Series in the Geological Sciences

Gromko, G.J., (1974) "Review of Expansive Soils", J. of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT6, June, pp.667-687.

Gromko, J.P. (1974), "Review of Expansive soils," Jour. Geotech. Eng. Div., Amer. Sec. of Civil Eng., Vol. 100, No. GT 6, pp.667-687.

Hang, P.T. and Brindley, G.W.,(1970) "Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange

Capacities (Clay-Organic Studies XVIII) “, Clays and Clay Minerals, Vol.18, pp.203-212.

Hardy, R.M., (1965) “ Identification and Performance of Swelling Soil Types”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, No.2, May, pp.141-153.

Higgs, N.B., (1988) “ Methylene Blue Adsorption as a Rapid and Economical Method of Determining Smectite”, Geotechnical Testing Journal, Vol.11, No.1, March, pp.68-71.

Hills, J.F. and Pettifer, G.S., (1985) “ The Clay Mineral Content of Various Rock Types Compared With the Methylene Blue Value”, J. of Chemical Technology Biotechnol. Chem.-Tech., 35A, pp.168-180.

Holland, J.E. (1980) “Discussion,” 4th International Conference on Expansive Soils, Vol. 2, Denver.

Holtan, H.N., England, C.B., Lewless, G.D. and Schmuller, G.A. (1968) “Moisture Tension Data for Selected Soils on Experimental Materials,” United States Department of Agriculture, pp.41-144.

Holtz, W.G., (1959) “ Expansive Clays- Properties and Problems”, Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol.54, No.4, Oct., pp.89-125.

Howard, A.K. and Bara, J.P. (1976) “Lime Stabilization of Friant-Kern Canal,” Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Report No. REC-ERC-76-20.

IX th Inter. Conf. On Soil Mech anf Found. Eng.Tokyo 1977

Jaeger, J.C., (1978) “ Elasticity, Fracture and Flow With Engineering and Geological Applications”, Chapman and Hall, 268 pages.

Jennings, J.E., and K. Knight (1957), "The Prediction of Total Heave from the Double Oedometer Test," Trans. Symposium on Expansive Clays, South Afr. Inst. of Civil Eng., pp.13-19.

Johnson, L.D. (1974) "An Evaluation of the Thermocouple Psychrometric Technique for the Measurement of Suction in Clay Soils," U.S. Army Engineering Station, Vicksburg, Mississippi, Technical Report S-74-1.

Johnson, L.D. (1977) "Evaluation of Laboratory Suction Tests for Prediction of Heave in Foundation Soils," U.S. Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, Technical Report S-77-7.

Johnson, L.D. (1980) "Field Test Sections on Expansive Soil," 4th International Conference on Expansive Soils, Vol. 2, Denver.

Jones, D.E. and Holtz, W.G., (1973) " Expansive Soils- The Hidden Disaster", Civil Engineering, Vol.43, No.8, pp.49-51. Jour. of Engineering Science Vol.15 No 1.

Kasapoğlu, K.E., (1980) " Ankara Kenti Zeminlerinin Jeomühendislik Özellikleri", Doçentlik Tezi, Hacettepe University, Geological Engineering Department, Beytepe, Ankara.

Katti, R.K. (1978) "Search for Solutions to Problems in Black Cotton Soils," 1st Indian Geotechnical Society Annual Lecture, Bombay, India.

Katti, R.K., Kulharni, U.V. and Kate, J. (1969) " A Note on Experimental Investigation on CNS Layer as an Intercepting Media for a Footing on Expansive Soils, " Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Expansive Soils, College Station, Texas.

Katti, R.K., Kulkarni, U.V. Beughale, E.S. and Divaskihar, D.G. (1979) "Shear Strength Development in Expansive Black Cotton Soil Media With and Without a Cohesive Non-Swelling Surcharge: Application to Stability

of Canals in Cuts and Embankments, "Report to Central Board of irrigation and Power, Delhi, India.

Kiper, O.B., (1983) " Etimesgut-Batıkent Yöresindeki Üst Pliosen Çökellerinin Jeomühendislik Özellikleri ve Konsolidasyonu", Ph.d. Thesis, Hacettepe University, Ankara.

Kocabayoğlu, E., (1971) " Contribution of Desiccation to the Preconsolidation of Ankara Clay ", M.S. Thesis, METU Civil Engng. Dept., 18 pages.

Komornik, A., Livneh, M. and Smucha, A. (1980) "Shear Strength and Swelling of Clays Under Suction," 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.2, Denver.

Krohn, J.P. and Slosson, J.E. (1980) 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.3, Denver.

Ladd, C.C. and Lambe, T.W., 1961, " The Identification and Behaviour of Compacted Expansive Clays", Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Paris, pp.201-205.

Lambe, T.W. (1960) "The Character and Identification of Expansive Soil," A report for the Federal Highway Administration.

Lambe, T.W. (1960) "The Structure of Compacted Clay," Transactions, American Society of Chemical Engineering, Vol. 125, p.681.

Lambe, T.W. and Whitman, B.V. (1959) "Behavior of Expansive Soils," 1st Annual Soil Mechanics Conference, Colorado School of Mines.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1959, " The Role of Effective Stress in the Behaviour of Expansive Soils", Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol.54, No.4, pp.33-61.

Lambe, T.W., 1958, “ The Structure of Compacted Clay “, J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. of the ASCE, Vol.84, No.SM2, part 1, pp.(1654-1)- (1654-34).

Lambe, T.W., 1960, “ The Character and Identification of Expansive Soils (Soil PVC Meter )”, A Report Completed for The Technical Studies Program of The Federal Housing Administration, MIT, 46 Pages.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1979, Soil Mechanics, SI

Lan, T.N., 1977, “ Un Nouvel Essai d’Identification des Sols. L’Essai au Bleu de Methylene, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 88, Mars-Avr., pp.136-137.

Lan, T.N., 1980, “ L’Essai au Bleu de Methylene, Un Progres dans la Mesure et le Controle de la Proprete des Granulats “, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 107, Mai-Juin, pp.130-135.

Lan, T.N., 1981, “ Utilisation de L’Essai au Bleu de Methylene en Terrassement Routier” , Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 111, Janv.-Fevr., pp.5-16.

Lautrin, D., 1987, “ Une Procedure Rapide d’Identification des Argiles”, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 152, Nov.-Dec., pp.75-84.

Lautrin, D., 1989, “ Utilisation Pratique des Parameters Derives de L’Essai au Bleu de Methylene dans les Projets de Genie Civil”, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 160, Fevr.-Mars., pp.53-65.

Locat, J., Lefebvre, G. and Ballivy, G., 1984, “ Mineralogy, Chemistry and Physical Properties Interrelationships of Some Sensitive Clays From Eastern Canada”, Can. Geotech., J.21, pp.530-540.



- Lohnes, R. (1974), "Ankara Soils with a Geological Perspective," Unpublished Report Prepared and Submitted to the Civil Engineering Department, METU
- Lytton, R.L. (1969) "Theory of Moisture Movement on Expansive Clays," Center for Highway Research, University of Texas, Austin, Sept., Research Report 118-1.
- Lytton, R.L. (1972) "Design Methods for Concrete Materials on Unstable Soils," Proceedings, 3rd International American Conference on Materials Technology, Rio de Janeiro, Brazil.
- Lytton, R.L. (1977) "The Characterization of Expansive soils in Engineering," Presentation, Symposium of Water Movement and Equilibrium in Swelling Soils, American Geophysical Union, San Francisco.
- Magnan, J.P. and Youssefian, G., 1989, "Essai au Bleu de Methylene et Classification Geotechnique des Sols", Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 159, Janv.- Fevr., pp.93-103.
- Mc Dowell, C. (1959) "The Relation of Laboratory Testing to Design for Pavements and Structures on Expansive Soils," Quarterly of the Colorado School of Mines. Vol. 54, No.4. pp.127-153.
- McKeen, G.R. (1980) "Airport Pavement Study," 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.2, Denver.
- Means, R.E., 1959, "Buildings on Expansive Clay", Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol.54, No.4, Oct., pp.1-31.
- Mitchell, J.K. (1967) "Components of Pore Water Pressure and Their Engineering Significance," Proceedings, 9th National Clay Conference, Clays and Clay Minerals, pp.162-184.

- Mitchell, J.K., 1976, "Fundamentals of Soil Behaviour", John Wiley and Sons, Inc., New York - London - Sydney- Toronto, 422 pages.
- Mitchell, P.W. (1980) "The Concepts Defining the Rate of Swell of Expansive Soil," 4<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils, Vol.2, Denver.
- Nevins, M.J. and Weintritt, D.J., 1967, "Determination of Cation Exchange Capacity by Methylene Blue Adsorption", Ceramic Bulletin, Vol.46, No.6, pp.587-592.
- Omay, B., 1970, "Swelling of Clays on METU Campus", M.S. Thesis, METU, Civil Engng. Dept., 73 pages.
- Ordemir, I., Alyanak, I. and Birand, A.A. (1965), "Report on Ankara Clay," Faculty of Engineering, METU, Pub. No.12, pp. 48.
- Ordemir, I., Soydemir, C., Birand, A., 1977, "Swelling Problems of Ankara Clays", 9th. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol.1, pp.243-247.
- Ordemir, İ., Soydemir, Ç, ve Birand, A.A. (1975) "Rock-Crushed Stone-Gravel Replacement Fill to Prevent Swelling of Kınık Clay," Special Report Submitted to the General Directorate of Waterworks, Turkey.
- Özkan, Y., 1987, "Killi Zeminlerde Kuruma Etkisiyle Meydana Gelen Fisur ve Çatlaklar ", Zemin Mekanigi ve Temel Muhendisligi Ikinci Ulusal Kongresi, Bogazici Universitesi, Cilt I, pp.201-218.
- Öner, M. and Birand, A., 1978, "Effect of an Impervious Surface Cover on the Soil Suction Equilibrium", METU Journal of Pure and Applied Sciences, Vol.10, No.2, pp.207-222.

- Özmelek, A.I., 1974, “ An Investigation of the Concept of Equilibrium Moisture Distribution and the Effect of Climatic Factors on Subgrade Moisture Conditions”, M.S. Thesis, METU Civil Engng. Dept. 197 pages.
- Panel Discussion (1980) 4th International Conference on Expansive soils, Vol. 2 Denver.
- Parcher, J.P. and Means, R.V. (1968) Soil Mechanics and Foundation Engineering, Ohio: Charles E. Merrill Pub.Co.
- Peterson, R. and Peters, N., 1963, “ Heave of Spillway Structures on Clay Shales”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.1, No.1, Sept., pp.5-15.
- Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1979) “Pile Foundation Analysis and Design”. John Wiley, London.
- Robertson, R.H.S. and Ward, R.M., 1951, “ The Assay of Pharmaceutical Clays “, Journal of Pharmacy Pharmacology, Vol.3, pp.27-35.
- Schreiner, H.D.,1987. “State of the Art Review on Expansive Soils “, Imperial College of Science and Technology, London, 113 pages.
- Seed, H.B., Mitchell, J.K. and Chan, C.K. (1962) “Swell and Swell Pressure Characteristics of Compacted Clays,” Highway Research Board, Bulletin No.313.
- Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. (1962) “Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays,” Journal SMFE Proceedings, ASCE, Vol. 88, No. SMJ.
- Shiming, H., 1984, “ Identification of Expansive Soils by Specific Surface Area Values “, Fifth Int. Conf. on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, May 21-23, pp.1-3.

Skempton, A.W., 1953, “ The Colloidal Activity of Clays”, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Zurich, Vol.1, pp. 57-67.

Snethen, D.R. (1980) “Characteristics of Expansive Soils Using Soil Suction Data, “ 4th International Conference on Expansive Soils, Vol. 2, Denver.

Snethen, D.R. and Johnson, L.D. (1977) “An Evaluation of Expedient methodology for Identification of Potentially Expansive Soils,” FHWA-RD-77-94.

Snethen, D.R., 1984, “Evaluation of Expedient Methods For Identification and Classification of Potentially Expansive Soils”, Fifth International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, pp.22-26.

Söylemez, N., 1972, “ Mineralogical Analysis of Ankara Clay by X-Ray Diffraction”, M.S. Thesis, METU Civil Engng. Dept., 89 pages.

Spangler, M.G. (1952) “Distribution in Capillary Moisture at Equilibrium in Stratified Soil,” Highway Research Board, Special Research Report No.2.

Statement of Review Panel (1965) Symposium on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soil Beneath Covered Areas, Australia: Butterworth.

Steinberg, M.L. (1980) “Deep Vertical Moisture Seals,” 4th International Conference on Expansive Soils, Vol.2, Denver.

Surgel, A., 1976, “ A Survey of The Geotechnical Properties of Ankara Soils”, M.S. Thesis, METU Civil Engineering Department , 96 Pages.

Taylor, R.K., 1985, “Cation Exchange in Clays and Mudrocks by Methlene Blue”, J. Chem. Tech. Biotechnol., 35A, pp.195-207.

Tourenq, C. and Lan, T.N., 1989, “ Mise en Evidence des Argiles par L’Essai au Bleu de Methylene”, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 159, Janv. - Fevr., pp.79-92.

Van der Merwe, D.H. (1964) “The Prediction of heave from the Plasticity Index and Clay Content of Soils,” Transactions, South African Institute of Civil Engineering No.6.

Van Impe, W.F. (Editor) (1988) Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Balkema.

Vijayvergiya, V.N. and Ghazzaly, O.I., 1973, “Prediction of Swelling Potential For Natural Clays”, Proc. 3rd Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, Israel, Vol.1, pp.227-236.

Ward, W.H., 1953, “ Soil Movement and Weather”, Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. , Zurich, Vol.1, pp.477-482.

Williams, E. (1958), discussion of paper “The Prediction of Total Heave from the Double Oedometer Test,” Trans. Symposium on Expansive Clays, South Afr. Inst. of Civil Eng., pp.24-26.

Wilson,G.W., (1997) Surface Flux Boundary Modelling for Unsaturated Soils” Geotech. Special Pub. No.68 Geo-Logan Conference Proceedings. ASCE Publn.

Worrall, W., 1958, “ Adsorption of Basic Dyestuffs by Clays “, Trans. Brit. Ceram. Soc., Vol.47, pp.210-17.

Wright, R.H. & Doe, G. (1989) Little Britain Project: Construction of Basement. Proc. Int. Conf. On Piling and Deep Foundations, London, Eds Burland J.B. and Mitchell, J.M. Vol.1 pp.221-230.

## **KISIM 11. SOKETLENMİŞ KAZIKLAR**

### **11.1. Genel**

Pek çok şartname, uç kazıklarının sağlam taban zeminine bir miktar girmesini öngörmektedir. Bu işlem, özel araç, gereç ve yapım özeni gerektirir. Yapı Ekonomisi açısından ise oldukça fazla bir maliyet artışını beraberinde getirir. Bu nedenlerle bir kazık socketinin kazığa etkiyen düşey ve yatay kuvvetler altında nasıl davranacağı ve ne şekilde, ne kadar yararlı olacağı, yanıtlanması gereken bir konudur. Bu kısımda, bu konu incelenecektir. İncelemede önce aksel yükler altında yükü taşımak için gereken socket boyunun hesaplanması anlatılacak, bundan sonra yatay yükler altındaki davranış ele alınacaktır. Bu bağlamda ötelenme değerlerinin saptanmasında pratik açıdan en önemli hususun kazık başının dönme miktarı olduğu bir kez daha vurgulanmalıdır. “Ankastre Başlı” bir kazık, 7. Kısımda açıklandığı gibi daha fazla yük taşımakta ve ötelenme miktarı da sınırlanmaktadır. Bu nedenle; tasarım ve yapım aşamalarında kazık başının ankastre olmasına özen gösterilmesini beklemek doğaldır. Bu nedenlerle bu kısımda “ankastre” başlı ve zemin seviyesinde yüklenmiş olan kazıkların yanal yük altındaki davranışı ele alınmıştır.

### **11.2. Aksel Kuvvetler ve Soketler**

#### **11.2.1. Kayalarda Dayanım**

Kazık socketinin içinde imal edildiği kayanın basınç dayanımı, her ne kadar bazı el kitaplarında kaya sınıflandırılmasına göre veriliyorsa da; (örneğin “Canadian Foundation Engineering Manual” 1985), bu direncin

laboratuvarda blok nümuneler üzerinde yapılan serbest basınc deneyleri ile veya arazi presiyometre deneyleri ile saptanması uygun olur.

Bu deneyler sonucunda Şeyl veya kireçtaşı gibi yumuşak kayaların dışındaki kaya zeminlerde güvenli basınc dayanımı aŐađdaki formülle bulunur:

$$q_a = q_{ul} K_{sp} b$$

(11.1)

Burada:

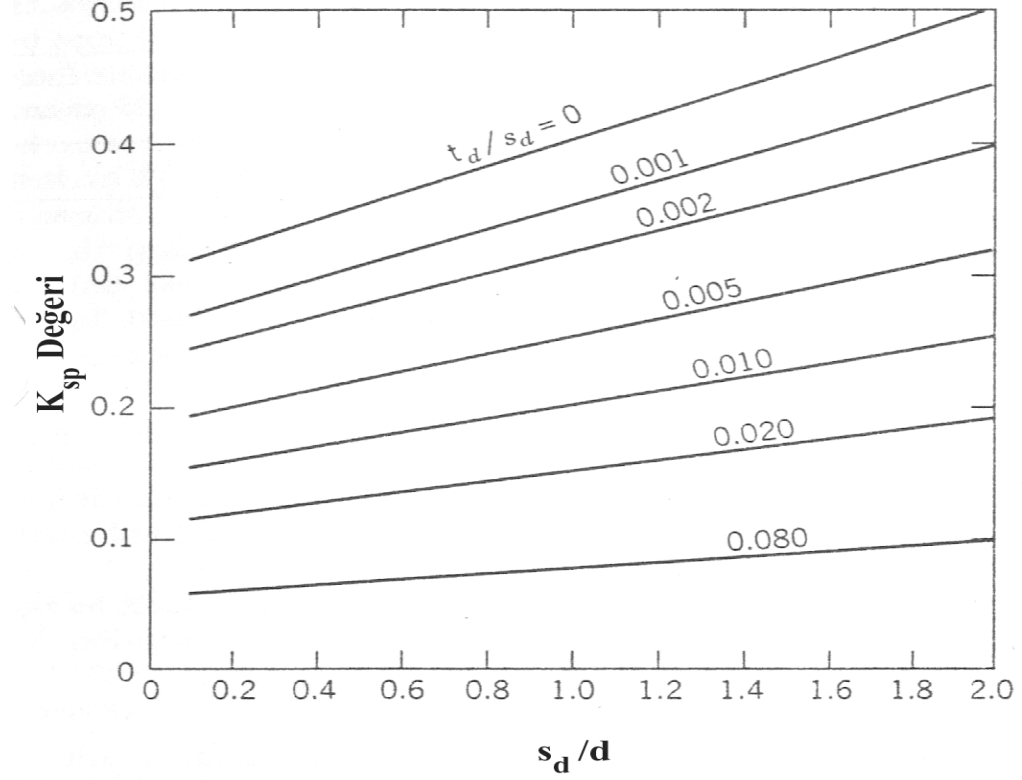
$K_{sp}$  = Şekil 11.1. Yardımı ile bulunabilecek olan bir ampirik katsayı,

$q_{ul}$  = Laboratuvarda Saptanmış Olan Serbest Basınc Dayanımı,

$b$  = aŐađda (11.2) bağıntısı ile tanımlanan bir derinlik faktörüdür.

$$b = [0.8 + 0.2(L_s / d)] \leq 2 \quad (11.2)$$

Burada  $L_s$  kazı soketinin boyu,  $d$  soketin çapıdır.



Şekil 11.1. Ampirik  $K_{sp}$  Katsayısı

Kaya örneklerinin dikkatle incelenmesi ile aşağıdaki çatlak vb süreksizliklerin belirlenmesi gereklidir.

$s_d$ =Süreksizlikler Arasındaki Açıklık,

$t_d$ =Süreksizliklerin Derinliği

Şeyl veya kireçtaşı gibi yumuşak kayaların direncinin ise yerinde presiometre deneyleri ile saptanması doğru olur.

### 11.2.2. Eksenel Yük Altında Soket Dayanımı

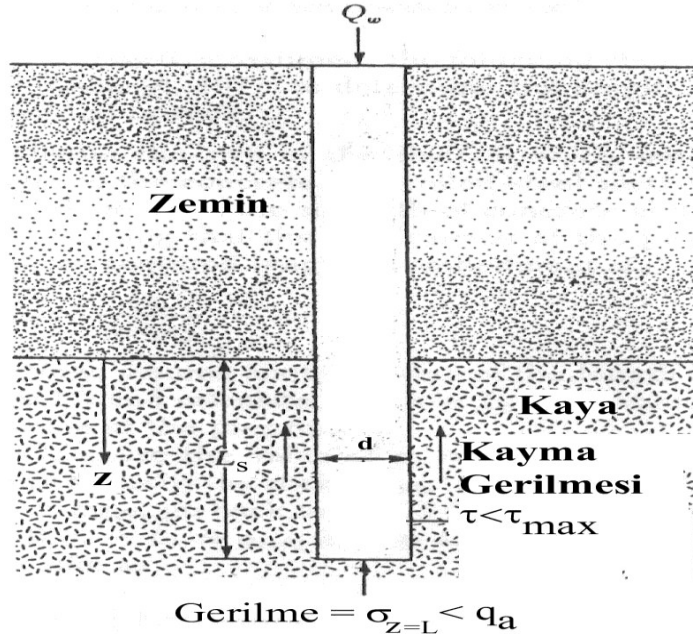
Bu dayanımın hesabı, aşağıdaki kabuller çerçevesinde yapılır:

- Kazık Zemin arasında yük transferi yoktur, yük; yalnızca soket tarafından kayaya iletilecektir. Bu kabul; sağlam yapılmış bir soketli uç



kazığının çevre zeminine göre oturmayacağı, dolayısı ile bir çevre sürtünmesi direncinin oluşmayacağı görüşüne dayanır.

b. Soket betonu ile kaya arasında aderans yoktur, yalnızca sürtünme vardır. Şekil 11.2 soketli kazığı ve kazık üzerine etkiyen yükleri göstermektedir.



Şekil 11.2. Soketli Kazık

Yukarıdaki kabuller altında, Şekil 11.2. ye referansla, soket kesidindeki basıncın derinlikle değişimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_z = \sigma_{\max} \exp \left[ - \frac{2\mu_c \tan \phi_{rc}}{1 - \mu_c + (1 + \mu_r) \frac{E_c}{E_r}} \frac{2z}{d} \right] \quad (11.3)$$

burada  $Q_w$  izin verilebilir servis yükü olmak üzere:

$$\sigma_{\max} = \frac{Q_w}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

(11.4)

Soket boyunca beton-kaya sürtünmesi nedeni ile kemerlenme olduğunu varsayan ve bunu yansıtan (11.3) denklemi, soketin başında ( $z=0$ ) oluşan  $\sigma_{\max}$  basınç değerinin, soketin ucunda ( $z=L_s$ ) belli bir değere indiğini göstermektedir.

Burada:

$\nu_c \nu_r$  = Betonun ve Kayanın Poisson Oranları,

$E_r, E_c$ , = Betonun ve Kayanın Elastik Modülleri,

$\mu_{rc}$  = Kaya-Beton Yüzeyindeki Sürtünme Açısıdır.

Analiz için izin verilebilir maksimum kayma gerilmesi değerine gereksinme vardır. Bu değer, (11.1) bağıntısı ile bulunan  $q_a$  değerinin yarısına 1.5 Güvenlik Katsayısı uygulanarak bulunabilir.  $\sigma_a = q_a/3$ .

Bu aşamadan sonra gerekli soket uzunluğu; kazık yükünün tamamını taşıdığı varsayımı ile; aşağıda gösterilen adımlar ile bulunur:

a. Kazığın enkesiti (A) ve çapı (d); uygulanan aksenal yükün, kazığın enkesit dayanımına bölünmesi ile saptanır.

$$d = \sqrt{\frac{4Q_w}{\pi \sigma_b}} \quad (11.5)$$

$\sigma_b$  = Kazık Enkesidinin Dayanımı,

b. Soketin, tüm kazık yükünü çeperdeki kayma gerilmesi aracılığı ile taşıyacağı varsayımı ile gerekli soket uzunluğu  $L_1$  hesaplanır.

$$L_1 = Q_w / d \tau_a \quad (11.6)$$

c. Ancak, bu basıncın bir kısmının soket ucuna iletileceği düşünülerek  $L_2 < L_1$  olacak şekilde yeni bir soket uzunluğu ( $L_2$ ) seçilir ve soketin ucundaki basınç (11.3) bağıntısı ile ve  $z = L_2$  kullanılarak saptanır.

d. Yukarıdaki c adımında hesaplanan  $\tau_{z=L_2}$  değeri (11.1) bağıntısı ile bulunan  $q_a$  ile karşılaştırılır. Eğer  $q_a$  aşılmışsa geri dönülür ve yeni bir  $L_2$  seçilir.

f. Yukarıdaki d adımında  $q_a$  aşılmamışsa kazık çevresindeki kayma gerilmesi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\tau = \left[ 1 - \frac{\sigma_{z=L_2}}{\sigma_{\max}} Q_w \right] \frac{1}{\pi d L_2} \quad (11.7)$$

Burada köşeli parantezin içindeki terimin yükün çevre sürtünmesi ile taşınan kısmı olduğu anlaşılacaktır.

g. (11.5) bağıntısı ile bulunan kayma gerilmesi  $\tau$  ile  $\tau_a$  karşılaştırılır.

f. Bu hesapların değişik soket boyları kullanılarak yapılması halinde görülecektir ki soket uzunluğu değiştirildikçe kazık ucundaki basınç ve kayma gerilmesi de değişecektir. Bu nedenle en ekonomik çözümün (en uygun soket boyunun) bulunabilmesi için  $\tau_{z=L_2} \leq q_a$  ve  $\tau \leq \tau_a$  şartını sağlayacak en kısa soket uzunluğu f. adımından sonra deneme yanılma ile devam edilerek bulunur.

### 11.3. Yanal Yükler Altında Davranış

Soketlenmiş Kazıkların ve soketlerin yanal yükler altında davranışı, bu kitabın birçok yerinde atıf yaptığımız Poulos ve Davis (1980) tarafından

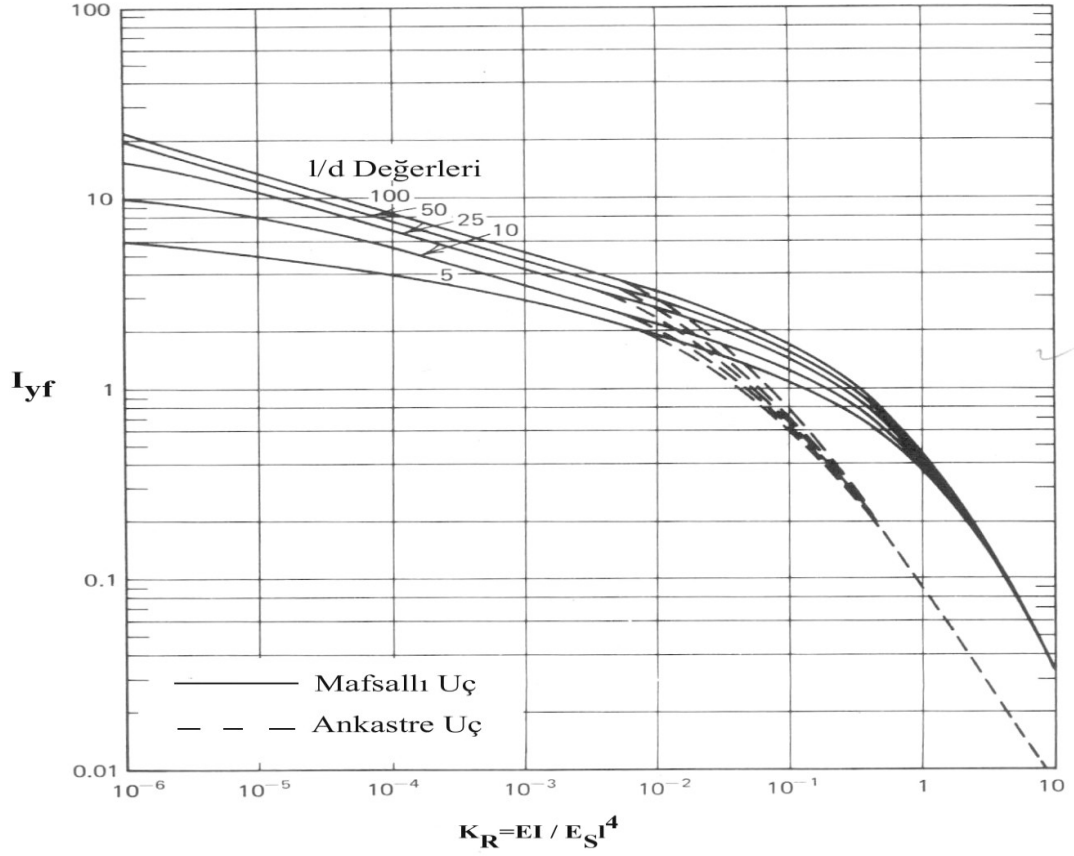
sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Bu paragraftaki şekiller, aksi belirtilmedikçe yukarıdaki kaynaktan alınmıştır. Çözümler, paragraph 11.1 de anlatılan nedenlerle ankastre başlı kazıklar için verilmiştir.

### 11.3.1. Yanal Ötelenme

Şekil 11.3. soketli bir kazığın yanal yük altında ötelenmesini göstermektedir. Bu Şekil; 6. Kısımındaki Şekil 6.26. nın soketli kazık çözümüne karşı gelen bir abaktır.  $I_{yf}$  ötelenme katsayısıdır.  $K_R$ , Kısım 6.da (6.85) ifadesi ile verilmiş olan boyutsuz parametredir. Hesap yapılırken aynen Kısım 6. da anlatılan yöntem izlenir:

$K_R$  hesaplandıktan sonra Servis Yüğü (H) Göçme Yüğüne Bölünerek ( $H_u$ ) Şekil 6.27 ve Şekil 6.29 de gösterilen abağı  $H/H_u$  değerleri ile girilir, zeminin göçme yüğüne yaklaşmayı temsil eden  $F_{yf}$  değeri bulunur. Sonra Şekil 11.3. yardımcı ile Ötelenme Katsayısı  $I_{yf}$  saptanır. Bu değerler aşağıdaki (11.8) bağıntısında kullanılarak, ankastre başlı kazığın başının ötelenmesi hesaplanır:

$$y_F = \frac{H}{E_s l} \frac{I_{yf}}{F_{yf}} \quad [6.87] \quad (11.8)$$

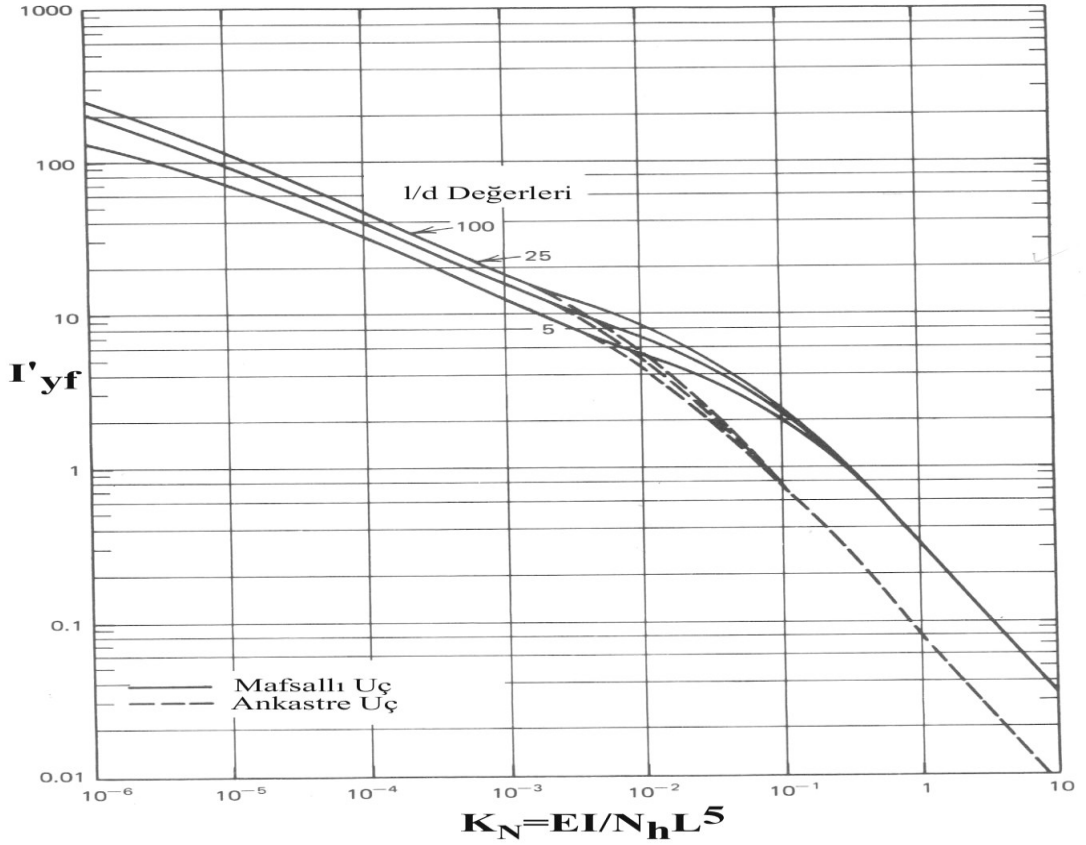


Şekil 11.3 Ankastré Başı Kazıkta Kazık Başı Ötelenmesi  
Tesir

Katsayısı ( $E_s = \text{Sabit}$ )

Şekil 11.4, Modülün derinlikle doğrusal olarak değişmesi halinde geçerli olan Ötelenme Katsayısını göstermektedir. Bu şeklin kullanımı ve hesap yöntemi aynen yukarıda, derinlikle değişmeyen modül halinde açıklanan şekildedir. Yalnızca rijitlik parametresi  $K_N$  nin hesaplanmasında (6.86) bağıntısı kullanılır. Ötelenme ise aşağıdaki 11.9 bağıntısı ile bulunur:

$$y_F = \frac{H}{N_h I^2} \frac{I'_{yf}}{F_{yf}} \quad (11.9)$$



Şekil 11.4 Ankastre Başlı Kazıkta Kazık Başı Ötelenmesi  
Tesir Katsayısı ( $N_h$ =Değişken)

Bu şekillerin incelenmesi mafsallı ve ankastre uç olmak üzere iki soket tipi kabul edildiğini göstermektedir. Bu nokta şöyle açıklanabilir:

Soket yapılmasının amacı; kazık ucundaki dönmenin kısıtlanarak kazık başı ötelenme miktarının ve momentlerin azaltılması, ayrıca yanal yüke karşı ek bir direncin sağlanmasıdır. Soketin içinde yapıldığı sert zemin veya kaya, tam anlamı ile sıkışamaz nitelikte değildir. Bu nedenle soket başına iletilen yükler nedeni ile soketin bir miktar dönmesi ve ötelenmesi doğaldır. Soketin bu hareketleri, hesap yöntemi aşağıda gösterilecek şekilde saptanabilir. Soket; bu hareket miktarına bağlı olarak ortaya atılan kriterlere göre “mafsal” ve “ankastre” olarak sınıflandırılır. Kazığın kendisi

de “mafsal uçlu” veya “ankastre uçlu ” şeklinde adlandırılır. Deyimlerden anlaşılacağı gibi mafsal bir soket, ankastre sokete nazaran daha fazla hareket etme olanağına sahiptir.

Diğer yandan Şekil 11.3. ve 11.4. ün incelenmesi, önemli bir noktayı gündeme getirmektedir:

Görüleceği gibi mafsal olsun, ankastre olsun soket yapılması halinde  $K_R(K_N)$  değerlerinin  $10^{-2}$  değerinden daha küçük olması halinde kazık başının ötelenme katsayıları ve dolayısı ile ötelenme miktarları fark etmemektedir.  $K_R(K_N)$  nin söz konusu değerleri ise “Esnek Kazık” veya “Uzun Kazık” tanımına uyan büyüklüklerdir. Sonuç olarak “Esnek” veya “Uzun” kazık tasarlanması halinde ankastre veya mafsallı soketlerin kullanılmasının kazıkların ötelenme miktarına ( ve dolayısı ile moment, kesme kuvveti vb) etki etmeyeceği söylenebilir.

Bundan daha önemli olan şudur ki  $K_R(K_N)$  nin söz konusu değerleri gözönüne alındığında Kısım 6 da soketlenmemiş (serbest uçlu) kazıklar için Şekil 6.26 ve 6.28 de görülen Ötelenme Katsayıları ile Şekil 11.3. ve 11.4. de verilen ötelenme katsayıları arasında büyük bir fark yoktur.

Sonuç olarak, pratikte karşılaşılan kazıkların pek çoğunu oluşturan “Esnek” kazıkların yanal yük altında davranışı açısından kazığı soketlemek veya soketlememek önem taşımamaktadır.

Bu, yanal yüklerin önemli olduğu pek çok problemde gözönüne alınması gereken bir olgudur. Deprem hareketlerinin kontrol altına alınması düşünülen kimi tasarımda soketlerden medet umulduğu ve bu amaçla “uzunca” soketlerin kullanıldığı dikkat çekmektedir. Dinamik hareket için bir sınır probleminin çözüm sonuçlarını yansıtan statik durumdaki bu bulgular mutlaka dikkate alınmalıdır.

### 11.3.2. Soketin Hareketi ve Etkinliği

Kazık Soketini çevreleyen sert zemin veya kayanın az da olsa sıkışabilir olması nedeni ile soket hareket edecektir. Soketin bu hareketlerinin, etkinliğini etkileyeceği yukarıdaki anlatımda belirtilmiştir.

Aşağıdaki (11.10) bağıntısı, iyi soketlenmiş, diğer deyişle “ankastre” bir soketin dönme miktarını vermektedir:

$$\theta_f = \frac{H}{E_s l^2} T_{of}$$

(11.10)

Burada:

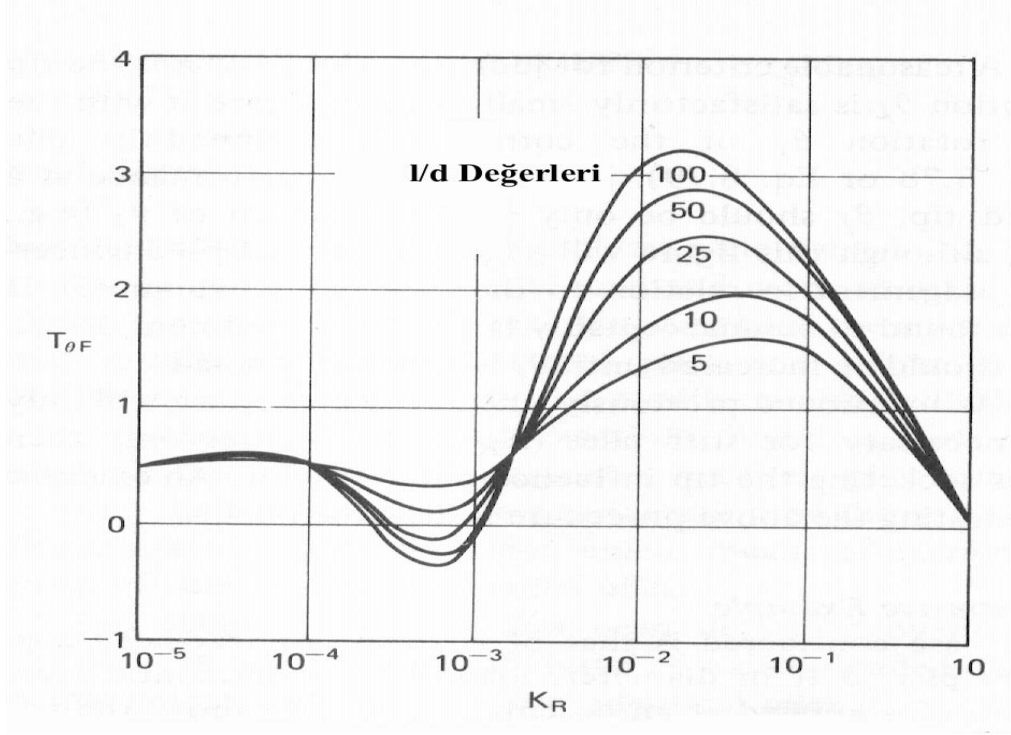
H= Kazık Başına Etkiyen Yanal Yük,

E<sub>s</sub>= Kazık Çevresindeki Zeminin Elastik Modülü,

l= Kazığın Boyu,

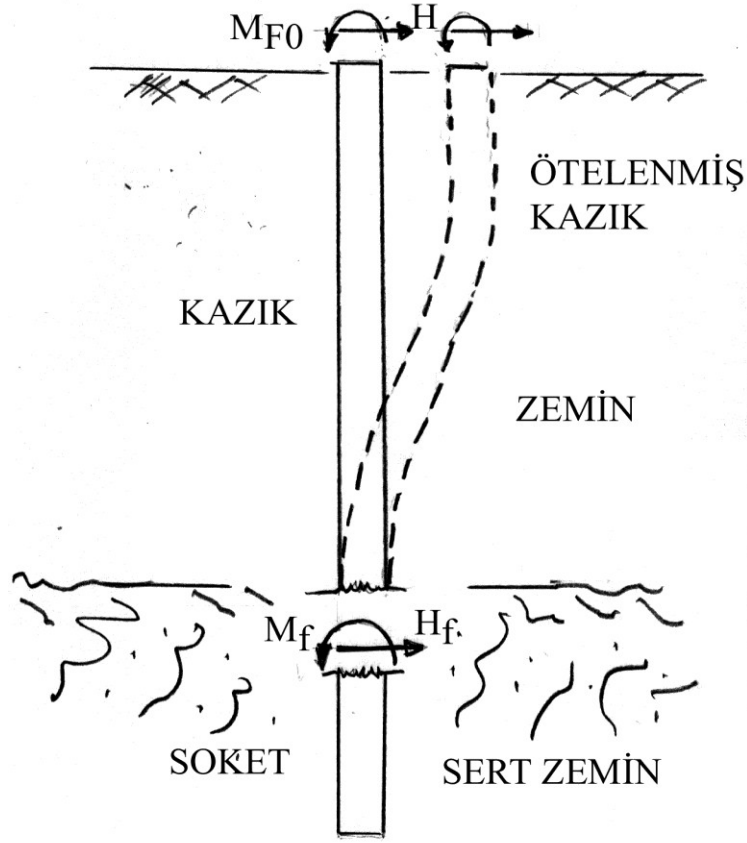
T<sub>of</sub>= Şekil 11.6. da gösterilen Dönme Etki Katsayısıdır.





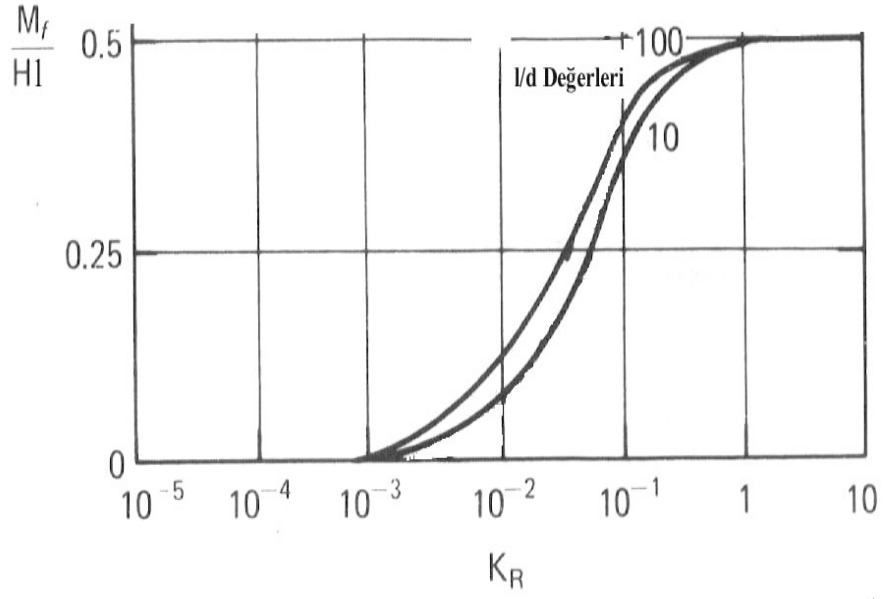
Şekil 11.5. Dönme Etki Katsayısı ( $T_{\theta F}$ )

Kazık ucundaki Söket, aşağıda Şekil 11.6 da gösterildiği gibi bir söket başı momentinin ( $M_f$ ) ve söket başı kesme kuvvetinin ( $H_f$ ) etkisi altındadır.

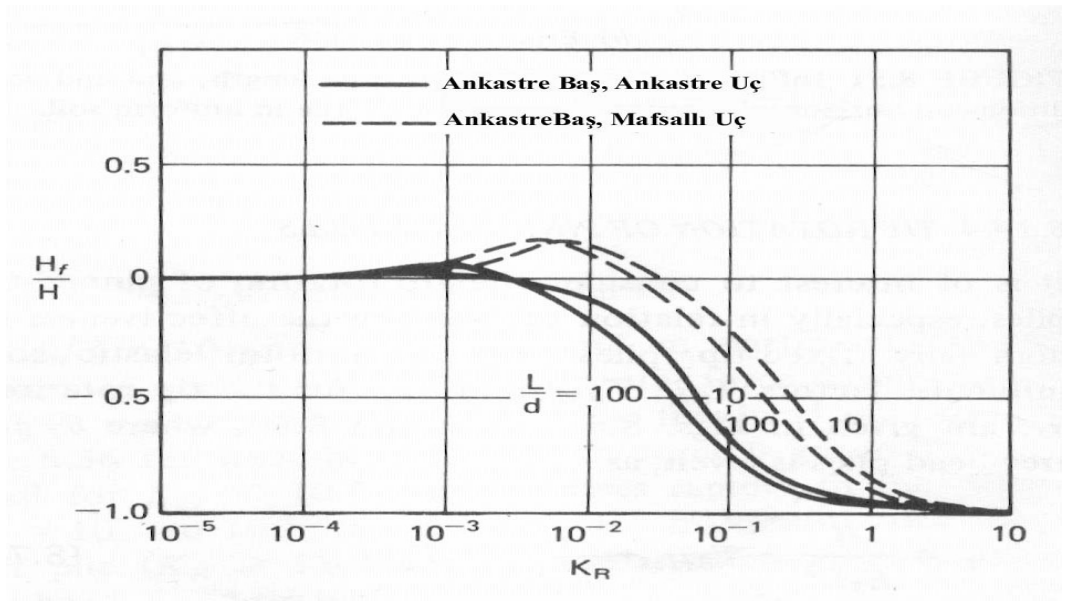


Şekil 11.6 Soksetli Kazık ve Kuvvetler

Bu kuvvetler, Şekil 11.7 ve Şekil 11.8 yardımı ile hesaplanabilir. Şekil 11.7 ile soket başı momenti  $M_f$ ,  $M_f / Hl$  boyutsuz oranı cinsinden verilmektedir. Burada  $H$  kazık yükü,  $l$  kazık boyudur. Narinlik oranı  $l/d$  nin 10 ve 100 değerlerine göre rijidlik katsayısının bir fonksiyonu olarak gösterilmiş olan moment üzerinde narinlik oranının büyük bir etkisinin olmadığı gözlenmektedir. Önemli diğer bir nokta ise  $K_R$  değerinin esnek kazıkları gösteren  $K_R < 10^{-2}$  ile  $K_R < 10^{-3}$  büyüklükleri için soket başı momentinin giderek küçülmesi ve sıfıra varmasıdır.



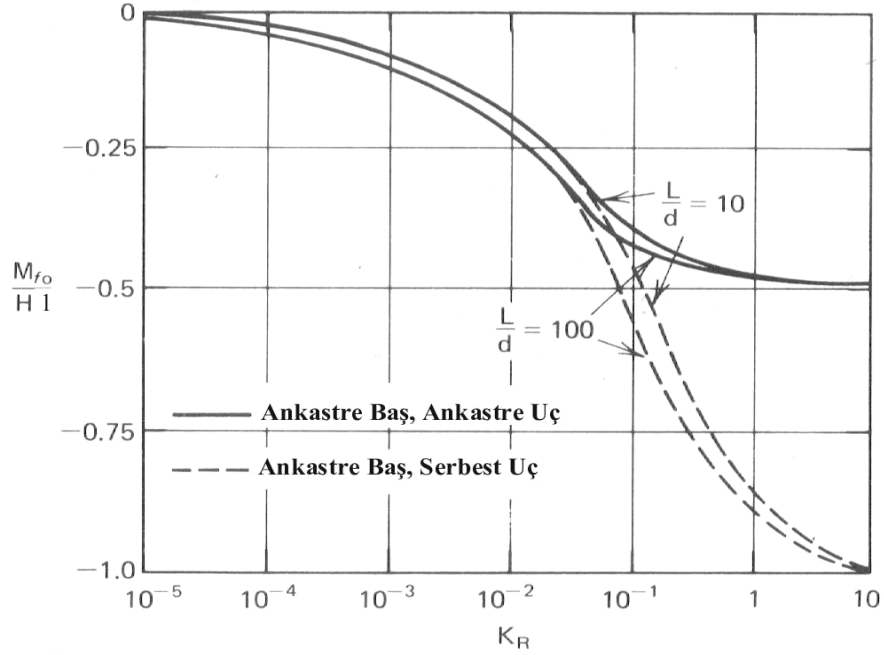
Şekil 11.7 Soket Başı Momenti  $M_f$



Şekil 11.8. Soket Başı Kayma Kuvveti,  $H_f$

Şekil 11.8 ile soket başı momentini Kesme Kuvveti  $H_f$ , Ankastre ve Mafsallı Soketler için  $H_f/H$  boyutsuz oranı cinsinden verilmektedir. Narinlik Oranının Kesme Kuvvetine etkisinin büyük olmadığı gözlenmektedir.

Ancak, bu şekilde de vurgulanması gereken bulgu,  $K_R$  değerinin esnek kazıkları gösteren  $K_R < 10^{-2}$  ila  $K_R < 10^{-3}$  büyüklükleri için soket başı Kesme Kuvvetinin de giderek küçülmesi ve sıfıra varmasıdır.



Şekil 11.9. Kazık Başı Ters Momenti,  $M_{f0}$

Şekil 11.9, kazık başında oluşan ankastrelik momentini göstermektedir. Yukarıdaki gözlemlere paralel olarak bu durumda da esnek kazıklarda ankastre veya mafsallı uçlu soketlerin davranışı aynı olmaktadır. Bu Şeklin Kısım 6 da verilmiş olan Şekil 6.30 ile kıyaslanması, esnek kazıklarda soket varlığının kazık başı ters momentini etkilemediğini ortaya koymaktadır.

Diğer yandan soketin kendisi; Şekil 11.6 ile gösterilen kuvvetleri taşıyan kaya içindeki bir kazık olarak düşünülebilir. Bu durumda:

- Sokete uygulanan yatay kuvvet  $H_f$  in soketi çevreleyen zeminin

dayanımından fazla olmaması gerekmektedir. Bu husus kontrol edilmelidir:

$$H_f < q_a d L_s / f_s \quad (11.11)$$

b. Böyle bir kazığın dönme miktarı, kazık başı kuvvetleri  $M_f$  ve  $H_f$  e bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$\theta = \frac{H_f}{E_k L_s^2} I_{\theta H} + \frac{M_f}{E_k L_s^3} I_{\theta M} \quad (11.12)$$

Burada:

$H_f$  ve  $M_f$  Soket Başı Kuvvetlerini,

$L_s$  = Soket Boyunu,

$I_{\theta m}$  ve  $I_{\theta h}$  = Moment ve Kesme Kuvveti Nedeni ile Dönme Tesir Katsayılarını,

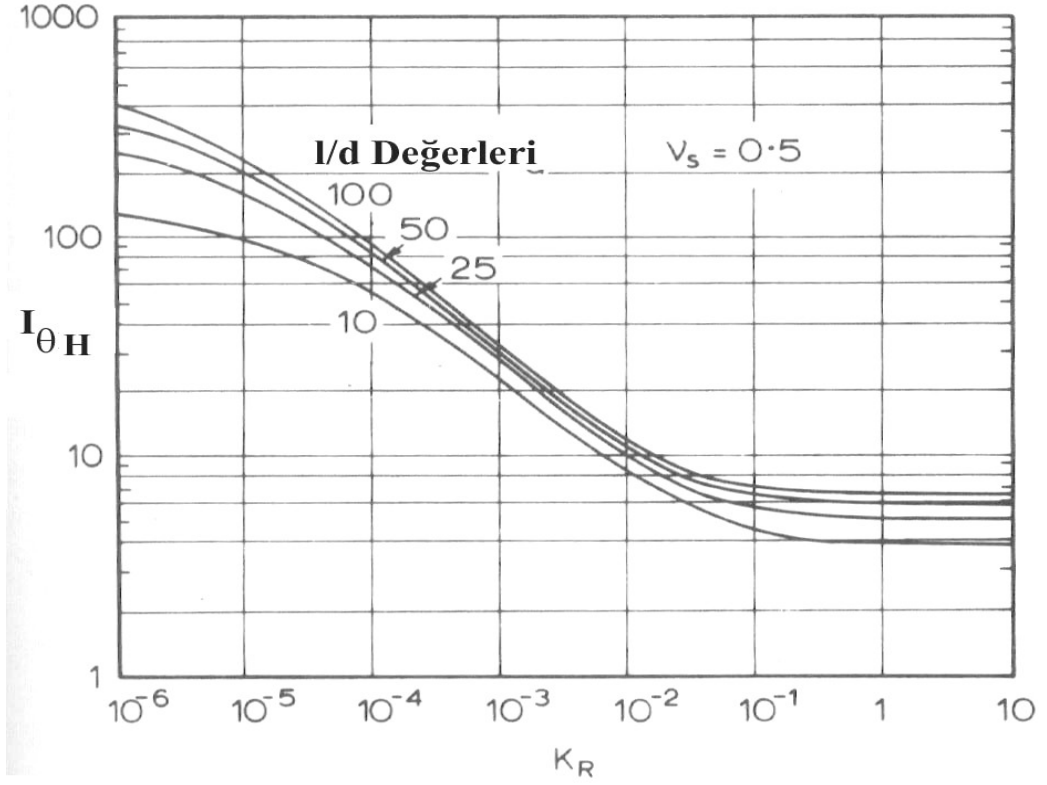
$E_k$  = Sokeni Çevreleyen Zeminin Elastik Modülünü göstermektedir.

Şekil 11.10, soket başındaki Kesme Kuvveti Etki Katsayısını, Şekil 11.11 ise Moment Etki Katsayısını, kazık rijidliği ve narinlik oranlarına bağlı olarak göstermektedir.

Bu durumda kazık rijidliği  $K_R$ , kazığı çevreleyen zeminin Elastik Modülü ve soket boyu gözönüne alınarak hesaplanır:

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_K L_S^4}$$

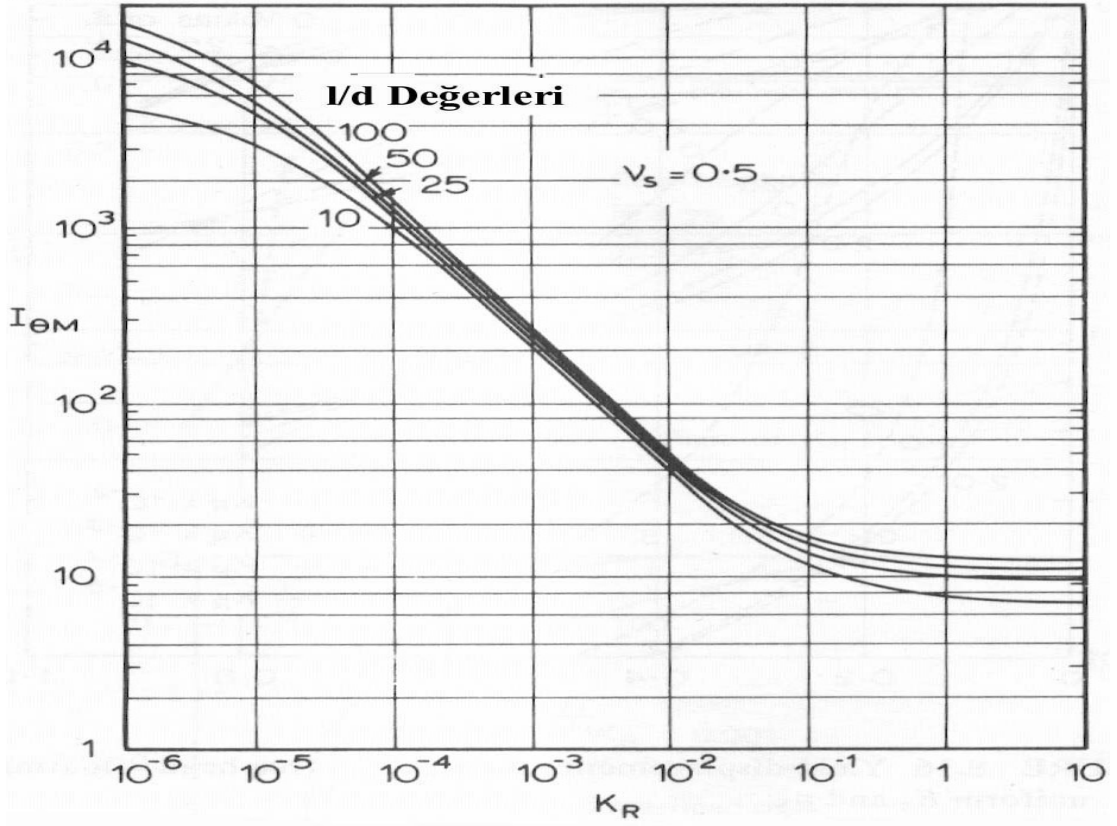
(11.13)



Şekil 11.10. Kesme Kuvveti Dönme Etki Katsayısı

Kazık socketinin gerçek dönmesi, (11.12) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Diğer taraftan, ankastre bir kazığın dönmesi ise (11.10) bağıntısı ile tanımlanmaktadır.

Bir kazık socketinin “ankastre” sayılabilmesi için (11.12) bağıntısı ile hesaplanmış olan gerçek dönme “ $\theta$ ”, (11.10) bağıntısı ile hesaplanmış olan dönme miktarı “ $\theta_f$ ” in en fazla %5 i kadar olmalıdır. ( $\theta \leq 1.05\theta_f$ )



Şekil 11.11. Moment Dönme Etki Katsayısı

### 11.3.3. Örnek 11.1

Yukarıdaki öğretinin daha iyi kavranabilmesi için aşağıdaki örnek sunulmaktadır:

Örnekteki Kazık ve Zeminin Özellikleri aşağıda listelenmiştir:

$$d=0.80 \text{ m}$$

$$l=20 \text{ m}$$

$$E_s=5000 \text{ KN/m}^2$$

$$E=21 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$$

$$E_k=14.7 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$$

$$\square_c = \square_r = 0.3$$

$$\square_{rc} = 38^0$$

$$q_{ul} = 8000 \text{ KN/m}^2$$

$$s/d = 2; t_d/s_d = 0; K_{sd} = 0.5$$

$$C_u = 25 \text{ KN/m}^2$$

$$\square_b = 5000 \text{ KN/m}^2$$

$$Q_w = 2600 \text{ KN}$$

$$H = 350 \text{ KN}$$

Çözüm:

11.3.3.1. Eksenel Yük için Çözüm:

(11.5) kullanılarak

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 2600}{5000 \times \pi}} = 0.813 \text{ m. bulunur.}$$

$d = 0.80 \text{ m}$ . Soket uzunluğu  $1.0 \text{ m}$  kabul edilirse (11.1) ile:

$$b = 0.8 + 0.2 \frac{1.0}{0.8} = 1.05 \text{ ve (11.2) ile:}$$

$$q_a = 8000 \times 1.05 \times 0.5 = 4200 \text{ KN/m}^2$$

$$\square_a = q_a / 3 = 1400 \text{ KN/m}^2$$

Yükün yalnızca kaya-soket yüzeyindeki kayma gerilmesi ile alınacağı düşünülerek bir deneme uzunluk bulunursa:

$$L_s = \frac{Q_w}{\pi d \tau_a} = \frac{2600}{\pi \times 0.80 \times 1400} = 0.738 \text{ m}. \text{ Bir kısım yükün soket ucuna}$$

intikal etmesi düşünülerek soket uzunluğu kısaltılabilir. Bu uzunluk  $0.70 \text{ m}$  olarak kabul edilerek hesaplara devam edilecektir.

Bu durumda  $b$  tekrar hesaplanırsa:



$$b = 0.8 + 0.2 \frac{0.7}{0.8} = 0.975 \text{ ve (11.2) ile:}$$

$$q_a = 8000 \times 0.975 \times 0.5 = 3900 \text{ KN/m}^2$$

Kayada süreksizlik olmadığından bu kez kayanın izin verilebilir kayma direnci  $\sigma_a = 3900/2 = 1950 \text{ KN/m}^2$  alınacaktır.

$$(11.3) \text{ kullanılarak soket ucu seviyesinde, } \sigma_{z=L_s} = 3775 \text{ KN/m}^2 < q_a = 3900 \text{ KN/m}^2$$

bulunur.

Ayrıca (11.7) ile kayma gerilmesi hesaplanırsa:

$$\sigma = 325 \text{ KN/m}^2 < \sigma_a = 1950 \text{ KN/m}^2 \text{ olur. Bu durumda 0.70 m lik soket uzunluğunun hem kesme kuvveti, hem de taban basınçları açısından aksenal yükü karşılamaya yeterli olduğu anlaşılmıştır.}$$

Bu kazığın ucunun soketlenmeyip kayanın temizlenmesi ile doğrudan oturtulacağı varsayılırsa kazık tabanında meydana gelecek olan basınç, aşağıda gösterildiği gibi izin verilebilir kaya dayanımını aşacak idi:

$$\sigma = 2600/0.5 = 5200 > q_{ul}/3 = 8000/3 = 2666 \text{ KN/m}^2$$

Bu durumda, bu aşamada kazık çapının genişletilmesi yoluna gidilerek soket yapımından vaz geçilebilir, ancak bu, alternatifler arasında bir ekonomik kıyaslamayı gerektirir. Aşağıda açılacak olan hususlar bu konuda verilecek kararları ayrıca etkileyecektir.

### 11.3.3.2. Yanal Yük için Çözüm:

Kazık Başının Ötelenmesi:

$$(6.85) \text{ ile } K_R = 5 \times 10^{-4} < 10^{-2} \text{ olup Kazık Esnektir.}$$

$$H_u = 0.5 \times 20 \times 9 \times 25 \times 0.8 = 1800 \text{ KN}$$

$$H/H_u=350/1800=0.194$$

Şekil 6.27 ile  $F_{yf}=0.90$  ve

Şekil 11.3 ile  $I_{yf}=6.0$

Ankastre başlı kazığın başının ötelenmesi, (11.8) bağıntısı kullanılarak:

$$y_f = 6x \frac{350}{5000x20x0.9} = 0.023m = 23mm$$

Yukarıda değinildiği gibi soketsiz bir kazık için de bu ötelenme farklı olmayacaktır.

Örneğin bu noktaya kadar olan kısmı ile socketin, kazığın davranışı üzerinde bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

Konuyu daha iyi açıklayabilmek amacı ile, diğer bütün veriler aynı kalmak kaydı ile kazığın boyu  $l=6.0$  m ye indirilerek rijid bir kazığın davranışı sergilenecektir.

Unutulmaması gereken nokta, aşağıda yapılacak olan kıyaslamalarda kazık boyunun değil, esas olarak kazık rijidliğinin davranışa etkisinin sonuçlarının kıyaslanacağıdır.

Bu durumda  $K_R=6.5 \times 10^{-2} > 10^{-2}$  olup Kazık Rijittir.

Bu durumda socket, “mafsallı” veya “ankastre” olarak ayrılacak ve hesaplar bu ayırım gözetilerek yapılacaktır. Bu hesaplar Tablo 11.1 de özetlenmiştir:

Bu tablonun incelenmesi, rijid bir kazık için, socketin mafsalı veya ankastre olması durumlarında kazık başının ötelenme miktarının farklı olduğunu göstermektedir. Ancak, socket mafsalı olursa, socketin hiç olmaması durumu ile yaklaşık olarak aynı sonuç elde edilmektedir.

Tablo 11.1 Rijit Kazığın Ötelenmesi

| Özellik          | Ankastre Soket | Mafsallı Soket | Soket Yok |
|------------------|----------------|----------------|-----------|
| $I_{yf}$         | 1.0            | 2.0            | 2.1       |
| $F_{yf}$         | 0.9            | 0.9            | 0.9       |
| $y_f(\text{mm})$ | 3.9            | 7.8            | 8.2       |

Tablo 11.2 Kuvvetler

| Kuvvetler | Esnek Kazık<br>$K_R = 5 \times 10^{-4}$ | Rijid Kazık<br>$K_R = 6.5 \times 10^{-2}$ |           |
|-----------|---|---|-----------|
|           |   | Ankastre                                  | Mafsallı  |
|           |   |   | Şekil No. |

|                 |       |       |       |      |
|-----------------|-------|-------|-------|------|
| $H_f/H$         | 0     | -0.5  | -0.05 | 8.56 |
| $H_f$ (KN)      | 0     | -175  | -17.5 |      |
| $M_f/Hl$        | 0     | 0.05  | Yok   | 8.53 |
| $M_f$ (KN.m)    | 0     | 105   | Yok   |      |
| $M_{f0}/Hl$     | -0.08 | -0.05 | -0.40 | 8.52 |
| $M_{f0}$ (KN.m) | -560  | 735   | -840  |      |

Sokete iletilen kuvvetler ve Kazık Başında oluşan kuvvetler Tablo 11.2. de özetlenmiştir. Tablo 11.2 nin incelenmesi ile şu hususlara dikkat çekilebilir:

-Esnek kazıkta, kazık esneyerek tüm yanal kuvveti komşu zemine aktardığından, sokete yük gelmemektedir.

-Mafsallı bir sokette moment oluşmaması doğaldır. Hesaplar bunu yansıtmaktadır.

-Esnek bir kazık halinde sıfır olan soket momenti, ankastre bir soket için oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Tasarımda, Kısım 6. da görüldüğü gibi çoğu kez momentin kazığın üçte biri derinliği içinde söndüğü varsayımı yapılır. Soketsiz kazıkların tasarımı için gerçekçi olan bu kabul ile tasarımın yapılması, ancak şartnameler öngörüyor diyerek kazıkların soketlenmesi, rastlanılan bir durumdur. Soketli kazıklar için soket hesabına yer verilmemesinin ve bu hesaba göre donatı öngörülmemesinin, istenilmeyen sonuçlar doğuracağı ortadadır.

-Kazıkların soketlenmesinin, kazık başı momentlerini arttırdığı görülmektedir.

$$\text{Soket için rijidlik katsayısı } K_R = \frac{422.23 \times 10^3}{14.7 \times 10^6 \times (0.70)^4} = 0.12 \text{ dir.}$$

Soketin dönme miktarı, ankastre bir soketin dönme miktarı ile Tablo 11.3 de karşılaştırılmıştır:

Tablo 11.3. Dönme Miktarları

|                | Katsayılar ve Dönme | Kaynaklar           |
|----------------|---------------------|---------------------|
| $T_{\theta F}$ | 2.4                 | (11.10); Şekil11.5  |
| $I_{\theta h}$ | 6                   | (11.12); Şekil11.10 |
| $I_{\theta m}$ | 12                  | (11.12); Şekil11.11 |

|                   |                       |  |
|-------------------|-----------------------|--|
| $\theta_f$ (rad.) | $4.7 \times 10^{-3}$  |  |
| $\theta$ (rad.)   | $1.09 \times 10^{-4}$ |  |
| $\theta_f/\theta$ | $0.023 < 0.05$        |  |

Tablo 11.3. incelenen soketin ankastre olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, yukarıdaki Tablolarda ankastre soket için hesaplanan sonuçlar geçerlidir.

(11.11) bağıntısı ile soketin yanal yük karşısında güvenliği aşağıdaki gibi irdelenebilir:

$$0.7 \times 0.80 \times 3900 / 3 = 728 \text{ KN} > 175 \text{ KN} . \text{ Güvenlidir.}$$

#### 11.4. Görüşler

*Yukarıda anlatılan teori ve çözülen örnek, kazıkları soketlemek konusunda dikkatli davranılması gerektiğini göstermektedir. Kazığın esnek olması durumunda, kazıkları soketlemenin bir yarar sağlamayacağı anlaşılmaktadır. Bu noktada 11.3.1 paragrafının sonunda varılan yargılara dikkat edilmelidir. Diğer bir önemli nokta ise etkin bir kazık soketi yapımının çok dikkat isteyen ve ayrıca özel araç ve gereç gerektiren bir iş olduğudur. Foraj işleminin niteliğine göre soket içine yukarıdan dolan ve/veya yıkanan zeminin, soketin etkinliğini azaltabileceği düşünülmelidir. Bu nedenle, soket çukurunun, istenilen çapta, derinlikte ve temizlikte açılması, ayrıca donatı yerleştirme ve betonlama işlemleri özel gereçlerle gözlenmelidir. Bu nedenle, soketlerin yararlı olacağına saptanması ve tasarımın bu şekilde gerçekleştirilmesi*

*durumunda, bu işi gerçekten yapabilecek elemanlara ve kuruluşlara gereksinim olduğu gözden kaçırılmamalıdır.*