

## Kazık Temellerin Bilgisayar Destekli Analizi

Devrim Alkaya<sup>1</sup>, Burak Yeşil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yard. Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli  
<sup>2</sup> Öğretim Gör., Düzce Üniversitesi, DMYO İnşaat Tek. Bölümü, Düzce  
devrimalkaya@hotmail.com, burakyesil@duzce.edu.tr

**Özet:** Bu çalışmada öncelikle geoteknik mühendisliğinin çeşitli uygulamalarında günümüzdeki teknolojik gelişmelerin de bir sonucu olarak giderek yaygın üretim potansiyeli kazanan kazıklı temel sistemlerinin genel olarak fonksiyonel özellikleri, kullanım amaçlarına ve seçim kriterlerini oluşturan teknik-ekonomik sınır şartlarına bağlı olarak kullanıldığı yerler kısaca açıklanmış; literatürde mevcut çeşitli kriterlere göre sınıflandırılan kazıklı temeller özetlenmiştir. Çalışma kapsamında kazık temellerin hızlı, doğru ve güvenilir bir şekilde tasarımı yapabilmek için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Hazırlanan programda üç farklı yöntemle taşıma gücü analizi yapılabilmektedir. Farklı yöntemlerin sonuçları kullanılarak daha güvenilir ve hızlı çözüm yapılması amaçlanmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Kazık Temeller, Yazılım, Geoteknik, Programlama.

## Computer Aided Analysis of Pile Foundations

**Abstract:** In this study, geotechnical engineering, primarily as a result of technological developments in various applications, the current production potential winner increasingly common functional properties of pile foundation systems in general, make use of selection criteria, goals, and due to the technical-economic boundary conditions are used as briefly explained, according to various criteria available in the literature classified piled foundations are summarized. Working under the pile foundations are fast, accurate and reliable way to be able to design a computer program has been developed. Analysis of bearing capacity of the program can be prepared in three different ways. Using the results of the different methods is to give more reliable and faster solution.

**Keywords:** Pile Foundation, Software, Geotechnic, Programming

### 1. Giriş

Üst yapı yüklerini kısmen ya da tamamen zemin yüzeyinden daha derinlerdeki tabakalara aktaran temel derinliği ile temel genişliği oranı en az 5 ve daha büyük olan sistemler derin temeller olarak tariflenmektedir [1]. Derin temeller arasında kazıklı temeller, ayak-keson temeller ve derin kazılar içine yerleştirilen yapı temelleri düşünülebilir.

Kazıklar çelik, beton veya ahşaptan imal edilen bir tür yapı elemanı olarak tanımlanabilirler. Kazıklar yapımı yüzeysel temellere kıyasla daha pahalı olan derin kazıklı temel inşaatı uygulamalarında kullanılırlar. Yüzeysel temel sistemlerine göre daha pahalı olmalarına karşın çeşitli nedenlerle kullanılmalrı oldukça gerekli ve hatta avantajlı olabilmektedir.

Kazıklar, zemin yüzeyine yakın tabakaların üst yapı yüklerini göçmeden veya üst yapıda hasara neden olacak şekilde fazla oturmadan taşıyabileceği bir yüzeysel temelin uygulamasına uygun olmadığı hallerde, üst yapı yüklerini zemin profilinin derinliklerinde yer alan taşıyıcılık özelliği yüksek tabakalara aktarmak amacıyla kullanılan ahşap, beton, çelik veya kompozit yapı elemanlarıdır.

Kazıklar çoğunlukla düşey basınç yüklerini taşırlar. Bununla birlikte kazıkların, rüzgâr, deprem ve dalga kuvvetleri gibi yatay kuvvetlere, suyun kaldırma etkisi gibi çekme kuvvetlerine ya da üst yapıya gelen yanıl kuvvetler nedeniyle döndürme momenti etkisine

maruz kaldığı kullanım alanları da vardır. Üst yapı yüklerinin zemine emniyetli bir şekilde aktarılabilmesi için pratikte en az 3 ya da 4 kazıktan oluşan kazı grupları teşkil edilir.

Bir kazıklı temelin tasarımında, zemin profilinin yapılan sondajlarla hassas olarak belirlenmesi ve zemin profilindeki çeşitli tabakaların mühendislik karakteristiklerinin bilinmesi ve böylelikle genel hatları ile zemine yük aktarma mekânizmasına göre kullanılacak kazığın tipine karar verilmelidir. Kestirilen zemin profili ve kazık tipine bağlı olarak, tek kazığın veya kazık gruplarının emniyetle taşıyabileceği yükler hesaplanmalıdır. Ancak bir kazık grubunun taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yapılacak yükleme deneyleri çok fazla yük gerektirdiği ve pahalı olduğu için, uygulamada çoğu kez tek bir kazığın taşıma kapasitesi belirlenerek, kazık gurubunun taşıma kapasitesinin tahmin edilmesine çalışılır. Bu tahminlerde gerilme alanlarının girişim yapması nedeniyle bir kazık grubunun taşıma kapasitesi bulunurken, tek bir kazığın taşıma kapasitesi ile gruptaki kazık sayısının çarpımı sonucunda elde edilen değer anılan girişim etkisini ortaya koyan bir grup faktörü ile çarpılmaktadır.

Kazıklı temellerin projelendirilmesinde, oturmalar genellikle önemli bir proje kriteri olarak göz önünde tutulmaz. Bununla birlikte, göçmeye karşı güvenliğin bulunduğu yanı sıra, servis yüklerinin meydana

getireceği oturmaların izin verilebilir sınırları aşmadığı gösterilmelidir.

## 2. Kazıkların Fonksiyonları

Kazıkların ana fonksiyonu yapı temelinden zemine intikal eden yükleri gevşek ve yumuşak zemin tabakalarının altında yer alan taşıma gücü yüksek, sıkışabilirliği az sağlam zemin tabakalarına aktarmaktır. Ancak kazıklar petrol platformu gibi deniz yapılarında ve yatay yük etkisine maruz yapılarda doğrudan üst yapı yüklerini taşımak amacıyla da kullanılabilirler. Düşey yüklere maruz kalan bir kazığın nihai taşıma gücü, kısmen kazık ucunda oluşan noktasal direncin, kısmen de kazık shaftı ile temas halinde olan zemin yüzeyi ile kazık yüzeyi arasında gelişen aderansla ilişkilendirilen yüzeysel sürtünme direncininin bileşkesi olmaktadır [8]. Ortam koşullarına bağlı olarak uç taşıma ve yüzeysel sürtünme kuvvetlerinin nihai taşıma gücü içindeki payları değişkendir. Bu değişkenliği kontrol eden faktörler, kazığın içine yerleştirildiği jeolojik ortamın geoteknik özellikleri, kazığın geometrik koşulları, narinliği ve uygulanan yüklerin büyüklüğüdür.

Düşey yüklere maruz kazıklarla yatay yük etkisinde kalan kazıkları karşılaştırırken zemin yüzeyinin yakınlarında ortaya çıkan değişimleri de dikkate almak gerekir. Zemin yüzeyine yakın bölümlerde etkili olan mevsimsel nem farklılıkları kazık davranışında önemli değişikliklere yol açabilmektedir. Bu yüzden kazıkların yatay yük etkisindeki davranışlarının tahmin edilmesi, düşey yük etkisindeki davranışlarının tahmin edilmesinden pratik olarak daha zordur [6].

Kazıklar, üst yapı yüklerini çoğu kez ekselel basınçla taşımakla birlikte, açık deniz platformları, rıhtım, şev ve iksa yapılan gibi mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan deprem, dalga, darbe kaldırma, yanal toprak itkisi ve çekme türü kuvvetlerin karşılanması gibi görevleri de gerektiğinde üstlenebilmektedir.

## 3. Kazıkların Kullanım Amaçları

Kazıklar aşağıda belirtilen başlıca amaçlara hizmet etmek üzere inşa edilmektedirler [12];

5. Üst yapı yüklerinin zemin yüzeyinden derinlerde bulunan ve taşıma karakteristikleri yüksek olan sağlam tabakalara güvenilir biçimde aktarılabilmesi. Uygulamada uç kazıkları olarak adlandırılan sitemdir.

6. Üst yapı yüklerinin kısmen yumuşak ve gevşek zemin tabakalarına, sürtünme reaksiyonlarının yardımıyla güvenilir biçimde aktarılması. Bu kazıklara sürtünme kazığı adı verilmektedir.

7. Gevşek-Granüler zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak gayesi ile kompaksiyon sağlamak üzere adı geçen zeminlere kazık çakılması. Uygulamada kompaksiyon kazıkları olarak adlandırılır.

8. İleri derecede hidrostatik basınca veya döndürme momentine maruz yapıların stabilitesini artırmak ve bu nedenle doğabilecek yapı hasarlarının önüne geçmek amacıyla kazıkların uygun eğimlerde zemine

çakılması. Uygulamada çekme kazıkları adı verilmektedir.

9. Erozyona maruz zeminlerde (köprü kenar ve orta ayakları v.b.) üst yapı yükünün erozyondan etkilenmeyen derinliklerdeki tabakalara taşıtılması.

10. Sahile yakın yapıların gemi v.b. diğer yüzen cisimlerin darbelerine karşı bu darbeleri sönmülendirerek korumak amacıyla tampon kazıklar sık yerleşimde inşa edilebilmektedir.

11. Çeşitli nedenlerle üst yapıdan zemine aktarılan çekme karakterli yüklerin taşınması amacıyla zeminde çekme yüküne maruz bölümlerde ankraj kazıkları tesis edilebilir.

12. Büyük hacimli yatay veya eğik kuvvetlerin zemine güvenilir biçimde aktarılmasını temin etmek amacıyla eğik kazıklar inşa edilebilir.

13. Kuleler deniz platformu gibi deniz yapıları ve yeraltı suyu altında kalan radye temellerin maruz kaldığı kaldırma kuvvetlerinin etkisini karşılamak amacıyla uzun kazıklar teşkil edilebilir.

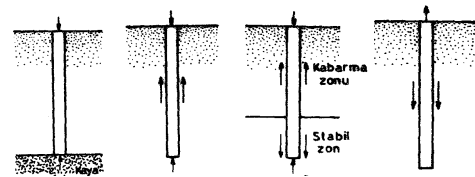
## 4. Kazıkların Kullanıldığı Yerler

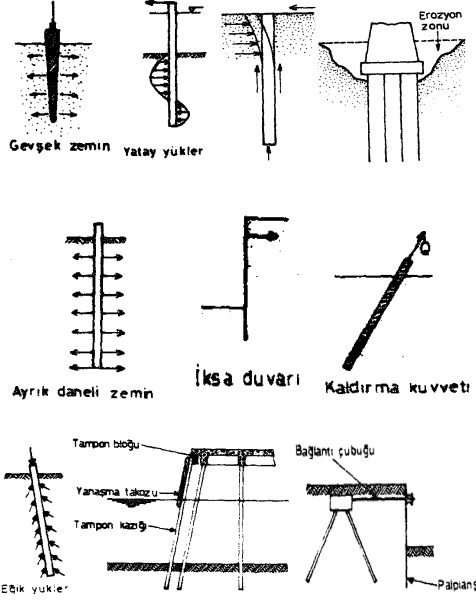
Kazıklı temel sistemlerinin kullanımını zorunlu kılan durumlar da göz önünde tutularak kazıkların uygulamada kullanıldığı başlıca yerler maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır [2].

14. Zemin strüktürünün yüzeye yalın tabakalarını oluşturan üst katmanlar, üst yapı yüklerinin yüzeysel temel sistemleri ile güvenilir bir şekilde zemine aktarılmasına elverişli geoteknik koşullara sahip değilse, daha açık bir anlatımla taşıma güçleri zayıf, sıkışabilir nitelikleri de fazla ise; yüklerin taşıyıcılık özelliği yüksek olan ve zemin profilinde zemin yüzeyinden daha derinlerde yer alan daha sağlam zemin ya da kayalara aktarılması zorunluluğunu ortaya çıkaran koşullarda, söz konusu edilen üst yapı yükleri çeşitli kazıklı temel sistemleri kullanarak taşıyıcı zemin katmanlara dağıtılabilir.

15. Suyla temas edince kabarma ya da ani çökme gösteren zeminlerde üst yapı yüklerinin aktif zon diye tariflenen bölgenin dışına kazıklar aracılığıyla aktarılması en iyi çözümdür.

16. Erozyon hareketleri sonucunda köprü ve viyadük ayaklarında temel altının oyulmasına engel olmak için adı geçen elemanlar kazıklı olarak tasarlanıp düzenlenebilir.





Şekil 1. Kullanılma amacına uygun olarak kazıkların uygulama sahalarından bazı örnekler

17. Açık deniz petrol platformları, kuleler, rıhtım payandaları gibi deniz yapılarında, hava meydanlarında yer alan irtibat kulelerinde sürekli ya da aralıklı iksa duvarları ve şev stabilitesi gibi bazı mühendislik uygulamalarında dalga, deprem ve suyun kaldırma kuvvetleri ile yanal toprak basınçlarının karşılanmasında kazıklar geniş kullanım potansiyeline sahiptir.

18. Nehir ve göl çevrelerindeki yumuşak dokulu gevşek ve hassas zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi ve sağlamlaştırılmasında kazıklar kullanılabilirler.

19. Sıvılaştırma potansiyeli bulunan bölgelerde üst yapı yüklerinin sıvılaştırma zonu altında kalan tabakalara emniyetle aktarılabilmesi gerekliliği söz konusu olduğunda yine kazıklardan yararlanılmaktadır.

## 5. Kazıkların Sınıflandırılması

Günümüz literatüründe kazıkların çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmalarının yapılması mümkündür. Yaygın olarak kazıklar aşağıdaki gibi dört gruba ayrılarak sınıflandırılabilir [7].

20. Zemine yük aktarma mekanizmasına göre kazıklar

21. İmal edildiği malzemenin cinsine göre kazıklar

22. Yapım şekillerine göre kazıklar

23. Zemine yerleşim özelliklerine göre kazıklar

### 5.1. Zemine Yük Aktarma Mekanizmasına Göre Kazıklar

Zemine yük aktarma mekanizmasına göre kazıklar altı gruba ayrılabilirler. (Uç kazıkları, sürtünme kazıkları, çekme kazıkları, ankraj kazıkları, kompaksiyon kazıkları ve eğik kazıklar)

### 5.2. İmal Edildiği Malzemenin Cinsine Göre Kazıklar

İmalatında kullanılan hammaddenin cinsine bağlı olarak kazıklar; ahşap, beton, çelik ve kompozit(karmaşık) olmak üzere dört ana gruba ayrılarak incelenebilir [14].

Beton kazıklar başlıca iki temel grupta incelenebilmektedirler [2]; ön dökümlü (prekast) beton kazıklar ve yerinde dökülen beton kazıklar

### 5.3. Yapım Şekillerine Göre Kazıklar

Uygulamada kullanılan yapım teknolojileri dikkate alındığında, genel bakış açısıyla kazıklar yapım şekillerine göre başlıca iki gruba toplanabilmektedir. Bunlar sırasıyla zemine büyük ya da küçük ölçekte yer değiştirme hareketi yaptıran çakma kazıklar ile zemine yer değiştirme hareketi yaptırmayan sondaj kazıkları olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 1. Çakma kazıkların tipik özellikleri ve uygulamaları [4]

Kazık Tipi	Yük Taşıma Kapasitesi (KN)	Uzunluk (m)	Uygulamalar
Ahşap kazıklar	100 - 500	10 - 20	Kumlu, siltli ve kumlu zeminlerde sürtünme kazığı olarak kullanılır
Çelik H kazıklar	400 - 2000	10 - 30*	Kayalarda ve sert zeminlerde uç kazığı, killerde ise sürtünme kazığı olarak kullanılır
Çelik boru kazıklar	400 - 1200	10 - 30*	Kayalarda ve sert zeminlerde uç kazığı, yumuşak zeminlerde ise sürtünme kazığı olarak kullanılır
Prekast beton kazıklar	200 - 2000	10 - 15	Kumlu ve çakıllı zeminlerde sürtünme kazığı, kayalarda ve sert zeminlerde uç kazığı olarak kullanılır
Öngermeli beton kazıklar	200 - 2000	20 - 30	Kumlu ve çakıllı zeminlerde sürtünme kazığı, kayalarda ve sert zeminlerde uç kazığı olarak kullanılır
Yerinde dökme beton kazıklar	300 - 700	10 - 30	Kumlu ve siltli zeminlerde sürtünme kazığı olarak kullanılır
Kompozit kazıklar	300 - 800	20 - 40	Birleşim kompozisyonuna bağlı olarak sürtünme veya uç kazığı olarak kullanılır
Sıkıştırılmış beton kazıklar	600 - 1500	5 - 20	İri daneli, çakıllı granüler zeminlerde uç kazığı olarak kullanılır

(\*) : Ekstiz yekpare uzunluklardır. Gerekliğinde çeşitli bağlantı elemanları ile uzunlukları artırılabilir.

Tablo 2. Değişik kesit çaplarına sahip bazı çakma kazıkların uygulamada taşıyabildikleri işletme yükleri [4]

Kazık Tipi	Yük (KN)
Ahşap kazık (uç çapı 20cm)	100 - 300
Prekast ya da öngermeli beton kazık	
• 30 cm çaplı dairesel kesitli	200 - 600
• 50 cm çaplı kare kesitli	700 - 2000
Çelik-H kesitli kazık	
• HP 10x42	500 - 750
Çelik - boru kesitli kazık	
• İçi betonla dolu, mandrelsiz	
• 10 <sup>16</sup> 0.188 boru kesitli	300 - 500
• 10 <sup>16</sup> 0.250 boru kesitli	400 - 700
• 12 <sup>16</sup> 0.312 boru kesitli	500 - 800
• 14 <sup>16</sup> 0.312 boru kesitli	600 - 900
• 16 <sup>16</sup> 0.375 boru kesitli	1000 - 1200
• Monotop	300 - 500

### 5.4. Zemine Yerleşim Özelliklerine Göre Kazıklar

Bazı yönetmelikler ve araştırmacılar kazıkların zemine yerleştirilmeleri sırasında zeminde oluşan yer değiştirme hareketlerinin düzeyine göre kazıkları üç sınıfta toplamaktadırlar;

24. Büyük yer değiştirme kazıkları

25. Küçük yer değiştirme kazıkları

26. Zeminde yer değiştirmeye yol açmayan kazıklar

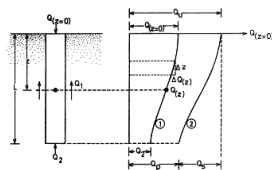
## 6. Kazıkların Zemine Yük Aktarma Mekanizması

Kazıktan zemine yük aktarma mekanizması oldukça karmaşıktır. Bu olayı yorumlamak için Şekil 2a'da gösterilen kazık uzunluğu L boyunca yük dağılımının irdelenmesi lazımdır. Kazık üzerindeki yük  $Q_w$  zemin yüzeyinden başlayarak derinlikle tedricen azalmaktadır. Bu yükün bir kısmı kazık gövdesi boyunca çepeçevre gelişen yüzey sürtünmesi ile karşılanan  $Q_{ws}$  ve kazık ucunun altında kalan zemin tarafından karşılanan  $Q_{wp}$ 'dir. Yük aktarma mekanizması toplam yükün ne kadarlık kısmının yüzey sürtünmesine kadarlık kısmının uç mukavemeti ile karşılanacağını belirlemektedir. Eğer herhangi bir z derinliğinde kazık shaftı tarafından taşınacak  $[Q_z]$  yükünün belirlenmesi için ölçümler yapılırsa  $Q_{ws}$  yükünün shaft boyunca dağılımı Şekil 2b'de görüldüğü gibi olmaktadır. Herhangi bir z derinliğinde "birim shaft alanına isabet eden yüzeysel sürtünme direnimi", aşağıdaki gibi hesaplanabilir. (Şekil 2c), [2].

$$f_z = \frac{\Delta Q_z}{P[\Delta z]} \quad (1)$$

Bu bağıntıda; P: Kazık en kesitinin çevre uzunluğunu göstermektedir.

Eğer kazık üzerindeki  $Q_w$  yükü tedricen artırılırsa kazık shaftı boyunca oluşan yüzeysel sürtünme direnimi kazığın çevre zeminine karşı göreceli hareketi 5-10 mm. ye ulaştığında maksimum derecede mobilize olmuş olacaktır. Buna karşın tabanda taşınabilecek yükün maksimum değerine ulaşabilmesi için kazık tabanının, çakma kazıklarda çapın %10'u, fore kazıklarda %25 ila %30'u kadar hareket etmesi gerekecektir. Kazık tepesine etkiyen yükün göçme yükü nihai yük taşıma kapasitesi  $Q_u$  değerine ulaşması halinde gerek çevrede ve gerekse de uçta taşınabilecek maksimum kapasitelere erişilmiş olacaktır. Nihai yük kazığa uygulandığında (Şekil 2d) taşıma kapasitesi maksimum değere ulaştığı için kazığın uç bölgesinde Şekil 2e'de tariflenen zonlarda çatlaklar oluşur. Daha büyük şiddetteki yüklerde zeminde kesme makaslaması etkisinde oluşabilen göçmeler nedeniyle kazıklar zemine gömülürler. Sonuçta ise farklı derinlikte farklı zemin koşullarında yeni bir kazık oluşmuş olur. Kazıklı temel ve diğer derin temel inşaatlarında en fazla çatlağın zımbalama etkisinin oluştuğu kesimlerde meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 2. Kazıklarda yük aktarma mekanizması [2]

## 7. Düşey Yükler Altında Kazık Taşıma Gücü Hesabı

Kullanılma amaçları çok çeşitli olabilen kazıkların projede öngörülen servis yüklerini güvenle taşımaları beklenir. Kazıklı temeller en az 3-4 kazıktan oluşan kazık gruplarından teşkil edilirler.

Bu bakımdan pratik açıdan önemli olan kazık gruplarının taşıma gücünün tespit edilmesidir. Kazık gruplarının taşıma gücünün belirlenebilmesi için de tek bir kazığın taşıma gücüne etkiyen faktörlerin bilinmesi gereklidir.

Kazık taşıma gücü, kazığın göçmeden ve aşın oturmalar göstermeden taşıyabileceği en büyük yük olarak tanımlanmaktadır. Kazık yükleme deneylerine ilişkin olarak taşıma gücüne nihai-sınır yük de denilebilir. Proje yükü nihai yükün bir güvenlik sayısına bölünmesi ile bulunabilir. Servis yükü ise tekil bir kazık için bulunan proje yükünün kazıkların grup etkisi göz önüne alınarak küçültülmesi ile elde edilmektedir.

Düşey yükler etkisinde kalan bir kazığın düşey taşıma kapasitesi veya kazık taşıma gücü kazığı oluşturan maddenin malzeme özelliklerine ve kazığın içinde bulunacağı zeminin çeşitli mühendislik özelliklerine bağlı olarak hesaplanabilir. Taşıma kapasitesi olarak bu değerlerden küçük olan seçilir.

Eksenel yüklü kazıkların kazık taşıma gücü büyüklüğü aşağıda sıralanan yöntemlerle belirlenebilmektedir;

27. Statik yöntemler
28. Dinamik yöntemler
29. Arazi deneylerinin sonuçlarına dayalı amprik yöntemler
30. Kazık yükleme deneyi sonuçlarına dayalı amprik yöntemler.

## 8. Statik Yöntemlerle Kazık Taşıma Gücü Hesabı

Bir kazığın göçme olmaksızın ve aşırı oturmalara maruz kalmaksızın taşıyabileceği maksimum yük olan nihai taşıma kapasitesi (kazık taşıma gücü), kazığın imal edilip yerleştirilmesinden önce çoğu kez laboratuarda belirlenen kohezyon ve kayma mukavemeti açısı gibi örselenmemiş kayma mukavemeti parametrelerinin kullanıldığı statik formüllerle hesaplanabilmektedir.

Eksenel yüke maruz kalan bir kazık bu yükü kısmen kazık shaftı boyunca meydana gelen çevre sürtünmesi ve kısmen de kazık ucunda oluşan uç mukavemeti ile taşıyacaktır. Aslına bakıldığında çevre sürtünmesi ve uç direncinin ayrı ayrı saptanması görüşü tüm statik formüllerin temelini oluşturmaktadır. Yukarıda da ifade edildiği üzere bir kazığın eksenel yüklere maruz kalması durumunda nihai taşıma kapasitesi ya da kazık taşıma gücü;

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2)$$

bağıntısı ile açıklanabilir. Kazığın kendi ağırlığını düşürerek kazığın net taşıma gücü büyüklüğü elde edilebilir.

$$Q_u = Q_p + Q_s - W_p \quad (3)$$

$Q_u$ : Kazığın nihai taşıma gücü,  $Q_p$ : Kazığın uç mukavemeti ile taşıdığı nihai yük,  $Q_s$ : Kazığın çevre sürtünmesi ile taşıdığı nihai yük,  $W_p$ : Kazık ağırlığı  
Genellikle kazık ağırlığı, kazığın nihai taşıma gücüne kıyasla oldukça küçüktür ve bu terim çoğu kez ihmal edilebilir. Ancak bu ihmal deniz ve liman yapılarının inşaatlarında yapılan kazık tasarımlarında asla yapılmamalıdır. Zira bu tür inşaatlarda kazık uzunluğu, dolayısıyla ağırlığı sayısal değer itibarıyla ihmal edilemeyecek boyutlara ulaşabilmektedir. Kazığın çevre sürtünmesi ile taşıdığı nihai yük, kazık shaftının teşkil ettiği yüzey alanı boyunca kazıkla zemin arasında gelişen kayma dirençlerinin entegrasyonu sonucu belirlenebilir. Söz konusu kayma gerilmeleri ifade edilen Coulomb teorisi ile açıklanmaktadır [8].

$$\tau_a = c_a + \sigma_n \tan \phi_a \quad (4)$$

Burada;  $\tau_a$ : Shaft boyunca kazığa etkiyen kayma gerilmesi,  $c_a$ : Adezyon,  $\sigma_n$ : Shaft boyunca kazığa etkiyen normal gerilme,  $\phi_a$ : Kazıkla zemin arasında kalan zonun sürtünme açısıdır.

Shaft boyunca kazığa etkiyen normal gerilme çoğu kez düşey gerilme  $\sigma_v$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\sigma_n = K_s \sigma_v \quad (5)$$

Burada;

$K_s$ : Yatay toprak basınç katsayısı olarak tariflenmektedir.

Böylece eşitlik yeniden düzenlenerek;

$$\tau_a = c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a \quad (6)$$

biçiminde ifade edilebilir. Kayma gerilmelerinin yukarıda da açıklandığı gibi shaft boyunca entegrasyonu yapıldığında kazığın çevre sürtünmesi ile taşıdığı nihai yük ifade edilebilmektedir.

$$Q_s = \int_{z=0}^{z=L} P \tau_a dz = \int_{z=0}^{z=L} P [c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a] dz \quad (7)$$

Burada;

P: Kazığın çevresi, L: Kazığın uzunluğu, z: Kazık uzunluğu boyunca herhangi bir derinlik olarak tariflenmektedir.

Kazığın uç mukavemeti ile taşıdığı nihai yük  $Q_p$  ise kazığın alt ucunda yer alan zeminin kazık boyunca düşey yönde aktarılan gerilmelere karşı koyduğu reaksiyonun bir ölçütü olarak uç bölgedeki kesit alanına aşağıdan yukarıya doğru etkiyen taşıma gücü bileşenidir. Uç mukavemeti ile taşınan toplam nihai bileşeni  $Q_p$  statik olarak Terzaghi'nin yüzeysel temellerin taşıma gücü hesabı için önerdiği yaklaşımla belirlenebilmektedir [8].

$$Q_p = [cN_c + \sigma_{vL} N_q + 0.5\gamma DN_\gamma] A_p \quad (8)$$

Burada; c: Zeminin kohezyonu,  $\gamma$ : Zeminin birim hacim ağırlığı, D: Kazığın çapı,  $\sigma_{vL}$ : Kazık ucunun bulunduğu seviyede etkiyen düşey gerilme,  $N_c$ ,  $N_q$  ve  $N_\gamma$ : Kazık ucunun yer aldığı zonda zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olan, ayrıca şekil ve derinlik faktörlerinin etkisini de hesaba katan boyutsuz taşıma gücü faktörleri,  $A_p$ : Kazık ucunun kesit alanı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu açıklamalara göre yeniden düzenlenirse;

$$Q_u = [cN_c + \sigma_{vL} N_q + 0.5\gamma DN_\gamma] A_p + \int_{z=0}^{z=L} P [c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_a] dz - W_p \quad (9)$$

(9)

genel bağıntısı elde edilebilir. Bu da tek kazığın nihai yük taşıma kapasitesini göstermektedir.

**Tablo 3.** Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen  $K_s$ ,  $\phi_a$  ve  $c_u$  parametreleri [3]

Araştırmacı	Kazık Tipi	Kumlar		Killer
		$K_s$	$\phi_a$ [°]	$c_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Poulos ve Davis, (1980)	Çelik HP	0.8	30	90-100
	Çelik Boru	0.4	30	-
Tomlinson, (1957)	Çelik HP	$K_s$	2/3 $\phi$	67
	Çelik Boru	0.5 $K_s$	2/3 $\phi$	-
	Beton Kılıflı	0.67 $K_s$	2/3 $\phi$	-
Meyerhof, (1956)	Çıkma	1.5-2.3	40-45	80
	Sondaj	10	40-46	-
Meyerhof, (1976)	Çelik HP	0.5	35	50
	Çelik Boru	0.57	-	-
	Beton Kılıflı	0.45	-	-
API, (1987)	Çelik HP	0.8	15-35	60
	Çelik Boru	0.9	-	-

Eğer analizlerde drenajsız ve kısa süreli yükleme koşulları göz önüne alınarak nihai taşıma kapasitesi hesaplanacaksa; drenajsız koşullara karşılık gelen zemin parametreleri olan c,  $\phi$ ,  $c_a$  ve  $\gamma$  değerleri kullanılmalı,  $\sigma_{vL}$  ve  $\sigma_{vp}$  gerilmeleri ise toplam gerilme yaklaşımına göre belirlenmelidir. Ancak özellikle kumlu zeminlerde yaralan kazıklar için uzun süreli yükleme koşullarına göre analiz yapılması gerektiğinde, drenajlı koşullara karşılık gelen efektif zemin parametreleri ve efektif gerilme yaklaşımına göre belirlenen  $\sigma_{vL}$  ve  $\sigma_{vp}$  efektif gerilmeleri hesaplarda kullanılmalıdır.

## 9. Arazi Deneylerinin Sonuçlarından Yararlanarak Kazık Taşıma Gücünün Hesaplanması

Bazı arazi deneylerinin sonuçlarından yararlanılması çok alışlagelmiş ve statik analizlere göre yapılan hesapların tahkikinde özellikle en çok başvurulan yöntem olmuştur. Günümüz uygulamalarında sonuçları üzerinde en fazla amprik bağıntılar geliştirilen ve taşıma gücü hesabında en çok kullanılan deneyler;

31. Standart penetrasyon deneyi
32. Koni penetrasyon deneyi
33. Pressiometre deneyi olarak bilinen deneylerdir.

**Tablo 4.** Kazık birim uç mukavemeti ile SPT darbe sayısı arasındaki ilişkiler [9]

Kazık Cinsi	Zemin Cinsi	$q_p$ (KN/m <sup>2</sup> )	Değişkenler	Kaynak
Çıkma Kazıklar	Kum	450 [N]	N: Bilgiyi zemin özellikleri yerine SPT sayısıdır.	Martin, et al (1987)
	Kum	400 [N]		Decourt (1982)
	Silt veya kumlu silt	350 [N]		Martin, et al (1987)
	Kumlu silt	250 [N]		Decourt (1982)
Yerine dikme çukura kazıklar	Kohesiyonsuz	150 [N]	$300 < q_p < 700$	Yamashita, et al (1982)
Sonda Kazıkları	Kumlar	100 [N]		Shaw ve Poulos (1982)

## 10. Düşey Yükler Altında Kazıklarda Oturma Hesabı

Zemine yerleştirmenin neden olduğu örselenme ile kazıktan zemine aktarılan gerilmenin dağılışı ve yerinin belirsizliği aksel yükler altında kazığın yapacağı oturmaları karmaşık bir hale getirmektedir.

ZEMİN CİNSİ	ELASTİSİTE (MN/m <sup>2</sup> )	POISSON ORANI
Gevşek Kum	10.35-24.15	0.20 - 0.40
Orta sıkı Kum	17.25-27.60	0.25 - 0.40
Sıkı Kum	34.50 - 55.20	0.30 - 0.45
Siltli Kum	10.35 - 17.25	0.20 - 0.40
Çakıllı Kum	69.00 - 172.50	0.15 - 0.35
Yumuşak Kil	2.07 - 5.18	-
Katı Kil	5.18 - 10.35	0.20 - 0.50
Çok Katı Kil	10.35 - 24.15	-

**Tablo 5.** Çeşitli zemin türleri için "μ" poisson sayıları [2]

Vesic [14], Sharma ve Joshi [11] kazığın yaklaşık 1 cm'lik bir deplasman yapabilmesi için mobilize olması

gereken çevre sürtünmesi değerinin gerçekte küçük olduğunu ve kazık çapı, zemin ve kazık cinsinden bağımsız olacağı savunmakta; aynı deplasmanın oluşması için mobilize olması gereken uç direncinin ise kazık çapı, zemin ve kazık cinsine bağlı olarak daha büyük değerler alacağı öne sürmektedirler. Bu durumda nihai çevre sürtünmesi aksel yükler altında iken nihai uç direncine kıyasla daha çabuk tümüyle mobilize olabilmektedir. Bununla beraber kazığın uzunluğuna ve zeminin cinsine bağlı olarak kazığa aktarılan üst yapı yüklerinin zemine dağılışı ve kazık çevresindeki yayılışında farklılık olması kaçınılmazdır.

## 11. Düşey Yükler Altında Kazık Gruplarının Davranışı

Uygulamada çoğu hallerde, üst yapı yüklerini taşıyıcı zemin tabakalarına aktarmak amacıyla zemine yerleştirilen kazıklar gruplar halinde inşa edilirler. Genellikle kazık gruplarının üzerinde betonarme olarak bir kazık başlığı da inşa edilmektedir. Söz konusu kazık grubunda yer alan tüm kazıkların üst ucu adı geçen başlığın içine gömülmüştür. Kazıklı temel projelerinin büyük bir çoğunluğunda kazık başlığı hemen zemin seviyesinde yer almakta, özel projelerde ise yeraltında veya yerüstünde bulunabilmektedir.

Grup kazıklarının bileşik taşıma gücü olarak tariflenen kazık grubunun taşıma gücünün tek kazığın taşıma gücünden az olmaması için pratikte grup içindeki kazıklar uygun mesafelerde birbirlerinden ayrı olarak zemine yerleştirilmelidir. Uygulamalarda söz konusu kazık aralığı (üst yapı yüklerinin şiddeti ve geoteknik ortam koşullarına da bağlı olmak üzere grup içindeki kazık çapının en az 2.5 katı olmalıdır. Bunun yanısıra emniyetli tarafta kalmak düşüncesi ile adı geçen mesafe 3D-7D arasında seçilmektedir [2].

Bir grup kazığının yük taşıma kapasitesinde grup etkisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{Q_{gu}}{\sum Q_u} \quad (10)$$

Burada;  $\eta$ : Grup etkisi,  $Q_{gu}$ : Kazık grubunun nihai yük taşıma kapasitesi,  $Q_u$ : Grup etkisi olmaksızın her bir kazığın nihai yük taşıma kapasitesi olarak tariflenmektedir.

## 12. Kazıkların Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışları

Kazıklara çoğu kez düşey doğrultuda etkiyen üst yapı yüklerine ilaveten yatay yükler ve momentler de etkiyebilmektedir. Bu gibi durumlar da kazığın yatay yüklere emniyetle karşı koyabilmesi için yapılması gereken analizler biraz karmaşıktır. Çünkü zemin ile kazık arasındaki davranış biçimi, yatay yük ve momentlerin etkimesi durumunda nonlineerdir.

Yatay yüklere göre kazıkların analizinde günümüzde kabul edilen çözümler, zemin koşulları ve yüklerin



mevcut çeşitli kriterlere göre sınıflandırılan kazıklı temeller hakkında bilgi verilmiştir. Çalışma kapsamında kazık temellerin hızlı, doğru ve güvenilir bir şekilde tasarımını yapabilmek için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Hazırlanan programda üç farklı yöntemle taşıma gücü analizi yapılabilmektedir. Farklı yöntemlerin sonuçları kullanılarak daha güvenilir ve hızlı çözüm yapılması amaçlanmaktadır. Program çalışması oturma analizi, kazık temel plan ve kesitlerin programda gösterilmesi ile sonuçlandırılacaktır. Halen üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

## 15. Kaynaklar

- [1] Bowles, J.E., "Foundation Analysis And Design", Mc Graw-Hill Book Company, Newyork, 816 p, (1982)
- [2] Das, B.M., "Principles of Foundation Engineering", PWS-Kent Publishing Company, Massachusetts, pp: 422 – 521, (1990).
- [3] Finno, R.J., "Predicted and Observed Axial Behaviour of Piles", Results of a Pile Prediction Symposium, ASCE Geotechnical Special Public, No: 23, New York, 888 p, (1989).
- [4] Hunt, R.E., "Geotechnical Engineering Techniques and Practise", Mc Graw - Hill Book Company, New York, pp: 331-443, (1986).
- [5] Kumbasar N., Kip F., "Zemin Mekaniği Problemleri", Çağlayan Kitabevi, 671 s, İstanbul, (1999)
- [6] Meyerhof, G.G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Proceeding, Volume: 102, No: GT3, pp: 197, (1976)
- [7] Naval Facilities Engineering Command, "Foundations and Earth Structures", Design Manual Dm 7.2, Department of the Navy, Alexandria, (1982).
- [8] Poulos, H.G., Davis, E.H., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, Inc., New York, 397 p, (1980).
- [9] Poulos, H.G., "Pile Behaviour - Theory and Application", Geotechnique 39, No: 3, pp: 365 – 415, (1989)
- [10] Prakash, S., Sharma, H.D., "Pile Foundations in Engineering Practice", John Wiley and Sons, Inc., New York, 734 p, (1990).
- [11] Sharma, H.D., Joshi, R.C., "Drilled Pile Behaviour in Granular Deposits", Journal of Canadian

- Geotechnical, Volume: 25, No: 2, pp: 222 – 232, (1988)
- [12] Teng, W.C, "Foundation Design", Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, pp: 193 – 255, (1962)
- [13] TSE 3167, "Kazık Temellerin Hesap ve Düzenlemesinde Genel Kurallar" Ankara, (1978)
- [14] Vesic, A.S., "Design of Pile Foundations", National Research Program Synthesis of Practice, Washin, No: 42, Transportation, Research Board, (1977)