



**FARKLI GEOMETRİK BOYUTLARA
SAHİP KAZIK GRUBUNUN
DEPREM ANINDAKİ DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer SINAN

**Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI GEOMETRİK BOYUTLARA SAHİP KAZIK GRUBUNUN
DEPREM ANINDAKİ DAVRANIŞI

Ömer SINAN

Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Ömer SINAN tarafından hazırlanan “Farklı Geometrik Boyutlara Sahip Kazık Grubunun Deprem Anındaki Davranışı” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30 / 07 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Başkan : Prof. Dr. İsmail ZORLUER
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

05 / 07 / 2024

Ömer SINAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI GEOMETRİK BOYUTLARA SAHİP KAZIK GRUBUNUN DEPREM ANINDAKİ DAVRANIŞI

Ömer SINAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Mühendislik yapılarının tasarımında dikkate alınması gereken en önemli yıkıcı etkenlerden biri deprem kuvvetidir. Depremler, yer kabuğundaki ani enerji boşalmalarının sonucu olarak meydana gelen doğal afetlerdir ve bu enerji boşalması, yüzeyde ciddi yıkıcı etkilere yol açabilir. Deprem dalgalarının yapılar üzerindeki etkileri, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, özellikle yüksek riskli bölgelerde yapıların sağlam temeller üzerine inşa edilmesi hayati bir önem taşır.

Yapıların bu doğal afetlere karşı direncini artırmak, yapıların uzun vadeli sağlamlığını güvence altına almak için kazıklı temellerin kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir. Özellikle zayıf zemin koşullarında, yapıların stabilitesini artırmak için kazıklı temeller kritik bir öneme sahiptir. Kazıklı temeller, yüklerin derin zemin tabakalarına aktarılmasını sağlayarak yapının stabilitesini ve dayanıklılığını artırır. Kazıkların tasarımı ve yerleştirilmesi, zemin özelliklerine, yük şartlarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Deprem bölgelerinde kazıklı temeller, sismik dalgaların yapı üzerindeki yıkıcı etkilerini azaltmada etkin bir rol oynar. Deprem anında, yüzeydeki zemin tabakaları hareket ederken, derin zemin tabakaları daha sabit kalır. Kazıklar, bu derin tabakalara bağlı olduğu için, yapının stabilitesini korur ve zemin hareketlerinin yapı üzerindeki olumsuz etkilerini minimize eder.

Bu araştırmada, yük altındaki farklı geometrik özelliklere sahip kazık gruplarının deprem etkisi altında analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Kazık gruplarının deprem altındaki performansını değerlendirmek için Plaxis 2D yazılım programı kullanılarak sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır. Araştırma kapsamında tabakalı zeminde kazık gruplarının deprem etkisi altında göstermiş olduğu deformasyonlar karşılaştırılmıştır.

2024, xv + 110 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kazık Grubu, Deprem Yükü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tabakalı Zemin.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

BEHAVIOR OF PILE GROUPS WITH DIFFERENT GEOMETRIC DIMENSIONS AT THE MOMENT OF AN EARTHQUAKE

Ömer SINAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail ZORLUER

One of the most critical destructive forces to consider in the design of engineering structures is earthquake forces. Earthquakes are natural disasters resulting from sudden energy releases in the Earth's crust, and this energy release can lead to severe destructive effects on the surface. The impact of seismic waves on structures is of great importance in terms of the safety and durability of buildings. In this context, it is crucial to construct buildings on solid foundations, especially in high-risk areas.

The use of pile foundations becomes inevitable to enhance the resistance of structures against these natural disasters and to ensure the long-term stability of buildings. In particular, in weak soil conditions, pile foundations are critical for increasing the stability of structures. Pile foundations improve the stability and durability of structures by transferring loads to deeper soil layers. The design and installation of piles vary depending on soil properties, load conditions, and environmental factors. In earthquake-prone areas, pile foundations play an effective role in mitigating the destructive effects of seismic waves on structures. During an earthquake, while the surface soil layers move, the deeper soil layers remain more stable. Since piles are anchored in these deeper layers, they help maintain the stability of the structure and minimize the adverse effects of ground movements on the structure.

In this research, the behavior of pile groups with different geometric properties under load was analyzed under earthquake effects. The finite element method was applied using the Plaxis 2D software program to evaluate the performance of pile groups under seismic conditions. The study compared the deformations exhibited by pile groups under earthquake effects in layered soils.

2024, xv + 110 pages

Keywords: Pile Group, Earthquake Load, Finite Element Method, Stratified Soil.



TEŞEKKÜR

Bu araştırma konusunun yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı, ayrıca bana aktardığı bilgilerinden dolayı çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail ZORLUER'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK'e her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her şekilde yanımda olarak motivasyon veren aileme teşekkür ederim.

Ömer SINAN
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Kazıklı Temeller	3
2.1.1 Kazık Çeşitleri.....	5
2.1.1.1 Kazıkların Yük Taşıma Şekillerine Göre İncelenmesi.....	5
2.1.1.2 Kazıkların Malzeme Sınıflandırmasına Göre İncelenmesi	7
2.2 Kazık Yükleme Deneyleri	13
2.3 Kazıkların Zemine Yük Aktarma Mekanizması.....	15
2.4 Kazıkların Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi.....	19
2.4.1 Uç Kazık Taşıma Kapasitesinin (Q_p) Belirlenmesi.....	22
2.4.1.1 Meyerhof Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi.....	23
2.4.1.2 Vesic Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi	26
2.4.1.3 Coyle ve Castello Metodu ile Kum Zeminlerde Q_p 'nin Belirlenmesi..	31
2.4.1.4 Hansen Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi	32
2.4.1.5 Janbu Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi	33
2.4.1.6 Terzaghi Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi	34
2.4.1.7 Q_p 'nin SPT ve CPT ile Belirlenmesi.....	35
2.4.2 Kazık Sürtünme Direncinin (Q_s) Belirlenmesi	36
2.4.2.1 Kum Zeminde Q_s 'in Belirlenmesi	37
2.4.2.2 Kumlu Zeminde Q_s 'in SPT Korelasyonu ile Belirlenmesi.....	39
2.4.2.3 Kil Zeminde Q_s 'in Belirlenmesi.....	40
2.5 Kazık Elastik Oturmalarının Belirlenmesi.....	45

2.6 Yanal Yüklü Kazıklar	47
2.6.1 Elastik Çözüm	48
2.6.2 Broms Metodu.....	55
2.7 Grup Kazık Etkisi	59
2.7.1 Kil Zeminde Kazık Gruplarının Verimliliği	64
2.8 Grup Kazık Oturması.....	66
2.9 Grup Kazık Konsolidasyon Oturması.....	67
2.10 Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi	69
2.10.1 Granüler Zemin Üzerinde Kil Dolgu Yapılması Durumunda.....	70
2.10.2 Kil Zemin Üzerinde Granüler Dolgu Yapılması Durumunda.....	71
2.11 Kazıklı Temeller Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	73
3. MATERYAL ve METOT	77
3.1 Zemin Profili ve Yapı Özellikleri	77
3.2 Kullanılan Deprem Verileri	81
3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	83
3.4 Plaxis 2D Programının Özellikleri.....	84
3.4.1 Plaxis 2D Programında Modelleme	85
4. BULGULAR	90
4.1 Kazık Hesapları.....	90
4.2 Plaxis Modelleme Verileri	93
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	97
6. KAYNAKLAR.....	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A_p	Kazık uç alanı
A_1, A_2, A_3	Efektif gerilme diyagramlarının alanları
A_m	Katsayı (elastik çözüm)
A'_m	Katsayı (elastik çözüm)
A_v	Katsayı (elastik çözüm)
A_x	Katsayı (elastik çözüm)
A'_x	Katsayı (elastik çözüm)
A_θ	Katsayı (elastik çözüm)
$A_{p'}$	Katsayı (elastik çözüm)
B_m	Katsayı (elastik çözüm)
B'_m	Katsayı (elastik çözüm)
B_g	Kazık grubunun kısa kenar genişliği
B_v	Katsayı (elastik çözüm)
B_x	Katsayı (elastik çözüm)
B'_x	Katsayı (elastik çözüm)
B_θ	Katsayı (elastik çözüm)
$B_{p'}$	Katsayı (elastik çözüm)
c'	Kohezyon
c_u	Drenajsız kohezyon
$c_{u(p)}$	Kazık ucundaki drenajsız kohezyon
C_p	Ampirik katsayı
C_s	Ampirik katsayı
D	Kazık çapı
d_c	Şekil faktörü
d_q	Şekil faktörü
$e_{0(i)}$	i tabakasının yükleme öncesi boşluk oranı
E_s	Zemin elastisite modülü
E_p	Kazığın elastisite modülü
f	Herhangi bir z derinliğinde birim sürtünme
f_{av}	Ortalama birim sürtünme direnci
f_c	Sürtünme direnci
FS	Güvenlik katsayısı
F_y	Kazık malzemesinin akma dayanımı
G_s	Zeminin kayma modülü
H_f	Kil dolgu yüksekliği
H_i	i kil tabakasının kalınlığı
I	Etki faktörü
I_p	Kazık kesitinin atalet momenti
I_r	Rijitlik endeksi
I_{rr}	Azaltılmış rijitlik endeksi
I_{wp}	Azaltma faktörü
I_{ws}	Etki faktörü

k	Yatak katsayı modülü
K_0	Zeminin sükunet halindeki basınç katsayısı
K_p	Rankine pasif toprak basınç katsayısı
L	Kazık boyu
ΔL	Kazığın zemin içerisindeki çakma boyu
L_g	Kazık grubunun boyu
M_g	Kazığa üzerindeki moment
$M_z(z)$	Kazığın herhangi bir derinlikteki momenti
n_h	Zeminin yatay yatak katsayı değeri
n_1	Kazık grubunun uzun kenarındaki kazık sayısı
n_2	Kazık grubunun kısa kenarındaki kazık sayısı
N_c^*	Taşıma gücü faktörü
N_q^*	Taşıma gücü faktörü
N_σ^*	Taşıma gücü faktörü
N_γ^*	Taşıma gücü faktörü
N_{60}	Kazık ucunun 10D üstü ve 4D altındaki SPT sayı ortalaması
$\bar{N}_{60}$	Kazık ucu çevresindeki ortalama SPT
p'	Zemin üzerindeki basınç
p	Kazık çevresi
p_a	Atmosfer basıncı
p_g	Kazık grubu kesitinin çevresi
$p'_z(z)$	Kazığın herhangi bir derinlikteki zemin reaksiyonu
q'	Kazık ucu seviyesinde efektif düşey gerilme
q_c	Koni penetrasyon uç direnci
q_p	Kazık uç direnci
q_u	Serbest basınç mukavemeti
q_{wp}	Kazık ucunda birim alana denk gelen uç yük
Q_{all}	Tek bir kazığın müsaade edilebilir yükü
Q_a	Toplam Emniyetli Kazık Taşıma Kapasitesi
Q_g	Kazık yanal yükü
$Q_{g(u)}$	Kazık grubunun taşıma gücü kapasitesi
Q_n	Kazığa etkiyen düşey yük
Q_u	Bir kazığın grup etkisi olmaksızın taşıma gücü kapasitesi
Q_p	Kazık uç direnci
Q_s	Kazık sürtünme direnci
Q_{wp}	Çalışan yük durumunda kazığın ucundaki taşınan yük
Q_{ws}	Çalışan yük durumunda kazık çevre sürtünmesi ile taşınan yük
R	Karakteristik uzunluk
S	Kazık kesit modülü
s_e	Tekil kazığın elastik oturması
s_c	Temel şekil değiştirme faktörü
s_γ	Temel şekil değiştirme faktörü
s_1	Kazığın elastik oturması
s_2	Kazık ucundaki yükten kaynaklı oturma
s_3	Kazık gövdesi boyunca iletilen yükün neden olduğu oturma
$s_{g(e)}$	Kazık grubunun elastik oturması

T	Kazık zemin arasındaki sistemin karakteristik uzunluğu
u_x	Yatay deplasman
u_y	Düşey deplasman
ν	Poisson oranı
$V_z(z)$	Kazığın herhangi bir derinlikteki kesme kuvveti
w	Ağırlık
W_1	Likit limit değeri
W_n	Doğal Su İçeriği
W_p	Plastik limit değeri
x	Deplasman miktarı
$x_z(z)$	Kazığın herhangi bir derinlikteki deplasmanı
z	Derinlik
α	Adezyon faktörü
β	İçsel sürtünme katsayısına bağlı katsayı
γ'	Dolgu altındaki kil tabakasının birim hacim ağırlığı
γ'_f	Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı
δ	Kazık–zemin arasındaki sürtünme açısı
Δ	Kazık ucundaki plastik bölgenin ortalama volumatik gerilmesi
$\Delta e_{(i)}$	i tabakasına gerilme nedeniyle oluşan boşluk oran değişimi
$\Delta s_{c(g)}$	Kazık grubundaki toplam konsolidasyon oturması
$\Delta s_{c(i)}$	i tabakası için konsolidasyon oturması
$\Delta \sigma'_i$	i zemin tabakasının merkezindeki efektif gerilme artışı
η	Kazık grubu verimliliği
λ	Kazık gömü derinliğine bağlı katsayı
μ_s	Zemin poisson oranı
ξ	Çevre sürtünme direncine bağlı katsayı
σ'_0	Efektif düşey gerilme
$\bar{\sigma}'_0$	Kazık uç noktasındaki efektif gerilme
ϕ'	Zeminin içsel sürtünme açısı
ϕ_r	Örselenmiş kil zeminin sürtünme açısı

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
CPT	Koni penetrasyon deneyi
EA	Eksenel rijitlik
EI	Eğilme rijitliği
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
K	Kiriş
R	Temel
S	Kolon
SP	Kötü derecelenmiş kum
SW	İyi derecelenmiş kum
TS	Türkiye standartları
UD	Örselenmemiş numune
OCR	Aşırı konsolide kil

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kazıklı temellerin kullanımını gerektiren durumlar	4
Şekil 2.2 (a) ve (b) uç kazık, (c) sürtünme kazığı	6
Şekil 2.3 Çelik kazıklar: (a) H tipi kazığın kaynakla birleştirilmesi; (b) boru tipi kazığının kaynakla birleştirilmesi; (c) H tipi kazığın bulonlarla birleştirilmesi; (d) boru tipi kazığın düz çakma ucu; (e) boru tipi kazığın konik çakma ucu....	8
Şekil 2.4 Ahşap kazık ucunun korunması	13
Şekil 2.5 Kazık yükleme deneyi.....	14
Şekil 2.6 Kazıkların yük aktarım mekanizması.....	17
Şekil 2.7 Kazık yükleme sırasında farklı aşamalarda aktarılan uç yükün rölatif büyüklüğü.....	18
Şekil 2.8 Zemin taşıma kapasitesi göçmesi, (a) genel kayma göçmesi; (b) Kısmi (bölgesel) kayma göçmesi; (c) zımbalama göçmesi.....	18
Şekil 2.9 Kum zemindeki temel göçmeler	19
Şekil 2.10 Kazık taşıma kapasitesi	20
Şekil 2.11 Homojen kum zeminde uç direncin değişimi.....	24
Şekil 2.12 Zemin içsel sürtünme bağlı olarak N_q * bulunması.....	24
Şekil 2.13 Zemin sürtünme açıları için kritik derinlik ve yük taşıma kapasitesi faktörleri.	25
Şekil 2.14 N_q *'ın, L/D oranına ve içsel sürtünme açısı ϕ' ile değişimi.....	31
Şekil 2.15 Kum zemindeki kazıklar için birim sürtünme direnci.....	38
Şekil 2.16 λ metodunun tabakalı zemine uygulanması.	41
Şekil 2.17 Kil zeminlerde f_c ve α' arasındaki değişim	44
Şekil 2.18 (a) Rijit kazık ve (b) elastik kazık için moment ve kesme diyagramları.	48
Şekil 2.19 (a) Yatay yüklü kazık; (b) yatay yük nedeniyle kazık üzerindeki zeminin direnci; (c) yer değiştirme, eğim, moment, kesme kuvveti ve zeminin oluşturduğu tepki için işaret kuralları.....	49
Şekil 2.20 Z için A_x , B_x ve A_m , B_m değişimleri	54
Şekil 2.21 Z için A_x' , B_x' ve A_m' , B_m' değişimleri	55
Şekil 2.22 Broms'un kısa kazıklar için nihai yanal direnç çözümü, (a) kum zemin, (b) kil zemin	56
Şekil 2.23 Broms'a göre kum zemin (a) ve kil zeminde (b) uzun kazıklar için yanal direnç	58
Şekil 2.24 Broms metoduna göre kum zemin (a) ve kil zeminde (b) kazık başlığı deplasmanı.....	59
Şekil 2.25 Kazık Grubu.....	60

Şekil 2.26 Kazık konuma bağlı ortalama yüzey (çevre) sürtünmesi f_{av}	63
Şekil 2.27 Kum zeminde kazık grubu verimliliği	63
Şekil 2.28 Kazık gruplarının doymuş kil zeminde nihai taşıma gücü	65
Şekil 2.29 N_c *'nin L_g/B_g ve L/B_g ile değişimi	65
Şekil 2.30 Kazık grubunun konsolidasyon oturması.....	69
Şekil 2.31 Negatif çevre sürtünmesi	70
Şekil 3.1 Zemin modeli.	78
Şekil 3.2 Yapıya ait SAP2000 modeli.....	80
Şekil 3.3 Kolon ve kiriş yerleşimleri.....	80
Şekil 3.4 11 adet deprem verisine ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği.	82
Şekil 3.5 Düğümler ve gerilme noktaları.	85
Şekil 3.6 (a) proje bilgilerinin girildiği bölüm ve (b) modelleme ölçülerinin girildiği bölüm.....	86
Şekil 3.7 Programın ana pencere bölümü.....	86
Şekil 3.8 (a) zeminin genel özellikleri ve (b) zeminin parametre değerlerinin girildiği bölüm.....	86
Şekil 3.9 Kazık ve temel malzeme özelliklerinin girildiği bölüm.....	87
Şekil 3.10 Kazık grubu modeli.....	87
Şekil 3.11 Sonlu elemanlar ağına bölünmüş kazık grubu modeli.	87
Şekil 3.12 Analiz verilerinin girildiği bölüm.	88
Şekil 3.13 Deprem ivme zaman grafiği.....	88
Şekil 3.14 Modellemeye ait analiz çıktısı.	89
Şekil 4.1 Ampirik yöntemler ve Plaxis programıyla hesaplanan oturma değerleri.....	95
Şekil 4.2 Kazık gruplarının depremli durumdaki oturma değerleri.	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yerinde dökülen betonarme kazıkların uzunluğuna göre en küçük çap oranları.....	11
Çizelge 2.2 N_q * değerlerinin enterpolasyonla bulunması.....	25
Çizelge 2.3 I_{rr} ve ϕ' değerlerine karşılık gelen N_{σ} * taşıma gücü.	29
Çizelge 2.4 Vesic'in teorisine göre I_{rr} 'ye bağlı N_c * değerleri.....	30
Çizelge 2.5 I_r ve c_u için O' Neill ve Reese önerdiği değerler.	30
Çizelge 2.6 Meyerhof, Hansen ve Vesic taşıma kapasitesi denklemleri için taşıma gücü faktörleri	32
Çizelge 2.7 Janbu ve Vesic metotları için taşıma kapasitesi faktörleri	34
Çizelge 2.8 Terzaghi (1947) tarafından önerilen temel şekil faktörleri.	35
Çizelge 2.9 Kazığın boyuna (L) bağlı olarak λ değerindeki değişim.....	40
Çizelge 2.10 α değerinin değişimi.....	42
Çizelge 2.11 Çeşitli zeminler için C_p	46
Çizelge 2.12 $L \geq 5T$ olan uzun kazıklar için katsayılar.....	52
Çizelge 2.13 Çeşitli zeminler için n_h	52
Çizelge 2.14 Kil zeminler için K değeri.....	58
Çizelge 2.15 Sürtünme kazıklarda grup verimliliği denklemleri.	62
Çizelge 3.1 Sondaj kuyusu verilerine ait SPT darbe sayısı.	77
Çizelge 3.2 Zemin profiline ait laboratuvar deney sonuçları.	78
Çizelge 3.3 Zemin profiline ait parametreler.	79
Çizelge 3.4 SAP2000 modeline ait yapı elemanlarının boyutları.	81
Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan depremlerin özellikleri.	82
Çizelge 3.6 Kazık ve temele ait malzeme özellikleri.	89
Çizelge 4.1 Tekil kazıkların toplam taşıma kapasitesi.	90
Çizelge 4.2 Tekil kazıkların emniyetli taşıma kapasitesi.	90
Çizelge 4.3 Kazıkların grup dağılımı.	91
Çizelge 4.4 Kazıkların grup içerisindeki merkezden merkeze olan mesafeleri.	91
Çizelge 4.5 Tekil kazıkların oturma değerleri (s_e).	91
Çizelge 4.6 Kazık gruplarının oturma değerleri ($s_{g(e)}$).	92
Çizelge 4.7 Das eşitliğine göre kazık gruplarının verimlilik değerleri.	92
Çizelge 4.8 Converse-Labarre eşitliğine göre kazık gruplarının verimlilik değerleri....	93
Çizelge 4.9 Kazık gruplarının emniyetli taşıma kapasitesi değerleri.	93

Çizelge 4.10 Kazık gruplarının Plaxis oturma değerleri.	94
Çizelge 4.11 Kazık gruplarının dinamik etki altında Plaxis oturma değerleri	94



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 H tipi çelik kazık imalatı.....	8
Resim 2.2 Betonarme çakma kazıkların imalatı	10
Resim 2.3 Fore kazık imalatı	12



1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği, zeminlerin özelliklerini, yük vb. etkiler altında davranışını inceler. Zemin mühendisliği; fizik, mekanik, hidrolik vb. bilgilerin zemine uygulanmasıdır (Uzuner 2007). Mühendislik yapılarının stabilitesini sağlamak için üzerine yapıldığı zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu bağlamda, zeminlerin taşıma kapasitesi ve oturma davranışları gibi faktörler, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşır. Artan nüfus oranı yapıların elverişsiz zemin koşullarında uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum geoteknik mühendisliğinin önemini gün geçtikçe arttırmaktadır. Yapıların güvenliğini sağlamak ve deprem gibi dış etkiler altında dayanıklılığını arttırmak için kazıklı temeller ihtiyaç duyulur.

Kazık temeller, özellikle zayıf zemin koşullarında yapıların stabilitesini sağlamak için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Kazıklar, yükleri daha derin ve daha sağlam zemin tabakalarına aktarmak suretiyle, zeminin taşıma kapasitesini artırır ve yapının oturmasını minimize eder. Deprem sırasında, kazık temeller, yatay ve dikey hareketlere karşı direnir ve yapının güvenliğini sağlar. Farklı çap ve boydaki kazıkların zeminle olan etkileşimleri, yük taşıma kapasiteleri ve deprem sırasındaki davranışları oldukça karmaşıktır ve dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Deprem sırasında zemin dinamikleri değişir ve bu dinamik değişiklikler kazıkların performansını doğrudan etkiler. Deprem kuvvetleri, zemin ve kazıklar arasındaki etkileşimleri karmaşıklaştırır, kazıkların yer değiştirmesine, bükülmesine ve diğer deformasyonlara neden olabilir. Bu nedenle, kazık temellerin deprem koşulları altındaki davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi, yapıların deprem güvenliğini sağlamak açısından hayati önem taşır.

Deprem, yer kabuğunda ortaya çıkan enerji sonucu meydana gelen sismik dalgadır. Bu sismik dalgalar yıkıcı etkileri nedeniyle mühendislik yapılarının tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır. Yaşanan büyük depremler mühendislik yapılarının dayanıklılığının artırılması gerektiğini defalarca göstermiştir. Özellikle binaların ve köprülerin temelleri deprem kuvvetlerine karşı en kritik yapı elemanları arasında yer alır. İnşaat mühendisleri

de bu bağlamda temel sistemlerini dayanıklı hale getirebilmek için önemli bir çaba sarf etmektedir.

Bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip kazıkların, aynı zemin profilinde ve aynı yük altında ortaya çıkardığı kazık grupları incelenmiştir. Kazıklar 60 cm, 80 cm ve 100 cm çapında; 15 m, 20 m, 25 m ve 30 m derinlikte modellenerek (toplam 12 model) incelenmiştir. Zemine uygulanacak yük için SAP200 programında 11 katlı bina tasarlanmıştır. Taşıma gücü hesapları ve kazık sayıları ampirik yöntemler yardımıyla hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda Microsoft Office Excel programından yararlanılmıştır. Kazık gruplarının depremsiz ve deprem etkisi altında davranışlarını incelemek için Plaxis 2D Foundation programında modellemeler oluşturulmuştur. Depremlı modellemelerde 11 farklı deprem verisi kullanılmıştır. Modelleme sonucunda ortaya çıkan oturma miktarları tabloda derlenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kazıklı Temeller

Yapıyı zeminin üzerinde durmasını sağlayan yüzeysel ve derin temel olmak üzere iki temel çeşidi bulunmaktadır. Zemine aktarılan yükleri yüzeysel temelin taşıma gücü karşılamıyorsa derin temellere ihtiyaç duyulmaktadır (Çinicioğlu 2005). Derin temeller; kazık, ayak, keson, baret ve kuyu temel olmak üzere 5'e ayrılır. Kazıklı temeller en yaygın olarak kullanılan temel türüdür.

Vesic (1977)'e göre kazıklı temellerin gerekliliği aşağıdaki durumlar ile özetlenebilir:

1) Kazıklar üst yapıdan gelen yüklerin, zeminin üst tabakasının kolayca sıkışabilen ve taşıyamayacak kadar yumuşak olması durumunda, Şekil 2.1a'da gösterildiği gibi derindeki sert bir zemin tabakasına iletmekte kullanılırlar. Yüzeyin altında uygun bir derinlikte kaya tabakası bulunmadığında, kazıklar yapısal yükü zemine kademeli olarak iletmek için kullanılır. Zemin-kazık arayüzünde gelişen sürtünme direnci, Şekil 2.1b'de görüldüğü gibi uygulanan yapısal yüke karşı direnç sağlar.

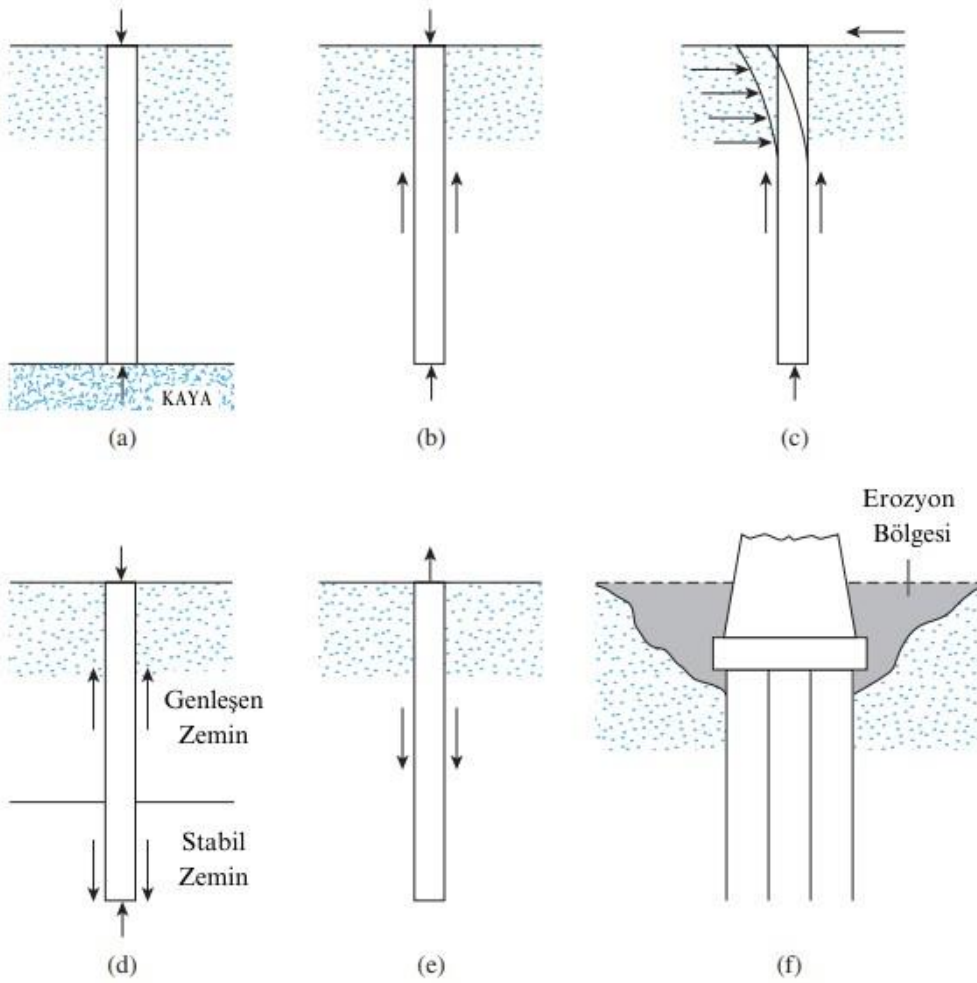
2) Kazıklar yatay yüke maruz kaldığında (Şekil 2.1c), kazık temelleri eğilmeye karşı direnirken, yapı tarafından iletilen dikey yükü desteklemeye devam ederler. Bu duruma rüzgar veya deprem kuvvetlerine maruz kalan yüksek yapıların ve yanıl toprak basıncına maruz kalan yapılarının tasarımında ve inşasında karşılaşılr.

3) Karşılaşılan durumlar incelendiğinde, yapı yapımı için planlanan arazide şişen ve çökme eğiliminde olan zemin profiliyle karşılaşılabılır. Bu tür zeminler yüzeyin altında yüksek bir derinliğe kadar uzanabilir. Genleşme eğilimde gösteren zeminler nem içerikleri arttıkça veya azaldıkça kabarma ya da büzülme eğiliminde bulunurlar. Kabarma sonucu oluşan gerilmeler önem arz etmektedir. Bu tür durumlarda sıg temeller kullanılırsa, yapı büyük hasar görebilir. Bu durumun önüne geçmek için, kazık temeller, kazıkların kabarma ve büzülmenin meydana geldiği aktif bölgenin ötesine uzatıldığı durumlarda Şekil2.1d'de gösterildiği gibi alternatif olarak düşünölebilir.

Lös gibi zeminler doğası gereği çökmeye meyillidirler. Bu zeminlerin su içeriği arttığında yapıları bozulabilir ve zeminin boşluk oranında ani azalma olması durumunda sıkı temellerle desteklenen yapıların büyük oturmasına neden olur. Bu tür durumlarda, kazık temeller su muhtevası değişiminin gerçekleşmeyeceği stabil zemin tabakalarına uzatılır.

4) Bazı yapıların temelleri örneğin yüksek gerilim direkleri, yer altı su seviyesi altında kalan radye temeller ve deniz platformları, taban kaldırma kuvvetine maruz kalır. Kazıklar bazen Şekil 2.1e'deki gibi bu duruma karşı koymak için kullanılır.

5) Temel altında oluşan erozyondan kaynaklı taşıma gücü kaybının önlenmesi için köprü ayakları ve iskeleler Şekil 2.1f'deki gibi kazıklı temeller üzerine inşa edilebilirler.



Şekil 2.1 Kazıklı temellerin kullanımını gerektiren durumlar (Das 2007).

Geçmişte, granüler ve kohezyonlu zeminlerde kazıkların davranışını ve yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için hem teorik hem de deneysel birçok araştırma yapılmıştır. Ancak mekanizmalar henüz tam olarak anlaşılmamış ve belki de hiçbir zaman anlaşılamayacaktır. Bu nedenle kazıklı temellerin tasarımı ve analizi, bazı alt zemin koşullarında çalışmanın getirdiği belirsizlikler nedeniyle bir sanat olarak kabul edilebilir.

2.1.1 Kazık Çeşitleri

2.1.1.1 Kazıkların Yük Taşıma Şekillerine Göre İncelenmesi

Kazıklar uzunluklarına ve yükün zemine aktarılma mekanizmasına bağlı olarak uç kazık, sürtünme kazığı ve kompaksiyon kazık olarak üçe ayrılır.

1 – Uç Kazık:

Arazide yapılan çalışmalardan elde edilen veriler incelendiğinde, makul bir derinlikte ana kaya veya kaya benzeri malzeme tespit edilirse kazıklar Şekil 2.2a'daki gibi kaya zemine kadar uzatılabilir. Bu durumda, kazıkların taşıma kapasitesi tamamen alttaki zemin malzemesinin yük taşıma kapasitesine bağlıdır; dolayısıyla, bu kazıklara uç kazık denir.

Kaya tabakası yerine, makul bir derinlikte oldukça sıkı ve sert bir toprak tabakası ile karşılaşırsa, kazıklar bu sert tabakaya Şekil 2.2b'deki gibi birkaç metre uzatılabilir. Kazık yükü şu şekilde ifade edilir:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.1)$$

Q_u = Kazığın nihai taşıma gücü

Q_p = Kazık uç direnci

Q_s = Kazık çevre sürtünme direnci

Uç kazıklı taşıma sistemlerinde Q_s nispeten küçük sayılır bu durumda:

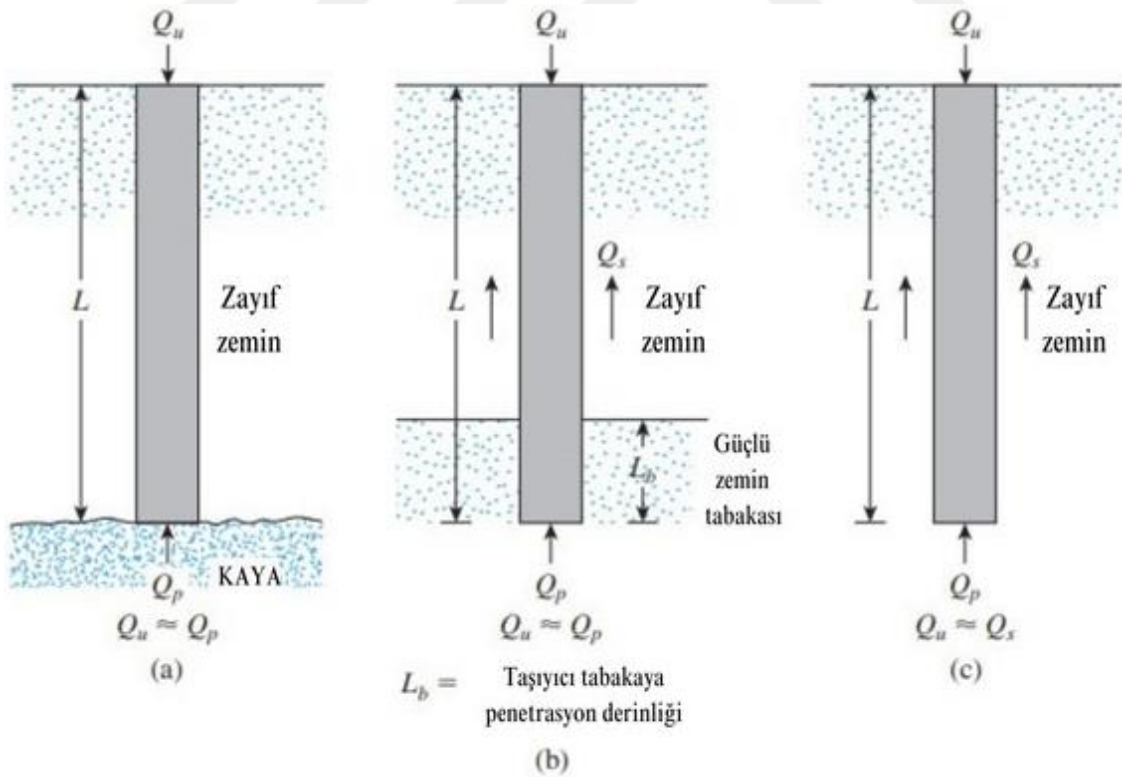
$$Q_u = Q_p \quad (2.2)$$

2 – Sürtünme Kazığı:

Arazide yapılan çalışmalardan elde edilen veriler incelendiğinde, makul bir derinlikte ana kaya veya kaya benzeri malzeme yoksa üzerindeki yapıyı taşıyabilmesi için, kazıklar bu tür zeminlerde yumuşak zemin tabakasından Şekil 2.2c'deki gibi daha derinlere uzatılabilir. Sürtünme kazık sistemlerinde Q_p nispeten küçük sayılır ve bu durum şu şekilde ifade edilir.

$$Q_u = Q_s \quad (2.3)$$

Bu kazıklara sürtünme kazığı denir. Sürtünme kazıkları yapısal yüke karşı direnci çevre sürtünmesinden elde eder. Sürtünme kazıklarının uzunlukları, zeminin kesme mukavemetine, uygulanan yüke ve kazık boyutuna bağlıdır.



3 – Kompaksiyon Kazık:

Kompaksiyon kazıklar, granüler zeminlerde uygun yüzey yakınında sıkıştırmayı sağlamak için kazıklar sürülür. Bu kazıklara sıkıştırma kazıkları denir. Sıkıştırma kazıklarının uzunlukları; sıkıştırma öncesi toprağın göreceli yoğunluğu, sıkıştırma sonrası istenen göreceli yoğunluk ve gerekli sıkıştırma derinliğine bağlıdır. Bu kazıklar genellikle kısadır; ancak, makul bir uzunluğu belirlemek için bazı saha testleri gereklidir.

2.1.1.2 Kazıkların Malzeme Sınıflandırmasına Göre İncelenmesi

Kazıklar malzeme çeşitlerine göre; çelik kazık, betonarme kazık, ahşap kazık ve kompozit kazık olarak 4'e ayrılır.

1 – Çelik Kazıklar:

Çelik kazıklar genellikle boru, kutu ve H kesitli kazıklar olarak kullanılır. Boru kazıkları, uçları açık veya kapalı olarak zemine çakılabilir. I kesitli ve geniş flanşlı çelik kazıklarda kullanılmaktadır. H kesitli kazıklar genellikle tercih edilir çünkü bunların gövde ve flanş kalınlıkları eşittir. H tipi çelik kazıklara ait imalat Resim 2.1'de gösterilmiştir. Birçok durumda, boru kazıklar çakıldıktan sonra beton ile doldurulur. Çelik kazıkların avantajları şöyledir:

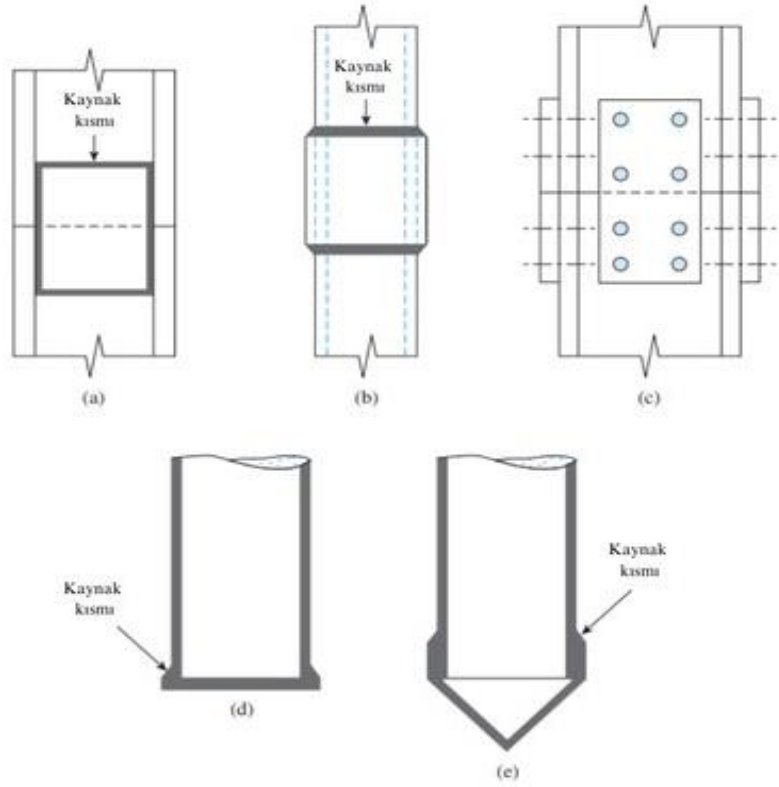
- 1) Yüksek çakma gerilmelerine dayanıklıdırlar.
- 2) Çelik kazıkların imalatına göre kısaltma ve uzatma işlemleri kolaydır.
- 3) Yüksek taşıma mukavemetine sahiptir.
- 4) Sert zemin katmanlarında (yumuşak kaya, yoğun çakıl) ilerleyebilir.

Dezavantajları:

- 1) Korozyon oluşumuna maruz kalabilirler.
- 2) İmalat sırasında yüksek gürültüye sebep olurlar.
- 3) Maliyeti göreceli olarak fazladır.

- 4) H kazıklar imalat sırasında sert zemin tabakalarında hasar görebilir veya eksenden sapabilir.

Çelik kazıkların birleşimi ve farklı uç imalatları Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Çelik kazıklar: (a) H tipi kazığın kaynakla birleştirilmesi; (b) boru tipi kazığının kaynakla birleştirilmesi; (c) H tipi kazığın bulonlarla birleştirilmesi; (d) boru tipi kazığın düz çakma ucu; (e) boru tipi kazığın konik çakma ucu (Das 2007).



Resim 2.1 H tipi çelik kazık imalatı (İnt.Kyn.1).

2 – Betonarme Kazıklar:

Betonarme kazıklar; çakma kazıklar ve yerinde dökme kazıklar olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır.

a – Betonarme Çakma Kazıklar:

Betonarme çakma kazıklar, üretim yerinde veya inşaat sahasında koşullar uygun ise döküme elverişli yerde hazırlanır ve imalatı yapılacak inşaat sahasına getirilir. Betonarme çakma kazıklar, büyük yükleri sağlam bir zemin tabakasına taşımak için kullanışlıdır. Betonarme çakma kazıklar; kare, daire veya sekizgen kesitte üretilirler. Kazık boyu ve çapı, yapı yükü ve zemin profiline göre seçilmektedir. Kazığa yerleştirilecek donatı, kazığın kaldırılması sırasında oluşabilecek eğilme momentini karşılayabilmek için standartlarda belirtilen hükümlere uygun olmalıdır. BS8004 ve DIN 4026, boyuna donatının kaldırma ve stoklama sırasında meydana gelen gerilmelerin, yapı yüklerinden gelen kuvvetlerin ve zemin kabarmasından kaynaklanan çekme kuvvetlerinin hesaplanmasını şart koşar. DIN4026'ya göre, beton kaldırma sırasında en az 22 N/mm², çakma sırasında ise en az 34 N/mm² basınç mukavemetine sahip olmalıdır. TS3169'a göre ise, betonarme çakma kazıklarda kullanılan beton kalıptan çıkarıldığında 22.5 N/mm², çakıldığında ise 35 N/mm² basınç mukavemetine sahip olmalıdır. Betonarme çakma kazıkların bazı avantajları şunlardır:

- 1) Korozyona oluşumuna karşı dirençlidirler.
- 2) Üzerine yapılacak yapılar ile kolay birleştirilebilirler.
- 3) Ön germeli imal edildikleri için taşıma ve çakma sırasında meydana gelebilecek çatlakların önüne geçilebilmektedir.

Kazık sayısının fazla olduğu durumlarda eğer zemin koşulları da elverişli ise imalat süresi sayesinde büyük ekonomiklik sağlanabilir. Çakma kazıklar önerilmeli olarak ta yapılabilir. 30 m'ye kadar imalatı gerçekleştirilebilir. Resim 2.2'de betonarme çakma kazıklara ait imalatı göstermektedir.



Resim 2.2 Betonarme çakma kazıkların imalatı (İnt.Kyn.2).

b – Yerinde Dökme Kazıklar:

Betonarme yerinde dökme kazıklar, açılan sondaj kuyusu içerisinde kaplama borulu veya borusuz imal edilir. Şahmerdan, hidrolik veya titreşimli bir çekici vasıtasıyla ucu kapalı bir kaplama borusunun zemine çakılması ile yapılan kazıklara, yerinde dökme betonarme çakma kazık adı verilir. Kaplama borusunun ucu açık şekilde zemine sokularak ve içi temizlenerek hazırlanan kazıklara "sondaj kazığı" veya "fore kazık" adı verilmektedir. Yerinde dökme kazıklar üç grupta incelenir:

- 1) Kaplama borusuz imal edilen kazıklar (kendini tutabilen zeminlerde zemin içerisinde çukur açan çelik bir borunun çakılması ve içerisinde betonlanması ile imal edilen kazıklar),
- 2) Kaplama borusu çukur içerisinde bırakılan kazıklar,
- 3) Kaplama borusu çukurdan çıkarılan kazıklar.

İmal edilecekleri zeminin özelliklerine uygun olarak yerinde dökme kazık çeşidi seçilir. TS3168 standardında kazıkların uzunluğuna göre en küçük çap oranı belirtilmiştir. Yerinde dökülen kazıkların uzunluğuna göre minimum çap uzunluğu Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Yerinde dökülen betonarme kazıkların uzunluğuna göre en küçük çap oranları.

Kazık boyu, L (m)	En küçük kazık çapı, D (mm)
$L \leq 10$	300
$10 < L \leq 15$	350
$15 < L \leq 20$	400
$20 < L \leq 30$	500

Yerinde dökme betonarme kazıkların imal edilme sırasında kazık bütünlüğünün sağlanamamasının nedenleri şöyle sıralanabilir (Sliwinski, Fleming, 1983, Fleming, 1983):

- 1) Beton kalitesinin yetersizliği ve dökülmesi işlemi sırasında betonun segregasyona uğraması sonucu yüzden kazığın mukavemetinin düşmesi,
- 2) Ön görülen kazık boyutlarında uygulanamaması, beton içerisine yabancı madde karışması ve kılıfın hızlı bir şekilde çekilmesi yüzünden istenilen kazık kesiti her derinlikte sağlanamaması,
- 3) Kazıkların yerleşeceği çukurların açılması sırasında kazık ucunun yerleştirileceği zeminin örselenmiş olması veya çukurun içerisinin döküntülerle dolması durumunda, kazık ucunun oturduğu zeminde örselenme meydana gelmesi,
- 4) Donatı kafesi yerinde olmaması gibi nedenler kazık bütünlüğünün sağlanmasında sorun oluşturabilirler.

Fore kazıkların yapımında dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır:

- 1) Kazık çukurunun çeperlerinin sürekliliği, yani stabilitesi sağlanmalıdır. Özellikle yer altı su seviyesinin altındaki kazık çukurlarında, en az 1,0 m'lik bir hidrolik yük farkı oluşturmak için su veya uygun diğer sıvılar kullanılarak kazık çukuru doldurulmalıdır.
- 2) Kazık çukurunun içi betonlama işleminden önce iyice temizlenmeli, betona yabancı madde karışmasına engel olunmalıdır.

- 3) Çukurun hazırlanması ile beton dökümü arasındaki zaman mümkün olduğunca azaltılmalıdır.
- 4) Çukur kazısı kılıfın 1,00 m altına kadar devam ettirilir. Donatı kafesi çukurun içine indirilir. Beton dökümü sırasında kılıfın çekilmesiyle birlikte çevreden zemin ve su girişini engelleyerek kılıfın yukarı çekilmesi kolaylaştırılır.
- 5) Betonlama işlemini kolaylaştırmak için pas paylarından uygun olanı seçilmeli ve donatının kılıfa temasını engellemek için pas payı takozları kullanılmalıdır.

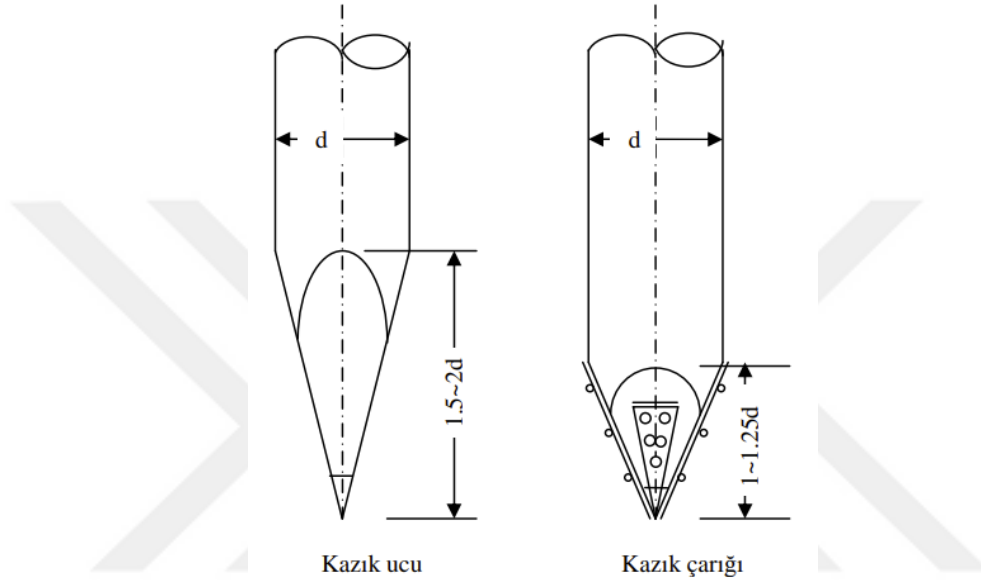


Resim 2.3 Fore kazık imalatı (İnt.Kyn.3).

3 – Ahşap Kazıklar:

Ahşap kazıklar, dalları ve kabuğu dikkatlice budanmış, düzgün gövdeli çam, köknar, meşe gibi ağaçlardan yapılır. Ahşap kazıkların imalatı sırasında yarık, çatlak ve budak bulunmamalıdır. Çoğu ahşap kazığın maksimum uzunluğu 10 ila 20 m arasındadır. Ahşap kazıklar, sert çakma gerilmelerine dayanamaz; bu nedenle, kazık kapasitesi genellikle sınırlıdır. Kazık ucundaki hasarı önlemek için Şekil 2.4'deki gibi metal başlık ve çarık kullanılabilir. Ahşap kazıkları çakma işlemi sırasında üst kısımlarında deforme meydana gelebilir. Bu durumun önüne geçebilmek için metal bant veya kapak kullanılabilir. Ahşap kazıkların gerilme veya yatay yük taşıması bekleniyorsa birleştirilmesinden kaçınılmalıdır. Yanal yük veya kaldırma kuvveti yoksa boru kılıflar, metal bantlar ve cıvatalar ile ek yapılabilir. TS3169 standardı, özel dayanıklılık gerektiren işler için meşe kullanımını tavsiye etmektedir. Ahşap kazıklar, çürüme, böcekler ve burğu kurtlarının

zararları nedeniyle hasara uğrayabilir. Böcek ve kurt zararını önlemek için koruyucular (kreozot, bakır sülfat ve potasyum bikromat) kullanılır. TS3169 standardında ahşap kazıkların ortalama çapları kazık boyuna göre tanımlanır: öyu 6 m'den kısa kazıklar için ortalama çap $D = 25 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Boyu 6 m'den uzun kazıklar için ise ortalama çap $D = (20 + L) \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olarak ifade edilmiştir. Burada L, kazık boyunu metre cinsinden temsil etmektedir.



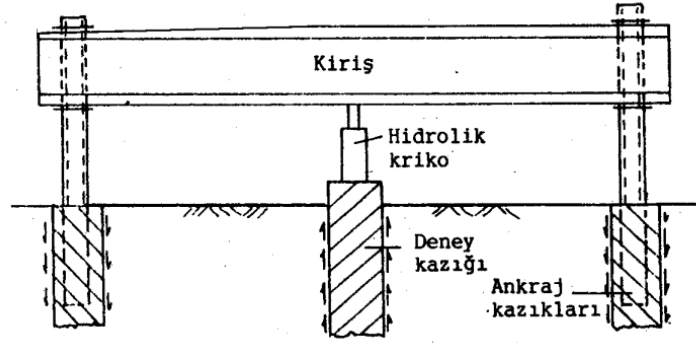
Şekil 2.4 Ahşap kazık ucunun korunması (Turan 2006).

4 – Kompozit Kazıklar:

Kompozit kazıkların üst ve alt kısımları farklı malzemelerden oluşan kazık tipidir. Çelik-beton kazıklar, alt kısmı çelikten ve üst kısmı yerinde dökme betondan oluşan kazıklardır. Ahşap-beton kazıklar genellikle su tablasının altında kalan alt kısım ahşap kazıktan ve üst kısım betondan oluşan kazıklardır. Kompozit kazıklarda iki farklı malzeme arasında uygun ek yerleri oluşturmak zor olduğundan yaygın olarak kullanılmazlar.

2.2 Kazık Yükleme Deneyleri

Kazık yükleme deneyleri, kazığın taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılan en güvenli yöntemdir. Şekil 2.5’de deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.5 Kazık yükleme deneyi (Çinicioğlu 2005).

Kazık yükleme deney sonuçları incelendiğinde kazıklarda yetersizlik görülürse tasarımı yapılan kazıklarda değişikliğe gidilebilir. Kazık yükleme deney sonuçları paket programlarda modelleme sonucu elde edilen veriler ve analitik çözümlerle karşılaştırılabilir.

Çinicioğlu (2005), yaptığı araştırmasında kazık yükleme deneyinde dikkat edilmesi gereken hususları şöyle belirtmiştir:

- 1) Yükleme deneyi ile kazık inşası arasında bir zaman geçmelidir. Bu süre killi zeminler için 1 ay, granüler zemin için 3-4 gün civarındadır. Bu süre kazık çevresindeki zeminin çakma sırasında kaybettiği mukavemeti tekrar geri kazanması için gereklidir. Beton kazıklarda ise malzemenin mukavemetinin kazanması için minimum bir süre geçmelidir.
- 2) Kazık yükleme deneyinde yükleme yapılacak yerin arazinin genel özelliklerini taşıması gerekir.
- 3) Yükleme deneyi için seçilen kazık boyu, kazık çapı ve inşa yöntemi daha sonra yapılacak kazıkların özelliklerini göstermelidir.

Kazık yükleme deneyinde kazığa yükün aktarılma şekli yerel şartnameler ve ASTM standartlarında belirtilmiştir. Çinicioğlu (2005) araştırmasında kuralları genel olarak şöyle özetlemiştir:

- 1) Yük kademeler Şeklinde ve her kademeye tasarım yükü değerinin %20–%25'i mertebesinde olacak Şekilde uygulanmalıdır. Bu kademeler, belirli bir süre geçtikten sonra veya belirli bir oturma hızına ulaşılana kadar zemin üzerinde bekletilir ve yk artırılır.
- 2) Nihai yük, tasarım yükünün iki katı olmalıdır. İlk yükleme aşamasında bu seviyeye (%200 tasarım yükü) ulaşıldıktan sonra ikinci aşamada yükleme göçme yüküne ulaşıncaya kadar devam eder.
- 3) Tasarımda genellikle belirli bir oturma seviyesine karşılık gelen yükün yarısı kullanılır. Bu oturma değeri genellikle 25 mm'dir.

Büyük lekli projelerde kazık yükleme deneyleri yapılması uygun görülmektedir. Bu durumun ana nedeni tahmin metotları sonucu elde edilen verilerin güvenilir olmamasından kaynaklıdır. Kazık yükleme deney sonuçları ile beraber tasarımların gerçekleştirilmesi gereklidir.

2.3 Kazıkların Zemine Yük Aktarma Mekanizması

styapıdan gelen yükler kazık temelleri tarafından zemine çeşitli karmaşık sistemler ile aktarılır. Bu olguyu anlamak için Şekil 2.6a'da gösterildiği gibi kazık uzunluğu L , boyunca yük dağılımına bakmak gerekmektedir. Kazık zerindeki ağırlık sıfırdan başlayarak derinlikle birlikte yavaş yavaş kademeli olarak artar ve zeminin yüzeyinde $Q(z=0)$ değerine ulaşır. Bu yükün bir kısmı kazık gövdesi boyunca çevresinde oluşan evre sürtünmesi Q_1 ile ve bir kısmı da kazık ucunun altında kalan zemin tarafından karşılanan Q_2 ile direnç gösterir. Toplam yükün ne kadarının evre sürtünmesi ile ne kadarının uç kazık kapasitesi ile karşılandığı, yük transfer mekanizması tarafından belirlenir. Herhangi bir z derinliğinde kazık gövdesi boyunca taşınacak $Q(z)$ yükü için ölçümler yapılırsa, kazık gövdesi boyunca dağılım Şekil 2.6b'de gösterildiği gibi olacaktır. Eşitlik (2.4) kullanılarak herhangi z derinliğinde birim evre sürtünme direnci, $f_{(z)}$, aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$f_{(z)} = \frac{\Delta Q_{(z)}}{p \cdot \Delta z} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte,

$f_{(z)}$ = Herhangi bir z derinliğinde birim çevre sürtünme direnci

p = kazık enkesitinin çevresi

$Q_{(z)}$ = Herhangi bir z derinliğinde kazık gövdesi boyunca taşınacak yük

Herhangi bir z derinliğinde birim çevre sürtünme direnci $f_{(z)}$ 'nin, derinlikle değişimi Şekil 2.6c'de gösterilmiştir.

Zemin yüzeyindeki Q yükü yavaş yavaş kademeli olarak artırılırsa, kazık ve zemin arasındaki kazığın boyutlarına ve L uzunluğuna bağlı olarak göreceli yer değiştirme 5–10 mm'ye ulaşacaktır. Bu noktada, kazık gövdesi boyunca çevre sürtünme direnci tamamen mobilize olacaktır. Öte yandan, kazık ucunda taşınabilecek maksimum yükü ($Q_2 = Q_p$) mobilize edebilmek için kazık ucunun, fore kazıklarda çapın yaklaşık %25'i ve çakma kazıklarda %10'u kadar hareket etmesi gerekmektedir. Şekil 2.6d ve 2.6b'deki nihai yükteki eğri gibi, $Q_{(z=0)} = Q_u$ iken durum:

$$Q_1 = Q_s \quad (2.5)$$

ve

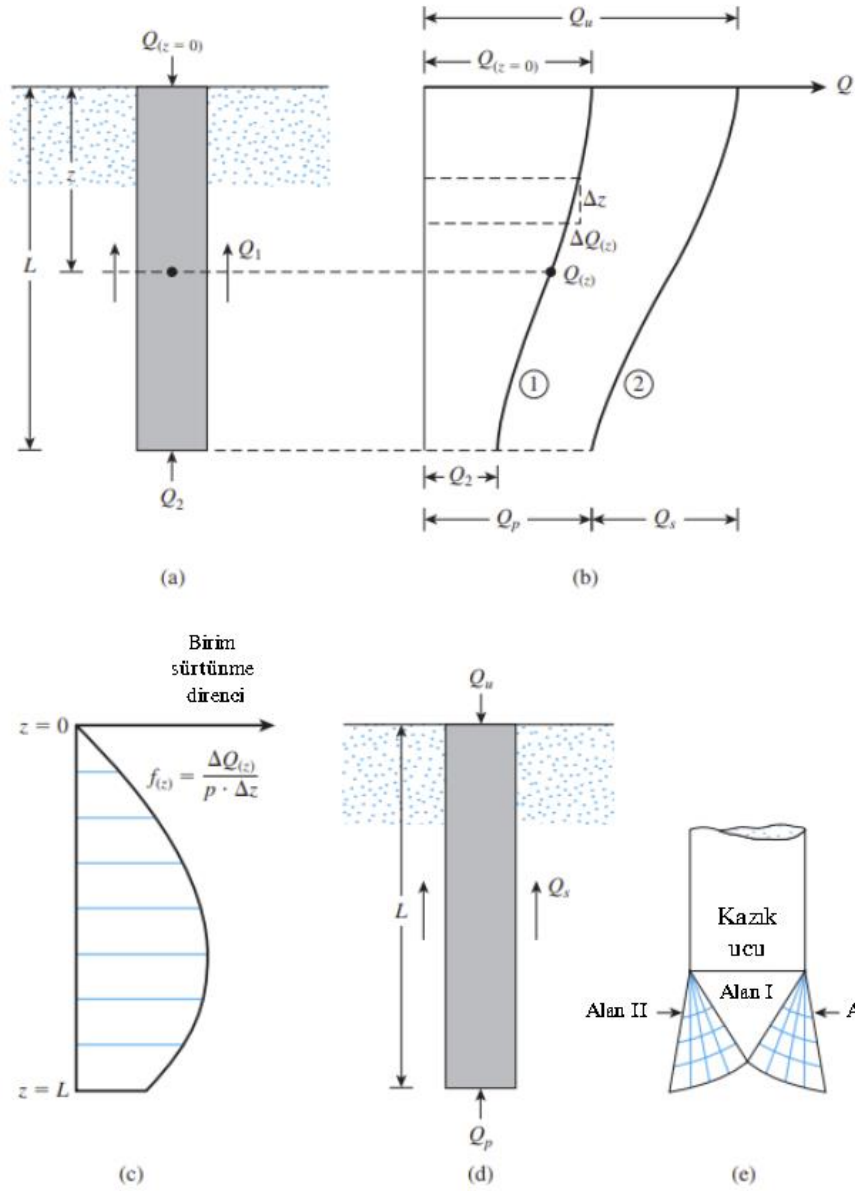
$$Q_2 = Q_p \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte,

Q_s = Kazık sürtünme direnci

Q_p = Kazık uç direnci

Açıklamaya göre, uç direnci, Q_p , kazık shaftı boyunca birim çevre sürtünmesi, Q_s 'den çok daha büyük bir deplasmana neden olur. Vesic'in (1970) granüler zeminlerde yapmış olduğu kazık yükleme deneyi sonuçları bunu göstermektedir.

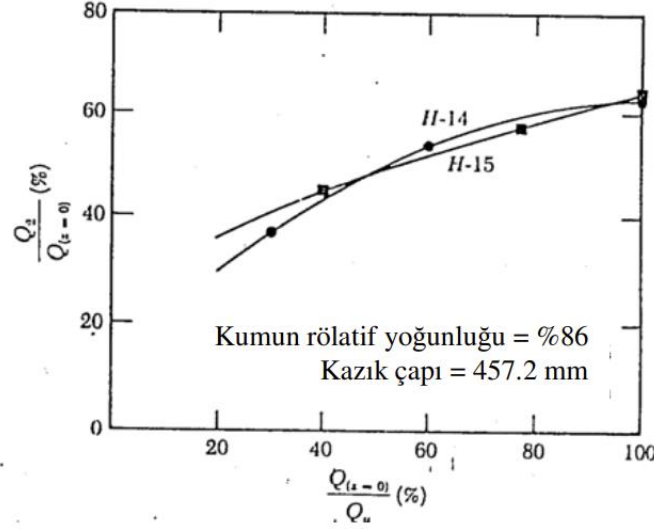


Şekil 2.6 Kazıkların yük aktarım mekanizması (Das 2007).

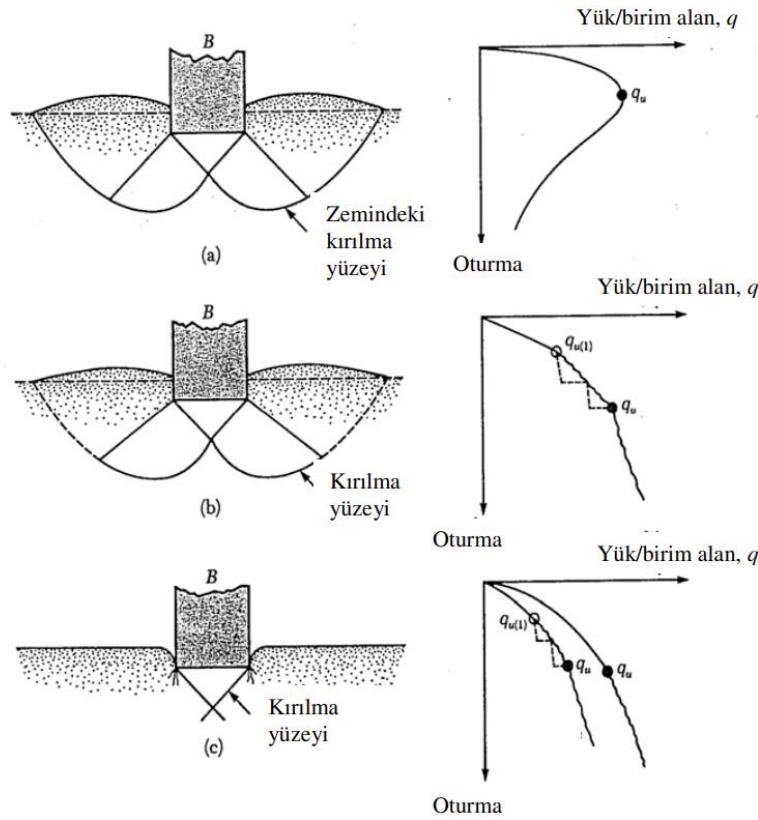
Şekil 2.7’de Vesic’in granüler zeminlerdeki deney sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçların sıkı kum zeminlerde boru kazıklara ait olduğu bilinmelidir. Şekil 2.8, nihai yükte kazık ucundaki zeminin taşıma kapasitesi başarısızlığı sonucu oluşan kırılma yüzeyini göstermektedir.

Kazıklı temeller, derin temellerin özel bir türüdür ve Şekiller 2.8c ve 2.9’da görüldüğü gibi, zemin genellikle zımbalama yoluyla çöker. Bu, kazık ucundaki üçgen alan I’nın aşağı doğru hareket ettiğinde başka kayma yüzeylerinin oluşmadığını gösterir. Radikal

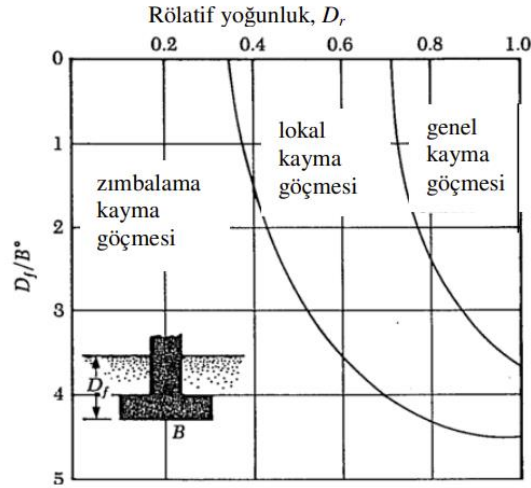
kesme alanı II sıkı kum ve sert kil zeminlerde meydana gelmektedir. Bu durum, Şekil 2.8c'deki gibi kazığın yük – yer değiştirme eğrisinde gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Kazık yüklemesi sırasında farklı aşamalarda aktarılan uç yükünün rölatif büyüklüğü.



Şekil 2.8 Zemin taşıma kapasitesi göçmesi, (a) genel kayma göçmesi; (b) Kısmi (bölgesel) kayma göçmesi; (c) zımbalama göçmesi (Vesic, 1973).



Şekil 2.9 Kum zemindeki temel göçmeler (Vesic 1973).

2.4 Kazıkların Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi

Kazık taşıma kapasitesi, farklı zemin koşullarında kazıkların taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılan matematiksel ifadelerden oluşur. Bu denklemler, genellikle kazığın sürtünme direnci ve uç direnci gibi bileşenlerini dikkate alır. Bu denklemler, kazıkların üzerindeki yükü güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için mühendisler tarafından kazıkların boyutlarını belirlemesine yardımcı olur. Zemin etütleri ve saha deneyleri ile desteklenen bu veriler, yapıların sağlamlığı ve güvenliği açısından büyük önem taşır. Kazığın nihai yük taşıma kapasitesi aşağıdaki denklemle bulunur:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.7)$$

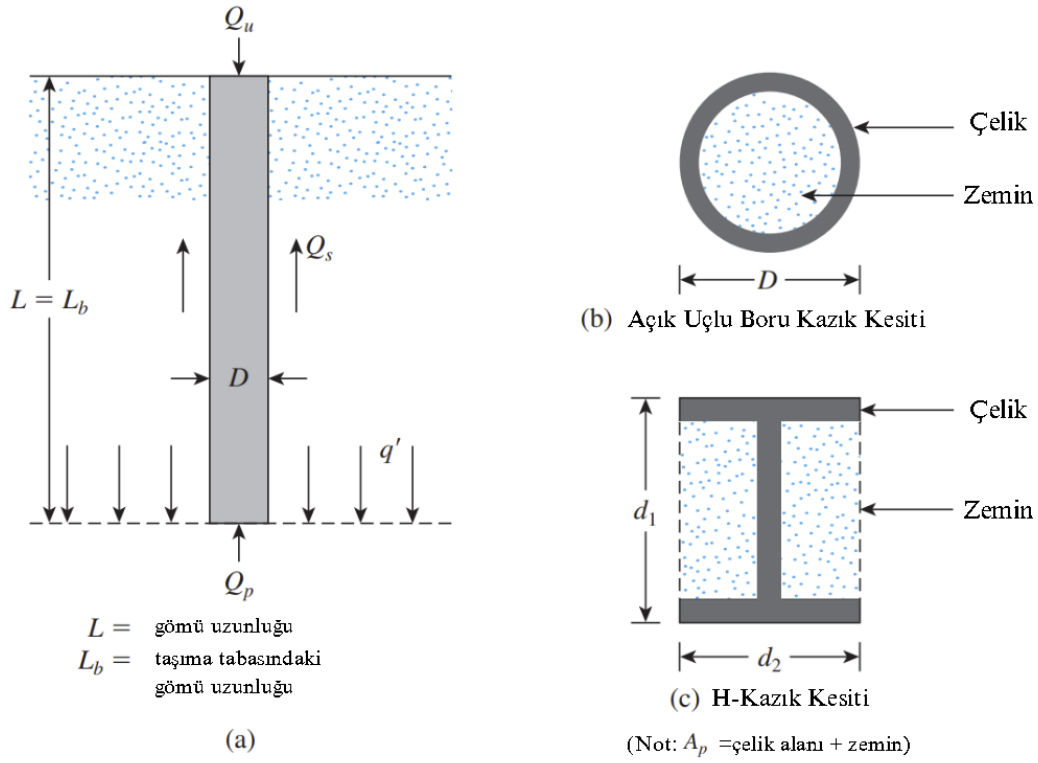
Burada,

Q_u = Kazık taşıma kapasitesi

Q_p = Kazık uç direnci

Q_s = Kazık sürtünme direnci

Kazık yük taşıma kapasitesini belirlemek için araştırmalar yapılmıştır. Kazık ve zemin etkileşimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Kazık taşıma kapasitesi (Das 2007).

Yüzeysel temelerde taşıma kapasitesinin belirlenmesi için Terzaghi aşağıdaki eşitlikleri belirlemiştir:

1) Yüzeysel kare temel için;

$$q_u = 1,3c'N_c + q'N_q + 0,4\gamma BN_\gamma \quad (2.8)$$

2) Yüzeysel dairesel temeller için;

$$q_u = 1,3c'N_c + q'N_q + 0,4\gamma BN_\gamma \quad (2.9)$$

Yüzeysel temeller için düşey yükleme durumunda benzer şekilde genel taşıma kapasitesi denklemi:

$$q_u = c'N_cF_{cs}F_{cd} + q'N_qF_{qs}F_{qd} + 1/2 \gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d} \quad (2.10)$$

Genel olarak nihai yük taşıma kapasitesi şu şekilde ifade edilir:

$$q_u = c'N_c^* + q'N_q^* + \gamma BN_\gamma^* \quad (2.11)$$

Burada N_q^* , N_c^* ve N_γ^* taşıma kapasitesi denklemlerinde kullanılan şekil ve derinlik faktörleridir.

Kazık uç kısmında birim alana denk gelen nihai yük taşıma kapasitesi (q_p), N_q^* , N_c^* ve N_γ^* faktörlerinin değerleri değişmesine rağmen (2.11) denklemine benzer şekilde gösterilebilir. Kazık genişliği D , (2.11) denklemindeki B ile değiştirilirse denklem şu hale gelmektedir:

$$q_u = q_p = c'N_c^* + q'N_q^* + \gamma DN_\gamma^* \quad (2.12)$$

Kazık genişliği D , hesaplamalarda göreceli olarak küçük olduğundan dolayı, ciddi bir hata riskini önlemek için eşitliğin sağ tarafındaki terim ihmal edilir ve denklem şu şekilde ifade edilir:

$$q_p = c'N_c^* + q'N_q^* \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) incelendiğinde dikkat edilmesi gereken ifade q terimidir. Bu terim denklemde q' şeklinde kullanıldığında düşey efektif gerilmeyi ifade eder. Bu terimlerin karışmaması için denklem şu şekilde ifade edilir:

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c'N_c^* + q'N_q^*) \quad (2.14)$$

Burada,

A_p = Kazık uç alanı

c = Kazık ucundaki zeminin kohezyonu

q_p, q_u = Kazık uç direnci

q' = Kazık ucu seviyesinde efektif düşey gerilme

N_c^*, N_q^* = Taşıma kapasitesi faktörleridir.

Kazığın sürtünme direnci ise şu şekilde ifade edilir:

$$Q_s = \sum p \Delta L f \quad (2.15)$$

Burada,

p = kazık çevresi

ΔL = Kazığın zemin içerisindeki çakma boyu

f = Herhangi bir z derinliğinde birim sürtünme direnci

Bir kazığın toplam nihai yük taşıma kapasitesi bulunduğundan sonra tek kazığın müsaade edilebilir yükünü bulmak için güvenlik sayısına bölünmelidir.

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} \quad (2.16)$$

Burada,

Q_{all} = Tek bir kazığın müsaade edilebilir yükü

FS = Güvenlik sayısı

2.4.1 Uç Kazık Taşıma Kapasitesinin (Q_p) Belirlenmesi

Uç kazık taşıma kapasitesini belirlerken araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucu elde edilen ampirik yöntemler kullanılır. Bu çalışma kapsamında Meyerhof, Vesic, Coyle ve Castello, Hansen, Janbu ve Terzaghi'nin önermiş oldukları ampirik yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak toplam uç kazık taşıma kapasitesi değeri belirlenmiştir.

2.4.1.1 Meyerhof Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi

Meyerhof metodu ile kum zeminlerde Q_p 'yi belirlerken genel olarak, kumdaki bir kazığın uç kazık taşıma kapasitesi (q_p), kazık çapının (L_b/D) taşıyıcı tabakadaki gömü derinliğine oranı azaldıkça artar ve $L_b/D = (L_b/D)_{cr}$ kritik gömü oranı maksimum değere ulaşır. Homojen zeminlerde L_b 'nin, kazığın gerçek gömü uzunluğu olan L 'ye eşit olduğunu Şekil 2.2'de belirtilmiştir. Ancak, kazık taşıyıcı bir tabakaya girdiğinde $L_b < L$ olur. Kritik gömü oranı (L_b/D)_{cr}'nin ötesinde q_p değeri değişmez; yani, $q_p = q_l$ olur. Şekil 2.11, bu etkinin homojen zemin koşulları altındaki durumunu göstermektedir. Meyerhof (1976), (L_b/D)_{cr}'nin bu değişimine ilişkin olarak granüler zeminlerde uç kazık taşıma kapasitesini belirlemek için şu yöntemi önermiştir.

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^* \quad (2.17)$$

Bu denklemde N_q^* Şekil 2.12'deki zemin içsel sürtünme açısına ϕ' bağlı olarak bulunur. Çeşitli sürtünme açıları için N_q^* değerleri enterpolasyon yapılarak çizelge 2.2 de verilmiştir. Ancak, denklemin (2.17) sonucu $A_p q_l$ değerini aşmamalıdır.

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_l \quad (2.18)$$

Bu denklemdeki sınırlayıcı uç direnç (q_l) şu şekildedir:

$$q_l = 0,5 p_a N_q^* \tan \phi' \quad (2.18)$$

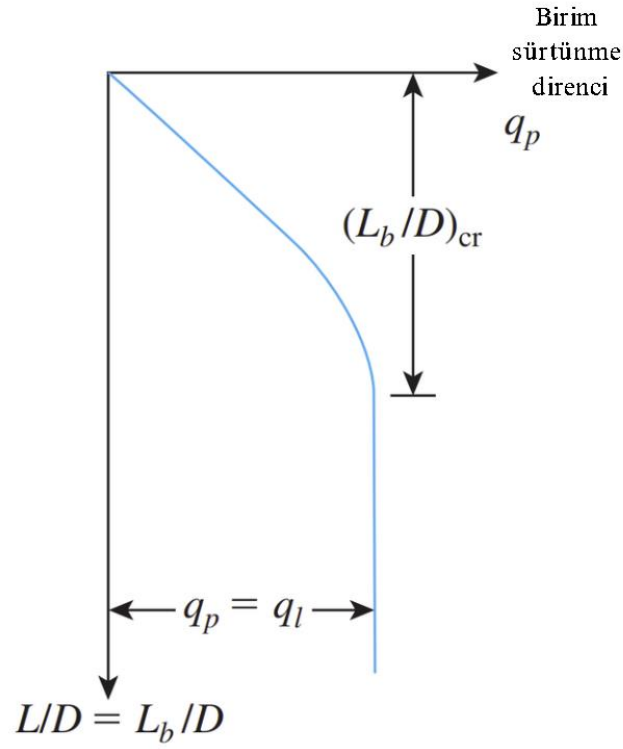
Burada,

p_a = Atmosfer basıncı (100 kN/m²)

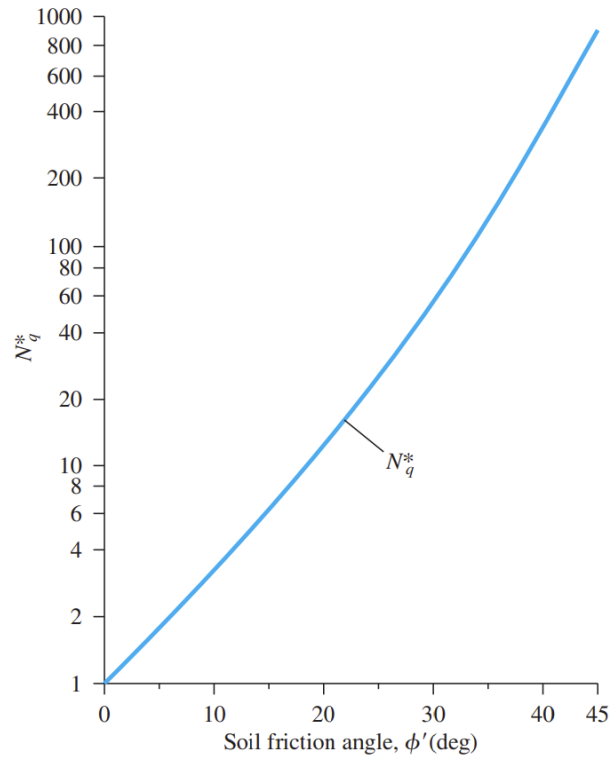
ϕ' = Zeminin içsel sürtünme açısı

N_q^* = Taşıma kapasitesi faktörü.

Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı yük taşıma kapasiteleri Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Homojen kum zeminde uç direncin değışimi (Das 2007).

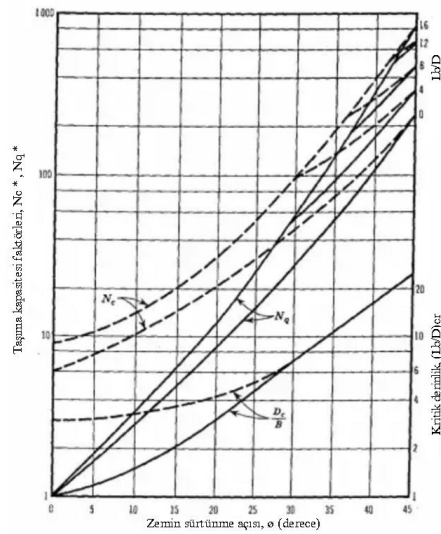


Şekil 2.12 Zemin içsel sürtünme bağlı olarak N_q^* bulunması (Meyerhof 1976).

Çizelge 2.2 N_q^* değerlerinin interpolasyonla bulunması (Meyerhof 1976).

İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (derece)	N_q^*
20	12,4
21	13,8
22	15,5
23	17,9
24	21,4
25	26,0
26	29,5
27	34,0
28	39,7
29	46,5
30	56,7
31	68,2
32	91,0
33	96,0
34	115,0
35	143,0
36	168,0
37	194,0
38	231,0
39	276,0
40	346,0
41	420,0
42	525,0
43	650,0
44	780,0
45	930,0

Meyerhof kritik gömü oranı için taşıma kapasitesi faktörelini Şekil 2.13'deki belirtmiştir.



Şekil 2.13 Zemin sürtünme açıları için kritik derinlik ve yük taşıma kapasitesi faktörleri, (Meyerhof, 1976).

Meyerhof kil zeminlerde Q_p 'nin belirlenmesi için bazı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Suya doygun killerde, drenajsız koşullar altındaki kazıklar için nihai taşıma gücü şu şekildedir:

$$Q_p \approx N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p \quad (2.19)$$

Burada,

c_u = Kazık ucunun oturduğu zeminin kohezyonu

N_c^* = Taşıma kapasitesi faktörü.

A_p = Kazık uç alanı

2.4.1.2 Vesic Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi

Vesic (1977), kum zeminde boşluk genişlemesi kavramına dayanarak kazık uç direncinin hesaplanmasını bir ampirik yöntemle sunmuştur. Bu yaklaşıma göre, efektif gerilme parametresi kullanılarak uç direnci aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q_p = A_p q_p = A_p \bar{\sigma}'_0 N_\sigma^* \quad (2.20)$$

Burada,

A_p = Kazık uç alanı

$\bar{\sigma}'_0$ = Kazık uç noktasındaki efektif gerilme

N_σ^* = Taşıma gücü kapasitesi faktörüdür ve

$\bar{\sigma}'_0$ ve N_σ^* aşağıdaki denklemler (2.21) ve (2.22) ile bulunur:

$$\bar{\sigma}'_0 = \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) q' \quad (2.21)$$

$$N_\sigma^* = \frac{3N_q^*}{(1 + 2K_0)} \quad (2.22)$$

Burada,

K_0 = Zeminin sükunet halindeki basınç katsayısıdır ve

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2.23)$$

Şeklinde ifade edilir.

Vesic teorisinde $N_\sigma^* = f(I_{rr})$ 'dir.

Burada I_{rr} , azaltılmış rijitlik endeksidir.

Denklem (2.24) yardımıyla I_{rr} değeri belirlenebilir.

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} \quad (2.24)$$

Burada,

Δ = Kazık ucu altındaki plastik bölgenin ortalama volumatik gerilmesi

I_r = Rijitlik endeksi

Denklem (2.25) yardımıyla I_r değeri şu şekilde belirlenir:

$$I_r = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)q' \tan \phi'} = \frac{G_s}{q' \tan \phi'} \quad (2.25)$$

Burada,

E_s = Zeminin elastisite modülü

μ_s = Zeminin poisson oranı

G_s = Zeminin kayma modülü

ϕ' = Zeminin içsel sürtünme açısı

$q' =$ Kazık ucu seviyesinde efektif düşey gerilme

Çeşitli zeminler için I_r aralığı şu şekildedir;

Kum zeminlerde (rölatif yoğunluk = %50 ~ %80): 75 ~ 150

Silt zeminlerde: 50 ~ 75

I_r 'nin hesaplanması sonucu, I_{rr} 'nin yaklaşık olarak belirlenmesi için şu yaklaşımlar sunulmuştur:

$$\frac{E_s}{p_a} = m \quad (2.26)$$

Burada,

$p_a =$ Atmosfer basıncı ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$)

$$m = \begin{cases} 100 - 200 & (\text{gevşek zemin için}) \\ 200 - 500 & (\text{orta sertlikte zemin için}) \\ 500 - 1000 & (\text{sert zemin için}) \end{cases}$$

$$\mu_s = 0,1 + 0,3 \left(\frac{\phi' - 25}{20} \right) (25^\circ \leq \phi' \leq 45^\circ \text{ için}) \quad (2.27)$$

$$\Delta = 0,005 \left(1 - \frac{\phi' - 25}{20} \right) \frac{q'}{p_a} \quad (2.28)$$

Çizelge 2.3 'de azaltılmış rijitlik indeksi I_{rr} ve içsel sürtünme açısı ϕ' değerlerine karşılık gelen N_σ^* taşıma gücü değerleri verilmiştir. Çizelge yardımıyla elde edilen N_σ^* değeri formülde yerine koyularak Vesic teorisine göre kum zemindeki kazık uç taşıma kapasitesi Q_p belirlenmiş olur. Q_p 'nin teorik olarak hesaplanmasında göz önünde bulundurulmayan; kazık ucunun kazık genişliğinin %10 ila %25 arasında oturma yapmaması halinde, gerçek değerinin elde edilemeyeceğidir. Bu da kumlar için kritik bir durumdur (Das, 1984).

Çizelge 2.3 I_{rr} ve ϕ' değerlerine karşılık gelen N_G^* taşıma gücü.

ϕ'	I_{rr}									
	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500
25	12,12	15,95	20,98	24,64	27,61	30,16	39,70	46,61	52,24	57,06
26	13,18	17,47	23,15	27,30	30,69	33,60	44,53	52,51	59,02	64,62
27	14,33	19,12	25,52	30,21	34,06	37,37	49,88	59,045	66,56	73,04
28	15,57	20,91	28,10	33,40	37,75	41,51	55,77	66,29	74,93	82,40
29	16,90	22,85	30,90	36,87	41,79	46,05	62,27	74,30	84,21	92,80
30	18,24	24,95	33,95	40,66	46,21	51,02	69,43	83,14	94,48	104,33
31	19,88	27,22	37,27	44,79	51,03	56,46	77,31	92,90	105,84	117,11
32	21,55	29,68	40,88	49,30	56,30	62,41	85,96	103,66	118,39	131,24
33	23,34	32,34	44,80	54,20	62,05	68,92	95,46	115,51	132,24	146,87
34	25,28	35,21	49,05	59,54	68,33	76,02	105,90	128,55	147,51	164,12
35	27,36	38,32	53,67	65,36	75,17	83,78	117,33	142,89	164,33	183,16
36	29,60	41,68	58,68	71,69	82,62	92,24	129,87	159,65	182,85	204,14
37	32,02	45,31	64,13	78,57	90,75	101,48	143,61	175,95	203,23	227,26
38	34,63	49,24	70,03	86,05	99,60	111,56	158,65	194,94	225,62	252,71
39	37,44	53,50	76,45	94,20	109,24	122,54	175,11	215,78	250,23	280,71
40	40,47	58,10	83,40	103,05	119,74	134,52	193,13	238,62	277,26	311,50
41	43,74	63,07	90,96	112,68	131,18	147,59	212,84	263,67	306,94	345,34
42	47,27	68,46	99,16	123,16	143,64	161,83	234,40	291,13	339,52	382,53
43	51,08	74,30	108,08	134,56	157,21	177,36	257,99	321,22	375,28	423,39
44	55,20	80,62	117,76	146,97	172,00	194,31	283,80	354,20	414,51	468,28
45	59,66	87,48	128,28	160,48	188,12	212,79	312,03	390,35	457,57	517,58

Vesic metodu ile kil zeminde Q_p 'yi belirlerken, doygun killerde ($\phi' = 0$ koşulu), kazığın uç kazık taşıma kapasitesi şu şekildedir:

$$Q_P = A_p q_p = A_p c_u N_c^* \quad (2.29)$$

Vesic (1977), yaptığı çalışmada boşlukların genişlemesi teorisine bağlı olarak şu eşitliği belirlemiştir:

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (2.30)$$

(2.24) denklemi, doymuş kil zeminde hacim değişikliği olmadığında $\Delta = 0$ olur ve böylelikle:

$$I_{rr} = I_r \quad (2.31)$$

Olur. Çizelge 2.4’de $\phi' = 0$ olması durumunda I_{rr} ’ye bağlı N_c^* değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.4 Vesic’in teorisine göre I_{rr} ’ye bağlı N_c^* değerleri

I_{rr}	N_c^*
10	6,97
20	7,90
40	8,82
60	9,36
80	9,75
100	10,04
200	10,97
300	11,51
400	11,89
500	12,19

$\phi' = 0$ için,

$$I_r = \frac{E_s}{3c_u} \quad (2.32)$$

O’ Neill ve Reese (1999) çalışmalarında I_r ve c_u için Çizelge 2.5’deki ilişkileri önerdiler:

Çizelge 2.5 I_r ve c_u için O’ Neill ve Reese önerdiği değerler.

$\frac{c_u}{p_a}$	I_r
0,24	50
0,48	150
$\geq 0,96$	250–300

Değerler şu şekilde yaklaşık olarak verilebilir.

$$I_r = 347 \left(\frac{c_u}{p_a} \right) - 33 \leq 300 \quad (2.33)$$

2.4.1.3 Coyle ve Castello Metodu ile Kum Zeminlerde Q_p 'nin Belirlenmesi

Coyle ve Castello (1981), kumlu zeminlerde gerçekleştirilen büyük ölçekli 24 adet kazık yükleme testinin bulgularına dayanarak, kumlar için aşağıdaki denklemi geliştirmişlerdir:

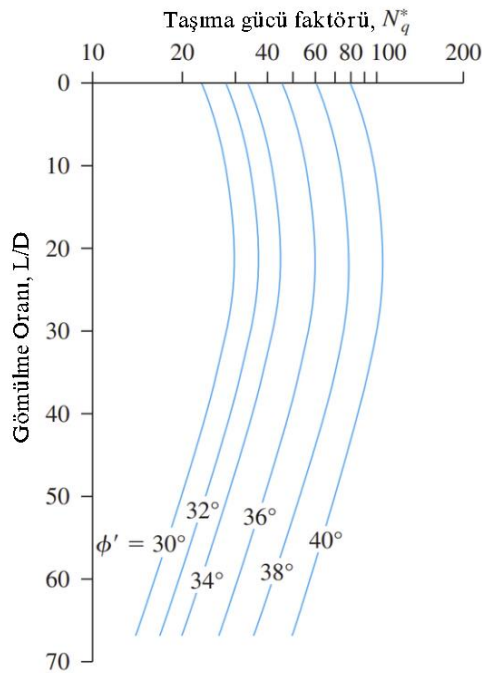
$$Q_p = q' N_q^* A_p \quad (2.34)$$

Burada,

q' = Kazık ucu seviyesinde efektif düşey gerilme

N_q^* = Taşıma kapasitesi faktörü

L/D oranına bağlı olarak N_q^* bulunması Şekil 2.14'de verilmiştir:



Şekil 2.14 N_q^* 'ın, L/D oranına ve içsel sürtünme açısı ϕ' ile değişimi (Das 2007).

2.4.1.4 Hansen Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi

Şekil faktörleri dikkate alındığında, kazıklı temeller için taşıma kapasitesi denklemi (2.35) şu şekilde alternatif olarak yazılabilir:

$$Q_p = A_p (c N_c d_c + \eta q N_q' d_q + 0,5 \gamma' B_p N_\gamma) \quad (2.35)$$

Burada,

d_c, d_q = Şekil faktörleri

N_c, N_q, N_γ = Taşıma kapasitesi faktörleri

B_p = Kazık çapı

N_c ve N_q değerleri Çizelge 2.6'dan alınır, ve şekil faktörleri, d_c ve d_q uygun koşullarda Hansen (1967) yöntemi kullanılarak belirlenir. Denklem (2.35) eşitliğinde η değeri 1'e eşit olarak alınır (Bowles 1996).

Çizelge 2.6 Meyerhof, Hansen ve Vesic taşıma kapasitesi denklemleri için taşıma gücü faktörleri (N_γ faktöründe alt indisler yazarı belirtir).

ϕ	N_c	N_q	$N_{\gamma(H)}$	$N_{\gamma(M)}$	$N_{\gamma(V)}$	N_q/N_c	$2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2$
0	5,14*	1	0	0	0	0,195	0
5	6,49	1,6	0,1	0,1	0,4	0,242	0,146
10	8,34	2,5	0,4	0,4	1,2	0,296	0,241
15	10,97	3,9	1,2	1,1	2,6	0,359	0,294
20	14,83	6,4	2,9	2,9	5,4	0,431	0,315
25	20,71	10,7	6,8	6,8	10,9	0,514	0,311
26	22,25	11,8	7,9	8	12,5	0,533	0,308
28	25,79	14,7	10,9	11,2	16,7	0,57	0,299
30	30,13	18,4	15,1	15,7	22,4	0,61	0,289
32	35,47	23,2	20,8	22	30,2	0,653	0,276
34	42,14	29,4	28,7	31,1	41	0,698	0,262
36	50,55	37,7	40	44,4	56,2	0,746	0,247
38	61,31	48,9	56,1	64,0	77,9	0,797	0,231
40	75,25	64,1	79,4	93,6	109,3	0,852	0,214
45	133,73	134,7	200,5	262,3	271,3	1,007	0,172
50	266,5	318,5	567,4	871,7	761,3	1,195	0,131

* = $\pi + 2$; $\phi = 0$ olduğunda limittir.

$L/B \leq 1$ için;

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \quad (2.36)$$

$$d_c = 1 + 0,4 L/B \quad (2.37)$$

$L/B > 1$ için;

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} L/B \quad (2.38)$$

$$d_c = 1 + 0,4 \tan^{-1} L/B \quad (2.39)$$

2.4.1.5 Janbu Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi

Kazıklı temelleri için şekil parametrelerini ve dilatasyon açısını dikkate alarak, genel taşıma kapasitesi denklemi (2.10) aşağıdaki şekilde alternatif olarak yazılabilir:

$$Q_p = A_p (c N_c d_c + \eta q N_q' d_q + 0,5 \gamma' B_p N_\gamma) \quad (2.40)$$

Janbu (1976) yaklaşımında N_q değeri denklem (2.41) kullanılarak belirlenir. Ayrıca, Hansen metodundan d_c ve d_q değerleri belirlenir ve denklem (2.40)'da yerine yazılır. Taşıma kapasitesini hesaplamak için N_c , N_q ve N_γ değerleri Çizelge 2.7'den alınır (Bowles 1996).

N_q , taşıma gücü faktörü denklem (2.41) verilen eşitlikten yararlanılarak ayrıca belirlenebilir.

$$N_q = \left(\tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi) \quad (2.41)$$

Burada,

Ψ = radyan cinsinden açı

ϕ' = Zeminin içsel sürtünme açısı

Çizelge 2.7 Janbu ve Vesic metotları için taşıma kapasitesi faktörleri (Bowles 1996).

ϕ	Janbu				Vesic			
	$\psi = 75^\circ$	90	105	$I_{rr}=10$	50	100	200	500
0	$N'_q = 1,00$	1,00	1,00	$N'_q = 1,00$	1,00	1,00	1,00	1,00
	$N'_c = 5,74$	5,74	5,74	$N'_c = 6,97$	9,12	10,04	10,97	12,19
5	1,50	1,57	1,64	1,79	2,12	2,28	2,46	2,71
	5,69	6,49	7,33	8,99	12,82	14,69	16,69	19,59
10	2,25	2,47	2,71	3,04	4,17	4,78	5,48	6,57
	7,11	8,34	9,70	11,55	17,99	21,46	25,43	31,59
20	5,29	6,40	7,74	7,85	13,57	17,17	21,73	29,67
	11,78	14,83	18,53	18,83	34,53	44,44	56,97	78,78
30	13,60	18,40	24,90	18,34	37,50	51,02	69,43	104,33
	21,82	30,14	41,39	30,03	63,21	86,64	118,53	178,98
35	23,08	33,30	48,04	27,36	59,82	83,78	117,34	183,16
	31,53	46,12	67,18	37,65	84,00	118,22	166,15	260,15
40	41,37	64,20	99,61	40,47	93,70	134,53	193,13	311,50
	48,11	75,31	117,52	47,04	110,48	159,13	228,97	370,04
45	79,90	134,87	227,68	59,66	145,11	212,79	312,04	517,60
	78,90	133,87	226,68	53,66	144,11	211,79	311,04	516,60

2.4.1.6 Terzaghi Metodu ile Q_p 'nin Belirlenmesi

Kazık temelleri için taşıma kapasitesi denklemi (2.10), temel şekil parametrelerini dikkate alarak, Hansen (1967) prosedürünü takip ederek aşağıdaki şekilde alternatif olarak ifade edilebilir:

$$Q_P = A_p (cN_c s_c + qN_q + 0,5\gamma' N_\gamma s_\gamma) \quad (2.42)$$

Burada,

s_c ve s_γ = Temel şekil değiştirme faktörleri

N_c ve N_q değerleri Çizelge 2.6'dan elde edilirken, temel şekil faktörleri olan s_c ve s_γ , temel kesitin şekline bağlı olarak Çizelge 2.8'den alınır. Bu yaklaşımda N_c ve N_q değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak da hesaplanabilir. (Bowles, 1996).

$$N_q = a^2/[2\cos^2(45 + \phi/2)] \quad (2.43)$$

$$a = e^{(0,75\pi - \phi/2)\tan\phi} \quad (2.44)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\phi \quad (2.45)$$

$$N_\gamma = (\tan\phi/2)/[(K_{py}/\cos^2\phi) - 1] \quad (2.46)$$

Çizelge 2.8 Terzaghi (1947) tarafından önerilen temel şekil faktörleri.

Temel Şekli	s_c	s_γ
Şerit temel	1.0	1.0
Dairesel kesitli temel	1.3	0.6
Kare kesitli temel	1.3	0.8

2.4.1.7 Q_p 'nin SPT ve CPT ile Belirlenmesi

Meyerhof (1976) çalışmasında, standart penetrasyon deneyinden (SPT) elde edilen darbe sayılarını, homojen granüler zeminde nihai kazık uç direncini ($L = L_b$) belirlemek için kullanılabileceğini belirtmiştir:

$$q_p = 0,4p_a N_{60} \frac{L}{D} \leq 4p_a N_{60} \quad (2.47)$$

Burada,

q_p = Kazık uç direnci

N_{60} = Kazık uç noktasından, 10D üstü ve 4D altı alanı içerisinde kalan SPT darbe sayılarının ortalaması

p_a = Atmosfer basıncı ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$)

L = Kazık boyu

D = Kazık çapı

Briaud vd. (1985) yaptıkları çalışmalarında kazık uç direncinin belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir:

$$q_p = 19,7 p_a (N_{60})^{0,36} \quad (2.48)$$

Meyerhof (1956) granüler zeminde, koni penetrasyon deneyi (CPT) sonuçlarının nihai kazık uç direncine yaklaşık olarak benzer alınabileceğini belirtmiştir:

$$q_p \approx q_c \quad (2.49)$$

Burada,

q_c = Koni penetrasyon uç direnci

2.4.2 Kazık Sürtünme Direncinin (Q_s) Belirlenmesi

Bir kazığın sürtünme direncini belirlemek için denklem (2.50)'de verilen eşitlik kullanılır:

$$Q_s = \sum p \Delta L f \quad (2.50)$$

Burada,

p = Kazık kesitinin çevresi

ΔL = Kazığın zemin içerisindeki çakma boyu

f = Herhangi bir z derinliğinde birim sürtünme direnci

2.4.2.1 Kum Zeminde Q_s 'in Belirlenmesi

Kazık için kum zemin içerisinde herhangi bir z derinliğindeki birim sürtünme direnci şu şekilde elde edilebilir:

$$f = K\sigma'_0 \tan \delta \quad (2.51)$$

Burada,

K = Toprak basınç katsayısı

σ'_0 = Göz önüne alınan derinlikteki ortalama efektif düşey yük

δ = Kazık–zemin sürtünme açısı

K değerleri, gerçekte derinliğe bağlı olarak değişen katsayıdır. Genel olarak, kazık üstündeki Rankine pasif toprak basıncı katsayısı (K_p); kazık ucundaki sükunet halinde bulunan toprak basıncından (K_0) daha azdır. Bu aynı zamanda kazığın yerleşimine de bağlıdır. Bu bulgulara dayanarak, Denklem (2.51)'de kullanılacak K değerleri listelenmiştir:

Fore kazıklar için;

$$K = K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2.52)$$

Düşük deplasmanlı kazıklar için;

$$K_0 = 1 - \sin \phi \text{ ile} \quad (2.53)$$

$$1,4K_0 = 1,4(1 - \sin \phi) \text{ aralığında} \quad (2.54)$$

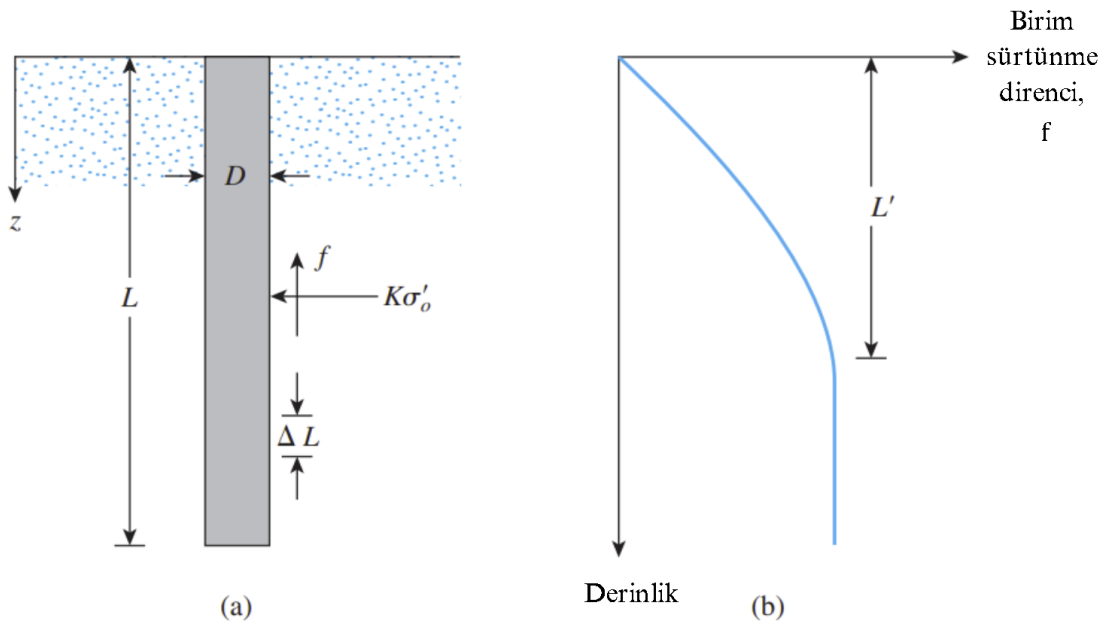
Yüksek deplasmanlı kazıklar için;

$$K_0 = 1 - \sin \phi \text{ ile} \quad (2.55)$$

$$1,8K_0 = 1,8(1 - \sin \phi) \text{ aralığında} \quad (2.56)$$

Denklem (2.51) kullanılarak görülebilir ki ortalama efektif düşey gerilme, σ'_v , kazık derinliği arttıkça yükselir ve yaklaşık olarak kazık çapının 15–20 katı değerine ulaştığında maksimum değerine ulaşır ve sabitlenir (Şekil 2.15b). Kritik derinlik, L' , rölatif yoğunluk, zemin içsel sürtünme açısı ve sıkışabilirlik gibi çeşitli unsurlara bağlıdır.

$$L' = 15D \quad (2.57)$$



Şekil 2.15 Kum zemindeki kazıklar için birim sürtünme direnci (Das 2007).

Çeşitli incelemeler, δ değerlerinin aralığının $0,5\phi$ ile $0,8\phi$ olduğunu ortaya koymuştur. δ değerinin seçimi etkili bir muhakeme gerektirir.

Coyle ve Castello (1981), kum zeminlerde kazık sürtünme direncinin belirlenmesinde şu eşitliği önermişlerdir:

$$Q_s = pL f_{av} = (K\sigma'_0 \tan \delta') pL \quad (2.58)$$

Burada,

K = Toprak basınç katsayısı

σ'_0 = Göz önüne alınan derinlikteki ortalama efektif düşey yük

δ = Kazık–zemin sürtünme açısı ($= 0,8\phi'$)

p = Kazık kesitinin çevresi

L = Kazık boyu

Eşitlik düzenlenirse şu şekilde yazılabilir:

$$Q_s = K\sigma'_0 \tan(0,8\phi') pL \quad (2.59)$$

Denklem (2.59)'da verilen ϕ' değeri zeminin içsel sürtünme açısıdır.

2.4.2.2 Kumlu Zeminde Q_s 'in SPT Korelasyonu ile Belirlenmesi

Meyerhof (1976), büyük deplasman yapan çakma kazıklar için ortalama birim sürtünme direncinin standart penetrasyon değerleri ile belirlenebileceğini göstermiştir.

$$f_{av} = 0,02p_a(\bar{N}_{60}) \quad (2.60)$$

Burada,

$\bar{N}_{60}$ = Kazık ucu çevresindeki ortalama SPT

p_a = Atmosfer basıncı ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$)

Düşük deplasman yapan çakma kazıklarda ise:

$$f_{av} = 0,01p_a(\bar{N}_{60}) \quad (2.61)$$

Briaud vd. (1985) çalışmalarında aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$f_{av} \approx 0,224p_a(\bar{N}_{60})^{0,29} \quad (2.62)$$

2.4.2.3 Kil Zeminde Q_s 'in Belirlenmesi

Kil zeminlerde Q_s 'i belirlemek için λ , α ve β metotları kullanılmaktadır.

λ metodu, kil zeminlerde Q_s değerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biridir. Vijayvergiya ve Focht (1972), kazık çakmanın herhangi bir derinlikte zemin yer değiştirmesine neden olduğu ve bunun da pasif yanal basınç oluşturduğu varsayımıyla bu yöntemi önermiştir. Ortalama birim sürtünme direnci şu şekilde ifade edilmiştir:

$$f_{av} = \lambda(\sigma'_0 + 2c_u) \quad (2.63)$$

Burada,

σ'_0 = Göz önüne alınan derinlikteki ortalama efektif düşey yük

c_u = Zeminin drenajsız kayma mukavemeti ($\phi = 0$)

Kazığın boyuna bağlı olarak λ değerindeki değişim Çizelge 2.9'da verilmiştir.

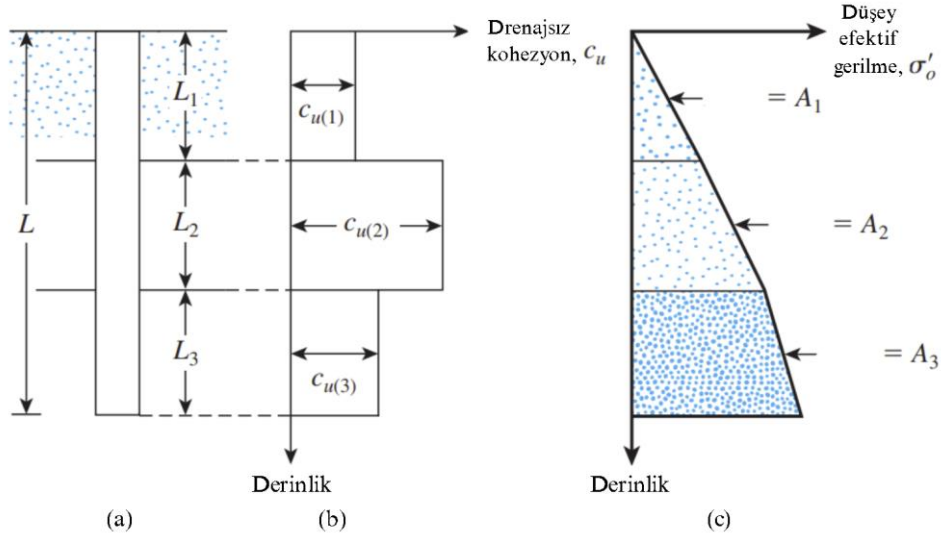
Çizelge 2.9 Kazığın boyuna (L) bağlı olarak λ değerindeki değişim (Das 2007).

Kazık Gömü Derinliği L(m)	λ
0	0,5
5	0,336
10	0,245
15	0,200
20	0,173
25	0,150
30	0,136
35	0,132
40	0,127
50	0,118
60	0,113
70	0,110
80	0,110
90	0,110

Tabakalı zeminlerde σ'_0 ve c_u değerleri bulunurken her tabakayı kendi içerisinde değerlendirmek gerekmektedir. Şekil 2.16a'da üç farklı kil tabakasından meydana gelen zemin içerisinde bir kazık görülmektedir. Şekil 2.16b'de zeminlere ait c_u değerlerinin $(c_{u(1)}L_1 + c_{u(2)}L_2 + \dots)/L$ ortalaması gösterilmektedir. Şekil 2.16c'de efektif gerilmelerin derinliğe bağlı olarak değişimini alanlar cinsinden göstermektedir.

$$\bar{\sigma}'_0 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L} \quad (2.64)$$

Denklemden (2.64) gösterilen $A_1, A_2, A_3, \dots$ değerleri efektif gerilme diyagramlarının alanlarıdır.



Şekil 2.16 λ metodunun tabakalı zemine uygulanması (Das 2007).

Kazığın toplam sürtünme direnci denklem (2.58) ile bulunur.

α metodu, kil zeminlerde birim çevre sürtünme değerini belirlemek için kullanılan yöntemdir ve şu eşitlikle belirlenir:

$$f = \alpha c_u \quad (2.65)$$

Burada,

α = Ampirik adezyon faktörü

α adezyon faktörünün c_u değerine bağlı olarak değişimi Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10 α değerinin değişimi (Terzaghi, Peck ve Mesri, 1996).

c_u/p_a	α
$\leq 0,1$	1,00
0,2	0,92
0,3	0,82
0,4	0,74
0,6	0,62
0,8	0,54
1,0	0,48
1,2	0,42
1,4	0,40
1,6	0,38
1,8	0,36
2,0	0,35
2,4	0,34
2,8	0,34

Kazığın toplam çevre sürtünme direnci aşağıdaki denklem yardımıyla bulunur:

$$Q_s = \sum p \Delta L f = \sum \alpha c_u p \Delta L \quad (2.66)$$

Burada,

c_u = Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

p = Kazık kesitinin çevresi

ΔL = Kazığın zemin içerisindeki çakma boyu

β metodu, kil zeminlerde Q_s değerini belirlemede kullanılan yöntemlerden biridir. Doygun kil içerisinde kazık çakılması işlemi sırasında kazık çevresindeki zeminde gözenek suyu basıncı artar. Normal killerde bu aşırı gözenek suyu basıncı, c_u 'nun 4 ila 6

katı arasında değişir. Bu basınç bir süre sonra azalmaya başlar. Bu durumda, örselenmiş kilin etkin gerilme özellikleri ($c = 0$ varsayımıyla), kazık için birim sürtünme direncini herhangi bir derinlikte şu şekilde ifade etmeye olanak tanır:

$$f = \beta \sigma'_0 \quad (2.67)$$

Burada,

σ'_0 = Herhangi bir derinlikteki düşey efektif gerilme

$$\beta = K \tan \phi_r \quad (2.68)$$

ϕ_r = Örselenmiş kilin drenajlı sürtünme açısı

K = Toprak basıncı katsayısı

K değeri;

$$K_0 = 1 - \sin \phi_r \quad (\text{normal konsolide killer için}) \quad (2.69)$$

$$K_0 = (1 - \sin \phi_r) \sqrt{OCR} \quad (\text{aşırı konsolide killer için}) \quad (2.70)$$

Burada,

OCR = Aşırı konsolide oranı

Denklemler (2.67), (2.68) ve (2.69) düzenlendiğinde normal konsolide killer için:

$$f = (1 - \sin \phi_r) \tan \phi_r \sigma'_0 \quad (2.71)$$

Aşırı konsolide killer:

$$f = (1 - \sin \phi_r) \sqrt{OCR} \tan \phi_r \sigma'_0 \quad (2.72)$$

f değeri hesaplamalar sonucu elde edildikten sonra toplam sürtünme direnci aşağıdaki şekilde bulunur:

$$Q_s = \sum p \Delta L f \quad (2.73)$$

Kil zeminlerde çevre sürtünmesi koni penetrasyon deneyi ile bulunabilmektedir. Kil zemindeki çevre sürtünmesini koni penetrasyon deneyi (CPT) ile bulmak için Nottingham and Schmertmann (1975) ve Schmertmann (1978) yaptıkları çalışmalarında ($\phi = 0$ için) aşağıdaki şekilde belirlemişlerdir:

$$f = \alpha' f_c \quad (2.74)$$

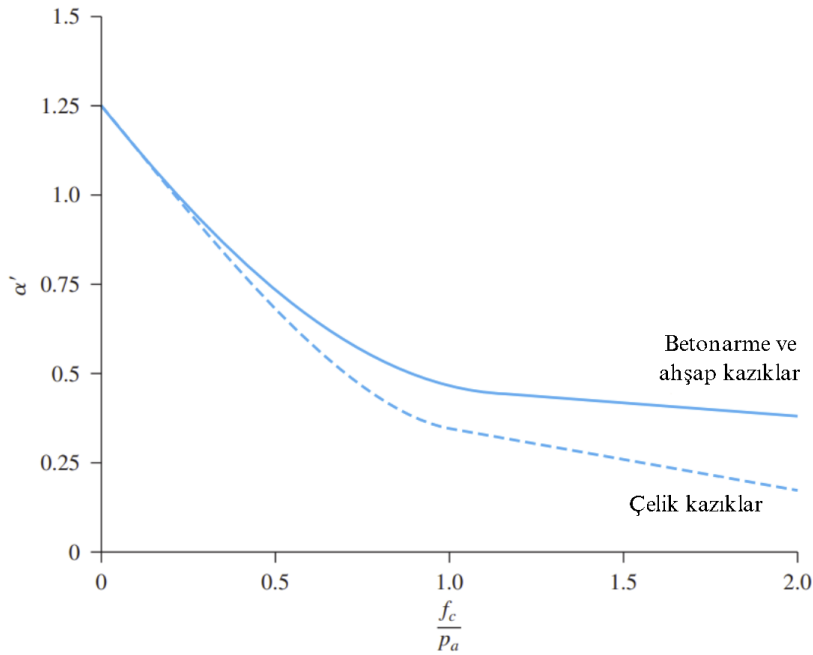
Burada,

α' = Ampirik faktör

f_c = Sürtünme direnci

f_c ve α' arasındaki değişim Şekil 2.17'de verilmiştir. Böylece Q_s değeri:

$$Q_s = \sum p \Delta L f = \sum p \Delta L \alpha' f_c \quad (2.75)$$



Şekil 2.17 Kil zeminlerde f_c ve α' arasındaki değişim (Das 2007).

2.5 Kazık Elastik Oturmalarının Belirlenmesi

Kazıkların dikey yük (Q_{wp}) altında oturması şu şekildedir:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (2.76)$$

Burada,

s_1 = Kazığın elastik oturması

s_2 = Kazık ucundaki yükten kaynaklı oturma

s_3 = Kazık shaftı boyunca iletilen yükün neden olduğu oturma

Kazığın elastik olduğu kabul edildiğinde temel malzeme mekaniği prensipleri kullanılarak kazık shaftındaki deformasyon belirlenebilir:

$$s_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \quad (2.77)$$

Burada,

Q_{wp} = Çalışan yük durumunda kazığın ucundaki taşınan yük

Q_{ws} = Çalışan yük durumunda kazığın çevre sürtünmesi ile taşınan yük

A_p = Kazık uç alanı

L = Kazık boyu

E_p = Kazık malzemesinin Young modülü

Kazık shaftı boyunca oluşan birim sürtünme mukavemeti (f), ξ 'nin büyüklüğünü belirler. Eğer f uniform veya parabolik ise, ξ 0,5'e eşittir. Diğer yandan, eğer f üçgensel bir dağılıma sahipse, ξ 'nin değeri yaklaşık olarak 0,67'dir (Vesic, 1977).

$$s_{e(2)} = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (2.78)$$

Burada,

D = Kazık çapı

q_{wp} = Kazık ucunda birim alana denk gelen uç yük = Q_{wp} / A_p

E_s = Kazık ucundaki zeminin elastisite modülü

μ_s = Zeminin poisson oranı

I_{wp} = Azaltma faktörü

Vesic (1977)'de yaptığı çalışmada kazık oturma miktarını elde etmek için yarı ampirik bir yöntem belirlemiştir:

$$s_{e(2)} = \frac{Q_{wp} C_p}{D q_p} \quad (2.79)$$

Burada,

q_p = Kazık uç direnci

C_p = Ampirik katsayı

Çizelge 2.11'de çeşitli zeminler için C_p değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.11 Çeşitli zeminler için C_p (Vesic 1969).

Zemin Türü	Çakma kazık	Fore kazık
Şerit temel	0,02–0,04	0,09–0,18
Dairesel kesitli temel	0,02–0,03	0,03–0,06
Kare kesitli temel	0,03–0,05	0,09–0,12

$$s_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (2.80)$$

Burada,

p = Kazık çevresi

L = Kazık boyu

I_{ws} = Etki faktörü

Burada, Q_{ws} / pL terimi kazık gövdesi boyunca oluşan f 'nin ortalama değeridir. Etki faktörü I_{ws} , şu şekilde bulunur:

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad (2.81)$$

Vesic (1977) yaptığı çalışmada $s_{e(3)}$ için farklı ampirik yöntem önermiştir:

$$s_{e(3)} = \frac{Q_{ws} C_s}{L q_p} \quad (2.82)$$

Burada,

C_s = Ampirik katsayı

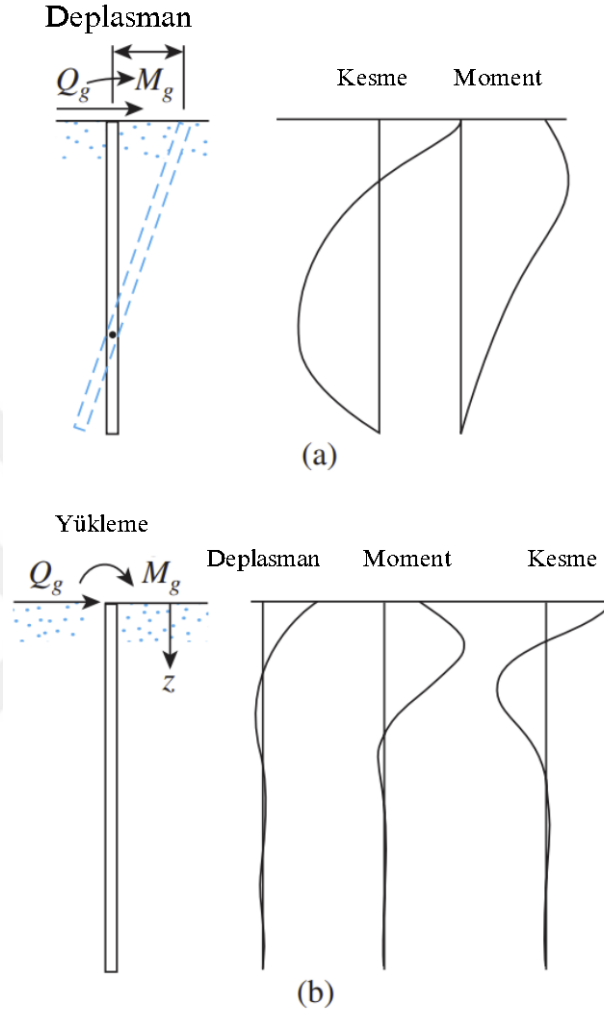
$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}} \right) C_p \quad (2.83)$$

C_p değerleri Çizelge 2.11'den elde edilebilir.

2.6 Yanal Yüklü Kazıklar

Bir dikey kazık, çevresindeki zeminde pasif basınç oluşturarak yatay yüklere karşı direnç gösterir. Zemin tepkisinin dağılımı, kazığın rijitliği, zeminin rijitliği ve kazığın uçlarının sabitlenme durumu gibi faktörlere bağlıdır. Yatay yüklere maruz kalan kazıklar genel olarak iki ana kategoriye ayrılabilir: kısa veya rijit kazıklar ve uzun veya elastik kazıklar.

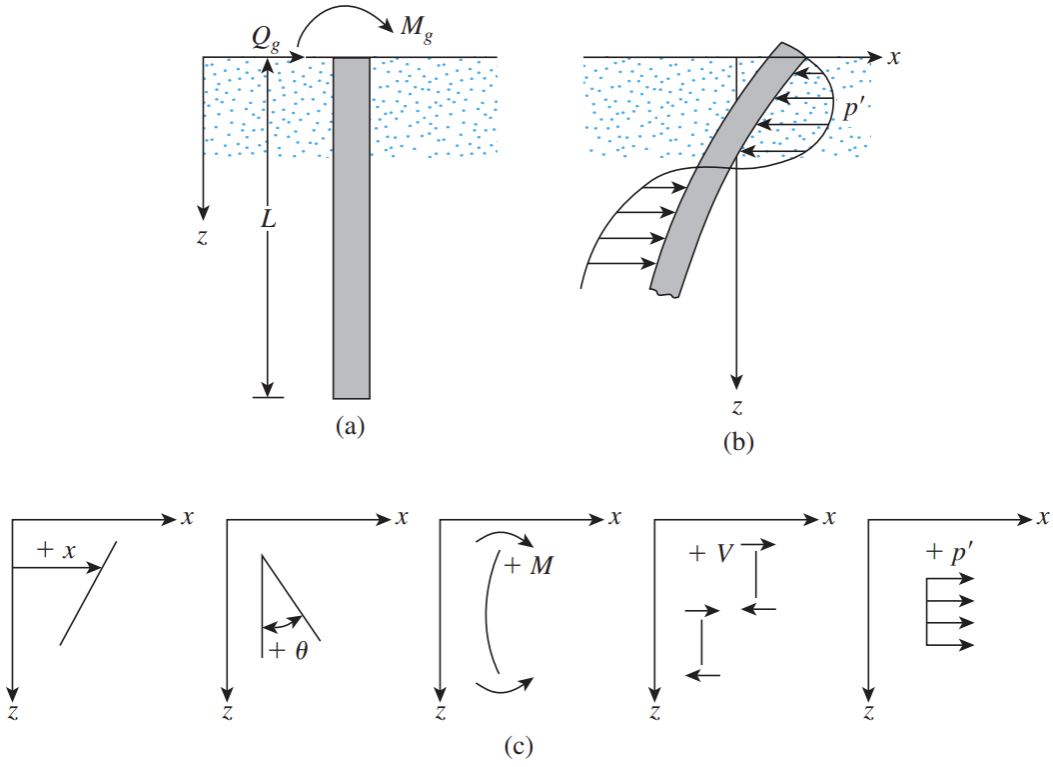
Şekil 2.18a ve 2.18b, yatay yükleme altında kazık sapmasının değişimini ve kazık boyunca moment ve kesme kuvvetinin dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.18 (a) Rijit kazık ve (b) elastik kazık için moment ve kesme diyagramları (Das 2007).

2.6.1 Elastik Çözüm

Matlock ve Reese (1960), zemin yüzeyinde granüler bir zemine gömülü yatay yük ve moment maruz kalmış bir dikey kazığın moment ve yer değiştirmelerini belirlemek için genel bir yöntem sunmuşlardır. Şekil 2.19a'da gösterildiği gibi, L uzunluğunda bir kazığın yatay bir kuvvet Q_g ve zemin yüzeyinde bir M_g moment etkisi altında olduğunu düşünün. Şekil 2.19b, kazığa uygulanan yük ve moment etkisiyle kazıkta oluşan genel şekil değiştirmesini ve zemin direncini göstermektedir.



Şekil 2.19 (a) Yatay yüklü kazık; (b) yatay yük nedeniyle kazık üzerindeki zeminin direnci; (c) yer değiştirme, eğim, moment, kesme kuvveti ve zeminin oluşturduğu tepki için işaret kuralları (Das 2007).

Daha basit bir Winkler modeline göre, elastik bir ortam sonsuz yakınlıkta bağımsız elastik yaylar serisi ile değiştirilebilir. Bu varsayıma dayanarak,

$$k = \frac{p'(kN/m)}{x(m)} \quad (2.84)$$

Burada,

k = yatak katsayı modülü

p' = Zemin üzerindeki basınç

x = Deplasman miktarı

Granüler bir zeminde yatak katsayısı:

$$k_z = n_h z \quad (2.85)$$

Burada,

n_h = Zeminin yatay yatak katsayı sabiti

z = zemin içerisindeki derinlik

Elastik zeminler üzerindeki kiriş teorisi:

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} = p' \quad (2.86)$$

Burada,

E_p = Kazık elastisite modülü

I_p = Kazık kesitinin atalet momenti

Winkler modülüne göre:

$$p' = -kx \quad (2.87)$$

Denklemler (2.86) ve (2.87) birbiri içinde çözüldüğünde:

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0 \quad (2.88)$$

Denklem (2.88) kullanılarak eşitlikler çıkartılır:

Herhangi bir derinlikteki kazık sehim $[X_z(z)]$:

$$X_z(z) = A_x \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g T^2}{E_p I_p} \quad (2.89)$$

Herhangi bir derinlikteki kazık eğimi $[\theta_z(z)]$:

$$\theta_z(z) = A_\theta \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_\theta \frac{M_g T}{E_p I_p} \quad (2.90)$$

Herhangi bir derinlikteki kazık momenti $[M_z(z)]$:

$$M_z(z) = A_m Q_g T + B_m M_g \quad (2.91)$$

Herhangi bir derinlikteki kazık üzerindeki kesme kuvveti $[V_z(z)]$:

$$V_z(z) = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad (2.92)$$

Herhangi bir derinlikteki kazık üzerindeki kesme kuvveti $[p'_z(z)]$:

$$p'_z(z) = A_{p'} \frac{Q_g}{T} + B_{p'} \frac{M_g}{T^2} \quad (2.93)$$

Burada,

$A_x, B_x, A_\theta, B_\theta, A_m, B_m, A_v, B_v, A_{p'}, B_{p'}$ ve $B_{p'}$ katsayılarıdır.

T = Kazık zemin arasındaki sistemin karakteristik uzunluğu.

T , karakteristik uzunluğu şu şekilde belirlenir:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (2.94)$$

$L \leq 2T$ olan durumlarda rijit kazık, $L \geq 5T$ olan durumlarda uzun kazık olarak hesap yapılır. Denklemlerde verilen katsayılar Çizelge 2.12' de verilmiştir. Çizelge 2.12' de verilen Z şu şekilde bulunur:

$$Z = \frac{z}{T} \quad (2.95)$$

Çizelge 2.12 $L \geq 5T$ olan uzun kazıklar için katsayılar, $k_z = n_h z$ (Woodward, Greer, Gardner 1972).

z	A_x	A_θ	A_m	A_v	$A_{p'}$	B_x	B_θ	B_m	B_v	$B_{p'}$
0,0	2,435	-1,623	0,000	1,000	0,000	1,623	-1,750	1,000	0,000	0,000
0,1	2,273	-1,618	0,100	0,989	-0,227	1,453	-1,650	1,000	-0,007	-0,145
0,2	2,112	-1,603	0,198	0,956	-0,422	1,293	-1,550	0,999	-0,028	-0,259
0,3	1,952	-1,578	0,291	0,906	-0,586	1,143	-1,450	0,994	-0,058	-0,343
0,4	1,796	-1,545	0,379	0,840	-0,718	1,003	-1,351	0,987	-0,095	-0,401
0,5	1,644	-1,503	0,459	0,764	-0,822	0,873	-1,253	0,976	-0,137	-0,436
0,6	1,496	-1,454	0,532	0,677	-0,897	0,752	-1,156	0,960	-0,181	-0,451
0,7	1,353	-1,397	0,595	0,585	-0,947	0,642	-1,061	0,939	-0,226	-0,449
0,8	1,216	-1,335	0,649	0,489	-0,973	0,540	-0,968	0,914	-0,270	-0,432
0,9	1,086	-1,268	0,693	0,392	-0,977	0,448	-0,878	0,885	-0,312	-0,403
1,0	0,962	-1,197	0,727	0,295	-0,962	0,364	-0,792	0,852	-0,350	-0,364
1,2	0,738	-1,047	0,767	0,109	-0,885	0,223	-0,629	0,775	-0,414	-0,268
1,4	0,544	-0,893	0,772	-0,056	-0,761	0,112	-0,482	0,688	-0,456	-0,157
1,6	0,381	-0,741	0,746	-0,193	-0,609	0,029	-0,354	0,594	-0,477	-0,047
1,8	0,247	-0,596	0,696	-0,298	-0,445	-0,030	-0,245	0,498	-0,476	0,054
2,0	0,142	-0,464	0,628	-0,371	-0,283	-0,070	-0,155	0,404	-0,456	0,140
3,0	-0,075	-0,040	0,225	-0,349	0,226	-0,089	0,057	0,059	-0,213	0,268
4,0	-0,050	0,052	0,000	-0,106	0,201	-0,028	0,049	-0,042	0,017	0,112
5,0	-0,009	0,025	-0,033	0,015	0,046	0,000	-0,011	-0,026	0,029	-0,002

$X_z(z), \theta_z(z), M_z(z), V_z(z), p'_z(z)$ için işaret kuralları Şekil 2.18c'de verilmiştir. Şekil 2.20'de $L/T = Z_{\max}$ için A_x, B_x ve A_m, B_m değişimlerini göstermektedir. n_h için zemin türüne bağlı değerler Çizelge 2.13' de gösterilmiştir.

Çizelge 2.13 Çeşitli zeminler için n_h .

Zemin Türü	Çakma kazık
Kuru veya nemli kum	
Gevşek	1800–2200
Orta	5500–7000
Sert	15000–18000
Su seviyesi altında	
Gevşek	1000–1400
Orta	3500–4500
Sert	9000–12000

Davisson ve Gill (1963) kohezyonlu zeminler için yaptıkları çalışmalarda şu denklemleri geliştirmiştir:

$$X_z(z) = A'_x \frac{Q_g R^3}{E_p I_p} + B'_x \frac{M_g R^2}{E_p I_p} \quad (2.96)$$

$$M_z(z) = A'_m Q_g R + B'_m M_g \quad (2.97)$$

Burada,

A'_x, B'_x, A'_m, B'_m = Katsayılar

R = Karakteristik uzunluk

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k}} \quad (2.98)$$

Şekil 2.21'deki A' ve B' katsayıları için:

$$Z = \frac{z}{R} \quad (2.99)$$

$$Z_{max} = \frac{L}{R} \quad (2.100)$$

Kumlarda, derinlikle doğrusal olarak değişen yatak katsayısı hesabı denklem (2.85) eşitliğinde gösterilmiştir. Kohezyonlu zeminlerde, derinlikle birlikte zeminin yatak katsayısı genellikle sabit kalır. Vesic (1961), yatak katsayısını şu şekilde önermiştir:

$$k = 0,65 \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \frac{E_s}{1 - \mu_s^2}} \quad (2.101)$$

Burada,

E_s = Zemin elastisite modülü

D = Kazık çapı

μ_s = Zemin poisson oranı

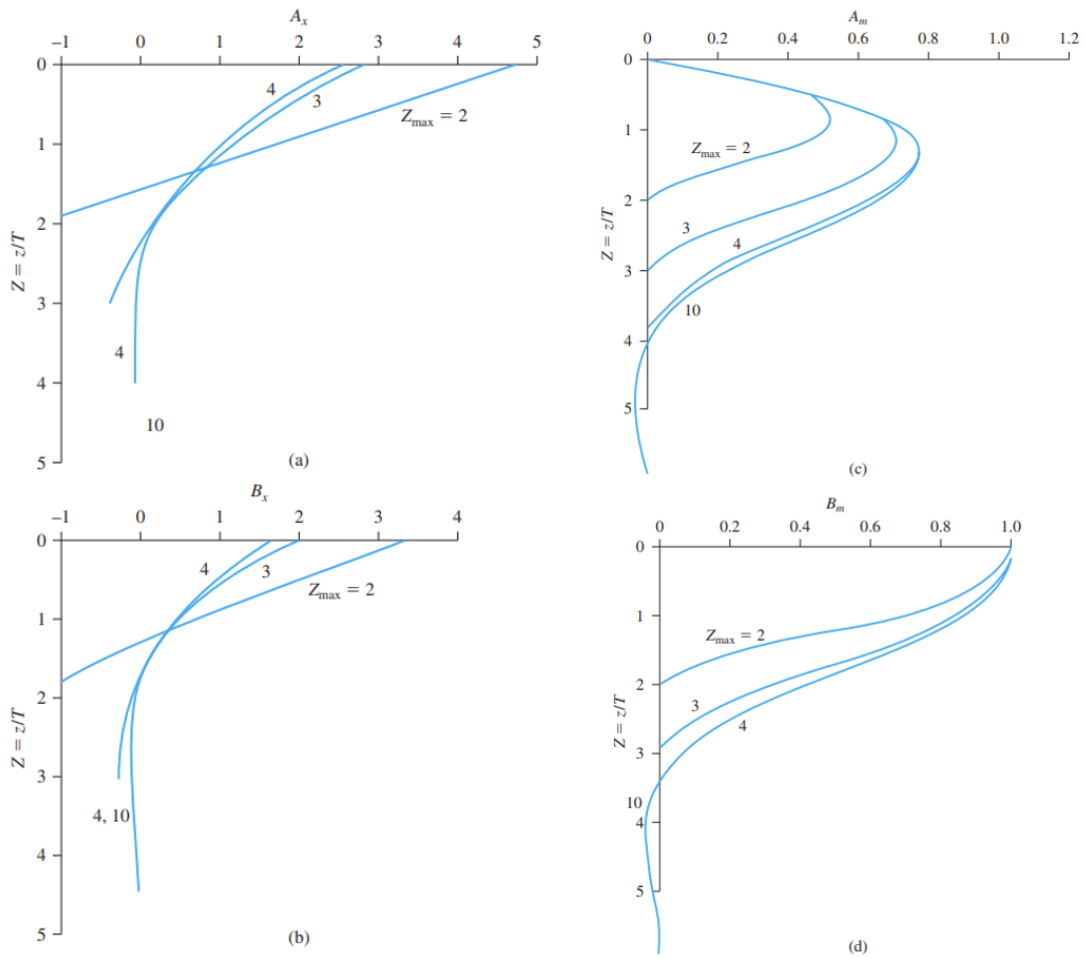
E_p = Kazık elastisite modülü

I_p = Kazık kesitinin atalet momenti

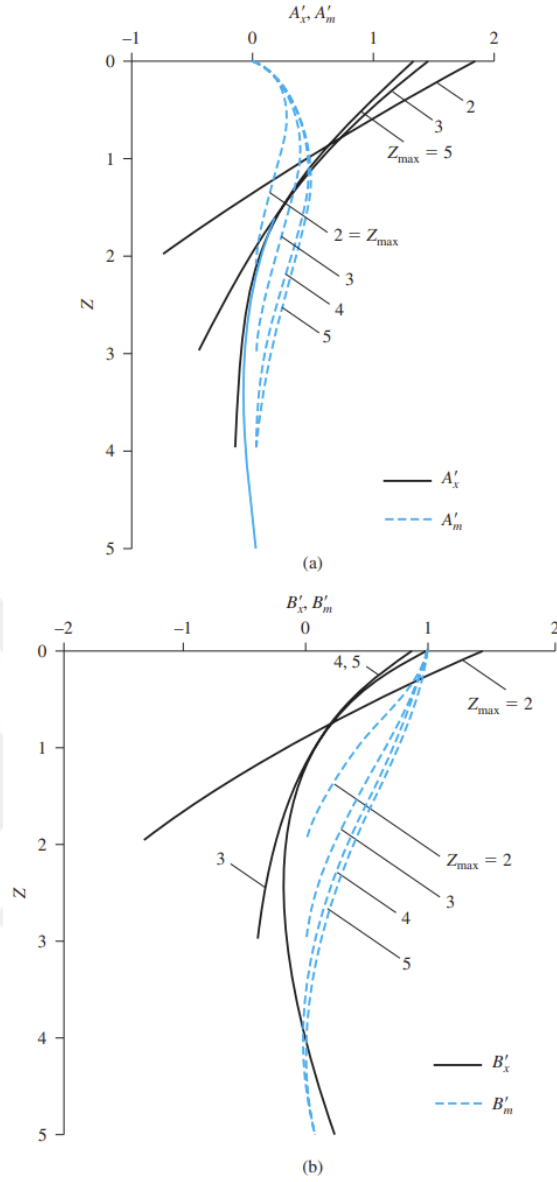
Pratik kullanımlar için denklem (2.101) şu şekilde yazılabilir:

$$k \approx \frac{E_s}{1 - \mu_s^2} \quad (2.102)$$

Denklem (2.102) kullanılarak yatak katsayısı belirlenebilir.



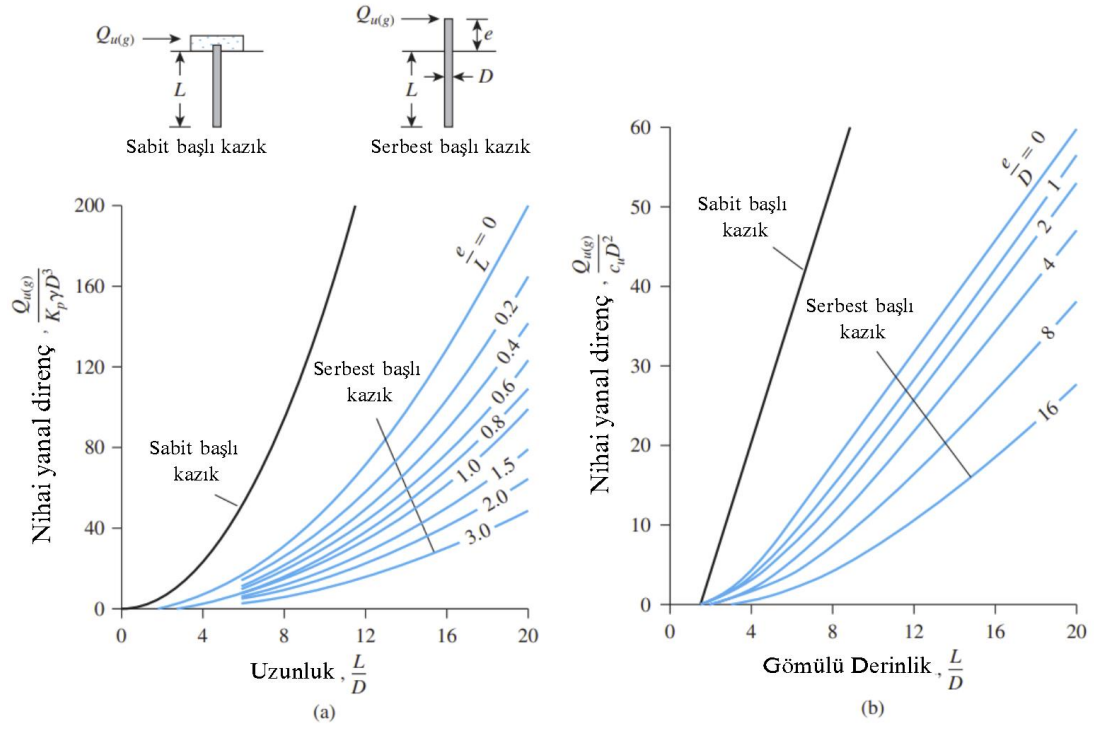
Şekil 2.20 Z için A_x , B_x ve A_m , B_m değişimleri (Das 2007).



Şekil 2.21 Z için A'_x, B'_x ve A'_m, B'_m değişimleri (Das 2007).

2.6.2 Broms Metodu

Broms (1965), yanal olarak yüklenen kazıklar için kısa kazıklarda olduğu gibi zeminde kayma kırılması ve plastik akma ile yönetilen kazık bükülmesi varsayımlarına dayalı basitleştirilmiş bir çözüm geliştirmiştir. Uzun kazıklara uygulanabilen kazık direnci için, kısa kazıklarda kum zeminde nihai yük direncini $Q_{u(g)}$, Broms Şekil 2.22a'da verilmiştir. Kohezyonlu zemine gömülü kazıklar için benzer bir çözüm Şekil 2.22b'de gösterilmektedir.



Şekil 2.22 Broms'un kısa kazıklar için nihai yanıl direnç çözümü, (a) kum zemin, (b) kil zemin (Das 2007).

$$K_p \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.103)$$

Burada,

K_p = Rankine pasif toprak basıncı

Şekil 2.22'ye göre:

$$c_u = \frac{0,75q_u}{FS} = \frac{0,75q_u}{2} = 0,375q_u \quad (2.104)$$

Burada,

FS = Güvenlik faktörü (= 2)

q_u = Serbest basınç mukavemeti

Broms kazıklardaki nihai yanal yükün bulunması için Şekil 2.23’de akma mukavemeti ile ilişkilendirmiştir:

$$M_y = SF_y \quad (2.105)$$

Burada,

S = Kazık kesit modülü

F_y = Kazık malzemesinin akma dayanımı

Yükleme koşulları altında kazık başlığında meydana gelen deplasmanı $X_z(z = 0)$ ’nın bulunması için Şekil 2.24a’den yararlanılır.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_P I_P}} \quad (2.106)$$

Şekil 2.24b’de kil zeminler için yatay zemin modülü K , şu şekilde hesaplanır:

$$K = \frac{\text{Basınç}(kN/m^2)}{\text{Deplasman}(m)} \quad (2.107)$$

β ise şu şekilde bulunur:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KD}{4E_P I_P}} \quad (2.108)$$

Kil zeminler için serbest basınç mukavemetine karşılık gelen K değerleri Çizelge 2.14’de gösterilmiştir.

Burada,

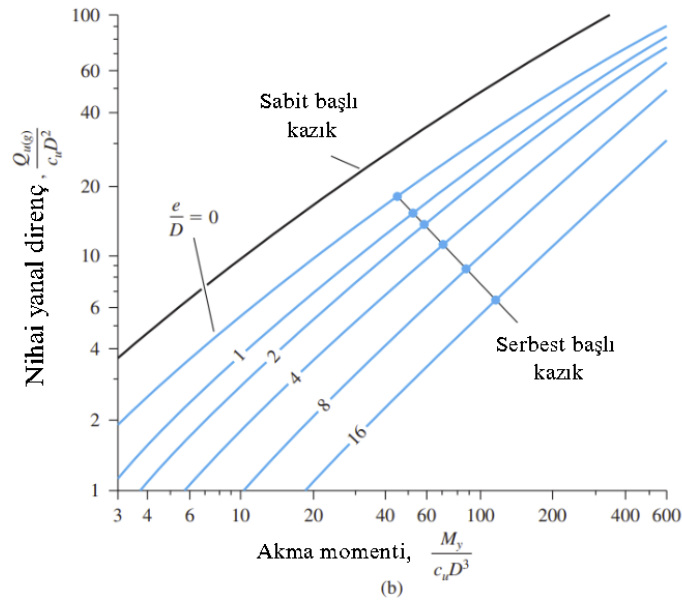
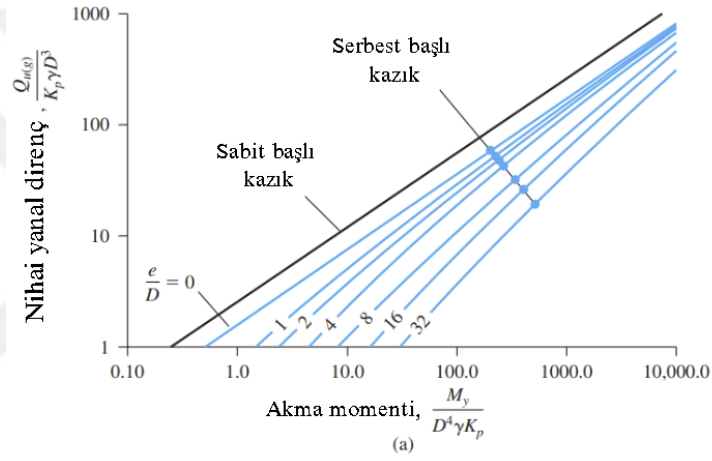
D = Kazık çapı

E_p = Kazık elastisite modülü

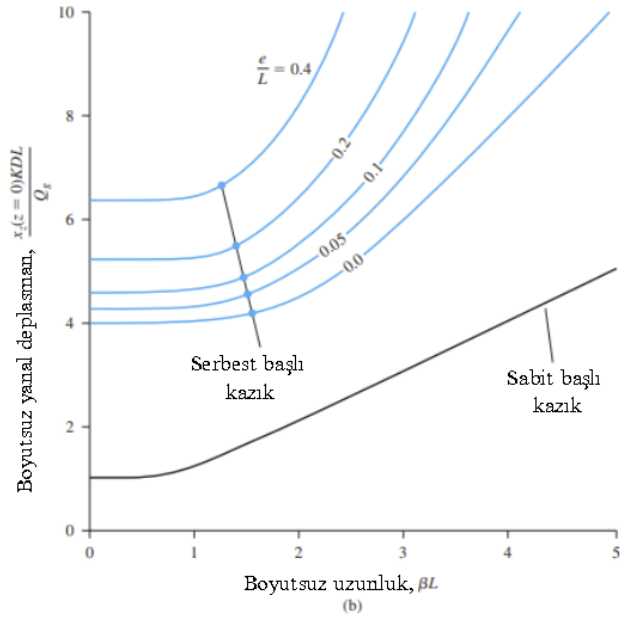
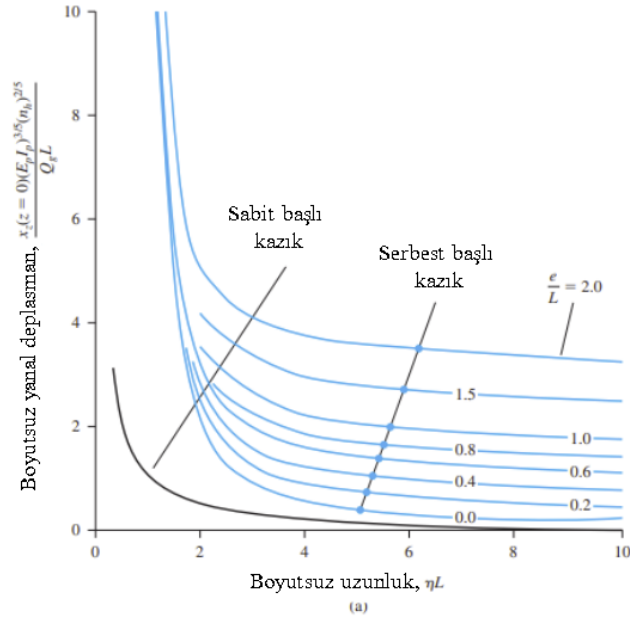
I_p = Kazık kesitinin atalet momenti

Çizelge 2.14 Kil zeminler için K değeri.

Serbest Basınç Mukavemeti kN/m ²	K kN/m ³
200	10000–20000
200–800	20000–40000
>800	>40000



Şekil 2.23 Broms'a göre kum zemin (a) ve kil zeminde (b) uzun kazıklar için yanıl direnç (Das 2007).

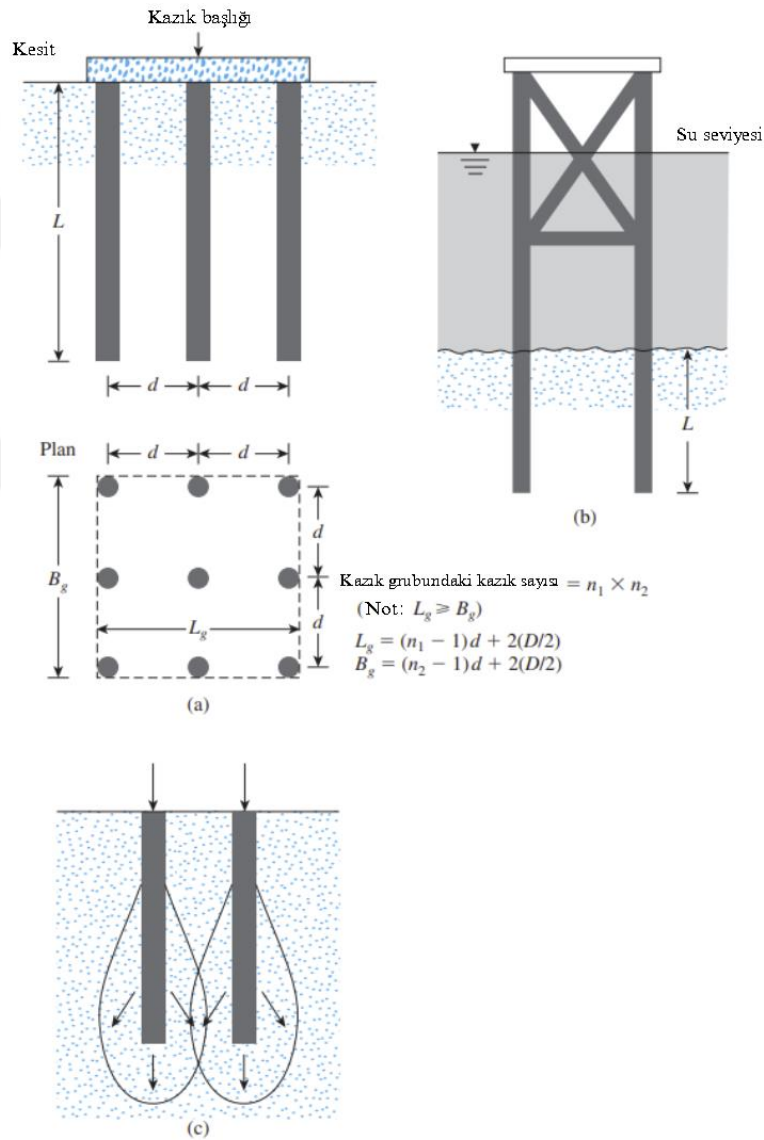


Şekil 2.24 Broms metoduna göre kum zemin (a) ve kil zeminde (b) kazık başlığı deplasmanı (Das 2007).

2.7 Grup Kazık Etkisi

Kazıklar genellikle grup halinde kullanılarak yapısal yüklerin zemine iletilmesini sağlar, bu durum Şekil 2.25'de gösterilmektedir. Grup kazıklarının üzerine bir kazık başlığı inşa edilir. Bu başlık, çoğu zaman zemine temas eder (Şekil 2.25a) veya deniz platformlarında olduğu gibi zeminin oldukça üzerinde bulunabilir (Şekil 2.25b).

Grup kazıklarının yük taşıma kapasitesini belirlemek oldukça karmaşıktır. Kazıklar birbirine yakın yerleştirildiğinde, kazıkların zemine ilettiği gerilmelerin Şekil 2.25c’de gösterildiği gibi üst üste bineceği varsayımı yapılabilir, bu da kazıkların toplam yük taşıma kapasitesini azaltabilir. İdeal durumda, grup içerisindeki kazıklar öyle yerleştirilmelidir ki grubun toplam yük taşıma kapasitesi, kazıkların tek tek taşıma kapasitelerinin toplamından az olmasın. Pratikte, merkezden merkeze kazık aralığı, d , minimum $2.5D$ olmalıdır ve genelde 3 ila $3.5D$ arasında tutulur.



Şekil 2.25 Kazık Grubu (Das 2007).

Bir kazık grubunun taşıma gücü kapasite verimliliği şu şekilde verilir:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\Sigma Q_u} \quad (2.109)$$

Burada,

η = Kazık grubu verimliliği

$Q_{g(u)}$ = Kazık grubunun taşıma gücü kapasitesi

Q_u = Her bir kazığın grup etkisi olmaksızın taşıma gücü kapasitesi

Mühendisler, özellikle kumlu zeminlerde sürtünme kazıkları için grup verimliliğini belirlemek amacıyla basitleştirilmiş analiz yöntemleri kullanır. Bu analiz türü, Şekil 2.25a ile açıklanabilir. Kazıkların grup içindeki aralıklarına göre, iki farklı şekilde davranış sergileyebilirler; $L_g \times B_g \times L$ boyutlarında bir blok olarak ve bireysel kazıklar olarak. Kazıklar bir blok olarak davranıyorsa, sürtünme kapasitesi:

$$f_{av} p_g L \approx Q_{g(u)} \quad (2.110)$$

Burada,

f_{av} = Ortalama birim sürtünme direnci

p_g = Kazık grubu kesitinin çevresi ($= 2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D$)

Benzer şekilde, kazıklar bireysel olarak davranıyorsa:

$$Q_u \approx p L f_{av} \quad (2.111)$$

Burada,

p = her bir kazığın kesit çevresi

Denklem (2.109) düzenlenirse:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\Sigma Q_u} = \frac{f_{av}[2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D]L}{n_1 n_2 p L f_{av}} = \frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{p n_1 n_2} \quad (2.112)$$

Buradan:

$$Q_{g(u)} = \left[\frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{p n_1 n_2} \right] \Sigma Q_{g(u)} \quad (2.113)$$

Denklem (2.113) incelendiğinde, eğer merkezden merkeze mesafe d yeterince büyükse $\eta > 1$ bu durumda kazıklar bireysel kazık gibi davranacaktır. $\eta < 1$ ise:

$$Q_{g(u)} = \eta \Sigma Q_{g(u)} \quad (2.114)$$

Eğer $\eta \geq 1$ ise:

$$Q_{g(u)} = \Sigma Q_{g(u)} \quad (2.115)$$

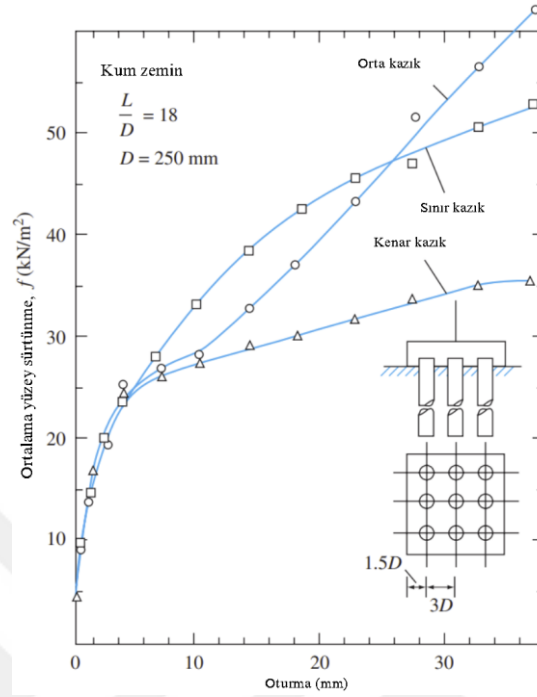
Denklem (2.115) eşitliği sağlanmış olur. Sürtünme kazıklarda grup verimliliğini hesaplamak için birçok denklem bulunmaktadır. Bu denklemler Çizelge 2.15’de verilmiştir.

Çizelge 2.15 Sürtünme kazıklarda grup verimliliği denklemleri.

İsim	Denklem
Converse–Labarre Denklemi	$\eta = 1 - \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1 n_2} \right] \theta$ $\theta(\text{derece}) = \tan^{-1}(D/d)$
Los Angeles Grup Etkisi Denklemi	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi d n_1 n_2} [(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1 + \sqrt{2}(n_1 - 1)(n_2 - 1)]$
Seiler–Keeney Denklemi	$\eta = \left\{ 1 - \left[\frac{11d}{7(d^2 - 1)} \right] \left[\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0,3}{n_1 + n_2}$

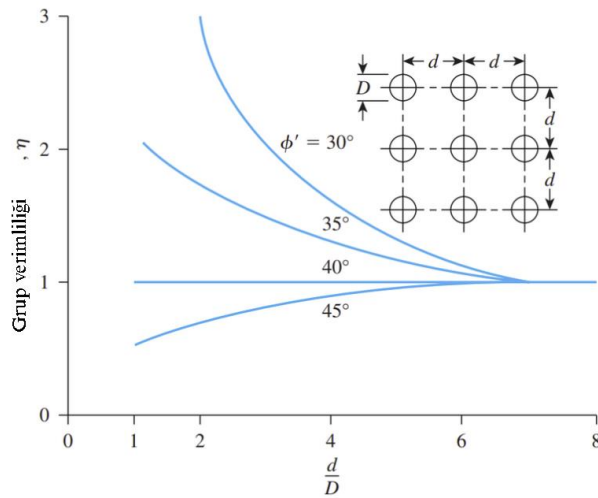
* Seiler–Keeney denklemindeki d ft. cinsindendir.

Grup kazıklarda kazığın konumuna bağlı olarak f_{av} büyüklüğü bulunabilir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26 Kazık konuma bağlı ortalama yüzey (çevre) sürtünmesi f_{av} (Liu vd. 1985).

Şekil 2.27, kum zeminlerdeki 3×3 kazık grubunun grup verimliliğinin değişimini göstermektedir (Kishida ve Meyerhof 1965). Gevşek ve orta sıkı kumlarda, grup verimliliğinin birden büyük olabileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, öncelikle kazık etrafındaki kumun yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.27 Kum zeminde kazık grubu verimliliği (Kishida ve Meyerhof 1965).

2.7.1 Kil Zeminde Kazık Gruplarının Verimliliği

Kazık gruplarının kil zeminde yük taşıma kapasitesi şu belirlenebilir:

$$1) \Sigma Q_u = n_1 n_2 (Q_p + Q_s)$$

$$Q_p = A_p [9c_{u(p)}]$$

$$Q_s = \Sigma \alpha p c_u \Delta L$$

Böylece,

$$\Sigma Q_u = n_1 n_2 (A_p [9c_{u(p)}] + \Sigma \alpha p c_u \Delta L) \quad (2.116)$$

Burada,

$c_{u(p)}$ = Kazık ucundaki kil zeminin drenajsız kohezyonu

2) Kazık gruplarının $L_g \times B_g \times L$ ölçülerine sahip bir blok gibi davrandığını varsayıldığında Şekil 2.28'e göre nihai sürtünme direnci;

$$\Sigma p_g c_u \Delta L = \Sigma 2(L_g + B_g) c_u \Delta L$$

Uç kazık taşıma kapasitesi:

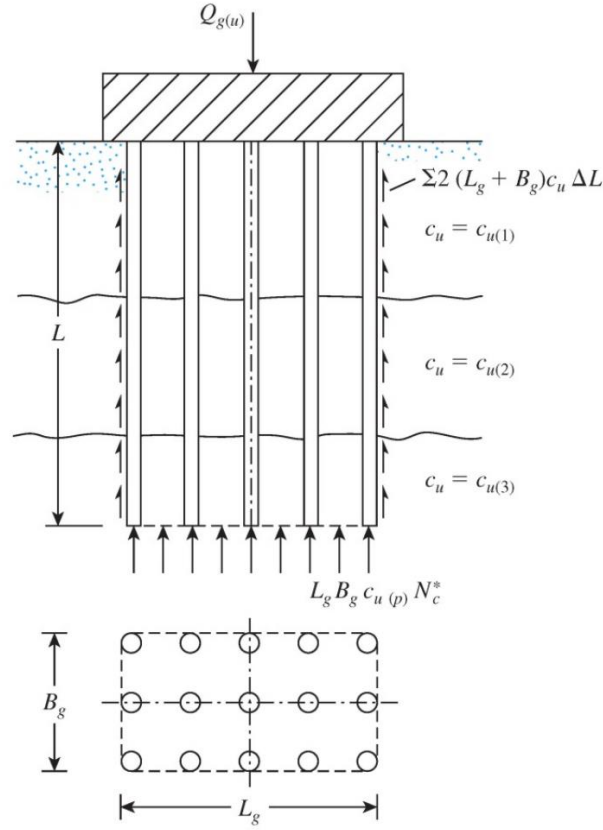
$$A_p q_p = A_p c_{u(p)} N_c^* = (L_g B_g) c_{u(p)} N_c^*$$

Şekil 2.29'dan N_c^* taşıma gücü faktörü elde edilir ve denklem:

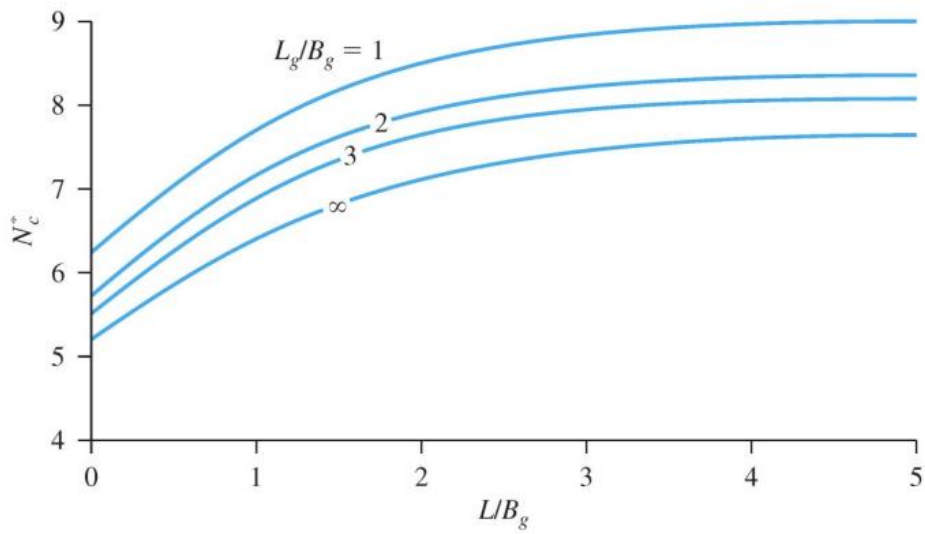
$$\Sigma Q_u = L_g B_g c_{u(p)} N_c^* + \Sigma 2(L_g + B_g) c_u \Delta L \quad (2.117)$$

Eşitliği elde edilir.

3) (2.116) ve (2.117) eşitliklerinin sonuçları karşılaştırılır ve bu değerlerden küçük olan $Q_{g(u)}$ değeri alınır.



Şekil 2.28 Kazık gruplarının doygun kil zeminde nihai taşıma gücü (Das 2007).



Şekil 2.29 N_c^* 'nin L_g/B_g ve L/B_g ile değişimi (Das 2007).

2.8 Grup Kazık Oturması

Kazık gruplarının, her bir kazık için yük altındaki oturmaları kazık genişliği B_g , ve kazıklar arasındaki merkezden merkeze mesafenin d , artmasıyla birlikte artar. Literatürde kazık gruplarının oturmasıyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, sonuçlar genellikle büyük farklılıklar göstermektedir. Kazık gruplarının oturmasıyla ilgili en basit ilişki, Vesic (1969) tarafından sunulmuştur:

$$s_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} s_e \quad (2.118)$$

Burada,

$s_{g(e)}$ = Kazık grubunun elastik oturması

B_g = Kazık grubunun kısa kenar genişliği

s_e = Tekil kazığın elastik oturması (Bölüm 2.5)

Meyerhof (1976) yaptığı çalışmada kum ve çakıllı zeminler için kazık gruplarının elastik oturmasını şu şekilde belirlemiştir:

$$s_{g(e)}(mm) = \frac{0,96q\sqrt{B_g}I}{N_{60}} \quad (2.119)$$

Burada,

$$q = Q_g/(L_g B_g) (kN/m^2)$$

L_g ve B_g = Kazık grubunun uzun ve kısa kenar mesafesi (m)

N_{60} = Kazığın uç oturma noktası etrafındaki ortalama SPT sayısı ($\approx B_g$ kazık uç noktasının altında)

$$I = \text{Etki faktörü} (= 1 - L/(8B_g) \geq 0,5)$$

Koni penetrasyon deneyine (CPT) bağlı olarak kazık gruplarının elastik oturması:

$$s_{g(e)} = \frac{q B_g I}{2 q_c} \quad (2.120)$$

Burada,

q_c = Koni penetrasyon direnci

L_g ve B_g = Kazık grubunun uzun ve kısa kenar mesafesi (m)

I = Etki faktörü ($= 1 - L/(8B_g) \geq 0,5$)

2.9 Grup Kazık Konsolidasyon Oturması

Kazık gruplarının, kil zeminlerdeki konsolidasyon oturma değerleri, 2:1 Gerilme Dağıtma Yöntemi ile belirlenebilir ve hesaplama şu adımlar ile gerçekleştirilir:

Adım 1: L derinliğinde kazık gömülü olduğunda, kazık grubuna etki eden toplam yük Q_g hesaplanır. Eğer kazık başlığı zemin seviyesinin altındaysa, Q_g değeri üst yapıdan kazıklara aktarılan yük değerinden, kazı için alınan zemin ağırlığının çıkarılması ile belirlenir.

Adım 2: 2 Düşey 1 Yatay dağılıma sahip olan çizgiler, Q_g yükünün kazık boyunun $2L/3$ altından başlayarak zemine aktarıldığını gösterir. Bu çizgiler, aa' ve bb' olarak temsil edilen 2:1 çizgisidir.

Adım 3: Tüm zemin tabakalarında, Q_g tarafından artan düşey etkili gerilme, (2.121) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta \sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g +)(L_g + z_i)} \quad (2.121)$$

Burada,

$\Delta \sigma'_i$ = i Kil zemin tabakasının merkezindeki efektif gerilme artışı

B_g = Kazık grubunun kısa kenar genişliği

L_g = Kazık grubunun uzun kenar genişliği

$z_i = z = 0$ noktasından i kil zemin tabakası merkezine olan mesafe

Q_g = Kazık grubuna etki eden toplam yük

Örneğin, Şekil 2.30'da, tabaka 2 için $z_i = L_1/2$, tabaka 3 için $z_i = L_1 + L_2/2$, ve tabaka 4 için $z_i = L_1 + L_2 + L_3/2$ olarak belirlenir. Tabaka 1 de ise, gerilme dağılımının $z = 0$ düzleminde başladığı yatayda bulunduğu için herhangi bir gerilme artışı yaşamaz.

Adım 4: Tüm zemin tabakalarındaki gerilme artışıyla oluşan konsolidasyon oturması hesaplanır.

$$\Delta s_{c(i)} = \left[\frac{\Delta e_{(i)}}{1 + e_{0(i)}} \right] H_i \quad (2.122)$$

Burada,

$\Delta s_{c(i)}$ = i kil tabakası için konsolidasyon oturması

$\Delta e_{(i)}$ = i kil tabakasındaki gerilme artışı nedeniyle boşluk oranındaki değişme

$e_{0(i)}$ = i kil tabakasındaki yükleme öncesi boşluk oranı

H_i = i kil tabakasının kalınlığı

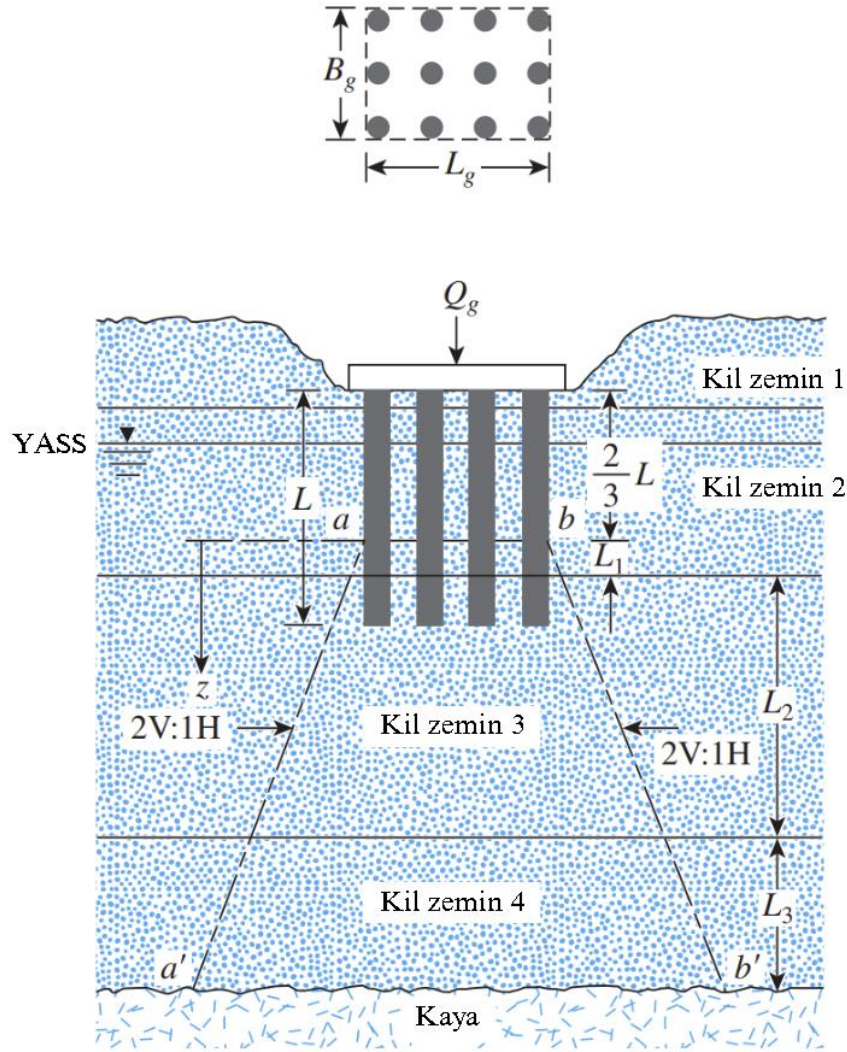
Adım 5: Kazık grubundaki toplam konsolidasyon oturması hesaplanır ve şu şekildedir:

$$\Delta s_{c(g)} = \Sigma \Delta s_{c(i)} \quad (2.123)$$

Burada,

$\Delta s_{c(g)}$ = Kazık grubundaki toplam konsolidasyon oturması

Denklem (2.123) kullanılarak kazık grubunun toplam konsolidasyon oturması hesaplanır.



Şekil 2.30 Kazık grubunun konsolidasyon oturması (Das 2007).

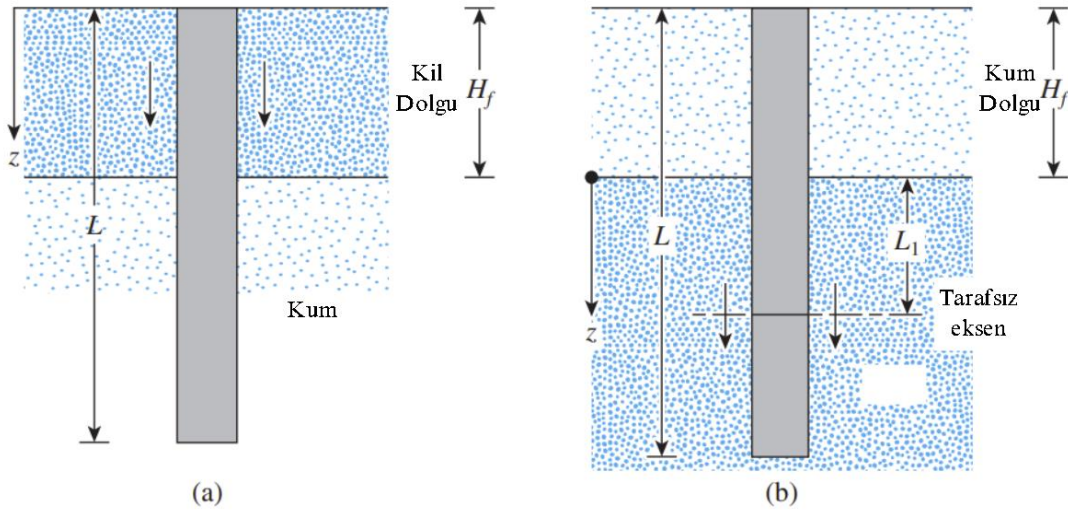
2.10 Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Çevresindeki zeminin bir kazığa uyguladığı aşağı yönlü çekme kuvvetine negatif çevre sürtünmesi denir. Aşağıdaki koşullarda böyle bir kuvvetin oluşmasına neden olacak durumlar belirtilmiştir:

- 1) Bir kazığın çakıldığı granüler zemin tabakasının üzerine kil dolgusu tabakası yerleştirilirse, dolgu zamanla katılaşacaktır. Konsolidasyon aşaması boyunca, konsolidasyon sürecinden kaynaklanan kazık üzerinde aşağı yönlü bir çekme kuvveti meydana gelecektir. Bu durum Şekil 2.31a’da gösterilmiştir.

- 2) Şekil 2.31b'de görüldüğü gibi, yumuşak kil tabakasının üzerine granüler zemin dolgusu yerleştirmek, kil tabakasının konsolide olmasına neden olacak ve bu da kazığı aşağıya doğru çekecektir.
- 3) Su seviyesinin düşürülmesi, herhangi bir derinlikte zemin üzerindeki dikey efektif gerilmeyi artıracak ve bu da kilde konsolidasyon oturmasına yol açacaktır. Kil tabakasındaki bir kazık, aşağı yönlü bir çekme kuvvetine maruz kalacaktır.

Aşağı yönlü sürüklenme kuvvetinin aşırı olması durumunda temel göçmesi görülebilir. Negatif çevre sürtünmesinin hesaplanması için iki yöntemi önerilmiştir.



Şekil 2.31 Negatif çevre sürtünmesi (Das 2007).

2.10.1 Granüler Zemin Üzerinde Kil Dolgu Yapılması Durumunda

β metoduna benzer bir ilişki, Şekil 2.31a'da negatif çevre sürtünmesi şu şekilde hesaplanır:

$$f_n = K' \sigma'_0 \tan \delta' \quad (2.124)$$

Burada,

$K' = \text{Toprak basınç katsayısı} (= 1 - \sin \phi')$

σ'_0 = Herhangi bir derinlikteki düşey efektif gerilme ($z = \gamma'_f z$)

γ'_f = Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı

δ' = Kazık–zemin sürtünme açısı

Kazıkta oluşacak toplam aşağı yönlü kuvvet şu şekildedir:

$$Q_n = \int_0^{H_f} (pK' \gamma'_f \tan \delta') z dz = \frac{pK' \gamma'_f H_f^2 \tan \delta'}{2} \quad (2.125)$$

Burada,

H_f = Kil dolgu malzemesinin yüksekliğidir. Dolgu malzemesi yer altı su seviyesinin üzerindeyse (YASS), efektif birim ağırlık (γ'_f) yerine doymuş birim hacim ağırlık değeri yazılmalıdır.

2.10.2 Kil Zemin Üzerinde Granüler Dolgu Yapılması Durumunda

Şekil 2.31b'de bu durum, $z = 0$ 'dan $z = L_1$ 'e kadar kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesi, nötr derinlik olarak tanımlanır (Vesic 1977). Bu derinlik için ifade aşağıdaki gibidir (Bowles 1982):

$$L_1 = \frac{(L - H_f)}{L_1} \left[\frac{L - H_f}{2} + \frac{\gamma'_f H_f}{\gamma'} \right] - \frac{2\gamma'_f H_f}{\gamma'} \quad (2.126)$$

Burada,

γ'_f = Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı

γ' = Dolgu altındaki kil tabakasının birim hacim ağırlığı

Uç kazıklarda, nötr derinlik kazığının dolgu kısmı hariç zemin içerisindeki yüksekliği olarak kabul edilebilir ($L_1 = L - H_f$).

$z = 0$ 'dan $z = L_1$ 'e kadar kazık üzerindeki negatif çevre sürtünmesi denklem (2.124)'deki gibi olur. Ancak:

$$\sigma'_0 = \gamma'_f H_f + \gamma' z \quad (2.127)$$

Burada;

σ'_0 = Herhangi bir derinlikteki düşey efektif gerilme

γ'_f = Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı

γ' = Dolgu altındaki kil tabakasının birim hacim ağırlığı

H_f = Kil dolgu malzemesinin yüksekliği

$$\delta' = 0,5 - 0,7\phi' \quad (2.128)$$

Burada;

δ' = Kazık–zemin sürtünme açısı

ϕ' = Zemin içsel sürtünme açısı

Herhangi bir derinlikteki düşey efektif gerilme ve kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı denklem (2.127) ve (2.128)'de verildiği şekilde hesaplanır. Kazıkta oluşacak toplam aşağı yönlü kuvvet şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} Q_n &= \int_0^{L_1} p f_n dz \\ &= \int_0^{L_1} p K' (\gamma'_f H_f + \gamma' z) \tan \delta' dz = (p K' \gamma'_f H_f \tan \delta') L_1 + \frac{L_1^2 p K' \gamma' \tan \delta'}{2} \quad (2.129) \end{aligned}$$

Burada,

γ'_f = Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı

γ' = Dolgu altındaki kil tabakasının birim hacim ağırlığı

H_f = Kil dolgu malzemesinin yüksekliği

K' = Toprak basınç katsayısı ($= 1 - \sin\phi'$)

σ'_0 = Herhangi bir derinlikteki düşey efektif gerilme

δ' = Kazık–zemin sürtünme açısı

ϕ' = Zemin içsel sürtünme açısı

2.11 Kazıklı Temeller Üzerine Yapılan Çalışmalar

Çevik (2005), çalışmasında geleneksel kazıklı temellerin yerine geçen kazıklı radye temelleri incelemiştir. Aşırı konsolide kil zeminler üzerine inşa edilen Westend 1 ve Messe-Torhous yapıları, sonlu elemanlar yöntemiyle iki boyutlu elasto-plastik analiz yapabilen Plaxis yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Veriler üzerinden yapılan analizde, sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarının arazi ölçüm verileri ile yakından uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Aktaş (2006), çalışmasında çeşitli kil tabakası kalınlıkları ve kazık çapları için tek bir kazık üzerindeki negatif çevresel sürtünmeyi incelemek için sonlu elemanlar programından yararlanmıştır. Çalışma özellikle kil zeminlerde çevresel sürtünmenin kazıkları nasıl etkilediğini incelemiş ve kohezyonlu zeminlerde oluşan kazıklar hakkında bilgi sağlamıştır. Araştırma, kazık çapının artmasıyla kazık-zemin temasında meydana gelen kayma gerilmelerinin azaldığı sonucuna varmıştır. Dolayısıyla, kazık çapının artması negatif çevresel sürtünme kuvvetinin artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Turan (2006), çalışmasında kazıklı temellerin düşey yük altında taşıma kapasitesini Plaxis programı ve ampirik formüllerle belirlemiştir. Elde edilen verilerin uygulanabilirliğini, ampirik yöntemler ve Plaxis analiz sonuçlarına göre irdelenmiştir. Çalışma sonucunda Plaxis programıyla elde edilen sonuçlara en yakın ampirik eşitlikler elde edilmiştir.

Jalali vd. (2012), çalışmalarında kazık-zemin etkileşimini ve bu etkileşimin kazık yerleşimi ve etkileşim bölgesindeki kesme gerilmesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yüklemin kazık yer değiştirmesi üzerindeki etkisi, Mohr-Coulomb ve Sert zemin

davranış yasaları uygulanarak araştırılmıştır. Çalışmada Plaxis programından yararlanılmıştır. Ayrıca, ANSYS yazılımı kullanılarak zemin ve kazık arasındaki arayüz etkisini araştırmak için dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Kazığın başındaki veya tabanındaki hız değişiminin arayüz faktörleri üzerinde önemli bir fark yaratmadığını tespit etmişlerdir.

Yazıcı (2013), çalışmasında yüksek plastisiteli (CH) kil zemin üzerine kazıklı radye temeli Plaxis 3D ve Plaxis 2D ile modellemiştir. Kazık aks aralığı dikkate alınarak tasarlanan modellerin analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kazıklar arası mesafenin artmasıyla hacimsel deformasyon, oturma ve kayma deformasyonunda azalma meydana geldiğini gözlemlemiştir. Kazık aralığı $d \geq 6D$ olması durumunda belirgin bir değişim meydana gelmediği belirlemiştir.

Azzam (2015), çalışmasında etekli temel sistemi kullanarak kumlu bir eğimin yanında bulunan ve deprem yüklemesine maruz kalan temellerin davranışını incelemiştir. Yatay zemin hareketini kontrol etme ve temellerin altındaki ve eğimlerin yanındaki gözenek suyu basıncını azaltma üzerindeki etkisini gözlemlemiştir. Çalışmasında Plaxis programından yararlanmıştır. Araştırma sonucunda etekli temel sisteminin genel eğim ve temel stabilitesini artırmada büyük bir etkililiğe sahip olduğunu gözlemlemiştir. Eteklerle sınırlı zemin temel sistemi, temel ivmesini azaltmış ve bu nedenle sönümleme elemanı olarak bitişik eğime iletilen rahatsızlığı hafiflettiğini belirlemiştir.

Ayhan (2016), çalışmasında arazide yapılan taş kolon ve fore kazık imalatı sonrası zemin iyileşme derecelerini gözlemlemiştir. Çalışmada Plaxis programı kullanılmıştır. Fore kazıkların denetimi amacıyla iyileştirilmiş zeminde kazık sürekliliği ve yükleme deneyleri yapılmıştır. Projede belirtilen kapasitede Taş kolonlara da kazık yükleme testi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, yapılan imalatların iyileştirme derecesi bakımından başarılı olduğunu belirlemiştir. Plaxis programından elde edilen veriler ile arazi sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Zhang vd (2017), yaptıkları çalışmada yumuşak kaolin kilinde kazık gruplarının davranışını incelemek için bir dizi sismik santrifüj model testi gerçekleştirmektedir. Çeşitli

küçük ölçekli kazık-başlık modelleri, 2×1 'den 4×3 kazık grubuna kadar modellenmiştir. Bu modellemelere, Sunda Subduction Trench'den kaynaklanan uzak alan depremini temsil etmek için yaklaşık 200 saniyelik güçlü yer hareketine uygulanmıştır. Kazık-başlık sisteminin sertlik/kütle oranının hızlanma ve kazık eğilme momenti tepkisini etkilediği bulunmuştur. 4×3 kazık grubunda, kazık eğilme momenti aynı zamanda kazığın sıradaki konumundan da etkilendiği belirlenmiştir.

Yeğit (2017), çalışmasında sabit yük altında kazıkların çapını, derinliğini ve uzunluğunu değiştirerek oluşturduğu kazık gruplarını incelemiştir. SAP2000 programında bina tasarımı gerçekleştirmiştir. SAP2000 ve Plaxis 3D programını kullanarak oturma değerleri hesaplamıştır. Kazıkta oluşan oturmaları, kazık grubu verimliliklerini ve maliyetlerini dikkate alarak en verimli sonuca ulaşılmasını hedeflemiştir. Sonuçlar incelendiğinde kazık sayılarındaki artışın ve kazık çapının büyük seçilmesi gibi nedenler kazık gruplarında verimliliği düşürdüğünü belirlemiştir.

Toma, (2017), çalışmasında yumuşak zemin üzerindeki bir yapıyı etkileyen deprem tepkisinin, zemin malzeme özellikleri ve temel türü bakımından nasıl etkilendiğini incelemiştir. Kazıkların yapı tepkisi üzerindeki etkisini ivme ve taban kesme kuvveti açısından değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmasın Plaxis 2D programını kullanmıştır. Sayısal dinamik analiz sonuçları, temel türünün yapıların deprem tepkisine önemli ölçüde etkisi olduğunu göstermiştir. Kazıkların kullanımıyla, tek katlı yapı için ivmenin %40 üzerinde ve dört katlı yapı için %45 üzerinde arttığını gözlemlemiştir. Her iki yapı için de sabit tabanın altındaki hesaplanan kesme kuvveti, kazıkların etkisiyle %100 arttığını belirlemiştir.

Zencir (2019), çalışmasında 8 bloklu tasarlanmış bir yapının kalıcı iksa sistemleriyle desteklenmesini ele almıştır. Gerçek bina yükleri kullanılarak Plaxis programı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Kazıklı ve diyafram duvarlı modellemelerde hem statik hem de dinamik analizleri yöntemleri uygulanmıştır. Analizler incelendiğinde kazıklı modelleme sonucu oluşan deplasmanların hem statik durumda hem de depremleri analiz durumunda, diyafram duvarlı modelleme sonucu oluşan deplasmanlardan daha az olduğunu belirlemiştir.

Al-Ghanim vd. (2019) çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak doygun kumlu zeminde sismik dalgaların etkisi altında kazıkların davranışını ve kazık temeline geogrid eklemenin etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, Plaxis 3D sonlu eleman programı kullanılmıştır. Geogrid kullanmadan kazık yerleşimi ile geogrid kullanarak kazık yerleşimi arasındaki fark olarak tanımlanan yerleşim oranındaki azalma, $(L/2 \times L/2)$, $(L \times L)$ ve $(2L \times 2L)$ boyutları için sırasıyla %10.6, %17 ve %21.3 olarak bulunmuştur.

Osmanoğlu ve Çimen (2021), çalışmalarında Kıbrıs Adası'nda farklı zemin profillerinde meydana gelen taşıma gücü ve oturma sorunlarından dolayı tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinin oturma tabanlı iyileştirmesini gerçekleştirmişlerdir. Sistemlerinde değişkenlik gösteren parametreler; kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğu değerleridir. Elde edilen sonuçlarda zemin gruplarında oturma tabanlı optimum kazık sayısı, kazık çapı ve uzunluğu değerlerini belirlemişlerdir.

Hothot (2021), çalışmasında farklı zemin ve kayalarda birimlerinde kazık yükleme deney sonuçlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanmıştır. Çalışma sonucunda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen verilerin, yaklaşık yöntemle hesaplanan verilere göre gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. Farklı zemin profillerinde taşıma gücü ve oturmaların hesaplanması gerektiğinde sonlu elemanlar yönteminden yararlanabileceğini belirlemiştir.

Kaçmaz (2022), çalışmasında Batman iline yapılması planlanan 2 bloklu bir yapının fore kazık sistemiyle desteklenmesini ele almıştır. Çalışma kapsamında Plaxis 2D, Plaxis 3D ve SAP2000 programlarından yararlanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde programdan elde edilen verilerin yapılan hesaplamalarla doğruluğunun kıyaslanması ciddi bir etki göstermiştir. Programlama kullanarak yapılan hesaplamalarda geleneksel metotlarla elde edilemeyen birçok parametrenin kolaylıkla modellenbildiğini belirlemiştir.

3. MATERYAL ve METOT

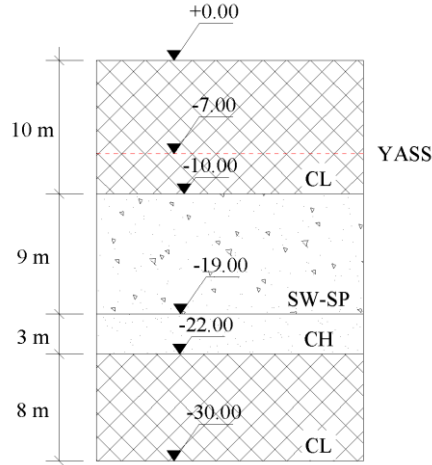
3.1 Zemin Profili ve Yapı Özellikleri

Çalışma kapsamında, Afyonkarahisar ili içerisinde bulunan bir arazinin zemin profili kullanılmıştır. Zemin profili için arazide yapılan sondaj verilerinden yararlanılmıştır. Arazide zemin özelliklerini belirlemek için her 1,5 m’de bir Standart penetrasyon testi (SPT) uygulanmıştır. SPT darbe sayıları Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Sondaj kuyularından alınan numuneler incelendiğinde zemin profilinin 0–10 m’si düşük plastisiteli kil (CL), 10–19 m’si iyi derecelenmiş kum/kötü derecelenmiş kum (SW–SP), 19–22 m’si yüksek plastisiteli kil (CH), 22–30 m’si düşük plastisiteli kil (CL) olduğu görülmüştür (Şekil 3.1). Numunelere ait laboratuvar deney sonuçları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Yapılan sondaj çalışmalarında yer altı su seviyesi 7 m’de görülmüştür. Zemin profilinin parametre özellikleri Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Sondaj kuyusu verilerine ait SPT darbe sayısı.

Sondaj Derinliği (m)	Darbe Sayısı				
	0 – 15 cm	0 – 15 cm	0 – 15 cm	N	N _{1,60}
1,50	2,00	5,00	6,00	11,00	8
3,00	5,00	4,00	3,00	7,00	5
4,50	4,00	3,00	2,00	5,00	4
6,00	2,00	3,00	5,00	8,00	8
7,50	3,00	3,00	4,00	7,00	6
9,00	2,00	2,00	2,00	4,00	3
10,50	2,00	3,00	8,00	11,00	9
12,00	9,00	11,00	9,00	20,00	16
13,50	17,00	14,00	11,00	25,00	17
15,00	11,00	6,00	14,00	20,00	16
16,50	2,00	5,00	9,00	14,00	10
18,00	6,00	7,00	5,00	12,00	9
19,50	5,00	7,00	8,00	15,00	10
21,00	14,00	13,00	13,00	26,00	18
22,50	8,00	7,00	14,00	21,00	16
24,00	6,00	10,00	21,00	31,00	19
25,50	11,00	13,00	15,00	28,00	18
27,00	9,00	13,00	15,00	28,00	18
28,50	9,00	11,00	14,00	25,00	17
30,00	10,00	11,00	12,00	23,00	17

* N; darbe sayısı, N_{1,60}; düzeltilmiş darbe sayısı



Şekil 3.1 Zemin modeli.

Çizelge 3.2 Zemin profiline ait laboratuvar deney sonuçları.

Numune Adı	Derinlik	Doğal Su İçeriği W_n %	Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_n	Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Üç Eksenli Basınç Deneyi	
				#4 Kalan	#200 Geçen %	W_L %	W_p %	I_p %		C_u kN/m ²	ϕ
SPT	1.50-1.95	20.3		0.0	77.2	35.1	18.5	16.6	CL	—	—
SPT	3.00-3.45	22.8	—	0.0	79.4	30.2	21.5	8.7	CL	—	—
UD	4.00-4.50	24.5	18.67	0.8	74.4	41.7	24.6	17.1	CL	37.55	7.44
SPT	4.50-4.95	23.1	—	1.1	79.1	44.5	23.9	20.6	CL	—	—
UD	5.50-6.00	20.8	18.69	2.0	75.8	41.6	21.0	20.6	CL	39.27	8.64
SPT	6.00-6.45	23.1	—	3.4	77.0	35.7	18.2	17.4	CL	—	—
SPT	7.50-7.95	21.7	—	3.6	78.2	36.2	23.3	12.8	CL	—	—
SPT	9.00-9.75	22.5	—	4.1	71.3	36.2	20.0	16.1	CL	—	—
SPT	10.50-10.95	21.5	—	6.4	45.8	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	12.00-12.45	20.2	—	8.2	48.2	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	13.50-13.95	23.7	—	5.9	45.5	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	15.00-15.45	21.0	—	7.5	46.5	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	16.50-16.95	20.9	—	7.5	47.3	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	18.00-18.45	21.6	—	5.7	46.8	—	—	NP	SW-SP	—	—
SPT	19.50-19.95	24.7	—	0.7	83.8	50.9	26.0	24.9	CH	—	—
SPT	21.00-21.45	23.1	—	0.9	84.6	53.1	21.9	31.2	CH	—	—
UD	26.50-27.00	20.2	18.61	2.6	71.1	42.2	21.0	21.2	CL	41.08	6.42
SPT	27.00-27.45	22.3	—	7.1	62.2	38.5	23.4	15.0	CL	—	—
SPT	30.00-30.45	21.2	—	5.4	64.9	37.6	21.7	15.9	CL	—	—

* W_L ; likit limit, W_p ; plastik limit, I_p ; plastisite indisi

Çizelge 3.3 Zemin profiline ait parametreler.

Zemin Sınıfı	γ_{sat}	γ	Φ	c kN/m ²	E kN/m ²	ν	k_x (m/gün)	k_y (m/gün)
CL	18,68	15,27	8,04	38,56	32000	0,33	0,001	0,001
SW-SP	17,00	13,99	33,82	1,00	28000	0,3	0,01	0,01
CH	18,74	15,30	10,00	60,85	33800	0,33	0,001	0,001
CL	18,61	15,36	6,42	41,09	32500	0,33	0,001	0,001

* γ_{sat} ; doymun birim hacim ağırlık, γ ; birim hacim ağırlık, E ; Elastisite modülü, ν ; poisson oranı; k_x ve k_y ; permeabilite katsayıları.

Sondaj raporundan elde edilen veriler kullanarak SPT $N_{1,60}$ değerleri, SPT deney cihazına ait verilere göre hesaplanmıştır. İncelenen laboratuvar deneyleri sonuçlarında zeminlere ait bazı parametreler belirlenememiştir. Bu parametreleri elde etmek için korelasyon hesaplarından yararlanılmıştır. Kazık taşıma kapasitesini ve oturma miktarlarını belirlerken önerilen ampirik yöntemler ince taneli ve iri taneli zeminleri ayrı ayrı değerlendirmektedir. Ancak gerçekte bir zemin profilindeki tabakalanma ince ve iri taneli tabakaları bir arada karşımıza çıkarmaktadır. Bu nedenle çalışmadaki zemin profili ince ve iri taneli zemin tabakalarıyla oluşturulmuştur.

Zemin profili üzerine SAP2000 programı yardımıyla 11 katlı konut yapısı tasarlanmıştır. Yapının temel boyutları 22 m x 27 m'dir. Yapı kat yüksekliği 3.00 m'dir. Yapının kolon ve kiriş tasarımı C35/40 beton sınıfı kullanılmıştır. Donatı malzemesi olarak B420C çeliği kullanılmıştır. Döşeme kalınlığı 12 cm'dir. Yapıya ait SAP2000 görüntüsü Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Kolon ve kiriş boyutları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Kolon, kiriş ve döşeme kalıp planı Şekil 3.3'de verilmiştir. Döşemeler üzerine konutlar için hareketli yük ve sabit yük etkililmiştir. Dış cephe kirişleri için sabit yük 6 kN/m², iç cephe kirişleri için sabit yük 3 kN/m² olarak etkililmiştir. Yapının temel alt seviyesi olarak, arazinin üst kotu kabul edilmiştir. Yapının temeli için radye temel sistemi kullanılmıştır. Radye temel kalınlığı 100 cm olarak alınmıştır. Temel beton sınıfı C35/40 olarak seçilmiştir. Temel üzerine gelen yükü elde ederken 1,4G + 1,6Q yük birleşimi kullanılmıştır. Temel 594 m²'lik bir alana yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.4 SAP2000 modeline ait yapı elemanlarının boyutları.

Yapı Elemanı Adı	Eleman	Boyutları (m)		
		x	y	z
K35x50	Kiriş	0,35	4	0,5
K40x50	Kiriş	0,4	5	0,5
S60x40	Kolon	0,6	0,4	3
S40x60	Kolon	0,4	0,6	3
S50x50	Kolon	0,5	0,5	3
S60x35	Kolon	0,6	0,35	3
D12	Döşeme	4	5	0,12
R100	Temel	22	27	1

* K; kiriş, S; kolon, D; döşeme, R; temel, x,y ve z; eksenler.

SAP 2000 programında yapılan analizler sonucunda kolonlardan temele aktarılan toplam yük 103340,552 kN olarak bulunmuştur. Üzerine temel ağırlığını da ilave ederek birim alana düşen toplam yük 199 kN/m² olarak hesaplanmıştır.

3.2 Kullanılan Deprem Verileri

Modellemelerde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018’de önerdiği şekilde 11 farklı deprem kaydı (1976 Pamukkale, 1983 Biga, 1992 Otlukbeli, 1992 Menderes 1995 Dinar, 1998 Adana, 1999 Düzce, 2002 Sultandağı, 2003 Bingöl, 2011 Van, 2023 Islahiye) kullanılmıştır. Modellemelerde kullanılan depremler AFAD veri bilgi sisteminden alınmıştır. Deprem karakteristikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir. TBDY 2018’e göre deprem yer hareketi düzeyleri, Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4) olarak bilinmektedir.

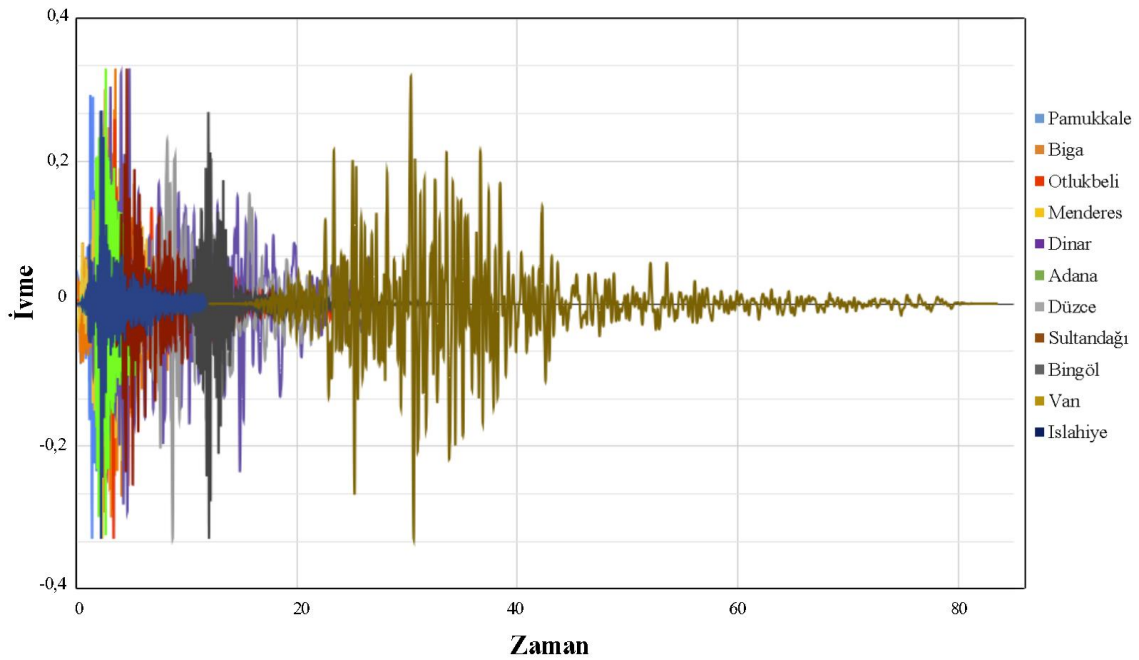
Bu çalışma kapsamında modelleme DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre tasarlanmıştır. Gerçek deprem kayıtları, yönetmeliğe uygun olarak çalışma alanı için sistem üzerinden elde edilen DD-2 ivme değerlerine göre (0.333 PGA(g)) ölçekleme yapılmıştır. Plaxis programında ölçeklenen deprem kayıtları kullanılmıştır.

Kullanılan 11 farklı deprem kaydına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 3.4’de ölçekli olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan depremlerin özellikleri.

Deprem Adı	İstasyon	Derinlik (km)	PGA (cm/s ²)	Büyüklik (M _w)
19.08.1976 Pamukkale (Denizli)	2001	20	348,53	5,0
05.07.1983 Biga (Çanakkale)	1012	6,9	53,44	5,5
13.03.1992 Otlukbeli (Erzincan)	2402	23	479,54	6,6
06.11.1992 Menderes (İzmir)	0905	17,2	83,49	6,0
01.10.1995 Dinar (Afyonkarahisar)	0302	5	320,76	6,1
27.06.1998 Adana	0105	46,6	273,55	6,2
12.11.1999 Düzce	8101	10,4	512,9	7,2
03.02.2002 Sultandağı (Afyonkarahisar)	0301	22,1	112,76	6,5
01.05.2003 Bingöl	1201	6	501,43	6,3
23.10.2011 Van	6503	19,02	178,35	6,7
06.02.2023 Islahiye (Gaziantep)	8002	9,77	129,2	6,5

* PGA; en büyük yer ivmesi



Şekil 3.4 11 adet deprem verisine ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği.

3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik problemlerini analiz etmek için diferansiyel denklemlerle ifade edilen nümerik çözümler yapan Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) geliştirilmiştir. Bu yöntemde, sürekli bir ortam sonlu bileşenlere bölünerek bir eleman için denklemler yazılır, bu denklemleri birbirleriyle entegre ederek sistem denklemleri elde edilir. Sürekli bir ortam için incelenen diferansiyel denklem, bir lineer denklem takımına dönüştürülür. FEM yaklaşımını kullanarak, karmaşık diferansiyel denklemler bilgisayar tarafından çözülebilecek matris forma dönüştürülür. Bu yöntemi kullanarak:

- 1) Birçok karşılaşılan problemlerde sonlu elemanlar kullanılabilir.
- 2) Bilgisayar yardımıyla çözümler gerçekleştirilir.
- 3) Karmaşık geometri modelleri, yükleme koşulları, sınır koşulları ve malzeme özellikleri dikkate alınabilir.
- 4) Birincil bilinmeyenler (akım potansiyeli, yer değiştirme, vb.) ve ikincil bilinmeyenler (şekil değiştirme, gerilme, vb.) birlikte çözümlenebilir.
- 5) Modellemelerde şekil değiştirme, gerilme, oturma gibi sonuçlar elde edilebilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), yapıların ve zeminin etkileşimini dikkate alan yapısal değerlendirmelerde kullanılan sayısal tekniklerden biridir. Analitik yaklaşımlar, rijit yapılardaki dinamik basınçları hesaplamayı kolaylaştırır, ancak esnek yapıların dinamik özelliklerini hesaplamak o kadar basit değildir. Bu nedenle, bu özelliklerin araştırılmasında sayısal teknikler kullanılır. Zemin içerisindeki geometrik süreksizlikler, analitik veya yarı analitik formüllerin zorlandığı karmaşık geometriler ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler, FEM ile kolaylıkla dikkate alınabilir (Gürsoy ve Durmuş 2002).

Geoteknik yapıların tasarımında, zemin hareketleri, yapı kuvvet diyagramları (M, V ve N) ve geoteknik yapılar ile komşu yapılardaki kuvvetler dikkate alınır. Teorik bir çözümün tamamen geliştirilmesi için dört gereksinimin karşılanması gerekir; malzeme bünye davranışı, denge, uygunluk ve sınır koşulları. Gerçek malzeme bünye modelini

dikkate alarak zemin davranışı için kapalı formda bir çözüm elde etmek mümkün değildir. Kapsamlı nümerik analizler, dört temel gereksinimi ve tasarım gereksinimlerini karşılar.

- 1) Elasto-plastik malzeme
- 2) Drenajlı ve drenajsız durum
- 3) Başlangıç koşulları ve gerilme durumu
- 4) Anizotropi

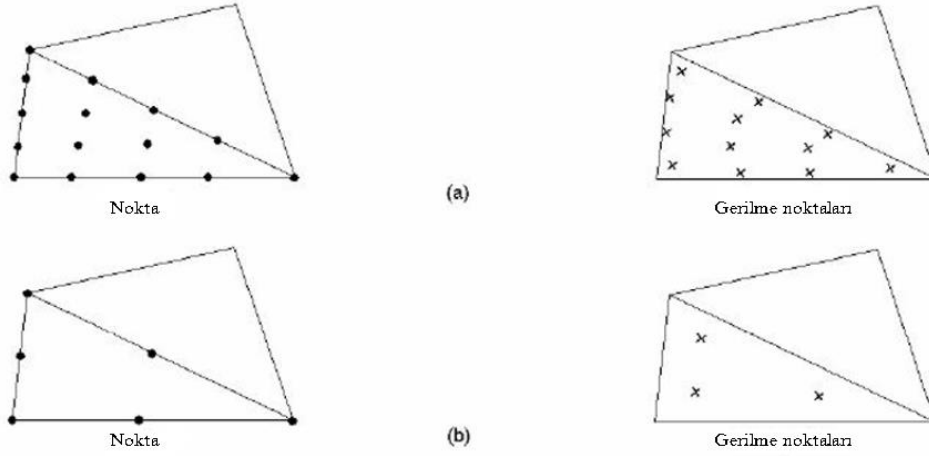
3.4 Plaxis 2D Programının Özellikleri

Plaxis, özellikle geoteknik mühendisliği uygulamalarında stabilite ve deformasyon değerlendirmeleri için geliştirilmiş bir sonlu eleman programıdır. Basit grafiksel giriş işlemleri ile karmaşık sonlu eleman modelleri hızla oluşturulabilir ve hesaplama sonuçlarının tam sunumu, gelişmiş çıktı olanakları ile sağlanır. Hesaplamanın kendisi güvenilir sayısal işlemlere dayanmakta olup tamamen otomatiktir.

Her yeni projenin analizinde geometrik bir model oluşturmak önemlidir. Noktalardan, çizgilerden ve kümelerden oluşan bir geometrik model, üç boyutlu bir sorunun iki boyutlu temsili olarak kabul edilir. Bir geometri modeli, alt zeminin temsili olacak şekilde belirgin zemin tabakalarına bölünebilmesi için, yapısal nesneleri, inşaat aşamalarını ve yükleri içermelidir. Modelin boyutu, projenin sonuçlarını etkilememesi için yeterince büyük olmalıdır.

Program içerisinde, noktalar çizgilerin başlangıç ve bitimlerini oluşturur. Çizgiler, geometrinin fiziksel sınırlarını ve geometrik süreksizliği tanımlamak için kullanılır. Kümeler, çizgilerle tamamen çevrilmiş alanlardır. Elemanlar, ağ oluşturulması sırasında kümeleri üçgen biçimli elemanlara böler. Elemanlar, 15-düğümlü ve 6 düğümlü elemanlar olmak üzere iki tanedir. Güçlü olan 15-düğümlü elemanlar gerilme ve göçme yüklerinin altında hassas hesaplamalar sağlar. 6-düğümlü eleman pratik durumlar açısından hızlı hesaplar için uygundur. Düğümler, bir sonlu eleman hesaplaması boyunca, deplasmanları (u_x ve u_y) hesaplar. Gerilmeler ve şekil değiştirmeler düğümlerden ziyade özel Gauss birleşim noktalarında hesaplanır. Düğümler ve gerilme noktaları Şekil 3.5'te

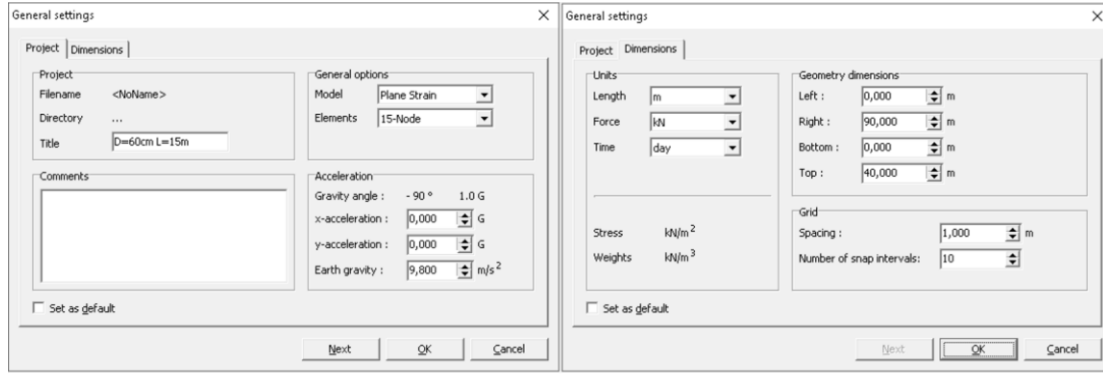
verilmiştir. Şekil 3.5a'da 15-düğümlü eleman, Şekil 3.5b'de 6-düğümlü eleman gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Düğümler ve gerilme noktaları.

3.4.1 Plaxis 2D Programında Modelleme

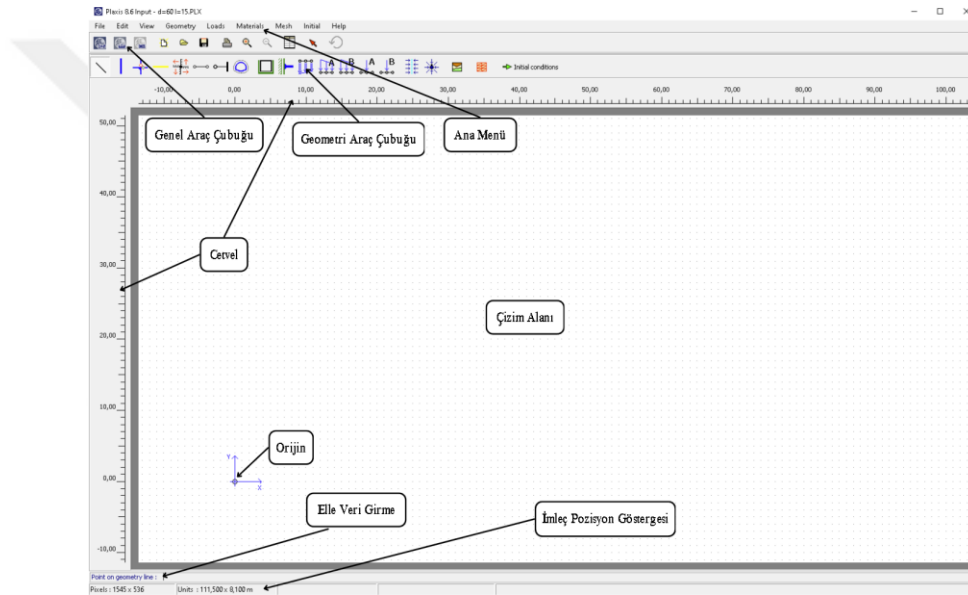
Plaxis programını açtığımızda ilk olarak genel ayarlar kısmıyla karşılaşırız (Şekil 3.6a). Project (proje) bölümünde çalışmanın başlığını, düğüm noktalarını ve yer çekimi ivme değeri girilir. Dimensions (Boyut) bölümünde; modellemenin birimleri, geometri boyutları ve geometri nokta sayısı girilir (Şekil 3.6b). Programın ana pencere bölümü incelendiğinde; geometri modeli oluşturmakla ilgili (Malzeme ataması, yük ataması, model sınırlamaları, ankraj, geogrid, kazık, temel vb.) kullanılan düğmeleri içerir. Ana menü bölümden yük değerlerini, geometri ile ilgili verileri, sonlu elemanlar ağına bölme gibi işlemler gerçekleştirilir (Şekil 3.7). Şekil 3.8'de malzeme özellikleri gösterilmiştir. Şekil 3.8a'da malzemenin adı, modeli, malzeme tipi, birim hacim ağırlık değerleri ve permeabilite değerleri girilir. Şekil 3.8b'de Parametreler bölümünde zeminin elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme değerleri girilir. Şekil 3.9'de kazık ve temel malzemelerine ait malzeme tipi, eksenel rijitlik, eğilme rijitliği, ağırlık ve poisson oranı değerleri girilir. Şekil 3.10'da çözüm yapılacak geometri modeli bulunmaktadır. Bu modelde zemin profili, temel, kazık grubu, yapıdan temele aktarılan yayılı yük ve deprem yükü görülmektedir. Şekil 3.11'de tasarlanan modelleme sonlu elemanlar ağına (mesh) bölünür. Modellemelerde sonlu elemanlar ağının sıklığı için "fine" seçilmiştir. Modele ait yer altı su seviyesi ve toprak basıncı değerleri girilerek hesaplama aşamasına geçilir.



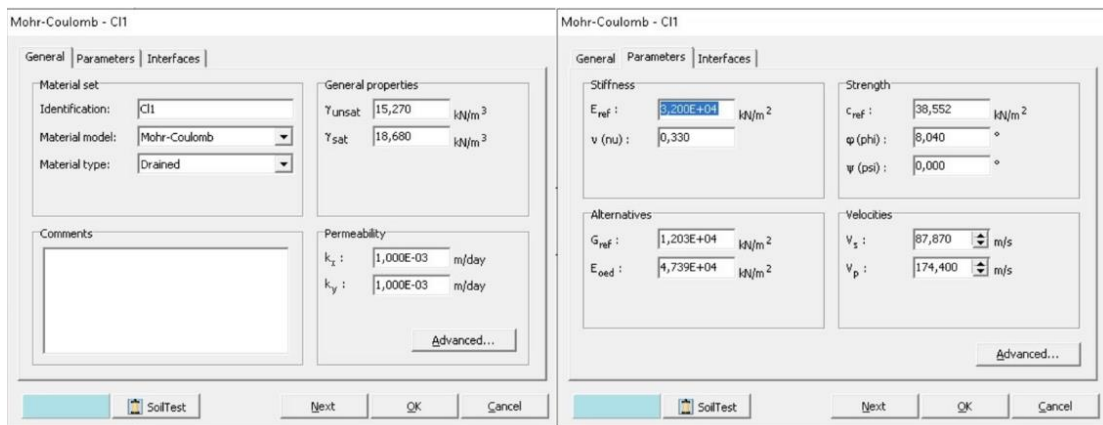
(a)

(b)

Şekil 3.6 (a) proje bilgilerinin girildiği bölüm ve (b) modelleme ölçülerinin girildiği bölüm



Şekil 3.7 Programın ana pencere bölümü.



(a)

(b)

Şekil 3.8 (a) zeminin genel özellikleri ve (b) zeminin parametre değerlerinin girildiği bölüm

Plate properties

Material set
 Identification:
 Material type:

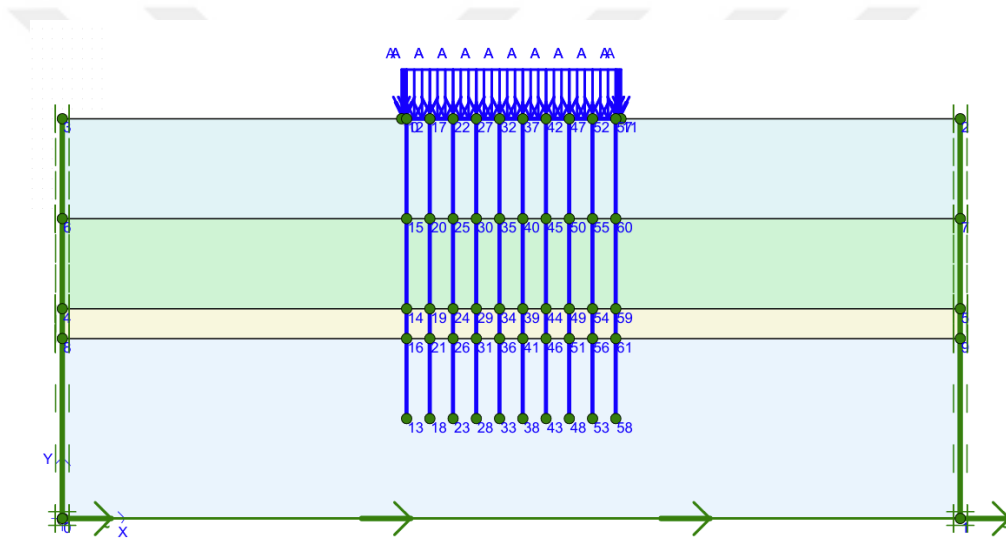
Comments

Properties

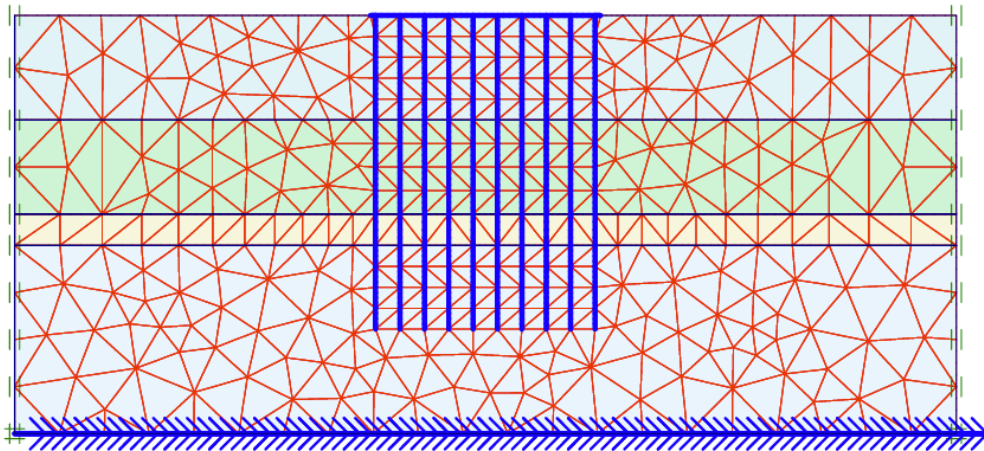
EA : kN/m
 EI : kNm²/m
 d : m
 w : kN/m/m
 v :
 M_p : kNm/m
 N_p : kN/m
 Rayleigh α :
 Rayleigh β :

OK Cancel

Şekil 3.9 Kazık ve temel malzeme özelliklerinin girildiği bölüm.

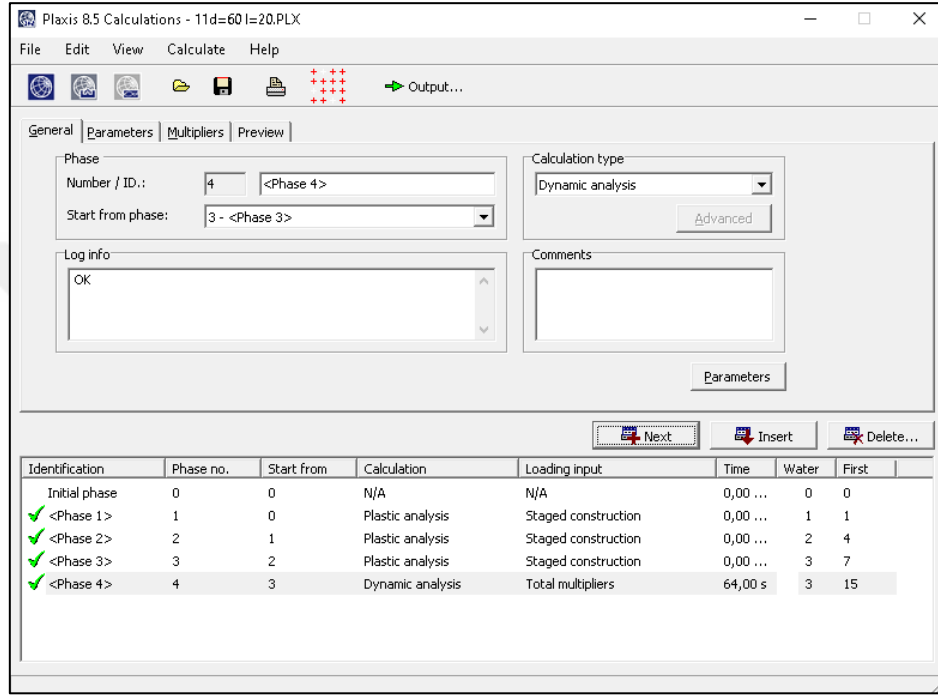


Şekil 3.10 Kazık grubu modeli.

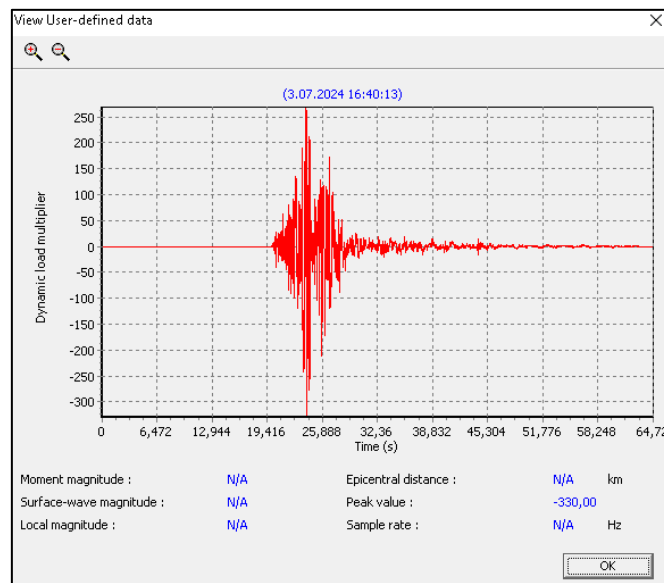


Şekil 3.11 Sonlu elemanlar ağına bölünmüş kazık grubu modeli.

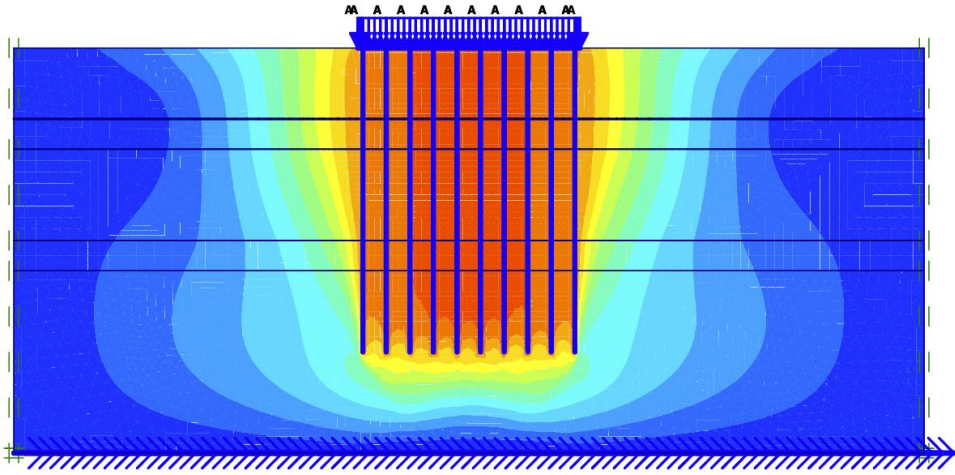
Modellemenin hesaplama aşamasında dört farklı analiz türü gerçekleştirilebilir: "plastik analiz", "konsolidasyon analizi", "güncellenmiş ağ analizi" ve "dinamik analiz". Hesaplama modeline bağlı olarak her modelleme için birkaç aşama seçilebilir (Şekil 3.12). Dinamik analiz için kullanılan örnek deprem ivme zaman grafiği Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Hesaplama sonucu modellemelere ait çıktılar elde edilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.12 Analiz verilerinin girildiği bölüm.



Şekil 3.13 Deprem ivme zaman grafiği.



Şekil 3.14 Modellemeye ait analiz çıktısı.

Programda kullanılan kazık ve temele ait malzeme özellikleri Çizelge 3.6’ de verilmiştir. Zemin özellikleri Bölüm 3.1’den alınmıştır.

Çizelge 3.6 Kazık ve temele ait malzeme özellikleri.

Malzeme Adı	Type	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	D (m)	w (kN/m/m)	v
60 cm Kazık	Elastic	1,92x10 ⁷	5,76x10 ⁵	0,6	6,79	0,2
80 cm Kazık	Elastic	2,56 x10 ⁷	1,36x10 ⁶	0,8	12,06	0,2
100 cm Kazık	Elastic	3,2 x10 ⁷	2,66x10 ⁶	1	18,85	0,2
Temel	Elastic	3,3 x10 ⁷	2,75x10 ⁶	1	—	0,2

* EA; eksenel rijitlik, EI; eğilme rijitliği, D; kazık çapı, w; ağırlık, v; poisson oranı

4. BULGULAR

4.1 Kazık Hesapları

Tekil kazıkların taşıma kapasitesini belirlemek için Bölüm 2.4’de bahsedilen ampirik formüller kullanılarak elle hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalarda kullanılan zemin profili Bölüm 3.1’de anlatılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kazık çapları: 60 cm, 80 cm ve 100cm; kazık boyları: 15 m, 20 m, 25 m ve 30 m olarak seçilmiştir. Çizelge 4.1’de tekil kazıkların ampirik formüller kullanılarak hesaplanan toplam taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir. Hesaplamalarda güvenli tarafta kalmak için taşıma kapasitesi değerleri güvenlik sayısına bölünmüştür (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1 Tekil kazıkların toplam taşıma kapasitesi.

Q_u	Toplam Kazık Taşıma Kapasitesi (kN)		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	2409,49	3916,78	5726,72
20 m	1344,43	1884,04	2468,20
25 m	1618,51	2262,40	2957,11
30 m	1907,05	2656,77	3460,38

Çizelge 4.2 Tekil kazıkların emniyetli taşıma kapasitesi.

Q_a	Toplam Emniyetli Kazık Taşıma Kapasitesi (kN)		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	803,16	1305,59	1908,91
20 m	448,14	628,01	822,73
25 m	539,50	754,13	985,70
30 m	635,68	885,59	1153,46

Temel altına yerleştirilecek kazık adedini bulmak için üst yapıdan gelen yük toplam kazık taşıma kapasiteleri ile bölünmüş ve kazıkların temel altına dağılımı gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 Kazıkların grup dağılımı.

	Kazık Dağılımı		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	12x12	10x9	8x8
20 m	17x16	14x14	12x12
25 m	15x15	13x12	11x11
30 m	14x13	12x11	10x10

Kazık grup dağılımları dikkate alınarak kazıkların merkezden merkeze olan mesafeleri belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 Kazıkların grup içerisindeki merkezden merkeze olan mesafeleri.

d	Kazık Aralığı Mesafesi (m)		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	1,95	2,65	3,00
20 m	1,43	1,63	1,91
25 m	1,53	1,93	2,10
30 m	1,78	2,12	2,33

Ampirik yöntemler kullanılarak hesaplanan tekil kazıkların oturma değerleri s_e , Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Tekil kazıkların oturma değerleri (s_e).

$s_e \text{ (mm)}$	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	96,93	128,2	157,94
20 m	13,73	17,02	20,45
25 m	16,72	20,43	24,36
30 m	18,95	22,3	26,03

Kazık gruplarının ampirik yöntemler kullanılarak hesaplanan oturma değerleri $s_{g(e)}$, Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Kazık gruplarının oturma değerleri ($s_{g(e)}$).

$s_{g(e)}$ (mm)	$\varnothing = 60$ cm	$\varnothing = 80$ cm	$\varnothing = 100$ cm
15 m	586,94	669,22	734,04
20 m	83,14	89,25	95,92
25 m	101,25	107,14	114,26
30 m	114,75	122,10	127,34

Kazıklar taşıma kapasitesi açısından bakıldığında, 15 m derinliğindeki kazıklar 20–25 ve 30 m derinliğindeki kazıklardan daha yüksek taşıma kapasitesi değeri vermektedir. Bunun nedeni 15 m boyundaki kazıkların uç bölgesinin kum zemine oturmasından kaynaklıdır. Bu duruma göre 15 m boyundaki kazıkların taşıma kapasitesi bakımından yeterli olduğu düşünülebilir. Ancak oturma değerleri açısından bakıldığında 15 m boyundaki kazıklarda ampirik yöntemlerle elde edilen oturma değerleri kabul edilebilir oturma değerlerini aştığı için kazık boyları artırılmıştır.

Kazık gruplarının ampirik yöntemlerle hesaplanan verimlilik değerleri aşağıda verilmiştir. Çizelge 4.7’de Das’ ın önermiş olduğu verimlilik (η) eşitliği kullanılmıştır.

Çizelge 4.7 Das eşitliğine göre kazık gruplarının verimlilik değerleri.

η	Kazık Verimliliği (%)		
	$\varnothing = 60$ cm	$\varnothing = 80$ cm	$\varnothing = 100$ cm
15 m	-	-	-
20 m	0,18	0,18	0,19
25 m	0,21	0,23	0,23
30 m	0,27	0,26	0,25

Çizelge 4.8’de ise Converse-Labarre’nin yaptıkları çalışma sonucu önermiş oldukları verimlilik (η) eşitliği kullanılmıştır.

Hesaplanan verimlilik sonuçları incelendiğinde kazık gruplarının verimlilik değerleri %1’in altında kalmaktadır.

Çizelge 4.8 Converse-Labarre eşitliğine göre kazık gruplarının verimlilik değerleri.

η	Kazık Verimliliği (%)		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	-	-	-
20 m	0,52	0,46	0,44
25 m	0,56	0,54	0,49
30 m	0,62	0,58	0,53

Kazık gruplarında her iki yöntemde de 15 m’de grup etkisi görülmediğinden verimlilik değerleri hesaplanmamıştır.

Kazık gruplarının taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Kazık gruplarının emniyetli taşıma kapasitesi değerleri.

Q_u	Grup Kazık Taşıma Kapasitesi (kN)		
	$\varnothing = 60 \text{ cm}$	$\varnothing = 80 \text{ cm}$	$\varnothing = 100 \text{ cm}$
15 m	-	-	-
20 m	214111,33	219423,49	213954,55
25 m	247100,50	239427,72	242643,23
30 m	251435,89	252518,27	247847,29

Kazık gruplarında boyu 15 m olan kazıklarda grup etkisi görülmediğinden dolayı taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmamıştır.

4.2 Plaxis Modelleme Verileri

Kazık gruplarının ampirik yöntemlerle karşılaştırılmasının yapılabilmesi için önce deprem kuvveti etki ettirilmeden analizler gerçekleştirilmiştir. Modellemeler ampirik yöntemle hesaplanan kazık aralığı değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Depremsiz kazık gruplarının oturmaları Çizelge 4.10’de verilmiştir.

Çizelge 4.10 Kazık gruplarının Plaxis oturma değerleri.

Oturmalar (mm)	Ø = 60 cm	Ø = 80 cm	Ø = 100 cm
15 m	79,79	90,09	105,62
20 m	62,86	85,36	112,12
25 m	50,28	58,63	82,03
30 m	36,29	40,93	50,19

Kazık gruplarına 11 farklı deprem etkisi etki ettirilerek oluşan düşey deformasyon değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

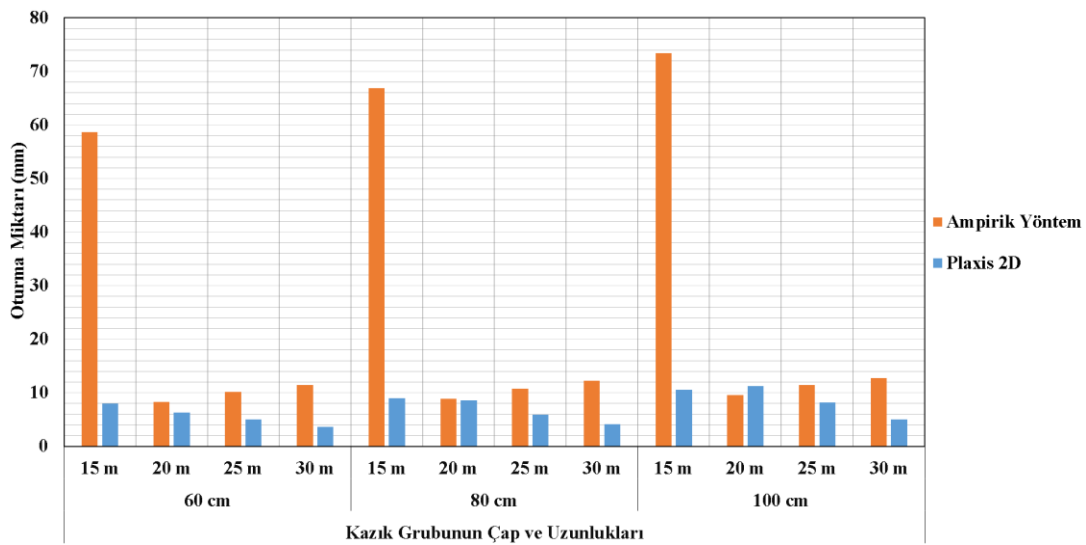
Çizelge 4.11 Kazık gruplarının dinamik etki altında Plaxis oturma değerleri (mm cinsinden).

	Kazık Gruplarının Çapları											
	Ø = 60 cm				Ø = 80 cm				Ø = 100 cm			
	Kazık Boyları											
Depremler	15 m	20 m	25 m	30 m	15 m	20 m	25 m	30 m	15 m	20 m	25 m	30 m
Pamukkale	58,9	54,1	32,7	16,9	66,8	71,9	102,6	33,0	78,1	104,8	74,7	55,8
Biga	78,6	80,7	53,1	30,9	92,5	115,7	79,8	53,85	111,0	163,0	120,7	82,32
Otlukbeli	179,8	174,5	126,5	74,5	202,8	228,1	162,1	116,0	235,2	297,0	231,4	159,9
Menderes	65,0	60,2	34,6	17,2	72,6	86,7	56,0	32,5	86,2	127,8	87,7	58,8
Dinar	123,5	121,5	72,1	38,0	145,8	207,4	115,2	72,5	185,5	347,2	216,2	132,6
Adana	6,33	10,3	1,66	0,74	5,27	13,1	9,16	1,39	6,29	8,2	5,56	3,31
Düzce	569,9	513,7	345,8	186,5	637,0	717,8	460,0	285,6	761,6	970,1	682,6	412,4
Sultandağı	87,4	80,7	53,6	29,5	99,7	120,8	79,7	52,1	117,5	180,3	127,7	85,1
Bingöl	56,4	52,4	33,3	15,7	64,8	70,6	47,8	27,5	75,9	95,4	73,65	53,3
Van	151,9	143,6	91,2	53,8	174,2	202,4	135,3	81,8	200,6	301,3	203,6	132,0
Islahiye	23,1	20,4	9,8	3,2	25,4	27,1	18,5	8,20	29,1	36,0	27,3	18,6

Depremler, süreleri ve frekans değerleri bakımından farklılık gösterdiği için oturma değerlerinde çeşitliliğe neden olmuştur.

Bu durum yapılacak olan analizlerde deprem kayıtlarının seçimi yönünden önemli bir rol oynamaktadır.

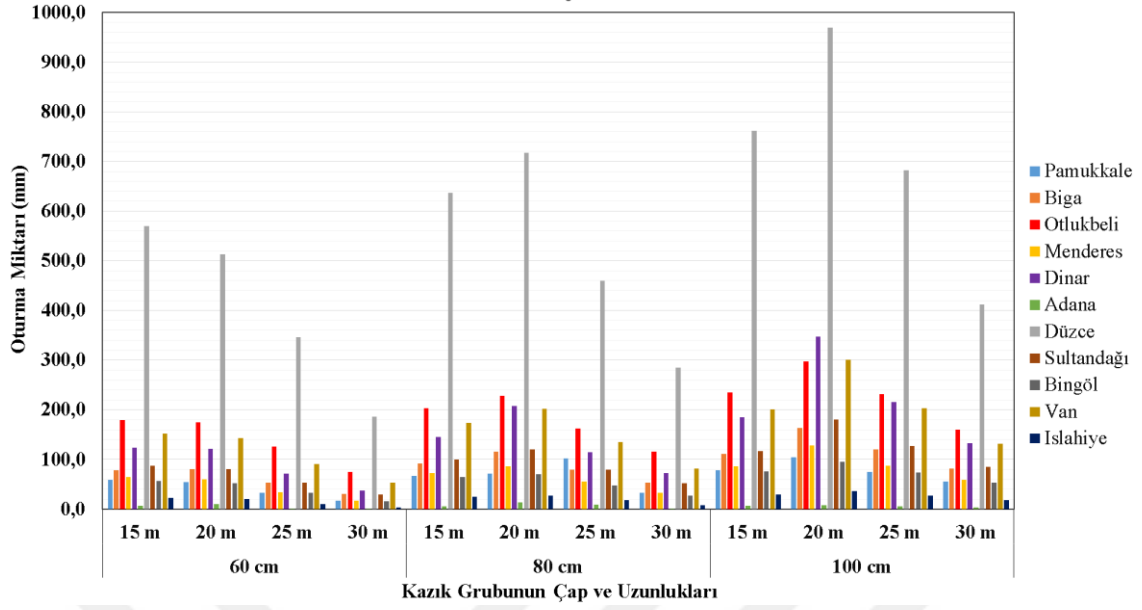
Analiz sonuçları genel olarak incelendiğinde en düşük oturma değerleri 30 m derinlikteki kazık gruplarında olduğu görülmüştür. En az oturma değerleri veren kazık grubuna ait Plaxis analizleri ve kazık dağılımı Ekler bölümünde verilmiştir. Ampirik yöntemlerle ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırmalı olarak sütun grafiği gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Ampirik yöntemler ve Plaxis programıyla hesaplanan oturma değerleri.

Grafik incelendiğinde 15 m boyundaki kazık gruplarında belirgin şekilde fazla oturma değerleri görülmektedir. Bunun nedeni 15 m boyundaki kazık gruplarının kazık uçlarının kum zemine oturmasından kaynaklı olduğu bilinmektedir. Kazık gruplarında kazık boyları arttırıldığında oturma miktarlarının azaldığı, kazık gruplarında çap büyüdükçe oturma miktarlarının arttığı belirlenmiştir. Genel olarak incelendiğinde Plaxis değerlerinin ampirik yöntemler kullanılarak elle yapılan hesaplamalardan daha az oturma değerleri verdiği görülmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan depremli durumdaki oturma değerleri sütun grafiği olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Kazık gruplarının depremli durumdaki oturma değerleri.

Depremli durumdaki sütun grafiği incelendiğinde en büyük oturma değerleri Düzce depreminde olduğu görülmektedir. En az oturmanın ise Adana depreminde meydana geldiği belirlenmiştir.

Kazık boyları bakımından incelendiğinde kazık gruplarının boyları arttırıldıkça oturma miktarlarının genel olarak azaldığı görülmüştür. Kazık çaplarının artmasıyla sürtünme yüzeyleri artmış bu durum farklı oturmalara neden olmuştur. Kazık gruplarının çapları arttırıldığında oturma miktarlarının arttığı görülmüştür.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, kazık gruplarının oturmalarını değerlendirmek amacıyla hem ampirik yöntemlerle elle hesaplamalar yapılmış hem de Plaxis 2D programında modelleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı geometrilere sahip kazık gruplarının zemin ile etkileşimleri ve oturma davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Ampirik yöntemler kullanılarak yapılan elle hesaplamalar ile kazık gruplarının temel taşıma kapasiteleri ve beklenen oturmaları belirlenmiştir. Ancak sonuçlara bakıldığında birbirinden farklı değerlerin olduğu görülmektedir. Bu durum literatürde (Das 2007) de belirtildiği gibi kazık temellerin hesaplanmasında karmaşık ve henüz tam bir çözüm yöntemi geliştirilemediği ifadesi ile uyumludur. Çünkü bu yöntemlerin bazı sınırlamaları ve kabulleri vardır. Bu durum tabakalı zemin koşullarında ve çeşitli yükleme senaryolarında yetersizliği çok daha fazla bir şekilde ortaya koymaktadır.

Plaxis 2D programında yapılan modelleme analizleri ile kazık gruplarının daha gerçekçi ve detaylı bir şekilde değerlendirilmesinin yapılabildiği söylenebilir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu analizler, zemin tabakalarının farklı özelliklerini ve kazık-zemin etkileşimlerini dikkate aldığından sonuçların daha güvenilir olduğu ifade edilebilir. Modelleme sonuçları, kazık gruplarının oturma davranışlarının zemin parametreleri, kazık geometrisi ve yerleşim düzenine bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

Genel olarak, her iki yöntemin de kazık oturmalarını belirlemede farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ampirik yöntemler, zemin davranışını genel hatlarıyla ve daha basit kabullerle ele almaktadır. Buna karşın, Plaxis 2D modelleme, zemin ve yapı arasındaki etkileşimleri daha detaylı bir şekilde simüle etmekte ve bu duruma uygun sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, farklı zemin türleri ve kazık çapları için kazık gruplarının oturma miktarları ampirik yöntemler kullanılarak elle hesaplamalar yapılmış ve Plaxis sonlu elemanlar

yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki yöntem arasındaki farklılıkları ve zemin türlerinin oturma miktarlarına etkisini ortaya koymuştur.

- 15 metre derinlikte kum zemin üzerine oturan kazıklarla oluşturulan kazık gruplarında yapılan analizlerde, ampirik yöntemle hesaplanan oturmalar 60 cm, 80 cm ve 100 cm çapındaki kazıkların olduğu gruplar için sırasıyla 586,9 mm, 669,2 mm ve 734 mm olarak bulunmuştur. Plaxis yöntemiyle yapılan analizler sonucunda ise sırasıyla 79,79 mm, 90,09 mm ve 105,62 mm oturma değerleri bulunmuştur. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında ampirik yöntemle hesaplanan değerlerin Plaxis sonuçlarından daha yüksek olduğunu belirgin bir şekilde göstermektedir. Bunun nedeni ampirik yöntemlerle yapılan hesaplamalarda 15 m boyundaki kazık gruplarının kazık uçlarının kum zeminde olmasından kaynaklıdır.
- 20 metre derinlikte yüksek plastisiteli kil (CH) zemine oturan kazık gruplarında yapılan hesaplamalarda, ampirik yöntemle bulunan oturmalar 60 cm, 80 cm ve 100 cm çapındaki kazık grupları için sırasıyla 83,14 mm, 89,25 mm ve 95,92 mm olarak tespit edilmiştir. Plaxis yöntemiyle elde edilen sonuçlar ise sırasıyla 62,86 mm, 85,36 mm ve 112,12 mm olmuştur. Bu durumda, 60 cm çapındaki kazık grubunda ve 80 cm çapındaki kazıklı gruplar için ampirik yöntemle hesaplanan değerlerin Plaxis sonuçlarına yakın olduğu, ancak 100 cm çapındaki kazık grubunda Plaxis yönteminin belirgin şekilde daha yüksek oturma değerleri verdiği görülmüştür.
- 25 metre derinlikte düşük plastisiteli kil (CL) zemine oturan kazık gruplarında ampirik yöntemle hesaplanan oturmalar 60 cm, 80 cm ve 100 cm çapındaki kazık grupları için sırasıyla 101,25 mm, 107,14 mm ve 114,26 mm olarak bulunmuştur. Plaxis yöntemiyle yapılan hesaplamalar ise sırasıyla 50,28 mm, 58,63 mm ve 82,03 mm oturma değerlerini göstermiştir. Bu durum, ampirik yöntemlerle hesaplanan oturma değerlerinin Plaxis sonuçlarından belirgin olarak daha yüksek olduğunu göstermektedir.

- 30 metre derinlikte düşük plastisiteli kil (CL) zemine oturan kazık gruplarında yapılan analizlerde, ampirik yöntemle bulunan oturmalar 60 cm, 80 cm ve 100 cm çapındaki kazık grupları için sırasıyla 114,75 mm, 122,1 mm ve 127,3 mm olarak tespit edilmiştir. Plaxis yöntemiyle elde edilen sonuçlar ise sırasıyla 36,29 mm, 40,93 mm ve 50,19 mm olmuştur. Bu durumda, ampirik yöntemle hesaplanan oturmaların Plaxis sonuçlarından çok daha yüksek olduğu ve bu farkın kazık çapı arttıkça daha belirgin hale geldiği görülmüştür.

Kazık gruplarının oluşturduğu oturma miktarları Yeğit (2017)'in yaptığı çalışmada elde edilen sonuçlarla benzer şekilde olduğu görülmektedir. Buna göre kazık çapı büyüdükçe oturma miktarlarında artış, kazık boyu arttığında oturma miktarlarında azalış olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan kazıklı temellerin deprem gibi hareketli yatay yüklerin etkisinde olduğu durumlarda oturma değerlerinin nasıl değiştiğini belirlemek için kazık gruplarında 11 farklı depremde oluşan ivme değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 3.5'de detayları verilen bu depremlerin oluşturduğu değerler; depremlerin ivmelerine, kazık aralığına, kazık çapı ve kazık boyuna bağlı olarak farklılıklar göstermiştir. Plaxis analizlerinde ölçeklendirilmiş deprem verileri kullanılmıştır. Depremli koşullarda, farklı deprem ivmeleri altında oturma miktarları Plaxis sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

- 60 cm çaplı kazık gruplarında yapılan analizlerde kazık gruplarının oturmalarında nispeten düşük değerler olduğu gözlemlenmiştir. 60 cm çapında kazıklı gruplar için en düşük oturma değeri Adana depreminde kazık boyu 30 m olan grupta 0,74 mm olarak hesaplanmıştır. En büyük oturma değeri kazık boyu 15 m olan grupta 569,9 mm olarak Düzce depreminde gözlenmiştir.
- 80 cm çaplı kazık gruplarında yapılan analizlerde kazık gruplarının oturmalarında en düşük oturma değeri Adana depreminde 30 m derinlikte 1,39 mm olarak hesaplanmıştır. En büyük oturma değeri kazık boyu 20 m olan grupta 717,8 mm olarak Düzce depreminde gözlenmiştir.

- 100 cm çaplı kazık gruplarında yapılan analizlerde kazık gruplarının oturmalarında en düşük oturma değeri Adana depreminde 30 m derinlikte 3,31 mm olarak hesaplanmıştır. En büyük oturma değeri kazık boyu 20 m olan grupta 970,1 mm olarak Düzce depreminde gözlenmiştir.

Deprem sonucu oluşan oturma miktarları genel olarak incelendiğinde en düşük oturma değerleri Adana depreminde, en büyük oturma değerleri Düzce depreminde elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla dinamik yükler altında farklı çaplardaki kazıklarda elde edilen deplasmanlarda farklılıklar gözlenmiştir. Kazık çaplarının artmasıyla sürtünme yüzeyleri artmış bu da farklı deprem kayıtlarının hepsinde sonuçlara yansımıştır. Kazık çapı ve boyu değişimi nedeniyle oturmalarda farklılık görülmüştür fakat analizlerde kullanılan kayıtların özellikleri de sonuçlara yansımıştır. Anakaya ivmesi olarak kullanılan ölçeklendirilmiş kayıtların maksimum ivme değerleri (pga) aynı olmasına rağmen, süreleri, frekans içerikleri farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar oturma değerlerindeki çeşitlilikle çok iyi bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu sebeple, dinamik yükler altındaki kazık davranışı modellenirken deprem kayıt seçimi çok büyük önem arz etmektedir. Tasarımlarda bu detay gözden kaçırılmamalı ve en olumsuz duruma göre gerekli önlemler alınmalıdır.

Bowles (1988), yaptığı çalışmada radye temellerdeki oturma miktarları için kil zeminlerde 12,5 cm, kum zeminlerde 7,5 cm kabul edilebilir oturma değerleri önermiştir. Tez çalışmasındaki oturma miktarları incelendiğinde Düzce depreminin oluşturmuş olduğu oturma değerleri bu sınırlar dışında kalmaktadır. Bu durumu iyileştirmek için kazık boyunun arttırılması gerektiği düşünülmektedir. Ancak çalışmanın yapıldığı alanın yakın çevresinde olan Sultandağı ve Dinar depremleri dikkate alındığında 30 m boyundaki kazık gruplarında belirtilen kabul edilebilir oturma değerlerini aşmadığı görülmektedir.

Kazıklar taşıma kapasitesi açısından bakıldığında 15 m'de kazık uçları kum zemin içerisinde kil zeminlerdekine göre fazla taşıma gücü değerleri vermektedir. 15 m boyunda

60 cm çapındaki tekil kazıkların toplam taşıma kapasitesi 2409,5 kN olarak belirlenirken, 20–25 ve 30 m’de ortalama 1600 kN olarak belirlenmiştir. Bu durum kum zeminde tekil kazıkların 1,5 kat daha fazla taşıma gc ortaya koyduğunu göstermiştir. Ancak 15 m boyundaki kazıklarda ampirik yöntemler kullanılarak elle yapılan hesaplamalarda elde edilen oturma değerleri kabul edilebilir oturma değerlerini aştığı için kazık boyları artırılmıştır.

Sonuç olarak, kazık gruplarının oturma miktarlarının belirlenmesinde hem ampirik yöntemlerin hem de sayısal analiz yöntemlerinin dikkate alınması önemlidir. Ampirik yöntemlerde önerilen analizler ince taneli ve iri taneli zeminleri ayrı ayrı değerlendirmektedir. Ancak gerçekte bir zemin profilindeki tabakalanma ince ve iri taneli tabakaları bir arada karşımıza çıkarmaktadır. Bu nedenle çalışmadaki zemin profili ince ve iri taneli zemin tabakalarıyla oluşturulmuştur. Bu durum yapılan analizlerde tabakalı zemin kullanılmasını önemli bir rol oynamıştır. Depremlilerde oluşan oturma miktarları yapıların tasarım aşamasında sismik verilerden yararlanılması gerektiğini açıkça ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, mühendislik tasarımlarının dikkatlice değerlendirilmesi gerektiği ve kazık temellerin güvenliğini sağlamak için hem depremsiz hem de depremliler durumların göz önünde bulundurulmasını ortaya koymuştur. Yapılacak sonraki çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenen sonuçlar statik ve dinamik kazık yükleme (yatay yükleme) deneyleri ile desteklenmeli, teorik sonuçlarla birlikte değerlendirilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Aktaş G, 2006, Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi Hakkında Bir İnceleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 140s, İstanbul
- Al Ghanim A A, Shafiqu Q S M, Ibraheem A T, 2019, Finite element analysis of the geogrid-pile foundation system under earthquake loading, Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 22(3), 202-207.
- Azzam, W R, 2015, Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading, HBRC J 11 (2): 231–239.
- Ayhan Ö, 2016, Seçilen Bir Sahada Taş Kolon ve Fore Kazık ile Yapılan İyileştirmenin Karşılaştırılması, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, 89s, Kocaeli.
- Bowles J E, 1996, Foundation Analysis and Design, Mc Graw Hill Companies, USA
- Briaud J L, Garland E, 1985, Loading rate method for pile response in clay, Journal of Geotechnical Engineering, 111(3), 319-335.
- Broms B B, 1965, Design of laterally loaded piles, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 91(3), 79-99.
- Çevik İ A, 2005, Aşırı Konsolide Killerdeki Kazık Davranışlarının Arazi Ölçümleri ve Numerik Analizlerle Karşılaştırılması, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, Eskişehir
- Çimen Ö, Osmanoglu U, 2021, Farklı Zemin Koşullarında Tasarlanan Kazıklı Radye Temel Sistemlerinin Oturma Tabanlı Optimizasyonu, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(4), 1436-1446.
- Çinicioğlu F, 2005, Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı, 19 Şubat 2005, İstanbul, 183-195.
- Coyle H M, Castello R R, 1981, New design correlations for piles in sand, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(7), 965-986.
- Das MB, 2007, Principles of Foundation Engineering, Global Engineering Publishing Company, Seventh Edition Stamford USA.

- Davisson M T, Gill H L, 1963, Laterally loaded piles in a layered soil system, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 89(3), 63-94.
- Gürsoy Ş, Durmuş A, 2002, Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21–22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Hansen C M, 1967, The three dimensional solubility parameter Danish Technical: Copenhagen, 14.
- Hothot M, 2021, Zeminde ve Kayada Kazık Taşıma Gücünün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmini, İstanbul Kültür Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, İstanbul.
- Jalali M M, Golmaei S H, Jalali M R, Borthwick A, Ahmadi M K Z, Moradi R, 2012, Using finite element method for pile-soil interface (through PLAXIS and ANSYS), Journal of Civil Engineering and Construction Technology, 3(10), 256-272.
- Kaçmaz M, 2022, Geoteknik Problemlerin Farklı Sonlu Elemanlar Programları İle Çözümlemesi: Örnek Bir Uygulama, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Batman.
- Matlock H, & Reese L C, 1960, Generalized solutions for laterally loaded piles, Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, 86(5), 63-92.
- Meyerhof G G, 1956, Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 82(1), 866-1.
- Meyerhof G G, 1976, Bearing capacity and settlement of pile foundations, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(3), 197-228.
- Nottingham L, Schmertmann J, 1975, An investigation of pile capacity design procedures Final Report D, 629, 159.
- Toma, M A, 2017, Earthquake Response Analysis of Pile Supported Structures- Correspondence of PLAXIS 2D with Eurocode 8, Norwegian University of

Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, MSc Thesis, 140s Norwegian.

Turan E, Statik ve Dinamik Düşey Yükler Altındaki Kazıklı Temellerin Davranışı, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 171s, Eskişehir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, 30364.

Uzuner B A, 2007, Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, 560s, Trabzon.

Vesic A S, 1970, Tests on instrumented piles, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96(2), 561-584 Ogeechee River.

Vesić A S, 1973, Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the soil mechanics and foundations division, 99(1), 45-73.

Vesic AS, 1977, Design of Pile Foundations, Washington, DC, United States.

Vesić, A B, 1961, Bending of beams resting on isotropic elastic solid, Journal of the Engineering Mechanics Division, 87(2), 35-53.

Yazıcı A G, 2013, Kazıklar Arası Mesafenin Kazıklı Radye Temel Sisteminde Etkisinin İki ve Üç Boyutlu Analizi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, 92s, Niğde.

Yeğit M, 2017, Farklı Çapta, Derinlikte ve Sayıdaki Kazıkların Grup Davranışı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Afyonkarahisar.

Zencir Y, 2019, Sonlu Elemanlar Yönteminde Destekli Kazı Teknikleri Uygulaması: Vaka Analizi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Bilecik.

Zhang L, Goh S H, Liu H, 2017, Seismic response of pile-raft-clay system subjected to a long-duration earthquake: centrifuge test and finite element analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92, 488-502.

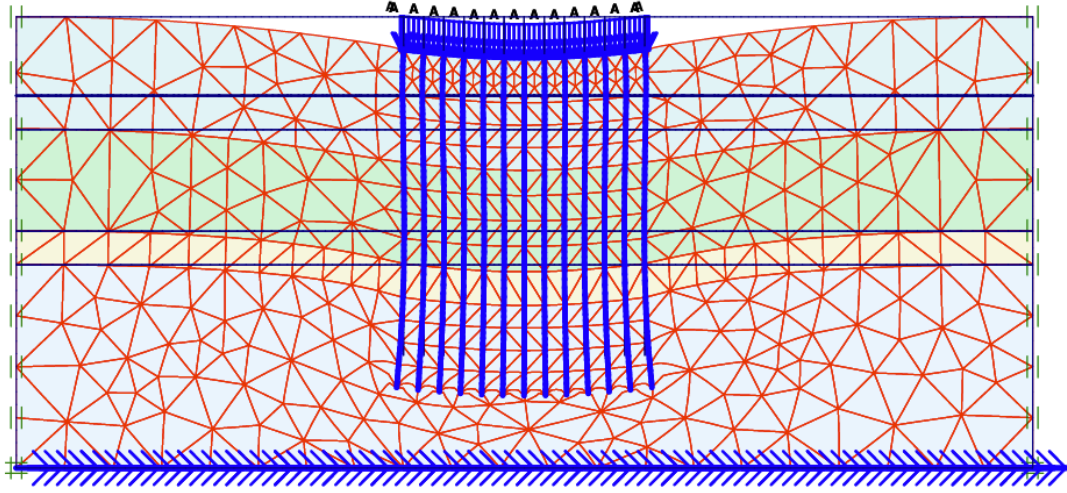
İnternet Kaynakları

- 1- <https://insapedia.com/kazik-temeller-kullanım-alanları-ve-kazik-temel-cesitleri/>, 15.06.2024
- 2- <http://www.egezemin.com/prekast-cakma-kazik>, 15.06.2024
- 3- <https://www.turkuazzemin.com.tr/kuzey-marmara-otoyolu-yaklasim-viyadukleri-fore-kazik-isleri-a23>, 16.06.2024



EKLER

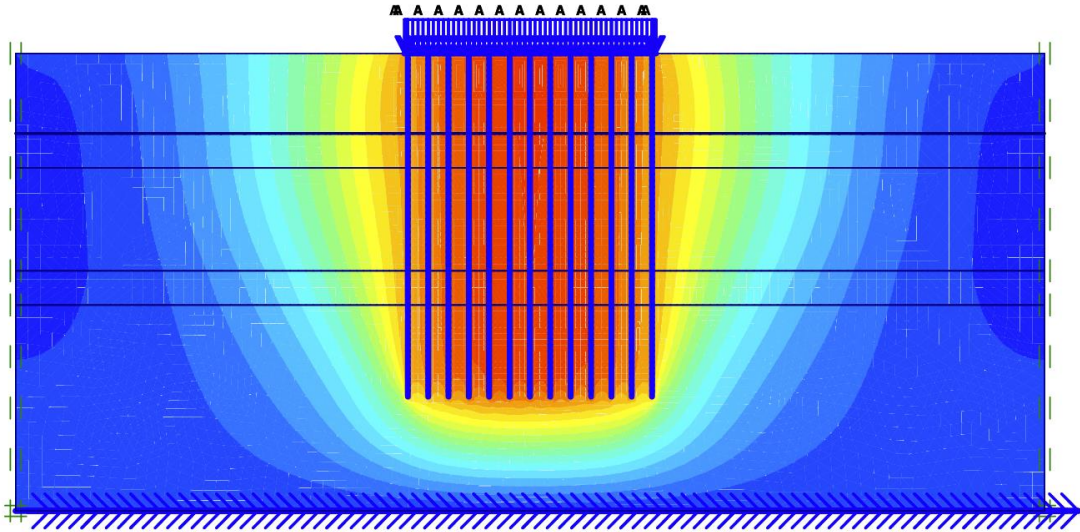
EK 1. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin deforme olmuş ağı.



Deformed mesh

Extreme total displacement $36,29 \cdot 10^{-3}$ m
(displacements scaled up 100,00 times)

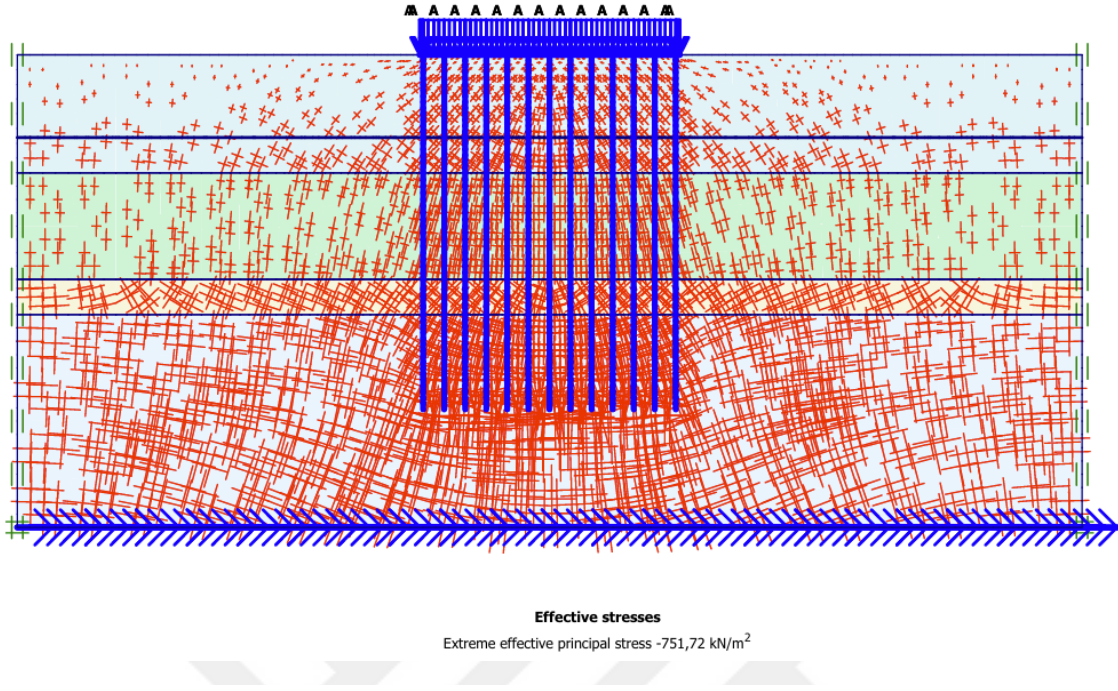
EK 2. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin düşey yer değiştirmesi.



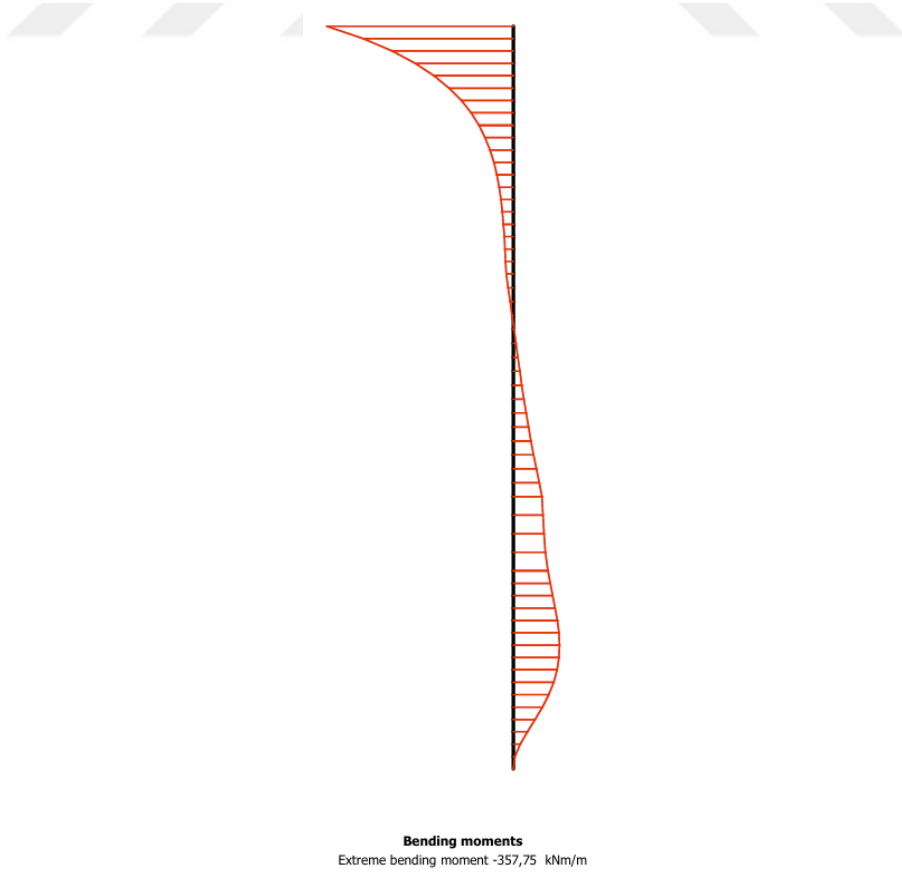
Vertical displacements (Uy)

Extreme Uy $-36,29 \cdot 10^{-3}$ m

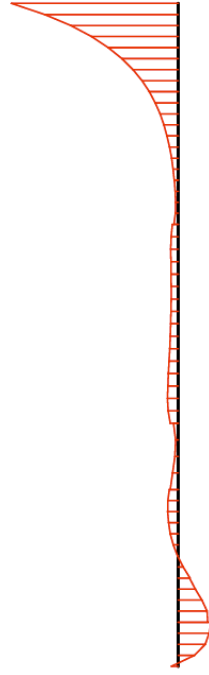
EK 3. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin efektif gerilmeleri.



EK 4. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin en kritik kazığının eğilme momenti.



EK 5. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin en kritik kazığının kesme kuvveti.



Shear forces
Extreme in plane shear force 154,33 kN/m

EK 6. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin en kritik kazığının normal kuvveti.



Axial forces
Extreme axial force -621,13 kN/m

EK 7. 60 cm'lik 30 m uzunluğundaki kazık sisteminin temel tabanındaki yerleşim planı.

