



T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAZIKLAR ARASI MESAFENİN KAZIKLI RADYE TEMEL SİSTEMİNDE
ETKİSİNİN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

AHMET GÜRKAN YAZICI

Eylül 2013

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAZIKLAR ARASI MESAFENİN KAZIKLI RADYE TEMEL SİSTEMİNDE
ETKİSİNİN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

AHMET GÜRKAN YAZICI

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA

Eylül 2013

Ahmet Gürkan YAZICI tarafından **Doç.Dr. Osman SİVRİKAYA** danışmanlığında hazırlanan **“Kazıklar arası mesafenin kazıklı radye temel sisteminde etkisinin iki ve üç boyutlu analizi”** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Osman SİVRİKAYA

(Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Ersin AYDIN

(Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Emre ÇEÇEN

(Fatih Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

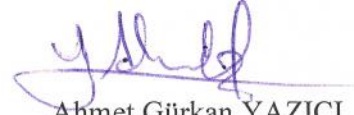
...../...../2013

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Ahmet Gürkan YAZICI

ÖZET

KAZIKLAR ARASI MESAFENİN KAZIKLI RADYE TEMEL SİSTEMİNDE ETKİSİNİN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

YAZICI, Ahmet Gürkan

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA

Eylül 2013, 75 sayfa

Temel zeminlerinin problemlili olması halinde, en genel çözüm derin temel (kazıklı temel) seçilerek yapı temellerinin tasarlanmasıdır. Bazı hallerde yüzeysel temel taşıma gücü açısından yeterlidir fakat oturmaları kabul edilebilir değerleri aşabilir. Bu şartlarda, yüzeysel temelin altında kazıklar oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanılmaktadır. “Kazıklı radye temel” olarak adlandırılan bu sistemler, kazıklı temellere göre daha ekonomik bir çözümdür. Kazıklı radye temellerin tasarımında dikkate alınması gereken önemli etkenlerden birisi de kazıklar arası aks mesafesinin seçimidir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli killi bir zemin üzerine kazıklı radye temel, sonlu elemanlar paket programı Plaxis 3D Foundation ve Plaxis 2D ile modellenmiş, kazık aks aralığına göre oluşturulan modellerin analiz sonuçları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Genel eğilim olarak iki ve üç boyutlu analizlerde, kazıklar arası mesafenin (s/D) artmasıyla oturma, kayma deformasyonu ve hacimsel deformasyonda azalma meydana gelmişken, bir eşik değer olarak $s \geq 6D$ olması halinde adı geçen büyüklüklerde belirgin bir değişim meydana gelmediği (sabit kaldığı) ya da yavaş azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Kazıklı radye temeller, kazık aralığı, sonlu elemanlar yöntemi, plaxis, drenajsız analiz

SUMMARY

TWO AND THREE-DIMENSIONAL ANALYSES OF THE EFFECT OF THE PILE SPACINGS IN PILED RAFT FOUNDATION SYSTEMS

YAZICI, Ahmet Gürkan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman SIVRIKAYA

September 2013, 75 pages

If the foundation soil has problems, the general solution is the design of the structure foundations by selecting the deep foundation (pile foundation). In some cases, shallow foundations are enough in terms of bearing capacity but their settlements may be over the acceptable values. In these conditions, the piles under the shallow foundations are used as settlement-reducer elements. Named as “Piled Raft Foundations”, these systems are more economical solutions than pile foundations. One of the important factors which have to be considered in the design of piled raft foundations is the selection of the axis space between the piles. In this study, piled raft foundation with different pile spacings on a high-plasticity clay soil were modelled by the Plaxis 3D Foundation and Plaxis 2D software packages based on finite element method. The results of the models made based on different pile spacings were compared and interpreted. As a general trend in accordance with the results of two-and three-dimensional analyses, the total displacements, shear strains and volumetric strains decreases as pile spacings (s/D) increase. In case of $s \geq 6D$ as a threshold value there is not a significant change in the aforementioned quantities (they remain constant) or decrease slightly.

Keywords: Piled raft foundations, pile spacing, finite element method, plaxis, undrained analysis

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, kazıklı radye temellerin davranışında etken olan kazıklar arası mesafenin, kohezyonlu zeminlerde davranışı drenajsız şartlarda ele alınarak, sonlu elemanlar yöntemiyle iki ve üç boyutlu analizlerle düşey deplasman, kayma deformasyonu ve hacimsel deformasyon davranışları incelenmiştir. Kazıkları arası mesafe arttıkça, genel olarak iki ve üç boyutlu analizlerde düşey deplasman, kayma deformasyonu ve hacimsel deformasyon değerlerinde azalmakla birlikte, $s \geq 6D$ durumunda ise değerler sabit yada az miktarda azalmalar meydana gelmiştir.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde her türlü imkanı sağlayan, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya, ayrıca sonlu elemanlar programının sağlanmasında ve yapılan modellerin analizleri boyunca ihtiyaç duyduğum her an yardımını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Emre ÇEÇEN hocama çok teşekkür ederim.

Her türlü maddi ve manevi desteği veren aileme de en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II DÜŞEY YÜKLER ALTINDA	
TEKİL KAZIKLARIN DAVRANIŞI ve TASARIMI	3
2.1 Kazıklı Temelerde Taşıma Gücü	3
2.1.1 Statik formüller	3
2.1.2 Dinamik formüller	7
2.1.3 Arazi deneylerinden elde edilen bağıntılar	9
2.2 Tekil Kazıklarda Oturma	10
BÖLÜM III DÜŞEY YÜKLER ALTINDA	
KAZIK GRUPLARININ DAVRANIŞI ve TASARIMI	14
3.1 Kazık Grupları	14
3.1.1 Kazık gruplarının taşıma gücü	15
3.1.2 Kazık gruplarının oturması	17
BÖLÜM IV KAZIKLI RADYE TEMELLER ÜZERİNE	
YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	21
4.1 Kazıklı Radye Temellerin Kullanım Alanları	22
4.2 Kazıklı Radye Temellerin Uygulama Örnekleri	23
4.3 Kazıklı Radye Temeller Üzerindeki Model Çalışmaları	24
4.4 Kazıklı Radye Temellerin Analizleri	25
BÖLÜM V SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ ve PLAXIS	33
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	33
5.2 Plaxis 2D ve 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı	34

BÖLÜM VI YAPILAN PARAMETRİK ÇALIŞMA: MODELLEME ve	
ANALİZLER	39
6.1 Materyal ve Metod.....	39
6.2 Malzeme Özellikleri	40
6.3 Hesap Aşaması.....	42
6.3.1 Kazıklı radye temelin iki (2D) boyutlu modellenmesi	42
6.3.2 Kazıklı radye temelin üç (3D) boyutlu modellenmesi	43
6.4 Kazıklı Radye Temelin İki (2D) Boyutlu Analizleri	44
6.5 Kazıklı Radye Temelin Üç (3D) Boyutlu Analizleri	52
6.6 İki (2D) ve Üç Boyutlu (3D) Analizlerin Karşılaştırılması	63
BÖLÜM VII SONUÇLAR ve ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR	68
ÖZ GEÇMİŞ	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Değişik K Değerleri.....	6
Çizelge 2.2. E değerleri.....	9
Çizelge 2.3. n Değerleri	9
Çizelge 2.4. C_p Değerinin Değişimi.....	12
Çizelge 3.1. Grup Verimi (η) Tahmini Öneriler	16
Çizelge 6.1. Analizlerde Kullanılan Zeminin Malzeme Parametreleri.....	40
Çizelge 6.1. Analizlerde Kullanılan Yapısal Elemanların Malzeme Parametreleri	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Uç Direncinin Homojen Zeminde Derinlikle Değişimi	5
Şekil 2.2. N_q ' nun İçsel Sürtünme Açısı ve Derinlikle Değişimi	5
Şekil 2.3. Dinamik Kazık Formülleri İçin Kullanılan Yaklaşım	8
Şekil 2.4. Kazıkların Yük Transfer Mekanizması	11
Şekil 2.5. a_s Faktörünün Değişimi	12
Şekil 3.1. Tipik Bir Kazık Grubunun Plan ve Kesiti	14
Şekil 3.2. Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Grubu Taşıma Kapasitesi	17
Şekil 3.3. Kazık Gruplarında Oluşan Gerilmenin Süperpozisyonu.....	18
Şekil 3.4. Kazık Etki Alanları, Grup Kazık Etki Alanı ve Tek Kazık Etki Alanı	19
Şekil 3.5. Kohezyonlu Zeminlerde Sürtünme Kazıklarında Oturma Hesabı için Gerilme Dağılımı.....	20
Şekil 4.1. Farklı Tasarım Yaklaşımlarına Göre Kazıklı Radye Temellerin Yük – Oturma Davranışı Eğrileri	22
Şekil 4.2. Kazıklı Radye Temel Katsayısı ile Kazıklı Radyenin Oturması / Radyenin Oturması Arasındaki Bağlantı Örneği.....	23
Şekil 4.3. Kazıklı Radye Temellerin Basitleştirilmiş Yük – Oturma Grafiği.....	25
Şekil 4.4. Kazıklı Radye Temel Tasarımı için Burland Yaklaşımı	27
Şekil 4.5. Eşdeğer Ayak (kazık) Yöntemi	28
Şekil 4.6. Kazıklarda Gerilme Aktarımları	28
Şekil 5.1. Plaxis 3D Foundation Yazılımında Kullanılan Sonlu Elemanlar	36
Şekil 5.2. Zeminde Mohr - Coulomb Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Modeli	36
Şekil 5.3. Üç Eksenli Basınç Deneyinden Elde Edilen Elastisite Modülü E_{50} 'nin Belirlenmesi	37
Şekil 6.1. Sonlu Elemanlar Model profilleri	40
Şekil 6.2 Plaxis 2D Ağ Oluşturma.....	42
Şekil 6.3. Plaxis 3D Foundation Programı ile oluşturulan iki Boyutlu Sonlu Eleman Ağı.....	43
Şekil 6.4. Plaxis 3D Foundation Programı ile oluşturulan üç Boyutlu Sonlu Eleman Ağı... ..	44
Şekil 6.5. s=2D için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	45

Şekil 6.6. $s=2D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	45
Şekil 6.7. $s=2D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	46
Şekil 6.8. $s=3D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	46
Şekil 6.9. $s=3D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	47
Şekil 6.10. $s=3D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	47
Şekil 6.11. $s=4D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	48
Şekil 6.12. $s=4D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	48
Şekil 6.13. $s=4D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	49
Şekil 6.14. $s=6D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	49
Şekil 6.15. $s=6D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	50
Şekil 6.16. $s=6D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	50
Şekil 6.17. $s=8D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	51
Şekil 6.18. $s=8D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	51
Şekil 6.19. $s=8D$ için Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	52
Şekil 6.20. $s=2D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	53
Şekil 6.21. $s=2D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman Kesiti ...	53
Şekil 6.22. $s=2D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	54
Şekil 6.23. $s=2D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	54
Şekil 6.24. $s=3D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	55
Şekil 6.25. $s=3D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman Kesiti ...	55
Şekil 6.26. $s=3D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	56
Şekil 6.27. $s=3D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	56
Şekil 6.28. $s=4D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	57
Şekil 6.29. $s=4D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman Kesiti ...	57
Şekil 6.30. $s=4D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	58
Şekil 6.31. $s=4D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	58
Şekil 6.32. $s=6D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	59
Şekil 6.33. $s=6D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman Kesiti ...	59
Şekil 6.34. $s=6D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	60
Şekil 6.35. $s=6D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	60
Şekil 6.36. $s=8D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman	61
Şekil 6.37. $s=8D$ için 3×3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Düşey Deplasman Kesiti ...	61

Şekil 6.38. $s=8D$ için 3x3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Hacimsel Deformasyon	62
Şekil 6.39. $s=8D$ için 3x3 Kazıklı Radye Temelde Oluşan Kayma Deformasyonu	62
Şekil 6.40. Kazıklı Sistemde Aks Mesafesine Bağlı Oluşan Oturma Grafiği	63
Şekil 6.41. Kazıklı Sistemde Aks Mesafesine Bağlı Oluşan Kayma Deformasyonu Grafiği.....	64
Şekil 6.42. Kazıklı Sistemde Aks Mesafesine Bağlı Oluşan Hacimsel Deformasyon Grafiği	64

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A_p	Kazığın uç alanı
A_s	Kazık çevre alanı
$\bar{b}$	Dış kazıklar arası aks mesafesi
C	Kohezyon
c_a	Birim adezyon
C_s	Kazık ortuma hesabı ampirik katsayısı
c_u	Drenajsız kayma mukavemeti
D	Kazık çapı
D_f	Temel kalınlığı
E	Elastisite modülü
E_{oed}	Rijitlik modülü
E_p	Kazık elastisitesi
E_{ur}	Boşaltma - yeniden yükleme elastisite modülü
f_s	Kazık sürtünme gücü
G	Kayma modülü
I_p	Plastik limit indisi
K	Yatak katsayısı
K_0	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
k_k	Kazık rijitliği
k_{kr}	Kazıklı radye rijitliği
k_r	Radye rijitliği
k_{rt}	Radye temelin rijitliği
L	Kazık boyu
L_e	Dönemsel derinlik değişimi
N	Kazık sayısı
N_c, N_q, N_γ	Terzaghi taşıma gücü katsayıları
$\check{N}_{eor}$	Kazık ucu seviyesindeki ortalama SPT-N değeri
P	Kazık çevre uzunluğu
P_k	Kazığa gelen yük

P_{kr}	Kazıklı radyeye gelen yük
P_r	Radyeye gelen yük
s	Kazıklar arası aks mesafesi
S_p	Kazık ucu oturması
S_{ps}	Kazık gövdesi boyunca taşınan yükten dolayı oluşan oturma
S_s	Kazık elastik oturması
S_t	Kazık toplam oturması
q_c	Koni penetrasyon deneyi uç direnci
q_u	Nihai taşıma gücü
Q_d	Kazık toplam taşıma gücü
Q_{din}	Zeminin kazık çakılmasına karşı dinamik direnci
Q_{fa}	Kazık gövdesi tarafından taşınan yük
Q_g	Kazık grup taşıma gücü
Q_p	Kazık uç direnci
Q_{pa}	Servis yükü altında kazık ucu tarafından taşınan yük
Q_s	Kazık sürtünme direnci
Q_{tekil}	Tek kazık taşıma gücü
Q_u	Kazığa uygulanan yük
w	Kazık ağırlığı
σ_v'	Kazık ucu jeolojik yük
ϕ	Zemin kazık arası sürtünme açısı
σ	Kazık gerilmesi boyunca ortalama yanal efektif gerilme
ΔE	Enerji kaybı
α	Ampirik adezyon katsayısı
α_{kr}	Kazıklı radye katsayısı
α_s	Kazık sürtünme katsayısı
γ	Zemin birim hacim ağırlığı
$\emptyset$	İçsel sürtünme açısı
ν	Poisson oranı
η	Kazık grup verimlilik katsayısı

Kısaltmalar**Açıklama**

SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
MPT	Menard Presiyometre Deneyi

BÖLÜM I

GİRİŞ

Mühendislik çözümlerinde güvenliğin yanında ekonomik tasarımlar yapmak da büyük önem taşımaktadır. Özetle üst yapıdan gelen yükün fazla olduğu yapılarda, maliyetin çok yüksek olması, temel sisteminin tasarımında güvenliğin yanı sıra optimum çözüm geliştirmeyi de beraberinde getirir. Radye temel tabanında oluşan basıncın, sistem toplam taşıma kapasitesine katkıda bulunduğu kazıklı radye temel sistemleri bu bağlamda önemli rol almıştır. Buna bağlı olarak kazık, radye ve zeminin birbiriyle etkileşimin göz önüne alındığı kazıklı radye temel sistemleri, yapıların tasarımında önemli rol almaktadır. Kazıklı radye temeller, farklı oturumların önlenmesinde büyük katkı sağlamaktadır.

Kazıklı radye temelin tasarımındaki en büyük belirsizlik, yukarıda da belirtildiği gibi, radye temel, zemin ve kazık grubunun birbiri ile etkileşiminin modellenmesi aşamasında yaşanmaktadır. Bu sebepten dolayı, bu sistemlerin gerçeğe yakın olarak modellenmesi için sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal çözüme dayalı yöntemler tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle tekil kazıklar ve kazık gruplarında, kazık elemanlarının taşıma gücü ve oturma hesaplarından bahsedilmiş olup, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki durumları araştırılmıştır. Daha önceden kazıklı radye temeller üzerine yapılmış çalışmalardan, kazıklı radye kullanım alanları, kazıklı radye uygulama örnekleri ve kazıklı radye üzerinde yapılmış uygulama örneklerine yer verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, kazık aralıklarının yüksek plastisiteli killi bir zemin üzerine kazıklı radye temel ele alınmış olup bu çalışmada, iki ve üç boyutlu analizler yapılarak kazık aralığının etkisi incelenmiştir.

Bölüm 2' de tekil kazıkların taşıma gücü, oturmasından, tasarımı aşamasında kullanılan yöntemler ve yapılan yaklaşımlar incelenmiştir.

Bölüm 3' te grup kazıkları ve grup kazıkları davranışı, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde taşıma gücüne değinilmiştir.

Bölüm 4' te kazıklı radye üzerine yapılmış çalışmalar, uygulama örnekleri, model çalışmaları ve analiz yöntemleri incelenmiştir.

Bölüm 5' te kazık radye temel davranışının incelenmesinde kullanılacak sonlu elemanlar yöntemine değinilmiş analizlerde kullanılan PLAXIS sonlu elemanlar yazılımı tanıtılmıştır.

Bölüm 6' da kazıklı radye temel sisteminin iki (2D) ve üç (3D) boyutlu olarak programda modellenmesi ve kazık aks aralığına bağlı (düşey deplasman, kayma deformasyonu, hacimsel deformasyon) analizleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Bölüm 7, kazıklı radye temelin kazık aks aralığına bağlı analizlerin sonuçları ve önerileri içermektedir.

BÖLÜM II

DÜŞEY YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIKLARIN DAVRANIŞI VE TASARIMI

Bir kazığın taşıma gücünü kazık- zemin etkileşimi yönünden belirleyen başlıca iki etken, kazığı çevreleyen zeminin taşıma gücünü oluşturan mekanik özellikleri ile kazığın yapıldığı malzemenin dayanımını oluşturan mekanik özellikleridir. Bu iki özellik kullanılarak kazık ve zemin ayrı ayrı değerlendirilir ve her ikisinin de uygulanan yük altında sağlam kalacakları kanıtlanır. Tasarım aşamasında öncelikle uygulanan yükün kazığın yapıldığı malzemeye bağlı olan toplam kesit direncini aşmamasına özen gösterilir. Zemin dayanımı yönünden kazıkların taşıma gücü, önce teorik veya ampirik formüllerle bulunur. Formüller, kazık zemin etkileşiminin statik dengesini yansıtan veya çakma kazıklarda kazığı çakmak için harcanan enerji ve/veya yapılan işi esas alan bağlantılardır.

2.1 Kazıklı Temellerde Taşıma Gücü

Kazık kapasitesi hesaplarında farklı metotlardan yararlanılmaktadır. Bunlar, zeminin mukavemetine dayalı statik analizler, arazi deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı ampirik çözümler, dinamik çakma direncinden elde edilen çözümler ve kazık yükleme deneyleridir (Prakash ve Sharma, 1990). Ancak zeminler farklı davranışlar gösterdikleri için kohezyonlu ve kohezyonsuz olarak taşıma gücünü incelemekte fayda bulunmaktadır.

2.1.1 Statik formüller

Üst yapıdan gelen bir kısmı uç direnci tarafından karşılanırken diğer kısmı sürtünme direnci tarafından karşılanmaktadır. Buradan yola çıkarak tekil kazık sistemin taşıma gücü;

$$Q_d = Q_p + Q_s - W \quad (2.1)$$

Burada Q_d kazığın toplam taşıma gücünü, Q_p uç direncini, Q_s sürtünme direncini, W kazık ağırlığını ifade etmektedir. Pratikte kazık ağırlığı kıyı ve liman yapıları gibi

kazığın zeminin dışında imal edildiği yapılar dışında ihmal edilmektedir (Thomlinson, 2004).

Denklemleri elde etmek için kullanılan formüller uç direnci (Q_p) için;

$$Q_p = A_p \left[cN_c + \frac{1}{2} \gamma D N_\gamma + \gamma L N_q \right] \quad (2.2)$$

Burada A_p ; kazığın uç alanı, c ; kazık ucunun temas ettiği zemin kohezyonu, γ ; zeminin birim hacim ağırlığı, N_c , N_γ , N_q ; taşıma gücü parametreleri, D ; kazık çapı, L ; kazığın zemine gömülü olan uzunluğu olmaktadır.

Çevre sürtünmesi (Q_s) için;

$$Q_s = p \sum \Delta L * f_s \quad (2.3)$$

Burada p ; kazık kesitinin çevre uzunluğu, ΔL ; f_s ve p değerinin sabit kaldığı uzunluk ve f_s ; ΔL uzunluğu boyunca sabit alınan birim gövde sürtünmesi olmaktadır.

Kohezyonsuz zeminler: Kohezyonsuz zeminlerde $c=0$ olduğundan ve 2. terim kazık çapının uzunluğa nispeten küçük değer almasından dolayı 3. terime göre çok küçük olduğundan uç direnci (Q_p) formülü aşağıdaki gibi yazılır.

$$Q_p = A_p * \gamma * L * N_q - W \quad (2.4)$$

Kazık yapımında kullanılan malzemenin ağırlığı yaklaşık olarak zemin ağırlığına eşit olduğundan,

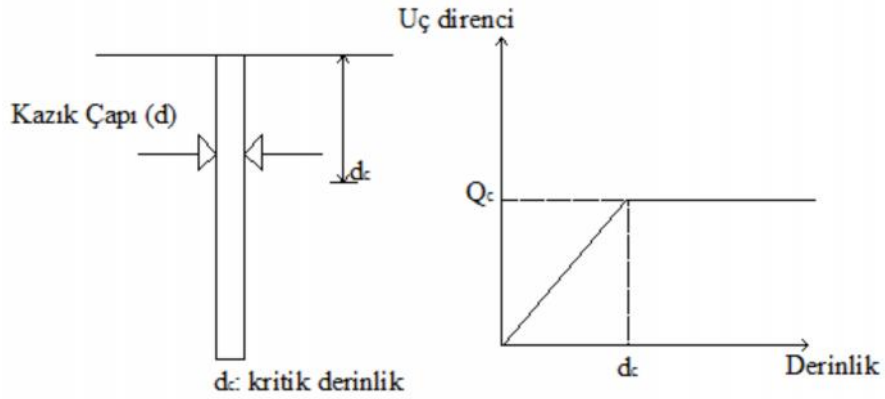
$$W = D_f * \gamma * A_p \quad (2.5)$$

$$Q_p = A_p * \gamma * L * (N_q - 1) \quad (2.6)$$

olarak kabul edilebilir. Ancak N_q değerleri pratikte her zaman 20 ve üzerinde değerler aldığı için bu denklemde ($N_q - 1$) yerine N_q kullanılabilir (Kumbasar ve Kip, 1999). Aynı denklem efektif gerilme cinsinden de yazılabilir. Bu denklemde σ_v' kazık ucundaki jeolojik yüküdür.

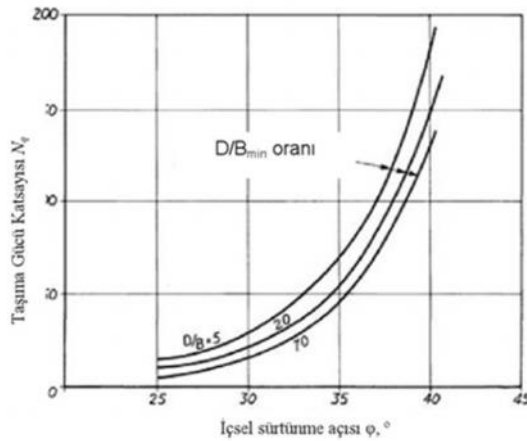
$$Q_p = A_p \cdot \sigma_v' \cdot N_q \quad (2.7)$$

Meyerhorf (1976)' un geliştirdiği Rajapakse (2008) incelemesinden sonra kazıkta uç direnci ve çevre sürtünmesi belirli bir derinliğe kadar artar daha sonra sabit kalır. Coyle ve Castello (1981) tarafından kumlu zeminde gerçekleştirilen ve L/D oranı 2 ila 57 arasında gerçekleştirilen kazık yükleme testlerinde kritik derinliğin kazık çapının yaklaşık olarak 20 katı civarı olduğu belirlenmiştir (şekil 2.1).



şekil 2.1. Uç direncinin homojen zeminde derinlikle değişimi (Coyle ve Castello, 1981)

Kazık taşıma gücünün hesabında kullanılan N_q değeri D_f/B oranına, taşıyıcı tabakanın içsel sürtünme açısına ve kazığın yerleştirilme şekline bağlıdır (şekil 2.2).



şekil 2.2. N_q 'nın içsel sürtünme açısı ve derinlikle değişimi (Tomlinson, 2004)

Denklem (2.3)' de verilen sürtünme direnci (Q_s) formülü içerisinde yer alan birim gövde sürtünmesi temel kayma mukavemeti denkleminde faydalanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_s = c_a + \sigma_h' \cdot \tan \delta \quad (2.8)$$

Bu denklemde , c_a : birim adezyon, δ : zemin ve kazık arasındaki sürtünme açısı σ_h' : kazık gövdesi boyunca ortalama yanal efektif gerilmeyi ifade etmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde adezyon olmaması sebebiyle birim gövde sürtünmesi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$f_s = \sigma_h' \cdot \tan \delta \quad (2.9)$$

Bu formül düşey gerilme cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_s = K \cdot \sigma_{vi}' \cdot \tan \delta \quad (2.10)$$

Burada K toprak basıncı katsayısı, σ_{vi}' ise 1 derinliği boyunca etkiyen düşey gerilmedir. (2.9) ve (2.10) denklemlerinden $K = \sigma_{vi}' / \sigma_{vh}'$ olduğu kolayca görülebilmektedir. Pratikte, K değeri elde edilmesi çok güç bir parametre olmakla beraber, genelde kazığın yerleştirilme şekline ve yerleştirilme sırasında deplase olan toprak miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 2.1. Kohezyonsuz zeminlerde değişik K değerleri (Meyerhorf, 1976)

Kazık Tipi	K değeri
Fore Kazık	0.5
H profil çakma kazık	0.5–1.0
Çakma kazık (küçük deplasman oluşturan)	0.75–1.25
Çakma kazık (büyük deplasman oluşturan)	1.0–2.0

Kohezyonlu zeminler: Kohezyonlu zeminlerde, özellikle killerde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, zemindeki kilin zamana bağlı oturma sonucu kayma mukavemetinin zamanla artacağıdır. Bu nedenle kısa dönem bazında $\phi = 0$ durumuna göre hesap yapılır (Prakash ve Sharma, 1990).

$$Q_p = A_p [cN_c + \gamma L N_q] \quad (2.11)$$

Kazığın ağırlığı çıkartılırsa, aynı denklem aşağıdaki şekle dönüşür:

$$Q_p = A_p [cN_c + \gamma L N_q] - \gamma L A_p \quad (2.12)$$

Kohezyonlu zeminlerde $\phi = 0$ ve buna göre $N_q = 1$ olduğundan, kohezyonlu zeminlerde kazık uç direncinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıdan yararlanılır.

$$Q_p = A_p c N_c \quad (2.13)$$

Sürtünme direnci (Q_s) ise denklem (2.8) yardımıyla hesaplanır. Ancak bu denklem $\phi = 0$ ve dolayısıyla $\delta = 0$ koşulu için aşağıdaki şekilde yazılır.

$$f_s = c_a = \alpha \cdot c_u \quad (2.14)$$

$$Q_s = f_s \cdot A_s = \alpha \cdot c_u \cdot A_s \quad (2.15)$$

α : Ampirik adezyon katsayısı

c_u : Drenajsız kayma mukavemeti

A_s : Kazık çevre alanı

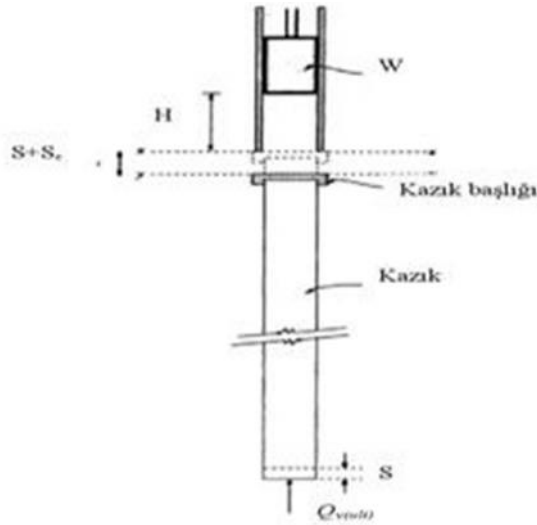
2.1.2 Dinamik formüller

Kazık taşıma gücü için iki temel yöntem bulunur. Bunlar kazık çakma formülleri ve dalga denklemleridir. Bu yöntemde de kazığın zemine çakılması esnasında zeminin değişken profilinden ötürü her zaman istenilen derinliğe inilemeyebilir. Bu durumda kazığın penetrasyon boyunca taşıma gücünü bulmak ya da belirlenmiş derinlikte istenilen taşıma gücüne erişip erişmediği kontrol edilir (Das, 1999). Dinamik formül verileri statik formüllere göre farklı ve güvensizdir. Örneğin kum ve çakıllı bir zeminde dinamik ve statik formül verileri çok yakın iken killi ve siltli zeminin sertliğine göre statik yöntemler hesaplanan taşıma gücü çok farklı olabilir.

Dinamik kazık formülleri kazık başlığına W ağırlığında ve H yüksekliğinde düşen bir tokmağın sağladığı enerji sayesinde kazık ucunun S kadar zemin içerisinde hareketi ve enerjinin korunumu yasasına dayanır (Şekil 2.3). Buna göre ana bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W.H = Q_{din}.S + \Delta E \quad (2.16)$$

Bu denklemde Q_{din} zeminin kazık çakılmasına karşı dinamik direncini, ΔE ise enerji kayıplarını temsil etmektedir. Enerji kayıpları sesi, gürültüyü, kazık başlığının elastik sıkışması S_e ve zeminin yanal sıkışmasını ve diğer enerji kayıplarını kapsar. En sık kullanılan dinamik bağıntı olan Engineering News bağıntısı aşağıda verilmiştir. Pratikte kullanılan dinamik kazık bağıntıları arasındaki temel fark enerji kayıplarının sembolize edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.3. Dinamik kazık formülleri için kullanılan yaklaşım (Prakash ve Sharma,1990)

Engineering News Bağıntısı:

$$Q_{din} = \frac{W*H}{S+C} \quad (2.17)$$

Bu formül esas olarak kazık çakma işlemi sırasında enerji kaybının 0 olması halinde kazığın zeminde C uzunluğu kadar ilave bir ilerleme kaydedeceği varsayımına dayanmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990). Bu formülde izin verilebilir taşıma gücünün bulunması için kullanılacak güvenlik katsayısı 6 olarak verilmektedir. Engineering News tarafından dinamik kazık formülleri yıllar boyunca revize edilmiş ve enerji kayıplarının optimum şekilde yansıtılmasına çalışılmıştır. Bu formülün en son revize edilmiş hali aşağıdaki gibidir (Das, 1999). E terimi tokmak verimlilik katsayısını ve n değeri tokmak ile kazık başlığı arasındaki çarpma sayısını simgelemekte olup bu

değerlerin değişik kazık ve tokmak tipleri için değişimi Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’de verilmiştir.

$$Q_{din} = \frac{E . W . H}{S + C} * \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \quad (2.18)$$

Çizelge 2.2. E değerleri (Bowles, 1997)

E	Kazık Tipi
0.75 – 1.0	Serbest düşmeli şahmerdan
0.75 – 0.85	Tek tesirli şahmerdan
0.85	Çift tesirli şahmerdan
0.85 – 1.0	Dizel motorlu şahmerdan

Çizelge 2.3. n değerleri (ASCE, 1941)

n	Kazık tipi
0.4-0.5	Demir tokmak ve başlıksız beton kazık
0.3-0.4	Çelik kazık ve ahşap yastık
0.25-0.3	Ahşap kazık

Dinamik kazık formüllerine örnek olarak Engineering News formülü haricinde Hiley formülü, Danimarka formülü, Brix formülü, Janbu formülü, Gates formülü Pacific Coast Uniform Building Code formülü verilebilir.

Dinamik formüllerin dezavantajı tüm yükün kazık uç direnci tarafından karşılandığı varsayımıdır. Ancak ince daneli zeminlerde çevre direncine bağlı olarak arttığından dinamik formüller bu zeminlerde güvenilir sonuçlar vermezler (Terzaghi ve Peck, 1968). Bu sebeple dinamik formül verileri arazi yükleme deneyi ya da statik formüllerle karşılaştırılmalıdır.

2.1.3 Arazi deneylerinden elde edilen bağıntılar

Kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş numune almanın zorluğu sebebiyle, zeminin kayma direnci ve dolayısıyla taşıma gücü arazi deneylerinden elde edilen verilerden ampirik formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir. Ancak bu kazık taşıma gücünü

hesaplamak için güvenilirliği en az yöntem olup, mutlaka diğer yöntemlerle desteklenmesi gerekir (Yalçın, 2010).

Standart penetrasyon deneyi (SPT): Meyerhof (1976), çakma kazıkların taşıma gücünün standart penetrasyon deneyi sonuçlarına göre aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabileceğini ileri sürmüştür. Uç direncinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$Q_p = 40 \bar{N}_{cor} L / D_f \leq 400 N_{cor} \text{ (kN)} \quad (2.19)$$

Bu bağıntıda N_{cor} kazık ucu seviyesindeki ortalama düzeltilmiş SPT-N değeridir. Kazığın zemine tamamen gömülü olduğu durumlarda $L = D_f$ olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

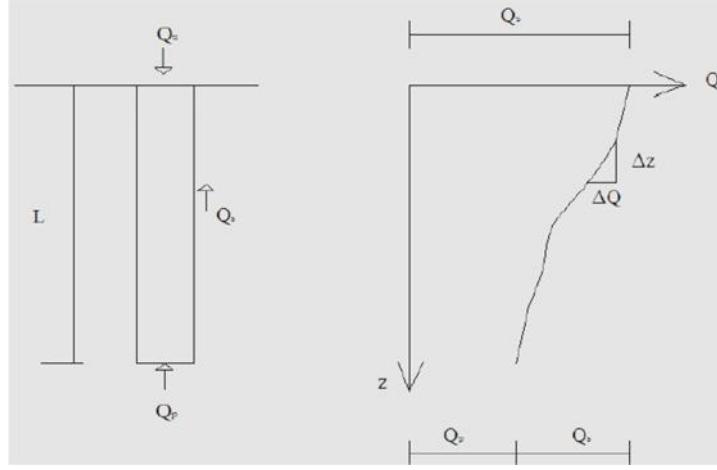
Koni penetrasyon deneyi (CPT): Statik koni penetrasyon deneyinde kullanılan konik penetrometre de bir tür model kazık olduğundan zemine kazık çakılması sırasındaki uç ve çevre direncini oldukça iyi bir şekilde simüle edebilecektir. Bu durumda Meyerhof (1976)' a göre, kazık uç direnci aşağıdaki formül yardımıyla belirlenebilir:

$$Q_p = A_p * q_c \quad (2.20)$$

Bu bağlantıda q_c koni penetrasyon deney verisi olan uç direncidir. SPT ve CPT dışında Menard Presiyometre deneyi (MPT) yöntemi de bulunmaktadır.

2.2 Tekil Kazıklarda Oturma

Kazıkların oturma analizlerinde kazığın etrafını saran zeminde oluşan gerilme dağılımı tam olarak bilinmemektedir. Kazığın zeminde aktardığı yükün uç ve gövde dirençleri arasında ki dağılımları bilinmediğinden ötürü, oturma karmaşık bir konu almıştır. Kazıkların yük transfer mekanizmasını anlamak için Şekil (2.4)' de gösterilen grafik incelenir ise kazığa uygulanan yük $Q = Q_u$ ise yükün derinlikle değişimi elde edilebilir. Kazıklarda uç ve sürtünme direnci arasındaki yük paylaşımı konusunda henüz aydınlığa kavuşmamış noktalar bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Kazıkların yük transfer mekanizması (Yalçın, 2010)

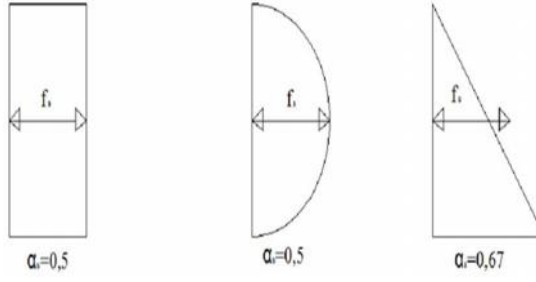
Kohezyonsuz zeminlerde tek kazıkta oturma: Kazıklarda oturmaların belirlenmesindeki zorluklar nedeni ile kazıkların oturması için sadece yaklaşık çözümler kullanılmaktadır. Bu noktada üç ana metot bulunur. Bunlar yarı ampirik metot, ampirik metot ve kazık yükleme deneyidir. Elastik oturma için kullanılan yarı ampirik yöntemde kazık oturması 3 bileşenden meydana gelir.

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (2.21)$$

Formülde S_t ; kazığın toplam oturması, S_s ; kazığın elastik oturması, S_p ; kazık ucunun oturması ve S_{ps} ; kazığın gövde boyunca taşınan yükten dolayı oturmasını teşkil eder. Bu terimlerin hesapları şu formüllerle yapılmaktadır;

$$S_s = (Q_{pa} + \alpha_s Q_{fa}) \frac{L}{A_p \cdot E_p} \quad (2.22)$$

Burada, Q_{pa} ; servis yükü altında kazık ucu tarafından taşınan yük, Q_{fa} ; kazık gövdesi tarafından taşınan yük, L ; kazık uzunluğu, A_p ; kesit alanı, E_p ; kazık elastisitesi ve α_s de kazık gövdesinin çevre sürtünmesinde bağlı bir katsayıdır. Bu katsayının değişimi Şekil (2.5)' de verilmiştir.



Şekil 2.5. a_s faktörünün değişimi (Vesic, 1977)

$$S_p = \frac{C_p \cdot Q_{pa}}{B \cdot q_p} \quad (2.23)$$

$$S_{ps} = \frac{C_s \cdot Q_{fa}}{D_f \cdot q_p} \quad (2.24)$$

Burada ise D ; kazık çapı, D_f ; kazık gömülü derinliği, q_p nihai uç direncini temsil etmektedir.

$$C_s: 0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{D_f}{B}} * C_p \quad (2.25)$$

C_p :ampirik katsayıdır.

Çizelge 2.4. C_p değerinin değişimi (Prakash ve Sharma, 1990)

<i>Zemin Cinsi</i>	<i>Çakma Kazıklar</i>	<i>Fore Kazıklar</i>
Sıkı-gevşek kum	0.02-0.04	0.09-0.18
Sert-yumuşak kil	0.02-0.03	0.03-0.06
Silt	0.03-0.05	0.09-0.12

Elastik oturma için önerilen ampirik yöntem, Vesic (1970) geliştirdiği formülde tekil kazığın basınç altındaki oturmasını;

$$S_t = \frac{D}{100} + \frac{Q_{va} \cdot L}{A_p \cdot E_p} \quad (2.26)$$

formülde; S_t : kazığın toplam oturması, Q_{va} : uygulanan kazık yükü, L : kazığın uzunluğu, D : kazık çapı, A_p : kazık kesitinin alanı, E_p : kazık elastisitesini gösterir. Kazık yükleme deneyi, tekil kazık oturmasını belirtmek için en ideal yöntem kazık yükleme testidir.

Kohezyonlu zeminlerde tek kazıkta oturma: Kohezyonlu zeminlerde tek kazığın oturma miktarı elastik oturma ve konsolidasyon oturması olarak meydana gelir ve toplam oturma bu iki bileşenin toplanması ile elde edilir.

Elastik oturma kohezyonlu zeminin elastik sıkışmasından kaynaklanır. Bu bileşen aşırı konsolide killerde aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak toplam oturmanın büyük bir kısmını oluşturur ve kohezyonsuz zeminlerdeki elastik oturma yöntemi ile aynı hesapları içerir. Konsolidasyon oturması ise kazık gurubunun konsolidasyon oturmasının hesaplanması ile aynıdır.

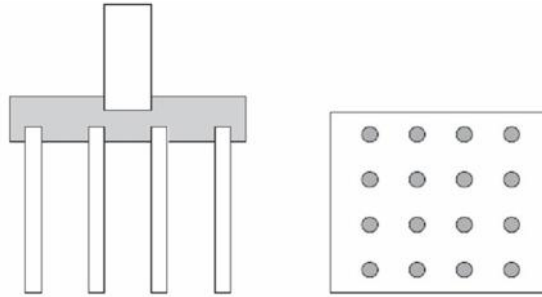
BÖLÜM III

DÜŞEY YÜKLER ALTINDA KAZIK GRUPLARININ DAVRANIŞI VE TASARIMI

Kazık grubunun taşıma gücü, kazıkların grup halinde davranışları düşünülerek hesaplanır. Zira, grup içindeki bir kazık ve çevre zemin, diğer kazıklardan iletilen gerilmelerin etki alanı içinde kalabilir. Bu problemin çözümü için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan biri sürtünme kazıklarında grup etkisini hesaplamak için kullanılan ampirik veya yarı ampirik formüllerdir. Bu formüller kazıklar arası etkileşim nedeni ile grup içindeki kazıkların taşıma güçlerinde meydana gelen azalmayı saptamak amacı ile geliştirilmişlerdir. η sayısı ile gösterilen grup verimi, kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplanması ile bulunan değerle çarpılarak grup taşıma gücü bulunur (Afacan, 2007).

3.1 Kazık Grupları

İnşaat sektöründe kazıklar genel olarak tek başlarına kullanılmazlar. Kazıklı temeller üst yapı yüklerini rahatlıkla zemine aktarması için grup olarak tasarlanmaktadır. Kazık başlığı da grupla yek pare oluşturularak kazıkların hepsini kapsamına alır (Şekil 3.1). Daha sonra hesap oluşan grup esasına göre yapılır.



Şekil 3.1. Tipik bir kazık grubunun plan ve kesiti (Rajapakse, 2008)

Sektörün literatüründe kazıkların ara mesafesinin çapın 3-7 katı olması halinde kazıkların grup olarak nitelendirilmesi gerekir. Minimum kazık arası mesafe çapın 3 katı kadar olmalıdır. Bunun sebebi kazıkların imalatını zorlaştırmamak ve kazıkların negatif etkisini azaltmaktır (Vesic, 1977). Bununla beraber pratikte bazı uygulamalarda imal edilen kazıkların merkezlerinin düşey yönde sapması sonucu uç seviyesinde

yakınlaştığı ve bu seviyede aşırı gerilme artışı olduğu gözlenmektedir. Sonuçta bu durum karşısında özellikle killi zeminde aşırı miktarda oturma olduğu gözlenir. Bu sebepten dolayı gerilme artışına neden olmamak için kazıklar arası mesafenin merkezden merkeze kazık çapının 3 katı veya 1 m olması gerektiği öngörülür (Tomlinson, 2004).

3.1.1 Kazık gruplarının taşıma gücü

Kazık gruplarında taşıma gücü hesabı, kazıkların grup halinde çalıştıkları kabulüyle yapılır. Grup içerisinde ki kazıklar diğer kazıkların sebep olduğu gerilmelerin tesir alanı içerisinde kalabilirler. Bu yüzden özellikle kohezyonlu zeminlerde kazık grubunun taşıma gücü, her bir kazığın taşıma gücü toplamına eşit olmayabilir. Kazık gruplarında ki taşıma gücünde meydana gelen azalmayı hesaplamak için ampirik ve yarı ampirik formüller geliştirilmiştir. Grup taşıma gücü kazıkların birer birer taşıma güçlerinin toplamı ile kazık grup verimliliği olarak adlandırılan ‘ η ’ kat sayısının çarpılması sonucu bulunur.

Kohezyonsuz zeminler de kazık gruplarının taşıma gücü: Kohezyonsuz zeminlerde grupta yer alan kazıkların altında meydana gelen gerilme zarflarının diğer kazıklarla olan etkileşimi az olduğu verimlilik katsayı (η) genel olarak 1 alınır. Bu nedenle pratik olarak tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamı kazık grubunun taşıma gücüne eşitlenir. Kazık grubunun taşıma kapasitesi ile ilgili olarak Vesic (1977)’ in önerdiği;

$$Q_G = N \cdot Q_{\text{tekil}} \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılır.

Q_G = Kazık grubunun taşıma gücü

Q_{tekil} = Tek kazığın taşıma gücü

N = Kazık sayısı

Kohezyonlu zeminler kazık gruplarının taşıma gücü: Kohezyonlu zeminlerde genel olarak kazıkların taşıma güçleri toplamı, grup taşıma kapasitesinden daha azdır. Kazık grubunun taşıma gücü, bireysel etki ve grup etkisinden küçük olanına eşit kabul edilir.

Bireysel Etki: Kazıkların sık yerleştirilmesi (kazıklar arası mesafe 3D’ den küçük) durumunda grup taşıma gücü, bireysel etki ile toplam taşıma gücünden küçük olacaktır. Grup etkisi yok ise toplam yük, tek kazığın taşıdığı yükün “N” katı ile verimlilik katsayısı (η)’ in çarpımına eşit olur.

$$Q_G = N \cdot \eta \cdot Q_{\text{tekil}} \quad (3.2)$$

Kazık grubu taşıma kapasitesi (Q_G)’ nin tekil kazık taşıma gücü (Q_{tekil}) ile kazık sayısı (N)’e oranı, kazık grubu verimliliği (η) olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{Q_{\text{Grup}}}{N \cdot Q_{\text{tekil}}} \quad (3.3)$$

Kazık grubu verimliliği; zemin parametrelerine, kazık grubu ve şekline, kazık uzunluğu ve kazık ara mesafesine bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Pratik olarak kohezyonlu zeminlerde kazık grubu verimlilik katsayısı için Çizelge (3.1)’ deki değerler kullanılabilir veya Converse – Labbare formülü (3.4) yardımı ile de hesaplanabilir.

Çizelge 3.1 Grup verimi (η) tahmini öneriler (Prakash ve Sharma, 1990)

Kazık Yerleşimi (s)	3D	4D	5D	6D	8D
η	0.7	0.75	0.85	0.9	1

$$\eta = 1 - \theta \cdot \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \right] \quad (3.4)$$

n: Bir sıradaki kazık sayısı

m: Gruptaki kazık sıra sayısı

$\theta = \arctan(d/s)$

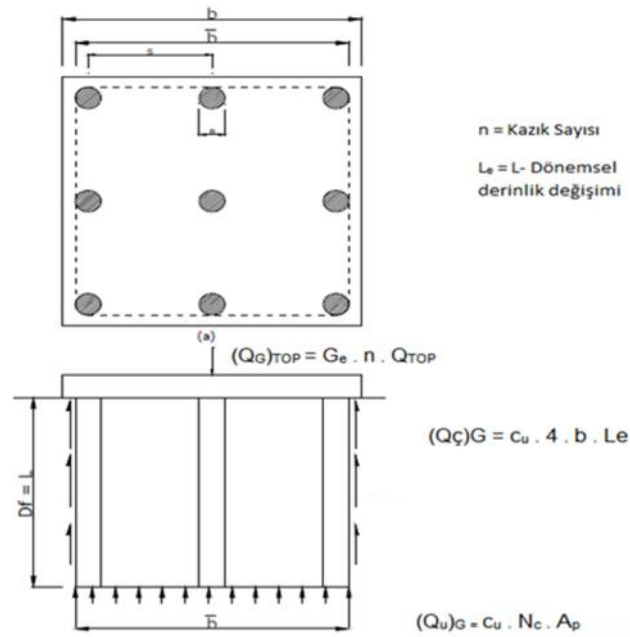
s: Kazıklar arası aks aralığı

D: Kazık çapı

Blok Etkisi: Grup etkisi ile taşıma gücü bireysel etki ile taşıma kapasitesinden daha büyük çıkmaktadır. Şekil (3.2)' de görünen kazık gurubu taşıma kapasitesi; (Terzaghi ve Peck, 1967 ; Meyerhof, 1976)' nın önerdiği;

$$Q_{Grup} = c_u \cdot N_c \cdot \bar{b}^2 + 4 \cdot c_u \cdot \bar{b} \cdot L_e \quad (3.5)$$

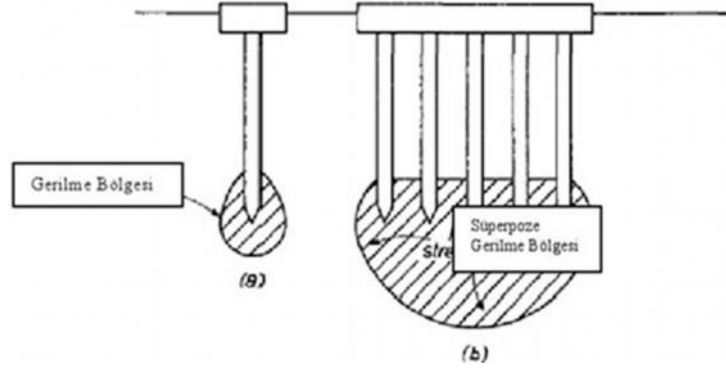
formülü ile hesaplanabilir.



Şekil 3.2 Kohezyonlu zeminlerde kazık grubu taşıma kapasitesi
(Terzaghi ve Peck, 1967)

3.1.2 Kazık gruplarının oturması

Kazık gruplarında birincil oturmalar sonucunda grubu oluşturan tekil kazıkların oturma değerlerinden fazla olacaktır. Bunun sebebi ise kazıkların zemine aktardıkları gerilmelerin kazık gruplarına göre çok daha derin bir alana iletmeleridir (Şekil 3.3). Burada aktarılan gerilmeden dolayı süperpozisyon olur ve kazık taşıma kapasitesi tekil kazıklara göre azalma ve oturmalarda artışlar olmaktadır (Das, 1999).

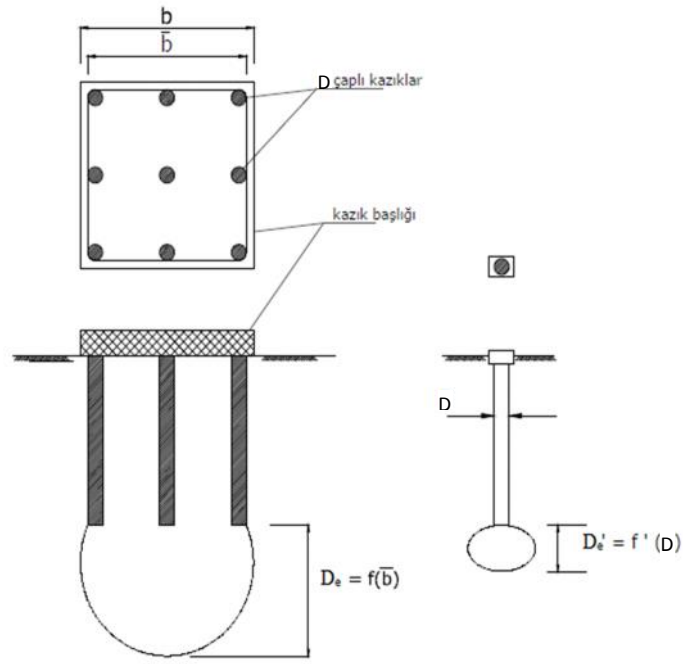


Şekil 3.3. Kazık gruplarında oluşan gerilmelerin süperpozisyonu (Tomlinson, 2004)

Kazık gruplarının oturmalarında bir çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Ampirik formüllere dayanan yöntemler (Vesic, 1970; Meyerhof, 1976),
2. Yapı zemin etkileşimini ve gerilme süperpozisyonunu dikkate alan yaklaşımlar (Poulos ve Davis, 1980),
3. Tekil kazıklara ait yük-oturma grafiklerini grup etkileşim faktörleri yardımıyla değiştirmeye dayanan yaklaşımlar,
4. Kazık grubuna etkileyen ortalama yük altında bir adet kazığın oturmasının oturma oranı R_s ile çarpılarak grup etkisini göze almaya dayanan yaklaşımlar,
5. Kazıkların yüzeyden itibaren belirli bir derinlikte yer alan bir radye temel tarafından sembolize edilebileceği varsayımına dayanan eşdeğer radye yöntemi,
6. Kazık grubunun ve arasındaki zeminin bir bütün olarak algılanarak grubun bir tekil kazık gibi çözümlenmesine dayanan blok yöntemi, bu yöntemde kazık ve zeminin rijitliği hesaplanır ve ortalama oturma değeri elde edilir.
7. Sonlu elemanlar metodu (SEM) ve sonlu farklar metodu (SFM) gibi nümerik yöntemler.

Kohezyonsuz zeminlerde kazık grubunun oturması: Kohezyonsuz zeminlerde, her bir kazığa eşit yükleme yapılması koşulu ile kazık grubunun oturma miktarı (S_g), normal olarak tek kazığın oturma (S_t) miktarından büyüktür. Bunun sebebi kazık grubunun daha derin ve daha büyük bir alana etkimesidir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Kazık etki alanları, grup kazık etki alanı ve tek kazık etki alanı (Prakash ve Sharma, 1990)

Grup oturma miktarının dizaynı amacı ile en basit yöntem Vesic (1977) tarafından önerilmiştir.

$$S_g = S_t \cdot \sqrt{\frac{\bar{b}}{D}} \quad (3.6)$$

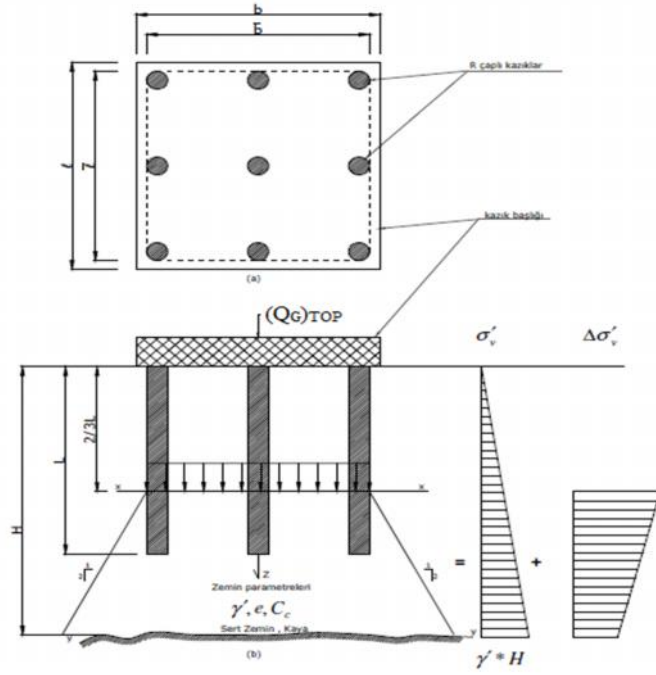
S_g = Kazık grubunun oturma miktarı

S_t = Hesaplanmış yada deney ile belirlenmiş tek kazık oturma miktarı

$\bar{b}$ = Kazık grubu genişliği

D = Bireysel kazık çapı

Kohezyonlu zeminlerde kazık grubunun oturması: Kazık grubunun kohezyonlu zeminlerdeki oturma hesabı için, elastik oturmanın hesabı gibi elastik oturmanın yanında konsolidasyon oturması hesabı da dikkate alınmalıdır. Konsolidasyon oturma miktarının hesaplanmasının en basit yolu Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kohezyonlu zeminlerde sürtünme kazıklarında oturma hesabı için gerilme dağılımı (Vesic, 1977)

- q_{all} , zemin yüzeyinden $2/3L$ derinliğine taşınan zemin basıncıdır. Bu derinlikteki zemindeki oturma ihmal edilecek kadar küçüktür.
- q_{all} , zemin basıncı $(H-2/3L)$ kalınlığındaki kil tabakasının üstüne uygulanmaktadır.

Bu kabullere dayanarak (ΔH) konsolidasyon oturması:

$$\Delta H = [C_c / (1 + e_0)] \cdot [H - 2/3L] \cdot \log[(\sigma'_v + \Delta\sigma'_v) / \sigma'_v] \quad (3.7)$$

ΔH = Konsolidasyon oturması

σ'_v = $(H-2/3L)$ tabakasının tam ortasındaki mevcut efektif basınç,

$\Delta\sigma'_v$ = $(H-2/3L)$ tabakasının tam ortasındaki kazık yükü ile artan efektif basınç

C_c = Konsolidasyon katsayısı

e_0 = İlk boşluk oranı

BÖLÜM IV

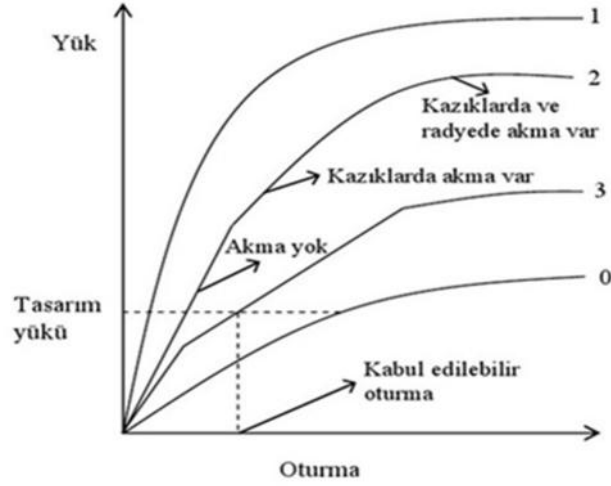
KAZIKLI RADYE TEMELLER ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu zamana kadar kazıklı temel hesaplarında yükün tamamını kazıkların taşıdığı varsayılmaktaydı. Fakat radyenin zemin yüzeyine teması söz konusu olduğunda yükü radye ve kazık paylaşarak aktarmaktadır. Bu durumda kazık sayısı azalır ve ekonomiklik sağlanmış olur. Yapılan son çalışmalarda araştırmacılar kazıkların oturmayı azalttığı tasarımlarda önceliği taşıma gücünü sağlama yerine kullanılabilirlik koşuluna önem vermektedirler. Kullanılabilirlik koşulu ise toplam ve farklı oturma değerinin emniyetli oturma değerinin altında olmasıdır (Poulos ve diğ., 2001).

Randolph (1994), kazıklı radyelerin tasarlanması için üç yaklaşım tanımlamıştır.

- 1- Geleneksel yaklaşım,
- 2- Sünme kazığı yaklaşımı,
- 3- Farklı oturmaların kontrolü yaklaşımı,

İlk iki yaklaşım toplam oturmayı güvenli değere indirir ki bu sebeple kazıklar temelin tamamına düzgün olarak dağıtılır. Üçüncü yaklaşım ise direkt farklı oturma değerlerini azaltır (Şekil 4.1). Bu yaklaşımda boyutlanan kazıklı radye yük-oturma davranışını gösterir (Poulos 2000). Burada 0 eğrisi radye temelin yük-oturma eğrisidir ve tasarım yükünde aşırı oturmalar meydana gelmiştir. Geleneksel yaklaşımla elde edilen 1 eğrisinde, temelin davranışı kazık grubu tarafından belirlenmekte ve yükün büyük bölümü kazıklar tarafından taşınmaktadır. Tasarım yükünde sistemin davranışı doğrusal olabilir. 2 eğrisi sünme kazığı yaklaşımıyla projelendirilmiş kazıklı radyeyi göstermektedir. Kazıklar için güvenlik sayısı geleneksel yaklaşımdakine göre daha küçüktür ve daha az sayıda kazık kullanılmıştır, radye ise daha fazla yük taşımaktadır. 3 eğrisi kazık taşıma gücünün tamamını kullanıldığı ve kazıkların oturmayı azaltıcı elemanlar olduğu durumdur. Tasarım yükünde yük-oturma davranışı doğrusal olmayabilir ancak temel sistemi yeterli güvenlik sayısına sahiptir ve oturma şartı da sağlanmaktadır. 3 numaralı eğriye göre yapılan boyutlandırma çok daha ekonomiktir (Poulos ve diğ., 1997; Poulos; 2001a).

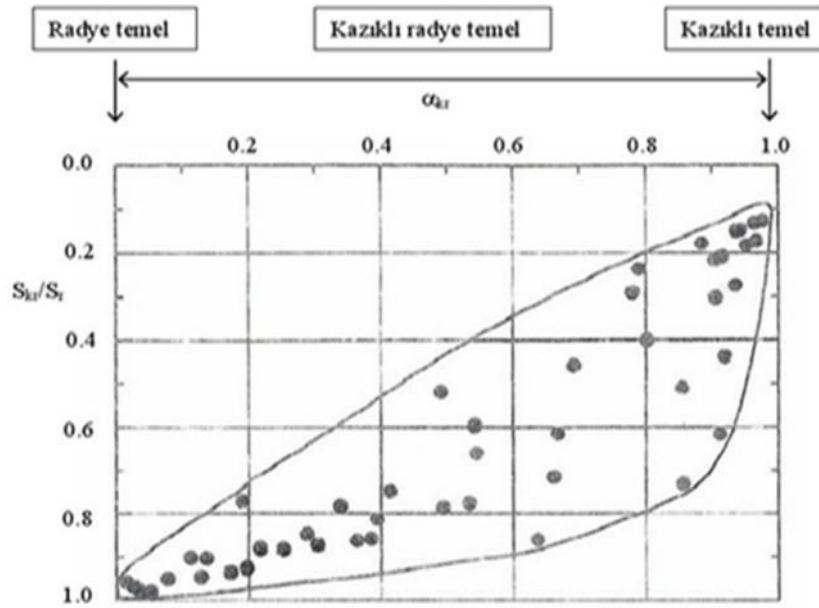


Şekil 4.1. Farklı tasarım yaklaşımlarına göre kazıklı radye temellerin yük-oturma davranışı eğrileri (Poulos, 2000)

4.1. Kazıklı radye temellerin kullanım alanları

Kazıklı radyenin en etkin uygulama alanı radyenin taşıma gücüne yeterli fakat oturma değerini aştığı durumlardır. Sert killerden ve/veya sıkı kumlardan oluşan ve temel derinliğince yumuşak ve/veya gevşek tabakaların bulunmadığı zemin profilleri kazıklı radye kullanımına uygundur (Poulos, 1994). Bu şartlarda radye taşıma gücünü sağlar ve kazık daha çok oturmaları azaltmak için kullanılır. Diğer yandan bu sistemlerin yapımının uygun olmayacağı şartlar, yumuşak killerin veya gevşek kumların yüzeye yakın bulunduğu, sıkı derinliklerde sıkışabilir yumuşak tabakalarının yer aldığı, konsolidasyon oturmasının oluşabileceği ve dış etkiler sonucu şişme gösterebilecek zemin profilleridir. İlk iki durumda, radyenin taşıma gücü çok az olabilir, üçüncü durumda ise sıkışabilir zemin tabakalarının uzun süre sonundaki oturmaları, radyenin sisteme katkısını azaltılabilir. Konsolidasyon sonucu meydana gelebilecek radye-zemin temas kaybından dolayı radye ağırlığının da kazıklara aktarılması veya oluşabilecek negatif çevre sürtünmesi sebebiyle kazıklara gelen yük artar ve temel sisteminin oturmaları büyür. Şişebilen zeminlerde ise, kazık boyunca yukarı doğru zemin hareketi ve radye altında oluşan gerilemeler kazıklarda çekme gerilmesinin artışına neden olur (Sinha ve Poulos, 1997; Poulos, 1993). Katzenbach ve Moorman (2001)'a göre, tabakalı zemin profilinde elastisite modülü oranları $E_1/E_2 \leq 1/10$ ise veya kazıklı radye altında organik zemin, dolgu veya yumuşak bir tabaka mevcut ise kazıklı radye kullanımı uygun değildir. Ayrıca kazık yükü/toplam yük olarak ifade edilen kazıklı radye kat

sayısı α_{kr} , 0,9'dan büyük ise bu sistemler tercih edilmemelidir. $\alpha_{kr}=0$ radye temeli, $\alpha_{kr}=1$ kazıklı temeli ifade etmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Kazıklı radye temel katsayısı ile kazıklı radyenin oturması/radyenin oturması arasındaki bağıntı örneği (Katzenbach ve diğ., 1998)

4.2. Kazıklı radye temellerin uygulama örnekleri

Kazıklı radye tasarımında birçok metot olmasına rağmen uzmanların onayladığı bir yöntem bulunmamaktadır. Fakat uygulanan sistemler uzun süredir başarılı sonuçlar vermektedir. ISSMGE TC18 tarafından hazırlanan raporda literatürdeki çalışmalardan 24 adet örnek seçilerek yayınlanmıştır (O'Neill ve diğ. 2001). Bu örneklerde proje detayları verilmeden bahsedilmiştir. Bunlar İngiltere'deki çalışmalardan bahseden Cooke (1986), Almanya'daki vakalardan bahseden El-Mosallamy (2002), Franke ve diğ. (2000) sayılabilir.

Kazıklı radye uygulamaları konusunda oldukça çok yayın bulunmaktadır. Örneklerin yayınlanması mühendisler için iyi birer referans olacaktır.

4.3. Kazıklı radye temeller üzerindeki model çalışmaları

Bütçe problemlerinden ötürü gerçek veya ilk örnek model yapımı zordur. Santrifüj deney sistemi modellemede boyut ve zaman aşılmasında etkilidir ancak kurulumu ve kullanımı maliyetli bir sistemdir. Bu nedenlerden ötürü sistem üzerinde fiziksel çalışma için sayısal analiz ve tasarım yöntemleri kadar örnek bulunmamaktadır.

Laboratuvar (1g) şartlarında yapılmış model deneyleri: Whitaker (1961), laboratuvar şartlarında yaptığı çalışmasında rijit kazık başlığının kohezyonlu zemin ile temas ettiği (kazıklı radye) ve başlığın olmadığı (veya zeminle temasında olmadığı – kazıklı temel) iki farklı sistemi incelemiş ve kazıklı radye temelin taşıma gücünün kazıklı temele göre daha yüksek olduğunu ifade etmiştir.

Cooke (1986), bu deneylerin sonuçlarını yeni deneylerle karşılaştırmış ve Whitaker (1961)'ın ifadesini doğrularken kazıkların oturmaya etkisini de incelemiştir. Oturmaları azaltmak amacıyla kullanılan *kazıkların sayısının arttırılmasının, 4 kazık çapında daha küçük kazık aralığı değerinden sonra önemli bir fayda getirmediğini* belirtmiştir. Kazık boyu radye genişliğinden ne kadar fazla ise elde edilen oturmadaki azalma da o kadar fazladır.

Santrifüj kullanılan model çalışmaları: Bu model çalışmasında önce sistemdeki kazık davranışının modellenmesi kontrol edilmiştir. Ko ve diğ. (1984) de gerçek boyuttaki prototiplerde iki ayrı yükleme deneyini santrifüj modelini farklı ivme değerlerinde testini yaptılar ve ortaya çıkan verilerin sistemin davranışını incelemeye kullanılacağını belirtmişlerdir.

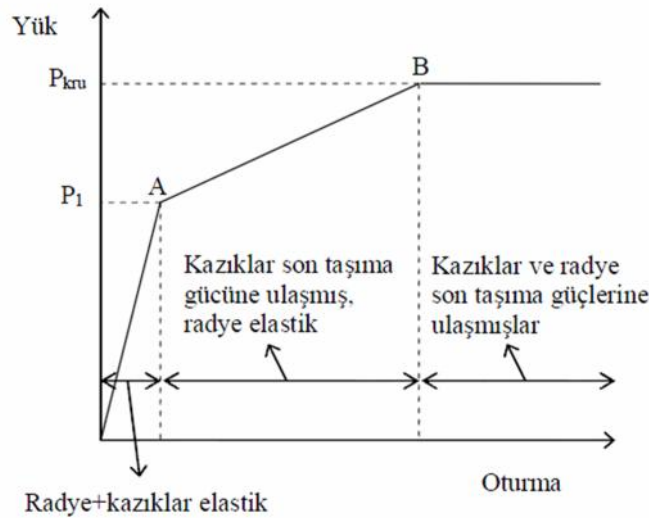
Thaher ve Jessberger (1991a, 1991b) 150g ivme değerinde 4 ayrı grupta yaptıkları deneylerde kazıklı radye temelin yük-oturma davranışıyla birlikte yük dağılımını da incelemişlerdir. Bilim insanlarına göre, *kazık aralığı/kazık çapı oranı olan s/D kazıklı radye temellerde davranışı etkileyen en önemli etken olmaktadır*. Ayrıca konsolidasyonlar sonucu kazıklara gelen yük oranlarında artış olmuştur.

4.4. Kazıklı radye temellerin analizleri

Literatürde, analiz için kullanılan 3 grup yöntem bulunmaktadır (Poulos ve diğ.,1997; Poluos, 2001b). Bunlar basitleştirilmiş hesap yöntemleri, yaklaşık sayısal analiz yöntemleri ve ileri sayısal analiz yöntemleridir.

Basitleştirilmiş hesap yöntemleri:

Davis ve Poulos (1972) / Poulos ve Davis (1980): Bu iki bilim insanı Poluos'un yaptığı çalışmaları temel alarak kazıklı radyenin 3 doğrusal parçadan meydana gelen basitleştirilmiş yük-oturma grafiğini elde etmeye yarayan bir hesap yöntemi sunmuşlardır. Yöntemin oluşması radyenin maksimum taşıma gücünde gereken oturmanın kazık grubu oturmasından daha büyük olduğunun görülmesidir. Bu yöntem sadece tam rijit veya esnek radye için uygulanabilir.



Şekil 4.3. Kazıklı radye temellerin basitleştirilmiş yük-oturma grafiği
(Poulos ve Davis, 1980)

Randolph (1983-1994): Kazık sisteminin davranışından yola çıkarak, kazıklı radye temel sisteminin davranışını etkileşim faktörlerinden yararlanarak elde etmiştir. Fakat bu yöntem sadece temel sisteminin doğrusal davranışın için geçerlilik kazanmaktadır. Kazıklı radye sistemin rijitliği k_{kr} , k_k ve k_r sırasıyla kazık grubu ve radyenin rijitlikleri olmak üzere α etkileşim faktörüne bağlı olarak hesaplanabilir.

$$k_{kr} = \frac{k_k + (1-2\alpha)k_r}{1-\alpha^2\left(\frac{k_r}{k_{kr}}\right)} \quad (4.1)$$

ifadesiyle hesaplanırken sistemde radye tarafından taşınan yükün oranı ise:

$$\frac{P_r}{P_r + P_k} = \frac{P_r}{P_{kr}} = \frac{(1-\alpha)k_r}{k_k + (1-2\alpha)k_r} \quad (4.2)$$

olur. Burada P_{kr} , P_r ve P_k sırasıyla kazıklı radye, radye ve kazıklara gelen yüklerdir. α etkileşim faktörü, r_b yarıçapında başlık ve r yarıçapında oluşan tekil sistem için:

$$\alpha = \frac{\ln(r_n/r_b)}{\ln(\frac{r_b}{R})} \approx 1 - \frac{\ln(\frac{r_b}{r})}{\zeta} \quad (4.3)$$

olarak hesaplanır. Burada r_m maksimum etki yarıçapını temsi ederken ζ kazık etki yarıçapını gösterir. Bu bağıntı çok kazıktan oluşan radye sistemlerinde r_b her kazığa düşen radye alanın eşdeğer yarıçapını kullanır. Grup boyutu büyüdükçe etkileşim faktörü kazık aralığı, narinliği ve rijitlikten bağımsız olarak 0.8 değerine yakınsamaktadır (Clancy ve Randolph, 1993).

Poulos-Davis-Randolph, PDR (Poulos, 2000, 2001b): PDR yöntemi yukarıda açıklanmış olan iki yöntemin ortak sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Önce belirlenen kazık sayısına göre sistem rijitliği k_{kr} ifadesi hesaplanmalıdır. Bu ifadedeki kazık grubu rijitliği k_k (Poulos ve Davis, 1980; Fleming ve diğ., 1992; Poluos, 1989) ve radye rijitliği k_r (Frase ve Wardle, 1976; Mayne ve Poulos, 1999) elastik teoremin yardımıyla klasik yöntemlerle hesaplanabilir. Radye yükünün toplam yüke oranı ise:

$$\frac{P_r}{P_k + P_r} = \frac{P_r}{P_{kr}} = X \quad (4.4)$$

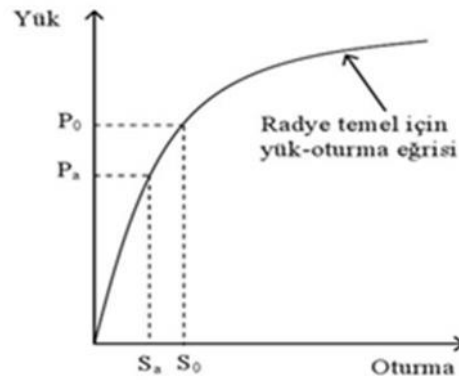
Buradan, P_1 yükü:

$$P_1 = \frac{P_{ku}}{1-x} \quad (4.5)$$

olarak elde edilir. Burada P_{ku} , kazık grubu son taşıma gücüdür. P_1 yüküne ulaşınca kadar sistem rijitliği için k_{kr} değeri alınır. Bu değerlerle ilk metottun yardımıyla kazıklı radyenin oturması:

$$S_{kr} = \frac{P_1}{k_{kr}} + \frac{P_{kr}-P_1}{k_r} \quad (4.6)$$

Burland (1995): Kazıkların kapasitesinin tasarım yükünde tamamının kullanıldığı ve kazıkları oturma azaltıcı eleman olarak kullanan basitleştirilmiş yöntemdir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kazıklı radye temel tasarımı için Burland yaklaşımı (Burland, 1995)

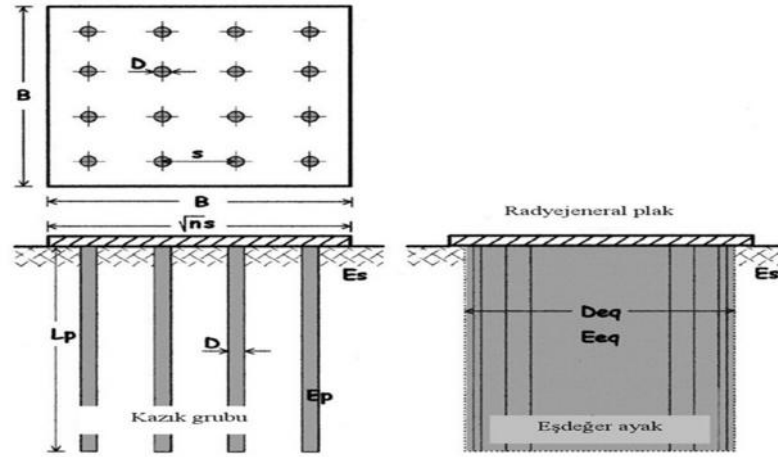
Randolph (1994): Kazıklı temelin oturma hesabında yararlanılan “eşdeğer radye ve eşdeğer ayak” yöntemlerinin, ‘kazıklı radye temelin oturma hesabı’ için de uygun olduğunu belirtmiştir. Kazık gruplarının oturma hesaplarında en sık kullanılan yöntemler olan basitleştirilmiş yöntemler bahsedildiği gibi “eşdeğer radye temel” yöntemi ve kazık gruplarının blok davranışını esas alan “eşdeğer ayak” yöntemidir.

Bu iki yaklaşımdan hangisinin kullanılacağına karar vermek için toplam kazık sayısı (n_t), kazık aralığı (s) ve kazık uzunluğuna (L) bağlı olarak tanımladığı görünüş oranından faydalanmaktadır.

R görünüş oranı:

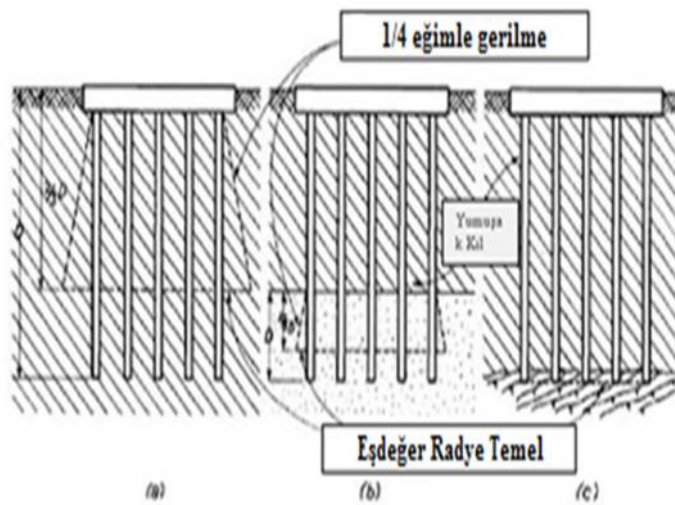
$$R = \sqrt{\frac{n_t s}{L}} \quad (4.7)$$

ifadesiyle hesaplanır. $R > 4$ olduğu durumlarda eşdeğer radye yöntemini kullanmak daha uygundur.



Şekil 4.5. Eşdeğer ayak (kazık) yöntemi (Castelli ve Maugeri, 2002)

Eşdeğer radye yönteminde, kazıklı radye temel, $2L/3$ derinliğinde bulunduğu varsayılan radye ile temsil edilir (Tomlinson, 2001). Eşdeğer radye boyutunu belirlemek için uygulanan yükün $1/4$ oranıyla yayıldığı kabul edilir (Şekil 4.6). Sistemin oturması, eşdeğer radyenin oturması ve eşdeğer radye üstünde kalan kazık boyunun elastik sıkışmasının toplamı olarak bulunur. Bu kabulden sonra radye temel için oturma analizi yapılarak oturmaların yaklaşık değeri elde edilir. Bundan sonraki adımda iri daneli zeminlerde sadece elastik oturma göz önüne alınırken, ince daneli zeminlerde ise konsolidasyon oturması ve elastik oturma beraber hesaplanır. Van Impe (1991)'e göre, toplam kazık kesit alanı/kazık grup alanı oranının 0.10'dan büyük olduğu durumlarda eşdeğer radye yönteminin kullanılması uygundur.



Şekil 4.6. Kazıklarda gerilme aktarımları a) Sürtünme kazıkları, b) Uç ve sürtünme kazıkları, c) Uç kazıkları (Tomlinson, 2004)

Eşdeğer radye temel yöntemi çoğu kez arazi yükleme deneylerinin sonuçlarıyla örtüşmektedir. Kazıklar arası mesafelerin etkileri, kazık gruplarının etkileşimini yeterince dikkate alınmaması bu yöntemin zayıf noktalarıdır. Bu sebeplerle karışık bir geometriye sahip değişik uzunluktaki kazıkların oluşturduğu sistemler dikkatlice incelenmelidir (Geopublications of Hong Kong, 2006).

Eşdeğer ayak yöntemi: Bu yöntem kazık grubu ve arada ki zeminin birlikte çalıştığı ve aynı rijitliğe sahip tek kazıkmış gibi düşünerek ayrıca kazık grubu altında sıkışabilir zemin tabakasının bulunması halinde burada oluşacak konsolidasyon oturmasını hesaplamak için kullanılır. Bu durumda eşdeğer kazık boyutu gruptaki kazıkların boyuna ve kazık genişliği grubun alanının (kazıklar arasında kalan zemin dâhil) kareköküne eşit alınır. Ancak Poulos (2002)'un yaptığı çalışmada eşdeğer çapı bulmak için alanın karekökü 1,13-1,27 arasında bir katsayı ile düzenlenir. Belirtilen değerden küçük olanı uç kazıkları, büyük olanı ise sürtünme kazıkları için kullanılır.

Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri:

Yaylar üzerinde şerit yaklaşımı: Radye temel şeritleri, kazıklar ise yayları ifade etmektedir. Sistem Poulos (1991)'un elastik teoriden yararlanmasıyla ortaya çıkmıştır.

Yaylar üzerinde plak yaklaşımı: Radye elastik bir plak, kazıklar ise yayları temsil eder. Bilim insanlarının farklı çalışmaları sonucu bu yaklaşımda, kazık ve radye yüklerini, toplam ve farklı oturmaklar ile radyenin eğilme momentleri hesaplanabilmektedir.

İleri sayısal analiz yöntemleri:

1. Sınır eleman yöntemi: Bu yaklaşımda sistem elemanları kazık ve radye parçalara bölünür ve tüm zemin-temel ara yüzey elemanlara ayrılır. Sistemin çözümüm için genelde Mindlin (1936) fonksiyonu kullanılır. Temel davranışının çözümü ise sonlu eleman-farklar yöntemlerinden birisiyle çözülür (Randolph, 1994).

2. Basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri: Bu yöntem sistemi düzlem deformasyon problemi (Desai ve diğ., 1974; Prakoso ve Kulhawy, 2001) veya eksenel simetrik problem (Hooper, 1973; Pressley ve Poulos, 1986) olarak çalışan yöntemdir. Bu iki

durumda da temel ve sistem sonlu elemanlar kullanılarak ifade edildiğinden, doğrusal olmayan davranışlar göz önüne alınabilmektedirler. İki fazlı zemin yapısı analizlere dâhil edildiğinde konsolidasyonda ötürü kazıklar arasında yük dağılımının değişimini ve oturmalarını elde etmek mümkündür. Bu iki yöntem dışında melez yöntemler ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi de bulunmaktadır.

3. Melez yöntemler: Farklı metotların bir arada kullanıldığı yöntemlerdir.

4. Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi: Bu yöntem kazıklı radye temellerin çözümlerinde en uygun sonuçları vermesine rağmen, bilgisayarların kapasitelerinin sınırlı olmasından ötürü ve zaman sorunlarından ötürü fazla tercih edilen bir yöntem değildir. Ancak son dönemde teknolojiye gelişmelerden ötürü bu metot bilim insanları tarafından tercih edilmeye başlanmıştır.

Türkiye’de kazıklı radye temel üzerine yapılan lisansüstü çalışmalar:

Ülkemizde kazıklı radye üzerine bir çok tez çalışması yürütülmüştür. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, kazıklı radye temellerin davranışı incelenmiştir (Gök, 1998; Karaşahin, 1999; Sağlam, 2003; Sert, 2003; Özdemir (2006; Gök (2007; Türkmen, 2008; Öztürk, 2008; Kaltakçı, 2009; Yalçın, 2010; Demirci, 2012).

Gök (1998) yüksek lisans tez çalışmasında fotoelastik laboratuvar deneyleri yardımıyla radye – kazık – zemin arasındaki etkileşimi, kazıklar ve radye arasındaki yük dağılımını ve oturma davranışını araştırmıştır. Fotoelastik deneylerden elde edilen sonuçları, bilgisayar analiz programı ile karşılaştırmıştır.

Karaşahin (1999) yüksek lisans tez çalışmasında, literatür taraması ve arazi deneyi çalışması yapmış olup, bu çalışmadan elde edilen sonuçlara bağlı, radye – kazık etkileşimi ve kazıklarla radye arasındaki yük paylaşımını incelemiştir.

Sağlam (2003) yüksek lisans tez çalışmasında, kazık gruplarının oturma analizlerinin elle çözüm metotlarını incelenmiştir. Oturma oranı, eşdeğer ayak, eşdeğer radye metotlarını incelemiş olup, farklı durumlar için hangi metodun uygun olduğu bulunmaya çalışmıştır.

Sert (2003) doktora tez çalışmasında, üç boyutlu sonlu eleman yazılımı ile kazıklı radye temel modelleri çözümlenmiştir. Seçilen zemin kesitinde temel kalınlığı, kazık sayısı, çapı ve yerleşimi değiştirilerek kazıklı radye temel oluşturularak parametrik çalışma yürütmüştür. Elde edilen sayısal değerlere bağlı olarak oturma ölçütlerini sağlayan en uygun kazık yerleşimini belirlemiştir.

Özdemir (2006), yüksek lisans tez çalışmasında, Plaxis sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, oluşturulan parametrik modellerde kazık boyu, kazık aralığı, kazık çapı, yükleme çeşidi, kazık sayısı ve zemin cinsi gibi parametrelerin değişimiyle radye altında oluşan taban basıncı değişimini incelemiştir.

Gök (2007) doktora tez çalışmasında, üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ve model deneyleri kullanarak kazıklı radye temellerin davranışını incelemiş, başlangıç aşamasında kullanılacak basit bir hesap yöntemi önermiştir.

Türkmen (2008) doktora tez çalışmasında laboratuvar ve saha deneyleri yaparak, kazıklı radye temellerin yük taşıma davranışını incelemiştir.

Öztürk (2008) yüksek lisans tez çalışmasında, Poulos (2000) tarafından önerilen bir elle hesap yöntemi ile üç boyutlu bir sonlu elemanlar programı yardımıyla sayısal uygulamasını yapıp sonuçları karşılaştırdı.

Kaltakçı (2009) yüksek lisans tez çalışmasında, aşırı konsolide killeri üzerinde inşa edilmiş kazıklı radye temellerin düzgün yayılı yük altındaki oturma davranışlarını, farklı kazık yerleşim planlarını ve yük seviyelerini incelemiştir. Yapılan analizleri daha önce yapılmış olan bir çalışmayla karşılaştırmıştır.

Yalçın (2010) yüksek lisans tez çalışmasında, üç boyutlu sonlu elemanlar paket programı ile radye temel, kazıklı radye temel ve kazıklı temellerin düşey ve yatay yükler altındaki davranışını incelemiştir. İnceleme sonucunda, üst yapıdan gelen yüksek mertebedeki yüklere bağlı olarak, kazıklı radye temelin daha ekonomik ve güvenli bir sistem olduğunu belirtmiştir.

Demirci (2012) yüksek lisans tez çalışmasında, kumlu zeminlerde kayma modülü azalımının, düşey yük altındaki kazık davranışına etkisini sonlu elemanlar yazılımı kullanarak incelemiştir. Analiz sonuçlarını kullanılan bağıntılar ve farklı bir sonlu elemanlar yazılım sonuçlarıyla karşılaştıran Demirci (2012), rijitlik azalımının dikkate alındığı zemin modellerinde, ekonomik tasarım yapmanın mümkün olduğu sonucuna ulaşmıştır.

BÖLÜM V

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS

5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık ve elle hesaplanması oldukça zaman alan, hatta imkânsız olan mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Bu yöntem esas olarak fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesine dayanır. Buna göre değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi suretiyle analiz edilir. Bu aşamada sistem parçalanırken esas sistemde yer alan süreksizlikler dikkate alınmalıdır. Örneğin farklı malzeme özelliklerine sahip geometriler kendi içerisinde parçalara ayrılmalıdır. Ayrılan parçalar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmak suretiyle esas geometriyi oluştururlar ve her bir parça için denge denklemleri yazılarak bilinmeyenler sınır şartları yardımıyla elde edilir. Her elemanın şekli, bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Bu şekilde yapılan analizin bir boyutlu olması durumunda elemanlar doğrusal, iki boyutlu olması durumunda elemanlar kare, üçgen ya da dikdörtgen ve üç boyutlu olması durumunda üçgen prizma, dikdörtgen prizma vb şekillerden oluşurlar. Her düğüm noktasının belirli bir serbestlik derecesi vardır ve bu serbestlik dereceleri elde edilmesi gereken bilinmeyenleri işaret etmektedir. Çözüm için bir asıl değişken seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve matris hesap yöntemiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır. Elde edilen ana değişkenler yardımıyla ikincil değişkenler elde edilir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi esas olarak deplasmanların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle deplasmanlar ana değişkenleri, deplasmanlar yardımıyla hesaplanan gerilme ve zorlanmalar ikincil değişkenleri belirtmektedir. Bu doğrultuda, sonlu eleman yönteminin işleyişi modelin sonlu elemanlara ayrılması, elemanda yükleme sonucu oluşacak deplasmanları yansıtacak deplasman modellerinin seçilmesi, elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içeren rijitlik matrisinin oluşturulması ve oluşturulan eleman rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerinin toplanarak sistemin bütünü

için rijitlik matrisi ve yk vektörünün elde edilmesi şeklinde özetlenebilir. Tek bir eleman için rijitlik matrisi $[k]$, yk vektörü $\{Q\}$ ve düğüm deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki ilişki u şekilde ifade edilir (Yalçın, 2010):

$$[k].\{q\} = \{Q\} \quad (5.1)$$

Her bir elemanın rijitlik matrisinin toplanması suretiyle elde edilen sistemin rijitlik matrisi $[K]$, tüm sistem için düğüm noktaları deplasman vektörü $\{r\}$ ve toplam yük vektörü $\{R\}$ arasındaki ilişki ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla açıklanabilir:

$$[K].\{r\} = \{R\} \quad (5.2)$$

Bu iki eitliğn çözülmesi için sınır koşullarının belirlenmesi ve bu iki eitliğn uygun şekilde ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Eitliklerin çözülmesi ile bilinmeyen ana değikenler elde edilir. Lineer analizlerde doğrudan çözüm yapılırken, doğrusal olmayan zemin davranışı için analizlerde her bir yük adımımda yk vektörleri ve rijitlik matrisleri tekrar oluşturularak çözümlenmektedir. Deplasmanların elde edilmesini takiben gerilme ve zorlanmalar deplasman değerlerine bağılı olarak hesaplanmaktadır (Yalçın, 2010).

Sonlu elemanlar yöntemi esas olarak üç ana adımdan oluşmaktadır. n süreç olarak adlandırılan ilk adımda, sistemin geometrisi, malzeme özellikleri, yapısal elemanlar ve yükler tanımlanmakta, hesap aşaması olan ikinci aşamada sistem sonlu elemanlara ayrılarak her bir eleman için bilinmeyenler yukarıda bahsedilen şekilde zlp düğüm noktalarındaki bilinmeyenlerin toplanması suretiyle tüm sistem için birincil ve ikincil değikenler elde edilmekte, süreç sonrası olarak adlandırılan son aşamada ise elde edilen birinci ve ikincil değikenlerin tüm sistem üzerindeki değerleri görülüp izlenebilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

5.2. Plaxis 2D ve 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı

Plaxis 3D Foundation programı, tezde kullanılan içerik ve özellik açısından Plaxis 2D programının özelliklerini kapsamaktadır. Üç boyutlu yazılımda iki boyutlu yazılıma nazaran 3. eksen (z) bulunmaktadır. Bu bağılamda, özellik olarak 2D' yi de içeren Plaxis

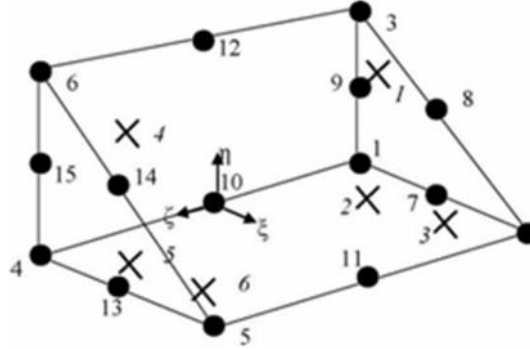
3D Foundation yazılımından bahsedilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesi'nde geliştirilen PLAXIS yazılımı, geoteknik mühendisliğinde hem statik hem de dinamik yükler altında karmaşık geometriye sahip sistemlerin deformasyon ve stabilite analizinde sıklıkla tercih edilen ve oldukça pratik bir programdır. Tercih edilmesinin sebebi kullanım kolaylığının yanı sıra, zeminin elastoplastik davranışını, başlangıç gerilme durumunu, yapı zemin etkileşimini dikkate alması olarak gösterilebilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve PLAXIS yazılımı, özellikle kıyı yapıları da dahil olmak üzere temel sistemlerinin analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır (Brinkgreve ve Broere, 2006). Bu programla yapılan çalışmalarda tabakalı zemin, karmaşık geometriye sahip sistemler, farklı yönlerde yükleme gibi bir çok durum dikkate alınabilir. PLAXIS yazılımı, Bölüm 6.1'de de belirtildiği gibi 3 ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, "input" *Giriş* bölümünde sistemin geometrisi ve sınır şartları tanımlanır, zemin ve yapı elemanlarının malzeme özellikleri belirlenir, etkiyen yük tipleri (çizgisel yük, yayılı yük vb.) ile etkidikleri noktalar seçilir ve bir sonraki aşamaya geçmeden hemen önce iki boyutlu sonlu eleman ağı, bu iki boyutlu ağın y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirine bağlanması suretiyle ise üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulur. Üç boyutlu sonlu eleman ağı 15 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlardan oluşmakta olup komşu elemanlar birbirlerine ortak düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanırlar. İkinci aşama olan "calculation" hesap aşamasında yapım aşamaları tanımlanır, her bir düğüm noktasındaki u_x , u_y ve u_z yerdeğiştirmeleri Bölüm 6.1'de belirtildiği gibi hesaplanır. Yerdeğiştirmelerin aksine, gerilme ve zorlamalar her bir elemanın Gauss (gerilme) noktalarında hesaplanmaktadır. 15 düğüm noktalı bir elemanda 6 gerilme noktası bulunmaktadır (Şekil 5.1). Üçüncü ve son aşama olan "output" *çıkı* bölümünde ise yapılan hesaplamaların sonuçları görülebilmekte, önceden belirlenmiş bazı noktalarda gerilme-şekil değiştirme ve taşıma gücü davranışını gösteren diğer diyagramlar çizdirilebilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirleyen faktörlerden birisi de, zemini tanımlarken hangi model kabulünün kullanıldığıdır. Plaxis 3D Foundation yazılımı, zemin mekaniğinde sıklıkla kullanılan lineer elastik ve elastoplastik Mohr-Coulomb zemin modellerinin yanı sıra, zeminin hiperbolik elastik-plastik davranışına izin veren

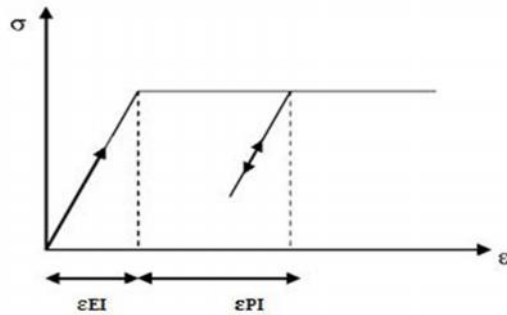
pekleşen zemin (Hardening Soil) ve yumuşak zemin akma modeli (Soft Soil Creep) gibi farklı kabullere dayanan zemin modellerinin kullanımına olanak tanımaktadır (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Üstyapının tipine ve zemin koşullarına bağlı olarak sistem drenajlı veya drenajsız olarak modellenebilmektedir.



Şekil 5.1. Plaxis 3D Foundation Yazılımında Kullanılan Sonlu Elemanlar (Brinkgreve ve Broere, 2006)

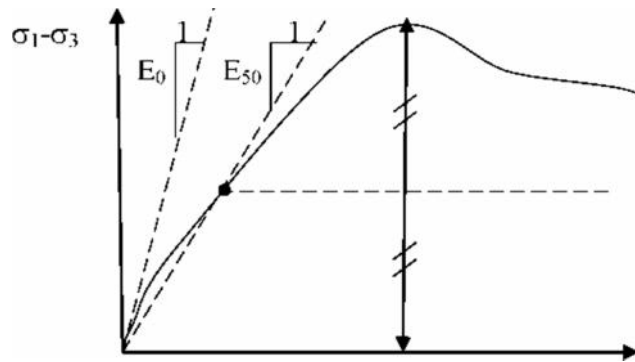
Elastik-ideal plastik Mohr-Coulomb modelinde Elastisite Modülü E ve Poisson Oranı ν zeminin elastik özelliklerini temsil ederken, kohezyon c ve içsel sürtünme açısı ϕ plastik, hacimsel genişleme açısı ψ ise hacim değiştirme özelliklerini temsil etmektedir. Bu modelde elastik ve plastik davranış net sınırlarla belirlenmiştir (Şekil 5.2). Ayrıca zemin içerisinde Elastisite Modülü E 'nin lineer artması durumunu modellemek de mümkün olabilmektedir. Gerçekte Mohr-Coulomb modeli zeminin davranışını ilk adımda incelemek için oldukça uygun olup elde edilen gerilme şekil değiştirme değerleri gerçeğe oldukça büyük bir uyum içerisinde (Yalçın, 2010).



Şekil 5.2. Zeminde Mohr – Coulomb gerilme-şekil değiştirme davranışı modeli (Brinkgreve ve Broere, 2006)

Zeminin elastoplastik davranışını tanımlayan diğer bir model Pekleşen Zemin (Hardening Soil Model) olup bu modelin Mohr-Coulomb modelinden farkı, akma yüzeyinin asal gerilme aralığı ile sınırlı olmayıp, plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak genişleyebilmesidir. Üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı Mohr-Coulomb modelinde doğrusal olarak temsil edilirken Pekleşen Zemin modelinde hiperbolik olarak kabul edilmektedir, bu da gerçek zemin davranışına daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Buna ilaveten, zemin rijitliğinin, zemine etkiyen gerilme artışına bağlı olarak arttığı hesaba katılmakta, dolayısıyla bu modelde tüm rijitlikler belirli bir referans gerilme alınarak belirlenmekte, yazılım zeminde gerilme artışına bağlı olarak rijitlik artışını başka bir işleme gerek kalmaksızın dikkate almaktadır. Pekleşen Zemin modelinde, Mohr-Coulomb zemin modelinin tanımında detaylı olarak yer verilen Elastisite Modülü dışındaki dört parametreye ek olarak, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen üç ayrı Elastisite Modülü parametresi ile zeminin davranışı daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu parametreler, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} olup, grafiksel tanımları Şekil 5.3’de verilmiştir. Tekrarlı yükleme boşaltma deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{ur} olarak isimlendirilmekte olup, pratikte şu şekilde hesaplanabilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006):

$$E_{ur} = 3 * E_{50} \quad (5.3)$$



Şekil 5.3. Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} 'nin belirlenmesi (Brinkgreve ve Broere, 2006)

Konsolidasyon deneyinden elde edilen rijitlik modülü E_{oed} ise ödometre deneyinde elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinin doğrusal kısmının eğimine eşittir. Bu üç parametreye ek olarak zeminin rijitliğinin gerilme artışına ne derece bağlı olduğunun

belirlenmesinde önemli bir rol oynayan bir katsayı olan m şu şekilde ifade edilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\theta - \sigma'_3 \cdot \sin\theta}{c \cdot \cos\theta + p^{ref} \cdot \sin\theta} \right)^m \quad (5.4)$$

Bu bağıntıda p^{ref} referans alınacak gerilmeyi, c kohezyonu, E^{ref} ise referans gerilmesi mertebesindeki elastisite modülünü temsil etmektedir.

BÖLÜM VI

YAPILAN PARAMETRİK ÇALIŞMA: MODELLEME VE ANALİZLER

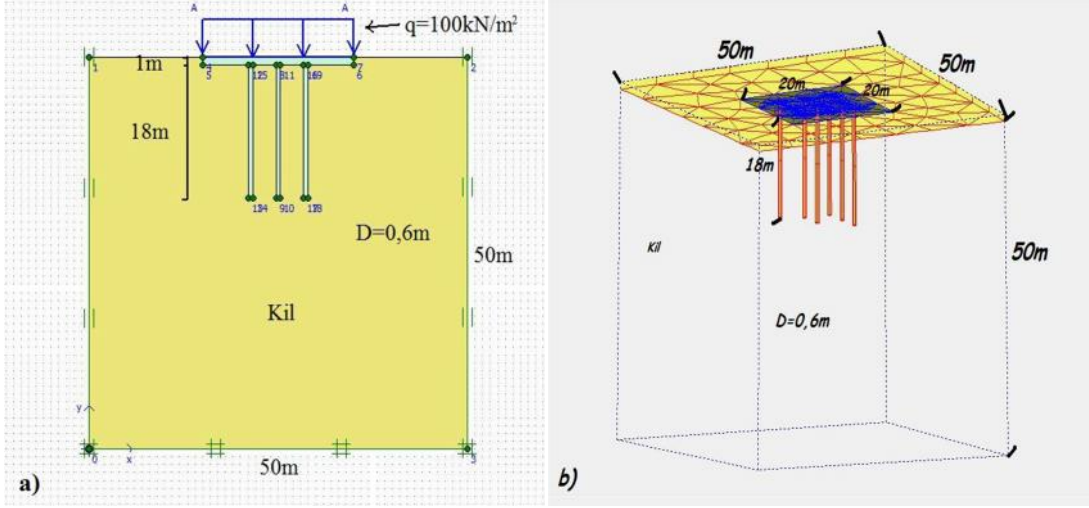
6.1. Materyal ve Metod

Çalışma kapsamında kullanılacak model, kil zemine (Çizelge 6.1) oturan yapıyı temsil edecek olup, düşey yük altında temel sistemin davranışı kısa periyotlu (drenajsız) analize göre iki (2D) ve üç (3D) boyutlu olarak araştırılmıştır. Bu sistem radye temel tabanının zemin ile temas halinde olduğu kazıklı radye temel olarak belirlenmiştir.

Üstyapıdan gelen yükler yayılı yük olarak modellenmiş olup, 20m x 20m' lik bir alanda yapıya etkiyen yükün yaklaşık 1,5 katı mertebesinde bir yük (tabanda 100 kPa) etkidiği varsayılmıştır.

Gerilmelerin yüksek olduğu ya da kritik oturma davranışı gösterebilme olasılığı bulunan bölgelerde eleman sayısının fazla olması gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durum, hesap için gerekli zamanın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yine Engin ve diğ. (2007) tarafından sonlu eleman ağının “sık” ve “çok sık” olarak modellenmesi halinde özellikle stabilite analizlerinde beklenenden daha önce göçme durumu gerçekleşebildiği belirtilmiştir. Bu sebeple her problem için uygun ağ sıklığının belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen modellerin tamamında aynı eleman sıklığını kullanmak yerine bölgesel olarak artırmak hesap aşamasından tasarruf etmeyi sağladığı için tercih edilmektedir. Bu çalışmada da sonlu elemanlar ağı “orta” sıklıkta modellenmiş, ancak radye temel altında oluşan gerilme ve deformasyonların fazla olması beklendiği için eleman sayısı artırılmıştır.

Analiz edilecek sistemin sınır şartlarından etkilenmemesi için sonlu eleman ağının oluşturulacağı geometrinin x, y ve z eksenlerinde yeterince büyük bir alanda yer alması gerekmektedir. Bu bağlamda 3 boyutlu da 50m x 50m x 50m boyutlarında 2 boyutlu da ise x, y eksenlerinde 50m x 50m boyutunda oluşturulacak bir geometride sınır şartlarından etkilenme durumunun gerçekleşmeyeceği yapılan çalışmalar sonucu belirlenmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Sonlu elemanlar model profilleri a) 2D temel sistem profili, b) 3D temel sistem profili

6.2. Malzeme Özellikleri

Sistem tek tabakalı zemin üzerinde modellenmiştir. Modellenecek zemin normal konsolide bir kil tabakası olarak seçilmiş olup, literatürde sağlıklı sonuçlar verdiği belirtilen pekleşen zemin (Hardening Soil) modeli kullanılmıştır (Sert, 2003). Killi zeminlerin drenajsız analizlerinde önerilen yöntem, drenajlı kayma mukavemeti parametrelerinin kullanılmasıdır (Berilgen, 2010). Kullanılan zeminin malzeme parametreleri Çizelge 6.1’ de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Analizlerde kullanılan zeminin malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Büyüklik
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_d	kN/m^3	18
Suya doymun birim hacim ağırlık, γ_{sat}	kN/m^3	18.5
Elastisite Modülü, E_{50}	kN/m^2	2×10^4
Rijitlik Modülü, E_{oed}	kN/m^2	2×10^4
Boşaltma-yeniden yükleme elastisite modülü, E_{ur}	kN/m^2	6×10^4
İçsel sürtünme açısı, ϕ'	-	25
Kohezyon, c'	kN/m^2	2
Arayüz Mukavemeti, R_{inter}	-	1.0

Temel sisteminin davranışını gerçeğe uygun olarak modellemek için, kazık-zemin etkileşiminin doğru olarak modellenmesi büyük bir önem taşımaktadır. Yer

değiştirmenin küçük olduğu durumlarda, diğer bir ifadeyle elastik sınır içinde kalması halinde, kazığın zeminle birlikte hareket ettiği varsayımı gerçeğe uygun sonuçların elde edilmesi için yeterli bir yaklaşım olurken, yer değiştirmenin büyük olduğu durumlarda kazığın zemine göre rölatif yer değiştirmesini inceleyebilmek için daha gelişmiş modellere ihtiyaç duyulmaktadır (Engin, 2007).

Geleneksel kazık elemanlarında kazık zemin etkileşimi kazık çevresinde ve ucunda kullanılan arayüz elemanlarıyla modellenmekte ve bu yöntem çözüm süresini artırmaktadır. Gömülü kazık modelinde ise kazık üç boyutlu bir hacim elemanı değil, bir kiriş (çizgi) elemanı olarak modellenmekte ve zemini herhangi bir noktada herhangi bir doğrultuda kesebilmektedir. Temel mühendisliğinde oldukça büyük bir öneme haiz olan kazık- zemin etkileşimi, kazık ve zemin düğüm noktaları arasındaki rölatif yer değiştirme ile tanımlanmaktadır. Söz konusu düğüm noktaları kazık gövdesi boyunca gömülü arayüz elemanlarıyla, kazık ucundaki zemin direnci ise doğrusal olmayan yay elemanlarıyla modellenmiştir. Kazık kapasitesi bu modelde girdi bilgisi olup, çevre sürtünmesi kazık çeperi boyunca sabit ya da değişken olarak tanımlanabilmektedir.

Radye plak için kullanılan döşeme elemanı ve radye plak altına yerleştirilen kazıkları temsil eden gömülü kazık elemanları lineer elastik ve izotropik olarak modellenmiştir. Kullanılan radye temel ve gömülü kazık elemanlarının malzeme parametreleri Çizelge 6.2’ de verilmektedir.

Çizelge 6.2. Analizlerde kullanılan yapısal elemanların malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Büyüklik
Birim hacim ağırlığı, γ	kN/m ³	24
Elastisite Modülü, E	kN/m ²	3x10 ⁷
Poisson Oranı, ν	-	0.2
Kayma Modülü, G	kN/m ²	1.25x10 ⁷
Temel Kalınlığı, d	m	1
Kazık çapı, D	m	0.6
Kazık boyu, L	m	18

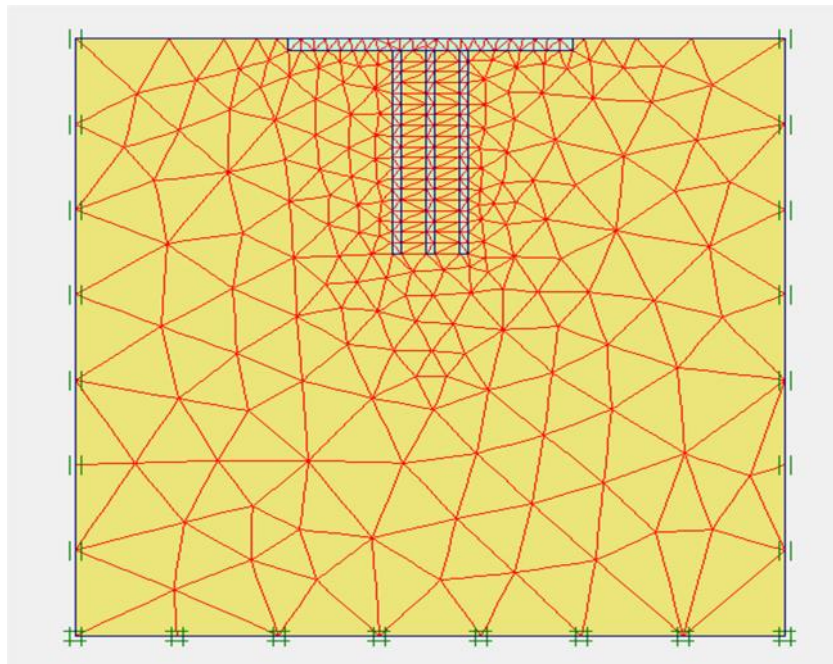
6.3. Hesap Aşaması

Yukarıda bahsedilen geometri ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra önce iki boyutlu, daha sonra oluşturulan bu iki boyutlu ağın y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirine bağlanması suretiyle ise üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.

Hesap aşamasında Plaxis programının “Staged Construction” özelliği kullanılmış, temel sistemini oluşturan elemanların imalatı ve yüklerin etkinleştirilmesi gerçeğe uygun şekilde kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.

6.3.1. Kazıklı radye temelin iki boyutlu (2D) modellenmesi

Sistemin Plaxis 2D programında “Genel Ayarlar” bölümünde x, y düzleminde 50m x 50m lik çalışma eksenini oluşturulduktan sonra; “Geometri çizgisi” komutu ile radye temel ve kazıklar, aks mesafesi ve kullanılan derinlik ve çap ölçülerine bağlı olarak yanal görünüş olarak çizilmiştir. Kullanılan zeminin malzeme parametreleri (Çizelge 6.1) ve yapısal eleman malzeme parametreleri (Çizelge 6.2) tanımlanmıştır. Radye temel üzerine etkiyecek 100 kN/m^2 yayılı yük oluşturulduktan sonra (Şekil 6.1), örgü ağı (generate mesh) oluşturulmuştur (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Plaxis 2D Ağ Oluşturma (Generate Mesh)

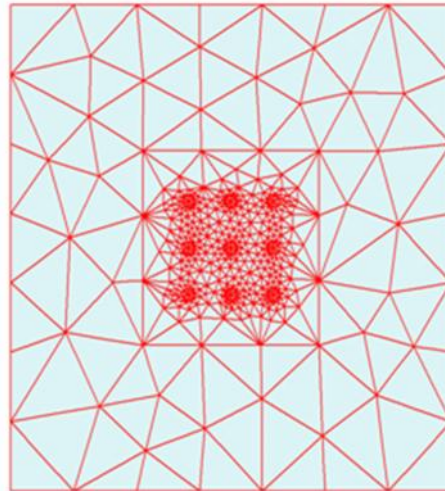
Başlangıç koşulları, yer altı su seviyesi seçildikten sonra hesap aşamasına geçilir. Hesap aşamasında etki edilen yük aktif edilerek, çözümlenen örgü ağında “curves” program sekmesinde yük - düşey deformasyon grafiği çizilmesi istenen noktalar seçilir ve kazık temel sistemi model çözümlenmesi tamamlanmıştır. “Output” bölümünde çözüm sonuçları ve seçilen noktalara bağlı yük - deformasyon davranışı görüntülenmiştir.

6.3.2. Kazıklı radye temelin üç boyutlu (3D) modellenmesi

Plaxis 3D Foundation programında; Kazık çapı 0.6m ve boyu 18m olan kazıklardan oluşan 3x3 kazıklı sistem oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sistemler s=2D, s=3D, s=4D, s=6D, s=8D kazıklar arası aks mesafesinde çözümlenerek meydana gelen kazıklı radye temelin davranışı irdelenmiştir.

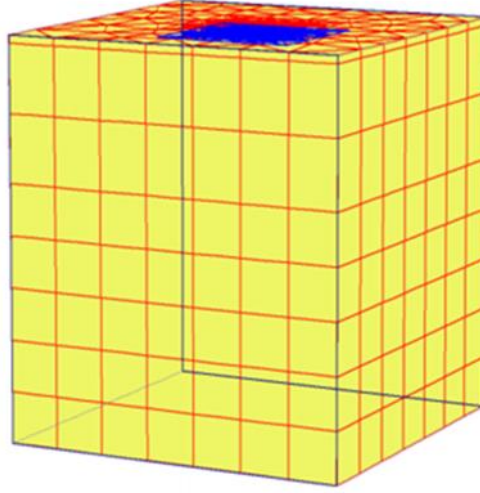
Kazıklı temel sistemine etkiyen düşey yükler altında, yapısal elemanların malzeme parametreleri ve zemin özellikleri girildiğinde model örneklerinde oluşan düşey yer değiştirmeler ve deformasyonlar hesaplanmıştır.

Sistemin geometrisi ve sınır şartları tanımlanıp, zemin ve yapı elemanlarının malzeme özellikleri, etkiyen yayılı yük ile etkidikleri noktalar seçildikten sonra bir sonraki aşamaya geçmeden hemen önce iki boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulur. Oluşturulan sistemin planda görünüşü Şekil 6.3’ de verilmektedir.



Şekil 6.3. Plaxis 3D Foundation yazılımı ile oluşturulan 2 boyutlu sonlu eleman ağı

Bu iki boyutlu ağı (Şekil 6.3) y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirine bağlanması suretiyle ise üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulur ($y=50\text{m}$). Üç boyutlu sonlu eleman ağı 15 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlardan oluşmakta olup komşu elemanlar birbirlerine ortak düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanırlar. Oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman ağı Şekil 6.4’ de verilmektedir.



Şekil 6.4. Plaxis 3D Foundation yazılımı ile oluşturulan 3 boyutlu sonlu eleman ağı

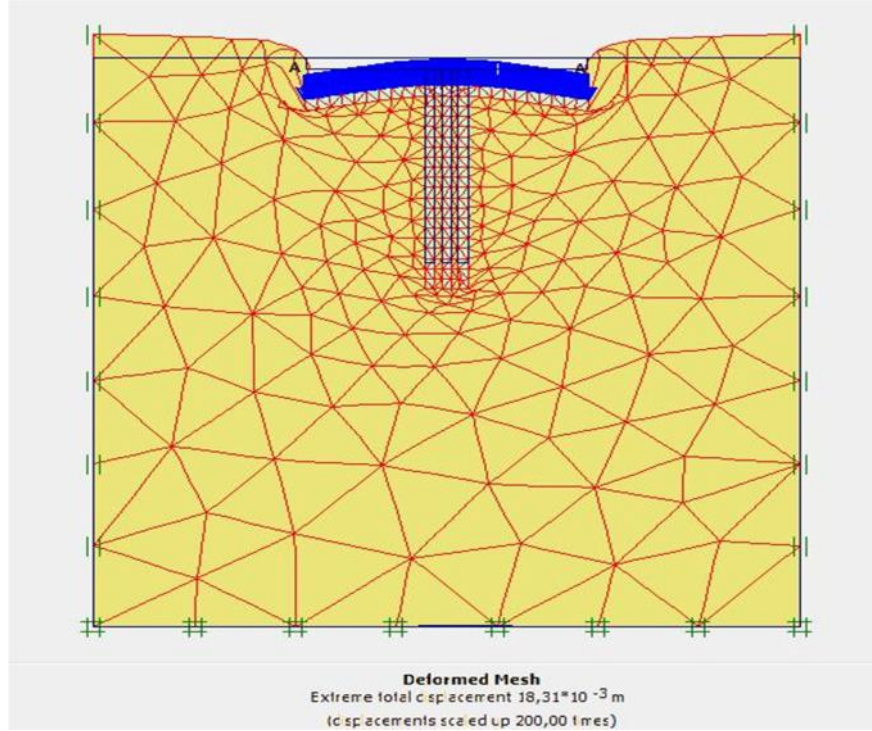
Üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulan sistemin “calculation” hesap aşamasına geçmeden önce sisteme etkiyecek olan yayılı yük $P=100\text{ kN/m}^2$ olarak seçilmiştir. ‘Calculation’ bölümünde sistem yapım aşamaları, etkiyecek yük bölümleri seçildikten sonra model çözümlemesi yapılmıştır.

Üçüncü ve son aşama olan “output” çıktı bölümünde ise yapılan hesaplamaların sonuçları görülebilmekte, önceden belirlenmiş bazı noktalarda gerilme-şekil değiştirme davranışını gösteren diğer diyagramlar çizdirilebilmiştir.

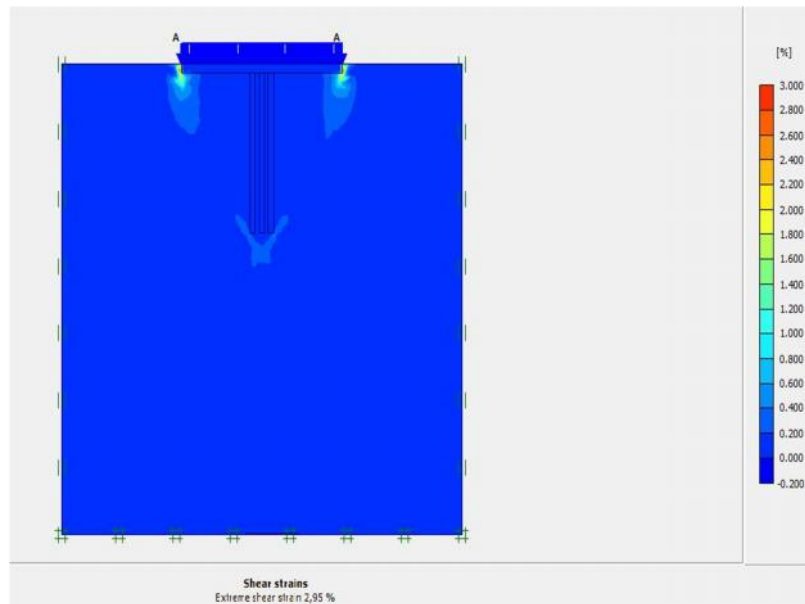
6.4. Kazıklı Radye Temelin İki Boyutlu (2D) Analizleri

Kazıklı radye temelin Plaxis 2D programında oluşturulan sistem modellemesinden, malzeme özellikleri ve yükleme tanımlandıktan sonra yapılan çözümleme sonucunda sistemde oluşan; toplam deplasman, kayma deformasyonu ve hacimsel deformasyon sonuçları incelenmiştir.

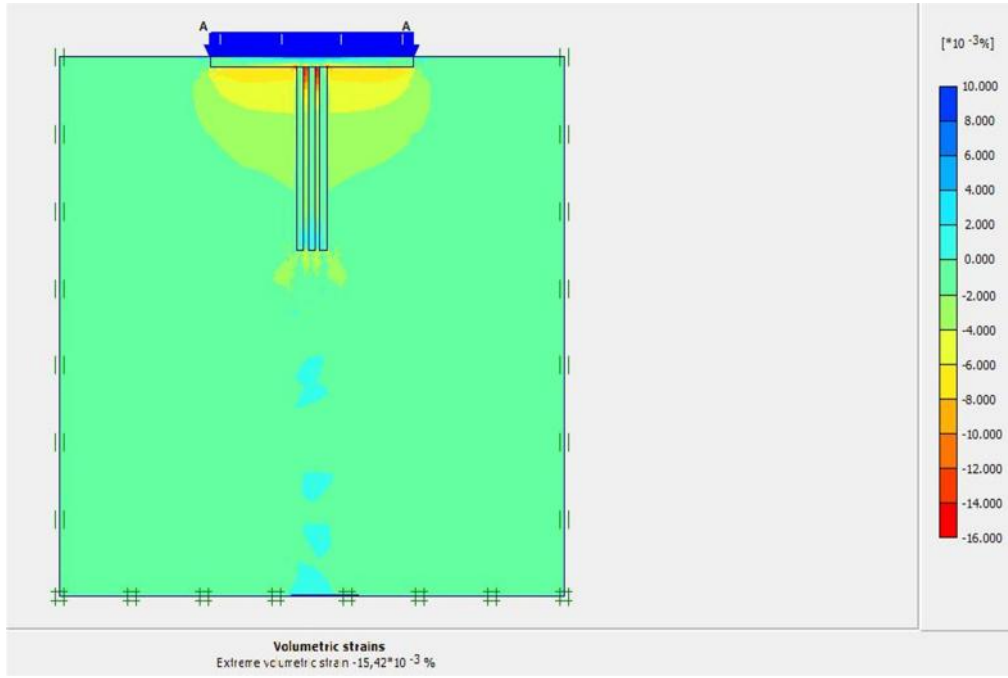
Kazıklar arasındaki mesafenin $s=2D$, $s=3D$, $s=4D$, $s=6D$ ve $s=8D$ aks aralığı için yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Sırasıyla Şekil 6.5 – Şekil 6.19’ de gösterilmiş ve irdelenmiştir.



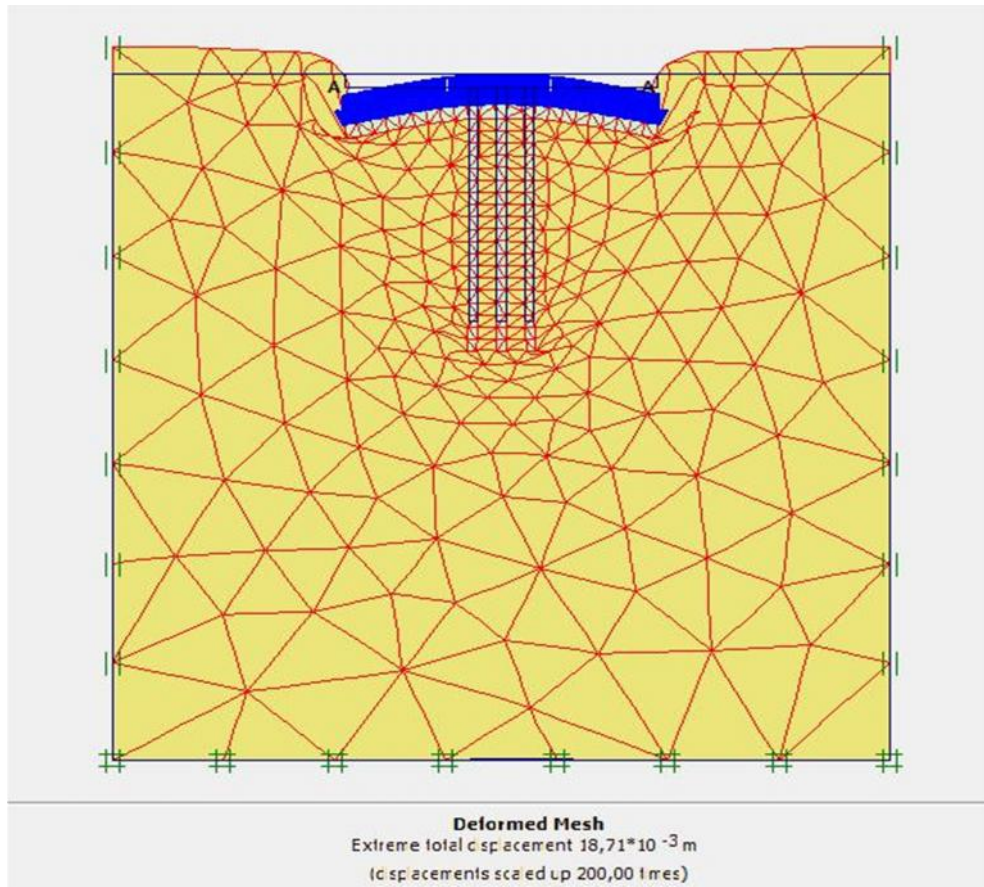
Şekil 6.5. $s=2D$ için kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



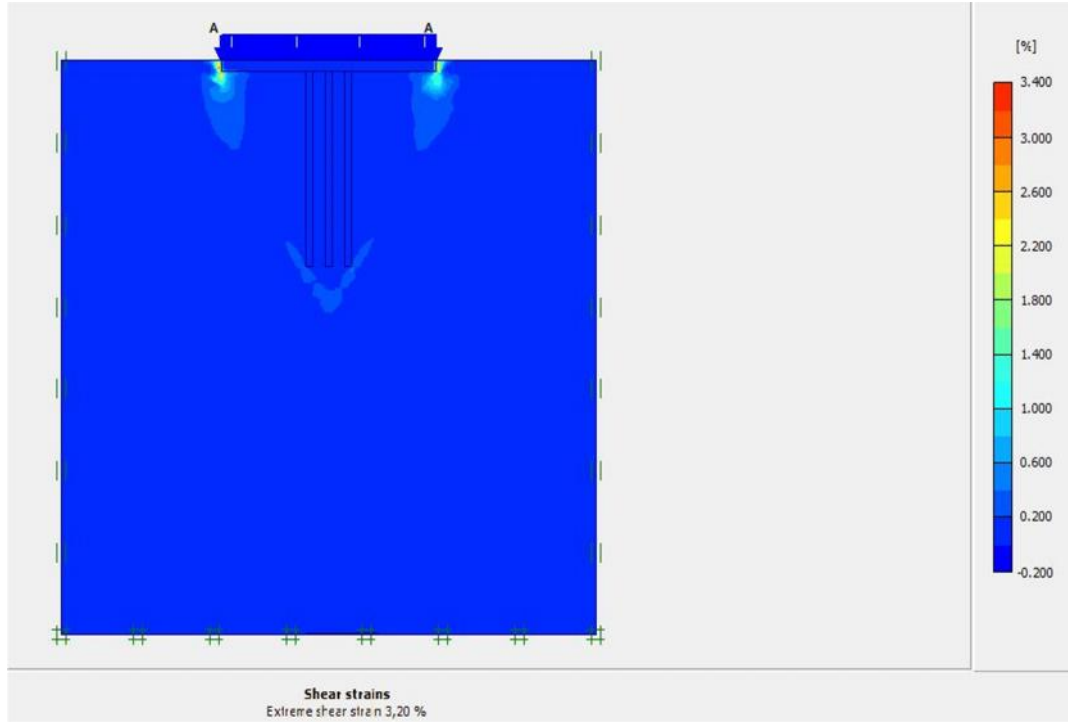
Şekil 6.6. $s=2D$ için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



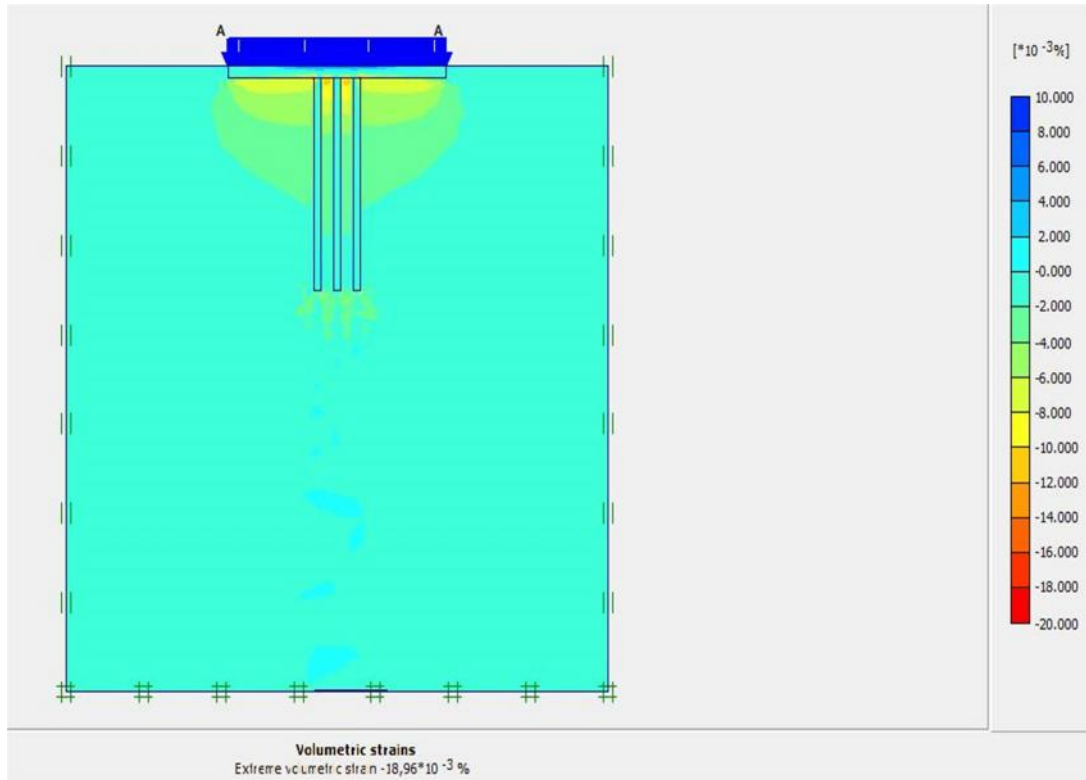
Şekil 6.7. s=2D için kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



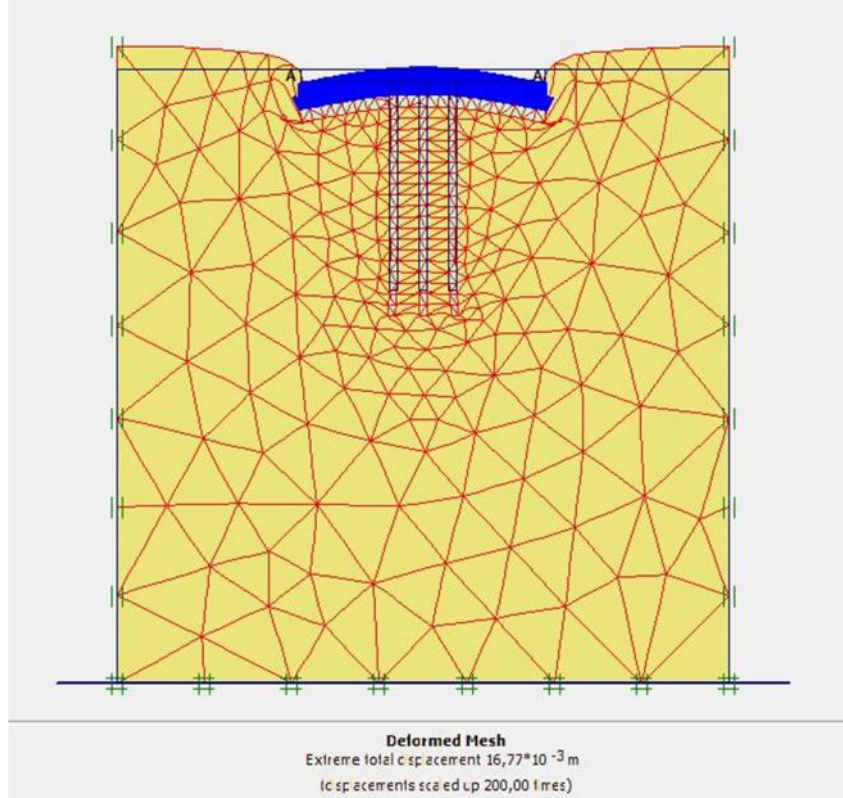
Şekil 6.8. s=3D için kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



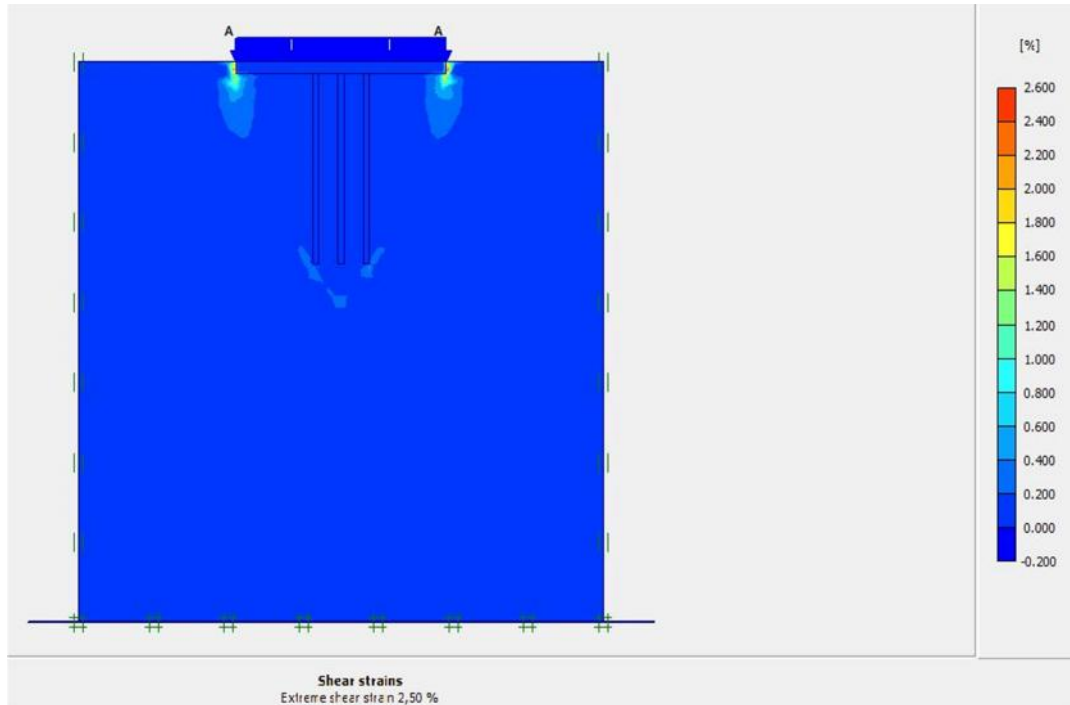
Şekil 6.9. s=3D için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



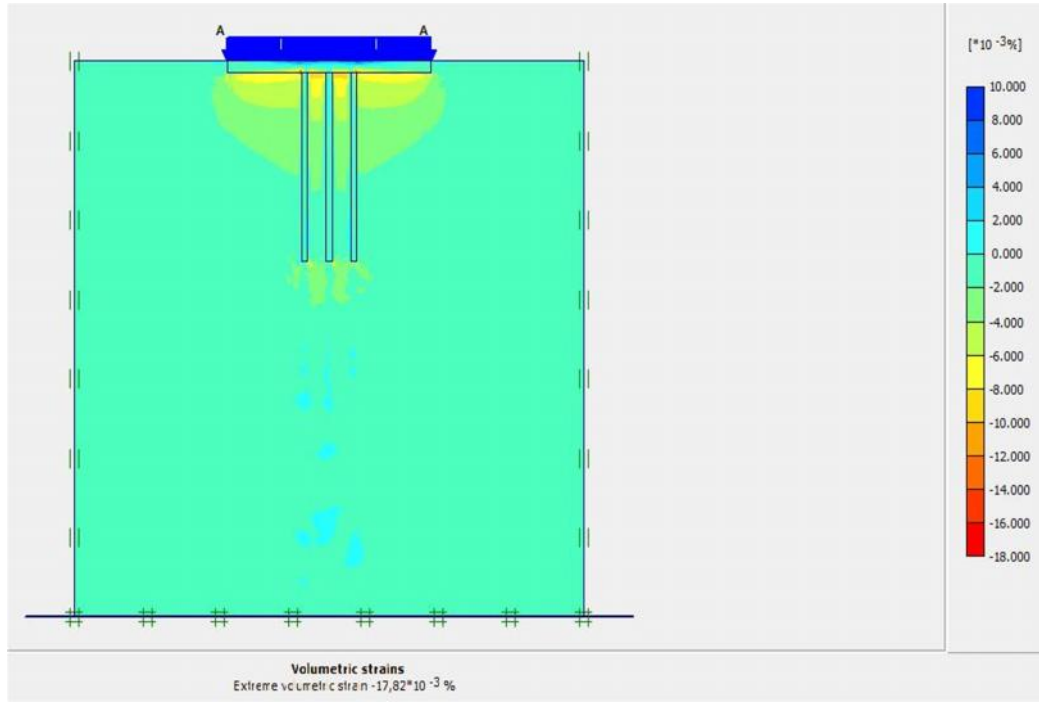
Şekil 6.10. s=3D için kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



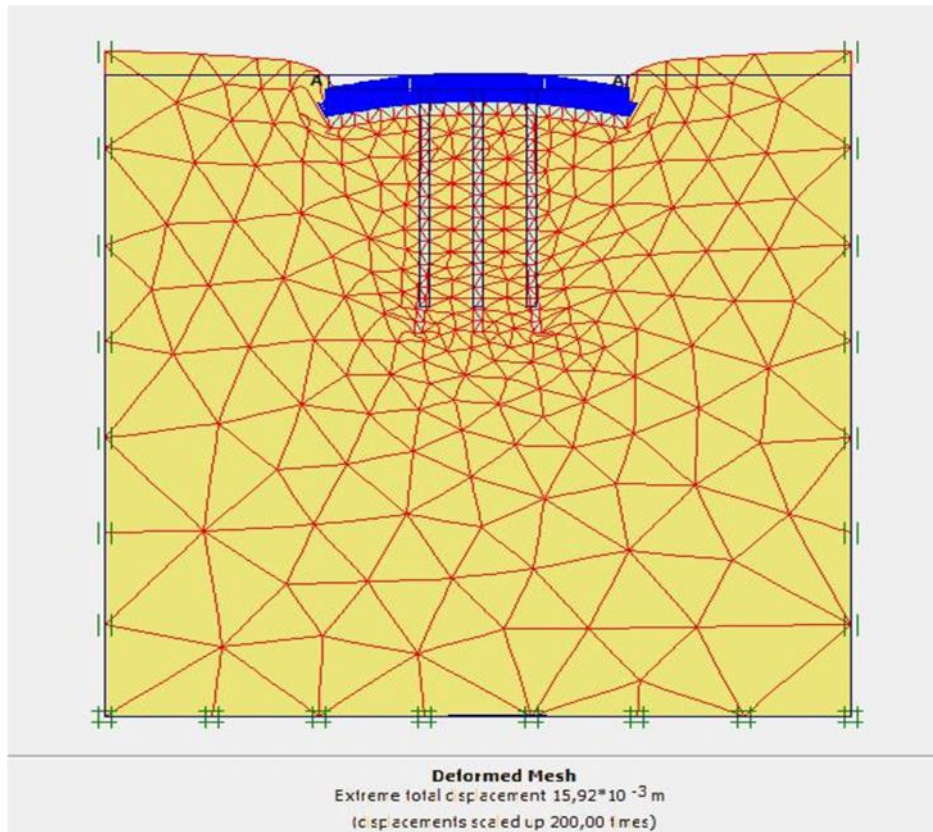
Şekil 6.11. $s=4D$ için kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



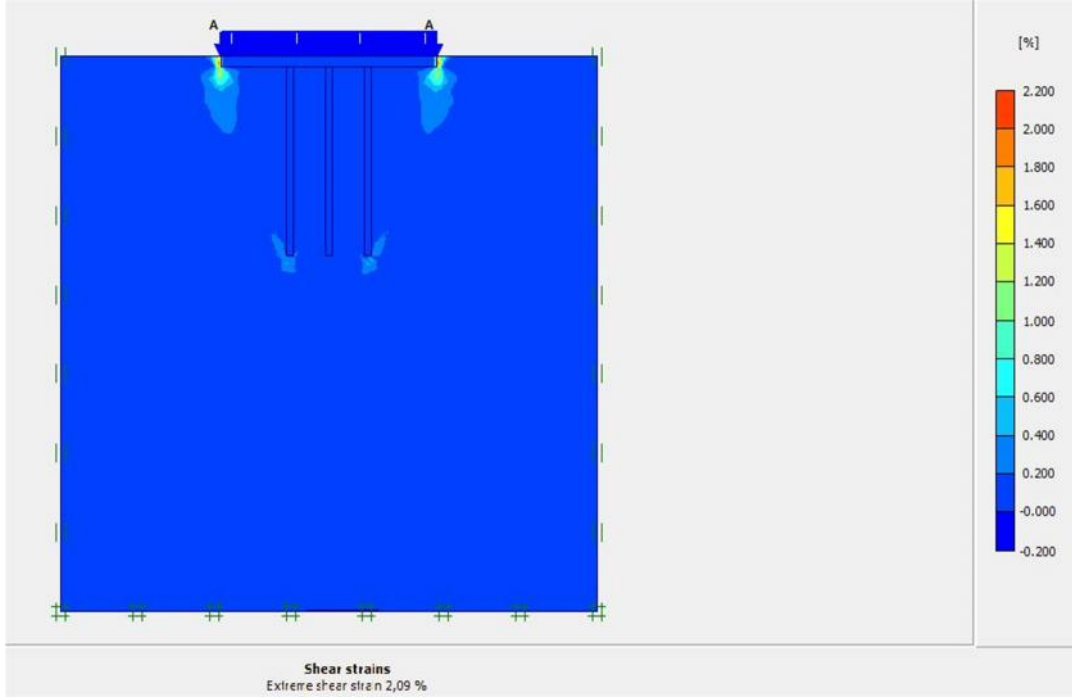
Şekil 6.12. $s=4D$ için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



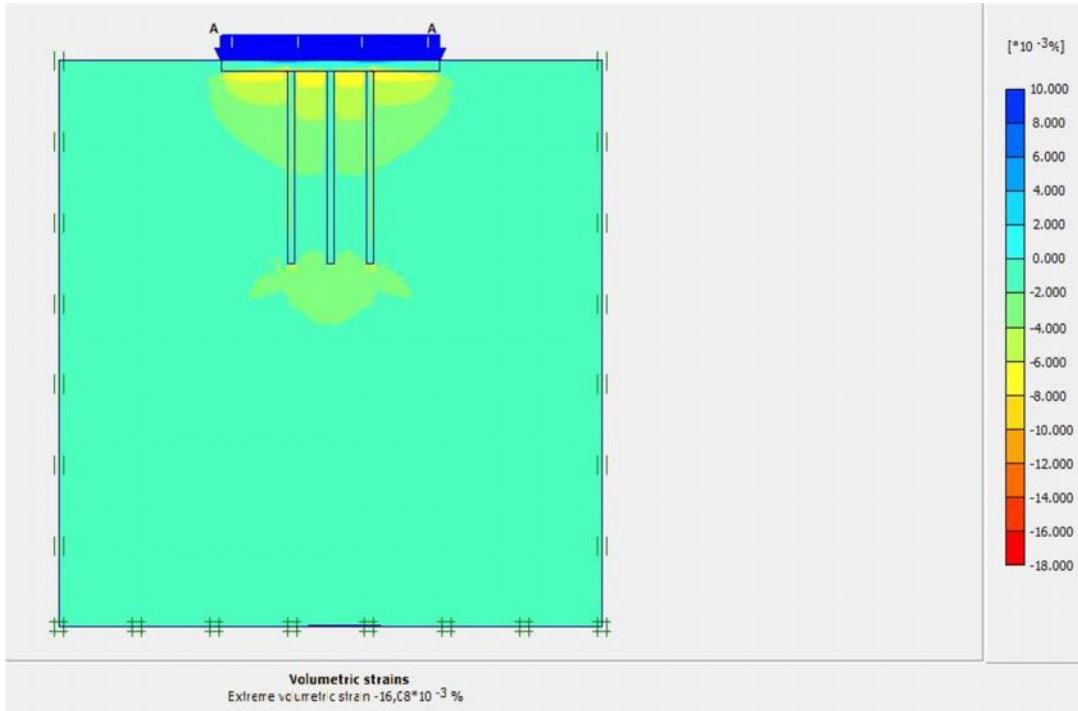
Şekil 6.13. $s=4D$ için kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



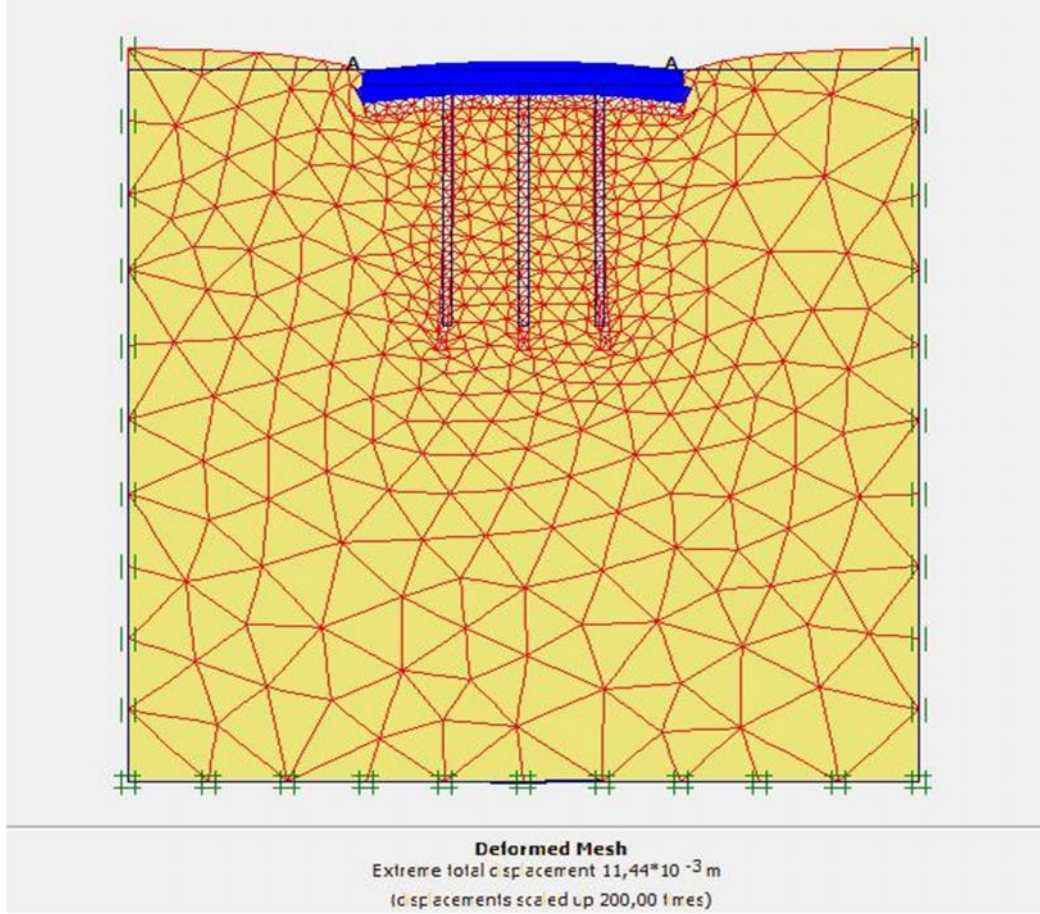
Şekil 6.14. $s=6D$ için kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



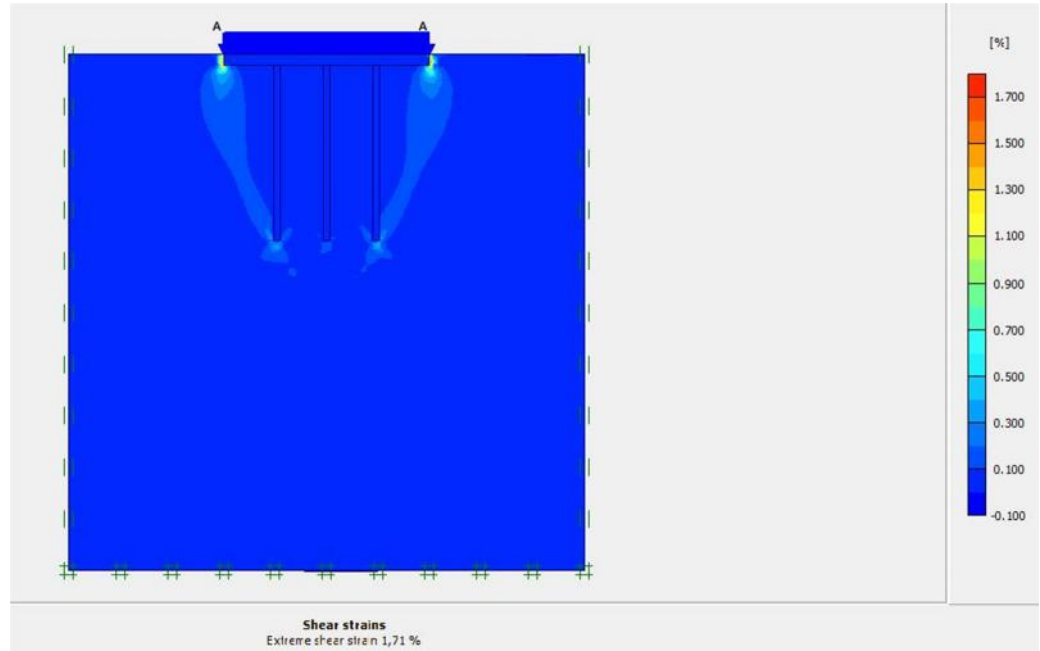
Şekil 6.15. $s=6D$ için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



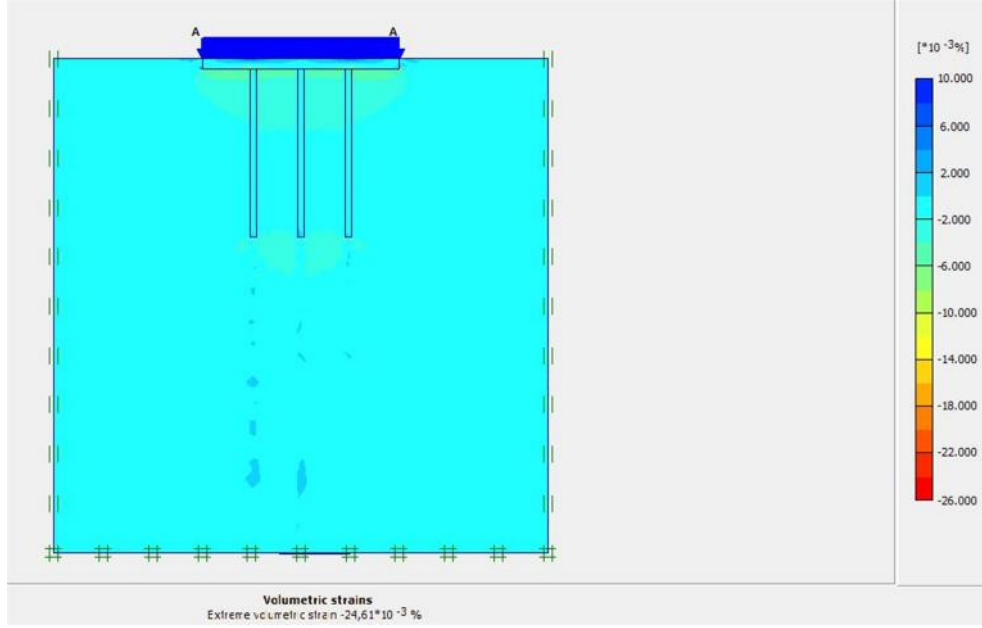
Şekil 6.16. $s=6D$ için kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



Şekil 6.17. $s=8D$ için kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



Şekil 6.18. $s=8D$ için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



Şekil 6.19. $s=8D$ için kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon

Kazıkların aks aralıklarına göre Plaxis 2D programında çözümlenen modellerde en büyük düşey deplasman (oturma) miktarı $s=2D$ kazık aks aralığı çözümüne bağlı olmak üzere 18,31 mm düzeyinde bulunmuştur (Şekil 6.5). En düşük düşey deplasman $s=8D$ kazık aks aralığına bağlı modelde 11,44 seviyesinde gerçekleşmektedir (Şekil 6.17).

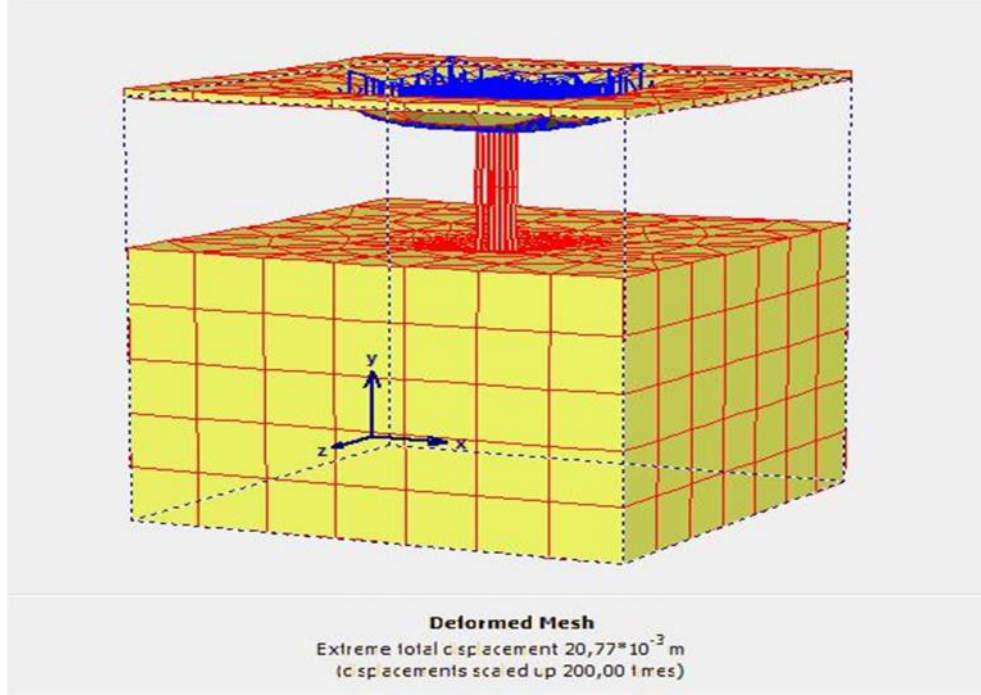
Kayma deformasyonu % 1,71 – % 3,20 miktarında oluşmakta olup, radye temel kenarında en büyük değere ulaşarak en alt kazık yüzeyi çevresine doğru sönümlenmektedir. $s=3D$ aks mesafesinde kayma deformasyonu % 3,20 ile en büyük değere ulaşmıştır (Şekil 6.9).

Kazık – radye temel birleşiminde en büyük kayma ve hacimsel deformasyon değerleri oluşmaktadır. % 0,024 ile en büyük hacimsel deformasyon değeri $s=8D$ aks mesafesine bağlı oluşmuştur (Şekil 6.19). %0,015 ile %0,024 arasında değişen değer en alt kazık ucu çevresi seviyesinde gerçekleşmiştir.

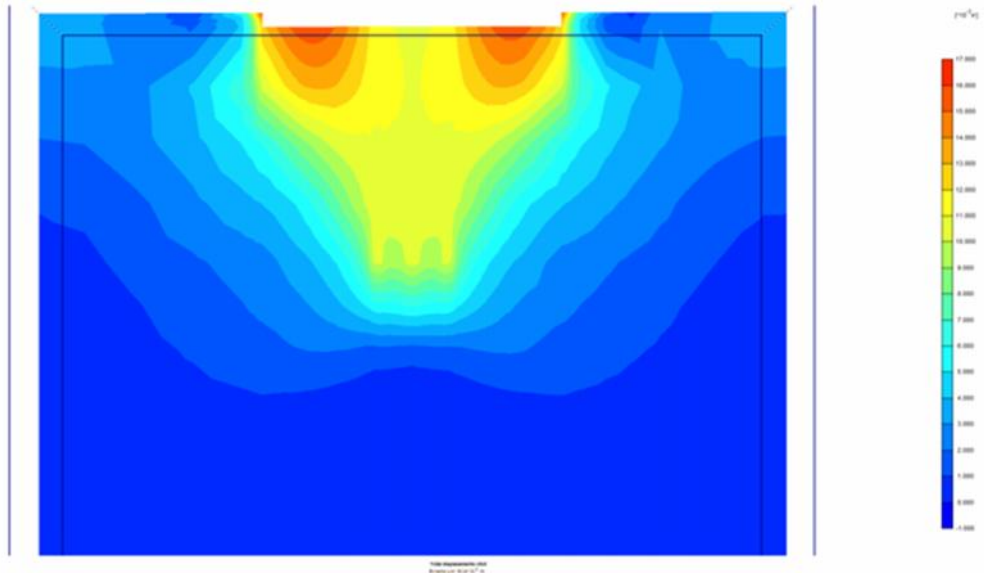
6.5 Kazıklı Radye Temelin Üç Boyutlu (3D) Analizleri

Kazıklı radye temelinin Plaxis 3D Foundation programında yapılan sistem modellemesinde, malzeme özellikleri ve yükleme tanımlandıktan sonra oluşan düşey deplasman, kayma deformasyonu, hacimsel deformasyon, incelenmiştir.

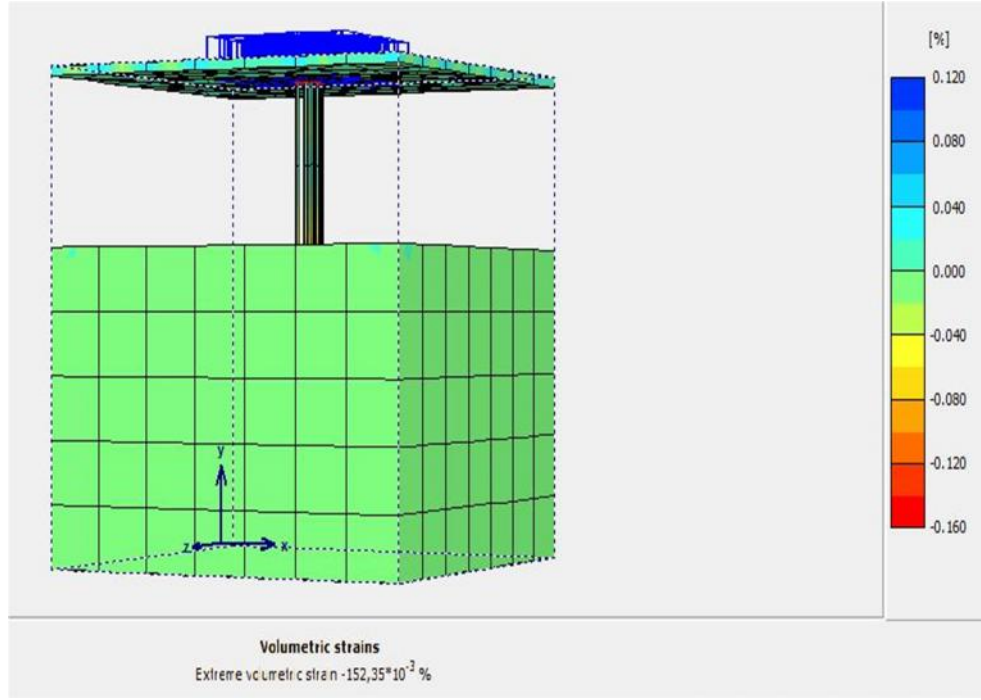
Kazıklar arasındaki mesafenin $s=2D$, $s=3D$, $s=4D$, $s=6D$ ve $s=8D$ aks aralığı için yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Sırasıyla Şekil 6.20 – 6.39’ da gösterilmiş ve irdelenmiştir.



Şekil 6.20. $s=2D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



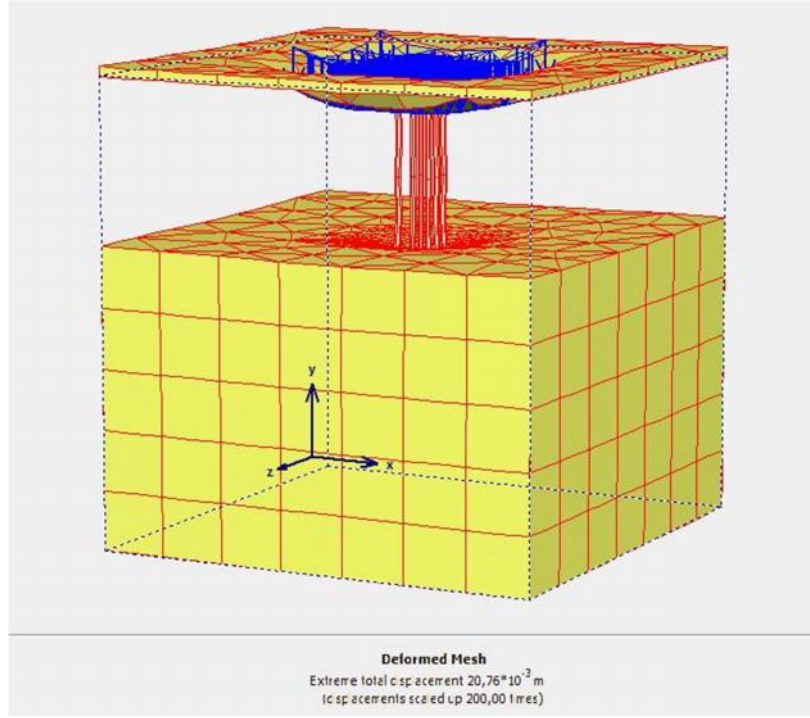
Şekil 6.21. $s=2D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman kesiti



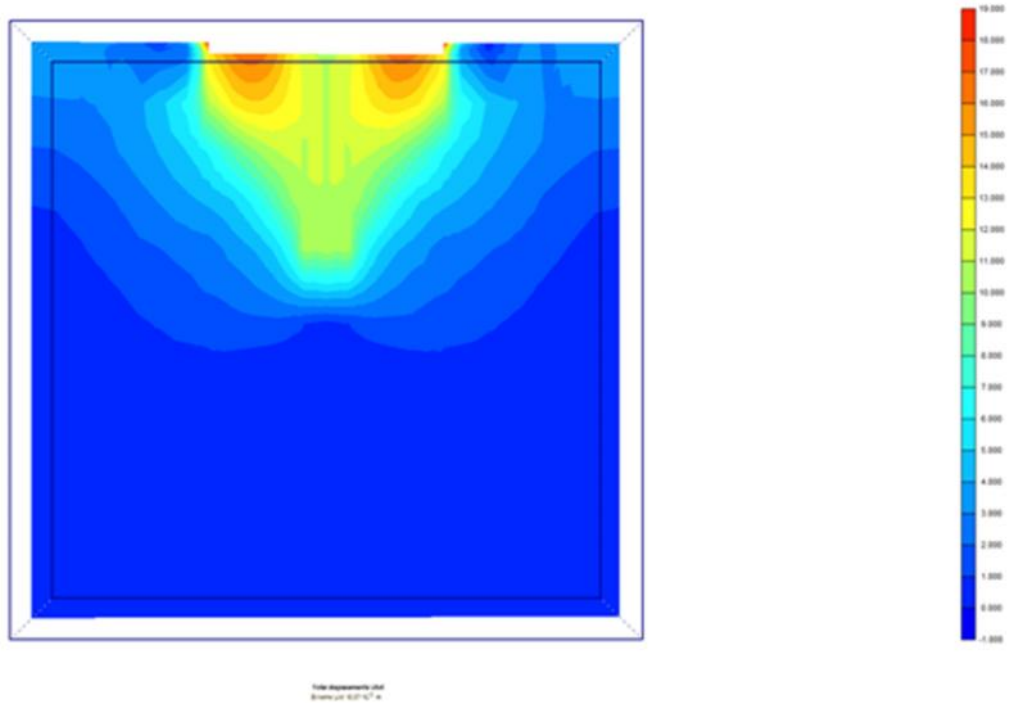
Şekil 6.22. s=2D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



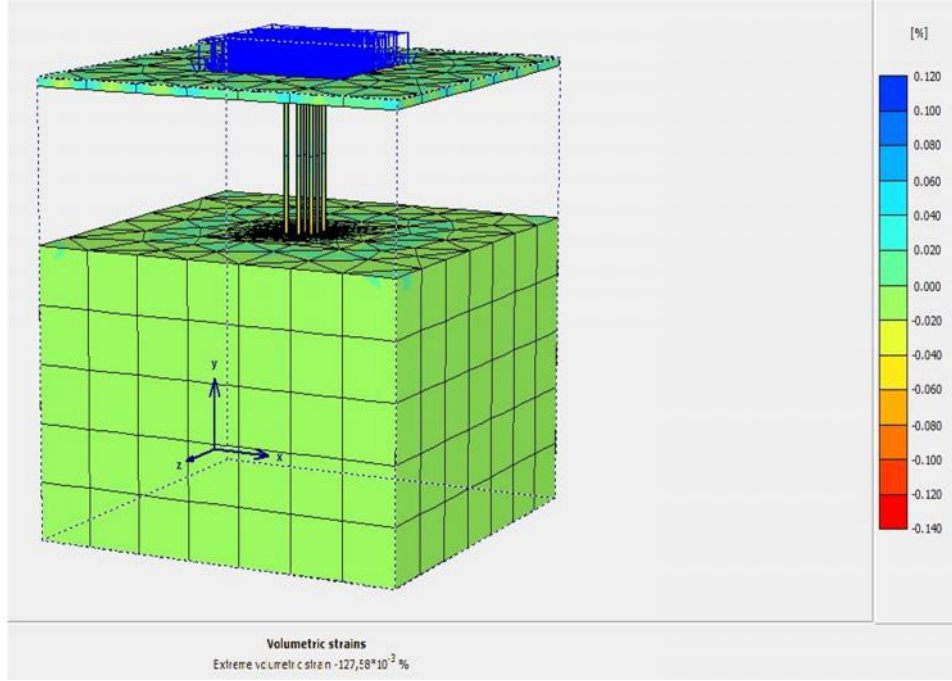
Şekil 6.23. s=2D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



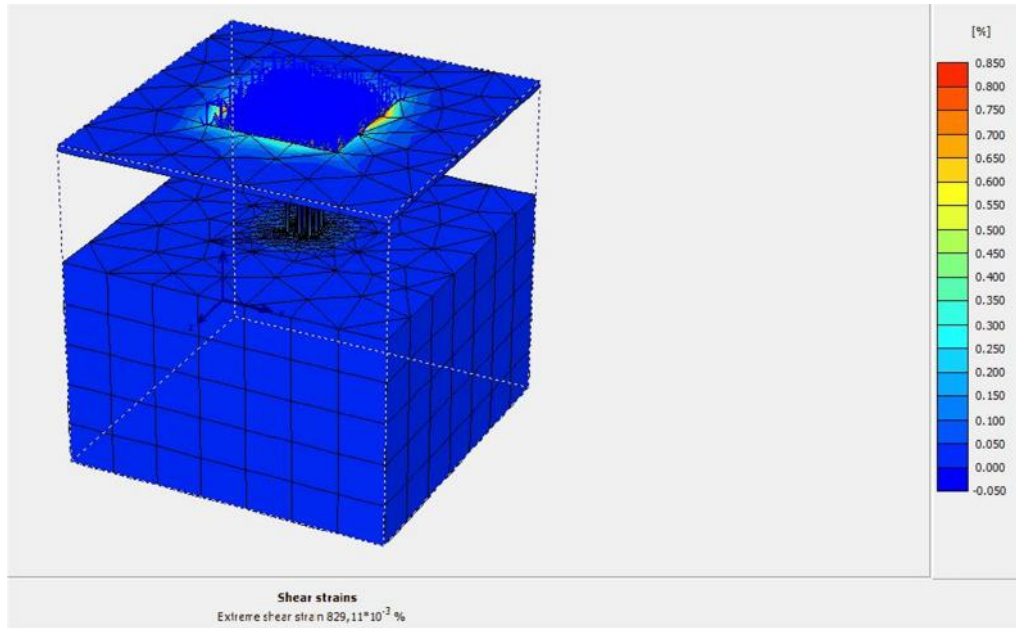
Şekil 6.24. s=3D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



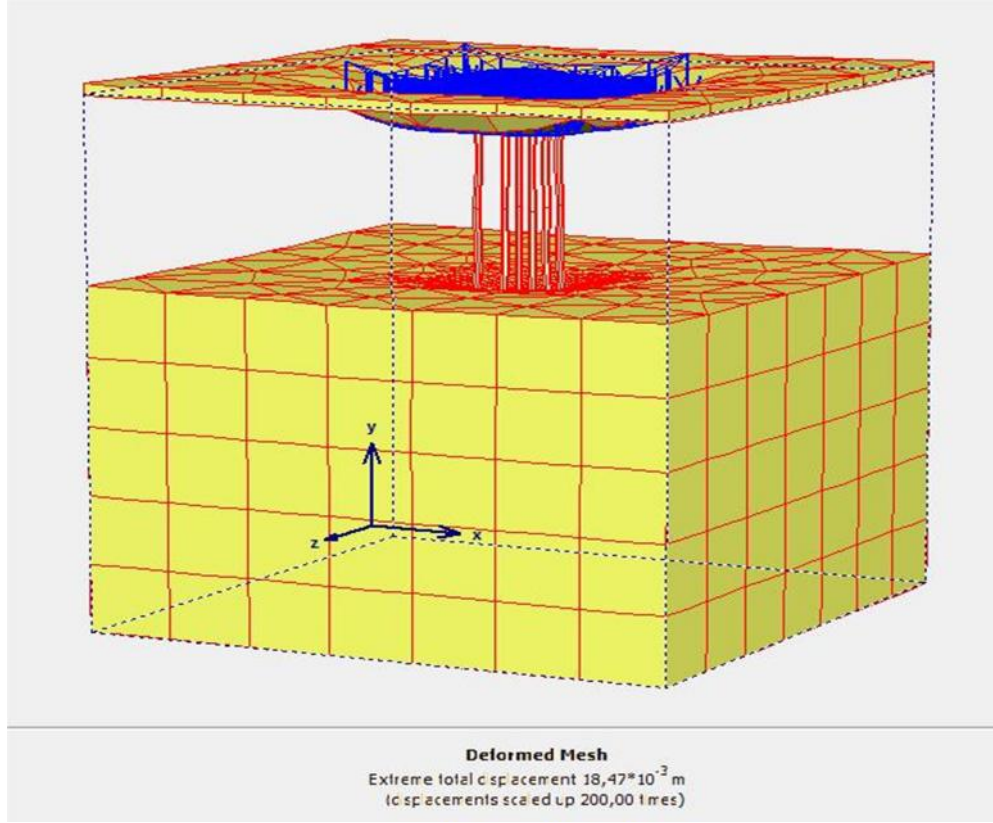
Şekil 6.25. s=3D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman kesiti



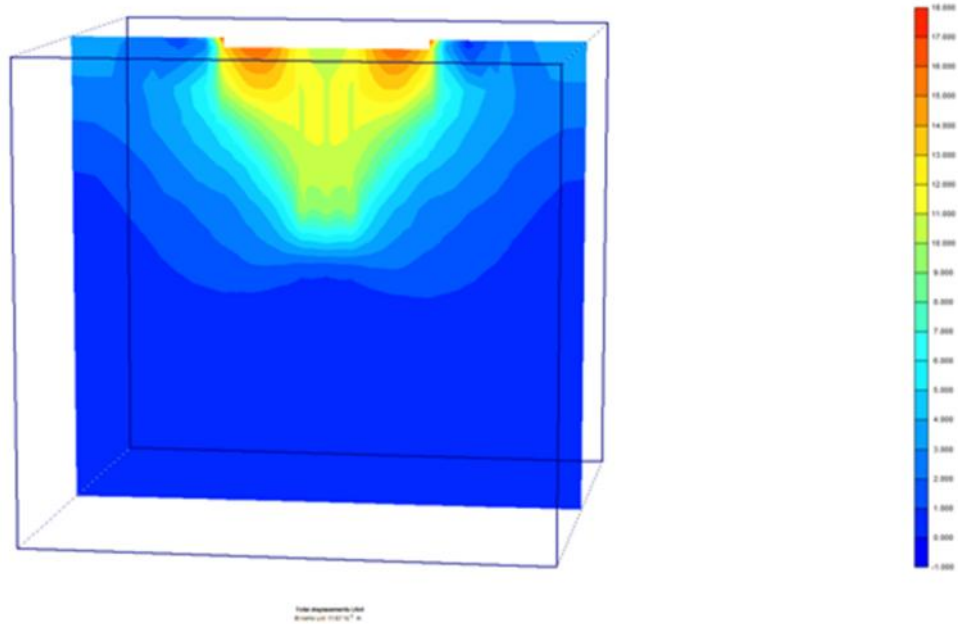
Şekil 6.26. s=3D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



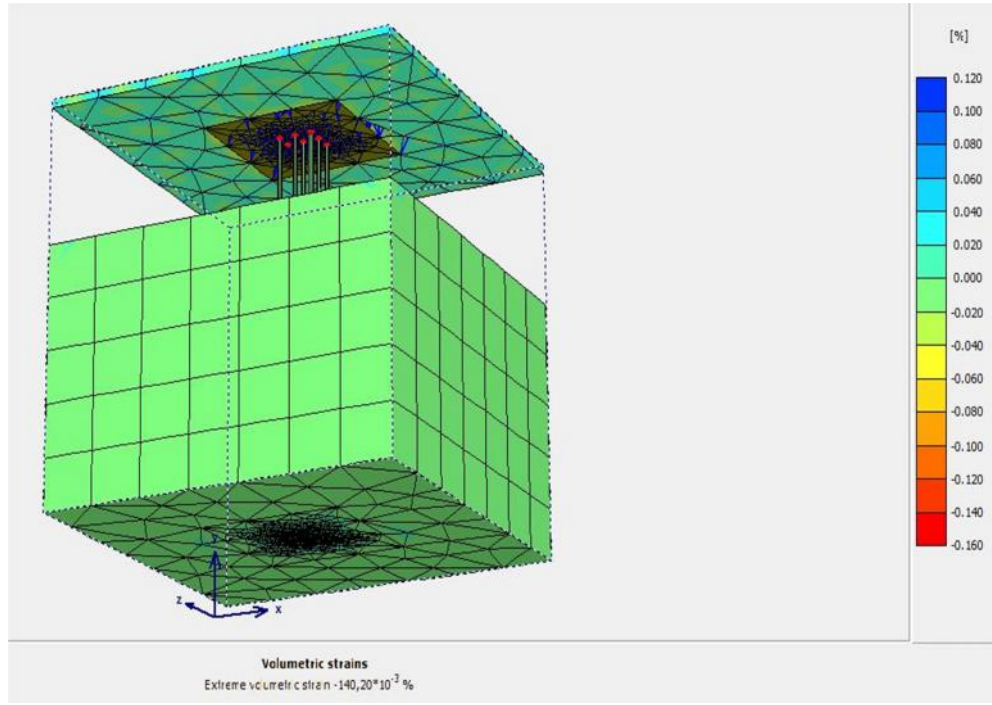
Şekil 6.27. s=3D için kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



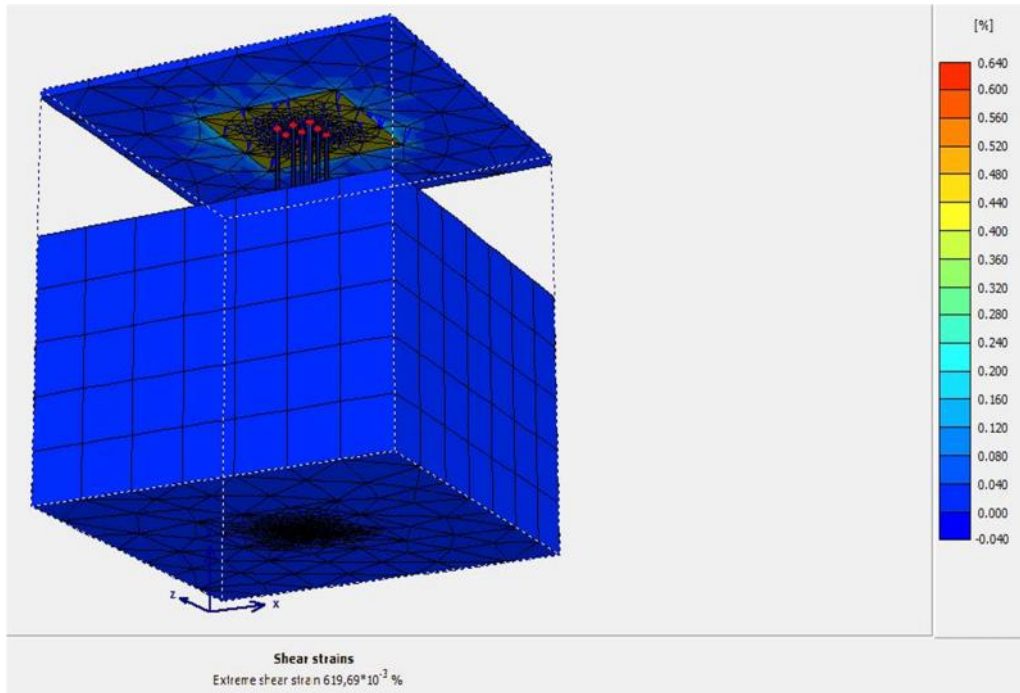
Şekil 6.28. s=4D için 3x3 kazıklı radye temel sisteminde oluşan düşey deplasman



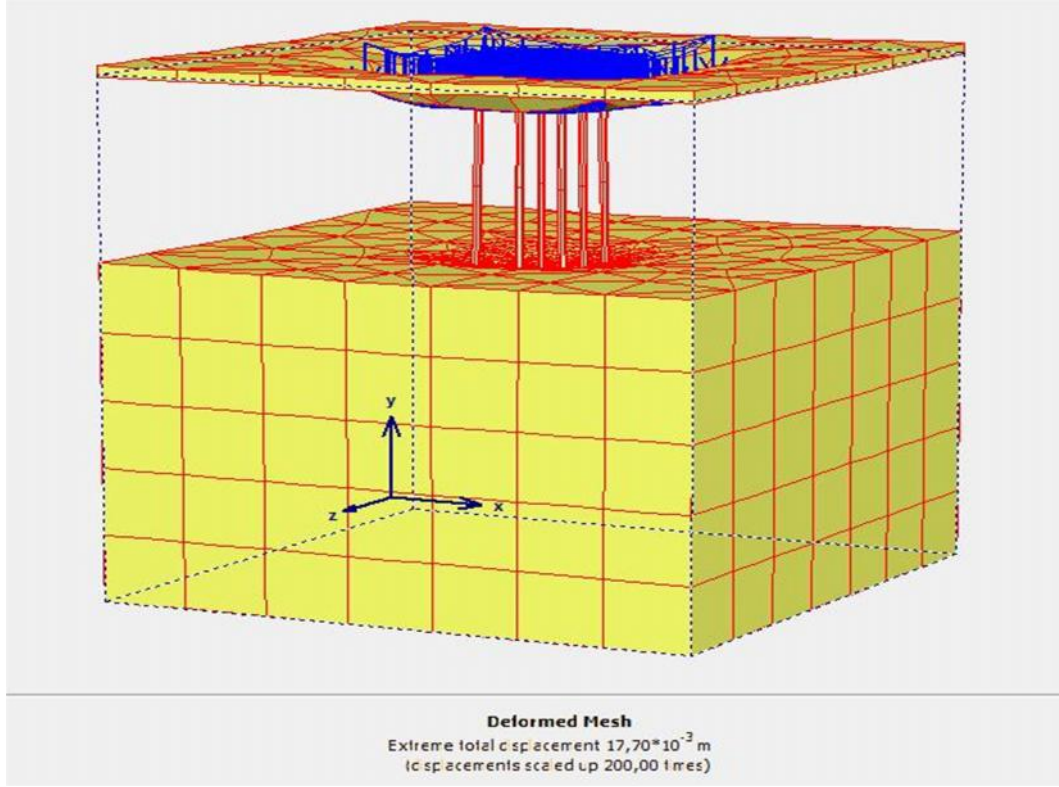
Şekil 6.29. s=4D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman kesiti



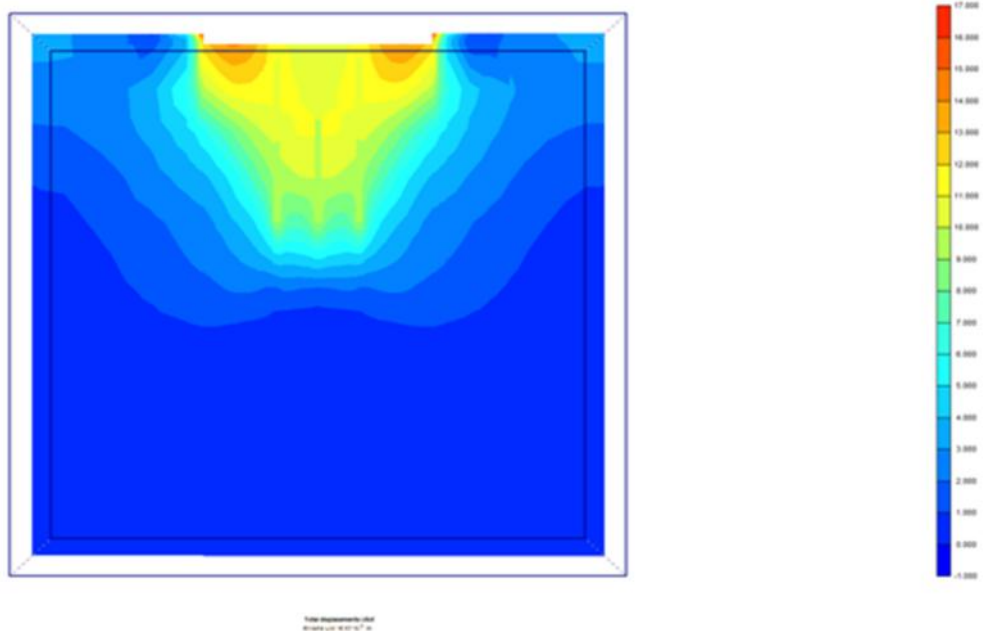
Şekil 6.30. $s=4D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



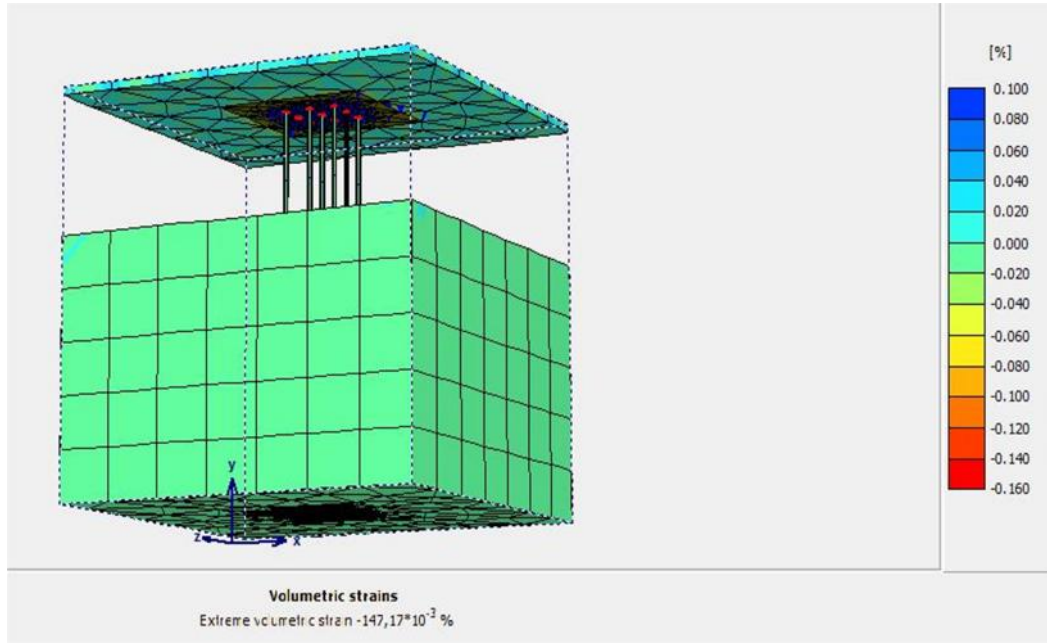
Şekil 6.31. $s=4D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



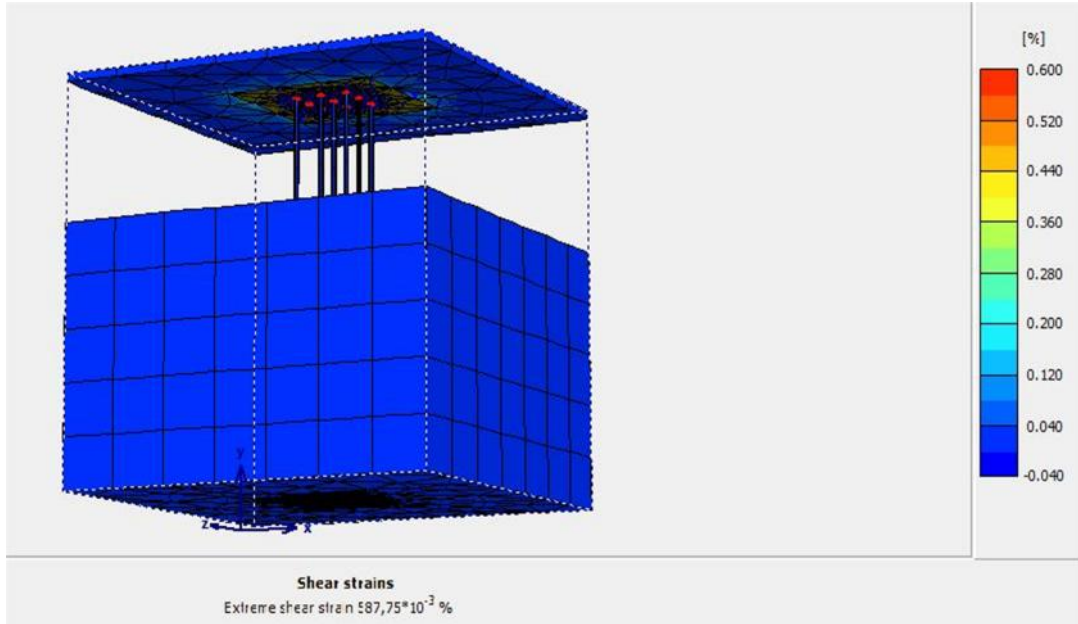
Şekil 6.32. s=6D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



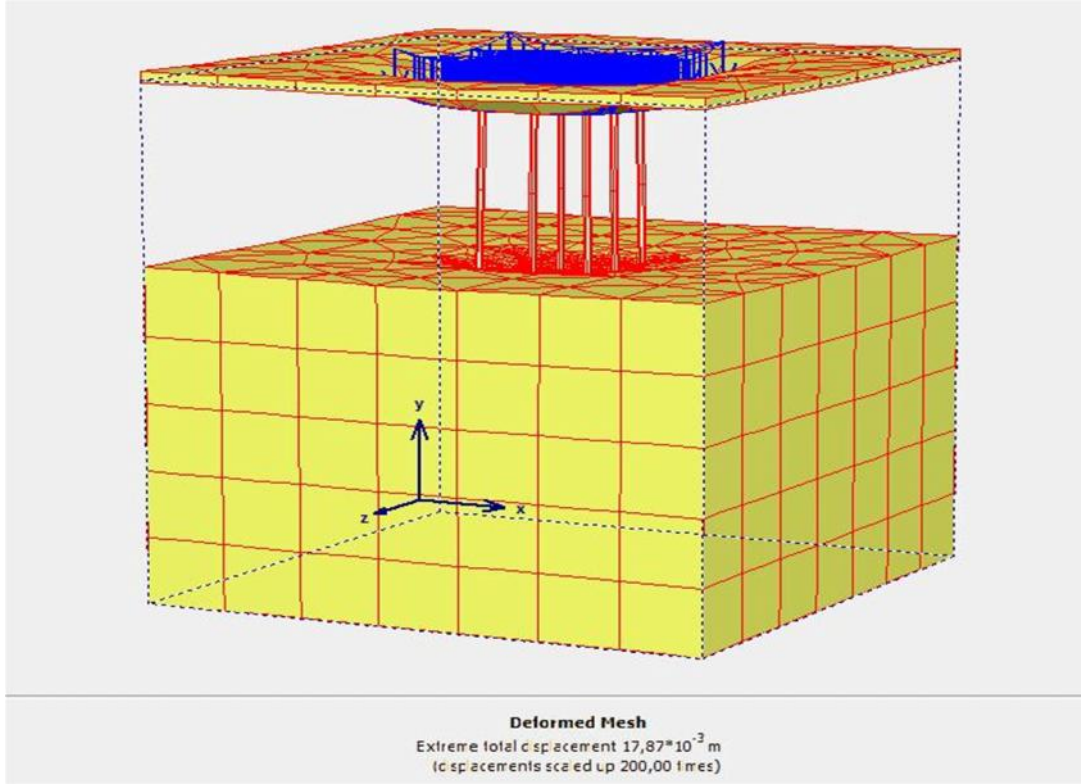
Şekil 6.33. s=6D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman kesiti



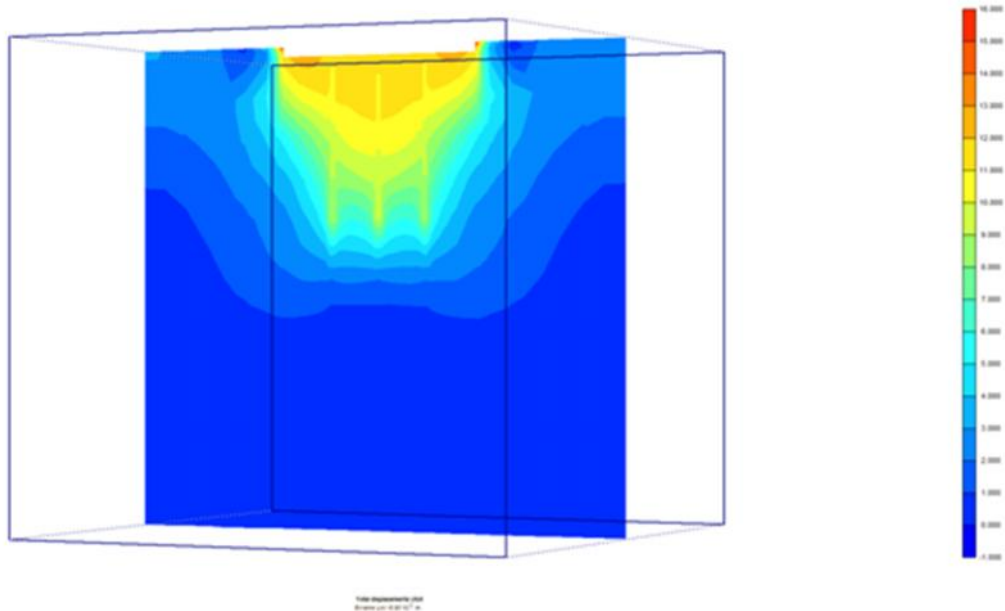
Şekil 6.34. $s=6D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



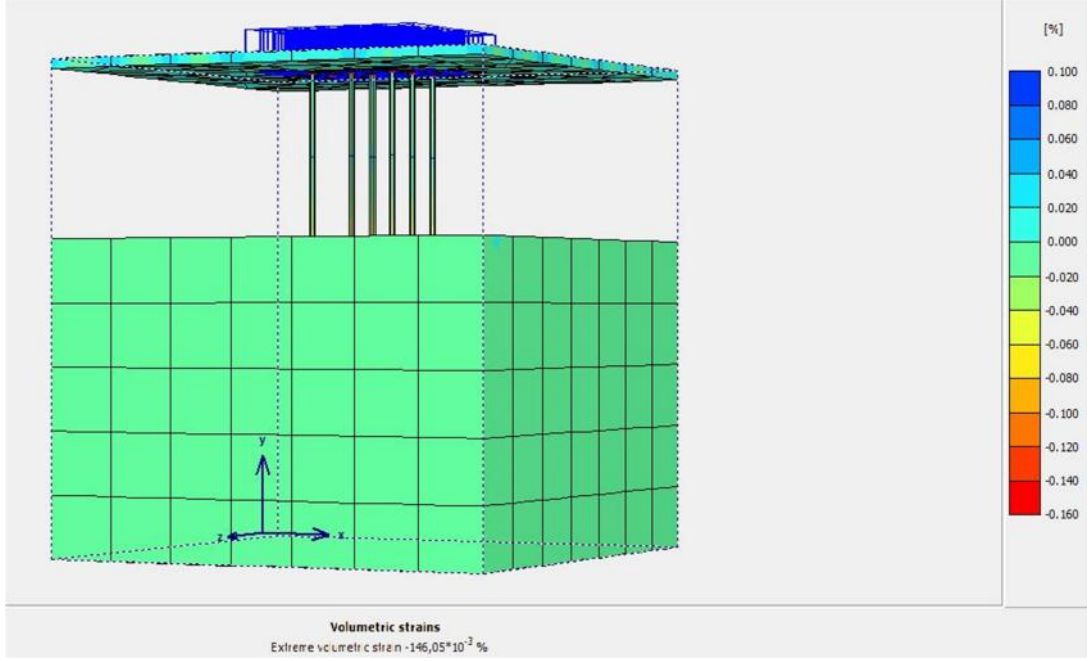
Şekil 6.35. $s=6D$ için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu



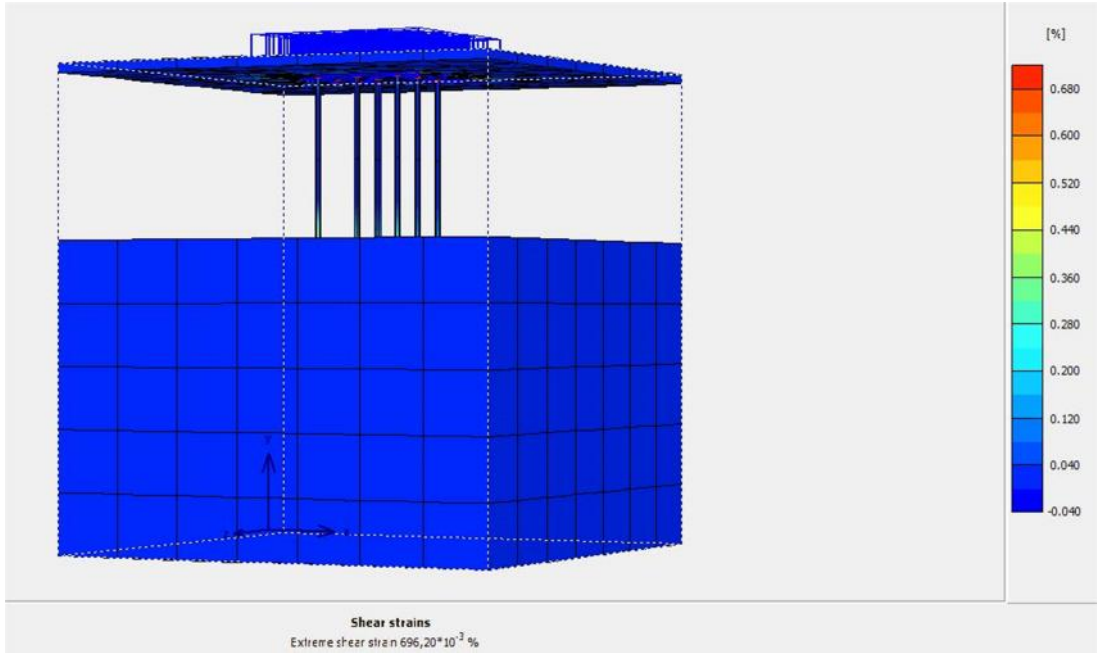
Şekil 6.36. $s=8D$ için 3x3 Kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman



Şekil 6.37. $s=8D$ için 3x3 Kazıklı radye temelde oluşan düşey deplasman kesiti



Şekil 6.38. s=8D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan hacimsel deformasyon



Şekil 6.39. s=8D için 3x3 kazıklı radye temelde oluşan kayma deformasyonu

Plaxis 3D Foundation' da s=2D, s=3D, s=4D, s=6D ve s=8D kazık aks aralıklarına göre yapılan model çözümlerinde en büyük düşey deplasman 20,77 mm ile s=2D aks aralığı modelinde oluşmuştur (Şekil 6.20). En düşük düşey deplasman, s=6D aks aralığına bağlı modelde 17,7 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 6.32).

Oluşturulan kazık kesitinde, düşey deformasyon 8 mm ile 17 mm arasında değişmektedir. Kazıklı bölgede minimum değerler oluşurken, radye temel dışı yüzey bölgeye yakın kısımlarda uç değerler oluşmuştur (Şekil 6.21).

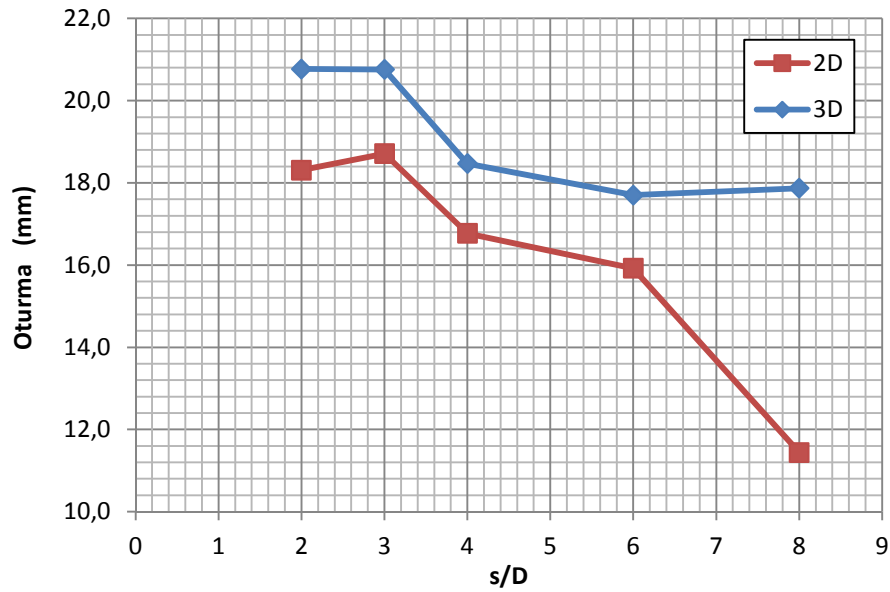
Sistemlerde oluşan kayma deformasyonları % 0,82 – 0,58 mertebesinde gerçekleşmiştir. En büyük değerlere kazık - radye birleşimi kazık çevresinde ulaşılmıştır.

Hacimsel deformasyon en büyük değer %0,152 ile $s=2D$ aks mesafesine bağlı modelde oluşmuştur (Şekil 6.22). %0,152 – 0,127 arasında değişen hacimsel deformasyon en alt kazık çevresi tabakasında oluşmaktadır.

6.6. İki (2D) ve Üç Boyutlu (3D) Analizlerin Karşılaştırılması

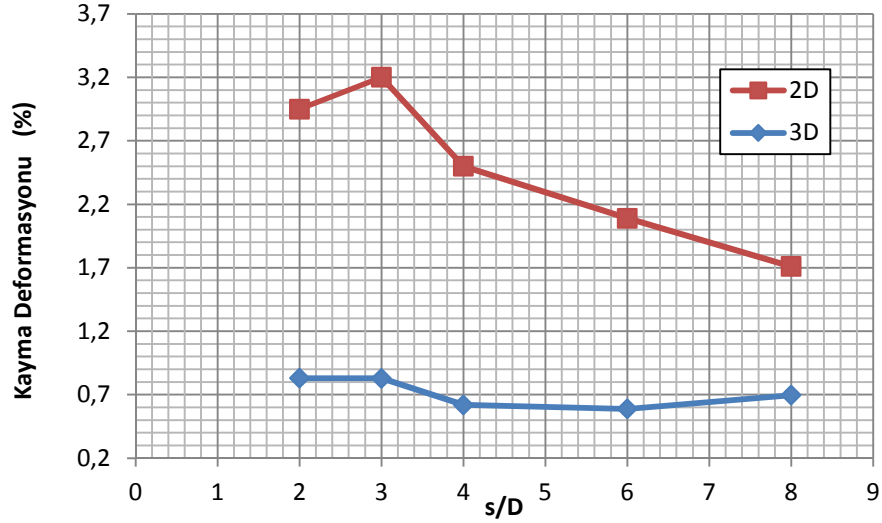
Kazıkların aks aralıklarına bağlı olarak killi bir zeminde inşa edilen kazıklı radye temel sisteminde kazıklar arası mesafenin etkisinin iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) analizlerinin karşılaştırılması ele alınmıştır.

Kazıklar arası aks mesafesine bağlı olarak oturmanın, kayma deformasyonun ve hacimsel deformasyon değerlerin değişimi sırasıyla Şekil 6.40, Şekil 6.41, Şekil 6.42’de verilmiştir.



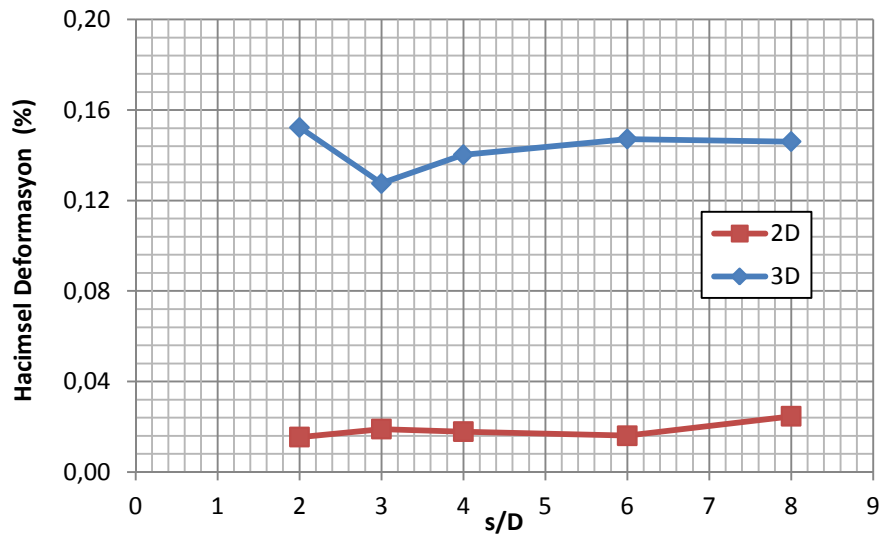
Şekil 6.40. Kazıklı sistemde aks mesafesine bağlı oluşan oturma (düşey deplasman) grafiği

Kazıklar aks mesafesine bağılı düşey deplasman analizlerinde, 3D analize bağılı oluşan değerler 2D analize göre ortalama daha yüksek mertebelerde gerçekleşmiştir. 3D analizde $s=6D$ aks mesafesinden sonra düşey deplasman değeri sabit kaldığı, 2D analizde ise $s=6D$ aks mesafesinden sonra, kazıklar arası mesafe arttıkça düşey deplasman değeri dramatik bir şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 6.40).



Şekil 6.41. Kazıklı sistemde aks mesafesine bağılı oluşan kayma deformasyonu grafiğı

Kayma deformasyonu analizinde, aks mesafesine bağılı üç boyutlu (3D) analizdeki değerler $s \geq 4D$ sabit değerde kaldığı, iki boyutlu analizde en yüksek değere $s=3D$ aks aralığında ulaştığı, bu değerden ($s=3D$) sonra lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 6.41).



Şekil 6.42. Kazıklı sistemde aks mesafesine bağılı oluşan hacimsel deformasyon grafiğı

3D analizde oluşan hacimsel deformasyon, 2D analizde oluşan hacimsel değere göre 7 kat mertebesinde fazla oluşmuştur (Şekil 6.42). Aks mesafesi artışına bağlı olarak hacimsel deformasyon, belli aks aralığına kadar düşüş gösterirken ($S=4D$), bu değerden sonra daha kararlı bir davranış göstermektedir.

İki boyutlu analizde kullanılan radye, kazık, zemin, yapısal elemanlar ve yükler birim genişlik için tanımlanırken, üç boyutluda kazık çapı, radye uzunluğu gibi 3. boyutlar ölçülendirilerek daha gerçekçi bir tanımlama ve hesaplama oluşturulmuştur. Dolayısıyla üç boyutlu analizler (3D), iki boyutlu (2D) analizlere göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Kazık grup modelinin radye temel alanındaki 3D model analizinde, yük – deformasyon - alan olarak detaylı sonuçları analiz edilirken, iki boyutluda üçüncü boyutun etkisi görülememektedir.

BÖLÜM VII

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kazıklı radyenin bir elemanı olarak; kazıkların yük-oturma davranışı, tekil kazığın davranışından farklı olmaktadır. Kazıklar arası yük dağılımı da farklılık göstermektedir. Düzgün yayılı yük altında yüksek plastisiteli kil zeminde köşe kazıklar en fazla yükü alırken, merkeze doğru yük miktarı azalmaktadır.

Temel elemanları, zemin ve üstyapı arasındaki etkileşimden dolayı kazıklı radye temellerin analizi karmaşıktır. Geleneksel yöntemlerle dikkate alınamayan birçok parametre ileri sonlu elemanlar veya benzeri yöntemler kullanan yazılımlarla daha kolay modellenenilmektedir. Gelişen teknoloji sayesinde yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile çözüm süreleri ve olanakları da günden güne iyileşmektedir.

Bu çalışmada kazıklar arası mesafenin killi zeminlerde inşa edilen kazıklı radye temel sistemindeki etkisinin literatür ile birlikte iki ve üç boyutlu modellerde analizi yapılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kazıklı radye temelin yük-oturma davranışını belirleyen önemli parametreler arasında kazık grup alanı/radye alanı, veya kazık grup boyutu/radye boyutu, kazık aralığı ve kazık boyu gibi geometrik özellikler yer almaktadır. Birçok araştırmacı bu parametreler için optimum değerler önermektedir.
- Kazıklı radye temel modellemesi için üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımı, parametrelerin tanımlanması, ölçülendirme, ve hesap aşamasında yapısal elemanların alan etkisinin incelenmesi açısından daha gerçekçi ve uygundur.
- Kayma deformasyonun, radye temel kenarında en büyük değerlere ulaşp kenar kazıklar alt kotuna doğru minimum değerlere ulaştığı görülmüştür.
- Kazık aks aralığı arttıkça hacimsel deformasyon ve kayma deformasyonu belli bir değerden ($s=4D$) sonra sabit kalmaktadır.

- İki boyutlu (2D) analizde oturma miktarı, belli ($s=6D$) değerden sonra kazık aks aralığı arttıkça dramatik bir azalma gösterirken, üç boyutlu (3D) analizde azalarak belli bir değerden ($s=6D$) sonra sabit kalmaktadır.
- Düşey deplasman ve hacimsel deformasyon değerlerinde, üç boyutlu (3D) analizlerin sonuçları, iki boyutlu (2D) analiz sonuçlarına göre daha yüksek değerler vermiştir.
- Üç boyutlu analizlerde kazık aralığını belli bir değerden ($s=6D$) daha büyük almak, oturmalarda elde edilecek azalma değerlerinde dikkate alınacak miktarlar vermemektedir.

KAYNAKLAR

- Afacan, K. B., Perde kazıkların düşey taşıma gücünün sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 29 – 30, 2007.
- Berilgen, M., Plaxis ile Hesaplamalı Geoteknik Kursu, *İstanbul Kültür Üniversitesi*, 24 – 26 Mayıs, 2010.
- Bowles, J. E., “Foundation analysis and design, 5th edition, McGraw – Hill International Editions, s. 1175, 1997.
- Brinkgreve and Broere, *Plaxis 3D Foundation v1.6 Manual*, 2006.
- Burland, J.B., Piles as settlement reducers, 19th National Italian Geotechnical Conference, Pavia, Italy, s. 21 – 34, 1995.
- Castelli, F. and Maugeri, M., Simplified Nonlinear Analysis for Settlement Prediction of Pile Groups, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, s. 76 – 84, 2002.
- Clancy, P. and Randolph, M. F., An approximate analysis procedure for piled raft foundations, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, s. 849 – 869, 1993.
- Cooke, R. W., Piled raft foundations on stiff clays – A contribution to design philosophy, *Geotechnique*, s. 169 – 203, 1986.
- Coyle, H. M. and Castello, R. R., New Design Correlations for pile design in sand, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1981.
- Das, M. B., Principles of Foundation Engineering, *Pws – Kent Pub.*, California, 1999.
- Davis, E. H. and Poulos, H. G., The analysis of piled raft systems, *Australian Geomechanic Journal*, s. 21 – 27, 1972.

Demirci, T., Zeminlerin rijitlik azalımının düşey yükler altındaki kazıkların davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2012.

Desai, C. S., Johnson, L. D. and Hargett, C. M., Analysis of pile supported gravity lock, **ASCE Journal of Geotechnical Engineering**, s. 1009 – 1029, 1974.

El – Mossallamy, Y., Innovative application of piled raft foundation in stiff and soft subsoil, **Deep Foundations**, s. 426 – 440, 2002.

Engin, H. K. Septanika, E. G. and Brinkgreve R. B. J., Improved embedded beam elements for the modelling of piles, **Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics**, s. 475 – 480, 2007.

Engin, H. K., Çekme Kazıklarının Gömülü Kazık Elemanlarıyla Modellenmesi, 2. **Geoteknik Sempozyumu Bildiriler El Kitabı**, Adana, 2007.

Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. and Elson, W.K., Piling Engineering, 2nd edition, **Surrey University press**, Halstead press, 1992.

Franke, E., El – Mossallamy, Y. And Witmman, P., Calculation methods for raft foundations in Germany, **In Design Applications of Raft Foundations**, s. 283 – 322, 2000.

Fraser, R. A. And Wardle, L.J., Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations, **Geotechnique**, Volume 26, s. 613 – 630, 1976.

Geopublications of Hong Kong, Foundation Design and Construction, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, **The Government of The Hong Kong Special Administrative Region**, Hong Kong, 2006.

Gök, S., Kazıklı radye temellerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, **İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1998.

Gök, S., Kazıklı radye temellerin tasarımı, Doktora Tezi, **İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2007.

Hooper, J. A., Observations on the behaviour of a piled raft foundation on London clay, **Proceedings of the Institution of Civil Enginners**, s. 77 – 90, 1973.

Kaltakçı, V., Kazıklı radye temellerin oturma davranışının iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2009.

Karaşahin, T., Kazıklı radye temellerde yükün kazıklar ve radye arasındaki paylaşımı, Yüksek Lisans Tezi, **İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1999.

Katzenbach, R., Arslan, U., Moorman, C. and Reul, O., Piled raft foundation – Interaction between piles and raft, Darmstadt Geotechnics, **International conference on soil – structure interaction in urban civil engineering**, s. 279 – 296, 1998.

Katzenbach, R. and Moorman, C., Recommendations for design and construction of piled rafts, **15th ICSMFE, Istanbul**, Turkey, s. 927 – 930, 2001.

Ko, H. Y., Atkinson, R. H., Goble, G. G. and Ealy, C. D., Centrifugal modeling of pile foundations, **in Analysis and Design of Pile Foundations**, s. 21 – 41, 1984.

Kumbasar, V. ve Kip, F., Zemin Mekaniği Problemleri, **Çağlayan Kitabevi**, 1999.

Mayne, P. W., and Poulos, H. G., Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations, **ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division**, Volume 125, s. 453 – 460, 1999.

Meyerhof, G. G., Bearing capacity and settlement of pile foundations, **ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division**, s. 195 – 228, 1976.

Mindlin, R. D., Force at a point in the interior of a semi-infinite solid, **Physics**, Volume 7, s. 195 – 202, 1936.

O'Neill, M. W., Caputo, V., De Cock, F., Hartikainen, J. and Mets, M., Case histories of the performance of pile assisted rafts, **ISSMGE TC18 Subcommittee 2 Report**, 2001.

Özdemir O. U., Kazıklı radye temellerde taban basıncı değişiminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2006.

Öztürk, K., Kazıklı radye uygulamaları, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 2008.

Plaxis 2D Version 8.2.

Poulos, H. G., Pile behaviour – theory and application, **Geotechnique**, Volume 9, s. 365 – 415, 1989.

Poulos, H. G., Analysis of piled strip foundations, **7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics**, s. 183 – 191, 1991.

Poulos, H. G. and Davis, E. H., Pile Foundation Analysis and Design, **John Wiley**, Newyork, 1980.

Poulos, H. G., Piled rafts in swelling or consolidating soils, **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, s. 374 – 380, 1993.

Poulos, H. G., An Approximate Numerical Analysis of Pile – Raft Interaction, **International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, s. 73 – 92, 1994.

Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J. ve Chen, L., Comparison of Some Methods for Analysis of Piled Rafts, **Proceedings of 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineerings**, Hamburg, s. 1119 – 1124, 1997.

Poulos, H. G., Practical Design of Piled Rafts in Design Applications of RAFT Foundations, **London**, s. 127 – 155, 2000.

Poulos, H.G., Piled raft foundations: Design and Applications, ***Geotechnique***, s. 95 – 113, 2001a.

Poulos, H. G., Methods of Analysis of Piled raft foundations, A report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations, ***International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering***, 2001b.

Poulos, H. G., Carter, J. P., Small, J. C., Foundations and Retaining Structures – Research and Practice, State of the Art Lecture, ***14th International Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering***, İstanbul, 2001.

Poulos, H. G., Prediction of Behaviour of Piled Building Foundations due to Tunneling Operations, ***Proceedings of 3rd International Symposium on Geotechnical Aspects of Tunneling in Soft Ground***, Toulouse, s. 55 – 61.2002.

Prakash, S. and Sharma, H. D., Pile Foundations in Engineering Practice, ***John Wiley and Sons***, 1990.

Prakoso, W. A. And Kulhawy, F. H., Contribution to piled raft optimum design, ***ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering***, s. 17 – 24, 2001.

Pressley, J. S. and Poulos, H. G., Finite element analysis of mechanics of pile group behaviour, ***International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics***, s. 213 – 221, 1986.

Pajapakse, R., Pile Desing and Construction Rules of Thumb, ***Elsevier Inc.***, Oxford, 2008.

Randolph, M. F., Design of Piled Foundations, ***Cambridge Univ. Eng. Dept., Res. Rep. Soils TR143***, 1983.

Randolph, M. F., Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts, ***Proocedings of 13th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering***, New Delhi, s. 61 – 82, 1994.

Sağlam, N., Kazıklı radye temellerin oturması: Hesap metotlarının ve gerçek problemlerin eleştirel yaklaşımla tekrar incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2003.

Sert, S., Aluviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi, Doktora Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi**, Sakarya, s. 56 – 63, 2003.

Sinha, J. and Poulos, H. G., Piled raft foundation systems in swelling and shrinking soils, **14th ICSMFE**, Germany, s. 1141 – 1144, 1997.

Terzaghi, K. And Peck, R., Soil Mechanics in Engineering Practice, **2nd Edition, John Wiley**, New York, 1967.

Thaher, M. and Jessberger, H. L., The behaviour of pile – raft foundations, investigated in centrifuge model tests, **Centrifuge' 91**, s. 225 – 234, 1991a.

Thaher, M. and Jessberger, H. L., Investigation of the behaviour of pile – raft foundations by centrifuge modelling, **10th ECSMFE**, Italy, s. 597 – 603, 1991b.

Tomlinson, M. J., Foundation design and construction, **7th edition Prentice Hall**, 2001.
Tomlinson, M. J., Pile Design and Construction Practice, **Chapman and Hall**, UK, 2004.

Türkmen, H. K., Rijit kazıklı radyelerin düşey yükler altında taşınması üzerine deneysel bir çalışma, Doktora Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2008.

Van Impe, W. F., Deformation of deep foundations, **10th ECSMFE**, Italy, s. 1031 – 1062, 1991.

Vesic, A. S., Load Transfer in Pile Soil Systems, **Proceeding Conference and Design Installation of Piled Foundations**, Lehigh University, Bethlehem , s. 47 – 73, 1970.

Vesic, A. S., Desing of Pile Foundations, Transportation Research Board, ***National Research Council***, 1977.

Yalçın, A., Kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yükler altında davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi ***İ. T. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, s. 26 – 30, 2010.

Whitaker, T. Some experiments on model piled foundations in clay, ***6th International Congress of International Association of Bridge Structure Engineering***, Sweden, s. 539 – 542, 1961.

ÖZ GEÇMİŞ

Ahmet Gürkan YAZICI, 01. 10. 1988 tarihinde Trabzon’ da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Trabzon’ da tamamladı. 2006 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ nden Haziran 2010’ da mezun oldu. 2010 – 2012 yılları arasında Trabzon Bahçecik TOKİ Şantiyesi’ nde Saha Mühendisi olarak; 2012 yılında Hakediş Mühendisi olarak başladığı Trabzon Akyazı Spor ve Kültür Kompleksi işinde halen çalışmaya devam etmektedir. 2010 – 2011 Öğretim Yılında Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.