

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIKLI RADYE TEMELLERİN TASARIMI

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Sebahat GÖK**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2007

KAZIKLI RADYE TEMELLERİN TASARIMI

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Sebahat GÖK
501982015

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mart 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Eylül 2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ergün TOĞROL
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Ahmet Işın SAYGUN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)
Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)

EYLÜL 2007

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, kazıklı radye temelin yük-oturma davranışını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu sistemlerde kazıklar, esas taşıyıcı elemanlar olmaktan çok oturmaları kontrol altına almak amacıyla kullanılmaktadırlar. Yapılan çalışmalar, bu yaklaşımla kazıklı temellere göre kullanılan kazık sayısında ve dolayısıyla temel maliyetinde önemli ölçüde tasarruf elde edildiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında bana verdiği destek ve göstermiş olduğu anlayıştan dolayı hocam Sayın Prof. Dr. Ergün TOĞROL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezde yapılan deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'nün "Uzun Süreli Yurtdışı Araştırma Etkinliklerini Destekleme Programı" kapsamında verdiği burs ve Batı Avusturalya Üniversitesi (UWA), Center for Offshore Foundation (COFS) tarafından verilen destekle gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda İTÜ Rektörlüğü ve UWA COFS'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu tezin oluşturulması sırasında verdikleri destek ve yardımlardan dolayı arkadaşlarıma, eğitim hayatım boyunca her zaman arkamda olan aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Sebahat GÖK

Eylül 2007

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAZIKLI RADYE TEMELLER ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Kazıklı Radye Temellerin Kullanım Alanları	6
2.2. Kazıklı Radye Temellere Uygulamadan Örnekler	8
2.3. Kazıklı Radye Temeller Üzerine Yapılmış Model Çalışmaları	8
2.3.1. Laboratuvar (1g) şartlarında yapılmış model deneyleri	8
2.3.2. Santrifüjde yapılmış model deneyleri	10
2.4. Kazıklı Radye Temellerin Analizi	11
2.4.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri	12
2.4.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri	18
2.4.3. İleri sayısal analiz yöntemleri	19
3. METOT	25
3.1. Değişkenler	26
3.1.1. Taşıma gücü	26
3.1.2. Yük paylaşım oranı	27
3.1.3. Kazık boyu	27
3.1.4. Oturma	28
3.2. Santrifüj Deney Sistemi	29
3.2.1. Santrifüj tipleri ve santrifüjde numune hazırlama	30
3.2.2. Santrifüjde kullanılan ekipman	31
3.2.3. Tez çalışmasında kullanılan santrifüj deney sisteminin özellikleri	34
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis 3D Foundatin Yazılımı	30
3.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi ve Geoteknik Mühendisliği'nde kullanımı	35
3.3.2. Plaxis 3D Foundation yazılımı	38
3.4. Diğer Basit Hesap Yöntemleri	40
3.4.1. Eşdeğer ayak yöntemi	40
3.4.2. Oturma oranı yöntemi	40
3.4.3. Etkileşim faktörleri yöntemi	41
3.5. Önerilen Hesap Yöntemi	42

4. SONUÇLAR	44
4.1. Santrifüj Deneyleri	44
4.1.1. Temel zeminin hazırlanması ve özellikleri	46
4.1.2. Deneylerde kullanılan kazıklı radye modelleri	48
4.1.3. Model deneyleri	50
4.1.4. Deneylerde kazıklı radye temelin taşıma gücü	52
4.1.5. Kazıklı radye temelin toplam ve farklı oturmaları	54
4.2. Önerilen Hesap Yöntemi ile Çözüm	60
4.2.1. Örnek 1	61
4.2.2. Örnek 2	63
4.2.3. Santrifüj deneyleri	64
4.3. Tahkikler	68
4.3.1. Plaxis 3D Foundation yazılımı	68
4.3.2. Eşdeğer ayak yöntemi	71
4.3.3. Oturma oranı yöntemi	73
4.3.4. Etkileşim faktörleri yöntemi	74
4.3.5. Sonuçlar	76
5. GENEL SONUÇLAR	78
KAYNAKLAR	81
EKLER	90
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

3D	: 3 Dimensional
CPT	: Cone Penetration Test
DRUCK PDCR	: Boşluk suyu basıncı ölçen alet
EN 1997-1:1994	: Eurocode 7
ISSMGE	: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer
PDR	: Poulos-Davis-Randolph yöntemi
TB1, TB2	: T-Bar deneyleri 1 ve 2
TC18	: Technical Committee 18 (Pile Foundations)
UWA	: University of Western Australia

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : ISSMGE TC18 raporundaki uygulama örnekleri (O'Neill vd. 2001)	9
Tablo 3.1 : Santrifüj sistemde ölçek katsayıları	29
Tablo 4.1 : Santrifüj model deneylerinde ölçülen oturma değerleri (arazi eşdeğeri)	56
Tablo 4.2 : Farklı kazık boylarına göre oturma değerleri, 3x3 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri	57
Tablo 4.3 : Farklı kazık boylarına göre oturma değerleri, 5x5 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri	57
Tablo 4.4 : Farklı kazık boylarına göre kazık yükleri, 3x3 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri	58
Tablo 4.5 : Farklı kazık boylarına göre kazık yükleri, 5x5 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri	58
Tablo 4.6 : Santrifüj modellerinin Plaxis 3D Foundation ile analizinden elde edilen oturma değerleri	59
Tablo 4.7 : Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Örnek 1	62
Tablo 4.8 : Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Örnek 2	63
Tablo 4.9 : Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 3x3 kazıklı sistem	65
Tablo 4.10 : Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 5x5 kazıklı sistem	65
Tablo 4.11 : Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 5x5 kazıklı sistem	66
Tablo 4.12 : Santrifüj deneyleri, Basit hesap yöntemi ile çözümler	68
Tablo 4.13 : Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Örnek 1	69
Tablo 4.14 : Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Örnek 2	70
Tablo 4.15 : Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Santrifüj deneyleri	70
Tablo 4.16 : Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Temsili kazıklara gelen yükler (kPa), Santrifüj deneyleri	70
Tablo 4.17 : Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Örnek 1	71

Tablo 4.18 : Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Örnek 2	72
Tablo 4.19 : Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Santrifüj deneyleri	72
Tablo 4.20 : Oturma oranı çözümleri, Örnek 1	74
Tablo 4.21 : Oturma oranı çözümleri, Örnek 2	74
Tablo 4.22 : Oturma oranı çözümleri, Santrifüj deneyleri	74
Tablo 4.23 : Etkileşim faktörleri çözümleri, Örnek 1	75
Tablo 4.24 : Etkileşim faktörleri çözümleri, Örnek 2	75
Tablo 4.25 : Etkileşim faktörleri çözümleri, Santrifüj deneyleri	75
Tablo 4.26 : Tüm sonuçlar, Örnek 1, Örnek 2 ve Santrifüj modelleri	76

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Farklı tasarım yaklaşımlarına göre kazıklı radyelerin yük-oturma davranışı eğrileri (Poulos, 2000b)	5
Şekil 2.2 : Kazıklı radye katsayısı ile kazıklı radyenin oturması/ radyenin oturması arasındaki bağıntıya bir örnek (Katzenbach vd., 1998)	7
Şekil 2.3 : Kazıklı radye temelin basitleştirilmiş yük-oturma grafiği (Poulos ve Davis, 1980)	15
Şekil 2.4 : Kazıklı radye temel tasarımı için Burland yaklaşımı (Burland, 1995)	13
Şekil 2.5 : Eşdeğer radye yöntemi (a) sürtünme kazıkları, (b) sürtünme ve uç kazığı, (c) uç kazığı (Tomlinson, 2001)	17
Şekil 2.6 : Eşdeğer ayak yöntemi (Randolph, 1994)	18
Şekil 2.7 : Düzlem deformasyon sonlu eleman yöntemi	20
Şekil 2.8 : Eksenel simetrik sonlu eleman yöntemi	22
Şekil 3.1 : Prototipte ve santrifüjde derinlikle gerilme dağılımı (Taylor, 1995)	30
Şekil 3.2 : Günümüzde kullanılan santrifüj tipleri (a) Kiriş tip; (b) Davul tip (Laue, 2002)	30
Şekil 3.3 : Farklı şekillere sahip penetrometre uçları (Chung ve Randolph, 2004)	32
Şekil 3.4 : Batı Avusturalya Üniversitesi'nde kullanılan kiriş santrifüj, Acutronic Model 661	34
Şekil 3.5 : Batı Avusturalya Üniversitesi'nde kullanılan davul santrifüj, koruyucu kapak yok	35
Şekil 3.6 : Plaxis 3D Foundation yazılımında kullanılan elemanlar	39
Şekil 3.7 : Oturma oranı yönteminde e sayısı hesap grafikleri (Fleming ve diğ., 1992)	41
Şekil 3.8 : Zeminde jeolojik yük ve gerilme artışı dağılımı (Tomlinson, 2001) ..	43
Şekil 4.1 : İlk grup deneylerin numune kutusundaki yerleşimi	44
Şekil 4.2 : İkinci grup deneylerin yerleşimi (a) 1 numaralı deney kutusu, (b) 2 numaralı deney kutusu	45
Şekil 4.3 : Deneylerde kullanılan kiriş santrifüjde efektif yarıçap hesabı ve numune kutusu boyutları	46
Şekil 4.4 : Santrifüjde kullanılan T-bar deney aleti ve yerleşimi	48
Şekil 4.5 : T-bar deney sonuçları, arazi şartları	49

Şekil 4.6	: Temel modellerinde kullanılan radyeler ve deformasyon ölçerli kazık	49
Şekil 4.7	: Temel modeli ve zemine çakılması sırasında kullanılan düzenek	51
Şekil 4.8	: İkinci grup deneylerde modellerin yüklenmesi ve lazerli yer değiştirme ölçerler	52
Şekil 4.9	: İlk grup deneylerde yük-oturma grafikleri, 3x3 kazıklı sistem	54
Şekil 4.10	: İlk grup deneylerde yük-oturma grafikleri, 7x7 kazıklı sistem	55
Şekil 4.11	: Santrifüj deneylerinde kazık yerleşimi ve temsili kazıkların numaralandırılması, 7x7 kazıklı sistem	59
Şekil 4.12	: Örnek 1 ve Örnek 2’de kazık yerleşimi	61
Şekil 4.13	: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Örnek 1	62
Şekil 4.14	: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Örnek 2	64
Şekil 4.15	: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 3x3 kazıklı sistem	66
Şekil 4.16	: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 5x5 kazıklı sistem	67
Şekil 4.17	: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 7x7 kazıklı sistem	67
Şekil 4.18	: Tekil kazık oturma hesabında kullanılan etki faktörleri (Poulos ve Davis, 1980)	72
Şekil E.1	: Numunenin laboratuvar şartlarında presde konsolidasyonu	90
Şekil E.2	: Boşluk suyu basınç ölçen aletler ve yerleştirilmesinde kullanılan düzenek	90
Şekil E.3	: Temel sisteminin hazırlanmasında kullanılan kılavuz sistem ve hazırlanmış temel modeli	91
Şekil E.4	: Santrifüj kontrol odası	91
Şekil E.5	: Santrifüj kontrol odasında deney sırasındaki bilgisayar kayıtları ve takip edilebilen veriler	92
Şekil E.6	: Santrifüj kontrol odasında deney sırasındaki santrifüj kontrolleri ve kamera kayıtları	92
Şekil E.7	: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre radye temelin arazi şartlarındaki oturmaları	93
Şekil E.8	: Santrifüjde radye temelin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları	93
Şekil E.9	: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 7x7 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=12.0 m	94
Şekil E.10	: Santrifüjde 7x7 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=12.0 m	94
Şekil E.11	: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 5x5 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=18.0 m	95
Şekil E.12	: Santrifüjde 5x5 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=18.0 m	95

Şekil E.13 : Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 5x5 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=24.0 m	96
Şekil E.14 : Santrifüjde 5x5 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=24.0 m	96
Şekil E.15 : Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 3x3 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=18.0 m	97
Şekil E.16 : Santrifüjde 3x3 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=18.0 m	97
Şekil E.17 : Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 3x3 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=24.0 m	98
Şekil E.18 : Santrifüjde 3x3 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=24.0 m	98
Şekil E.19 : Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde 2 boyutlu sonlu eleman ağı: (a) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup, (b) Örnek1	99
Şekil E.20 : Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde 2 boyutlu sonlu eleman ağı: (a) Örnek1, (b) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup, sadece yapısal elemanların görünümü	99
Şekil E.21 : Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde düşey yerdeğiştirmelerin grafiksel gösterimi: (a) Örnek1, (b) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup	100

SEMBOL LİSTESİ

α	: Kazıklı radye temelde etkileşim katsayısı
α_a	: Adezyon katsayısı
α_{kr}	: Kazıklı radye temel katsayısı
α_{ku}	: Kazıklı radye temelde kazık grubunun davranış katsayısı
α_{ru}	: Kazıklı radye temelde radyenin davranış katsayısı
χ	: Kazık ucunda genişleme oranı
δ	: Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı
ϕ	: Zeminin kayma mukavemeti açısı
ϕ_{kum}	: Kumun kayma mukavemeti açısı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_{beton}	: Betonun birim hacim ağırlığı
γ_{kum}	: Kumun birim hacim ağırlığı
γ_n	: Kilin birim hacim ağırlığı
η	: Kazık grubu etkinlik oranı
λ	: Kazık/zemin rijitlik oranı
μ	: Kazık sıkışabilirliğinde katsayı
ν_k	: Kazığın Poisson oranı
ν_{kum}	: Kumun Poisson oranı
ν_r	: Radyenin Poisson oranı
ν_s	: Zeminin Poisson oranı
ρ	: Zeminin homojenlik oranı
σ_{v0}	: Düşey jeolojik gerilme
ϖ	: Kazık ucu/kazık altı zeminin kayma modülü oranı
ω	: Açısal hız
ξ	: Kazıklı radye temelin son taşıma gücünün, radye ve kazık grubunun son taşıma güçleri toplamına oranı
ζ	: Kazık etki yarıçapı oranı
$\Delta\sigma'$	: İlave efektif gerilme
$\Delta\sigma'_{A-A}$	: A-A seviyesindeki ilave efektif gerilme
$[k]$	: Rijitlik matrisi
$\{q\}$	: Eleman düğüm noktaları yerdeğiştirme vektörleri matrisi
$\{r\}$	: Tüm sistemin düğüm noktaları yerdeğiştirme vektörleri matrisi
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi

$\{Q\}$	: Dügüm noktaları yük vektörleri matrisi
$\{R\}$	: Tüm sistemin düğüm noktaları yük vektörleri matrisi
d_{50}	: Kumun ortalama dane çapı
d	: Kazık çapı
d_b	: Kazık uç çapı
d_e	: Eşdeğer kazık çapı
d_s	: T-bar deney aletinde silindirin çapı
e	: Oturma oranı sayısı
f_s	: Birim çevre sürtünmesi
$f_{se-duvar}$	: Arayüzey elemanının eşdeğer çevre sürtünmesi
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Santrifüjde numune yüksekliği
k	: Tekil kazığın rijitliği
k_k	: Kazık grubunun rijitliği
k_{kr}	: Kazıklı radye temelin rijitliği
k_r	: Radye temelin rijitliği
n	: Santrifüjde arttırılmış yerçekimi ivmesinin oranı
n_k	: Bir sıradaki kazık sayısı
n_t	: Toplam kazık sayısı
q	: Yapıdan gelen düşey gerilme
q_d	: Temel taşıma gücü
r	: Kazık yarıçapı
r_b	: Kazık başlık yarıçapı
r_m	: Maksimum etki yarıçapı
r_s	: Santrifüj yarıçapı
r_u	: Kazık ucu yarıçapı
s	: Kazık aralığı
s_u	: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti
u, u_1, u_2, u_n	: Dügüm noktalarındaki yerdeğıştirmeler
$A_{eşdeğerradye}$	: Eşdeğer radye alanı
A_k	: Bir kazığın enkesit alanı
A_{kg}	: Kazık grup alanı
A_{kk}	: Toplam kazık enkesit alanı
A_r	: Radye alanı
A_{rnet}	: Net radye alanı
A_s	: Birim derinlik için bir kazığın çevre alanı
B_{kg}	: Kazık grup genişliği
B_r	: Radye genişliği
B_t	: Temel genişliği
D_t	: Temel derinliği
E_1, E_2	: Zemin tabakalarının elastisite modülü
E_e	: Eşdeğer kazığın elastisite modülü
$E_{e-duvar}$	: Eşdeğer şeritin elastisite modülü

E_k	: Kazık elastisite modülü
E_{kum}	: Kumun elastisite modülü
E_r	: Radye elastisite modülü
E_s	: Zeminin elastisite modülü
F_{s-k}	: Kazık grubunun güvenlik katsayısı
F_{s-kr}	: Kazıklı radye temelin güvenlik katsayısı
F_{s-r}	: Radye temelin güvenlik katsayısı
G	: Zeminin kayma modülü
G_L	: Kazık ucunda zeminin kayma modülü
G_{ort}	: Zeminin ortalama kayma modülü
G_u	: Kazık ucu altında zeminin kayma modülü
H	: Zemin tabaka kalınlığı
I_o, I_1	: Oturma etki faktörleri
I	: Oturma hesabında katsayı
K_0	: Sukunetteki toprak basıncı katsayısı
K	: Eşdeğer kazık ve zemin elastisite modüllerinin oranı, E_c/E_s
K_s	: Yatay toprak basıncı katsayısı
L	: Kazık uzunluğu
L_e	: Eşdeğer kazık uzunluğu
L_r	: Radye uzunluğu
L_s	: T-bar deney aletinde silindirin uzunluğu
N_1, N_2, N_m	: Yaklaşım fonksiyonları
N_b	: T-bar deneyinin analizinde kullanılan katsayı
N_γ, N_c	: Taşıma gücü katsayıları
P_0	: Temel tasarım yükü
P_1	: Temel yükü
P	: T-bar deneyinde uygulanan yük miktarı
P_a	: Kabul edilebilir oturmaya karşılık gelen yük
P_k	: Kazıklı radye temelde kazık grubunun taşıdığı yük
P_{kr}	: Kazıklı radye temelin taşıdığı yük
P_{kru}	: Kazıklı radye temelin son taşıma gücü
P_{ku}	: Kazık grubunun son taşıma gücü
P_r	: Kazıklı radye temelde radyenin taşıdığı yük
P_{ru}	: Radye temelin son taşıma gücü
P_{tku}	: Tekil kazığın son taşıma gücü
R	: Görünüş oranı
R_e	: Efektif santrifüj yarıçapı
R_K, R_v, R_h	: Oturma katsayıları (abaklardan elde edilir)
R_s	: Oturma oranı
S_0	: Tasarım yükündeki oturma
S	: Oturma
S_a	: Kabul edilebilir oturma
S_k	: Kazık grubunun oturması

S_{kr}	: Kazıklı radye temelın oturması
S_r	: Radye temelın oturması
S_{tk}	: Tekil kazığın oturması
X	: Kazıklı radye temelde radyenin taşıdığı yükün toplam yüke oranı

KAZIKLI RADYE TEMELLERİN TASARIMI

ÖZET

Kazık grupları, yapısal yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığı kabulüne göre projelendirilmektedir. Fakat radyenin zemine doğrudan temas ettiği hallerde yük, radye ve kazıklar arasında paylaşarak zemine aktarılır. Temel sisteminin tasarımında radye tarafından zemine aktarılan yük göz önüne alınırsa gerekli olan kazık sayısında azalma ve dolayısıyla temel maliyetinde önemli ölçüde tasarruf elde edilir.

Bu tez çalışmasında, kazıklı radye temellerin davranışını incelemek ve tasarımda ilk aşamada kullanılabilecek basit bir hesap yöntemi geliştirmek hedeflenmiştir. Bu amaçla model deneylerinden ve bilgisayar analizlerinden faydalanılmıştır.

Kiriş santrifüjde yapılan fiziksel model deneyleri, Batı Avusturalya Üniversitesi'nde (UWA) gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı temel zemini ile temas eden radyenin, sistemin taşıma gücüne etkisi ilk grup deneylerin konusunu oluşturmuş, kazık grubu ve kazıklı radye temelin yük-oturma davranışı irdelenmiştir. Bu amaçla 3x3 ve 7x7 kazıktan oluşan sistemler hem kazıklı temel (radyenin zemin ile teması yok), hem de kazıklı radye (radye zemin ile temas etmekte) olarak yüklenmiş ve yük-oturma davranışları izlenmiştir. Deney sonuçlarında radyenin zeminle temasından itibaren sistemin yük taşıma kapasitesinde gözle görülür bir artış meydana geldiği görülmüştür. İkinci grup deneylerde ise, göçmeye karşı güvenli, ancak oturmaları kabul edilebilir değerleri aşan radye temelin merkez bölgesine yerleştirilecek kazıkların, radyenin davranışına etkisi ele alınmış ve kazıkların radyedeki farklı oturmaları azaltıcı etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, sistemin optimum tasarımı için gereken etkin minimum kazık boyunun belirlenmesi önemlidir. Etkin kazık boyunu bulabilmek için, kazık uzunlukları değiştirilerek, 3x3 ve 5x5 kazıktan oluşan kazıklı radye temellerin oturma davranışı ele alınmıştır. Sistem, radyenin emniyetli taşıma gücü değerinde yüklenmiş ve bu yük altında radyenin köşe, merkez ve kenar orta noktalarındaki oturma değerleri ölçülmüştür.

Tez çalışmasında başlangıç aşamasında kullanılabilek basit bir hesap yöntemi önerilmiştir. Önerilen hesap yönteminde, yapı yükünün, radye ve kazıklar tarafından paylaşılarak taşınacağı kabul edilmekte, yük paylaşım oranına göre radyenin ve kazık grubunun oturmaları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Öncelikle radye tek başına ($P_k/P_{kr}=0$) ele alınır ve taşıyıcı zeminin özelliklerine bağlı olarak oturma miktarı bulunur. Daha sonra, yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığı ($P_k/P_{kr}=1$) kabul edilerek kazık grubunun ne kadar oturacağı hesaplanır. Hesaba yükün farklı oranlarda radye ve kazık grubu tarafından taşınması hallerinde oturmalar bulunarak devam edilir. Çeşitli P_k/P_{kr} oranları için elde edilen oturma miktarları karşılaştırılarak, radye ve kazık grubunun oturmalarının eşit olduğu yük paylaşım oranı belirlenir. Bu durumda her iki sistem birlikte çalışacaktır. Elde edilen sonuç, bir yandan oturma miktarını vermekte, öte yandan kazık boyunun belirlenmesini sağlamaktadır.

Önerilen hesap yöntemi örnek çözümlere ve santrifüj modellerine uygulanmış, sonuçları literatürde mevcut diğer yöntemlerle ve Plaxis 3D Foundation ileri sonlu eleman yazılımı ile tahkik edilmiştir. Örnek 1 ve 2'nin tahkikinde kullanılan eşdeğer ayak, oturma oranı ve etkileşim faktörleri metotları ile elde edilen değerler önerilen basit hesap yönteminin sonuçları ile uyumludur. Santrifüj deneylerinde, diğer araştırmacılar tarafından optimum tasarım için yapılan önerilere yakın değerler için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yöntem ayrıca ileri sayısal analiz metodu Plaxis 3D Foundation yazılımıyla da uyumlu sonuçlar vermiştir.

DESIGN OF PILED RAFT FOUNDATIONS

SUMMARY

In conventional methods, piles are designed to withstand the total applied load. However, when the raft is in direct contact with the underlying soil, the load is transferred to the supporting soil partly by the raft and partly by the piles. The design of the foundation may be optimised by incorporating the load bearing capacity of the raft and major economies can be obtained in piling cost.

The present research aims to study the load-settlement behaviour of pile groups and piled raft foundations and to propose a simplified analysis method for the preliminary design stage of piled rafts.

Model tests were performed at the University of Western Australia, Perth. The first series aimed to obtain the effect of the raft, contacting directly with the underlying soil, on the load capacity of the foundation system. The load-settlement behaviour of similar pile groups and piled rafts were examined. Systems of 3x3 and 7x7 piles were loaded as a pile group (the cap is clear from the soil) and a pile raft (the cap is in direct contact with the soil). From the test results, it is clearly seen that there is a remarkable increase in load capacity of the system when the cap starts to contact with the supporting soil. In the second series of model tests, the key questions to be addressed are whether a central pile group is effective at reducing differential settlements of a raft which has an adequate bearing capacity, and what is the effective pile length for the optimum design of piled raft foundations. To find the effective pile length, piled rafts consisting of 3x3 and 5x5 piles, with different pile length for every system, were loaded. The service load was equal to the allowable load of the raft and differential settlements were measured at three points (center, corner, and mid-edge). The model tests are checked with the Plaxis 3D Foundation computer programme.

The present research proposes a simplified design method of the piled rafts. In the proposed method, settlements of the raft and the pile group are separately calculated, employing the classical formula. The length of piles is determined by considering that the stress at the equivalent raft level is equal or smaller than 20 per cent of the geological stress. Then simple diagram is drawn to determine the load shearing value for settlements of raft and pile group becomes equal.

The simplified method results are consistent with the other methods (equivalent raft, equivalent pier, settlement ratio, interaction methods and Plaxis 3D Foundation computer programme). It can be used for the preliminary design stage of piled rafts.

1. GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerde kazıklı temel hesabı, yapı yükünün tamamının kazıklar tarafından taşındığı varsayımına göre yapılır. Fakat radyenin zeminle doğrudan temas ettiği durumlarda, yük radye ve kazıklar arasında paylaşılarak zemine aktarılmaktadır. Temellerin boyutlandırılmasında radye tarafından zemine aktarılan yük göz önüne alınırsa, kazık harcamalarında dolayısıyla temel maliyetinde önemli ölçüde tasarruf sağlanır.

Bazı hallerde yüzeysel temel taşıma gücü açısından yeterlidir fakat oturmaları kabul edilebilir değerleri aşabilir. Bu şartlarda, yüzeysel temelin altında kazıklar *oturmaya azaltıcı eleman* olarak kullanılmaktadır (Broms, 1976; Burland ve diğ., 1977). ‘Kazıklı radye temel’ olarak adlandırılan bu sistemler, kazıklı temellere göre daha ekonomik bir çözümdür.

Tez çalışmasında, kazıklı radye temellerin davranışını incelemek ve tasarımında ilk aşamada kullanılabilecek basit bir hesap yöntemi geliştirmek hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda santrifüj model deneylerinden ve bilgisayar analizlerinden faydalanılmıştır.

Giriş bölümünde, tezde ele alınan konu genel hatlarıyla anlatılarak çalışmanın içeriği kısaca açıklanmıştır.

İkinci bölümde, kazıklı radye temelin analizi ve tasarımı konusunda literatürde yer alan mevcut yöntemler ele alınmış, uygulamadan örneklerle ve model deneylerine değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan metot üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda incelenen değişkenler, deneylerde kullanılan santrifüj fiziksel modelleme sistemi, deney sonuçlarının irdelenmesinde yararlanılan Plaxis 3D Foundation bilgisayar yazılımı, önerilen hesap yöntemi ve literatürde mevcut olan diğer basit hesap yöntemleri ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde ise, kazıklı radye temellerin yük-oturma davranışını incelemek amacıyla yapılan santrifüj deneylerinin, önerilen hesap yönteminin, Plaxis 3D Foundation yazılımıyla yapılan çözümlerin ve diğer basit hesap yöntemlerinin sonuçları verilmiştir.

Beşinci bölüm, kazıklı radye temellerin davranışı ve tez çalışması üzerine genel sonuçları ve bu sonuçların tartışmasını içermektedir.

2. KAZIKLI RADYE TEMELLER ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Temeller, üst yapı yüklerini zeminin taşıyabileceği gerilmeleri ve kabul edilebilir oturmaları aşmadan taşıyıcı zemin tabakalarına aktaran yapı elemanlarıdır ve temel derinliği/temel genişliği (D_t/B_t) oranına göre yüzeysel temel veya derin temel olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Yüzeysel temel ($D_t/B_t \leq 2.5$), zemin şartları uygun olduğunda, yapımı daha kolay ve ekonomik olduğu için ilk tercihtir. Ancak temel zemini zayıf ise ve taşıma gücü aşılyorsa derin temel sisteminin kullanılması gereklidir.

Alışlagelmiş yöntemlerde kazıklı temel hesabı, yapı yükünün tamamının kazıklar tarafından taşındığı varsayımına göre yapılmaktadır. Fakat radyenin zemine doğrudan temas ettiği durumlarda yük, radye ve kazıklar arasında paylaşılarak zemine aktarılır. Bu nokta temel tasarımında göz önüne alındığı takdirde kazık sayısı azalacağı için ekonomik açıdan önemli ölçüde tasarruf sağlanır.

Bazı durumlarda yüzeysel temelin taşıma gücü yeterlidir fakat oturmaları kabul edilebilir değerleri aşar. Bu şartlarda, kazıklar yüzeysel temelin altında ‘*oturmayı azaltıcı eleman*’ olarak kullanılırlar (Broms, 1976; Burland ve diğ., 1977).

Son dönemde araştırmacılar, kazıkların oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanıldığı kazıklı radye temel tasarımında önceliğin taşıma gücü koşulu yerine kullanılabilirlik (*serviceability*) koşuluna verilmesi gerekliliğini vurgulamaktadırlar. Kullanılabilirlik koşulu, toplam ve farklı oturmaların kabul edilebilir değerlerin altında kalmasını ifade etmektedir (Poulos ve diğ., 2001).

Bu yeni yaklaşım yönetmelik ve standartlarda yavaş yavaş yerini almaktadır (Katzenbach ve Moorman, 2001; Viggiani, 2003). Bunların başında Eurocode 7 gelmektedir. EN 1997-1:1994, “§7:Kazıklı temeller: Kazıklar radyenin oturmasını sınırlamak amacı ile kullanıldığında, yapının kullanılabilirlik analizi için akma yüküne karşılık gelen mukavemetleri dikkate alınır” tanımlamasını içermektedir. Mart 2004’te kabul edilen düzenlemesinde ise, bir önceki kadar kesin bir yöntem belirtilmese de, “*bu bölümdeki hüküm, kazıklı radyelerde oturmayı azaltıcı eleman*

olarak kullanılan kazıkların tasarımına doğrudan uygulanmamalıdır” cümlesi ile kazıklı radye tasarımı için alışlagelmiş metotlar dışında yeni yöntemlerin kullanılmasının altı çizilmektedir. Uluslararası Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Komitesi (ISSMGE) Teknik Komite 18 (TC18) alt grubu, kazıklı radyelerin analizi, tasarımı ve yapımı konusunda uluslararası bir rehber kitap hazırlamaktadır (Katzenbach, 2006).

Randolph (1994), kazıklı radye tasarımı için üç farklı yaklaşım tanımlamıştır:

1. Geleneksel yaklaşım: Temel sistemi kazık grubu olarak tasarlanır, ancak radyenin zemine temas ettiği noktalardan yük aktardığı da hesaba katılır Bu tasarımda yükün büyük bölümü (% 60-75) kazıklar tarafından taşınır.

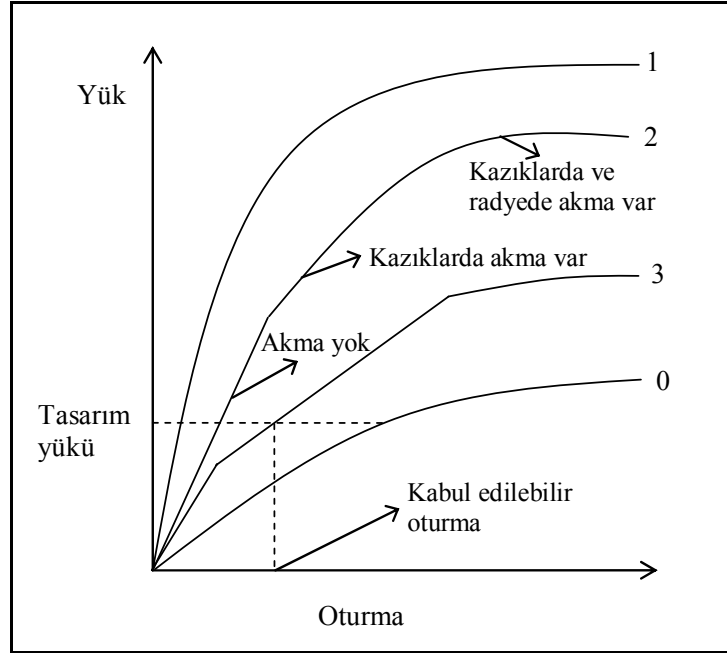
2. Sünme kazığı yaklaşımı: Kazıkların, tekil kazık taşıma gücünün % 70-80'ine (sünme davranışının başladığı) karşılık gelen servis yükünde çalıştığı kabul edilir ve radye-zemin arasındaki gerilme kil zeminin önkonsolidasyon basıncının altında kalacak şekilde kazık sayısı belirlenir (Hansbo ve Kallström, 1983).

3. Farklı oturmaların kontrolü yaklaşımı: Kazıklar, farklı oturmaları azaltmak amacıyla yükleme durumuna göre radye altında uygun bölgelere yerleştirilir.

İlk iki yaklaşımda amaç toplam oturmayı kabul edilebilir değerlere indirmektir, bu nedenle kazıklar radye alanının tamamına düzgün yayılı olarak dağıtılır. Farklı oturmalar toplam oturmada meydana gelen azalmaya bağlı olarak azalır. Üçüncü yaklaşımda ise amaç doğrudan farklı oturma değerlerini azaltmaktır. Şekil 2.1'de bu yaklaşımlara göre boyutlandırılan kazıklı radyelerin yük- oturma davranışı görülmektedir (Poulos 2000a).

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 tamamının 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, 1 ve 2 eğrilerine göre yapılanlardan çok daha ekonomiktir (Poulos ve diğ., 1997; Poulos, 2001a).



Şekil 2.1: Farklı tasarım yaklaşımlarına göre kazıklı radye temellerin yük-oturma davranışı eğrileri (Poulos, 2000a)

Poulos (2001a)'a göre kazıklı radye temelin tasarımı üç aşamadan oluşmaktadır:

1. *İlk aşama:* Kazıklı radye temelin kullanımının uygulanabilirliği değerlendirilir ve tasarım gereksinimlerini karşılayacak kazık sayısı kabaca belirlenir.

2. *İkinci aşama:* Kazıkların gerekli olduğu bölgeler ve genel özellikleri belirlenir.

3. *Son aşama:* Optimum kazık sayısı, yeri ve yerleşimi belirlenir. Radyedeki oturma, eğilme momenti, kesme kuvvetleri ile kazıklardaki yük ve moment dağılımı bulunur.

İlk aşamada, radye davranışı incelenerek taşıma gücü, toplam ve farklı oturmaları bulunur. Eğer radye ihtiyaç duyulan taşıma kapasitesinin çok az kısmını karşılıyorsa, temel sistemi geleneksel yaklaşıma göre projelendirilmelidir. Ancak radye hemen hemen veya tamamen üstyapı yükünü taşıyabiliyorsa, sünme kazığı veya farklı oturmaların kontrolü yaklaşımını kullanmak daha ekonomik bir çözüm olacaktır.

İkinci aşamada yükleme durumuna göre kazıklara ihtiyaç duyulan bölgeler ve kazık özellikleri kabaca belirlenir.

Son aşamada, öngörülen temel sisteminin davranışı mevcut sayısal analiz yöntemleri yardımıyla detaylı bir şekilde analiz edilir.

İlk iki aşama ileri bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmadan, basit hesaplamalarla yapılabilir. Ayrıntılı son aşamada ise, zemin-radye-kazık etkileşimini dikkate alan uygun bilgisayar programlarının kullanımına gereksinim duyulabilir. Ayrıca temel sistemi-üstyapı arasındaki etkileşimin de dikkate alınması gerekebilir.

Mandolini ve diğ. (2005), kazıklı radye tasarımında, kendi deyimleriyle "*kullanıma hazır*" (ready for use) diye tanımladıkları noktaları aşağıdaki gibi sıralamışlardır:

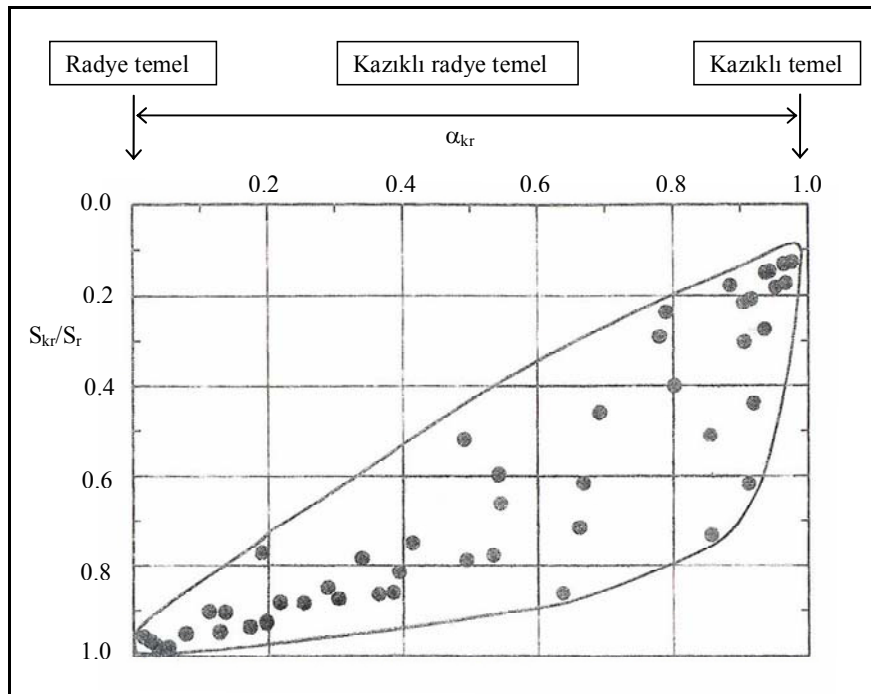
1. Kazık sayısını arttırmak genellikle yararlıdır ama her zaman en uygun sonucu vermez. Kullanılacak kazık sayısı için bir üst limit vardır ve bu değerden sonraki ilave kazıklar önemli bir fayda sağlamayacaktır.
2. Toplam oturmayı azaltmak için en uygun çözüm, radye genişliğinden daha uzun kazıkları, radye alanının tümüne düzgün yayılı yerleştirmektir. Ancak büyük boyutlu radyelerde ($B_r > 15m$), toplam oturma kazıkların ilavesi ile çok fazla azalmayacaktır.
3. Farklı oturmaları azaltmak için gerekli görülen uygun bölgeye az sayıda kazık yerleştirmek, radye kalınlığını arttırmaktan veya tüm radye alanına düzgün yayılı dağıtılmış çok sayıda kazık kullanmaktan daha iyi sonuç verecektir. Kazıklar için en uygun bölge yükleme şartlarına bağlıdır. Düzgün yayılı yük halinde, kazıkların radyenin merkez bölgesine yerleştirilmeleri en doğru çözümdür (Viggiani, 2001; Prakoso ve Kulhawy, 2001; Horikoshi ve Randolph, 1998). Kazıklar ne kadar uzun ise farklı oturmalarda elde edilecek azalma o kadar fazla olacaktır.
4. Radye kalınlığı, farklı oturmaları ve eğilme momentlerini etkilemektedir, ancak kazıklar ile radye arasındaki yük dağılımı ve toplam oturma üzerinde etkisi çok azdır.

2.1. Kazıklı Radye Temellerin Kullanım Alanları

Radyenin taşıma gücünün yeterli olduğu ancak oturma değerlerinin kabul edilebilir sınırları aştığı durumlar kazıklı radyenin en etkin uygulama alanıdır. 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 durumlarda, radye gerekli taşıma gücünün büyük bölümüne sahiptir ve kazıklar esas taşıyıcı eleman olmaktan çok oturmaları azaltmak için kullanılmaktadırlar.

Diğer yandan bu sistemlerin yapımının uygun olmayacağı şartlar, yumuşak killerin veya gevşek kumların yüzeye yakın bulunduğu, sığ 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 azaltabilir. 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 gerilmeler 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 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 temel katsayısı α_{kr} , 0.9'dan büyük ise bu sistemler tercih edilmemelidir. $\alpha_{kr} = 0$ radye temeli, $\alpha_{kr} = 1$ kazıklı temeli ifade etmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Kazıklı radye temel katsayısı ile kazıklı radyenin oturması / radyenin oturması arasındaki bağıntıya bir örnek (Katzenbach ve diğ., 1998)

2.2. Kazıklı Radye Temellere Uygulamadan Örnekler

Kazıklı radye tasarımı için birçok metot önerilmiş olmasına rağmen, herkes tarafından geçerliliği kabul edilmiş standart bir yöntem bulunmamaktadır. Bununla beraber bu sistemler uygulamada uzun süredir başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. ISSMGE TC18 tarafından hazırlanan raporda literatürdeki çalışmalardan 24 adet vaka örneği seçilerek yayınlanmıştır (O'Neill ve diğ., 2001) (Tablo 2.1). Uygulama örneklerine değinen diğer kapsamlı çalışmalar arasında İngiltere'deki çalışmaları anlatan Cooke (1986), Almanya'daki vakaları anlatan El-Mosallamy (2002), Franke ve diğ. (2000) ve Katzenbach ve diğ. (2000) sayılabilir. Büyük çoğunluğunda proje detayları yeterince verilmemiş olsa da kazıklı radye uygulamaları konusunda çok sayıda yayın mevcuttur. Uygulama örneklerinin yayınlanması, yapacakları çalışmada kazıklı radyenin uygulanabilirliği konusunda fikir edinmek isteyenler için iyi bir referans olmaktadır.

2.3. Kazıklı Radye Temeller Üzerine Yapılmış Model Çalışmaları

Yüksek bütçeleri, boyut ve zaman sorunları nedeniyle gerçek boyutlu veya prototip modellerin yapılması oldukça zordur. Santrifüj deney sistemi, modellemede boyut ve zaman sorununun aşılmasında etkilidir ancak kurulumu ve kullanımı pahalı bir sistemdir. Karşılaşılan bu sorunlardan dolayı kazıklı radye temeller üzerine yapılan fiziksel model çalışmaları, sayısal analiz ve tasarım yöntemleri konusundaki çalışmalar kadar çok değildir.

2.3.1. 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 temasının 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'ın ifadesini doğrularken kazıkların oturmaya etkisini de incelemiştir. Oturmaları azaltmak amacıyla kullanılan kazıkların sayısının arttırılmasının, 4 kazık çapından daha küçük kazık aralığı değerinden sonra önemli bir fayda getirmediğini belirtmiştir. Kazık boyu radye genişliğinden ne kadar fazla ise elde edilen azalma da o kadar fazladır.

Tablo 2.1: ISSMGE TC18 raporundaki uygulama örnekleri (O'Neill ve diğ., 2001)

No	Proje	Bulunduğu yer	Zemin Tipi
1	Messturm	Frankfurt, Almanya	Aşırı konsolide kil
2	Torhaus	Frankfurt, Almanya	Aşırı konsolide kil
3	Westendstrasse 1	Frankfurt, Almanya	Aşırı konsolide kil
4	Petronas Kuleleri	Kuala Lumpur, Malezya	Alüvyon ve karışık rezidüel zemin
5	QV1	Perth, Avustralya	Silttaşı üstünde sıkı kum ve sert kil
6	Urawa City I-II	Tokyo, Japonya	Yer yer katı kil tabakalı gevşek-sıkı kum
7	Kömür silosu	Belirtilmemiş	Yumuşak alüvyon
8	Hyde Park Cavalry Barracks	Londra, İngiltere	Çok katı aşırı konsolide kil
9	Stonebridge Park	Londra, İngiltere	Çok katı aşırı konsolide kil
10	New Law Court Binası	Napoli, İtalya	Volkanik kökenli kohezyonlu-sürtünmeli puzolon
11	Neuville-su-Oise Köprüsü	Oise nehri, Belçika	Kaba kum üzerinde lemlikumlu alüvyon
12	Grain Terminali	Gent, Belçika	Yer yer kum ve kil tabakalı lemlikumlu kum
13	Molas depolama tankı	İskoçya	Az aşırı konsolide kil
14	The Pyramid	Memfis, Amerika	Çok aşırı konsolide kil üzerinde normal konsolide-aşırı konsolide kil
15	Hadera güç istasyonu bacaları	Hayfa, İsrail	Kil tabakalı gevşek-çok sıkı kum
16	Garigliano ve Ausente Köprüleri	Formia, İtalya	Siltli kumlu normal konsolide-az aşırı konsolide organik kil
17	Apartman	Uppsula, İsveç	Yumuşak deniz ve göl killeri
18	Apartman	Enköping, İsveç	Kum üstünde yumuşak, buzul sonrası, az aşırı konsolide kil
19	Treptowers	Berlin, Almanya	Kum (derinlikle birim hacim ağırlığı artan)
20	Sıvı gaz tankı	Gdansk, Polonya	Orta sıkı kum ve çok gevşek silt
21	Malt fabrikası silosu	Gdansk, Polonya	Orta sıkı kum ve gevşek silt üstünde dolgu
22	Termal elektrik güç istasyonu	Gdansk, Polonya	Bir ince tabaka turba içeren orta sıkı ince kum
23	Commerzbank	Frankfurt, Almanya	Kum ve çakıl, altında katı kil, altında kaya
24	La Azteca	Meksika, Meksika	Yumuşak sıkışabilir volkanik kil

Wiesner ve Brown (1980), kazıklı radye temelin aşırı konsolide killerde davranışını incelemek için 4 adet model deneyi yapmışlardır. Deney sonuçları ile elastik teoriyi kullandıkları analiz yönteminin sonuçlarını karşılaştırarak, elastik teorinin bu sistemlerin davranışını incelemek için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Turek ve Katzenbach (2003), düşey yükler altında kum zemindeki radye, kazıklı radye ve kazıklı temel davranışını incelemişlerdir. Kazıklı radye kullanımı ile gevşek kumda radyeye göre % 30, sıkı kumda ise % 50 daha az oturma elde edilmiştir. Yükleme sürecinde oturmalar arttıkça kazıklı radyede kazıkların aldığı yük oranı azalmıştır. Horikoshi ve Randolph (1996), Kwon ve diğ. (2005) tarafından da aynı davranış gözlenmiştir. Ancak Mandolini ve diğ. (2005), inceledikleri uygulama örneklerinde radyenin yük oranının zamanla azaldığını belirtmişlerdir.

Katzenbach ve Turek (2005), aynı sistemleri düşey ve yatay yükler altında da incelemişlerdir. Yatay yük dayanımı, düşey yükle doğru orantılı olarak kazıklı radyede artmakta, kazıklı temelde ise belirgin bir artış göstermemektedir. Kazıklı radyenin yatay dayanımı kazıklı temeline göre 2.5-6 kat daha fazladır. Yatay yerdeğiştirmeler arttıkça radyenin aldığı yatay yük miktarı azalmaktadır.

2.3.2. Santrifüjde yapılmış model deneyleri

Santrifüj çalışmalarında, öncelikle bu sistemin kazık davranışını modellemek için uygunluğu kontrol edilmiştir. Ko ve diğ. (1984), gerçek boyutlu prototipler üzerinde yapılmış 2 ayrı yükleme deneyinin santrifüj modelini farklı ivme değerlerinde test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan bu sistemin kazıklı temellerin davranışının incelenmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Thaher ve Jessberger (1991a, 1991b), 150g ivme değerinde 4 ayrı grupta yaptıkları deneylerde kazıklı radye temelin yük-oturma davranışını ve yük dağılımını incelemişlerdir. Yazarlara göre, kazık aralığı/kazık çapı oranı (s/d) kazıklı radye davranışını etkileyen en önemli parametredir. Konsolidasyon sonucu kazıklara gelen yük oranı artmıştır. Deneylerden birinde Frankfurt'taki Fair Tower'ın temel sistemi modellenmiştir ve gerçek ölçümler ile santrifüj deney sonuçlarının tutarlılığı, bu sistemin kazıklı radye davranışını modellemeye uygun olduğunu göstermektedir.

Horikoshi (1995), kil zeminde 10 adet temel modeli üzerinde yaptığı deneylere dayanarak, düzgün yayılı yüklü kazıklı radye temelde farklı oturumaları en aza indirmek için kazıkların merkez bölgeye, radye alanının % 16-25'ine yerleştirilmelerini önermiştir.

Horikoshi ve diğ. (2005a, 2005b), kum zemindeki kazıklı radye temelin davranışını yatay statik ve dinamik yük altında incelemişlerdir. Kazıklı radye temelin yatay yük taşıma kapasitesi radyeye göre daha fazladır ve yatay yerdeğiştirmeler arttıkça radyeye gelen yatay yük miktarı azalmıştır.

2.4. Kazıklı Radye Temellerin Analizi

Kazıklı radye temellerin analizi için kullanılmakta olan yöntemleri 3 grupta toplamak mümkündür (Poulos ve diğ., 1997; Poulos, 2001b):

1. *Basitleştirilmiş hesap yöntemleri:* Yararlanılan basitleştirmelerle sayesinde bilgisayar kullanımına ihtiyaç duyulmayan bu metotlar arasında Davis ve Poulos (1972)/ Poulos ve Davis (1980), Randolph (1983, 1994), Burland (1995) ve Poulos-Davis-Randolph (Poulos, 2000a, 2001b), eşdeğer radye ve eşdeğer ayak yöntemleri sayılabilir.

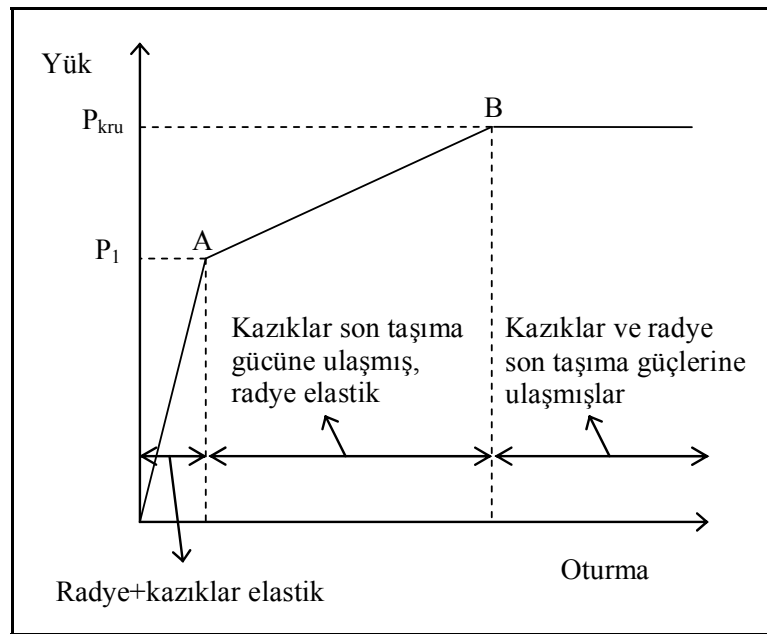
2. *Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri:* Radyenin şerit (Poulos, 1991) veya plakla, kazıkların ise yaylarla temsil edildiğı yöntemlerdir (Hongladaromp ve diğ., 1973; Poulos 1994, Anagnostopoulos ve Georgiadis, 1998).

3. *İleri sayısal analiz yöntemleri:* Sınır eleman metodu (Butterfield ve Banerjee 1971; Kuwabara, 1989; Griffiths ve diğ., 1991), temel sistemini düzlem deformasyon (Desai ve diğ., 1974; Prakoso ve Kulhawy, 2001) veya eksenel simetrik problem (Hooper, 1973; Pressley ve Poulos, 1986) olarak çözen basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri, birkaç yöntemin birarada kullanıldığı melez yöntemler (Hain ve Lee, 1978; Clancy ve Randolp, 1993; Franke ve diğ., 1994; Ta ve Small, 1996), 3 boyutlu sonlu eleman yöntemi (Ottaviani, 1975; Reul ve Randolph, 2003; Liang ve diğ., 2003) ileri sayısal analiz metodlarıdır.

Poulos ve diğ. (2001), kazıklı radye temellerin analizinde kullanılmakta olan yöntemler konusundaki düşüncelerini '*başarılı bir tahmin için anahtar kullanılan analiz yönteminin detaylarından daha çok uygun geoteknik parametrelerin seçimidir*' cümlesi ile ifade etmişlerdir. Aynı görüşü Mandolini ve diğ. (2005) de paylaşmaktadır.

2.4.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri

1. *Davis ve Poulos (1972)/Poulos ve Davis (1980)*: Davis ve Poulos (1972), Poulos'un kazık grubu (1968a) ve kazık başlığı-kazıktan oluşan birim eleman (1968b) için etkileşim faktörlerini kullanarak yaptığı çalışmaları birleştirerek kazıklı radyenin 3 doğrusal parçadan meydana gelen basitleştirilmiş yük-oturma grafiğini elde etmeye yarayan bir hesap yöntemi önermişlerdir (Şekil 2.3). Yöntemin çıkış noktası, radyenin son taşıma gücüne ulaşması için gereken oturma miktarının kazık grubu için gerekenden daha büyük olmasıdır. Metot sadece tam rijit veya tam esnek radyeler için kullanılabilir.



Şekil 2.3: Kazıklı radye temelin basitleştirilmiş yük-oturma grafiği (Poulos ve Davis, 1980)

Grafikte, başlangıçtan A noktasına kadar olan kısımda kazıklar son taşıma güçlerine ulaşmıştır. Yük kazıklar ve radye tarafından taşınmaktadır. Oturma, P_1 yükü altında sistemin oturması olarak hesaplanır. Sistemin oturması, tekil kazığın oturmasına bağlı olarak abaklar yardımıyla bulunur. Bu noktadan sonra meydana gelecek ilave yük artışı radye tarafından karşılanacaktır. Bu sebeble A noktasından tüm sistemin son taşıma gücüne (P_{kru}) eriştiği B noktasına kadar oturma ($P_{kru}-P_1$) yükü altında radyenin oturması olarak hesaplanır. İki değer toplanarak sistemin toplam oturması elde olunur.

2. *Randolph (1983, 1994):*

Randolph (1983), kazık başlığı-kazıktan oluşan birim elemanın davranışından yola çıkarak, kazıklı radyenin davranışını etkileşim faktörleri kullanarak elde etmiştir. Ancak yöntem sadece kazıklı radye sistemlerin doğrusal davranışı için geçerlidir.

Kazıklı radye sistemin rijitliği k_{kr} , k_k ve k_r sırasıyla kazık grubu ve radyenin rijitlikleri olmak üzere α etkileşim faktörüne bağlı olarak:

$$k_{kr} = \frac{k_k + (1 - 2\alpha)k_r}{1 - \alpha^2 \left(\frac{k_r}{k_k}\right)} \quad (2.1)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Sistemde radye tarafından taşınan yükün oranı:

$$\frac{P_r}{P_r + P_k} = \frac{P_r}{P_{kr}} = \frac{(1 - \alpha)k_r}{k_k + (1 - 2\alpha)k_r} \quad (2.2)$$

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 kazıktan oluşan tekil sistem için:

$$\alpha = \frac{\ln(r_m / r_b)}{\ln(r_m / r)} \approx 1 - \frac{\ln(r_b / r)}{\zeta} \quad (2.3)$$

olarak hesaplanır. Burada r_m maksimum etki yarıçapı ve ζ kazık etki yarıçapı oranıdır.

Bu bağıntı birden fazla kazıktan oluşan kazıklı radye sistem için r_b her kazığa düşen radye alanının eşdeğer yarıçapı alınarak kullanılır. Grup boyutu büyüdükçe (3x3 kazıktan itibaren), etkileşim faktörü kazık aralığı, narinliği ve rijitliğinden bağımsız olarak 0.8 değerine yakınsamaktadır (Clancy ve Randolph, 1993). Bu durumda (2.1) ve (2.2) bağıntıları :

$$k_{kr} = \frac{1 - 0.6 \left(\frac{k_r}{k_k}\right)}{1 - 0.64 \left(\frac{k_r}{k_k}\right)} k_k \quad (2.4)$$

$$\frac{P_r}{P_k + P_r} = \frac{0.2k_r}{k_k - 0.6k_r} \quad (2.5)$$

şeklini alır.

Kazıklar ile radye arasındaki yük paylaşım oranı:

$$\frac{P_r}{P_k} = \frac{0.2}{1 - 0.8(k_r/k_k)} \frac{k_r}{k_k} \quad (2.6)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu değer genellikle 0.3-0.5 (k_r/k_k) aralığında değişir.

3. *Poulos-Davis-Randolph, PDR (Poulos, 2000a, 2001b):*

PDR yöntemi, yukarıda açıklanan iki yöntemin birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Öncelikle belirlenen kazık sayısına göre sistem rijitliği k_{kr} (2.1) ifadesiyle hesaplanır. Bu ifadedeki radye rijitliği k_r (Fraser ve Wardle, 1976; Mayne ve Poulos, 1999) ve kazık grubu rijitliği k_k (Poulos ve Davis, 1980; Fleming ve diğ., 1992; Poulos, 1989) elastik teoriden yararlanılan klasik yöntemlerle hesaplanabilir. Kazık ve radyenin yük-oturma eğrilerinin hiperbolik olduğu göz önüne alınmak istenirse k_r ve k_k rijitlikleri hesaplanırken bu nokta dikkate alınabilir (Poulos, 2000b). Radye yükünün toplam yüke oranı:

$$\frac{P_r}{P_k + P_r} = \frac{P_r}{P_{kr}} = X \quad (2.7)$$

ile gösterilirse, P_1 yük değeri:

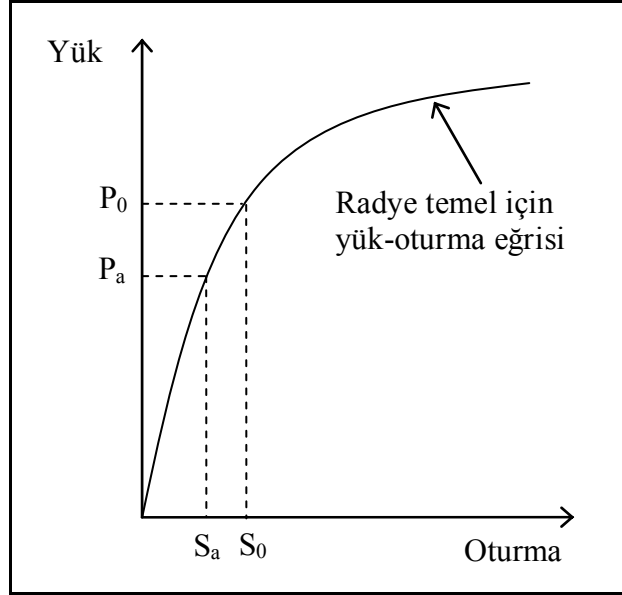
$$P_1 = \frac{P_{ku}}{(1 - X)} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir. Burada P_{ku} , kazık grubunun son taşıma gücüdür. P_1 yüküne kadar sistemin rijitliği için hesaplanan k_{kr} değeri kullanılır. Bu noktadan P_{kru} sistemin son taşıma gücü değerine kadar olan aralıkta ise sistemin rijitliği sadece radyenin rijitliğine eşit alınır. P_{kru} değerinden sonra yük-oturma eğrisi yataydır. Bu değerlerle ilk metotta anlatıldığı şekilde kazıklı radyenin oturması aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$S_{kr} = \frac{P_1}{k_{kr}} + \frac{P_{kr} - P_1}{k_r} \quad (2.9)$$

4. Burland (1995):

Kazıkların oturmayı azaltıcı elemanlar olarak kullanıldıkları ve tasarım yükünde kazık kapasitelerinin tamamından yararlanıldığı durumlar için geçerli basitleştirilmiş bir yöntemdir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Kazıklı radye temel tasarımı için Burland yaklaşımı (Burland, 1995)

Öncelikle tek başına radye temelin yük-oturma davranışı belirlenir. P_0 tasarım yükündeki S_0 toplam oturma değeri bulunur. Kabul edilebilir toplam oturma miktarı S_a belirlenir ve buna karşılık gelen P_a yük değeri eğriden okunur. $(P_0 - P_a)$ değeri kazıklar tarafından taşınması gereken yüküdür. Kazıkların çevre sürtünmesinin tamamen oluşacağı kabul edildiğinden güvenlik sayısı 1'dir. Ancak Burland, kazıkların çevre sürtünmesinin 0.9 gibi bir uyanma faktörüyle çarpılabileceğini belirtmiştir.

Kazıklı radye temelin son taşıma gücü için, (1) kazık bloğunun son taşıma gücü ile blok dışında kalan radyenin son taşıma gücünün toplamı veya (2) gruptaki tüm kazıkların son taşıma güçleri ile radyenin son taşıma gücünün toplamı arasındaki küçük olan değer alınabilir (Poulos, 2000a). Mandolini ve diğ. (2005), blok göçmenin meydana geldiği kazık aralığına kadar ilk değer, daha büyük kazık aralıkları için ise ikinci değer kullanılması uygun olacağı görüşündedirler. Borel (2001), ikinci seçenekte, radye ve kazıkların taşıma güçleri için katsayılar kullanılması gerekliliğini vurgulamıştır. Buna göre kazıklı radyenin son taşıma gücü:

$$P_{kru} = \alpha_{ru} P_{ru} + \alpha_{ku} P_{ku} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada P_{ru} , radyenin son taşıma gücü, α_{ru} ve α_{ku} kazıklı radye temelde radyenin ve kazık grubunun davranış katsayılarıdır. Radyenin ve kazık grubunun son taşıma güçleri mevcut yöntemlerle hesaplanabilir. Davranış katsayıları ise yükleme deneylerinden elde edilebilir.

De Sanctis ve Mandolini (2003)'e göre $\alpha_{ku} = 1$ değerini kullanmak uygundur, ancak kazık yerleşimine bağlı olarak $\alpha_{ru} < 1$ almak gerekir. Yazarlar, kazıklı radye son taşıma gücünü, kazık grubu ve radyenin son taşıma güçleri toplamına oranlayarak ξ katsayısını tanımlamışlardır:

$$\xi = \frac{P_{kru}}{P_{ru} + P_{ku}} = \frac{F_{s-kr}}{F_{s-r} + F_{s-k}} \quad (2.11)$$

F_{s-kr} , F_{s-r} ve F_{s-k} sırasıyla kazıklı radye, radye ve kazık grubunun güvenlik sayılarıdır. Kazıklı radyenin güvenlik sayısı, uygulanan yükten bağımsız olarak, kazık grubu ve radyenin güvenlik sayılarının toplamından çok az küçüktür ($0.82 \leq \xi \leq 1.00$) (De Sanctis ve Mandolini, 2006).

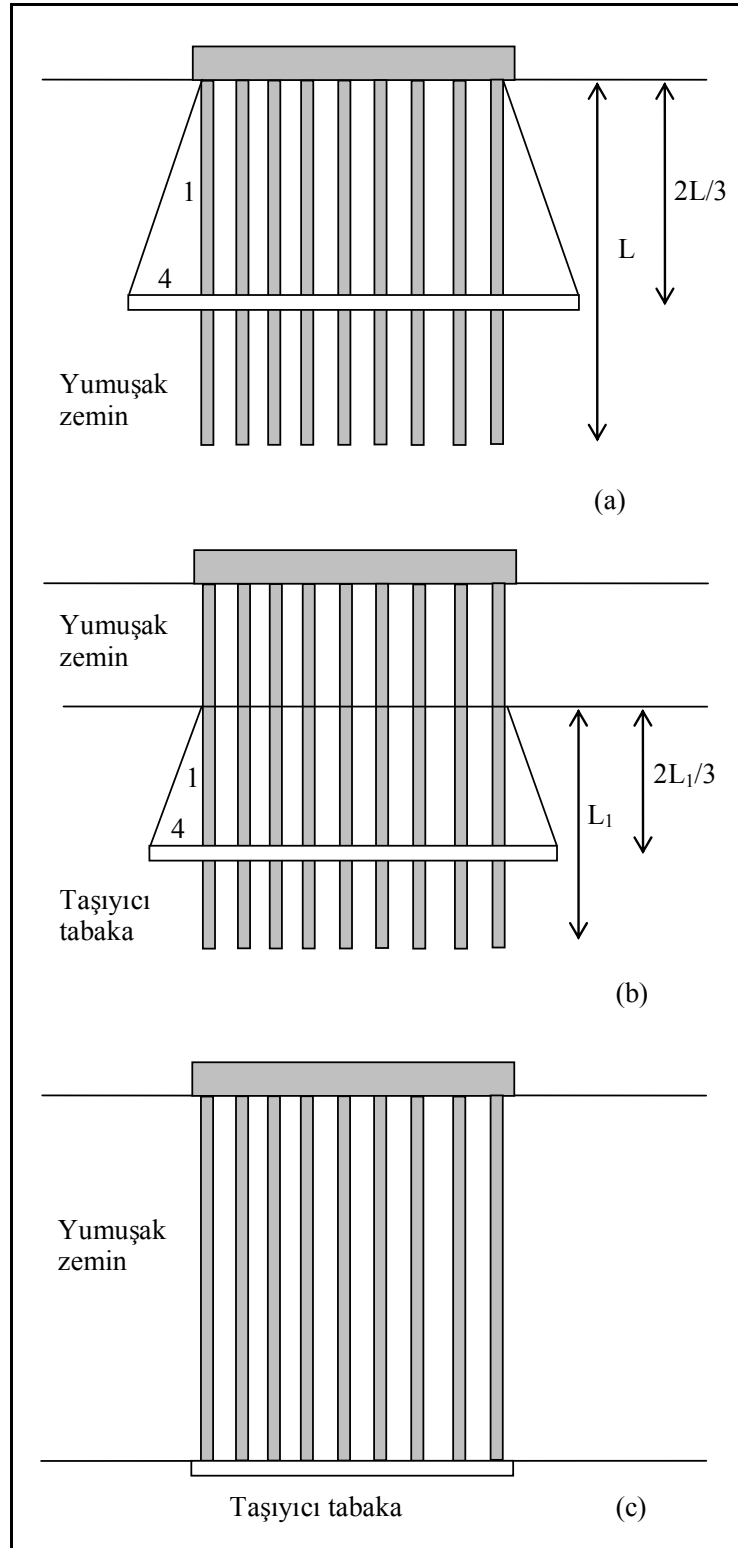
Randolph (1994), kazıklı temelin oturma hesabında yararlanılan eşdeğer radye ve eşdeğer ayak yöntemlerinin, 'kazıklı radye temelin oturma hesabı' için de uygun olduğunu belirtmiştir. Bu iki yaklaşımdan hangisinin kullanılacağına karar vermek için toplam kazık sayısı (n_t), kazık aralığı (s) ve kazık uzunluğuna (L) bağlı olarak tanımladığı görünüş oranından faydalanmaktadır. R görünüş oranı:

$$R = \sqrt{\frac{n_t s}{L}} \quad (2.12)$$

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

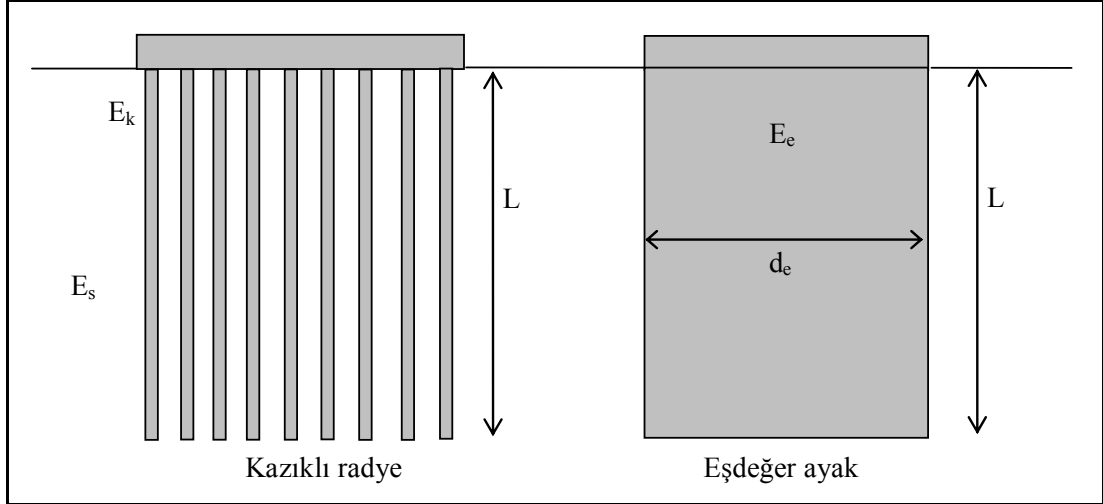
Eşdeğer radye yönteminde, kazıklı radye temel, $2L/3$ derinliğinde bulunduğu varsayılan radye ile temsil edilir (Tomlinson, 2001). Eşdeğer radye boyutunu belirlemek için uygulanan yükün $1/4$ oranıyla yayıldığı kabul edilir (Şekil 2.5). Sistemin oturması, eşdeğer radyenin oturması ve eşdeğer radye üstünde kalan kazık boyunun elastik sıkışmasının toplamı olarak bulunur. Mevcut yöntemlerle her iki değer de hesaplanabilir. 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 2.5: Eşdeğer radye yöntemi (a) sürtünme kazıkları, (b) sürtünme ve uç kazığı, (c) uç kazığı (Tomlinson, 2001)

Eşdeğer ayak yönteminde, kazık grubu eşdeğer bir ayak ile temsil edilir. İki tip eşleme kullanılabilir (Poulos ve Davis, 1980): (1) kazık grubu ile aynı çevre alanına sahip L_e eşdeğer uzunluğunda bir ayak veya (2) kazık grubu ile aynı uzunlukta d_e eşdeğer çapında bir ayak (Şekil 2.6). Tabakalı zemin profilinde eşdeğer çap yaklaşımını kullanmak daha uygundur (Poulos, 1993).



Şekil 2.6: Eşdeğer ayak yöntemi (Randolph, 1994)

Eşdeğer ayak tanımlandıktan sonra oturma, mevcut yöntemlerden biri ile tekil kazığın oturması olarak hesaplanabilir. Eşdeğer ayak çapı ve elastisite modülü:

$$d_e = 1.13 \sqrt{A_{kg}} \quad (2.13)$$

$$E_e = E_s + (E_k - E_s) \left(\frac{A_{kk}}{A_{kg}} \right) \quad (2.14)$$

ifadeleriyle hesaplanır. Burada A_{kg} ve A_{kk} sırasıyla, kazık grup alanı ve kazıkların toplam enkesit alanı; E_s ve E_k , kazıkların yer aldığı zemin tabakası ve kazığın elastisite modülleridir. Randolph (1994), kazıklı radyede, eşdeğer çap hesaplanırken kazık grup alanı yerine radye alanının alınmasının daha uygun olacağı görüşündedir.

2.4.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri

1. Yaylar üstünde şerit yaklaşımı: Radye temel şeritler, kazıklar ise yaylarla temsil edilmektedir. Bu yaklaşımı kullandığı çalışmasında Poulos (1991), radye-radye, kazık-kazık, radye-kazık ve kazık radye etkileşim faktörlerini hesaplamak için elastik

teoriden yararlanmıştır. Sistemde, incelenen şerit dışındaki parçaların etkisi de hesaba katılabilmektedir. Metot, radyedeki burulma momentlerini dikkate alamasa da daha ileri sayısal analiz yöntemleriyle kıyaslandığında uygun sonuçlar vermektedir.

2. *Yaylar üstünde plak yaklaşımı*: Radye elastik bir plak, kazıklar ise yaylarla temsil edilmektedir. Bu yaklaşımı kullanan Hongladaromp ve diğ. (1973), bazı etkileşim faktörlerini dikkate almamış ve çok yüksek rijitlikler elde etmişlerdir. Poulos (1994), radyeyi sonlu farklar yöntemiyle plakla ve kazıkları yaylarla modellemiştir. Benzer bir çalışma da Anagnostopoulos ve Georgiadis (1998) tarafından da yapılmıştır. Yöntemde, temel elemanları arasındaki etkileşim ile kazıkların doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmaktadır. Kazık ve radye yükleri, toplam ve farklı oturmalar ile radyenin eğilme momentleri hesaplanabilmektedir.

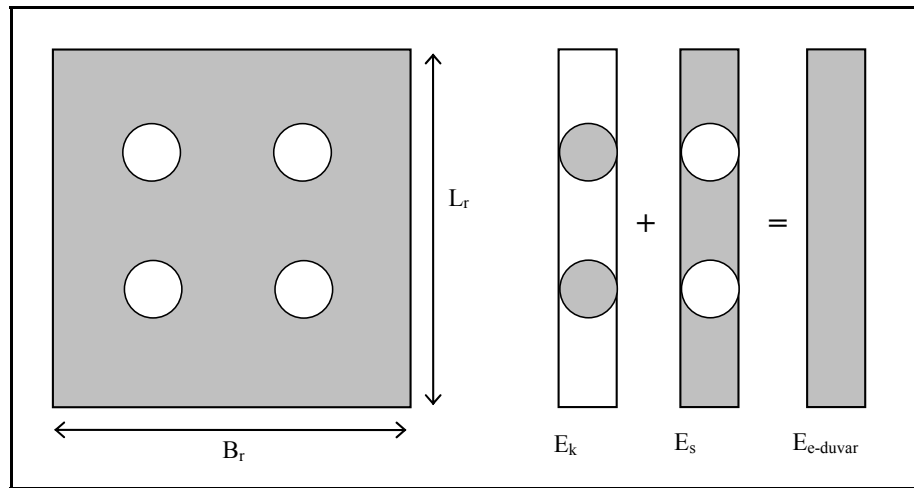
2.4.3. İleri sayısal analiz yöntemleri

1. *Sınır eleman yöntemi*: Bu yaklaşımda hem radye hem de kazıklar parçalara bölünür, ayrıca tüm zemin–temel arayüzeyleri de elemanlara ayrılır. Zemin içindeki hareketlerin çözümü için genellikle Mindlin (1936) fonksiyonu kullanılmaktadır. Temel elemanlarının davranışı ise sonlu eleman veya sonlu farklar gibi yöntemlerle çözülür (Randolph, 1994). Temel ve zemin elemanlarının yerdeğiştirmelerinin eşitliği ve düşey denge denkleminin yazılmasıyla aranan gerilme ve yerdeğiştirme değerleri elde edilir. Mindlin fonksiyonu homojen doğrusal elastik ortamlar için geçerli olduğundan, doğrusal olmayan davranış, kazık boyunca yük aktarım fonksiyonları kullanılarak dikkate alınabilir (Griffiths ve diğ., 1991). Yamashita ve diğ. (1987), zemin şartlarının homojen olmaması halinde, Mindlin denklemlerinde kullanılacak ortalama elastisite modülleri konusunda bir çalışma yapmışlardır.

Butterfield ve Banerjee (1971), elastik zeminde kazıklı radye ve kazık gruplarının davranışını incelenmişlerdir. Kazık grubu boyutlarına ve kazık aralığına bağlı olarak, radyenin zeminle teması sistemin rijitliğini % 5-15 arasında arttırmakta ve radye yükün % 15-25'ini taşımaktadır ($20 \leq L/d \leq$). Kuwabara (1989), elastik homojen izotropik zemindeki kazıklı radye ve serbest kazık gruplarının düşey yük altında davranışını araştırmış, kazıkların sıkışabilirliği ve temel elemanları arasındaki etkileşimi dikkate almıştır. Radye rijittir ve toplam yükün % 20-40'ını taşımaktadır ($L/d < 50$, $s/d < 10$).

2. *Basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri*: Bilgisayar kapasitelerinin sınırlı olması ve zaman sorunu, 3 boyutlu sonlu eleman analizlerinin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle bazı sadeleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu grupta, kazıklı radyeyi düzlem deformasyon problemi (Desai ve diğ., 1974; Prakoso ve Kulhawy, 2001) veya eksenel simetrik problem (Hooper, 1973; Pressley ve Poulos, 1986) olarak ele alan yöntemler yer alır. Her iki durumda da, temel ve zemin sonlu elemanlarla temsil edildiğinden, doğrusal olmayan davranış dikkate alınabilmektedir. İki fazlı zemin yapısı analize dahil edildiğinden, konsolidasyon sebebiyle kazıklar arası yük dağılımının değişimini ve oturmaları elde etmek mümkündür.

Kazıkların düşey yük altındaki davranışı eksenel rijitliklerine bağlıdır. Üç boyutlu kazıklı radye problemini, kazık sıralarını eşdeğer rijitliğe sahip şeritlere dönüştürerek, iki boyutlu düzlem deformasyon problemi olarak çözmek mümkündür (Şekil 2. 7) (Desai ve diğ., 1974).



Şekil 2.7: Düzlem deformasyon sonlu eleman yöntemi

Eşdeğer duvarın eksenel rijitliğinin hesabında, zemin rijitliği kazıklara göre düşük olduğundan ihmal edilebilir. Eşdeğer duvarın elastisite modülü:

$$E_{e-du\ var} = \frac{n_k A_k E_k}{dL_r} \quad (2.15)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada n_k , bir sıradaki kazık sayısı; A_k , bir kazığın en kesit alanı ve L_r , radye uzunluğudur. Kazık uzunluğu, yükleme şartları ve diğer malzeme özellikleri aynıdır.

İki boyutlu çözüme geçildiğinde, kazık sıraları sürekli bir duvara dönüştüğü için uç direnci ve çevre sürtünmesine çalışan alanlar değişmektedir. Eşlenik duvar ve temsil ettiği kazıkların aynı taşıma gücüne sahip olabilmesi için bir düzeltme gerekmektedir. Uç kesit alanına müdahale edilemediği için uç mukavemetinde bir değişiklik yapılamamaktadır. Uzun kazıklarda, uç direnci çevre sürtünmesine göre çok daha küçük olduğundan bu etki ihmal edilebilir. Her bir duvarda iki yan yüzey olduğu göz önüne alınarak arayüzey elemanının eşdeğer çevre direnci:

$$f_{se-duvar} = \frac{n_k A_s f_s}{2L_r} \quad (2.16)$$

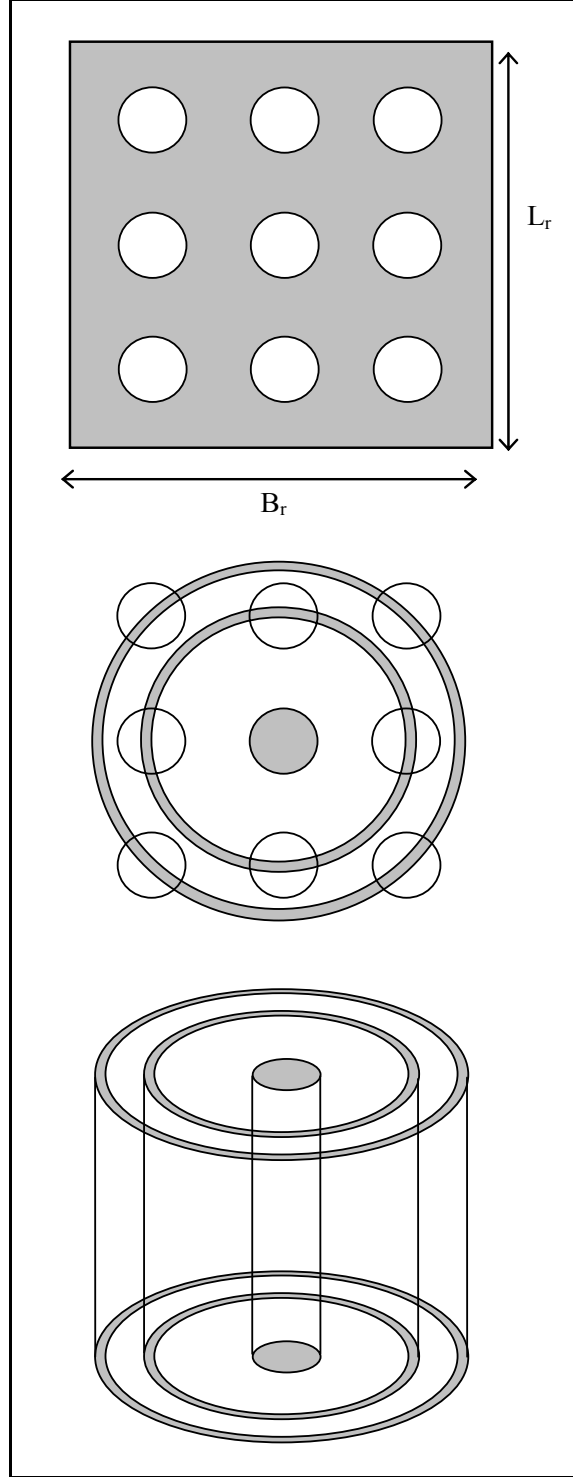
şeklinde hesaplanmalıdır (Prakoso ve Kulhawy, 2001). Burada A_s , birim derinlik için bir kazığın çevre alanı ve f_s , kazık boyunca etkiyen birim çevre sürtünmesidir.

Prakoso ve Kulhawy (2001), düzlem deformasyon sonlu eleman yöntemiyle, kazıklı radyelerin düşey yük altındaki davranışını elastik ve elasto-plastik zemin modelleri kullanarak incelemişlerdir. Analizleri sonucunda kazıklı radye davranışını en çok etkileyen geometrik parametreler olarak kazık grubu genişliği/radye genişliği oranı (Sert, 2003) ve kazık uzunluğu bulunmuştur. Yazarlar, kazıklı radye tasarımı için yerdeğiştirmelere dayalı bir yöntem önermişlerdir. De Sanctis ve Russo (2002), bu çalışma için yazdıkları tartışmada düzlem deformasyon sonlu eleman yönteminin kazıklı radye davranışının analizi için pek uygun olmadığı görüşünü belirtmişlerdir.

Hooper (1973) tarafından ortaya konulan eksenel simetrik modellemede, sistemin simetrisinden faydalanılmaktadır. Oluşturulan halkaların merkezleri temsil ettikleri kazıkların merkezleri ile çakıştırılır (Şekil 2.8). Halkanın rijitliği temsil ettiği kazıkların toplam rijitliğine eşittir. Halka kalınlığı, halka kesit alanı, temsil ettiği kazıkların toplam kesit alanına eşit olacak şekilde belirlenir. Kazıkların toplam çevre sürtünmesinin elde edilebilmesi için kazık-zemin yüzeyi sürtünme değeri ayarlanmalıdır. Hooper, bu yaklaşımın gözlemlenen davranışla benzer sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Pressley ve Poulos (1986), eksenel simetrik sonlu eleman yöntemiyle, kare yerleşimli kazık gruplarının doğrusal olmayan yük-oturma davranışını incelemişlerdir. Analizlerde küçük kazık aralıklarında blok göçme meydana gelmiş ve sadece dış kazıklarda zemin-kazık yüzeyinde kayma olmuştur. Kazık aralığı büyüdükçe

sistemin davranışı blok göçmeden tekil kazıkların göçmesine dönmüş ve tüm kazıklarda kazık-zemin ara yüzeyinde kayma görülmüştür. Elde edilen grup oturma oranı ve grup etkinliği değerleri diğer yöntemlerle uyumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 2.8: Eksenel simetrik sonlu eleman yöntemi

3. *Melez yöntemler*: Farklı metotlarının birarada kullanıldığı yöntemlerdir.

Hain ve Lee (1978), etkileşim faktörlerini kullanarak radye temeli ince plak sonlu elemanlarla, kazık-zemin ortamını ise sınır elemanlar yardımıyla modellemişlerdir.

Clancy ve Randolp (1993), çalışmalarında kazıkları çubuk sonlu elemanlar ve radyeyi iki boyutlu ince plak olarak modellemişlerdir. Etkileşim faktörleri Mindlin denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Kazık boyunca yük aktarımı için doğrusal olmayan t-z yaylarından yararlanılmıştır. Sadece elastik şartlar dikkate alınsa da, sonlu eleman yönteminden çok daha az denklem gerektirmesi ve sınır eleman yönteminin zaman alıcı integrallerine ihtiyaç duymaması yöntemin avantajıdır.

Franke ve diğ. (1994), kazıklar için sınır eleman, radye için sonlu eleman analizlerinin kullanıldığı ve kazıkların doğrusal olmayan davranışını dikkate alan bir yöntem önermişlerdir.

Ta ve Small (1996), kazıklı radye temellerin tabakalı zeminlerdeki davranışını inceledikleri çalışmalarında kazık-radye-zemin etkileşimini dikkate almışlardır. Radye, sonlu eleman ve zemin-kazık ortamı, sonlu tabaka metotları kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonucunda toplam ve farklı oturmalar, radyedeki eğilme momentleri ve kazık yükleri elde edilmektedir.

4. *Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi*: 3 boyutlu sonlu eleman yöntemi, kazıklı radye temellerin analizinde genellikle en uygun çözümleri vermesine rağmen, bilgisayar kapasitelerinin sınırlı olması ve zaman sorunu nedeniyle fazla kullanılamamaktadır. Ancak son dönemlerdeki teknolojik gelişmeler bağlı olarak, bu metot çalışmalarda daha sık yer almaya başlamıştır.

Ottaviani (1975), radyenin zeminle temasının temel sisteminin davranışı üstündeki etkisini incelemek için 3 boyutlu sonlu eleman yöntemini kullanmıştır. Temel sistemi kare kesitli 3x3 ve 3x5 kazıktan oluşmaktadır. Sistemler, kazık grubu ve kazıklı radye olarak incelenmiştir. Çalışmada, zeminle temas eden radyenin yükün sadece bir bölümünü doğrudan zemine aktarmakla kalmadığını, kazıkların zemine yük aktarım davranışını da etkilediği belirtilmiştir. Radyenin zeminle teması, kazıkların üst bölümlerinde zemindeki kayma gerilmesini azaltmakta, aynı zamanda kazık ucunda düşey gerilmeyi arttırmaktadır.

Reul ve Randolph (2003), aşırı konsolide Frankfurt kilinde inşa edilen üç gökdelenle yapılan oturma ölçümleri ile 3 boyutlu sonlu eleman çözümlerini karşılaştırmışlardır.

Yapılan analizlerde, toplam ve farklı oturmalar ile kazıkların taşıdığı yük miktarı (sonlu eleman çözümlerinde biraz daha yüksek çıkmasına rağmen) ölçümlerle uyum içindedir.

Liang ve diğ. (2003), önerdikleri karma kazıklı radye temellerin analizi için 3 boyutlu sonlu eleman yöntemini kullanmışlardır. Karma kazıklı radye olarak tanımladıkları sistem; radye, radye altında kazıklarda yük dağılımını düzenlemek için kum-çakıldan oluşan bir yastık, yüzeydeki yumuşak zemini güçlendirmek için taş kazık veya zemin-çimento kolonları gibi esnek sayılabilecek malzemeden yapılmış kısa kazıklar ve oturmayı azaltmak için beton gibi daha rijit malzemelerden yapılmış taşıyıcı tabakaya giren uzun kazıklardan oluşmaktadır. Yazarlar 3 boyutlu sonlu eleman yöntemiyle bu sistemi analiz etmişler ve Çin’de bu tarzda yapılmış bir temel sistemine de uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda bu sistemin yüzeye yakın yumuşak zemin tabakası olması durumunda kullanılabileceğini ve temel maliyetinde ekonomi sağlayacağını belirtmişlerdir.

3. METOT

Tez çalışmasının amacı kazıklı radye temellerin yük-oturma davranışını inceleyerek tasarımıda ilk aşamada kullanılabilecek basit bir hesap yöntemi geliştirmektir. Bu hedef doğrultusunda santrifüjde model deneyleri yapılmış, sonlu eleman metodunu kullanan Plaxis 3D Foundation yazılımından ve literatürde mevcut diğer bazı basit hesap yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Çalışmada izlenen metodun detaylandırıldığı bu bölümünde, öncelikle kazıklı radye temel davranışında ele alınan değişkenler tanımlanmıştır. Bu değişkenler taşıma gücü, radye ile kazıklar arasındaki yük paylaşım oranı, kazık boyu ve oturmalarıdır.

Daha sonraki adımda fiziksel modellemede kullanılan santrifüj deney sisteminin özellikleri, hesap esasları, numune hazırlanması ve kullanılan ekipman anlatılmıştır. Santrifüjde gerçekleştirilen model deneyleri iki ana grupta ele alınabilir. Kazıklı temel ve kazıklı radye temelin taşıma güçleri açısından karşılaştırıldıkları ilk grup deneylerde 2 adet model deneyi yapılmıştır. Ayrıca tekil kazık taşıma gücünü bulmak için de yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Farklı kazık sayısı ve boylarının kazıklı radye sistemin yük-oturma davranışına etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen ikinci grup deneylerde ise 2 farklı numune kutusunda 6 adet model yüklenmiştir. Deneylerin detayları ve sonuçları 4. bölümde yer almaktadır.

Bir sonraki bölümde genel hatlarıyla sonlu eleman yöntemi anlatılmış ve bu yöntemin kullanıldığı ileri sayısal analiz yöntemi olan Plaxis 3D Foundation ticari yazılımın özelliklerine değinilmiştir.

Çalışmaya literatürde mevcut olan ve santrifüj deneyleri ile önerilen basit hesap yönteminin uygulandığı 2 adet örneğin tahkikinde kullanılan diğer basit hesap metodlarının detayları verilerek devam edilmiştir. Bu yöntemler eşdeğer ayak yöntemi, oturma oranı yöntemi ve etkileşim faktörleri yöntemidir. Tahkiklerde Plaxis 3D Foundation yazılımından da yararlanılmıştır.

Son olarak kazıklı radye temellerin tasarımıda ilk aşamada kullanılabilecek basit bir hesap yöntemi olarak önerilen metot ele alınmış ve hesap esasları anlatılmıştır.

3.1. Değişkenler

3.1.1. Taşıma gücü

Göçme oluşmadan taşınabilecek en büyük yük değerini ifade eden temelin son taşıma gücü çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Kare şekilli radyeler üzerinde yapılan deneyler, radye genişliğinin % 10'una karşılık gelen oturma değerindeki yükün radye temelin son taşıma gücü olarak alınabileceğini göstermiştir (Cooke, 1986).

Aynı yüke maruz kalan kazık grubu ile eşdeğeri tekil kazığın davranışı farklıdır. Bu farklılığın taşıma gücündeki ifadesi olan grup etkinlik sayısını hesaplamak için literatürde birçok metot mevcuttur. Kumdaki (gevşekten orta sıkıya kadar) kazık gruplarının etkinlik sayısı genellikle birden büyüktür (Vesic, 1981). Ancak pratikte çakma kazıklar için 1, yüzen sondaj kazıkları için ise daha küçük değerler kullanılmaktadır. Kil zeminlerde ve sıkı kumda ise etkinlik sayısı çoğunlukla birden küçük (0.7-0.9) olmaktadır (Cooke, 1986).

Kazık grubunun göçmesi iki türlü meydana gelebilir: (1) tekil kazık taşıma gücünün aşılması veya (2) kazık grubunun blok göçmesi. Blok göçme kaba daneli zeminlerde taban alanı/yanal alan oranı birden küçük olduğunda meydana gelebilir (Fleming ve diğ., 1992). Yakın aralıklarla yerleştirilen uzun kazıklardan oluşan gruplarda daha büyük aralıklı kısa kazık gruplarına göre blok göçmenin gerçekleşmesi daha büyük olasılıktır. Kildeki kazık gruplarında, kazık aralığı/kazık çapı oranı 4'den küçük olduğu (veya bir başka deyişle kazık aralığının yaklaşık olarak kazık çevresine eşit olduğu) durumlarda blok göçme oluşmaktadır (De Mello, 1969; Cooke, 1986). Daha büyük aralıklarda gruptaki kazıklar tekil kazık olarak davranırlar.

Kazıklı radyenin son taşıma gücü için, (1) kazık bloğunun son taşıma gücü ile blok dışında kalan radyenin son taşıma gücü toplamı, veya (2) gruptaki tüm kazıkların son taşıma güçleri ile radyenin son taşıma gücü toplamından daha küçük olan değer alınabilir (Poulos, 2000a). Mandolini ve diğ. (2005), blok göçmenin meydana geldiği kazık aralığına kadar ilk değer, daha büyük kazık aralıkları için ise ikinci değer kullanılmasının uygun olacağı görüşündedirler. Borel (2001) ve Liu ve diğ. (1994) sistemin son taşıma gücü, radye ve kazık grubunun son taşıma güçlerinden hesaplanırken her iki değer için de birer etkileşim sayısı kullanılmasını önermişlerdir.

Kildeki kazıklı radyelerin son taşıma gücünün kazıklı temellerin son taşıma gücüne oranı her zaman birden büyüktür (De Sanctis ve Mandolini, 2006). Buradan radyenin,

sistemin son taşıma gücünü arttırdığı açıkça görülmektedir. Kazıklı radyenin son taşıma gücünün, radye ve kazıkların son taşıma güçlerinin toplamına oranı 0.8-1.0 arasındadır ki bu kazıklı radyenin son taşıma gücünün, sistem elemanlarının toplam taşıma gücü değerinin en az % 80'ine eşit olduğu anlamına gelmektedir.

3.1.2. Yük paylaşım oranı

Kazıklı radye temelde yapı yükü hem radye hem de kazıklar tarafından zemine aktarılmaktadır. Bu sistemlerin davranışına etkiyen parametrelerin (kazık, radye ve zemin özellikleri, yükleme şekli gibi) sayısı ve değişim aralığı çok geniştir. Bu nedenle kazıklı radye en karmaşık temel sistemlerinden birini oluşturur. Cevaplanması gereken önemli sorulardan biri, yapı yükünün kazıklar ve radye arasındaki paylaşım oranının hangi değeri alacağıdır (Togrol ve Gök, 2001).

De Sanctis ve Mandolini (2006) yaptıkları çalışmada kazıklı radye temelin optimum tasarımı için kullanılabilecek bir öneri sunmuşlardır. Kildeki kazıklı radyede ($s/d \geq 4$) kazıklar, kazıklı temel ile aynı miktarda yük taşımaktadır ($\alpha_{ku}=1$). Oysa kazık yerleşimi ve özelliklerine bağlı olarak radyenin taşıdığı yük miktarı, sadece radyenin olduğu sisteme göre daha azdır ($0.4 \leq \alpha_{ru} \leq 1.0$, ortalama 0.75). Sonuçların doğrusal regresyonundan A_r , radye alanını olmak üzere $\alpha_{ru} = 1 - 3[(A_{kg} / A_r) / (s / d)]$ ifadesi elde edilmiştir. $(A_{kg} / A_r) / (s / d) = 1/3$ eşitliği temel sisteminin kazıklı temel davranışından kazıklı radye davranışına geçtiği kritik değer olarak görülebilir. Tasarımda sağlanması istenilen diğer koşullara dikkat edilerek bu ifade yardımıyla kazıklı radye tasarımı için bir optimum sonuç bulunabilir.

Kazıklı radye temelde yük paylaşımında diğer birçok parametre yanında kazık aralığı/kazık çapı oranı önemli bir etkidir (Mandolini ve diğ., 2005). Aralık arttıkça radyenin taşıdığı yük miktarı artmaktadır.

3.1.3. Kazık boyu

Kazık boyu, kazıklı radyenin yük-oturma davranışını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Oturma miktarında elde edilecek azalma büyük ölçüde kazık boyu/radye genişliği (L/B_r) oranına bağlıdır. Sistemde mümkün olduğunca uzun kazıkların kullanılması daha uygundur (Cooke, 1986; Russo ve Viggiani, 1998). Ancak kazık boyu arttıkça radyenin aldığı yük azalmaktadır. Bu nedenle optimum

tasarım için hangi uzunlukta kazıkların (*etkin kazık boyu*) kullanımının uygun olacağı incelenmelidir. Etkin kazık boyundan daha uzun kazıkların oturmaya etkisinin oldukça azaldığı göz önünde tutulmalıdır (Balakumar ve diğ., 2005; Prakoso ve Kulhawy, 2001; Randolph, 1994). Büyük boyutlu radyelerde, özellikle farklı oturmaları azaltmak amacıyla kullanılan kazıklarda, optimum bir toplam kazık boyu her zaman bulunabilir (Viggiani, 2001; Katzenbach ve diğ., 1998).

3.1.4. Oturma

Oturma, yük altında temelin herhangi bir noktasında oluşan yerdeğiştirmedir. Toplam oturma yapıya önemli zararlar vermese de altyapıda sorunlar yaratabilir. Yapılarda hasara daha çok farklı oturmalar sebep olmaktadır. Kum zemindeki radye temellerde kabul edilebilir sınır değerler, toplam oturma ve farklı oturmalar için sırasıyla 40-65 mm ve 25 mm olarak verilirken, kil zeminler için 65-100 mm ve 40mm'dir (Skempton ve MacDonald, 1953). Radyede oturmalar radye boyutuna bağlı olarak artmaktadır (Cooke, 1986).

Radye temelde toplam oturmayı azaltmak için en uygun çözüm, radye genişliğinden daha uzun kazıkları, radye alanının tümüne düzgün yayılı bir şekilde yerleştirmektir. Oturmalar özellikle L/B_r oranına bağlı olarak değişmektedir. Ancak büyük boyutlu radyelerde ($B_r > 15m$) bu uygulanabilir olmayacaktır ve toplam oturma kazık sayısının artırılması ile çok fazla azalmayacaktır (Mandolini ve diğ., 2005). Ayrıca kazık aralığı/kazık çapı (s/d) oranının 4'ten küçük olması durumunda oturmalarda fazla azalma gözlenmemektedir (Cooke, 1986). Farklı oturmaları azaltmak için ise yükleme şartlarına göre belirlenen bölgeye (örneğin düzgün yayılı yük durumunda merkeze) az sayıda kazık yerleştirmek uygun bir çözüm olacaktır (Viggiani, 2001; Yuan ve diğ., 2001; Horikoshi ve Randolph, 1998).

Tekil kazığın oturmasına bağlı olarak kazıklı temel veya kazıklı radyenin oturmaları ampirik ifadelerle hesaplanabilir (Poulos ve Davis, 1980; Clancy ve Randolph, 1993; Mandolini ve diğ., 2005). Tekil kazığın oturması kazık yükleme deneyi veya literatürde mevcut yöntemlerle hesaplandıktan sonra sistemin oturması, kazık sayısı, aralığı, narinlik oranı gibi değişkenlere bağlı olarak abaklar yardımıyla elde edilen R_s grup oturma etkinliği ile çarpılarak bulunur (Skempton ve MacDonald, 1953; Meyerhof, 1969; Vesic, 1969). Ayrıca toplam oturmalar ve farklı oturmalar arasındaki ilişki de yine ampirik bağıntılarla ifade edilebilir.

3.2. Santrifüj Deney Sistemi

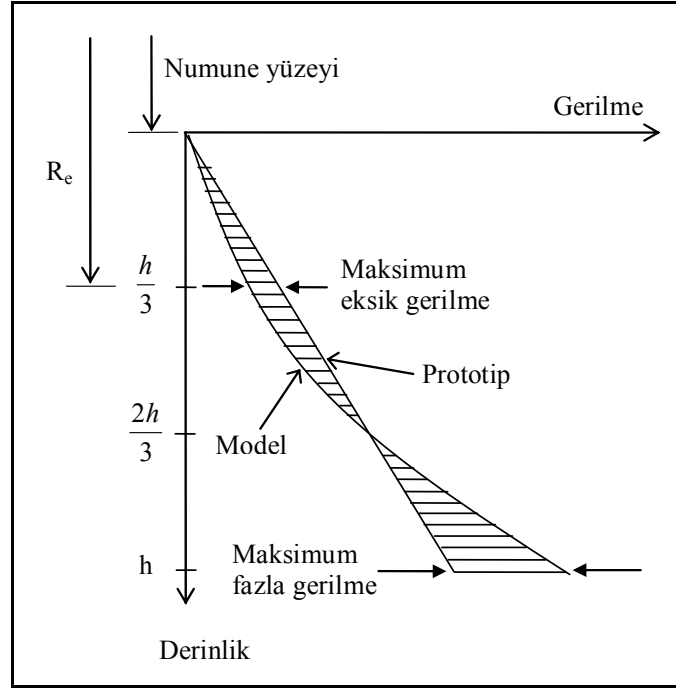
Santrifüj, prototip veya arazide zeminde oluşan gerilme değerine ve dağılımına eşdeğer durumu, merkezkaç kuvvetini arttırarak daha küçük ölçekli (1/n) bir sistemde elde etme ilkesine dayanır. Böylece problemlerin fiziksel modellenmesi sırasında karşılaşılabilecek boyut veya zaman sorunlarının aşılması mümkün olur. Santrifüjde model/prototip ölçek katsayıları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Santrifüj sistemde ölçek katsayıları

Parametre	Birim	Model/Prototip
İvme	m/s^2	n
Doğrusal boyut	m	1/n
Gerilme	kPa	1
Birim şekil değiştirme	-	1
Yoğunluk	kg/m^3	1
Ağırlık veya Hacim	kg veya m^3	$1/n^3$
Birim ağırlık	N/m^3	n
Kuvvet	N	$1/n^2$
Eğilme momenti	Nm	$1/n^3$
Zaman (difüzyon)	s	$1/n^2$
Zaman (dinamik)	s	1/n
Frekans	1/s	n

Arttırılmış yerçekimi ivmesi numune boyunca sabit olmayıp santrifüj merkezinden uzaklığa bağlı olarak arttır. Bu nedenle modelde gerilme dağılımı doğrusal değildir ancak belli bir derinlikte prototipte ve modelde birbirine eşittir (Şekil 3.1). Kaynaklanacak hatayı en aza indirmek için dikkat edilecek nokta, kullanılacak n katsayısının hangi yarıçap için verileceğidir. n değerinin verileceği efektif santrifüj yarıçapı R_e , incelenen probleme göre değişebilir ama genel amaçlar için merkez aks üzerinde, santrifüj merkezinden h numune yüksekliğinin 1/3’üne kadar alınabilir (Taylor, 1995). Bu değer kullanılırsa arttırılmış ivme değerini numune boyunca sabit kabul etmekten doğan hata ihmal edilebilir.

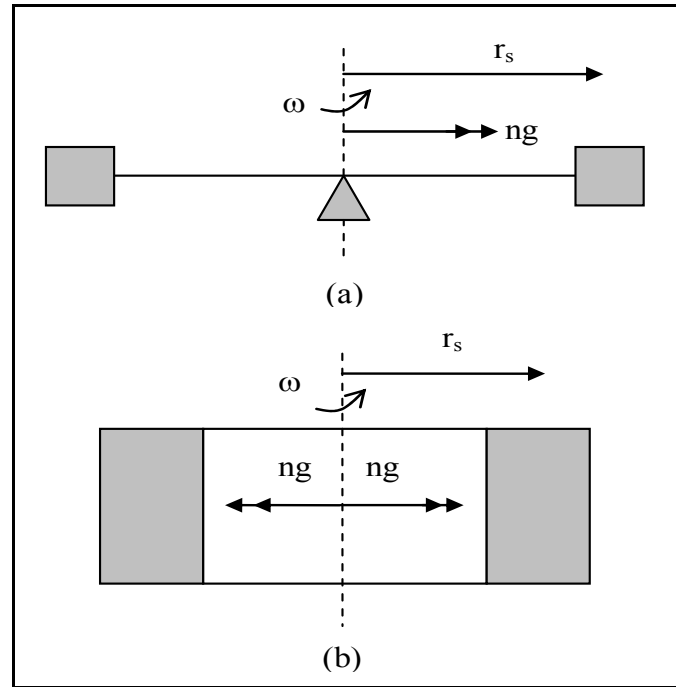
Santrifüjde deney yaparken kullanılan zeminin ortalama dane boyutuna, Coriolis ivmesine, sınır etkilerine, oluşabilecek içbükey zemin ve su yüzeylerine (kiriş tipte) dikkat etmek gerekir. Killerde dane boyutunun etkisi ihmal edilebilir ancak kaba daneli zeminlerde dikkate alınmalıdır. Sınır etkileri, numune kutusunun iç yüzeyleri yağlanarak veya modeli kenarlardan ve tabandan yeterli uzaklığa yerleştirilerek en aza indirgenebilir. Oluşan içbükey zemin ve su yüzeylerinin yaratabileceği sorunları modeli numune kutusunun merkezine yakın koyarak azaltmak mümkündür.



Şekil 3.1: Prototip ve santrifüjde derinlikle gerilme dağılımı (Taylor, 1995)

3.2.1. Santrifüj tipleri ve santrifüjde numune hazırlama

Günümüzde kiriş santrifüj ve davul santrifüj olmak üzere iki ayrı model kullanılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Günümüzde kullanılan santrifüj tipleri (a) Kiriş tip; (b) Davul tip (Laue, 2002)

Kiriş tipte, kirişin bir ucunda modelin olduğu düzenek, diğer ucunda ise sistemi dengede tutan ağırlık yer alır. Davul santrifüjde ise, sistemin çevresi boyunca tüm kanal çalışma alanı olarak kullanılabilir.

Numune hazırlamak için araziden alınan veya laboratuvarda hazırlanan zeminler kullanılabilir. Malzeme seçiminden sonra, zemin numunesinin laboratuvar şartlarında mı yoksa santrifüjde mi hazırlanacağına karar verilmelidir. Numune genellikle giriş tipte laboratuvar şartlarında, davul tipte ise santrifüj çalıştığı sırada hazırlanır.

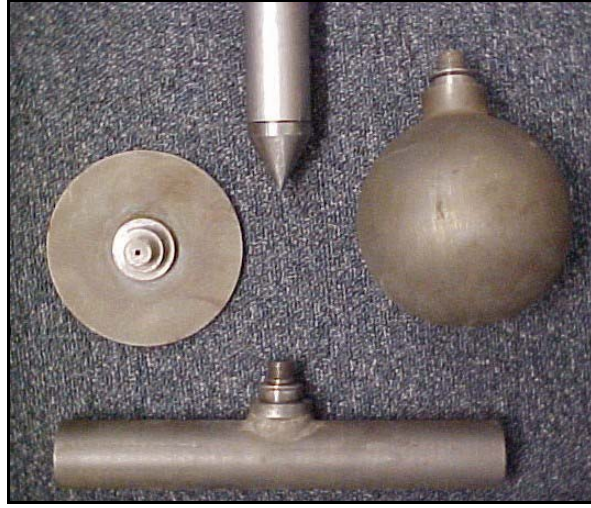
Kaba daneli zeminler genellikle yağmurlama yöntemiyle hazırlanırlar. İstenilen sıklık veya birim hacim ağırlık, zeminin döküldüğü yüksekliğin ya da akış hızının kontrolü ile sağlanır. Kiriş tipte, kaba daneli zemin numunesi laboratuvar şartlarında veya santrifüj çalışırken hazırlanabilir. Malzeme, santrifüj dönerken numune kutusunun üstüne yerleştirilen bir huniden dökülür. Danelerin izleyeceği yörünge ve düşecekleri nokta hesaplanırken, zemin danesi üzerindeki Coriolis etkisi dikkate alınmalıdır. Davul tipte ise numune santrifüj çalışırken hazırlanır ve giriş modele göre daha kolaydır.

Kil numuneler laboratuvarda mikserde vakum uygulanarak, yüksek su muhtevasında (likit limit değerinin iki katı) çamur karışım olarak hazırlanır. Kiriş santrifüjde, normal konsolide kil numunesi elde etmek için, numune kutusuna boşaltılan çamur karışım doğrudan santrifüje yerleştirilir, sistem çalıştırılarak numune konsolidasyona bırakılır. Ancak numune öncelikle preste istenilen gerilmeler altında konsolide edilip, daha sonra santrifüjde konsolidasyona bırakılır ise üst bölgeler aşırı konsolide olur. Davul tipte ise mikserde hazırlanan çamur karışım doğrudan santrifüje konulur.

Kaba daneli zemin ile numune hazırlanırken ölçeğin dane boyutu üzerindeki etkisine dikkat edilmelidir. Doğrusal boyutlarda ölçek katsayısı n olduğundan, 200g'de 1 mm boyutundaki bir dane gerçekte 20 cm'lik bir taş eşdeğer olacaktır. Bu nedenle kaba daneli zemin kullanıldığında maksimum dane boyutu 0.3 mm'den küçük olan ince kum tercih edilmelidir (Laue, 2002). Aynı prototipi temsil eden modellerin farklı n değerlerinde test edilmesiyle (modelin modellenmesi) ölçek etkisi kontrol edilebilir.

3.2.2. Santrifüjde kullanılan ekipman

Santrifüjde zemin özellikleri deney sırasında, öncesinde ve sonrasında belirlenebilir. Sıklıkla kullanılan deneyler Vane, CPT ve T-Bar'dır. Arazide de kullanılan bu aletler, boyutları küçültülerek santrifüje uygun hale getirilmişlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Farklı şekillere sahip penetrometre uçları (Chung ve Randolph, 2004)

Sadece killerde kullanılan Vane deneyinde, aleti döndürmek için gerekli olan kuvvetten zeminin drenajsız kayma mukavemeti (s_u) elde olunur.

CPT deneyi kumdan kile kadar geniş bir zemin aralığı için kullanılır. 60°'lik bir açıya sahip koniye ve bağlı olduğu şafta etkiyen basınçlar ölçülür. Ucun hemen arkasına yerleştirilen boşluk suyu basınç ölçeri ile penetrasyon sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ölçülebilir. CPT deney sonuçları kaba daneli zeminin rölatif sıkılığının, ince daneli zeminin drenajsız kayma mukavemetinin ve tabakalar arası geçişin belirlenmesi için kullanılır.

T-Bar deneyi özellikle normal konsolide yumuşak killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemek için Batı Avusturalya Üniversitesi'nde tasarlanmıştır. 5mm çapında ve 20 mm uzunluğunda alüminyum bir silindir ve dik açı ile bağlı olduğu bir çubuktan oluşan T-bar aletinin tasarımında çıkış noktası zemine yatay olarak itilen, çevre yüzeyi perdahlı, yanıl yüzeyi pürüzsüz yuvarlak çubukların davranışdır (Stewart ve Randolph, 1991). T-bar, CPT ve Vane deneylerinin avantajlı yönlerini birleştirmektedir. Vane deneyinde olduğu gibi herhangi bir amprik yaklaşım kullanmadan zeminin drenajsız kayma mukavemetini hesaplanmasını sağlamakta ve CPT deneyi gibi sürekli bir zemin profili boyunca değerleri vermektedir.

CPT ve T-Bar deneylerinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta uygun penetrasyon hızının belirlenmesi, Vane deneyinde ise dönüş hızının seçimidir (Horikoshi, 1995).

Santrifüjdeki modelde oluşacak gerilme, şekil değiştirme, boşluk suyu basınçları veya incelenen probleme göre elde edilmek istenen diğer değişkenler uygun ölçme aletleri ile elde edilebilir. Görsel tekniklerle de bazı parametreleri izlemek ve ölçmek mümkündür.

Arazide veya laboratuvarında kullanılmakta olan ölçüm aletlerinin çoğu boyutları ve ölçme aralığı uygun hale getirilerek santrifüjde de kullanılmaktadır. Santrifüjde yararlanılan ölçü aletleri çok küçük ve hafif olmalıdırlar, aksi takdirde kullanıldıkları bölgenin davranışını etkileyebilir veya ilave yük oluşturabilirler.

Tüm ölçme sistemleri için doğru kalibrasyon en önemli noktadır. Aletin kalibrasyonu sürekli kontrol edilmeli ve gerekirse her kullanım öncesi yeniden yapılmalıdır.

Santrifüjde yük sıklıkla üreteçler tarafından uygulanır. Üreteçler hava, su ya da yağ basınçları ile istenilen yük değerini sağlarlar. Gelişen teknoloji sayesinde motorlu sistemlerle yükleme yapmak daha sık kullanılır olmuştur. Uygulanan yük genellikle model-üreteç, yapı-zemin gibi farklı iki eleman arasına yerleştirilen yük hücreleri ile ölçülür. Gerilmeler doğrudan ölçülemediği için, ölçülen şekil değiştirmelerden elde edilirler. Şekil değiştirmeleri ölçen aletler, zemin-yapı elemanı arayüzey davranışını etkilememesi için yapı elemanının içine yerleştirilmeye çalışılmalıdır. Eğer zemin veya su ile temasları olacak ise, gerekli yalıtım tedbirleri alınarak korunmalıdır.

Boşluk suyu basınç ölçerler yerleştirildikleri noktadaki boşluk suyu basınçlarını verirler. Günümüzde en çok kullanılan model DRUCK PDCR 81'dir (Phillips, 1995). Ön yüzdeki poroz taş, içerideki membrana sadece su basıncının etkimesini sağlar. Zeminin geçirgenliğine göre bu taşların seçimi yapılır. Seramik elemanlar killer için uygun iken, kaba daneli zeminler için daha geçirgen bir malzeme tercih edilmelidir. Boşluk suyu basınç ölçerin, basınç değişimini hemen algılayabilmesi için poroz taşın başlangıçta tamamen suya doymun olması sağlanmalıdır. Ayrıca boşluklarında hava kalmamalıdır. DRUCK PDCR81 dışında farklı firmaların ürettiği boşluk suyu basınç ölçerler mevcuttur, ancak bunlar ya çok büyüktürler ya da zemin içine gömülerek kullanılmaya uygun değildirler (Phillips, 1995; Laue, 2002).

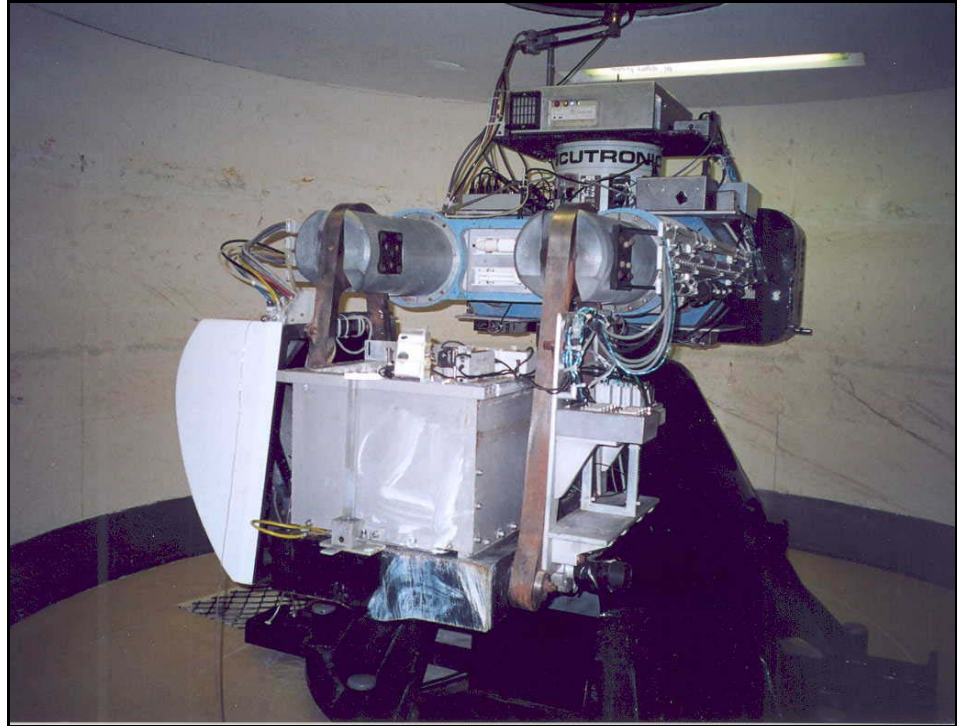
Yerdeğiştirme ölçümünde çoğunlukla LVDT, doğrusal potansiyometre veya lazerli ölçerler kullanılır. LVDT ve potansiyometre, yerdeğiştirmenin ölçüldüğü model ile temas halindedir. Lazerli ölçerin ise su seviyesi üstünde bir hedef noktayı görüyor olması yeterlidir.

İki boyutlu problemlerde yerdeğıştirmeler görsel yöntemlerle de elde edilebilir. Zemin içine yerleştirilen elemanlarla zemindeki hareket gözlemlenir. Kumda bu elemanlar boyalı kum bantları olabilir. Kilde ise iğneler veya özel hazırlanmış işaret elemanları kullanılabilir. Bu işaretler zemin davranışını etkilemeyecek özellikte seçilmeli ve numune hazırlanırken yerleştirilmelidir. Bu elemanları gözlemlmek için model kutusunun bir yüzü, sürtünmesi azaltılmış saydam bir malzemeden yapılır. Deney sırasında sürekli fotoğraf çekilerek veya deney kameraya alınarak işaretlerin hareketleri izlenip zeminin davranışı ölçülebilir.

Elektronik alandaki ilerlemeler sayesinde yüksek çözünürlükteki sayısal fotoğrafların yoğunluk değışimleri ölçülerek, işaretlere ihtiyaç duyulmadan yerdeğıştirmeleri elde etmek de mümkündür (White ve diğeri, 2001).

3.2.3. Tez çalışmasında kullanılan santrifüj deney sisteminin özellikleri

Tezde yer alan deneyler, Batı Avusturalya Üniversitesi (University of Western Australia, UWA) Perth'te gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kiriş santrifüj Acutronic Model 661'dir (Şekil 3.4). Santrifüjün çapı $r_s = 1.8$ m ve toplam kapasitesi 40g.ton'dur (Randolph ve diğeri, 1991). Toplam kapasite, yük ile maksimum ivme değeri çarpılarak hesaplanır ($0.2\text{ton} \cdot 200g = 40g.\text{ton}$).



Şekil 3.4: Batı Avusturalya Üniversitesi'nde kullanılan kiriş santrifüj, Acutronic Model 661

Batı Avusturalya Üniversitesi'nde bulunan davul santrifüjde numune hazırlanan kanalın genişliği 0.3 m, çapı 1.2 m ve radyal derinliği 0.2 m, toplam kapasitesi 290 g.ton'dur ($0.6 \text{ ton} \cdot 484 \text{ g}$) (Stewart ve Randolph, 1998) (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Batı Avusturalya Üniversitesi'nde kullanılan davul santrifüj, koruyucu kapak yok

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis 3D Foundation Yazılımı

3.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi ve Geoteknik Mühendisliği'nde kullanımı

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli ortamın sonlu eleman olarak adlandırılan basit geometrik alt bölgelere ayrılarak temsil edilmesidir ve temel yaklaşım, sıcaklık, basınç, gerilme veya yerdeğiştirme gibi herhangi bir sürekli büyüklüğü, küçük ve sürekli parçaların birleşmesinden oluşan bir modele dönüştürmektir.

Öncelikle problemin geometrisi oluşturularak sistem düğüm noktaları ile birbirine bağlanan sonlu sayıda elemana ayrılır. Elemanlara ayırma işleminin doğru biçimde yapılması çözümün doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Eleman boyutları ve sayıları, sistemi en iyi temsil edecek ve aynı zamanda hesapları da en aza indirgeyecek biçimde olmalıdır. Değişkenin ani değişim gösterdiği yerlerde elemanlar genellikle daha küçük seçilir. Tek boyutta elemanlar çizgidir. Düzlem problemlerde kullanılan iki boyutlu elemanlar üçgen veya dörtgen şeklinde

olabilirler. Üç boyutlu elemanlar ise üçgen piramit, dikdörtgenler prizması, daha genel olarak dört veya altı yüzlü elemanlardır.

Sistem sonlu elemanlara ayrıldıktan sonra ele alınan büyüklüğün ortamdaki değişimini gösterecek yaklaşım fonksiyonu seçilir. Seçilen fonksiyon gerçeğe ne kadar yakın ise çözümdeki yaklaşıklık da o kadar fazla olur. Yaklaşım fonksiyonu problemin yapısına ve çözüm bölgesine göre derecesi ve katsayıları belirlenen polinomlar veya seriler olabilir.

Ele alınan büyüklükler arasındaki ilişkiyi gösteren bünye denklemi belirlendikten sonra, bir elemanın davranışını gösteren denklemler elde edilir. Eleman denklemleri birleştirilerek tüm sistemin denklemleri bulunur. Sınır koşulları uygulanan sistem denklemleri çözülerek aranan birincil bilinmeyenler ve buna bağlı olarak da diğer ikincil bilinmeyenler hesaplanır.

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan gerilme-şekil değiştirme problemlerinin sonlu elemanlarla çözümünde, birincil bilinmeyenler çoğunlukla ortamdaki her düğüm noktasının yerdeğiştirmesidir. Yerdeğiştirmeler elde edildikten sonra, gerilmeler gibi diğer ikincil bilinmeyenler bunlara bağlı olarak hesaplanabilir. Bu tür çözümlerdeki sonlu eleman yönteminin adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Desai, 1979) :

1. Modelin geometrisinin belirlenmesi ve elemanlara ayrılması: Çözüm için en uygun geometri, eleman şekilleri ve sayısı belirlenerek ortam sonlu elemanlara ayrılır.
2. Yerdeğiştirme yaklaşım fonksiyonlarının seçimi: Yükleme sonucu elemanda oluşacak yerdeğiştirmelerin dağılımı ve davranışını verecek yaklaşım fonksiyonları için basitlikleri nedeniyle genellikle lineer polinomlar veya trigonometrik seriler seçilir. Yerdeğiştirme u ile ifade edilirse, polinom yaklaşım fonksiyonu:

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + \dots + N_m u_m \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Burada $u_1, u_2, \dots, u_n$ düğüm noktalarındaki bilinmeyen yerdeğiştirmeler ve $N_1, N_2, \dots, N_n$ ise yaklaşım fonksiyonlarıdır.

3. Malzeme bünye davranışının belirlenmesi: Uygulanan yük nedeniyle elemanda oluşacak yerdeğiştirmeyi verecek bağıntının seçilmesidir ve eleman davranışını verecek denklemleri elde etmeye yarar. Sonlu eleman yönteminde en önemli

adımlardan biri bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisini verecek bağıntının tanımlanmasıdır. Malzemenin veya sistemin davranışını doğru olarak yansıtacak bünye denklemleri belirlenmediği takdirde sonlu elemanlar yönteminden elde edilecek sonuçlar gerçekçi olmayacaktır.

4. Eleman denklemlerinin çıkarılması: Geometri ve malzeme bünye davranışına bağlı olarak eleman davranışını veren denklemlerin matris şeklindeki genel ifadesi:

$$[k]\{q\} = \{Q\} \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Burada $[k]$ rijitlik matrisi, $\{q\}$ ve $\{Q\}$ sırasıyla düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme ve yük vektörleridir.

5. Sistem denkleminin elde edilmesi ve sınır şartlarının tanımlanması: Bir tek eleman için elde edilen genel denklem tüm elemanlar için yazılır. Uygunluk/süreklilik ve denge yasalarına dayanarak tüm eleman denklemleri toplanır ve sistemin tümü için rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde olunur:

$$[K]\{r\} = \{R\} \quad (3.3)$$

Burada $[K]$ sistem rijitlik matrisi, $\{r\}$ ve $\{R\}$ sırasıyla tüm sistem için düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme ve yük vektörleridir. Sistem denkleminin çözümünün gerçekleştirilmesi için sınır şartlarının uygulanması gerekir. Sınır şartları ortamın belli parça veya parçalarındaki kısıtlamalardır. Geometrik veya doğal sınır şartları olabilir. Sonlu elemanlar yönteminde matrisin genellikle sadece geometrik koşullar için değiştirilmesi yeterlidir.

6. Birincil bilinmeyenler (yerdeğiştirmeler) için çözüm: Birincil bilinmeyenler olan yerdeğiştirmeleri elde etmek için, sistem denklemleri Gauss eliminasyon veya yinelemeli (iterative) yöntem gibi uygun bir metot ile çözülür.

7. İkincil bilinmeyenler (gerilme, moment, kesme kuvvetleri) için çözüm: Yerdeğiştirmeler hesaplandıktan sonra bunlara bağlı olarak daha önce tanımlanan bağıntılar yardımıyla ikincil bilinmeyenler elde olunur.

3.3.2. Plaxis 3D Foundation yazılımı

Geoteknik Mühendisliği'nde kullanılacak bir sonlu eleman yazılımı zeminin elasto-plastik davranışını, heterojenliğini, drenajlı ve drenajsız davranışını, başlangıç gerilme durumunu ve karmaşık sınır ve başlangıç koşullarını dikkate alabilmelidir. Plaxis 3D Foundation yazılımı, özellikle temellerin 3 boyutlu analizi için hazırlanmış ticari bir sonlu eleman programıdır (Brinkgreve ve Broere, 2006).

İleri bir sayısal analiz yöntemi olan bu metotta, birçok karmaşık geometri, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumu dikkate alınabilir. Ancak bu tür çözümlerde çok fazla zamana ve yüksek bilgisayar kapasitelerine gereksinim duyulabilmektedir. Bazen daha basit analiz yöntemleri ile de çok uygun sonuçlar elde etmek mümkündür.

Kazıklı radye temelde kazıklar, radye ve zemin arasındaki etkileşimi dikkate alabilen Plaxis 3D Foundation yazılımı; geometri, sınır şartları ve malzeme özelliklerinin tanımlandığı *giriş*, yapım aşamalarının tanımlanıp analiz edildiği *hesap*, sonuçların görülebildiği *çıkış* ve bu sonuçların grafiklerinin elde edilebildiği *grafik* alt bölümlerinden oluşmaktadır.

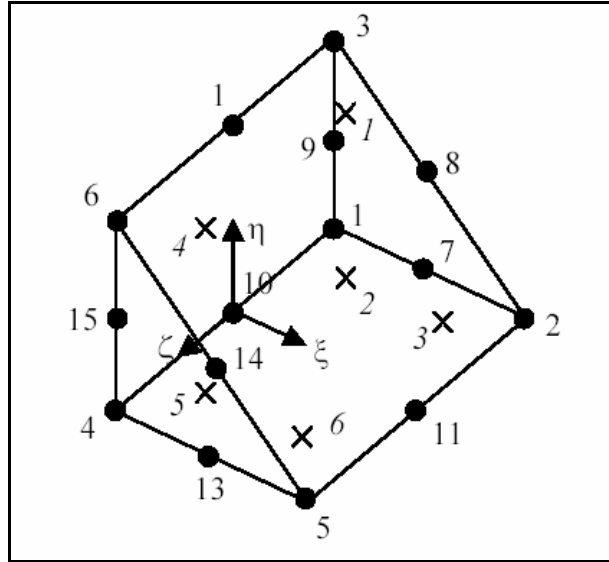
Giriş bölümünde öncelikle modelin geometrisi oluşturulur. Noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan model geometrisi çözülecek gerçek problemi temsil etmelidir. Modelin geometrisi ilk adımda üstten görünümde, diğer bir deyişle iki boyutlu (x-z) düzlemlerde belirlenir. Farklı zemin tabakaları, yeraltı suyu, yapısal elemanlar, inşaat aşamaları, yükler bu aşamada tanımlanır ve özellikleri atanır. Plaxis 3D Foundation yazılımının giriş bölümünde grafik yöntemden yararlanıldığı için kullanıcıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Model geometrisi belirlendikten sonra önce iki boyutta, daha sonra üçüncü boyutta düzgün olmayan sonlu eleman ağı program tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Kullanıcı sonlu eleman ağı oluşumuna ancak genel (çok kaba, kaba, orta, ince, çok ince) veya bölgesel (alanda, çizgide, noktada inceltme) ağ irilik durumunu seçerek müdahale edebilmektedir. Seçilen ağ iriliğine göre eleman sayısı belirlenmekte, problemin çözüm süresi de bu sayıya bağlı olarak değişmektedir. Problemin sonuçlarını etkilememesi için seçilen modelin sınırları yeterince geniş olmalıdır. Üç boyutlu ağ oluşturulduktan sonra model kaydedilerek hesap aşamasına geçilir.

Hesap aşamasında inşaat aşamaları tek tek tanımlanmaktadır. İlk aşamada program otomatik olarak başlangıç koşullarındaki gerilme durumunu oluşturur. Bu esnada geometride daha önce tanımlanmış olan tüm yapısal elemanlar ve yükler yok sayılır, sadece zemin tabakaları mevcuttur. Başlangıç koşullarındaki gerilme durumu K_0 veya ağırlık yükleme yöntemi olmak üzere iki şekilde hesaplanabilir. Diğer aşamalar problemin özelliğine göre kullanıcı tarafından adım adım oluşturulur. Grafikleri çizilmek istenen düğüm noktaları seçildikten sonra ‘hesapla’ komutuyla program çözüme başlamaktadır.

Hesaplamaların tamamlanmasıyla sonuçlar (gerilme, yerdeğiştirme, boşluk suyu basınçları, momentler, kesme kuvvetleri gibi bilinmeyenler) çıkış alt bölümünde her aşama için grafik ve sayısal olarak alınabilir. Daha önce belirlenen düğüm noktalarının eğrileri grafik alt bölümü kullanılarak çizdirilebilir.

Plaxis 3D Foundation yazılımında elemanlar 15 düğümlü kama elemanlardır, yatay çalışma düzlemlerinde 6 düğümlü üçgen elemanlar ve derinlik boyunca 8 düğüm noktalı dörtgen elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 3.6). 15 düğüm (•) noktasında yerdeğiştirmeler, 6 Gauss (gerilme) noktasında (×) gerilmeler hesaplanır.



Şekil 3.6: Plaxis 3D Foundation yazılımında kullanılan elemanlar

Zemin modeli gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntının matematiksel olarak ifade edilmesidir. Plaxis 3D Foundation yazılımı farklı zemin modellerinin kullanımına olanak tanımaktadır. Sıklıkla kullanılan lineer elastik ideal plastik Mohr-Coulomb modeli yanında, pekleşen zemin ve yumuşak zemin akma modeli gibi

gelişmiş modeller de mevcuttur. Zeminlerin drenajlı ve drenajsız şartlarda davranışı elde edilebilir. Yapısal elemanlar için ise genellikle lineer elastik model ve geçirimsiz ortam seçenekleri kullanılmaktadır.

3.4. Diğer Basit Hesap Yöntemleri

3.4.1. Eşdeğer ayak yöntemi

Bölüm 2’de detayları verildiği üzere eşdeğer ayak yönteminde, kazık grubu eşdeğer bir ayak ile temsil edilir (Poulos ve Davis, 1980). İki tip eşleme kullanılabilir: (1) kazık grubu ile aynı çevre alanına sahip L_e eşdeğer uzunluğunda bir ayak veya (2) kazık grubu ile aynı uzunlukta d_e eşdeğer çapında bir ayak. Tabakalı zemin profilinde eşdeğer çap yaklaşımını kullanmak daha uygundur (Poulos, 1993). Eşdeğer ayak tanımlandıktan sonra oturma, mevcut yöntemlerden biri ile tekil kazığın oturması olarak hesaplanabilir.

3.4.2. Oturma oranı yöntemi

Aynı yüke maruz kalan kazık grubu, eşdeğeri tekil kazığa göre daha fazla oturur. Oturmadaki artış kazık grubunun oturmasının tekil kazığın oturmasına oranıyla hesaplanan R_s oturma oranı ile ifade edilebilir. Butterfield ve Douglas (1981) gruptaki kazıklar arası etkileşimi dikkate alarak, k_k kazık grubu rijitliğini, k tekil kazık rijitliklerinin toplamının bir çarpanı olarak aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir (Fleming ve diğ., 1992):

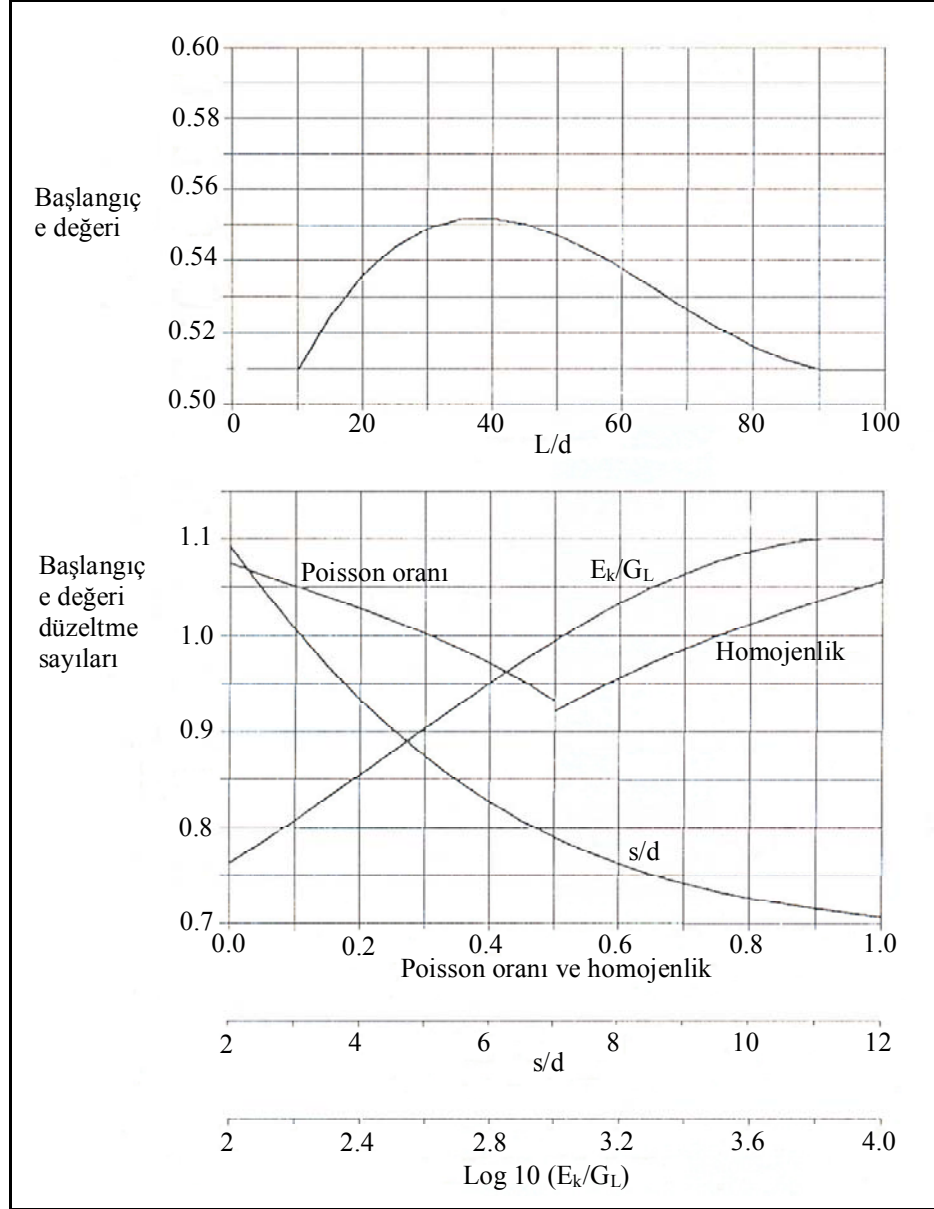
$$k_k = \eta n_t k \quad (3.4)$$

Burada η , oturma oranı R_s ’in tersidir ve bir etkinlik oranı olarak düşünülebilir. Kazıklar arası etkileşim olmadığı durumda η bire eşit olacaktır. Kazık sayısına göre etkinlik oranı grafikleri logaritmik ekseninde çizildiğinde bir doğru elde edildiğinden,

$$\eta = n_t^{-e} \quad (3.5)$$

yazılabilir. e oturma oranı sayısı birçok kazık grubu için 0.4-0.6 arasında yer alır.

e oturma oranı sayısının gerçek değeri kazık narinlik, rijitlik, aralık oranları ve zemin homojenliği ile Poisson oranına bağlıdır ve abaklar yardımıyla hesaplanabilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Oturma oranı yönteminde e sayısı hesap grafikleri (Fleming ve diğ., 1992)

Öncelikle üstteki grafik kullanılarak, başlangıç değerleri olarak kabul edilen kazık rijitlik oranı $E_k/G_L = 1000$, kazık aralık oranı $s/d = 3$, zeminin homojenliği $\rho = 0.75$ ve zeminin Poisson oranı $\nu_s = 0.3$ için, gerçek kazık narinlik oranına (L/d) göre e değeri okunur. Aşağıdaki 4 ayrı grafikten ise daha önce kabul edilen değerlerden farklı gerçek değerler için düzeltme sayıları bulunarak, okunan ilk e değeriyle çarpılır ve gerçek e sayısı bulunur.

3.4.3. Etkileşim faktörleri yöntemi

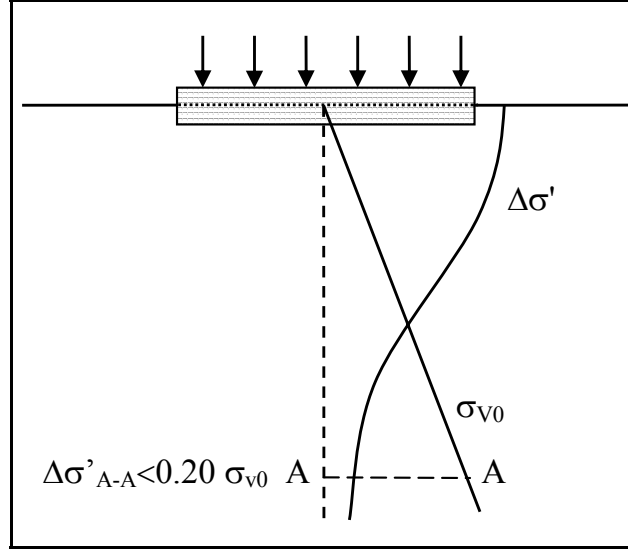
Randolph (1983), kazık başlığı-kazıktan oluşan birim elamanın davranışından yola çıkarak, kazıklı radye temelın davranışını etkileşim faktörleri kullanarak elde etmiştir. Metot, Bölüm 2’de detaylı olarak açıklandığı için burada kısaca değinilecektir. İlk adımda radye ve kazık grubunun ayrı ayrı rijitlikleri literatürde mevcut yöntemlerden herhangi biri ile hesaplanır. Kazıklı radye sistemin rijitliği ile radye ve kazık grubunun taşıdığı yük miktarları bu değerlere ve tanımlanan etkileşim faktörüne bağlı olarak elde edilir.

3.5. Önerilen Hesap Yöntemi

Kazıklı radye temel, radye (veya kazık başlığı) ve kazık grubunun birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Önerilen hesap yönteminde, yapı yükünün, radye ve kazıklar tarafından paylaşılarak taşınacağı kabul edilmekte, yük paylaşım oranına göre radyenin ve kazık grubunun oturmaları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Öncelikle radye tek başına ($P_k/P_{kr}=0$) ele alınır ve taşıyıcı zeminin özelliklerine bağlı olarak oturma miktarı bulunur. Daha sonra, yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığı ($P_k/P_{kr}=1$) kabul edilerek kazık grubunun ne kadar oturacağı hesaplanır. Hesaba yükün farklı oranlarda radye ve kazık grubu tarafından taşınması hallerindeki oturmalar bulunarak devam edilir. Çeşitli P_k/P_{kr} oranları için elde edilen oturma miktarları karşılaştırılarak, radye ve kazık grubunun oturmalarının eşit olduğu yük paylaşım oranı belirlenir. Bu durumda her iki sistem birlikte çalışacaktır. Elde edilen sonuç, bir yandan oturma miktarını vermekte, öte yandan kazık boyunun belirlenmesini sağlamaktadır.

Kazık grubunun oturma hesabında, belirli bir derinlikte olduğu varsayılan eşdeğer radyeden zemine aktarılan gerilme dikkate alınmaktadır ve sürtünme kazıkları için önerilen gerilme yayılımı kullanılmıştır (Tomlinson, 2001). Bu yöntemde, kazık grubunun taşıdığı yükün, kazık boyunun 2/3’ü derinliğine kadar 4 düşey/1 yatay eğimle yayıldığı kabul edilmekte ve bu seviyede oluşacak gerilme yayılımı (eşdeğer radye) dikkate alınarak kazık grubunun oturması hesaplanmaktadır. Oturma hesabında dikkate alınacak derinlik, ilave efektif gerilmenin düşey jeolojik gerilmenin % 20’sinden küçük kaldığı seviyedir (Şekil 3.8) (Tomlinson, 2001). Önerilen hesap yönteminde, eşdeğer radyenin derinliği belirlenirken, bu şartın

($\Delta\sigma'_{A-A} \leq 0.20\sigma'_{v0}$) sağlanmasına dikkat edilir. Böylece bu seviyeden daha derinde olan zemin, eşdeğer radyeden aktarılan gerilmelerden etkilenmeyecektir.



Şekil 3.8: Zeminde jeolojik yük ve gerilme artışı dağılımı (Tomlinson, 2001)

Radye ve eşdeğer radyeye (kazık grubuna) etkiyen gerilmeler belirlendikten sonra her iki sistemin oturmaları:

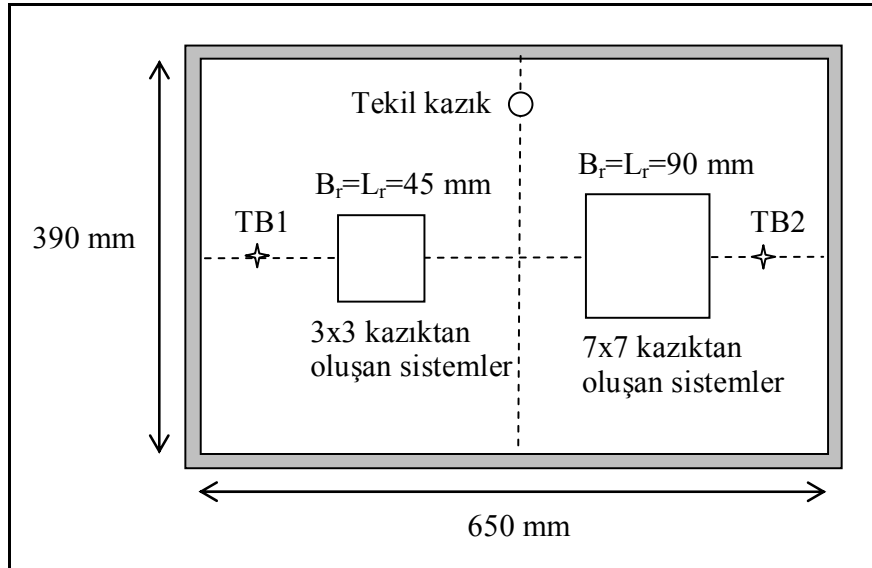
$$S = \frac{qB_r(1 - \nu_s^2)I}{E_s} \quad (3.6)$$

formülü ile hesaplanır. Burada S: Oturma, q: Yapıdan gelen düşey gerilme, B_r : Radye genişliği, ν_s : Zeminin Poisson's oranı, I: Katsayı (rijit kare temel için 0.82, esnek kare temel için ortalama 0.95, (Saran, 1996)) ve E_s : Zeminin elastisite modülüdür.

4. SONUÇLAR

4.1. Santrifüj Deneyleri

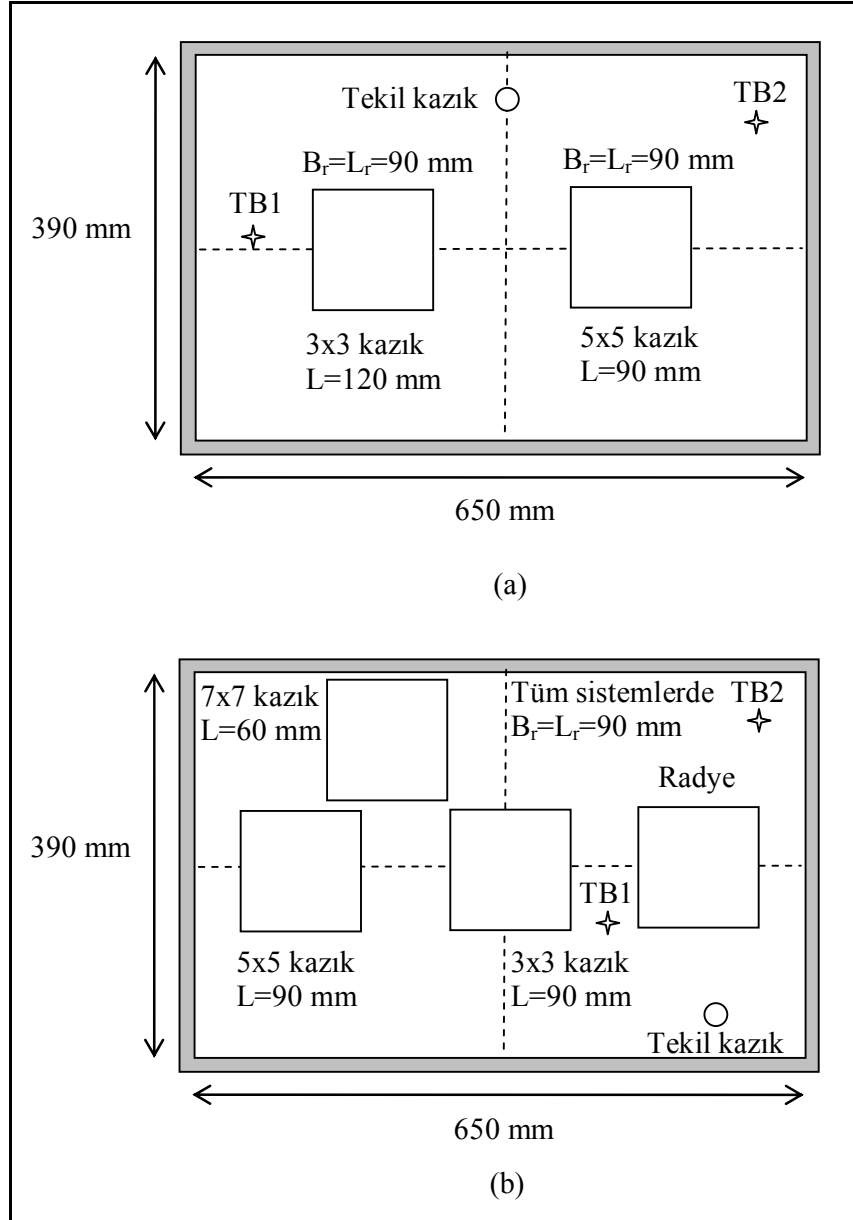
Tezdeki deneysel çalışma iki bölüm halinde ele alınabilir. Kazıklı temel ve kazıklı radye temelleri taşıma gücü açısından karşılaştırmayı amaçlayan ilk grup deneylerde, bir tane numune kutusunda 2 adet yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Bu amaçla 3x3 ve 7x7 kazıktan oluşan 2ayrı sistem, kazıklı temel (radyenin zemin ile teması yok) ve kazıklı radye temel olarak yüklenmiş ve yük-oturma davranışları ele alınmıştır. Yükleme, temel sistemlerinin sabit hızla zemine itilmesiyle yapılmıştır. Hem kazıklı temel hem de kazıklı radye temel aynı model üzerinde yüklendiğinden, deneye önce kazıklı temel olarak başlanmış, daha sonra sistem itilmeye devam edilerek kazıklı radye temel olarak devam edilmiştir. Aynı numune kutusunda ayrıca tekil kazık yükleme deneyi de yapılmıştır.



Şekil 4.1: İlk grup deneylerin numune kutusundaki yerleşimi

Yapılarda hasara daha çok farklı oturmaların kabul edilebilir sınır değerleri aşmasının neden olduğu dikkate alınarak, ikinci grup deneylerde, üniform yüklü radye temelin merkez bölgesine yerleştirilen kazıkların farklı oturmalara etkisi incelenmiştir. Bu sistemlerde temelin optimum tasarımı için gereken etkin kazık

boyunun belirlenmesi önemlidir. Farklı kazık sayısı ve boyunun kazıklı radye sistemin yük-oturma davranışına etkisini incelemek amacıyla yapılan ikinci grup deneyler 2 adet numune kutusunda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Etkin kazık boyunu bulmak için, 3x3 ve 5x5 kazıktan oluşan kazıklı radyelerin kazık boyları değiştirilerek yük-oturma davranışlarına bakılmıştır.



Şekil 4.2: İkinci grup deneylerin yerleşimi (a) 1 numaralı deney kutusu, (b) 2 numaralı deney kutusu

İkinci seri deneylerin ilk numune kutusunda, $L=120$ mm uzunluğunda kazıkların yer aldığı 3x3 ve 5x5 kazıklı sistemlerin yüklendiği 2 adet deney yapılmıştır. İkinci kutuda yapılan 4 adet deneyde ise, $L=90$ mm uzunluğundaki kazıkların kullanıldığı

değerinde mikserde hazırlanmıştır. Bulamaçta hava kabarcıkları oluşmasını önlemek için karıştırma sırasında vakum uygulanmıştır.

Numune 650 mm x 390 mm x 325 mm boyutlarındaki çelik kutuda hazırlanmıştır. Öncelikle kum drenaj tabakası (ortalama dane çapı $d_{50}=0.25$ mm) belirli bir yükseklikten dökülerek serilmiş, kil danelerinin drenaj kanallarını tıkamasını önlemek için üstüne filtre kağıdı konulmuştur. Bulamaç haldeki kil bir kaşık yardımıyla numune kutusuna dökülmüş ve numune laboratuvar şartlarında (1g) konsolide edilmek üzere prese yerleştirilmiştir (Şekil E.1, Ekler). Uygulanan gerilme değeri adım adım arttırılarak belirlenen maksimum konsolidasyon basıncı 120 kPa ulaşılmıştır. Kilin laboratuvar şartlarında konsolidasyonu yaklaşık 2 hafta sürmüştür. Her iki grup deney için de numunenin hazırlanışı aynıdır.

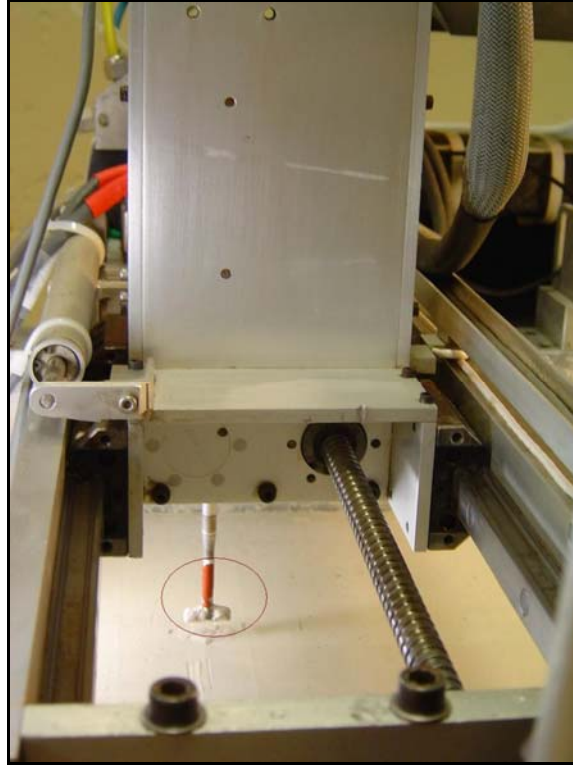
Laboratuvar şartlarında konsolidasyonun tamamlanmasından sonra, boşluk suyu basıncını ölçen aletlerin zemin içinde istenilen derinliklere yerleştirilmesine geçilmiştir. Kutunun bir kenarı çıkarılarak, numunede belirlenen derinlikte yatay bir delik açılmış ve deliğe su enjekte edilerek hava boşluğunun oluşması önlenmeye çalışılmıştır (Şekil E.2). Bu esnada buharlaşma sonucu numuneden su kaybını önlemek için zemin üst yüzeyi folyo ile kaplanmıştır.

Açılan bu deliklere ölçü aletlerinin yerleştirilmesinden sonra boşluk bulamaç ile yeniden doldurulmuştur. Kutunun kenarı kapatıldıktan sonra toplam ağırlığı tartılıp kilin birim hacim ağırlığı γ_n , 17.5 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Deneyler sırasında zeminin suya doygunluğunu korumak ve drenaj için, kutunun 4 köşesinde düşey kum drenler oluşturulduktan sonra numune kutusu santrifüje konulmuştur. Zeminin drenajsız kayma mukavemetini belirlemekte kullanılacak T-bar penetrasyon deney düzeneği yerleştirilmiştir (Şekil 4.4).

T-bar deneyinden zeminin drenajsız kayma mukavemeti:

$$\frac{P}{s_u L_s d_s} = N_b \quad (4.1)$$

formülü ile elde edilir. Burada P uygulanan yük; L_s silindirin uzunluğu; d_s silindirin çapı, N_b bir katsayıdır ve değeri adezyon ile ifade edilen silindirin pürüzlülüğüne bağlı 9-12 aralığında değişir, ortalama 10.5'in kullanılması genellikle uygundur.



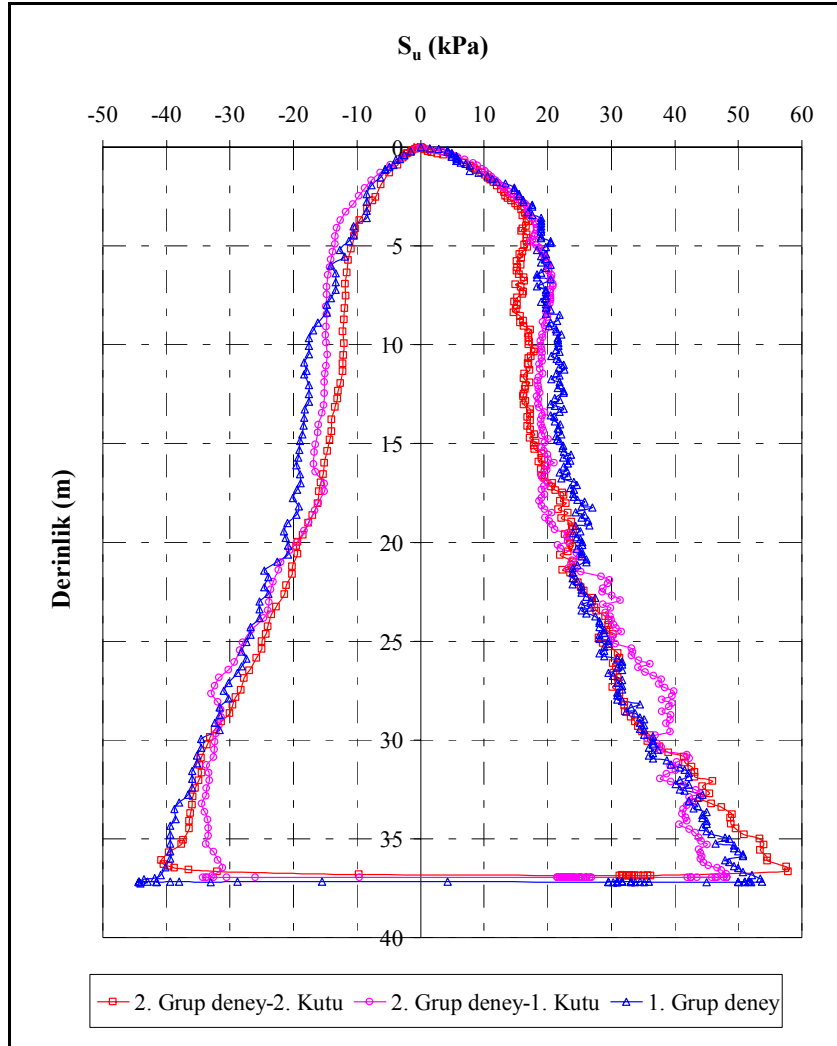
Şekil 4.4: Santrifüjde kullanılan T -bar deney aleti ve yerleşimi

Deney düzeneğinin santrifüje yerleştirilmesinden sonra sistem 200g’de çalıştırılarak zemin numunesi kendi ağırlığı altında 24 saat boyunca konsolidasyona bırakılmıştır. Bu esnada numune kutusunun 4 köşesinde oluşturulan düşey kum drenler vasıtasıyla zemine su verilmeye başlanmıştır. Konsolidasyon süresince zeminin suya tam doygunluğunu korumak için su seviyesi zemin yüzeyinden 1-2 mm yukarıda tutulmuştur. Konsolidasyonun tamamlanmasından sonra kilin drenajsız kayma mukavemetini belirlemek amacıyla T-bar penetrasyon deneyi yapılmış ve santrifüj durdurulmuştur. Şekil 4.5’te T-bar deneyinden elde edilen kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti değerinin derinlik boyunca değişimi görülmektedir. Deneyde programında sıradaki adım temel modellerinin yerleştirilmesidir.

4.1.2. Deneylerde kullanılan kazıklı radye modelleri

İlk grup deneylerde temel modeli, 7 mm kalınlığında alüminyum radye ve 3.15 mm dış, 2.45 mm iç çapında, 92.5 mm uzunluğunda pirinç kazıklardan oluşmaktadır. Kazıklar, 7x7 kazıklı modelde radye alanının tamamına düzgün yayılı şekilde dağıtılmış iken, 3x3 kazıktan oluşan sistemde sadece radyenin merkez bölgesine

yerleştirilmişlerdir. 49 kazığa sahip sistemde radye boyutları 90 mm x 90 mm iken, 9 kazıklı temel modelinde 45 mm x 45 mm'dir.



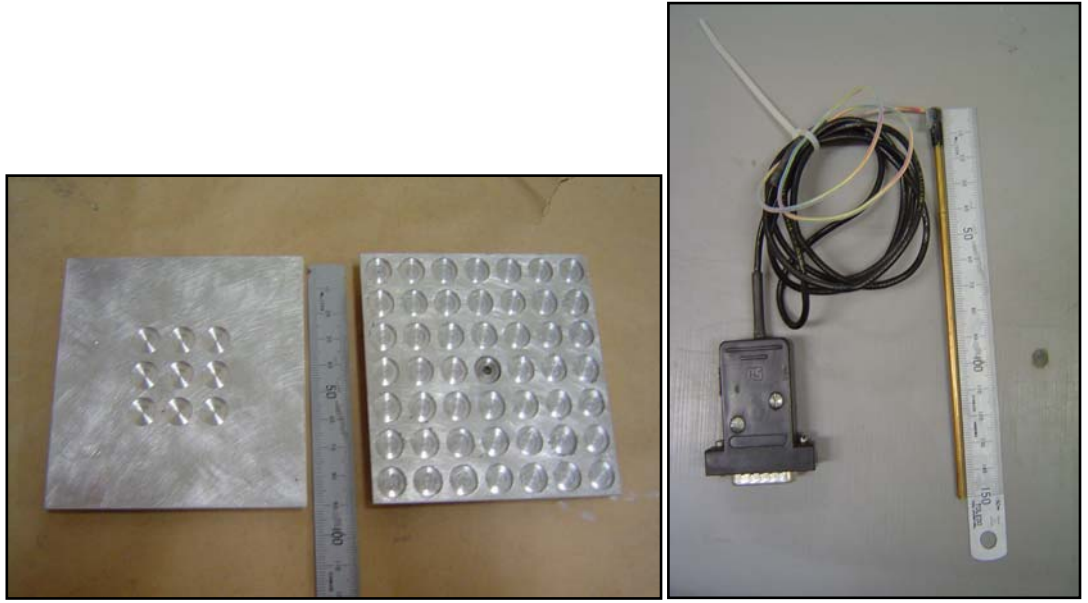
Şekil 4.5: T-bar deney sonuçları, arazi şartlarında

İkinci grup deneylerde, sadece 90 mm x 90mm boyutundaki radye kullanılırken, radye kalınlığı 1.8 mm'ye düşürülmüştür. 9 ve 25 kazıktan oluşan sistemlerin kazık boyları 120 mm ve 90 mm olarak belirlenmiştir. Kazık çapı bir önceki deneylerdeki ile aynıdır. Ayrıca radye temel ve 60 mm uzunluğundaki kazıkların yer aldığı klasik kazıklı temel formülleri kullanılarak tasarlanmış 7x7 kazıklı sistem de yüklenmiştir. Her iki grup deneylerde kazık aralığı 4d'dir.

Kullanılan modellerdeki kazıklar arazide 0.63 m çapında, 24.0 m-18.5 m-18.0 m ve 12 m uzunluğunda beton kazıkları temsil etmektedir (Horikoshi, 1995). Radye boyutları 9 m x 9 m ve 18 mx 18 m, kalınlıkları ise ilk ve ikinci grup deneylerde

sırasıyla 1.9 m ve 0.5 m'ye ($E_k=E_r=40$ GPa, $\nu_k=\nu_r=0.16$, $\gamma_{\text{beton}}=24$ kN/m³) karşılık gelmektedir. Her iki tip deney grubu için de temel modellerinin hazırlanışı aynıdır.

Kazık ve radyeden oluşan temel modelini hazırlamak için her iki temel elemanı ayrı ayrı imal edilmiştir (Şekil 4.6). Kazık başlarına gelen eksenel yükün belirlenmesi için farklı bölgelerde seçilen temsili kazıkların başlarına deformasyon ölçüm aletleri yerleştirilmiştir. Her deney öncesi kazıklar kalibre edilmiştir. Radyede açılan alanlara dairesel başlıklı kazıklar yapıştırılarak oturtulmuştur. Kazıkların düşey ve birbirine paralel olmasını sağlamak için yapıştırma esnasında bir kılavuz sistem kullanılmış, model hazırlandıktan sonra çıkartılmıştır (Şekil E.3).



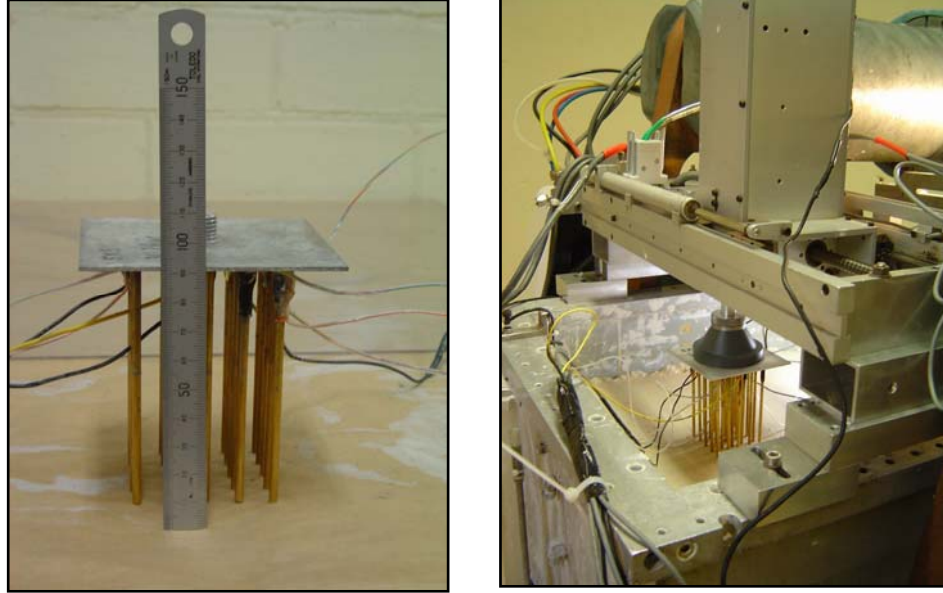
Şekil 4.6: Temel modellerinde kullanılan radyeler ve deformasyon ölçerli kazık

4.1.3. Model deneyleri

Temel modelleri, yükleyici sistemler kullanılarak 0.1 mm/s sabit penetrasyon hızıyla zemine itilmiştir. Literatürde taşıma gücünün doğru tayin edilebilmesi için kazıkların santrifüjde deneyin yapılacağı ivme değerinde zemine çakılması gerektiği belirtilse de (Craig 1984), çalışmanın amacı kazıklı temel ve kazıklı radyenin yük-oturma davranışını belirlemek olduğundan, modelin 1g'de yerleştirilmesi uygundur.

İlk grup deneyler bir adet deney kutusunda gerçekleştirilmiştir. Her iki sistem aynı bölgede yüklendiği için, kazıklar öncelikle 90 mm zemine itilmişlerdir. Çakma sırasında radyenin yatay konumunda sorun olmaması için ağırlığı çok az olan bir kılavuz sistem kullanılmıştır (Şekil 4.7). Radye ile zemin arasında 2.5 mm boşluk

kalıncaya kadar temel sistemi itilmiş (kazıklı temel) ve kılavuz sistem çıkarılıp santrifüj çalıştırılarak sistemin ağırlığından ve kazıkların zemine çakılmasından dolayı oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenmiştir.

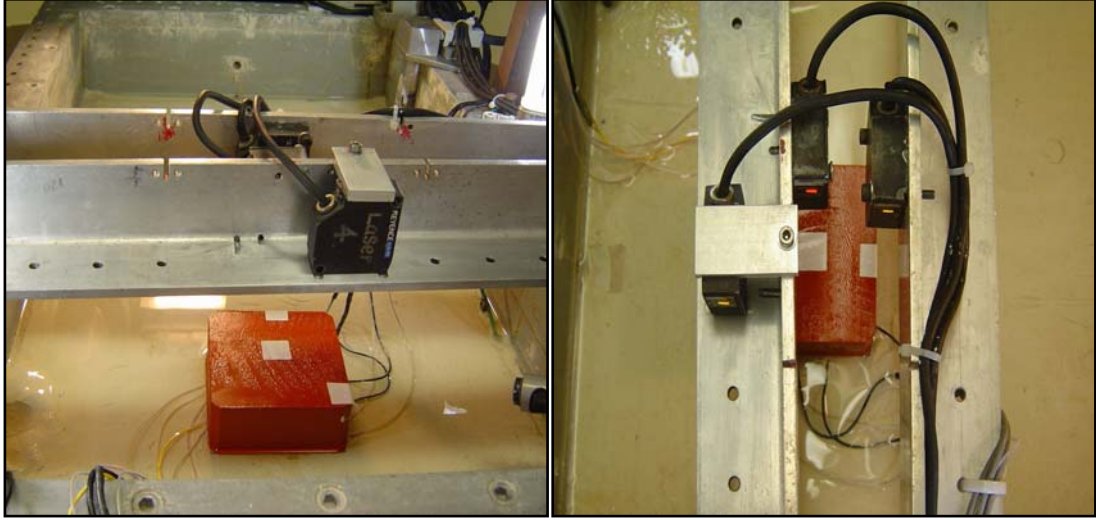


Şekil 4.7: Temel modeli ve zemine çakılması için kullanılan düzenek

Daha sonra radye zemin ile temas edinceye kadar sistem 0.1 mm/s sabit penetrasyon hızıyla yüklenmeye (zemine itilmeye) devam edilmiştir. Sistemin çakılması sırasında belli penetrasyon derinliklerinde yük boşaltımları yapılmıştır. Temel modeli yukarıdan yükleyici sisteme bağlı olduğundan boşaltma ancak sistem durdurularak gerçekleştirilebildiğinden bu esnada yukarı doğru hareket meydana gelmemiştir. Radyenin zemin ile temasından dolayı oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için beklenmiş ve deneye sistemin aynı penetrasyon hızıyla kazıklı radye olarak yüklenip-boşaltılmasıyla devam edilmiştir. Yükleme-boşaltma sırasında kazıklara gelen eksenel yükler, oturmalar, yükleyici sistem tarafından uygulanan yük ve boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Yükleme-boşaltma işlemi tekil kazık için de aynı şekilde yapıldıktan sonra T-bar penetrasyon deneyi ile ilk grup çalışma tamamlanmıştır.

İkinci grup deneyler ise iki adet deney kutusunda gerçekleştirilmiştir. İlk grup deneylerdeki gibi, temeller kılavuz sistem yardımıyla radye zeminle temas edinceye kadar 0.1mm/s sabit penetrasyon hızıyla zemine itilmiştir. Daha sonra kılavuz sistem çıkarılıp, temel modeli yükleyiciden ayrılmıştır. Santrifüj çalıştırılarak sistemin ağırlığı altında zeminin konsolidasyonunun tamamlanması ve radyenin zemin ile

temasından dolayı oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenmiştir. Santrifüj durdurularak radyenin emniyetli taşıma gücü değerine karşılık gelen yük (50 kPa) ($F_{s-r}=2.5$) elde olunacak şekilde bir ağırlık yardımıyla temel sistemi yüklenmiş ve santrifüj tekrar çalıştırılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: İkinci grup deneylerde modellerin yüklenmesi ve lazerli yer değiştirme ölçerler

Radye temelin emniyetli taşıma gücü değerine eşit olan bu yük altında, seçilen temsili kazıklara gelen eksenel yükler, boşluk suyu basınçları ve radyenin köşe, merkez ve kenar orta noktalarındaki oturma değerleri ölçülmüştür. Sistemlerin yüklenmesi tamamlandıktan sonra tekil kazık yükleme deneyi ve T-bar penetrasyon deneyi yapılarak deneyler bitirilmiştir. Santrifüj ve santrifüj çalışırken kullanılan tüm aletler kontrol odasında bulunan bilgisayarlar ile idare edilmekte, gözlenmekte ve veriler buradaki bilgisayarlarda depolanmaktadır (Şekil E.4-6).

4.1.4. Deneylerde kazıklı radye temelin taşıma gücü

İlk grup deneylerde, temelin taşıma gücünü incelemek amacıyla 3x3 ve 7x7 kazıktan oluşan sistemler kazıklı temel ve kazıklı radye temel olarak yüklenmiştir. Deneyler kazıklı temel ve kazıklı radye temel için aynı noktada, aynı modeller üzerinde yapıldığından, sistemler kazıklı temel olarak yüklenmeye başlamış ve kazıklı radye temel olarak tamamlanmıştır. Yükleme sabit yerdeğiştirme hızıyla yapıldığından büyük yerdeğiştirme değerlerinde de temellerin davranışı gözlemlenebilmiştir.

Poulos (2000a) tarafından belirtildiği gibi kazıklı radye sistemlerin son taşıma gücü için, (1) kazık bloğunun son taşıma gücü ile blok dışında kalan radyenin son taşıma

gücü toplamı, veya (2) gruptaki tüm kazıkların son taşıma güçleri ile radyenin son taşıma gücü toplamlarından daha küçük olanı alınabilir. Bazı araştırmacılar ikinci durumda her iki temel elemanının taşıma güçleri için bazı katsayılar önermektedir. Kazık bloğunun son taşıma gücü hesabı için Terzaghi ve Peck (1967) tarafından verilen grup formülü kullanılabilir:

$$P_{kru} = \left[4(\sqrt{n_t} - 1)s + \pi d \right] L s_u + \left[(\sqrt{n_t} - 1)s + d \right]^2 N_c s_u \quad (4.2)$$

ifadesinde ilk parantez bloğun yanal çevre sürtünmesini, ikincisi ise uç mukavemetini göstermektedir.

3x3 kazıklı sistemde kazık bloğu için çevre sürtünmesi 7372 kN ve $N_c=9$ alınarak uç mukavemeti 5208 kN elde edilir. Bu değerlerle toplam son taşıma gücü 12580 kN hesaplanır. 7x7 kazıktan oluşan sistem için ise aynı değerler sırasıyla 20799 kN, 40186 kN ve 60985 kN'dur.

Kazık bloğu dışında kalan radyenin taşıma gücü:

$$q_d = \left(1 + 0.2 \frac{B_r}{L_r} \right) s_u N_c \quad (4.3)$$

formülü ile $N_c=5.7$ alınarak hesaplanırsa, toplam son taşıma gücü 3x3 kazıklı sistemde 6015 kN, 7x7 kazıklı ise 9349 kN'dur. Bu değerlerle kazıklı radyenin toplam taşıma gücü ilk sistem için 18.60 MN, ikincisi için ise 70.33 MN olur.

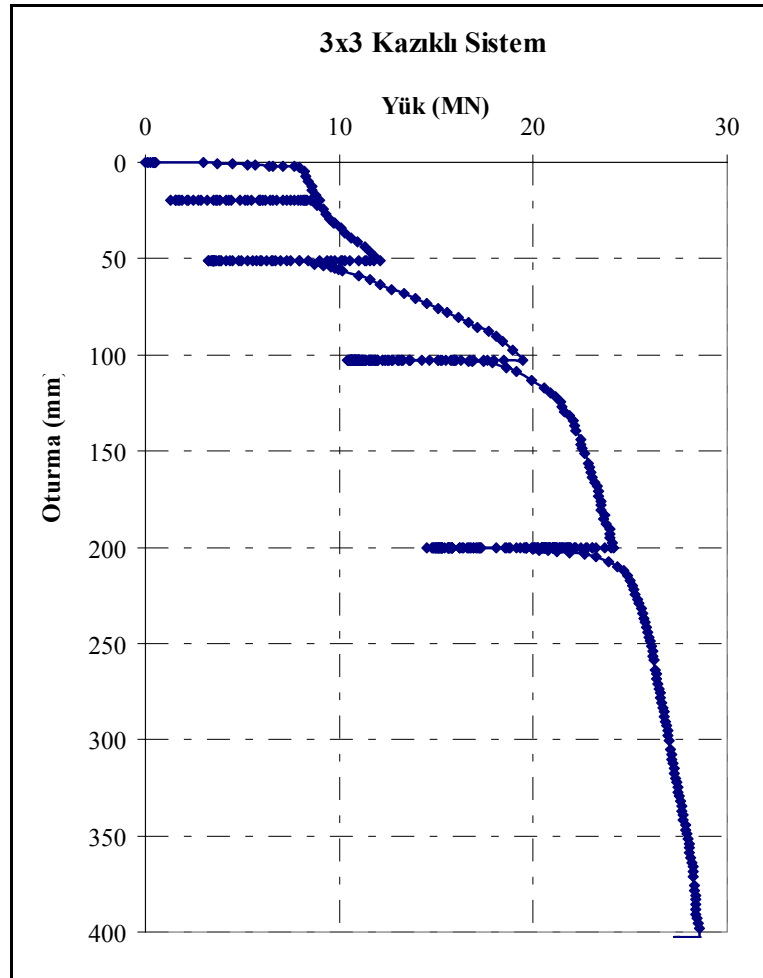
İkinci yöntemde sistemlerin son taşıma gücü gruptaki tüm kazıkların son taşıma güçleri ile radyenin son taşıma gücü toplamı olarak hesaplanır. Tekil kazığın son taşıma gücü :

$$P_{iku} = \alpha_a s_u \pi d L + 9 s_u \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.4)$$

bağıntısı ile elde edilir. α_a adezyon katsayısı $s_u < 25$ kPa olduğu için 1'dir. 18.5 m uzunluğundaki kazığın son taşıma gücü 710 kN'dur. 3x3 kazıklı sistemdeki tüm kazıkların toplam taşıma gücü 6386 kN ederken, 7x7 kazıklı sistemde bu değer 34769 kN'dur. 9 m x 9 m ve 18 m x 18 m boyutundaki radyelerin son taşıma gücü ise sırasıyla 9973 kN ve 39891 kN'a eşittir. Kazıklı radyelerin toplam taşıma gücü 9 kazıklı ve 49 kazıklı sistemler için sırasıyla 16.36 MN ve 74.66 MN olur. Kazıklı

radyelerin son taşıma gücü değeri olarak iki yöntem arasında daha küçük olan değeri alınırsa, 3x3 kazıklı sistem için 16.36 MN ve 7x7 kazıklı sistem için 70.33 MN olur.

Deneyler kazıklı temel ve kazıklı radye temel için aynı noktada, aynı modeller üzerinde yapıldığından, sistemler kazıklı temel olarak yüklenmeye başlamış ve radyenin zeminle temasıyla birlikte kazıklı radye temel olarak tamamlanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen grafiklerden de görülmektedir ki radyenin zeminle temasından itibaren her iki sistemin de yük taşıma kapasitesinde dikkate değer bir artış meydana gelmektedir (Şekil 4.9-10).

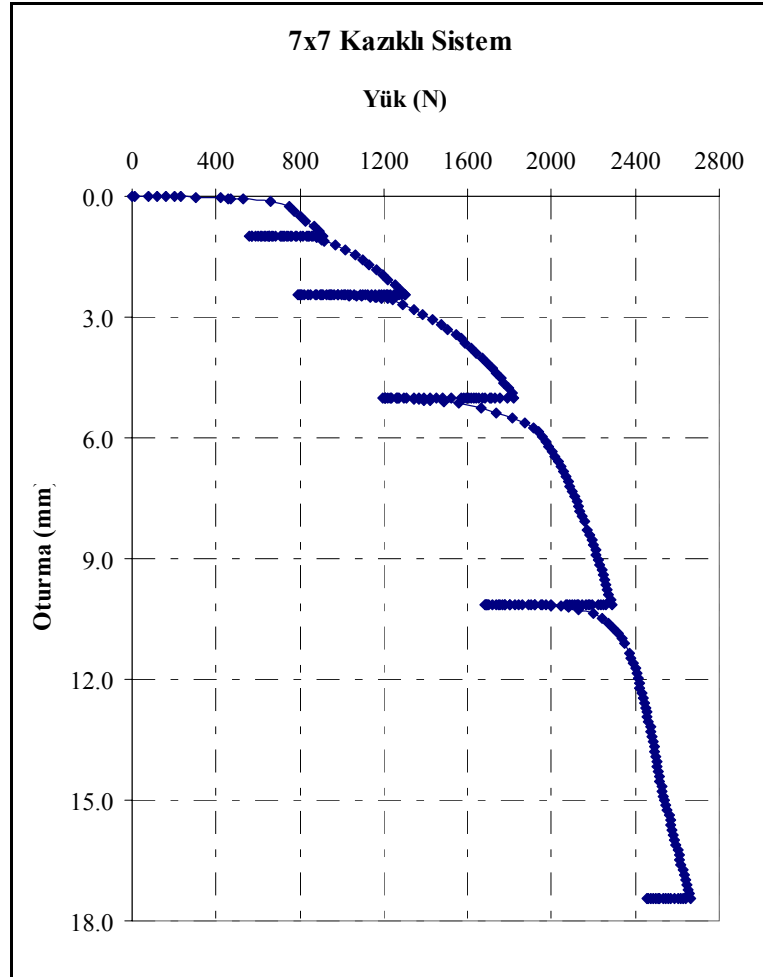


Şekil 4.9: İlk grup deneylerde yük-oturma grafikleri, 3x3 kazıklı sistem

4.1.5. Kazıklı radye temelin toplam ve farklı oturmaları

İkinci bölümde, göçmeye karşı güvenli, ancak oturmaları kabul edilebilir değerleri aşan radye temelin merkez bölgesine yerleştirilecek kazıkların radyedeki farklı oturmaları azaltıcı etkisi incelenmiştir. Kazıkların uzunlukları değiştirilerek sistemin

optimum tasarımı için gereken etkin kazık boyunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla 90 mm x 90 mm boyutundaki radyenin merkez bölgesine 4d aralığında, 3x3 ve 5x5 kazıktan oluşan kazık grupları yerleştirilmiş ve kazık boyları değiştirilerek bu değişimin sistemin davranışına etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.10: İlk grup deneylerde yük-oturma grafikleri, 7x7 kazıklı sistem

2.5 güvenlik sayısı ($F_{s-r}=2.5$) ile hesaplanan radyenin emniyetli taşıma gücüne eş yük (50 kPa) elde olunacak şekilde temel sistemleri bir ağırlık yardımıyla yüklenmiştir. Bu yük altında, seçilen temsili kazıklara gelen eksenel yükler, boşluk suyu basınçları ve radyenin köşe, merkez ve kenar orta noktalarındaki oturma değerleri ölçülmüştür (Şekil E7-18) (Tablo 4.1). Ayrıca kazık boyu klasik kazıklı temel hesabı kullanılarak belirlenmiş ($F_{s-k}=2.0$) olan 7x7 kazıklı sistem ve radye temel de aynı şekilde yüklenmiştir. Deney süresince seçilen temsili kazıklara gelen eksenel yükler ölçülmüş olsa da, 200g değerine çıktığında strain gaugelerde meydana gelen sorunlar nedeniyle elde edilen değerler yeterince güvenli olmadığı için verilmemiştir.

Tablo 4.1: Santrifüjde model deneylerinde ölçülen oturma değerleri (arazi eşdeğeri)

Model	Oturmalar (mm)			Farklı Oturmalar (mm)	
	Merkez	Köşe	Kenar orta	Merkez-Köşe	Merkez-Kenar orta
Radye temel	105.18	78.61	93.44	26.57	11.74
7x7, L=12.0 m	90.88	80.50	85.06	10.38	5.82
5x5, L=18.0 m	97.75	93.20	96.52	4.55	1.23
5x5, L=24.0 m*	90.33	116.17	97.04	-25.84	-6.71
3x3, L=18.0 m	97.10	93.12	95.62	3.98	1.48
3x3, L=24.0 m	94.20	92.00	93.08	2.19	1.11

*: Sistem çakılırken radyede eğilme meydana gelmiştir.

Tablo 4.1’de görülen toplam oturma değerlerine, sistemlerin yüklenmesi için santrifüjün durdurulmasından sonra tekrar çalıştırıldığında meydana gelen zemin oturumları da dahildir. Ancak bu değerlerin sistemlerin farklı oturma davranışında değişikliğe yol açmaması nedeniyle genel bir fikir edinme amacıyla kullanılması uygundur.

Plaxis 3D Foundation yazılımı ile deneylerdeki 3x3 ve 5x5 kazıklı modeller farklı kazık boylarında çözülmüş ve oturma değerleri ile kazık yükleri Tablo 4.2-4.5 arasında verilmiştir. Sistemlerdeki kazık yerleşimi ve numaralandırılması Şekil 4.11’de görülmektedir.

49 kazıktan oluşan temelde kazıklar radye alanının tümüne düzgün yayılı olarak dağıtılmış ve 12.0 m’lik kazık boyu temel sistemi klasik kazıklı temel gibi projelendirildiğinde ($F_{s-k}=2$) elde edilmiştir. Bu sebeble 7x7 kazıklı sistem Plaxis 3D Foundation yazılımı ile sadece bu kazık uzunluğu için incelenmiş ve oturma değerleri merkezde 73.53 mm, köşede 54.24 mm ve kenar ortasında 63.98 mm elde edilmiştir. Buna göre farklı oturma değerleri merkez-köşe 19.29 mm ve merkez-kenar ortası 9.56 mm’dir.

Aynı sistemde temsili kazıklara gelen yükler ise 1 numaralı kazıktan başlamak üzere sırasıyla 214.44 kN, 210.71 kN, 206.35 kN, 216.14 kN, 222.68 kN, 217.54 kN, 320.89 kN, 329.80 kN, 322.36 kN ve 392.64 kN’dur. Bu değerlerle toplam kazık yükü 13 467 kN’dur ve kazıklar yükün % 83.1’ini taşımaktadırlar.

Tablo 4.2: Farklı kazık boylarına göre oturma değerleri, 3x3 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri

	Oturmalar (mm)			Farklı Oturmalar (mm)	
Kazık Boyu (m)	Merkez	Köşe	Kenar orta	Merkez-Köşe	Merkez-Kenar orta
30.0	63.56	62.92	63.17	0.64	0.39
28.0	65.11	63.99	64.92	1.12	0.19
26.0	67.03	65.21	66.93	1.82	0.10
25.0	68.08	65.87	67.98	2.21	0.10
24.0	69.11	66.54	69.02	2.57	0.09
22.0	71.16	67.69	71.06	3.47	0.10
20.0	74.73	70.73	74.62	4.00	0.11
18.0	76.02	70.15	75.70	5.87	0.32
15.0	80.69	72.06	79.34	8.63	1.35
12.0	86.84	73.47	82.92	13.37	3.92
10.0	91.23	73.73	84.83	17.50	6.40
8.0	95.47	73.68	86.49	21.79	8.98
5.0	101.03	73.10	88.18	27.93	12.86
Radye	104.94	71.71	88.71	33.23	16.23

Tablo 4.3: Farklı kazık boylarına göre oturma değerleri, 5x5 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri

	Oturmalar (mm)			Farklı Oturmalar (mm)	
Kazık Boyu (m)	Merkez	Köşe	Kenar orta	Merkez-Köşe	Merkez-Kenar orta
28.0	51.06	50.54	51.01	0.52	0.05
26.0	53.70	52.55	53.65	1.15	0.05
25.0	55.00	53.53	54.94	1.47	0.06
24.0	57.16	54.35	56.05	2.81	1.11
22.0	59.98	56.31	58.70	3.67	1.28
20.0	62.61	58.36	61.53	4.25	1.08
18.0	66.05	60.52	64.55	5.53	1.50
15.0	72.22	63.60	69.06	8.62	3.16
12.0	78.67	66.97	74.20	11.70	4.47
10.0	83.45	68.78	77.41	14.67	6.04
8.0	88.81	70.77	81.16	18.04	7.65
5.0	96.57	72.34	85.68	24.23	10.89

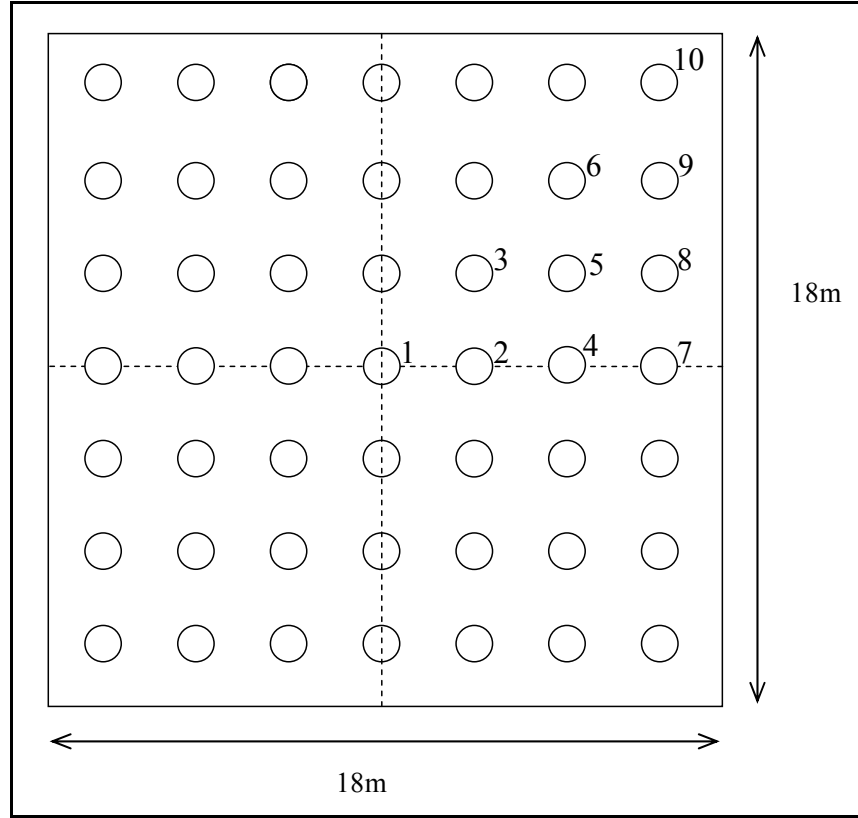
Tablo 4.4: Farklı kazık boylarına göre kazık yükleri, 3x3 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri

Kazık Boyu (m)	Temsili kazık yükleri (kN)			Toplam kazık yükü	
	1	2	3	P _k (kN)	P _k /P _{kr} (%)
30.0	363.75	754.99	1113.08	7836	48.4
28.0	362.85	736.74	1078.13	7622	47.1
26.0	367.19	716.51	1033.87	7369	45.5
25.0	368.98	705.62	1010.54	7234	44.7
24.0	366.27	694.62	992.38	7115	43.9
22.0	368.80	670.66	940.65	6814	42.1
20.0	371.425	643.55	881.91	6473	39.9
18.0	372.52	610.88	819.42	6094	37.6
15.0	365.03	560.08	718.55	5480	33.8
12.0	348.80	486.51	599.34	4692	29.0
10.0	340.23	436.97	508.52	4126	25.5
8.0	306.67	370.24	419.15	3464	21.4
5.0	238.75	254.53	265.18	2318	14.3

Tablo 4.5: Farklı kazık boylarına göre kazık yükleri, 5x5 kazıklı sistem, Plaxis 3D Foundation çözümleri

Kazık Boyu (m)	Temsili kazık yükleri (kN)						Toplam kazık yükü	
	1	2	3	4	5	6	P _k (kN)	P _k /P _{kr} (%)
28.0	172.42	218.36	263.02	502.51	550.74	826.64	11823	73.0
26.0	179.87	220.97	263.73	490.80	536.19	794.64	11550	71.3
25.0	181.94	222.05	263.74	484.78	528.71	778.86	11409	70.4
24.0	182.36	221.44	261.90	480.36	522.99	769.15	11298	69.7
22.0	186.85	223.79	261.83	467.06	506.51	734.93	10989	67.8
20.0	191.79	225.99	261.46	452.18	488.17	697.24	10645	65.7
18.0	197.08	228.24	260.65	435.60	467.84	655.55	10260	63.3
15.0	203.92	230.15	257.35	408.37	434.50	590.04	9624	59.4
12.0	214.11	233.14	253.54	370.57	388.86	502.51	8764	54.1
10.0	217.78	232.78	248.63	344.96	358.29	442.58	8160	50.4
8.0	219.85	228.13	237.61	304.39	311.80	368.67	7269	44.9
5.0	204.29	203.41	205.41	230.00	230.75	245.29	5587	34.5

Tablo 4.2-5'te koyu renk yazılmış satırlar santrifüj modellerindeki kazık boylarıdır. Plaxis 3D Foundation yazılımı ile yapılan çözümlerde elde edilen oturmalar sadece santrifüj modelleride kullanılan kazık boyları için Tablo 4.6'da yeniden verilmiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere santrifüj deneylerinde görülen davranış ile 3 boyutlu sonlu eleman çözümleri uyum göstermektedir.



Şekil 4.11: Santrifüj deneylerinde kazık yerleşimi ve temsili kazıkların numaralandırılması, 7x7 kazıklı sistem

Tablo 4.6: Santrifüj modellerinin Plaxis 3D Foundation ile analizinden elde edilen oturma değerleri

Model	Oturmalar (mm)			Farklı Oturmalar (mm)	
	Merkez	Köşe	Kenar orta	Merkez-Köşe	Merkez-Kenar orta
Radye	104.94	71.71	88.71	33.23	16.23
7x7, L=12.0	73.53	54.24	63.98	19.29	9.56
5x5, L=18.0	66.05	60.52	64.55	5.53	1.50
5x5, L=24.0	57.16	54.35	56.05	2.81	1.11
3x3, L=18.0	76.02	70.15	75.70	5.87	0.32
3x3, L=24.0	69.11	66.54	69.02	2.57	0.09

Farklı oturma değerleri için merkez-köşe ve merkez-kenar ortası verilmesine rağmen, çalışmada farklı oturma tanımı merkez-köşe olarak kullanılacaktır. Sonlu eleman analizlerinden de görüldüğü üzere merkez bölgesine yerleştirilen kazıkların belli bir uzunluktan sonra farklı oturmalara etkisi oldukça azalmakta ve kazık boyunu daha fazla uzatmak anlamlı olmamaktadır. Kısa kazık boylarında, 5x5 kazıktan oluşan sistem farklı oturmaları azaltmada daha etkili olurken, daha uzun kazık boylarında ($L \geq 20.0$ m) 3x3 kazıklı sistem daha uygundur. Toplam veya maksimum oturma için 5x5 kazıklı sistem ile daha düşük değerler elde edilmektedir. 9 kazıklı sistem, optimum tasarım için Horikoshi (1995) tarafından önerilen A_{kg} / A_r oranı % 16-25 değerlerine göre oldukça küçüktür (% 8). 25 kazıklı sistem bu değerlere daha yakındır (% 31) ve kısa kazıklar için daha uygun sonuçlar vermektedir.

Plaxis 3D Foundation çözümlerinde kazıklar arası yük dağılımlarına bakıldığında, köşe kazıklar her zaman daha fazla yük almaktadır. Bu değer merkez kazığının 4 katına kadar ulaşmaktadır. Köşelerden merkeze doğru ilerledikçe kazık yükü azalmaktadır.

4.2. Önerilen Hesap Yöntemi ile Çözüm

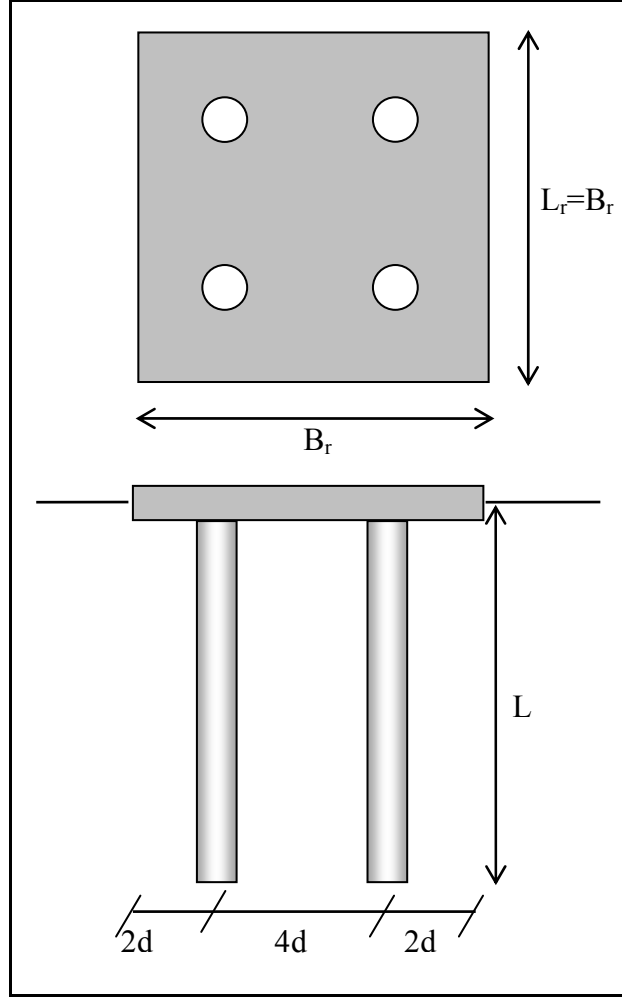
Önerilen hesap yöntemi iki farklı probleme ve santrifüj deneylerindeki sistemlere uygulanmıştır. Her iki örnekte de zemin özellikleri, kazık sayısı ve yerleşimi aynıdır. Kumda teşkil edilen kazıklı radye temel, $4d$ aralığında d çapında 4 adet kazık ve kenar uzunluğu $8d$ olan kare radye temelden oluşmaktadır (Şekil 4.12).

Kum zeminin birim hacim ağırlığı, $\gamma_{kum}=18$ kN/m³; kayma mukavemeti açısı, $\phi_{kum}=35^\circ$; elastisite modülü, $E_{kum}=30$ MPa ve Poisson's oranı, $\nu_{kum}=0.40$ 'tır.

Örneklerde, kazık grubunun oturma hesabında yararlanılan eşdeğer radye seviyesindeki gerilme alanı, L kazığın toplam boyunu göstermek üzere:

$$A_{es\ deg\ erradye} = \left[\left(\frac{2L}{3} \right) \frac{1}{4} + 5d \right]^2 = \left[\frac{L}{3} + 5d \right]^2 \quad (4.5)$$

ifadesiyle hesaplanır. Aynı şekilde santrifüjdeki sistemler için de eşdeğer radye seviyesindeki gerilme alanı elde edilir.



Şekil 4.12: Örnek 1 ve Örnek 2’de kazık yerleşimi

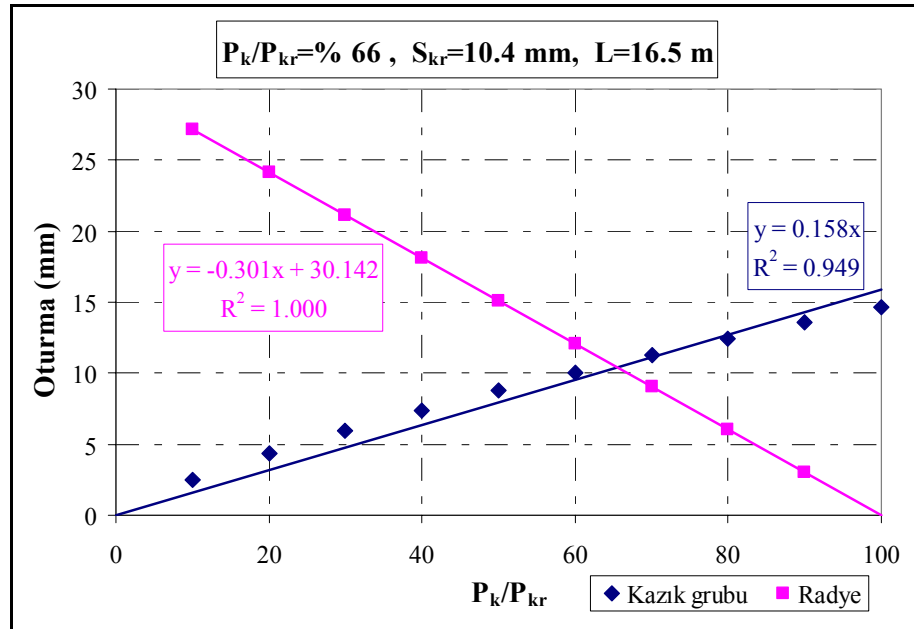
4.2.1. Örnek 1

İlk örnekte, kazık çapı 1.0 m, radye kenar uzunluğu 8 m, radyeye etkiyen yayılı yük 100 kN/m^2 ’dir. Radyenin toplam alanı, $A_r=64 \text{ m}^2$ ve net radye alanı, $A_{\text{net}}=39 \text{ m}^2$ ’dir. Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre, kazık grubu ve radyenin oturma değerleri ile eşdeğer radye gerilmesinin jeolojik yükün % 20’sinden küçük olması şartını sağlayan kazık boyları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Yük paylaşım oranı-oturma grafiği çizilerek radye ve kazık grubunun oturmalarının eşitlendiği yük paylaşım oranı belirlenmiştir (Şekil 4.13). Bu durumda radye ve kazık grubunun hesaplanan oturma miktarı 10.4 mm ve kazık boyu 16.5 m’dir. Yük paylaşım oranı (P_k/P_{kr}) % 66, buna bağlı olarak kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük miktarları sırasıyla 4201 kN ve 2199 kN’dur.

Tablo 4.7: Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Örnek 1

P_k/P_{kr} (%)	P_k (kN)	P_r (kN)	$\Delta\sigma'_{A-A}$ (kN/m ²)	$0.20\sigma'_{y0}$ (kN/m ²)	S_k (mm)	S_r (mm)	L (m)
100	6400	-	47.54	47.54	14.67	-	19.81
90	5760	640	45.24	45.24	13.58	3.01	18.85
80	5120	1280	42.75	42.79	12.45	6.03	17.83
70	4480	1920	40.10	40.10	11.27	9.04	16.71
60	3840	2560	37.18	37.18	10.05	12.06	15.49
50	3200	3200	33.92	33.94	8.76	15.07	14.14
40	2560	3840	30.22	30.26	7.40	18.09	12.61
30	1920	4480	25.94	25.94	5.94	21.10	10.81
20	1280	5120	20.65	20.69	4.32	24.11	8.62
10	640	5760	13.52	13.54	2.47	27.13	5.64
-	-	6400	-	-	-	18.37	-

**Şekil 4.13:** Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Örnek 1

Elde edilen değerlere göre sistem elemanlarının taşıma gücü tahkik edilebilir. Kum zemine oturan kare temel için taşıma gücü ifadesi:

$$q_d = 0.4\gamma B_r N_\gamma \quad (4.6)$$

ve $\phi_{kum} = 35^\circ$ için $N_\gamma = 42.4$ değeri kullanılarak kazık grubu dışında kalan radye temelin taşıma gücü 916 kPa bulunur. Bu durumda güvenlik sayısı $F_{s-r} = 16.3$ olur.

Kazık grubuna etkiyen birim çevre sürtünmesi:

$$f_s = K_s \sigma_v \tan \delta \quad (4.7)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada $K_s/K_0=1$, $K_0=1-\sin\phi$ ve $\delta=\phi$ değerleri alınarak ortalama birim çevre sürtünmesi $f_s=44.3$ kPa hesaplanır. Kazık grubunun blok hareket ettiği kabulüyle toplam çevre sürtünmesi 14632 kN bulunur. Güvenlik sayısı $F_{s-k}=3.5$ olur. Kazık grubunun taşıma gücü, tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamı olarak da tahkik edilebilir. Bu durumda toplam taşıma gücü 9194 kN ve güvenlik sayısı 2.2'dir.

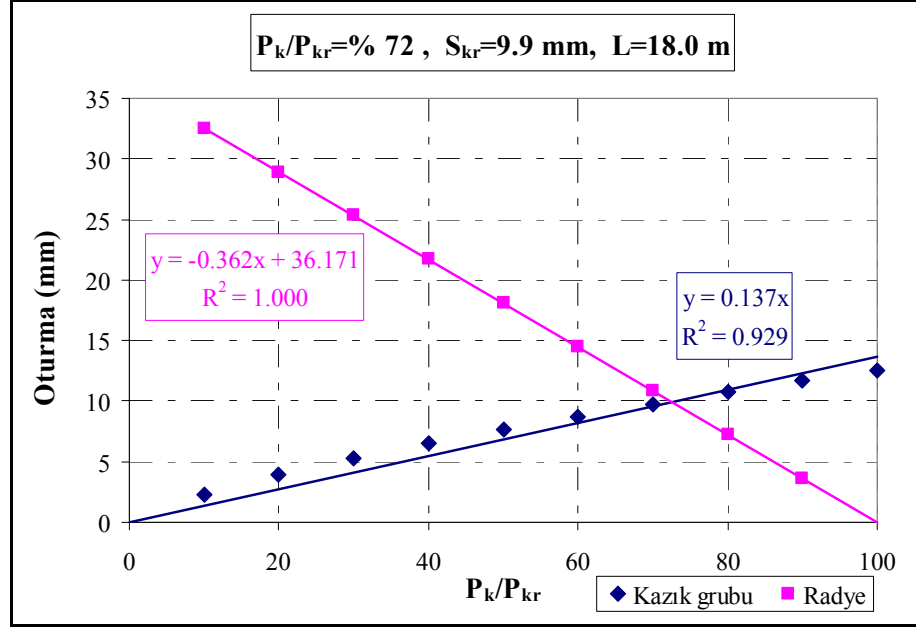
4.2.2. Örnek 2

İkinci örnekte, kazık çapı 0.60 m, radye kenar uzunluğu 4.8 m ve radyeye etkiyen yayılı yük 200 kN/m^2 'dir. Radye temelin toplam alanı, $A_r=23.04 \text{ m}^2$ ve net radye alanı, $A_{\text{net}}=14.04 \text{ m}^2$ 'dir. Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre radye ve kazık grubunun oturmaları ile kazık boyları Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8: Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Örnek 2

P_k/P_{kr} (%)	P_k (kN)	P_r (kN)	$\Delta\sigma'_{A-A}$ (kN/m ²)	$0.20\sigma'_{v0}$ (kN/m ²)	S_k (mm)	S_r (mm)	L (m)
100	4608	-	48.54	48.55	12.58	-	20.23
90	4147	461	46.44	46.44	11.67	3.62	19.35
80	3686	922	44.16	44.18	10.73	7.23	18.41
70	3226	1382	41.68	41.74	9.75	10.85	17.39
60	2765	1843	39.00	39.02	8.73	14.47	16.26
50	2304	2304	36.00	36.00	7.66	18.09	15.00
40	1843	2765	32.57	32.57	6.52	21.70	13.57
30	1382	3226	28.51	28.54	5.28	25.32	11.89
20	922	3686	23.49	23.50	3.91	28.94	9.79
10	461	4147	16.47	16.49	2.32	32.55	6.87
-	-	4608	-	-	-	22.04	-

Yük paylaşım oranı-oturma grafiği çizilerek radye ve kazık grubunun oturmalarının eşitlendiği yük paylaşım oranı belirlenmiştir (Şekil 4.14). Bu durumda radyenin ve kazık grubunun hesaplanan oturma miktarı 9.9 mm ve kazık boyu 18.0 m'dir. Yük paylaşım oranı % 72, kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük miktarları sırasıyla 3340 kN ve 1268 kN'dur.



Şekil 4.14: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Örnek 2

Elde edilen değerlere göre sistem elemanlarının taşıma gücü tahkiki yapıldığında, kazık grubu dışında kalan radye temelin taşıma gücü 550 kN/m^2 hesaplanır. Bu durumda güvenlik sayısı 6.1 olur.

Kazık grubuna etkiyen ortalama birim çevre sürtünmesi, 48.4 kN/m^2 'dir. Kazık grubunun bir blok şeklinde hareket ettiği düşünülerek toplam çevre sürtünmesi 10448 kN bulunur. Güvenlik sayısı $F_{s-k}=3.1$ olur. Kazık grubunun taşıma gücü, tekil kazıkların taşıma güçleri toplamı olarak tahkik edildiğinde toplam taşıma gücü 6565 kN bulunur ve güvenlik sayısı 2.0'dir.

4.2.3. Santrifüj deneyleri

Önerilen hesap yöntemi ile 3x3, 5x5 ve 7x7 kazıkların yer aldığı 2. grup santrifüj temel modellerinin çözümleri yapılmıştır. Sistemler deneylerde uygulanan 50 kN/m^2 düzgün yayılı yük altında çözülmüştür.

İkinci grup deneylerde radye boyutları 18 m x 18 m, radye kalınlığı 0.5 m, beton kazıkların çapı 0.63 m ve kazık aralığı 2.52 m'dir. Santrifüjde uzun süreli davranış incelendiğinden, çözümlerde kil zemin için drenajlı parametreler kullanılmıştır. Buna göre zeminin elastisite modülü 6.5 MPa, Poisson oranı 0.35, kayma mukavemeti açısı 21° , kohezyonu 10 kPa ve suya doygun birim hacim ağırlığı 17.5 kN/m^3 'dir.

Radye temelin toplam alanı, $A_r=324 \text{ m}^2$ ve net radye alanı, A_{net} , 3x3, 5x5 ve 7x7 kazıklı sistemler için sırasıyla 291.85 m^2 , 209.30 m^2 ve 75.94 m^2 'dir. Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre radye ve kazık grubunun oturmaları ile kazık boyları Tablo 4.9-11'de verilmiştir.

Tablo 4.9: Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 3x3 kazıklı sistem

P_k/P_{kr} (%)	P_k (kN)	P_r (kN)	$\Delta\sigma'_{A-A}$ (kN/m ²)	$0.20\sigma'_{v0}$ (kN/m ²)	S_k (mm)	S_r (mm)	L (m)
100	16200	-	68.19	68.20	135.21	-	29.23
90	14580	1620	65.06	65.10	125.29	11.09	27.90
80	12960	3240	61.73	61.74	115.06	22.19	26.46
70	11340	4860	58.08	58.12	104.40	33.28	24.91
60	9720	6480	54.11	54.13	93.29	44.38	23.20
50	8100	8100	49.67	49.70	81.60	55.47	21.30
40	6480	9720	44.63	44.66	69.18	66.57	19.14
30	4860	11340	38.72	38.73	55.81	77.66	16.60
20	3240	12960	31.39	31.43	41.02	88.76	13.47
10	1620	14580	21.32	21.33	23.91	99.85	9.14
-	-	16200	-	-	-	99.94	-

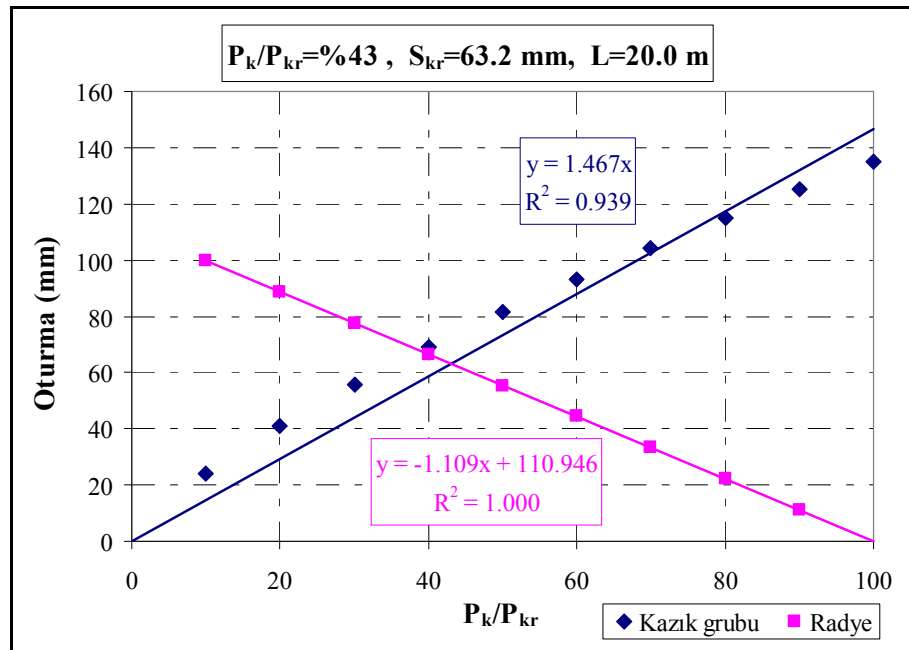
Tablo 4.10: Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 5x5 kazıklı sistem

P_k/P_{kr} (%)	P_k (kN)	P_r (kN)	$\Delta\sigma'_{A-A}$ (kN/m ²)	$0.20\sigma'_{v0}$ (kN/m ²)	S_k (mm)	S_r (mm)	L (m)
100	16200	-	50.45	50.47	116.30	-	21.63
90	14580	1620	47.57	47.58	107.14	15.47	20.39
80	12960	3240	44.49	44.50	97.69	30.94	19.07
70	11340	4860	41.17	41.21	87.90	46.41	17.66
60	9720	6480	37.58	37.61	77.75	61.88	16.12
50	8100	8100	33.64	33.65	67.16	77.35	14.42
40	6480	9720	29.23	29.26	55.99	92.82	12.54
30	4860	11340	24.20	24.22	44.12	108.30	10.38
20	3240	12960	18.26	18.27	31.29	123.77	7.83
10	1620	14580	10.79	10.80	17.01	139.24	4.63
-	-	16200	-	-	-	99.94	-

Yük paylaşım oranı-oturma grafiği çizilerek radye ve kazık grubunun oturmalarının eşitlendiği yük paylaşım oranı belirlenmiştir (Şekil 4.15-17).

Tablo 4.11: Çeşitli yük paylaşım oranlarına göre oturmalar ve kazık boyları, Santrifüj deneyleri, 7x7 kazıklı sistem

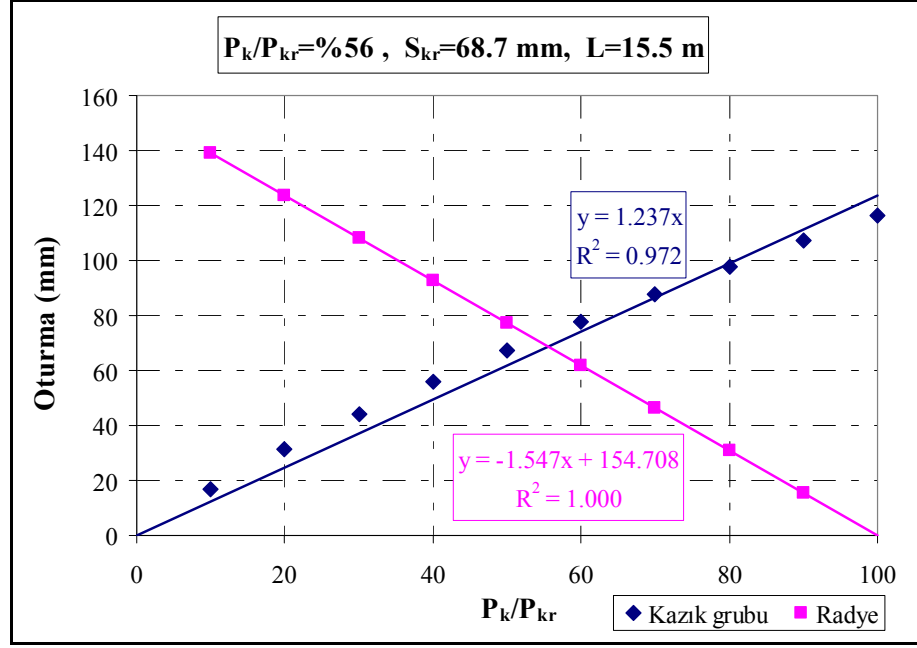
P_k/P_{kr} (%)	P_k (kN)	P_r (kN)	$\Delta\sigma'_{A-A}$ (kN/m ²)	$0.20\sigma'_{v0}$ (kN/m ²)	S_k (mm)	S_r (mm)	L (m)
100	16200	-	36.73	36.75	99.24	-	15.75
90	14580	1620	34.22	34.23	90.87	42.64	14.67
80	12960	3240	31.56	31.59	82.28	85.28	13.54
70	11340	4860	28.75	28.77	73.46	127.92	12.33
60	9720	6480	25.75	25.76	64.36	170.56	11.04
50	8100	8100	22.52	22.52	54.94	213.20	9.65
40	6480	9720	19.00	19.02	45.14	255.84	8.15
30	4860	11340	15.14	15.17	34.90	298.48	6.50
20	3240	12960	10.83	10.85	24.09	341.12	4.65
10	1620	14580	5.88	5.90	12.56	383.76	2.53
-	-	16200	-	-	-	99.94	-



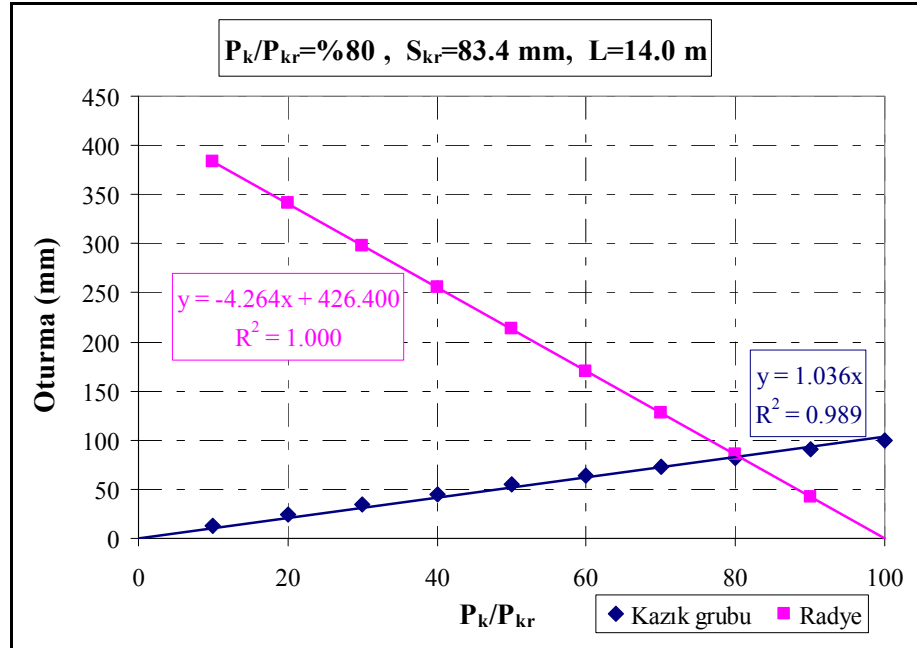
Şekil 4.15: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 3x3 kazıklı sistem

Bu durumda 3x3 kazıklı sistemde radyenin ve kazık grubunun hesaplanan oturma miktarı 63.2 mm ve kazık boyu 20.0 m'dir. Yük paylaşım oranı % 43, kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük miktarları sırasıyla 6977 kN ve 9223 kN'dur.

5x5 kazıklı sistem için ise radyenin ve kazık grubunun hesaplanan oturma miktarı 68.7 mm ve kazık boyu 15.5 m'dir. Yük paylaşım oranı % 56, kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük miktarları sırasıyla 9002 kN ve 7198 kN'dur.



Şekil 4.16: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 5x5 kazıklı sistem



Şekil 4.17: Yük paylaşım oranı-oturma grafiği, Santrifüj deneyleri, 7x7 kazıklı sistem

7x7 kazıklı sistemde radyenin ve kazık grubunun hesaplanan oturma miktarı 83.4 mm ve kazık boyu 14.0 m'dir. Yük paylaşım oranı % 80, kazık grubu ve radyenin taşıdıkları yük miktarları sırasıyla 13033 kN ve 3167 kN'dur.

Her 3 temel sisteminin basit hesap yöntemi ile çözümünden elde edilen sonuçlar toplu halde Tablo 4.12’de görülmektedir.

Tablo 4.12: Santrifüj deneyleri, Basit hesap yöntemi ile çözümler

Sistem	3x3	5x5 kazık	7x7 kazık
L (m)	20.0	15.5	14.0
S _{kr} (mm)	63.2	68.7	83.4
P _k /P _{kr} (%)	43	56	80

4.3. Tahkikler

4.3.1. Plaxis 3D Foundation yazılımı

Kazıklı radye temel hesabında kazıklar, radye ve zemin arasındaki etkileşimi dikkate alan Plaxis 3D Foundation yazılımı, önerilen hesap yöntemiyle incelenen iki problemin ve santrifüjde yapılan 2. grup deneylerin tahkikinde kullanılmıştır.

Örnek 1 ve Örnek 2’deki modellerinin simetrik olması nedeniyle sadece dörtte bir sistem üzerinde çözüm yapılırken, santrifüj deneylerinde tüm sistem kullanılmıştır. x, y ve z eksenlerinde sınır şartlarının etkisinin kalmadığı veya ihmal edilebileceği en uygun sonlu eleman ağ boyutlarını belirlemek için farklı boyutlarda deneme çözümleri yapılmıştır (Şekil E19-20). Ağ sınır şartları yazılım tarafından otomatik atanmaktadır. Yapılan çözümler sonucunda gerilme ve yerdeğiştirmelerde önemli değişikliklerin görülmediği boyutların kullanılmasına karar verilmiştir.

Örnek 1 ve Örnek 2 için, x ve z eksenlerinde ağ uzunluğu 32 m iken, en uzun kazık boyuna bağlı olarak y eksenindeki derinlik -40 m seçilmiştir. Yeraltı suyu da bu seviyededir. Radye ve kazık çevresindeki ve kazık ucundaki ağda inceltme yapılmıştır. Bu şartlarda eleman sayıları 21 152-26 656 arasında değişmektedir ve çözüm süreleri 20-40 dakika arasındadır. Zeminin kayma mukavemeti ve endeks özellikleri için daha önce örnek çözümlerde belirtilen değerler kullanılırken, zemin modeli olarak Mohr-Coulomb modelinden yararlanılmıştır. Kazıklar ve radye için elastisite modülü 30 GPa, Poisson oranı 0.18 ve betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m³, alınmıştır. Temel sistemi kum zeminde yer aldığından drenajlı davranış seçilmiştir.

Santrifüjde yapılan 2. grup deneylerin Plaxis sonlu eleman çözümlerinde, x ve z eksenlerindeki ağ uzunluğu 90 m iken, y eksenindeki derinlik -47 m’dir. Yeraltı suyu

da bu seviyededir. Radye çevresindeki ağda inceltme yapılmıştır. Bu şartlarda eleman sayıları 26 600-34 560 arasında değişmektedir ve çözüm süreleri 1-3 saat arasındadır. Konsolidasyon oturmasının da dahil olduğu uzun süreli oturma değerini hesaplamak için drenajlı çözümler yapılmıştır. Kil zemin için kullanılan drenajlı parametreler, basit hesap yöntemi ile yapılan çözümlerde kullanılanlar ile aynıdır. Zemin modeli olarak yine Mohr-Coulomb modeli kullanılmıştır. Kazıklar ve radye için elastisite modülü 40 GPa, Poisson oranı 0.16 ve betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m³'tür.

Çözümlerde geometri ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra K_0 şartlarında gerilme durumu ilk adımda yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Sonrasında önce kazıklar daha sonra da radye yapılmakta, son adım olarak da yayılı yük etkitilmektedir. Belirlenen bu hesap aşamalarına göre analizler tamamlandıktan sonra aranılan yerdeğiştirmeler, gerilmeler, momentler sayısal veya grafik olarak elde edilmektedir (Şekil E21). Örnek 1 ve Örnek 2 için farklı kazık boylarında yapılan sonlu eleman çözümlerinde elde edilen oturma ve yük dağılımı değerleri Tablo 4.13-14'te görülmektedir. Santrifüj modelleri için ise farklı kazık boylarında yapılan çözümler daha önceki bölümde Tablo 4.2-5 arasında verilmiştir. Bu sonuçlardan yalnızca santrifüj modellerinde kullanılan kazık boyları ve basit hesap yönteminde elde olunan kazık boyları için olan oturmalar Tablo 4.15'te, temsili kazıklara gelen yükler Tablo 4.16'da görülmektedir.

Tablo 4.13: Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Örnek 1

L (mm)	P _k (kN)	P _r (kN)	S _{kr} (mm)	P _k /P _{kr} (%)
20.0	5033	1367	9.24	78.6
19.0	4968	1432	9.53	77.6
18.0	4901	1499	9.82	76.6
17.0	4825	1575	10.15	75.4
16.5	4785	1615	10.32	74.8
15.5	4700	1700	10.67	73.4
14.5	4604	1796	11.06	71.9
13.0	4449	1951	11.69	69.5
11.0	4182	2218	12.68	65.3
9.0	3830	2570	13.90	59.8
6.0	2961	3439	16.51	46.3
Radye	-	6400	19.35	-

Tablo 4.14: Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Örnek 2

L (mm)	P _k (kN)	P _r (kN)	S _{kr} (mm)	P _k /P _{kr} (%)
20.5	3766	842	8.82	81.7
19.5	3736	872	9.08	81.1
18.5	3704	904	9.35	80.4
18.0	3689	919	9.48	80.1
17.5	3670	938	9.64	79.6
16.5	3631	977	10.00	78.8
15.0	3571	1037	10.51	77.5
14.0	3520	1089	10.93	76.4
12.0	3396	1212	11.93	73.7
10.0	3221	1387	13.31	69.9
7.0	2514	2094	18.37	54.6
Radye	-	4608	25.44	-

Tablo 4.15: Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Oturmalar ve yük dağılımı, Santrifüj deneyleri

Sistem	3x3 kazık			5x5 kazık			7x7 kazık	
L (m)	24.0	20.0	18.0.0	24.0	18.0	15.5	14.0	12.0
S _{kr} (mm)	69.11	74.73	76.02	57.16	66.05	71.47	69.50	73.53
P _k	7115	6473	6377	11298	10260	9745	13467	13034
P _r	9085	9727	9823	4902	5940	6455	2733	3166
P _k /P _{kr}	43.9	39.9	39.4	69.7	63.3	60.2	83.1	80.5

Tablo 4.16: Plaxis 3D Foundation yazılımı çözümleri, Temsili kazıklara gelen yükler (kPa), Santrifüj deneyleri

Sistem	3x3 kazık			5x5 kazık			7x7 kazık	
Kazık	24.0	20.0	18.0.0	24.0	18.0	15.5	14.0	12.0
1	366.27	400.30	372.52	182.36	197.08	202.39	211.44	209.58
2	694.62	649.98	610.88	221.44	228.24	229.62	210.71	208.53
3	992.38	844.09	819.42	261.90	260.65	257.81	206.35	203.37
4				480.36	435.60	413.70	216.14	212.49
5				522.99	467.84	441.01	222.68	219.55
6				769.15	655.55	602.55	217.54	211.72
7							320.89	307.89
8							329.80	317.10
9							322.36	308.44
10							392.64	372.04

Tablo 4.13-16’da koyu renk yazılmış olan satırlar basit hesap yöntemiyle bulunan kazık boyu değerinin Plaxis çözümlerine karşılık gelmektedir.

4.3.2. Eşdeğer ayak yöntemi

Kazık grubunun eşdeğer bir ayak ile temsil edildiği bu yöntemde, kazık grubu ile aynı uzunlukta d_e eşdeğer çapında bir ayak eşlemesi yapılmıştır. Kazık grup

alanınının ayak alanına eşitliğinden elde edilen $d_e = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{kg}}$ ifadesiyle hesaplanan

eşdeğer ayak çapı, Örnek 1 ve Örnek 2 için sırasıyla 5.64 m ve 3.39 m’dir.

$E_e = E_s + (E_k - E_s) \left(\frac{A_{kk}}{A_{kg}} \right)$ denkleminde her iki durum için eşdeğer elastisite modülü

E_e 3796 MPa bulunmuştur. Eşdeğer ayak çapı, 3x3, 5x5 ve 7x7 kazıklı santrifüj modelleri için sırasıyla 6.40 m, 12.08 m ve 17.77 m hesaplanmıştır. Aynı sistemler için eşdeğer elastisite modülü ise 3497 MPa, 2724 MPa ve 2469 MPa’dır.

Eşdeğer ayak bu şekilde tanımlandıktan sonra kazıklı radye temelin oturması, tekil kazığın oturması olarak:

$$S_{kr} = S_{tk} = \frac{PI}{E_s d} \quad (4.8)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır (Poulos ve Davis, 1980). Burada I , oturma etki faktörüdür ve kazık sıkışabilirliği ve narinliği, zeminin Poisson oranı ve tabaka kalınlığına (H) bağlı olarak abaklar yardımıyla $I = I_0 R_K R_v R_h$ elde edilir (Şekil 4.7).

I_0 , R_K , R_v ve R_h abaklardan okunan katsayılarıdır. Örnek 1, Örnek 2 ve santrifüj modelleri için eşdeğer ayak yöntemiyle elde edilen sonuçlar Tablo 4.17-19’da verilmiştir.

Tablo 4.17: Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Örnek 1

L (m)	20.0	19.0	18.0	17.0	16.5	15.5	14.5	13.0	11.0	9.0	6.0
S_{kr} (mm)	9.61	9.76	9.95	10.29	10.44	10.55	10.66	11.22	12.04	13.20	15.40

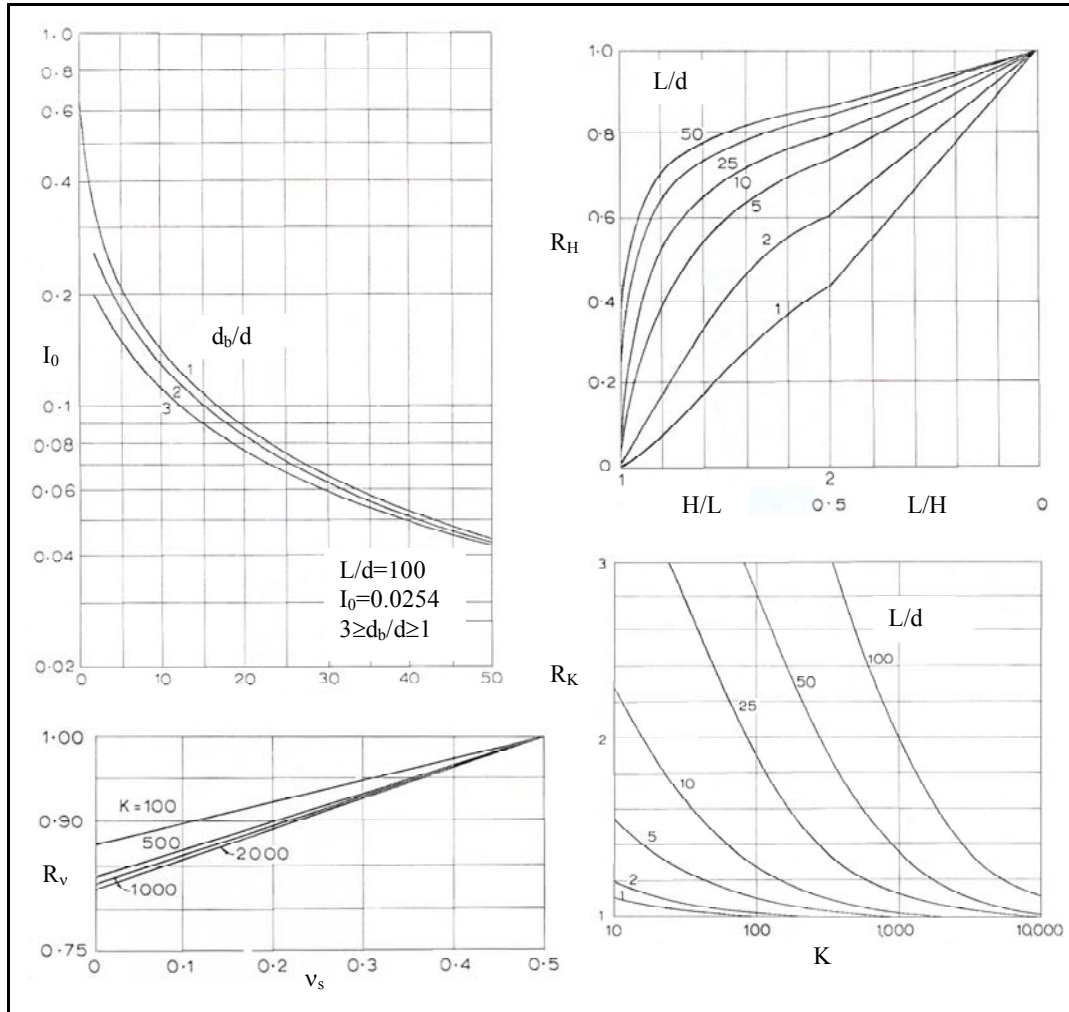
Tablo 4.18: Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Örnek 2

L (m)	20.5	19.5	18.5	18.0	17.5	16.5	15.0	14.0	12.0	10.0	7.0
S _{kr} (mm)	8.89	9.08	9.23	9.42	9.70	9.75	10.40	10.68	11.54	12.53	14.40

Tablo 4.19: Eşdeğer ayak yöntemi çözümleri, Santrifüj deneyleri

Sistem	3x3 kazık			5x5 kazık			7x7 kazık		
L (m)	24.0	20.0	18.0.0	24.0	18.0	15.5	14.0	12.0	
S _{kr} (mm)	89.93	103.40	107.75	64.37	68.64	74.52	62.68	64.01	

Tablo 4.17-19’da koyu renk yazılmış sütunlar basit hesap yöntemiyle bulunan değerlerin eşdeğer ayak yöntemi ile çözümlerine karşılık gelmektedir.

**Şekil 4.18:** Tekil kazık oturma hesabında kullanılan etki faktörleri (Poulos ve Davis, 1980)

4.3.3. Oturma oranı yöntemi

Kazık grubunun rijitliği, gruptaki kazıklar arası etkileşimi dikkate alan $k_k = \eta n_t k$ ifadesiyle hesaplanmıştır (Butterfield ve Douglas, 1981). Burada η , oturma oranı R_s 'in tersidir ve bir etkinlik oranı olarak düşünülebilir.

Kazık sayısına göre etkinlik oranı $\eta = n_t^{-e}$ bağıntısı ile elde edilir. e sayısı kazık narinlik, rijitlik, aralık oranları ve zeminin homojenliği ile Poisson oranına bağlı olarak abaklardan elde edilmiştir (Fleming ve diğ., 1992) (Şekil 3.7). Öncelikle ilk grafikten, kabul edilen rijitlik oranı 1000, kazık aralık oranı 3, zeminin homojenliği 0.75 ve zeminin Poisson oranı 0.3 değerleri için gerçek kazık narinlik oranına (L/d) göre başlangıç e değeri okunur. Diğer dört grafikten ise daha önce kabul edilmiş değerlerden farklı gerçek değerler için ayrı düzeltme sayıları bulunarak, başlangıç e değeriyle çarpılır ve gerçek e sayısı bulunur.

η değerinden sonra tekil kazık rijitliği mevcut yöntemlerden herhangi biri ile hesaplanır. Randolph ve Wroth (1978) tarafından önerilen metot kullanılırsa, tekil kazığın rijitliği:

$$\frac{P_k}{G_L r S_k} = \frac{\frac{4\chi}{(1-\nu_s)\varpi} + \frac{2\pi\rho \tanh(\mu L)}{\zeta} \frac{L}{(\mu L)} \frac{L}{r}}{1 + \frac{4\chi}{\pi\lambda(1-\nu_s)\varpi} \frac{\tanh(\mu L)}{(\mu L)} \frac{L}{r}} \quad (4.9)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada $\chi = r_u / r$ (r_u kazık ucu yarıçapı olmak üzere) uç çapı farklı olan kazıklarda genişleme oranı, $\varpi = G_L / G_u$ kazık ucu ve altında farklı zemin bulunması durumunda zeminin kayma modülü oranı, $\rho = G_{ort} / G_L$ zeminin ortalama ve kazık ucundaki kayma gerilmesi oranı olarak zemin homojenliğinin göstergesi, $\lambda = E_k / G_L$ kazık/zemin rijitlik oranı, $\zeta = \ln(r_m / r)$ kazık etki yarıçapı oranı ve $\mu L = \sqrt{\frac{2}{\lambda\zeta}} \frac{L}{r}$ kazık sıkışabilirliğinin ifadesidir. ζ kazık etki yarıçapı oranı:

$$\zeta = \ln\{[0.25 + (2.5\rho(1-\nu_s) - 0.25)\varpi]L/r\} \quad (4.10)$$

bağıntısıyla elde edilir. $\varpi = 1$ olduğu sürtünme kazıklarında (4.10) ifadesi $\zeta = \ln[2.5\rho(1-\nu_s)L/r]$ şeklini alır.

Kazık grubunun rijitliği hesaplandıktan sonra toplam yükün oturmaya oranı olarak ifade edilen rijitlik tanımlaması kullanılarak kazıklı radye temelin oturması hesaplanır. Örnek 1, Örnek 2 ve santrifüj modelleri için oturma oranı yöntemiyle hesaplanan sonuçlar Tablo 4.20-22’de görülmektedir.

Tablo 4.20: Oturma oranı yöntemi çözümleri, Örnek 1

L (m)	20.0	19.0	18.0	17.0	16.5	15.5	14.5	13.0	11.0	9.0	6.0
S _{kr} (mm)	10.64	10.90	11.19	11.49	11.66	12.03	12.44	13.07	14.25	15.79	19.48

Tablo 4.21: Oturma oranı yöntemi çözümleri, Örnek 2

L (m)	20.5	19.5	18.5	18.0	17.5	16.5	15.0	14.0	12.0	10.0	7.0
S _{kr} (mm)	10.14	10.32	10.54	10.65	10.78	11.03	11.53	11.88	12.77	13.92	16.57

Tablo 4.22: Oturma oranı yöntemi çözümleri, Santrifüj deneyleri

Sistem	3x3 kazık			5x5 kazık			7x7 kazık		
L (m)	24.0	20.0	18.0.0	24.0	18.0	15.5	14.0	12.0	
S _{kr} (mm)	87.48	98.29	104.97	57.70	68.94	75.15	59.05	64.57	

Tablo 4.20-22’de koyu renk yazılmış sütunlar basit hesap yöntemiyle bulunan değerlerin oturma oranı yöntemi ile çözümlerine karşılık gelmektedir.

4.3.4. Etkileşim faktörleri yöntemi

Randolph (1983), kazık başlığı-kazıktan oluşan birim elamanın davranışından yola çıkarak, kazıklı radye temelin davranışını etkileşim faktörleri kullanarak elde etmiştir. Kazıklı radye sistemin rijitliği $k_{kr} = \frac{k_k + (1-2\alpha)k_r}{1 - \alpha^2(\frac{k_r}{k_k})}$ ve radye tarafından

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

taşınan yükün oranı $\frac{P_r}{P_{kr}} = \frac{(1-\alpha)k_r}{k_k + (1-2\alpha)k_r}$ ifadesi ile hesaplanır.

Kazık grubu ve radyenin rijitlikleri mevcut yöntemlerden herhangi biri ile elde edildikten sonra, α etkileşim faktörü, r_b yarıçapında başlık ve r yarıçapında kazıktan

oluşan tekil sistem için $\alpha = \frac{\ln(r_m / r_b)}{\ln(r_m / r)} \approx 1 - \frac{\ln(r_b / r)}{\zeta}$ bağıntısından elde edilir.

Örnek 1, Örnek 2 ve santrifüj modellerinin çözümlerinde, kazık grubunun rijitliği için oturma oranı yönteminde hesaplanan rijitlikler alınmıştır. Radye temelin rijitliği ise (kare rijit radye temel):

$$k_r = \frac{2.25GB_r}{(1-\nu_s)} \quad (4.11)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır (Randolph, 1994).

Kazıklı radye temelin rijitliği hesaplandıktan sonra toplam yükün oturmaya oranı olarak ifade edilen rijitlik tanımlaması kullanılarak kazıklı radye temelin oturması hesaplanır. Örnek 1, Örnek 2 ve santrifüj modelleri için etkileşim faktörleri yöntemiyle elde edilen sonuçlar Tablo 4.23-25'te verilmiştir.

Tablo 4.23: Etkileşim faktörleri yöntemi çözümleri, Örnek 1

L (m)	20.0	19.0	18.0	17.0	16.5	15.5	14.5	13.0	11.0	9.0	6.0
S _{kr} (mm)	10.15	10.37	10.61	10.86	11.00	11.29	11.62	12.11	12.98	14.04	16.09
P _k /P _{kr} (%)	81.6	80.8	80.0	79.1	78.6	77.4	76.1	74.0	70.1	64.6	51.5

Tablo 4.24: Etkileşim faktörleri yöntemi çözümleri, Örnek 2

L (m)	20.5	19.5	18.5	18.0	17.5	16.5	15.0	14.0	12.0	10.0	7.0
S _{kr} (mm)	9.86	10.02	10.22	10.32	10.43	10.66	11.10	11.41	12.18	13.13	15.19
P _k /P _{kr} (%)	87.6	87.2	86.7	86.5	86.2	85.6	84.5	83.7	81.6	78.7	71.6

Tablo 4.25: Etkileşim faktörleri yöntemi çözümleri, Santrifüj deneyleri

Sistem	3x3 kazık			5x5 kazık			7x7 kazık	
L (m)	24.0	20.0	18.0.0	24.0	18.0	15.5	14.0	12.0
S _{kr} (mm)	79.95	87.47	91.64	54.57	63.73	68.45	54.83	64.57
P _k /P _{kr} (%)	66.0	58.1	52.8	80.6	74.5	70.9	78.1	75.0

Tablo 4.23-25'te koyu renk yazılmış sütunlar basit hesap yöntemiyle bulunan değerlerin etkileşim faktörleri yöntemi ile çözümlerine karşılık gelmektedir.

4.3.5. Sonuçlar

Örnek 1, Örnek 2 ve santrifüj modellerinin önerilen hesap yöntemi ile çözümünden bulunan oturma, yük paylaşımı ve kazık uzunluğu değerleri ile bu metodun tahkikinde kullanılan diğer yöntemlerle elde edilen sonuçların tamamı Tablo 4.26’da verilmiştir.

Tablo 4.26: Tüm sonuçlar, Örnek 1, Örnek 2 ve Santrifüj modelleri

Sistem	Örnek 1	Örnek 2	Santrifüj modelleri			
			3x3 kazık	5x5kazık	7x7 kazık	
L (m)	16.5	18.0	20.0	15.5	14.0	
S _{kr} (mm)	10.44	9.42	103.40	74.52	62.68	Esdeger ayak
	11.66	10.65	98.29	75.15	59.05	Oturma oranı
	11.00	10.32	87.47	68.45	54.83	Etkileşim faktörleri
	10.32	9.48	74.73	71.47	69.50	Plaxis
	10.4	9.9	63.2	68.7	83.4	Basit hesap yöntemi
P _k /P _{kr}	78.6	86.5	58.1	70.9	78.1	Etkileşim faktörleri
	74.8	80.1	39.4	60.2	80.5	Plaxis
	66	72	43	56	80	Basit hesap yöntemi

Oturma değerleri açısından bakıldığında, kum zeminde yer alan temel sisteminin bulunduğu Örnek 1 ve Örnek 2 çözümleri için, önerilen basit hesap yöntemiyle bulunan değerler ile 3 boyutlu ileri sayısal analiz yöntemi de dahil olmak üzere diğer yöntemlerle hesaplanan değerler uyumlu sonuçlar vermektedir. Uzun süreli davranışın izlendiği kil zemindeki santrifüj modelleri için ise elde edilen değerler 5x5 kazıklı sistem için diğer metodların sonuçları ile uyumlu iken 3x3 kazıklı ve 7x7 kazıklı sistemlerde farklılık gösterebilmektedir. 3x3 kazıklı sistem için diğer yöntemlerle elde edilen çözümler de geniş bir aralıkta dağılmaktadır.

Horikoshi (1995)’e göre kazıklı radye temellerin optimum tasarımı için kazık grup alanı/radye alanı (A_{kg}/A_r) değeri % 16-25 arasında yer almalıdır. Örnek 1 ve Örnek 2 için A_{kg}/A_r oranı % 25’dir. 3x3 kazıklı sistem için ise A_{kg}/A_r oranı yaklaşık olarak % 8 ile önerilen değer altında kalırken, 7x7 kazıklı sistemde % 71 gibi oldukça yüksek bir değere ulaşmaktadır. 7x7 kazıklı sistemde kazık grubu dışında kalan

radye alanı oldukça az olduğundan, önerilen basit hesap yönteminde ara adımlarda radyenin aldığı yük oranı arttıkça büyük oturma değerleri elde edilmekte, bu da sistemin oturmasının fazla çıkmasına neden olmaktadır. 5x5 kazıklı sisteme bakıldığında ise aynı değer % 31'dir ve Örnek 1 ile Örnek 2'de olduğu gibi önerilen aralığa yakındır ve bu sistemlerde elde edilen sonuçlar diğer çözümlerinki ile uyumludur.

Prakoso (1999)'ya göre ise farklı oturmaları azaltmada en iyi sonucu almak için kazık grup genişliği/radye genişliği oranı (B_{kg}/B_r) 0.40-0.60 arasında olmalıdır. B_{kg}/B_r oranı 3x3 kazıklı sistem için 0.32, 5x5 kazıklı sistem için 0.60 ve 7x7 kazıklı sistem için 0.88'dir. Örnek 1 ve Örnek 2 için ise bu oranı 0.63'tür. Örnek 1, Örnek 2 ve 5x5 kazıklı sistemin oranları yukarıda önerilen değerlerle uyum içindedir ve bu sonuçlardan görülmektedir ki drenajlı davranış ele alındığında kum ya da kil zeminde önerilen hesap yöntemi ile yapılan çözümler, diğer basit hesap yöntemleri ve 3 boyutlu ileri sayısal analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir ve bu yöntemin kazıklı radye temellerin tasarımında ilk aşamada kullanımı uygundur.

Çözümler yük paylaşım oranına göre incelenirse A_{kg}/A_r oranının % 16-25 değerine yakın olduğu sistemlerde önerilen hesap yöntemi ile diğer iki yöntemle göre daha düşük değerler hesaplanmaktadır. Kazıklı temel olarak kabul edilebilecek 7x7 kazıklı sistemde ise diğer yöntemlerle yakın değerler elde edilmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR

Yapı temellerinin tasarımında, temel zemininin taşıma gücünün yeterli olmasının yanında meydana gelecek oturmaların kabul edilebilir sınırlar içinde kalması şartı da aranır. Taşıma gücünün yeterli olması ancak oturmaların kabul edilebilir değerleri aşması halinde, yüzeysel temelin altında “oturmayı azaltıcı eleman” olarak kazıklar kullanılmıştır. Kazıklı radye olarak adlandırılan temel sistemleri böyle bir gereksinimden doğmuştur.

Geleneksel yöntemlerde, kazıklı temel hesabı yapı yükünün tamamının kazıklar tarafından taşındığı varsayımına göre yapılır. Fakat radyenin zeminle temas ettiği durumlarda yük, radye ve kazıklar arasında paylaşarak zemine aktarılmaktadır. Temel sisteminin tasarımında bu nokta dikkate alındığı takdirde daha ekonomik bir çözüm elde etmek olasıdır. Bazı hallerde yüzeysel temel taşıma gücü açısından yeterlidir fakat oturmalar kabul edilebilir değerlerden fazladır. Bu şartlarda yüzeysel temellerin altında kazıklar *oturmayı azaltıcı eleman* olarak kullanılmaktadır. Kazıklı radye olarak adlandırılan bu sistemler, kazıklı temellere göre çok daha ekonomik bir çözümdür.

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 kil zeminde köşe kazıklar en fazla yükü alırken, merkeze doğru yük miktarı azalmaktadır.

Kazıklı radye probleminin çözümünde elastik hesap yöntemlerinden yararlanıldığında, çok sayıda değişken ve çözülmesi gereken çok sayıda ifade ortaya çıkmaktadır. Bu ifadelerde kullanılan parametrelerin, arazideki değerleri belli olmadıkça yapılan hesapların fazla bir yararı olmamaktadır. Bu yüzden, karmaşık hesap yöntemleri yerine, zemin parametrelerinin değişiminin izlenebildiği ve bu parametrelerin arazide sağlıklı bir şekilde belirlenebilen değerlerine bağlı, daha sade yöntemlere gereksinim vardır.

Bu çalışmada önerilen hesap yönteminde, yapı yükünün, radye ve kazıklar tarafından paylaşılarak taşınacağı kabul edilmekte, farklı paylaşım oranlarına göre radyenin ve kazık grubunun oturmaları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Çeşitli P_k/P_{kr} oranları için elde edilen oturma miktarları karşılaştırılarak, radye ve kazık grubunun oturmalarının eşit olduğu paylaşım oranı belirlenmektedir. Elde edilen sonuç, bir yandan oturma miktarını vermekte, öte yandan kazık boyunun belirlenmesini sağlamaktadır.

Önerilen yöntemde, kazıklı radye sistemlerin hesaplanması için arazide belirlenen zemin özelliklerinin değişiminin izlenebilmektedir. Bu amaçla yararlanılan kavramlar ve hesap esaslarının, teker teker bakıldığında, zemin mekaniğinde esasen yaygın olarak kullanıldığı görülür.

Kazıklı radye temellerin optimum tasarımı için Horikoshi (1995) A_{kg}/A_r oranının % 16-25 arasında yer almasını önermiştir. Prakoso (1999)'a göre de farklı oturmaları azaltmada en iyi sonucu almak için kazık grup genişliği/radye genişliği oranı (B_{kg}/B_r) 0.40-0.60 arasında olmalıdır. Tasarımda bu oranlara yakın değerler kullanıldığında, önerilen hesap yöntemi ile kumda veya kilde yer alan kazıklı radye temeller için yapılan çözümler, diğer basit hesap yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Yöntem ayrıca ileri sayısal analiz metodu Plaxis 3D Foundation yazılımıyla da benzer sonuçlar vermiştir. Yöntemin çıkış noktası sistem elemanlarının oturma değerleri olduğu için, oturmaya dayalı tasarım için kullanımı uygundur. Yük paylaşım oranı açısından ise diğer yöntemlere göre farklılık gösterebilmektedir.

Temel elemanları, zemin ve üstyapı arasındaki etkileşimden dolayı kazıklı radye temeller analizi karmaşık sistemlerdir. Geleneksel yöntemlerle dikkate alınamayan birçok etken ileri sonlu eleman veya benzeri yazılımlarla daha kolay modellenebilmektedir. Gelişen teknoloji sayesinde yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile çözüm süreleri ve olanakları da günden güne artmaktadır.

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. Kazık aralığını belli bir değerden daha düşük almak veya kazık sayısını belli sayıdan fazla arttırmak, aynı şekilde kazık

boyunu belli bir değerden uzun tutmak, oturmelerde elde edilecek azalma değerlerinde dikkate alınacak miktarlar vermemektedir.

Kazıklı radyelerin analizinde teorik yöntemlerin yanında deneysel ve uygulama örneklerine de ihtiyaç vardır. Büyük ölçekli model deneyleri hem yapılabilirlik hem de zaman açısından sorun yaratabilmekte, ayrıca ekonomik olmamaktadır. Santrifüj modelleme bu anlamda önemli bir kolaylık sağlamaktadır.

Kazıklı radye sistemlerin hesaplanmasında güncel olan sorunlardan birisi, yanal yükler etkisindeki davranışdır. Kazık gruplarının yanal yükler etkisindeki davranışı tam anlaşılamamışken kazıklı radyenin yanal yükler etkisindeki davranışına hemen bir çözüm bulunabileceği düşünülmemektedir. Bu bakımdan, tez çalışmasında kazıklı radyenin yanal yükler etkisindeki davranışı dikkate alınmamıştır. Kazıklı radye temelin dinamik yükler altındaki davranışı da incelenmesi gereken diğer bir konudur.

KAYNAKLAR

- Anagnostopoulos, C. and Georgiadis, M.,** 1998. A simple analysis of piles in raft foundations, *Geotechnical Engineering Journal*, Volume 29, No:1, pp. 71-83.
- Balakumar, V., Kalaiarasi, V., and Ilamparuthi, K.,** 2005. Experimental and analytical study on the behaviour of circular piled raft on sand, *16th ICSMGE*, Osaka, Japan, Volume 4, pp. 1943-1946.
- Borel, S,** 2001. Calcul des fondations mixtes semelle-pieux sous sollicitation horizontale, *15th ICSMGE*, Istanbul, Turkey, Volume 2, pp. 847-850.
- Brinkgreve and Broere,** 2006. *Plaxis 3D Foundation v1.6 Manual*.
- Broms, B.B.,** 1976. Pile foundations-Pile groups, *6th ECSMFE*, Vienne, Austria, Volume 2.1, 103-132.
- Burland, J.B.,** 1995. Piles as settlement reducers, *19th National Italian Geotechnical Conference*, Pavia, Italy, pp. 21-34.
- Burland, J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B.,** 1977. Behaviour of foundations and structures, *9th ICSMFE*, State-of-the-Art Report, Tokyo, Japan, July, Volume 2, pp. 495-546.
- Butterfield, R. and Banerjee, P.K.,** 1971. The problem of pile group- pile cap interaction, *Géotechnique*, Volume 21, No:2, pp. 135-142.
- Butterfield, R. and Douglas, R.A.,** 1981. Flexibility coefficient for the design of piles and pile groups, *CIRIA Technical note*, No:108, London.
- Chung, S.F. and Randolph, M.F.,** 2004. Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers, *2nd International Conference on Geotechnical Site Characterization*, Eds. de Fonseca, V. and Mayne, P., Porto, Portugal, 19-22 September, Volume 1, pp. 671-678.
- Clancy, P. and Randolph, M.F.,** 1993. An approximate analysis procedure for piled raft foundations, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 17, pp. 849-869.
- Cooke, R.W.,** 1986. Piled raft foundations on stiff clays- A contribution to design philosophy, *Géotechnique*, Volume 36, No:2, pp. 169-203.

- Craig, W.H.**, 1984. Installation studies for model piles, *Symposium on the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design*, Manchester, pp. 440-455.
- Davis, E.H. and Poulos, H.G.**, 1972. The analysis of piled raft systems, *Australian Geomechanic Journal*, G2, 1, pp. 21-27.
- De Mello, V.F.M.**, 1969. Foundations of buildings on clay, State of the art report, 7th *ICSMFE*, Mexico City, Volume 1, pp. 49-136
- De Sanctis, L., and Russo G.**, 2002. Discussion of ‘Contribution to piled raft foundation design’ by W.A. Prakoso and F.H. Kulhawy, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, August, pp. 707-708.
- De Sanctis, L. and Mandolini, A.**, 2003. On the ultimate vertical load of piled rafts on soft clay soils, in *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ed. Van Impe, W.F., Millpresss, Rotterdam, pp. 379-386.
- De Sanctis, L. and Mandolini, A.**, 2006. Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 132 , pp. 1600-1610.
- Desai, C.S.**, 1979. *Elementary finite element method*, Prentice Hall, N.J.
- Desai, C.S., Johnson, L.D. and Hargett, C.M.**, 1974. Analysis of pile supported gravity lock, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 100, GT9, pp. 1009-10029.
- El-Mossallamy, Y.**, 2002. Innovative application of piled raft foundation in stiff and soft subsoil, *Deep Foundations 2002*, pp. 426-440.
- Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F., and Elson, W.K.**, 1992. *Piling Engineering*, 2nd edition, Surrey University press, Halstead press.
- Franke, E., Lutz, B. and El-Mossallamy, Y.**, 1994. Measurements and numerical modelling of highrise building foundations on Frankfurt clay, *Conference on Vertical and Horizontal Deformation of Foundations and Embankments*, Texas, USA, Volume 2, Eds. Yeung, A. and Felio, G., pp. 1325-1336.

- Franke, E., El-Mossallamy, Y. and Wittmann, P.,** 2000. Calculation methods for raft foundations in Germany, in *Design Applications of Raft Foundations*, Ed. Hemsley, J.A., Thomas Telford, pp. 283-322.
- Fraser, R.A. and Wardle, L.J.,** 1976. Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations. *Géotechnique*, Volume 26, pp. 613–630.
- Griffiths, D.V., Clancy, P. and Randolph, M.F.,** 1991. Piled raft foundations analysis by finite elements, 7th *International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Volume 2, Eds. Beer, G., Booker, J.R. and Carter, J.P., Cairns, Australia, pp. 1153-1157.
- Hain, S.J. and Lee I.K.,** 1978. The analysis of flexible raft-pile systems, *Géotechnique*, Volume 28, No:1, pp. 65-83.
- Hansbo, S. and Kallström, R.,** 1983. A case study of two alternative foundation principles, *Vag-och Vattenbyggaren*, 7-8, pp. 23-27.
- Hongladaromp, T., Chen, N.J. and Lee, S.L.,** 1973. Load distribution in rectangular footings on piles, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 4 , No:2, pp. 77-90.
- Hooper, J.A,** 1973. Observations on the behaviour of a piled raft foundation on London clay, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Volume 55, No:2, pp. 77-90.
- Horikoshi, K.,** 1995. Optimum design of piled raft foundations, *PhD Thesis*, University of Western Australia, Perth.
- Horikoshi, K. and Randolph, M.F.,** 1996. Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay, *Géotechnique*, Volume 46, No:4, pp. 741-752.
- Horikoshi, K. and Randolph, M.F.,** 1998. A contribution to optimum design of piled rafts, *Géotechnique*, Volume 48, No:3, pp. 301-307.
- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., and Watanabe, T.,** 2005a. Performance of pile draft foundations subjected to dynamic loading, *IJPMG International Journal of Physical Modelling in Geotechnis* 2, pp. 51-62.

- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., Watanabe, T., and Fukuyama, H.,** 2005b. Performance of pile draft foundations subjected to static horizontal load, *IJPMG International Journal of Physical Modelling in Geotechnis* 2, pp. 37-50.
- Katzenbach, R.,** 2006. International guideline for combined piled raft foundations (draft version), TC18 report.
- Katzenbach, R., and Moormann, C.,** 2001. Recommendations for the design and construction of piled rafts, *15th ICSMFE*, Istanbul, Turkey, 27-31 August, pp. 927-930.
- Katzenbach, R., and Turek, J.,** 2005. Combined pile raft foundation subjected to lateral loads, *16th ICSMGE*, Volume 4, pp. 2001-2004.
- Katzenbach, R., Arslan, U. and Moormann, C.,** 2000. Piled raft foundation projects in Germany, *15th ICSMFE*, Istanbul, Turkey, 27-31 August, pp. 927-930.
- Katzenbach, R., Arslan, U. and Moormann, C., Reul, O.,** 1998. Piled raft foundation - Interaction between piles and raft, *Darmstadt Geoetchnics*, No. 4, International conference on soil-structure interaction in urban civil engineering pp. 279-296.
- Ko, H.Y., Atkinson, R.H., Goble, G.G. and Ealy, C.D.,** 1984. Centrifugal modeling of pile foundations, in *Analysis and Design of Pile Foundations*, Ed. Meyer, J.R., pp. 21-41.
- Kuwabara, F.,** 1989. An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soils, *Soils and Foundations*, Volume 29, No:1, pp. 82-92.
- Kwon, O., Arslan, U. and Moormann, C.,** 2000. Piled raft foundation projects in Germany, *15th ICSMFE*, Istanbul, Turkey, 27-31 August, pp. 927-930.
- Laue, J.,** 2002. Centrifuge technology, in *Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes*, pp. 75-112, Ed. Springman, S., Swets&Zeitlinger, Lisse.
- Liang, F.Y.; Chen L.Z. and Shi, X.G.,** 2003. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load, *Computers and Geotechnics*, Volume 30, pp. 443-453.

- Liu, J., Huang, Q., Li, H., and Hu, W.L.,** 1994. Experimental research on bearing behaviour of pile groups in soft soil, *13th ICSMGE*, Volume 2, pp. 535-538
- Mandolini, A., Russo, G, and Viggiani, C.,** 2005. Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design, *16th ICSMFE*, Osaka, Japan, 12-16 September, pp. 177-213.
- Mayne, P.W. and Poulos, H.G.,** 1999. Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Volume 125, GT6, pp. 453-460.
- Meyerhof, G.G.,** 1976. Bearing capacity and settlement of pile foundations, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Volume 102, GT3, pp. 195-228.
- Mindlin, R.D.,** 1936. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid, *Physics*, Volume 7, pp. 195-202.
- O'Neill, M.W., Caputo, V., de Cock, F., Hartikainen, J. and Mets, M.,** 2001. Case histories of the performance of pile assisted rafts, *ISSMGE TC18 Subcommittee 2 Report*, January 2001.
- Ottaviani, M.,** 1975. Three dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups, *Géotechnique*, Volume 25, No:2, pp. 159-174.
- Phillips, R.,** 1995. Centrigues in modelling: Practicle considerations, in *Geotechnical Centrifuge Technology*, Ed. Taylor, R.N., Blackie Academic&Professional, Glasgow, pp. 34-60.
- Poulos, H.G.,** 1968a. Analysis of the settlement of pile groups, *Geotechnique*, Vol.18, pp.449-471.
- Poulos, H.G.,** 1968b. The influence of a rigid pile cap on the settlement behaviour of an axially loaded pile, *Civil Engineering Transaction of the Institution of Engineers*, Australia, pp. 206-208.
- Poulos, H.G.,** 1989. Pile behaviour-theory and application, *Géotechnique*, Volume 9, No:3, pp. 365-415.

- Poulos, H.G.,** 1991. Analysis of piled strip foundations, *7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Eds. Beer, G., Booker, J.R. and Carter, J.P., Cairns, Australia, Vol. 1, pp. 183-191.
- Poulos, H.G.,** 1993. Piled rafts in swelling or consolidating soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 119 , No:2, February, 374-380.
- Poulos, H.G.,** 1994. Alternative design strategies for piled raft foundations, *3rd International Conference on Deep Foundation Practice incorporating PILETALK'94*, Singapore, 19-20 May, Keynote paper, pp. 239-244.
- Poulos, H.G.,** 2000a. Pile-raft interaction-Alternative methods of analysis, in *Developments in Theoretical Geomechanics*, Eds. Smith, D.W. and Carter, J.P., Balkema, pp. 445-463.
- Poulos, H.G.,** 2000b. Practical design procedures for piled raft foundations, in *Design Applications of Raft Foundations*, Ed. Hemsley, J.A., Thomas Telford, pp. 425-467.
- Poulos, H.G.,** 2001a. Piled raft foundations: Design and applications, *Géotechnique*, Volume 51, No:2, 95-113.
- Poulos, H.G.,** 2001b. Methods of analysis of piled raft foundations, *ISSMGE TC18 Subcommittee 1 Report*, June 2001.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H.,** 1980. *Pile foundation analysis and design*, John Wiley&Sons.
- Poulos, H.G., Carter, J.P., and Small, J.C.,** 2001. Foundations and retaining structures-Research and practice, *15th ICSMFE*, Istanbul, Turkey, 27-31 August, Volume 4, pp. 2527-2606.
- Poulos, H.G., Small, J.C., Ta, L.D., Sinha, J. and Chen, L.,** 1997. Comparison of some methods for analysis of piled rafts, *14th ICSMFE*, Hamburg, Germany, 6-12 September, pp. 1119-1124.
- Prakoso, W.A.,** 1999. Numerical analysis of vertically loaded and laterally loaded foundations enhanced by deep foundation elements, *MsC. thesis*, Cornell University , Ithaca, USA.

- Prakoso, W.A. and Kulhawy, F.H.,** 2001. Contribution to piled raft optimum design, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 127, No:1, pp. 17-24.
- Pressley, J.S. and Poulos, H.G.,** 1986. Finite element analysis of mechanisms of pile group behaviour, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 10, No: 2, pp. 213-221.
- Randolph, M.F.,** 1983. Design of piled rafts, *International Symposium on Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, Thailand, pp. 525-537.
- Randolph, M.F.,** 1994. Design methods for pile groups and piled rafts, *13th ICSMFE*, New Delhi, India, pp. 61-82.
- Randolph M.F., and Wroth, .,** 1978. Analysis of deformation of vertically loaded piles, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 104, GT12, pp. 1465-1488.
- Randolph M.F., Jewell, R.J., Stone, K.J.L. and Brown, T.A.,** 1991. Establishing a new centrifuge facility, *Centrifuge '91*, Eds. Ko, H.Y. and Mc Leon, F.G., Boulder, Colorado, 13-14 June, pp. 3-9.
- Reul, O. and Randolph, M.F.,** 2003. Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in situ measurements and numerical analyses, *Géotechnique*, Volume 53, No:3, pp. 301-315.
- Russo, G. and Viggiani, C.,** 1998. Factors controlling soil-structure interaction for piled rafts, *Darmstadt Geotechnics*, No:4, International conference on soil-structure interaction in urban civil engineering, pp. 297-322.
- Saran, S.,** 1996. *Analysis and design of substructures, limit state design*, First edition, 868 pages, A.A. Balkema.
- Sert, S.,** 2003. Alüviyal ortamda kazıklı yayılı temellerin üç boyutlu analizi, *Doktora tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sinha, J. and Poulos, H.G.,** 1997. Piled raft foundation systems in swelling and shrinking soils, *14th ICSMFE*, Germany, Volume 2, pp. 1141-1144.

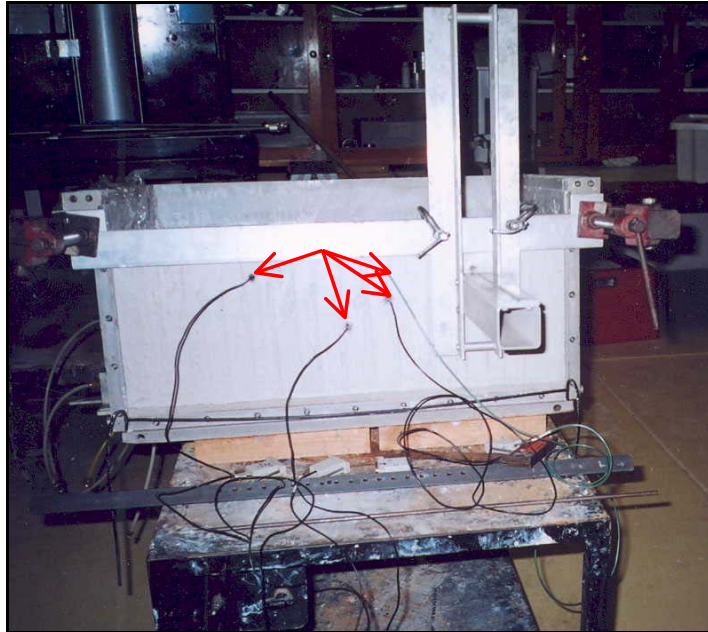
- Skempton, A.W. and MacDonald, D.H.,** 1956. The allowable settlements of buildings, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part III, 5, pp. 727-784.
- Stewart, D.P. and Randolph, M.F.,** 1991. A new site investigation tool for the centrifuge, *Centrifuge '91*, Eds. Ko, H.Y. and Mc Leon, F.G., Boulder, Colorado, 13-14 June, pp. 531-537.
- Stewart, D.P., Boyle, R.S. and Randolph, M.F.,** 1998. Experience with a new drum centrifuge, *Centrifuge '98*, Eds. Kimura, T., Kusakabe, O. and Takemura, J., Tokyo, Japan, 23-25 September, pp. 35-40.
- Ta, L.D. and Small, J.C.,** 1996. Analysis of piled raft system in layered soils, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 20, pp. 57-72.
- Taylor, R.N.,** 1995. Centrigues in modelling: Principles and scale effects, in *Geotechnical Centrifuge Technology*, Ed. Taylor, R.N., Blackie Academic&Professional, Glasgow, pp. 19-33.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B.,** 1967. *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley&Sons, New York.
- Thaher, M. and Jessberger, H.L.,** 1991a. The behaviour of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests, *Centrifuge '91*, Eds. Ko, H.Y. and Mc Leon, F.G., Boulder, Colorado, 13-14 June, pp. 225-234.
- Thaher, M. and Jessberger, H.L.,** 1991b. Investigation of the behaviour of pile-raft foundations by centrifuge modelling, *10th ECSMFE*, Florence, Italy, pp. 597-603.
- Togrol, E. ve Gök, S.,** 2001. Kazıklı radye temellerin tasarımı üzerine, *Türkiye İnşaat Mühendisliği 16. Teknik Kongresi*, ODTÜ Kültür Merkezi, 1-3 Kasım, Ankara.
- Tomlinson, M.J.,** 2001. *Foundation design and construction*, 7th edition, Prentice Hall.
- Turek, J. and Katzenbach, R.,** 2003. Small-scale model tests with combined pile-raft foundations, in *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 409-413, Ed. Van Impe, W.F., Millpresss, Rotterdam.

- Van Impe, W.F.**, 1991. Deformation of deep foundations, *10th ECSMFE*, Florence, Italy, Volume 3, pp. 1031-1062.
- Vesic, A.S.**, 1969. Experiments with instrumented pile groups in sands*Performance of deep foundations, *ASTM STP 444*, pp. 177-222.
- Vesic, A.S.**, 1981. Behaviour of pile groups, *10th ICSMFE*, Stockholm, Sweden, Volume 4, pp. 808-811.
- Viggiani, C.**, 2001. Analysis and design of piled foundations, *Rivista Italiana di Geotecnica*, First Arrigo Crice Lecture, Anno XXXV, No:1, Gennaio-Marzo, pp. 47-75.
- Viggiani, C.**, 2003. Analysis and design of piled foundations, *ETHZ Seminars*, May, Zurich.
- Whitaker, T.**, 1961. Some experiments on model piled foundations in clay, *6th International Congress of International Association of Bridge Structure Engineering*, Stockholm, Sweden, pp. 124-139.
- White, D.J., Toke W.A., Bolton, M.D. and Munachen, S.E.**, 2001. A deformation measuring system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis, *15th ICSMGE*, Istanbul, Turkey, 27-31 August, Volume 1, pp. 539-542.
- Wiesner, T.J. and Brown, P.T.**, 1980. Laboratory tests on model piled raft foundations, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 106, GT7, pp. 767-783.
- Yamashita, K., Tomono, M. and Kakurai, M.**, 1987. A method for estimating immediate settlement of piles and pile groups, *Soils and Foundations*, Volume 27, No:1, pp. 61-76.
- Yuang, K., Tomono, M. and Kakurai, M.**, 2001. A method for estimating immediate settlement of piles and pile groups, *Soils and Foundations*, Volume 27, No:1, pp. 61-76.

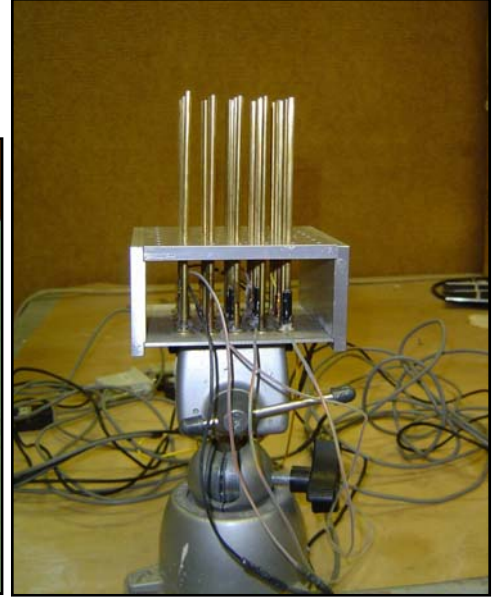
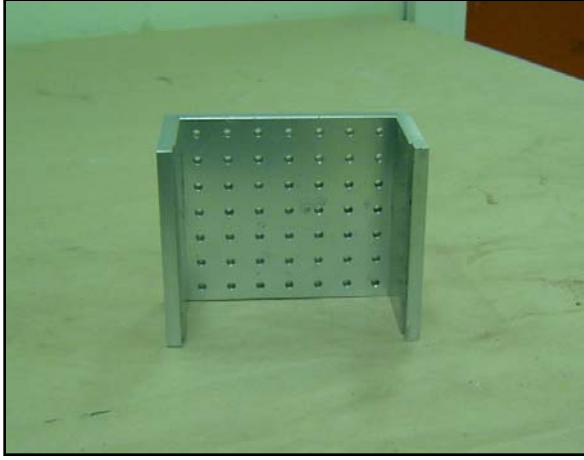
EKLER



Şekil E.1: Numunenin laboratuvar şartlarında (1g) preste konsolidasyonu



Şekil E.2: Boşluk suyu basınç ölçerler ve yerleştirilmesinde kullanılan düzenek



Şekil E.3: Temel sisteminin hazırlanmasında kullanılan kılavuz sistem ve hazırlanmış temel modeli



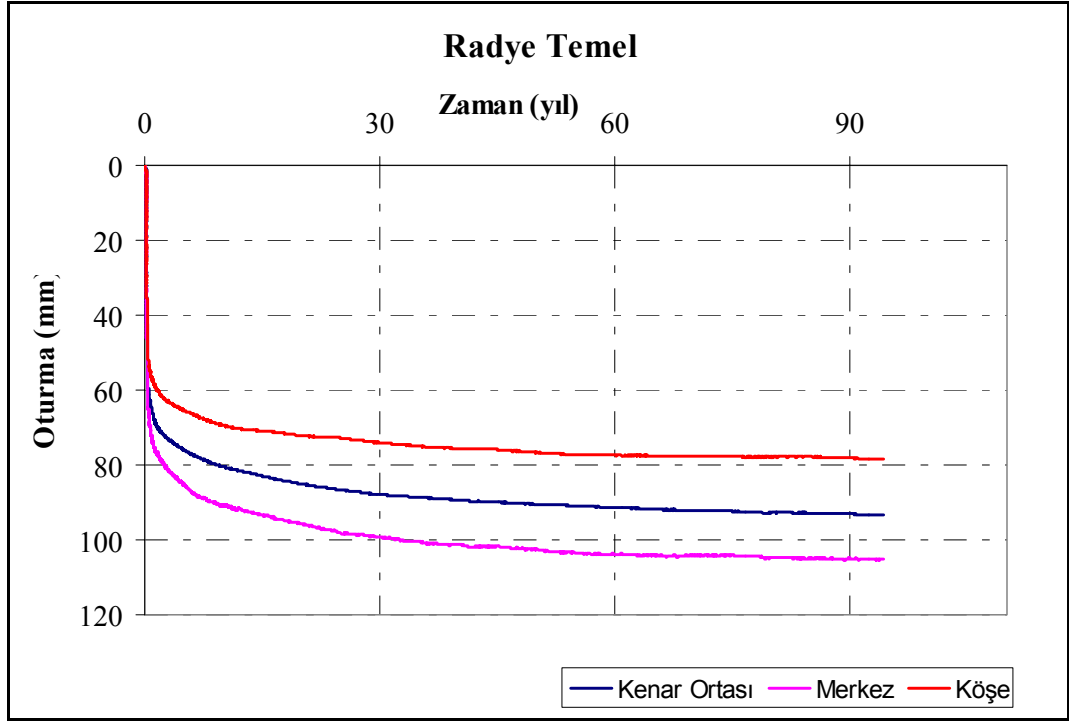
Şekil E.4: Santrifüj kontrol odası



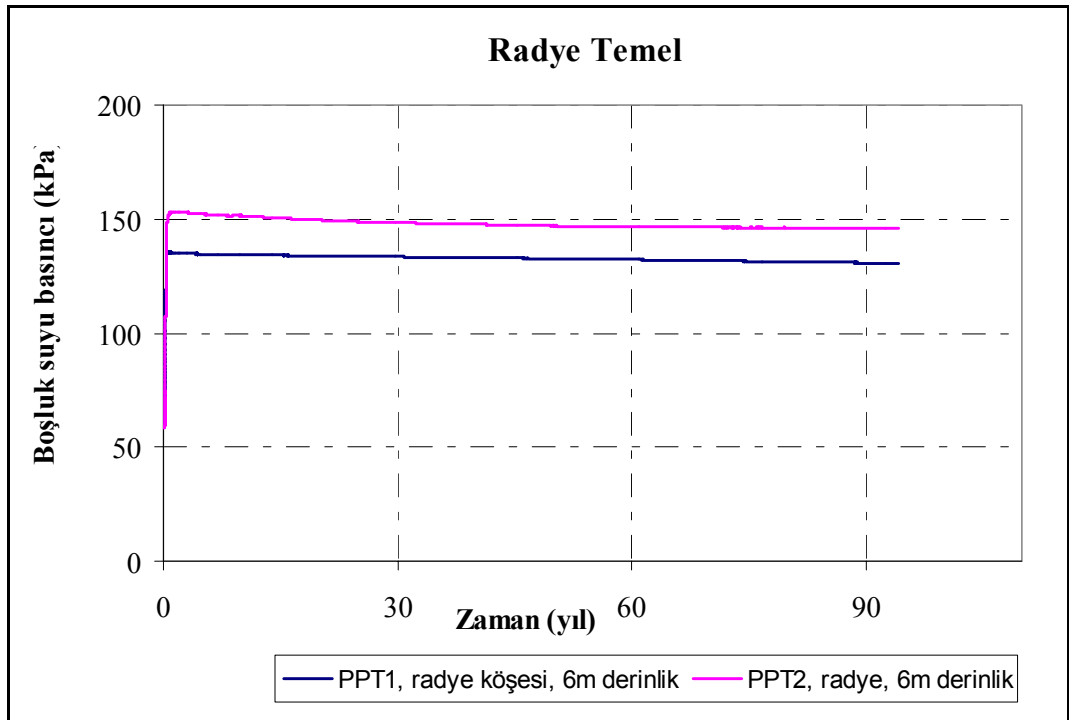
Şekil E.5: Santrifüj kontrol odasında deney sırasındaki bilgisayar kayıtları ve takip edilebilen veriler



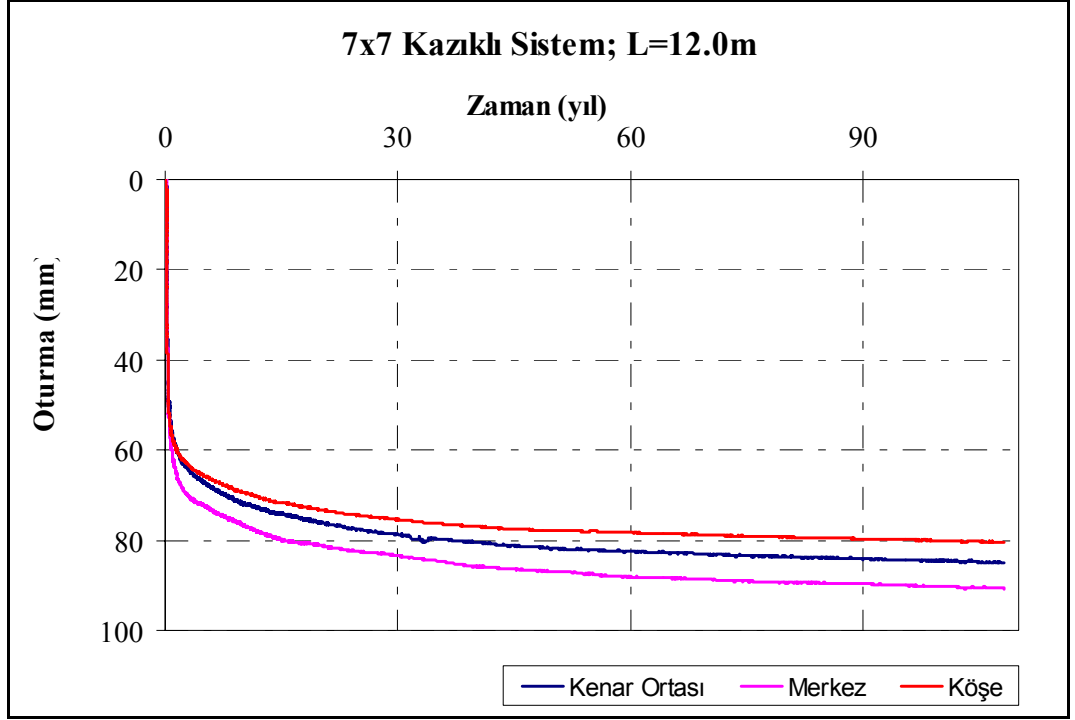
Şekil E.6: Santrifüj kontrol odasında deney sırasındaki santrifüj kontrolleri ve kamera kayıtları



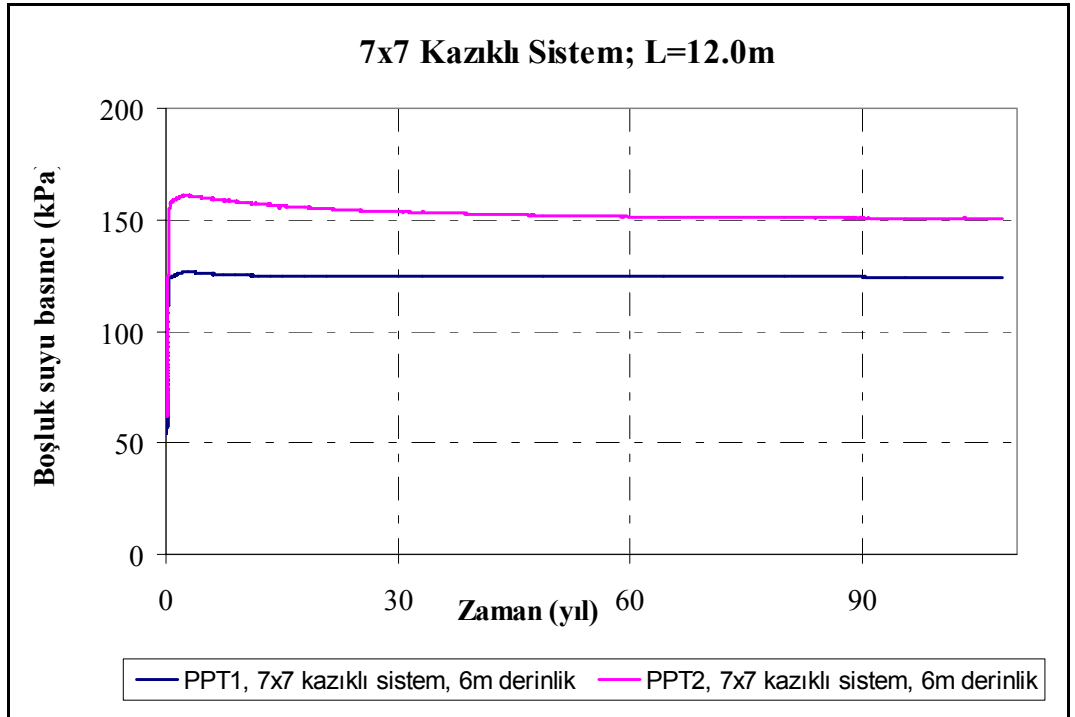
Şekil E.7: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre radye temelin arazi şartlarındaki oturmaları



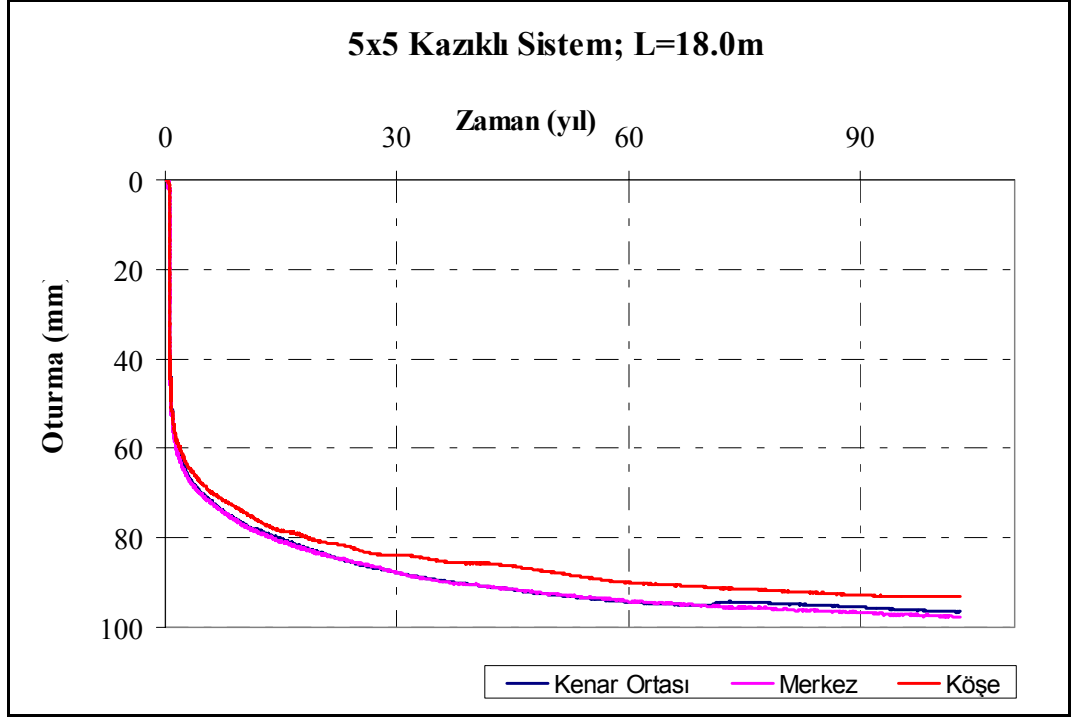
Şekil E.8: Santrifüjde radye temelin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları



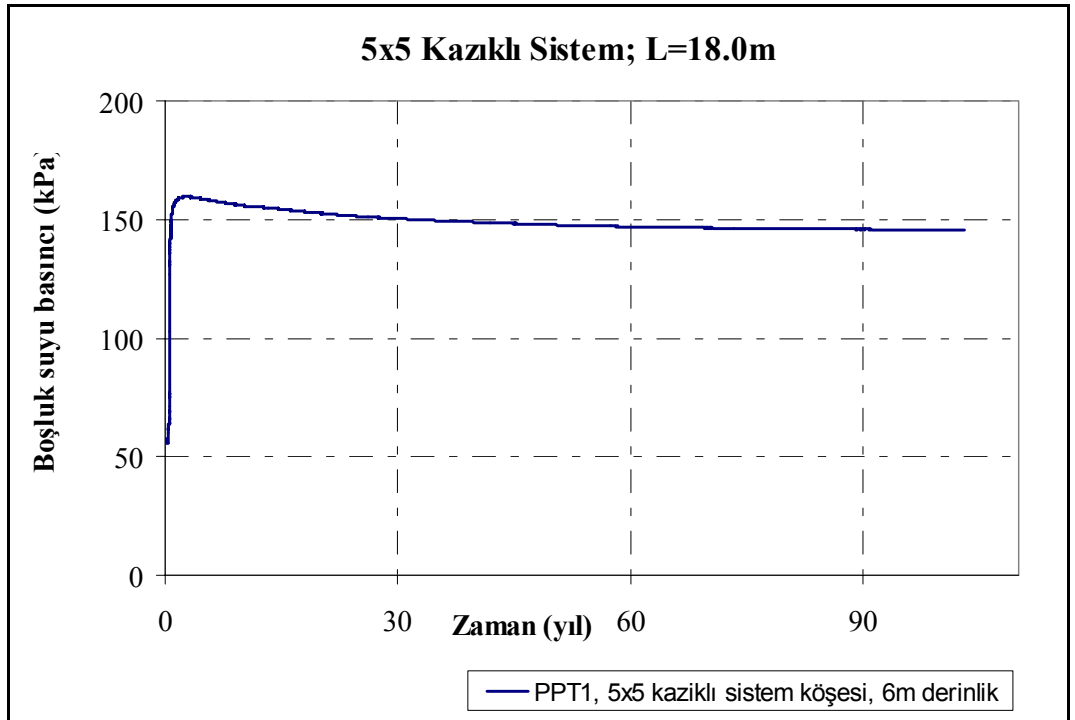
Şekil E.9: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 7x7 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=12.0m



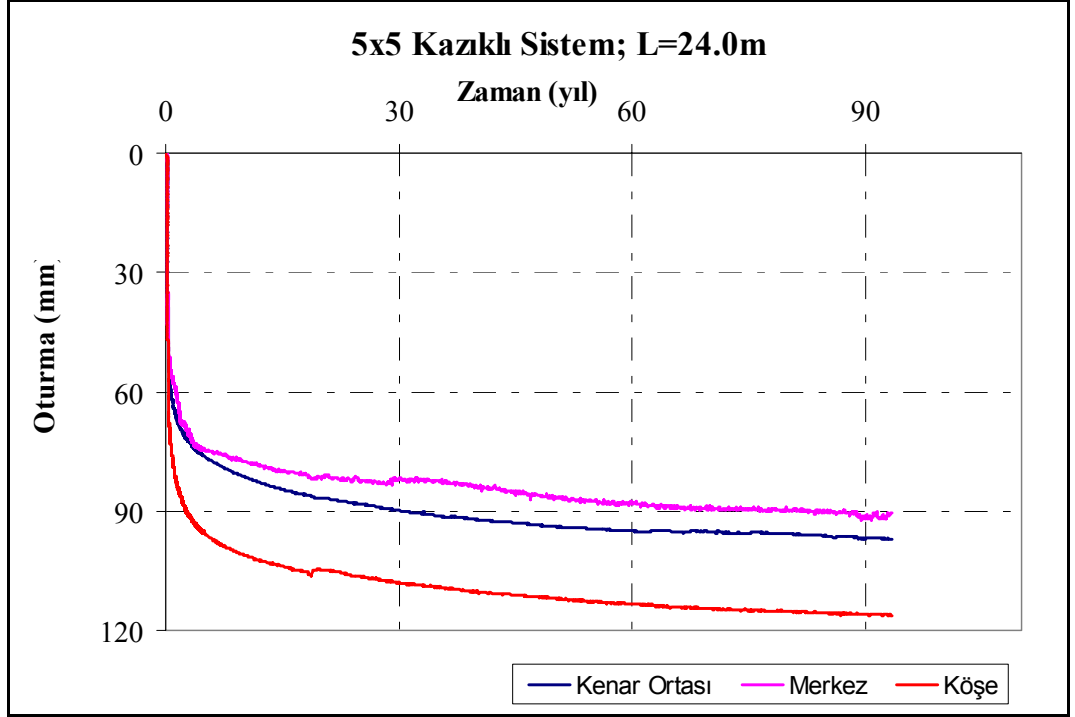
Şekil E.10: Santrifüjde 7x7 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=12.0m



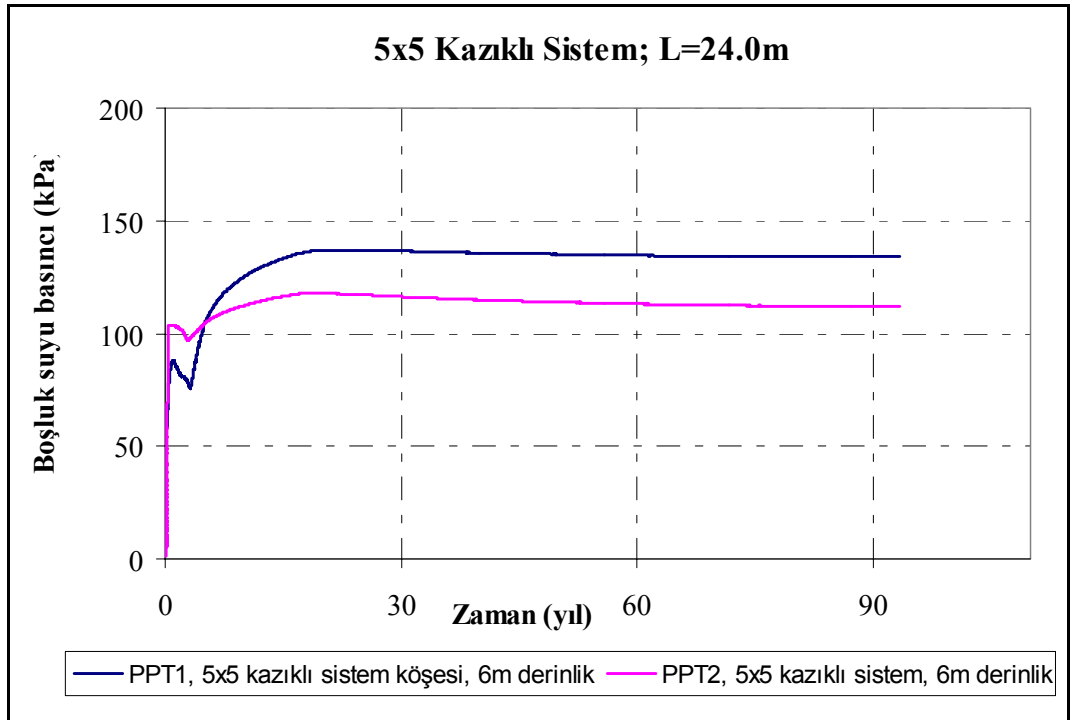
Şekil E.11: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 5x5 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=18.0m



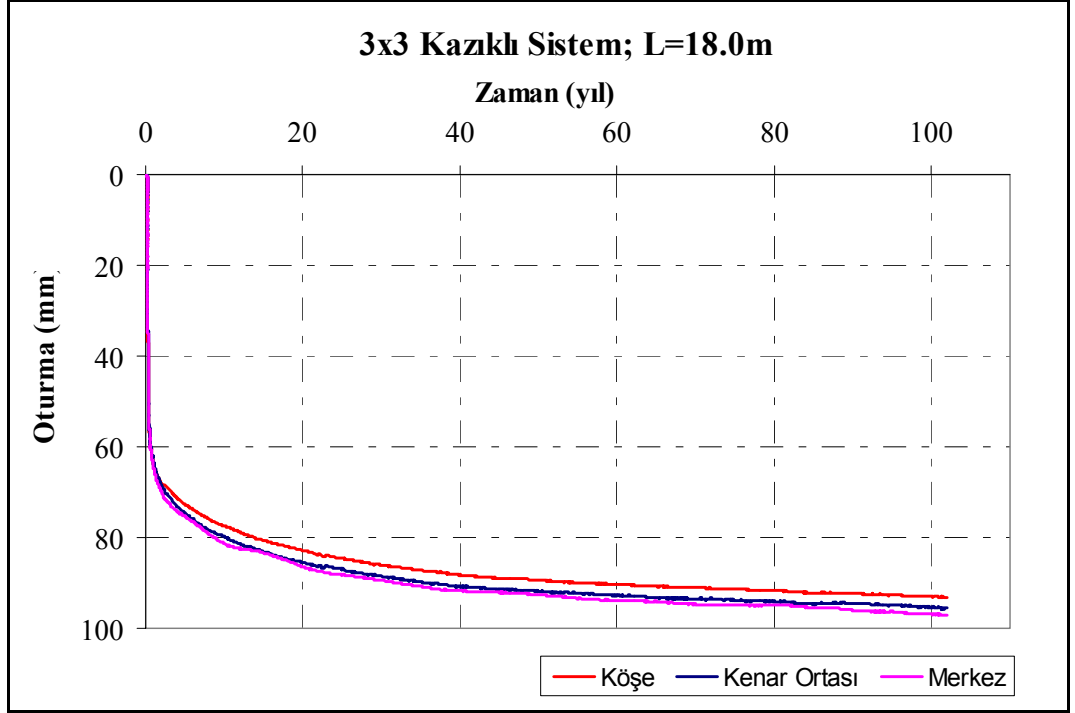
Şekil E.12: Santrifüjde 5x5 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=18.0m



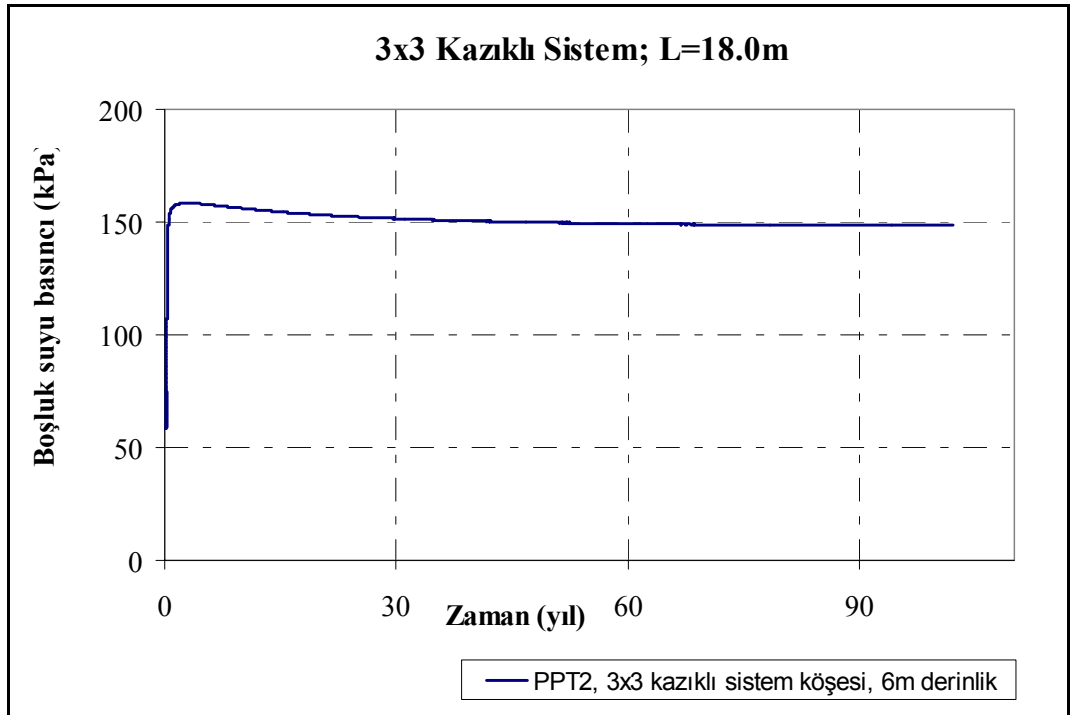
Şekil E.13: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 5x5 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=24.0m



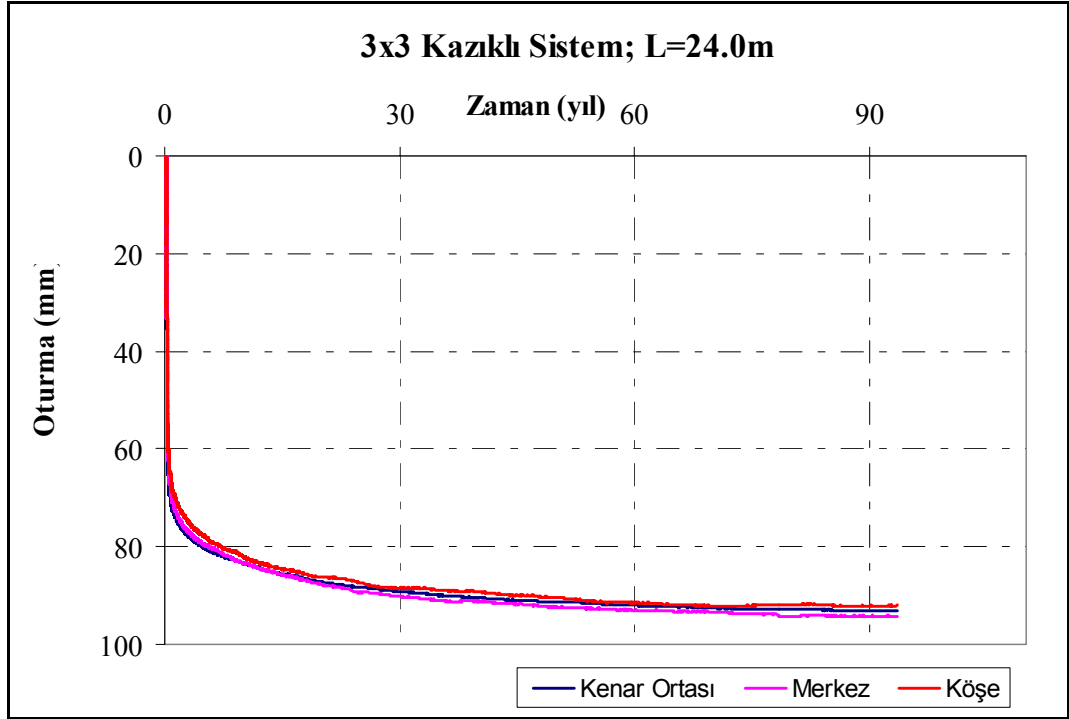
Şekil E.14: Santrifüjde 5x5 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=24.0m



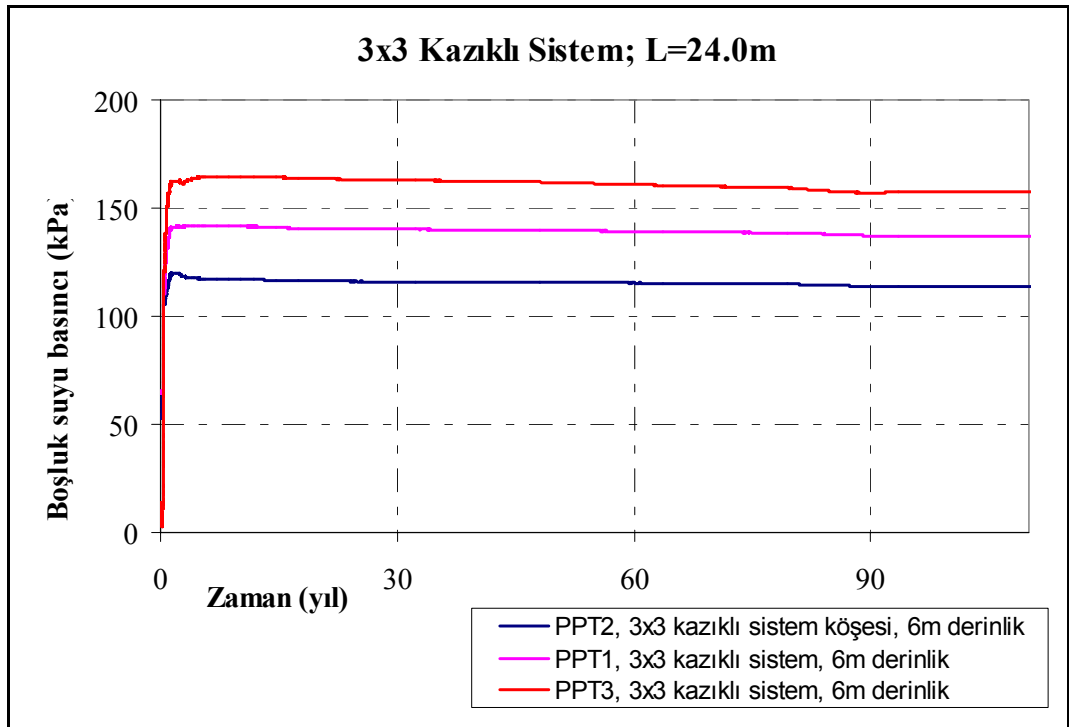
Şekil E.15: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 3x3 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=18.0m



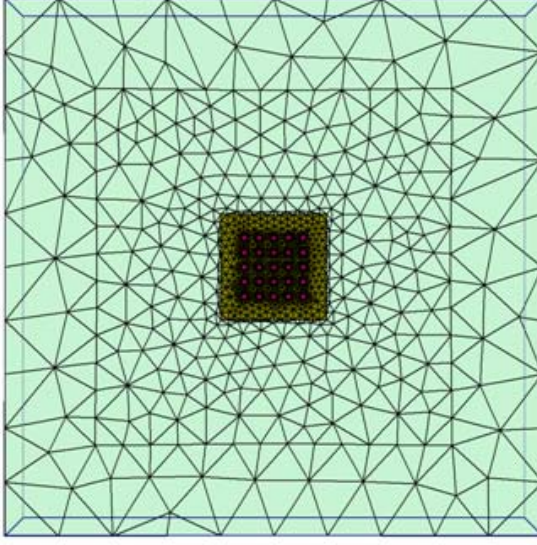
Şekil E.16: Santrifüjde 3x3 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=18.0m



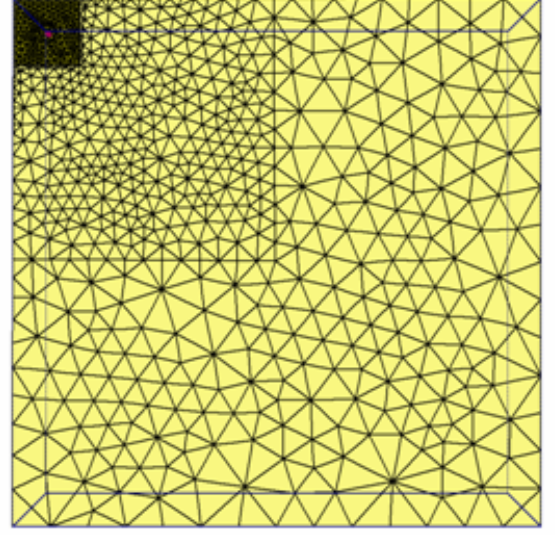
Şekil E.17: Santrifüj deneyleri sonuçlarına göre 3x3 kazıklı sistemin arazi şartlarındaki oturmaları, L=24.0m



Şekil E.18: Santrifüjde 3x3 kazıklı sistemin yüklenmesi sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, L=24.0m

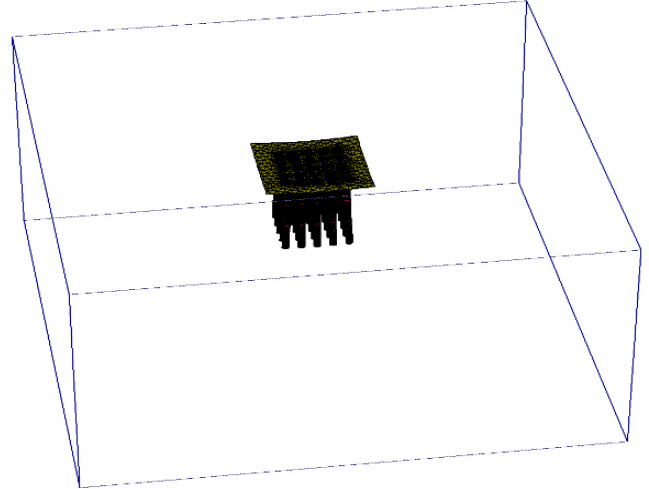
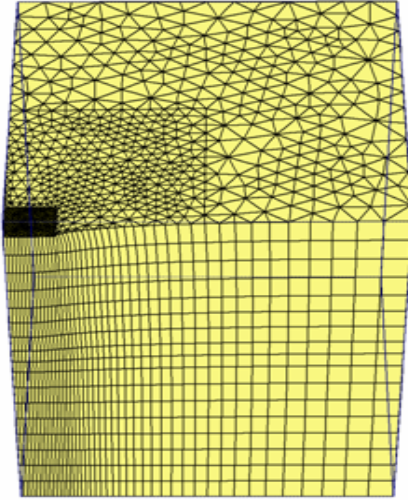


(a)

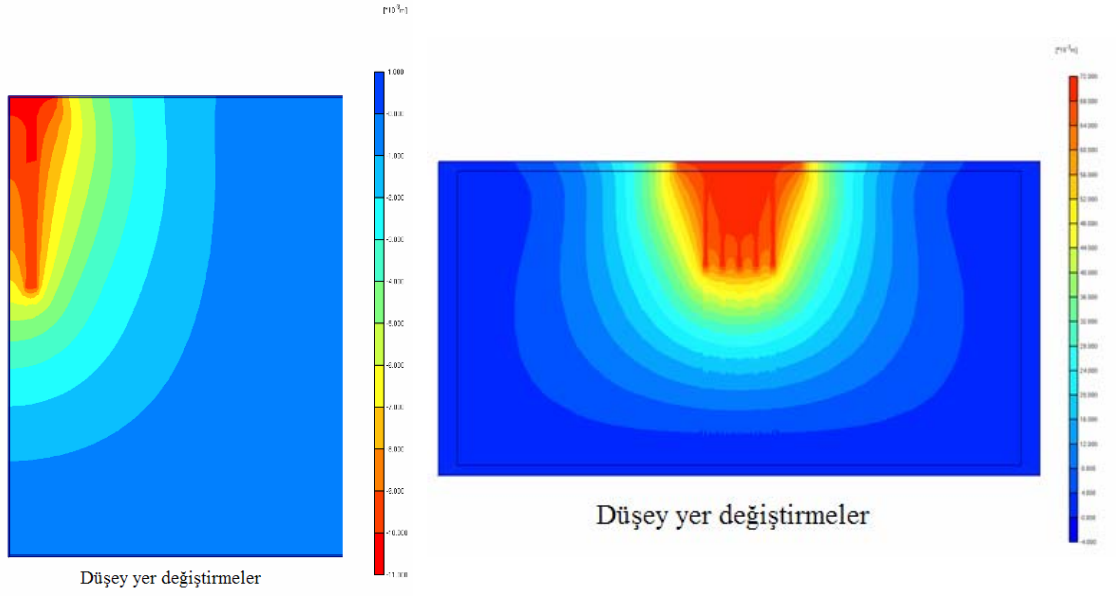


(b)

Şekil E.19: Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde 2 boyutlu sonlu eleman ağı: (a) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup, (b) Örnek1



Şekil E.20: Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde 3 boyutlu sonlu eleman ağı: (a) Örnek1, (b) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup, sadece yapısal elemanların görünümü



Şekil E.21: Plaxis 3D Foundation yazılımı ile çözümlerde düşey yerdeğiştirmelerin grafiksel gösterimi: (a) Örnek1, (b) Santrifüj deneyleri 5x5 kazıktan oluşan grup

ÖZGEÇMİŞ

Sebahat GÖK, 8 Şubat 1971 yılında Bolu’da doğmuştur. Orta öğrenimini Özel Notre Dame De Sion Fransız Kız Lisesi’nde tamamladıktan sonra, 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yüksek öğrenimine başlamıştır. 1994’te 1 yıl süreyle İTÜ Yabancı Diller Bölümü’nde İngilizce hazırlık okuduktan sonra, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı’nda yüksek lisansına, 1998 senesinde ise doktora eğitimine başlamıştır. 1996 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır ve halen bu görevini sürdürmektedir.