

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN DÜŞEY VE YATAY YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Aslı YALÇIN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

**Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik
Mühendisliği**

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN DÜŞEY VE YATAY YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Aşlı YALÇIN
501061316**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)
Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)**

OCAK 2010

Aileme...

ÖNSÖZ

Kazıklı radyejeneral temeller, çoğunlukla radyejeneral temellerin taşıma gücü bakımından yeterli olduğu, ancak oturma kriterlerini sağlayamadığı durumlarda radye plak altına oturma değerlerinin kabul edilebilir mertebelere indirilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yükler altında davranışı PLAXIS 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı yardımıyla incelenmiştir. Bunun için üstyapıdan gelen yükler ve zemin özellikleri sabit tutularak temel sisteminin radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel olarak tasarlanması durumunda sistemin yük oturma davranışı incelenmiş, ayrıca yanıl ötelenmeler, kazıklarda oluşan momentler, radyejeneral plakta oluşan eğilme momentleri araştırılmıştır.

Çalışmam boyunca engin bilgisini ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Mete İNCECİK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, öğrenimim süresince bana verdikleri maddi destek için TÜBİTAK'a, ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.'den Sayın Hocam Prof. Dr. Turan DURGUNOĞLU ve İnş. Y. Müh. Sn. Selim İKİZ'e, manevi destekleri için aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2009

Aslı YALÇIN

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. RADYEJENERAL TEMELLER	3
2.1 Genel Tanım	3
2.2 Radyejeneral Temellerde Taşıma Gücü Hesabı	9
2.3 Radyejeneral Temellerin Boyutlandırılması	13
2.3.1 Basit gerilme dağılımı	13
2.3.2 Yatak katsayısı yöntemi	16
2.3.3 Elastik yarı uzay (rijitlik modülü) yöntemi	21
2.3.4 Diğer yöntemler	23
2.3.4.1 Eşlenik yöntem	23
2.3.4.2 Psödo-eşlenik yöntem	24
2.3.4.3 Çoklu parametre yöntemi	25
2.3.4.4 Sonlu elemanlar yöntemi	26
2.3.5 Radyejeneral temellerde farklı oturmanın tahmini	26
3. KAZIKLI TEMELLER	29
3.1 Kazıklı Temel Sistemlerinin Genel Tanımı	29
3.2 Kazıkların Yük Aktarım Şekline Göre Sınıflandırılması	31
3.2.1 Uç kazıkları	31
3.2.2 Sürtünme kazıkları	31
3.2.3 Kompaksiyon Kazıkları	31
3.3 Tekil Kazıklı Temellerin Taşıma Gücü.....	31
3.3.1 Statik formüller	32
3.3.1.1 Kohezyonsuz zeminler	33
3.3.1.2 Kohezyonlu zeminler	36
3.3.2 Dinamik formüller.....	39
3.3.3 Arazi deneylerinden elde edilen bağıntılar	42
3.3.3.1 Standart penetrasyon deneyi (SPT)	42
3.3.3.2 Koni penetrasyon deneyi (CPT)	43
3.3.3.3 Menard presiyometre deneyi (MPT)	44
3.3.4 Kazık yükleme deneyi ile taşıma gücü tayini	46
3.4 Tekil Kazığın Oturma Analizi	48
3.5 Kazık Gruplarının Tasarımı	52
3.6 Kazık Gruplarının Oturması	56

3.6.1 Eşdeğer radyejeneral temel yöntemi	58
3.6.2 Eşdeğer ayak yöntemi	58
3.6.3 Etkileşim faktörü yöntemi	60
3.7 Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi	62
3.8 Kazıkların Çekme Taşıma Gücü	65
3.8.1 Kohezyonsuz zeminler	66
3.8.2 Kohezyonlu zeminler	67
3.9 Kazıkların Yanal Yükler Altında Davranışları	67
3.9.1 Taşıma gücünün hesaplanmasına dayalı kazık tasarımı	69
3.9.1.1 Brinch-Hansen yöntemi	71
3.9.1.2 Broms yöntemi	73
3.9.2 Limit yer değiştirme değerlerine göre tasarım	75
3.9.2.1 Yatak katsayısı yöntemi	76
3.9.2.2 Elastik Düzlem Yaklaşımı	82
4. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLER ve DÜŞEY YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARI	85
4.1 Kazıklı Radyejeneral Temellerin Genel Tanımı	85
4.2 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Tasarımı	86
4.3 Arazide Yapılan Çalışmalar	92
4.4 Laboratuvar Çalışmaları	94
4.5 Nümerik Analiz ile Hesap Yöntemleri	95
4.5.1 Basitleştirilmiş hesap yöntemleri	95
4.5.1.1 Poulos ve Davis yöntemi(1980)	96
4.5.1.2 Randolph yöntemi(1983, 1994)	96
4.5.1.3 Poulos-Davis-Randolph (PDR) yöntemi	97
4.5.1.4 Burland yöntemi (1995)	100
4.5.2 Yaklaşık bilgisayar çözümüne dayalı yöntemler	101
4.5.2.1 Yaylar üzerinde şerit yaklaşımı	102
4.5.2.2 Yaylar üzerinde plak yaklaşımı	103
4.5.3 Sonlu ve sınır eleman yöntemleri	104
4.5.3.1 Sınır eleman yöntemi	105
4.5.3.2 Sınır eleman ve sonlu eleman yöntemlerinin birlikte kullanıldığı yöntemler	105
4.5.3.3 Basitleştirilmiş iki boyutlu sonlu eleman yöntemleri	106
4.5.3.4 Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi	107
4.5.4 Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması	108
4.6 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminde Kazıkların Boyutlandırılması	111
4.6.1 Plağa gelen maksimum momenti hesaplama yöntemi	113
4.6.2 Plağa gelen maksimum kesme kuvvetinin hesaplanması yöntemi	115
4.6.3 Plağa gelen maksimum taban basıncının hesaplanması yöntemi	115
4.6.4 Plaktaki oturmaları hesaplama yöntemi	117
4.6.5 Kolon altına yerleştirilecek kazık adedinin hesaplanması	118
4.7 Kazıklı Radyejeneral Temel Sistemine Etkiyen Değişik Faktörler	119
4.7.1 Kazık adedi ve yükleme şekli	120
4.7.2 Kazık uzunluğu	122
4.7.3 Radyejeneral temelin kalınlığı	124
4.7.4 Radyejeneral temelin çapı	126
5. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN YATAY YÜK ALTINDA DAVRANIŞI	129
5.1 Genel Tanım	129

5.2 Arazide Yapılan Çalışmalar	132
5.3 Laboratuvarda Yapılan Çalışmalar	135
5.4 Nümerik Analiz ile Hesap Yöntemleri	139
5.4.1 Kazıklı radyejeneral temellerin yanal yük altında analizi	140
5.4.1.1 Radyejeneral temel elemanının çözümü	142
5.4.1.2 Zemin içine gömülü kazık grubunun çözümü	143
5.4.1.3 Kazıklı radyejeneral temel sisteminin çözümü	144
5.4.2 Elde edilen sonuçların arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması	145
5.5 Değişik Faktörlerin Yatay Yük Altındaki Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Davranışı Üzerine Etkisi	148
5.5.1 Kazık-zemin rijitlik oranının etkisi	149
5.5.2 Radyejeneral Temel-Zemin Rijitlik Oranının Etkisi	151
5.5.3 Kazık Yerleşim Oranının Etkisi	153
6. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ YARDIMIYLA İNCELENMESİ	157
6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	157
6.2 Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı	158
6.3 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Plaxis 3D Sonlu Elemanlar Programı ile Modellenmesi	162
6.3.1 Ön çalışmalar	162
6.3.2 Model özellikleri ve sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi	162
6.3.3 Malzeme özellikleri	164
6.3.4 Hesap aşaması	166
6.3.4.1 Sistemin radyejeneral temel olarak modellenmesi	167
6.3.4.2 Sistemin kazıklı radyejeneral temel olarak modellenmesi	171
6.3.4.3 Sistemin kazıklı temel olarak modellenmesi	177
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	183
7.1 Sonuçlar	183
7.2 Öneriler	185
KAYNAKLAR	187
EKLER	199

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASCE	: American Society of Civil Engineers
BDM	: Sınır Farklar Yöntemi
BEM	: Sınır Elemanlar Yöntemi
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FLAC	: Fast Lagrangian Analysis of Continua
GARP	: General Analysis of Raft with Piles
GASP	: General Analysis of Strip with Piles
MPT	: Presiyometre Deneyi
NAVFAC	: Naval Facilities Engineering Command
PDR	: Poulos Davis Randolph
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi

SEMBOL LİSTESİ

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	: 1. sabitlenmiş nokta etrafında sırasıyla M_x, M_y momentleri ve z ekseninin yönünde radyejeneral temelin dönme miktarı
$[I_r]$	: sabitlenmiş radyejeneral temelin etki matrisi
$[I_{sp}]$	: kazık+zemin bloğunun etki matrisi
$\{a\}, \{f\}$	: radyejeneral temel geometrisine bağlı olarak değişen tamamlayıcı vektörler
$\{P_r\}$	: radye ve kazık+zemin bloğu arasında oluşan arayüz kuvvetlerinin vektörü
$\{P_r\}$	: radyejeneral temeli oluşturan elemanlara etkiyen arayüz kuvvetlerinin ve momentin vektörü
$\{\delta_{r0}\}$	: radyejeneral temeli oluşturan elemanların herbirinin orta noktasında sabitlenmiş radyeye uygulanan dış yükler sonucu oluşan oturma değeri
$\{\delta_{sp}\}$	: kazık elemanlarının en üst noktasındaki oturma değeri
A	: Radyejeneral temelin alanı
a	: radyenin karakteristik uzunluğu
A_p	: kazığın uç alanı
A_s	: kazığın gövde alanı
B	: Temelin genişliği
c	: Kohezyon
c_a	: adhezyon
D_f	: Temel kazı derinliği
D_x, D_y, D_z	: 1. sabitlenmiş nokta etrafında sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultusunda radyejeneral temelin yatay ötelenmesi
E_m	: zeminin sıkışabilirlik modülü
E_p	: kazığın elastisite modülü
E_r	: radyejeneral temelin elastisite modülü
E_s	: zeminin rijitlik modülü
$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$	: Derinlik katsayıları
$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$	: Yük eğim katsayıları
$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$	: Şekil katsayıları
f_n	: negatif çevre sürtünmesi
I_r	: radyejeneral temelin atalet momenti
I_x	: x eksen etrafındaki atalet momenti
I_y	: y eksen etrafındaki atalet momenti
K	: toprak basıncı katsayısı
k	: yatak katsayısı
$k_{0.3}$	: arazideki plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayısı
k_p	: kazık grubunun rijitliği
k_{pr}	: kazıklı radyejeneral temelin rijitliği
k_r	: radyejeneral temelin rijitliği
K_r	: radyejeneral temel-zemin rijitlik oranı
k_x	: yatay yatak katsayısı

L'	: radyejeneral temelin efektif rijitlik çapı
M_x	: x eksenine etrafındaki kolon yüklerinden oluşan moment
N_c, N_q, N_γ	: Terzaghi taşıma gücü katsayıları
$P_{h,front}$	: yükleme doğrultusunda radyejeneral temelin zeminle temasta olan ön yüzeyinde kalan alan tarafından taşınan yük
$P_{h,r}$	: radyejeneral temelin taşıdığı yatay yük
$P_{h,side}$	: yükleme doğrultusunda yanlarda kalan alanlar tarafından taşınan yük
$P_{h,top}$	: kazıklı radyejeneral temelin toplam yatay taşıma gücü
P_r	: radyejeneral temelin taşıdığı yük
P_{top}	: kazıklı radyejeneral temelin toplam taşıma gücü
Q_{din}	: zeminin dinamik direnci
$Q_{g(u)}$	: kazık grubunun nihai taşıma gücü
Q_p	: uç direnci
Q_s	: sürtünme direnci
q_u	: Nihai taşıma gücü
R	: yatak katsayısı derinlik boyunca sabit zeminler için rijitlik faktörü
R_s	: cephe oranı
s_e	: kazığın elastik oturması
s_p	: kazığın ucunun oturması
s_{pr}	: kazıklı radyejeneral temelin oturması
s_{ps}	: kazığın gövdesi boyunca meydana gelen oturma
s_r	: radyejeneral temelin oturması
s_t	: kazığın toplam oturması
t	: radyejeneral temelin kalınlığı
T	: yatak katsayısı derinlik boyunca değişken zeminler için rijitlik faktörü
U	: normalize kolon yükü
W	: kazığın ağırlığı
α	: kazıklı radyejeneral temel katsayısı
α_{cp}	: kazık-radye etkileşim faktörü
α_h	: kazıklı radyejeneral temel yatay yük katsayısı
α_{ij}	: etkileşim faktörü
β	: radyejeneral temellerin esnekliğini belirleyen katsayı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
δ	: kolonun orta noktasının radyejeneral temelin kenarına olan uzaklığı
δ	: zemin kazık arasındaki sürtünme açısı
ΔE	: zemine kazık çakılması sırasında oluşan enerji kayıpları
η	: kazık grubunun verimliliği
$\Sigma P_{h,p}$	: kazıkların taşıdığı yatay yük
ΣP_p	: kazıkların taşıdığı yük
σ_v'	: efektif gerilme
ν_p	: kazığın poisson oranı
ν_r	: radyejeneral temelin poisson oranı
ω	: oturma faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Taşıma gücü katsayıları.....	10
Çizelge 2.2 : Şekil, derinlik ve eğim katsayılarının ampirik değerleri	12
Çizelge 3.1 : Kohezyonsuz Zeminlerde Değişik K değerleri (Meyerhof, 1976).....	35
Çizelge 3.2 : E değerleri (Bowles, 1997).....	41
Çizelge 3.3 : n değerleri (ASCE, 1941).....	41
Çizelge 3.4 : R_1 değerinin değişimi (Gunaratne, 2007)	43
Çizelge 3.5 : C_p değerlerinin değişimi (Prakash ve Sharma, 1990).....	52
Çizelge 3.6 : Kazık davranışını belirlemede kullanılan rijitlik faktörü değerleri.....	71
Çizelge 3.7 : Çeşitli Zemin Tipleri İçin Yatay Yatak Katsayısı k_x değerleri (Bowles, 1989)	78
Çizelge 4.1 : Değişik yöntemler ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Poulos, 2001)	111
Çizelge 6.1 : Plaxis 3D Foundation programında kullanılan zeminin malzeme parametreleri.	165
Çizelge 6.2 : Plaxis 3D Foundation Programında Kullanılan Yapısal Elemanların Malzeme Parametreleri	166
Çizelge 6.3 : Radyejeneral Temelde Meydana Gelen Maksimum ve Minimum Yer Değiştirme ve Eğilme Momenti Değerleri.....	171
Çizelge 6.4 : Yapılar için müsaade edilebilir oturma değerleri (Bowles, 1997)	173
Çizelge 6.5 : Kazıklı radyejeneral ve radyejeneral temelde meydana gelen oturma, yanal ötelenme ve eğilme momenti değerleri	176

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Düz plak radyejeneral temel.....	5
Şekil 2.2 : Kolonlar altında kalınlaştırılmış radyejeneral temel	6
Şekil 2.3 : Kirişler ve Döşemeden Oluşan Radyejeneral Temel	7
Şekil 2.4 : Kaset Temel.....	8
Şekil 2.5 : Yüzeysel temel altındaki göçme mekanizması(Terzaghi ve Peck, 1968)..	9
Şekil 2.6 : Basitleştirilmiş kabule göre radyejeneral temel altında taban basıncı dağılımı	14
Şekil 2.7 : Radyejeneral temellerin basitleştirilmiş gerilme dağılımı kabulüne göre çözümü (Bowles, 1997)	15
Şekil 2.8 : Radyejeneral temellerin yatak katsayısı yöntemi ile boyutlandırılmasında kullanılan Z_1 , Z_2 , Z_3 ve Z_4 katsayıları (Bowles, 2001).....	21
Şekil 2.9 : Winkler Yöntemi ve Elastik Yarı Uzay Yönteminde a)Rijit, b) Elastik Temelin Altında Oluşan Gerilme Dağılımı ve Oturma Değerleri (Lopes, 2000)	23
Şekil 2.10 : Eşlenik Yöntemin Şematik Gösterimi.....	24
Şekil 3.1 : Kazıklı Temellerin Kullanım Alanları (Das, 1999).....	30
Şekil 3.2 : Uç direncinin homojen kumlu bir zeminde derinlikle değişimi.....	34
Şekil 3.3 : N_q 'nın D/B , içsel sürtünme açısı ve derinlikle değişimi (Tomlinson,2004)	34
Şekil 3.4 : λ katsayısının derinliğe bağlı olarak değişimi (Mandal, 2006).....	37
Şekil 3.5 : α Adhezyon Katsayısının Kilin drenajsız kayma mukavemeti ile değişimi (Chen, 2007).....	38
Şekil 3.6 : Dinamik Kazık Formülleri için kullanılan yaklaşım (Prakash ve Sharma,1990)	40
Şekil 3.7 : Kazık üst ve alt etki bölgeleri (Gunaratne, 2007)	44
Şekil 3.8 : K_q değerinin değişimi (Canadian Foundation Engineering Manual, 1978)	45
Şekil 3.9 : f_s değerinin değişimi (Canadian Foundation Engineering Manual, 1978)	46
Şekil 3.10 : Kazık Yükleme Testi Yük-Oturma Grafiği (Tomlinson, 1994).....	48
Şekil 3.11 : Kazık Yükleme Deneyi'nden Taşıma Gücünün Bulunması (Das,1999)	49
Şekil 3.12 : Kazıkların yük transfer mekanizması.....	50
Şekil 3.13 : α_s faktörünün değişimi (Vesic, 1977).....	51
Şekil 3.14 : Tipik bir kazık grubunun plan ve kesitleri (Rajapakse, 2008)	53
Şekil 3.15 : Kazık Gruplarında Blok Hareketi (Fleming ve diğ., 2009).....	55
Şekil 3.16 : (a) Şekil Faktörü s ve (b) Taşıma Gücü Katsayısı N_c değerlerinin değişimi (Tomlinson, 2004).....	56
Şekil 3.17 : Kazık Gruplarında Oluşan Gerilmelerin Süperpozisyonu (Tomlinson,2004).....	57
Şekil 3.18 : Kazıklarda Gerilme Aktarımları a) Sürtünme Kazıkları, b) Uç ve Sürtünme Kazıkları, c) Uç Kazıkları (Tomlinson, 2004).....	59

Şekil 3.19 : Eşdeğer Kazık Yöntemi (Castelli ve Maugeri, 2002)	60
Şekil 3.20 : Etkileşim Faktörü Yöntemi (Poulos, 2006).....	61
Şekil 3.21 : Killi Zeminlerde Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı (Tomlinson,2004)	63
Şekil 3.22 : Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesinin Nötr Nokta Yöntemi ile Hesaplanması (Şenol ve Sağlamer, 1993).....	64
Şekil 3.23 Kazıklarda Çekme Kapasitesi (Prakash, 1990).....	65
Şekil 3.24 : Çekme kazıklarında mobilize olan zemin kütlesinin geometrik büyüklüğü.....	66
Şekil 3.25 : Yatay yük altında kısa düşey kazıkların davranışı (Tomlinson, 2004) ..	69
Şekil 3.26 : Yatay yük altında sonsuz uzunluktaki düşey kazıkların davranışı, a) Serbest başlıklı b) Bağlı (Tomlinson, 2004)	69
Şekil 3.27 : Kazık rijitliği hesabında kullanılan nh değerlerinin zeminin sıklığına göre değişimi (Zhang, 2009)	72
Şekil 3.28 : Brinch Hansen yönteminde kullanılan K_c ve K_q katsayılarının ϕ ve x/B değerlerine bağlı değişimleri	72
Şekil 3.29 : Kısa (rijit) kazıklarda yanal yer değiştirme (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.....	73
Şekil 3.30 : Kısa (rijit) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.	74
Şekil 3.31 : Kısa (rijit) kazıklarda kohezyonsuz zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.	74
Şekil 3.32 : Uzun (esnek) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için	75
Şekil 3.33 : Uzun (esnek) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için	76
Şekil 3.34 : p-y eğrileri (Tomlinson, 2004)	80
Şekil 3.35 : Elastik Düzlem Yaklaşımı. (a) Kazığa, (b) Kazıkla temas halindeki zemine etkiyen gerilmeler (Poulos and Davis, 1980)	83
Şekil 4.1 : Çeşitli tasarım kabullerine göre yük-oturma eğrileri (Poulos, 2001)	89
Şekil 4.2 : Kazıklı radyejeneral temellerin yük aktarım mekanizması (Hanisch ve diğ., 2002)	91
Şekil 4.3 : Kazıklı radyejeneral temel katsayısının değişiminin oturmaya etkisi (Hanisch ve diğ., 2002)	92
Şekil 4.4 : Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Basitleştirilmiş Hali (Randolph, 1994).....	97
Şekil 4.5 : Poulos-Davis-Randolph PDR Yöntemi ile elde edilen kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma eğrisi (Poulos, 2001)	100
Şekil 4.6 : Burland Yöntemi ile Kazıklı Radyejeneral Temelin Basitleştirilmiş Çözümü	102
Şekil 4.7 : Yaylar Üzerinde Şerit Yaklaşımının GASP (Geotechnical Analysis with Strip on Piles) Programı Yardımıyla Modellenmesi (Poulos, 1994)	103
Şekil 4.8 : Analiz yöntemlerinin karşılaştırılmasında kullanılan örnek problem (Poulos, 2000)	109
Şekil 4.9 : Çeşitli analiz yöntemleri sonucunda elde edilen yük-davranış grafikleri (Poulos, 2001)	109
Şekil 4.10 : Tekil kolon yükü altında yer alan radyejeneral temel kesiti (Poulos, 2001).....	112
Şekil 4.11 : Dairesel kesitli kolon için moment faktörleri A ve B'nin değişimi (Poulos, 2001)	114

Şekil 4.12 : Dairesel kesitli kolon için kesme kuvveti faktörü c_q 'nın değişimi (Poulos, 2001)	115
Şekil 4.13 : Taban basıncı faktörü $\bar{q}$ 'nın değişimi (Poulos, 2001).....	116
Şekil 4.14 : Oturma Faktörü ω (Poulos, 2001).....	117
Şekil 4.15 : Çeşitli yük ve rijitlik değerleri için kritik yüklerin değişimi (yalnızca iç kolonlar için, Beton: $f_c=32$ Mpa, $E_r=25,000$ MPa. Çelik: $f_y=400$ MPa. Donatı Oranı=%1) (Poulos, 2001)	120
Şekil 4.16 : Kazık adedinin yük oturma davranışı üzerindeki etkisi (Poulos, 2001)	122
Şekil 4.17 : Kazık adedinin a) maksimum oturma, b) farklı oturma, c) maksimum moment M_x ve d) kazıklara aktarılan yük oranı üzerindeki etkisi (Poulos, 2000)	123
Şekil 4.18 : Kazık uzunluğunun kazıklı radyejeneral temel sisteminin davranışına etkisi (Poulos, 2001)	124
Şekil 4.19 : Kazık uzunluğunun bir kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma davranışına etkisi (radye plağı 10 m çapında bir alana sahiptir) (Maharaj ve Anshuman, 2004)	125
Şekil 4.20 : L/d oranları değişken bir sistemde kazık uzunluğunun kazıklı radyejeneral temel sistemindeki yük-oturma davranışına etkisi (Maharaj ve Anshuman, 2004).....	125
Şekil 4.21 : Radyejeneral temel kalınlığının temel sisteminin davranışı üzerine etkisi (Poulos ve diğ., 2001)	126
Şekil 4.22 : Radyejeneral plak çapının kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma davranışı üzerine etkisi (Maharaj ve Anshuman, 2004)	127
Şekil 5.1 : Kazıklı radyejeneral temellerin yatay yük altında yük aktarım mekanizması.....	130
Şekil 5.2 : Yatay yük altında kazıkların etrafında oluşan gerilme dağılımı (Reese ve Van Impe, 2001).....	131
Şekil 5.3 : Kazık başlığının zemin ile temasının oluşan deformasyonlar üzerinde etkisi (Beatty, 1970)	133
Şekil 5.4 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde iç ve dış yükleri gösteren şematik diyagram (Zhang ve Small, 2000).....	141
Şekil 5.5 : Kazıklı Radyejeneral Temelin Parçalara Ayırılarak Çözümü (Zhang ve Small, 2000).....	142
Şekil 5.6 : Kazık ve zemin profilinin şematik gösterimi (Small ve Zhang, 2000) ..	145
Şekil 5.7 : Kazık grubunun yerleşim planı (Poulos, 2001).....	147
Şekil 5.8 : İlk ve onu takip eden sıra kazıklarda ölçülen ve teorik olarak hesaplanan moment değerlerinin karşılaştırılması (Poulos, 2001)	147
Şekil 5.9 : Orta sıra kazıklarda ölçülen ve teorik olarak hesaplanan moment değerlerinin karşılaştırılması (Poulos, 2001)	148
Şekil 5.10 : A-A kesidi boyunca arayüzde oluşan kayma gerilmesinin değişimi (Poulos,2001)	150
Şekil 5.11 : Yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin kazık-zemin rijitlik oranına bağlı değişimi (Poulos, 2001)	151
Şekil 5.12 : Kazık-Zemin Rijitlik Oranına bağlı olarak kazıkların taşıdığı yük miktarının değişimi (Poulos, 2001).....	151
Şekil 5.13 : Normalize edilmiş yerdeğiştirmelerin radyejeneral temel-zemin rijitlik oranına göre değişimi (Poulos, 2001)	152
Şekil 5.14 : Kazıklar tarafından taşınan yük miktarının radyejeneral temel-zemin rijitlik oranına göre değişimi (Poulos, 2001)	153

Şekil 5.15 : Kazık yerleşim oranının (S/D) kazıklı radyejeneral temel sisteminin yerdeğiştirmesi üzerine etkisi (Poulos, 2001)	154
Şekil 5.16 : Kazık yerleşim oranının (S/D) kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazık grubu tarafından taşınan yük miktarı üzerine etkisi (Poulos, 2001)	155
Şekil 6.1 : Plaxis 3D Foundation Yazılımında Kullanılan Sonlu Elemanlar	160
Şekil 6.2 : Zeminde Mohr-Coulomb gerilme-şekil değiştirme davranışı modeli	160
Şekil 6.3 : Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} 'nin belirlenmesi	161
Şekil 6.4 : Poulos'un (2001) hipotetik probleminin şematik gösterimi	163
Şekil 6.5 : Poulos'un (2001) hipotetik probleminin çeşitli yöntemlerle çözümü sonucu elde edilen değerlerin karşılaştırılması	163
Şekil 6.6 : Radyejeneral Temel Sisteminin Plan ve Kesiti	167
Şekil 6.7 : Radyejeneral temel sisteminin sonlu elemanlar programında görünüşü	168
Şekil 6.8 : Radyejeneral Temel 1-1' Kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri	169
Şekil 6.9 : Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri	170
Şekil 6.10 : Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti yanal ötelenme değerleri	170
Şekil 6.11 : Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Plan ve Kesitleri	172
Şekil 6.12 : Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Sonlu Elemanlar Programında Görünüşü	173
Şekil 6.13 : Kazıklı Radyejeneral Temel 1-1' Kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri	174
Şekil 6.14 : Kazıklı Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri	174
Şekil 6.15 : Yatay yer değiştirmelerin 2-2' kesiti boyunca radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel için değişimi.....	175
Şekil 6.16 : 1-1 kesitinde plakta oluşan eğilme momentlerinin kazıklı radyejeneral sistem ve radyejeneral sistem için değişimi	176
Şekil 6.17 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazıkların toplam yerdeğiştirme $ u $ değerleri	177
Şekil 6.18 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazıklara etkiyen toplam düşey yükün değişimi	178
Şekil 6.19 : Kazıklı temel plan ve kesitleri	179
Şekil 6.20 : Kazıklı temel sisteminin göçme durumunda deforme olmuş hali	180
Şekil 6.21 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde A noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi	180
Şekil 6.22 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde B noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi	181
Şekil 6.23 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde E noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi.....	181
Şekil 6.24 : (a) Kazıklı radyejeneral temel ve (b) kazıklı temelde kazıklarda oluşan eğilme momenti değerleri.....	182
Şekil A.1 : Radyejeneral Temel A ve B noktası yük-düşey deplasman eğrileri.....	201
Şekil A.2 : Radyejeneral Temel A ve B noktası yük-yatay deplasman eğrileri	201
Şekil A.3 : Kazıklı Radyejeneral Temel A, B, C, D ve E noktaları yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri	202
Şekil A.4 : Kazıklı Radyejeneral Temel A, B, C, D ve E noktaları yük-yanal yerdeğiştirme eğrileri	202
Şekil A.5 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen oturmaların karşılaştırılması	205

Şekil A.6 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen ötelenmelerin karşılaştırılması	206
Şekil A.7 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen eğilme momentlerinin karşılaştırılması	207

KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN DÜŞEY VE YATAY YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda artan nüfus ve insanoğlunun sürekli değişen ihtiyaçları, tüm mühendislik dallarında olduğu gibi, inşaat mühendisliği alanında da köklü değişimleri beraberinde getirmiştir. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için, yüksek yapılar, ağır köprüler ve viyadükler, deniz ve kıyı yapıları inşaatlarına hız verilmiştir.

Bu tip yapılarda üstyapıdan zemine önemli mertebelerde yük aktarılmaktadır. Bu yüklerin, özellikle yüzeye yakın bölgelerde yer alan zemin tabakalarının taşıma güçlerinin yetersiz olması durumunda daha derinde yer alan nispeten sağlam tabakalara aktarılması gerekmektedir. Bu durumda kazıklı temellerin kullanımı kaçınılmazdır.

Ancak kazıklı temellerin inşaat maliyeti yüzeysel temeller ile kıyaslandığında oldukça yüksektir. Bu durumda üstyapıdan gelen yükün yalnızca kazıklar vasıtasıyla zemine aktarılacağı kabulü, gerekenden fazla kazık tasarlanmasına, dolayısıyla maliyetin artmasına neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü maliyeti düşürecek optimum tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yukarıda bahsedilen hususlar ışığında “Kazıklı Radyejeneral Temeller” adı altında yeni bir temel sistemi türü geliştirilmiştir. Bu sistemde üstyapıdan gelen yüklerin bir kısmı radyejeneral temel tarafından, diğer kısmı ise kazıklar tarafından zemine aktarılmaktadır. Kazıklı radyejeneral temellerin tasarımında radyejeneral plak tarafından yük aktarımının gerçekleştiğinin göz önüne alınması, plak altına yerleştirilecek kazık sayısında düşüşe neden olmakta, ancak bu temel sistemlerinin hesaplanmasında radye-zemin-kazık etkileşiminin dikkate alınması zorunluluğu karmaşık bir hesap aşamasını beraberinde getirmektedir. Bu karmaşık problemin çözümünde bazı kabuller sonucu geliştirilen basitleştirilmiş yöntemlerin yanında, problemin gerçeğe oldukça yakın bir biçimde tanımlanmasına olanak veren sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik yöntemler de sıklıkla tercih edilmektedir.

Kazıklı radyejeneral temellerin düşey yükler altında davranışı üzerine günümüzde birçok çalışma mevcuttur. Ancak yatay ve düşey yüklerin beraber etkimesi durumu üzerine yapılan çalışma sayısı çok azdır. Bu tez çalışması kapsamında, kazıklı radyejeneral temellerin yatay ve düşey yükler altında davranışı PLAXIS 3D Sonlu Elemanlar Programı yardımıyla incelenmiştir. Bu çerçevede, zemin özellikleri sabit kalmak koşulu ile, üstyapıdan gelen yükler altında radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel olmak üzere üç değişik temel sisteminin davranışı irdelenmiş ve üstyapıdan gelen yüklerin yüksek mertebelerde olduğu durumlarda kazıklı radyejeneral temellerin kazıklı temeller ve radyejeneral temellere kıyasla oldukça ekonomik ve güvenli bir temel sistemi olduğu belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF PILED RAFT FOUNDATIONS UNDER VERTICAL AND LATERAL LOADING WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In recent years, increasing population and changing demands of human being has brought radical changes in civil engineering as in all other branches of engineering with it. To meet the demands of increasing population, construction of high-rise buildings, heavy bridges and viaducts, offshore structures is accelerated.

In these type of structures, serious amount of load is transferred from superstructure to subsoil. In case the superstructure loads are so high that the bearing capacity of soil strata close to the surface is insufficient, they should be transmitted to the lower soil strata with higher bearing capacity. In this case, use of a pile foundation is an obligation.

However, construction cost of pile foundations is quite high when compared to that of shallow foundations. So, the assumption that the superstructural load would be transmitted to the subsoil only by means of piles gives rise to overestimation of pile number, consequently construction costs increase. Hence optimum design methods to decrease the costs are needed.

As a result of the topics mentioned above, a new foundation system called “piled raft system” is developed. In this system, part of the superstructural load is transmitted by means of raft, while the rest is transmitted by means of pile group. Consideration of load transmission by means of raft results in a decrease in pile number to be placed beneath raft foundation, on the other hand the fact that raft-pile-soil interaction has to be considered during design stage brings a complicated calculation process with it. Beside simplified methods developed by some assumptions, also numerical methods such as finite element method enabling the model to be defined quite close to reality is preferred often.

Today, numerous works about the behaviour of piled raft foundations under vertical loading are available whereas studies and publications about the behaviour of piled rafts under horizontal and vertical loading are very rare. In scope of this thesis, behaviour of piled raft foundations under horizontal and vertical loading is investigated by means of PLAXIS 3D Finite Element Program. In this context, behaviour of three different foundation systems as raft foundation, piled raft foundation and pile foundation is studied under constant superstructural load and subsoil conditions and it is concluded that in case high loads are transmitted from superstructure piled raft foundations are economical and safe solutions in comparison with raft foundations and conventional piled foundations.

1. GİRİŞ

Günümüzde, mühendislik çözümlerinde güvenlik kriterinin yanısıra ekonomik tasarımlar yapmak da büyük önem taşımaktadır. Özellikle çok katlı yapılarda, üstyapının maliyetinin çok yüksek olması, temel sisteminin tasarımında güvenliğin yanında optimum çözümü geliştirmenin gereğini beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, geleneksel kazıklı temellerden farklı olarak radyejeneral temel tabanında oluşan basınçların da sistemin toplam taşıma kapasitesine katkıda bulunduğu kabulü yapılan, diğer bir deyişle kazık, radye ve zeminin birbiriyle etkileşiminin göz önüne alındığı kazıklı radyejeneral temel sistemleri, 1970'lerden bu yana özellikle çok katlı yapıların tasarımında önemli rol oynamıştır. Bu sayede, radyejeneral temel altına yerleştirilen kazık sayısı ve boyu azalmakta, dolayısıyla maliyetlerde önemli ölçüde tasarım sağlanmaktadır. Bunun yanında, kazıklı radyejeneral temeller, yapısal yüklemdeki eksantrisiteden dolayı oluşacak farklı oturmaların önlenmesinde de büyük önem taşımaktadır.

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

Kazıklı radyejeneral temellerin düşey yük altında davranışı ile ilgili günümüze dek birçok çalışma yapılmıştır. Ancak kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin düşey yüklerin yanında yatay yüklerin etkisi altında olduğu durumlarda sergilediği davranış üzerine yapılan çalışma sayısı çok azdır. Bu çalışmalara örnek olarak Zhang (2000), Zhang ve Small (2000) ve Turek (2006) gösterilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, konu ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve geçmişte yapılan çalışmalar ile birlikte güncel gelişmeleri kapsayan kaynaklar taranmıştır. Edinilen bilgiler ışığında, kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yükler altında davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemine dayalı bilgisayar programlarından faydalanılmıştır.

Bölüm 2’de, radyejeneral temeller hakkında genel bilgi verilmiş, tasarımı aşamasında kullanılan yöntemler ve yapılan kabuller incelenmiştir.

Bölüm 3’te kazıklı radyejeneral temelleri oluşturan bir diğer öge olan kazıklar ve grup davranışı hakkında bilgi verilmiş, düşey ve yatay yükler altındaki davranışlarına değinilmiştir.

Bölüm 4’te kazıklı radyejeneral temeller hakkında genel bilgi verilmiş, bu temel sistemlerinin tasarımında kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerde yapılan kabuller incelenmiş, ayrıca düşey yük altındaki davranışını etkileyen faktörler incelenmiştir.

Bölüm 5’te, kazıklı radyejeneral temellerin yatay yükler altındaki davranışı ele alınmış, değişik faktörlerin sistemin yatay yük altındaki davranışına olan etkisi hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 6’da, kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin davranışının irdelenmesinde kullanılacak olan sonlu elemanlar yöntemine değinilmiş, analizlerde kullanılan PLAXIS 3D sonlu elemanlar yazılımı tanıtılmış, yapılan analizlerin sonuçları irdelenmiştir.

Bölüm 7 ise kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yükler altında davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi sonucu elde edilen verilerin tartışmasını içermektedir.

2. RADYEJENERAL TEMELLER

2.1 Genel Tanım

Radyejeneral temeller, yumuşak veya gevşek ve taşıma kapasitesi düşük olan zeminlerde üstyapıdan gelen yüklerin geniş bir alana dağıtılması, bunun sonucunda farklı oturmaların azalması amacıyla kullanılan, oturma alanı genellikle yapının oturma alanına eşit olan bir sığ temel çeşididir. Kolonların birbirine yakın olduğu, dolayısıyla kolonlardan aktarılan yükleri taşımaları için boyutlandırılan temellerin üst üste bineceği durumlarda radyejeneral temeller tercih edilir. Burada bina, zemini tamamen örten ve tersine çalışan bir döşeme üzerine oturtulur. Radyejeneral temelin diğer bir görevi de, rijit döşeme ve kirişlerden oluşan üstyapıdan alınan kısmi rijitliğin, üzerine oturduğu değişen sıkışabilirlikteki zeminde taşıma gücü daha düşük veya sıkışabilirliği daha yüksek olan bölgeleri diğer bölgelerle bağlamak için kullanılması suretiyle bina temeline bir ölçü rijitlik kazandırmaktır.

Radyejeneral temellerin kullanıldığı durumlar (Das, 1999):

- 1) İnşa edilecek yapının oturduğu zeminin taşıma kapasitesi düşük ve sıkışabilirliği fazlaysa, ayrıca üstyapıdan gelen yüklerin ağırlığından dolayı zeminde farklı oturma oluşması bekleniyorsa.
- 2) Tekil temellerin ebatları çok büyükse, kapladıkları alanlar birbirlerine çok yaklaşıyor ve hatta üst üste biniyorsa,
- 3) Pratikte, yapının temellerinin kapladığı toplam alanın binanın oturma alanının yarısından fazla olduğu durumlarda radyejeneral temel tercih edilmektedir.
- 4) Zemin profili değişken ise, dolayısıyla farklı oturmaların limit değerlerin çok üzerinde olması bekleniyorsa
- 5) Yanal yüklerin yapı boyunca üniform yayılmadığı durumlarda, yanal yükler tekil temellerde veya kazık başlıklarında farklı yatay yer değiştirmelere sebep olabilir. Bu durumda radye temelin sürekliliği bu tür yer değiştirmelere engel olmaktadır.

6) Kaldırma kuvvetinin tekil temellerin karşılayacağı değerlerden büyük olması durumunda yapının yüzme problemi ortaya çıkmaktadır. Bu tip durumlarda radye temelin ağırlığı, kaldırma kuvvetlerinin karşılanmasını sağlamakta ve sürekliliği de yapının yüzmesine engel olmaktadır.

7) Bina temel alt kotunun yer altı su seviyesinde veya daha aşağıda bulunması durumunda temelin su izolasyonu hayati önem taşımaktadır. Bu durumda radye temelin monolitik özelliği öne çıkmakta ve izolasyon uygulamasında pratiklik açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Radyejeneral temeller biçimsel ve yapısal olarak beş ana kategoride toplanabilirler (artan rijitlikle sıralanmıştır):

- 1)Düz plak radyejeneral temel,
- 2)Kirişli radyejeneral temel,
 - a)Alttan Kirişli Radyejeneral Temel,
 - b)Üstten kirişli Radyejeneral Temel,
- 3)Mantar Şeklinde Radyejeneral Temel,
- 4)Ters Kemer Şeklinde Radyejeneral Temel,
- 5)Kaset Temel.

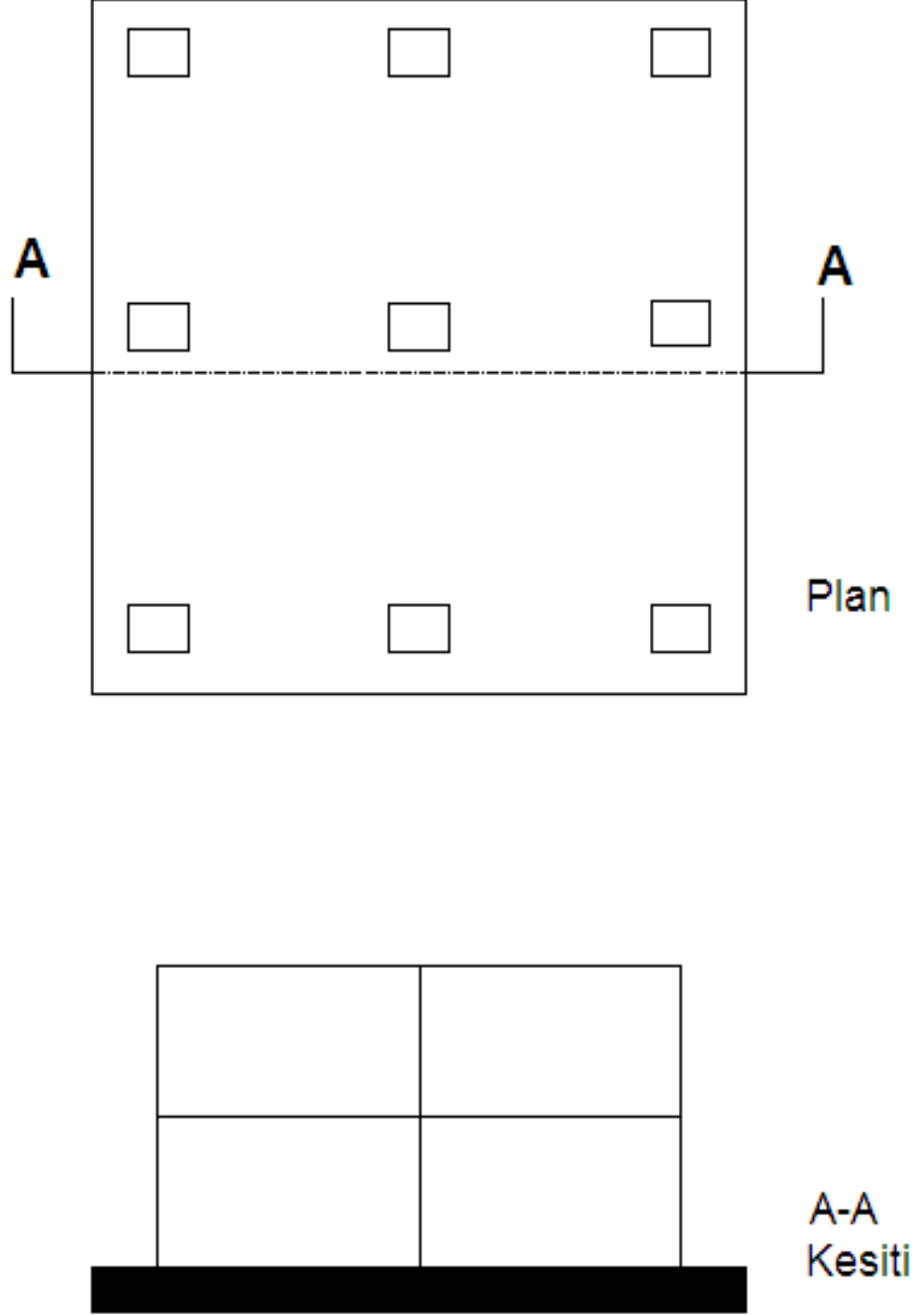
Düz Plak Radyejeneral Temel: Genellikle duvar veya kolonlar birbirlerine yakın ve yükleri de az ise temel, düz radyejeneral temel şeklinde imal edilir (Şekil 2.1 Bu temel tipinde radye üniform bir kalınlığa sahiptir (Das, 1999).

Kolonlar Altında Kalınlaştırılmış Düz Plak Radyejeneral Temel: Duvar ya da kolonların aralıkları fazlaysa temel, kirişli radyejeneral olarak inşa edilir. Bu tip temellere bir örnek Şekil 2.2 ‘de gösterilmiştir.

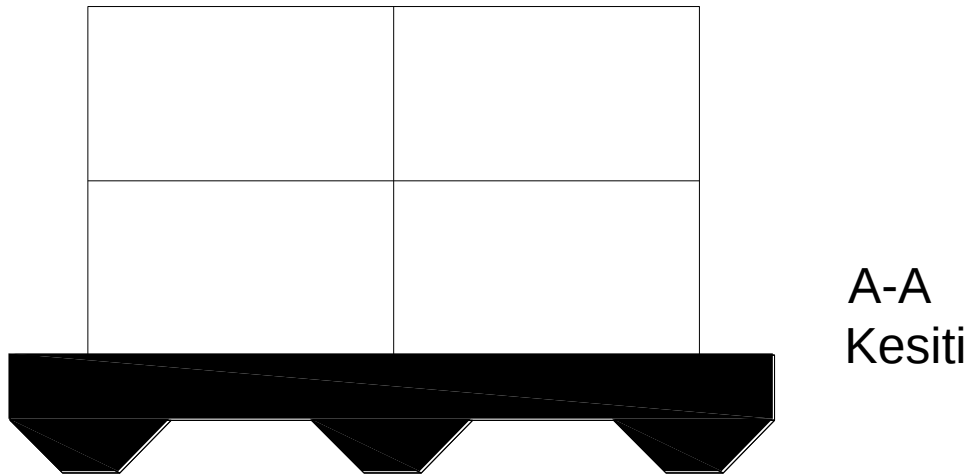
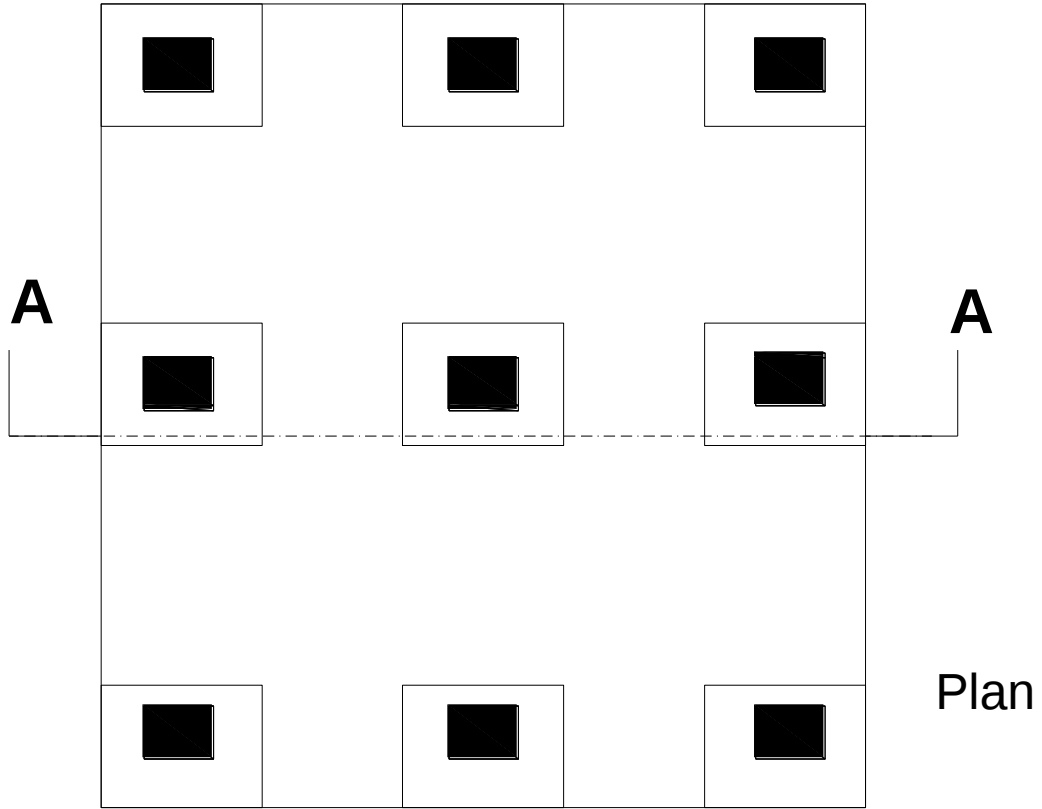
Kiriş ve Plakdan Oluşan Radyejeneral Temel: Kirişler her iki yönde de devam etmekte ve kolonlar genelde kirişlerin kesişim noktalarında yer almaktadırlar (Şekil 2.3).

Kaset Temel: Yüksek taban basıncına haiz olan temellerde, farklı oturmaları ve temel duvarlarına yanlardan gelecek zemin basınçlarını karşılamak için uygulanırlar. Bir bütün olarak yapılan rijit temel döşeme, perde duvarı, kolon ve kirişlerden oluşur

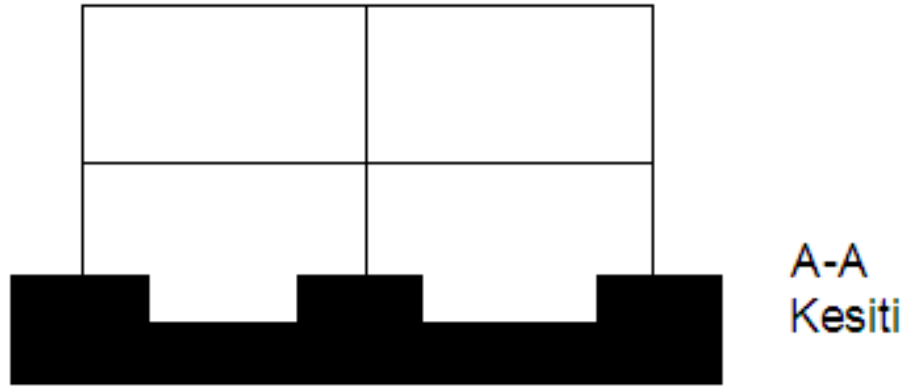
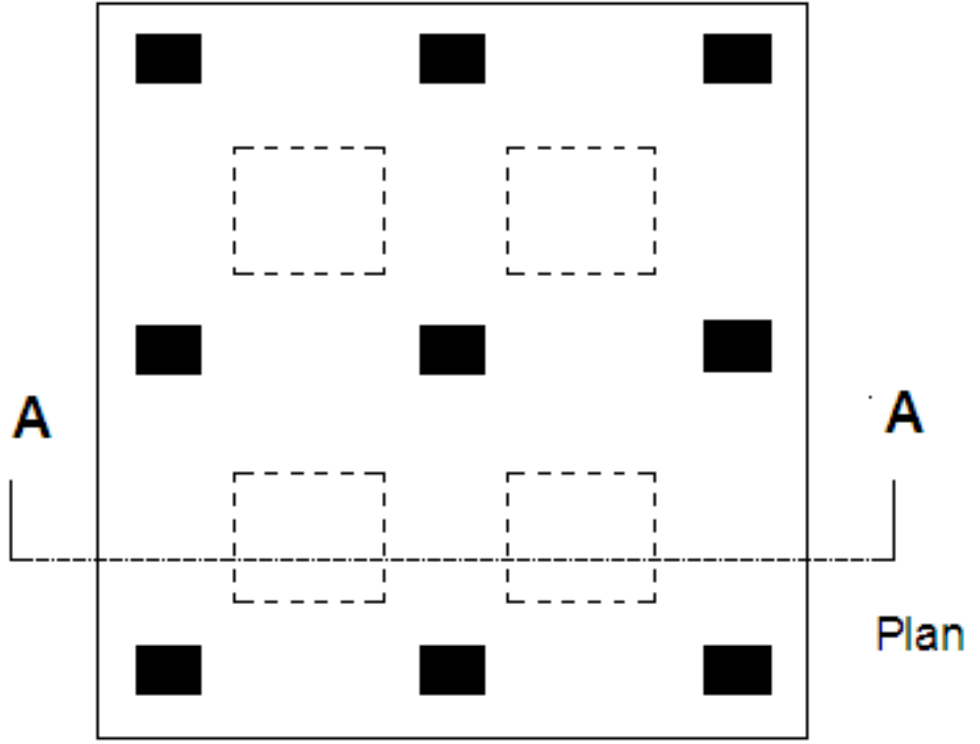
(Şekil 2.4). Bu temel türünde yan duvarlar radyejeneral temelin rijitliğini arttırıcı etki göstermektedir.



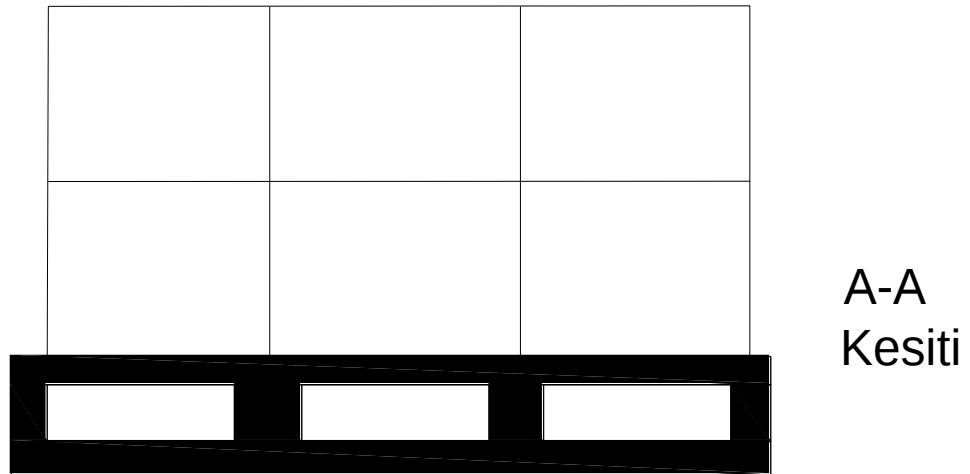
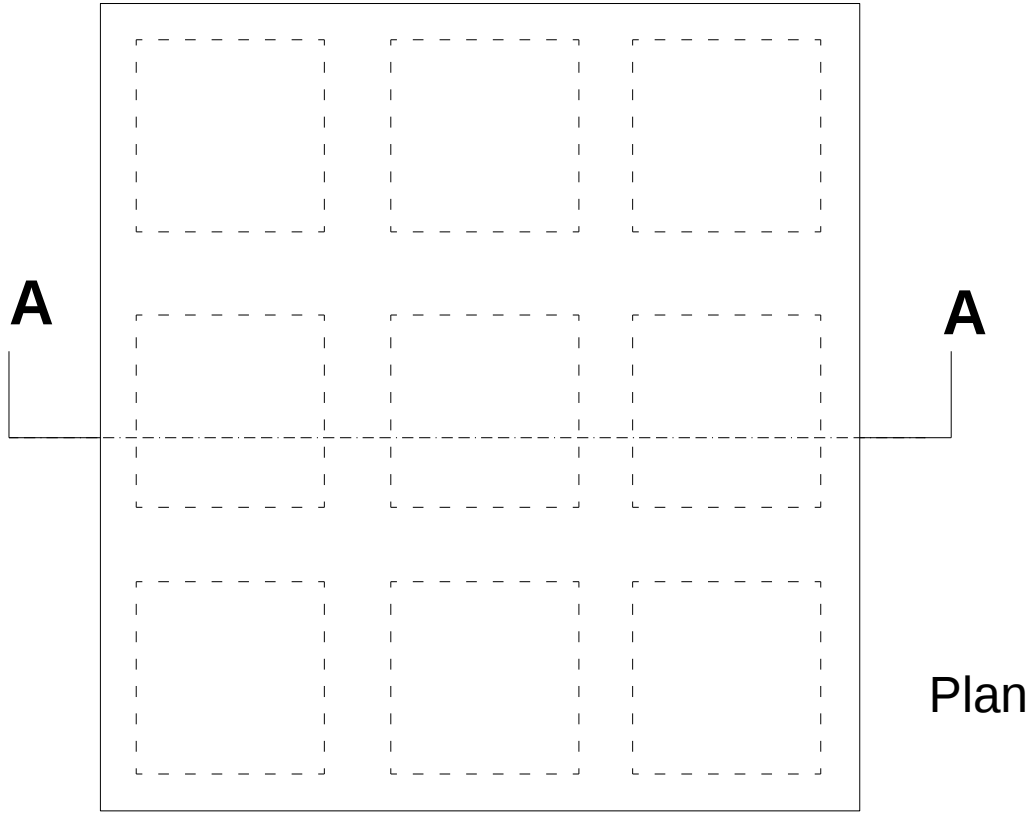
Şekil 2.1 : Düz plak radyejeneral temel



Şekil 2.2 : Kolonlar altında kalınlaştırılmış radyejeneral temel



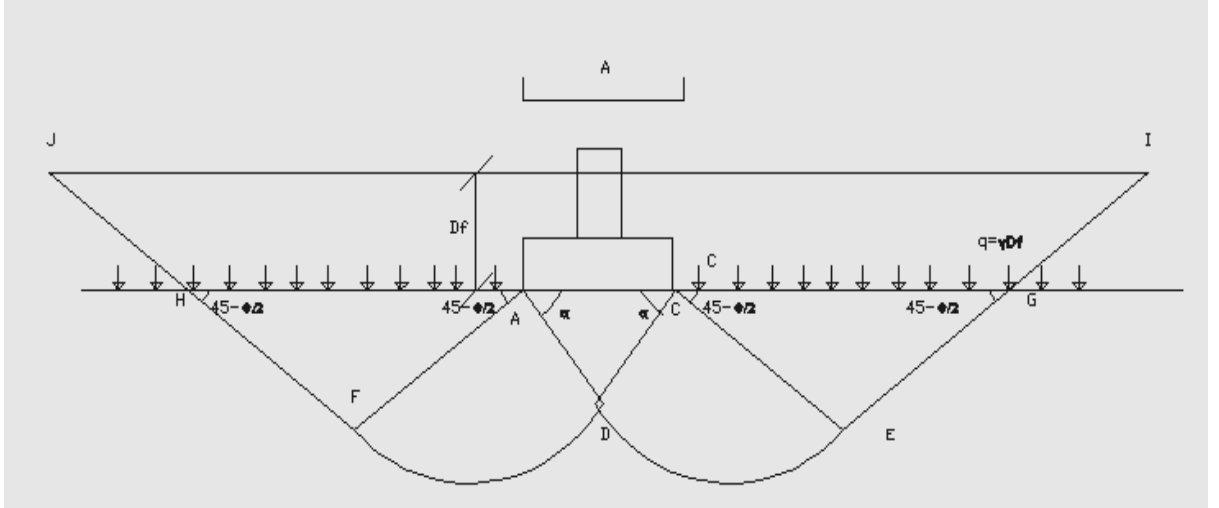
Şekil 2.3 : Kirişler ve Döşmeden Oluşan Radyejeneral Temel



Şekil 2.4 : Kaset Temel

2.2 Radyejeneral Temellerde Taşıma Gücü Hesabı

Sürekli temeller altında göçme mekanizmasının Şekil 2.5 'te görüldüğü gibi gelişeceği düşünülür ve kaydıran kuvvetlerle karşı koyan kuvvetler dengelenerek limit durum için çözüm yapılır (Terzaghi ve Peck, 1968).



Şekil 2.5 : Yüzeysel temel altındaki göçme mekanizması(Terzaghi ve Peck, 1968)

Terzaghi'n nihai taşıma gücü formülü radye temeller için aşağıdaki gibidir.

$$q_u = c \cdot N_c \cdot F_{cs} \cdot F_{cd} \cdot F_{ci} + \gamma \cdot D_f \cdot N_q \cdot F_{qs} \cdot F_{qd} \cdot F_{qi} + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot F_{\gamma s}. \quad (2.1)$$

c: Temel altındaki zeminin kohezyonu (kN/m² , t/m²)

γ . Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m³, t/m³)

D_f : Temel çevresindeki zemin yüzeyinden temelin alt taban kotuna düşey uzaklık
(m)

B: Radyejeneral temelin genişliği (dairesel temellerde çap kullanılır) (m)

N_c, N_q, N_γ : Taşıma gücü katsayıları (Çizelge 2.1 'de tanımlanmaktadır) (boyutsuz)

 F_{cs}, F_{qs}, F_{ys} : Şekil katsayıları (boyutsuz) F_{cd}, F_{qd}, F_{yd} : Derinlik katsayıları (boyutsuz)

F_{ci}, F_{qi}, F_{yi} : Yük eğim katsayıları (boyutsuz)

Çizelge 2.1 : Taşıma gücü katsayıları

ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.0	0.0
5	6.50	1.6	0.5
10	8.30	2.5	1.2
15	11.0	3.9	2.6
20	14.8	6.4	5.4
25	20.7	10.7	10.8
30	30.1	18.4	22.4
32	35.5	23.2	30.2
34	42.2	29.4	41.1
36	50.6	37.7	56.3
38	61.4	48.9	78.0
40	75.3	64.2	109.4
42	93.7	85.4	155.6
44	118.4	115.3	224.6
46	152.1	158.5	330.4
48	199.3	222.3	496.0
50	266.9	319.1	762.9

Taşıma gücü formülünde yer alan üç terimin anlamı şu şekildedir:

$c.N_c$: Temel zeminindeki kohezyonun taşıma gücüne katkısı. Eğer $c = 0$ olursa, bu terim yok olur

$\gamma.B.N_\gamma$: Temel zemininin kayma mukavemeti açısının taşıma gücüne katkısı. Bu terimde yer alan N_γ içsel sürtünme açısı ϕ 'nin fonksiyonudur. γ değeri temel tabanı altındaki zeminin birim hacim ağırlığıdır.

$\gamma.D_f.N_q$: Temel tabanı üzerinde yer alan ve temeli çevreleyen sürşarj yükünün taşıma gücüne katkısı. Bu terimde yer alan γ değeri zemin taban seviyesi üzerinde yer alan zeminin birim hacim ağırlığıdır.

Şekil, derinlik ve eğim katsayıları için De Beer ve Hansen (1970) tarafından geliştirilen ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanan ampirik formüller aşağıda verilmiştir.

Terzaghi taşıma gücü denklemi kare ve daire şeklindeki temeller için aşağıdaki gibidir:

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \text{ (Kare Temel)} \quad (2.2)$$

$$q_u = 1.3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \text{ (Daire Temel)} \quad (2.3)$$

Net nihai taşıma gücü;

$$q_{net(u)} = q_u - q \quad (2.4)$$

bağıntısından hesaplanmakta olup

$$q = \gamma \cdot D_f \quad (2.5)$$

olarak tanımlanmaktadır.(2.5) no'lu denklemde D_f temel derinliğini simgelemektedir.

Her mühendislik probleminde olduğu gibi, taşıma gücü problemleri de belli güvenlik katsayıları kullanılarak çözülmektedir. Güvenli net taşıma gücü, net taşıma gücünün belli bir güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Kil zeminlerdeki radye temellerde sabit yük ve maksimum hareketli yük altında güvenlik katsayısı 3'ten az seçilmemelidir. İri daneli zeminlerde de güvenlik katsayısı başka bir değer belirtilmediği sürece 3 alınabilir.

$$q_{all(net)} = \frac{q_{u(net)}}{FS} \quad (2.6)$$

Suya doymun killerde, $\phi=0$ olması durumunda, düşey yük durumu için (2.1) no'lu denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir. Bu denklemde c değeri, zeminin drenajsız kohezyon değeri c_u 'ya eşittir.

$$q_d = c \cdot N_c \cdot F_{cs} \cdot F_{cd} + \gamma \cdot D_f \quad (2.7)$$

Çizelge 2.2 : Şekil, derinlik ve eğim katsayılarının ampirik değerleri

Şekil Katsayıları	Derinlik Katsayıları a) $D_f/B \leq 1$	Derinlik Katsayıları b) $D_f/B > 1$	Eğim katsayıları
$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L} \cdot \frac{N_q}{N_c} \right)$	$F_{cd} = 1 + \left(0.4 \cdot \frac{D_f}{B} \right)$	$F_{cd} = 1 + \left(0.4 \cdot \tan^{-1} \frac{D_f}{B} \right)$	$F_{ci} = \left[1 - (\beta^\circ / 90^\circ)^2 \right]$
$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L} \cdot \tan \phi \right)$	$F_{qd} = 1 + \left[2 \cdot \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \cdot \frac{D_f}{B} \right]$	$F_{qd} = 1 + \left[2 \cdot \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \cdot \tan^{-1} \frac{D_f}{B} \right]$	$F_{qi} = \left[1 - (\beta^\circ / 90^\circ)^2 \right]$
$F_{\gamma s} = 1 - \left(\frac{B}{L} \cdot 0.4 \right)$	$F_{\gamma d} = 1$	$F_{\gamma d} = 1$	$F_{\gamma i} = \left[1 - (\beta / \phi)^2 \right]$

Bu formül, Çizelge 2.1 'de verilen değerler ve Çizelge 2.2 'de verilen bağıntılar kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$q_u = c \cdot 5,14 \cdot \left(1 + \frac{B}{5,14 \cdot L}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,4 \cdot D_f}{B}\right) + \gamma \cdot D_f \quad (2.8)$$

(2.4), (2.5) ve (2.6)no'lu denklemlerin yardımıyla suya doymun killer için güvenli zemin emniyet gerilmesi aşağıda yer alan denklemdeki gibi elde edilir.

$$q_{all(net)} = c_u \cdot 1,713 \cdot \left(1 + \frac{B}{5,14 \cdot L}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,4 \cdot D_f}{B}\right) \quad (2.9)$$

İri daneli zeminlerde ise radye temellerin taşıma gücü, arazide gerçekleştirilen SPT (Standart Penetration Test) deneyinden elde edilen SPT-N sayısı kullanılarak hesaplanabilir.

$$q_{all(net)} = 11,98 N_{cor} \left[(3,28B + 1) / 3,28B^2 \right] \cdot F_d \cdot (S_e / 25,4) \quad (2.10)$$

Bu bağıntıda,

N_{cor} : düzeltilmiş standart penetrasyon sayısı

B : genişlik

$$F_d: 1 + 0,33(D_f / B) \leq 1,33$$

S_c : oturma (mm) değerleridir.

2.3 Radyejeneral Temellerin Boyutlandırılması

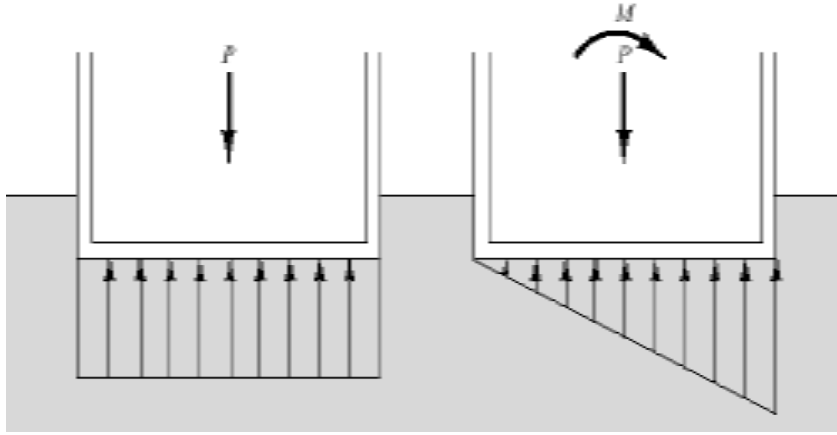
Yüzeysel temeller için birçok hesap yöntemi mevcut olup bu yöntemler aşağıda ana hatlarıyla belirtilmiştir.

2.3.1 Basit gerilme dağılımı

Bu yöntemde üstyapıdan gelen yüklerin etkisi altında radyejeneral temelde ve zeminde oluşan yerdeğiştirmelerin ihmal edilebilir mertebede olduğu kabul edilmektedir (Smoltyczk, 2006). Buna göre radyejeneral temelde meydana gelen deformasyonlar taban basıncının dağılımını etkilemeyecek kadar küçük

mertebededir. Taban basıncı dağılımı yalnızca temele etkiyen yüklere ve radyejeneral temelin ağırlığına bağlı olup, zemine eksenel tekil yük etkimesi durumunda üniform, eksantrik yük veya moment etkimesi durumunda ise lineer olarak değişmektedir (Şekil 2.6). Bu kabul radyejeneral temelde oluşan toplam ve farklı oturmalar ile gerilmelerin kolay hesaplanmasına olanak tanımaktadır (Coduto, 2001).

Gerçekte bu yöntem, radyejeneral temelerde genişlik/kalınlık oranının tekil temellere nazaran daha büyük olması sebebiyle tekil temeller için radyejeneral temellere nazaran daha uygun sonuçlar vermektedir. Ayrıca rijit temeller altındaki gerilme dağılımı basit gerilme dağılışı yönteminde varsayılan dağılımdan çok daha farklı olup basit gerilme dağılımında gerçeğe kıyasla fazla güvenli sonuçlar elde edilmektedir.



Şekil 2.6 : Basitleştirilmiş kabule göre radyejeneral temel altında taban basıncı dağılımı

Bu yöntemin hesap adımları aşağıda özetlenmiştir (Das, 1999).

- 1.Radyejeneral temele etkiyen toplam yük her bir kolona etkiyen yüklerin toplamı olarak hesaplanır.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (2.11)$$

2. Zemin üzerine etkiyen basıncı hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$q = \frac{P}{A} \pm \frac{M_y x}{I_y} \pm \frac{M_x y}{I_x} \quad (2.12)$$

Burada;

A: Radyejeneral temelin alanı,

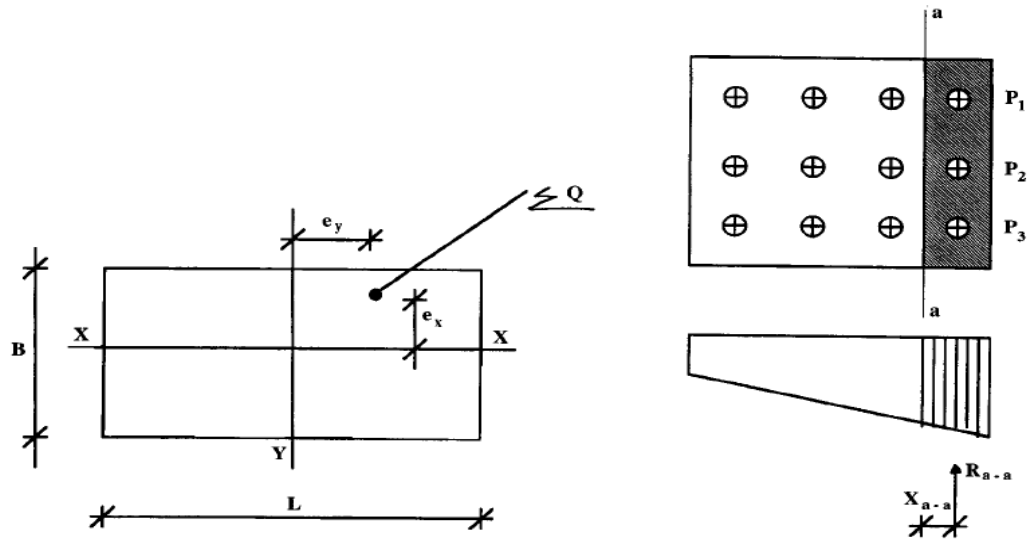
I_x : $(1/12)*L*B^3$, X Aksı etrafındaki atalet momenti

I_y : $(1/12)*B*L^3$, Y Aksı etrafındaki atalet momenti

M_x : X Aksı etrafındaki kolon yüklerinden oluşan moment, $Q*e_x$

M_y : Y Aksı etrafındaki kolon yüklerinden oluşan moment, $Q*e_y$ terimlerini temsil etmektedir.

Eksantrisite değerleri e_x ve e_y her bir kolon yükünün fiktif bir x' noktasına göre ağırlıklı ortalamasının hesaplanması ile elde edilir.



Şekil 2.7 : Radyejeneral temellerin basitleştirilmiş gerilme dağılımı kabulüne göre çözümü (Bowles, 1997)

3. 2 no'lu adımda hesaplanmış olan ve üstyapıdan radyejeneral temele aktarılan yüklerin temelin net taşıma gücünü aşıp aşmadığı kontrol edilir.

$$q \leq q_{all(net)}$$

şartı aranır.

4. Radyejeneral temel her iki doğrultuda şematik olarak küçük parçalara bölünür. Her bir parçanın genişliği $B_1, B_2, \dots, B_n$ olarak adlandırılır.

5. Her bir parça için kayma gerilmesi V ve moment M diyagramları hem x , hem de y doğrultusunda çizilir.

6. Çeşitli kolonlar altındaki diyagonal çekme gerilmeleri kontrol edilerek radyenin efektif kalınlığı d bulunur. 318-95 no'lu Amerikan Beton Enstitüsü

standardına göre radyenin genişliği b_0 ve kalınlığı d aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$U = b_0 d \left[\phi (0.34) \sqrt{f'_c} \right] \quad (2.13)$$

U : faktörlü kolon yükü (kolon yükü*yük faktörü) (MN)

Φ : azaltma faktörü=0.85

f'_c : betonun 28 günlük basınç dayanımı (MN/m²)

7.Tüm parçaların x ya da y doğrultusundaki moment diyagramlarından birim genişlikteki maksimum pozitif ya da negatif momentler elde edilir.

8.Elde edilen momentlerden birim genişlik için donatı alanı abaklar yardımıyla bulunur.

2.3.2 Yatak katsayısı yöntemi

Bu yöntemde, basit gerilme dağılımı ile yapılan çözümlerde göz ardı edilen üniform olmayan zemin taban basınçları ve radyede oluşan şekil değiştirmeler dikkate alınmaktadır. Bu sayede, radyedeki eğilmeler daha kesin hesaplanmakta ve daha güvenli ve ekonomik çözümler geliştirilebilmektedir. Ancak bu metot kullanılırken dikkate alınması gereken iki önemli husus vardır.

1. Taban basıncı dağılımı basit bir şekle sahip olmadığı için daha karmaşık bir yapısal analize ihtiyaç vardır.
2. Oturma ile taban basıncı arasındaki ilişkinin ve yapı-zemin ilişkisinin daha net tanımlanması gerekmektedir.

Bu yöntemde Winkler (1867) tarafından geliştirilen hipotez esas alınarak çözüm yapılmakta, buna göre zeminin sonsuz sayıda elastik özellikli yaydan oluştuğu kabul edilmekte ve bu sistemdeki yay sabiti, zeminin yatak katsayısına eşit olmaktadır. Winkler hipotezine göre, temelin altındaki herhangi bir noktada oluşan gerilme, o noktadaki yer değiştirme (oturma) ile orantılıdır. Bu sistemde, her bir yayın, sadece bulunduğu noktadaki yerdeğiştirmeyi temsil ettiği kabul edilmekte, ancak bu varsayım yöntemin bazı noktalarda gerçeği tam olarak yansıtamamasına sebep olmaktadır. Bu hususlar şöyle özetlenebilir:

1. Gerçekte, zemin doğrusal olmayan bir yük oturma davranışı sergilemekte, ancak Winkler yönteminde zeminin lineer bir yük-oturma davranışı sergilediği ve bu yük oturma doğrusunun eğiminin yatak katsayısına eşit olduğu kabul edilmektedir.
2. Bu yöntemle göre, tamamen homojen bir zemin üzerinde yer alan üniform yüklü bir radyejeneral temelin, her noktada aynı oturmayı yapacağı öngörülmektedir. Ancak gerçekte orta bölgede oluşan gerilme artışları daha fazla olacağından orta bölgede daha fazla oturma oluşacaktır.
3. Gerçekte her bir yay birbirinden bağımsız hareket etmemekte, tam tersine her bir noktadaki yay komşu ve hatta daha uzaktaki yaylar ile etkileşim içinde olmaktadır.

Winkler yöntemine göre, radyejeneral temel üzerinde herhangi bir noktadaki oturma şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$z = \frac{q}{k} \quad (2.14)$$

Bu yöntemi daha iyi anlayabilmek için, üzerine Q yükü etkileyen, sonsuz uzunlukta ve B genişliğinde bir kiriş göz önüne alındığında,

$$M = E_R \cdot I_R \cdot \frac{d^2 z}{dx^2} \quad (2.15)$$

M : herhangi bir noktadaki moment

E_R : radyejeneral temelin elastisite modülü (genellikle beton ya da betonarme)

I_R : kirişin kesitindeki atalet momenti ($=B \cdot h^3/12$) bağıntısı elde edilir.

Mekanik kanunlarından,

$$\frac{dM}{dx} = V \text{ (kayma kuvveti)} \quad (2.16)$$

ve

$$\frac{dV}{dx} = q \text{ (zemin tepkisi)} \quad (2.17)$$

olduğu bilinmektedir.

(2.15), (2.16) ve (2.17) no'lu denklemler birleştirildiğinde,

$$E_R \cdot I_R \cdot \frac{d^4 z}{dx^4} = q \quad (2.18)$$

$$q = -k' \cdot z = -k \cdot B_1 \cdot z \quad (2.19)$$

olduğuna göre, yukarıdaki denklem,

$$E_F \cdot I_F \cdot \frac{d^4 z}{dx^4} = -z \cdot k \cdot B_1 \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir. (2.20) no'lu denklemin çözümü aşağıda verilmiştir.

$$z = e^{-\alpha x} (A' \cos \beta x + A'' \sin \beta x) \quad (2.21)$$

A' ve A'' katsayılar olup, β terimi aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{B_1 k}{4E_F I_F}} \quad (2.22)$$

(2.22) no'lu denklemden elde edilen β parametresi radyejeneral temellerin tasarımında önemli bir yere sahiptir. Amerikan Beton Enstitü Komitesi'nin 336 no'lu bildirisine göre, radyejeneral temellerin bölündüğü herhangi bir parça için, kolonların aralığı $1.75/\beta$ 'den küçük ise radyejeneral temel geleneksel rijit yönleme göre, bu değerden büyük ise yaklaşık esnek yönleme göre tasarlanır.

Yaklaşık esnek yönleme göre çözüm yapılabilmesi için, zemin yatak katsayısı k 'nın belirlenmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, Winkler hipotezine göre yatak katsayısı ile zeminin yer değiştirmesinin çarpımıyla temelden zemine aktarılan basınç elde edilmektedir.

Ancak, yatak katsayısı k 'nın, her zemin için sabit bir değer almadığının bilinmesi gerekir. Bu değer, temelin genişliği B , uzunluğu L ve temel derinliği D_f gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Casagrande'nin (1955) yatak katsayısını etkileyen parametreler üzerinde yaptığı araştırmalara göre, temel derinliği arttıkça yatak katsayısının değeri azalmaktadır. K değeri arazide 30 cm*30 cm ebatlarındaki

bir plaka ile gerçekleştirilen plaka yükleme testinden elde edilmekte, daha sonra da bu değer, B*B boyutlarındaki bir temel için ampirik formüller yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu formüller, iri daneli ve ince daneli zeminler için sırasıyla,

$$k = k_{0.3} \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 \quad (2.23)$$

ve

$$k = k_{0.3} \left(\frac{0.3}{B} \right) \quad (2.24)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $k_{0.3}$ değeri, arazideki plaka yükleme deneyinden elde edilen yatak katsayısıdır. Temelin B*L boyutlarında bir dikdörtgen olması halinde, hem iri daneli, hem de ince daneli zeminler için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$k = \frac{k_{B \times B} \cdot (1 + 0.5 \frac{B}{L})}{1.5} \quad (2.25)$$

Bu formülden görüldüğü üzere, aynı zeminde sonsuz uzunluktaki bir temel için yatak katsayısı, aynı genişlikte ancak B uzunluğunda bir temelin yatak katsayısının 0.67'sine eşit olmaktadır.

Yaklaşık elastik metotun çözümü adım adım aşağıda özetlenmiştir.

1. (2.13) no'lu denklemde belirtilen şekilde radyejeneral temelin kalınlığı d hesaplanır.
2. Radyenin eğilme rijitliği R aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{E_F h^3}{12(1 - \mu_F^2)} \quad (2.26)$$

E_f : temel malzemesinin elastisite modülü

μ_f : temel malzemesinin Poisson oranı

h : radyenin kalınlığı

3. Radyejeneral temelin efektif rijitlik çapı L' hesaplanır.

$$L' = \sqrt[4]{\frac{R}{k}} \quad (2.27)$$

Herhangi bir kolondan temele aktarılan yükün etki alanı 3 ila 4 L' arasında değişmektedir.

4. Kolon yüklerinden dolayı oluşan momentler polar koordinatlarla ya da kartezyen koordinatlarla aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 2.8).

$$M_r = -\frac{Q}{4} \left[Z_1 - \frac{(1-\mu_F)Z_2}{\frac{r}{L'}} \right] \quad (2.28)$$

$$M_t = -\frac{Q}{4} \left[\mu_F Z_1 + \frac{(1-\mu_F)Z_2}{\frac{r}{L'}} \right] \quad (2.29)$$

5. Radyejeneral temelin birim genişliği için bir kolondan temele aktarılan yükün oluşturduğu kayma kuvveti hesaplanır.

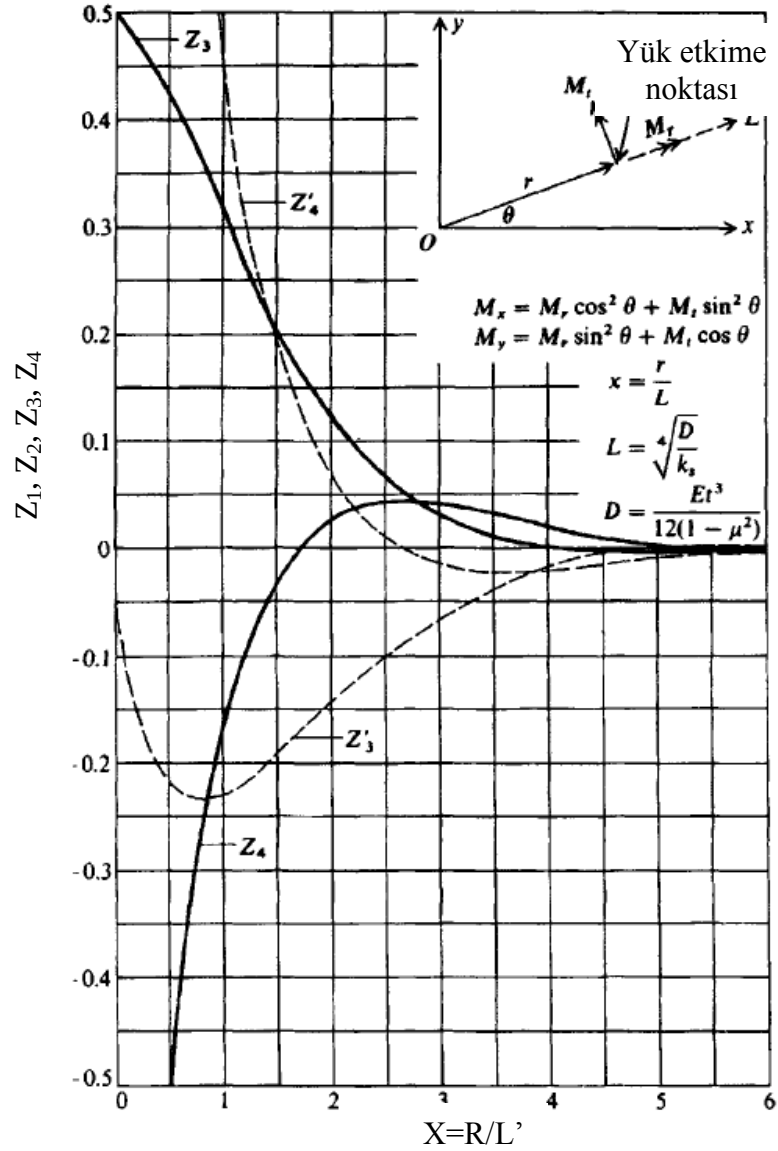
$$V = \frac{Q}{4L'} Z_3 \quad (2.30)$$

6. Radyejeneral temelin köşesinin herhangi bir kolonun etki alanı içine girmesi durumunda radyenin bu düzlem boyunca devam ettiği varsayılır. Elde edilen kayma kuvveti ve momentin aynı büyüklükte zıt işaretli değeri o noktaya etkililerek istenen koşullar elde edilmiş olur.

7. Herhangi bir noktadaki yer değiştirme aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\delta = \frac{QL'^2}{4R} Z_4 \quad (2.31)$$

Z_1, Z_2, Z_3 ve Z_4 katsayılarının değişimi Şekil 2.8 'de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Radyejeneral temellerin yatak katsayısı yöntemi ile boyutlandırılmasında kullanılan Z_1, Z_2, Z_3 ve Z_4 katsayıları (Bowles, 2001)

2.3.3 Elastik yarı uzay (rijitlik modülü) yöntemi

Bu yöntem, radyejeneral temelin oturma hesabında zeminin laboratuvar veya arazi deneyleri sonucu elde edilmiş elastisite modülü E ve Poisson oranı ν parametrelerini kullanılması esasına dayanır. Hesap sırasında kullanılan parametreler ampirik bağıntılar olmayıp zeminin kendi değerleri olduğundan gerçeğe en yakın sonuçları veren yöntemdir (Smolytch, 2006). Elastik yarı uzay yöntemi ile yapılan hesaplamalarda temel zemini, zeminin elastik parametrelerini ve rijitlik modülü değerlerini içerecek şekilde; elastik yarı mekân olarak modellenmektedir. Winkler yöntemi ve elastik yarı uzay yöntemleri ile yapılan hesaplarda radyejeneral temel tabanında oluşan gerilme dağılımları ve oturmalar Şekil 2.9 'da gösterilmektedir.

Buna göre elastik yarı uzay modelinde üniform yüklü rijit temel altında gerilme değerleri temel kenarlarına doğru artarken, Winkler yöntemine göre temel altında gerilme dağılımı sabittir.

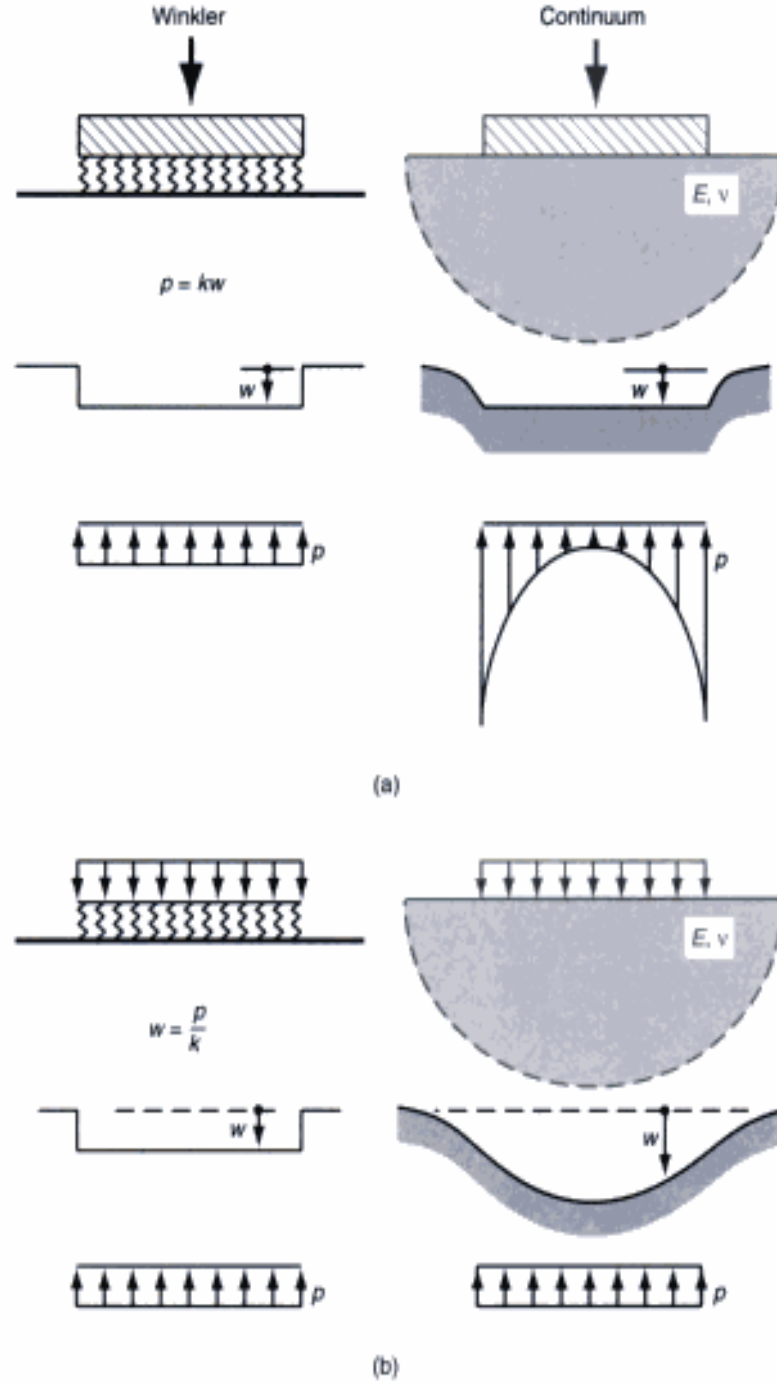
Radyejeneral temellerin zeminin elastik yarı uzay olarak modellendiği yöntemle çözümünde kullanılan rijitlik modülü E_s , zeminden alınan numunenin yatay deformasyonuna izin verilmeyen konsolidasyon deneyi ile elde edilmektedir. Buna göre zeminin elastisite modülü ve rijitlik modülü arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$E_s = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.32)$$

Radyejeneral temel altındaki zeminin elastik yarı uzay olarak modellenmesi durumunda temel altında oluşacak oturma şu şekilde hesaplanır:

$$s = \frac{\sigma_0 \cdot b \cdot f}{E_m} \quad (2.33)$$

Yukarıdaki bağıntıda verilen b temelin genişliği ve f temel boyutlarına, temel altında bulunan zeminin mukavemet özelliklerine ve poisson oranına bağlı bir katsayı ve E_m , zeminin sıkışabilirlik modülü olup sıkışabilirlik modülü büyük ölçekli plaka yükleme deneyleri yardımıyla hesaplanabilmektedir. E_m parametresi yerine laboratuarda konsolidasyon deneyi sonucu elde edilen E_s rijitlik modülü de kullanılabilir. f değeri ise oluşturulan abaklar yardımıyla temel boyutlarına bağlı olarak elde edilmektedir (Kany, 1974). Elastik yarı uzay yöntemi, tıpkı yatak katsayısı yöntemi gibi temel altında oluşan şekil deformasyonları dikkate aldığı, buna ilaveten zeminin kendi parametreleri ile çalışmaya olanak sağladığı için gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermekte, bilgisayar yazılımları sayesinde bu yöntem yardımıyla çok çabuk ve pratik bir biçimde çözüme ulaşılabilmektedir.



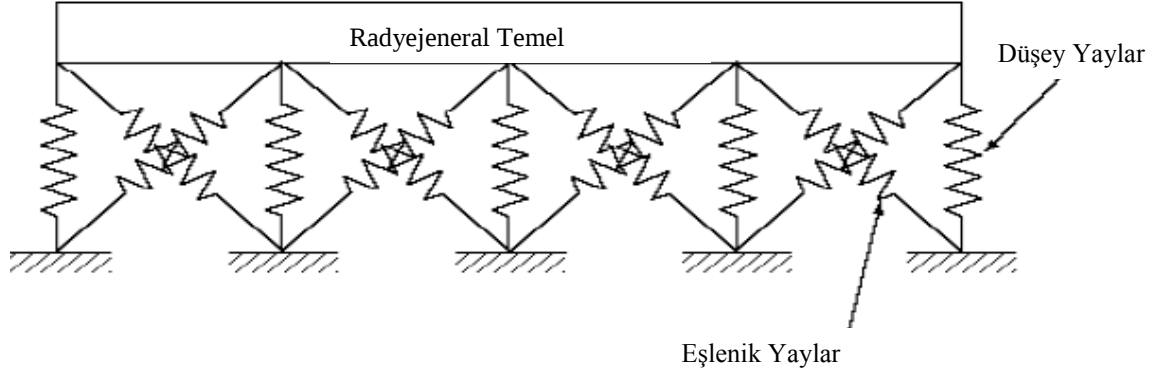
Şekil 2.9 : Winkler Yöntemi ve Elastik Yarı Uzay Yönteminde a)Rijit, b) Elastik Temelin Altında Oluşan Gerilme Dağılımı ve Oturma Değerleri (Lopes, 2000)

2.3.4 Diğer yöntemler

2.3.4.1 Eşlenik yöntem

Eşlenik yöntem, esas olarak Winkler yöntemiyle aynı prensip doğrultusunda çözüm yapmakla beraber her bir yayın bağımsız olarak hareket ettiği kabulünden farklı

olarak her bir yayın kendisine komşu yaylarla etkileşim içinde olduğunu varsayarak çözüm yapmaktadır (Şekil 2.10). Bu yöntem Winkler yöntemine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekle beraber oldukça karmaşık bir hesap aşamasına sahip olup genelde bilgisayarla çözüm gerektirmektedir. Ayrıca eşlenik yaylar için hangi k_s yatak katsayısının seçileceği açıklığa kavuşturulamamıştır (Coduto, 2001).



Şekil 2.10 : Eşlenik Yöntemin Şematik Gösterimi

2.3.4.2 Psödo-eşlenik yöntem

Bu yöntem ilk olarak Liao (1991) ve Horvath (1993) tarafından geliştirilmiş olup esasen eşlenik yöntemde karşılaşılan zorlukları gidermek ve Winkler yöntemindeki yetersizlikleri bertaraf etmek amacıyla Winkler yönteminin yeniden düzenlenmiş halidir. Bu yöntemin Winkler yönteminden en büyük farkı radyejeneral temel altında her bir noktada bağımsız yaylar kullanılmasına rağmen bu yayların yatak katsayısının radyejeneral temel altındaki konumlarına bağlı olarak değişken olmasıdır (Horvath, 2002). Buna göre düzgün yayılı yüklü bir radyejeneral temelin kenarlarında yer alan yayların yatak katsayısı daha yüksek, ortada yer alan yayların yatak katsayısı daha fazla olmakta ve bu sayede gerçekte oluşan oturma modeli elde edilmiş olmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü'nün çalışmalarına göre (1993) radyejeneral temelin kenarlarında kullanılan yatak katsayılarının orta bölgede kullanılan yatak katsayılarının yaklaşık iki katı mertebesinde olmaları gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca yine aynı çalışmada psödo-eşlenik yöntemle elde edilen momentlerin geleneksel Winkler yöntemi ile elde edilen momentlerin %25'i kadar daha fazla olduğu görülmüş olup Winkler yöntemi ile elde edilen değerlerin oldukça güvensiz olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre psödo-eşlenik yöntem ile radyejeneral temellerin tasarımı yapılırken aşağıdaki adımlar izlenebilir:

1. Radyejeneral temel iki veya daha fazla yük bölgesine ayrılır. En içerde yer alan bölge radyejeneral temel genişlik ve uzunluğunun yarısına sahip olacak şekilde düzenlenmelidir.
2. Her bölge için yatak katsayısı belirlenir. Bu aşamada yatak katsayısının en içerdeki bölgeden dışarıya doğru artmasına ve en dıştaki bölgenin yatak katsayısının en içerdeki bölgenin yatak katsayısının yaklaşık iki katı mertebede olmasına dikkat edilmelidir (Horwath, 1993).
3. Her bir bölge için deformasyonlar, kesme kuvvetleri ve momentler Bölüm 2.3.2 'de belirtildiği gibi Winkler yöntemine uygun olarak hesaplanır.
4. Radyejeneral temel kalınlığı ve donatılar mukavemet ve konfor şartlarını sağlayacak şekilde seçilir.

Günümüzde bir çok ticari tasarım yazılımı Winkler hipotezine bağlı olarak tasarım yapmakta, ancak bu yazılımlarda radyejeneral temeli bölgelere ayırıp her bölgeye farklı yatak katsayısı atayarak psödo-eşlenik yöntemi kullanmak ve gerçeğe daha uygun çözümler elde etmek mümkün olmaktadır.

2.3.4.3 Çoklu parametre yöntemi

Bu yöntemin yukarıda bahsedilen elastik çözüm yöntemlerinden en önemli farkı, diğer yöntemlerde kullanılan doğrusal davranış gösteren yaylardan farklı olarak zemin yapı ilişkisini modellemek için yaylara ek olarak bazı farklı mekanik elemanların kullanılmasıdır. Horwath'a göre kullanılacak elemanların türü, uygulanan yüke gösterilen direncin yerdeğiştirmenin kaçınıcı türeviyle orantılı olduğuna bağlı olarak değişmektedir. Buna göre, yukarıda bahsedilen yöntemler geçerli olmakta ve modellemek için yay elemanları kullanılmaktadır. Uygulanan yük sonucu oluşan basınç oluşan yerdeğiştirmenin birinci türevi ile doğru orantılı ise kullanılan fiziksel eleman birim kalınlıkta olup sadece düşey kesme kuvvetlerine karşı koyan lineer elastik bir tabaka olarak tanımlanan bir kayma tabakasıdır. Bunun pratikteki karşılığı öngermeli bir membran olabilmektedir. Uygulanan yük sonucu oluşan basıncın oluşan yerdeğiştirmenin ikinci türevi ile doğru orantılı olduğu durumlarda ise iki boyutlu bir plak mekanik eleman olarak kullanılabilir (Horwath, 2002).

2.3.4.4 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi analiz yapılacak sistemi küçük parçalara bölerek her bir düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeleri hesaplayarak sistemin toplam yerdeğiştirmesini elde etmek prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi ileri bölümlerde verilecektir.

2.3.5 Radyejeneral temellerde farklı oturmanın tahmini

Radyejeneral temellerde tekil ve sürekli temellerle kıyaslandığında zeminin aşırı derecede heterojen bir yapıya sahip olması ya da üstyapıdan gelen yüklerin bir noktada toplanması durumu dışında farklı oturma problemine nadiren rastlanmaktadır. Radyejeneral temellerde farklı oturmanın meydana gelmesinde temelin ve üstyapının oluşturduğu sistemin eğilme rijitliği önemli bir rol oynamaktadır. Buna göre sistemin rijitliği şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_b I_b = E_r \cdot I_r + E_B I_B \quad (2.34)$$

$E_b I_b$: Üstyapının ve temelin oluşturduğu sistemin birim uzunluk için B'ye dik yönde eğilme rijitliği

$E_r \cdot I_r$: radyejeneral temelin B'ye dik yönde eğilme rijitliği

$E_B \cdot I_B$: üstyapının B'ye dik yönde eğilme rijitliği

Bu bağıntıya göre radyejeneral temelin eğilme rijitliği temelin çoğu zaman basit bir şekilden oluşması, dolayısıyla atalet momentinin kolaylıkla hesaplanması ve tek bir malzemenin kullanılması (genellikle betonarme) sebebiyle basit bir şekilde elde edilebilmektedir. Ancak üstyapıyı oluşturan elemanların şekillerinin karmaşık olması sebebiyle atalet momenti I_B 'nin hesaplanması oldukça zaman almaktadır. Netzel (1996), üstyapının inşaatı sırasında sistemin kendi içinde yaşayacağı deformasyonlar sebebiyle hesaplanan eğilme rijitliği değerine çoğunlukla ulaşamadığını belirtmiştir. Bu sebepten ötürü, binanın eğilme rijitliğinin ya bir kısmı dikkate alınmakta, ya da bu değer tamamen ihmal edilmektedir. Frankfurt ve civar bölgelerdeki yapılarda Sommer (1972) tarafından yapılan ölçümler sonucunda bu varsayımın gerçekte örtüştüğü belirlenmiştir.

Farklı oturma oranının belirlenmesinde sistemin üstyapı ve temelden oluşan sistemin rijitliğinin temelin altında yer alan zeminin rijitliğine oranı rol oynamaktadır. Bu oran şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$K_r = \frac{E_b \cdot I_b}{E_s \cdot b \cdot l^3} \quad (2.35)$$

Bu bağıntıda;

$E_b I_b$: Üstyapının ve temelin oluşturduğu sistemin birim uzunluk için B'ye dik yönde eğilme rijitliği

E_s : Zeminin elastisite modülü

B : Temel genişliği

I_b : Yapının birim uzunluk için B kenarına dik yönde atalet momentini temsil etmektedir.

Elde edilen K_r değerine göre, farklı oturmanın toplam oturmaya olan oranı (δ) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

1. $K_r > 0.5$ ise, $\delta=0$ ve radyejeneral temelin rijit davranış gösterdiği kabul edilir.
2. $K_r = 0.5$ ise, $\delta \approx 0.1$ olarak alınabilir.
3. $K_r = 0$ ise, kare radyejeneral temeller için ($B/L=1$) $\delta=0.35$ ve şerit temeller için ($B/L=0$) $\delta=0.5$ alınabilir.

3. KAZIKLI TEMELLER

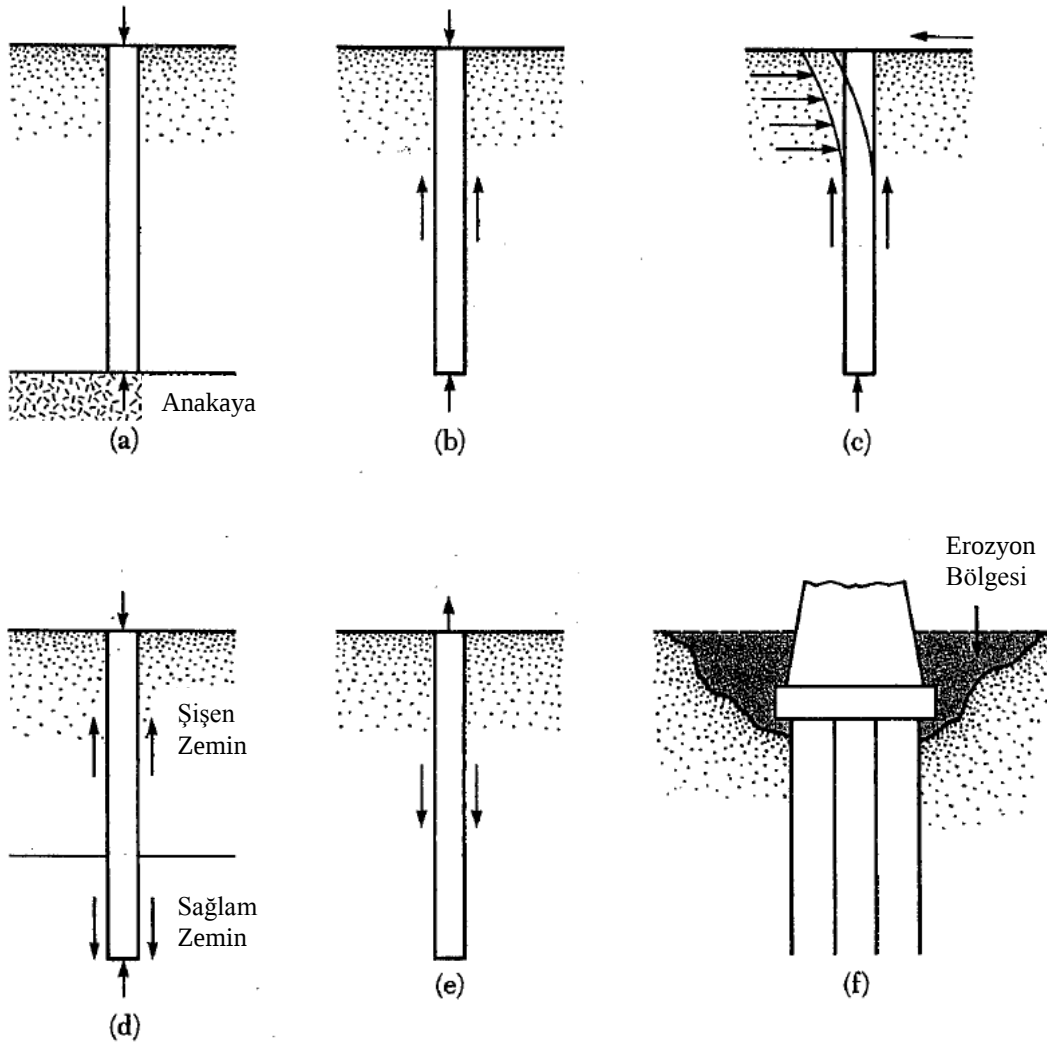
3.1 Kazıklı Temel Sistemlerinin Genel Tanımı

Üstyapıdan gelen yüklerin fazla olması, yapı altında yer alan zeminin bu yükleri göçmeden ya da aşırı miktarda oturmaya maruz kalmadan taşıyamayacak olması ve sağlam tabakaların derinde yer alması veya sıkı temel için yapılacak zemin iyileştirmesinin daha maliyetli olması durumunda üstyapıdan gelen yükler kazıklı temeller vasıtasıyla zemine aktarılır. Kazıklı temellerin kullanıldığı durumlar aşağıda kısaca özetlenmiştir (Das, 1999).

1. Üst tarafta yer alan zemin tabakalarının sıkışabilirliğinin yüksek olması ve üstyapıdan gelen yükleri taşıyamayacak kadar zayıf olması durumunda, bu yüklerin derinde yer alan ana kayaya ya da sağlam zemin tabakasına kazıklar vasıtasıyla aktarılması sağlanır (Şekil 3.1a). Uç taşıma gücünün ağırlık kazındığı durumlarda bu kazıklara uç kazığı adı verilmektedir.
2. Zemin yüzeyinden itibaren belirli bir derinliğe kadar yüksek taşıma gücüne haiz zemin ile karşılaşmadığı takdirde, kazıklar yükü zemine kademeli olarak aktarır. Yükler zemin ve kazık yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvveti tarafından taşınır. Bu tip kazıklar ise sürtünme kazığı veya bazı durumlarda yüzen kazık olarak adlandırılmaktadır. (Şekil 3.1b).
3. Yanal yüklere maruz kalması durumunda, kazıklar bir yandan eğilmeye zorlanırken aynı zamanda düşey yükleri de karşılayabilmektedir. Bu tip durumlar genelde yüksek yanal yüklerin olduğu istinat yapılarının tasarımı ya da yüksek rüzgar ya da deprem yüküne maruz kalan çok katlı yapılar ile kule, baca gibi yapıların temellerinde görülmektedir (bkz Şekil 3.1c).
4. Bazı durumlarda, yapının inşa edileceği alanda şişen zemin tabakaları bulunabilmektedir. Özellikle şişen zeminlerde su muhtevasının değişimine bağlı olarak büyük hacim değişiklikleri gözlenebilmektedir. Bu durumda şişme basıncının mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Bu tabakaların derinliğinin çok fazla olduğu durumlarda, yüzeysel temellerin kullanımından kaçınılmalıdır, aksi takdirde farklı oturmalara bağlı büyük yapısal hasarlar

meydana gelebilmektedir. Kazıklı temellerin kullanımı halinde, kazık derinliğinin söz konusu aktif tabakanın derinliğinden fazla olması durumunda, kazıklar gerektiğinde çekme kuvvetine çalışabilmektedir (Şekil 3.1d).

5. Soğutma kuleleri, deniz yapıları gibi hafif yapılar ya da temel altı kötü yer altı su seviyesinin altında yer alan radyojeneratör temeller kaldırma kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu durumda kazık temeller **çekme kazığı** olarak bu kuvvetlerin karşılanması amacıyla tercih edilmektedir (Şekil 3.1e).
6. Köprü ayakları ve iskele benzeri yapılarda, zeminin yüzeyindeki oyulma sebebiyle taşıma gücü kaybına uğrama tehlikesi yüzeysel temellerden ziyade kazıklı temellerin tercih edilmesine neden olmaktadır (Şekil 3.1f).



Şekil 3.1 : Kazıklı Temellerin Kullanım Alanları (Das, 1999)

3.2 Kazıkların Yük Aktarım Şekline Göre Sınıflandırılması

3.2.1 Uç kazıkları

Bölüm 3.1’de belirtildiği gibi, yükün kazık tarafından derinde yer alan taşıma gücü çok yüksek zemine ya da ana kayaya uç gerilmeleri ile aktarılması durumunda kazık uç kazığı olarak isimlendirilir. Bu kazıklarda çevre sürtünmesinden oluşan direnç ihmal edilecek mertebededir.

Bazı durumlarda, belirli bir derinlikten itibaren taşıma gücü nispeten yüksek zeminlerle (sert kil ve sıkı kumlar) karşılaşılrsa bile, kazık bu tabaka içerisinde bir miktar soketlenmektedir. Bu durumda kazık yükü hem uç hem de sürtünme direnci tarafından karşılanmaktadır.

3.2.2 Sürtünme kazıkları

Bu tip kazıklarda belirli bir derinlik boyunca ana kayaya ya da taşıma gücü yüksek zemine ulaşılamamakta, bu sebeple yük kazık gövdesi boyunca yer alan zeminlere sürtünme direnci yoluyla aktarılmaktadır. Sürtünme kazıklarında kazığın uç direnci ihmal edilecek mertebededir.

3.2.3 Kompaksiyon Kazıkları

Özellikle iri daneli zeminlerde, yüzeye yakın bölgedeki zeminin sıkıştırılmasını sağlamak amacıyla zemine uzunluğu fazla olmayan kazıklar çakılmakta ve zeminin hem yoğunluğunda hem de mukavemetinde artışlar gözlenmektedir. Kompaksiyon kazıklarının uzunlukları zeminin sıkışmadan önceki ve sonraki yoğunlukları ile istenen sıkışma derinliğine bağlı olarak belirlenmektedir (Das, 1999).

3.3 Tekil Kazıklı Temellerin Taşıma Gücü

Kazık kapasitesi hesaplarında aşağıdaki metotlardan yararlanılır (Prakash ve Sharma, 1990). Ancak farklı zemin davranışlarını göz önüne alarak bu formülleri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için ayrı ayrı incelemek daha yararlı olacaktır.

1. Zeminin mukavemetine dayalı statik analizler
2. Arazi deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı ampirik çözümler
3. Dinamik çakma direncinden elde edilen çözümler
4. Arazi kazık yükleme deneyleri

3.3.1 Statik formüller

Üstyapıdan gelen düşey yüklerin Bölüm 3.2’de bahsedildiği gibi bir kısmı, uç direnci tarafından, diğer kısmı ise sürtünme direnci tarafından karşılanmaktadır. Buna göre tekil kazığın düşey yük altında taşıma gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_d = Q_p + Q_s - W \quad (3.1)$$

Bu denklemde Q_d kazığın toplam taşıma gücünü, Q_p uç direncini, Q_s sürtünme direncini ve W kazığın ağırlığını ifade etmektedir. Ancak pratikte kazık ağırlığı kıyı ve liman yapıları gibi kazığın zeminin dışında imal edildiği yapılar dışında ihmal edilmektedir (Tomlinson, 2004). Bu durumda formülü oluşturan ilk iki terimi elde etmekte kullanılan denklemler (3.2) ve (3.3)’teki gibidir.

Uç direnci için;

$$Q_p = A_p \left[cN_c + \frac{1}{2} \gamma DN_\gamma + \gamma LN_q \right] \quad (3.2)$$

A_p : kazığın uç alanı

c : kazık ucunun temas ettiği zeminin kohezyonu

γ : zeminin birim hacim ağırlığı (kazığın ucu ve gövdesinde farklı zemin tabakaları varsa bu tabakalar ayrı ayrı dikkate alınır)

N_c, N_γ, N_q : boyutsuz ve zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olarak değişen taşıma gücü parametreleri

D : kazık çapı

L : kazığın zemine gömülü olduğu derinlik (genelde kazık uzunluğuna eşittir.)

Çevre sürtünmesi için;

$$Q_s = p \sum \Delta L \cdot f_s \quad (3.3)$$

p : kazık kesitinin çevre uzunluğu

ΔL : f_s ve p değerlerinin sabit kaldığı uzunluk

f_s : ΔL uzunluğu boyunca sabit alınan birim gövde sürtünmesi

3.3.1.1 Kohezyonsuz zeminler

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

$$Q_p = A_p \gamma \cdot L \cdot N_q - W \quad (3.4)$$

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

$$W = D_f \cdot \gamma \cdot A_p \quad (3.5)$$

ve

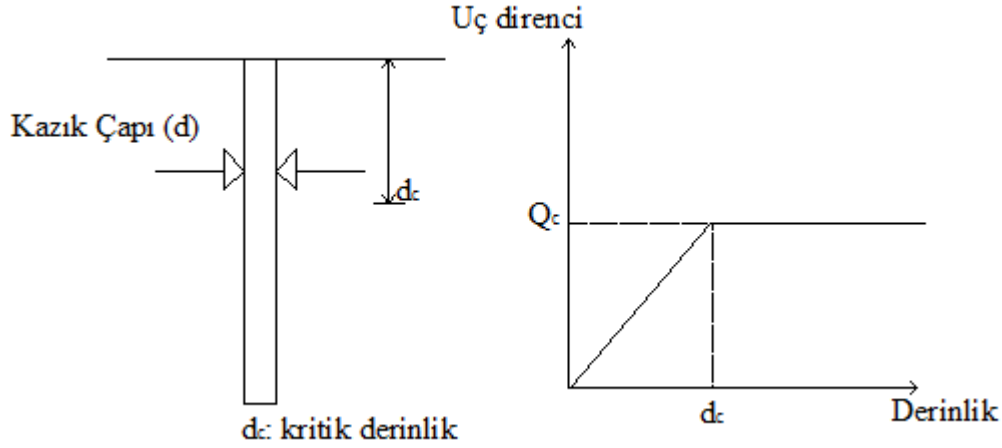
$$Q_p = A_p \gamma \cdot L \cdot (N_q - 1) \quad (3.6)$$

olarak kabul edilebilir. Ancak N_q değerleri pratikte her zaman 20 ve üzerinde değerler aldığı için bu denklemde (N_q-1) yerine N_q kullanılabilir (Kumbasar ve Kip, 1999).

Aynı denklem efektif gerilme cinsinden de yazılabilir. Bu denklemde σ_v' kazık ucundaki jeolojik yüküdür.

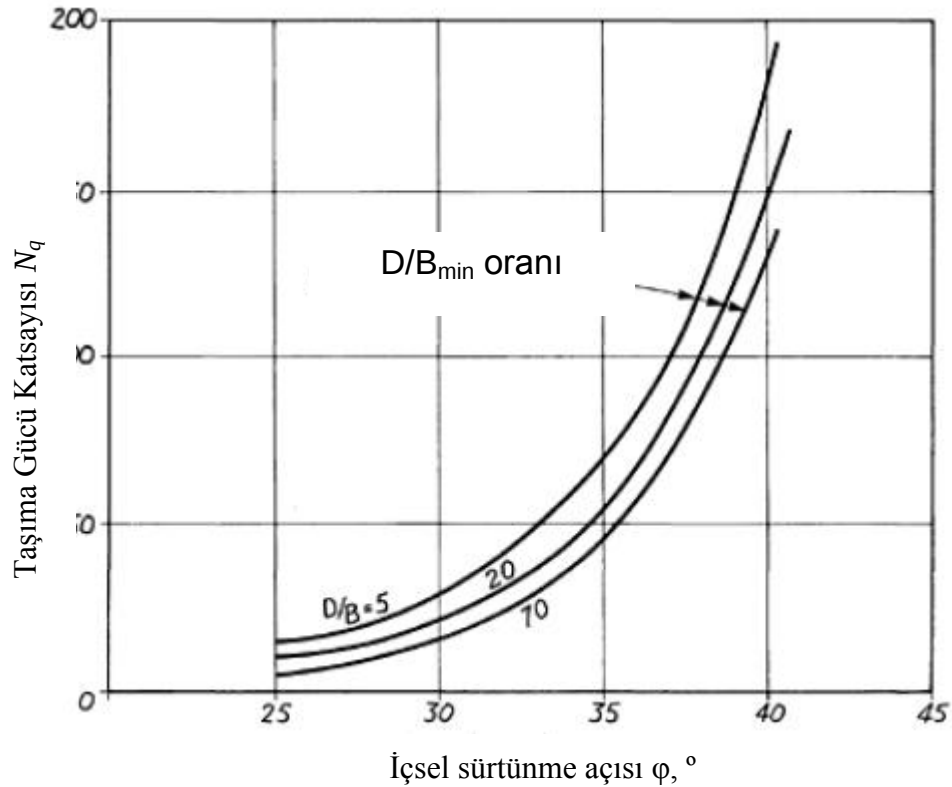
$$Q_p = A_p \sigma_v' \cdot N_q \quad (3.7)$$

Meyerhof (1976) tarafından geliştirilen ve Rajapakse (2008) tarafından da irdelenen yöntemle göre kazıklarda uç direnci ve çevre sürtünmesi belli bir derinliğe kadar artmakta, ancak belirli bir derinlikten sonra sabit kalmaktadır (Şekil 3.2). Meyerhof (1976) ve Coyle ve Castello (1981) tarafından kumlu zemin içerisinde gerçekleştirilen ve kazık uzunluğunun kazık çapına oranı D/B 2 ila 57 arasında gerçekleştirilen kazık yükleme testlerinde bu kritik derinliğin genelde yaklaşık olarak kazık çapının 20 katı civarında olduğu belirlenmiştir (Meyerhof, 1976; Coyle ve Castello, 1981).



Şekil 3.2 : Uç direncinin homojen kumlu bir zeminde derinlikle değişimi

Kazık taşıma gücünün hesabında kullanılan N_q değeri D_f/B oranına, taşıyıcı tabakanın içsel sürtünme açısına ve kazığın yerleştirilme şekline bağlıdır. N_q 'nın D_f/B , içsel sürtünme açısı ve derinlikle değişimini gösteren grafikler Şekil 3.3'de verilmektedir.



Şekil 3.3 : N_q 'nın D_f/B , içsel sürtünme açısı ve derinlikle değişimi (Tomlinson,2004)

(3.3) no'lu denklemde verilen sürtünme direnci formülü içerisinde yer alan birim gövde sürtünmesi temel kayma mukavemeti denkleminden faydalanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_s = c_a + \sigma_h' \tan \delta \quad (3.8)$$

Bu denklemde,

c_a : birim adezyon

δ : zemin ve kazık arasındaki sürtünme açısı

σ_h' : kazık gövdesi boyunca ortalama yanal efektif gerilmeyi ifade etmektedir.

Kohezyonsuz zeminlerde adezyon olmaması sebebiyle birim gövde sürtünmesi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$f_s = \sigma_h' \tan \delta \quad (3.9)$$

Bu formül düşey gerilme cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_s = K \cdot \sigma_{vl}' \tan \delta \quad (3.10)$$

Burada K toprak basıncı katsayısı, σ_{vl}' ise 1 derinliği boyunca etkiyen düşey gerilmedir. (3.9) ve (3.10) denklemlerinden $K = \sigma_{vl}' / \sigma_{hl}'$ olduğu kolayca görülebilmektedir. Pratikte, K değeri elde edilmesi çok güç bir parametre olmakla beraber, genelde kazığın yerleştirilme şekline ve yerleştirilme sırasında deplasman olan toprak miktarına bağlı olarak değişmektedir. Değişik yöntemlere göre K değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kohezyonsuz Zeminlerde Değişik K değerleri (Meyerhof, 1976)

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

3.3.1.2 Kohezyonlu zeminler

Kohezyonlu zeminlerde, özellikle killerde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, killerin zamana bağlı oturma sonucu kayma mukavemetinin zamanla artacağıdır. Bu nedenle kısa dönem bazında $\phi=0$ durumuna göre hesap yapılır (Prakash ve Sharma, 1990). (3.2) no'lu denklemde verilen kazık uç direnci formülü kohezyonlu zeminlerde içsel sürtünme açısının 0'a eşit olması sebebiyle aşağıdaki gibi yazılır.

$$Q_p = A_p [cN_c + \gamma L N_q] \quad (3.11)$$

Kazığın ağırlığı çıkartılırsa, aynı denklem aşağıdaki şekle dönüşür:

$$Q_p = A_p [cN_c + \gamma L N_q] - \gamma \cdot L \cdot A_p \quad (3.12)$$

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

$$Q_p = A_p c N_c \quad (3.13)$$

Sürtünme direnci ise (3.8) no'lu denklem yardımıyla hesaplanır. Ancak bu denklem $\phi=0$ ve dolayısıyla $\delta=0$ koşulu için aşağıdaki şekilde yazılır.

$$f_s = c_a \quad (3.14)$$

Adezyon değerinin bulunması için literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

λ Yöntemi: Bu yöntem Vijagvergiya ve Focht (1972) tarafından geliştirilmiştir ve zeminin kazık çakılması sonucu oluşan yer değiştirmesinin her derinlikte pasif yanal gerilmeler oluşturduğu kabulüne dayanır. Buna göre kazık boyunca ortalama birim çevre direnci aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{av} = \lambda (\bar{\sigma}_v' + 2c_u) \quad (3.15)$$

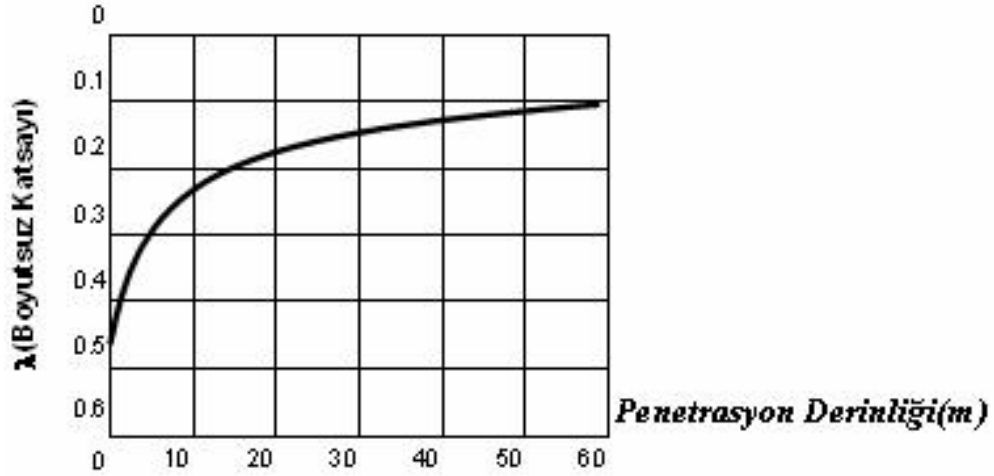
Bu denklemde,

$\bar{\sigma}_v'$: Kazığın uzunluğu boyunca ortalama efektif düşey gerilmeyi,

c_u : ortalama drenajsız kayma mukavemetini ifade etmektedir.

λ katsayısı kazık penetrasyon derinliği ile birlikte artmakta olup (Şekil 3.4) toplam sürtünme direnci aşağıdaki şekilde yazılır:

$$Q_s = p.L.f_{av} \quad (3.16)$$



Şekil 3.4 : λ katsayısının derinliğe bağlı olarak değişimi (Mandal, 2006)

Özellikle tabakalı zeminlerde $\bar{\sigma}_v'$ ve c_u değerlerinin hesaplanmasında dikkat edilmelidir. Drenajsız kayma mukavemetinin c_{u1} , c_{u2} olarak her tabaka için değiştiği bir örnekte ortalama drenaj kayma mukavemeti c_u 'nın hesaplanmasında,

$$c_u = \frac{(c_{u(1)} \cdot L_1 + c_{u(2)} \cdot L_2 + c_{u(3)} \cdot L_3 + \dots)}{\sum L} \quad (3.17)$$

Ortalama efektif gerilmenin hesaplanmasında ise,

$$\bar{\sigma}_v' = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + \dots)}{\sum L} \quad (3.18)$$

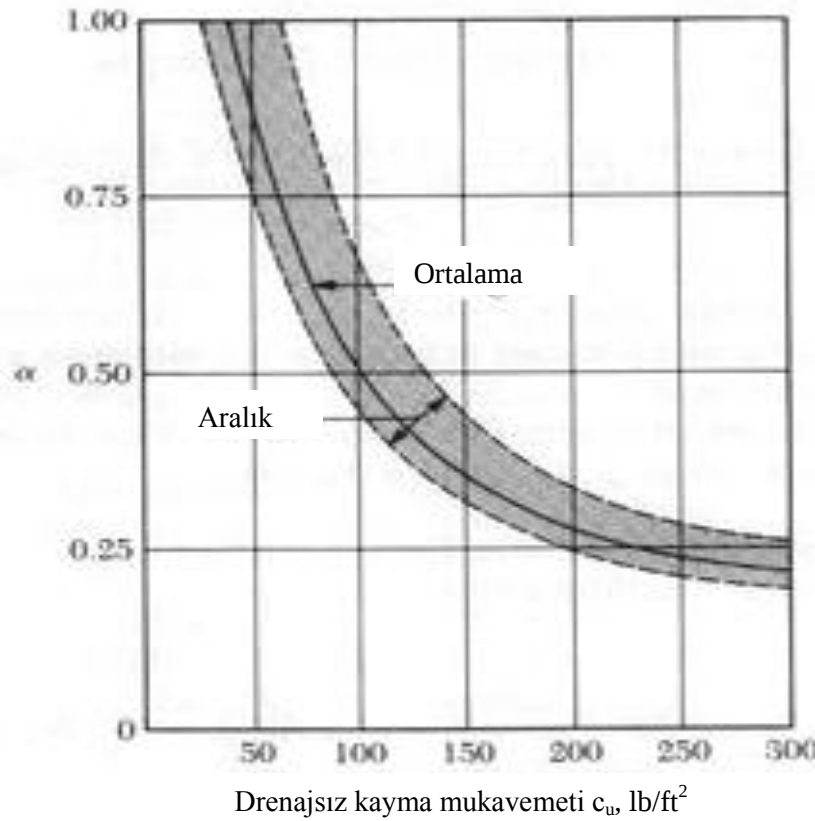
formülleri kullanılır. Burada A_1 , A_2 ... düşey efektif gerilme diyagramlarının her bir tabaka için alanını belirtmektedir.

α Yöntemi: Bu yönteme göre killi zeminlerde kazıkların birim çevre sürtünmesi yani adezyon değerinin drenajsız kayma mukavemetiyle orantılı olduğu kabul edilir ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$f_s = \alpha \cdot c_u \quad (3.19)$$

Bu denklemde α ampirik adezyon katsayısı olup, zeminin c_u değerine göre yer aldığı aralığı gösteren grafik Şekil 3.5’de verilmiştir. Bu yöntemle göre kazığın çevre sürtünmesi aşağıdaki gibidir.

$$Q_s = \sum \Delta L \cdot p \cdot \alpha \cdot c_u \quad (3.20)$$



Şekil 3.5 : α Adhezyon Katsayısının Kilin drenajsız kayma mukavemeti ile değişimi (Chen, 2007)

β Yöntemi: Kazıkların suya doymun kil zeminlerde çakılması durumunda kazıkların etrafındaki zeminde boşluk suyu basınçlarında ani bir artış meydana gelmekte, ancak bu basınç artışı kısa sürede sönümlenmektedir. Bu yöntemle göre meydana gelen boşluk suyu basıncı artışı normal konsolide killerde zeminin drenajsız kayma mukavemetinin 4 ila 6 katı arasında bir değer almakta olup, çabuk sönümlenmesi sebebiyle birim sürtünme direnci zeminin yoğrulmuş durumdaki efektif gerilme parametrelerini baz alarak hesaplanabilmektedir. Buna göre her derinlik için birim çevre sürtünmesinin hesabında aşağıdaki formül kullanılır.

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_v \quad (3.21)$$

Bu formülde

σ'_v : düşey efektif gerilme,

β : $K \cdot \tan \Phi_R$

Φ_R : yoğrulmuş kilin drenajlı sürtünme açısı

K : toprak basıncı katsayısı değerlerini ifade etmektedir.

Bölüm 3.3.1.1'de belirtildiği gibi, toprak basıncı katsayısı değerlerini belirlemek oldukça zor olmakla beraber, normal konsolide killeri için,

$$K = 1 - \sin \Phi_R \quad (3.22)$$

aşırı konsolide killeri için ise,

$$K = 1 - \sin \Phi_R \sqrt{OCR} \quad (3.23)$$

olarak alınabilir. Bu durumda (3.21), (3.22) ve (3.23) no'lu denklemlerin birleştirilmesi ile normal konsolide killeri için birim çevre sürtünmesi,

$$f_s = (1 - \sin \phi_R) \cdot \tan \phi_R \cdot \sqrt{OCR} \cdot \sigma'_v \quad (3.24)$$

formülüyle hesaplanır.

3.3.2 Dinamik formüller

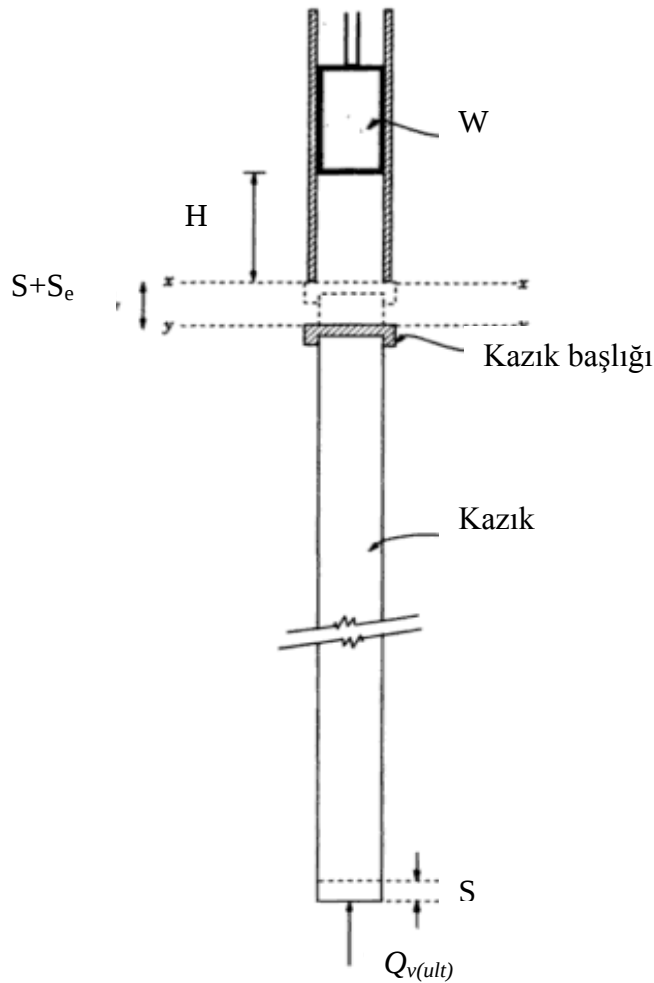
Kazıkların taşıma kapasitesinin dinamik yollarla elde edilmesi için kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar kazık çakma formülleri ve dalga denklem çözümleridir. Bu yöntem esasen, kazık çakılması sırasında kazık değişken zemin profili nedeniyle her zaman arzu edilen derinliğe inemediği için kazığın zemine penetrasyonu boyunca taşıma gücünü belirleyebilmek ya da kazığın belirlenmiş derinlikte istenen taşıma gücüne erişip erişmediğini kontrol etmektir (Das, 1999). Dinamik formüllerle elde edilen sonuçlar statik formüllere göre farklıdır ve daha az güvenilirdir. Bu formüller kum ve çakıl zeminlerde hem dinamik, hem de statik yüklere göre elde edilecek direnç hemen hemen aynı olmakta, ancak kil ve siltli zeminlerde zeminin sertliğine göre statik yöntemlerle hesaplanan taşıma gücüne göre çok farklı değerler elde edilmektedir.

Dinamik kazık formülleri kazık başlığına W ağırlığında ve H yüksekliğinde düşen bir tokmağın sağladığı enerji sayesinde kazık ucunun S kadar zemin içerisinde hareketi ve enerjinin korunumu yasasına dayanır (Şekil 3.6). Buna göre ana bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W.H = Q_{din}.S + \Delta E \quad (3.25)$$

Bu denklemde Q_{din} zeminin kazık çakılmasına karşı dinamik direncini, ΔE ise enerji kayıplarını temsil etmektedir. Enerji kayıpları sesi, gürültüyü, kazık başlığının elastik sıkışması S_e 'yi, zeminin yanal sıkışmasını ve diğer enerji kayıplarını kapsar.

En sık kullanılan dinamik bağıntı olan Engineering News bağıntısı aşağıda verilmiştir. Pratikte kullanılan dinamik kazık bağıntıları arasındaki temel fark enerji kayıplarının sembolize edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.6 : Dinamik Kazık Formülleri için kullanılan yaklaşım (Prakash ve Sharma,1990)

Engineering News Bağıntısı:

$$Q_{din} = \frac{W.H}{S + C} \quad (3.26)$$

Bu formül esas olarak kazık çakma işlemi sırasında enerji kaybının 0 olması halinde kazığın zeminde C uzunluğu kadar ilave bir ilerleme kaydedeceği varsayımına dayanmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990). Bu formülde izin verilebilir taşıma gücünün bulunması için kullanılacak güvenlik katsayısı 6 olarak verilmektedir.

Engineering News tarafından dinamik kazık formülleri yıllar boyunca revize edilmiş ve enerji kayıplarının optimum şekilde yansıtılmasına çalışılmıştır. Bu formülün en son revize edilmiş hali aşağıdaki gibidir (Das, 1999). E terimi tokmak verimlilik katsayısını ve n değeri tokmak ile kazık başlığı arasındaki çarpma sayısını simgelemekte olup bu değerlerin değişik kazık ve tokmak tipleri için değişimi Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir.

$$Q_{din} = \frac{E.W.H}{S + C} \cdot \frac{W + n^2W_p}{W + W_p} \quad (3.27)$$

Çizelge 3.2 : E değerleri (Bowles, 1997)

E	Kazık Tipi
0,75–1,0	Serbest düşmeli şahmerdan
0,75–0,85	Tek tesirli şahmerdan
0,85	Çift tesirli şahmerdan
0,85–1,0	Dizel motorlu şahmerdan

Çizelge 3.3 : n değerleri (ASCE, 1941)

n	Kazık Tipi
0,4–0,5	Demir tokmak ve başlıksız beton kazık
0,3–0,4	Çelik kazık ve ahşap yastık
0,25–0,3	Ahşap kazık

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

Dinamik kazık formüllerinin önemli bir dezavantajı da, tüm yükün kazık uç direnci tarafından karşılandığı varsayımı ile hareket edilmesidir. Ancak siltli ve killi zeminlerde çevre direnci derinliğe bağlı olarak arttığından dinamik formüller bu zeminlerde güvenilir sonuçlar vermemektedir (Terzaghi ve Peck, 1968). Bu sebeple bu formüller yardımıyla elde edilen değerler, mutlaka arazi yükleme deneyleri veya statik formüllerle karşılaştırılmalıdır.

3.3.3 Arazi deneylerinden elde edilen bağıntılar

Kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş numune almanın zorluğu sebebiyle, zeminin kayma direnci ve dolayısıyla taşıma gücü arazi deneylerinden elde edilen verilerden ampirik formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir. Ancak bu kazık taşıma gücünü hesaplamak için güvenilirliği en az yöntem olup, mutlaka diğer yöntemlerle desteklenmesi gerekir.

3.3.3.1 Standart penetrasyon deneyi (SPT)

Meyerhof (1976), çakma kazıkların taşıma gücünün standart penetrasyon deneyi sonuçlarına göre aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabileceğini ileri sürmüştür.

Uç direncinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$Q_p = 40 \cdot \bar{N}_{cor} \cdot L / D_f \leq 400 N_{cor} \text{ (kN)} \quad (3.28)$$

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

Sürtünme direnci için ise yine Meyerhof (1976) tarafından geliştirilen aşağıdaki formül kullanılmaktadır. Bu formül ancak yüksek deplasmanlı çakma kazıklarda geçerlidir.

$$f_{av} = 2 \cdot \bar{N}_{cor} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (3.29)$$

ve

$$Q_s = p \cdot L \cdot f_{av} \quad (3.30)$$

3.3.3.2 Koni penetrasyon deneyi (CPT)

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

$$Q_p = A_p \cdot q_c \quad (3.31)$$

Bu bağıntıda q_c koni penetrasyon deneyinden elde edilen uç direncidir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu deneyin kazık çakılma işlemini gerçeğe oldukça yakın bir şekilde temsil etmesinden dolayı elde edilen veriler kazık taşıma gücünün belirlenmesinde rahatlıkla kullanılabilir.

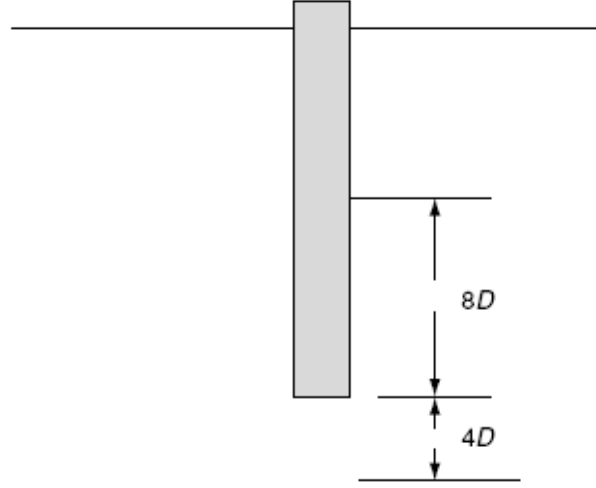
AASHTO (1996) tarafından ise koni penetrasyon deneyinden kazık uç direncinin elde edilmesi için Schmertmann ve Nottingham (1975) tarafından geliştirilen aşağıdaki yöntem kullanılmaktadır.

$$q_p = R_1 \cdot R_2 \cdot \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad (3.32)$$

Burada q_{c1} ve q_{c2} Şekil 3.7'de gösterildiği gibi sırasıyla kazık ucunun altında ve üstünde bulunan etki alanları içerisinde ani pik noktaların haricinde minimum ortalama değerleri temsil etmektedirler. R_1 değeri drenajsız kayma mukavemetine bağlı bir katsayı olup Çizelge 3.4'den elde edilebilmektedir. R_2 değeri ise elektrikli koniler için 1.0, mekanik koniler için 0.5 olarak kabul edilmektedir.

Çizelge 3.4 : R_1 değerinin değişimi (Gunaratne, 2007)

c_u (kPa)	R_1
<50	1.0
75	0.64
100	0.53
125	0.42
150	0.36
175	0.33
200	0.30



Şekil 3.7 : Kazık üst ve alt etki bölgeleri (Gunaratne, 2007)

Çevre direncinin belirlenmesinde ise yine aynı şekilde koni penetrasyon deneyinden elde edilen sürtünme direnci yaklaşık olarak kazık sürtünme direnci olarak kullanılabilir (Cai ve diğ, 2008).

3.3.3.3 Menard presiyometre deneyi (MPT)

Presiyometre testi zeminin birçok mühendislik özelliğini ve yanal deformasyon davranışını doğrudan belirlenmesine olanak tanıdığı için sıkça tercih edilen ve kullanışlı bir arazi deneyidir. Bu deneyde uç direnci doğrudan aşağıdaki bağıntıyla elde edilmektedir. Formülde yer alan K_q taşıma gücü katsayısının Df/B oranına göre değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu diyagramda 1 no’lu eğri silt ve killeri, 2 no’lu eğri sert kil, sıkı silt, gevşek kum ve aşınmış kayaları, 3 no’lu eğri kum, çakıl ve kayaları ve 4 no’lu eğri çok sıkı kum ve çakılları göstermektedir (Canadian Foundation Engineering Manual, 1978).

$$Q_p = A_p \cdot [q_0 + K_q (P_L - P_0)] \quad (3.33)$$

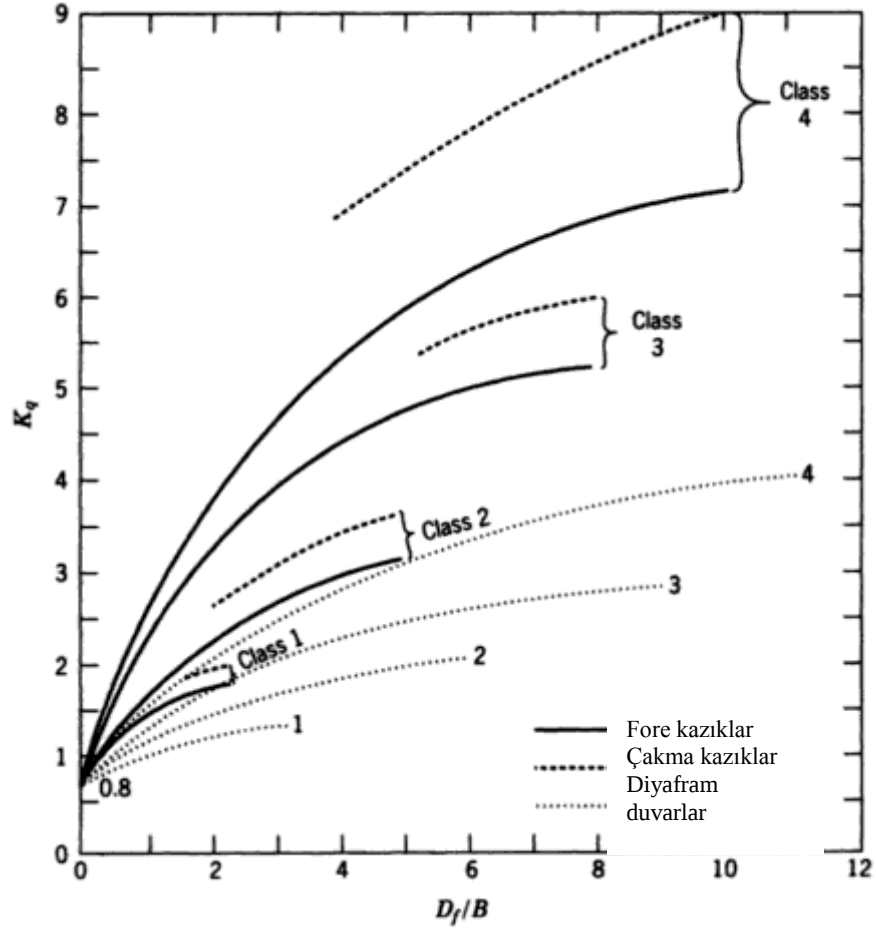
Bu bağıntıda,

q_0 : zemin içerisinde kazık uç kotunda oluşan sükunetteki yanal gerilme

K_q : Şekil 3.8’den elde edilen taşıma gücü faktörü

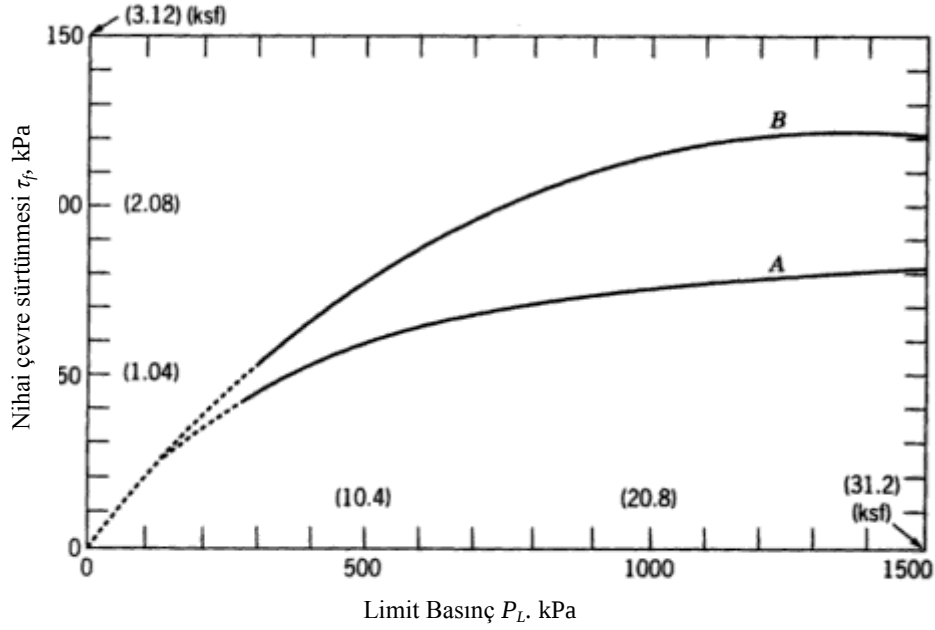
P_L : limit basınç değeri (PMT testinden elde edilir)

P_0 : başlangıç basınç değerini temsil etmektedir (PMT testinden elde edilir).



Şekil 3.8 : K_q değerinin değişimi (Canadian Foundation Engineering Manual, 1978)

Aynı şekilde sürtünme direnci f_s de presiyometre değerlerinden elde edilebilir. Çevre direncinin limit presiyometre basıncına göre değişimi Şekil 3.9’te verilmiştir. Buna göre, A eğrisi kohezyonlu zeminlerde zemine tamamen gömülü ahşam ve beton kazıklar için doğrudan, çelik kazıklar için 0.75 ile çarpılarak, kohezyonsuz zeminlerde deplasmana yol açmayan beton kazıklar ve deplasmana sebep olan çelik kazıklar için doğrudan, deplasmana yol açmayan çelik kazıklar için 0.5 ile çarpılarak, B eğrisi ise kohezyonsuz zeminlerde deplasmana sebep olan beton kazıklar için doğrudan kullanılır (Baguelin, 1978).



Şekil 3.9 : f_s değerinin değişimi (Canadian Foundation Engineering Manual, 1978)

3.3.4 Kazık yükleme deneyi ile taşıma gücü tayini

Kazık yükleme deneyi kazıkların düşey ve yanal yönde taşıma güçlerini, ayrıca çekmeye karşı dayanımlarını belirlemek için kullanılan ve gerçeğe en yakın sonuçları veren yöntemdir. Bu yöntem esas olarak kazığın uygun bir düzeneğe sürekli olarak yüklenecek yer değiştirmelerin ölçümü ve buna göre kazığın taşıma gücünün ve nihai yükünün bulunması prensibine dayanır.

Kazık yükleme testi için esas olarak 2 yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler;

1. Sabit Artan Penetrasyon (CRP)
2. Sürekli Yükleme (ML) olarak ikiye ayrılır. Sürekli yükleme yöntemi de kendi içerisinde hızlı sürekli yükleme (QM) ve yavaş sürekli yükleme (SM) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Hızlı sürekli yükleme testinde proje taşıma gücünün %300'üne kadar 20 kademede (her bir artış proje yükünün %15'ine eşittir) ve her aralıkta 5 dakika kalmak suretiyle kazığa uygulanır ve daha sonra uygulanan yük dört eşit adımda ve her adımda 5 dakika kalmak suretiyle boşaltılır. Yavaş sürekli yükleme testinde ise proje taşıma gücünün %200'üne kadar 8 aralıkta (her bir artış proje yükünün %25'ine eşittir) ve her aralıkta oturma hızı 0.25mm/h oluncaya kadar (ancak aralıklarda bekleme süresi 2 saati geçmemelidir) kalmak suretiyle kazığa uygulanır, maksimum yükte 24 saat

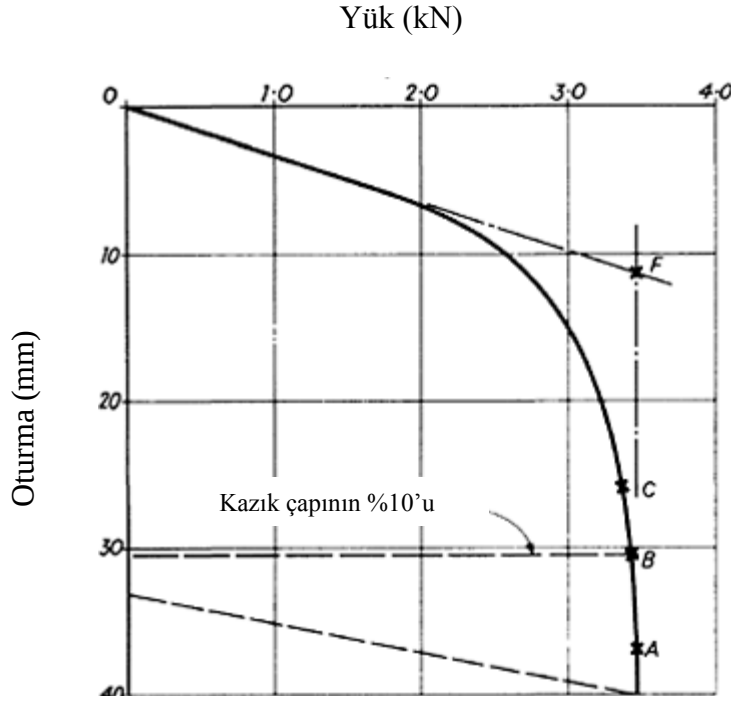
beklenir ve daha sonra uygulanan yük sekiz eşit adımda ve her adımda 1 saat kalmak suretiyle boşaltılır. Ancak daha sonra kazık aynı yüke dört aralıkta (her bir artış proje yükünün %50'sine eşittir) ve her adımda 20 dakika beklemek suretiyle tekrar yüklenir ve bu yüke ulaşıldıktan sonra kadar tasarım yükünün %10'una eşit aralıklarda ve her aralıkta 20 dakika beklenecek göçme meydana gelinceye kadar yükleme işlemine devam edilir. Hızlı sürekli yükleme testi yaklaşık 3-5 saat içerisinde tamamlanabilirken bu süre yavaş sürekli yükleme testi için 40-70 saat arası sürebilmektedir. Hızlı sürekli yükleme testi daha hızlı ve daha ekonomik olmakla beraber çok kısa bir zaman içerisinde gerçekleştirildiği için oturmalar hesaplanamamaktadır (ASTM, 1981) .

Sabit Artan Yükleme (CRP) yönteminde kazık ucundaki oturma hızı sabit bir değerde kalacak şekilde (1.25 mm/min) yüklenir ve bu hızda kalmak için gerekli kuvvet sürekli olarak kaydedilir. Deney toplam penetrasyon 50-75mm olana kadar devam ettirilir. Bu yöntem de oldukça hızlı olmakla beraber uç kazıkları için sert tabakada ilerlemek zor olduğundan dolayı tercih edilmemektedir.

Bu iki yönteme ek olarak İsveç Kazık Komisyonu'nun geliştirerek önerdiği İsveç Döngüsel Yöntemi de kullanılmaktadır. Bu metotta kazık önce dizayn yükünün 1/3'üne kadar yüklenir. Daha sonra dizayn yükünün 1/6'sı boşaltılır ve bu yükleme boşaltma döngüsü 20 kez tekrar edilir. Daha sonra yük %50 arttırılır ve bu yükleme boşaltma döngüsü 20 kez daha tekrarlanır. Bu iki adım göçme oluşana dek uygulanır ve her 20 döngüde yük %50 arttırılır. Bu yöntem oldukça zahmetlidir ve ayrıca döngüler sırasında kazığın davranışında değişiklikler oluşabilmektedir. Bu yüzden de sadece döngüsel yüklemenin çok önemli olduğu özel projelerde tercih edilmektedir.

Genel olarak kazık taşıma gücünü test etmek için Sürekli Yükleme Metodu uygulanmaktadır. Sabit Oranlı Penetrasyon ise genel olarak kazık nihai taşıma gücünü tespit etmek için uygulanır ve bu nedenle daha ziyade kazık ön yükleme veya araştırma çalışmalarında kullanılır (Sonuvar, 2007).

Bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla “yük-oturma” ve “zaman-oturma” grafikleri çizilir. Yük-oturma grafiğine örnek Şekil 3.10'te verilmiştir.



Şekil 3.10 : Kazık Yükleme Testi Yük-Oturma Grafiği (Tomlinson, 1994)

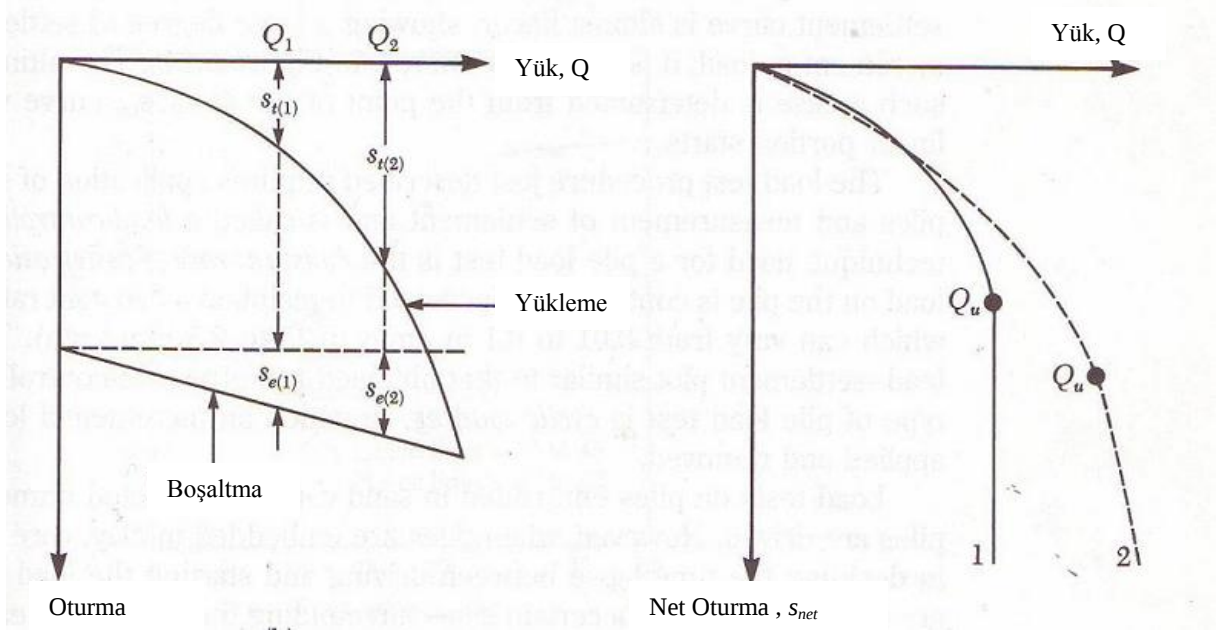
Yük-oturma ve zaman-oturma grafiklerinden taşıma gücü hesaplamak için literatürde değişik bir çok yöntem mevcuttur. Ancak Tomlinson (1994) ve Das (1999) tarafından önerilen yöntem pratik ve akılda kalıcıdır. Bu iki yönteme göre herhangi bir Q_1 yükü için yük-oturma eğrisinden net oturma aşağıdaki gibi bulunur:

$$s_{net(1)} = s_{t(1)} - s_{e(1)} \quad (3.34)$$

Burada $s_{t(1)}$, Q_1 yükü için kazığın toplam oturması, $s_{e(1)}$ ise kazığın elastik oturmasını temsil etmektedir. Değişik yükler için elde edilen net oturma değerleri yardımıyla yük-net oturma grafiği çizilir. Bu grafiğe bir örnek Şekil 3.11'te verilmiştir. Çizilen grafik hem (1) hem de (2) eğrisine benzeyebilir. Bu durumda eğrinin asimptotik değer aldığı (1) ya da eğiminin değişerek çok az bir yük artışında çok büyük oturmaların meydana gelmeye başladığı değer (2) nihai taşıma gücü değeri olarak kabul edilir.

3.4 Tekil Kazığın Oturma Analizi

Kazıkların oturma analizleri kazığın etrafındaki zeminde oluşan gerilme dağılımı tam olarak bilinemediğinden ve kazıktan zemine oluşan yük aktarımının uç ve gövde arasında hangi oranda paylaşıldığı hakkında net bir bilgi olmadığından oldukça karmaşık bir konudur.

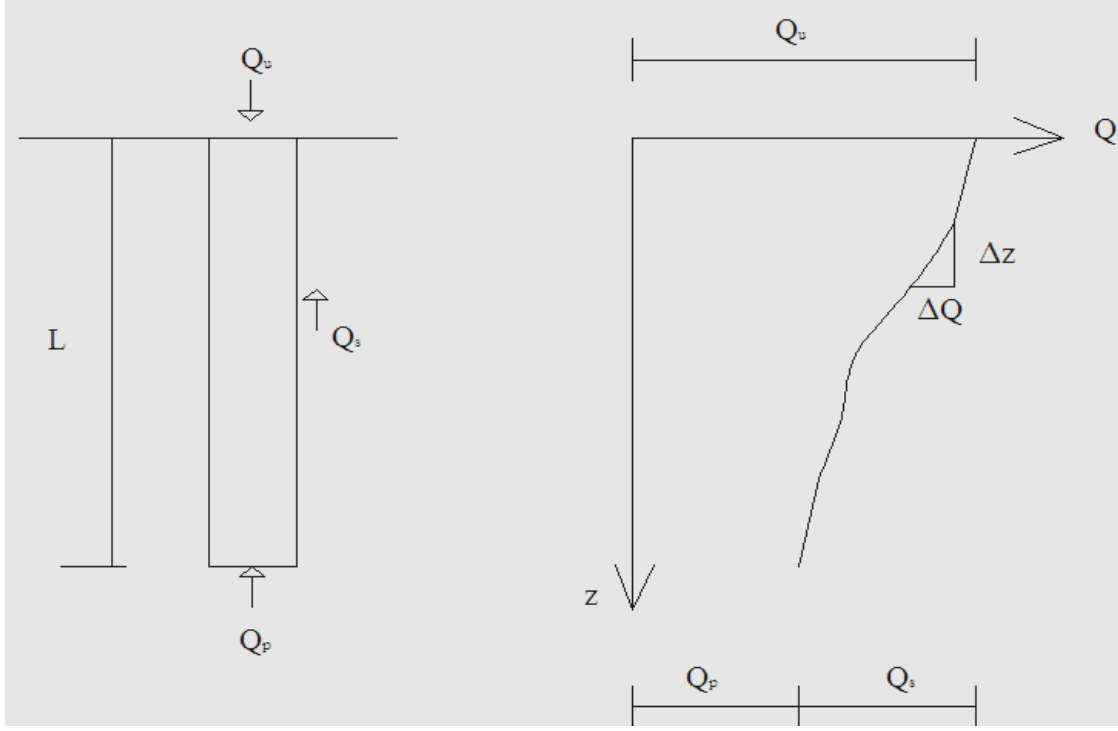


Şekil 3.11 : Kazık Yükleme Deneyi'nden Taşıma Gücünün Bulunması (Das,1999)

Kazıkların yük transfer mekanizmasını anlamak için Şekil 3.12'de gösterilen grafik incelendiğinde, kazığa $Q=Q_u$ yükü uygulandığı takdirde bu yükün derinlik boyunca nasıl değiştiği görülmektedir. Buna göre zemin yüzeyinden itibaren L derinliğine aktarılmış olan yük, kazığın uç direncine, L derinliğindeki toplam yük azalması ΔQ_u ise çevre sürtünmesine eşit olmaktadır. Ayrıca çevre sürtünmesini mobilize etmek için gereken zemin ile kazık arası rölatif yer değiştirme kazık boyutları ve zemin tipinden bağımsız olarak 5–10 mm arasında değişirken, kazık uç direnci kazığın kazık çapının %10-25'i arası bir değerde yer değiştirmesi sonucu mobilize olmaktadır. Bu durumda çevre direnci, uç direncinden çok daha önce mobilize olmakta ve daha fazla yük taşımaktadır. Woo ve Yuang (1994) tarafından yapılan kazık yükleme deneylerinde, fore kazığın ancak 150 ton ve üzerinde yüklendiği takdirde uç direnci tarafından yük taşımaya başladığı görülmüştür.

Görüldüğü üzere, kazıklarda uç ve sürtünme direnci arasındaki yük paylaşımı konusunda henüz aydınlığa kavuşamamış noktalar mevcuttur. Bu sebeple kazıkların oturması için ancak yaklaşık çözümler ile hesap yapılabilmektedir. Bu bağlamda üç temel metot kullanılmaktadır:

1. Yarı-ampirik metot
2. Ampirik metot
3. Kazık yükleme deneyi



Şekil 3.12 : Kazıkların yük transfer mekanizması

Yarı-ampirik yöntem: Bu çözüm metodunda kazığın oturmasının 3 bileşenden meydana geldiği varsayımı yapılmaktadır.

$$s_t = s_e + s_p + s_{ps} \quad (3.35)$$

Bu bağıntıda;

s_t : Kazığın toplam oturmasını,

s_e : Kazığın elastik oturmasını,

s_p : Kazık ucunun oturmasını,

s_{ps} : Kazığın gövde boyunca taşınan yükten dolayı oturmasını sembolize etmektedir.

Bu üç terim aşağıda gösterilen formüller yardımıyla ayrı ayrı hesap edilirler.

$$s_e = \frac{(Q_{pa} + \alpha_s \cdot Q_{fa})L}{A_p \cdot E_p} \quad (3.36)$$

Burada,

Q_{pa} : Servis yükü altında kazık ucu tarafından taşınan yük

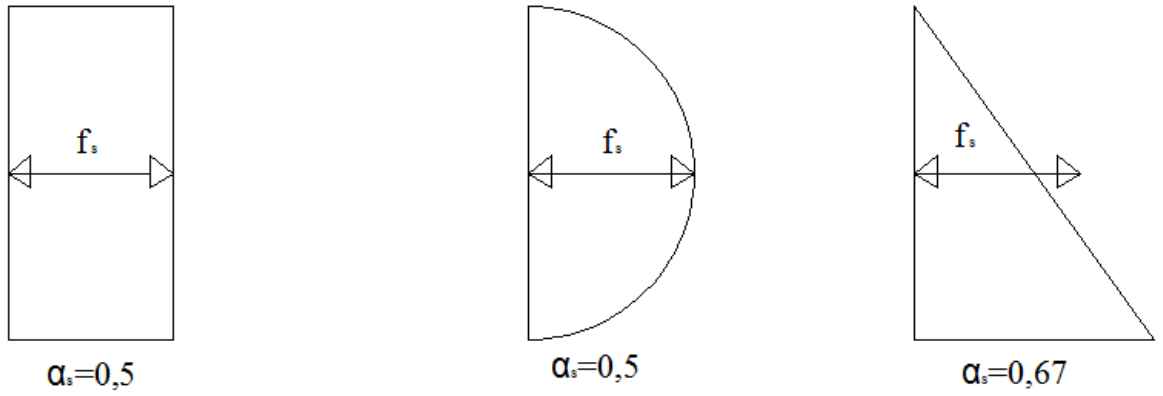
Q_{fa} : Servis yükü altında kazık gövdesi tarafından taşınan yük

L : Kazık uzunluğu

A_p : Kazık kesitinin alanı

E_p : Kazığın elastisite modülü

α_s : Kazık gövdesi boyunca çevre sürtünmesinin dağılımına bağlı bir katsayıyı temsil etmekte olup, bu katsayının değişimi Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13 : α_s faktörünün değişimi (Vesic, 1977)

$$s_p = \frac{Q_{pa} \cdot C_p}{B \cdot q_p} \quad (3.37)$$

$$s_{ps} = \frac{Q_{fa} \cdot C_s}{D_f \cdot q_p} \quad (3.38)$$

Bu denklemlerde,

B : Kazık çapı,

D_f : Kazık gömülü derinliği,

q_p : nihai uç direnci

$$C_s : 0,93 + 0,16\sqrt{D_f / B} \cdot C_p \quad (3.39)$$

C_p : ampirik katsayı (Farklı zemin tipleri için değerleri Çizelge 3.5’te verilmiştir).

Çizelge 3.5 : C_p değerlerinin değişimi (Prakash ve Sharma, 1990)

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

Ampirik yöntem: Vesic (1970) tarafından geliştirilen bu metotta tekil bir kazığın basınç altında oturmasının aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabileceği belirtilmektedir.

$$s_t = \frac{2,5.B}{100} + \frac{(Q_{va}.L)}{A_p.E_p} \quad (3.40)$$

Bu denklemde,

s_t : Kazığın toplam oturması,

Q_{va} : Uygulanan kazık yükü,

L : Kazık uzunluğu,

B : Kazık çapı,

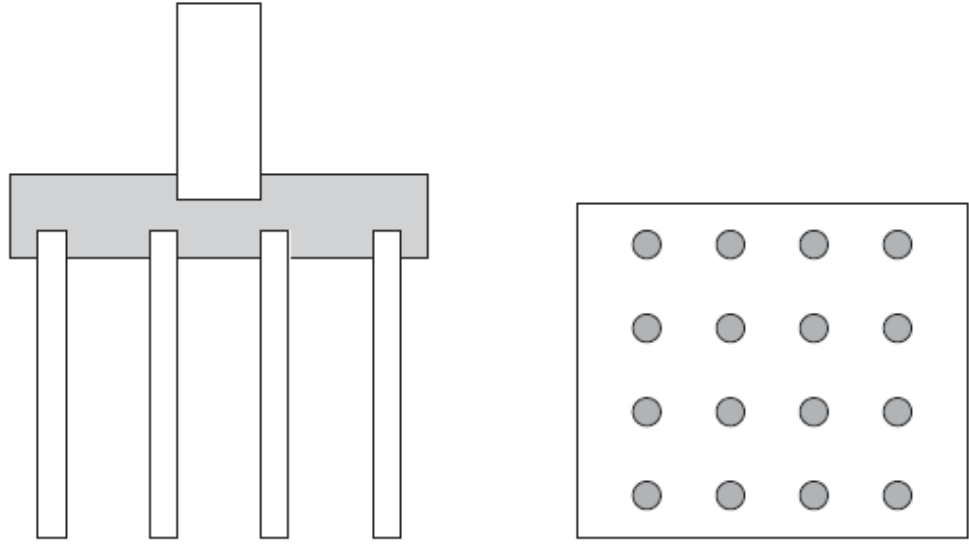
A_p : Kazık kesitinin alanı,

E_p : Kazığın elastisite modülünü belirtmektedir.

Kazık Yükleme Deneyi: Bölüm 3.3.4 'te belirtildiği gibi, tekil kazıkların oturmasını belirlemek için en uygun yöntem kazık yükleme testidir. Bu test sonucunda elde edilen veriler bize kazığın uzun vadedeki davranışı hakkında önemli ipuçları vermektedir.

3.5 Kazık Gruplarının Tasarımı

İnşaat sektöründe çoğu zaman kazıklı temeller üstyapıdan gelecek yükü karşılayabilmek için grup olarak projelendirilirler ve kazık başlığı genelde bu kazıkların hepsini kapsayacak şekilde bir plak olarak imal edilir (Şekil 3.14). Bu durumlarda kazık grubu için tasarım yapmak gerekebilir. Tasarım aşamasında göz önüne alınması gereken kriterler ile ilgili detaylı bilgi aşağıdaki bölümlerde verilmektedir.



Şekil 3.14 : Tipik bir kazık grubunun plan ve kesitleri (Rajapakse, 2008)

Literatürde kazıklar arasındaki uzaklığın kazık çapının 3 ila 7 katı arasında olması halinde bu kazıkların kazık grubu olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Kazıklar arası uzaklık imalat sırasında güçlük yaşanmasını engellemek ve kazıkların birbirini negatif etkilemesini engellemek için kazık çapının 3 katından daha az olmamalıdır (Vesic, 1977). Ayrıca pratikte bazı uygulamalarda imal edilen kazıkların düşeyden sapma göstererek uç seviyesinde birbirine yakınlığı ve bu yüzden bu seviyede gerilmelerin çok arttığı, sonuç olarak bu bölgede özellikle killi zeminlerde aşırı miktarda oturma gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu yaklaşmanın gerilme artışına sebebiyet vermemesi için kazıkların merkezden merkeze uzaklığının kazık çapının en az 3 katı ve 1 m'den az olmaması gerektiği belirtilmektedir (Tomlinson, 2004).

Bir kazık grubunun taşıma gücünün verimliliği aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} \quad (3.41)$$

Burada, $Q_{g(u)}$ kazık grubunun taşıma kapasitesini, $\sum Q_u$ kazık grubundaki her bir kazığın taşıma güçlerinin toplamını simgelemektedir. Verimlilik hesaplanırken Şekil 3.14'deki veya benzeri figür esas alınır.

Sürtünme kazıklarının verimlilik hesaplarında, özellikle kumlu zeminlerde çoğu mühendis basitleştirilmiş bir kabule göre analiz yapmaktadır. Kazıklar birbirlerine

olan uzaklıklarına göre ya $L_g \cdot M_g \cdot L$ boyutlarında bir blok halinde, ya da tekil kazıklar gibi davranacaklardır. İlk durum halinde kazıkların taşıma gücü yaklaşık olarak;

$$Q_{g(u)} \approx f_{av} \cdot p_g \cdot L \quad (3.42)$$

değerine eşittir. Burada p_g , kazık grubu bloğunun çevresi olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$p_g = 2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)d + 4D \quad (3.43)$$

İkinci durum halinde ise kazık taşıma gücü şu değeri almaktadır:

$$Q_u \approx f_{av} \cdot p \cdot L \quad (3.44)$$

Buradaki p ise tekil kazığın çevresine eşittir. Bu durumda kazık grubunun taşıma gücünün verimliliği (3.41) nolu denklemin yardımıyla hesaplanmakta ve aşağıdaki değeri almaktadır.

$$\eta = \frac{f_{av} \cdot [2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)d + 4D] \cdot L}{n_1 \cdot n_2 \cdot f_{av} \cdot p \cdot L} \quad (3.45)$$

$$\eta = \frac{2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{n_1 \cdot n_2 \cdot p} \quad (3.46)$$

Kabaca bir yaklaşımla, kazık aralığı d 'nin belirli bir değerden fazla olması durumunda, $\eta > 1$ olacaktır. Bu durumda kazıklar tekil davranış sergileyecektir. Bu yüzden, $\eta < 1$ için kazık grubunun taşıma gücü;

$$Q_{g(u)} = \eta \sum Q_u \quad (3.47)$$

ve $\eta \geq 1$ için kazık grubunun taşıma gücü;

$$Q_{g(u)} = \sum Q_u \quad (3.48)$$

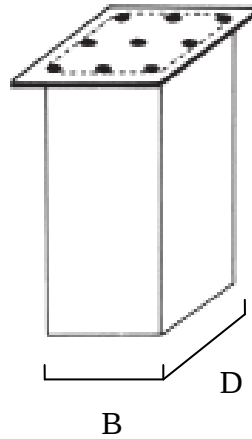
olarak hesaplanmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde pratikte tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamı kazık grubunun taşıma gücüne eşit kabul edilmektedir.

Kohezyonlu zeminlerde ise tam tersi bir durum geçerlidir, yani kazık grubunun taşıma gücü, tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamına eşit olmamaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde kazık grubunun yumuşak killer veya gevşek kum içinde imal edilmesi, ancak sert kil tabakasında sonlanması halinde imal edilen kazıkların tek bir kazığa göre uygun güvenlik katsayısı ile dizayn edilmesi durumunda kazık grubunda toptan kayma göçmesi durumuna rastlanmamaktadır. Ancak oturma için gerekli tahkikler mutlaka yapılmalıdır.

Ancak pratikte istenmeyen bir durum olmasına rağmen eğer kazıkların yumuşak kil tabakası içerisinde sonlanması gerekiyorsa, bu durumda kazık grubu için “blok göçmesi” durumuna karşı tahkikler yapılmalıdır. Blok hareketine bir örnek Şekil 3.15’de gösterilmektedir. Bu durumda kazık bloğunun taşıma gücü aşağıdaki bağıntıda verilmiştir.



Şekil 3.15 : Kazık Gruplarında Blok Hareketi (Fleming ve diğ., 2009)

$$Q_{BL[g(u)]} = p.L.\bar{c} + 1,3.c_b.s.N_c.A_b \quad (3.49)$$

Burada;

P : kazık bloğunun çevresi ($2.(B+D)$),

L : kazık uzunluğu,

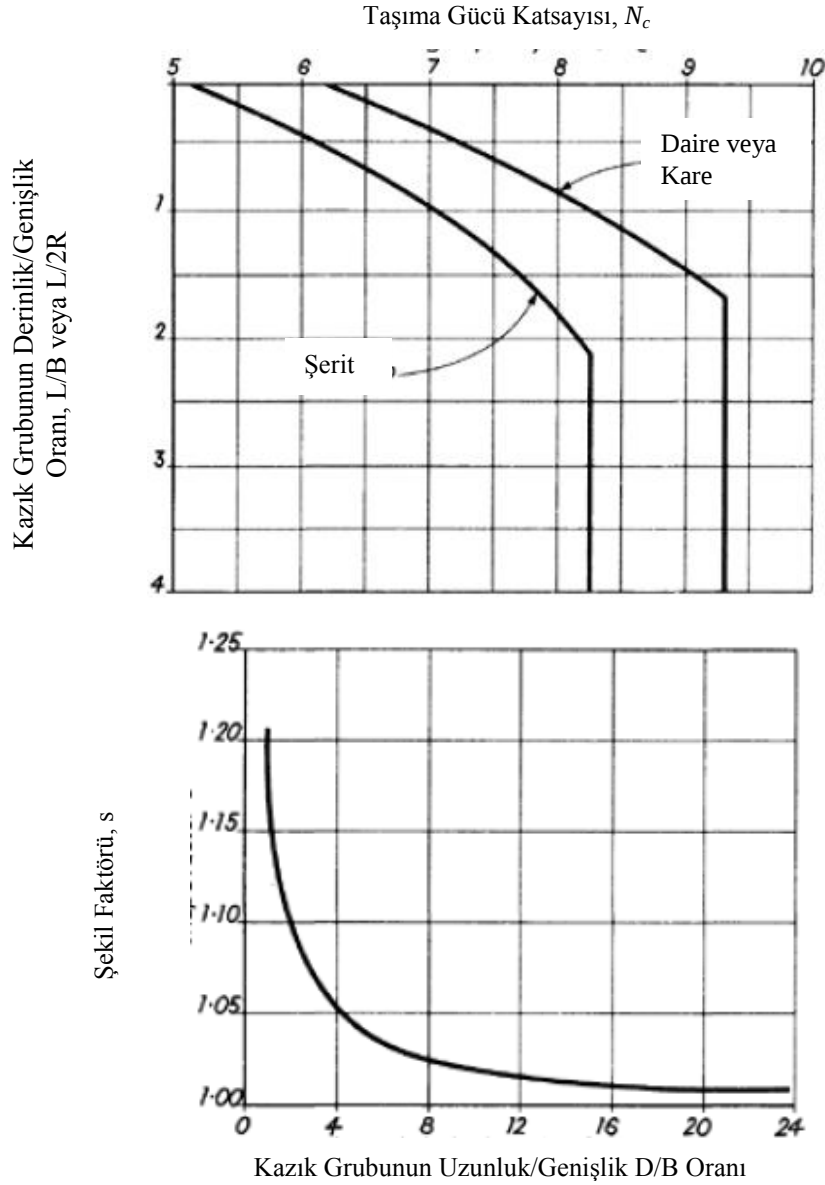
$\bar{c}$: kazık gövde uzunluğu boyunca kil zeminin ortalama kohezyon değeri,

c_b : kazık ucundaki zeminin kohezyon değeri,

s: şekil faktörü,

N_c : taşıma gücü katsayısı,

A_b : kazık bloğunun kesitinin alanı (B.D) değerlerini göstermektedir. N_c ve s değerlerinin değişimi Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

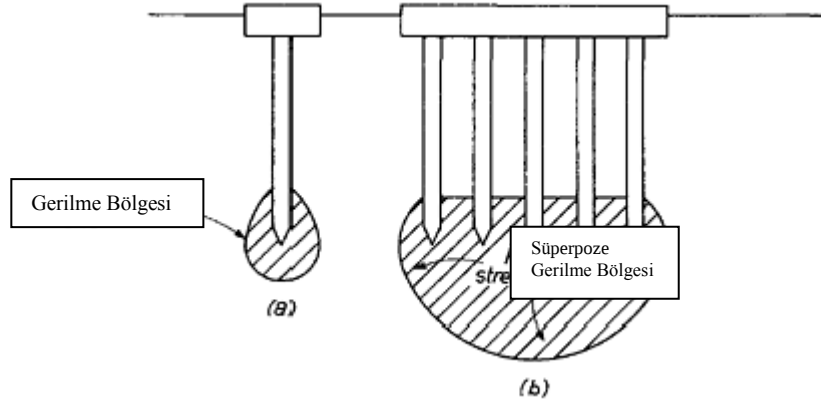


Şekil 3.16 : (a) Şekil Faktörü s ve (b) Taşıma Gücü Katsayısı N_c değerlerinin değişimi (Tomlinson, 2004)

3.6 Kazık Gruplarının Oturması

Kazık gruplarında, hem elastik hem de zamana bağlı konsolidasyon oturmaları söz konusu grubu oluşturan tekil kazıkların oturma değerlerinden fazla olacaktır. Bunun sebebi, kazıklardan zemine aktarılan gerilmelerin kazık grubu için tekil kazıklara

nazaran çok daha derin bir alanda etkimeleridir. Şekil 3.17’de gösterildiği gibi kazıklar tarafından zemine aktarılan gerilmelerde süperpozisyon oluşacağından artış olacak ve kazık taşıma kapasitesinde tekil kazıklara göre azalma ve oturma miktarlarında artış meydana gelecektir (Das, 1999).



Şekil 3.17 : Kazık Gruplarında Oluşan Gerilmelerin Süperpozisyonu
(Tomlinson,2004)

Kazık gruplarının oturmalarında bir çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Poulos, 2006):

1. Ampirik formüllere dayanan yöntemler (Skempton, 1953; Vesic, 1970; Meyerhof, 1976),
2. Yapı zemin etkileşimini ve gerilme süperpozisyonunu dikkate alan yaklaşımlar (Poulos ve Davis, 1980),
3. Tekil kazıklara ait yük-oturma grafiklerini grup etkileşim faktörleri yardımıyla değiştirmeye dayanan yaklaşımlar,
4. Kazık grubuna etkiyen ortalama yük altında bir adet kazığın oturmasının oturma oranı R_s ile çarpılarak grup etkisini göze almaya dayanan yaklaşımlar,
5. Kazıkların yüzeyden itibaren belirli bir derinlikte yer alan bir radye temel tarafından sembolize edilebileceği varsayımına dayanan eşdeğer radye yöntemi,
6. Kazık grubunun ve arasındaki zeminin bir bütün olarak algılanarak grubun bir tekil kazık gibi çözümlenmesine dayanan blok yöntemi, bu yöntemde kazık ve zeminin rijitliği hesaplanır ve ortalama oturma değeri elde edilir.
7. Sonlu elemanlar metodu (SEM) ve sonlu farklar metodu (SFM) gibi nümerik yöntemler.

Kazık gruplarının konsolidasyon oturmalarının hesaplanmasında en sık kullanılan yöntemler olan basitleştirilmiş yöntemler yukarıda bahsedildiği gibi eşdeğer radyejeneral temel yöntemi ve kazık gruplarının blok halinde davrandığı farz edilerek çözümlenen eşdeğer ayak yöntemidir. Bu çalışma kapsamında bu iki yöntemden ve etkileşim faktörü yönteminden kısaca bahsedilecektir.

3.6.1 Eşdeğer radyejeneral temel yöntemi

Bu yöntem, kazık grubunun taşıdığı yükün, yüzeyden itibaren kazık boyunun $2/3$ 'ü ile tamamı arasında değişen bir derinlikte yer alan ve grubun kapladığı alana eşit büyüklükte tamamıyla esnek bir davranış sergileyen bir radyejeneral temel tarafından taşındığı ve de kazık gövdesinden zemine aktarılan çevre sürtünmesinin kazık grubunun çevresinden kazığın yük aktarım şekline ve zemin tipine bağlı olarak $1/4$ ile $1/2$ arasında değişen bir eğimle yayıldığı kabulüne dayanır (Şekil 3.18). Bu kabulden sonra radye temel için oturma analizi yapılarak oturmaların yaklaşık değeri elde edilir. Bundan sonraki adımda iri daneli zeminlerde sadece elastik oturma göz önüne alınırken, ince daneli zeminlerde ise konsolidasyon oturması ve elastik oturma beraber hesaplanır.

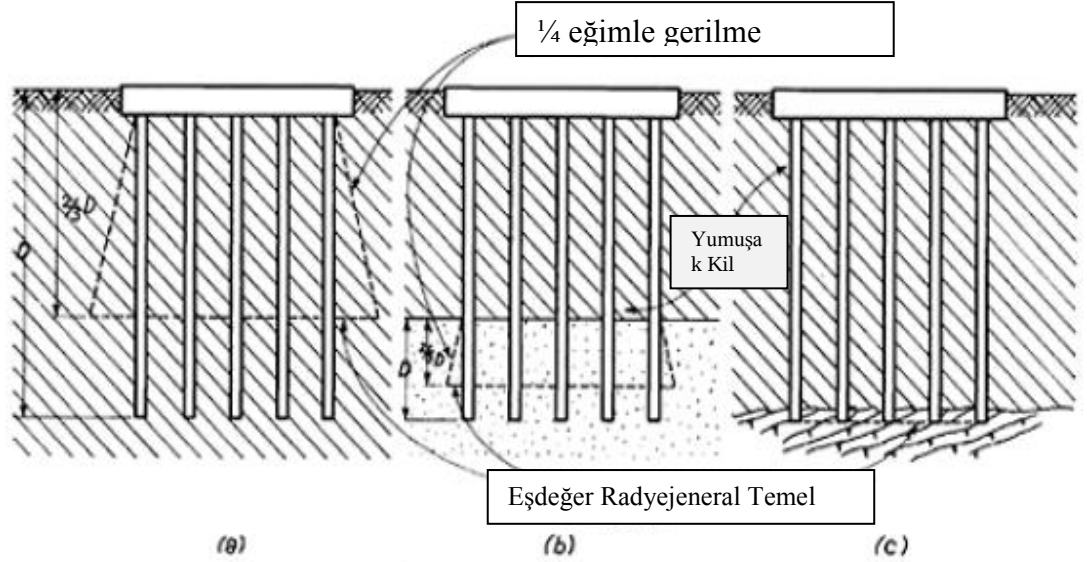
Eğer kazık başlığındaki oturma miktarı bulunmak isteniyorsa, eşdeğer radyejeneral temel metodu ile bulunan oturma miktarına Bölüm 3.4'te gösterilen (3.36) denklemi ile hesaplanan kazık başlığının elastik oturma miktarı ilave edilir.

Eşdeğer radyejeneral temel yöntemi çoğu durumda arazideki yükleme testlerinden elde edilen sonuçlarla uyum göstermekle beraber, kazık aralıklarının etkisini ve kazıkların grup etkileşimini yeterince dikkate almaması bu yöntemin zayıf taraflarıdır. Bu sebeple karmaşık geometriye sahip ve değişken uzunlukta kazıkların oluşturduğu kazık gruplarında dikkatle kullanılmalıdır (Geopublications of Hong Kong, 2006).

3.6.2 Eşdeğer ayak yöntemi

Bu yöntemde kazık grubu ve arasındaki zemin, birlikte çalışan ve aynı rijitliğe sahip tek bir kazık gibi düşünülerek, özellikle kazık grubunun altında sıkışabilir zemin tabakasının bulunması halinde, bu tabakada meydana gelebilecek konsolidasyon oturmalarını hesaplama amacıyla kullanılmaktadır. Bu durumda eşdeğer kazığın uzunluğu kazık grubundaki kazıkların boyuna, genişliği ise kazık grubunun kapladığı

alanın (arada kalan zeminin kapladığı alan dahil) kareköküne eşit olmaktadır. Ancak Poulos (2002) tarafından yapılan çalışmalarda eşdeğer çapı bulmak için alanın karekökü 1.13 ila 1.27 arasında değişen bir katsayıyla çarpılmalıdır. Yukarıda belirtilen değerlerden küçük olanı uç kazıkları için, büyük olanı ise sürtünme kazıkları için kullanılmaktadır.



Şekil 3.18 : Kazıklarda Gerilme Aktarımları a) Sürtünme Kazıkları, b) Uç ve Sürtünme Kazıkları, c) Uç Kazıkları (Tomlinson, 2004)

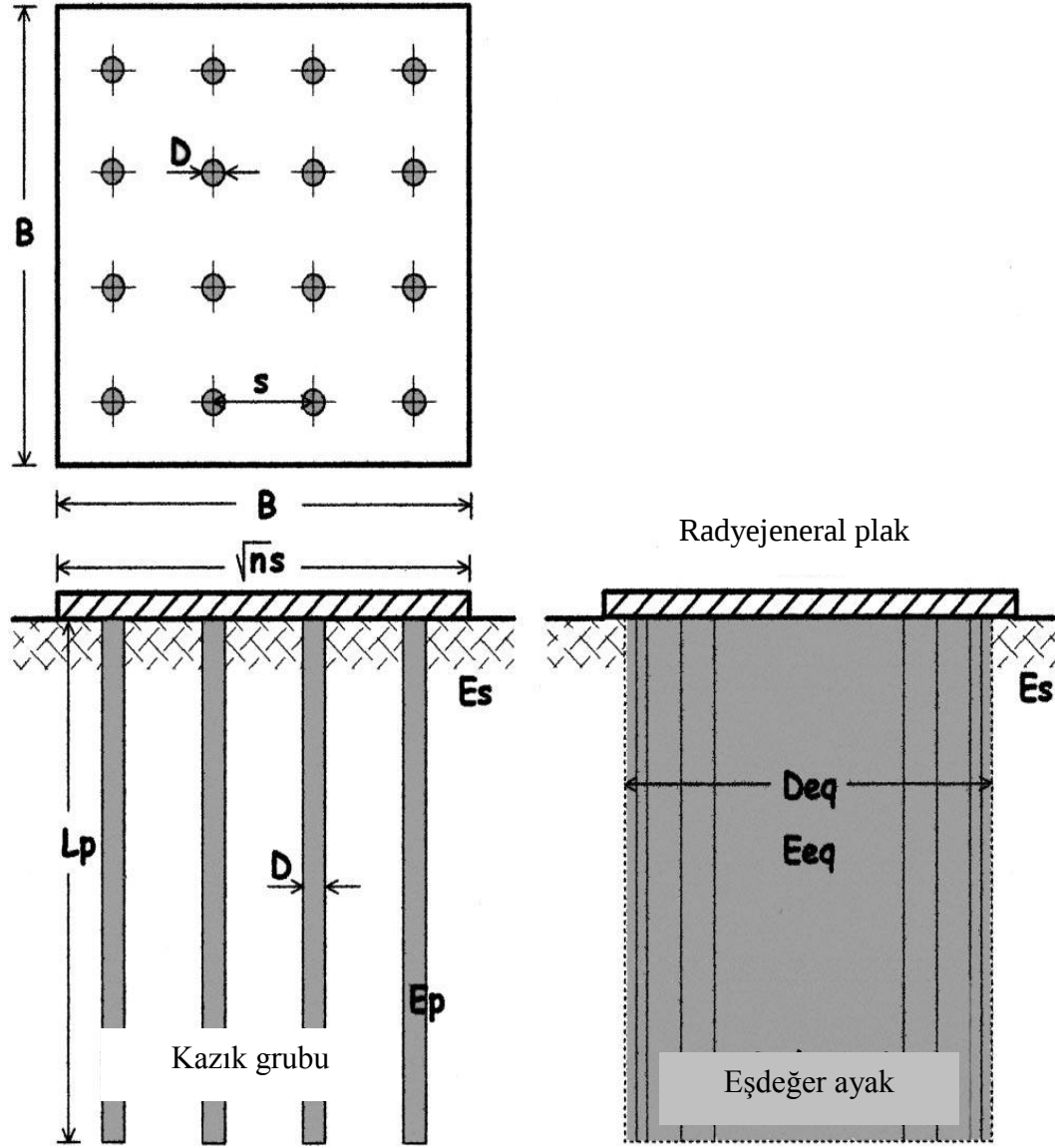
Eşdeğer kazığın boyutları belirlendikten sonra Bölüm 3.4'te belirtildiği gibi tekil kazıkların oturması için kullanılan hesap metodlarından birinin yardımıyla oturma analizi yapılmakta ve kazık grubu için ortalama oturma değerleri elde edilmektedir.

Randolph (1994) tarafından eşdeğer ayak yönteminden elde edilen sonuçların gerçeğe yakınlığının belirlenmesinde kullanılmak üzere *cephe oranı* (R) adında bir parametre geliştirilmiştir. Bu parametre aşağıda belirtilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$R_s = \sqrt{\frac{n \cdot s}{L}} \quad (3.50)$$

Burada n kazık adedini, s kazıkların merkez noktaları arasındaki mesafeyi ve L kazık uzunluğunu simgelemektedir. Randolph (1994)'a göre, $R_s < 3$ olması halinde eşdeğer ayak yöntemi rijitlik değerini gerçeğe göre fazla öngörmekte, ancak $R_s \geq 1$ olması ve kazıklar arası mesafenin kazık çapının 5 katından fazla olmaması durumunda

doğruluk oranı daha yüksek yöntemlerle yapılan çözümler ile karşılaştırıldığında hata payı %20'lik bir sınır içerisinde kalmaktadır.



Şekil 3.19 : Eşdeğer Kazık Yöntemi (Castelli ve Maugeri, 2002)

3.6.3 Etkileşim faktörü yöntemi

Bu yöntem bir kazık grubu içerisinde yer alan her bir kazıkta meydana gelen oturma miktarının grupta yer alan diğer kazıklar tarafından etkilendiği kabulüne dayanır (Şekil 3.20). Buna göre n adet kazıktan oluşan bir kazık grubunda i kazığının oturması aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

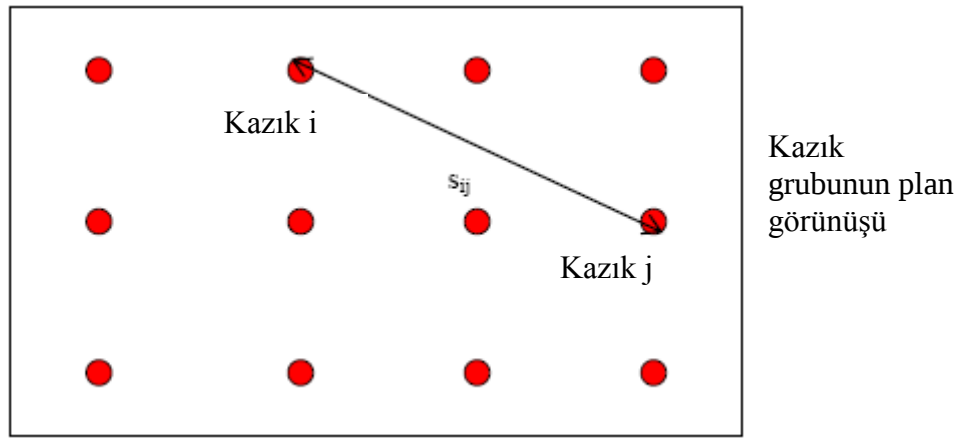
$$s_i = \sum_{j=1}^n (P_{av} \cdot s_1 \cdot \alpha_{ij}) \quad (3.51)$$

Bu bağıntıda;

P_{av} : kazık grubu içerisindeki her kazığa gelen ortalama yük,

s_1 : tekil kazığın birim yük altında oturması (kazık esnekliği)

α_{ij} : i kazığı için grup içerisindeki herhangi bir j kazığı ile arasındaki s_{ij} mesafesine bağlı olarak değişen etkileşim faktörünü simgelemektedir.



Şekil 3.20 : Etkileşim Faktörü Yöntemi (Poulos, 2006)

Bu bağlamda grupta yer alan n adet kazık için toplam n adet denklem ve ayrıca genel denge denklemleri yazılabilir. Oluşabilecek iki durum için de bu denklemler kolaylıkla çözülebilmektedir:

1. Her bir kazığa gelen yükün bilinmesi durumunda kazıklarda oluşacak oturmalar doğrudan hesaplanabilecektir. Ancak yüklerin farklı olması durumunda her kazıkta oluşacak oturma miktarı farklı olacaktır.
2. Rijit, yani farklı oturmaya izin vermeyecek bir kazık başlığının kullanılması halinde her kazıkta oluşacak oturma aynı olacak, ancak bu durumda da her kazığa üstyapıdan gelen yük farklılık gösterecektir.

Poulos ve Davis (1980) tarafından geliştirilen orijinal yöntemde etkileşim faktörleri sınır elemanlar yöntemi yardımıyla hesaplanmakta ve α ve d/D eksen takımları üzerinde grafik olarak gösterilmektedir.

Poulos (1993) tarafından yapılan çalışmalarda, 3 adet vaka analizi sırasında etkileşim faktörü yöntemi ve eşdeğer radyejeneral temel yöntemi ile yapılan oturma hesapları

karşılaştırılmış ve etkileşim faktörü yönteminin az sayıdan oluşan kazık gruplarında oldukça güvenilir olduğu, ancak kazık sayısının artması durumunda eşdeğer radye metodu ile elde edilen değerlerin test sonuçlarına daha yakın değerler verdiği belirlenmiştir.

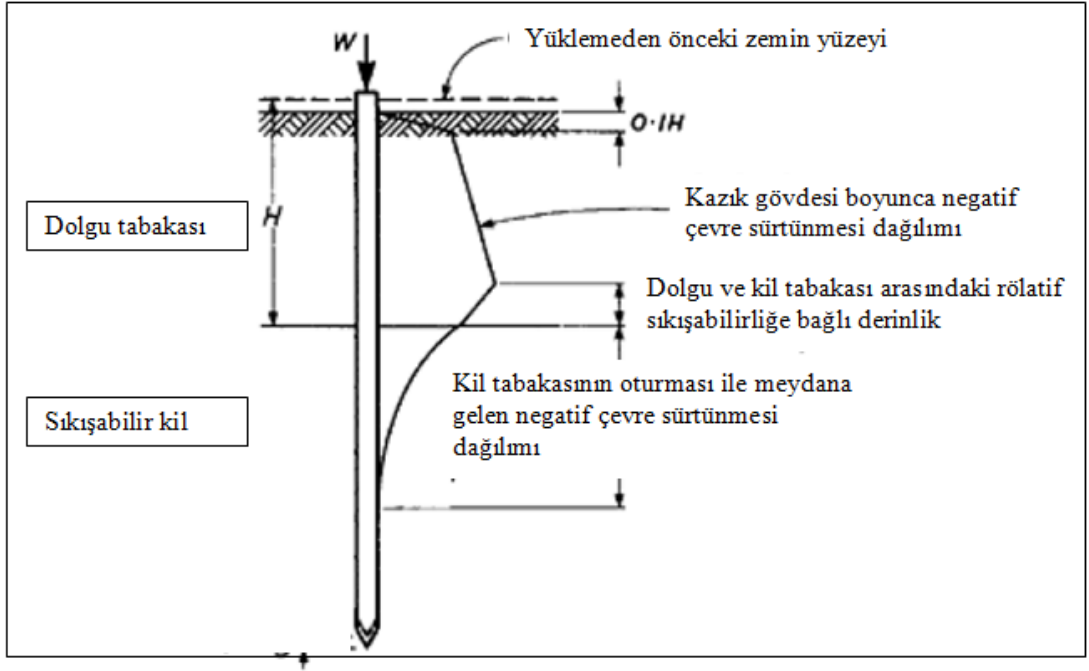
Kazık gruplarında esas olarak oturma problemlerine nadiren rastlanmaktadır. Genelde zeminde kabarma ve/veya şişme, kazık aralığının yakın olduğu durumlarda düşeyden sapma oluşan kazıklar arasında çakışma, komşu bina ve altyapılara zarar verme problemleri ile karşılaşmaktadır. Ancak kazık gruplarının yine de oturma tahkiklerinin yapılması, özellikle kazık grubunda yük dağılımının eşit olmaması ya da zeminin heterojen yapısı nedeniyle oluşabilecek farklı oturmalara karşı önlemlerin alınması gerekmektedir.

3.7 Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesi

Kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamlamamış zeminlerde veya sıkışabilen zeminler üzerinde yapılan dolgularda kazık çevresindeki zeminde zaman içerisinde konsolidasyon oturmaları meydana gelebilmektedir. Kazığı çevreleyen zeminin herhangi bir nedenle oturması durumunda kazık tasarımında dikkate alınan çevre sürtünmesinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Sürtünme kazıklarında zeminle aynı miktarda oturma oluşmakta, ancak uç kazıklarında çevre zeminin düşey yönde kazıktan daha fazla oturması sonucu pozitif çevre sürtünmesi önce azalmakta, belli bir noktada sıfırlanmakta ve daha sonra negatif değerler almaktadır. Bunun bir sonucu olarak kazıklı temel sistemi üst yapı yüklerinin yanı sıra adezyon etkisiyle kazık çevresindeki zemini de taşımaktadır (Şenol ve Sağlamer, 1993).

Negatif çevre sürtünmesi kazık ile zemin arasındaki rölatif yer değiştirmeye bağlı olarak artar. Vesic (1977) tarafından söz konusu rölatif yer değiştirmenin yaklaşık 15 mm'ye erişmesi durumunda negatif çevre sürtünmesi tamamen mobilize olur.

Sıkışabilir kil tabaka ve üzerinde yer alan kalın bir dolgu tabakası içerisinde imal edilen kazıklarda oluşacak negatif çevre sürtünmesinin idealize edilmiş dağılımı Şekil 3.21'te gösterilmektedir.



Şekil 3.21 : Killi Zeminlerde Negatif Çevre Sürtünmesi Dağılımı
(Tomlinson,2004)

Negatif çevre sürtünmesinin hesaplanmasında nötr noktanın bulunması ve β yöntemi en sık kullanılan yöntemler olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerden Vesic (1977) tarafından geliştirilen nötr nokta yöntemi, kil tabaka üzerinde granüler dolgu zeminin yer aldığı durumlarda kullanılır ve kazık gövdesi boyunca Şekil 3.22’de görüldüğü gibi negatif çevre sürtünmesinin 0 değerine ulaştığı noktanın bulunarak yüzeyden itibaren bu noktaya kadar olan derinlik boyunca oluşan adezyon kuvvetinin hesaplanması prensibine dayanır.

Bowles (1982) tarafından nötr noktanın yer aldığı derinliğin aşağıdaki gibi hesaplanabileceği belirtilmiştir.

$$L_1 = \frac{(L - H_f)}{L_1} \cdot \left[\frac{L - H_f}{2} + \frac{\gamma'_f \cdot H_f}{\gamma'} \right] - \frac{2\gamma'_f H_f}{\gamma'} \quad (3.52)$$

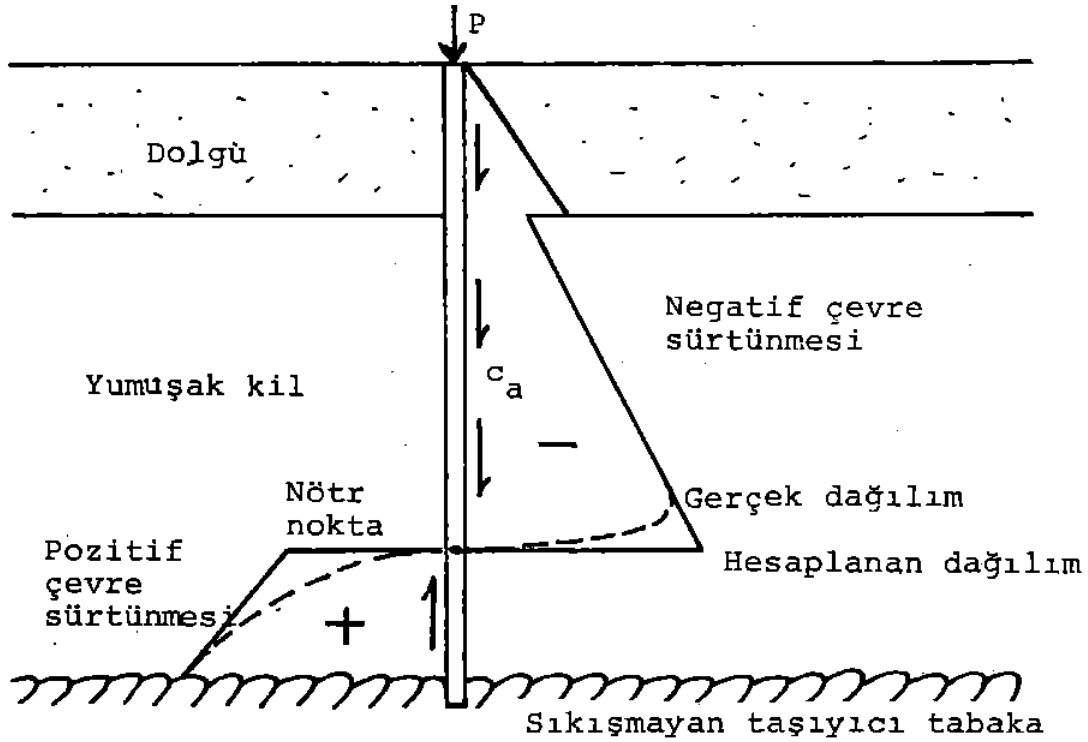
Bu bağıntıda γ'_f ve γ' sırasıyla dolgunun ve kil tabakasının su altındaki birim hacim ağırlığını temsil etmektedir. Uç kazıkları için nötr derinliğin, kazık boyuna eşit olduğu kabul edilmektedir (Das, 1999). Eşitliğin yardımıyla nötr derinlik elde edildikten sonra $z=0$ ila $z=L_1$ derinlikleri arasında her noktadaki birim negatif çevre sürtünmesi aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$f_n = K_0 \tan \delta \cdot \sigma'_v \quad (3.53)$$

Bu değer yardımıyla kazık boyunca etkiyen negatif çevre sürtünmesi ise şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{u(neg)} = \int_0^{L_1} p \cdot f_u \cdot dz \quad (3.54)$$

Bu bağıntıda p kazığın çevresini belirtmektedir.



Şekil 3.22 : Kazıklarda Negatif Çevre Sürtünmesinin Nötr Nokta Yöntemi ile Hesaplanması (Şenol ve Sağlamer, 1993)

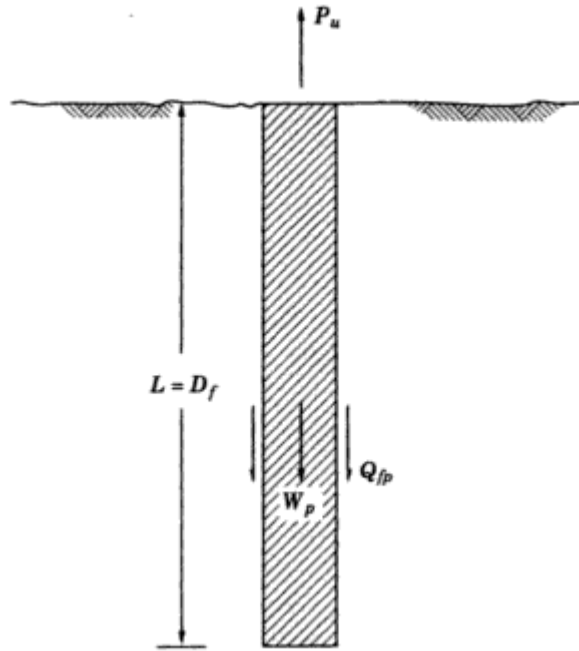
Granüler zemin üzerinde yer alan kil dolgu tabakası içerisinde meydana gelen negatif çevre sürtünmesinin hesaplanmasında kullanılan bir yöntem olan β yöntemi ise Bölüm 3.3.1.2’de açıklanan ve kazığın çevre direncini hesaplamakta kullanılan β yöntemi ile büyük ölçüde benzemektedir. Tek fark burada yoğrulmuş kilin değil tabii haldeki kilin içsel sürtünme açısının kullanılıyor olması ve elde edilen değerlerin ters işaretli olmasıdır. Bu durumda bulunacak olan negatif çevre sürtünmesi değeri aşağıdaki gibidir.

$$Q_{u(neg)} = \int_0^{H_f} p \cdot f_u \cdot dz \quad (3.55)$$

Bu denklemin (3.54) nolu denklemden farkı, burada negatif çevre sürtünmesinin dolgu kalınlığı boyunca, yukarıda ise yüzeyden itibaren dolgu tabakanın kalınlığı da dahil olmak üzere nötr noktaya kadar olan mesafe boyunca hesaplanıyor olmasıdır.

3.8 Kazıkların Çekme Taşıma Gücü

Kazıkların çekme taşıma gücü esas olarak basınç taşıma gücüne benzer bir yöntemin yardımıyla hesaplanır. Burada tek fark uç taşıma kapasitesinin kazığın ampatmanlı imal edilmesi durumu haricinde dikkate alınmamasıdır.



Şekil 3.23 Kazıklarda Çekme Kapasitesi (Prakash, 1990)

Kazık çekme kapasitesi hesaplarında kullanılan formül aşağıdaki gibidir. Bununla ilgili temel kavramlar Şekil 3.23’de gösterilmektedir.

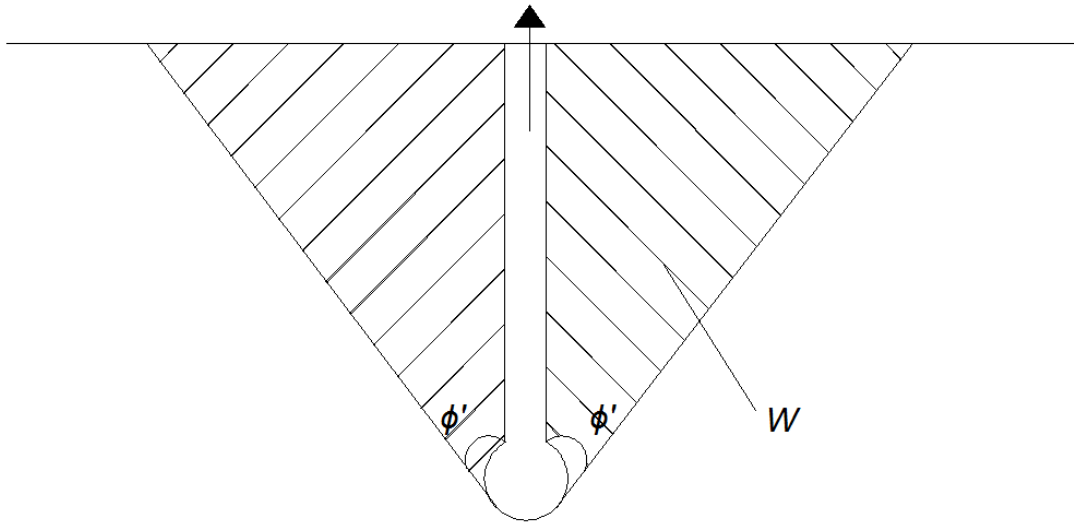
$$P_u = Q_{fp} + W_p \quad (3.56)$$

Burada P_u nihai çekme kapasitesini, Q_{fp} çekme durumunda nihai shaft sürtünmesini ve W_p kazığın ağırlığını simgelemektedir. Ancak çevre direnci hesabında kullanılan K , α , β gibi katsayıların belirlenmesi esnasında, çekme kazıklarının imalatı sonrasında

zeminde basınca çalışan kazıklardan farklı bir gerilme dağılımının olduğu gözönüne alınmalıdır. Bunun yanısıra, Franke kazıkları gibi uç kısmında kesit alanı genişleyen çekme kazıkları etrafında oluşan göçme yüzeyinin geometrik büyüklüğü konusunda çeşitli varsayımlar mevcuttur. Bunlardan en pratik olanı kazık uç kısmından zemin yüzeyine doğru ϕ' açısı ile genişleyen bir yüzeydir (Şekil 3.24). Bu durumda göçme yüzeyi kazık etrafında oluşan bir koninin yüzey alanına eşit olacaktır. Çekme kazığı etrafında mobilize olan zemin kütlesinin büyüklüğü ise aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot t^3 \tan^2 \phi' \quad (3.57)$$

Bu çalışma kapsamında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için çekme kapasitesinin hesaplanması ayrı ayrı ele alınacaktır.



Şekil 3.24 : Çekme kazıklarında mobilize olan zemin kütlesinin geometrik büyüklüğü.

3.8.1 Kohezyonsuz zeminler

Kohezyonsuz zeminlerde çekme kapasitesi Bölüm 3.3.1.1’de anlatılan kohezyonsuz zeminlerde kazıkların basınç kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan (3.10) denklemi yardımıyla hesaplanabilmektedir. Buna göre birim çevre sürtünmesi;

$$f_s = K \cdot \sigma'_{vl} \tan \delta \quad (3.58)$$

ve nihai shaft sürtünmesi

$$Q_{fp} = \sum_{L=0}^{L=L} A.f_s = K.\tan \delta.p.\sum_{L=0}^{L=L} \sigma'_{vl}.\Delta L \quad (3.59)$$

olarak hesaplanır. Ancak yapılan çalışmalarda, kazıkların çekme kapasitelerinin kısa vadede basınç kapasitesine eşit olmakla beraber, Radharkrishna ve Adams silindir kesitli kazıklarda 3-4 aylık bir süre içerisinde kazıkların çekme kapasitelerinin basınç kapasitelerinin %50'si civarlarına düştüğünü göstermiştir. 1986 tarihli Foundations and Earth Structures Design Manual DM-7.2 sayısında ise kazıkların çekme kapasitesinin basınç kapasitesinin 2/3 katına eşit kabul edilebileceği bildirilmiştir. Bu durumda kohezyonsuz zeminlerde kazıkların nihai shaft sürtünmesi aşağıda belirtilen formülle hesaplanabilmektedir.

$$Q_{fp} = \frac{2}{3} \sum_{L=0}^{L=L} A.f_s = \frac{2}{3} K.\tan \delta.p.\sum_{L=0}^{L=L} \sigma'_{vl}.\Delta L \quad (3.60)$$

Buna göre kohezyonsuz zeminlerde kazıkların izin verilebilir çekme kapasiteleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q_{u,all} = \frac{\frac{2}{3} K.\tan \delta.p.\sum_{L=0}^{L=L} \sigma'_{vl}.\Delta L}{FS} + W_p \quad (3.61)$$

3.8.2 Kohezyonlu zeminler

Kohezyonlu zeminlerde kazık taşıma gücü Bölüm 3.3.1.2'de detaylı olarak anlatılmıştı. Yukarıda da belirtildiği gibi kohezyonlu zeminlerde kazık çekme kapasitesi, çevre sürtünmesi (3.14) no'lu denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu durumda nihai shaft sürtünmesinin formülü aşağıdaki gibidir.

$$Q_{fp} = \sum_{L=0}^{L=L} A.f_s = p.\sum_{L=0}^{L=L} c_a.\Delta L \quad (3.62)$$

3.9 Kazıkların Yanal Yükler Altında Davranışları

Kazıklı temeller pratikte genel olarak düşey yüklerin etkisinde bulunmak ve buna göre tasarlanmakla beraber, toprak basıncı, rüzgar, deprem veya yapı üzerinde seyreden taşıtların fren ve hızlanma etkisi ile yanal yüklere de maruz

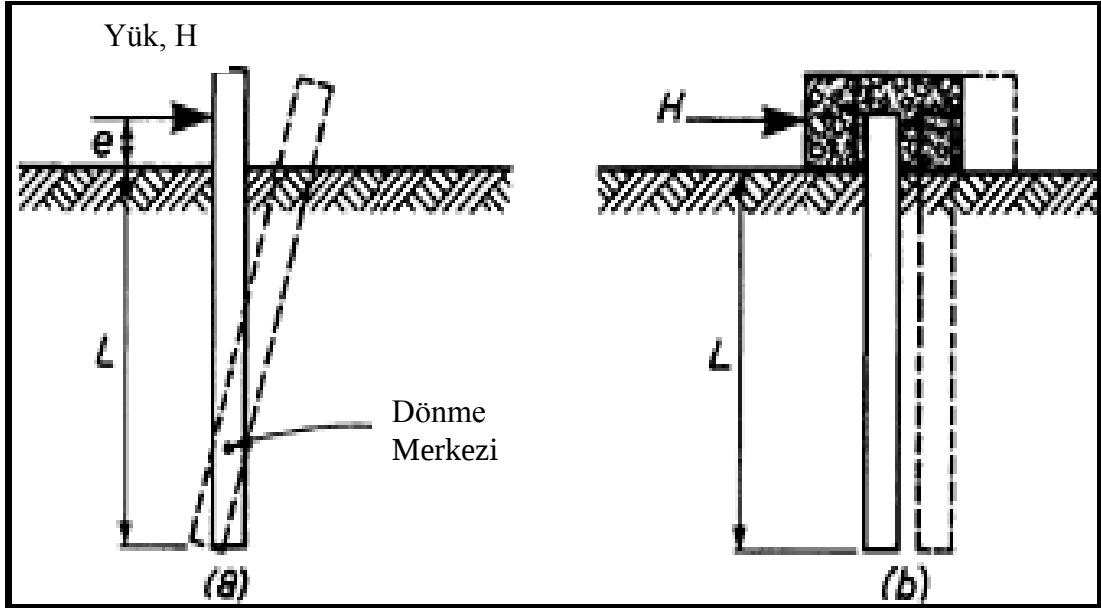
kalabilmektedirler. Kazıkların yanal yükler altındaki davranışları, 1960'ların ortalarına kadar belirsizliğini korumuştur. Tasarımcılar, bu döneme kadar kazıkları kazık çaplarının küçük olması nedeniyle daha çok düşey yüklere göre tasarlamışlardır. Önemli yanal yüklerin taşınması için eğimli kazıklar kullanılmıştır (Bowles, 1997). Bu sistemde yanal yükün etkimesi halinde, söz konusu yük eğimli kazıklardan birine sadece basınç yükü, diğerine ise sadece çekme yükü etkiyecek şekilde bileşenlere ayrılır ve bu kuvvetlerin büyüklüğü kuvvet üçgeni yardımıyla kolayca hesaplanabilir. Bu yüklerin geçici olması halinde, yükler zeminle tamamen temas halinde olması şartı ile kazık başlıklarına da taşınabilir (Tomlinson, 2004).

Genel anlamda, yanal yüklenmiş kazıklı temellerin davranışları, eksenel yüklenmiş kazıklı temellerin davranışlarından farklıdır. Zemin davranışının doğrusal olmaması ve kazıkların yarı rijit davranışları sonucu kazıklarda büyük deformasyonlar oluşmaktadır. Bu davranışların değerlendirilmesinde, çok daha karmaşık zemin-yapı etkileşimi analizlerine ihtiyaç gösteren yanal deplasmanların ince duyarlılıkla tahmin edilmesi yoluna gidilmektedir.

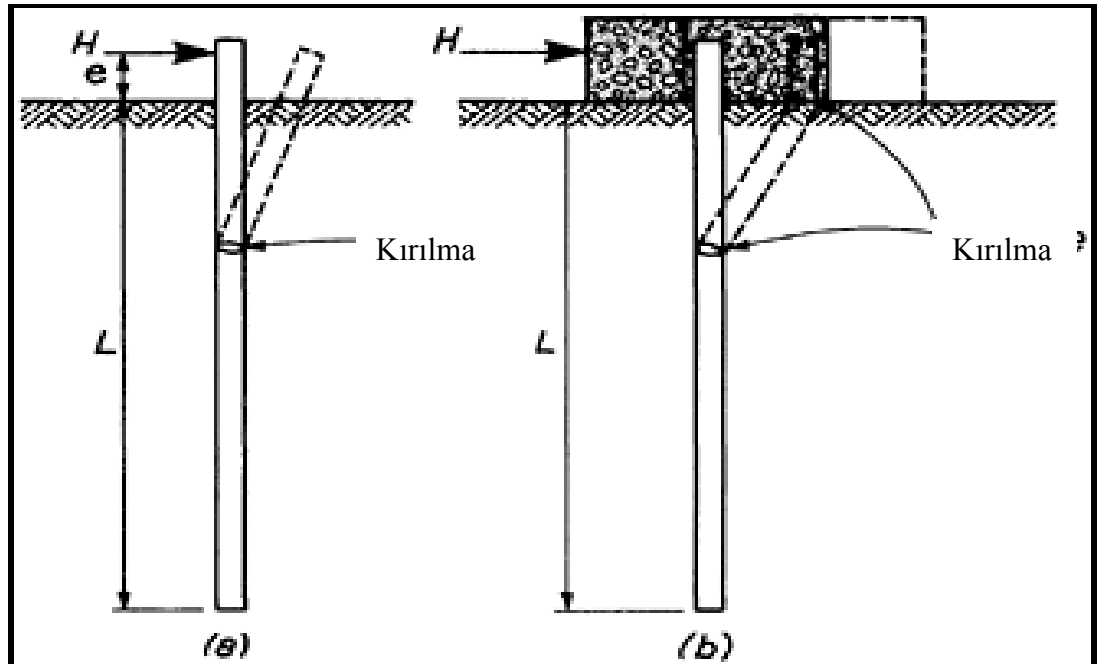
Kazıklar, herhangi bir sebepten dolayı yanal yüklemeye maruz kaldıklarında, bu yükü ve momenti kayma mukavemeti ve eğilme rijitliği yardımıyla, ayrıca kazığın etrafını saran zeminin mobilize olması ve yükün karşılanmasına katkıda bulunması ile karşılarlar.

Kazığın boyunun genişliğine (çapına) oranının 10–12 ve daha küçük olduğu durumlarda kazık “kısa kazık” olarak nitelendirilebilir. Şekil 3.25(a)'da gösterildiği gibi kısa ve serbest davranan rijit bir kazık anal yük etkisinde dönmeye çalışmakta ve kazık ucuna yakın kısımda zemin direncine ek olarak pasif direnç oluşmasına neden olmaktadır. Bu pasif direncin aşılması halinde kazık dönme göçmesine uğramaktadır. Şekil (b)'de ise kazığın üstten bağlı olma hali gösterilmektedir. Bu durumda is kazık kayarak göçmektedir.

Kazığın sonsuz uzunlukta olması halinde ise (Şekil 3.26) kazığın alt ucunda oluşacak pasif direnç sonsuz büyüklükte olacağından kazığın üst kısmı deforme olurken alt taraf sabit kalacaktır. Bu tip kazıklarda göçme maksimum eğilme momentinin olduğu noktada kırılma göçmesi olarak meydana gelecektir. Kazığın üstten bağlı olması halinde ise maksimum moment ve dolayısıyla kırılma bağlantı noktasında veya hemen altında oluşacaktır.



Şekil 3.25 : Yatay yük altında kısa düşey kazıkların davranışı (Tomlinson, 2004)



Şekil 3.26 : Yatay yük altında sonsuz uzunluktaki düşey kazıkların davranışı, a) Serbest başlıklı b) Bağlı (Tomlinson, 2004)

3.9.1 Taşıma gücünün hesaplanmasına dayalı kazık tasarımı

Pratikte kazıkların ve kazık gruplarının yanal yük altında taşıma kapasitelerinin belirlenmesi yönteminden ziyade, kazıkların yanal yük altında belirli bir yanal ötelenme limitinin üzerine çıkmaması prensibine dayanılarak tasarım yapılmaktadır. Ancak yine de yanal yöntem altındaki taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için çeşitli

yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları Brinch Hansen Yöntemi ve Broms Yöntemi'dir.

Kazıkların taşıma gücünün hesaplanması için ilk olarak kazıkların rijit bir eleman gibi mi yoksa esnek bir eleman gibi mi davranacağına karar verilmelidir. Bunun için kazık ve zeminin ortak etkileşimiyle oluştuğu kabul edilen rijitlik faktörleri R ve T hesaplanır. Bu faktörler kazığın rijitliği olarak adlandırılan EI değerine ve zeminin sıkışabilirliğine bağlıdır. Zemin sıkışabilirliği ise kazık çapı B'ye ve zeminin üzerinde yükleme yapılan alanın büyüklüğü ile değişen “yatak katsayısı” parametresi k ile hesap edilmektedir.

Aşırı konsolide killerde yatak katsayısının derinlikle sabit kaldığı kabul edilerek rijitlik faktörü R aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{kB}} \quad (3.63)$$

Yatak katsayısı k değerinin sabit olmayıp derinlik boyunca doğrusal olarak değiştiği normal konsolide killerde ve diğer zeminlerde ise rijitlik faktörü T kullanılır ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (3.64)$$

Burada yatak katsayısı k değeri;

$$k = n_h * \frac{x}{B} \quad (3.65)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanır. Bu bağıntıdaki n_h parametresi için Mustang Adası'nda yapılan kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler Reese tarafından yorumlanmış ve grafiğe dönüştürülmüş olup karşılaştırılma yapıldığında Terzaghi'nin elde ettiği değerlere nazaran daha yüksek mertebelerdedir (Şekil 3.27).

R ve T değerleri elde edildikten sonra kazıklı temel sisteminin rijit mi yoksa esnek bir kazık gibi mi davranacağı Çizelge 3.6 yardımıyla belirlenir.

Çizelge 3.6 : Kazık davranışını belirlemekte kullanılan rijitlik faktörü değerleri

Kazık Tipi	Zemin Yatak Katsayısı	
	Doğrusal Artan	Sabit
Rijit (serbest başlıklı)	$L \leq 2T$	$L \leq 2R$
Elastik (serbest başlıklı)	$L \geq 4T$	$L \geq 3.5 R$

Rijit ve esnek kazıkların yanal yük kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

3.9.1.1 Brinch-Hansen yöntemi

Bu yöntem Brinch Hansen tarafından 1961 yılında geliştirilmiş olup toprak basıncı teorisine dayanmaktadır. Hem iri daneli zeminlerde hem de ince daneli zeminlerde olumlu sonuçlar vermekte, ayrıca tabakalı zeminlerde de kullanılabilir. Ancak sadece rijit kazıklar için uygulanabilirliği mevcuttur ve dönme noktası deneme yanılma yoluyla belirlenebilmektedir.

İlk olarak zemin profili tabakalara ayrılır ve kazık boyunca oluşan kuvvetler için yazılacak olan denge denklemin benzer olan aşağıdaki bağıntı yardımıyla her bir tabaka için x metre derinliğindeki yanal yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{xu} = (\overline{\sigma_{vx}} K_q + c K_c) B \quad (3.66)$$

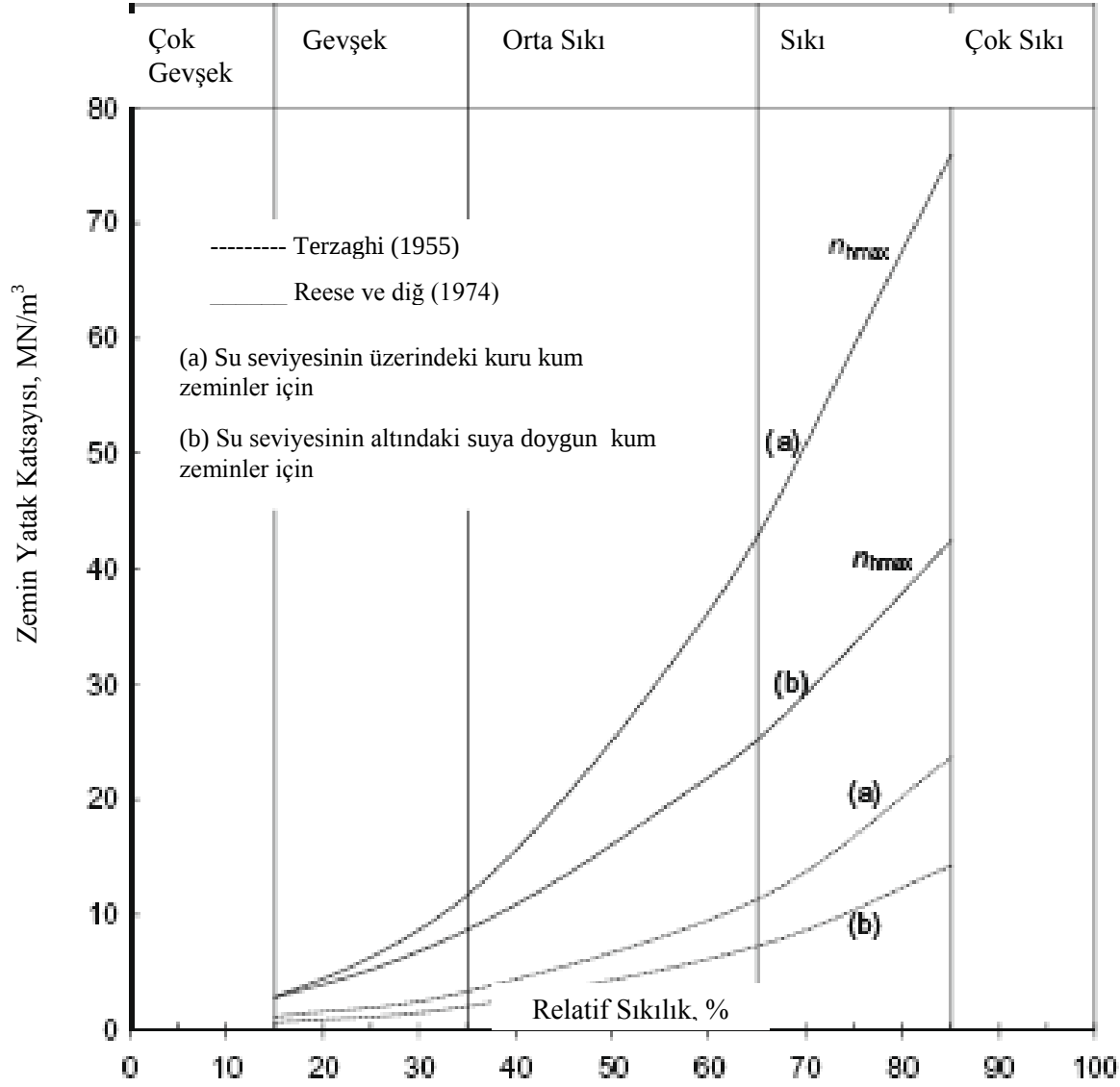
Bu bağıntıda;

$\overline{\sigma_{vx}}$: Düşey efektif gerilmeyi,

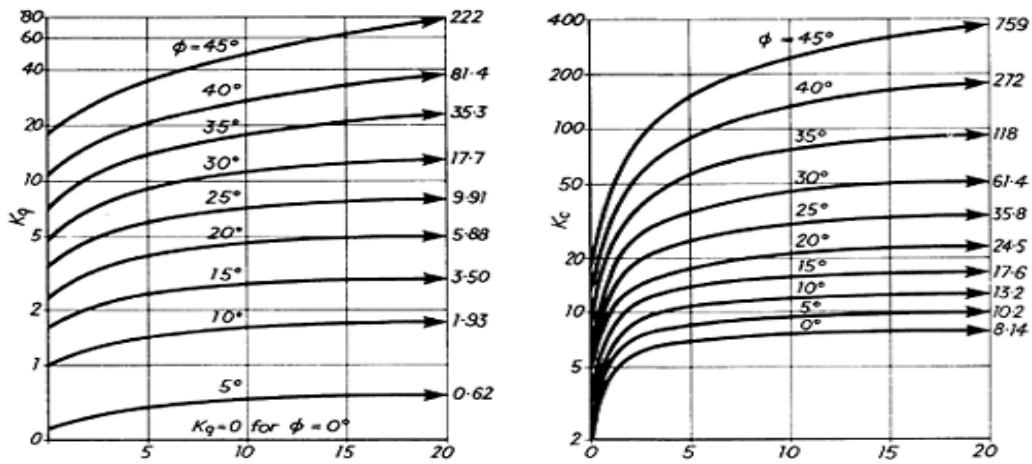
c : Kohezyonu,

K_c ve K_q : ϕ ve x/B (derinlik/kazık çapı) değerlerine bağlı katsayıları temsil etmektedir. Bu iki katsayının değişim grafikleri Şekil 3.28’da verilmiştir.

Bu yöntemin ana prensibi her bir tabaka için yanal direnci hesapladıktan sonra deneme yanılma yöntemiyle kazık boyunca etkiyen dirençlerin momentlerini hesaplayarak bu momentlerin 0’a eşit olduğu, yani tarafsız noktayı (dönme noktasını) bulmaya dayanır. Bu yöntemle yanal yük taşıma kapasitesi elde edildikten sonra derinliğe bağlı moment ve kayma kuvveti diyagramları çizilir. Bu aşamada kayma kuvvetinin 0’a eşit olduğu noktadaki maksimum eğilme momenti M_{max} değerinin kazık gövdesinin taşıyabileceği M_{ult} değerini aşmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.27 : Kazık rijitliği hesabında kullanılan n_h değerlerinin zeminin sıkılığına göre değişimi (Zhang, 2009)



Şekil 3.28 : Brinch Hansen yönteminde kullanılan K_c ve K_q katsayılarının ϕ ve x/B değerlerine bağlı değişimleri

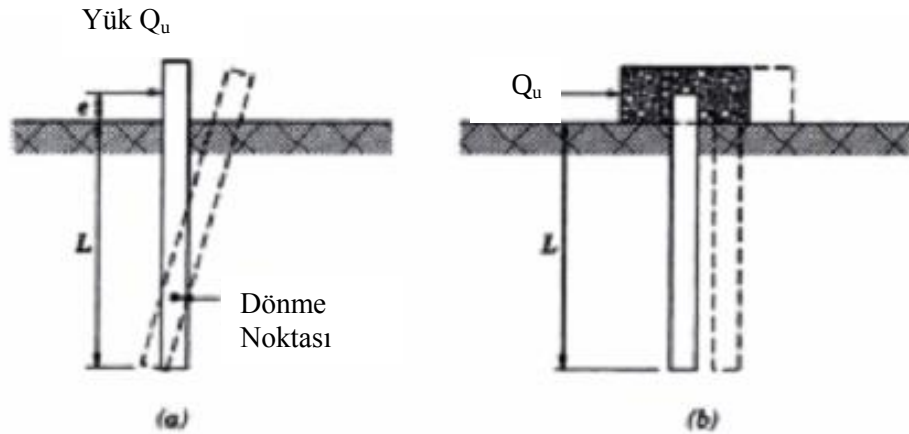
3.9.1.2 Broms yöntemi

Bu yöntem Bengt Broms tarafından 1964 yılında geliştirilmiş olup, Brinch Hansen'e göre çok daha kolay bir yaklaşıma dayandığından ve de uyumlu sonuçlar elde edildiğinden kazıkların yanal yük altındaki davranışlarının incelenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntem belli bazı kabullere dayanmaktadır. Bunlardan başlıcaları;

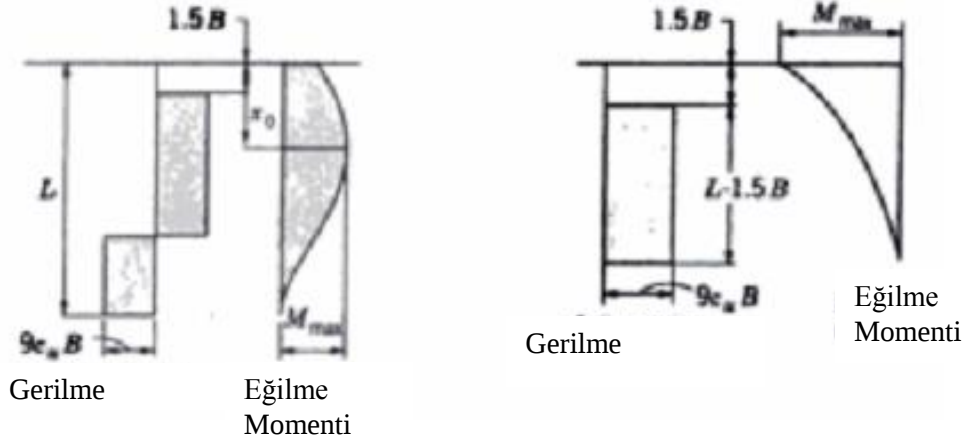
1. Zemin kohezyonsuz ($c=0$) veya yalnız kohezyonludur ($\phi=0$), tabakalı zemin profillerinde her tabaka için ayrı analiz yapılır.
2. Bu yöntemde yukarıda belirtilen şekilde sınıflandırılan kısa (rijit) ve uzun (esnek) kazıklar için analiz yöntemleri farklıdır.

Bu bölüm içerisinde yukarıda da belirtildiği gibi rijit kazıklar yanal yükleme sonucunda serbest halde belirli bir nokta etrafında dönme şeklinde deformasyona uğrarken, üstten bağlı olması durumunda ötelenme hareketi gerçekleştirmektedir (Şekil 3.29).

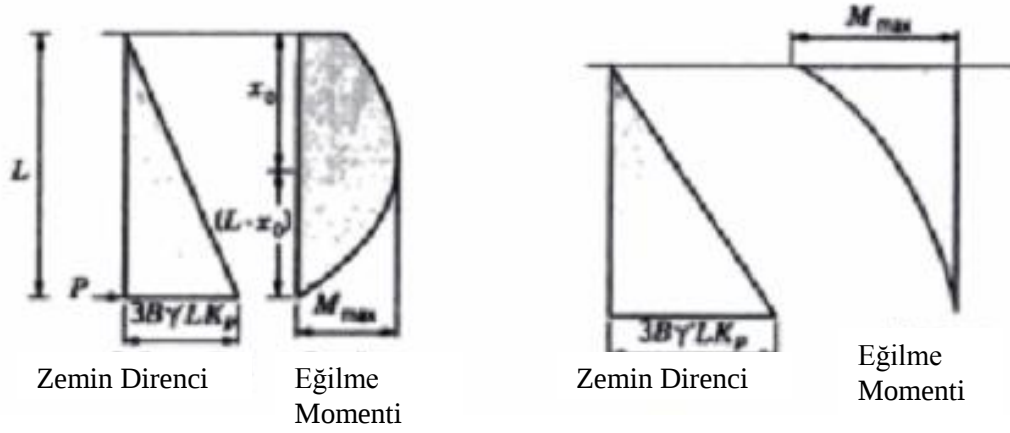
Broms'un kısa (rijit) kazıklar için kazık başlığının serbest ve bağlı olması hali için geliştirdiği derinliğe bağlı gerilme ve moment değişimlerini gösteren diyagramlar, kohezyonlu zeminler için Şekil 3.30'da, kohezyonsuz zeminler için Şekil 3.31'da verilmiştir.



Şekil 3.29 : Kısa (rijit) kazıklarda yanal yer değiştirme (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.



Şekil 3.30 : Kısa (rijit) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.



Şekil 3.31 : Kısa (rijit) kazıklarda kohezyonsuz zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için.

Broms tarafından geliştirilen bağıntıya göre rijit kazıklar için kohezyonsuz zeminlerde kazığın arkasındaki aktif basınç ihmal edilmekte ve kazık boyunca z derinliğindeki yanal yükleme direnci şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_{xu} = (\overline{\sigma_{vx}} K_q + c K_c) B \quad (3.67)$$

Bu bağıntıda;

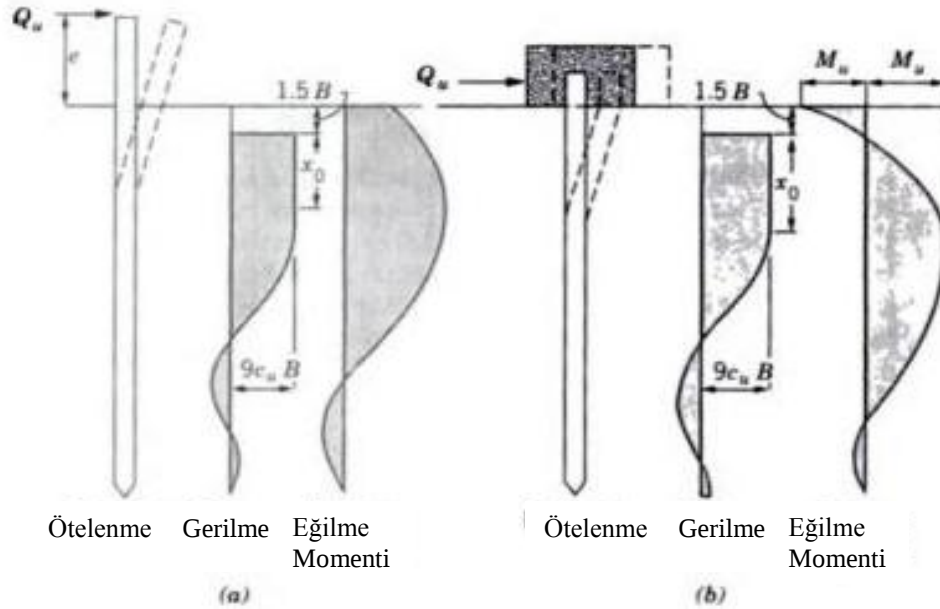
σ'_v : z derinliğindeki düşey efektif gerilme,

B: Kazık çapı,

K_p : Rankine pasif toprak basıncı katsayısı, $(1+\sin\phi)$. $(1-\sin\phi)$ bağıntısından hesaplanmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde ise zemin yüzeyinden itibaren $1.5B$ derinliğe kadar gerilmenin 0'a eşit olup, bu derinlikten itibaren ise rijit kazıklarda sabit olarak $9c_u B$ değerini aldığı belirtilmektedir. Serbest kazıklarda dönme noktasından itibaren gerilme işaret değiştirecek ancak büyüklüğü sabit kalacaktır. Esnek kazıklarda ise kazığın fiktif bir x_0 noktasından sonra herhangi bir dönme ya da ötelenmeye maruz kalmadığı varsayımıyla kazıktaki gerilmelerin $(1.5B+x_0)$ derinliğinden itibaren azalmaya başladığı ve bir müddet sonra tamamen sönümlendiği varsayılmaktadır.

Broms'un uzun (esnek) kazıklar için kazık başlığının serbest ve bağlı olması hali için geliştirdiği derinliğe bağlı gerilme ve moment değişimlerini gösteren diyagramlar, kohezyonlu zeminler için Şekil 3.32'de, kohezyonsuz zeminler için Şekil 3.33'de verilmiştir.

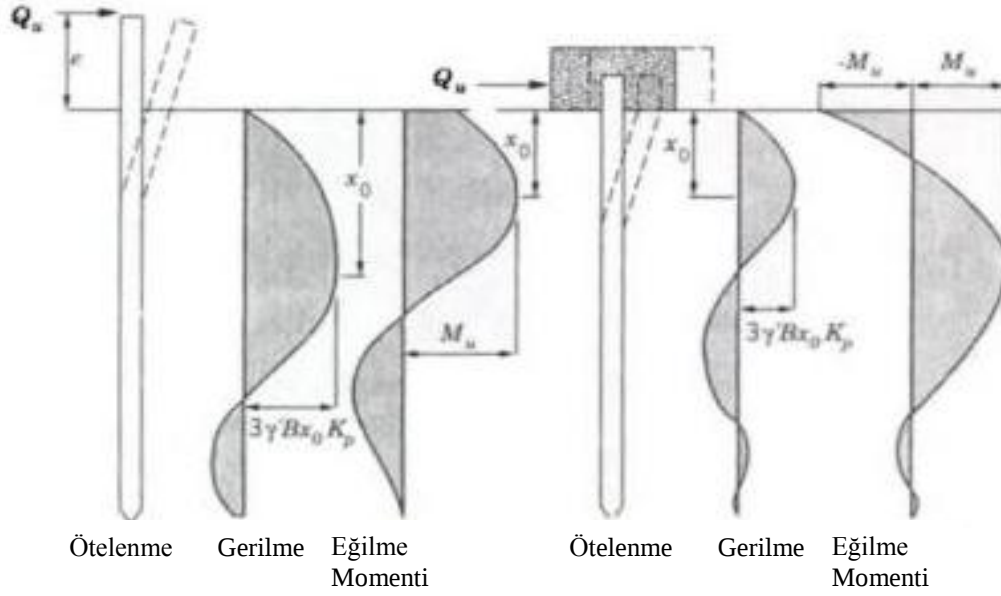


Şekil 3.32 : Uzun (esnek) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için

3.9.2 Limit yer değiştirme değerlerine göre tasarım

Bölüm 3.9.1 'de de belirtildiği gibi, kazıklı temellerin yanal yüklemeler altındaki davranışları incelenirken, taşıma kapasitesinden ziyade limit yer değiştirme değerleri göz önüne alınarak tasarım yapılmaktadır. Bu kritere göre geliştirilmiş hesap yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan ikisi;

1. Yatak Katsayısı Yöntemi (Reese ve Matlock, 1956, Matlock ve Reese, 1960)
2. Elastik Düzlem Yaklaşımı'dır. (Poulos, 1971)



Şekil 3.33 : Uzun (esnek) kazıklarda kohezyonlu zeminlerde oluşan gerilme ve momentler (a) serbest (b) bağlı kazıklar için

3.9.2.1 Yatak katsayısı yöntemi

Bu yöntemde aslında radyejeneral temellerin tasarım yöntemleri kapsamında bahsedilen ve Bölüm 2.3.2 'de detaylı olarak incelenmiş olan Winkler yöntemi baz alınmaktadır. Buna göre, yanal yükleme altında bulunan bir kazık, elastik davranış gösteren bir zemine oturmuş olan kiriş gibi davranmaktadır. Bu durumda elastik davranış gösteren zeminin birbirine sonsuz küçük mesafede bulunan ancak birbirinden bağımsız ve elastik yaylarla temsil edilebileceği Winkler hipotezine göre kabul edilmektedir. Bu yayların sertliği, tipik yay problemlerinde olduğu gibi;

$$F = k.x \quad (3.68)$$

bağıntısına benzer bir bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu parametre zemin mekaniğinde “yatak katsayısı” olarak adlandırılmakta ve hesabı aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (3.69)$$

p : kazık birim uzunluğundaki zemin gerilmesi

y : kazıkta oluşan yer değiştirme

Bu değer temel inşaatında yapı zemin etkileşiminin ifade edilmesinde kullanılan çok önemli bir parametre olup, elastik teoriye dayanan bir çözüm yöntemidir. Yatak katsayısının hesabında kullanılan p-y eğrileri kazık yükleme deneyleri ya da araziden alınan zemin numunesi üzerinde laboratuarda gerçekleştirilen 3 eksenli basınç deneylerinden elde edilmektedir.

Ancak elde edilen değer düşey yatak katsayısı olup, yanal yüklemeler altındaki davranışın incelenmesinde kullanılan yatay yatak katsayısı değeri için Palmer and Thompson (1948) tarafından önerilen aşağıdaki yöntem kullanılmaktadır.

$$k_x = k_h \left(\frac{x}{L} \right)^n \quad (3.70)$$

Bu bağıntıda k_h düşey, k_x yatay yatak katsayısını, x kazık boyunca düşeyde herhangi bir mesafeyi, L ise kazık uzunluğunu simgelemektedir. n ise 0'a eşit veya daha büyük bir katsayı olup zemin tipine bağlı olarak değişmektedir. Kumlar ve normal konsolide killeri için uzun süreli yüklemelerde n değeri 1, aşırı konsolide killerde ise 0 olarak kabul edilebilmektedir (Prakash ve Sharma, 1999). Ancak Davisson ve Prakash'a göre kumlarda 1.5 ve killerde de 0.15 alınması daha doğru bir yaklaşım olmaktadır. Çeşitli zemin tipleri için k_x değerleri 0'de verilmektedir. Yatak katsayısı değerleri ampirik bağıntılar yardımıyla elde edilebildiği gibi arazide Presiyometre deneyleri yardımıyla da bulunabilmektedir.

n değerinin 1'e eşit olduğu durumlarda, diğer bir deyişle, kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killeri için yukarıda da bahsedildiği gibi derinlikle birlikte jeolojik yüke bağlı olarak zeminin mühendislik özellikleri, ve buna bağlı olarak yatak katsayısı lineer olarak artmaktadır. Bu durumda düşey yatak katsayısı k_h değerinin değişimi aşağıdaki gibidir.

$$k_h = n_h \cdot x \quad (3.71)$$

Bu bağıntıdaki n_h parametresi yatak katsayısı sabiti olarak adlandırılmakta olup, kohezyonsuz zeminlerdeki değerlerinin değişimi için deneysel sonuçlardan ve literatürden faydalanılmaktadır.

Aşırı konsolide killerde ise n değeri 0 olmakta ve zeminin yatay yatak katsayısı derinlik boyunca sabit ve düşey yatak katsayısına eşit olmaktadır.

Çizelge 3.7 : Çeşitli Zemin Tipleri İçin Yatay Yatak Katsayısı k_x değerleri (Bowles, 1989)

Zemin Tipi	Yatay Yatak Katsayısı (MN/m²)
Sıkı Kumlu Çakıl	220–400
Orta Sıkı Kaba Kum	157–300
Orta Kum	110–280
İnce veya Siltli İnce Kum	80–200
Katı Kil (Islak)	60–220
Katı Kil (Doygun)	30–110
Orta Katı Kil (Islak)	39–140
Orta Katı Kil (Doygun)	10–80
Yumuşak Kil	2–40

Gerçekte zeminlerin davranışı bilindiği gibi elastoplastik özellik göstermekte ve yatak katsayısı yöntemi bu durumdan ötürü gerçekten uzaklaşmaktadır. Bu sebepten ötürü p-y eğrisi yaklaşım metodu denilen bir yöntemle Winkler hipotezine küçük bir değişiklik uygulanmaktadır.

Buna göre, yanal yükler altında çok küçük yerdeğiştirmelerin gerçekleşmesi halinde, bu yerdeğiştirmelerin elastik olduğu kabul edilmekte ve yatak katsayısı yöntemi ile çözüm yapılabilir. Ancak gerçekte yerdeğiştirmeler elastik sınırı aşmakta ve kazık yanal yükler altında doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Bu durumda p-y eğrileri yaklaşımı ile çözüm yoluna gidilmektedir.

Yanal yükler altındaki bir kazığın davranışı elastik bir zemine oturan elastik kirişin davranışını belirleyen denklem yardımıyla ifade edilebilir.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3.72)$$

Kazığa etkiyen düşey yükün 0 olması halinde ise, (3.72) bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (3.73)$$

Burada,

E : kazığın elastisite modülü

I : kazık kesit alanının eylemsizlik momenti

p : zeminde x derinliğinde oluşan gerilme ($=k_h \cdot y$)

Birim uzunlukta kazık çevresinde oluşan gerilme p ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla açıklanabilir.

$$p = k \cdot y \quad (3.74)$$

Bu durumda (3.72) ve (3.73) bağıntılarının çözümü sadece zemin modülü k teriminin derinlik x ve yanal şekildeğiştirme y 'nin bir fonksiyonu olması halinde mümkün olabilmektedir. Zemin modülü k 'nın sayısal olarak en uygun tarifi zeminde oluşan gerilme p değerini yanal ötelenme y 'nin bir fonksiyonu olarak gösteren ve doğrusal olmayan eğriler topluluğudur. Bu eğriler derinliğe ve zemin parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Reese, 1977).

p - y eğrileri zeminin hem elastik, hem plastik davranışı için, diğer bir deyişle 0 gerilme değerinden zeminin yükün sabit kalmasına rağmen yer değiştirmelerin arttığı göçme gerilmesine kadar olan aralık içerisinde kullanılabilmektedir (Tomlinson, 2004). p - y eğrileri kazığın kesit alanının şeklinden ve kazığın rijitliğinden bağımsız olup, her bir eğrinin ait olduğu alanın altında ve üzerinde oluşan gerilmelerden etkilenmediği kabul edilmektedir.

p - y eğrileri kazık boyunca her derinlik için ayrı ayrı çizilerek sonuçta kazık boyunca çizilen eğriler kümülatif olarak tek bir grafik üzerinde gösterilebilmektedir. Bu eğrilere örnek Şekil 3.34'te gösterilmektedir. p - y eğrilerinin karakteristik özellikleri şunlardır:

1. Belirli sayıda p - y eğrisinden oluşan bir sette, yatay olarak uygulanan bir yük altında zeminin yanal şekil değiştirmesi herhangi bir derinlikte o derinlikteki belirli ve tekil bir bölge için temsil edilmektedir.

olduğu durumda kullanılan k değerleri ve (3.) bağıntısında, diğer bir deyişle yatak katsayısının derinliğe bağlı olarak değişkenlik gösterdiği durumlarda kullanılan n_h değerleri literatürden ve konu ile ilgili yapılmış arazi deneyleri vb. çalışmalardan elde edilir.

2. Bu elde edilen değerler ve kazığa uygulanan yatay yük Q_g ve moment M_g belirlendikten sonra kazık boyunca derinliğe bağlı yer değiştirme aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır:

Aşırı Konsolide Killer için:

$$y_x = y_A + y_B = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad (3.75)$$

Kohezyonsuz Zeminler ve Normal Konsolide Killer için:

$$y_x = y_A + y_B = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI} \quad (3.76)$$

Bu bağıntılarda;

y_x : kazığın x derinliğindeki toplam yanıl yer değıştirmesi

y_a : kazığın uygulanan yatay kuvvete bağılı yanıl yer değıştirmesi

y_b : kazığın uygulanan momente bağılı yanıl yer değıştirmesi

A_y : yanıl kuvvet için ötelenme katsayısı

B_y : moment için ötelenme katsayısını temsil etmektedir.

3. Önceden arazide yapılan yükleme deneyleri, bilgisayar programları ya da elle çözümler yardımıyla elde edilen p-y eğrileri kullanılarak (3.) veya (3.) bağıntılarından hesaplanan ötelenme değerlerine karşılık gelen zemin gerilmesi değerleri bulunur. Grafikler yardımıyla elde edilen p ve y değerlerinden (3.) bağıntısı yardımıyla yeni k değeri ve rijitlik modülü R veya T değeri hesaplanır. Hesaplanan değerler (a) adımımda hesaplanan değerler ile karşılaştırılır.
4. Bu değerlerin eşit olmaması halinde ilk adımda p-y eğrileri ile hesaplanan k değerine daha yakın bir değeri seçilerek deneme-yanılma yöntemi ile (a)'dan

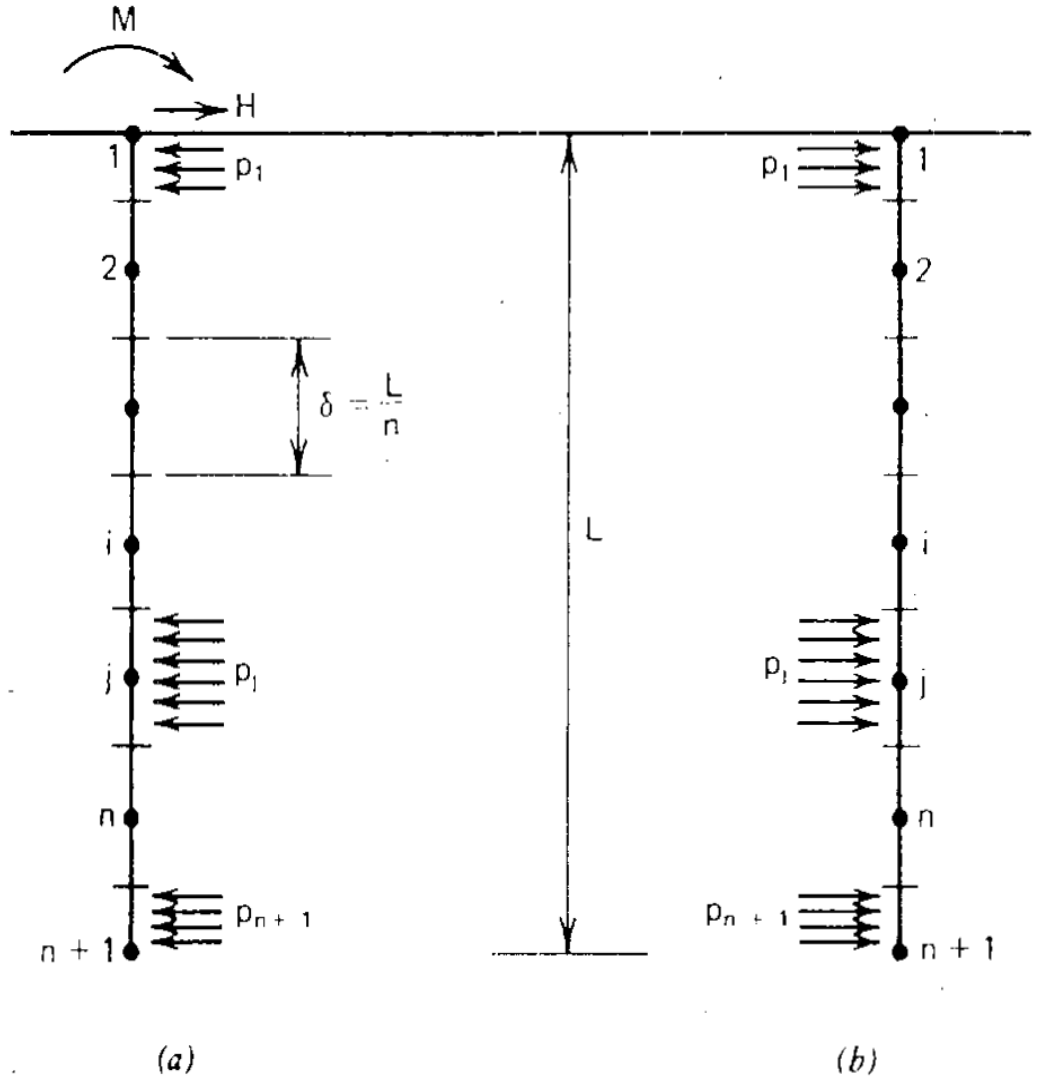
(c)'ye kadar olan adımlar döngüsel olarak varsayılan ve hesaplanan R ve T değerleri eşit çıkıncaya dek tekrarlanır.

3.9.2.2 Elastik Düzlem Yaklaşımı

Yatak katsayısı ve p-y eğrileri yaklaşımında zemin bir bütün olarak ele alınmadığı için zaman zaman yetersiz sonuçlar verebilmektedir. Bu durumda Poulos (1971) ve Poulos ve Davis (1980) tarafından yanal yüklü kazıkların davranışı zemini elastik bir düzlem kabul ederek irdeleyen çalışmalar yapılmıştır. Bu yaklaşım teorik olarak daha gerçekçi olmasına rağmen, en büyük dezavantajı pratikte zemin modülünün tam olarak belirlenememesi olmaktadır.

Bu yöntemde, Şekil 3.35'te gösterildiği gibi kazığın ince dikdörtgen kesitli ve rijitliği derinlik boyunca sabit düşey bir çubuk olarak temsil edilebileceği kabul edilir. Kazık en alt ve en üstte yer alan parçalar $\delta/2$, diğerleri $\delta=L/n$ uzunluğunda olacak şekilde $(n+1)$ parçaya bölünür. Hesabı basitleştirme amacıyla, zemin ile kazık arasında oluşacak gerilmeler dikkate alınmaz. Kazık boyunca yer alan her bir parça üzerine eşit ve P değerinde bir yanal kuvvetin etki ettiği varsayılır. Diğer bir kabul ise zeminin homojen, izotrop ve yarı sonsuzlukta elastik malzeme gibi davranış sergilediğidir. Zeminin elastisite modülü E_s ve Poisson oranı ν_s kazığın oluşumuna bağlı değişkenlik göstermemektedir.

Poulos'un yaklaşımına göre, zemin içinde tamamen elastik koşulların gerçekleşmesi durumunda, kazığın ve zeminin yanal yerdeğiştirmesi eşit olacaktır. Bu olgudan yola çıkarak Poulos (1971), kazık boyunca yer alan her bir elemanın orta noktasında zeminin ve kazığın ötelenmelerini eşit olduğunu kabul etmiştir. Kazık başında ve sonunda yer alan ve $\delta/2$ uzunluğundaki iki elemanın yanal yer değiştirmeleri hesaplandıktan sonra, denge denklemleri yardımıyla her bir eleman için bilinmeyen ötelenme değerleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.35 : Elastik Düzlem Yaklaşımı. (a) Kazığa, (b) Kazıkla temas halindeki zemine etkiyen gerilmeler (Poulos and Davis, 1980)

4. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLER ve DÜŞEY YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARI

4.1 Kazıklı Radyejeneral Temellerin Genel Tanımı

Bölüm 2’de anlatıldığı gibi taşıyıcı tabakanın yüzeye yakın yer aldığı durumlarda üstyapıdan gelen yükler bir sığ temel çeşidi olan radyejeneral temel vasıtasıyla zemine aktarılabilmekte, ancak taşıma gücü kriteri sağlanmasına rağmen, toplam ve farklı oturma için belirlenen sınır değerler genellikle aşıldığı takdirde kazıklı temel tercih edilmektedir. Üst yapı yükleri altında radyejeneral temelde taşıma gücü güvenliği sağlanmadığı takdirde yine kazıklı temel uygulanmaktadır. Bununla beraber, önceki bölümde anlatılan kazıklı temellerin tasarımında, kazık gruplarının üzerinde yer alan kazık başlığının zeminde meydana gelebilecek oturmalara ve diğer hacim değişikliklerine karşı zemin ile temas halinde olmadığı, dolayısıyla üstyapıdan gelen tüm yükün kazık başlığı aracılığıyla kazıklara taşındığı varsayılmaktadır. Ancak uygulamada bu durum çoğunlukla gerçekleşği yansıtmamaktadır, diğer bir deyişle kazık başlığı, çoğu kez radye şeklindeki plak, zemin ile temas halinde olmakta ve yükün bir miktarını zemine aktarmaktadır (Franke, 1991; El-Mossallamy and Franke, 1997). Ayrıca üstyapı yükünün kısmen radyejeneral temel tarafından taşınabilmesi halinde, tüm yükün kazıklara taşınması ekonomik bakımdan elverişsiz bir çözüm olmaktadır. Bu durumda, kazıklar, yükü taşımaktan ziyade, oturmayı azaltıcı eleman olarak görev yapmaktadır. Bu olgu, temel mühendisliğinde kazıklı radyejeneral temel denilen yeni bir temel sistemi oluşmasına yol açmıştır (Poulos, 2001).

Kazıklı radyejeneral temelin en önemli özelliği, bu sistemde üstyapıdan gelen yükün bir kısmının kazıklar, bir kısmının ise radyejeneral temel tarafından taşınmasıdır. Bu durumda, kazık ve radyejeneral temel arasındaki yük paylaşımı hesaba katılmakta ve kazıklar nihai taşıma kapasitesi ve hatta daha fazla yük altında çalıştırılabilmektedirler. Bu sebepten ötürü, kazıklı radyejeneral temel sisteminde, kazıklar geleneksel kazık sistemlerine nazaran daha ekonomik bir şekilde oturmaların azaltılmasında kullanılabilmektedirler (Reul ve Randolph, 2003). Bu

sistem, özellikle Almanya’da 90’lı yılların başından itibaren yüksek yapıların projelendirilmesinde tercih edilmekte ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Katzenbach ve diğ., 2001).

4.2 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Tasarımı

Poulos (2001), idealleştirilmiş zemin profilleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda genelde katı kil veya sıkı kumdan oluşan zemin profillerinin kazıklı radyejeneral temel tasarımına elverişli olabileceğini belirtmiştir. Bu durumlarda temelin performansını artırıcı şekilde çalışan kazıklarla birlikte temel sistemi yeterli yük taşıma kapasitesini ve oturma kriterlerini sağlamaktadır.

Kazıklı radyejeneral temel sistemine uygun olmayan zemin koşulları aşağıda sıralanmıştır:

1. Yüzeye nispeten yakın yerlerde yumuşak ve sıkışabilir tabakalar içeren zemin profilleri,
2. Uzun süreli konsolidasyon oturmalarının meydana gelme riski yüksek zeminler,
3. Dış etkenler altında şişme etkisi gösterebilecek zeminler.

Poulos (1993), şişme veya büzülme sebebiyle kazıklı radyejeneral temel sistemine etkiyen gerilmelerin değişimini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş ve şu sonuçlara varmıştır:

1. Konsolidasyon sebebiyle kazıklarda oluşan negatif çevre sürtünmesi, kazıklara gelen basınç gerilmesinde artışa neden olmuş ve daha fazla yükün kazıklar tarafından taşınması gerekmiştir.
2. Şişebilen zeminlerde, zeminin yerdeğiştirmesi ve kazıklı radyejeneral temel altında oluşan gerilmeler kazıklarda çekme gerilmesi oluşmasına sebep olmaktadır.

Kazıklı radyejeneral temellerin tercih edilmeye başlandığı 90’lı yılların başından itibaren, söz konusu temel sistemlerinin tasarımı ile ilgili değişik yöntemler geliştirilmiştir ve bu yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir. Bu hususta dikkate alınması gereken en önemli etken, kazıklı radyejeneral temellerin zemin, radye ve kazık elemanlarının birleşiminden oluşan bir sistem olduğudur (Chow, 2007).

Kazıklı radyejeneral temel tasarımına ait ilk ve en önemli çalışmalardan bir tanesi Poulos ve Davis tarafından 1980 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde kazıklı radyejeneral temel sistemi bir bütün olarak serbest uçlu bir kazık yerine, bir başlığa ankastre bağlanmış tek bir kazık gibi modellenerek analiz yapılmıştır.

Her temel sisteminin tasarımında olduğu gibi, kazıklı radyejeneral temellerin tasarımında da göz önüne alınması gereken belirli parametreler vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Düşey ve yanal yükler altında ve moment etkisi altında sistemin nihai taşıma gücü,
2. Toplam oturma değeri,
3. Farklı oturma değerleri,
4. Radye plağına etkileyen moment ve kesme kuvvetleri,
5. Kazıklara etkileyen moment ve kesme kuvvetleri.

Kazıklı radyejeneral temeller üzerine yapılmış çalışmaların çoğunda, taşıma gücü ve düşey yükler altında oturma kriterleri üzerinde durulmuştur. Ancak bu konuların yanında diğer kriterlerin sağlanmasına da dikkat edilmelidir. Poulos (2001), bazı vakalarda rüzgar yükü sebebiyle oluşan momentlerin düşey ölü ve hareketli yüklere nazaran kazık sayısı ve yerleşimini belirlemede daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Poulos (1991) tarafından kazıklı radyejeneral temellerin davranışını etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. Radyenin şekli, boyutları ve rijitliği,
2. Kazık sayısı, boyutları, rijitliği, yerleşimi,
3. Yükleme özellikleri (tekil yük ya da yayılı yük)
4. Zemin profili, zeminin sıkışabilirliği ve taşıma gücü

Randolph (1994) tarafından kazıklı radyejeneral temel sistemleri için 3 farklı tasarım yöntemi geliştirilmiştir.

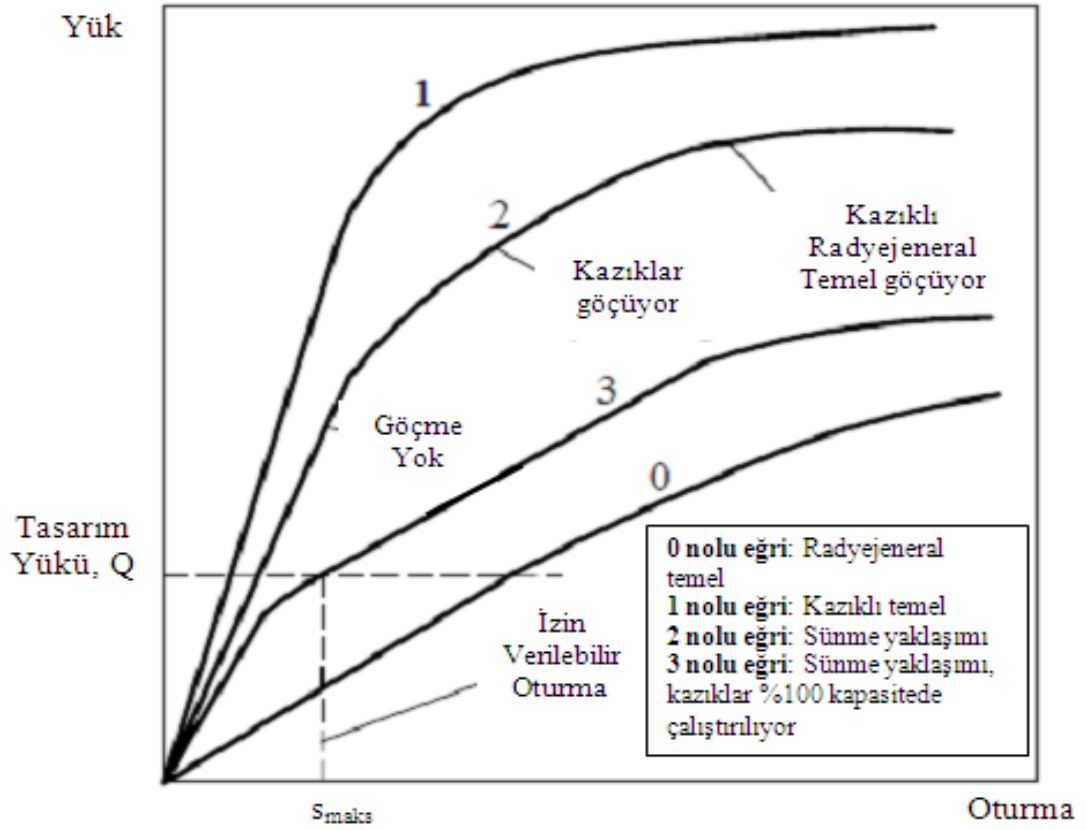
1. Kazıklı Temel (Geleneksel Yaklaşım): Bu yöntemde kazıklar yükün tamamını taşımak üzere tasarlanır.
2. Sünme Yaklaşımı: Kazıklar gözle görülür sünme hareketinin başladığı yük seviyesi olan nihai taşıma gücünün %70-80'ine göre dizayn edilir. Radye ve zemin arasındaki net taban basıncının zeminin önkonsolidasyon basıncından

düşük kalması, dolayısıyla oluşabilecek aşırı oturma değerlerini önlemek amacıyla kazıklar sisteme ilave edilir.

3. Farklı Oturma Kontrolüne Dayalı Yaklaşım: Bu yaklaşımda kazıklar radye altında oluşacak toplam oturma değerlerini azaltmaktan ziyade farklı oturmaları engellemek amacıyla üstyapıdan gelen yüklerin fazla olduğu stratejik noktalara yerleştirilirler.

Ayrıca, sünme yaklaşımının daha uç bir versiyonu olan diğer bir yaklaşımda da, kazıkların tümünün ya da bir kısmının yukarıda belirtilen şekilden farklı olarak nihai taşıma kapasitelerinin %100'ünde çalışacak şekilde tasarlanır. Bu yöntem kazıkların öncelikli olarak oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanılmalarını sağlarken, aynı zamanda sistemin toplam taşıma gücüne katkıda bulunmalarına da olanak sağlamaktadır. Açıkça görülmektedir ki, geleneksel yaklaşım dışındaki yöntemler çok daha ekonomik bir temel sistemi tasarımını mümkün kılmaktadır.

Şekil 4.1'de, yukarıda belirtilen tasarım yaklaşımlarından ilk ikisi için kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin yük-oturma davranışları gösterilmektedir. 0 numaralı eğri temel sisteminin sadece radyejeneral temelden oluşması durumunda sistemin oturma davranışını temsil etmektedir. Görüldüğü üzere eşit tasarım yükü altında radye temel sisteminde izin verilebilir değerlerin üzerinde oturma değerleri gözlenmektedir. 1 numaralı eğri geleneksel yaklaşıma göre tasarlanmış bir kazıklı temel sistemine ait olup, aynı yük altında minimum oturma değeri vermekte, ancak bu tasarım ekonomik bir çözüm olmamaktadır. 2 numaralı eğri sünme yaklaşımına göre tasarlanmış sistemlerin yük-oturma davranışlarını göstermekte ve bu durumda kazıklar daha düşük bir güvenlikle çalışmasına rağmen kazık sayısı az olduğundan radyeye düşen yük miktarı daha fazla olmakta ve oturma miktarı geleneksel yaklaşımla karşılaştırıldığında daha fazla olmaktadır. 3 numaralı eğri ise yukarıda bahsedilen sünme yaklaşımının ikinci versiyonu olan kazıkların tam kapasiteyle çalıştırılması prensibini simgelemekte olup tasarım yükünde sistem doğrusal olmayan davranış göstermesine rağmen oturma kriterinin sağlanması sebebiyle sistem genel olarak güvenli kabul edilmekte ve 1 ve 2 numaralı tasarımlardan daha ekonomik bir çözüm sağlamaktadır.



Şekil 4.1 : Çeşitli tasarım kabullerine göre yük-oturma eğrileri (Poulos, 2001)

Kazıklı radyejeneral temellerin analizinde kullanılacak yöntemlerde aşağıdaki olguların göz önüne alınması gerekmektedir: (Poulos ve diğ. 1997)

1. Kazık-radye-zemin arasındaki etkileşimin gerçeğe yakın bir biçimde değerlendirilmesi. Bu etkileşimlerin ihmal edilmesi halinde temel sisteminin rijitliği gereğinden fazla hesaplanmakta, bununla beraber toplam ve farklı oturmaların hesabında da gerçeğe göre daha küçük değerler elde edilmektedir. (Poulos, 2002)
2. Kazıkların sayısının, yerleşiminin, rijitliğinin ve boyutlarının değişimi,
3. Zemin profillerinin gerçeği yansıtacak şekilde modellenmesi,
4. Kazıklar ve radye arasındaki yük paylaşımının hesaplanması,
5. Kazıkların doğrusal olmayan yük-deformasyon davranışının göz önüne alınması,
6. Tüm sistem için toplam ve farklı oturmaların hesaplanması,
7. Radyenin yapısal ve betonarme hesabı için kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin hesaplanması.

Kazıklı radyejeneral temellerin tasarımı 3 temel adımda özetlenebilir:

1. Ön tasarım aşaması olarak nitelendirilebilecek ilk aşamada, kazıklı radyejeneral temel sisteminin diğer geleneksel yöntemlere göre olan kullanılabilirliği araştırılmalı ve tasarım kriterlerini sağlayacak yaklaşık kazık sayısı belirlenmelidir.
2. İkinci adımda kazık yerleşiminin gerekli olduğu bölgeler ve kazıkların temel özellikleri kaba hatlarıyla belirlenmelidir.
3. Son aşamada ise optimum kazık sayısı, kazıkların gruplandırılması ve kazıkların yerleşim bölgeleri net olarak belirlenmeli ve radye altında oturma, eğilme momenti ve kesme kuvveti ile kazıklara gelen yük ve momentler detaylı olarak hesaplanmalıdır.

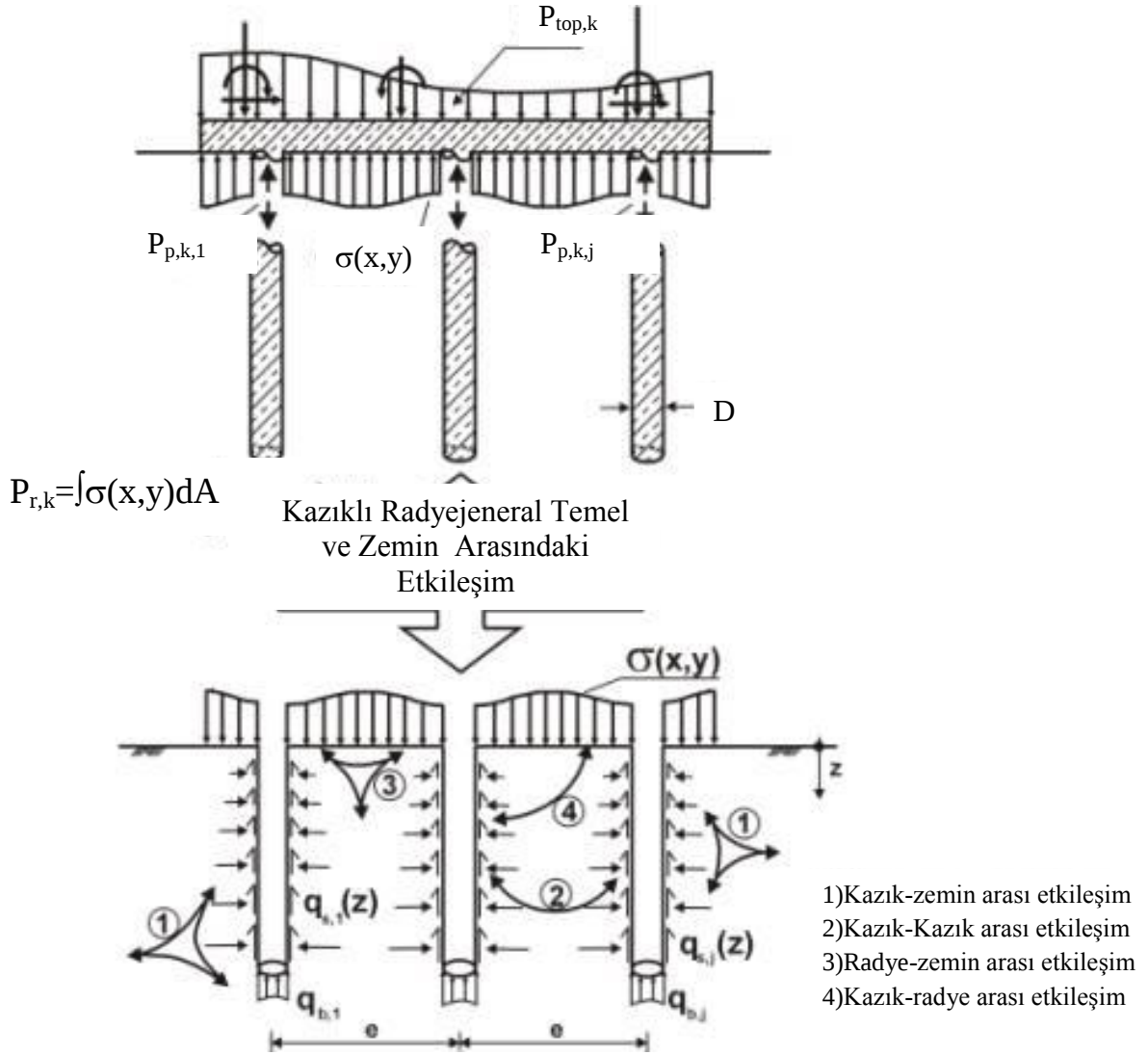
Hanisch, Katzenbach ve König (2002), kazıklı radyejeneral temeller üzerine yaptıkları çalışmalarda kazıklı radyejeneral temellerin yük aktarım mekanizmasının Şekil 4.2’de gösterildiği gibi çalıştığını belirtmişlerdir. Buna göre kazıklı radyejeneral temel sisteminin taşıma gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{top} = P_r + \sum P_p \quad (4.1)$$

Burada P_r uygulanan düşey yükün radyejeneral temel tarafından taşınan miktarını, $\sum P_p$ ise uygulanan düşey yükün radyejeneral temel altında yer alan kazık grubu tarafından taşınan miktarını simgelemektedir. Radyejeneral temelin taşıma gücü Şekil 4.2’de belirtildiği gibi uygulanan dış yük ve momentler altında zeminin radyejeneral temel ile temas ettiği alan boyunca oluşan gerilmelerin söz konusu alan üzerinden integrasyonu ile elde edilir. Kazıkların taşıma gücü ise uç ve sürtünme direnci olarak iki bileşene ayrılır ve ayrı ayrı hesaplanır.

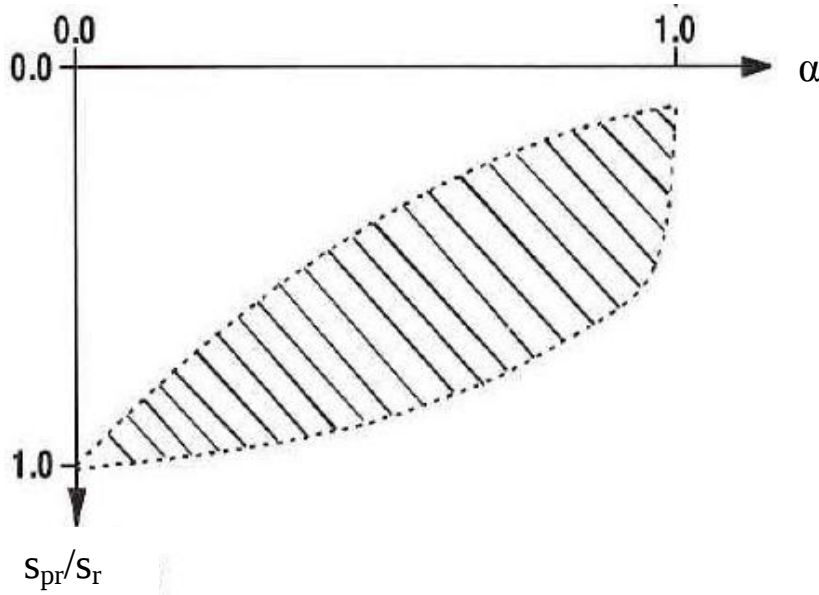
Kazıklı radyejeneral temellerin taşıma gücü ve oturma davranışında önemli bir rol oynayan kazıklı radyejeneral temel katsayısı kazıklar tarafından taşınan yükün toplam yüke oranı olarak tanımlanır.

$$\alpha = \frac{\sum P_p}{P_{top}} \quad (4.2)$$



Şekil 4.2 : Kazıklı radyejeneral temellerin yük aktarım mekanizması (Hanisch ve diğ., 2002)

Buna göre altında kazık grubu bulunmayan radyejeneral temeller için kazıklı radyejeneral temel katsayısı 0 iken, kazık başlığının zemin ile temasta bulunmadığı kazıklı temeller için bu katsayı 1 değerini almaktadır. Kazıkların oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanıldığı kazıklı radyejeneral temeller için ise söz konusu katsayının değeri 0 ila 1 arasında değişmektedir (Şekil 4.3). Şimdiye kadar olan kazıklı radyejeneral temel uygulamalarında yapılan ölçümler sonucu bu katsayının 0.3 ila 0.8 arasında değerler aldığı gözlenmiştir (Katzenbach ve diğ., 2005).



Şekil 4.3 : Kazıklı radyejeneral temel katsayısının değişiminin oturmaya etkisi (Hanisch ve diğ., 2002)

4.3 Arazide Yapılan Çalışmalar

Kazıklı radyejeneral temel sistemleri özellikle 1980'lerden itibaren Bölüm 4.2'de ayrıntılı olarak bahsedilen zemin profilinin hakim olduğu bölgelerde geleneksel kazıklı temel sistemlerine nazaran çok daha ekonomik olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle Frankfurt ve Londra kilinin özelliklerinden dolayı Frankfurt am Main ve Londra'da söz konusu sistemin kullanıldığı birçok başarılı uygulama gerçekleştirilmiştir (Turek, 2006, Reul, 2000). Bunlara örnek olarak 130 m yüksekliğinde bir yapı olan Torhaus der Messe Frankfurt (Sommer, 1991), Hochhaus Galileo, Frankfurt (Katzenbach ve diğ., 2001) ve Commerzbank yapıları gösterilebilir. Torhaus der Messe projesinin temel inşaatı sırasında kazıklı radyejeneral temel sisteminin taşıma gücü davranışını incelemek için kazık uçlarına gerilme ölçerler, tabanda oluşan basınçları incelemek için radyejeneral temel altına taban basıncı ölçerler ve ekstansometreler, ayrıca kazıklarda oluşan eğilme momentlerini incelemek için kazık başlarına ve kazık boyunca 4 noktada kazık enkesitinde uzama ölçerler yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda toplam yükün ön hesap aşaması sırasında hesaplanandan çok daha büyük bir kısmının (yaklaşık %80) radyejeneral temel tarafından zemine aktarıldığı belirlenmiş, ayrıca oturmaların söz konusu yapının altına yalnızca radyejeneral temel inşa edilmesi

durumu için hesaplanan oturma miktarının yaklaşık %50'si mertebelerinde kaldığı belirlenmiştir (Sommer, 1991).

Yine Frankfurt am Main bölgesinde inşa edilen 228 m yüksekliğindeki ofis binası MAX, çok yakınında yer alan ve benzer zemin profili üzerine inşa edilmiş EUROTHEUM yapısının temel sistemine yerleştirilmiş ekipmanlar sayesinde elde edilen verileri kullanarak geri hesap yöntemiyle projelendirilmiştir (Katzenbach ve diğ., 2005). EUROTHEUM temel sistemine üstyapıdan 550 MN'luk bir yük gelmekte ve yapının inşa edileceği zemin profili 9 m kalınlığında bir kuaterner kum ve çakıl tabakası, altında 49 metre kalınlığında kil tabakası ve daha altında anakaya olarak yer alan Frankfurt kireçtaşıdan oluşmaktadır. Bu veriler doğrultusunda yapının temel sistemi kazıklı radyejeneral temel sistemi olarak projelendirilmiştir. 1.0 ila 2.5 m arasında değişen kalınlıktaki radyejeneral temelin altına uzunlukları 25 ila 30 m arasında değişen 1.5 m çapında 25 adet kazık yerleştirilmiştir. Bu kazıklardan 4 tanesine taşıma gücü davranışlarını incelemek amacıyla kazık başlarına yük hücreleri, radyejeneral temel altına taban basıncını ölçerler ve altı noktaya boşluk suyu basıncı ölçerler yerleştirilmiştir. Topografik ölçümler sonucu binada oluşan oturma belirlenmiş, buna göre oluşan maksimum oturma 3 cm civarında iken, aynı yapı için nümerik analiz yoluyla yapılan geri hesap sonucu elde edilen maksimum oturma değeri yaklaşık 5.5 cm olarak bulunmuştur. Bu fark zeminin halen konsolide olması ve aletsel gözlem ile elde edilen verinin nihai değer olmamasından kaynaklanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen uygulamalara ek olarak Berlin kumu olarak adlandırılan Berlin taşıyıcı zemini üzerinde de başarılı birçok kazıklı radyejeneral temel uygulaması gerçekleştirilmiştir. Berlin bölgesinde zemin profili genel olarak kalınlığı 40 m'ye varan, sıkı-çok sıkı kum ve marn tabakalarından oluşmakta olup zemin elastisite modülü E, derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu zemin profili üzerinde 1995-1997 yılları arasında inşaatı tamamlanan Treptowers binası, asansör kovanının altında -8.00m kotunda, diğer bölgelerde ise -5.50 m kotunda yer alan bir radyejeneral temel üzerine inşa edilmiştir. Üstyapıdan gelen yükü derinde yer alan çok sıkı kum tabakasına taşıtabilmek için radyejeneral temelin altına 54 adet kazık yerleştirilmiştir (Katzenbach ve diğ., 2000). Radyejeneral temel kotunun değişkenliği sebebiyle, kazık boyları 12.5 m ila 16.0 m arasında değişmektedir. Temel inşaatı sırasında yerleştirilen aletsel gözlem ekipmanlarından elde edilen verilere göre bina

altında inşaatın tamamlanmasından sonra ölçülen nihai oturma değerleri yaklaşık 7.3 cm mertebelerindedir (Katzenbach ve diğ., 2000).

Bu bölgede inşaatı tamamlanan bir diğer yapı olan Sony-Centre binası, 2,600 m²'lik bir oturma alanına sahip olup, inşa edilecek olan radyejeneral temelin alt kotundan itibaren yarı katı buzul birikinti tabakası bulunması sebebiyle temel altına çapı 1.5 m ve boyu 20-25m arasında değişen 44 adet kazık yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen maksimum oturma değerinin yaklaşık 2.8 cm olduğu görülmüştür (Katzenbach ve Reul, 2003).

4.4 Laboratuvar Çalışmaları

Kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin taşıma gücü ve oturma davranışlarını güvenilir bir şekilde belirleyebilmek için Bölüm 4.3'te detaylı olarak anlatılan arazi deneylerine ek olarak laboratuvarda temel sistemi belirli bir ölçekte küçültülmüş olarak modellenerek belirli bir düşey ya da yatay yük altında gösterdiği davranış incelenilmektedir. Bu esnada, sınır şartları kontrol edilebilmekte ve gerekmesi halinde değiştirilebilmektedir (Turek, 2006).

Garg (1979) tarafından gerçekleştirilen, kum zemin içerisinde yer alan kazık grubu ve kazıklı radyejeneral temel sisteminin davranışlarını karşılaştıran büyük ölçekli laboratuvar deneyleri sonucunda kazıklı radyejeneral temel sisteminin rijitliğinin kazık grubunun rijitliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Garg (1979), kazık başlığı tarafından taşınan yükün sabit olmadığını, kazıklı radyejeneral temel sisteminin oturmasına bağlı olarak değiştiğini vurgulamıştır.

Thaher ve Jessberger (1991), kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin davranışını oluşturdukları modeli santrifüj deneyine tabi tutmak suretiyle incelemişlerdir. Deneyler 3 seri halinde gerçekleştirilmiş olup, ilk seride kazık sayısının, ikinci seride kazık uzunluğunun ve üçüncü seride kazık çapının temel sisteminin davranışına olan etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Poulos (1994) tarafından geliştirilen ve aşağıda detaylı olarak anlatılacak olan GARP programı yardımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve verilerin uyumlu olduğu gözlenmiştir. İlk seriden elde edilen sonuçlara göre, kazık sayısı arttıkça oturma miktarı azalmakta ve kazıklar tarafından taşınan yük miktarının toplam yüke oranı artmaktadır. Ayrıca optimum kazık adedine ulaşıldıktan sonra kazık adedinin artmasının oturma davranışı ve

kazıklar tarafından taşınan yük miktarı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. İkinci seri yapılan deneyler sonucunda ise kazık uzunluğunun artmasının oturmayı azaltıcı yönde etki yaptığı belirlenmiştir. Ancak kritik kazık uzunluğuna ulaşıldıktan sonra kazık uzunluğunun artmasına rağmen kazıklar tarafından taşınan yük oranında önemli bir artış meydana gelmemektedir (Thaher ve Jessberger, 1991). Üçüncü seride ise kazık çapı arttıkça oturmanın azaldığı, kazıklar tarafından taşınan yük oranının ise kazık çapı arttıkça artmakta olduğu görülmektedir. Yine Thaher (1991) tarafından yapılan çalışmalarda kazıklı radyejeneral temel sisteminde meydana gelen oturmanın aynı şartlar altında sistemin yalnızca radyejeneral temel olarak projelendirilmesi halinde oluşacak oturma değerlerine kıyasla %24-%35 oranında daha az olduğu görülmüştür.

Horikoshi (1995), kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin optimum tasarımı konusunda yaptığı çalışmalar sırasında kil zemin içerisinde bir dizi santrifüj model deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler sonucunda radyejeneral temel altında merkez bölgesinde kazık adedinin azaltılması halinde farklı oturma değerlerinin büyük ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir. Kazıklı radyejeneral temellerde kazık başlığı altında yer alan kazıklarda en büyük yükü köşelerdeki kazıklar almaktadır. Kenarlardaki kazıklar tarafından daha az yük taşınırken, orta bölgedeki kazıklara düşen yük daha azdır. Bunun ana sebebi kazıklar yerleşim aralığının belirli bir değer altında kalması durumunda ortaya çıkan grup etkisidir. Bu şekilde yukarıda da bahsedildiği gibi kazık-kazık etkileşimi yükün taşınmasına yardımcı olmaktadır.

4.5 Nümerik Analiz ile Hesap Yöntemleri

4.5.1 Basitleştirilmiş hesap yöntemleri

Bu yöntemler sistemin tasarımının ön aşamasında kullanılmakta olup ilk olarak yalnızca radyejeneral temelin performansı, diğer bir deyişle düşey ve yanal taşıma kapasitesi, toplam ve farklı oturma değerleri geleneksel yöntemlerle analiz edilir ve daha sonra kazıklar sisteme dahil edilir. Radyenin tek başına üstyapıdan gelen yükün belirli bir kısmını taşıyabilecek olması halinde kazıklı radyejeneral temel sistemi geleneksel çözüm yöntemiyle dizayn edilir, yani radyejeneral temel esas temel sistemi olan kazıklara gelen yükü azaltmak için kullanılır. Eğer radye taşıma gücü kriterini sağlıyor, ancak hesaplanan toplam veya farklı oturma değerleri izin verilen değerleri aşıyorsa, bu durumda kazıklar oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanılır.

4.5.1.1 Poulos ve Davis yöntemi(1980)

Bu yöntemde tüm sistemin yük-oturma eğrisi basitleştirilerek elle hesap yapılmaktadır. Kazıklı radye temelin rijitliğinin, sadece radyenin rijitliğinin ve kazıkların ve radyenin nihai taşıma güçleri elastik teori yardımıyla hesaplanmaktadır.

4.5.1.2 Randolph yöntemi(1983, 1994)

Randolph tarafından geliştirilen yöntemde, kazıklı radyejeneral temel sisteminde üstyapıdan gelen yükün kazıklar ve radye arasındaki paylaşımını belirlemek için bağıntılar geliştirilmiştir. Kazıklı radye temel sisteminin Randolph tarafından basitleştirilmiş hali Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Buna göre kazıklı radyenin rijitliği aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$k_{pr} = \frac{1 - 0.6 * \left(\frac{k_r}{k_p}\right)}{1 - 0.64 * \left(\frac{k_r}{k_p}\right)} * k_p \quad (4.3)$$

k_{pr} : kazıklı radyejeneral temelin rijitliği

k_r : radye temelin rijitliği

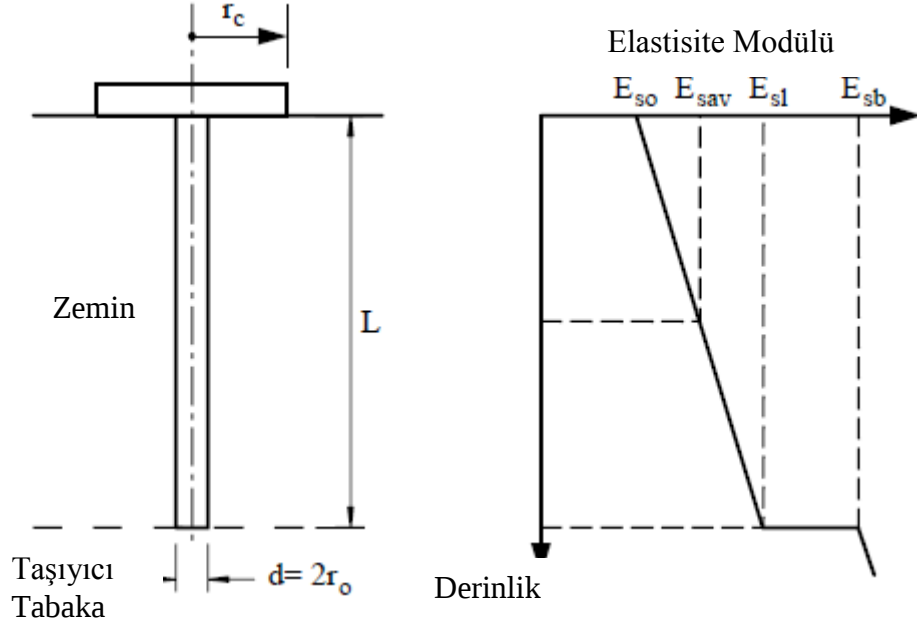
k_p : kazıkların rijitliği

Kazıklar tarafından taşınan yükün toplam yüke oranı (4.2) no'lu bağıntı yardımıyla hesaplanabilmekte olup, radyejeneral temel tarafından taşınan yükün kazıklar tarafından taşınan yüke oranı ise şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2}{1 - 0.8 * \left(\frac{k_r}{k_p}\right)} * \frac{k_r}{k_p} \quad (4.4)$$

Burada P_r radyejeneral temel tarafından taşınan, P_p ise kazık tarafından taşınan yükü simgelemektedir.

Ancak Randolph tarafından geliştirilen bu yöntemin en önemli dezavantajı, sadece doğrusal davranış gösteren kazıklı radyejeneral temel sistemleri için geçerli olmasıdır. Bu sebeple sadece geleneksel yaklaşıma göre tasarlanan sistemler için kullanılabilir.



Şekil 4.4 : Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Basitleştirilmiş Hali
(Randolph, 1994)

4.5.1.3 Poulos-Davis-Randolph (PDR) yöntemi

Bu yöntemde göre kazıklı radyejeneral temel sisteminin düşey taşıma kapasitesi, aşağıda belirtilen iki değerden daha az olanının seçilmesi suretiyle belirlenir:

1. Radyenin ve radye altında yer alan tüm kazıkların taşıma güçlerinin toplamı,
2. Radye, kazıklar ve radyenin kazık grubunun çevresi dışında kalan kısmının oluşturduğu bloğun toplam taşıma gücü,

Yük oturma davranışını elde edebilmek için, Poulos ve Davis'in (1980) yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanılmakta, bununla beraber Randolph'un (1994) yük paylaşım metodu kullanılarak farklı bir açılım elde edilmekte ve yöntem geliştirilmektedir. Bu yaklaşımla, kazıklı radyenin rijitliği aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$k_{pr} = \frac{k_p + k_r * (1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 * \frac{k_r}{k_p}} \quad (4.5)$$

Bu denklemde Randolph'un 1994 yılında geliştirdiği bağıntıdan farklı olarak kazık ve radyenin etkileşimini temsil eden etkileşim faktörü α_{cp} parametresi de dahil edilerek çözüm gerçeğe daha yakın hale getirilmiştir.

Radyejeneral temelin rijitliği Elastisite Teorisi yardımıyla Fraser ve Wardle (1976) ve Mayne ve Poulos (1999) tarafından verilen çözümler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Kazıkların rijitliği ise yine elastisite teorisi yardımıyla Poulos ve Davis (1980), Fleming ve diğ. (1992) veya Poulos (1989) tarafından verilen çözümler kullanılarak hesaplanabilir. Bu yaklaşımlarda önce tek bir kazığın rijitliği hesaplanmakta, elde edilen değer daha sonra bir grup verimlilik katsayısı ile çarpılarak kazık grubuna ait rijitlik elde edilmektedir.

Poulos-Davis-Randolph (PDR) yönteminde toplam yükün radyejeneral temel tarafından taşınan kısmı şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k_r * (1 - \alpha_{cp})}{k_p + k_r * (1 - \alpha_{cp})} = X \quad (4.6)$$

P_r : radye tarafından taşınan yük

P_t : toplam yük

(4.5) no'lu bağıntıda yer alan radye-kazık etkileşim faktörü α_{cp} ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\alpha_{cp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\zeta} \quad (4.7)$$

Şekil 4.4'den de görüleceği gibi r_c kazık başığının ortalama yarıçapını (radye alanının kazık sayısına bölünmesiyle de elde edilebilir), r_0 ise kazık yarıçapını temsil etmektedir. ζ ise boyutsuz bir katsayı olup şu şekilde hesaplanır:

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (4.8)$$

$$r_m = \{0.25 + \xi[2.5 * \rho * (1 - \nu) - 0.25]\} * L \quad (4.9)$$

$$\xi = \frac{E_{s1}}{E_{sb}} \quad (4.10)$$

$$\rho = \frac{E_{sav}}{E_{s1}} \quad (4.11)$$

Bu denklemlerde;

ν : Zeminin Poisson oranı

L : kazık boyu

E_{s1} : kazık uç seviyesinde zeminin elastisite modülü

E_{sb} : kazık ucu altında yer alan taşıyıcı tabakanın elastisite modülü

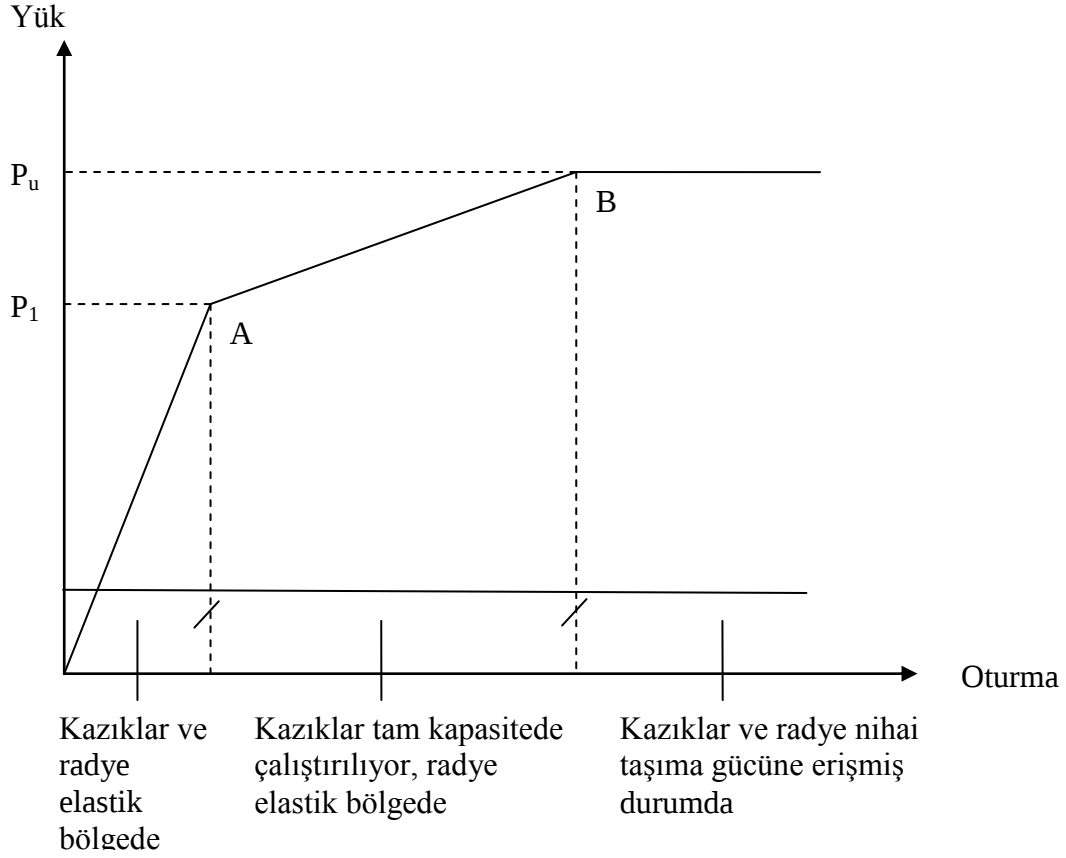
E_{sav} : kazık gövdesi boyunca zeminin ortalama elastisite modülünü belirtmektedir.

Bu denklemler yardımıyla üç doğrudan oluşan bir yük-oturma eğrisi çizilir (Şekil 4.5). İlk olarak düşünülen kazık sayısı için (4.5) denklemi yardımıyla kazıklı radyejeneral temelin rijitliği hesaplanır. Kazık taşıma kapasitesinin tamamı mobilize olana kadar bu rijitlik değeri kullanılır. Kazık taşıma gücünün tamamının aynı anda mobilize olduğu varsayımıyla kazık kapasitesine erişilen yük olan P_1 yükü aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1 - X} \quad (4.12)$$

Burada P_{up} radye altında yer alan kazık grubunun nihai taşıma gücü, X ise (4.6) denklemi yardımıyla hesaplanan üstyapıdan gelen yükün radye tarafından taşınan kısmını göstermektedir. Bu durumda $1-X$ değeri toplam yükün kazıklar tarafından taşınan kısmına eşit olacaktır. Şekil 4.5'te A noktası ile gösterilen bu noktadan itibaren kazıklı radyejeneral temel sisteminin nihai taşıma gücüne eriştiği B noktasına kadar temel sisteminin rijitliği radyenin rijitliği K_r değerine eşittir. Bu aşamadan itibaren yük oturma eğrisi yatay bir hal alır.

Herhangi bir radyejeneral temel için değişik kazık konfigürasyonları için yük-oturma eğrileri MATHCAD veya benzeri bir matematiksel program yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilir. Bu şekilde kazık sayısı ve sistemin ortalama oturma değerleri arasındaki ilişki belirlenebilmektedir. Poulos (2002) ve Mandolini ve diğ. (2005) bu yöntemle elde edilen çözümlerin üç boyutlu sayısal çözümlerle elde edilen sonuçlarla zemin içerisinde gözle görülür akma başlayıncaya kadar çok iyi bir şekilde örtüştüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 4.5 : Poulos-Davis-Randolph PDR Yöntemi ile elde edilen kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma eğrisi (Poulos, 2001)

4.5.1.4 Burland yöntemi (1995)

Radyejeneral temel altındaki kazıkların oturmaya azaltıcı eleman olarak kullanılmaları ve tam kapasitede çalışmaları durumu için, Burland tarafından aşağıdaki basitleştirilmiş yaklaşım geliştirilmiştir.

1. Yalnızca radyejeneral temel için uzun süreli yük-oturma eğrisi çizilir. Bu durumda temel sisteminin tasarım yükü P_0 için S_0 büyüklüğünde bir oturmaya uğraması beklenmektedir.
2. S_0 değerinin belirli bir güvenlik katsayısına bölünmesi sonucu tasarım oturma değeri S_a hesaplanır.
3. Bu oturma değeri aşılmadan taşınabilecek maksimum yük olan P_1 değeri elde edilir.
4. $(P_0 - P_1)$ yükünün kazıklar tarafından taşındığı kabul edilir. Bu kazıkların çevre direnci tamamen mobilize olacağı için güvenlik katsayısı kullanılmasına gerek yoktur. Bununla beraber, Burland (1995) tarafından en

güvenli yaklaşımın sağlanması açısından kazık çevre direncinin 0.9 gibi bir katsayı ile azaltılması önerilmektedir.

5. Kazıkların P_{su} değerinden daha fazla yük taşıyan kolonların altında yer alması halinde, kazıklı radye sistemi azaltılmış kolon yüklerinin etkidiği bir radyeye eşdeğer olarak düşünülebilir. Bu kolonlarda, indirgenmiş kolon yükü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_r = Q - 0.9P_{su} \quad (4.13)$$

6. Radyede oluşan eğilme momentleri bu durumda kazıklı radye temel sistemine eşdeğer ve üzerine Q_r yükü etkileyen bir radye temelin çözümlenmesi ile elde edilir (Şekil 4.6).
7. Oturmaların hesaplanması ile ilgili Burland (1995) tarafından kesin bir yöntem geliştirilmemiş olmakla beraber, bu durumda Randolph (1994) tarafından geliştirilen ve aşağıda belirtilen oturma tahkiki yeterli sonuçlar verebilmektedir.

$$S_{pr} = \frac{S_r * k_r}{k_{pr}} \quad (4.14)$$

Bu bağıntıda:

S_{pr} : kazıklı radyejeneral temelin oturması

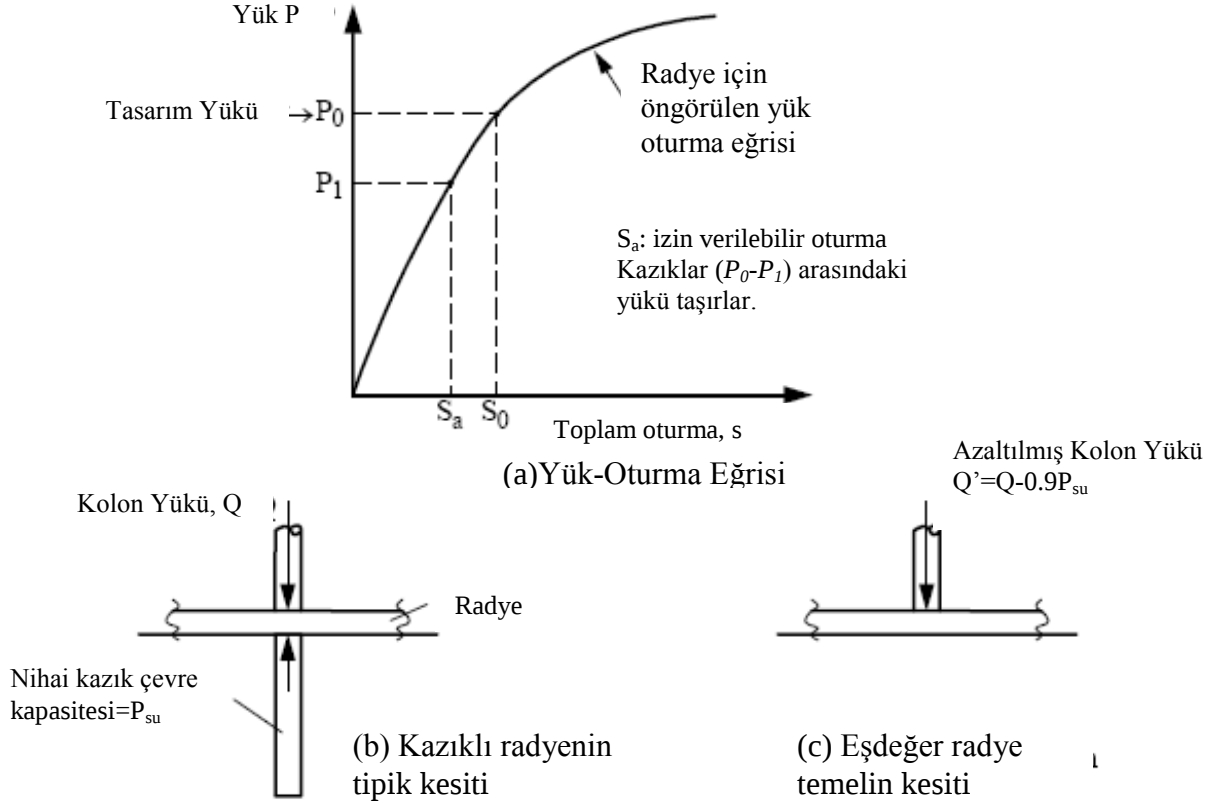
S_r : eşdeğer radye temelin oturması

k_r : Eşdeğer radyenin rijitliği

k_p : kazıklı radyejeneral temelin rijitliğini simgelemektedir. Radye temelin rijitliği elastik teori yardımıyla hesaplanırken, kazıklı radyejeneral temelin rijitliğini hesaplamak için (4.5) bağıntısı kullanılabilir.

4.5.2 Yaklaşık bilgisayar çözümüne dayalı yöntemler

Bu yöntemler basitleştirilmiş yöntemlere nazaran daha komplike olmakla beraber basitleştirici bir çok kabule dayanan yaklaşımları içermektedir.



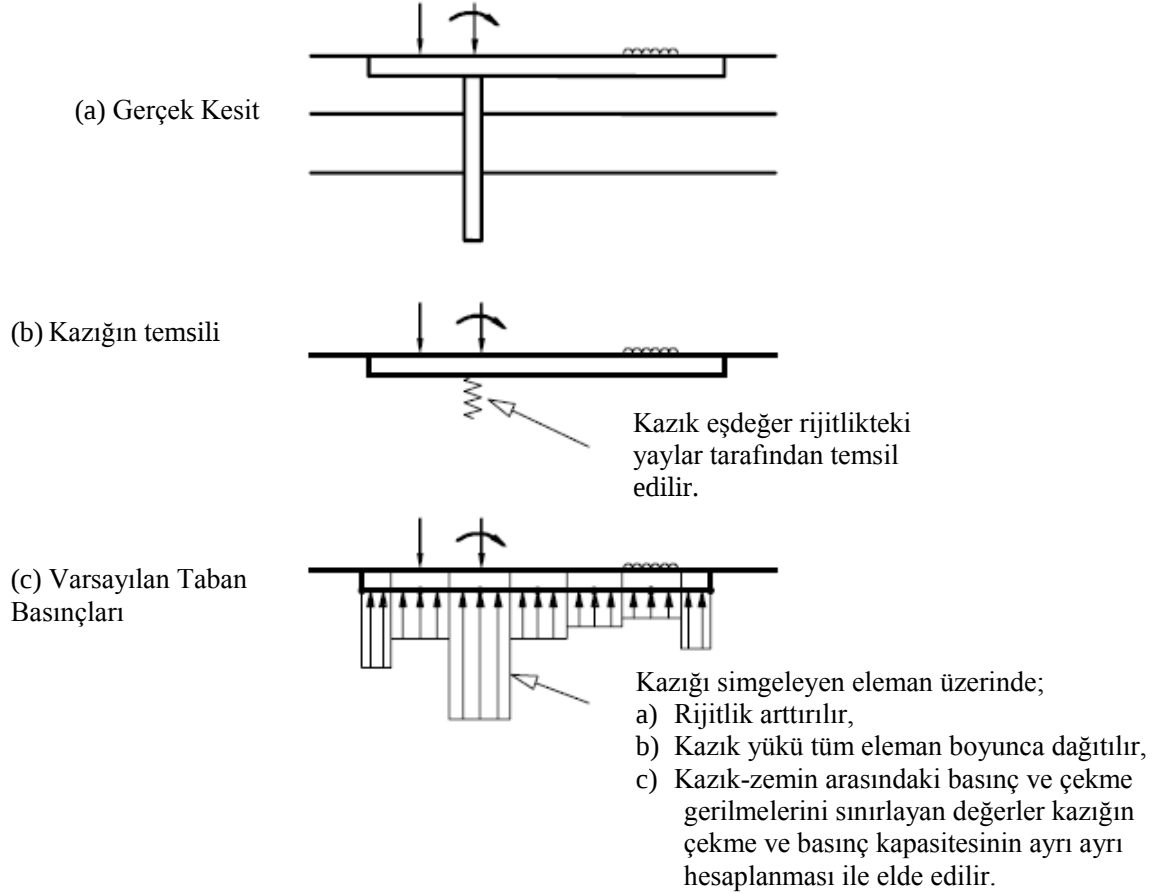
Şekil 4.6 : Burland Yöntemi ile Kazıklı Radyejeneral Temelin Basitleştirilmiş Çözümü

4.5.2.1 Yaylar üzerinde şerit yaklaşımı

Bu yöntemde, kazıklı radyejeneral temel sisteminin herhangi bir kesidi için radye temel bir şerit temel olarak, alttaki kazıklar ise yaylarla modellenmektedir. Kazık-kazık, kazık-radye, kazık-zemin ve radye-zemin arasındaki etkileşim yaklaşık kabuller yardımıyla gözönüne alınmakta ve radyenin analizin yapıldığı kesitin haricinde kalan kısmı bu kısımdan dolayı oluşacak oturmaların serbest arazi oturması şeklinde modellenmesi yoluyla dikkate alınmaktadır. Bu etkilere ilaveten, söz konusu kesitteki oturmalar ve momentler hesaplanmakta ve radye alanının dışında oluşan oturmalar da elde edilebilmektedir.

Bu yaklaşıma Poulos ve diğ. (1994) tarafından geliştirilen GASP (Geotechnical Analysis of Strip with Piles-Kazıklı Şeritlerin Geoteknik Analizi) isimli program örnek verilebilir (Şekil 4.7). Söz konusu yaklaşım daha kapsamlı çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla uyumluluk sağlamakta olup, bu yöntemlere göre en büyük dezavantajları radyede oluşacak eğilme momentlerini göz önüne almasına rağmen burulma momentlerini dikkate almaması ve şerit üzerinde herhangi bir

noktada iki boyutta analiz yapılması halinde elde edilen gerçek değerlerden çok farklı oturma değerleri ile karşılaşılmasıdır. Bu probleme çözüm olarak ise iki boyutlu analiz yapılması sırasında zeminin sadece bir yönde (uzun yönde) doğrusal olmayan davranış gösterdiği kabul edilerek kısa yönde kazık ve radyenin doğrusal davranış gösterdiği varsayımıyla hesap yapılması fikri geliştirilmiş, bu sayede zeminin gerçeklikten uzak sünme değerleri alması önlenmiştir.



Şekil 4.7 : Yaylar Üzerinde Şerit Yaklaşımının GASP (Geotechnical Analysis with Strip on Piles) Programı Yardımıyla Modellenmesi (Poulos, 1994)

4.5.2.2 Yaylar üzerinde plak yaklaşımı

Bu yaklaşımın yaylar üzerinde şerit yaklaşımından farkı, radyenin bir kesidini şerit temel olarak modelleyerek değil, radyenin tamamını elastik bir plak ve zemini elastik sürekli bir düzlem olarak modelleyerek çözüm yapılmasıdır. Bu yaklaşım üzerinde daha önceden yapılan çalışmalarda (Hongladaromp ve diğ., 1973) bazı etkileşim bileşenleri ihmal edilmiş ve kazık-radye rijitlikleri olması gerekenden çok daha yüksek değerler almıştır.

Poulos (1994) elastik teori yardımıyla Hongladaromp (1973) tarafından ihmal edilen etkileşimleri tanımlamış ve plağın çözümü için sonlu farklar yönteminden yararlanarak GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles – Kazıklı Radyelerin Geoteknik Analizi) isimli bir program geliştirmiştir. Bu programda tabakalı zemin profilini modelleyebilme, ayrıca kazıkların nihai taşıma gücüne erişmesinin, radyenin altında taşıma gücüne erişilmesinden dolayı oluşacak göçmelerin ve düşey zemin oturmalarının sistemin üzerinde yarattığı etkinin kolaylıkla izlenebilmesi mümkündür. Bu yaklaşımda yapılan kabuller Bölüm 4.5.2.1’de belirtilenlerle benzeşmektedir.

Sales ve diğ. (2000) tarafından geliştirilen GARP’ın yeni sürümünde, sonlu farklar yöntemi yerine sonlu elemanlar yöntemi ile sistem çözülmüş ve kazıklarda nihai taşıma gücüne erişimin modellenmesi için geliştirilmiş bir yaklaşım kullanılmıştır.

Russo (1998) ve Russo ve Viggiani (1997) tarafından geliştirilen yukarıda bahsedilen yöntemle benzerlikler içeren yaklaşımda, yukarıda belirtilen kazık-kazık, kazık-radye- zemin-kazık ve zemin-radye etkileşimleri yine elastik teori yardımıyla hesaba katılmış olup, kazıkların doğrusal olmayan davranışı tekil kazıklar için hiperbolik yük-oturma eğrilerinin olduğu varsayımıyla dikkate alınmıştır. Ancak kazık-kazık etkileşimi sadece kazığın elastik davranış gösterdiği bölge için uygulanmış ve yük-oturma eğrisindeki non-lineer bölgenin sadece söz konusu kazığın yüklenmesinden dolayı olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen tüm yaklaşımlarda radye ince bir plak olarak modellenmiş olup, kalın plak kullanılmasının analiz sonucunda ne gibi değişiklikler yaratacağı merak konusu olmuştur. Nitekim Poulos ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmalarda radye öncelikle ince bir plak eleman olarak daha sonra ise 0.3 m kalınlığında bir plak olarak ve sonlu elemanlar ağının radyeyi temsil eden kısmına radye için bir rijitlik katsayısı atayarak modellenmiş, elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda hem rijit hem de esnek radyeler için radyenin ince ya da kalın plak olarak modellenmesinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.

4.5.3 Sonlu ve sınır eleman yöntemleri

Bu başlık kapsamında bahsedilecek olan yöntemler basitleştirilmiş hesap yöntemlerine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve detaylı tasarım aşaması

sırasında kullanılmaktadır. Bu yöntemler yardımıyla radye plağın her bölgesindeki ayrıntılı oturma dağılımı ve kazıkların yerleşimi belirlenebilmektedir.

4.5.3.1 Sınır eleman yöntemi

Sınır eleman yönteminde, kazıklı radye temel sistemini oluşturan elemanlar ayrı ayrı analiz edilir ve bu elemanların çözümünde elastik teoriden yararlanılır (Butterfield ve Banerjee, 1971, Brown ve Wiesner, 1975, Kuwabara, 1989, Bilotta ve diğ. 1991).

Kuwabara, sınır elemanlar yöntemi ile elastik, homojen ve izotrop yarı uzay bir zemin içerisinde yer alan bir kazıklı radye temel sisteminin oturma ve yük transfer davranışlarını sınır eleman yöntemi yardımıyla modellemiş ve elde edilen sonuçları serbest başlıklı kazık gruplarının ve tekil kazıkların davranışlarıyla karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, radyenin doğrudan zemine aktardığı yük oranının toplam yükün yaklaşık olarak %20-%40'ı arasında olmasına rağmen, radyenin oturmayı azaltıcı etkisinin çok küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmaya ek olarak Poulos (1993) tarafından şişen ve oturan zeminlerin incelenmesinde kullanılan analiz yönteminde, Kuwabara (1989) tarafından geliştirilen sınır eleman metodu kullanılmış, ayrıca ek olarak kazık elemanları boyunca serbest zemin hareketlerine ve hem kazığın hem de radyenin çekmede ve basınçta göçmeye ulaşmasına izin verilmiştir. Ancak bu konudaki diğer çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da radye rijit kabul edilmiştir.

4.5.3.2 Sınır eleman ve sonlu eleman yöntemlerinin birlikte kullanıldığı yöntemler

Hain ve Lee (1978), radyenin elastik ince plak sonlu elemanlarla temsil edildiği, kazık özelliklerinin ise sınır eleman yöntemiyle hesaplandığı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntem zemini homojen, yarı sonsuz, elastik bir kütle olarak kabul etmekte ve kazıkların taşıyabileceği yükler için bir sınırlama getirmektedir. Bu yaklaşım radye-zemin, zemin-zemin, radye-kazık ve zemin-kazık arasındaki etkileşimlerin tümünü göz önüne almakta, böylece kazık grubunun oturmayı azaltıcı etkisini net bir şekilde ortaya koyabilmektedir (Gandhi ve Maharaj, 1995).

Franke ve diğ. (1994) tarafından geliştirilen hibrid(kombinasyon) metotta da yukarıda belirtildiği gibi kazıklar için sınır eleman yöntemi, radye için ise sonlu eleman yöntemini kullanarak çözüm yapılmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı

doğrusal olmayan kazık davranışı ve kazıkların teşkilinden sonra zeminde oluşacak artık gerilmelerin dikkate alınabilmesidir.

Sinha (1997), bütün kazıkların sınır eleman analiziyle ayrı ayrı parçalara bölünerek incelendiği ve radyenin ince plak sonlu elemanlarla temsil edildiği bir sınır eleman yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışma kapsamında da zemin elastik ve homojen bir kütle olarak tanımlanmış, ancak radye-zemin arasında oluşan basınçlar hem basınç hem de çekme için sınırlandırılarak, buna ilaveten kazık gövdesi ve kazık ucu ile zemin arasındaki gerilme değerlerine sınırlama getirilerek zeminin doğrusal olmayan davranışı da tanımlanmıştır.

4.5.3.3 Basitleştirilmiş iki boyutlu sonlu eleman yöntemleri

Bu kapsamda yer alan çalışmalar genellikle kazık grubunun ya da kazıklı radyejeneral temel sisteminin düzlem gerilme problemi haline (örn:Desai, 1974) veya eksenel simetrik problem haline (Naylor ve Hooper, 1974) getirilerek çözümünü önermektedir. Her iki durum için de, hem radye hem de zemin ayrı ayrı parçalara bölünerek sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmekte, bu sebepten ötürü radyenin ve zeminin doğrusal olmayan davranışı kolaylıkla dikkate alınabilmektedir. Zeminin iki fazlı davranışı da hesaba katılabilmekte, bunun sonucunda zamana bağlı oturma ve zeminin oturmasına bağlı olarak kazık yükünün dağılımı hesaplanabilmektedir. Hooper (1973), Londra’da inşa edilen bir yapı için eksenel simetrik modelleme sonucunda elde edilen verilerin gerçekte gözlem sonucu elde edilen verilere benzer olduğunu göstermiştir. Ancak bu basitleştirilmiş yaklaşımla yapılan çözümlerde rastlanan temel problem, sadece düzgün yükleme modellerinin analiz edilebilmesi ve radye içerisinde burulma momentlerinin elde edilememesidir.

Esas olarak tam bir sonlu elemanlar yöntemi olmamasına rağmen, Hewitt ve Gue (1994) karstik kireçtaşı içeren bir zemin üzerinde kazıklı radyejeneral temel sistemini modellemişlerdir. Problem ticari bir yazılım olan ve sonlu farklar kodunu kullanan FLAC yardımıyla modellenmiştir. Temel sistemi düzlem gerilme problemi olarak tanımlanmış ve yaklaşık değerler vermesine rağmen kireçtaşında yer alan boşlukların temel sistemlerinin oturmasındaki etkisini göstermekte oldukça başarılı olmuştur.

4.5.3.4 Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi

İnşaat mühendisliğinde herhangi bir problemin gerçeğe en yakın modellenmesi için en uygun yol, problemin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmesidir (Katzenbach ve diğ., 1998). Ottaviani (1975) bu metodu kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde ilk uygulayan isimlerden birisidir. Zhuang ve diğ. (1991) ve Lee (1993) kazıklı radyejeneral temel sistemleri içinde yük dağılımını ve oturmayı belirlemek ve parametrik çözümler geliştirmek amacıyla doğrusal üç boyutlu çözümler geliştirmiştir. Bu değişken parametreler içerisinde rölatif radye rijitliği, kazık uzunluğu ve kazık sayısı gibi faktörler yer almaktadır.

Ta ve Small (1996) radye için ince plak sonlu elemanlarla, zemin için ise sonlu tabaka metodu ile çözüm yapan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem zeminin doğrusal davranışı ile sınırlı olmakla beraber, tabakalı zemin profillerinde yapılan çözümlerde oldukça başarılı sonuçlar vermekte ve radye altında her bölgeye kazık yerleşimini mümkün kılmaktadır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar içerisinde en kapsamlı olanlarından biri Wang (1995) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada düşey yük altında kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bu çözüm için bilgisayar kullanımı mutlaka gerekli olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar daha basit yöntemlerle elde edilen verilerin kontrol edilmesi için bir referans noktası oluşturmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda Bölüm 4.5.1.1’de anlatılan rijit radyenin elastik olarak ve etkileşim faktörleri yardımıyla çözülmesine dayanan Poulos ve Davis (1980) yönteminin, üç boyutlu nümerik analizlerle uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

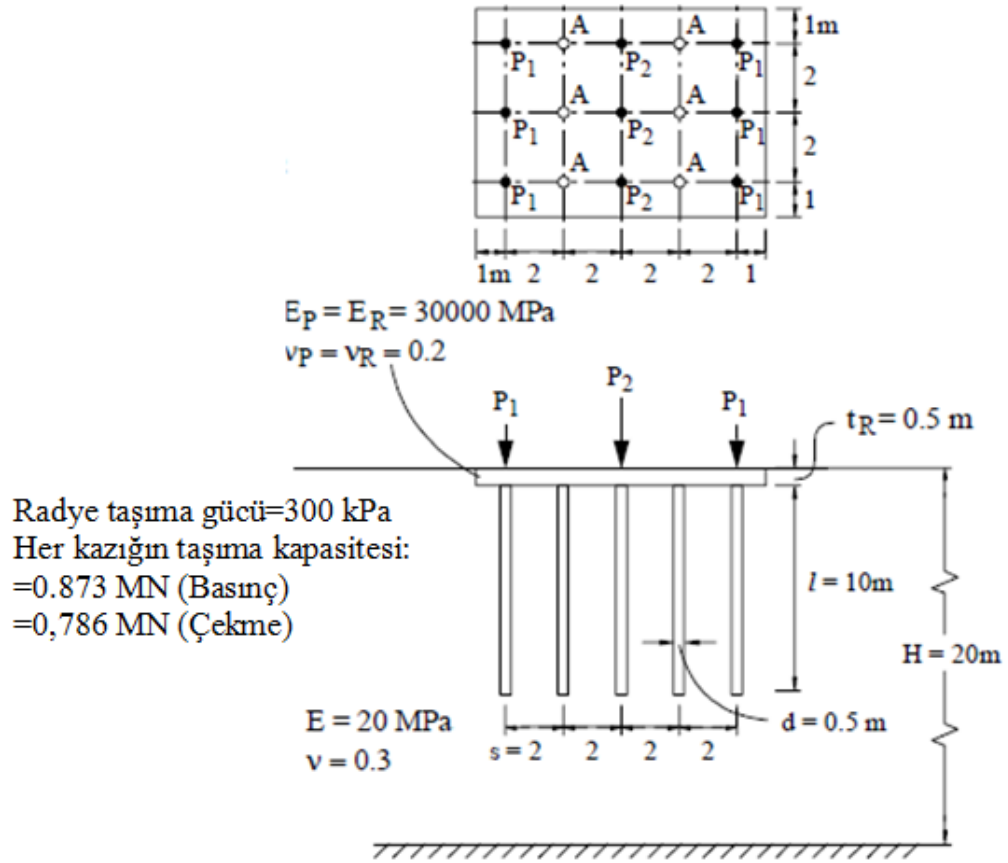
Reul ve Randolph, 2003 yılında yaptıkları çalışmada Almanya, Frankfurt’ta yer alan Messeturm, Torhaus ve Westend 1 binaları için üç boyutlu sonlu eleman analizi ile yaptıkları çözümleri, sahada yapılan ölçümlerden elde edilen verilerle karşılaştırmışlardır. Buna göre üç boyutlu analiz yöntemiyle elde edilen toplam ve farklı oturma değerleri arazide ölçülen değerlerle uyumluluk göstermekte, ayrıca kazıklı radyede oluşan oturma değerleri, aynı zemin üzerinde modellenen radyejeneral temelde gözlenen oturma değerlerinin %51 ila %63’ü arasında değişen mertebede kalmaktadır.

Reul ve Randolph (2004), 259 adet farklı kazıklı radyejeneral temel konfigürasyonunu üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelemişlerdir. Bu çalışmada kazık boyu, kazıkların yerleşimi, kazık adedi, radye-zemin rijitlik oranı ve radye temel üzerindeki yük dağılımı değişken, temel sistemlerinde kullanılan toplam kazık uzunlukları ise sabit parametreler olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda kazık sayısının fazla fakat kazık uzunluklarının kısa olduğu sistemlerde tekil kazık uzunluğunun daha fazla fakat kazık sayısının az olduğu sistemlere kıyasla ortalama oturma değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Farklı oturma değerleri ise daha ziyade zemin-radye rijitlik oranlarına ve yükün nasıl uygulandığına bağlı olarak değişmektedir. Buna ilaveten bu çalışmada yüklerin etkidiği bölgelerin altına yerleştirilecek kazıkların ve diğer bölgelerdeki değişken kazıkların toplam uzunluğunun minimum toplam kazık uzunluğuna eşit olduğu belirtilmiştir.

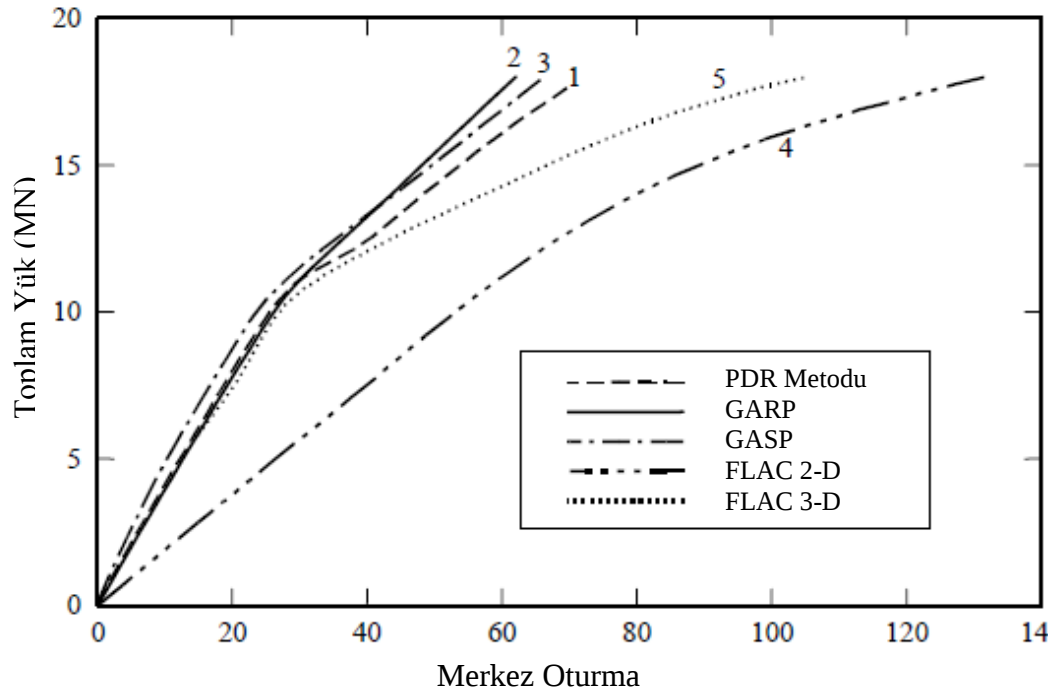
4.5.4 Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin analiz yöntemleri Şekil 4.8’de gösterilen örnek problem üzerinde karşılaştırılmış ve sistemin farklı yöntemler ile yapılan çözümlerde gösterdiği davranış incelenmiştir.

Farklı analiz yöntemlerinin sonucunda elde edilen yük-oturma davranış grafikleri Şekil 4.9’da verilmektedir. Bölüm 4.5.1.4’te anlatılan Burland metodu ile sistemin yük-oturma grafiği tam olarak elde edilemediği için bu yöntem dahil edilmemiştir. Grafikten söz konusu problem için iki boyutlu sonlu elemanlar programı FLAC 2-D yöntemi dışında tüm yöntemlerin uyumlu sonuç verdiği, ancak FLAC 2-D tarafından öngörülen oturma değerlerinin diğer yöntemlere nazaran çok fazla olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, FLAC 2-D ile düzlemsel gerilme kabulüne göre çözüm yapılmasıdır. Yaklaşık 12 MN’luk yük mertebesinde üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden (FLAC 3-D) diğerlerine nazaran daha fazla oturma değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi ise zeminin altında plastik bölgelerin oluşması ve buna mukabil plastik deformasyonların artmasıdır (Poulos, 2001).



Şekil 4.8 : Analiz yöntemlerinin karşılaştırılmasında kullanılan örnek problem (Poulos, 2000)



Şekil 4.9 : Çeşitli analiz yöntemleri sonucunda elde edilen yük-davranış grafikleri (Poulos, 2001)

Çizelge 4.1’de 9 kazıklı bir sistem için, 12 MN düşey yük altında yukarıda belirtilen yöntemler kullanılarak yapılan hesaplar sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Buna göre şu sonuçlara varılabilir:

1. Daha önce de belirtildiği gibi toplam oturmalar dikkate alındığında hemen tüm yöntemler uyumlu sonuçlar vermekte, yalnızca FLAC 2-D ile hesaplanan oturma değerleri diğerlerine göre 2 katı büyüklükte çıkmaktadır.
2. Köşe kazığının altında hesaplanan oturmalarda sapma merkezdeki oturmaya göre daha fazladır. Hesaplanan farklı oturma değerleri, 4.1 ila 11.8 mm arasında değişmektedir. 11.8 mm değeri yaylar üzerinde şerit yaklaşımı (GASP) ile elde edilmiş olup, beklenenin çok üzerinde bir değerdir. Bu sebeple bu analiz yönteminin farklı oturmaların hesaplanması amacıyla dikkatle kullanılması gerekmektedir.
3. Tüm yöntemler yükün belli bir kısmının kazıklar tarafından taşındığı sonucunu vermektedir. FLAC 2-D yöntemi bu oranı daha fazla hesaplarken, FLAC 3-D yöntemi nihai taşıma kapasitesine daha erken erişildiği kabulüne bağlı olarak diğerlerinden daha düşük değerler vermektedir.
4. Basitleştirilmiş yöntemler ve yaklaşık bilgisayar çözümüne dayanan yöntemler ile yapılan çözümlerde elde edilen radye eğilme momentleri genel olarak aynı mertebede çıkmaktadır. Ancak FLAC 2-D ve FLAC 3-D yönteminde momentler elde edilen gerilmeler yardımıyla hesaplanmış ve diğer yöntemlere göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Ancak bu değerler radye içerisinde yer alan yapısal gerilmeler değil, radyeyi temsil eden dış elemanların içerisinde yer alan Gauss noktalarında hesaplanan değerler olduğundan hatalı değerler olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple FLAC 3-D analizinde moment hesabı için iki farklı yaklaşım daha geliştirilmiş ve bunlar Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. İlk olarak radye içerisindeki her elemanın Gauss noktasındaki gerilme hesaplanmış, bu gerilmelerden iterasyon yardımıyla radyenin üst ve alt tarafındaki gerilmeler tahmin edilmiş ve bu iki değerlerin ortalaması alınarak moment hesaplanmıştır. İkinci yaklaşımda ise elde edilen deplasman değerleri radye eğilme rijitliği ile çarpılarak etkiyen kuvvet bulunmuş buradan da çift katlı integral alınarak moment değerleri elde edilmiştir. Görüldüğü üzere son iki yaklaşımla elde edilen moment değerleri uyumlu olmakla beraber halen diğer yöntemlerden daha alt mertebededirler.

Bunun sebebinin ise diğer yöntemlerde radyenin ince plak olarak modellenirken, üç boyutlu sonlu eleman analizinde üç boyutlu bir cisim olarak modellenmesi olduğu düşünülmektedir (Poulos, 2001).

Çizelge 4.1 : Değişik yöntemler ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Poulos, 2001)

Yöntem	Merkez Oturma (mm)	Köşe Kazığının Altındaki Oturma (mm)	Radyede Oluşan Maksimum Moment (MNm/m)	Kazıklar Tarafından Taşınan Yük Miktarı (%)
Poulos-Davis-Randolph (PDR)	36.8	-	-	77.0
GARP	34.2	26.0	0.684	65.1
GASP	33.8	22.0	0.563	65.5
Burland	33.8	29.7	0.688	65.5
FLAC 2-D	65.9	60.5	0.284	79.5
FLAC 3-D	39.9	35.8	(aşağıda verilmiştir)	58.2
çıktı verilerden hesaplanan moment (3 boyutlu analiz için geçerlidir)			0.326	
Dolaylı yollardan hesaplanan moment (3 boyutlu analiz için geçerlidir)			0.421	
Deformasyonlardan hesaplanan moment (3 boyutlu analiz için geçerlidir)			0.484	

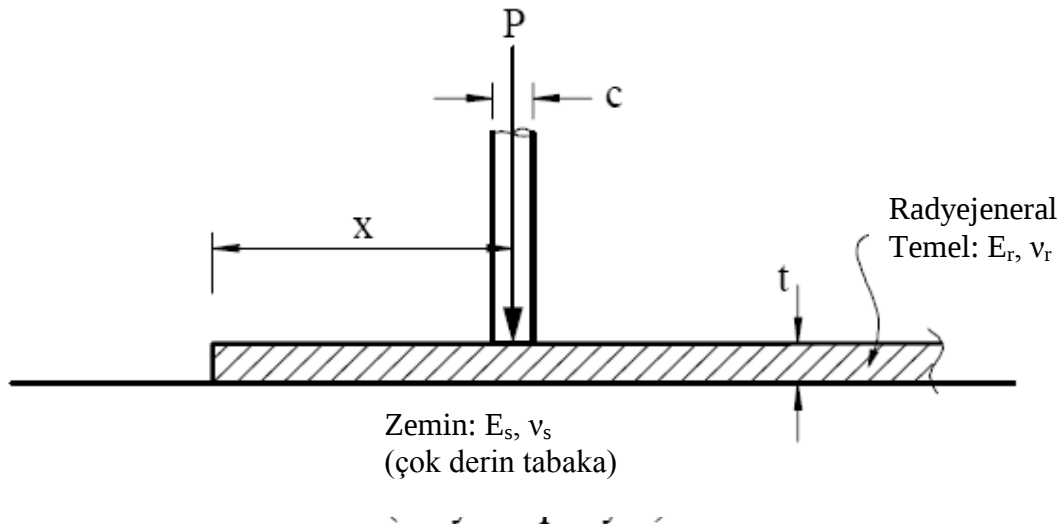
4.6 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminde Kazıkların Boyutlandırılması

Kazıklı radyejeneral temellerin tasarımı sırasında önemli bir basitleştirme de radyejeneral temellerin üzerinde yükün üniform olarak dağıldığı varsayımdır. Ancak pratikte çoğu zaman böyle bir durum söz konusu olmamaktadır. Üstyapıdan gelen

yükler kolonlar vasıtasıyla temele aktarılmakta, dolayısıyla kolonların olduğu bölgelerde diğer bölgelere nazaran daha fazla gerilme oluşmaktadır. Bu problemin çözülmesi için Poulos (2001) tarafından bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile tek başına belirli bir kalınlıktaki radyejeneral temelin karşılayabileceği maksimum kazık yükü ve bu değeri aşan kazık yükleri için o bölgeye yerleştirilmesi gereken kazık adedi hesaplanabilmektedir.

Radyejeneral temel üzerinde yer alan tipik bir kolon kesiti Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Buna göre radyejeneral bir temelin altında kazığa ihtiyaç duyulması için aşağıda belirtilen dört durumdan birinin gerçekleşmesi yeterlidir:

1. Kolon altında radyede oluşan eğilme momenti radye için izin verilen moment değerinden fazla ise,
2. Kolon altında radyede oluşan kesme kuvveti radye için izin verilen kesme kuvveti değerinden fazla ise,
3. Kolon altında radyede oluşan taban basınçları zemin emniyet gerilmesi değerinden fazla ise,
4. Kolon altında radyede oluşan oturma değerleri radye için izin verilen azami oturma değerinden fazla ise radyejeneral temelin altına kazık yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu kriterler için yapılması gereken tahkikler aşağıda listelenmiştir.



Şekil 4.10 : Tekil kolon yükü altında yer alan radyejeneral temel kesiti (Poulos, 2001)

Kolon altında oluşan eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, taban basıncı ve oturma değerleri Selvadurai (1979) tarafından özetlenen elastik teori yardımıyla hesaplanabilir. Ancak bu problemde zemin homojen oldukça büyük bir derinliğe kadar uzanmakta olup, elastik bir kütle olarak modellenmiş ve yarı sonsuz elastik radye üzerinde tekil yükün etkidiği bir vaka için çözüm yapılmıştır. Bu koşullar oldukça idealleştirilmiş olmakla beraber, tasarım için bir fikir edinmeye olanak sağlamaktadır. Ayrıca Fraser ve Wardle (1976) tarafından geliştirilen yaklaşım kullanılarak tabakalı zemin profilini eşdeğer bir homojen zemin tabakasına dönüştürmek de mümkündür.

4.6.1 Plağa gelen maksimum momenti hesaplama yöntemi

Elastik ve yarı-sonsuz radyenin üzerinde yer alan c çapında herhangi bir kolon altında her iki doğrultuda meydana gelen maksimum momentler aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanabilir:

$$M_x = A_x \cdot P \quad (4.15)$$

$$M_y = B_y \cdot P \quad (4.16)$$

Bu bağıntılarda kullanılan katsayılar;

$$A_x = A - \left[0.0928 \cdot \ln\left(\frac{c}{a}\right) \right] \quad (4.17)$$

$$B_y = B - \left[0.0928 \cdot \ln\left(\frac{c}{a}\right) \right] \quad (4.18)$$

ampirik bağıntıları ile elde edilmekte olup, A ve B olarak adlandırılan moment faktörleri kolonun orta noktasının radyejeneral temelin kenarına olan uzaklığının radyenin karakteristik uzunluğuna oranı olan δ/a değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu katsayıların x/a uzaklığına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Radyenin karakteristik uzunluğu olarak adlandırılan α değerinin hesabında kullanılan formül aşağıdaki gibidir.

$$a = t \cdot \left[\frac{E_r \cdot (1 - \nu_s^2)}{6E_s \cdot (1 - \nu_r^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.19)$$

Burada;

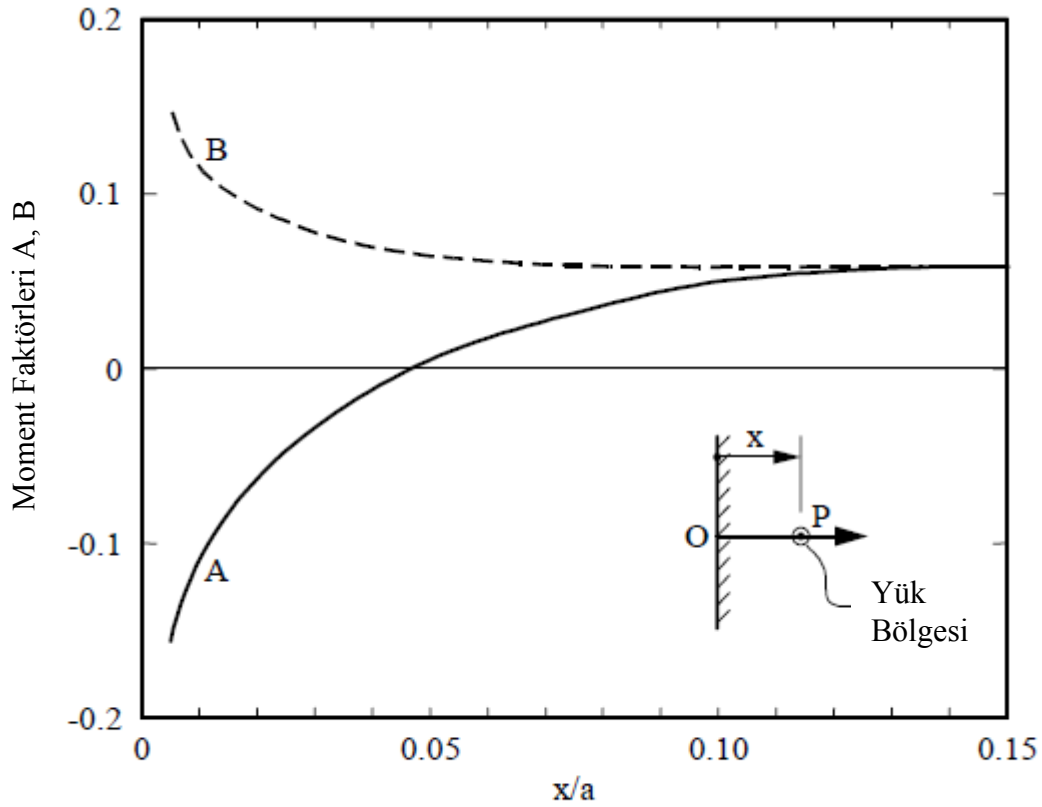
t : radyejeneral temelin kalınlığı,

E_r : radyejeneral temelin elastisite modülü,

E_s : zeminin elastisite modülü,

ν_r : radyejeneral temelin Poisson oranı,

ν_s : zeminin Poisson oranını simgelemektedir.



Şekil 4.11 : Dairesel kesitli kolon için moment faktörleri A ve B'nin değişimi (Poulos, 2001)

Buna göre radyejeneral temel tarafından izin verilen moment değerlerini aşmadan taşınabilecek azami kolon yükü P_{cl} şu şekilde elde edilir:

$$P_{cl} = \frac{M_d}{A_x \text{ veya } B_y (\text{büyük. deger})} \quad (4.20)$$

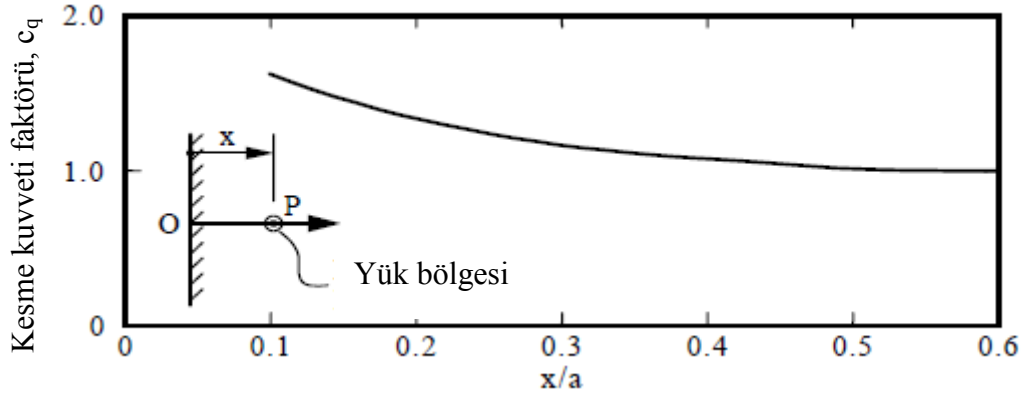
Bu bağıntıda M_d radyejeneral temelin tasarım moment kapasitesini belirtmektedir.

4.6.2 Plağa gelen maksimum kesme kuvvetinin hesaplanması yöntemi

Bir kolonun altında yer alan azami kesme kuvveti $V_{\max}$ aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$V_{\max} = \frac{(P - q\pi c^2) \cdot c_q}{2\pi c} \quad (4.21)$$

Burada, q radyejeneral temel altındaki taban basıncını, c kolon çapını ve c_q kesme kuvveti faktörünü temsil etmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Dairesel kesitli kolon için kesme kuvveti faktörü c_q 'nin değişimi (Poulos, 2001)

Buna göre eğer radyejeneral temelin tasarım kesme kuvveti kapasitesi V_d ise, radyejeneral temel tarafından izin verilen kesme kuvveti değerlerini aşmadan taşınabilecek azami kolon yükü P_{c2} şu şekilde elde edilir:

$$P_{c2} = \frac{V_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot c}{c_q} + q_d \pi c^2 \quad (4.22)$$

Burada q_d radyejeneral temel altındaki emniyetli taşıma gücünü belirtmektedir.

4.6.3 Plağa gelen maksimum taban basıncının hesaplanması yöntemi

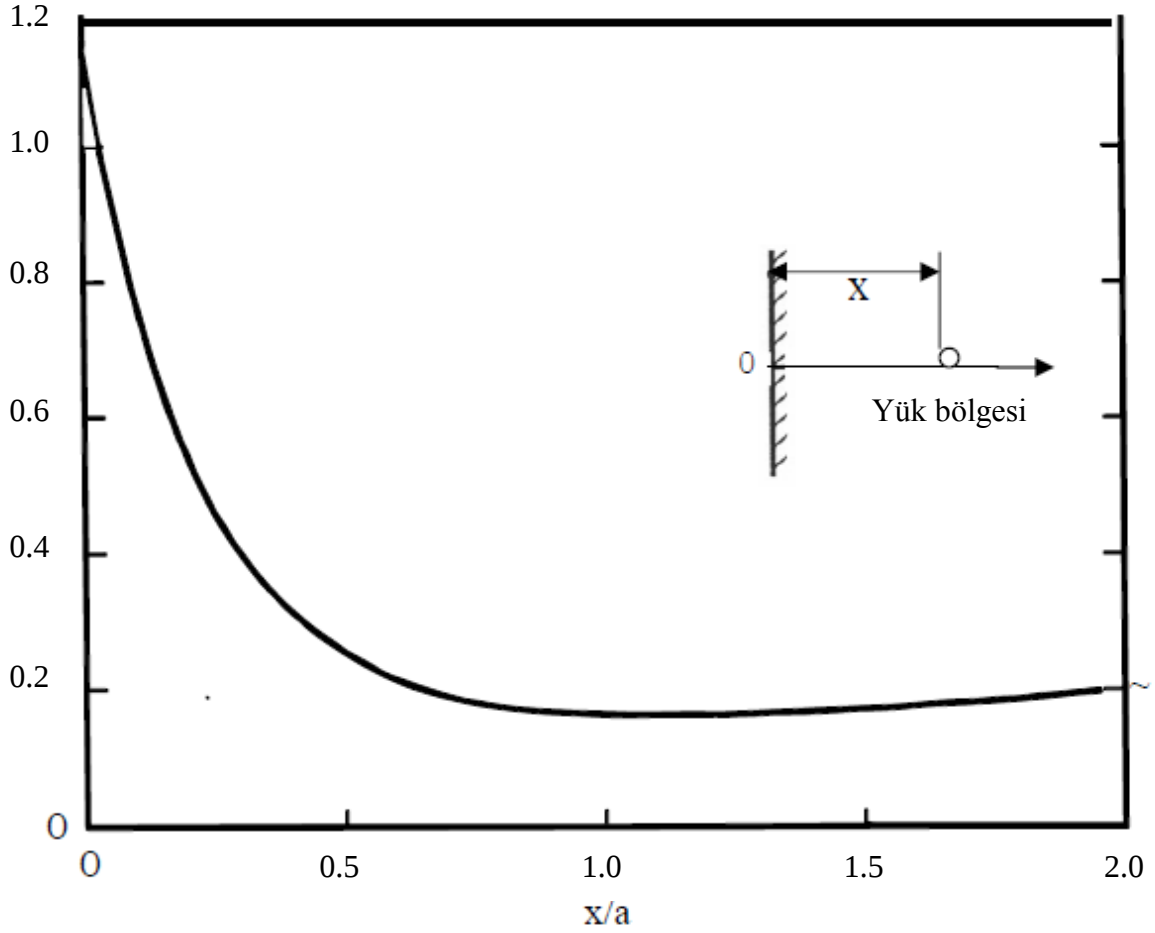
Radyejeneral temel altındaki maksimum taban basıncı $q_{\max}$ 'ın elde edilmesinde aşağıda verilen denklem kullanılmaktadır.

$$q_{\max} = \frac{\bar{q} \cdot P}{a^2} \quad (4.23)$$

Burada;

$\bar{q}$: Taban basıncı faktörü (Şekil 4.13),

a : Radyenin karakteristik uzunluğunu (4.19) belirtmektedir.



Şekil 4.13 : Taban basıncı faktörü $\bar{q}$ 'nun değişimi (Poulos, 2001)

Buna göre radyejeneral temel tarafından izin verilen taban basıncı değerlerini aşmadan taşınabilecek azami kolon yükü P_{c3} şu şekilde elde edilir:

$$P_{c3} = \frac{q_u a^2}{F_s \bar{q}} \quad (4.24)$$

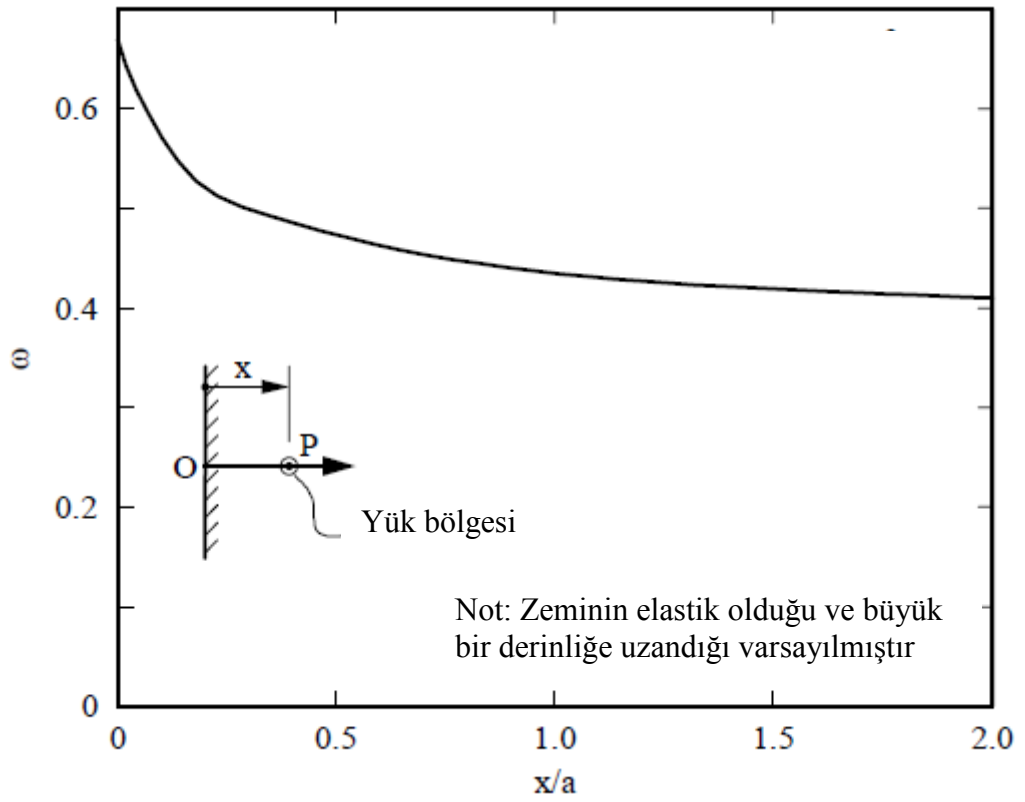
Burada q_u radyejeneral temel altındaki zeminin taşıma gücünü, F_s ise taban basıncı güvenlik sayısını belirtmektedir.

4.6.4 Plaktaki oturmaları hesaplama yöntemi

Bir kolon altındaki oturma miktarı, yükün o noktada toplandığı göz önüne alınarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$S = \frac{\omega(1-\nu_s^2).P}{E_s.a} \quad (4.25)$$

Bu bağıntıda ω oturma faktörünü temsil etmekte olup, bu faktörün x/a oranına göre değişimi Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Oturma Faktörü ω (Poulos, 2001)

Bu bağıntı komşu kolonlardan etkiyen yükler sonucu meydana gelecek olan oturmayı dikkate almamakta, bu nedenle sadece bölgesel oturma değerini vermekte ve toplam oturma değerleri her bir kolon için hesaplanan bölgesel oturma değerlerinin süperpoze edilmesi ile elde edilebilmektedir (Poulos, 2001).

Buna göre eğer radyejeneral temelin altında izin verilen oturma değeri S_a ise, radyejeneral temel tarafından söz konusu değeri aşmadan taşınabilecek azami kolon yükü P_{c4} şu şekilde elde edilir:

$$P_{c4} = \frac{S_a E_s a}{\omega(1-\nu_s^2)} \quad (4.26)$$

4.6.5 Kolon altına yerleştirilecek kazık adedinin hesaplanması

Radyejeneral temel üzerinde yer alan herhangi bir kolon için hesaplanan tasarım yükü P_c ise, söz konusu değerin yukarıda belirtilen dört durumdan herhangi biri için hesaplanan kritik yükü aşması halinde bu bölgede radyejeneral temel altına kazık yerleştirilme gereği doğacaktır. Diğer bir deyişle,

$$P_c > P_{crit} \quad (4.27)$$

eşitsizliği geçerli olacaktır. Burada P_{crit} , yukarıda bahsedilen dört kriter için hesaplanan kritik yüklerden (P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} , P_{c4}) en küçüğüdür. Burada kritik durumu oluşturan kriter maksimum moment, kesme kuvveti ya da taban basıncı ise ($P_{crit} = P_{c1}$, P_{c2} ya da P_{c3}), bu durumda kazıklar taşıma kapasitesini artırıcı şekilde dizayn edilecektir. Bölüm 4.5.1.4'te bahsedildiği gibi, Burland (1995), bir kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazıkların nihai taşıma kapasitelerinin sadece %90'ının mobilize olduğunu belirtmiştir. Buna göre, kolon altına yerleştirilecek kazığın taşıma gücü aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$P_{ud} = 1.11F_p (P_c - P_{crit}) \quad (4.28)$$

Burada F_p kazıklar için güvenlik katsayısını temsil etmektedir. Kazıkların oturmayı azaltıcı eleman olarak kullanılması halinde $F_p=1$ alınabilir (Poulos, 2001).

Kritik durumu oluşturan kriterin bölgesel oturma olması halinde ise kazıklar taşıma kapasitesinden ziyade sistemin rijitliğini artırıcı ve oturmayı azaltıcı eleman olarak tasarlanmalıdır. Radyejeneral temel altında izin verilen maksimum oturma değerinin S_a olması halinde temel sisteminin kolon altında sahip olması gereken rijitlik değeri;

$$K_{cd} = \frac{P_c}{S_a} \quad (4.29)$$

olarak elde edilebilir. Bu durumda (4.5) bağıntısı yeniden yazılarak kazık rijitliği için şu eşitlik yazılabilir:

$$K_p^2 + K_p [K_r (1 - 2\alpha_{cp}) - K_{cd}] + \alpha_{cp}^2 K_r K_{cd} = 0 \quad (4.30)$$

Bu bağıntıda;

α_{cp} : kazık-radye etkileşim faktörü,

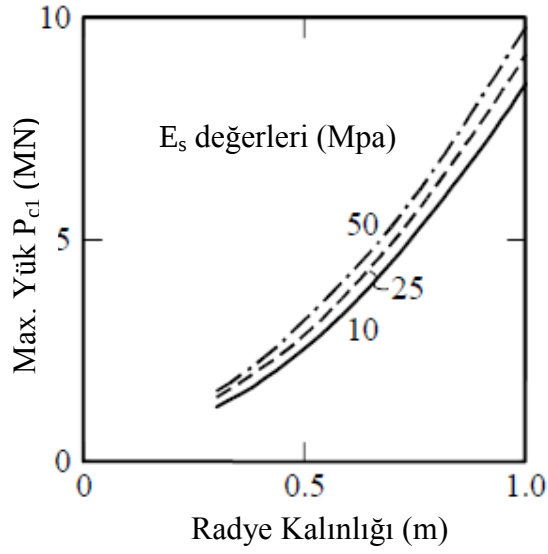
K_r : kolon etrafında radyejeneral temelin rijitliğini belirtmektedir. Kazık-radye etkileşim faktörü (4.7) bağıntısı ile hesaplanmakta olup, radyejeneral temelin kolon etrafındaki rijitliği o bölgeyi radyenin karakteristik uzunluğu olan a çapında bir dairesel temel olarak düşünerek elde edilebilir.

Yukarıda bahsedilen dört farklı kriter için radyejeneral temelin kalınlıklarına ve zeminin elastisite modülüne göre kritik yüklerin değişimi Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Bu grafiklerin incelenmesi ile, aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

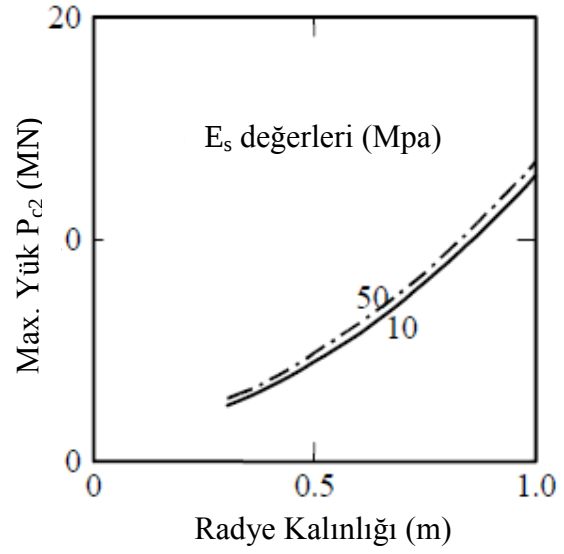
1. Tüm kriterler için, radyejeneral temelin kalınlığı arttıkça, o temel tarafından taşınabilecek azami kolon yükü de buna bağlı olarak artmaktadır.
2. Eğilme momenti ve kesme kuvveti için maksimum kolon yükleri zeminin elastisite modülüne bağlı olarak fazla değişkenlik göstermemekte, bununla beraber taban basıncı ve bölgesel oturma için hesaplanan maksimum kolon yükleri zeminin elastisite modülüne bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir.
3. Bu grafikler için belirli bir kalınlıkta radyejeneral temel ve belirli elastisite modülüne sahip zemin için en kritik durumların, diğer bir deyişle en küçük kritik kolon yüklerinin eğilme momenti ve bölgesel oturma için oluştuğu görülmektedir (Poulos, 2001).

4.7 Kazıklı Radyejeneral Temel Sistemine Etkiyen Değişik Faktörler

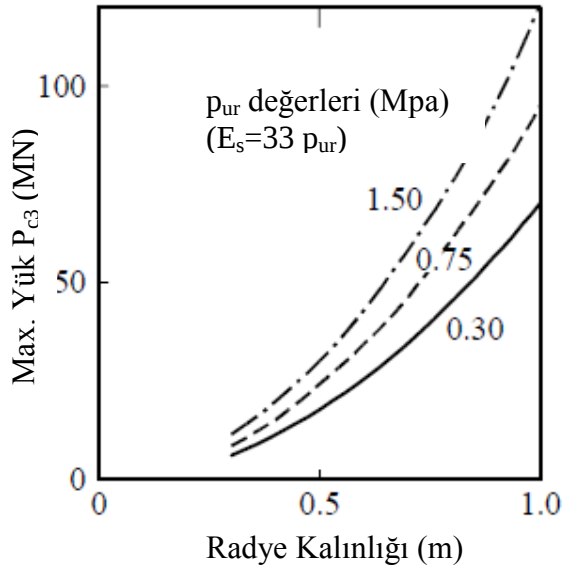
Kazıklı radyejeneral temellerin karakteristik davranışlarını incelemek ve değişken parametrelerin bu davranış üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için Poulos (2000) tarafından Bölüm 4.5.4 ’te verilen örnek problem üzerinde (Şekil 4.8) çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma sırasında temel sistemini oluşturan elemanların Elastisite Modülü ve Poisson Oranı sabit tutulmuş, buna karşılık kazık adedinin, yükleme biçiminin, kazık uzunluğunun, radyejeneral temel kalınlığının ve üzerine etkiyen yükün şiddetinin temel sisteminin davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır.



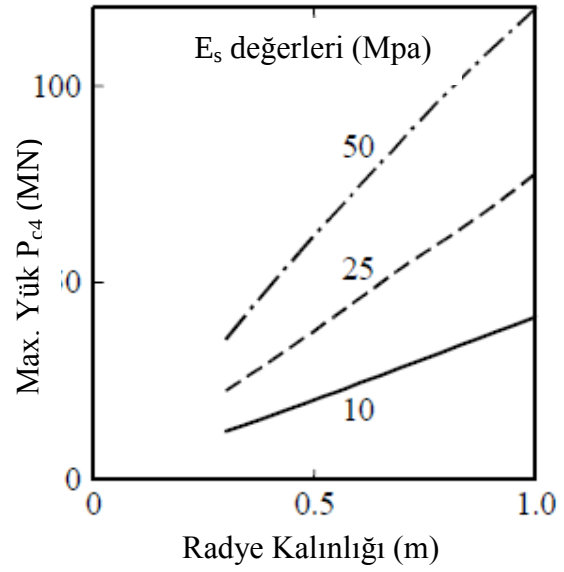
(a) Maksimum moment kriteri



(b) Maksimum kesme kuvveti kriteri



(c) Maksimum taban basıncı kriteri
(FS=1.2)



(d) Maksimum bölgesel oturma kriteri
(20 mm azami)

Şekil 4.15 : Çeşitli yük ve rijitlik değerleri için kritik yüklerin değişimi
(yalnızca iç kolonlar için, Beton: $f_c=32$ Mpa, $E_r=25,000$ MPa.
Çelik: $f_y=400$ MPa. Donatı Oranı=%1) (Poulos, 2001)

4.7.1 Kazık adedi ve yükleme şekli

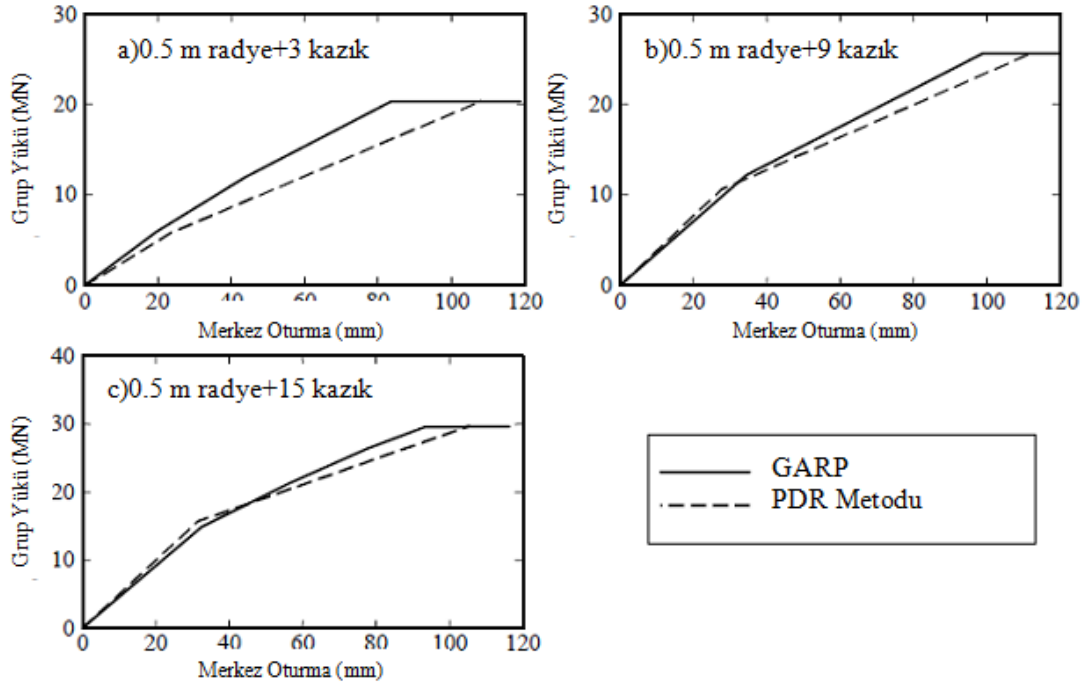
Bu analizler sırasında Poulos (1994) tarafından geliştirilen ve detayı olarak Bölüm 4.5.2.2’de anlatılan Yaylar Üzerinde Plak Yaklaşımı Metodu (GARP) ve Bölüm 4.5.1.3’te verilen Poulos-Davis-Randolph (PDR) Metodu kullanılmıştır.

Radyejeneral temel kalınlığı sabit ve 0.5 m alınmış olup, temel altındaki kazık adedinin 3, 9 ve 15 olması durumu için analiz yapılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen yük-oturma grafikleri Şekil 4.16'da verilmektedir. Buradan görüleceği gibi iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbirleriyle büyük oranda benzerlik göstermektedirler. Açıkça görüleceği gibi uygulanan yük miktarı arttıkça, bütün konfigürasyonlarda oturma miktarı artmakta, ancak kazık sayısına bağlı olarak aynı yük altında gözlenen oturma miktarı her iki yöntemde de azalmaktadır.

Şekil 4.17'de üstyapıdan 12 MN şiddetinde bir yük etkimesi durumunda kazık adedinin maksimum toplam oturma, farklı oturma, maksimum eğilme momenti ve kazıklar tarafından taşınan yükün oranı üzerindeki etkisi hem tekil, hem de yayılı yük etkimesi durumunda gösterilmektedir. Bu grafiklerin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir (Poulos, 2000):

1. Maksimum oturma miktarı kazık sayısı ile ters orantılı olarak azalmakta, ancak 20 ve daha fazla kazık için sabit bir değer almaktadır. Diğer bir deyişle kazıkların oturmaya azaltıcı eleman olarak kullanılması durumunda 0.5 m kazınlığındaki bir radyejeneral temel için 20'den fazla kazık yerleştirilmesinin bir anlamı yoktur.
2. Radyejeneral temel altındaki kazık adedinin az olduğu durumlarda yükün tekil olması halinde gözlenen oturma miktarı yayılı yük altında gözlenen değere göre daha fazla olmakla beraber, kazık adedinin 10 ve daha fazla olduğu durumlarda iki değer birbirine çok yaklaşmaktadır.
3. Kenardaki ve ortadaki kazıklar arasında oluşan farklı oturma değerleri kazık adedine bağlı olarak düzenli bir değişim göstermemektedir. Grafikler incelendiğinde farklı oturmanın en az olduğu durumun 3 kazık konfigürasyonunda, en fazla olduğu durumun ise yaklaşık 9 kazık olması durumunda olduğu ifade edilebilir. Bunun sebebinin radyejeneral temelin kenarlarına yakın bölgelerine yerleştirilen kazıkların burada oturmanın zaten çok az olması sebebiyle kenarlarını yukarı doğru hareket ettirmesi olduğu düşünülebilir.
4. Tekil yükün etkidiği durumlarda gözlenen maksimum eğilme momenti değerleri yayılı yüke göre oldukça fazla olup, en düşük moment değeri 3 kazıklı konfigürasyonda elde edilmiştir.

5. Kazıklar tarafından taşınan yükün oranı kazık sayısına bağlı olarak artmakta, ancak 15 ve daha fazla kazık için önemli bir artış göstermemektedir. Bu parametre için yükün yayılı veya tekil olmasının toplam yük oranında önemli bir etkisi bulunmamakla beraber, yükün kazıklar arasındaki dağılımı yükün etkime şekline göre ciddi farklılıklar göstermektedir (Poulos, 2001).

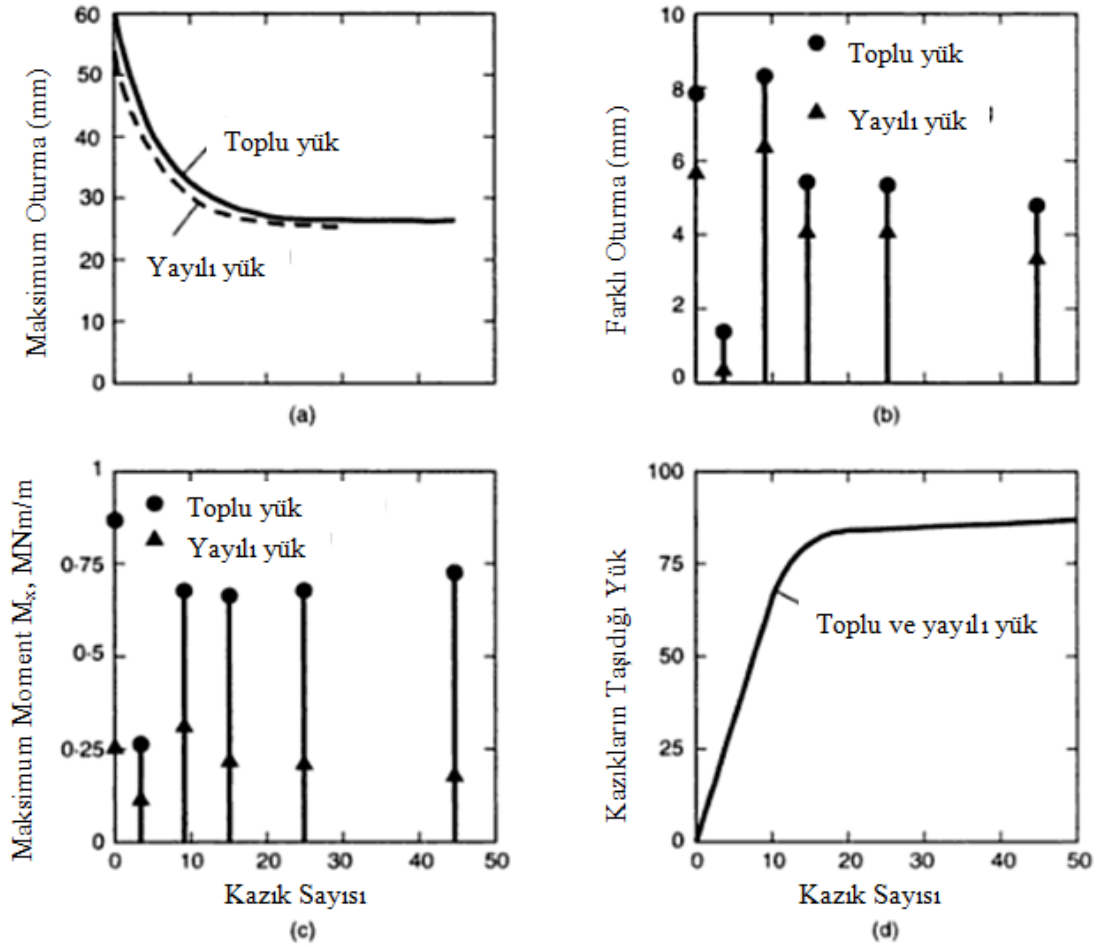


Şekil 4.16 : Kazık adedinin yük oturma davranışı üzerindeki etkisi (Poulos, 2001)

4.7.2 Kazık uzunluğu

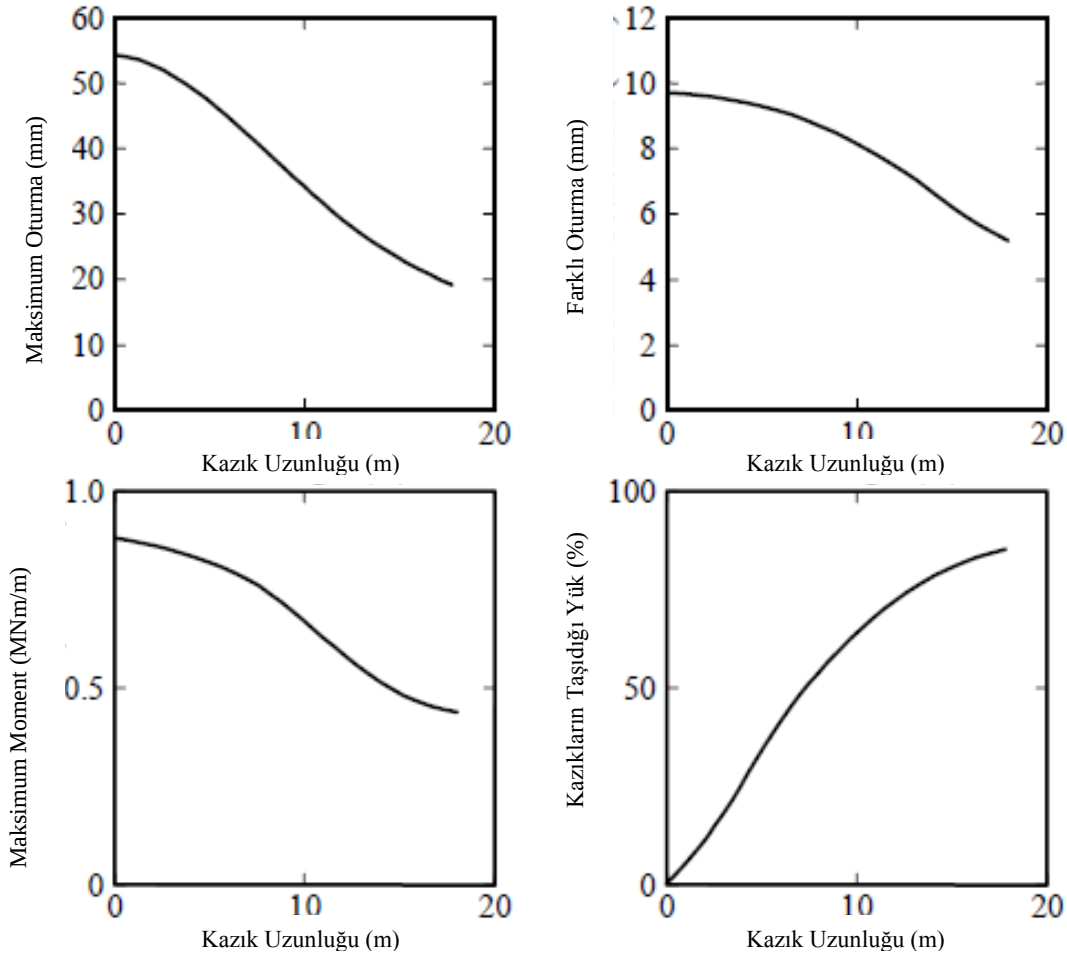
9 kazıktan oluşan ve 0.5 m kalınlığında radyejeneral temel için 12 MN yük altında maksimum oturma, farklı oturma, maksimum eğilme momenti ve kazıklar tarafından taşınan yükün toplam yük miktarına oranının kazık uzunluğu ile değişimini belirten grafikler Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Bu bölümde daha önce de değinildiği gibi kazık uzunluğu arttıkça kazıkların taşıdığı yükün toplam yüke oranı artmakta, bunun sonucunda radyejeneral temel altında gözlenen toplam oturma, farklı oturma ve eğilme momentleri azalmaktadır. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 karşılaştırıldığında, 12 MN'luk bir yük altında aynı çapta kazıkların kullanılması durumunda 30 mm toplam oturma için 10 m uzunluğunda 13 adet kazığın yeterli olduğu Şekil 4.17a'dan görülürken, Şekil 4.18'den kazık adedinin sabit tutulması durumunda (9 adet) 30 mm toplam oturma değerini sağlamak için minimum kazık boyu 11 m olarak

bulunmuştur. Buradan açıkça görüldüğü gibi bu vaka için kazıkların boyunu uzatmak kazık adedini artırmaktan daha etkili bir çözüm sunmaktadır (Poulos ve diğ. 2001).



Şekil 4.17 : Kazık adedinin a) maksimum oturma, b) farklı oturma, c) maksimum moment M_x ve d) kazıklara aktarılan yük oranı üzerindeki etkisi (Poulos, 2000)

Mahraj ve Anshuman (2004) tarafından eksenel simetrik bir kazıklı radyejeneral temel üzerinde yapılan çalışmalarda üç boyutlu sonlu eleman yöntemi ile çözümler yapılmış ve kazık uzunluğunun temel sisteminin yük-oturma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda radyejeneral temel altına yerleştirilen kazıkların temelin oturmasını önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Oturma miktarı kullanılan kazık adedi ve kazık uzunluğuna bağlı olarak %0 ile %50 arasında azalmaktadır. Kazık uzunluğunun 10 m çapında bir kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma davranışına etkisi Şekil 4.19'da, radyejeneral temel çapının 20 metre olması durumunda değişik kazık uzunlukları için yük-oturma davranışını gösteren grafik Şekil 4.20'de verilmiştir.

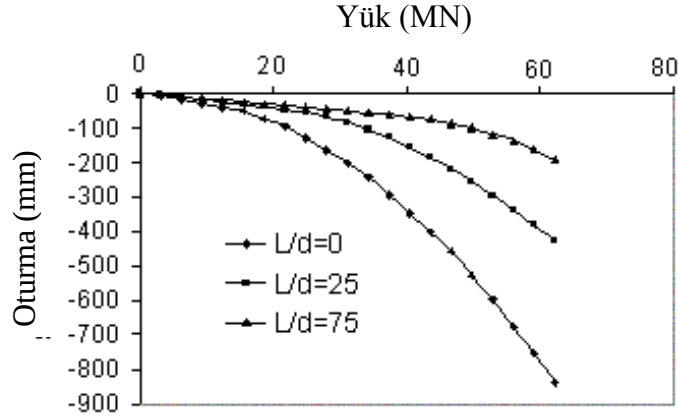


Şekil 4.18 : Kazık uzunluğunun kazıklı radyejeneral temel sistemi davranışına etkisi (Poulos, 2001)

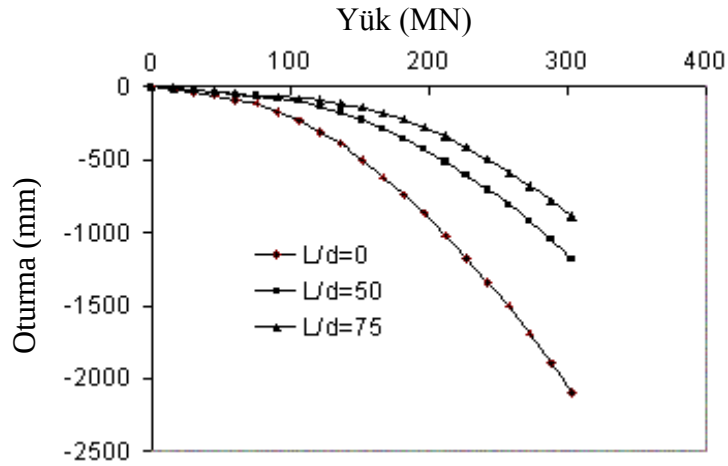
4.7.3 Radyejeneral temelin kalınlığı

Şekil 4.21’de, altına her biri 10 m uzunluğunda ve 9 adet kazık imal edilmiş değişken kalınlıktaki radyejeneral temellerin temel sisteminin davranışı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu problemde yine Şekil 4.8’de verilen problem kullanılmış ve $P_1 = 1$ MN, $P_2 = 2$ MN olarak kenara ve radyenin ortasına etkiyen yükler seçilmiştir. Görüldüğü üzere hem maksimum oturma hem de kazıklar tarafından taşınan yük miktarı radyejeneral temel kalınlığından fazla etkilenmemektedir. Ancak radyejeneral temelin kalınlığının artırılması, farklı oturma değerlerini önemli ölçüde azaltmakta, bununla birlikte radyejeneral temel içerisinde oluşacak eğilme momentlerini artırmaktadır (Poulos, 2001). Şekil 4.21’ten görüldüğü üzere kazık adedinin 0 olması durumunda, diğer bir deyişle temel sisteminin sadece radyejeneral temelden ibaret olması durumunda maksimum oturma miktarları diğer sistemlere göre oldukça yüksek değerler vermekte ve sistem özellikle radyejeneral temel

kalınlığının az olduğu durumlarda doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Radyejeneral temel kalınlığının artmasıyla birlikte temel altında plastik bölgelerin oluşması ile farklı oturma değeriinde düşme gözlenmektedir. Bu parametre ile ilgili yapılan çalışmalarda da en iyi performansı radyejeneral temelin altına 3 kazığın yerleştirildiği konfigürasyon vermiştir. Bu da, radyejeneral temel altına gereken noktalara kazık yerleştirilmesinin önemli olduğunu bir kez daha açıkça göstermektedir.

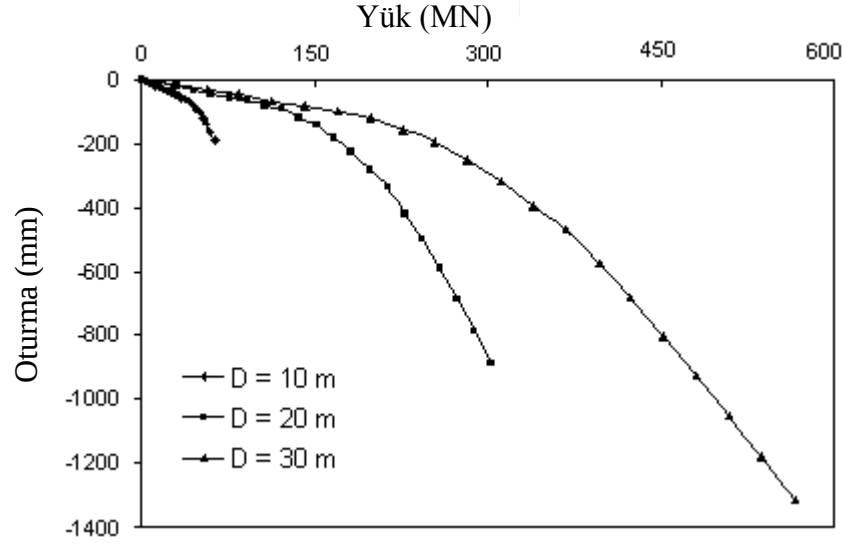


Şekil 4.19 : Kazık uzunluğunun bir kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma davranışına etkisi (radye plağı 10 m çapında bir alana sahiptir) (Maharaj ve Anshuman, 2004)



Şekil 4.20 : L/d oranları değişken bir sistemde kazık uzunluğunun kazıklı radyejeneral temel sistemlerindeki yük-oturma davranışına etkisi (Maharaj ve Anshuman, 2004)

Radye çapının 10 m'den 20 m'ye çıkması halinde sistemin taşıma gücünde büyük bir artış gözlenmekte, ancak 20m ve 30 m çapındaki radyejeneral temeller arasında yaklaşık 100 MN'luk yük seviyesine kadar önemli bir fark oluşmamaktadır. 100 MN'dan sonra 30 m çapındaki sistemde aynı yük altında daha az oturma gözlenmekte, ancak bu fark 10 ve 20 m çapındaki radyejeneral temeller arasındaki fark kadar belirgin olmamaktadır.



şekil 4.22 : Radyejeneral plak çapının kazıklı radyejeneral temel sisteminin yük-oturma davranışı üzerine etkisi (Maharaj ve Anshuman, 2004)

5. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN YATAY YÜK ALTINDA DAVRANIŞI

5.1 Genel Tanım

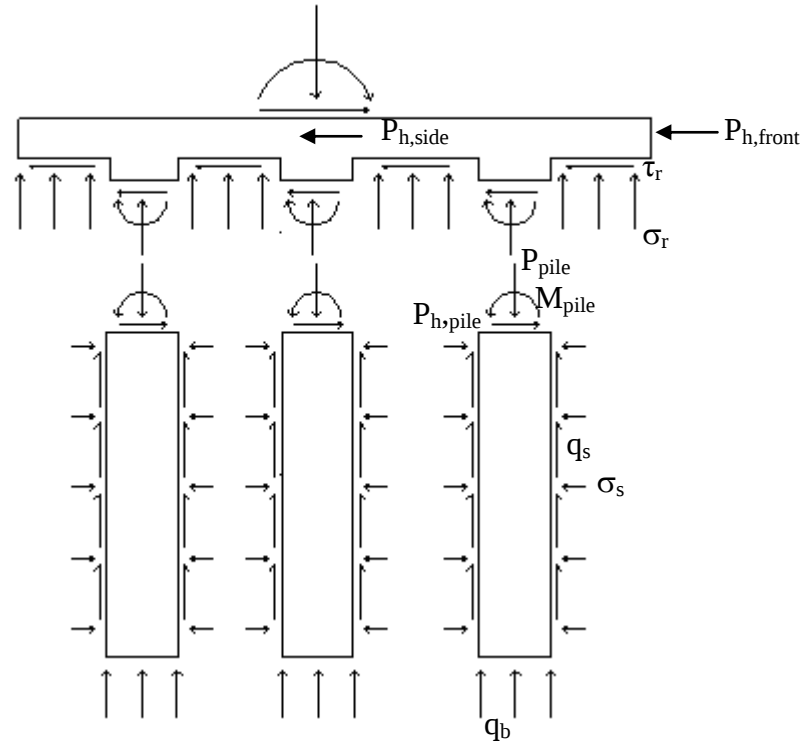
Kazıklı radyejeneral temellerin düşey yük altındaki davranışı yukarıda detaylı olarak anlatılmıştır. Literatürde şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğu da düşey yük altındaki davranışı incelemektedir. Ancak pratikte durum elbette ki bu şekilde olmamakta, çoğu yapı büyük ölçüde yanal yük ve moment etkisine maruz kalmaktadır. Bu çalışma kapsamında kazıklı radyejeneral temellerin yanal yükler altındaki yük-oturma davranışı incelenmiş, buna etki eden faktörler araştırılmıştır.

Tıpkı düşey yük altındaki kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde kazıkların farklı ve toplam oturmayı azaltıcı yönde kullanıldığı gibi, yanal yük altındaki kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde de kazıklar uygulanan yatay yük sonucu oluşan ve yatay yönde yer değiştirmelere sebep olan yanal kuvvetlerini bir bölümünü taşıyarak oluşan yer değiştirmeleri azaltıcı yönde etkili olmaktadır (Turek, 2006).

Kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde yatay yük altında oluşan yük aktarım mekanizması mekanizması Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Buna göre yanal yük altında kazıklı radyejeneral temellerin taşıma gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{h,tot} = P_{h,r} + \sum P_{h,p} + P_{h,side} + P_{h,front} \quad (5.1)$$

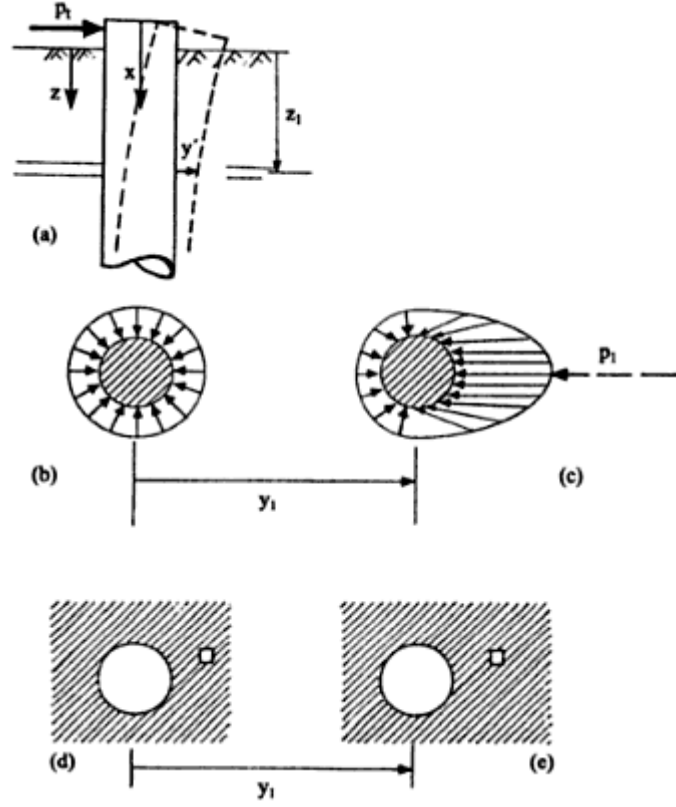
Bu bağıntıda tıpkı düşey yükler altında olduğu gibi $P_{h,tot}$ kazıklı radyejeneral temel sisteminin yanal yük altındaki taşıma gücünü, $P_{h,r}$ sisteme etkileyen yükün radyejeneral temel tarafından taşınan miktarını, $\sum P_{h,p}$ sisteme etkileyen yükün kazık grubu tarafından taşınan miktarını temsil etmektedir. Ancak kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde düşey yük altında gösterilen davranıştan farklı olarak radyejeneral temelin zemine gömülü olması halinde yatay yük altında oluşan gerilmelerin bir kısmı da yükleme doğrultusunda radyejeneral temelin zemine gömülü olduğu alanda oluşn gerilmeler tarafından taşınmakta olup bu gerilmeler yükleme doğrultusunda yanlarda kalan alanlar için $P_{h,side}$, yükleme doğrultusunda



Şekil 5.1 : Kazıklı radyejeneral temellerin yatay yük altında yük aktarım mekanizması

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, radyejeneral temelin taşıdığı yük miktarı radyenin altında kalan zemin ve radye arasında oluşan kayma gerilmelerinin zemin ve radyejeneral temel arasında kalan alan üzerinden entegrasyonu ile elde edilmektedir. Kazık grubunun taşıdığı yük ise kazık gövdesi boyunca oluşan normal gerilmelerin kazık uzunluğu boyunca entegrasyonu ile elde edilmektedir. Ancak yanal kuvvetler altında kazıkların yerdeğiştirmesine bağlı olarak bu gerilmeler de değişmektedir (Reese ve Cox, 1969). Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, yatay kuvvet altında başlangıç durumunda gerilme dairesel bir kazığın gövdesi boyunca belirli bir z_1 derinliğinde, kazık çevresindeki her noktaya eşit gerilme etkimekte iken, bu noktanın başlangıç durumuna göre y_1 mesafesi kadar ötelenmesi durumunda z_1 derinliğinde kazık etrafında oluşan gerilme dağılımı yüklemeye ters doğrultuda artarken, yükleme doğrultusunda azalmaktadır. Ayrıca, yükleme öncesinde gerilmeler kazık gövdesine dik açı ile etkimekte, dolayısıyla kayma gerilmesi bileşenleri sıfıra eşit olmaktadır. Yükleme sonucunda ise görüldüğü gibi oluşan gerilmelerin bir kısmı kazık

gövdesine dik açı ile etkimemekte ve bu sebeple kazık çevresinde kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Kazıklı radyejeneral temelin taşıma gücünün kazıklar tarafından taşınan bileşeni söz konusu gerilmelerin kazık gövdesi boyunca entegrasyonu ile elde edilmektedir.



Şekil 5.2 : Yatay yük altında kazıkların etrafında oluşan gerilme dağılımı (Reese ve Van Impe, 2001)

Kazıklı radyejeneral temellerin düşey yük altında taşıma gücü ve oturma davranışını belirleyen ve Bölüm 4.2’de ayrıntılı olarak bahsedilen kazıklı radyejeneral temel katsayısı gibi yatay yük etkisi altındaki kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin davranışını belirlemek için kazıklı radyejeneral yatay yük katsayısı tanımlanmıştır (Turek, 2006). Bu katsayı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha_h = \frac{\sum P_{h,p}}{P_{h,tot}} \quad (5.2)$$

Tıpkı düşey yük altındaki kazıklı radyejeneral temeller gibi yatay yük kazıklı radyejeneral temel katsayısı da radyejeneral temeller için 0, kazıklı temeller için 1 değerini almaktadır.

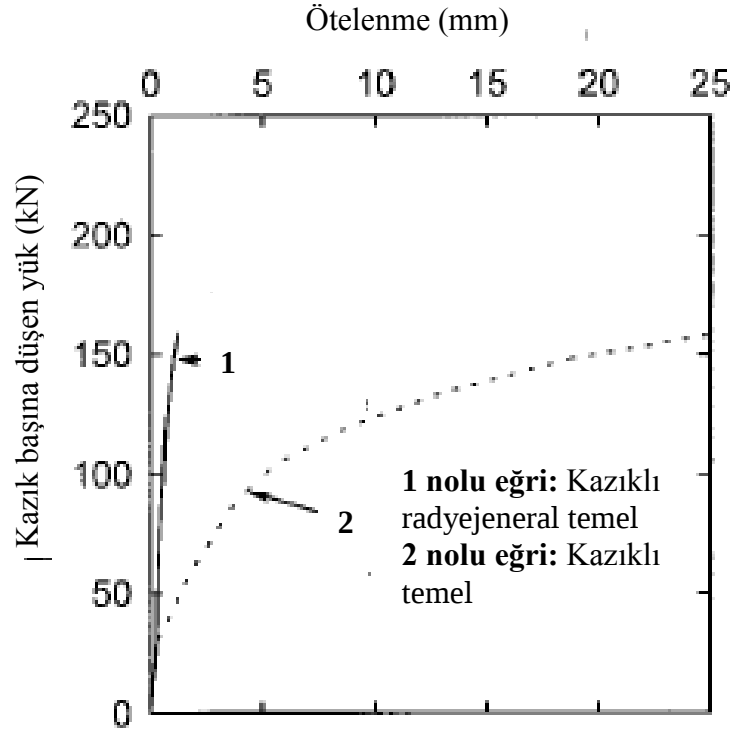
5.2 Arazide Yapılan Çalışmalar

Kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin yatay yük altında davranışını inceleyen arazi deneyleri ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar arasında Beatty (1970), Kim ve Brungraber (1976) ve Mokwa ve Duncan (2001) örnek olarak gösterilebilir. Ancak üç çalışmanın da ortak özelliği, deneyler sırasında temel sistemini kazıklı radyejeneral temel olarak değil, kazık başlığı ve kazık grubundan oluşan bir sistem olarak tasarlamış olmalarıdır. Ancak söz konusu kazık başlıkları zemin ile temas halinde olduğundan her üç sistem de kazıklı radyejeneral temel sistemi olarak kabul edilebilir.

Beatty (1970), yumuşak kil üzerinde yaptığı büyük ölçekli arazi deneylerinde, kazıklı radyejeneral temellerin ve kazık gruplarının yatay yük altında davranışlarını incelemiştir. Her iki sistem için de biri 6, biri 2 adet içerisi betonla doldurulmuş 24 metre uzunluğundaki çakma kazıktan oluşan ikişer model düzeneği kullanılmıştır. 6 kazıktan oluşan düzeneklerin birinde radyejeneral temel alt kotuna kadar zemin kazılmış, diğerinde ise yükleme yönünde radyejeneral temelin alnında kalan zemin uzaklaştırılmamış ve böylece $P_{h,front}$ parametresinin de sistemin taşıma gücüne katkıda bulunması sağlanmıştır. Her iki düzenekte de radyejeneral altındaki zemin uzaklaştırılmadığından uygulanan yatay yükün bir kısmının radyejeneral temel altında oluşan kayma gerilmeleri vasıtasıyla zemine aktarıldığı varsayılmıştır. Her iki düzenekte de sistemin kendi ağırlığı dışında bir düşey yük uygulanmamıştır. 2 kazıktan oluşan diğer iki düzenekte ise ilk olarak zemin radyejeneral temel alt kotuna kadar kazılmış, birine sabit bir düşey yük etkililirken, diğerine kendi ağırlığı dışında bir düşey yük etkitilmemiştir. Daha sonra söz konusu iki düzenekten birinin altındaki zemin uzaklaştırılmış, böylece radyejeneral temel ile zemin arasındaki temas kesilmiş ve sistemin bir kazıklı temel gibi davranması sağlanmıştır (Beatty, 1970). Bu deneyler sonucunda sistemin kazıklı radyejeneral temel olarak tasarlanması durumunda aynı yük altında oluşacak deformasyonların yaklaşık %50 mertebesinde azaldığı, ayrıca sistem üzerine etkiyen düşey yükün sistemin toplam yatay direncini artırdığı belirlenmiştir (Şekil 5.3).

Kim ve Brungraber (1976), arazide her biri 12 m uzunluğunda 6 adet çakma kazıktan oluşan iki adet kazıklı radyejeneral temel sisteminin yanal yükleme altında davranışını araştırmışlardır. Kazıklar kil tabakası içinde kalmakla beraber, kazık uç

bölgesinde bir kireç taşı tabakasına rastlanmıştır. Radyejeneral temellerden birinin boyutları 3,6mx2,4m, diğerinin boyutları ise 3,0mx2,1m olup her ikisinin de kalınlığı 1,2 m'dir. İki sisteme de önce sabit bir düşey yük uygulanmış, daha sonra yatay yükleme aşamasına geçilmiştir. Deney sonucunda radyejeneral temelin yanıl yerdeğıştirmesi ve kazıkların genişmesi, dolayısıyla kazıklarda oluşan eğilme momentleri ölçülmüştür. Ancak bu deneylerde radyejeneral temelin taşıma gücü hakkında bir bilgi edinilemediğinden aynı boyutlardaki deney düzeneğıyle 1979 yılında bir dizi deney daha gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında radyejeneral temelin altında yer alan 10 cm kalınlığında zemin tabakası uzaklaştırılmış, böylece sistemin kazıklı temel sistemi gibi davranması sağlanmıştır (Kim ve diğ., 1979). Kazık grubu ve kazıklı radyejeneral temel sistemi için elde edilen deney sonuçları karşılaştırıldığında kazık grubunda meydana gelen maksimum eğilme momentleri ve yanıl yerdeğıştirmelerin, kazıklı radyejeneral temel sisteminde meydana gelen maksimum eğilme momentleri ve yanıl yerdeğıştirmelerin yaklaşık 2 katı mertebesinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.3 : Kazık başlığının zemin ile temasının oluşan deformasyonlar üzerinde etkisi (Beatty, 1970)

Mokwa ve Duncan (2001), her biri 4 adet çelik çakma kazıktan oluşan 3 adet kazıklı radyejeneral temel sistemi üzerinde yatay yük etkisi altında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Düşey doğrultuda yalnızca temel sisteminin kendi ağırlığının

etkimesine izin verilmiş, ayrıca bir düşey yük uygulanmamıştır. Deney sahasındaki hakim zemin profili kum, killi kum ve çakıl tabakalarından oluşmaktadır. Kazık uzunluğu iki sistemde 5,8 m, bir sistemde 3 m olup, radyejeneral temeller iki sistem için bir kenarı 1,5 m ve kalınlığı 0,46 m, bir sistem için bir kenarı 1,5 m ve kalınlığı 0,91 m olan kareler şeklinde tasarlanmıştır. Deneyler üç seri halinde gerçekleştirilmiştir. İlk seride radyejeneral temel ve zemin arasında tam temas sağlanmış, böylece sistemin kazıklı radyejeneral temel sistemi gibi davranması hedeflenmiştir. Ayrıca radyejeneral plak zemine tamamen gömülü olduğundan alın ve yan yüzlerde oluşan gerilmelerin de sistemin taşıma gücüne katkısı bulunduğu göz önüne alınmıştır. İkinci seride ise yan yüzlerde ve alın seviyesindeki zemin uzaklaştırılmış, sistem yine kazıklı radyejeneral temel sistemi gibi davranırken sadece radyejeneral temel altında oluşan taban basınçlarının taşıma gücüne katkı sağladığı kabulü yapılmıştır. Üçüncü seri deneylerde ise radyejeneral plak ve zemin arasındaki boşluklar farklı malzemelerle kontrollü bir biçimde doldurularak farklı malzemelerle temas halinde temel sisteminin taşıma gücü ve oturma davranışı incelenmiştir. Deneyler sırasında yatay ve düşey yer değiştirmeler ile uygulanan düşey yük ölçülerek ilgili grafikler oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre radyejeneral plağın zemine tamamen gömülü olması durumunda alın ve yan yüzlerde oluşan gerilmelerin kazıklı radyejeneral temel sisteminin taşıma gücüne önemli ölçüde katkısı bulunmaktadır (Mokwa ve Duncan, 2001). Yapılan ölçümlere göre plağın zemine tamamen gömülü olması durumunda elde edilen yatay taşıma gücü, radye plağın sadece alt yüzünün zemine temas etmesi halinde elde edilecek yatay taşıma gücünün iki katı mertebesinde dir. Ayrıca farklı dolgu malzemeleri kullanarak yapılan deneyler sonucunda dolgu malzemesinin rijitliği ve mukavemeti ile temel sisteminin yatay rijitliği arasında doğrudan bir ilişki bulunduğu belirlenmiştir.

Farklı dolgu malzemelerinin kazıklı radyejeneral temelin taşıma gücü üzerine etkisini araştıran bir diğer çalışma Rollins ve Sparks (2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma esnasında 1,2 m kalınlığında ve 2,7 m kenar uzunluğuna sahip bir radyejeneral plak ve 9 adet çelik boru kazığın oluşturduğu bir kazıklı radyejeneral temel sistemi kullanılmıştır. Kullanılan çelik kazıkların dış çapı 32 cm, uzunluğu 9,1 m olup radyejeneral plağa rijit bağlantı sağlanmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği alanda zemin yapısı oldukça karmaşık olup kil, çakıl ve silt tabakalarından oluşmaktadır. Yükleme yönünde radyejeneral plağın alın yüzü boyunca çakıl dolgu

yapılmış, böylece $P_{h,front}$ olarak adlandırılan alın yüzünde oluşan gerilmenin temel sisteminin taşıma gücü üzerine etkisi belirlenmiştir. Düşey yönde yalnızca temel sisteminin kendi ağırlığı etkimektedir. Deneyler sonucunda temel sisteminin yatay yer değiştirmesi, uygulanan yatay yük, kazıkların yanal ötelenmesi ve 3 kazıkta eğilme momentleri ölçülmüştür. Ancak yukarıda belirtilen şartlar altında sadece bir deney gerçekleştirildiği için radyejeneral plağın altında oluşan gerilmelerin $P_{h,r}$ ve kazıklar tarafından taşınan yükün $P_{h,p}$ ölçülmesi mümkün olmamıştır. Ancak yine Rollins ve Sparks (2002) tarafından geliştirilen basitleştirilmiş bir hesap yöntemiyle bu üç bileşeni yaklaşık olarak ayrı ayrı hesap etmek mümkün olabilmektedir.

5.3 Laboratuvarında Yapılan Çalışmalar

Kazıklı radyejeneral temellerin yanal yükler altında taşıma gücü ve oturma davranışını inceleme amacıyla laboratuvarında yapılan ve temel teşkil eden çalışmalardan bir tanesi Meymand (1998) tarafından gerçekleştirilen küçük ölçekli sarsma tablası deneyleridir. Bu çalışma kapsamında yumuşak kil tabakası içine saplanan 1,8 m uzunluğundaki ve dış çapı 5 cm olan alüminyum borular ve beton kazık başlığından oluşan kazıklı radyejeneral temel sistemi modeli üzerinde farklı konfigürasyonlarla deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk deneyde beton plak altına 4 adet kazık yerleştirilmiş ve plağın tabanının ve yan yüzlerinin zemin ile teması kesilmeyerek sistemin kazıklı radyejeneral temel gibi davranması amaçlanmıştır. İkinci deneyde plağın altındaki ve etrafındaki zemin uzaklaştırılmış böylece sistem bir kazık grubu haline dönüştürülmüştür. Üçüncü deneyde plak altına dokuz adet kazık yerleştirilmiştir ve plağın tabanının ve yan yüzlerinin zemin ile teması kesilmeyerek sistemin kazıklı radyejeneral temel gibi davranması amaçlanmıştır, dördüncü deneyde ise sadece kazık etrafındaki zemin uzaklaştırılmış, plağın tabanının zeminle olan teması kesilmemiştir. Tüm deneylerde öncelikle sabit bir ağırlıkla düşey yükleme yapılmış, daha sonra ise sarsma tablası yardımıyla yanal kuvvet uygulanmıştır. Deneyler sonucunda radyejeneral temelin tabanında oluşan gerilmelerin, radyejeneral temelin yan yüzlerinde oluşan gerilmelere oranla sistemin taşıma gücüne daha büyük katkı sağladığı belirlenmiştir (Meymand, 1998).

Kazıklı radyejeneral temellerin yanal yük altındaki davranışını inceleyen en kapsamlı çalışmalardan bir tanesi Kanazawa Üniversitesi'nden bir araştırma grubu ve Taisei

Corporation işbirliğiyle Japonya’da yürütülen laboratuvar model deneyleridir. Bu deneyler ve sonuçları hakkında detaylı bilgi aşağıda verilecektir.

Söz konusu deneylerle ilgili ilk çalışma Watanabe ve diğ. (2001) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada araştırma kapsamında uygulanan küçük ölçekli santrifüj model deneyleri ve sonuçları ile ilgili bilgi verilmiştir. Deneyin uygulandığı zemin cinsi kuru kum olup, bir deney kazıklı radyejeneral temel sistemi ile, iki deney ise radyejeneral temel ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tekil kazık ile birçok deney gerçekleştirilmiş, ancak bu çalışma kapsamında kazık gruplarının davranışı incelenmemiştir. Deney düzeneği 3,5 cm kalınlığında ve kenar uzunlukları 8 cm olan alüminyum bir plak ve altına yerleştirilen her biri 17 cm uzunluğunda ve 1 cm dış çapı olan 4 adet alüminyum kazıktan oluşmaktadır. Deneyler sırasında alüminyum plağın yalnızca tabanı zemine temas ettirilmiş, böylece yalnızca tabanda oluşa gerilmelerin sistemin taşıma gücüne katkıda bulunması sağlanmıştır. Deney sırasında öncelikle düşey yük uygulanmış ve daha sonra sabit düşey yüke ilaveten yatay yük uygulanmasına geçilmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilen ekipmanlar sayesinde radyejeneral temelin yatay ötelenmesinin yanı sıra, kazık başlarındaki normal ve kesme kuvvetleri, kazık uçlarındaki normal kuvvetler ve çeşitli derinliklerde kazıklarda oluşan eğilme momentleri dolaylı yollardan ölçülebilmektedir. Deney sonucunda etkiyen yatay yükün büyük bir kısmının radyejeneral temel tabanında oluşan kayma gerilmeleri tarafından karşılandığı belirlenmiştir (Watanabe ve diğ., 2001). Ancak artan yer değiştirmeye beraber toplam yükün radyejeneral temel tarafından taşınan miktarında azalma gözlenmiştir. Ayrıca kazıklı radyejeneral temel sisteminün, geleneksek radyejeneral temel sistemine göre yatay yükler altında çok daha yüksek taşıma gücüne sahip olduğu belirtilmiştir.

Watanabe ve diğ., (2001) tarafından gerçekleştirilen deneyler esas alınarak yukarıda açıklanan düzeneğe sadık kalınarak, santrifüjlü sarsma tablası üzerinde kazıklı radyejeneral temelin dinamik yatay yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir (Horikoshi ve diğ., 2002a, Horikoshi ve diğ., 2002b). Uygulanan yükler deney düzeneğinin ağırlığı ve yatay ivmeden ibarettir. Deney sonucunda kazıklı radyejeneral temel üzerine etkiyen çevrimli yatay ivmenin temel sisteminin oturmasına ve kalıcı bir yanal ötelenmeye sebep olduğu görülmüştür.

Kuru kum zeminde kazıklı radyejeneral temellerin ve kazık gruplarının davranışını karşılaştırmak amacıyla Pastsakorn ve diğ. (2002), 20 mm çapında, 200 mm uzunluğunda ve 1 mm et kalınlığına sahip alüminyum boruların ve 22 mm kalınlığında dikdörtgen biçiminde alüminyum plağın meydana getirdiği bir düzenek üzerinde laboratuvar model deneyleri gerçekleştirmiştir. Plak altındaki kazık adedinin 1, 4, 6 ve 9 olması durumuna ve radyejeneral plağın kenar uzunluğunun 75 mm, 150 mm ve 225 olması durumuna göre oluşturulan farklı konfigürasyonlar üzerinde radyejeneral plağın yanal ötelenmesi, yatay ve düşey kazık dirençleri ve kazık eğilme momentleri ölçülerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Tüm konfigürasyonlarda öncelikle 52 kPa büyüklüğünde sabit bir düşey basınç uygulanmış, daha sonra yatay yük uygulanmasına geçilmiştir. Aynı kazık konfigürasyonu için geçerli olmak kaydıyla kazıklı radyejeneral temelin yatay yükler altındaki taşıma gücü, kazık grubunun taşıma gücünün yaklaşık 2-2.5 katı mertebesinde dir. Buna ilaveten, kazıklı radyejeneral temel sisteminin toplam taşıma gücünün özellikle yanal yükleme işleminin başlangıç aşamasında çok büyük bir kısmının radyejeneral plak tarafından taşındığı ve yanal yerdeğiştirmeyle beraber radyejeneral plak tarafından taşınan yük miktarının azalmasına rağmen halen %30 mertebelerinde kaldığı belirlenmiştir (Pastsakorn ve diğ., 2002).

Yine Watanabe ve diğ. (2001) tarafından gerçekleştirilen ve yukarıda bahsedilmiş olan deneylerde kullanılan düzenek üzerinde bir takım değişiklikler yapılarak statik Horikoshi ve diğ. (2003a) ve dinamik (2003b) yatay yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma yukarıda bahsedilen çalışmalara ek olarak, kazıkların radyejeneral plak ile bağlanma şeklinin kazıklı radyejeneral temel sisteminin davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla, kazıkların radyejeneral plağa rijit ve mafsallı bağlandığı durumlar için ayrı modeller oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar Watanabe ve diğ. (2001) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumlu olup, ayrıca kazıkların radyejeneral plak ile bağlanma şeklinin kazıklı radyejeneral temel sisteminin taşıma gücü üzerinde etkisi bulunduğunu göstermektedir. Rijit bağlantılı kazıklı radyejeneral temel sisteminin nihai yanal taşıma gücü, hem sistemin sadece radyejeneral temel olarak tasarlanması durumunda sahip olacağı nihai yanal taşıma gücünden, hem de kazıkların mafsallı bağlanması halinde kazıklı radyejeneral temel sisteminin sahip olacağı nihai yanal taşıma gücünden çok daha fazladır. Yine yukarıda Pastsakorn ve diğ. (2002) tarafından belirtildiği gibi kazıklı radyejeneral

temel sistemlerinde yatay yükleme altında başlangıçta yükün bir bölümünün radyejeneral plak tarafından taşındığı, ancak yanal yerdeğiştirme arttıkça radye tarafından taşınan yük miktarının azaldığı ve kazıklara gelen yükün arttığı, bununla beraber kazıkların mafsallı olarak bağlandığı kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde kazıkların toplam taşıma gücüne katkısının çok daha az olduğu görülmüştür (Horikoshi ve diğ., 2003a). Statik ve dinamik yatay yükleme deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında her iki durumda kazıklı radyejeneral temel sisteminin yatay yük altındaki taşıma gücü ve şekil değiştirme davranışı benzer özellik göstermektedir. Dinamik yükler altında kazıklı radyejeneral temel sistemine ilaveten ayrıca kazık grubu üzerinde de deneyler yapılmış ve iki temel sisteminin yatay yük altında davranışı karşılaştırılmıştır (Horikoshi ve diğ., 2003b). Buna göre aynı yük altında kazıklı radyejeneral temel sistemindeki kazıklarda oluşan eğilme momenti ve yatay ivme değerleri kazık grubunda elde edilen değerlerden daha az olup, radyejeneral plağın zemine temas ederek yük aktarması halinde temel sisteminin davranışında meydana gelen değişiklikleri bir kez daha vurgulamaktadır.

Matsumoto ve diğ. (2004), yukarıda belirtilen santrifüj deneylerine ilaveten basit yerçekimi ortamında, diğer bir deyişle 1g yerçekimi etkisi altında küçük ölçekli temel sistemi modeli üzerinde kazıkların radyejeneral plağa bağlanma şeklinin ve yatay yükün etkime noktasının sistemin davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan model, Horikoshi ve diğ. (2003 a, b) tarafından geliştirilen ve yukarıda bahsedilen modele büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Kazıkların radyejeneral plağa rijit bağlanması ve mafsallı bağlanması hali için iki ayrı model oluşturularak her iki modelde yatay yükün 0.7 b, 1.5 b ve 2.3 b yükseklikten etkimesi durumu için toplam altı adet deney gerçekleştirilmiştir. Her iki modelde de radyenin kenar uzunluğu b, 8 cm olarak tayin edilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde kazıkların radyejeneral plağa hem rijit hem de mafsallı bağlanması durumunda sisteme etkileyen yatay yükün etkime noktasının yüksekliğinin artması halinde temel sisteminin yatay taşıma gücünün azaldığı görülmüştür. Buna ilaveten kazık grubunun önünde yer alan kazıkların taşıma gücünün tüm kazık bağlantı şekilleri ve tüm yatay yük etkime yükseklikleri için kazık grubunun arkasında yer alan kazıklara nazaran daha fazla yük taşıdıkları belirlenmiştir. Ancak kazık grubunun önünde ve arkasında yer alan kazıkların taşıma gücü arasındaki fark yatay yükün etkime yüksekliğine bağlı olarak artmaktadır (Matsumoto ve diğ., 2004a).

Yukarıda bahsedilen statik yatay yükleme deneylerine ek olarak yine Matsumoto ve diğ (2004b), 1g yerçekimi ivmesi altında sarsma tablası deneyleri uygulayarak aynı sistemin dinamik yatay yükler altında davranışını incelemişlerdir. Bu deneyler sırasında sadece kazıkların rijit bağlanması durumunda uygulanan ivme ve üstyapı ağırlık merkezi yüksekliğinin değişiminin temel sisteminin davranışı üzerine etkisi parametrik olarak irdelenmiştir. Sisteme etkiyen yatay yük, sarsma tablasına uygulanan yatay ivme ile sağlanmıştır. Yükün etkiye noktasının 0.6 b, 1.5 b ve 2.3 b olarak değiştiği üç adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneyden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda uygulanan yatay ivmenin bina rezonans ivmesinden küçük olması halinde statik deneylerdekine yakın taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. Ancak uygulanan ivmenin rezonans ivmesini aşması halinde sistemin davranışı statik yükleme altında sergilediği davranıştan oldukça farklı bir hal aldığı ve bu tip durumlar için gerekli dinamik analizlerin yapılması gerektiği önemle vurgulanmıştır (Matsumoto ve diğ., 2004b).

5.4 Nümerik Analiz ile Hesap Yöntemleri

Yatay olarak tabakalanmış zeminlerin tüm yük tipleri altında davranışını incelemek amacıyla Small ve Booker (1986) tarafından geliştirilen sonlu tabaka teorisi, bu yönde yapılan çalışmaların çoğuna ışık tutmuştur. Bu teoriye dayanarak Ta ve Small (1996) zemin ile temas halinde olan ya da olmayan kazıklı radyejeneral temeller için düşey yükler altında davranışını inceleyen bir yöntem geliştirmişler, zemini sonlu tabakalar yöntemiyle, radyejeneral temeli ise sonlu elemanlar yöntemiyle ince elastik bir plak olarak modellemişlerdir. Daha sonra bilgisayar ile yapılan çözümlerde süreyi kısaltmak için yaklaşık bir yöntem geliştirilmiştir (Ta ve Small, 1997). Bu yöntem ile bilgisayarın sistemi çözmesi için gereken süre tam analizin 100'de 1'i mertebesinde dir. Burada tek kısıtlama radyejeneral temelin kare ve eşit boyutlu parçalara bölünme zorunluluğudur. Söz konusu yöntemle çözülen 4x4'lük bir kazık grubundan oluşan kazıklı radyejeneral temel sisteminde taşıyıcı tabakanın rijitliğinin artması durumunda kazıklar tarafından taşınan yük oranının arttığı, dolayısıyla radyejeneral temel tarafından taşınan yük oranının azaldığı belirlenmiştir. Başka bir problemde rijit ve elastik radyejeneral temel için ayrı ayrı çözümler yapılmış, bunun sonucunda rijit radyejeneral temel olması durumunda kenarlardaki kazıkların daha fazla yük taşıdığı ve bu kenarlar boyunca burulma momentlerinin daha yüksek

değerler aldığı belirlenmiştir. Bununla beraber, elastik radyejeneral temel olması durumunda tüm kazıkların taşıdığı yük miktarı yaklaşık olarak aynı mertebede olup, burulma momentleri en yüksek değerleri radye kazık birleşim noktalarında almaktadır.

Bu çalışmaları takiben, Small ve Zhang (2000) tarafından yukarıda da bahsedilen sonlu tabakalar teorisine dayanan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Buna göre radyejeneral temel hem zemin hem de kazıklar tarafından desteklenmekte ve düşey yüklerin yanında hem yanal yük hem de moment etkisine maruz kalabilmektedir. Zhang ve Small (2000) tarafından geliştirilen APRAF (Analysis of Piled Raft Foundations) programı yardımıyla kazıklı radyejeneral temel sisteminin her 3 yönde hareketi ve iki yönteki dönmesi hesaplanabilmektedir. Bu programın kullanımı sırasında şu sonuçlara varılmıştır:

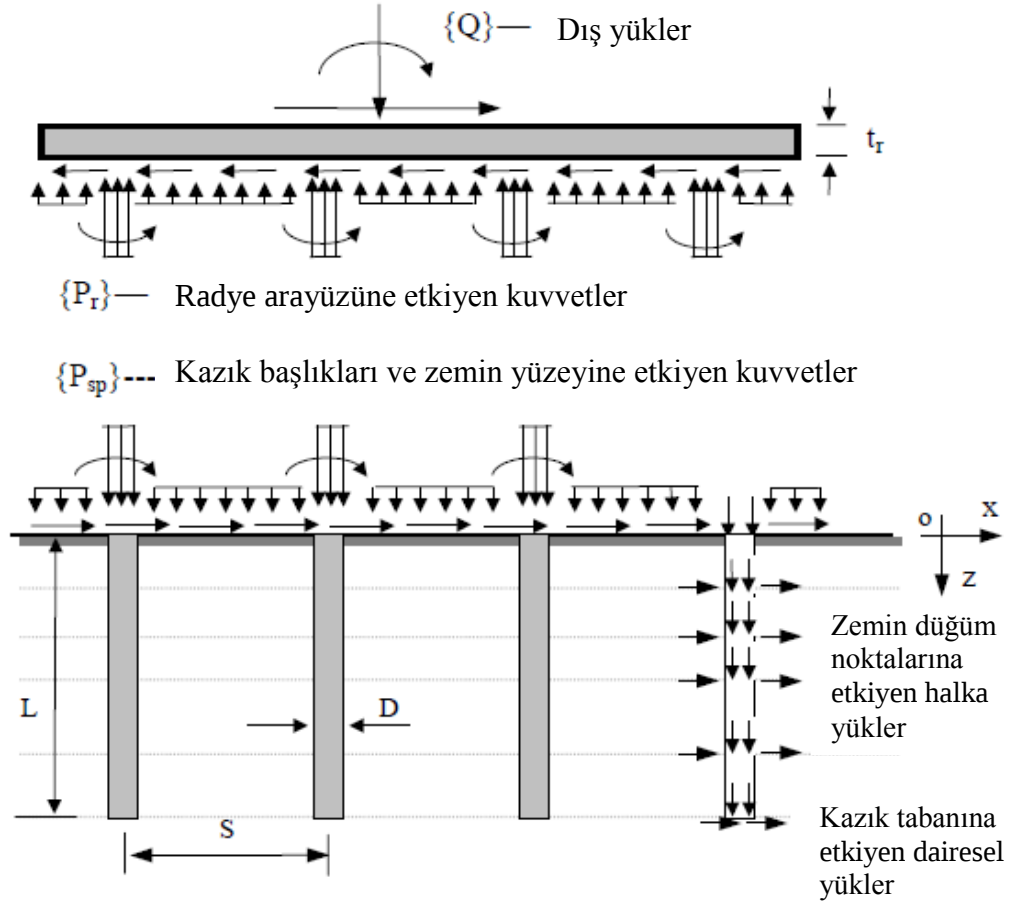
1. Programı çalıştırmak için bilgisayar belleğinin küçük bir kısmı yeterli olmaktadır.
2. Kazıklı radyejeneral temel sistemine her yönde uygulanan yük ve momentleri gözönüne alabilmektedir.
3. Uygulanan yükler ve yerdeğiştirmeler birleştirilmiş olarak analiz edilmektedir.
4. Diğer yöntemlere göre çözüm için gereken zaman oldukça kısadır.

İlerleyen bölümlerde söz konusu analiz yöntemi ve kazıklı radyejeneral temel sistemleri ile ilgili yapılmış diğer çalışmalar hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

5.4.1 Kazıklı radyejeneral temellerin yanal yük altında analizi

Zhang ve Small (2000) tarafından geliştirilen yöntemde kazıklı radyejeneral temel sistemi radyejeneral temel ve kazık grubu+zemin olmak üzere iki parçaya ayrılmaktadır. Bu analizde esas prensip dış yüklerin radyejeneral temel vasıtasıyla kazıklara, en son olarak da kazıklardan zemine aktarılmasına dayanır. Sistemin şematik görünümü Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi sistem iki parçaya ayrılmış olup, radyejeneral temele etkiyen yükler dış yükler Q ve radye-kazık arayüzünde oluşan kuvvet P_r , kazık ve zeminden oluşan bloğa etkiyen yük ise radye-blok arayüzünde oluşan P_{sp} kuvvetidir. Kazık ve zemin arasında oluşan kuvvetler ise her düğüm noktasına etkiyen halka yüklerden oluşan bir seri gibi düşünülebilir (Zhang ve Small, 1999). Söz konusu halka yükler hem düşey hem de

yatay yönde etkimekte olup yeterli sayıda kullanıldığı takdirde kazık boyunca oluşan sürekli gerilmeleri gerçeğe oldukça yakın bir şekilde modellemek mümkün olmaktadır (Poulos, 2001). Kazığın zemin ile temas halinde olan ucunda ise dairesel yayılı bir yükün etkidiği kabulü yapılmaktadır.



Şekil 5.4 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde iç ve dış yükleri gösteren şematik diyagram (Zhang ve Small, 2000)

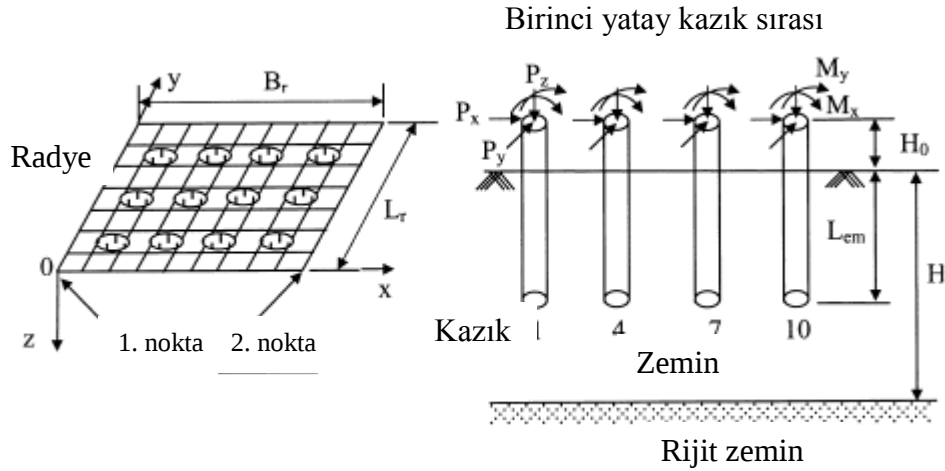
Radyejeneral temel ince elastik bir plak olarak modellenmekte ve her elemana bir kazık düşecek şekilde dikdörtgen parçalara ayrılmaktadır. Bu durumda her bir elemanın dört düğüm noktası bulunmaktadır ve serbestlik derecesi 24'tür. Bununla birlikte söz konusu elemana etkiyen arayüz kuvvetinin yayılı yük olduğu kabul edilmektedir.

Kazıklar ve zeminden oluşan blok ise radyejeneral temelden etkiyen arayüz kuvvetine maruz kalmakta ve Zhang ve Small tarafından 1999 yılında geliştirilen yöntem kullanılmıştır. Burada kazıklara etkiyen arayüz kuvvetleri radyejeneral temelin aksine eşdeğer tekil yük olarak kabul edilmekte ve kazık grubuna etkiyen dış yükler gibi modellenebilmektedir. Zemine etkiyen ve radyejeneral temelle

etkileşimden dolayı oluşan arayüz kuvvetleri ise dikdörtgen düzgün yayılı yük olarak kabul edilmektedir. Ancak bu yöntemde kazık başlarındaki burulma etkisi dikkate alınmamakta, bu yüzden de burulma etkisinin önemli rol oynadığı problemlerde tercih edilmemektedir (Zhang ve Small, 2000).

5.4.1.1 Radyejeneral temel elemanının çözümü

Yukarıda da bahsedildiği gibi kazıklı radyejeneral temel sistemi radyejeneral temel ve kazık+zemin grubu olmak üzere iki parçaya ayrılarak her bir parça ayrı ayrı çözümlenir. Radyejeneral temelin çözümünde radye üzerinde bazı düğüm noktalarının dönmeye ve ötelenmeye karşı sabitlenmesi gerekmektedir. Zhang ve Small (2000) bu konuyla ilgili çalışmalarında iki köşe düğüm noktasını sabitleyerek analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu düğüm noktalarından bir tanesi her yönde sabitken, diğer bir deyişle serbestlik derecesi 6 iken, diğer düğüm noktası radyenin z eksenini etrafında dönmesini önlemek için yalnızca y ekseninde sabitlenmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : Kazıklı Radyejeneral Temelin Parçalara Ayrılarak Çözümü (Zhang ve Small, 2000)

Bu durumda, radyeyi oluşturan elemanların her birinin merkezindeki oturma şu şekilde hesaplanabilir:

$$\{\delta_r\} = [I_r]\{P_r\} + \{a\}D_x + \{b\}D_y + \{c\}D_z + \{d\}\theta_x + \{e\}\theta_y + \{f\}\theta_z + \{\delta_{r0}\} \quad (5.3)$$

Bu bağıntıda;

$[I_r]$: sabitlenmiş radyejeneral temelin etki matrisi

$\{P_r\}$: radyejeneral temeli oluşturan elemanlara etkiyen arayüz kuvvetlerinin ve momentin vektörü

$\{\delta_{r0}\}$: radyejeneral temeli oluşturan elemanların herbirinin orta noktasında sabitlenmiş radyeye uygulanan dış yükler sonucu oluşan oturma değeri

D_x, D_y, D_z : 1. sabitlenmiş nokta etrafında sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultusunda radyejeneral temelin yatay ötelenmesi

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$: 1. sabitlenmiş nokta etrafında sırasıyla M_x, M_y momentleri ve z ekseninin yönünde radyejeneral temelin dönme miktarı

$\{a\}, \{f\}$: radyejeneral temel geometrisine bağlı olarak değişen tamamlayıcı vektörleri belirtmektedir.

5.4.1.2 Zemin içine gömülü kazık grubunun çözümü

Tabakalı zemin içerisine gömülmüş bir kazık grubunun çözümünde zemin-zemin, zemin-kazık, kazık-kazık ve kazık-zemin etkileşimleri gözönüne alınmalıdır. Bunlardan ilki olan zemin-zemin etkileşimi yukarıda da bahsedilen ve Small ve Booker (1986) tarafından geliştirilmiş olan Sonlu Tabaka Teoremi yardımıyla doğrudan çözülebilmektedir. Diğer etkileşimler ise yine Zhang ve Small (1999) tarafından geliştirilen ve Sonlu Tabaka Teoremi ile birlikte kullanılan metot yardımıyla elde edilebilmektedir. Burada zeminin davranışı elastik kabul edilmekte olup servis yüklerinin zemin emniyet gerilmesinin altında tutulacağı düşünüldüğünde bu varsayım mantıklı kabul edilebilmektedir. Radyejeneral temel tarafından iletilen yükler altında her bir kazığın en üst noktasındaki ve her bir zemin elemanının orta noktasındaki düşey yer değiştirmeler şu bağıntı yardımıyla ifade edilebilir:

$$\{\delta_{sp}\} = [I_{sp}]\{P_{sp}\} \quad (5.4)$$

Burada,

$\{\delta_{sp}\}$: kazık elemanlarının en üst noktasındaki oturma değeri

$[I_{sp}]$: kazık+zemin bloğunun etki matrisi

$\{P_r\}$: radye ve kazık+zemin bloğu arasında oluşan arayüz kuvvetlerinin vektörünü belirtmektedir.

5.4.1.3 Kazıklı radyejeneral temel sisteminin çözümü

Yukarıda verilen bağıntılara dayanılarak ve yer değiştirmelerin eşitliğini ve etkileşim kuvvetlerinin dengesi göz önüne alınarak şu sonuçlara varılmaktadır:

$$\{\delta_r\} = \{\delta_{sp}\} \quad (5.5)$$

$$\{P_r\} = -\{P_{sp}\} \quad (5.6)$$

Buna göre,(5.3)'den (5.6)'ya kadar olan bağıntılar birleştirildiğinde ortaya çıkan denklem aşağıdaki gibidir:

$$([I_r] + [I_{sp}])\{P_{sp}\} - \{a\}D_x - \{b\}D_y - \{c\}D_z - \{d\}\theta_x - \{e\}\theta_y - \{f\}\theta_z = \{\delta_{r0}\} \quad (5.7)$$

Ayrıca, uygulanan dış yükler ve radyejeneral temele etkiyen arayüz kuvvetleri ve momentleri arasındaki denge durumu dikkate alındığında şu bağıntılar elde edilir:

$$\{a'\}\{P_{sp}\} = P_x \quad (5.8)$$

$$\{b'\}\{P_{sp}\} = P_y \quad (5.9)$$

$$\{c'\}\{P_{sp}\} = P_z \quad (5.10)$$

$$\{d'\}\{P_{sp}\} = M_x \quad (5.11)$$

$$\{e'\}\{P_{sp}\} = M_y \quad (5.12)$$

$$\{f'\}\{P_{sp}\} = M_z \quad (5.13)$$

Bu bağıntılarda P_x , P_y ve P_z radyejeneral temele uygulanan dış yükleri, M_x ve M_y sabitlenmiş nokta etrafında radyejeneral temele uygulanan momentleri, M_z ise birinci sabit noktada z eksenini etrafında P_x ve P_y yüklerinin oluşturduğu toplam momenti belirtmektedir. $\{a'\}$ 'nden $\{f'\}$ 'ne kadar olan vektörler tamamlayıcı vektörler olup (5.7) denkleminde yer alan ve $\{a'\}$ 'nden $\{f'\}$ 'ye kadar olan vektörlerle ilişkilidirler.

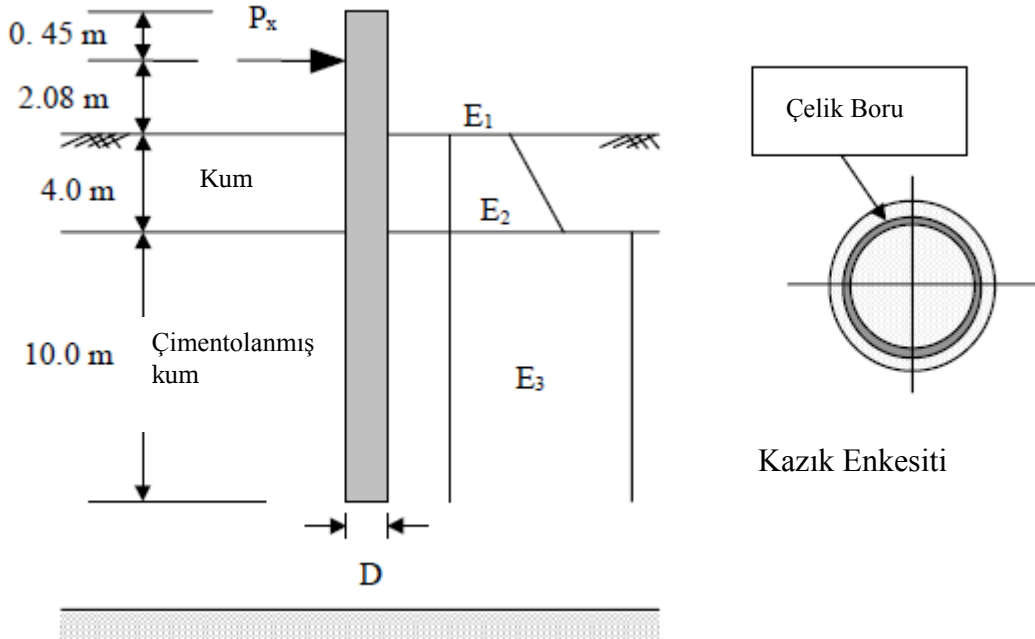
(5.7)'ten (5.13)'e kadar olan bağıntılar çözüldüğünde kazık-radyejeneral temel arayüzünde kazık üst noktalarında oluşan etkileşim kuvvetleri elde edilebilmekte ve

bu değerler (5.13) bağıntısına yerleştirildiğinde altında kazık bulunan bir radyejeneral temelin yer değiştirme değerleri bulunabilmektedir.

5.4.2 Elde edilen sonuçların arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması

Small ve Zhang (2000) yukarıda bahsedilen yöntemle elde ettikleri değerleri arazide yapılan ölçümler sonucu Ruesta ve Townsend (1997) tarafından elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Tekil bir kazık ve büyük ölçekli ve kazık yerleşim oranı 3 olan bir kazık grubu ayrı ayrı yanal yüklemeye tabi tutulmuştur. Kazıkların enkesiti ve zemin profili şekil 5.6’da gösterilmektedir. elik borunun çapı 350 mm olup et kalınlığı 9.5 mm’dir. Bu boru beton içine gömülmüş ve kazığın çapı bu şekilde 0.76 m’ye ulaşmıştır. Gömülü kazığın uzunluğunun kazık çapına oranı 18.42’dir. Betonun ve elik borunun elastisite modülleri sırayla 34.475 MPa ve 190,302 Mpa olarak verilmiştir. Kazığın eşdeğer elastisite modülünü bulmak için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$E_{concrete}I_{concrete} + E_{pipe}I_{pipe} = E_{equiv}I_{equiv} \quad (5.14)$$



şekil 5.6 : Kazık ve zemin profilinin şematik gösterimi
(Small ve Zhang, 2000)

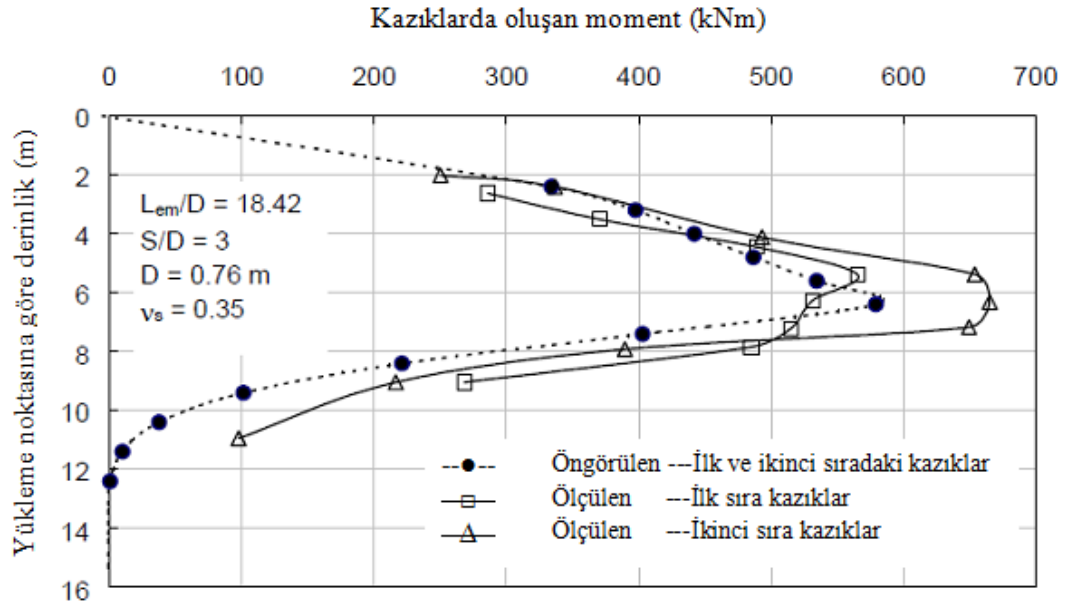
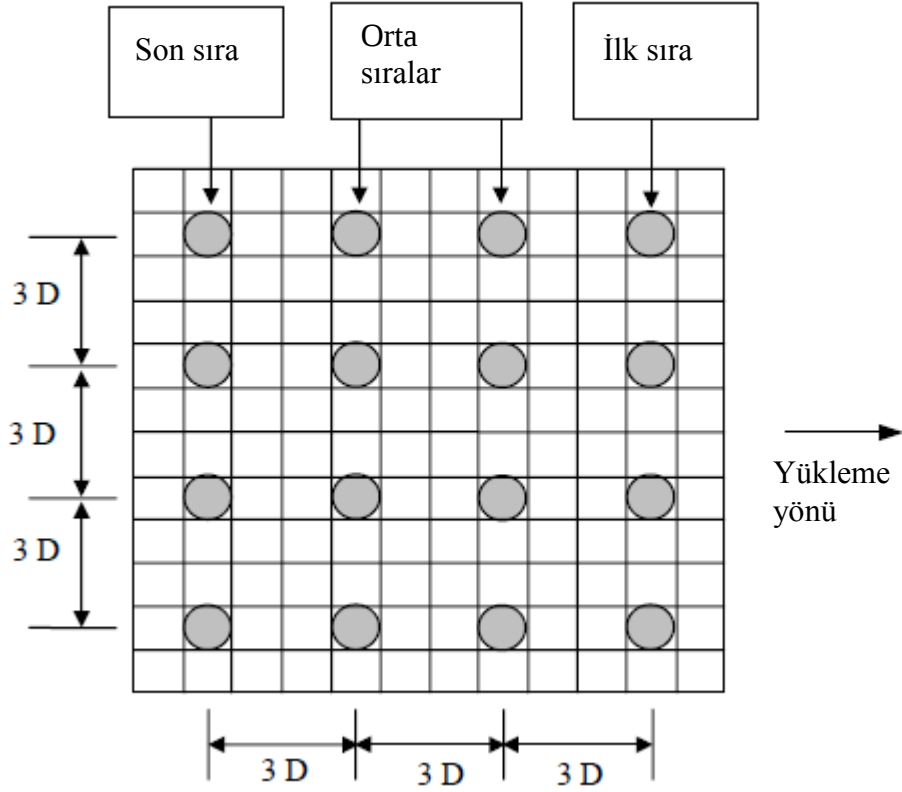
Bu şekilde eşdeğer elastisite modülü 43,660 MPa olarak hesaplanmıştır. Zemin profili üstte 4.0 m kalınlığında kum ve altında 10.0 m kalınlığında çimentolaşmış kum tabakasından oluşmaktadır. Her iki tabaka için de Poisson oranı 0.35 kabul

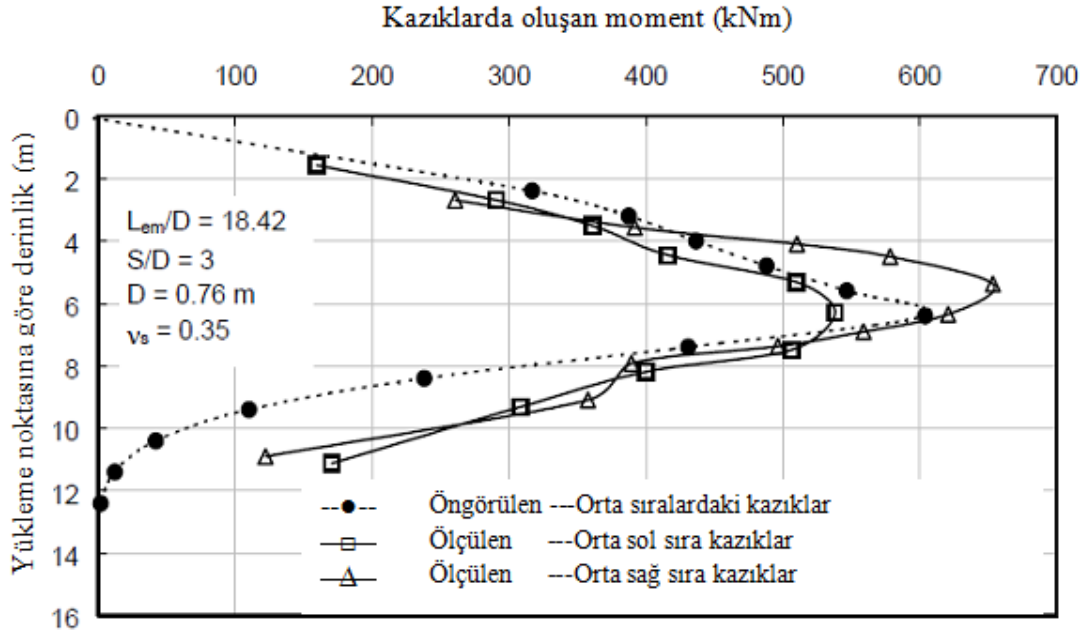
edilmiştir. Sahada yapılan dilatometre ve presiyometre deneylerinden yüzeye yakın olan kum tabakasının elastisite modülünün derinlikle değiştiği, altta yer alan çimentolanmış kum tabakasının ise elastisite modülünün tabaka derinliği boyunca sabit kaldığı gözlenmiştir.

Her iki tip zemin için de elastisite modülü tekil kazığın geri çözümü ile elde edilmiştir. Öncelikle, sahada gerçekleştirilen dilatometre ve presiyometre deneylerinden elde edilen veriler yardımıyla elastisite modülünün derinliğe bağlı değişimi Şekil 5.6'da gösterildiği gibi yaklaşık olarak belirlenmiştir. Geri hesap sırasında $z=0.0\text{m}$ ve $z=4.0\text{ m}$ 'deki elastisite modülleri arazi ölçümleri sırasında elde edilmiş E elastisite modüllerinin doğrusal olarak değiştiği kabulü ile hesaplanmıştır. Bu durumda üstteki kum tabakasının elastisite modülü değerlerinin 12.35MPa ile 23.35 MPa arasında değiştiği, alttaki tabakanın derinlik boyunca sabit olan elastisite modülünün ise ortalama 190,5 MPa mertebesinde seyrettiği belirlenmiştir. Hesaplanan elastisite modüllerini kullanarak ve radyejeneral temeli esnek kabul ederek kazık grubundaki her bir kazığın yer değiştirmesi yukarıda bahsedilen APRAF programı yardımıyla hesaplanmıştır. Radyejeneral temelin esnek kabul edilmesi ile bu eleman için oldukça küçük bir elastisite modülü kullanılmış, bu şekilde kazıkların radyejeneral temele bağlı olmadığı durum modellenmeye çalışılmıştır.

Bu şekilde APRAF yazılımı yardımıyla hesaplanan moment değerleri her bir kazık sırası için sahada ölçülen ortalama moment değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kazık grubunun yerleşim planı Şekil 5.7'te, elde edilen verilerin grafik halinde çizimi Şekil 5.8'te ve Şekil 5.9'da verilmektedir. Burada aynı yükün uygulanması halinde hem ilk ve son sıra için, hem de orta sıralar için teoride hesaplanan moment değerlerinin birebir aynı çıkacağı unutulmamalıdır (Small ve Zhang, 2000).

Elde edilen grafiklere göre öngörülen moment değerleri her sıra kazık için ölçülen değerler ile büyük oranda uyumluluk göstermektedir. Bu sonuçlara göre ilk ve son sıra için ölçülen ve hesaplanan maksimum moment değerleri arasında %12.9 civarında bir fark mevcut iken, bu fark orta sağ ve sol sıralar için elde edilen veriler karşılaştırıldığında %7.5 mertebelerinde kalmaktadır.





Şekil 5.9 : Orta sıra kazıklarda ölçülen ve teorik olarak hesaplanan moment değerlerinin karşılaştırılması (Poulos, 2001)

5.5 Değişik Faktörlerin Yatay Yük Altındaki Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Davranışı Üzerine Etkisi

Small ve Zhang (2002) kare biçiminde radyejeneral temel ve 4x4 karelajla yerleştirilmiş derin homojen bir zemin tabakasına gömülü 16 kazıktan oluşan bir sistem üzerinde değişken parametrelerin temel sisteminin davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Radyejeneral temelin ve zeminin Poisson oranları sırasıyla 0.15 ve 0.35 seçilmiştir. Hem radyejeneral temelin kalınlığı, hem de kazıkların çapı 0.5 m olarak belirlenmiştir.

Hem düşey, hem de yatay yüklemeler durumunda, normalize edilmiş yatay ve düşey yerdeğiştirmeler I_{uxx} ve I_{uzz} şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$I_{uxx} = \frac{E_s D}{q_x B_r L_r} u_x \quad (5.15)$$

$$I_{uzz} = \frac{E_s D}{q_z B_r L_r} u_z \quad (5.16)$$

Bu bağıntılarda;

u_x , u_z : gerçek yatay ve düşey değiştirmeler,

E_s : zeminin elastisite modülü,

D : kazık çapı,

q_x , q_z : uygulanan düzgün yayılı yatay ve düşey yükler,

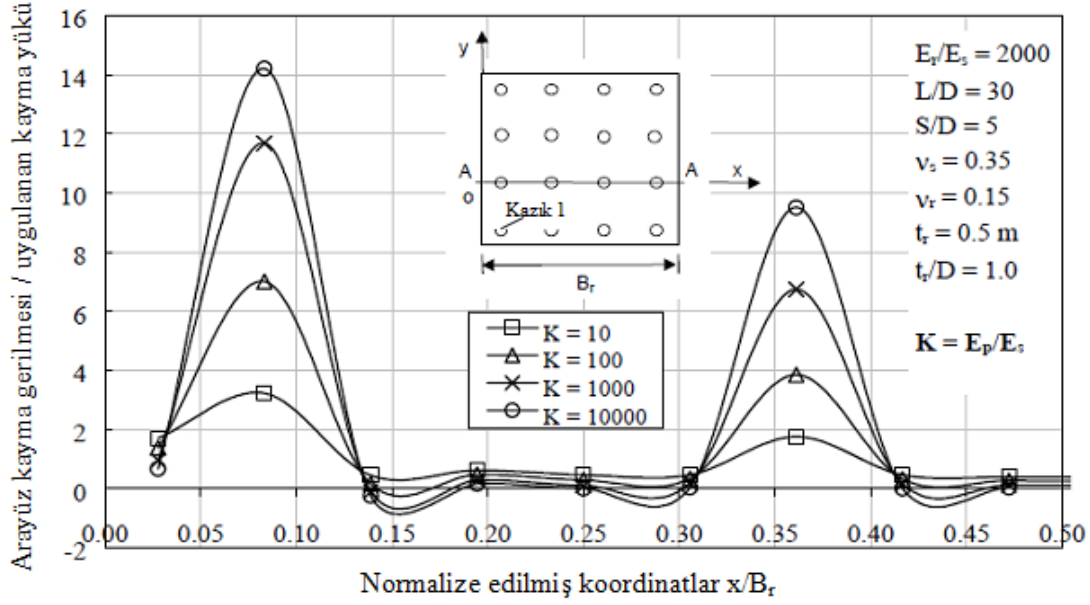
B_r : radyenin genişliği,

L_r : radyenin uzunluğunu simgelemektedir. Radyejeneral temel kazıkların etrafına her yönde bir kazığın çapı kadar, yani 0.5 m uzunluğunda taşırılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde farklı parametrelerin temel sisteminin oturma davranışı ve yük dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

5.5.1 Kazık-zemin rijitlik oranının etkisi

Kazık-zemin rijitlik oranının temel sisteminin yer değiştirmesi ve yükün dağılımı üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmalarda Small ve Zhang (2002) kazık aralığının kazık çapına oranı, diğer bir deyişle kazık yerleşim oranını 5 olarak, zeminin elastisite modülünü 10 MPa olarak ve radyejeneral temelin elastisite modülünü 20,000 MPa olarak seçmişlerdir. Kazık uzunluğunun kazık çapına oranını temsil eden kazık narinlik oranı ise 30 olarak alınmıştır. Homojen zemin tabakasının sonsuz derinliğe uzandığı kabulü ile hareket edilmiştir. Farklı kazık-zemin rijitlik oranları için x eksenini yönünde etkiyen üniform bir kayma yükü τ altında çizilen grafikler Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’da gösterilmektedir.

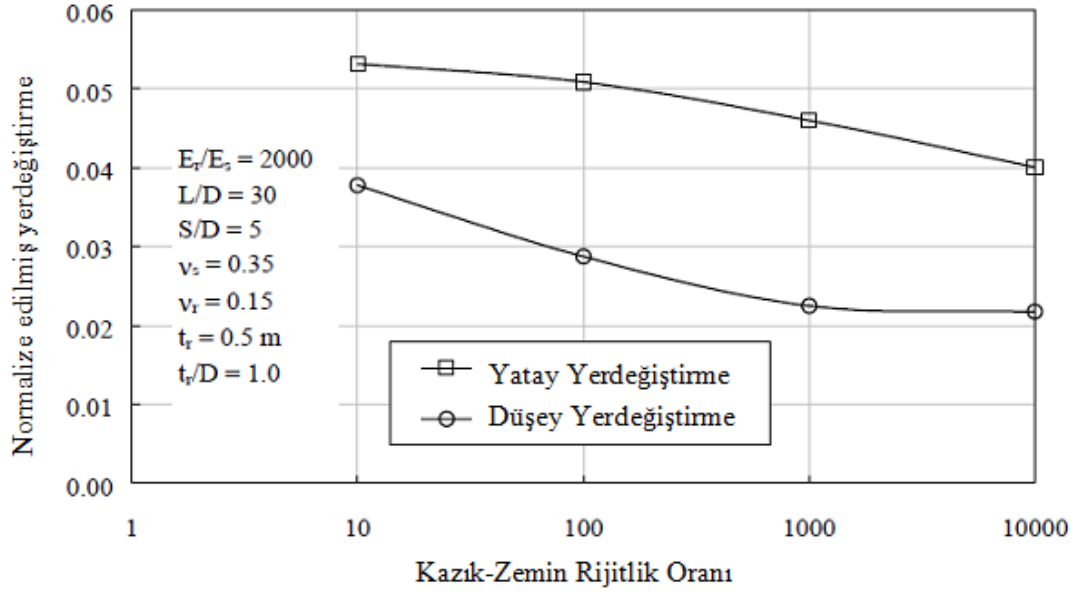
Şekil 5.10’da kazık rijitliğinin zemin rijitliğine oranını temsil eden farklı K değerleri için A-A kesitindeki arayüzde oluşan kayma gerilmesinin kesit boyunca değişimi verilmektedir. Bu grafikten anlaşılabacağı üzere kazıkların bulunduğu noktalarda oluşan kayma gerilmesi tüm rijitlik oranları için zemin yüzeyinde oluşan kayma gerilmesine kıyasla çok daha büyük değerler almakta, ayrıca kazık rijitliği arttıkça kazık başlarında oluşan kayma gerilmesi artmakta ve zemin yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri azalmaktadır.



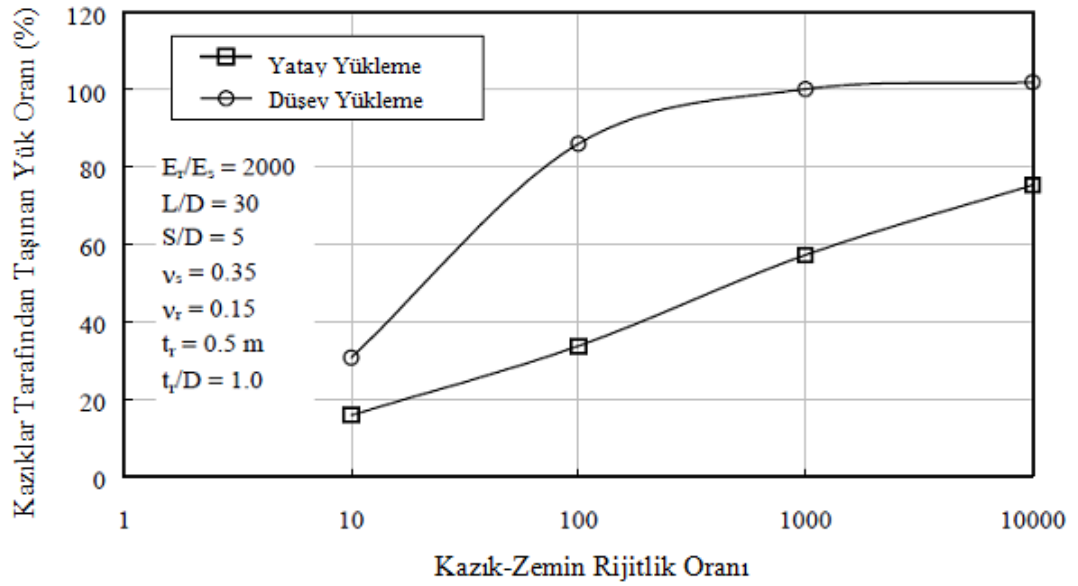
Şekil 5.10 : A-A kesidi boyunca arayüzde oluşan kayma gerilmesinin değişimi (Poulos,2001)

Şekil 5.11, kazık-zemin rijitlik oranına bağlı olarak yatay ve düşey yerdeğiştirme miktarlarının değişimini vermektedir. Buna göre elde edilen yatay deplasman değerleri düşey deplasman değerlerinden kazık-zemin rijitlik oranından bağımsız olarak yüksektir. Kazık rijitliği arttıkça hem yatay, hem de düşey deplasman değerlerinde azalma gözlenmektedir. Burada dikkate alınması gereken bir husus düşey yükleme altında gözlenen yerdeğiştirmelerde kazık-zemin rijitlik oranı 1000'in altındayken kazık rijitliğindeki artışa bağlı olarak meydana gelen azalmanın kazık-zemin rijitlik oranı 1000'in üzerinde değerler aldığı zamanki azalma eğiliminden daha fazla olduğudur.

Şekil 5.12'de ise kazık-zemin oranındaki artışa bağlı olarak kazıkların taşıdığı yükün toplam yüke oranının değişimi verilmektedir. Buna göre, yatay yükleme altında kazık rijitliğine bağlı olarak kazıkların taşıdığı yük miktarı hemen hemen doğrusal olarak artmakta, düşey yükleme altında ise kazık-zemin rijitlik oranı değerleri 10 ve 100 arasında iken kazıkların taşıdığı yük oranı hızlı bir biçimde artarken, kazık-zemin rijitlik oranı değeri K 100'ün üzerine çıktığında kazıkların taşıdığı yükün artış hızında düşme gözlenmekte, hatta neredeyse asimptotik bir değer almaktadır.



Şekil 5.11 : Yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin kazık-zemin rijitlik oranına bağlı değişimi (Poulos, 2001)



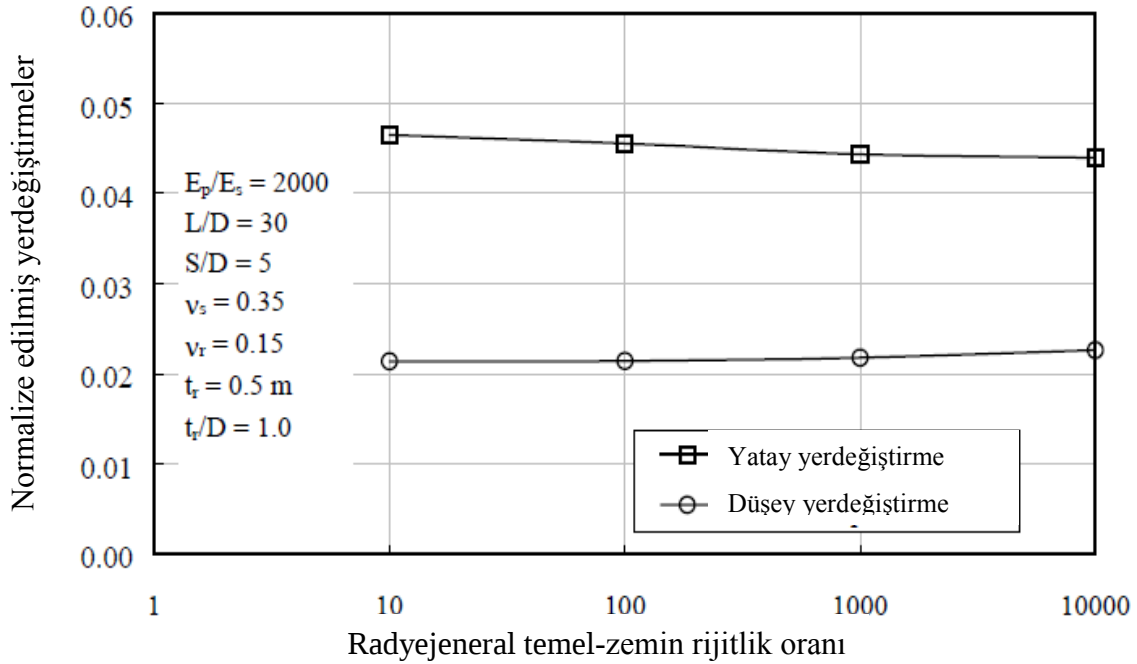
Şekil 5.12 : Kazık-Zemin Rijitlik Oranına bağlı olarak kazıkların taşıdığı yük miktarının değişimi (Poulos, 2001)

5.5.2 Radyejeneral Temel-Zemin Rijitlik Oranının Etkisi

Radyejeneral temelin rijitliğinin zeminin rijitliğine oranı E_r/E_s 'nin kazıklı radyejeneral temel sisteminin davranışına olan etkisini belirlemek amacıyla Small ve Zhang (2000) tarafından yapılan çalışmada bir önceki bölümde belirtildiği gibi kazık aralığının kazık çapına oranı, diğer bir deyişle kazık yerleşim oranı, zeminin elastisite modülü ve kazık uzunluğunun kazık çapına oranını temsil eden kazık

narinlik oranı sabit tutularak ve kazık rijitliğinin zemin rijitliğine oranı yine sabit ve 2000 alınarak E_p/E_s 'nin değişiminin etkileri incelenmiştir. Radyejeneral temelin rijitliği aynı zamanda radyejeneral temelin kalınlığına da bağlı olduğundan bu değer de sabit ve 0.5 m olarak seçilmiştir. Buna göre E_p/E_s oranının değişimine göre normalize edilmiş yerdeğiştirmelerin ve kazıklar tarafından taşınan yükün değişimi Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de gösterilmektedir.

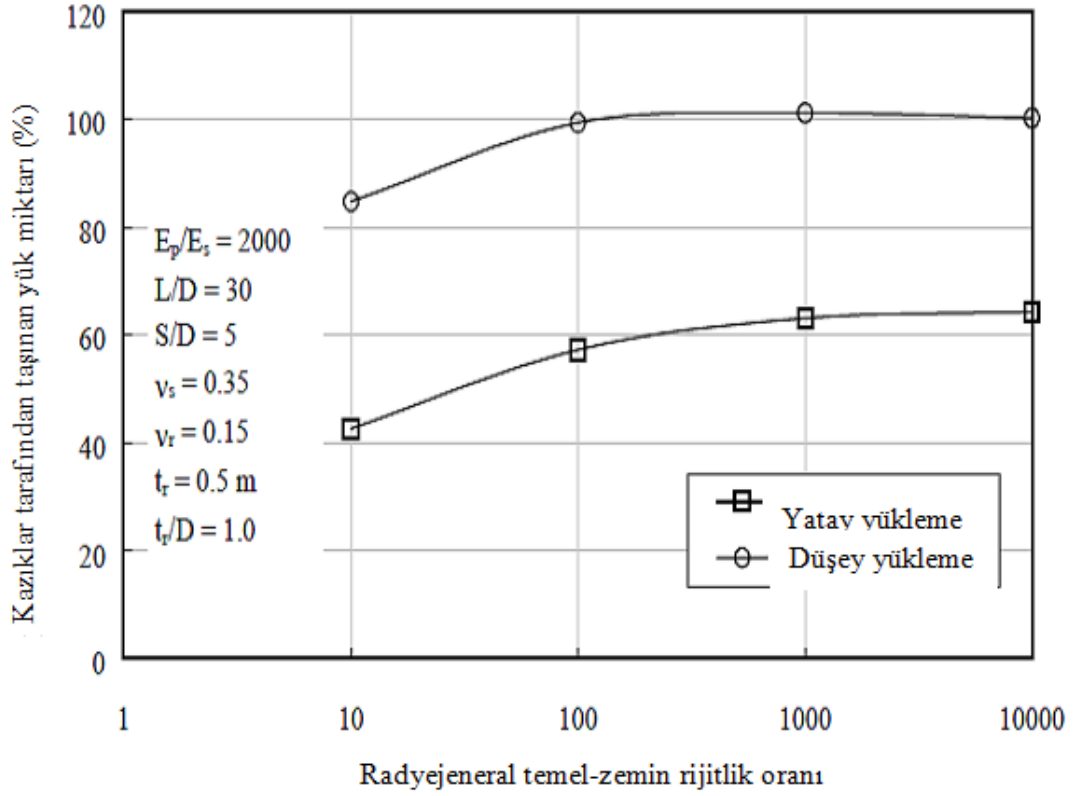
Şekil 5.13'de görüldüğü üzere radyejeneral temel-zemin rijitlik oranının kazıklı radyejeneral temel sisteminin yerdeğiştirmesi üzerindeki etkisi kazık-zemin rijitlik oranının değişmesinin temel sistemi üzerinde yarattığı ve Bölüm 5.5.1 'de detaylı olarak anlatılan etkilerden farklı olarak neredeyse ihmal edilebilir mertebededir. Bu durum hem yatay hem de düşey yüklemeler için geçerli olup yatay yükleme sonucu meydana gelen yerdeğiştirmeler düşey yükleme sonucu meydana gelen yerdeğiştirmelerden daha fazladır.



Şekil 5.13 : Normalize edilmiş yerdeğiştirmelerin radyejeneral temel-zemin rijitlik oranına göre değişimi (Poulos, 2001)

Şekil 5.14'de ise kazıklara gelen yükün toplam yüke oranının radyejeneral-temel zemin rijitlik oranına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Buna göre, radyejeneral-temel zemin rijitlik oranının 100'den az olduğu durumlarda rijitlik oranındaki artışa paralel olarak kazıkların taşıdığı yük oranı da gözle görülür biçimde artmakta, ancak

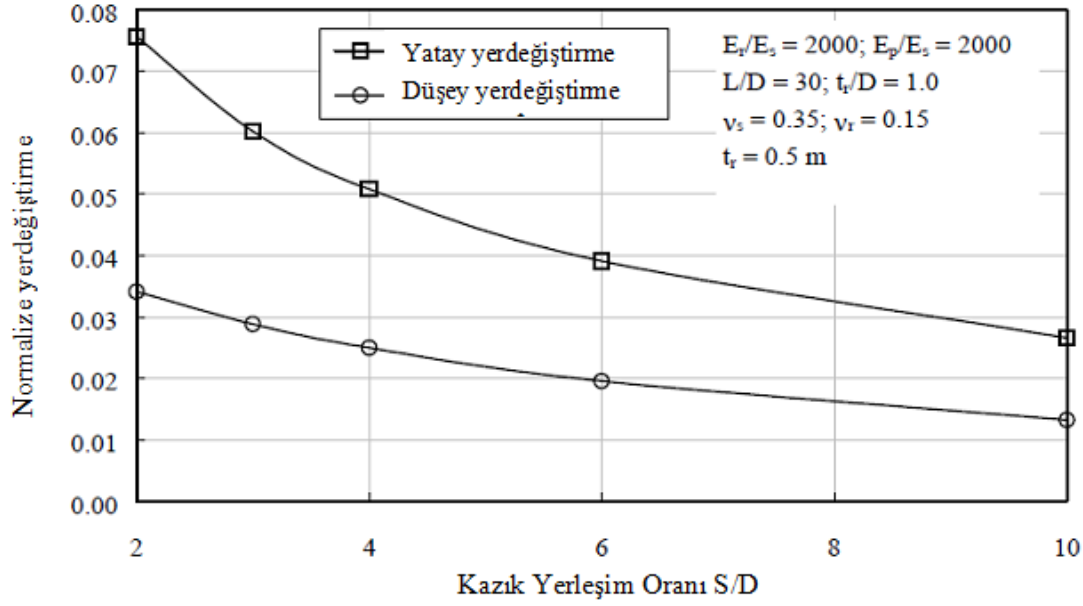
rijitlik oranının 100'ün üzerine çıkması halinde her iki yükleme şekli için de rijitlik oranının artışı kazıklara gelen yük miktarında ihmal edilebilir bir değişime sebep olmaktadır.



Şekil 5.14 : Kazıklar tarafından taşınan yük miktarının radyejeneral temel-zemin rijitlik oranına göre değişimi (Poulos, 2001)

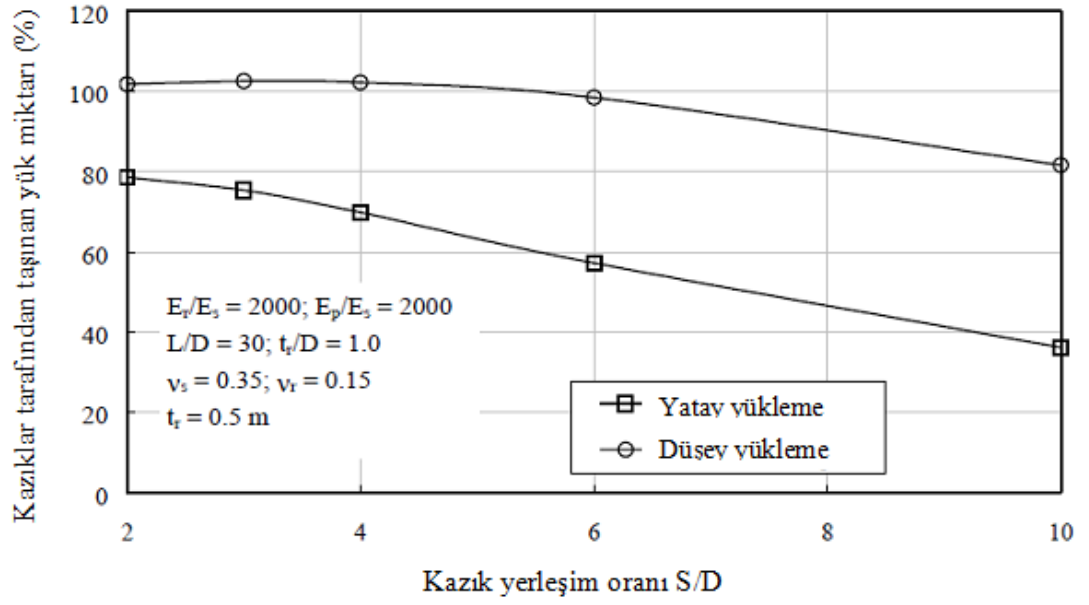
5.5.3 Kazık Yerleşim Oranının Etkisi

Small ve Zhang (2000), kazık yerleşim aralığının kazıklı radyejeneral temel sisteminin davranışı üzerine olan etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, bölüm 5.5.1 ve Bölüm 5.5.2 'deki gibi, kazık uzunluğunun kazık çapına oranını temsil eden kazık narinlik oranını ($L/D=30$), zeminin elastisite modülünü ($E_s=10$ MPa), kazık rijitliğinin zemin rijitliğine oranını ($E_p/E_s=2000$) ve radyejeneral temel rijitliğinin zemin rijitliğine oranını ($E_r/E_s=2000$) sabit alarak kazık aralığının kazık çapına oranı S/D 'nin değişiminin etkilerini incelemişlerdir. Burada dikkate alınması gereken husus kazık aralığı arttıkça radyejeneral temelin boyutlarının büyüdüğü ve yapılan çalışmalarda düzgün yayılı yük kullanılması sebebiyle uygulanan toplam kuvvetin kazık aralığı büyüdükçe arttığıdır.



Şekil 5.15 : Kazık yerleşim oranının (S/D) kazıklı radyejeneral temel sisteminin yerdeğ iştirme üzerine etkisi (Poulos, 2001)

Kazık yerleşim oranının kazıklı radyejeneral temel sisteminin yerdeğ iştirme üzerine etkisi incelendiğ inde, hem yatay hem de düşey yükleme durumları için kazık yerleşim aralığının temel sisteminin yerdeğ iştirme üzerinde oldukça önemli etkileri olduğu görülmektedir (Şekil 5.15). Özellikle kazık aralığının kazık çapına oranının küçük olduğu sistemlerde yerdeğ iştirme dikkat edilmesi gereken boyutlara ulaşmaktadır. Kazık yerleşim oranının kazıklar tarafından taşınan yük miktarı üzerine etkisi ise Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Buna göre yatay yükleme esnasında kazık yerleşim aralığı arttıkça, kazık grubu toplam yükün daha az kısmını taşımaktadır. Düşey yükleme durumunda kazık yerleşim aralığının artması halinde kazıkların taşıdığı yük miktarında meydana gelen azalma yatay yükleme durumuna göre daha düşük mertebededir.



Şekil 5.16 : Kazık yerleşim oranının (S/D) kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazık grubu tarafından taşınan yük miktarı üzerine etkisi (Poulos, 2001)

6. KAZIKLI RADYEJENERAL TEMELLERİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ YARDIMIYLA İNCELENMESİ

6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemi, karmaşık ve elle hesaplanması oldukça zaman alan, hatta imkânsız olan mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Bu yöntem esas olarak fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesine dayanır. Buna göre değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi suretiyle analiz edilir. Bu aşamada sistem parçalanırken esas sistemde yer alan süreksizlikler dikkate alınmalıdır. Örneğin farklı malzeme özelliklerine sahip geometriler kendi içerisinde parçalara ayrılmalıdır. Ayrılan parçalar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmak suretiyle esas geometriyi oluştururlar ve her bir parça için denge denklemleri yazılarak bilinmeyenler sınır şartları yardımıyla elde edilir. Her elemanın şekli, bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Bu şekilde yapılan analizin bir boyutlu olması durumunda elemanlar doğrusal, iki boyutlu olması durumunda elemanlar kare, üçgen ya da dikdörtgen ve üç boyutlu olması durumunda üçgen prizma, dikdörtgen prizma vb şekillerden oluşurlar. Her düğüm noktasının belirli bir serbestlik derecesi vardır ve bu serbestlik dereceleri elde edilmesi gereken bilinmeyenleri işaret etmektedir. Çözüm için bir asıl değişken seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve matris hesap yöntemiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır. Elde edilen ana değişkenler yardımıyla ikincil değişkenler elde edilir (Sert, 2003).

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi esas olarak deplasmanların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle deplasmanlar ana değişkenleri, deplasmanlar yardımıyla hesaplanan gerilme ve zorlanmalar ikincil değişkenleri belirtmektedir. Bu doğrultuda, sonlu eleman yönteminin işleyişi modelin sonlu elemanlara ayrılması, elemanda yükleme sonucu oluşacak deplasmanları yansıtacak deplasman modellerinin seçilmesi, elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden

elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içeren rijitlik matrisinin oluşturulması ve oluşturulan eleman rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerinin toplanarak sistemin bütünü için rijitlik matrisi ve yük vektörünün elde edilmesi şeklinde özetlenebilir. Tek bir eleman için rijitlik matrisi $[k]$, yük vektörü $\{Q\}$ ve düğüm deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$[k] * \{q\} = \{Q\} \quad (6.1)$$

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

$$[K] * \{r\} = \{R\} \quad (6.2)$$

Bu iki eşitliğin çözülmesi için sınır koşullarının belirlenmesi ve bu iki eşitliğin uygun şekilde ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Eşitliklerin çözülmesi ile bilinmeyen ana değişkenler elde edilir. Lineer analizlerde doğrudan çözüm yapılırken, doğrusal olmayan zemin davranışı için analizlerde her bir yük adımında yük vektörleri ve rijitlik matrisleri tekrar oluşturularak çözümlenmektedir. Deplasmanların elde edilmesini takiben gerilme ve zorlanmalar deplasman değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi esas olarak üç ana adımdan oluşmaktadır. Ön süreç olarak adlandırılan ilk adımda, sistemin geometrisi, malzeme özellikleri, yapısal elemanlar ve yükler tanımlanmakta, hesap aşaması olan ikinci aşamada sistem sonlu elemanlara ayrılarak her bir eleman için bilinmeyenler yukarıda bahsedilen şekilde çözülüp düğüm noktalarındaki bilinmeyenlerin toplanması suretiyle tüm sistem için birincil ve ikincil değişkenler elde edilmekte, süreç sonrası olarak adlandırılan son aşamada ise elde edilen birinci ve ikincil değişkenlerin tüm sistem üzerindeki değerleri görülüp izlenebilmektedir.

6.2 Plaxis 3D Foundation Sonlu Elemanlar Programı

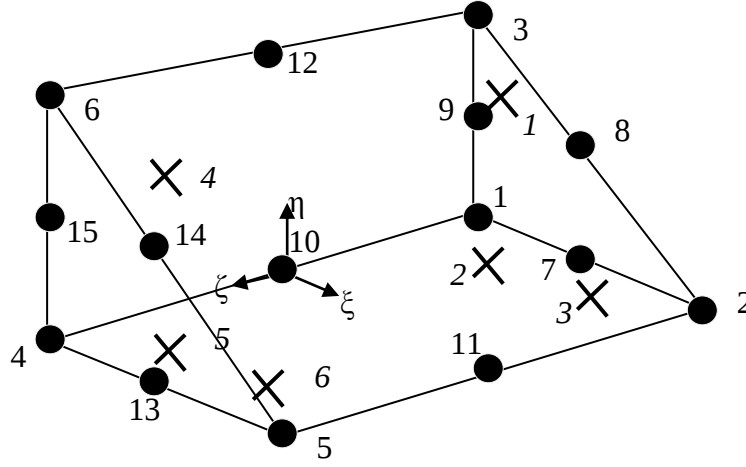
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesi'nde geliştirilen PLAXIS® yazılımı, geoteknik mühendisliğinde hem statik hem de

dinamik yükler altında karmaşık geometriye sahip sistemlerin deformasyon ve stabilite analizinde sıklıkla tercih edilen ve oldukça pratik bir programdır. Tercih edilmesinin sebebi kullanım kolaylığının yanı sıra, zeminin elastoplastik davranışını, başlangıç gerilme durumunu, yapı zemin etkileşimini dikkate alması olarak gösterilebilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve PLAXIS programının bir modülü olan PLAXIS 3D Foundation yazılımı, özellikle kıyı yapıları da dahil olmak üzere temel sistemlerinin analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir üç boyutlu sonlu elemanlar programıdır (Brinkgreve ve Broere, 2006). Bu programla yapılan çalışmalarda tabakalı zemin, karmaşık geometriye sahip sistemler, farklı yönlerde yükleme gibi bir çok durum dikkate alınabilir.

PLAXIS 3D Foundation yazılımı, Bölüm 6.1’de de belirtildiği gibi 3 ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, “INPUT” *Giriş* bölümünde sistemin geometrisi ve sınır şartları tanımlanır, zemin ve yapı elemanlarının malzeme özellikleri belirlenir, etkiyen yük tipleri (çizgisel yük, yayılı yük vb.) ile etkidikleri noktalar seçilir ve bir sonraki aşamaya geçmeden hemen önce iki boyutlu sonlu eleman ağı, bu iki boyutlu ağın y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirine bağlanması suretiyle ise üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulur. Üç boyutlu sonlu eleman ağı 15 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlardan oluşmakta olup komşu elemanlar birbirlerine ortak düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanırlar. İkinci aşama olan “CALCULATION” hesap aşamasında yapım aşamaları tanımlanır, her bir düğüm noktasındaki u_x , u_y ve u_z yerdeğiştirmeleri Bölüm 6.1’de belirtildiği gibi hesaplanır. Yerdeğiştirmelerin aksine, gerilme ve zorlamalar her bir elemanın Gauss (gerilme) noktalarında hesaplanmaktadır. 15 düğüm noktalı bir elemanda 6 gerilme noktası bulunmaktadır (Şekil 6.1). Üçüncü ve son aşama olan “OUTPUT” *çıkış* bölümünde ise yapılan hesaplamaların sonuçları görülebilmekte, önceden belirlenmiş bazı noktalarda gerilme-şekil değiştirme ve taşıma gücü davranışını gösteren diğer diyagramlar çizdirilebilmektedir.

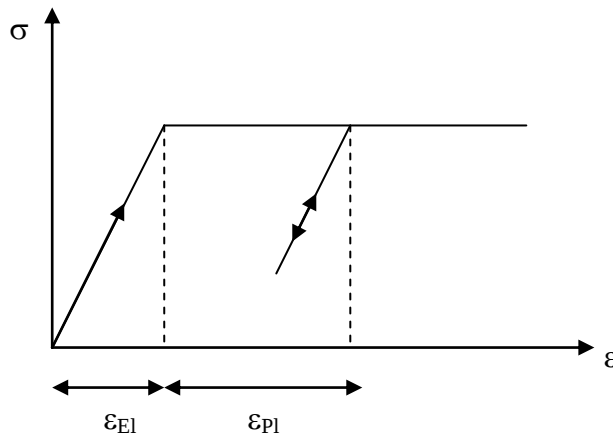
Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirleyen faktörlerden birisi de, zemini tanımlarken hangi model kabulünün kullanıldığıdır. Plaxis 3D Foundation yazılımı, zemin mekaniğinde sıklıkla kullanılan lineer elastik ve elastoplastik Mohr-Coulomb zemin modellerinin yanı sıra, zeminin hiperbolik elastik-plastik davranışına izin veren pekleşen zemin (Hardening Soil) ve yumuşak zemin akma modeli (Soft Soil Creep) gibi farklı kabullere dayanan zemin modellerinin kullanımına olanak tanımaktadır.

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



Şekil 6.1 : Plaxis 3D Foundation Yazılımında Kullanılan Sonlu Elemanlar

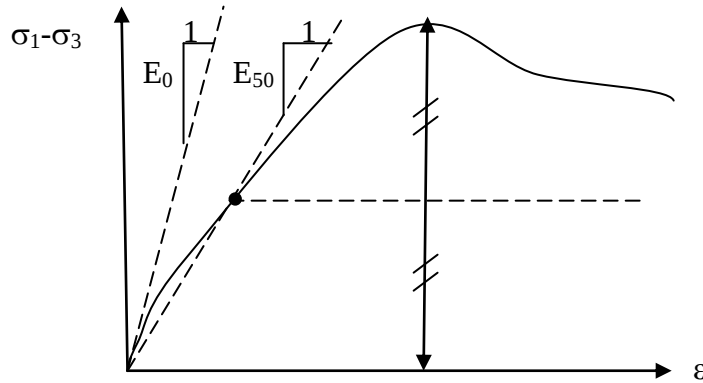
Elastik-ideal plastik Mohr-Coulomb modelinde Elastisite Modülü E ve Poisson Oranı ν zeminin elastik özelliklerini temsil ederken, kohezyon c ve içsel sürtünme açısı ϕ plastik, hacimsel genleşme açısı ψ ise hacim değiştirme özelliklerini temsil etmektedir. Bu modelde elastik ve plastik davranış net sınırlarla belirlenmiştir (Şekil 6.2). Ayrıca zemin içerisinde Elastisite Modülü E 'nin lineer artması durumunu modellemek de mümkün olabilmektedir. Gerçekte Mohr-Coulomb modeli zeminin davranışını ilk adımda incelemek için oldukça uygun olup elde edilen gerilme şekil değiştirme değerleri gerçekte oldukça büyük bir uyum içerisinde.



Şekil 6.2 : Zeminde Mohr-Coulomb gerilme-şekil değiştirme davranışı modeli

Zeminin elastoplastik davranışını tanımlayan diğer bir model Pekleşen Zemin (Hardening Soil Model) olup bu modelin Mohr-Coulomb modelinden farkı, akma yüzeyinin asal gerilme aralığı ile sınırlı olmayıp, plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak genişleyebilmesidir. Üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı Mohr-Coulomb modelinde doğrusal olarak temsil edilirken Pekleşen Zemin modelinde hiperbolik olarak kabul edilmektedir, bu da gerçek zemin davranışına daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Buna ilaveten, zemin rijitliğinin, zemine etkiyen gerilme artışına bağlı olarak arttığı hesaba katılmakta, dolayısıyla bu modelde tüm rijitlikler belirli bir referans gerilme alınarak belirlenmekte, yazılım zeminde gerilme artışına bağlı olarak rijitlik artışını başka bir işleme gerek kalmaksızın dikkate almaktadır. Pekleşen Zemin modelinde, Mohr-Coulomb zemin modelinin tanımında detaylı olarak yer verilen Elastisite Modülü dışındaki dört parametreye ek olarak, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen üç ayrı Elastisite Modülü parametresi ile zeminin davranışı daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu parametreler, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} olup, grafiksel tanımları Şekil 6.3’de verilmiştir. Tekrarlı yükleme boşaltma deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{ur} olarak isimlendirilmekte olup, pratikte şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$E_{ur} = 3 * E_{50} \quad (6.3)$$



Şekil 6.3 : Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} 'nin belirlenmesi

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

olduğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynayan bir katsayı olan m şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (6.4)$$

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

6.3 Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Plaxis 3D Sonlu Elemanlar Programı ile Modellenmesi

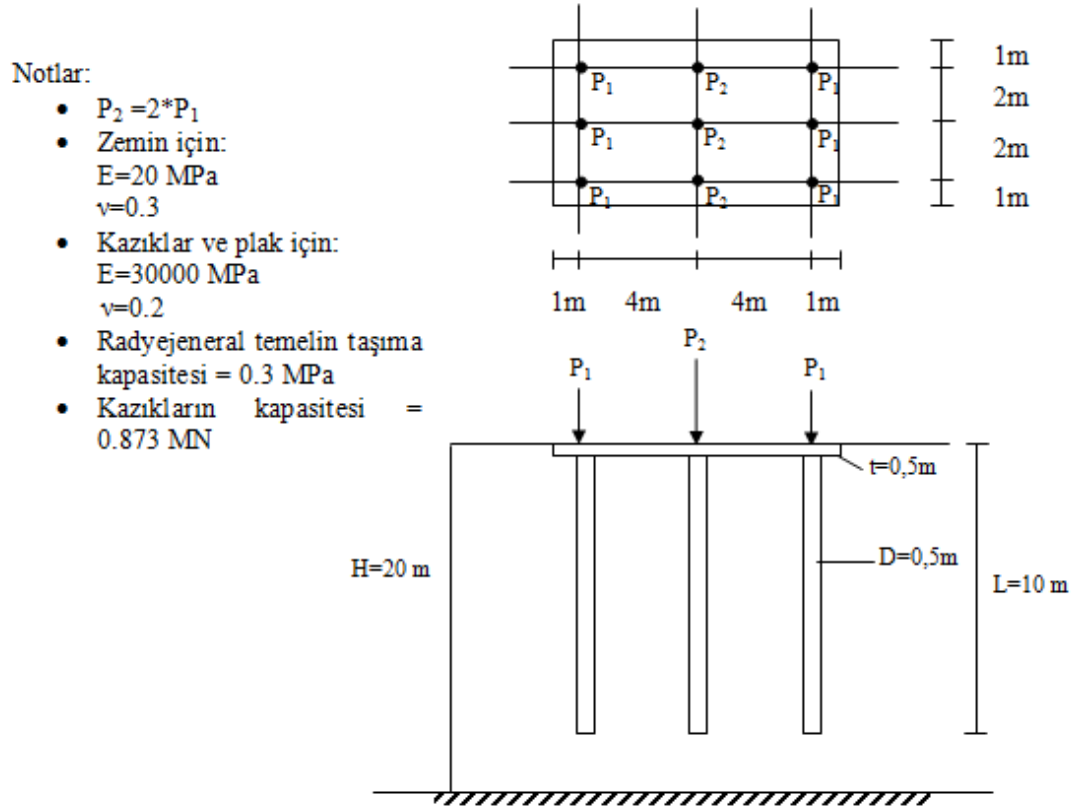
6.3.1 Ön çalışmalar

Bu çalışma kapsamında incelenecek farklı temel sistemlerinin, uygulanan belirli bir yük altında Plaxis 3D Foundation programı ile elde edilecek yerdeğiştirme, gerilme, moment değerleri ve kazıklara ve radyejeneral plağa gelen yük miktarlarının gerçeğe uygunluklarının kontrolü, diğer bir deyişle programın kalibrasyonu amacıyla Poulos (2001) tarafından geliştirilen ve Engin ve Brinkgreve (2008) tarafından da irdelenen, Şekil 6.4'te verilen hipotetik problem Plaxis 3D Foundation programı ile çözülmüştür. Problemin çözümü sonucunda elde edilen toplam ve farklı oturma değerlerinin ve radyejeneral plakta oluşan maksimum eğilme momenti değerinin daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen değerlerle uyum içinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.5). Elde edilen değerlerin karşılaştırıldığı çalışmalar aynı problemin basit hesap yöntemi olan Poulos-Davis-Randolph (PDR) ve Burland yöntemi, basitleştirilmiş bilgisayar çözümüne dayalı olan GASP (Poulos, 1991) ve GARP (Poulos, 1994) ile FLAC 2-D ve FLAC 3-D iki ve üç boyutlu sonlu eleman yöntemleri ile yapılan çözümleri kapsamaktadır. Bu çalışmalar ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.5'de verilmiştir.

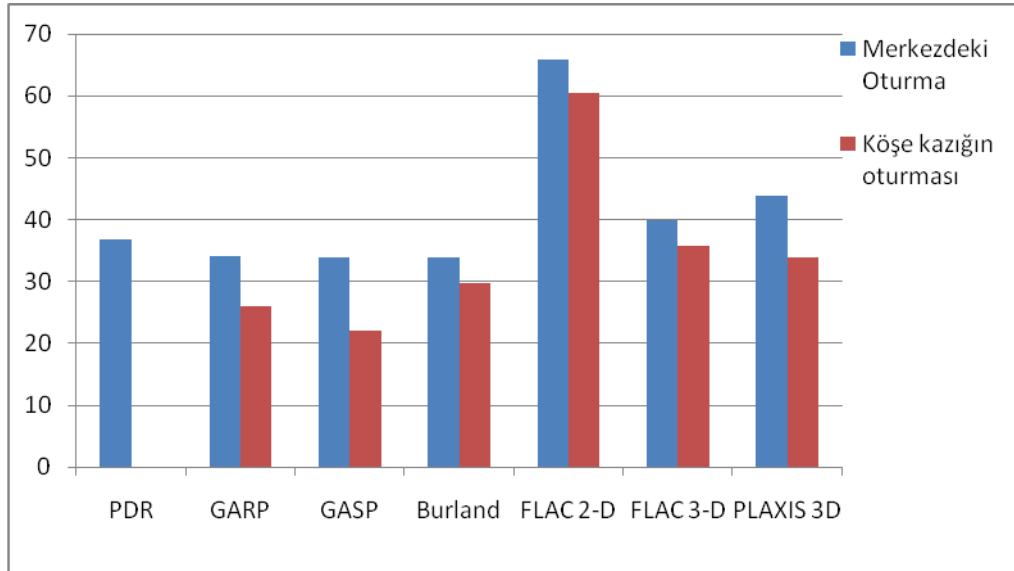
6.3.2 Model özellikleri ve sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi

Çalışma kapsamında kullanılacak model 20 katlı ve kil zemine oturan bir yapıyı temsil edecek olup, düşey ve yatay yükler altında 3 farklı temel sisteminin kullanılması durumunda her bir temel sisteminin taşıma gücü ve oturma davranışı araştırılacaktır. Bu sistemler sırasıyla radyejeneral temel, radyejeneral temel

tabanının zemin ile temas halinde olduğu kazıklı radyejeneral temel ve radyejeneral temelin zemin ile temasının olmadığı kazıklı temel olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.4 : Poulos'un (2001) hipotetik probleminin şematik gösterimi



Şekil 6.5 : Poulos'un (2001) hipotetik probleminin çeşitli yöntemlerle çözümü sonucu elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Üstyapıdan gelen yükler yayılı yük olarak modellenmiş olup, 10mx10m'lik bir alanda yapının geri kalanına etkiyen yükün yaklaşık 1,5 katı mertebesinde bir yük etkidiği varsayılmıştır. Fiziksel olarak bu bölgenin yapının diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğu (kule vs) ya da ağır bir makinenin bulunduğu düşünülebilir.

Sonlu eleman çözümünde kullanılan eleman sayısının artırılması ile düğüm noktası sayısı artırılmakta, böylece zemin daha az rijit bir davranış sergilemektedir (Engin ve diğ., 2007). Ayrıca gerilmelerin yüksek olduğu ya da kritik oturma davranışı gösterebilme olasılığı bulunan bölgelerde eleman sayısının fazla olması gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durum, hesap için gerekli zamanın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yine Engin ve diğ. (2007) tarafından sonlu eleman ağının “sık” ve “çok sık” olarak modellenmesi halinde özellikle stabilite analizlerinde beklenenden daha önce göçme durumu gerçekleşebildiği belirtilmiştir. Bu sebeple her problem için uygun ağ sıklığının belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen 3 boyutlu modelin tamamında aynı eleman sıklığını kullanmak yerine bölgesel olarak artırmak hesap aşamasından tasarruf etmeyi sağladığı için tercih edilmektedir. Bu çalışmada da sonlu elemanlar ağı “orta” sıklıkta modellenmiş, ancak radyejeneral temel altında oluşan gerilme ve deformasyonların fazla olması beklendiği için eleman sayısı artırılmıştır.

Analiz edilecek sistemin sınır şartlarından etkilenmemesi için sonlu eleman ağının oluşturulacağı geometrinin x, y ve z eksenlerinde yeterince büyük bir alanda yer alması gerekmektedir. Bu bağlamda 100 m x 100 m x 50 m boyutlarında oluşturulacak bir geometride sınır şartlarından etkilenme durumunun gerçekleşmeyeceği yapılan çalışmalar sonucu belirlenmiştir. Sistemin düşey ve yatay yük etkisindeki davranışı araştırılacağı için simetriden yararlanılmamıştır.

6.3.3 Malzeme özellikleri

Sistem tek tabakalı zemin üzerinde modellenmiştir. Modellenecek zemin normal konsolide bir kil tabakası olarak seçilmiş olup, Mohr-Coulomb modeli kullanılmıştır. Bölüm 6.2’de de belirtildiği gibi aslında Pekleşen Zemin (Hardening Soil) modeli arazideki zemin davranışını daha iyi yansıtmaya rağmen, bu çalışma kapsamında üç eksenli basınç deneyi verileri elde bulunmadığından ve Mohr-Coulomb modeli ilk yaklaşımda gerçeğe oldukça uygun sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Ancak arazi şartlarını daha iyi yansıtmaya amacıyla zeminin elastisite modülünün derinliğe

bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir. Kullanılan zeminin malzeme parametreleri Çizelge 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Plaxis 3D Foundation programında kullanılan zeminin malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Büyüklik
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_d	kN/m ³	18
Suya doymun birim hacim ağırlık, γ_{sat}	kN/m ³	20
Elastisite Modülü, E	kN/m ²	2,5x10 ⁴
Elastisite Modülü derinlikle artış oranı, ΔE	kN/m ² /m	500
Poisson oranı, ν		0,3
Rijitlik Modülü, E_{oed}	kN/m ²	3,37x10 ⁴
Kayma Modülü, G	kN/m ²	9615,4
İçsel sürtünme açısı, ϕ	°	28
Kohezyon, c	kN/m ²	20
Arayüz mukavemeti, R_{inter}	-	0,9

Temel sisteminin davranışını gerçeğe uygun olarak modellemek için, kazık-zemin etkileşiminin doğru olarak modellenmesi büyük bir önem taşımaktadır. Yerdeğiştirmenin küçük olduğu durumlarda, diğer bir deyişle elastik sınır içinde kalması halinde, kazığın zeminle birlikte hareket ettiği varsayımı gerçeğe uygun sonuçların elde edilmesi için yeterli bir yaklaşım olurken, yerdeğiştirmenin büyük olduğu durumlarda kazığın zemine göre rölatif yerdeğiştirmesini inceleyebilmek için daha gelişmiş modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Gömülü kazık modeli (embedded pile) Plaxis 3D Foundation yazılımı için geliştirilmiş, doğrusal olmayan kazık zemin etkileşimini tasvir eden bir modeldir. (Engin, 2007). Geleneksel kazık elemanlarında kazık zemin etkileşimi kazık çevresinde ve ucunda kullanılan arayüz elemanlarıyla modellenmekte ve bu yöntem çözüm süresini artırmaktadır. Gömülü kazık modelinde ise kazık üç boyutlu bir hacim elemanı değil, bir kiriş (çizgi) elemanı olarak modellenmekte ve zemini herhangi bir noktada herhangi bir doğrultuda kesebilmektedir. Temel mühendisliğinde oldukça büyük bir öneme haiz olan kazık-zemin etkileşimi, kazık ve zemin düğüm noktaları arasındaki rölatif yerdeğiştirme ile tanımlanmaktadır. Söz konusu düğüm noktaları kazık gövdesi boyunca gömülü arayüz elemanlarıyla, kazık ucundaki zemin direnci ise doğrusal olmayan yay elemanlarıyla modellenmiştir. Kazık kapasitesi bu modelde girdi bilgisi olup, çevre sürtünmesi kazık çeperi boyunca sabit ya da değişken olarak tanımlanabilmektedir.

Radyejeneral plak için kullanılan döşeme elemanı ve radyejeneral plak altına yerleştirilen kazıkları temsil eden gömülü kazık elemanları lineer elastik ve izotropik olarak modellenmiştir. Çevre sürtünmesi kazık çeperi boyunca değişken olarak tanımlanmıştır. Kullanılan radyejeneral temel ve gömülü kazık elemanlarının malzeme parametreleri Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Plaxis 3D Foundation programında kullanılan yapısal elemanların malzeme parametreleri

Parametre	Birim	Büyükölük
Birim hacim ağırlığı, γ	kN/m ³	24
Elastisite Modülü, E	kN/m ²	3x10 ⁷
Poisson oranı, ν		0,2
Kayma Modülü, G	kN/m ²	1,25x10 ⁷
Radyejeneral temelin kalınlığı, d	m	1,5
Kazık çapı, D	m	1,2
Kazık uç alanı, A	m ²	1,13
Kazık başındaki çevre direnci	kN/m	75
Kazık uç kısmındaki çevre direnci (25,0 m için)	kN/m	360
Kazık uç direnci	kN	1850

6.3.4 Hesap aşaması

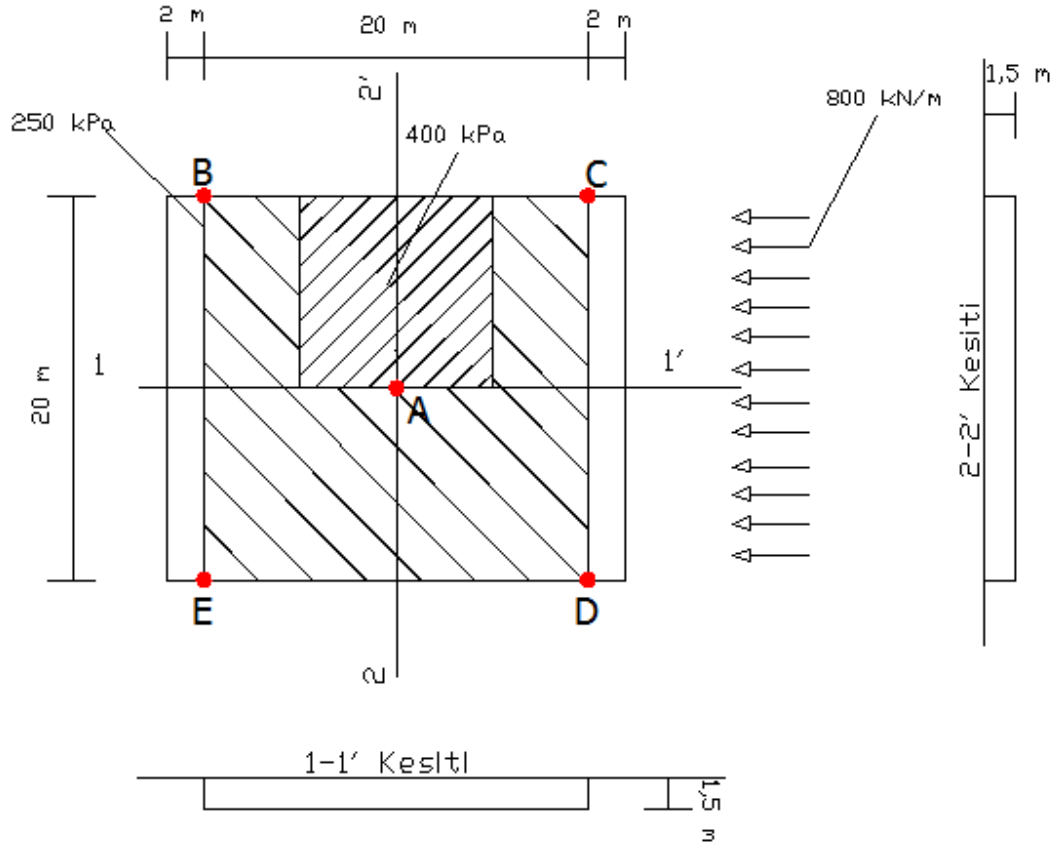
Yukarıda bahsedilen geometri ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra önce iki boyutlu, daha sonra oluşturulan bu iki boyutlu ağı y eksenindeki çalışma düzlemleri boyunca birbirine bağlanması suretiyle ise üç boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.

Hesap aşamasında Plaxis 3D Foundation programının “Staged Construction” özelliği kullanılmış, temel sistemini oluşturan elemanların imalatı ve yüklerin etkinleştirilmesi gerçeğe uygun şekilde kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi temel sistemi radyejeneral temel, radyejeneral temel tabanının zemin ile temas halinde olduğu kazıklı radyejeneral temel ve radyejeneral temelin zemin ile temasının olmadığı kazıklı temel olarak ayrı modellenmiş ve her bir sistemin modellenmesi ve elde edilen taşıma gücü davranışı ile ilgili bilgi detaylı olarak aşağıda belirtilmiştir.

6.3.4.1 Sistemin radyejeneral temel olarak modellenmesi

İlk olarak sistem yalnızca radyejeneral temel olarak modellenmiştir. Sistemin plan ve kesitleri Şekil 6.6’da, üç boyutlu ağ görüntüsü Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.6 : Radyejeneral Temel Sisteminin Plan ve Kesiti

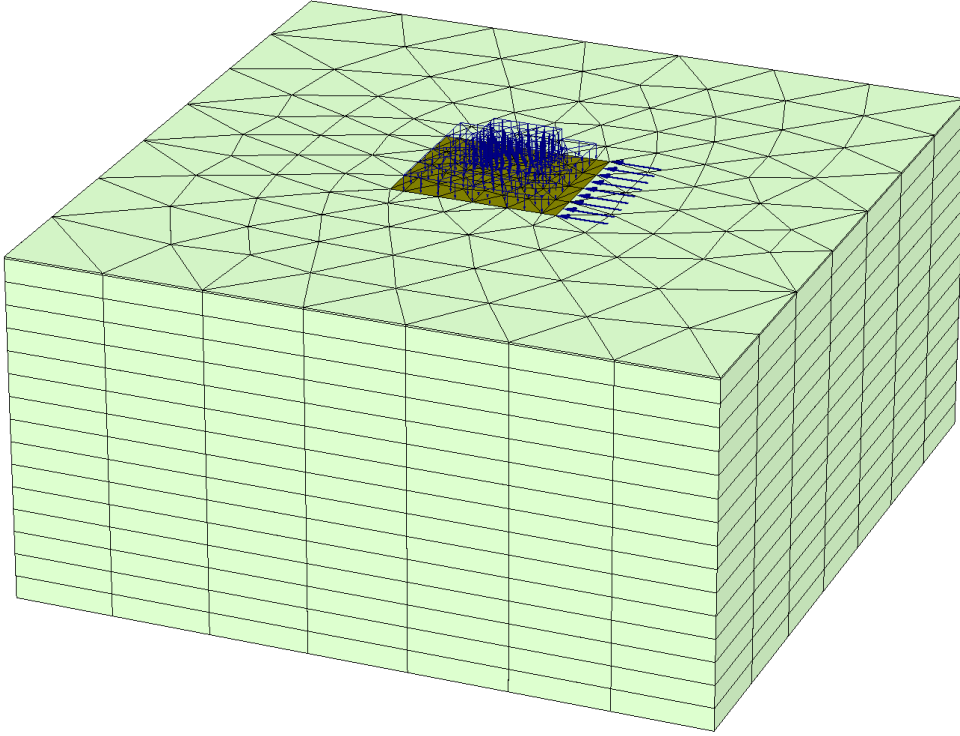
Hesap aşamasında üç kademe tanımlanmıştır. İlk kademe zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan başlangıç gerilme durumunu temsil etmekte olup K_0 yöntemi tercih edilmiştir. K_0 yönteminde yalnızca zemin ağırlığı ve varsa boşluk suyu basınçları dikkate alınmaktadır. Bu yöntemle zemin içerisinde herhangi bir noktadaki yatay gerilme şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v \quad (6.5)$$

Bu bağıntıda σ_h ve σ_v sırasıyla zemindeki yatay ve düşey gerilmeleri, K_0 ise zeminin sükunetteki toprak basıncı katsayısını simgelemektedir. K_0 normal konsolide killer için Jaky'nin (1944) formülüne göre aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilmektedir:

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

(6.6)



Şekil 6.7 : Radyejeneral temel sisteminin sonlu elemanlar programında görünüşü

Ancak bu yöntemde hesaplanan düşey gerilmeler zeminin kendi ağırlığına eşit olmaktadır. Bu sebeple sistemde tam kuvvetler dengesinin sağlanması için ancak zemin yüzeyinin tamamen yatay ve zemin tabakalarının zemin yüzeyine paralel olması durumunda K_0 yöntemi geçerli olmaktadır (Plaxis 3D Foundation Reference Manual, 2005).

Başlangıç gerilme durumunun hesaplanması için kullanılan diğer yöntem olan *Gravity Loading* yönteminde ise K_0 aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır:

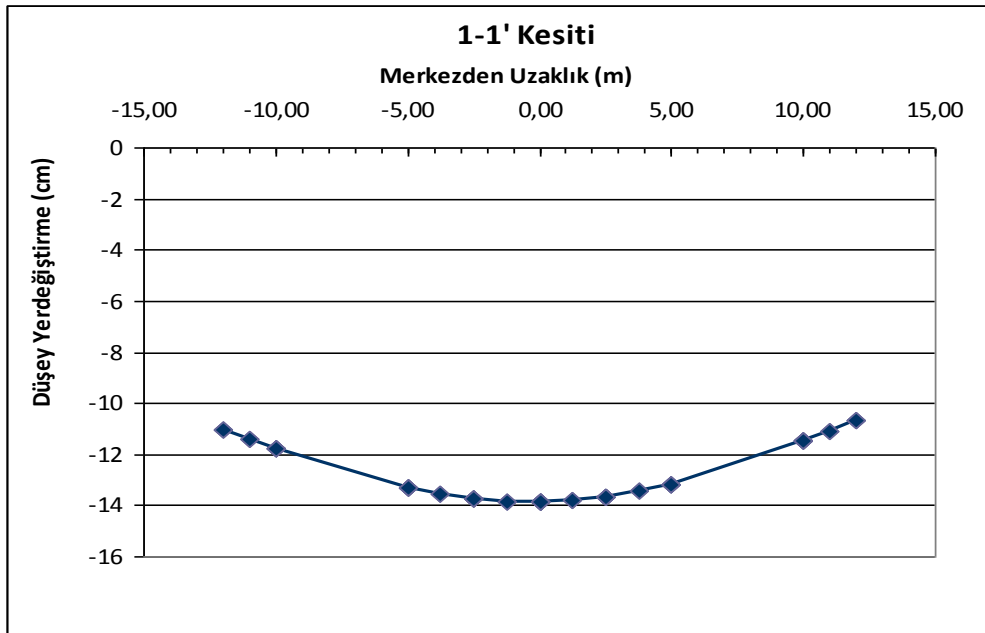
$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (6.7)$$

Bu bağıntıya göre sükûnetteki toprak basıncı katsayısı tamamıyla zeminin Poisson oranına bağlıdır. Zeminin yüzeyinin yatay olmaması durumunda bu yöntemin kullanılması önerilmektedir (Plaxis 3D Foundation Reference Manual, 2005).

Başlangıç gerilme durumu tanımlandıktan sonraki aşamada radyejeneral plağın inşa aşaması modellenmiş ve bir sonraki aşamada da düşey ve yatay yükler tanımlanmıştır. Sisteme üç farklı yük etkimektedir (Şekil 6.6, Şekil 6.7). Radyejeneral temele etkileyen düşey yayılı yükler kule bölgesinde 400 kPa, diğer bölgelerde 250 kPa olup, -x yönünde etkileyen çizgisel yük ise 800 kN/m büyüklüğündedir ve Yeni Deprem Yönetmeliği'ne (2009) göre hesaplanmış ve yapıya etkileyen toplam düşey yükün %15'i mertebesinde kabul edilmiştir.

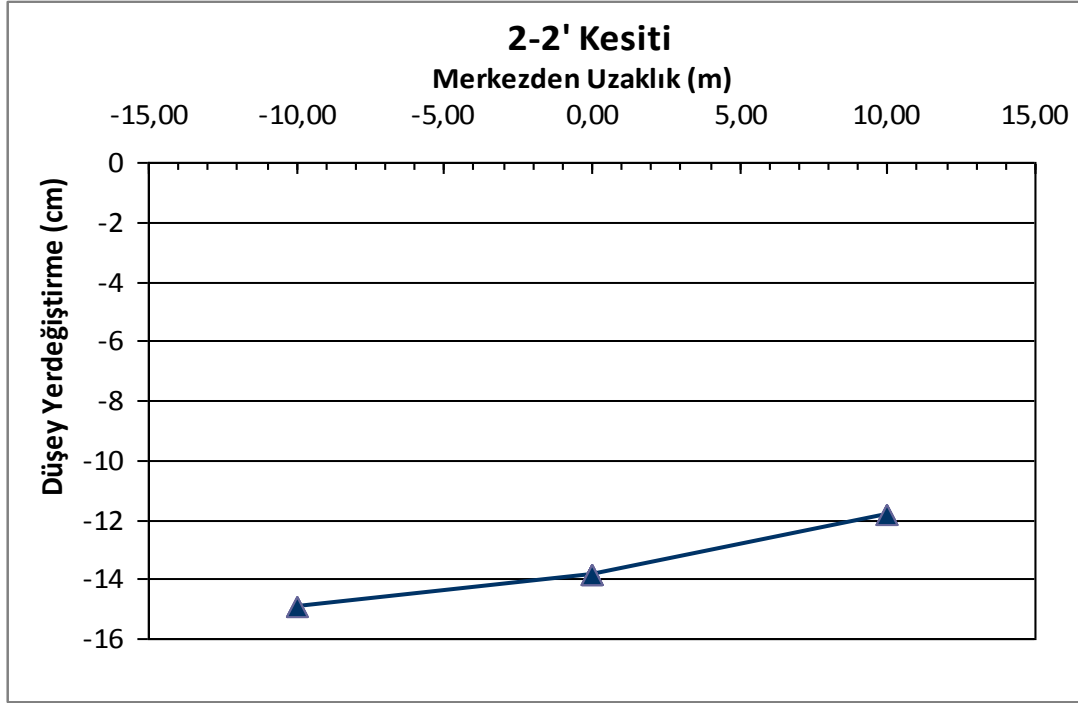
Hesap aşamaları tanımlandıktan sonra çözümlenme aşamasına geçilmiş ve çözümleme yaklaşık 4 dakika sürmüştür. Sistem toplam 5280 eleman ve 14593 düğüm noktasından oluşmaktadır. Etkileyen yükler altında sistemde oluşan yatay ve düşey deformasyon ile radyejeneral temelde oluşan eğilme momentleri özet değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Beklendiği gibi radyejeneral temel üzerinde oturma yükün yoğun olduğu kule bölgesinin altında en büyük değeri almakta ve diğer bölgelerde bina köşelerine doğru gittikçe azalmaktadır. 1-1' kesitinin oturma değerleri Şekil 6.8'de, 2-2' kesitinin oturma değerleri Şekil 6.9'da verilmektedir. Buna göre radyejeneral plak altında oluşan maksimum oturma değeri yaklaşık 14,9 cm, farklı oturma değeri ise yaklaşık 6,0 cm civarı olup bu değerler yapılar için toplam ve farklı oturma sınır değerlerinin çok üzerindedir.

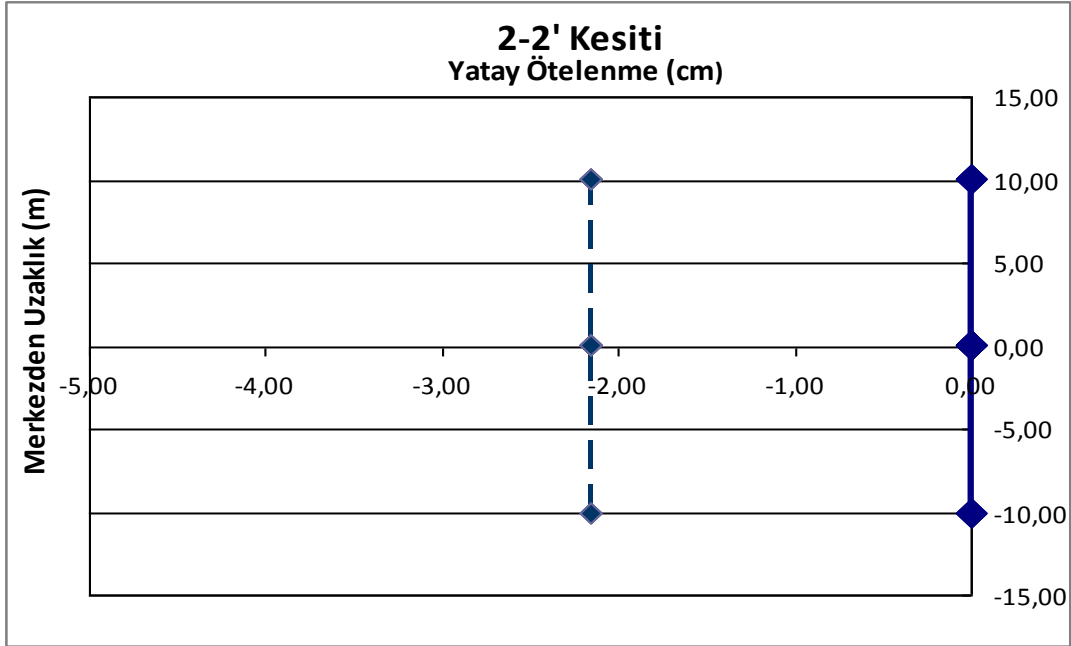


Şekil 6.8 : Radyejeneral temel 1-1' kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri

Yatay yer değiştirme ise radyejeneral plak boyunca yaklaşık 2cm mertebelerinde seyretmekte olup sistem düzgün bir biçimde yanal ötelenmeye maruz kalmaktadır (Şekil 6.10).



Şekil 6.9 : Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti düşey yerdeğiştirme değerleri



Şekil 6.10 : Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti yanal ötelenme değerleri

Radyejeneral temelin A ve B noktalarında meydana gelen düşey yer değiştirmelerin yükleme aşamaları boyunca değişimi Şekil A.1’de, yatay yer değiştirmelerin yükleme aşamaları boyunca değişimi Şekil A.2’de verilmektedir.

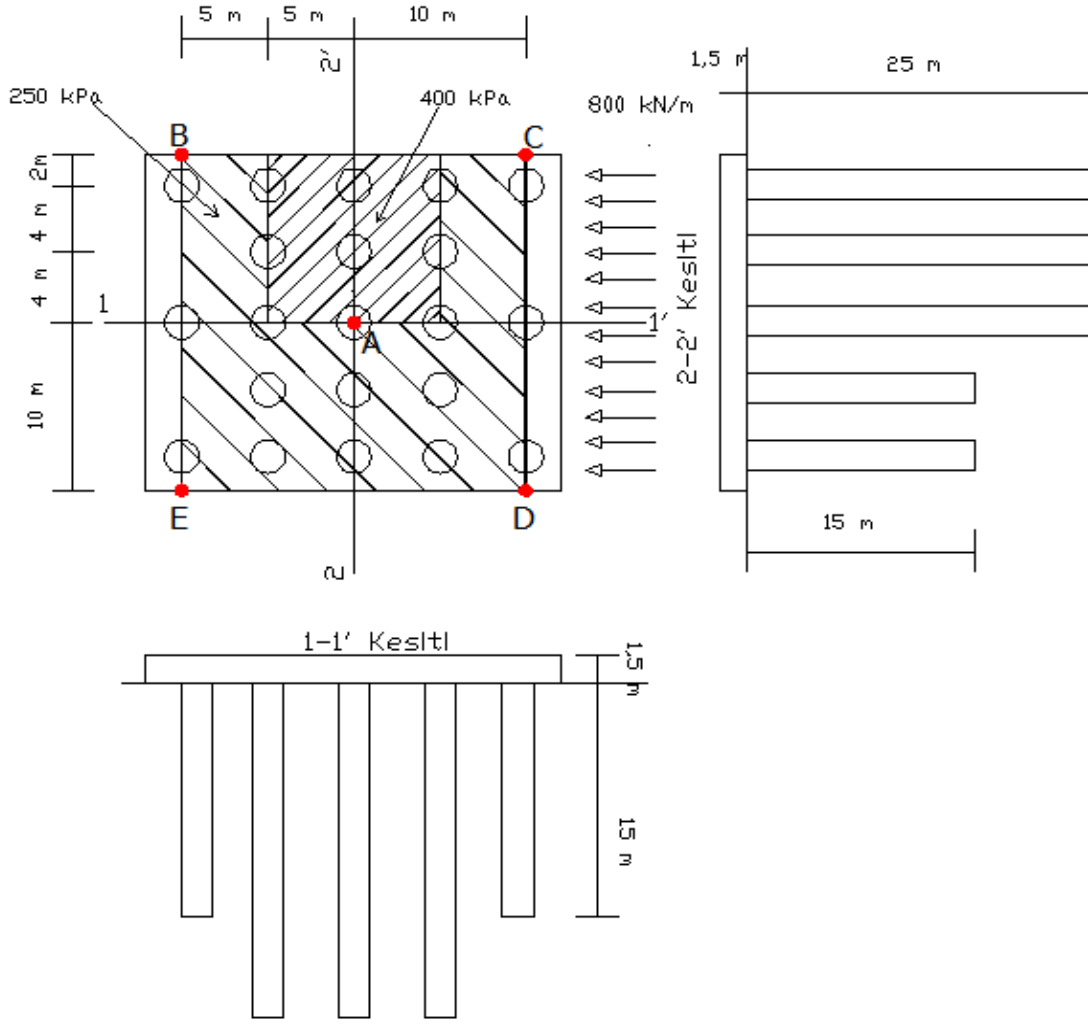
Çizelge 6.3 : Radyejeneral temelde meydana gelen maksimum ve minimum yer değiştirme ve eğilme momenti değerleri

	Birim	En Büyük Değer	En Küçük Değer
Düşey yer değiştirme, u_y (cm)	cm	14,90	8,90
Yatay yer değiştirme, u_x (cm)	cm	2,18	2,14
Temel plağında oluşan eğilme momenti, M_{11} (kNm/m)	kNm/m	5.400	-147

6.3.4.2 Sistemin kazıklı radyejeneral temel olarak modellenmesi

Temel sisteminin radyejeneral temel olarak modellenmesi sonucunda radyejeneral temelde oluşan toplam ve farklı oturma değerleri binalar için müsaade edilebilir değerlerin çok üzerinde çıkmıştır. Bu durumda temel altında yer alan zeminin iyileştirilmesi ya da temel sisteminin yeniden tasarlanması gerekmektedir. Bu aşamada temel sisteminin kazıklı radyejeneral temel olarak yeniden tasarlanması durumunda sistemde oluşan maksimum ve minimum yatay ve düşey yer değiştirme ile eğilme momenti değerleri araştırılmıştır.

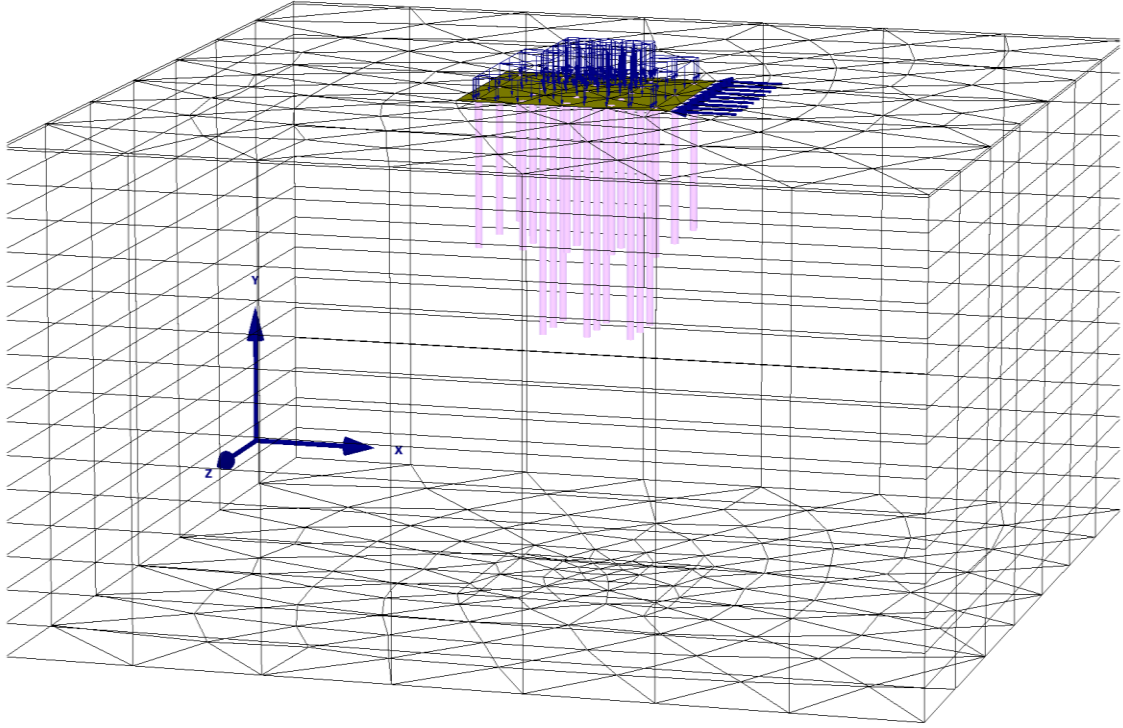
İncelenecek kazıklı radyejeneral temel sistemindeki kazıkların yerleşimine, sistemin aynı yükler altında radyejeneral temel olarak modellendiği durumda meydana gelen oturmaların bölgesel dağılımı göz önünde bulundurularak karar verilmiştir. Buna göre, yükün yoğun olduğu kule bölgesine 1,2 m çapında 25 m uzunluğunda 4m x 5m karelajla, kule bölgesinin dışında aynı karelajda ve çapta ancak 15 m uzunluğunda, kenar bölgelere ise 15 m uzunluğunda 8 m ara ile kazıklar yerleştirilmiştir. Yatay ve düşey yükler altında bu sistemde oluşan maksimum ve minimum yer değiştirmeler ve eğilme momenti değerleri araştırılmıştır. Sistemin plan ve kesitleri Şekil 6.11’de, üç boyutlu sonlu elemanlar programında görünüşü ise Şekil 6.12’de verilmektedir.



Şekil 6.11 : Kazıklı Radyejeneral Temel Sisteminin Plan ve Kesitleri

Hesap aşamasında ilk olarak Bölüm 6.3.4.1’de detaylı olarak anlatılan başlangıç gerilme durumu K_0 yöntemi ile tanımlanmış, daha sonra kazıklar ve radyejeneral temelin inşa aşaması modellenmiş ve son olarak da yükler etkinleştirilmiştir.

Hesap aşamaları tanımlandıktan sonra çözülme aşamasına geçilmiş ve çözümleme yaklaşık 6 dakika sürmüştür. Sistem toplam 4448 eleman ve 12736 düğüm noktasından oluşmaktadır. Etkiyen yükler altında sistemde oluşan yatay ve düşey deformasyon ile radyejeneral plakta oluşan eğilme momentleri özet değerleri Çizelge 6.5’de verilmiştir.

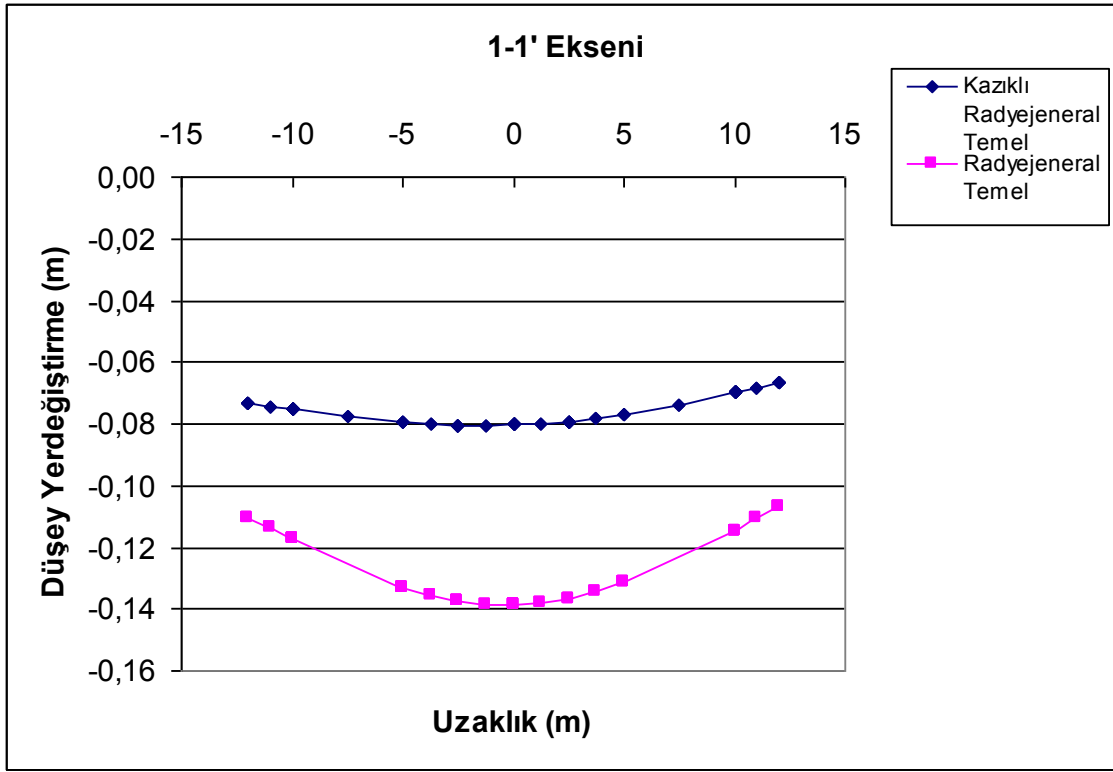


Şekil 6.12 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminin sonlu elemanlar programında görünüşü

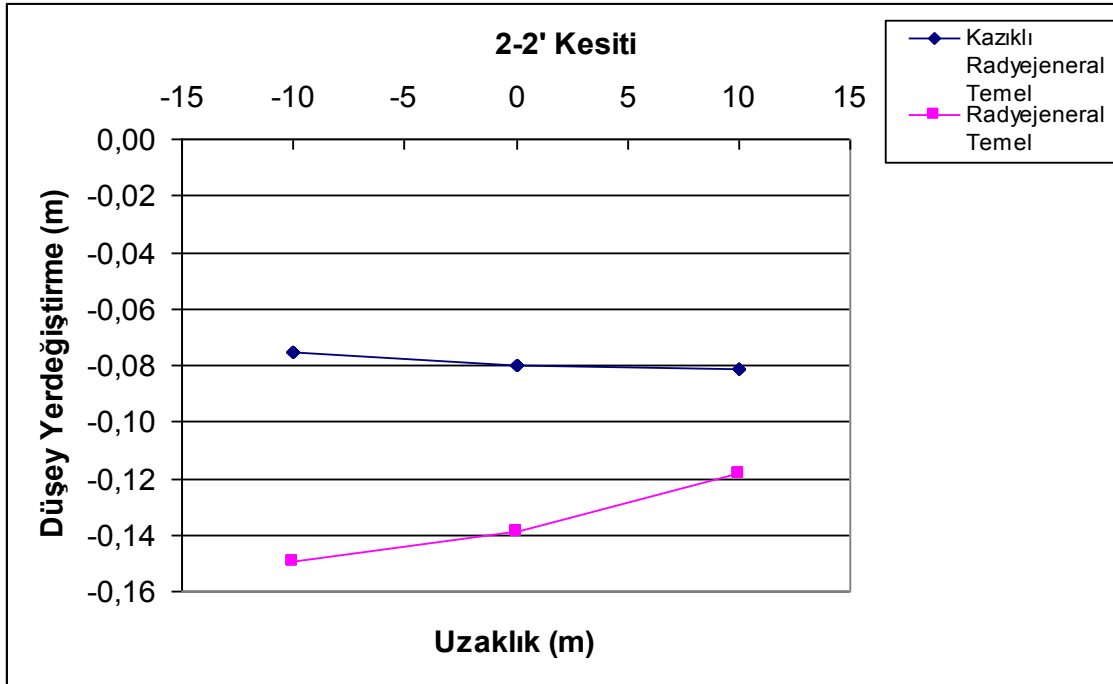
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde radyejeneral temelin altına yerleştirilen kazıkların toplam ve farklı oturmayı büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. Radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde 1-1' kesitinde meydana gelen oturmaların değişimi Şekil 6.13'de, 2-2' kesitinde meydana gelen oturmaların değişimi ise Şekil 6.14'te verilmiştir. Meydana gelen maksimum oturma değeri yaklaşık 8 cm, farklı oturma değeri ise yaklaşık 1,9 cm civarı olup bu değerler yüksek yapılar müsaade edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.4 : Yapılar için müsaade edilebilir oturma değerleri (Bowles, 1997)

	Tekil Temeller	Radyejeneral Temeller
Açısal dönme	1/300	1/300
Farklı oturma(mm)		
Kil zeminler	35	35
Kum zeminler	25	24
Maksimum oturma(mm)		
Kil zeminler	75	65-100
Kum zeminler	50	35-65



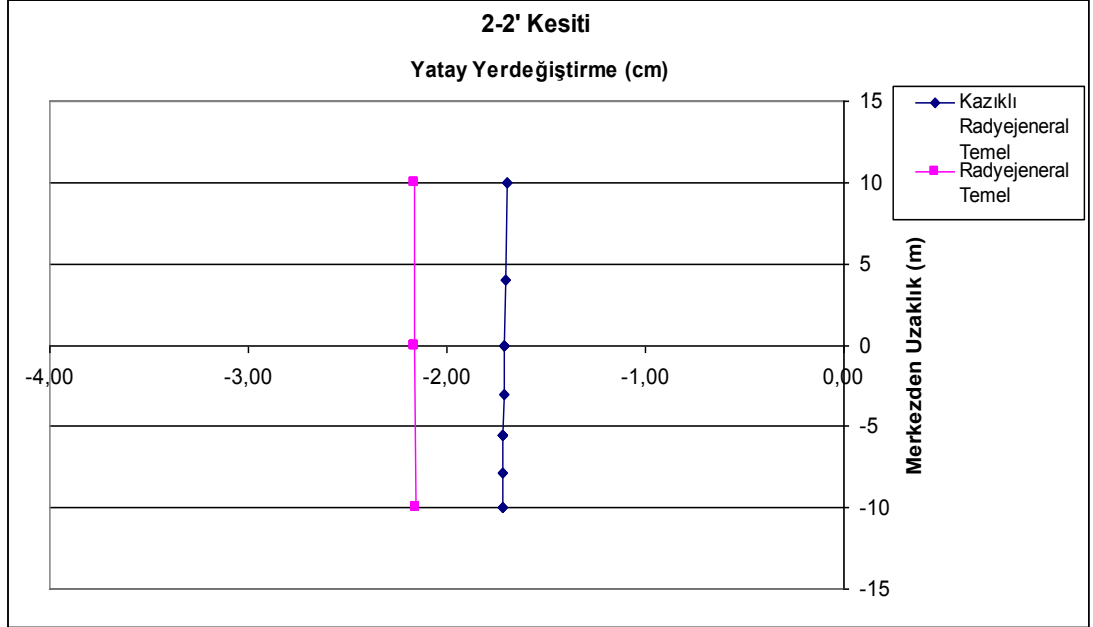
Şekil 6.13 : Kazıklı Radyejeneral Temel 1-1' Kesiti düşey yerdeğiştirme değeri



Şekil 6.14 : Kazıklı Radyejeneral Temel 2-2' Kesiti düşey yerdeğiştirme değeri

Yatay yer değıştirme ise radyejeneral temelin altına yerleştirilen kazıklar sonucunda büyük miktarda azalma göstermiştir. Radyejeneral temel sisteminde yatay yükler

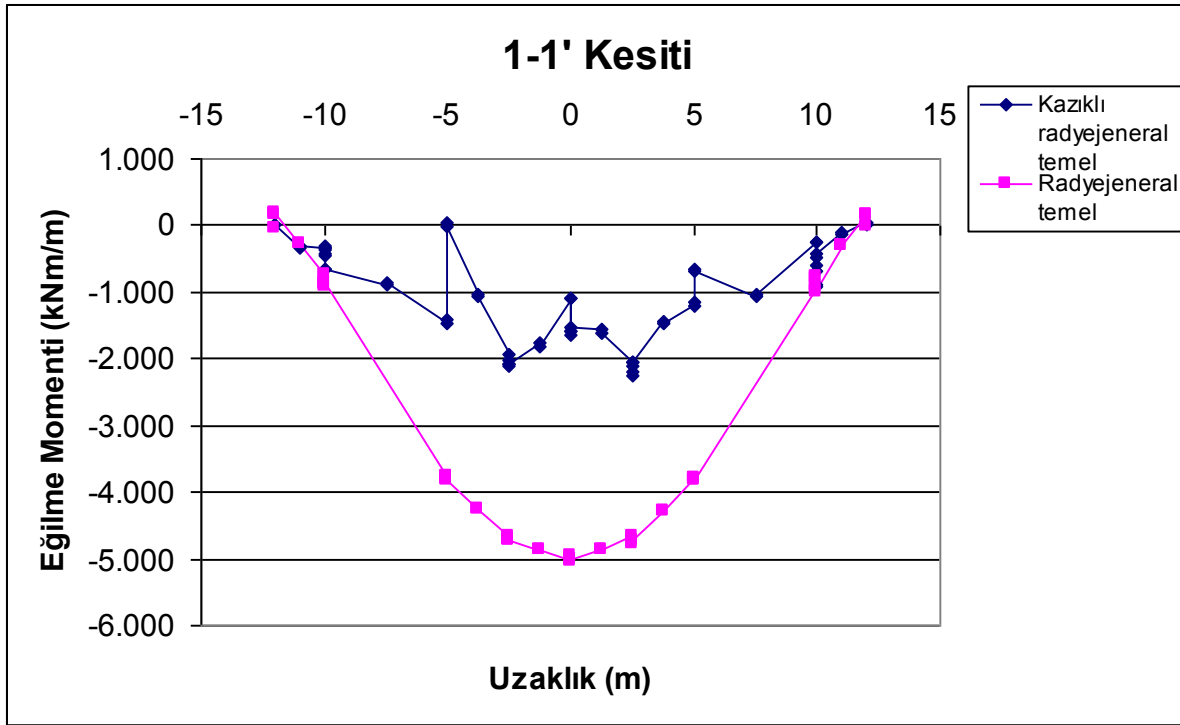
altında gözlenen yer değıştirme yaklaşık 2,1 cm değerlerinde iken, kazıklı radyejeneral temel sisteminde bu değerler yaklaşık 1,7 cm mertebelerine inerek yaklaşık %20 oranında azalmıştır. Yatay yer değıştirmelerin 2-2' kesiti boyunca radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel için değışimi Şekil 6.15'de verilmektedir.



Şekil 6.15 : Yatay yer değıştirmelerin 2-2' kesiti boyunca radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel için değışimi

Kazıklı radyejeneral temelin A, B, C, D ve E noktalarında meydana gelen düşey yer değıştirmelerin yükleme aşamaları boyunca değışimi Şekil A.3'de, yatay yer değıştirmelerin yükleme aşamaları boyunca değışimi Şekil A.4'de verilmektedir.

Radyejeneral temelde ve kazıklı radyejeneral temelde yatay ve düşey yükleme sonucu plakta oluşan eğilme momentleri incelendiğinde, radyejeneral temel sisteminde oluşan eğilme momentlerinin yükün fazla olduğu kule bölgesinde maksimum değeri aldığı, kenarlara doğru azalarak en sonunda negatif değere ulaştığı görülmektedir. Kazıklı radyejeneral temel sistemi için de aynı durum geçerli olmakla beraber, plağın orta bölgesinde oluşan eğilme momentleri büyük oranda azalmıştır. Bunun yanında, kazıkların bulundukları noktalarda momentlerde kazık başlarının mesnet görevi görmesinden dolayı ani azalmalar görülmektedir. 1-1 kesitinde plakta oluşan eğilme momentlerinin kazıklı radyejeneral sistem ve radyejeneral sistem için değışimi Şekil 6.16'de verilmektedir.

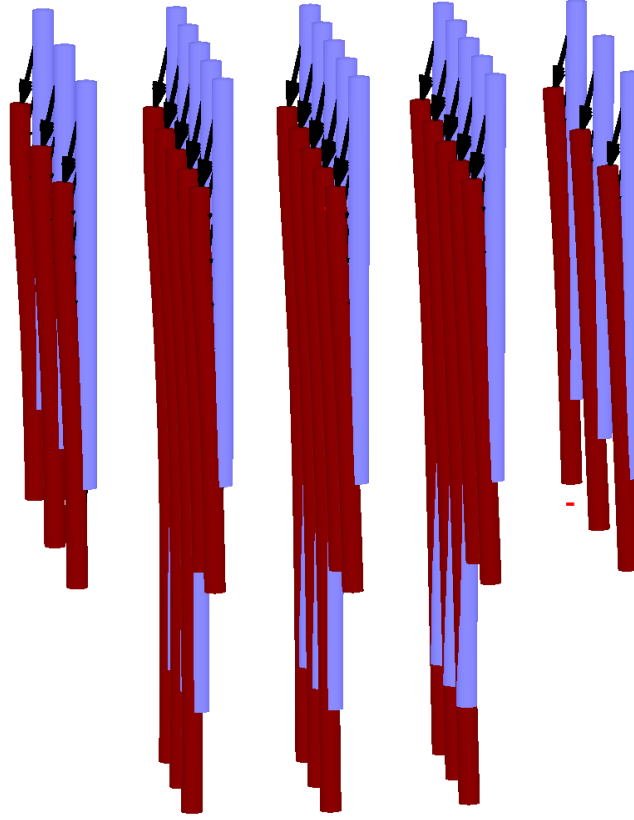


Şekil 6.16 : 1-1 kesitinde plakta oluşan eğilme momentlerinin kazıklı radyejeneral sistem ve radyejeneral sistem için değişimi

Çizelge 6.5 : Kazıklı radyejeneral ve radyejeneral temelde meydana gelen oturma, yanal ötelenme ve eğilme momenti değerleri

	Kazıklı Radyejeneral Temel		Radyejeneral Temel	
	En Büyük Değer	En Küçük Değer	En Büyük Değer	En Küçük Değer
Düşey yer değiştirme, u_y (cm)	8,10	6,05	14,90	8,90
Yatay yer değiştirme, u_x (cm)	1,72	1,67	2,18	2,14
Temel plağında oluşan eğilme momenti, M_{11} (kNm/m)	2.160	-170	5.400	-147

Kazıklı radyejeneral temelde kazıkların yerdeğiştirmesi ve kazıklar tarafından taşınan yüklerin değişimi Şekil 6.17'de gösterilmektedir. Buna göre kazıklarda meydana gelen oturma değerleri 6,5 ile 8,1 cm arasında değişmekte olup maksimum ve minimum oturma meydana geldiği noktalar, plakta maksimum ve minimum oturmaların olduğu noktalarla aynıdır. Bu durum, kazıklı radyejeneral temelde kazıkların ve radyenin eşit miktarda oturduğu kabulüyle uyumludur.



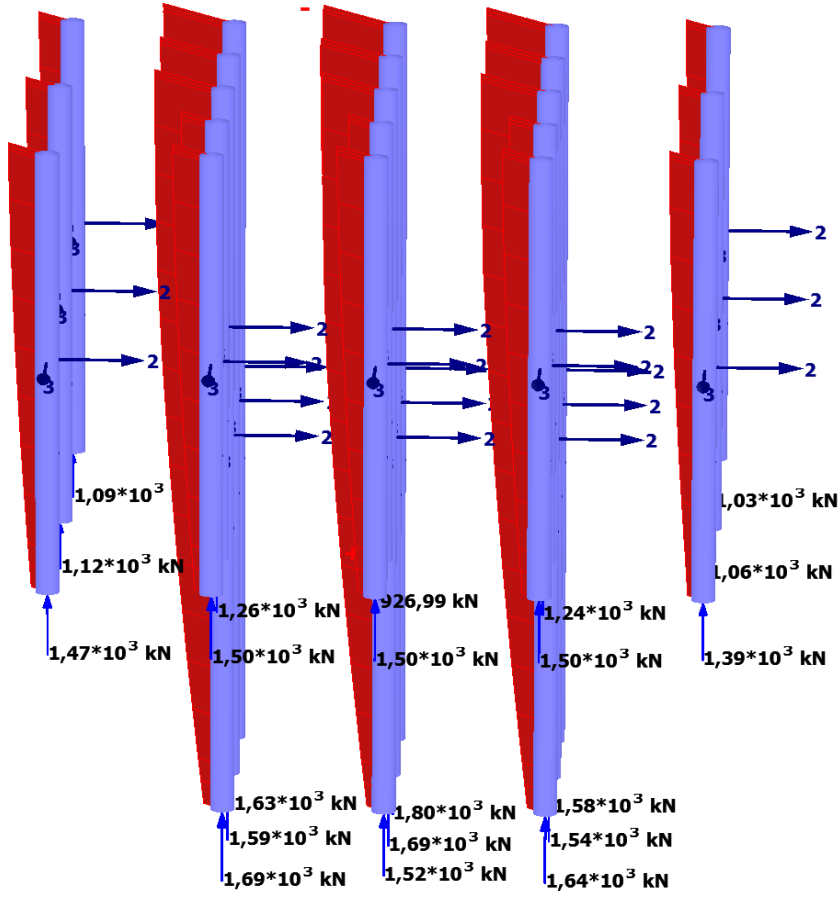
Şekil 6.17 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazıkların toplam yerdeğiştirme $|u|$ değerleri

Kazıklı radyejeneral temel sisteminde her bir kazığa etkiyen düşey yük ve bu yüklerin derinlikle değişimi Şekil 6.18’de gösterilmektedir. Her bir kazığa etkiyen ortalama düşey yük hesaplandığında kazıklara etkiyen toplam düşey yükün 71.200 kN olduğu belirlenmiştir. Buradan kazıklı radyejeneral temel katsayısı $\alpha=62$ olarak hesaplanmıştır.

6.3.4.3 Sistemin kazıklı temel olarak modellenmesi

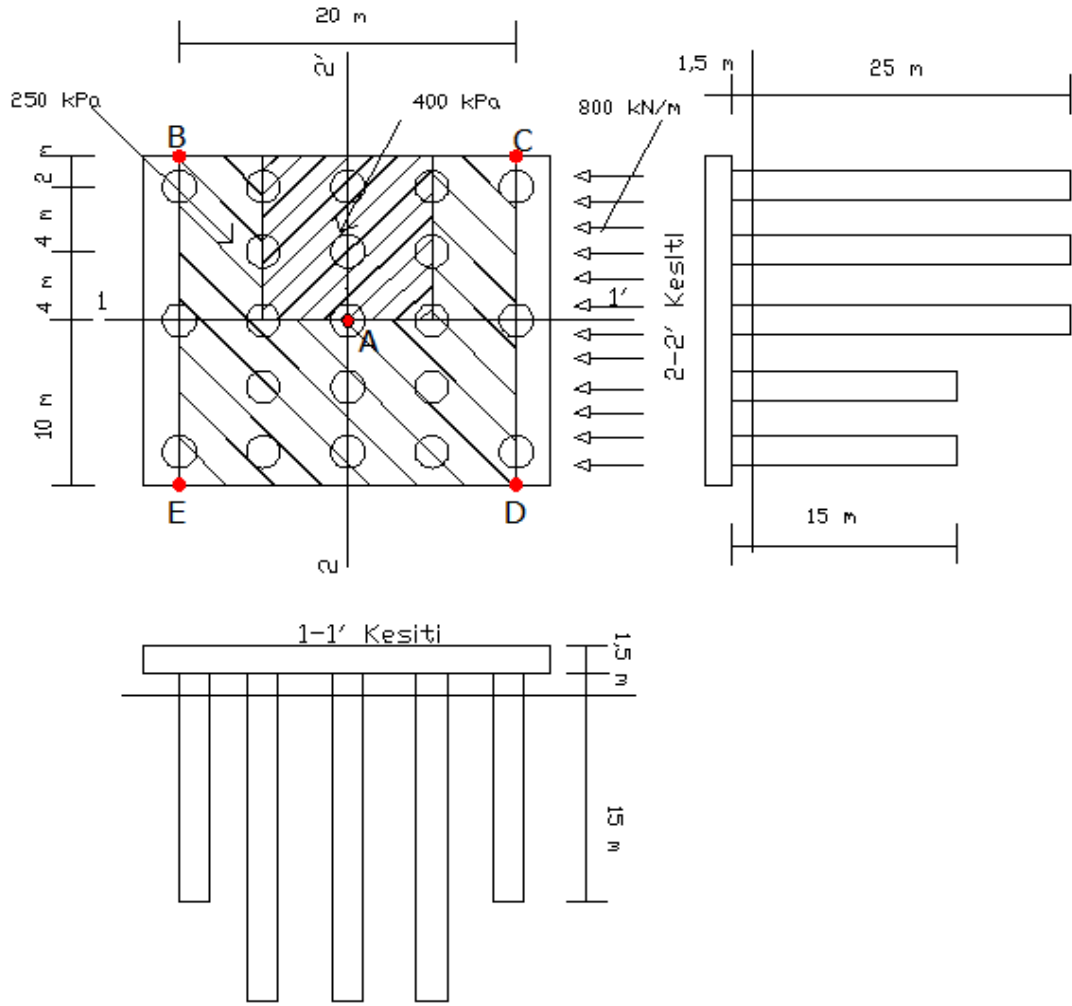
Temel sisteminin etkiyen düşey ve yatay yükler altında radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel olmak üzere iki farklı sistemle modellenmesinin sonucunda radyejeneral plakta meydana gelen düşey ve yatay deplasmanlar ve eğilme momentlerinin değişimi Bölüm 6.3.4.2’de irdelenmiştir. Bunun sonucunda radyejeneral temel altına yerleştirilen kazıkların sistemde oluşan yatay ve düşey deplasman değerleri ile eğilme momentlerini azalttığı görülmüştür. Son olarak sistemin kazıklı temel olarak modellenmesi, yani radyejeneral plak ile zemin arasında temas oluşmaması durumunda sistemde düşey ve yatay yükler altında

oluşan yatay ve düşey yerdeğiştirmeler ile radyejeneral plakta ve kazıklarda oluşan momentler araştırılmıştır.



Şekil 6.18 : Kazıklı radyejeneral temel sisteminde kazıklara etkiyen toplam düşey yükün değişimi

Bölüm 6.3.4.2’de detaylı olarak anlatılan kazıklı radyejeneral temel sisteminde kullanılan kazık karelijına ve uzunluklarına sadık kalınmış, yalnızca radyejeneral plak ve zemin arasındaki temas kesilerek plağın zemine yük aktarmadığı durum modellenmeye çalışılmıştır. Bunun için -0,25 m’de bir çalışma düzlemi oluşturulmuştur. Hesap aşamasında kazıklar aktive edildikten sonra 0,00 m kotundaki çalışma düzlemi ile -0,25 m’deki çalışma düzlemi arasında kalan zemin deaktive edilmiş ve plak yerleştirilmiştir. Bu sayede oluşturulan modelde kazık başları zemin yüzeyinden 0,25 m yukarıda yer almakta ve radyejeneral temel zemine plak altında oluşan taban basınçları vasıtasıyla yük aktaramamaktadır. Kazıklı temelin plan ve kesitleri Şekil 6.19’te gösterilmektedir.

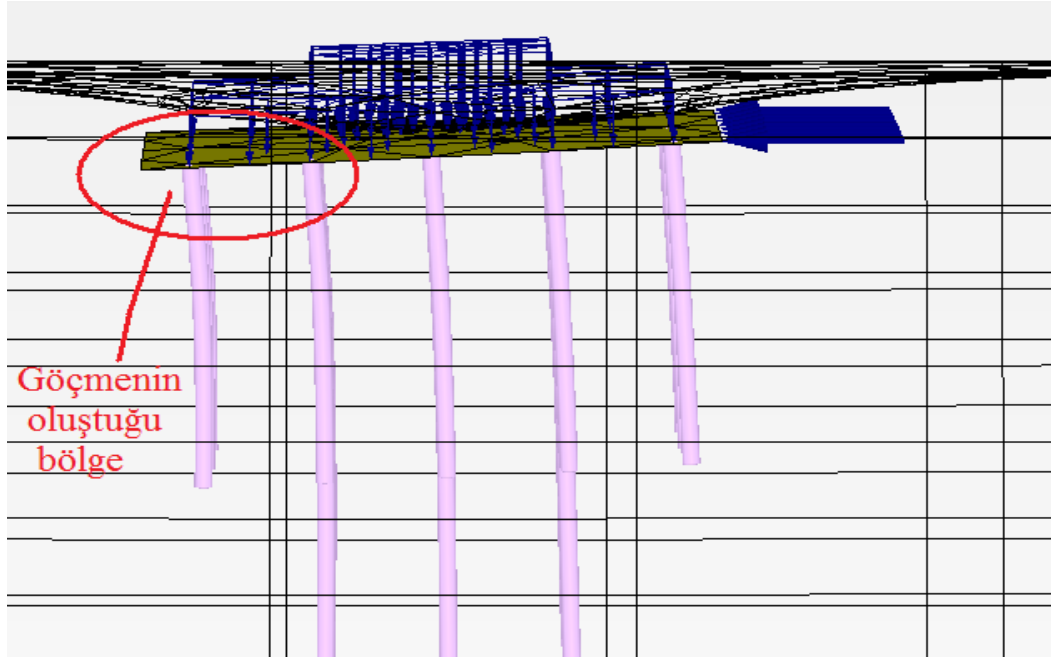


Şekil 6.19 : Kazıklı temel plan ve kesitleri

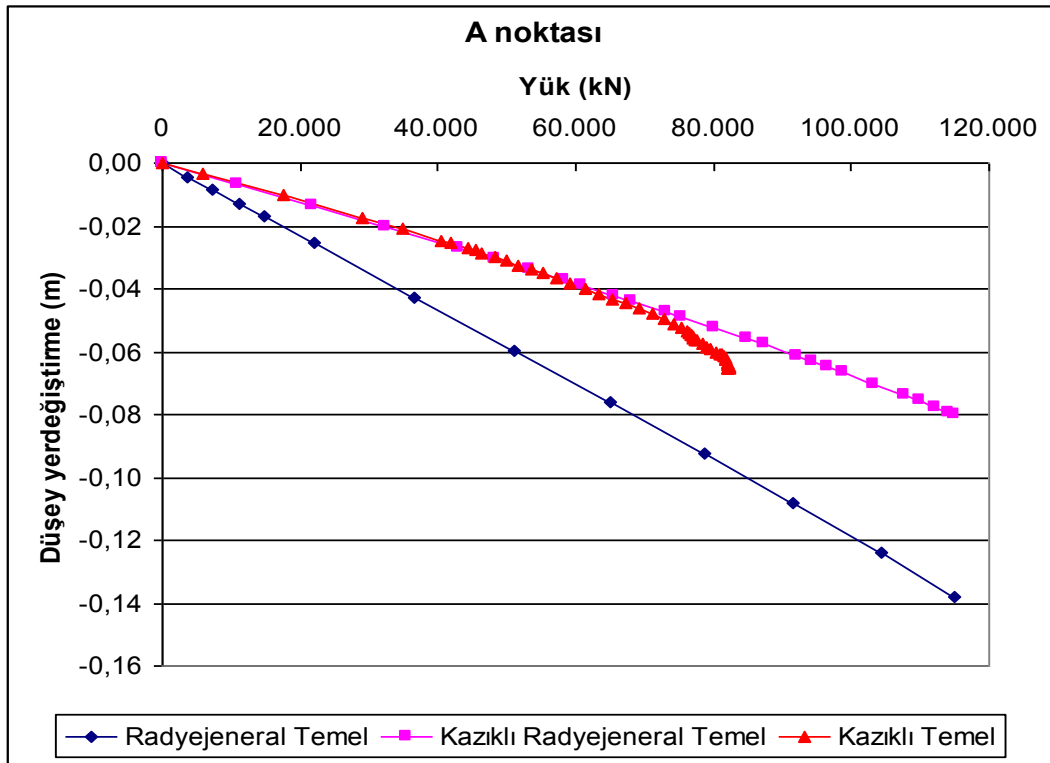
Oluşturulan kazıklı temel sistemi önceki bölümlerde incelenen radyejeneral temel ve kazıklı radyejeneral temel sistemine etkiyen yüklere eşit miktarda düşey ve yatay yükler altında, hesap aşamasında toplam yükün %71'inin uygulandığı noktada göçmüştür. Sistemin göçme anındaki deformasyonu ve göçmenin olduğu bölge Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Buna göre sistem planda belirtilen (Şekil 6.19) E noktası etrafında göçmeye uğramıştır.

Kazıklı temelde göçmenin meydana geldiği aşamada, diğer bir deyişle yükün %71'inin uygulandığı anda radyejeneral temelde, kazıklı radyejeneral temelde ve kazıklı temelde A, B ve E noktasındaki düşey yerdeğiştirmeler sırasıyla Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'de verilmektedir. Buradan görüldüğü üzere başlangıçta kazıklı radyejeneral temel sistemi ve kazıklı temel sistemi neredeyse aynı oturma davranışı gösterirken, kazıklı temel bir noktadan sonra nonlineer davranış sergilemeye başlamakta ve yükün tamamı uygulanmadan göçmeye uğramaktadır.

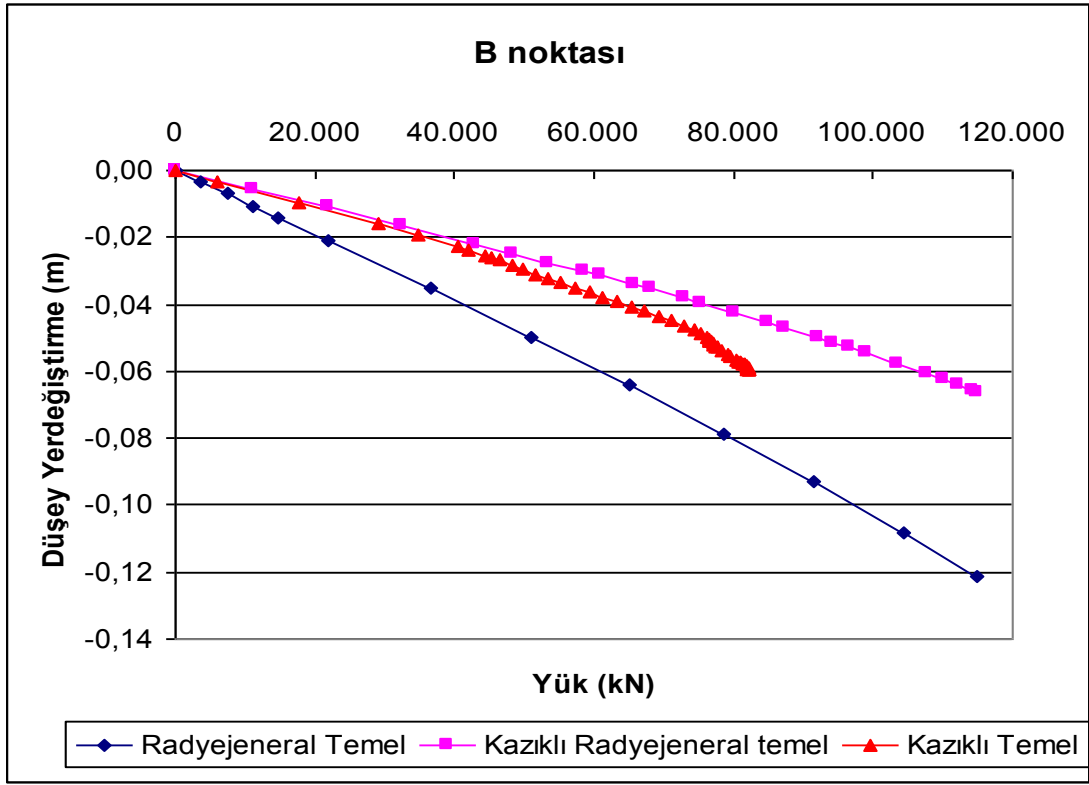
Özellikle göçmenin meydana geldiği E noktasında oturmalar hem kazıklı radyejeneral temelde hem de radyejeneral temelde aynı yük seviyesinde meydana gelen oturmalarından fazladır.



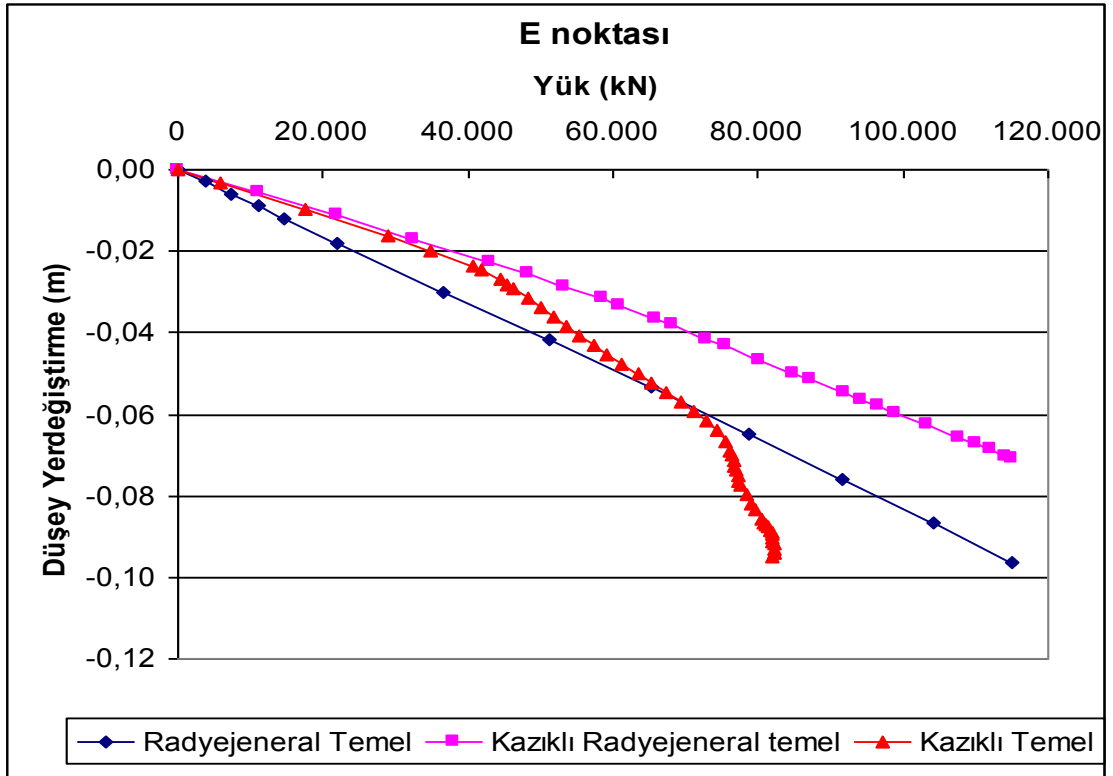
Şekil 6.20 : Kazıklı temel sisteminin göçme durumunda deforme olmuş hali



Şekil 6.21 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde A noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi

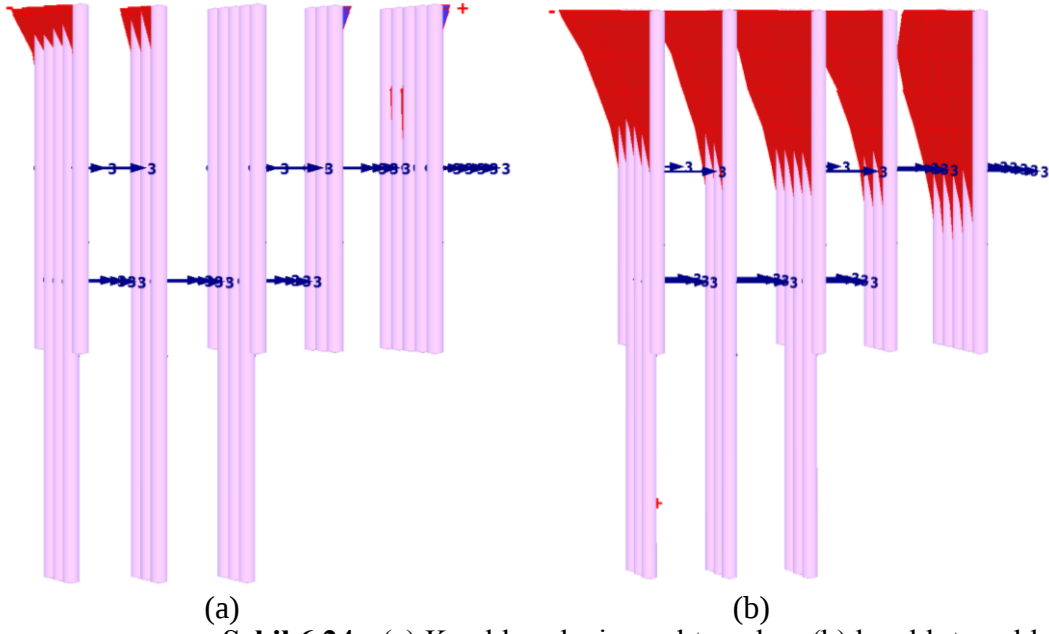


Şekil 6.22 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde B noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi



Şekil 6.23 : Radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinde E noktasındaki yük oturma eğrisinin değişimi

Kazıklı radyejeneral temel ve kazıklı temelde kazıklarda oluşan momentler Şekil 6.24'te gösterilmektedir. Buna göre, kazıklı radyejeneral temelde kazıklarda oluşan maksimum moment 1500 kNm mertebelerinde iken, kazıklı temel sisteminde kazıklarda oluşan moment 3700 kNm mertebelerinde olup, kazıklı radyejeneral temeldeki momentlerin iki katı mertebesindedir. Kazıklı temel sisteminin yükün tamamı uygulanmadan göçmesinin sebeplerinden birinin kazıklarda oluşan aşırı moment olduğu düşünülmektedir.



(a) (b)
Şekil 6.24 : (a) Kazıklı radyejeneral temel ve (b) kazıklı temelde kazıklarda oluşan eğilme momenti değerleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Yapı temellerinin tasarımında, temel sisteminin üstyapıdan gelen yükleri göçmeden taşıma şartının yanısıra, meydana gelecek oturmaların belirli bir sınırı aşmaması şartı aranır. Özellikle çok katlı yapılarda, radyejeneral temel sisteminin taşıma gücü kriterini sağladığı, ancak oturmaların müsaade edilebilir değerleri aşmasının beklendiği durumlarda temel sistemini kazıklı temel olarak yeniden tasarlamak altyapı maliyetini önemli ölçüde artıracaktır. Günümüz mühendislik çözümlerinde emniyet şartının yanında, ekonomi de büyük rol oynamaktadır. Bu çerçevede, kazıklı radyejeneral temel sistemleri adında yeni bir konsept geliştirilmiştir.

Geleneksel yöntemlerde, üstyapıdan gelen yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığı kabulü yapılmakta, bu durum temel altına yerleştirilecek kazık sayısını önemli miktarda artırmaktadır. Ancak gerçekte, üstyapıdan gelen yükün bir kısmı, radye plak altında oluşan taban basınçları tarafından taşınmaktadır. Bu durumun hesaplarda gözönüne alınması halinde kazık adedinde büyük ölçüde tasarruf etmek mümkündür. Ancak kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin tasarımında kazık grubu, radye ve zemin arasındaki etkileşimin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Temel sistemini oluşturan bu üç ögenin karşılıklı etkileşimi çoğu basitleştirilmiş yöntemde ihmal edilmekte, bunun sonucu olarak elde edilen değerler gerçekten uzak olmakta, meydana gelmesi beklenen toplam ve farklı oturma değerleri ile radyejeneral temel tarafından taşınacak yük miktarı gerçekten daha az hesaplanmaktadır.

Kazıklı radyejeneral temel sistemlerinin düşey yükler altında davranışı ile ilgili literatürde pek çok çalışma mevcut olmasına rağmen, söz konusu temel sistemlerinin yatay yükler altında davranışı ile ilgili açıklığa kavuşturulamamış bir çok nokta bulunmaktadır. Ancak düşey yükler altında olduğu gibi, yatay yükler altında da radye plak altına yerleştirilen kazıkların yapının yanal ötelenmesini önemli ölçüde azaltması beklenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yüklerin birlikte etkimesi durumunda sergilediği davranışı radyejeneral temel ve kazıklı temel sistemlerinin sergilediği davranışla karşılaştırmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda kil zemin üzerinde inşa edilecek çok katlı bir yapının temel sisteminin radyejeneral temel, kazıklı radyejeneral temel ve radyejeneral temelin yük paylaşımına katkısının ihmal edildiği kazıklı temel olmak üzere üç farklı temel sistemi olarak tasarlanması durumunda uygulanan düşey ve yatay yükler altında her bir sistemde meydana gelen oturmalar, yanal ötelenmeler, radye plakta oluşan momentler incelenmiştir. Yapının bir bölümüne, kalan alanda etkiyen yükün yaklaşık 1,5 katı mertebesinde bir yük etkimekte olup, bu bölge pratikte yüksek bir kuleyi temsil edebilir. Bu şekilde radye plağın altında farklı oturumları oluşacak Söz konusu temel sistemlerinin davranışının incelenmesi sırasında kazık- zemin ve radye arasındaki ilişkiyi gerçeğe en yakın şekilde modelleyebilmek için PLAXIS 3D FOUNDATION sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Yapının temel sisteminin kazıklı radyejeneral temel sistemi olarak projelendirilmesi durumunda, maksimum oturma değerleri yaklaşık %40, farklı oturumlar ise %35 oranında azalma göstermiştir.
2. Yanal ötelenmeler ise radye plak üzerinde hemen her noktada aynı mertebelerde oluşmuş, radyejeneral temel altına kazıkların yerleştirilmesi durumunda yanal ötelenmeler %25 mertebesinde azalmıştır.
3. Temel sisteminin radyejeneral olarak tasarlanması durumunda, maksimum moment radye plağın orta bölgesinde, 400 kPa büyüklüğünde yayılı yükün etkidiği bölgede oluşmuştur. Radyejeneral plakta oluşan eğilme momenti dağılımı, kiriş açıklığında oluşna eğilme momenti sağılımı ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Kazıklı radyejeneral temel sisteminde ise açıklıkta oluşan eğilme momentleri %50 civarında azalmış, kazıklar ise mesnet gibi davrandıkları için bu noktalarda ani azalmalar görülmüştür.
4. Kazıklara gelen yükler incelendiğinde maksimum yükün kule bölgesinin altında bulunan kazıklara etkidiği, diğer bölgelerde yer alan kazıklar söz konusu olduğunda köşelerde bulunan kazıkların orta bölgelerde yer alan

kazıklardan daha fazla yük aldığı görülmüştür. Yapılan hesaplarda kazıklara gelen yükün, toplam yükün %60'ı civarında olduğu belirlenmiştir.

5. Temel sisteminin kazıklı radyejeneral temel ile aynı kazık yerleşimi ve kazık uzunluğunda, ancak radyejeneral temelin yük paylaşımına katkısının olmadığı kazıklı temel olarak modellenmesi durumunda, sistem toplam yükün %71'inin uygulandığı anda göçmüştür.
6. Radye plağın orta nokta ve köşe noktalarında üç temel sistemi için yük deplasman eğrileri incelendiğinde kazıklı temelin göçtüğü anda etkiyen yük mertebesinde kazıklı radyejeneral temelde oluşan oturmaların hem radyejeneral temelden hem de kazıklı temelden daha az olduğu görülmektedir.
7. Kazıklara gelen momentler karşılaştırıldığında kazıklı temelde kazıklara etkiyen momentin kazıklı radyejeneral temel sistemindeki kazıklara etkiyen momentlerin yaklaşık iki katı mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Kazıklı temelin göçmesine kazıklarda oluşan momentin neden olabileceği düşünülmektedir.
8. Kazıklı temel sisteminin diğer iki temel sistemine etkiyen düşey ve yatay yükleri göçmeden taşıyabilmesi ve oturmaların müsaade edilebilir değerlerin altında kalması için kazık adedinin ve boylarının artırılması gerekmektedir.

7.2 Öneriler

Kazıklı radyejeneral temellerin yatay yük altındaki davranışı, çoğu açıdan bilinmezliklerle doludur. Bu tez çalışması kapsamında incelenen yatay yükler, statik yükler olup, gerçekte kazıklı radyejeneral temel sistemlerine etkime potansiyeli bulunan yüklerin birçoğu (deprem, rüzgar, vb) dinamik yüklerdir. Bu açıdan kazıklı radyejeneral temellerin dinamik yükler altındaki davranışı incelenmeli ve gerek laboratuvar deneyleri ile, gerek sayısal yöntemlerle, gerek arazide yapılan ölçümler ile parametrik çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- AASHTO**, 1996: Standard Specifications for Highway Bridges, 16th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, pp. 677.
- ACI**, 1996: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) American Beton Enstitüsü.
- ACI**, 2002: Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats (ACI 336.2R-88) American Beton Enstitüsü.
- ASTM D 1143-81**, 1989: Standard Method of Testing Piles Under Static Axial Compressive Load, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.08, Philadelphia, pp.179-189
- Baguelin, F., Jexequal, J. F., ve Shields, D.H.**, 1978: The Pressuremeter and Foundation Engineering, Trans. Tech. Publication,
- Beatty, C.I.**, 1970: Lateral Tests on Pile Groups, Foundation Facts, VI(I), 18-21.
- Bowles, J. E.**, 1997: Foundation Analysis and Design, McGrawHill, International Edition.
- Brinkgreve, R.B.J., Broere, W.**, 2006. PLAXIS 3D Foundation v1.6 Foundation Manual.
- Broms, B.**, 1964: The lateral resistance of piles in cohesionless soils, *Journal of the Soil Mechanics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 90, No. SM3, pp.123-56.
- Broms, B.**, 1964: The lateral resistance of piles in cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 90, No. SM2, pp.27-63.
- Brown, P.T., Wiesner, T.J.**, 1975: The behaviour of uniformly loaded piled strip footings, *Soils and Foundations*, Vol.15, pp: 13-21.
- Burland, J.B.**, 1995. Piles as Settlement Reducers. Keynote Address, *18th Italian Congress on Soil Mechanics*, Pavia, Italy.
- Butterfield, R., Banerjee, P.K.**, 1971. The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups. *Geotechnique*, Vol. 21(1), pp: 43-60.
- Cai, G., Liu, S., Tong, L., and Du, G.**, 2008: Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles, *Engineering Geology*, Vol. 104, no: 3-4, pp.211-222.
- Canadian Foundation Engineering Manual**, 1978 and 1985: Canadian Geotechnical Society, Bi Tech Publications

- Castelli, F., Maugeri, M.,** 2002: Simplified Nonlinear Analysis for Settlement Prediction of Pile Groups, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No:1 pp.76-84.
- Chen, W. C.,** 2006: Prediction Of Ultimate Load Bearing Capacity Of Driven Piles, M.Sc. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia
- Chow, H.S.W,** 2007: Analysis of Piled-Raft Foundations with Piles of Different Lengths and Diameters, Phd Thesis, University of Sydney, Australia.
- Coduto, D.P.,** 2001: Foundation Design: Principles and Practices, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River NJ.
- Coyle, H.M, Castello, R.R.,** 1981: New Design Correlations For Pile Design İn Sand, *Journal Of Geotechnical Engineering Division*, ASCE.
- Çinicioğlu, S.F.,** 1995: Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı, İmo İstanbul Seminer Notları.
- Das, M.B.,** 1999: Principles Of Foundation Engineering, Pws-Kent Pub., California.
- Davisson, M. T., Prakash, S.,** 1963. A review of soil pile behaviour, *Highway Research Record*, No:39, pp.25-48.
- De Beer, E., Hansen J.B.,** 1970: A Revised And Extended Formula For Bearing Capacity, *Danimarka Geoteknik Enstitüsü 28 No’lu Bülten*, Sf 22.
- Desai, C.S.** 1974: Numerical Design Analysis for Piles in Sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol:100(GT6), pp:613-635.
- El-Mossallamy, Y., Franke, E.,** 1997: Piled Rafts: Numerical modelling to simulate the behaviour of piled raft foundations, The Authors, Darmstadt.
- Engin, H.K., Brinkgreve R.B.J.,** 2009. Investigation of Pile Behaviour Using Embedded Piles, *Proceedings of 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering* , Alexandria, Egypt.
- Engin, H.K., Septanika, E.G., ve Brinkgreve R.B.J.,** 2007. Improved embedded beam elements for the modelling of piles, *Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG X*, Taylor&Francis, pp. 475 - 480.
- Engin, H.K., Septanika, E.G., ve Brinkgreve R.B.J.,** 2008. Estimation of Pile Group Behavior using Embedded Piles, In Singh (ed), *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics; 12th International IACMAG Conference*, Goa, India, pp.3231-3238
- Engin, H.K.,** 2007. Çekme Kazıklarının “Gömülü Kazık” Elemanlarıyla Modellenmesi, Ed. M.Y.Özkan, 2. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler El Kitabı, Adana, Artı Ofset.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M.F., and Elson, K.,** 2009: Piling Engineering, 3rd Edition, Taylor&Francis, Oxford.
- Franke, E.,** 1991: Measurements beneath piled rafts, Key note lecture to the ENPC Conference on Deep Foundations, Paris, pp.1-28.

- Franke, E., Lutz, B. ve El-Mossallamy, Y.,** 1994. Measurements and Numerical Modelling of High-Rise Building Foundations on Frankfurt Clay. *Geotechnical. Special Publications* 40, ASCE, Vol:2, pp: 1325-1336.
- Fraser, R.A., Wardle, L.J.** 1976. Numerical Analysis of Rectangular Rafts on Layered Foundations". *Geotechnique*, Vol.26,No.4, p.613.
- Gandhi, S.R., Maharaj, D.K,** 1995: Behaviour of piled raft under uniform loading, *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Bangalore*, Vol:1, pp:19-23.
- Garg, K. G.,** 1979: Bored pile groups under vertical load in sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No:GT8, pp:939-955.
- Geopublications of Hong Kong,** 2006: Foundation Design and Construction, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government Of The Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong.
- Gunaratne, M.,** 2007: The Foundation Engineering Handbook, Taylor&Francis, USA.
- Hain, S.J., Lee, I.K.,** 1978: The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems. *Geotechnique*, Vol: 28 (1), pp: 65-83.
- Hanisch, J., Katzenbach, R., ve König, G.,** 2002: Kombinierte Pfahl-Plattengründungen, Ernst&Sohn, Berlin.
- Hansen, J. B.,** 1961: The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. *Danish Geotechnical Institute, Bulletin* No. 12, Copenhagen 1961, pp. 5-9.
- Hewitt, P., Gue, S.S.,** 1994: Piled Raft Foundation in a Weathered Sedimentary Formation, Kuala Lumpur, Malaysia. *Proceedings Geotropika '94*, Malacca, Malaysia, pp:1-11.
- Hongladaromp, T., Chen, N.J. ve Lee, S.L.,** 1973. Load Distributions in Rectangular Footings on Piles. *Geotechnical Engineering*, Vol. 4(2), pp.77-90.
- Hooper, J.A.,** 1973: Observations on the Behaviour of a Piled-Raft Foundation on London Clay. *Proceedings of Institute of Civil Engineers*, Vol:55(2), pp: 855-877.
- Horikoshi, K.,** 1995. Optimum design of piled raft foundations, PhD Thesis, University of Western Australia, Perth.
- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., ve Watanabe, T.,** 2003b: Performance of piled raft foundations subjected to dynamic loading, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 3, No:2 pp.51-62.
- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., Watanabe, T., ve Fukuyama, H.,** 2003a: Performance of piled raft foundations subjected to static horizontal loads, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 3, No:2 pp.37-50.

- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Watanabe, T., ve Fukuyama, H.,** 2002a: Performance of piled raft foundations subjected to seismic loads, Proceedings International Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in View of International Harmonization and Performance Based Design, IWS Kamakura, pp.1-8.
- Horikoshi, K., Watanabe, T., Fukuyama, H., ve Matsumoto, T.,** 2002b: Behaviour of piled raft foundations subjected to horizontal loads, Proceedings of 1st International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, St. John's, pp.715-721.
- Horvath, J.S.,** 1993: Subgrade Modeling (Jr Soil-Structure Interaction Analysis Of Horizontal Foundation Elements, Manhattan College Research Report No. Celge-93-I, Manhattan College, New York.
- Horvath, J.S.,** 2002: Soil-Structure Interaction Research Project - Basic SSI Concepts And Applications Overview, Manhattan College Research Report No. Cgt-2002-2, Manhattan College, New York.
- Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C. ve Reul, O.,** 1998: Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft. *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4, pp:279-296.
- Katzenbach, R., Arslan, U., ve Moormann, C.,** 2000: Piled raft foundation projects in Germany, in *Design Applications of Raft Foundations* p. 323-393, Ed. Hemsley, J.A., Thomas Telford Publications, London.
- Katzenbach, R., Bachmann, G., ve Ramm, H.,** 2005a: Vom Einzelpfahl über die Pfahlgruppe zur Kombinierten Pfahl-Plattengründung, Festschrift zur 60. Geburtstag von Herrn Prof. H.G. Kempfert, Kassel.
- Katzenbach, R., Hoffmann, H., Moormann, C., ve Vogler, M.,** 2001a: Neue geotechnische Konzepte für den technisch und wirtschaftlich optimierten Hochhausbau. *Bauingenieur*, Band 76, pp.314-325.
- Katzenbach, R., Kinzel, J., El-Mossallamy, Y., ve von der Hude, N.,** 2001b: Besondere Aspekte bei der Gründung des Hochhauses Galileo in Frankfurt am Main, Vorträge zum 8. Darmstadter Geotechnik-Kolloquium, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 55.
- Katzenbach, R., Schmitt, A., Turek, J.,** 2005b: Assessing Settlement of High-Rise Structures by 3D Simulations, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol: 20 Issue 3, pp: 221-229.
- Kim, J.B., Brungraber, R.J.,** 1976: Full Scale Lateral Load Tests of Pile Groups, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.102, No:GT1, pp. 87-105.
- Kumbasar, V., Kip, F.,** 1999: Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi.
- Kuwabara, F.,** 1989: An Elastic Analysis for Piled Raft Foundations in a Homogeneous Soil. *Soils and Foundations*, Vol: 28(1), pp: 82-92.
- Lee, I.K.,** 1993: Analysis and Performance of Raft and Raft-Pile Systems. Keynote Lect., *3rd International Conference on Case Histories. in Geotechnical Engineering*, St. Louis.

- Liao, S.S.C.**, 1991: Estimating The Coefficient Of Subgrade Reaction For Tunnel Design, Internal Research Report, Parsons Brinkerhoff, Inc.
- Lopes, F. R.**, 2000: Design of Raft Foundations on Winkler Springs, in *Design Applications of Raft Foundations* p. 127-155, Ed. Hemsley, J.A., Thomas Telford Publications, London.
- Maharaj, D.K., Anshuman, D.**, 2004., The Effect of Raft Size and Pile Length on Load-Settlement Behaviour of Axisymmetric Piled Raft Foundation, EJGE Electronical Journal of Geotechnical Engineering Paper.
- Mandolini, A., Russo, G., ve Viggiani, C.**, 2005: Pile Foundations. Experimental Investigations, Analysis and design, Proceedings of 16th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.1, pp:177-213.
- Matlock, H., Reese, L. C.**, 1960: Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 86, No.SM 5.
- Matsumoto, T., Fukumura, K., Horikoshi, K., ve Oki, A.**, 2004b: Shaking Table Tests on Model Piled Rafts in Sand Considering Influence of Superstructures International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 4, No:3 pp.21-38.
- Matsumoto, T., Fukumura, K., Pastsakorn, K., Horikoshi, K., ve Oki, A.**, 2004a: Experimental and Analytical Study on Behaviour of Model Piled Rafts in Sand Subjected to Horizontal and Moment Loading, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 4, No:3 pp.1-19.
- Mayne, P.W., Poulos, H.G.** 1999. Approximate Displacement Influence Factors for Elastic Shallow Foundations. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No. 6, pp.453-460.
- Meyerhof, G.G.**, 1976: Bearing Capacity And Settlement Of Pile Foundations. Proceedings Of The American Society Of Civil Engineers, Gt3, Pp. 197–228.
- Meymand, P.H.**, 1998: Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay, PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Mokwa, R.L., Duncan, J.M.**, 2001: Laterally Loaded Pile Group Effects and p-y Multipliers, Geotechnical Special Publications No.113 - Foundations and Ground Improvement, ASCE, pp. 728-742.
- NAVFAC**, 1986: Foundations and Earth Structures Design Manual, DM 7.02, Naval Facilities Engineering Command, Virginia
- Naylor, D.J., Hooper, J.A.**, 1974: An effective stress finite element analysis to predict the short and long term behaviour of a piled raft foundation on london clay, Proceedings of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 394-402.
- Netzel, D.**, 1996: Flachengründungen aus Sicht des Konstruktiven Ingenieurbaus, Bautechnik Vol. 73, pp.582-594

- Ottaviani, M.**, 1975: Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups, *Geotechnique*, Vol:25(2), pp: 159-174.
- Palmer, L. A., Thompson, J. B.**, 1948: The Earth Pressure and Deflection Along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrust, *Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 5.
- Pastsakorn, K., Hashizume, Y., ve Matsumoto, T.**, 2002: Lateral Load Tests on Model Pile Groups and Piled Raft Foundations in Sand, *Proceedings of 1st International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, St. John's, pp.709-714.
- Poulos, H. G. Davids, E. H.**, 1980: *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley New York.
- Poulos, H. G.**, 1971: Behaviour of laterally loaded piles II—Pile groups, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.97 SM5, pp. 733–751.
- Poulos, H. G.**, 1971: Behaviour of laterally loaded piles I—Single piles, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.97 SM5, pp. 711–731.
- Poulos, H. G.**, 2002: Prediction of Behaviour of Piled Building Foundations due to Tunneling Operations, *Proceedings of 3rd International Symposium on Geotechnical Aspects of Tunneling in Soft ground*, Toulouse, Preprint Volume 4.55-4.61.
- Poulos, H. G.**, 2003: Settlement of Bored Pile Groups, *Proceedings of BAP II*, Ghent, Balkema, Rotterdam, pp.103-117.
- Poulos, H. G.**, 2006: Pile Group Settlement Estimation – Research to Practice, *Foundation Analysis and Design: Innovative Methods*, ASCE American Society of Civil Engineering, pp.1-22.
- Poulos, H.G.**, 1989. "Pile Behaviour – Theory and Application". *Geotechnique*, Vol. 39 (3), pp:365-415.
- Poulos, H.G.**, 1991: Analysis of Piled Strip Foundations. *Comp. Methods & Advances in Geomechs.*, ed. Beer et al, Balkema, Rotterdam, No.1, pp:183-191.
- Poulos, H.G.**, 1993: An Approximate Numerical Analysis of Pile Raft Interaction. *International Journal of Numerical and Analytical Methods In Geomechanics.*, Vol 18, pp.73-92.
- Poulos, H.G.**, 1993: Piled rafts in swelling or consolidating soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol: 119(2), pp: 374-380.
- Poulos, H.G.**, 1994: An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction. *International. Journal of. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, No.18, pp: 73-92.
- Poulos, H.G.**, 2000: Practical Design of Piled Rafts in *Design Applications of Raft Foundations* p. 127-155, Ed. Hemsley, J.A., Thomas Telford Publications, London.

- Poulos, H.G.**, 2001a: Piled raft foundations: Design and Applications, *Geotechnique*, Vol. 50, No.2 pp: 95-113.
- Poulos, H.G.**, 2001b: Methods of Analysis of Piled raft foundations, A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Poulos, H.G.**, 2002: Simplified design procedure for piled raft foundations. *Deep Foundations 2002*, Ed. M.W. O'Neill & F.C. Townsend, ASCE Spec. Geotechnical. Publications. Vol:116, No:1 pp:441-458.
- Poulos, H.G., Carter, J.P ve Small, J.C.** 2001. Foundations and Retaining Structures – Research and Practice. State of the Art Lecture, *14th International Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul*.
- Poulos, H.G., Small, J.C., Ta, L.D., Sinha, J. ve Chen, L.**, 1997. Comparison of Some Methods for Analysis of Piled Rafts. *Proceedings of 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, No:2 pp:1119-1124.
- Prakash, S., Sharma, H.D.**, 1990: Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley And Sons.
- Rajapakse, R.**, 2008: Pile Design and Construction Rules of Thumb, Elsevier Inc., Oxford.
- Randolph, M.F.** 1983. Design of Piled Foundations. *Cambridge Univ. Eng. Dept.*, Res. Rep. Soils TR143.
- Randolph, M.F.**, 1994: Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts, *Proceedings of 13th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5: 61-62.
- Randolph, M.F.**, 2004: Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. State Of The Art Report, *13 International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, No:5 pp:61-82.
- Reese, L. C.**, 1977: Laterally Loaded Piles: Program documentation, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT4, pp. 287-305.
- Reese, L. C., Cox, W. R., ve Koop, F. B.**, 1974: Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, paper No. OTC 2080
- Reese, L. C., Matlock, H.**, 1956: Non-dimensional solutions for laterally-loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth. *Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, Texas, pp. 1–41.
- Reese, L.C., Cox., W.R.**, 1969: Soil behaviour from analysis of tests of uninstrumented piled under lateral loading, *Performance of Deep Foundations*, ASTM STP 444, pp: 160-176.
- Reese, L.C., Van Impe, W.F.**, 2001: Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading, A. A. Balkema, Rotterdam.

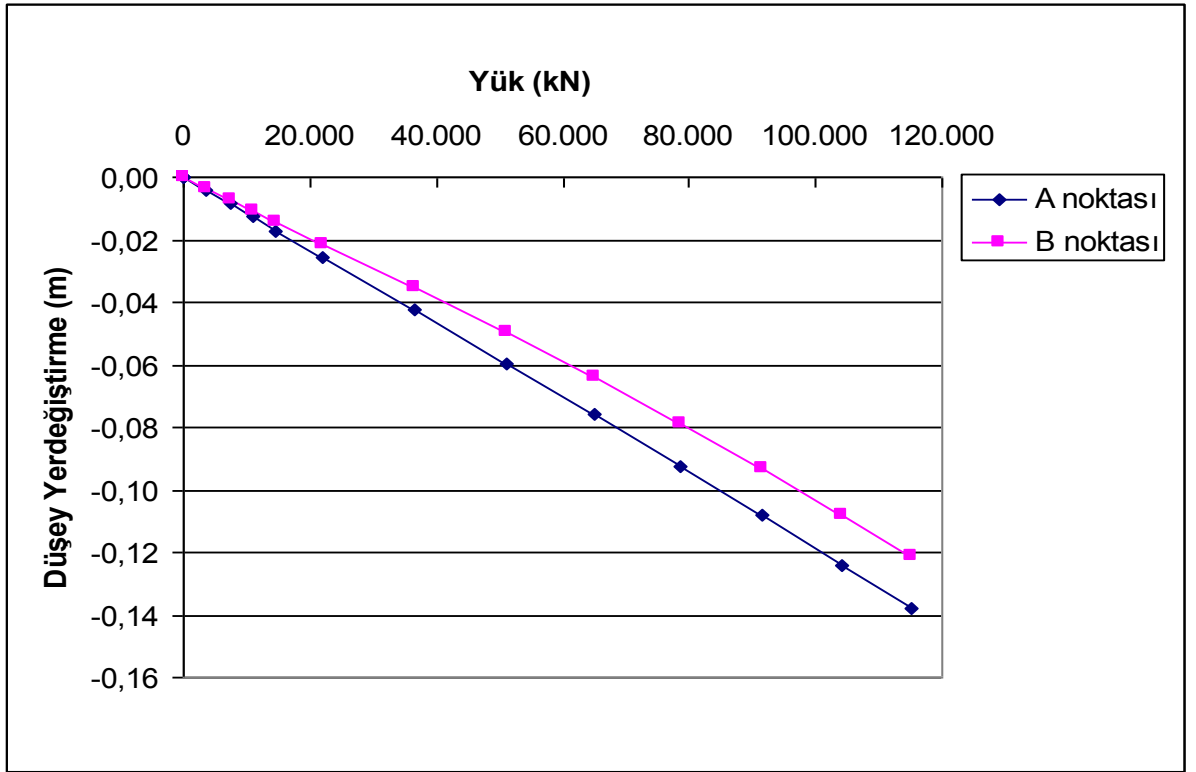
- Reul, O.**, 2000: In-situ Messungen und numerische Studien zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 53.
- Reul, O., Randolph, M. F.**, 2004: Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 1, pp:1–13.
- Reul, O., Randolph, M.F.**, 2003: Piled Rafts in Overconsolidated Clay: Comparison of In-Situ Measurements and Numeric Analyses, *Geotechnique*, Vol.53, No.3, pp: 301-315.
- Rollins, K.M., Sparks, A.E.**, 2002: Lateral Load Capacity of a Full-Scale Fixed-Head Pile Group, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 711-723.
- Russo, G.**, 1998: Numerical Analysis of Piled Rafts. *International Journal of Analytical & Numerical Methods in Geomechanics.*, Vol:22(6) pp:477-493.
- Russo, G., Viggiani, C.**, 1998. Factors Controlling Soil-Structure Interaction for Piled Rafts. *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt University. of Technology, No. 4, pp.297-322.
- Sales, M.M., Poulos, H.G. ve Small, J.C.**, 2000. A New Approach for Analysis of Fully Mobilized Piles in Piled Rafts. Submitted for Publication.
- Schmertmann, J., Nottingham, L.**, 1975: An Investigation of Pile Capacity Design Procedures, Final Report D 629 to Florida Department of Transportation from Department of Civil Engineering, University of Florida.
- Selvadurai, A.P.S.** 1979: Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction. *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 17, Elsevier, Amsterdam.
- Sert, S.**, 2003. Aluviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Sinha, J.**, 1997: *Piled Raft Foundations Subjected to Swelling and Shrinking Soils*. PhD Thesis, Univ. of Sydney, Australia.
- Skempton, A. W., Bjerrum, L.**, 1957: A contribution to the settlement analysis of foundations on clay, *Geotechnique*, Vol.7, p-168.
- Small, J.C., Booker, J.R.**, 1986. Finite layer analysis of layered elastic materials using a flexibility approach. Part 2-circular and rectangular loadings. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Vol.23 pp. 959-978.
- Small, J.C., Zhang, H.H.**, 2000. Piled Raft Foundations Subjected to General Loadings. *Developments in Theoretical Geomechanics*, Ed. D.W. Smith, & J.P. Carter, Balkema, Rotterdam, pp.431-444.
- Smoltyzck, U.**, 2006: Grundbau-Taschenbuch, Ernst Verlag.

- Sommer, H.**, 1991: Entwicklung der Hochhausgründungen in Frankfurt / Main. Festkolloquium anlässlich des 20-jährigen Bestehens des Grundbauinstitutes Prof. Dr. H. Sommer und Partner GmbH, pp:47-62.
- Şenol, A., Sağlamer, A.**, 1993: Kazıklı Temellerde Negatif Çevre Sürtünmesi Problemi, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergisi, Vol.13, No:1.
- Ta, L.D., Small, J.C.** 1996: Analysis of Piled Raft Systems in Layered Soils. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, Vol:2, pp:: 57-72.
- Ta, L.D., Small, J.C.**, 1996. Analysis of Piled Raft Systems in Layered Soils. *International. Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol: 2 pp. 57-72.
- Ta, L.D., Small, J.C.**, 1997. An Approximation for Analysis of Raft and Piled Raft Foundations. *Computers and Geotechnics*, Vol: 20, No:2 pp. 105-123.
- Terzaghi, K.**, 1955: Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, Vol. 5, No. 4, 1955, pp. 297–326.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.**, 1968: Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Edition, Wiley, New York.
- Thaher, M, Jessberger, H.L.**, 1991: The behaviour of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests, Proceedings of 10th European Conference on Centrifuge, Boulder, Colorado, USA, A.A. Balkema, Rotterdam, eds H.Y.Ko and F.G.McLean, pp. 225-234.
- Thaher, M.**, 1991: Tragverhalten von Pfahl-Plattengründungen im bindigen Baugrund: Berechnungsmodelle und Zentrifugen-Modellversuche. Ruhr Universität Bochum, Heft 15.
- Toğrol, E.**, 1970: Kazıklı Temeller,
- Toğrol, E., Tan, A.O.**, 2003: Kazıklı Temeller,
- Tomlinson, M.J.**, 2004: Pile Design And Construction Practice, Chapman And Hall, London, UK.
- Turek, J.**, 2006: Beitrag zur Klärung des Trag-und Verformungsverhaltens horizontal belasteter Kombiniertes Pfahl-Plattengründungen, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 72.
- Vesic, A. S.**, 1970: Load Transfer in Pile Soil Systems, Proceedings Conference on Design Installation of Pile Foundations, Lehigh University, Bethlehem, pp.47-73.
- Vesic, A. S.**, 1977: Design of Pile Foundations, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.
- Vijayvergiya, V. N., Focht, J. A. Jr.**, 1972: A new way to predict capacity of piles in clay, Proceedings, 4th Annual Offshore Technology Conference, Paper No:OTC Paper 1718, Houston, TX.

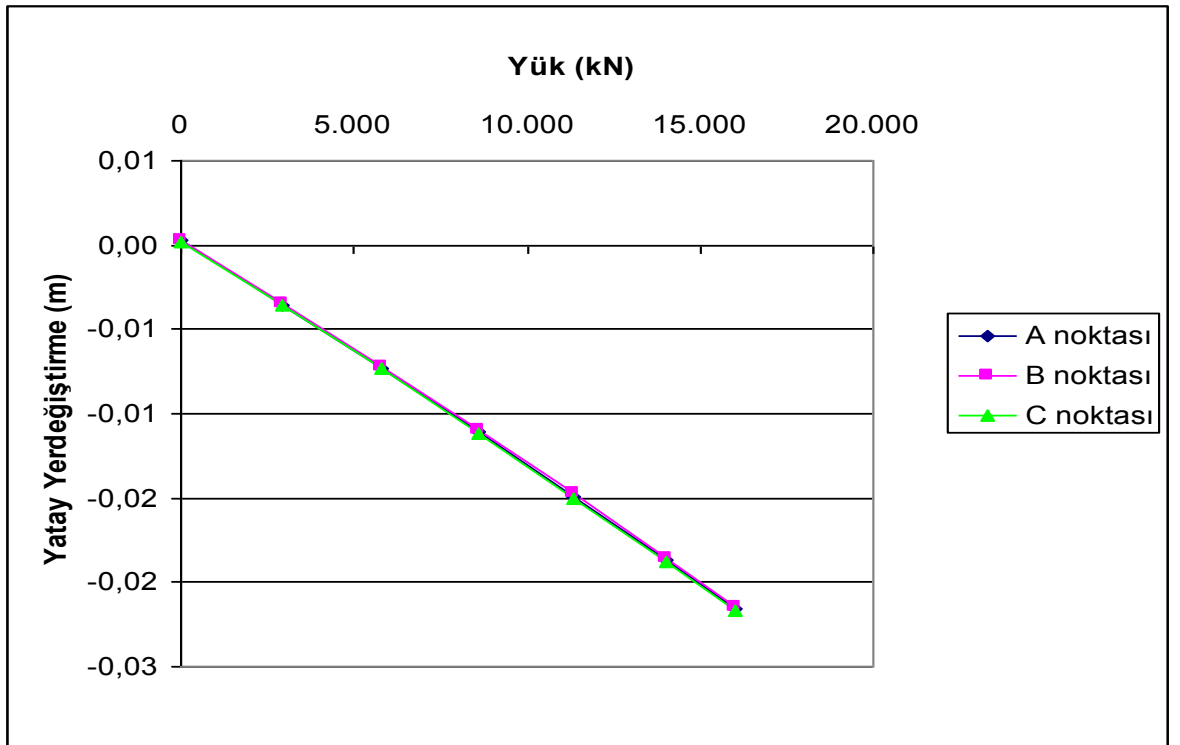
- Watanabe, T., Fukuyama, H., Horikoshi, K., ve Matsumoto, T.,** 2001: Centrifuge modelling of piled raft foundations subjected to horizontal loads, Proceedings of 5th International Conference on Deep Foundation Practice incorporating PILETALK, Singapore, pp.371-378.
- Winkler, E.,** 1867: Die Lehre von Elastizitat und Festigkeit. H. Dominicus. Prag.
- Zhang, H.H.,** 2000. Finite Layer Method for Analysis of Piled Raft Foundations, PhD Thesis, University of Sydney, Australia.
- Zhang, H.H., Small, J.C.,** 1999. Analysis of axially and laterally loaded pile groups embedded in layered soils. *Proceedings of the 8th Australia – New Zealand Conference on Geomechanics, 15-17 February, Hobart, Tasmania, Edited by N. Vitharana and R. Coleman, Vol:1* pp.475-483.
- Zhang, H.H., Small, J.C.,** 2000. Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. *Computers and Geotechnics*, Vol: 26, No:1 pp. 1-21.
- Zhang, L.,** 2009: Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesionless soil, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Issue 5, pp.718-724.
- Zhuang, G.M., Lee, I.K. ve Zhao, X.H.,** 1991:. Interactive Analysis of Behaviour of Raft-Pile Foundations. *Proceedings of Geo-Coast '91*, Yokohama, Vol:2, pp: 759-764.

EKLER

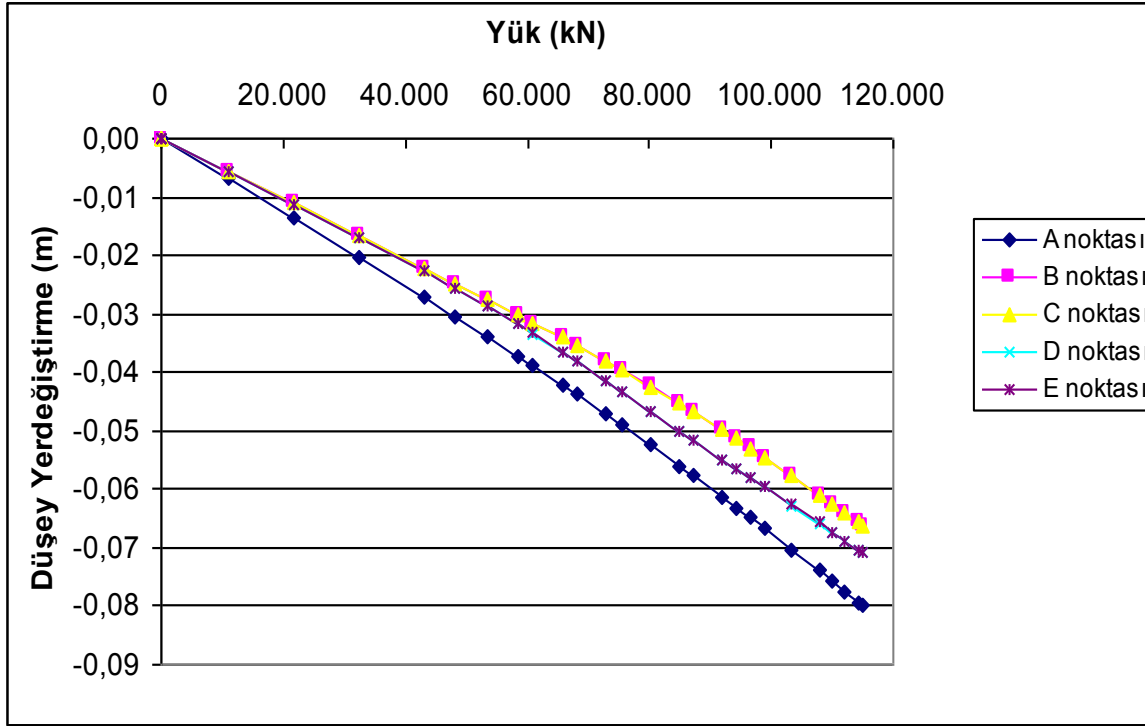
EK A.1 : Yük-Deplasman Eğrileri



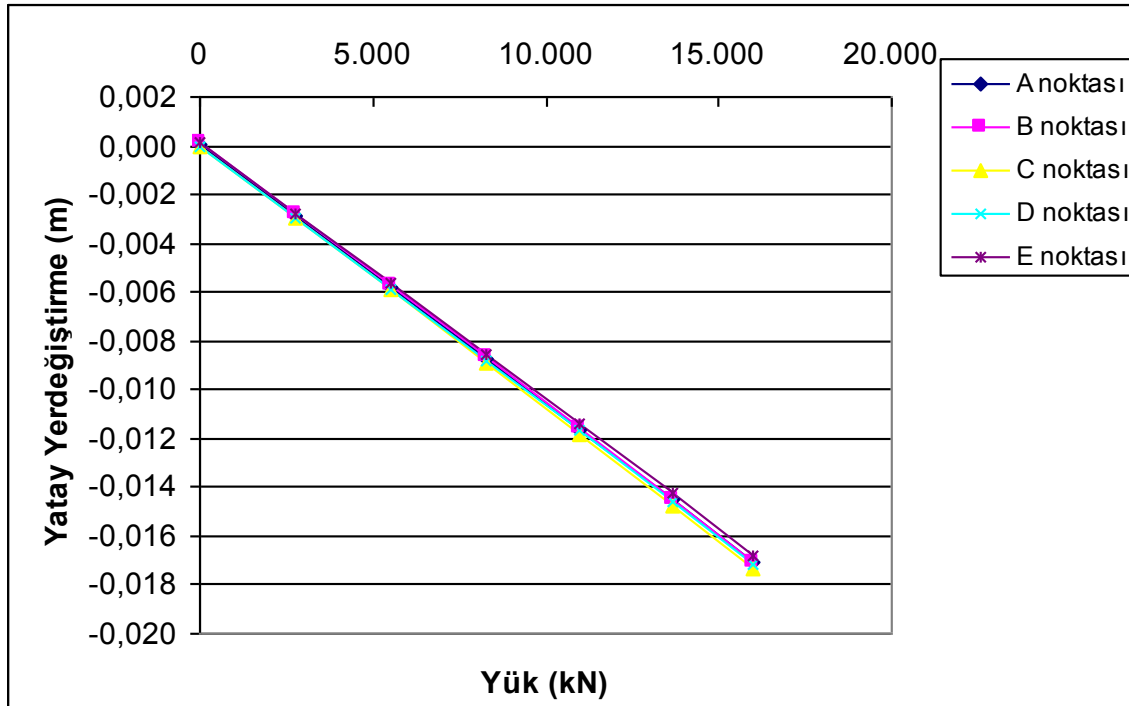
Şekil A.1 : Radyejeneral Temel A ve B noktası yük-düşey deplasman eğrileri



Şekil A.2 : Radyejeneral Temel A ve B noktası yük-yatay deplasman eğrileri

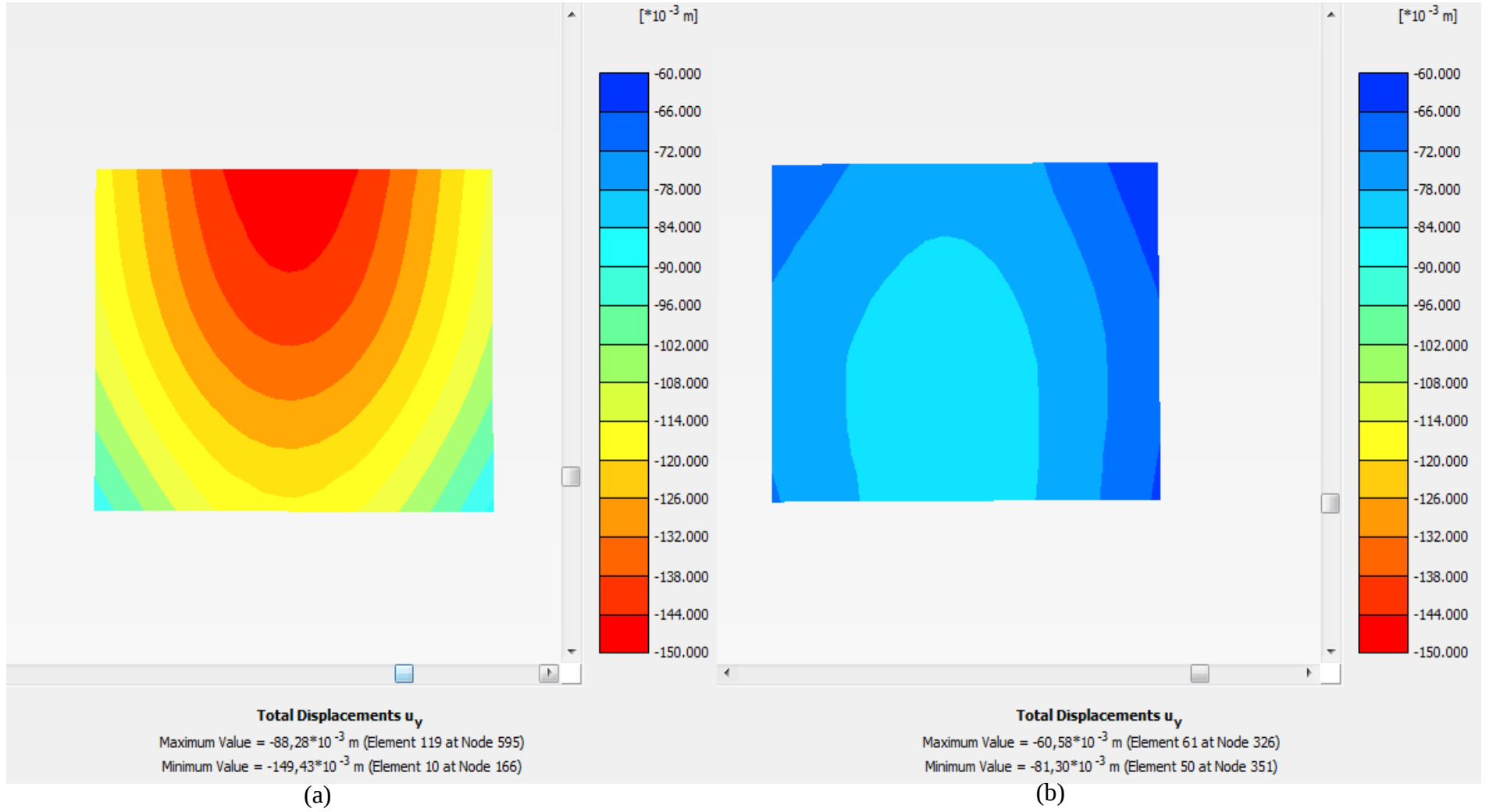


Şekil A.3 : Kazıklı Radyejeneral Temel A, B, C, D ve E noktaları yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri

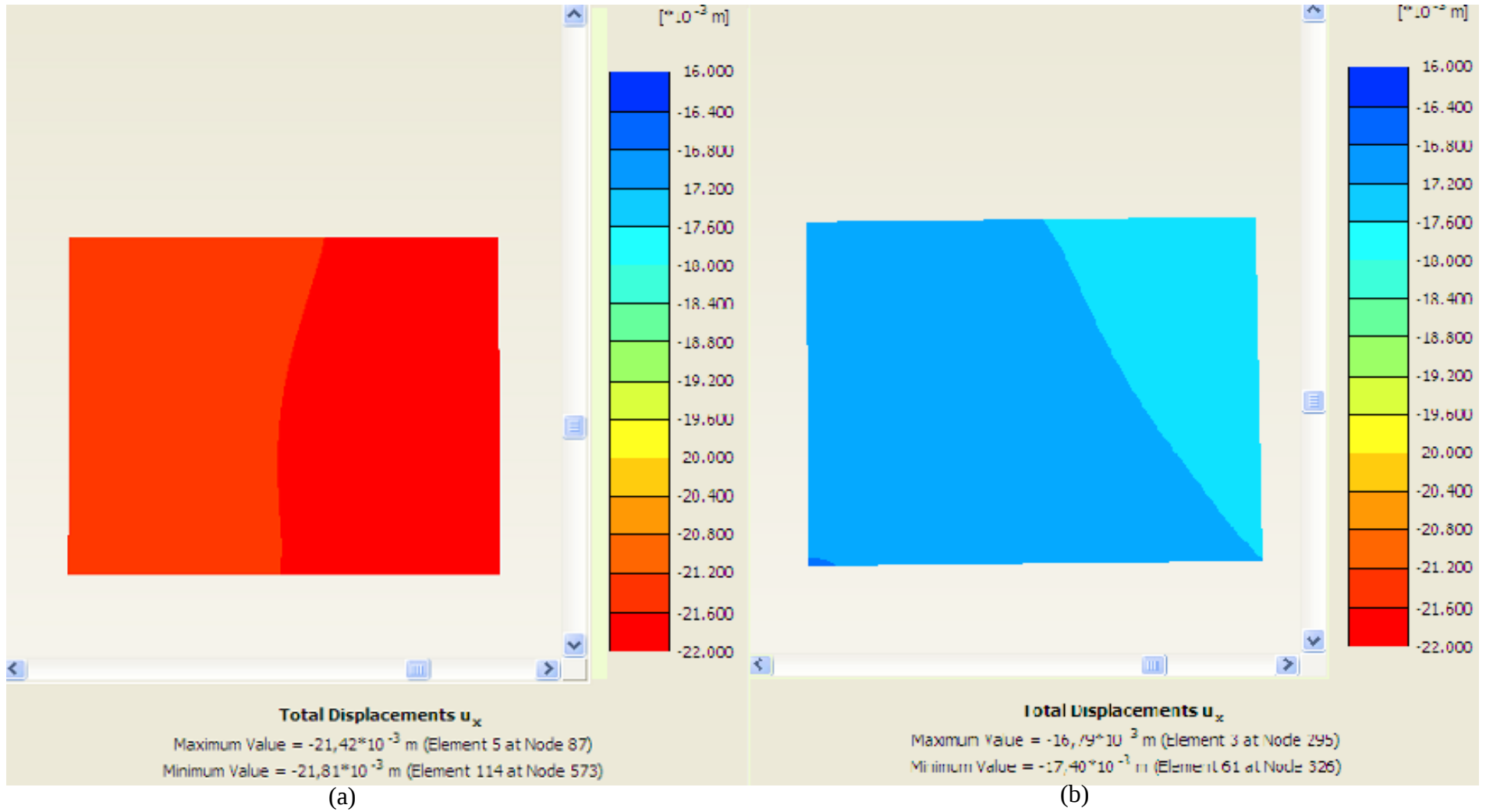


Şekil A.4 : Kazıklı Radyejeneral Temel A, B, C, D ve E noktaları yük-yanal yerdeğiştirme eğrileri

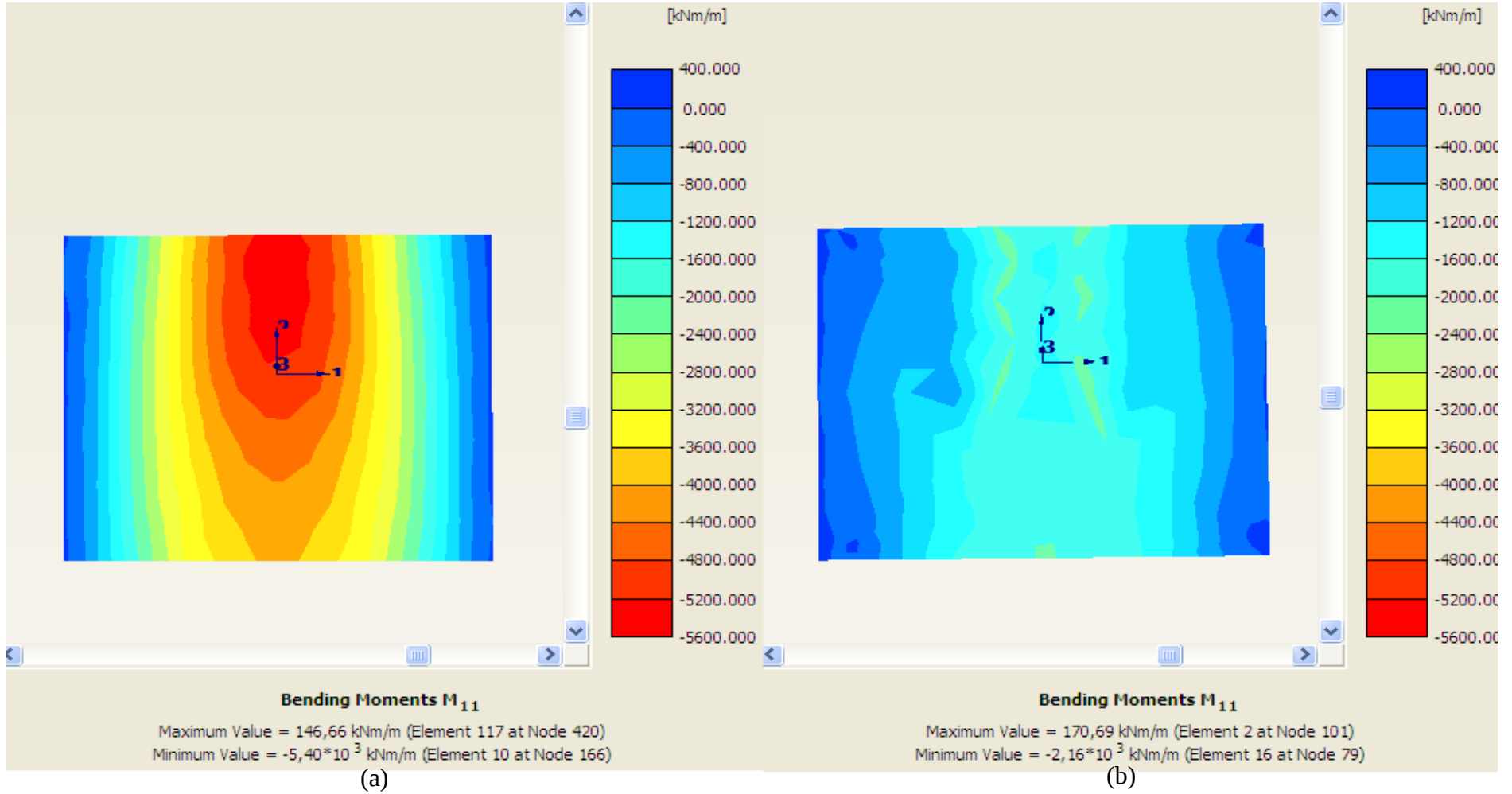
EK A.2 : Radyejeneral Temel, Kazıklı Radyejeneral Temel ve Kazıklı Temel Sistemlerindeki Düşey Yerdeğiştirme, Yatay Yerdeğiştirme ve Eğilme Momenti Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil A.5 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen oturmaların karşılaştırılması



Şekil A.6 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen ötelenmelerin karşılaştırılması



Şekil A.7 : (a) Radyejeneral temel ve(b) kazıklı radyejeneral temel sistemlerinde radye plakta meydana gelen momentlerin karşılaştırılması

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ashi YALÇIN

Doğum Yeri ve Tarihi: 25.04.1983 Kadıköy / İSTANBUL

**Adres: Suadiye 19 Mayıs Mah. Kavisli Sk. Mustafa Bey Apt. No:21 /10 Kadıköy
İSTANBUL**

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2002-2006 (GPA 3.34/4.00)

Lise: İstanbul Lisesi, 1994-2002