T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALUVİYAL ORTAMDA KAZIKLI YAYILI TEMELLERİN ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

136446

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yük. Müh. Sedat SERT

Enstitü Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Akın ÖNALP

MAYIS - 2003

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALUVİYAL ORTAMDA KAZIKLI YAYILI TEMELLERİN ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Yük. Müh. Sedat SERT

Enstitü Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Akın ÖNALP

Bu tez 12/09/ 2003 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/[illegible] ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı
Prof. Dr. Akın ÖNALP

Jüri Üyesi	Jüri Üyesi	Jüri Üyesi	Jüri Üyesi
Prof.Dr.Mete İNCECİK	Prof.Dr.Abdullah MİMAROĞLU	Doç.Dr.Tuğrul ÖZKAN	Doç.Dr. Zeki GÜNDÜZ

ÖNSÖZ

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında doktora tezi olarak hazırlanan bu araştırmada; aluviyal ortamda oturan kazıklı yayılı temellerin sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu analizi yapılmıştır.

Yüksek öğrenimime başladığım 1990 yılından bugüne örnek aldığım, doktora çalışmalarım süresince her türlü destek ve emeğini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Akın ÖNALP' e teşekkürler ederim.

Çalışmalarım süresince farklı aşamalarda yardımlarını gördüğüm Sakarya Üniversitesi öğretim üyeleri Y. Doç. Dr. Ersin AREL, Y. Doç. Dr. Sami ARSOY, Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı' ndan Arş. Grv. Ertan BOL ve Arş. Grv. Aşkın ÖZOCAK, Boğaziçi Üniversitesi' nden Dr. Hafez KEYPOUR, Trakya Üniversitesi' nden İnş. Yük. Müh. Ertuğrul ORDU ile Plaxis Türkiye temsilcisi Müge İNANIR' a teşekkür ederim.

Ayrıca, araştırmalarım boyunca bana destek olan eşim Hacer SERT ile SERT ve KONYER ailelerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
SİMGELER LİSTESİ vi
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
SUMMARY xv

BÖLÜM 1.
GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı 1
1.2. Tanımlar 2
1.2.1. Toplam oturma 2
1.2.2. Farklı oturma 2
1.2.3. Gurup etkinliği 2
1.2.4. Oturma kriterleri 2

BÖLÜM 2.
KAZIKLI TEMELLERE GELENEKSEL YAKLAŞIM 4
2.1. Kazıkların Taşıma Gücü 4
2.1.1. İri daneli zeminlerde kazık taşıma gücü 5
2.1.1.1. Çevre sürtünmesi 5
2.1.1.2. Uç direnci 6
2.1.2. İnce daneli zeminlerde kazık taşıma gücü 7
2.1.2.1. Çevre sürtünmesi 7
2.1.2.2. Uç direnci 8
2.2. Kazık Guruplarının Taşıma Gücü 8
2.3. Kazık Guruplarının Oturması 10

BÖLÜM 3.
KAZIKLI YAYILI TEMELLER 12
3.1. Kazıklı Yayılı Temellerin Uygulanma Gerekçeleri 12
3.2. Kazıklı Yayılı Temellerin Uygulanabilirliği 13
3.3. Tasarım Gereksinimleri 14
3.4. Alternatif Tasarım Yaklaşımları 16
3.5. Analiz Yöntemlerinin Sınıflandırılması 21
3.5.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri 24
3.5.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri 29
3.5.3. Karışık sayısal analiz yöntemleri 30
3.5.3.1. Sınır eleman yöntemi 30
3.5.3.2. Sınır eleman ve sonlu eleman yöntemlerinin birlikte kullanıldığı yöntemler 31
3.5.3.3. Basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri 31
3.5.3.3.1. İki boyutlu (düzlem zorlanma) sonlu eleman çözümü 32
3.5.3.3.2. Eksenel simetrik sonlu eleman çözümü 34
3.5.3.4. Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi 35

BÖLÜM 4.
ADAPAZARI ÖRNEĞİ 37
4.1. Jeoloji, Jeomorfoloji ve Deprem Durumu 37
4.2. 1999 Depremleri 39
4.3. Geoteknik Özellikler 41
4.3.1. Laboratuvar deneyleri 41
4.3.2. Arazi deneyleri 43
4.3.3. Sağlam tabakaların başlangıç derinlikleri ve kalınlıkları 47

BÖLÜM 5.
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE UYGULAMA 50
5.1. Sonlu Eleman Yöntemi 50
5.1.1. Sonlu eleman çözümüne genel yaklaşım 50
5.1.2. Kazık - zemin ara yüzeyinin modellenmesi 52
5.2. Plaxis Yazılımı 53

5.3. Model Özellikleri 57
5.3.1. Sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi ve eleman sayısının belirlenmesi 57
5.3.2. Kazık - zemin ara yüzeyinin modellenmesi 60
5.3.3. Sınır şartları 61
5.3.4. Kazık, yayılı temel, zemin ve ara yüzey özellikleri 61
5.3.5. Hesap adımları 63

BÖLÜM 6.
SAYISAL ÇÖZÜMLER 64
6.1. İki ve Üç Boyutlu Çözümlerin Karşılaştırılması 67
6.2. Yayılı Temel Çözümleri 69
6.3. Kazıklı Yayılı Temel Çözümleri 73
6.3.1. Ana çözümler 73
6.3.1.1. Kazıklı sistemde kazık sayısının etkisi 73
6.3.1.2. Kazık alanının etkisi 79
6.3.1.3. Kazık aralığı oranı etkisi 85
6.3.1.4. Kazık genişliğinin (çapının) etkisi 89
6.3.1.5. Temel kalınlığının etkisi 94
6.3.1.6. Kazık yayılım oranı etkisi 98
6.3.1.6.1. Optimum kazık yayılım oranı değişimi 101
6.3.2. Model değişkenlerinin değerlendirilmesi 104
6.3.3. Yayılı temel boyutunun etkisi. 107
6.3.4. Kazık boyu değişiminin etkisi 108
6.3.5. Sıkı kum tabakasının yüzeye uzaklık ve kalınlığının etkisi 110
6.3.6. Kayma direnci düşük zeminin etkisi 113
6.3.7. Zayıf zeminde kazık boyunun etkisi 115
6.3.8. Drenajlı - drenajsız çözümler 115

BÖLÜM 7. SONUÇLAR 117
BÖLÜM 8. TARTIŞMA ve ÖNERİLER 120
KAYNAKLAR 121
ÖZGEÇMİŞ 137

SİMGELER LİSTESİ

A_b : Kazığın veya kazık bloğunun taban alanı

A_k : Kazık kesit alanı

A_s : Kazık veya kazık bloğunun çevre alanı

A_{yt} : Yayılı temel alanı

B_g : Kazık gurubu genişliği

B_g/B_t : Kazık yayılım oranı

B_t : Yayılı temel genişliği

c' : Efektif kohezyon

c_a : Kille kazık arasındaki yapışma (adezyon)

c_u : Drenajsız kayma direnci

d : Kazık genişliği (çapı)

e_0 : Boşluk oranı

E : Elastisite modülü

E_g : Gurup etkinliği

$E_{50}^{'ref}$: Referans elastisite modülü

$E_{oed}^{'ref}$: Ödometre referans elastisite modülü

$E_{ur}^{'ref}$: Referans boşaltma - yeniden yükleme elastisite modülü

f_s : Kazık boyunca etkiyen birim çevre sürtünmesi

k_p : Kazıkların rijitliği

k_{pr} : Kazıklı yayılı temelin rijitliği

k_r : Yayılı temelin rijitliği

K_n^{nc} : Sükunette yatay toprak basıncı katsayısı

K_s : Yatay toprak basıncı katsayısı

[k], [K] : Sonlu eleman çözümünde bir elemanın ve sistemin rijitlik matrisi

L : Kazık boyu

m : "Pekleşen zemin" modelinde gerilmeye bağlılığı gösteren üstlük

M_k : Kazık ağırlığı

n : Kazık sayısı

N_c : Taşıma gücü faktörü

N_q : Taşıma gücü faktörü

OCR : Aşırı konsolidasyon oranı

p^{ref} : Referans gerilme (100 kPa)

P_p : Kazıklar tarafından taşınan yük

P_r : Yayılı temel tarafından taşınan yük

q_b : Kazık ucundaki zeminin taşıma gücü

{q},{r} : Sonlu eleman çözümünde bir elemanda ve sistemde deplasman vektörü

{Q},{R} : Sonlu eleman çözümünde bir elemanda ve sistemde yük vektörü

Q_b : Uç direnci

Q_s : Toplam çevre sürtünmesi

Q_u : Kazığın taşıyabileceği son yük

R_f : Yenilme oranı (R_f=0.9)

R_{inter} : Kazık zemin arayüzey azaltma faktörü

s : Merkezden merkeze kazıklar arası uzaklık

s/d : Kazık aralığı oranı

t : Yayılı temel kalınlığı

y_{ref} : Referans derinlik

z_c : Çevre sürtünmesi için kritik derinlik

α : Kazık - zemin yapışma katsayısı

α_{cp} : Kazıklar ve yayılı temel arasındaki etkileşim faktörü

ψ : Kabarma açısı

δ : Kazık - zemin sürtünme açısı

Δ : Toplam oturma

Δ_{ort} : Ortalama toplam oturma

$\Delta\delta$: Farklı oturma

$\Delta\delta_{ort}$: Ortalama farklı oturma

ϕ' : Efektif kayma direnci açısı

ν : Poisson oranı

ρ : Birim hacim ağırlık (kN/m^3)

σ'_v : Düşey efektif gerilme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Tek kazık ve kazık gurubu altındaki gerilme dağılışları 9
Şekil 2.2a: Kazıkların eşit aralıklı dağıldığı durumda blok göçmesi 9
Şekil 2.2b: Kazık aralığının bir boyutta diğerinden çok farklı olması durumunda bloğun görünüşü 9
Şekil 2.3: Kazık gurubunun oturma hesabında gerilme dağılımı kabulü 11
Şekil 2.4a: Sürtünme kazıklarından oluşan gurupta yükün zemine aktarılması 11
Şekil 2.4b: Yumuşak kilden sıkı zemine giren (çevre sürtünmesi + uç direnci) kazık gurubunda yükün zemine aktarılması 11
Şekil 2.4c: Uç direncine çalışan kazık gurubunda yükün zemine aktarılması 11
Şekil 3.1: Karma kazıklı yayılı temelin gösterimi 14
Şekil 3.2: Killi zeminlerde oturma azaltıcı kazıkların kullanılması 18
Şekil 3.3: Kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanılması 19
Şekil 3.4: Oturma azaltıcı kazıkların çalışma prensibi 19
Şekil 3.5: Çeşitli tasarım yaklaşımlarına göre kazıklı yayılı temelin yük - oturma davranışı 20
Şekil 3.6: Kazık - yayılı temel elemanının basitleştirilmiş gösterimi 27
Şekil 3.7: Kazıklı yayılı temelin üç doğrusal parçadan oluşan yük - oturma davranışı 28
Şekil 3.8: Kazıklı temelin düzlem zorlanma problemine çevrilişi 33
Şekil 3.9: Kazıklı yayılı temel probleminin eksenel simetrik gösterimi 34
Şekil 4.1: Adapazarı' nın yeri 37
Şekil 4.2: Adapazarı jeoloji haritası 38
Şekil 4.3: Sakarya bölgesinin neotektonik haritası 39
Şekil 4.4: Hasar nedenleri 40
Şekil 4.5: Tığcılar Mahallesi' nde ortalama $SPTN_{30}$ ve c_u değerleri 42
Şekil 4.6: Adapazarı numunelerinde doğal birim hacim ağırlık ve boşluk oranı değerleri 43

Şekil 4.7: Erenler bölgesinden bir kesit 44
Şekil 4.8: Tığcılar ve Yenigün Mahalleleri' nin aluviyon haritası 45
Şekil 4.9: Koni penetrasyon deneyinde sıkı tabakaların bulunduğu örnek zemin kesiti 46
Şekil 4.10: Adapazarı kent merkezi zemin profilleri 46
Şekil 4.11: CPT sonuçlarına göre sıkı tabaka (q_{cmax}>15 MPa) başlangıcı histogramı 47
Şekil 4.12: CPT sonuçlarına göre sıkı tabaka (q_{cmax}>30 MPa) başlangıcı histogramı 47
Şekil 4.13: Sondaj sonuçlarına göre çok sıkı tabaka başlangıcı histogramı 48
Şekil 4.14: Sondaj sonuçlarına göre çok sıkı tabaka kalınlıkları histogramı 48
Şekil 4.15: CPT ve sondajlara göre çok sıkı tabakaların başlangıç derinlikleri 49
Şekil 5.1a: Sürekli elemanlar ile yapı - zemin etkileşimi 52
Şekil 5.1b: Yapı - zemin etkileşiminin ince ara yüzey elemanlarla modellenmesi 52
Şekil 5.1c: Yapı - zemin etkileşiminin yaylarla modellenmesi 52
Şekil 5.1d: Yapı - zemin etkileşiminin özel ara yüzey elemanlarıyla modellenmesi 52
Şekil 5.2: İnce ara yüzey elemanları 53
Şekil 5.3: Zemin elemanında düğümlerin ve gerilme noktalarının yerleşimi 54
Şekil 5.4: Üç boyutlu sonlu eleman ağının oluşturulması 55
Şekil 5.5: z - düzlemlerinin ve dilimlerin tanımlanması 55
Şekil 5.6: Zeminde gerilme - şekil değiştirme davranışı modelleri 56
Şekil 5.7: Sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi 58
Şekil 5.8: Sonlu eleman ağının iki boyutlu görünümü 59
Şekil 5.9: Sonlu eleman ağının üç boyutlu görünümü 59
Şekil 5.10: Eleman sayısının deplasmanlara etkisi 60
Şekil 5.11: Kumda koni uç direnci - efektif kayma direnci açısı ilişkisi 62
Şekil 5.12: Kumda koni uç direnci - elastisite modülü ilişkisi 62
Şekil 6.1: Analizlerde kullanılan zemin profili 64
Şekil 6.2: Kazıklı yayılı temelde değişkenlerin gösterimi 65
Şekil 6.3: İki ve üç boyutlu çözümde temel merkezi altında derinlik boyunca oturmalar 68

Şekil 6.4a: Yayılı temelin oturma kalıbı (kenar - merkez - kenar)..... 70
Şekil 6.4b: Yayılı temelin oturma kalıbı (köşe - merkez - köşe)..... 70
Şekil 6.5: Yayılı temel kalınlığının oturmalara etkisi..... 71
Şekil 6.6: Farklı genişlikteki yayılı temellerin ortasında meydana gelen oturmalar..... 71
Şekil 6.7: Farklı genişlikteki yayılı temellerde meydana gelen oturmalar..... 72
Şekil 6.8: Yayılı temel genişliğinin oturmalara etkisi..... 72
Şekil 6.9: Değişik temel sistemleri..... 73
Şekil 6.10: Ortalama toplam oturmaların kazık sayısına bağlı değişimi..... 74
Şekil 6.11: Tüm modellerde ortalama toplam oturmaların kazık sayısına bağlı değişimi..... 75
Şekil 6.12: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı yayılı temelde oturmaların yayılı temele oranı..... 75
Şekil 6.13: Kazık sayısının artışı ile ortalama toplam oturmaların değişimi..... 76
Şekil 6.14: Kazık sayısının artışı ile ortalama toplam oturmaların değişimi..... 77
Şekil 6.15: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı yayılı temelde farklı oturmalar.... 78
Şekil 6.16: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı temelde farklı oturmalar..... 78
Şekil 6.17: Yükleme sonucunda temel plağının eş deplasman eğrileri..... 79
Şekil 6.18: Kazık sayısına (n) bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (d=0.4 m, t=0.6 m)..... 80
Şekil 6.19: Kazık sayısına (n) bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (d=0.6 m, t=1.0 m)..... 80
Şekil 6.20: Kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi..... 81
Şekil 6.21: Kazık alanı yüzdesi - ortalama toplam oturma değişimi..... 81
Şekil 6.22a: Normalleştirilmiş kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi..... 81
Şekil 6.22b: Normalleştirilmiş kazık alanı - normalleştirilmiş ortalama toplam oturma değişimi..... 81
Şekil 6.23: Normalleştirilmiş kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi..... 82
Şekil 6.24: Farklı kazık genişliği ve temel kalınlığı için kazık alanı - oturma ilişkisi..... 83
Şekil 6.25: Kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi..... 83
Şekil 6.26: Kazık alanı - ortalama farklı oturma değişimi (tüm değerler)..... 84
Şekil 6.27: Kazık alanı - ortalama farklı oturma değişimi..... 84

Şekil 6.28: d=0.4 m olan kazıklı temelde ortalama oturmaların kazık aralığı oranına bağlı değişimi..... 85
Şekil 6.29: Ortalama ve normalleştirilmiş ortalama oturmaların kazık aralığı oranına bağlı değişimi..... 86
Şekil 6.30: B_g/B_t oranlarına bağlı olarak ortalama oturma - s/d oranı değişimi... 86
Şekil 6.31: B_g/B_t oranlarına bağlı olarak normalleştirilmiş ortalama oturma - s/d oranı değişimi..... 87
Şekil 6.32: d=0.4 m olan kazıklı temelde ortalama farklı oturma - s/d oranı değişimi (B_g/B_t=1.0)..... 88
Şekil 6.33: Kazıklı yayılı temelde ortalama farklı oturma - s/d değişimi (tüm modeller)..... 88
Şekil 6.34: Kazıklı temelde ortalama farklı oturma - s/d değişimi..... 89
Şekil 6.35: Ortalama oturmaların kazıkların genişliğine bağlı değişimi..... 90
Şekil 6.36: Normalleştirilmiş toplam oturmaların kazık genişliğine bağlı değişimi..... 91
Şekil 6.37: Ortalama farklı oturmaların kazık genişliğine bağlı değişimi..... 92
Şekil 6.38: Kazık genişliğine bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=25 m, t=0.6 m)..... 93
Şekil 6.39: Kazık genişliğine bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=49 m, t=1.0 m)..... 93
Şekil 6.40: Ortalama toplam oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi. 94
Şekil 6.41: Ortalama normalleştirilmiş toplam oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi..... 95
Şekil 6.42: Ortalama farklı oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi... 96
Şekil 6.43: Temel kalınlığına bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=9 m, d=0.4 m)..... 97
Şekil 6.44: Temel kalınlığına bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=49 m, d=0.8 m)..... 97
Şekil 6.45: Ortalama toplam oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi..... 98
Şekil 6.46: Normalleştirilmiş ortalama toplam oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi..... 99
Şekil 6.47: Ortalama farklı oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi..... 100
Şekil 6.48: Optimum kazık yayılım oranı - kazık sayısı ilişkisi..... 102

Şekil 6.49: Optimum kazık yayılım oranı - kazık genişliği ilişkisi..... 102
Şekil 6.50: Optimum kazık yayılım oranı - yayılı temel kalınlığı ilişkisi..... 103
Şekil 6.51: Optimum kazık yayılım oranı - zemin özellikleri ilişkisi..... 103
Şekil 6.52: Temel boyutu - oturma ilişkileri..... 107
Şekil 6.53: Optimum kazık yayılım oranı - yayılı temel boyutu ilişkisi..... 108
Şekil 6.54: Kazık boyunun oturmalara etkisi..... 109
Şekil 6.55: Sıkı tabaka kalınlığının ve yüzeye uzaklığının oturmalara etkisinin kazık sayısına bağlı gösterimi..... 110
Şekil 6.56: Sıkı tabaka kalınlığının ve yüzeye uzaklığının oturmalara etkisinin kazık aralığı oranına bağlı gösterimi..... 111
Şekil 6.57: Sıkı tabaka ortasının yüzeye uzaklığı - oturma ilişkileri..... 112
Şekil 6.58: Sıkı tabaka ortasının yüzeye uzaklığı ve kalınlığı - oturma ilişkileri.. 113
Şekil 6.59: Zemin özellikleri - oturma ilişkileri..... 114
Şekil 6.60: Zemin özellikleri - oturma ilişkilerinin kazık sayısı ve s/d' ye göre değişimi..... 114
Şekil 6.61: Kayma direnci düşük zeminde kazık boyunun oturmalara etkisi..... 115
Şekil 6.62: Drenajlı ve drenajsız durumda yük - oturma ilişkisi..... 116
Şekil 6.63: Drenajlı ve drenajsız durumda derinlik - oturma ilişkisi..... 116

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1: Yayılı temelli yapılar için oturma kriterleri..... 3
Tablo 2.1: Yatay toprak basıncı katsayısı oranı..... 6
Tablo 2.2: Kazık - zemin sürtünme açıları..... 6
Tablo 2.3: Taşıma gücü faktörü..... 7
Tablo 3.1: Kazıklı temellerin analiz ve tasarım yöntemleri..... 22
Tablo 3.2: Kazıklı yayılı temel çözüm yöntemlerinin karşılaştırması..... 24
Tablo 5.1: Modelde kullanılan zemin, kazık, temel ve ara yüzey özellikleri..... 63
Tablo 6.1: Kazık aralığı oranının (s/d) değerleri..... 65
Tablo 6.2: İki ve üç boyutlu modellerde model değişkenleri ve çözüm süreleri.. 67
Tablo 6.3: Kazık yayılım oranının optimum değerleri..... 104
Tablo 6.4: Model değişkenlerine bağlı olarak ortalama toplam oturmalar..... 105
Tablo 6.5: Model değişkenlerine bağlı olarak ortalama farklı oturmalar..... 106

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Yayılı temel; Kazıklı yayılı temel; Aluviyal ortam; Sıkı kum tabakaları; Üç boyutlu sonlu eleman çözümü; Kazık yayılım oranı.

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilimdalı' nda doktora tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı; kazıklı yayılı temellerin kullanılması ile "kötü" olarak nitelendirilen genç aluviyal zeminlerde yüksek yapılaşmaya gidilebileceğini sayısal çözümlerle ortaya koymak ve geleneksel yöntemlerin aksine kazıklı temel sistemlerinde yayılı temelin de üst yapı yükünü paylaştığı gerçeğinden yola çıkarak taşıma gücü ve oturma ölçütlerini sağlayacak en uygun kazık sayısı, boyutları ve yerleşimini belirlemektir.

Bu çalışmada, üç boyutlu PLAXIS adlı sonlu eleman yazılımı ile yumuşak zemin özellikleri kullanılarak kazıklı yayılı temel modelleri çözümlenmiştir. Öncelikle Adapazarı kent merkezi zeminlerinde yapılan yaklaşık 600 sondaj ve 250 sondalamadan gelen numune ve veriler incelenerek içlerinde kazıklı temeller için uygun ortam oluşturan sıkı kumları içeren tipik zemin kesitleri ve zemin özellikleri belirlenmiştir. Seçilmiş bir zemin kesitinde, yayılı temel kalınlığı, kazık sayısı, çapı ve yerleşimi değiştirilerek yayılı temel ve kazıklı yayılı temel modelleri oluşturulmasıyla detaylı bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Sonuçta, elde edilen sayısal değerler karşılaştırılarak oturma ölçütlerini sağlayan en uygun kazık yerleşimi belirlenmiştir.

THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF PILED RAFT FOUNDATIONS IN ALLUVIAL SOILS

SUMMARY

Keywords: Raft; Mat; Piled raft foundation; Alluvial soil; Dense sand layers; Three dimensional finite elements, Pile group to raft width ratio.

This thesis has been prepared in partial fulfilment for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil Engineering of the Graduate School of Sakarya University. The aim of this study was to show the possibility of constructing tall buildings on 'weak' alluvial soils of the city of Adapazarı by using piled rafts and determine the most convenient number, dimensions and spacing of piles.

In this study, three dimensional models of piled rafts were generated and calculated with the geotechnical finite element code PLAXIS. After evaluating around 600 borings and 250 soundings performed in the city, soil profiles which have dense sand and gravelly sand layers were located. Analyses have been performed for a typical profile to establish guidelines for the diameter and spacing of the piles as well as the type of the raft.

The main finding of the thesis is that the ratio pile group width to breadth of the raft is the governing parameter in design and analysis of piled rafts.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Sayısal analiz yöntemlerindeki gelişmeler, şimdiye kadar sadece iki boyutta incelenebilen zemin - yapı etkileşiminin ve zeminlerin doğrusal olmayan yük - şekil değiştirme davranışlarının üç boyutlu modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu gelişmeler ışığında, ileri bilgisayar yazılımları kullanılarak kazıklı temellerin tasarımında geleneksel yöntemlerde incelenemeyen yayılı temel - kazık - zemin etkileşimleri dikkate alınarak daha gerçekçi ve ekonomik çözümler yapılabilmektedir.

Adapazarı gibi aluviyal kökenli genç zeminlere sahip yerleşim merkezleri temel sistemlerinin yetersiz olduğu durumlarda depremler sırasında büyük zarar görebilmektedir. Karşılaşılan yıkım ve can kaybı sonrasında, bunlara gerekçe olarak "kötü" diye nitelendirilen zemin koşulları gösterilmektedir. Bilimsel temellere dayanmayan ve mühendislik yaklaşımı taşımayan bu düşünce sebebiyle, zemin incelemelerinin gerektiği gibi yapılarak doğru temel sistemleriyle yüksek yapılaşmaya gidilebileceği kanısının yerleşmesi yerine yüksek yapılaşmanın tamamen yasaklanması gibi bir sonuç ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, öncelikle kazıklı yayılı temel (kazıklı radye) sistemlerinin üç boyutlu analizini yapmak ve Adapazarı gibi aluviyon kökenli yerleşim bölgelerinde uygun temel sistemi seçimiyle yüksek yapılaşmaya gidilebileceğini göstermektir. Türk teknik literatüründe *radyejeneral* gibi yabancı sözcükle anlatılan temel tipi bu tezde "yayılı" olarak nitelendirilecektir.

1.2. Tanımlar

1.2.1. Toplam oturma (Δ)

Yük altında yapı temelinin herhangi bir noktasında zeminin elastik ve plastik hareketleri sonucunda oluşan yerdeğiştirme. Toplam oturmalar yapıya önemli zarar vermemekle birlikte kanal, su ve gaz bağlantılarının kesilmesine sebep olabilirler.

1.2.2. Farklı oturma (δΔ)

Yapının eğilmesine sebep olan, görüntüyü bozduğu gibi yapı içindeki alet ve makinaların çalışmasını da engelleyebilen, temelin değişik yerlerinde farklı miktarlarda oturması.

1.2.3. Grup etkinliği (E_g)

Kazık gurubunun toplam taşıma gücünün, tekil kazıkların dirençleri toplamına oranı. Kazıkların birbirlerine yakın konumlandırıldığı durumlarda gurup etkinliği değeri 1' den küçük çıkabilir.

1.2.4. Oturma kriterleri

Estetik açıdan kötü görünüme yol açmalarına ve kullanıcıda tedirginliğe neden olmalarına rağmen yapı temellerinde meydana gelen toplam veya farklı oturmalar yapısal hasara yol açmayabilirler.

Bowles (1988), farklı oturmaların oluşan en büyük toplam oturmanın ¾' ü oranında gerçekleşeceğini belirtmiştir.

Tablo 1.1' de Mc Donald ve Skempton (1955) tarafından yayılı temeller için yapıların dayanabileceği ve kullanılması önerilen toplam oturma ve farklı oturma değerleri verilmiştir.

Tablo 1.1: Yayılı temelli yapılar için oturma kriterleri (Mc Donald ve Skempton, 1955)

Kriter	Zemin Türü	Yapıların Dayanabileceği	Önerilen
$\delta\Delta_{max}$ (mm)	Kil	45	38
	Kum	32	25
Δ_{max} (mm)	Kil	76-127	64-102
	Kum	51-76	38-64

Yayılı temellerde Türkiye uygulaması için uygun olacağı düşünülen toplam oturma sınırları, Önalp (1983) tarafından kilde 100 mm, kumda 60 mm olarak verilmiştir. Bu değerler yapıların tahammül edebileceği üst değerler olarak belirtilmiştir. Tasarım sırasında yayılı temellerde 40 mm' ye göre hesap yapılması önerilmiş ve bu durumda farklı oturmaların toplam oturmaların yarısı civarında gerçekleşeceği belirtilmiştir.

BÖLÜM 2. KAZIKLI TEMELLERE GELENEKSEL YAKLAŞIM

Temeller, yapı yüklerini zemine taşıma gücü aşılmadan, kabul edilebilir oturmalarla aktaran yapı elemanlarıdır. Bu tariften hareketle yapı temellerinin tasarımında ilk seçenek yüzeysel temellerdir. Kazıklı temellerin kullanımı, yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma ölçütlerini sağlayamayacağı aşağıdaki koşullarda gerekli olmaktadır:

- Yüzeysel temellerin taşıma gücünün üst yapı yükünden gelen gerilmelerden küçük olması,
- Yapı altındaki zeminin sıkışabilirliğinin çok yüksek olması, yüzeysel temellerin kullanımı halinde oluşacak oturmaların kabul edilemez düzeye erişmesi,
- Zeminin sıkışabilirliğinin ve üst yapı yükü dağılımının farklılık göstermesi sebebiyle ayrık yüzeysel temellerde aşırı farklı oturmaların ortaya çıkması,
- Temel sisteminin deprem sebebiyle yatay yük etkisi alması.

Üst tabakalardaki zeminin düşük kayma direncine sahip olduğu durumlarda kazıklar daha derinlerdeki sağlam tabakalara, varsa ana kayaya kadar uzatılırlar. Sağlam zeminin yüzeyden çok aşağıda olduğu durumlarda kazık boyunun uzatılması ekonomik olmaktan çıkmakta, dolayısıyla yük kazık boyunca çevre sürtünmesiyle aktarılmaktadır.

2.1. Kazıkların Taşıma Gücü

Kazıkların eksenel taşıma güçleri, uç direnci ile çevre sürtünmesi / yapışmasından oluşur ve

$$Q_u = Q_b + Q_s - M_k = q_b \cdot A_b + f_s \cdot A_s - M_k \qquad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, Q_u kazığın taşıyabileceği son yük, Q_b uç direnci, Q_s toplam çevre sürtünmesi, q_b kazık ucundaki zeminin taşıma gücü, f_s kazık çevresine etkiyen birim sürtünme gerilmesi, A_b kazık ucu kesit alanı, A_s kazık yüzey alanı ve M_k kazık ağırlığıdır.

2.1.1. İri daneli zeminlerde kazık taşıma gücü

2.1.1.1 Çevre sürtünmesi

İri daneli zeminlerde çevre sürtünmesinin kritik derinliğe (z_c) kadar doğrusal arttığı ve bu derinlikten sonra sabit kaldığı kabul edilmektedir. Bu derinlik,

Gevşek kumlarda $z_c = 10 \cdot d$,

Orta sıkı kumlarda $z_c = 15 \cdot d$,

Sıkı kumlarda $z_c = 20 \cdot d$

olarak alınabilmektedir (ASCE, 1993). Burada, d kazık çapı veya genişliğidir.

Kazık boyunca etkiyen birim çevre sürtünmesi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilir:

$$f_s = K_s \cdot \sigma'_v \cdot \tan\delta \tag{2.2}$$

$$\sigma'_v = \rho' \cdot z, \ (z < z_c) \tag{2.3}$$

$$\sigma'_v = \rho' \cdot z_c, \ (z \geq z_c) \tag{2.4}$$

$$Q_s = f_s \cdot A_s \tag{2.5}$$

Burada, σ'_v düşey efektif gerilmeyi, K_s yatay toprak basıncı katsayısını, δ kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısını göstermektedir.

K_s yatay toprak basıncı katsayısı, kazık malzemesine, kazığın imal şekline (çakma, delme), zeminin sıkılığına bağlıdır. Tomlinson (1994) tarafından sükunette toprak

basıncı katsayısına ($K_0 = 1 - Sin\phi'$) bağlı olarak önerilen değerleri Tablo 2.1' de verilmiştir:

Tablo 2.1: Yatay toprak basıncı katsayısı oranı, K_s/K_0 (Tomlinson, 1994)

Kazık İmal Şekli	K_s/K_0
Çakma kazıklar, sıkıştırma etkisi büyük	1.00-2.00
Çakma kazıklar, sıkıştırma etkisi düşük	0.75-1.25
Yerinde dökme betonarme sondaj kazıkları	0.75-1.00
Su jeti kullanılarak imal edilmiş kazıklar	0.50-0.70

Tomlinson (1994), normal yüklenmiş kumlarda K_0 değerini, gevşek, orta sıkı ve sıkı kumlar için sırasıyla 0.50, 0.45 ve 0.35 olarak vermiştir.

Kulhawy (1984), kazık - zemin sürtünme açısını zeminin efektif kayma direnci açısına bağlı olarak vermiştir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2: Kazık - zemin sürtünme açıları (Kulhawy, 1984)

Kazık - Zemin Arayüzeyi	Kazık-Zemin Sürtünme Açısı,δ (°)
Pürüzsüz (veya kaplanmış) çelik - kum	$0.5\phi'$-$0.7\phi'$
Pürüzlü (veya nervürlü) çelik - kum	$0.7\phi'$-$0.9\phi'$
Betonarme çakma - kum	$0.8\phi'$-$1.0\phi'$
Yerinde dökme betonarme - kum	$1.0\phi'$
Ahşap - kum	$0.8\phi'$-$0.9\phi'$

2.1.1.2. Uç direnci

İri daneli zeminlerde uç direncinin de sürtünmede olduğu gibi kritik derinliğe kadar arttığı, kritik derinlikten sonra sabit kaldığı kabul edilmektedir. Uç direnci hesaplanırken de kritik derinlikler için aynı eşitlikler kullanılabilir (ASCE, 1993).

İri daneli zeminlerde kazığın uç direnci,

$$q_b = \sigma'_v \cdot N_q \qquad (2.6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada, σ'_v düşey efektif gerilmeyi, N_q ise taşıma gücü faktörünü göstermektedir.

Prakash ve Sharma (1990) tarafından önerilen taşıma gücü faktörleri Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3: Taşıma gücü faktörü (Prakash ve Sharma, 1990)

	ϕ (°)	25	28	30	32	34	36	38	40	42	45
N_q	Çakma	12	20	25	35	45	60	80	120	160	230
	Delme	5	8	12	17	22	30	40	60	80	115

2.1.2. İnce daneli zeminlerde kazık taşıma gücü

2.1.2.1. Çevre sürtünmesi

İnce daneli zeminlerde kazık çevresinde elde edilen direnç çevre sürtünmesi olarak adlandırılsa da kazık ile zemin arasındaki yapışmadan (adezyon) kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla çevre sürtünmesi,

$$f_s = c_a = \alpha \cdot c_u \tag{2.7}$$

$$Q_s = f_s \cdot A_s \tag{2.8}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada c_a kil ile kazık arasındaki yapışma (adezyon), α yapışma katsayısı, c_u ise zeminin drenajsız kayma direncidir.

Coduto (1994), delme *(fore)* kazıklarda α yapışma katsayısının aşağıdaki şekilde kullanılmasını önermiştir:

$$c_u < 51 \text{ kPa} \Rightarrow \alpha = 1.0 \tag{2.9}$$

$$c_u \geq 51 \text{ kPa} \Rightarrow \alpha = 0.32 + 250\, c_u^{-1.5} \tag{2.10}$$

Fleming vd. (1992), düşey efektif gerilmeye göre normalleştirilmiş drenajsız kayma direncini kullanarak yapışma katsayısını,

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} \leq 1 \Rightarrow \alpha = \frac{0.5}{\left(c_u / \sigma'_v\right)^{1/2}} \tag{2.11}$$

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} > 1 \Rightarrow \alpha = \frac{0.5}{\left(c_u / \sigma'_v\right)^{1/4}} \tag{2.12}$$

şeklinde vermiştir.

2.1.2.2. Uç direnci

Killi zeminlerde kazıkların uç direnci,

$$q_b = c_u \cdot N_c \tag{2.13}$$

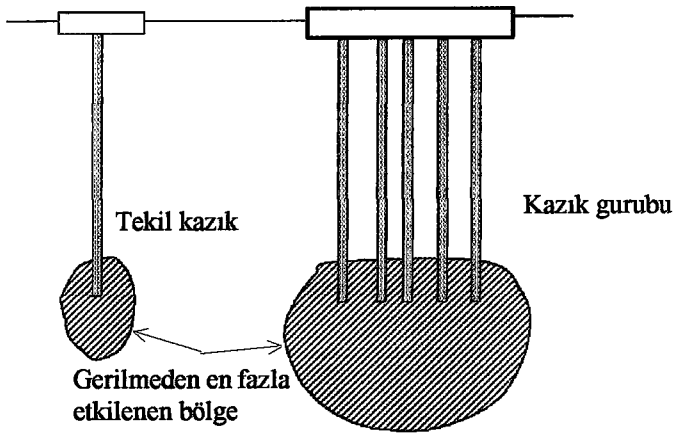
şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, c_u zeminin drenajsız kayma direnci, N_c ise taşıma gücü faktörüdür. N_c katsayısı, kazık boyu büyüdükçe artar ve $D_f/d \geq 4$ durumunda 9 değerini alır. Kazıklı temellerde kazık boyu, kazık çapının 4 katından daha büyük olduğundan genelde N_c=9 değeri kullanılır (Skempton, 1951).

2.2. Kazık Guruplarının Taşıma Gücü

Kazıklar yapı elemanı olarak tek başlarına kullanılmazlar. Kazıklı temellerde kazıklar, üst yapı yüklerini guruplar halinde zemine iletirler. Kazık gurubunun göstereceği davranış, tek kazık üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan farklılık göstermekte ve kazık gurubunun taşıma gücü kazıkların tek tek taşıma güçlerinin toplamından az olabilmektedir. Tek kazıkta oturma ölçütleri sağlanmış görünse bile çoklu sistemde gurup etkisi sebebiyle aşırı oturmalar görülebilmektedir. Kazık sayısının fazla olması sebebiyle gerilme dağılışı daha geniş alana yayılmakta ve daha derinlerdeki zeminler de etki almaktadır (Şekil 2.1).

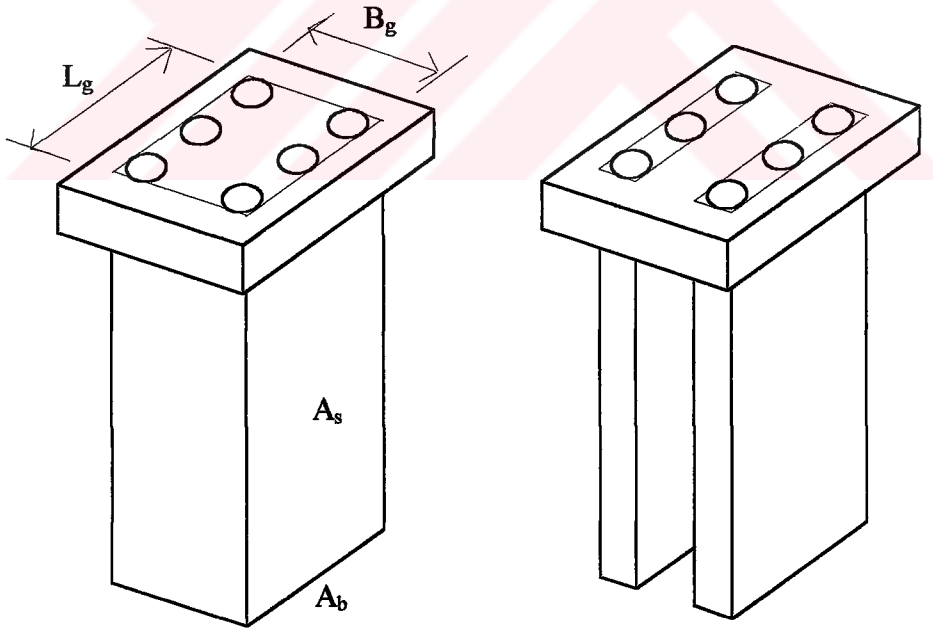
Kazık aralığının küçük olması durumunda basınç soğanlarının çakışmaması ve kazık aralığının fazla olduğu durumlarda kazık başlığının ekonomik olmasını

sağlayabilmek için kazık aralığının bir optimum değerde tutulması gerekir. Vesic' e (1977) göre optimum kazık aralığı 3d ile 3.5d arasında bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Tek kazık ve kazık gurubu altındaki gerilme dağılışları

Terzaghi ve Peck (1967), kazık guruplarında kazıkların tekil göçmeleri yerine gurubun blok halinde göçtüğünü kabul ederek taşıma gücünü aşağıdaki şekilde vermişlerdir (Şekil 2.2a):



Şekil 2.2.a: Kazıkların eşit aralıklı dağıldığı durumda blok göçmesi

b: Kazık aralığının bir boyutta diğerinden çok farklı olması durumunda bloğun görünüşü

$$Q_u = A_s \cdot c_u \cdot \alpha + c_b \cdot A_b \cdot N_c - (M_k - M_z) \qquad (2.14)$$

Burada, A_s: Kazık gurubunun yüzey alanı, A_b: Kazık gurubunun taban alanı, c_u, c_b: Kazık gurubu etrafindaki ve tabanındaki ortalama drenajsız kayma direnci, N_c: Taşıma gücü faktörü, M_k ve M_z: Sırasıyla gurubu oluşturan malzemenin ve zeminin ağırlıkları.

Kazık aralığının bir boyutta diğerinden çok farklı olması durumunda bloğun yüzey ve uç alanları Şekil 2.2.b' deki gibi değişmektedir.

Killi zeminlerde kazık gurubunun taşıma gücü (a) tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamı, (b) kazık bloğunun taşıma gücünün küçük olanına eşit alınır (ASCE, 1993).

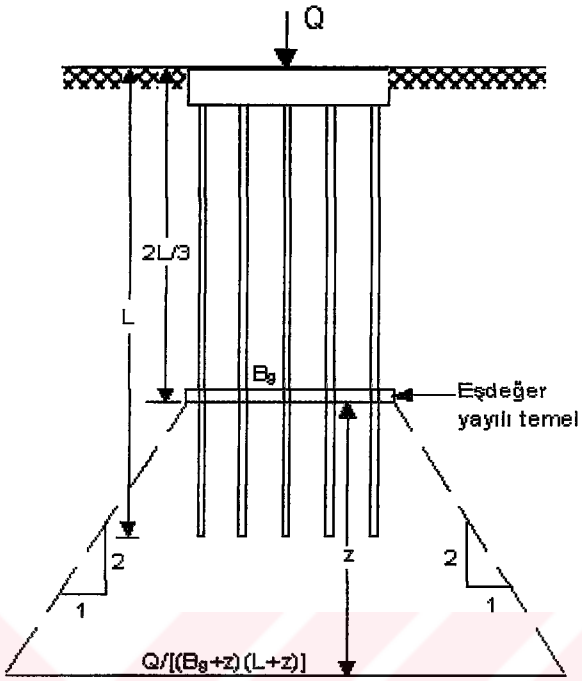
Kumda oluşturulan çakma kazıklarda kazık gurubunun taşıma gücü tekil kazıkların taşıma güçlerine veya daha fazlasına eşit olmaktadır. Uygulamada, kum tabakasının altında zayıf zemin yoksa gurup etkinliği 1.0 alınabilir. Kum tabakasının altında zayıf zeminler varsa kazık gurubunun taşıma gücü (a) tekil kazıkların taşıma güçlerinin toplamı, (b) uçtaki direncin zayıf zemin özellikleriyle bulunduğu kazık bloğunun taşıma gücünün küçük olanına eşit alınır (ASCE, 1993).

2.3. Kazık Guruplarının Oturması

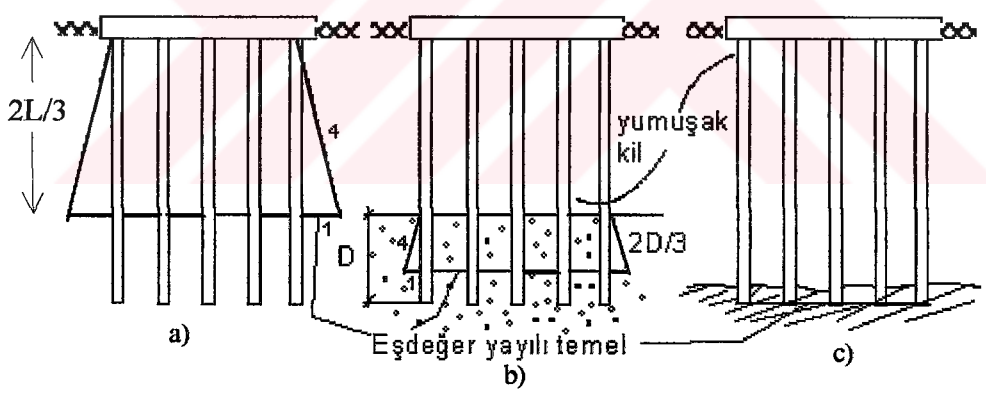
Terzaghi ve Peck (1967), kazık gurubunun oturmasını, kazık başlığından 2L/3 derinliğinde eşdeğer yayılı temelin oturmasına eşit olarak hesaplamayı önermişlerdir. Burada eşdeğer yayılı temelin oturması, kazık gurubu ile aynı yükü taşıyan 2L/3 derinliğinde bulunan, gerilmenin 1 yatay - 2 düşey eğimle genişleyen bir alanda yayıldığı kabul edilerek hesaplanmaktadır (Şekil 2.3).

Tomlinson (1994), sürtünme kazıkları için kazık gurubunun taşıdığı yükü 2L/3 derinliğe kadar 1 yatay - 4 düşey eğimle yayılıyor kabul etmiş ve o derinlikteki yatay bir düzleme bu gerilmenin etkisinin meydana getireceği oturmayı hesaplamıştır (Şekil 2.4.a). Yumuşak kil içinden geçerek iri daneli taşıyıcı tabakaya giren kazık gurubunun taşıdığı yükü, kazığın taşıyıcı tabakaya girdiği seviyenin altında kalan kısmının 2/3' ünden itibaren 1 yatay - 4 düşey eğimle yayarak hesaplamıştır (Şekil 2.4.b). Kazıklar sıkışabilir tabaka altındaki kaya tabakasına oturuyorsa kazıklara

gelen yük, blok tabanında zemine doğrudan etki ediyor kabulünü yapmıştır (Şekil 2.4.c).



Şekil 2.3: Kazık gurubunun oturma hesabında gerilme dağılımı kabulü (Terzaghi ve Peck, 1967)



Şekil 2.4.a: Sürtünme kazıklarından oluşan gurupta yükün zemine aktarılması
b: Yumuşak kilden sıkı zemine giren (çevre sürtünmesi + uç direnci) kazık gurubunda yükün zemine aktarılması
c: Uç direncine çalışan kazık gurubunda yükün zemine aktarılması (Tomlinson, 1994)

BÖLÜM 3. KAZIKLI YAYILI TEMELLER

3.1. Kazıklı Yayılı Temellerin Uygulanma Gerekçeleri

Yayılı temeller, genellikle yapı yüklerini taşıma gücü açısından yeterli güvenlik sayılarıyla üzerinde yer aldıkları zeminlere iletirler. Bir yayılı temel, taşıma gücü açısından yeterli güvenliğe sahip olsa bile uzun sürede aşırı oturmalar gösterebilir. Farklı oturmalar temelin veya üst yapının rijitliğini artırarak düşürülebilir. Toplam oturmaları azaltmak için de, yayılı temel alanı genişletilebilir veya yüzdürme amaçlı kazı yapılarak temel sistemi bodrumlu inşa edilebilir. Yayılı temel alanını artırmak için daha fazla aiana sahip olunması gerekir; kazı yapılması ise bodrum ihtiyacı olmayan durumlar dışında ekonomik değildir. Yayılı temel kullanılmasının oturma ölçütlerini sağlayamayacağı durumlarda kazıkların hem taşıma gücünü artırıcı hem de oturmaları azaltıcı olarak kullanılması akla gelmektedir.

Geleneksel yöntemlerde yayılı temel, kazıklı yayılı temel sisteminin bir parçası olmasına rağmen hesaplamada tasarım yükünün tamamının kazıklar tarafından taşındığı varsayılmaktadır. Gerçekte ise yük, yayılı temel ve kazıklar arasında paylaşılarak zemine aktarılır. Tüm yükün kazıklar tarafından taşınmadığı, yayılı temelin de belli oranda yük taşıdığı temel sistemlerinin tasarımına dair çalışmalar son yıllarda ileri düzeye çıkmıştır. Ortaya konulan yöntemlerde kazıklar, yayılı temel ve zemin arasındaki etkileşime bağlı olan yük paylaşımı önem taşımaktadır. Bu çalışmalarda amaç, toplam ve farklı oturmaların kontrol altında tutularak ve taşıma gücü açısından güvenlik sağlanarak ekonomik bir çözüm elde edilmesidir. Ekonomik tasarım için, farklı ve toplam oturmaları kontrol altında tutan yeterli sayıda, çapta ve aralıkta kazık sayısının ve yayılı temel kalınlığının tesbiti gerekmektedir. Buradan hareketle, kazık sayısının hesaplanmasında oturma miktarındaki azalma en belirleyici etken olmaktadır. Kazıkların "oturma azaltıcı eleman" (Burland vd., 1977) olarak

kullanılmaları ile geleneksel yöntemlere göre kazık sayısı oldukça azaldığı gibi gurup etkisi de daha az olmaktadır.

Birand (1992a), kum içindeki gurup kazıklarda oturma ve yük paylaşımının, kazık başlığının rijitliğine bağlı olduğunu göstermiştir.

3.2. Kazıklı Yayılı Temellerin Uygulanabilirliği

Kazıklı yayılı temellerin en etkili uygulaması, yayılı temelin tek başına taşıma gücünün yeterli olduğu, ancak toplam ve / veya farklı oturmaların kabul edilebilir üst sınırları aştığı durumlarda yapılmaktadır. Poulos (1991), içinde sert killerin ve / veya sıkı kumların yer aldığı zemin profillerinin kazıklı yayılı temellerin kullanılması için en uygun durumlar olduğunu belirtmiştir.

Yüzeye yakın kısımlarda yumuşak killerin ve gevşek kumların bulunduğu; sığ derinliklerde sıkışabilir tabakaların olduğu; konsolidasyon oturmalarının doğabileceği, dış etkiler sebebiyle şişme gösterebilecek zemin profilleri ise uygun olmayan durumlar olarak belirtilmiştir. İlk iki durumda yayılı temelin taşıma gücü tek başına yeterli olmayabilir; üçüncü durumda sıkışabilir tabakalardaki oturmalar yayılı temelin sisteme katkısını azaltabilir; son iki durumda ise zeminde oluşacak oturma ve şişme sebebiyle kazıklara ek yük artışı gelebilir.

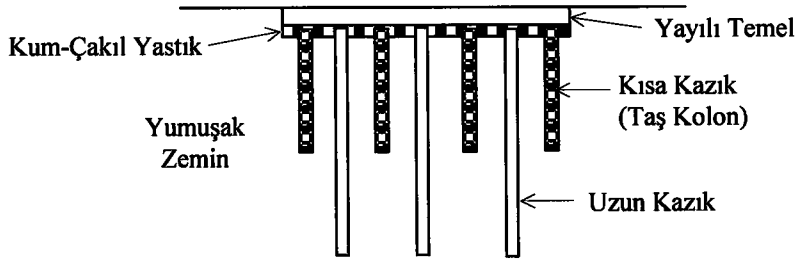
Yukarıda belirtilen sakıncalar sebebiyle kazıklı yayılı temellerin tasarımında, dış etkilerden dolayı oluşabilecek zemin hareketlerinin (şişme, büzülme, konsolidasyon) temel sisteminin davranışında meydana getirebileceği değişikliklerin dikkate alınması gerekir.

Poulos (1993), şişme veya büzülme sebebiyle gerilmelerde oluşan değişikliklerin kazıklı yayılı temel sistemi üzerindeki etkisini sınır elemanlar yöntemiyle inceleyip şu sonuçları elde etmiştir:

- Konsolidasyon sebebiyle oluşan negatif çevre sürtünmesi kazıklarda basınç gerilmesi artışı oluşturmuş ve yayılı temelin ağırlığının da kazıklar tarafından taşınması gerekmiştir.

- Şişebilen zeminlerde, zemin hareketi ve yayılı temel altında oluşan gerilmeler kazıklarda çekme gerilmesi artışı meydana getirmiştir.

Liang vd. (2003), çok derin yumuşak zeminlerin bulunduğu durumlarda, kazıklı yayılı temellerin oturma azaltıcı etkisinden yararlanmak için bir yaklaşım sunmuştur (Şekil 3.1). "Karma kazıklı yayılı temel" *(composite piled raft)* adı verilen bu yaklaşımda kısa kazıklar taş kolon olarak yüzeye yakın kısımda zeminin taşıma gücünü yükseltmek için kullanılmakta, uzun kazıklar da oturma azaltıcı olarak daha derinlerdeki sert kile veya varsa taşıyıcı tabakaya oturtulmaktadır. Yayılı temel altında kum ve çakıldan oluşturulan yastık ise kısa kazıklarla uzun kazıklar arasındaki yük dağılımını ayarlamak için kullanılmaktadır. Kum - çakıl yastık kullanıldığında, uzun kazıklara gelen yük yastığın olmadığı duruma göre azalmakta, kısa kazıklara gelen yük ise artmaktadır. Yastığın olmadığı durumda, uzun kazıklara gelen maksimum eksenel gerilme yüzeye yakın kısımlarda oluşurken, yastığın kullanıldığı durumlarda daha aşağılara inmektedir. Optimum yastık kalınlığının bulunması ile kısa kazıkların kapasiteleri tam olarak kullanılmakta, uzun kazıklardaki gerilme dağılışı da ayarlanabilmektedir. Yöntemin kazıklı yayılı temel uygulanmasının sakıncalı olduğu belirtilen çok derin yumuşak zeminler içeren kesitlerde geçerliliği, temeli bu yöntemle inşa edilmiş 7 katlı bir binada alınan ölçümlerle üç boyutlu sonlu eleman çözümleri karşılaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Karma kazıklı yayılı temelin gösterimi (Liang vd., 2003)

3.3. Tasarım Gereksinimleri

Poulos (1991b), kazıklı yayılı temellerin davranışını etkileyen faktörleri şu şekilde vermiştir:

- Yayılı temelin özellikleri (rijitlik, şekil, boyutlar)

- Kazık özellikleri (sayı, çap, boy, yerleşim, rijitlik)
- Yük özellikleri (tekil, düzgün yayılı)
- Zemin özellikleri (zemin profili, rijitlik, taşıma gücü)

Poulos' a (1997b) göre kazıklı yayılı temellerin hesabında kullanılacak yöntemlerin aşağıdaki şartları içermesi gerekir:

- Kazık - yayılı temel - zemin arasındaki etkileşimin uygun bir biçimde değerlendirilmesi,
- Kazıkların sayısının, yerlerinin ve özelliklerinin değişimi,
- Gerçek zemin profillerinin kullanımı,
- Kazıklar ve yayılı temel arasındaki yük paylaşımının hesaplanması,
- Kazıklarda basınç ve çekme için son taşıma gücüne kadar yüklenebilmenin ve temelde doğrusal olmayan yük - deformasyon davranışının incelenebilmesi,
- Tüm temel sisteminde toplam ve farklı oturmaların hesaplanabilmesi,
- Yayılı temelin yapısal tasarımı için eğilme momentleri ve kesme kuvvetlerinin hesaplanması,
- Kullanıcıya ek bir eğitim ve çaba gerektirmeden kullanılabilme.

Poulos (2001b) tüm temel sistemlerinde olduğu gibi, kazıklı yayılı temellerin tasarımında da göz önünde bulundurulması gereken özellikleri şu şekilde belirtmiştir:

- Düşey ve yatay yükler ile moment yükleri için son taşıma güçleri,
- Maksimum toplam oturmalar,
- Farklı oturmalar,
- Yayılı temelin betonarme hesabı için yayılı temelde oluşan momentler ve kesme kuvvetleri,
- Kazıkların betonarme hesabı için kazıklarda oluşan yükler ve momentler.

Kazıklı yayılı temellerin tasarımında en çok düşey yükler altında taşıma güçleri ve oturma davranışları incelenmesine rağmen bazı durumlarda rüzgar veya deprem yüklerinden oluşan momentler de kazık gereksinimini belirlemektedir.

Poulos (2001a), kazıklı yayılı temellerin ekonomik şekilde tasarımının üç aşamalı olması gerektiğini belirtmiştir:

a) Kazıklı yayılı temelin kullanılabilirliğinin belirlendiği, tasarım gereklerinin karşılanması için gerekli kazık sayısının yaklaşık olarak bulunduğu ilk aşama,
b) Kazıkların temel altında nerelere gerekli olduğunun ve kazıkların genel özelliklerinin belirlendiği ikinci aşama,
c) Optimum kazık sayısının, kazıkların yerleşiminin belirlendiği, yayılı temelde oturma dağılımının, eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin; kazıklarda ise yük ve momentlerin hesaplandığı ayrıntılı üçüncü ve son aşama.

İlk iki aşama ileri bilgisayar programlarına ihtiyaç olmadan basit hesaplamalarla yürütülebilir. Ayrıntılı aşamada ise üstyapı - zemin - yayılı temel ve kazıklar arasındaki etkileşimi dikkate alabilen gelişmiş bilgisayar yazılımlarının kullanılması gerekmektedir.

3.4. Alternatif Tasarım Yaklaşımları

Bir çok araştırmacı tarafından geleneksel yöntemlerle hesaplanan kazık sayısının gereğinden fazla olduğunu belirten çalışmalar yapılmıştır (Burland vd., 1977; Padfield ve Sharrock, 1983; Fleming vd., 1992; Randolph, 1994; Hansbo, 1994). Bunlara göre, kazık sayısının aşırı olması sebebiyle beliren oturmalar üst yapının dayanabileceği oturmaların çok altında olmaktadır. "Oturmaları kabul edilebilir seviyelere çekmek için ne kadar kazık gerektiği" ve "farklı oturmaları en aza indirmek için bu kazıkların yayılı temel altında hangi bölgelere konulacağı" soruları Burland vd. (1977) tarafından ortaya konmuştur. Bu yazarlar, yayılı temel altındaki oturmaları azaltmak için gerekli olan kazık sayısının çok az olduğunu, dolayısıyla kazık aralıklarının büyük seçilmesinin gerektiğini ve bu oturmalarla kazık taşıma güçlerinin tamamının kullanılabildiğini belirtmişlerdir. Aynı şekilde Padfield ve Sharrock (1983), ekonomik tasarım yapabilmek için kazıkların oturmaları azaltıcı eleman olarak kullanılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak Fleming vd. (1992) ve Randolph (1994) tarafından kazık gurubunun esnek bir yayılı temelin altında merkeze yakın bölgelere yerleştirilmesinin yeterli olacağı belirtilmiştir.

Oldukça esnek yayılı temellerde bile bu yolla yapılan tasarımın farklı oturmaları azaltacağı bildirilmiştir.

Randolph (1994), kazıklı yayılı temellerin tasarımı için üç farklı yaklaşım ortaya koymuştur:

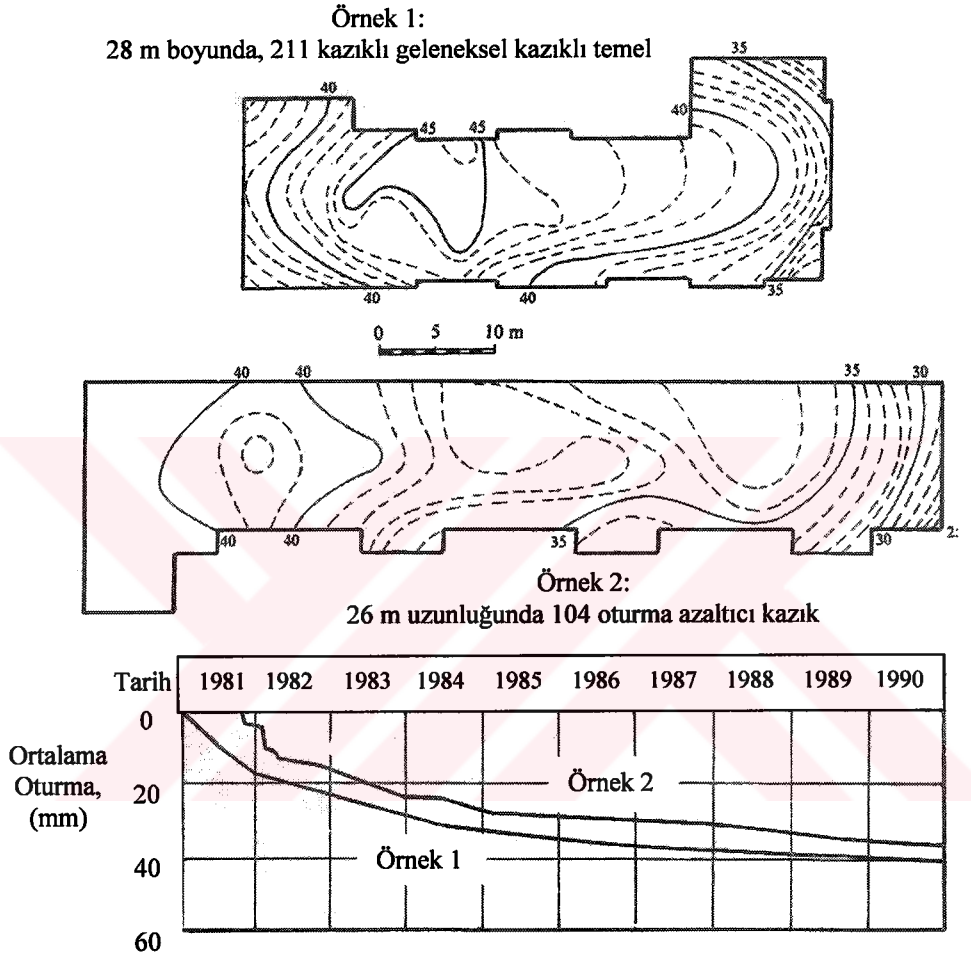
a) Yayılı temelin yük taşımasına izin verilen; fakat kazıkların yükün büyük bir kısmını taşıyacağı şekilde tasarlandığı geleneksel yaklaşım: Kazıkların tüm temel alanına eşit aralıklarla yayıldığı bu yöntemde yayılı temelin rijitliğine (Randolph, 1983; Randolph ve Clancy, 1993) bağlı olarak kazık sayısı azalmakta ve yükün % 60-75' i kazıklar tarafından taşınabilmektedir.

b) Özellikle killi zeminlerde kazıkların tipik olarak son taşıma güçlerinin %70-%80' ine karşılık gelen zeminde sünme davranışının etkinleştiği bir çalışma yükünde tutulduğu ve kazıkların yayılı temelle zemin arasındaki taban basıncını zeminin ön konsolidasyon basıncı altında tutabilecekleri sayıda tasarlandıkları *"creep piling"* yaklaşımı.

c) Ana amacı farklı oturmaları kontrol altında tutmak olan, kazıkların stratejik olarak konumlandırıldığı yaklaşım. İlk iki yaklaşımda kazıklar yayılı temel altına düzgün dağılımla yayılmakta ve amaç toplam oturmaları kabul edilebilir düzeye çekmek olmaktadır. Önceki yöntemlerde farklı oturmalar toplam oturmalardaki azalmalara bağlı olarak düşürülebilmektedir. Bu son yaklaşımda ise amaç doğrudan farklı oturmaları azaltmaktır. Farklı oturmalar denetim altına alındığında toplam oturmalar da kendiliğinden kabul edilebilir düzeylere çekilmektedir.

Cooke vd. (1981) tarafından birinci yaklaşıma örnek olarak verilen vaka analizinde, standart kazık gurubu olarak tasarlanan bir temel sisteminde kazık aralığı oranı (s/d) 3.6 iken eşit aralıklarla yayılmış 350 kazık gerekmektedir. Aynı koşullarda yayılı temelin katkısı ortaya konunca gerekli kazık sayısının 100' den daha az olacağı hesaplanmış ve yapılan ölçümler de bunu doğrulamıştır (Randolph ve Clancy, 1993).

Hansbo (1994) tarafından verilen vaka analizinde biri geleneksel yöntemle (28 m uzunluğunda 211 kazık), diğeri de *"creep piling"* yöntemiyle (26 m uzunluğunda 104 kazık) hesaplanan iki yapının oturma performansları değerlendirilmiştir. Kazık maliyetinde önemli düşüş elde edilmekle birlikte Şekil 3.2' den görüldüğü gibi oturmalardaki farklılığın çok küçük düzeyde kaldığı ifade edilmiştir.

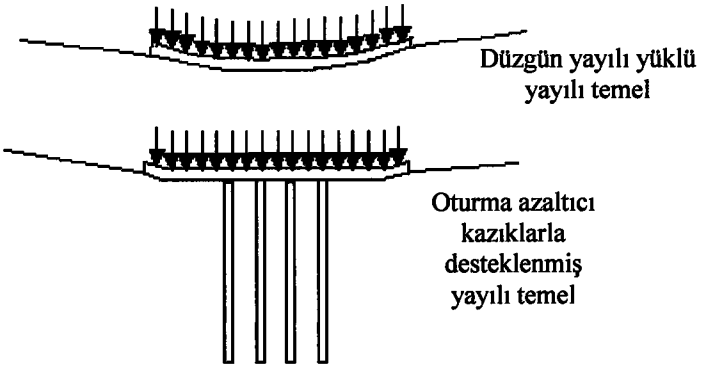


Şekil 3.2: Killi zeminlerde oturma azaltıcı kazıkların kullanılması (Hansbo, 1994)

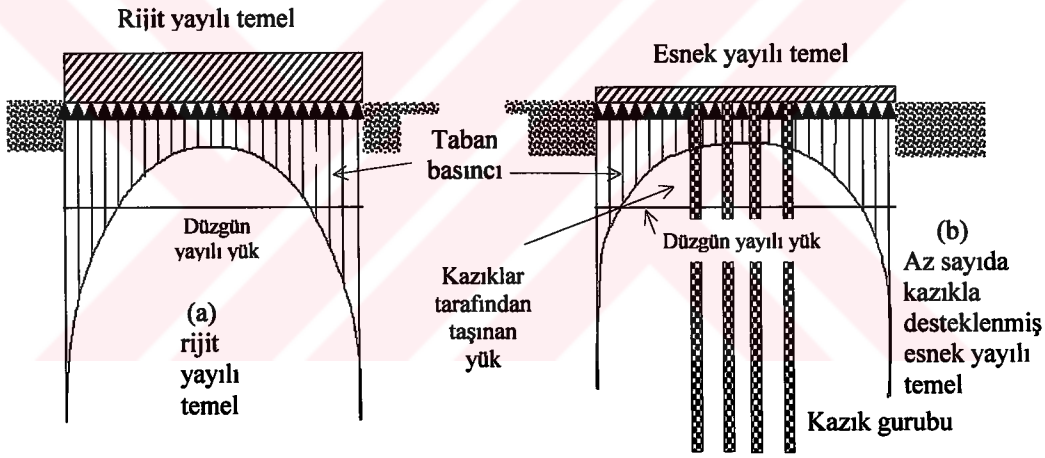
Kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanılması kavramı Randolph (1994) tarafından açıklanmıştır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) . Buna göre üst yapı yükünün planda düzgün dağıldığı kabul edilirse yayılı temelin oturma kalıbı bir "tabak" şeklinde olacaktır. Bu temelin merkez bölgesine eklenecek muhtemelen son taşıma güçlerine yakın yüklenmiş az sayıda kazık bu eğilimi azaltarak farklı oturmaları minimuma çekecektir.

Elastik zeminlerde düzgün yayılı yük etkisindeki rijit bir yayılı temel (farklı oturmalar sıfır) altındaki taban basıncı dağılımı Şekil 3.4.a' daki gibi olacaktır. Bu

taban basıncı dağılımı aynı yük altındaki esnek yayılı temelde de elde edilebilirse yayılı temelde farklı oturmaların büyük oranda azaltılabileceği görülür. Bu da esnek yayılı temelin merkezi altında oluşacak yüksek taban basınçlarını az sayıda kazık ekleyerek düşürmek yoluyla sağlanabilecektir (Şekil 3.4.b).



Şekil 3.3: Kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanılması (Randolph, 1994)



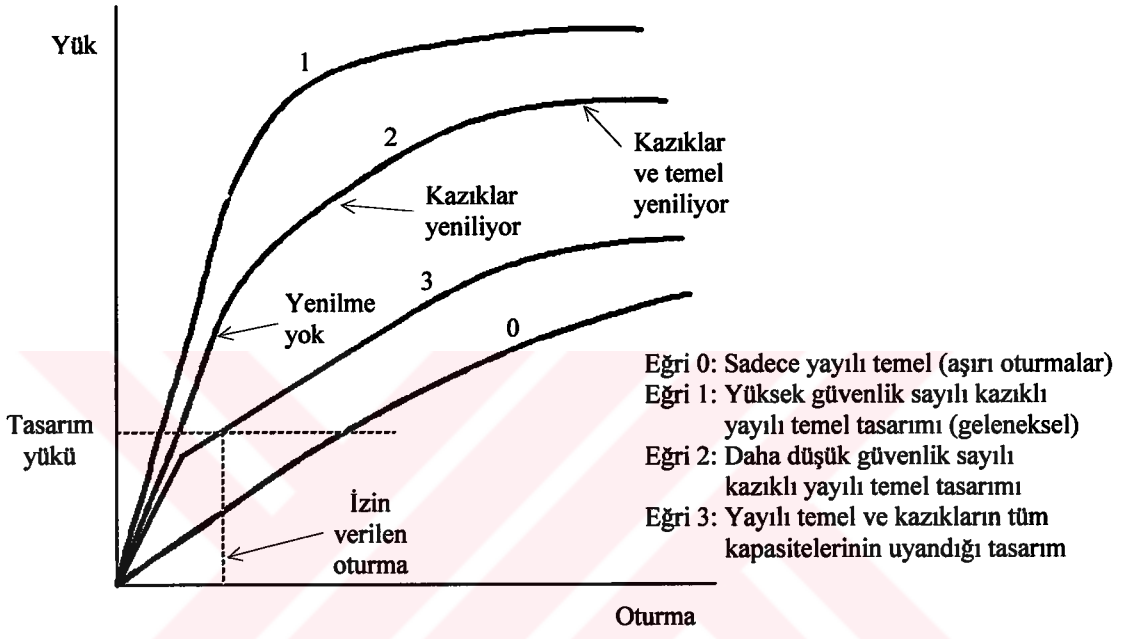
Şekil 3.4: Oturma azaltıcı kazıkların çalışma prensibi, (Randolph, 1994)

Yapılan bir dizi santrifüj deneyi ile bu uygulamanın geçerliliği gösterilmiştir (Horikoshi ve Randolph, 1996). Kilde oturan kazıksız ve kazıklı yayılı temellerin oturma davranışlarını gözlemek amacıyla yapılan 6 gurup deney sonucunda merkezde geleneksel yöntemlere göre belirlenen kazık sayısının sadece %13' ü civarında kazık kullanmanın farklı oturmaları azaltmak için yeterli olduğu belirtilmiştir.

Davis ve Poulos (1972) ve Poulos ve Davis (1980) tarafından elastik koşullarda drenajsız koşullar için üç doğrusal parçadan oluşan yük - oturma davranışı

gösteriminden yola çıkarak çeşitli tasarım felsefeleri için kazıklı yayılı temel sisteminin yük - oturma davranışı Şekil 3.5' te verilmektedir (Poulos, 1997, 2001b).

Eğrilerin birinci bölümünde kazıklar ve temel lineer elastik davranmakta, ikinci bölümde kazıklar son taşıma güçlerine ulaştıktan sonra yayılı temel yük taşımaya devam etmekte, son bölümde de temel sistemi yenilmektedir.



Şekil 3.5: Çeşitli tasarım yaklaşımlarına göre kazıklı yayılı temelin yük - oturma davranışı

Şekil 3.5' te 0 eğrisi tasarım yükünde aşırı oturmaların gözlendiği yayılı temelin yalnız kullanıldığı durumu göstermektedir. 1 eğrisi, kazıklı yayılı temel sisteminin davranışının kazık gurubu tarafından belirlendiği ve tasarım yükünde büyük ölçüde doğrusal davranışın gözlendiği geleneksel yaklaşımı temsil etmektedir. Bu durumda kazıklar yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. 2 eğrisi, daha az sayıda kazık kullanılan ve yayılı temelin eğri 1' dekinden daha fazla yük taşıdığı, ancak taşıma gücü açısından güvenlik sayısının daha düşük olduğu *"creep piling"* durumunu temsil etmektedir. 3 eğrisi ise, kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanıldıkları ve tasarım yükünde kapasitelerinin tümünün kullanıldığı durumu göstermektedir. Buna göre tasarım yükünde yük - oturma davranışı doğrusal olmayabilir ancak tüm temel sistemi için güvenlik sayısı yeterli düzeydedir. Ayrıca, oturma açısından da bir sorun belirmez. Eğri 3' e göre yapılan boyutlandırma uygulanabilirliği yanında 1 ve 2 eğrilerine göre yapılanlardan çok daha ekonomik olmaktadır.

3.5. Analiz Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Son yıllarda kazık tasarımı ampirik yaklaşımlardan teorik temelleri olan metotlara doğru kaymıştır. Kazıklı temellerin daha yaygın olarak kullanılması, bunlarda da hala kontrol edilmesi gereken oturmaların meydana gelmesi ve yapı yüklerindeki artışlar bu gelişmeleri getirmiştir.

Sınır Eleman Yöntemi ve Sonlu Eleman Yöntemi gibi sayısal çözüm tekniklerinin ortaya çıkması ve sayısal analiz yöntemlerindeki gelişmeler sonucunda kazıklı temellerin karmaşık etkileşimleri modellenebilir hale gelmiştir (Ottaviani, 1975; Awad ve Birand, 1992; Russo ve Viggiani, 1995; Mendonca ve Paiva, 2000; Lee vd., 2001; Kim vd., 2001). Bu hızlı ilerlemeler, birbirleriyle benzerlik ve de farklılıklar içeren bir çok yöntemi alternatif çözüm olarak ortaya çıkarmıştır.

Poulos ve Hull (1989), kazıklı temellerin analiz ve tasarım yöntemlerini üç gurupta sınıflandırmıştır (Tablo 3.1). Buna göre birinci guruptakiler geoteknikte çok kullanılan yöntemlerdir. İkinci guruptaki yöntemler önemli basitleştirmeler içermekle birlikte teorik temellere dayanmaktadır ve bunlarda kazık deplasmanlarının hesabı artarak kullanılmaktadır. Çözümde tasarım grafikleri ve basit yazılımlar kullanılmaktadır. Üçüncü gurupta, yere özel zemin incelemeleri yapılarak Sınır Eleman Yöntemi (BEM) ile Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) gibi ileri bilgisayar teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı projenin önemine, eldeki bütçeye, mevcut geoteknik veriye, zemin profili ve yük durumunun karmaşıklığına, tasarımın hangi aşamada olduğuna ve tasarımcının deneyimine bağlıdır.

Poulos (1989), eksenel yüklü kazıkların çözümü için son yıllarda geliştirilen yöntemleri üçe ayırmıştır. Bu yöntemlerin çoğunun Tablo 3.1' de 3. gurupta yer aldığı da belirtilmiştir.

a) Zeminin ve kazıkların yatay bağımsız dilimlere ayrılıp modellendiği basitleştirilmiş yöntemler (Randolph ve Wroth, 1978).

b) Ara yüzey davranışını yansıtan yük aktarımını içeren (Coyle ve Reese, 1966; Kraft vd., 1981) veya zemin kütlesinin davranışını temsil etmek için elastik ortam teorisini kullanan sınır elemanlar yöntemi (Butterfield ve Banerjee, 1971; Poulos ve Davis, 1980).

c) Farklı yapısal zemin modellerinin kullanıldığı, zeminin hetorojen yapısının ve eşyönsüzlüğünün (anizotropi) hesaba katılabildiği çeşitli sonlu eleman yöntemleri (Desai, 1974; Ottaviani, 1975).

Tablo 3.1: Kazıklı temellerin analiz ve tasarım yöntemleri (Poulos ve Hull, 1989)

Gurup	Alt gurup	Karakteristikler	Parametre Belirleme Yöntemi
1	-	Ampirik - zemin mekaniği prensiplerine dayanmayan	Basit arazi ve laboratuvar deneyleri, korelasyonlar
2	2A	Basitleştirilmiş teori ve tasarım eğrilerine dayalı (zemin mekaniği prensiplerini kullanan ve basit hesaplamalar içeren). Teorisi lineer elastik (deformasyon) veya rijit plastik (stabilite)	Uygun arazi deneyleri - Bazı korelasyonlar gerekebilir
	2B	2A' dan farkı teori doğrusal değil (deformasyon) veya elasto plastik (stabilite)	
3	3A	Arazi deneylerine dayanan teori ve zemin mekaniği prensiplerini kullanan. Teori lineer elastik (deformasyon) veya rijit plastik (stabilite)	Uygun gerilme izlerini oluşturan laboratuvar ve / veya arazi deneyleri
	3B	3A' dan farkı göreceli olarak basit şekilde zeminin doğrusal olmayan davranışına izin verilir	
	3C	3A' dan farkı zeminin doğrusal olmayan davranışını uygun şekilde modelleyebilen	

Belirtilen bütün yöntemler içinde sonlu elemanları kullananlar en güçlü çözüm yaklaşımlarını sunmaktadır Bunun nedeni, bu yöntemlerde zeminin yük altında gösterdiği doğrusal olmayan davranış yanında arazide gerçekleşen tüm olayların da sırasıyla modellenebilmesidir. Kazığın yerleştirilmesi, bu işlemden doğan konsolidasyon, yükün kademeli etkimesi (Nystrom, 1984; Withiam ve Kulhawy, 1979) bunlara tipik örneklerdir. Poulos, bu tip analizlerin kazık davranışının ayrıntılı

olarak anlaşılmasında yol gösterdiğini belirtmekle birlikte modellemenin karışıklığı ve geniş geoteknik veri gerektirmesi sebebiyle uygulanabilirliğinin zorluğuna dikkat çekmiştir.

Poulos' a göre karışık problemlere getirdiği basitleştirme sebebiyle kazık ve zemin yanında kazık - zemin ara yüzeyinin modellenebildiği sınır elemanlar yönteminin kullanılmasıyla da hızlı çözüm yapılabilmektedir.

Poulos (1997, 2001a, 2001b), kazıklı yayılı temellerin analizinde kullanılan yöntemleri üç guruba ayırmıştır:

1) Basitleştirilmiş hesap yöntemleri (Poulos ve Davis, 1980; Randolph, 1983, 1994; van Impe ve Clerq, 1995; Burland, 1995).

2) Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri,

a) Yaylar üstündeki şerit yaklaşımı (Poulos, 1991)

b) Yaylar üstündeki plak yaklaşımı (Clancy ve Randolph, 1993; Poulos, 1994a; Viggiani, 1998; Russo ve Viggiani, 1998; Yamashita vd., 1998; Anagnostopoulos ve Georgiadis, 1998).

3) İleri sayısal analiz yöntemleri.

a) Yayılı temel ve kazıkların ayrı ayrı parçalara bölünerek, elastik teori yardımıyla aralarındaki etkileşimin dikkate alındığı sınır elemanlar yöntemi (Butterfield ve Banerjee, 1971; Kuwabara, 1989; Sinha, 1997).

b) Yayılı temelin sonlu eleman yöntemiyle, kazıkların ise sınır eleman yöntemiyle incelendiği birleştirilmiş yöntem (Hain ve Lee, 1978; Ta ve Small, 1996; Franke vd., 1994).

c) Temel sistemini bir düzlem zorlanma problemi (Desai, 1974) veya eksenel simetrik problem (Hooper, 1974) olarak çözen basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri.

d) Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi (Zhuang vd., 1991; Lee, 1993; Wang, 1996; Katzenbach vd., 1998).

Poulos (2001c), kazıklı yayılı temellerin çözüm yöntemlerini incelemiş ve bunların yapabilirliklerini karşılaştırmalı olarak vermiştir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Kazıklı yayılı temel çözüm yöntemlerinin karşılaştırması (Poulos, 2001c)

Yöntem	Elde Edilecek Sonuç					Modelleme			
	Oturma	Farklı Oturma	Kazık Yükü	Yaylı Temel Eğilme Momenti	Burulma, Kesme	Zemin Özellikleri Doğrusal Değil	Kazık Özellikleri Doğrusal Değil	Zemin Özellikleri Üniform Değil	Yaylı Temel Esnekliği
Poulos ve Davis (1980)	X	0	0	0	0	0	X	0	0
Randolph (1983)	X	0	X	0	0	0	0	0	0
Van Impe ve Clerq (1995)	X	X	0	0	0	0	0	0	0
Poulos (1994), (Eşlenik Temel)	X	X	0	0	0	0	0	0	0
Brown ve Wiesner (1975)	X	X	X	X	0	0	0	0	X
Clancy ve Randolph (1993)	X	X	X	X	X	0	0	X	X
Poulos (1994)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kuwabara (1989)	X	0	X	0	0	0	0	0	0
Hain ve Lee (1978)	X	X	X	X	X	0	X	0	X
Sinha (1997)	X	X	X	X	X	X	X	0	X
Franke vd. (1994)	X	X	X	X	X	0	X	0	X
Hooper (1973)	X	X	X	X	0	X	0	X	X
Hewitt ve Gue (1994)	X	X	X	X	0	0	0	X	X
Lee vd. (1993)	X	X	X	X	X	0	0	X	X
Ta ve Small (1996)	X	X	X	X	X	0	0	X	X
Wang (1996)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Katzenbach (1998)	X	X	X	X	X	X	X	X	X

3.5.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri

Bu yöntemler elastik ortamda teorik çalışmaları içerirler, bilgisayar kullanımını gerektirmeyen yaklaşık hesap yöntemleridir.

1) Tüm sistemin yük - oturma eğrisinin basitleştirildiği elle hesap yönteminde, kazıklı yayılı temelin veya yalnız yayılı temelin rijitliğinin, kazıkların ve yayılı temelin son taşıma gücünün bulunması için elastik çözümler kullanılır (Poulos ve Davis, 1980). Ortaya çıkan yük - oturma eğrileri üç bölümden oluşur. Bu yöntemde yayılı temelin esnekliği dikkate alınamaz ve yalnız yayılı temelin olduğu durumda sadece tam rijit *(perfectly rigid)* veya tam elastik *(perfectly elastic)* yayılı temeller incelenebilir.

2) Randolph (1983,1984), kazıklı yayılı temel sisteminin rijitliği ile kazıklarla yayılı temel arasındaki yük paylaşımı için yaklaşık bağıntılar geliştirmiştir. Aşağıdaki bağıntılar birçok durumda kullanılabilir:

Kazıklı yayılı temelin rijitliği:

$$k_{pr} = \frac{1 - 0.6 \cdot \left(\frac{k_r}{k_p}\right)}{1 - 0.64 \cdot \left(\frac{k_r}{k_p}\right)} \cdot k_p \qquad (3.1)$$

Burada k_{pr}: Kazıklı yayılı temelin rijitliği, k_r: Yayılı temelin rijitliği, k_p. Kazıkların rijitliği.

Kazıklar tarafından taşınan yükün oranı:

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2}{1 - 0.8 \cdot \left(\frac{k_r}{k_p}\right)} \cdot \frac{k_r}{k_p} \qquad (3.2)$$

Burada P_r: Yayılı temel tarafından taşınan yük, P_p: Kazıklar tarafından taşınan yük.

Randolph' un yöntemi doğrusal davranan kazıklı yayılı temel sistemleri ile sınırlıdır (Şekil 3.5' te 1 nolu eğri). Dolayısıyla yayılı temelin yük taşıdığı kazık gurupları olarak geleneksel tasarım yöntemi için uygundur.

Franke (1994) tarafından Randolph' un yöntemine benzer bir yöntem ortaya konmuştur. Bu yöntem kazık ve yayılı temel rijitliklerine ek olarak kazık - yayılı temel ve yayılı temel - kazık etkileşimini dikkate alır.

Bu guruba düşen yöntemler arasında Van Impe ve de Clerq (1995) yöntemi, eşlenik yayılı temel yöntemi ve eşlenik kuyu temel yöntemi sayılabilir.

Poulos vd. (2001a, 2001b), kazıklı yayılı temel tasarımında ilk aşama için Poulos ve Davis (1980) ve Randolph (1994) tarafından yük - oturma davranışının tahminine yönelik ortaya konan yaklaşımları birleştirerek kazıklı yayılı temel davranışının incelenmesinin uygun olduğunu belirtmiştir. Poulos - Davis - Randolph (PDR) yöntemi adı verilen yaklaşımda iki ana amaç, temelin son taşıma gücünün bulunması ve basit üç kırıklı doğru *(three - linear)* ilişkisini kullanarak yük - oturma davranışının tahmin edilmesidir (Şekil 3.7).

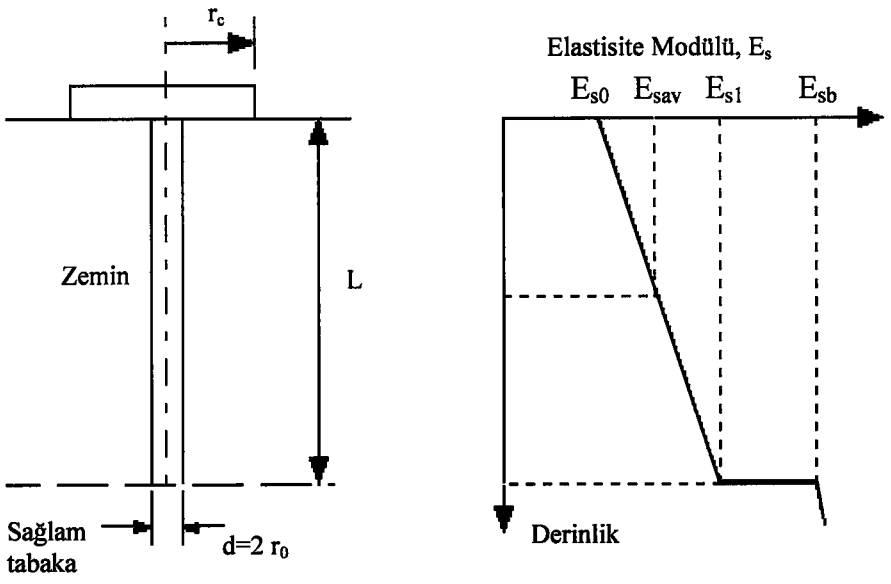
Böylece kazıklı yayılı temelin taşıma gücü aşağıda verilen iki değerden düşük olanı olarak seçilebilir:
- Yayılı temelin ve tüm kazıkların son taşıma güçlerinin toplamı.
- Kazıkları ve yayılı temeli içine alan bloğun son taşıma gücüne blok dışında kalan yayılı temel son taşıma gücünün ilave edilmesi ile bulunan toplam değer.

Şekil 3.6' da kazık - yayılı temel probleminin Randolph (1994) tarafından tanımlanmış gösterimi sunulmaktadır.

Bu yaklaşıma göre kazıklı yayılı temelin rijitliği şu şekilde tahmin edilebilir:

$$k_{pr} = \frac{k_p + k_r \cdot (1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha^2_{cp} \cdot k_r \cdot k_p} \tag{3.3}$$

Burada k_{pr}: Kazıklı yayılı temelin rijitliği, k_p: Kazık gurubunun rijitliği, k_r: Sadece yayılı temelin rijitliği, α_{cp} : Kazıklar ve yayılı temel arasındaki etkileşim faktörüdür.



Şekil 3.6: Kazık - yayılı temel elemanının basitleştirilmiş gösterimi (Randolph, 1994)

Yayılı temel rijitliği (k_r), elastik teori yardımıyla örneğin Fraser ve Wardle (1976) veya Mayne ve Poulos (1999) tarafından verilen çözümlerle tahmin edilebilir. Kazık gurubunun rijitliği de gene elastik teori yardımıyla Poulos ve Davis (1980), Fleming vd. (1992) veya Poulos (1989) yaklaşımlarıyla hesaplanabilir. Son verilen yaklaşımlarda, tekil kazığın rijitliği elastik teori yardımıyla hesaplanmakta, daha sonra gurup rijitliği etkinlik faktörüyle çarpılarak elastik çözümlerden yaklaşık olarak bulunabilmektedir.

Toplam yükün yayılı temel tarafından taşınan kısmı:

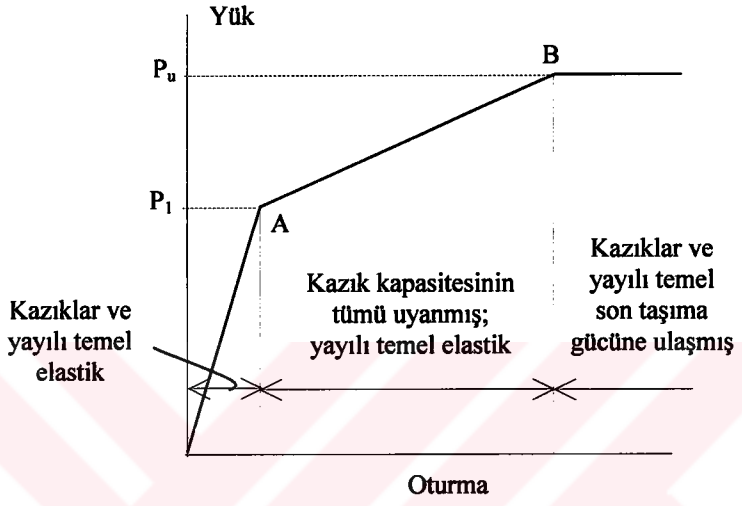
$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k_r \cdot (1-\alpha_{cp})}{k_p + k_r \cdot (1-\alpha_{cp})} = X \tag{3.4}$$

şeklinde verilmektedir. Burada; P_r, yayılı temel tarafından taşınan yükü, P_t ise toplam yükü göstermektedir.

Kazıklarla yayılı temel arasındaki etkileşim faktörü şu şekilde verilmektedir:

$$\alpha_{cp} = 1 - \frac{\ln(r_c / r_0)}{\zeta} \tag{3.5}$$

Burada: r_c: Kazık başlığının ortalama yarıçapı (yayılı temel alanının kazık sayısına bölümü ile elde edilen alana karşılık gelen değer), r_0: Kazık çapı, $\zeta = \ln(r_m/r_0)$, $r_m = \{0.25 + \xi \cdot [2.5 \cdot \rho \cdot (1-\nu) - 0.25]\} \cdot L$, $\xi = E_{s1}/E_{sb}$, $\rho = E_{sav}/E_{s1}$, υ: Zeminin Poisson oranı, L: Kazık boyu, E_{s1}: Kazık ucu seviyesinde zemin elastisite modülü, E_{sb}: Kazık ucu altında taşıyıcı tabakanın elastisite modülü, E_{sav}: Kazık boyunca zeminin ortalama elastisite modülü.



Şekil 3.7: Kazıklı yayılı temelin üç doğrusal parçadan oluşan yük-oturma davranışı (Randolph, 1994)

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak Şekil 3.7' de verilen üç doğru parçasından oluşan *(three - linear)* yük - oturma eğrisi hazırlanabilir. Önce düşünülen kazık sayısına bağlı olarak kazıklı yayılı temelin rijitliği hesaplanır. Kazık kapasitesinin tümü kullanılana kadar bu rijitlik uygulanır. Kazıkların kapasitelerine erişildiğinde tüm kazık yükünün oluştuğu basitleştirmesiyle taşınan toplam yük,

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1-X} \tag{3.6}$$

şeklinde verilmektedir. Burada; P_{up}: Guruptaki kazıkların son taşıma güçleri ve 1-X: Kazıklar tarafından taşınan yükün oranı olmaktadır.

Bu noktadan sonra (Şekil 3.7' de A noktası), temel sisteminin rijitliği sadece yayılı temelinki ile temsil edilmektedir ve bu durum kazıklı yayılı temel sisteminin son

taşıma gücüne ulaşılıncaya kadar sürer (B noktası). Bu aşamadan sonra yük - oturma ilişkisi yataylaşmaktadır.

Herhangi bir matematik yazılımıyla (Excel, Matlab vb.) bilgisayarda değişik sayıda kazık için kazıklı yayılı temelin yük - oturma davranışı incelenebilir. Bu tip hesaplamalarla oturmalar ve güvenlik sayısına karşılık düşey taşıma gücü hakkında bir fikir edinilebilir.

3.5.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri

Zemine oturan plak veya şeritlerin incelendiği yöntemler kullanılarak, kazıkların yaylarla temsil edildiği çalışmalardır.

1) Yaylar üstündeki şerit yaklaşımı: Yayılı temel kesitinin şerit, kazıkların yaylarla temsil edildiği bu yaklaşım için Poulos (1991) örnek olarak verilebilir. Bu yöntemde dört etkileşim de *(raft - raft, pile - pile, raft - pile, pile - raft)* yaklaşık olarak hesaba katılmakta, şerit dışında kalan kısmın etkisi de dikkate alınabilmektedir. Yöntem daha ileri olan bir çok yöntemle uyumlu sonuçlar verebilmektedir. Ancak yöntemin yayılı temelde doğan burulma momentlerini dikkate alamama gibi yetersizliği vardır.

Brown ve Wiesner (1975) ve Wiesner ve Brown (1976) sınır elemanlar yöntemiyle bir kazıklı şeridi incelemişler ve bunun kazıklı yayılı temele nasıl uygulanabileceği hakkında çalışmalar yapmışlardır.

2) Yaylar üstündeki plak yaklaşımı: Yayılı temelin elastik bir plak, kazıkların ise bunu destekleyen yaylarla temsil edildiği *(plate on springs)* sistem.

Hongladaromp vd. (1973), bazı etkileşimleri ihmal etmiş ve bu nedenle rijitlikler çok yüksek çıkmıştır.

Poulos (1974), plak için sonlu farklar yöntemi uygulamış, yaklaşık elastik çözümlerle çeşitli etkileşimleri tanımlamıştır. Son taşıma gücüne ulaşan kazıkların

etkileri, yayılı temel altında yenilme meydana gelmesi, dış zemin hareketleri yöntemin içinde incelenebilmektedir.

Clancy ve Randolph (1993), kazıkların çubuk sonlu eleman guruplarıyla, yayılı temelin ise iki boyutlu ince plak elemanlarla modellendiği bir yaklaşım sunmuşlardır. Etkileşimin dört bileşeni *(raft - raft, pile - pile, raft - pile, pile - raft)* elastik analizler yoluyla dikkate alınmıştır. Yöntem, temel sisteminin elastik davranışıyla kısıtlıdır.

Buna benzer bir yaklaşım, Franke vd. (1994) tarafından sunulmuştur. Bu yöntemde doğrusal olmayan kazık davranışı hiperbolik çevre *(shaft)* ve taban *(base)* davranışı özellikleri ile hesaba katılmıştır.

Yamashita vd. de (1994), yayılı temel ve yaylar tarafından temsil edilen kazıklarla zemini modellemek için sonlu eleman yaklaşımını kullanmıştır.

3.5.3. Karışık sayısal analiz yöntemleri

3.5.3.1. Sınır eleman yöntemi

Bu yaklaşımda yayılı temel ve her bir kazık ayrı parçalara bölünür. Bu yaklaşıma göre yapılan ilk çalışmalardan biri Butterfield ve Banarjee (1971) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada kazık gurubu elastik zemin kütlesi üzerinde oturan rijit bir başlık şeklinde analiz edilmiştir.

Kuwabara (1989), elastik zemin kütlesi üzerinde oturan bir kazıklı yayılı temelin analizini tanımlamıştır. Bu çalışmada kazıklı temel rijittir ve kazıkların sıkışabilirlikleri dikkate alınmıştır. Bu çalışma sonunda, normal kazık aralıkları için elastik şartlarda yayılı temelin küçük oranlarda yük aldığı bulunmuştur.

Poulos (1993), Kuwabara' nın analizini serbest ortam zemin hareketlerine *(free - field soil movements)* izin verecek ve yayılı temelle zemin arasındaki taban basınçlarına bir sınır getirecek şekilde genişletmiştir. Ayrıca kazıklar için çekme ve

basmada son yüklerin kullanılmasına izin verilmiştir. Ancak bu çalışmada da yayılı temel rijit olarak kabul edilmiştir.

3.5.3.2. Sınır ve sonlu eleman yöntemlerinin birlikte kullanıldığı yöntemler

Hain ve Lee (1978), yayılı temelin ince plak sonlu elemanlar tarafından temsil edildiği, kazık özelliklerinin ise sınır eleman yöntemiyle hesaplandığı bir yayılı temel analizi sunmuşlardır. Yöntem elastik analiz yapmakla birlikte programda kazıkların taşıyabileceği yükler için bir limit *(cut - off)* getirilmiştir. Yöntemin yetersizliği, zeminin yarı sonsuz homojen bir elastik ortam olarak temsil edilmesidir.

Franke vd. (1994) kazıklar için sınır eleman analizlerini, yayılı temel için sonlu eleman analizlerini kullanan bir yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde kazıkların doğrusal olmayan davranışı ve kazık çakma sonrasında zemindeki kalıntı gerilmeler dikkate alınabilmektedir.

Sinha (1997), tüm kazıkların sınır eleman yöntemiyle tanımlanıp analiz edildiği, yayılı temelin ise ince plak sonlu elemanlarla temsil edildiği bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde zemin homojen - elastik bir ortam olarak kabul edilmiştir. Ancak hem çekme hem de basma için yayılı temel - zemin temas basınçlarına sınır getirilerek doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Ayrıca kazık ile çevreleyen zemin arasındaki ve kazık ucundaki gerilmelere sınırlama getirilmiştir. Zeminin şişmesi ve konsolidasyonu hesaplanarak serbest ortam zemin hareketleri de hesaba katılabilmektedir.

3.5.3.3. Basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemleri

Basitleştirilmiş yöntemler genellikle kazık gurubunun veya kazıklı yayılı temelin düzlem zorlanma problemi (Desai, 1974) veya eksenel simetrik (Hooper,1973; Naylor ve Hooper, 1974) problem olarak temsil edildiği yaklaşımları içerir. Her iki yöntemde de yayılı temel ve zemin sonlu elemanlarla temsil edildiğinden zeminin ve yayılı temelin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınabilmektedir. İki fazlı zemin yapısını temsil etmekle konsolidasyon sebebiyle zamana bağlı kazık yük

dağılımlarında oluşan değişim ve oturmalar hesaplanabilmektedir. Hooper (1979), Londra' da bir binada gözlemlenen davranışla problemin eksenel simetrik modellemesinden tahmin edilen sonuçların benzer olduğunu göstermiştir. Bu yöntemlerle yapılan çözümlerde de yayılı temeldeki burulma momentleri elde edilememektedir.

Hewitt ve Gue (1994), karstik kireçtaşı içeren bir zemin profilinde sonlu farklar yöntemiyle hesap yapan FLAC (Itasca 1991) yazılımını kullanarak kazıklı yayılı temel analizi yapmıştır. Burada temel ve zemin düzlem zorlanma problemi olarak tanımlanmış, yaklaşık olsa da temelin oturmasında kireçtaşındaki boşlukların etkisi dikkate alınabilmiştir.

3.5.3.3.1. İki boyutlu (düzlem zorlanma) sonlu eleman çözümü

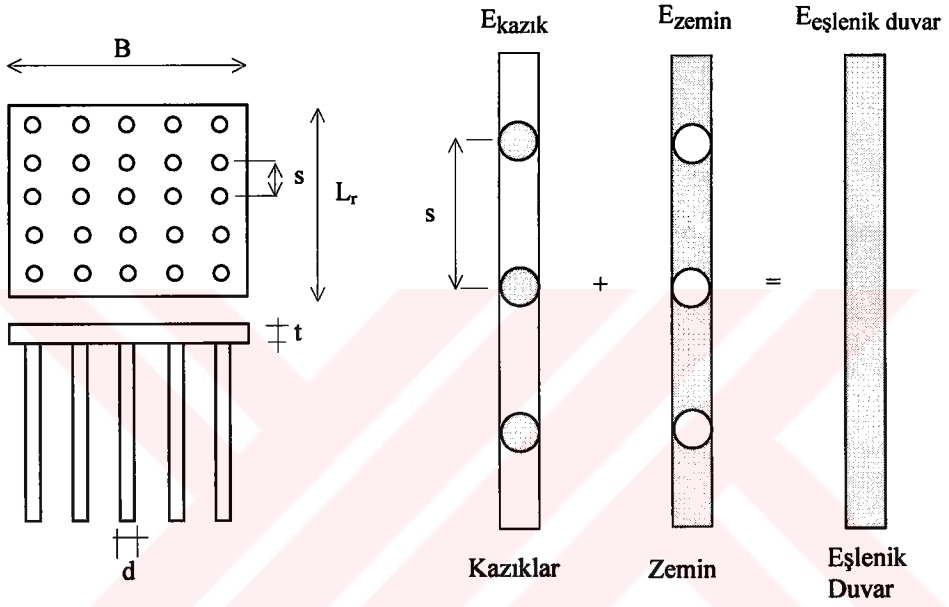
Üç boyutlu kazıklı yayılı temel problemi, sonlu elemanlar yöntemiyle Şekil 3.8' de verildiği şekilde kazıkların aynı eksenel rijitliğe sahip eşlenik duvara dönüştürülmesi için yapılan kabullerle iki boyutlu düzlem zorlanma problemi olarak çözülebilmektedir (Desai vd., 1974; Hewitt ve Gue, 1994; Prakoso ve Kulhawy, 2001). Zeminin rijitliği, kazıklara göre çok düşük olduğundan eşlenik duvarın eksenel rijitliği hesaplanırken zeminin etkisi ihmal edilebilmektedir (Randolph, 1981).

Desai vd. (1974), üç boyutlu problemlerin, sonlu elemanlar yöntemiyle eşlenik iki boyutlu düzlem zorlanma problemi olarak çözülmesine yönelik bir çalışma ortaya koymuştur. Dayanma yapısı altında kullanılan kazıklar, aynı eksenel rijitliğe ve boya sahip birim genişlikteki eşlenik bir duvarla temsil edilmiştir. Eşlenik duvar için elastisite modülü:

$$E_e = \frac{n_p \cdot A_p \cdot E_p}{A_e} \qquad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, E_e: Eşlenik duvarın elastisite modülü, n_p: Bir sıradaki kazık sayısı, A_p: Kazık kesit alanı, E_p: Kazık elastisite modülü, A_e: Eşlenik alan ($A_e = d \cdot L$), L : Temel Boyutu, d : Kazık çapı olmaktadır.

Yaklaşık sonlu eleman çözümüyle bulunan sonuçların gözlemlerle uyuştuğu, yöntemin uygulanmasıyla büyük ölçüde zaman ve emek tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir.



Şekil 3.8: Kazıklı temelin düzlem zorlanma problemine çevrilişi

Prakoso ve Kulhawy (2001), iki boyutlu sonlu eleman yazılımı olan PLAXIS (Vermeer ve Brinkgreve, 1995) programını kullanarak drenajsız koşullarda yüzen *(floating)* kazıklı yayılı temelleri elastik ve elasto - plastik zemin özellikleriyle inceleyen bir çalışma ortaya koymuştur. Model oluşturulurken kazıklar, Desai vd. (1974) tarafından önerilen biçimde eşlenik duvara dönüştürülmüştür. Eşlenik düzlem zorlanma kazıkları ile gerçekte kazıkların aynı uç ve çevre direncine sahip olması için de bir başka basitleştirmenin yapılması gerekmektedir. Bu çözümde uç alanı değiştirilemediği için uç direnci ile ilgili bir değişiklik yapılamamaktadır. Derin kazıklarda uç direnci etkisinin daha az olduğu belirtilerek bu katkı ihmal edilmiştir. Modelde çevre direnci ara yüzey *(interface)* elemanları kullanılarak modellenmiştir. Her bir duvarda iki yan yüzey olduğu için bir ara yüzey elemanın eşlenik çevre direnci,

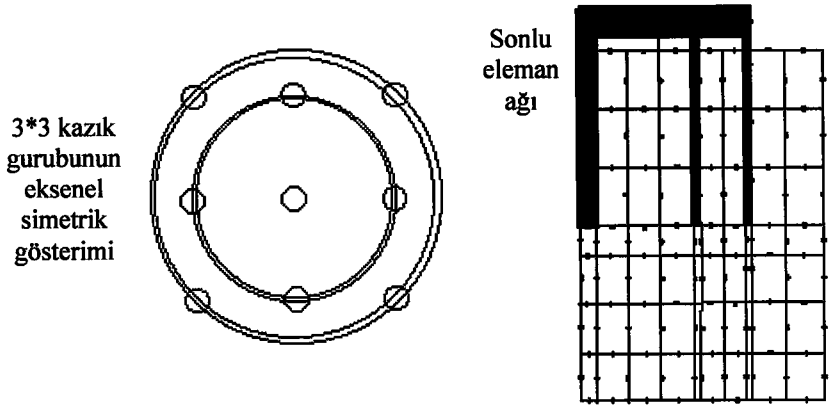
$$f_{s-eq} = \frac{n_{p-row_i} \cdot A_s \cdot f_s}{2 \cdot L_r} \tag{3.8}$$

Burada A_s: Birim derinlik için bir kazığın çevre alanı, f_s: Kazık boyunca etkiyen birim çevre sürtünmesi, L_r: Yayılı temel uzunluğudur.

İki boyutlu çözümde toplam oturmaların üç boyutlu çözümlere göre % 5 ile % 25 arasında fazla çıktığı, ayrıca üç boyutlu çözümlerde elde edilen temel merkezi - köşe arasındaki farklı oturmaların düzlem zorlanma çözümünde elde edilemediği belirtilmiştir.

3.5.3.3.2. Eksenel simetrik sonlu eleman çözümü

Hooper (1979) tarafından ortaya konan eksenel simetrik modellemede kazıklar eşlenik halkalarla temsil edilmiştir (Şekil 3.9). Buna göre halkaların merkezleri temsil ettikleri kazıkların merkezleri ile çakışmakta; halka kalınlığı, halka kesit alanının temsil ettiği kazıkların toplam kesit alanına eşit olacak şekilde seçilmektedir. Halka alanları farklı olduğundan toplam yüzey direncinin bulunması amacıyla kazık - zemin yapışma değeri ayarlanmakta; basitleştirme için bu değerler halkaların her iki tarafında eşit alınabilmektedir.



Şekil 3.9: Kazıklı yayılı temel probleminin eksenel simetrik gösterimi (Hooper, 1979)

Pressley ve Poulos (1986), çalışmalarında kare düzeninde kazık grupları için doğrusal olmayan yük - oturma davranışını incelemişlerdir. Kazık gurubu, eşlenik eksenel simetrik modelle temsil edilmiştir. Değişen kazık aralıkları sonucu ortaya

çıkan kazık gurubu davranışlarının incelenmesi için doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Kazık aralığının küçük olduğu durumlarda gurupta blok halde göçme meydana gelmiştir. Kazık gurubunun altında belirgin plastik bölgeler oluşmuş, kazık - zemin arasında kayma sadece dış kazıklarda görülmüştür. Kazık aralığı arttıkça yenilme mekanizması tek kazık yenilmesi durumuna yönelmiş ve kazık aralığının kazık çapının 8 katı olduğu durumda kazık - zemin arasında kayma tüm kazıklarda belirmiştir. Çözümler sonunda elde edilen gurup oturma oranı ve gurup etkinliğinin diğer yöntemlerle uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

3.5.3.4. Üç boyutlu sonlu eleman yöntemi

Ottaviani (1975), kazıklı temellerin üç boyutlu olarak modellenmesinde ilk uygulayıcı olarak gözükmektedir. Zhuang vd. (1991) ve Lee (1993) kazıklı yayılı temeldeki oturmaları ve yük dağılımını incelemek için yaptıkları parametrik çalışmada üç boyutlu doğrusal sonlu eleman analizi kullanmışlardır.

Ottaviani (1975), homojen lineer elastik ortamdaki düşey yüklü tekil kazık ve kazık guruplarının davranışını eksenel simetrik ve üç boyutlu elemanlar kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Kazık gurubunun başlıklı veya başlıksız olma durumuna göre kazıklarda ve zeminde gerilme dağılımı ortaya konmuş ve başlıklı durumda yük aktarma davranışı incelenmiştir. Tekil kazık için yapılan eksenel simetrik sonlu eleman çalışmasına (Ottaviani, 1972) referans verilerek modelde, daire kesitli kazık yerine kare kesitli kazık kullanılmasının oturma ve gerilme değerlerinde bir farklılık ortaya çıkarmadığı belirtilmiştir. Kazık başlığının zeminle temas ettiği fakat kenarlarda temasın olmadığı bildirilmiştir. Kazıklarla zemin ara yüzeyinde göreceli harekete izin verilmemiş; modelde yan sınırlar sonuçların etkilenmeyeceği kadar geniş seçilmiştir. Sonuçlarda, başlık olması durumunda kazıklar arasındaki yük dağılımının eşit olmadığı, özellikle düşük dirençli zeminlerde içte kalan kazıkların daha az yük aldığı belirtilmiştir. Başlığın zeminle temas etmesinin kazıkların üst kısımları çevresindeki zeminde kayma gerilmelerini azalttığı, ancak kazık ucu altındaki zeminde düşey gerilmeleri artırdığı, kazık çevresindeki zeminde kayma gerilmelerinin derinlikle değişken olduğu ve kazık ucunun hemen üstündeki bölgede çok yüksek gerilmelerin oluştuğu da bulunmuştur.

Muqtadir ve Desai (1986), kazıklı temellerin analizi için üç boyutlu lineer olmayan sonlu eleman çözüm yöntemi sunmuşlardır. Yöntemde kumun elastik, doğrusal olmayan elastik ve elastik - plastik pekleşme *(hardening)* davranışı gözönüne alınabilmektedir. Kazık - zemin ara yüzeyindeki etkileşimi hesaplara içerebilmek için ince ara yüzey elemanı *(thin - layer interface element)* kullanılmıştır. Sayısal çözümden elde edilen deplasman ve yük değerleri laboratuvar model deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, doğrusal olmayan zemin davranışı ve kazık - zemin ara yüzeyindeki göreceli hareketler tartışılmıştır. Bu çalışmada temel, kazıklar ve zemin üç boyutlu, 8 düğümlü, 6 yüzlü elemanlarla modellenmiş, zemin ve kazık arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için yine 8 düğümlü ince ara yüzey elemanları tanımlanmıştır. Sonlu eleman analizi sonuçları, diğer yaklaşımlar ve laboratuvar model deney sonuçları ile uyum göstermiştir.

Ta ve Small (1996), yayılı temeli ince plak sonlu elemanlarla, zemini de sonlu tabaka yöntemiyle *(finite layer method)* tanımlayarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem doğrusal zemin davranışı modeli ile sınırlı olmakla birlikte tabakalı zemin sistemlerinde etkili çözüm yapabilmektedir. Ayrıca kazıkların konumları ile ilgili bir sınırlama da getirilmemiştir.

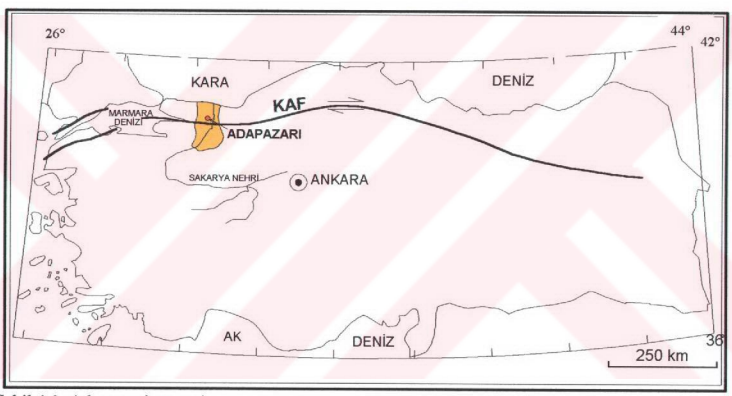
Wang (1996), düşey yük alan kazıklı yayılı temelde doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu eleman yöntemini kullanarak ortaya gelişmiş bir çalışma çıkarmıştır.

Reul ve Randolph (2003), aşırı konsolide Frankfurt kili üzerinde inşa edilmiş üç gökdelende yapılan oturma ölçümleri ile sonlu eleman çözümlerini karşılaştırmıştır. Yapılan üç boyutlu sonlu eleman analizinde, kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanıldığı durumda oluşacak oturmaların sadece yayılı temel olması durumundaki oturmaların %51-63'ü civarında gerçekleşeceği bulunmuş ve sonlu eleman analizi sonuçlarının ölçümlerle uyum gösterdiği belirtilmiştir.

BÖLÜM 4. ADAPAZARI ÖRNEĞİ

4.1. Jeoloji, Jeomorfoloji ve Deprem Durumu

Adapazarı, Türkiye'nin kuzey batısında İstanbul' un doğusunda yer alan yaklaşık 200000 nüfuslu bir tarım, ticaret ve endüstri şehridir (Şekil 4.1).

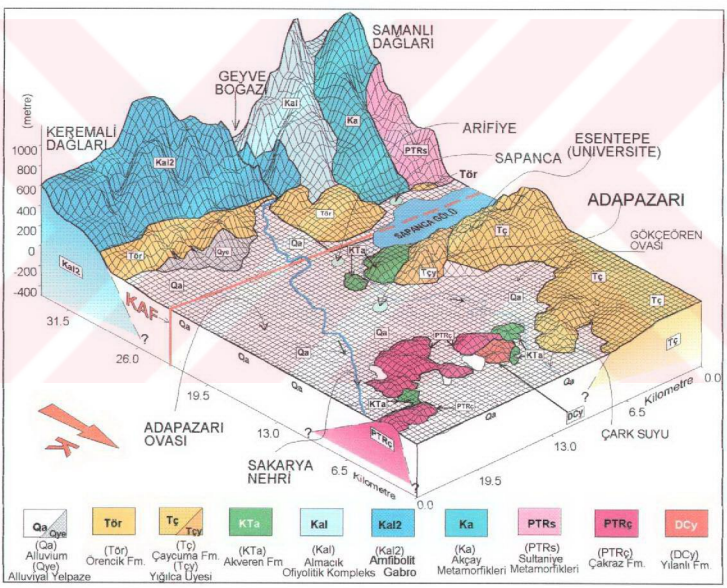


Şekil 4.1: Adapazarı'nın yeri

Önalp ve Bol (1998), Adapazarı kent merkezi jeolojisi ve jeomorfolojisi hakkında bilgiler derlemiştir. Adapazarı, uzun doğrultuda Sapanca Gölü - Hendek güneybatısı arasında 32 km, kısa doğrultuda kuzeyde Mağara Boğazı - güneyde Akyazı batısı arasında 27 km kadar uzanan yaklaşık bir paralelkenar biçimindeki Adapazarı Ovası' nın batısında kuruludur. Şehir genç aluviyal (fluviyal) dolgu üzerinde ve yayılmanın daha çok kuzey - güney doğrultusunda oluştuğu tipik bir ova kentidir (Şekil 4.2). Adapazarı şehrinin kurulmuş olduğu saha genelde düz bir görünüme sahip olup şehir merkezinin deniz seviyesine göre yüksekliği 31 m civarındadır. Bu yükseklik kuzeydoğu yönünde ‰0.5, kuzeybatı yönünde ‰2' lik bir eğimle azalma gösterir.

Kentleşme sınırlarındaki bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkileri kısmen bozmaktadır.

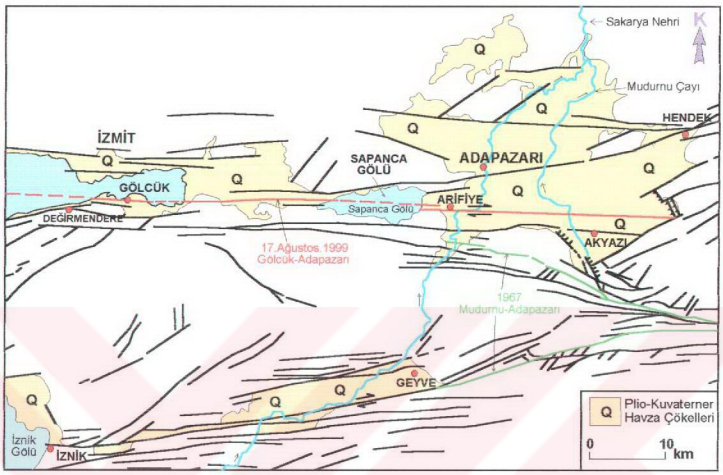
Adapazarı zeminleri oluşumları açısından az rastlanır özellikler göstermektedir. Kentin üzerinde kurulu olduğu Adapazarı Ovası' nı temsil eden çok derin ve genç çökeller düşey ve yanal olarak ani değişimler gösteren bir yapıya sahiptir. Aluviyonun kaynağını büyük oranda Geyve Boğazı' ndan Adapazarı Ovası' na ulaşan Sakarya Nehri ile Sapanca Gölü' nün fazla yükünü boşaltan Çark Suyu oluşturmaktadır. Kil, silt, kum ve nadiren çakıl bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik dizilimleri şeklinde ardalanmalı olarak görülmektedir.



Şekil 4.2: Adapazarı jeoloji haritası (Bol, 2003)

En büyük kalınlığı yaklaşık 1000 metre olarak tahmin edilen aluviyal dolgu üzerinde yer alan Adapazarı, ortalama 10 yıllık aralıklarla büyüklüğü 7' yi aşabilen depremler üreten ve Türkiye' nin kuzeyinde doğudan - batıya uzanan Kuzey Anadolu Fayı'ndan

dolayı tektonik açıdan aktif bir konumdadır (Şekil 4.3) ve çeşitli tarihlerde meydana gelmiş olan şiddetli depremlerden büyük hasar görmüştür.



Şekil 4.3: Sakarya bölgesinin neotektonik haritası (Koçyiğit vd., 1999)

4.2. 1999 Depremleri

Adapazarı, 1999 Kocaeli (M_w=7.4) ve Düzce (M_w=7.2) depremleriyle büyük yıkıma uğramış, depremler sırasında binlerce can kaybı ve önemli maddi kayıp meydana gelmiştir. Oluşan hasarın nedeni olarak, kentin üzerinde oturduğu aluviyal kökenli zemin gösterilmiş, "kötü" olarak nitelendirilen zemin özellikleri sebebiyle idari makamlar tarafından kat sayısı kısıtlamasına gidilmiştir. Sadece gözlemlere dayanan ve bilimsel / teknik dayanağı olmayan bu sınırlamanın gerçeği tam yansıtmadığı depremler sonrasında yapılan zemin araştırmalarıyla ortaya konmuştur.

Bray ve Stewart (2000), depremlerde hasar gören yapılarda yaptıkları gözlemler sonucunda oturma, taşıma gücü kaybı ve yanal yer değiştirmelerin yer altı su seviyesinin yüzeye yakınlığı nedeniyle bodrumsuz inşa edilen ve temelleri yüzeye oturtulan binalarda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Önalp vd. (2001), 1999 depremleri sonucunda ortaya çıkan hasarları değerlendirmişler ve kentte meydana gelen büyük kaybın sebebi olarak sadece zemin koşullarının gösterilemeyeceğini belirtmişlerdir. Yapılan ayrıntılı çalışmalar sonucunda hasarın sebepleri 6 gurupta toplanmıştır (Şekil 4.4):

A. Yönetmeliklere uymayan yapı tasarımı,

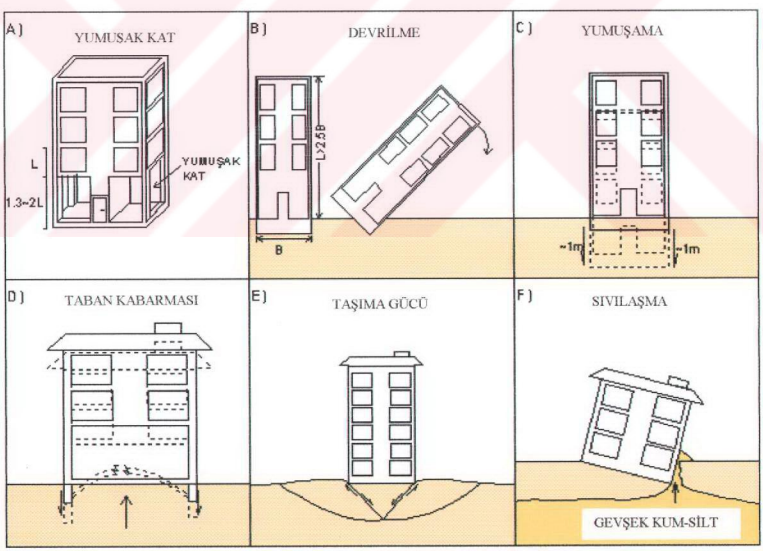
B. Yükseklik / genişlik oranı 2.5' dan büyük veya gömme derinliği sıfır olan yapılarda devrilme, kayma ve komşu yapılarla çarpışma,

C. Zemin yüzeyinde yenilme belirtisi olmamasına karşın drenajsız şartlarda yumuşak silt ve killerde görülen zemin yumuşaması sebebiyle 1m' ye varan oturmalar,

D. Yayılı temel olmaması durumunda yapının zemin içine battığı ve döşemelerde kabarmalar veya patlamaların oluştuğu durumlar,

E. Temel taşıma gücünün aşılması,

F. Sıvılaşma.



Şekil 4.4: Hasar nedenleri a) yumuşak kat b) devrilme c) tekrarlı yükleme ile kayma direncinde azalma d) taban kabarması e) taşıma gücü aşılması f) sıvılaşma (Önalp vd., 2001)

Depremler öncesinde Adapazarı' nda "zemin etüdü" kavramının yerini mühendisler arasında kabul görmüş "zemin emniyet gerilmesi" teriminin aldığını bilmek, depremler sonrasında idari makamların kararları ile bilimsel çalışmaların sonuçlarının örtüşmemesinin nedenini açıklamak için yeterlidir. Zemin kesiti, zemin özellikleri, gömme derinliği, temel türü, temel genişliği, yer altı suyu düzeyi gibi temel mühendisliğinin ana kavramları dikkate alınarak "temelin güvenli taşıma gücü" nün bulunması yerine hemen hemen tüm yapılarda hiçbir etüde gerek duyulmadan "zemin emniyet gerilmesi=0.8 kg/cm^2" değeri ile hesap yapılması ve yer altı su seviyesinin de yüzeye bir çok yerde 1 m' den daha yakın olması sebebiyle temellerin yüzeye oturtulması yukarıda belirtilen hasarın önemli bir bölümüne sebep olmuştur. Buradan hareketle, Adapazarı' nda 1999 depremlerinde oluşan büyük can kaybı ve hasarın nedeninin "kötü" zemin koşulları değil, yapıların uygun temel sistemleri ile inşa edilmemiş olması biçiminde gösterilmesi doğru olacaktır.

Önalp vd. (2001) tarafından yapılan araştırmalar sonucunda bazı bölgelerde yüzeysel temel güvenli taşıma gücünün 45 kPa gibi bir değerde çıkması ve bunun 3m derinlik boyunca değişmemesi 80 kPa' lık güvenli taşıma gücüne karşılık olarak her yer ve şartta kullanılan 0.8 kg/cm^2' lik "zemin emniyet gerilmesi" değerinin ne kadar yanıltıcı olduğunu ortaya koymuştur.

4.3. Geoteknik Özellikler

Depremden sonra 600 dolayında sığ sondaj gerçekleştirilmiş, bunlardan elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı' nda TS1900/1987' ye göre gerekli deneylere tabi tutulmuş ve TS1500/2000 uyarınca sınıflandırılmışlardır. Buna ek olarak Sakarya Üniversitesi yaklaşık 250 adet Koni Penetrasyon Deneyi (CPTU) yapmıştır.

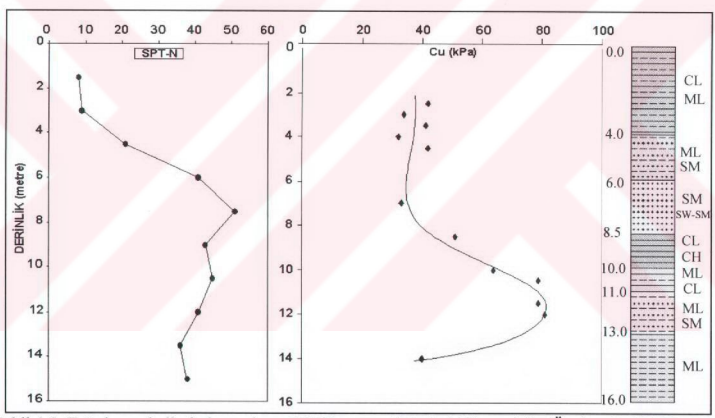
4.3.1. Laboratuvar deneyleri

Önalp vd. (2000), yapılan üç eksenli UU kesme deneylerinden drenajsız kayma direncini üst 5 m derinlik için c_u=45±15 kPa, 15 m derinlik boyunca tüm numuneler için c_u=54±22 kPa şeklinde vermişlerdir. Yapılan kesme kutusu deneyleri sonunda

sıkı kumların bulunduğu derinlik ve bölgelerde kayma direnci açısının $\phi' \geq 35°$ gibi değerler alabildiği görülmüştür. Bunun yanında killi-kumlu zemin numunelerinde drenajsız kayma direnci değerinin c_u=3-119 kPa, kayma direnci açısının da ϕ_u=4°-35° arasında değiştiği belirlenmiştir.

Üç eksenli UU kesme deneyi sonuçlarına göre yapılan bir diğer çalışmada da üst 5 m derinlik için drenajsız kayma direncinin 25 kPa ile 70 kPa arasında değiştiği belirtilmiş, ortalama değer de 40 kPa olarak bildirilmiştir. Aynı değer 5 ile 15 m arası için ise 85 kPa olarak verilmiştir (Önalp vd., 2001).

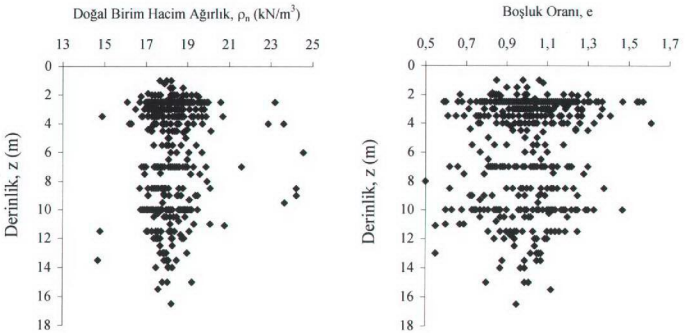
Şekil 4.5' de deprem hasarlarının yoğun gözlendiği Tığcılar Mahallesi için $SPTN_{30}$ ve c_u değerlerinin tipik değişimi bir örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Tığcılar mahallesinde ortalama $SPTN_{30}$ ve c_u değerleri (53 sondaj), (Önalp vd., 2001)

Çoğunlukla killi zeminler üzerinde yapılan üç eksenli UU kesme deneylerinde doğal birim hacim ağırlıklarının 17-20 kN/m^3, boşluk oranlarının da 0.7-1.3 arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 4.6). Ayrıca, hemen hemen tüm numunelerde doygunluk derecesinin %100 olduğu bulunmuştur.

PLAXIS yazılımıyla sonlu eleman modelini oluştururken kullanılmak üzere 10 adet üç eksenli konsolidasyonlu - drenajsız hücre kesme deneyi yapılmış, ayrıca 25 adet konsolidasyon deneyi sonucu değerlendirilmiştir.



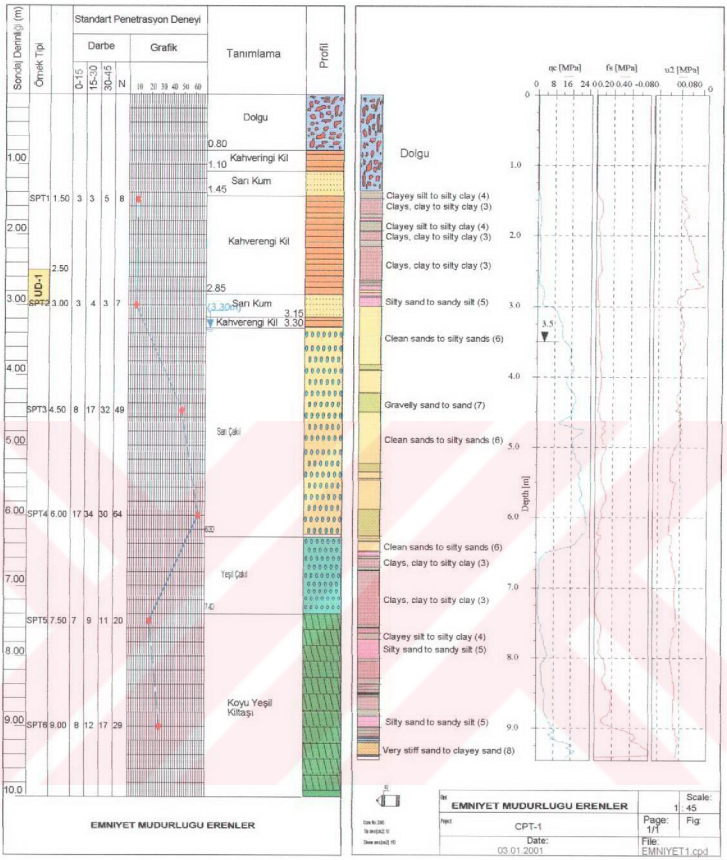
Şekil 4.6: Adapazarı numunelerinde doğal birim hacim ağırlık ve boşluk oranı değerleri

Yüzeye yakın tabakalarda sıkça rastlanan orta plastisiteli kil ve siltlerde yapılan üç eksenli konsolidasyonlu - drenajsız (CIU) deneylerde kayma direnci parametreleri c'=16-35 kPa ve ϕ'=20-35° arasında bulunurken, daha derinlerdeki CH killerde c'≥100 kPa olan değerlere rastlanmış ve ϕ'=10-25° değerleri elde edilmiştir.

Konsolidasyon deneylerinde yüzeye yakın numunelerde aşırı konsolidasyon oranının (OCR) 4' ü aşabildiği görülmüş, derinlere indikçe de bu değer 1 olmuştur. Örneğin, DSİ tarafından yapılan 200 m' lik derin sondajdan alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneylerde OCR değerleri, 7.00, 22.00, 55.50 ve 103.50 m' ler için sırasıyla 3.19, 2.17, 1.98 ve NL olarak ölçülmüştür.

4.3.2. Arazi deneyleri

Önalp vd. (2000, 2001), kent merkezinde üst 5 m' de killer ve plastik olmayan siltlerin, bunların altında da sıkı kum veya hafif aşırı konsolide killerin bulunduğu kesitlerle sık sık karşılaşıldığını belirtmişlerdir (Şekil 4.7). Üst 5 m için SPTN değerlerinin 2 ile 10 arasında değiştiği, sonda uç dirençlerinin de 2 MPa' dan küçük ölçüldüğü vurgulanmıştır. Bu derinliğin altında vuruşlar 20' nin üzerinde çıkmakta ve refüye yönelmektedir. Buradan kentte minimum yüzeysel temel derinliğinin 3 m olması gerektiği veya yüksek yapılaşmaya derin temel sistemleri ile gidilebileceği sonucuna varılmaktadır.

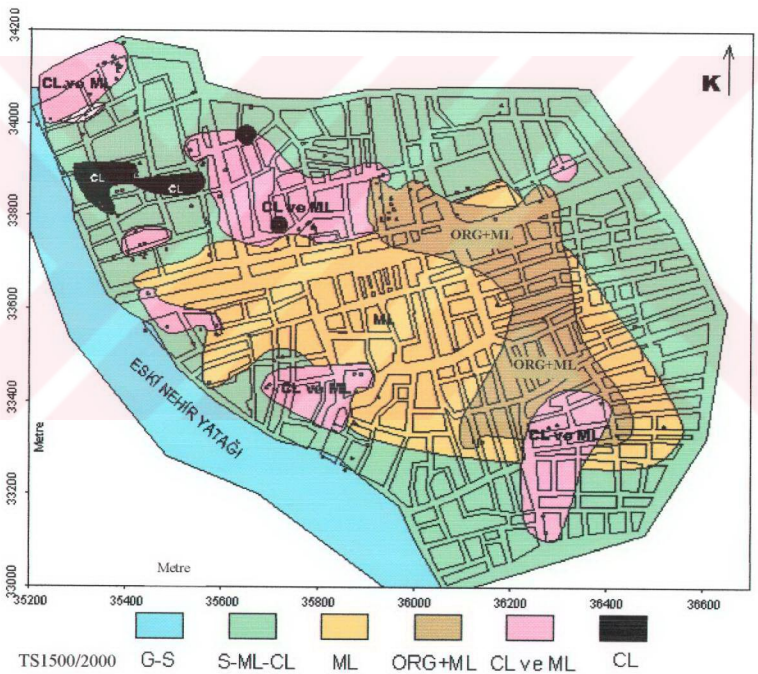


Şekil 4.7: Erenler Bölgesinden bir kesit

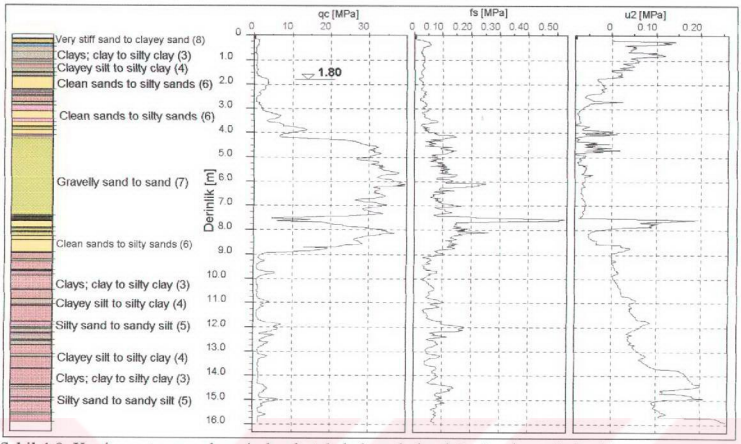
Üst katmanlardaki kayma direnci düşük zeminlerin aksine kent merkezinde eski nehir yataklarının bulunduğu bölümler yüksek yapılaşma için sağlam bir temel zemini oluşturabilecek sıkı kum ve çakıllı kumları içermektedir. Bol vd. (2002), Adapazarı' nın iki mahallesini içeren çalışmalarında 104 sondaj ve 57 sondalama (CPTU) sonuçlarını kullanarak Sakarya nehrinin eski yatağını oluşturan kanalın güneyden kuzey batıya doğru uzanan kolunu ortaya çıkarmışlardır (Şekil 4.8). Bu kesimde yapılmış sondajlarda SPTN değerleri refü (SPTN>50) veren ve CPTU deneyinde uç direnci (q_c) 30 MPa' ı aşan sıkı kum ve çakıllara rastlanmaktadır. Şekil

4.8' e bakıldığında Adapazarı' nda birbirine çok yakın bölgelerde dahi nehir sistemlerinde farklı çökelme özelliklerini (Shantser, 1951) yansıtan oluşumlar nedeniyle birbirine hiç benzemeyen temel ortamları ile karşılaşılabildiği görülmektedir.

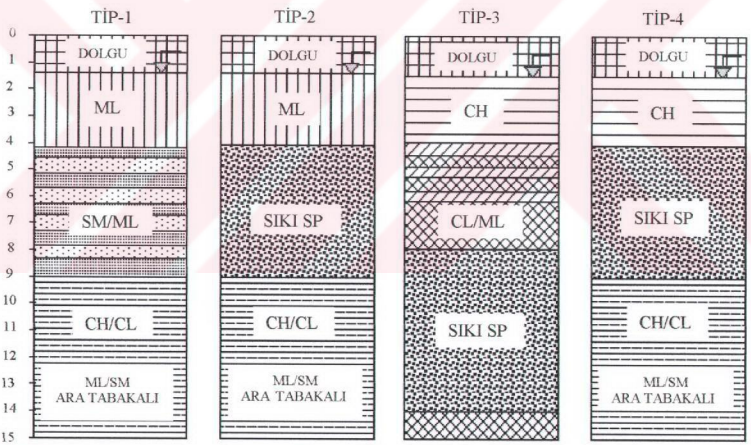
Şekil 4. 9' da sıkı kum ve çakıllı kum katmanlarının bulunduğu bir kesitte tipik koni penetrasyon deneyi sonucu çıktısı sunulmuştur. Burada da olduğu gibi sonda uç dirençlerinin (q_c) 35 MPa' ı aştığı durumlarda efektif kayma direnci açısı (ϕ') Lunne vd. (1997)' ye göre 40°' den yüksek çıkabilmektedir.



Şekil 4.8: Tığcılar ve Yenigün Mahallelerinin Aluviyon Haritası (üst 6.0 m) (Bol, vd., 2002)



Şekil 4.9: Koni penetrasyon deneyinde sıkı tabakaların bulunduğu örnek zemin kesiti



Şekil 4.10: Adapazarı kent merkezi zemin profilleri (Sancio vd., 2002).

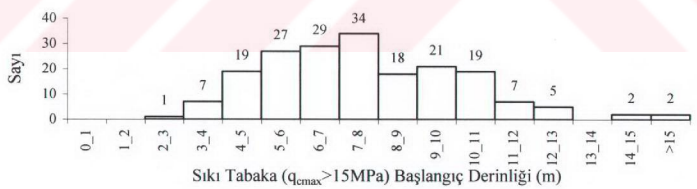
Sancio vd. (2002), Adapazarı merkezinde zemin problemlerinin görüldüğü değişik yerlerde ve yıkımların çok olduğu belli eksenler boyunca toplam 46 sondaj ve 135 sondalama yapmışlar ve bunlara dayanarak çalıştıkları alanlarda üst 15 m için 4 ayrı tipte zemin profili sunmuşlardır (Şekil 4.10). Dikkate değer olan bulgu, bu kesitlerin üçünde kalınlığı 6 m' ye varan sıkı kum ve çakıllı kumların varlığıdır. Sıkı kumların üstünde killi silt ve siltli killerin, derin katmanlarda ise silt ve kum ara katmanlı kil

katmanlarının varlığı belirtilmiştir. Deprem sonrasında DSİ tarafından yapılan ve ana kayaya ulaşılamayan 200 m' lik bir sondajda yukarıdaki sonuçlara benzer olarak üst katmanlarda genel olarak ince kum katmanları içeren kil ve siltler geçilmiş, daha derinlerde ise killerle karşılaşılmıştır. 50 m ile 70 m arasında ise birkaç CL simgesi dışında tüm kesitin yüksek plastisiteli killerden oluştuğu görülmüştür.

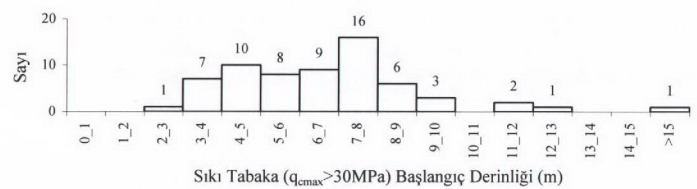
4.3.3. Sağlam tabakaların başlangıç derinlikleri ve kalınlıkları

Şekil 4.11, 4.12, 4.13, ve 4.14' de Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı tarafından incelenen sonda ve sondaj bilgilerinden elde edilen sıkı / çok sıkı kum ve çakıllı kum tabakalarının başlangıç derinlikleri ve kalınlıklarına ait bilgiler sunulmuştur.

Adapazarı merkezinde yapılan 225 adet CPT sonuçları değerlendirildiğinde uç dirençlerinin 191 kesitte 15 MPa' ı, 64 kesitte de 30 MPa' ı aştığı sıkı ve çok sıkı tabakaların varlığı ortaya çıkmaktadır. 200 kN kapasiteli CPT deney aletinin ankrajlarının sökülmesi sebebiyle sıkı tabaka kalınlığı her zaman tam ölçülemese de birçok durumda sıkı tabakaların kalınlığının 5 m' yi geçtiği yapılan sondajlar tarafından da doğrulanmıştır.



Şekil 4.11: CPT sonuçlarına göre sıkı tabaka (q_{cmax}>15 MPa) başlangıcı histogramı

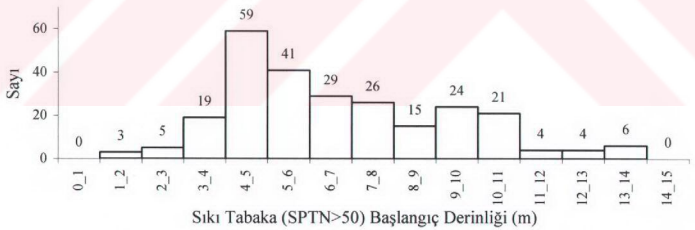


Şekil 4.12: CPT sonuçlarına göre sıkı tabaka (q_{cmax}>30 MPa) başlangıcı histogramı

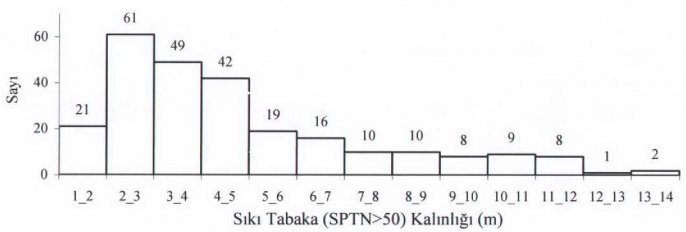
CPT deney sonuçlarına göre sıkı ve çok sıkı tabakaların başlangıç derinlikleri Şekil 4.11 ve 4.12' de gösterilmiştir. Dikkati çeken ilk nokta, üst 3 m' de bir kesit dışında hiçbir durumda sıkı / çok sıkı tabakalarla karşılaşılmamasıdır. Sıkı ve çok sıkı tabakaların başlangıç derinliklerinin %65' den fazlası 5 m ile 10 m arasında bulunmaktadır. Çok sıkı tabakaların %30' u 4-5 m' den başlarken 10 m' den daha derinlerdeki çok sıkı tabaka oranı %5' te kalmaktadır.

Adapazarı merkezinde yapılan 600 civarında sondaj değerlendirildiğinde bunların yarısına yakınında ham SPTN değerlerinin refü verdiği çok sıkı tabakaların bulunduğu görülmüştür. Sondaj sonuçlarından da üst 3 m' de sağlam tabakaların hemen hemen hiç bulunmadığı anlaşılmaktadır. Çok sıkı tabakaların tespit edildiği 256 sondaja göre bunların 86 tanesi üst 5 m' de, 135 tanesi 5 m ile 10 m arasında ve 35 tanesi de 10 m' den daha derinde başlamaktadır (Şekil 4.13).

Şekil 4.14' de sondajlarda ortaya çıkan sıkı tabaka kalınlıkları sunulmuştur. Buradan 2 m ile 5 m arasındaki kalınlıklara en fazla rastlandığı söylenebilmektedir. 256 sıkı tabakanın kalınlıklarının 173' ü sıfır ile 5 m arasında, 63' ü 5 m ile 10 m arasında ve 20 tanesi de 10 m' den daha fazla çıkmaktadır.

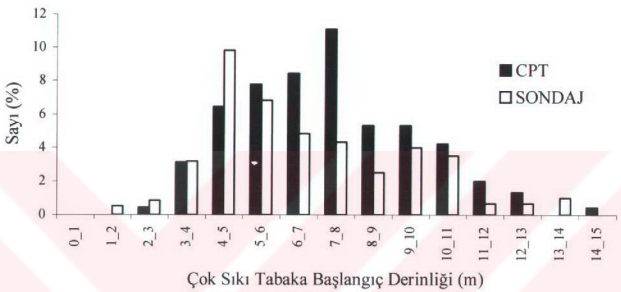


Şekil 4.13: Sondaj sonuçlarına göre çok sıkı tabaka başlangıcı histogramı



Şekil 4.14: Sondaj sonuçlarına göre çok sıkı tabaka kalınlıkları histogramı

q_c>20 MPa ve SPTN>50 değerlerini sağlayan çok sıkı tabakalar için CPT ve SPT sonuçlarına birlikte bakıldığında, bu tabakaların başlangıç derinliklerinde farklılık olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 4.15). 4-8 m' lerden başlayan sıkı tabakaların sayısı derinlere gidildikçe CPT sonuçlarına göre artarken SPT sonuçlarına göre düşmektedir. CPT' nin SPT gibi sondör ölçüm hatalarına açık olmaması nedeniyle daha güvenilir olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.15: CPT ve sondajlara göre çok sıkı tabakaların başlangıç derinlikleri

BÖLÜM 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE UYGULAMA

5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

5.1.1. Sonlu eleman çözümüne genel yaklaşım

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde birçok mühendislik dalında olduğu gibi geoteknikte de yaygın olarak kullanılan ileri bir sayısal analiz yöntemidir.

Herhangi bir geoteknik tasarım yapılırken, yerel veya toptan göçme olup olmayacağı, kesit tesirlerinin (eğilme momenti, eksenel kuvvetler veya kesme kuvvetleri) değeri, yapı ve komşu zeminde meydana gelecek deformasyonlar, oluşturulan yapı nedeniyle çevre yapılar veya servis ağlarında oluşacak etkiler dikkate alınması gereken konulardır. Analitik çözüm yöntemleri, yukarıda belirtilen durumların tamamını tek bir çözümde ele alamadıklarından sadece göçme ile ilgili fikir verebilmektedirler. Sonlu eleman yönteminde, gerçeğe uygun zemin özellikleri tanımlanabilmekte, tüm dış yapı ve yükleme etkileri dikkate alınabilmektedir.

Sonlu eleman yönteminde problemin geometrisi oluşturularak sistem, sonlu sayıda elemana ayrılır. Her elemanın şekli, bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Yapıyı oluşturan tek bir elemanın davranışı tanımlanabilirse yapının bütünü için de davranışın tanımlanması mümkün olacaktır. Çözüm için bir asıl değişken seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve bu, matris tekniğiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır. Deplasmanların ana değişken olarak seçildiği sonlu eleman yöntemi çözümlerinde, problemin her bir düğüm noktasındaki deplasmanlar bilinmeyenlerdir. Deplasman değerleri çözüldüğünde, gerilme ve zorlanmalar deplasmanlara bağlı olarak bulunurlar.

Sonlu eleman yönteminin işleyişi şu şekilde özetlenebilir:

Modelin elemanlara ayrılması: Bir boyutlu cisimler düğümlerle, iki boyutlu cisimler çizgilerle, üç boyutlu cisimler düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılırlar. İki boyutlu elemanlar üçgen veya dörtgen, üç boyutlu elemanlar, dikdörtgenler prizması, kama, dört yüzlü veya altı yüzlü olabilir.

Deplasman modellerinin seçilmesi: Elemanda yükleme sonucu oluşacak deplasmanları yansıtacak deplasman fonksiyonları genellikle polinom seçilir. En basit deplasman modeli genellikle lineer polinomdur.

Eleman rijitlik matrisinin oluşturulması: Rijitlik matrisi, elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içermektedir. Rijitlik matrisi [k], yük vektörü {Q} ve düğüm deplasman vektörü {q} arasındaki ilişki şu şekilde gösterilir:

$$[k]*\{q\}=\{Q\} \tag{5.1}$$

Modelin bütünü için rijitlik matrisinin ve yük vektörünün oluşturulması: Her bir elemanın rijitlik matrisi ve eleman yük vektörleri toplanarak sistemin rijitlik matrisi ve yük vektörü oluşturulur. Sistem rijitlik matrisi [K], toplam yük vektörü {R} ve bütün sistem için düğüm noktaları deplasman vektörü {r} şu şekilde gösterilir:

$$[K]*\{r\}=\{R\} \tag{5.2}$$

Bu eşitlikler uygun eşitlik ilişkilendirilmesi ile geometrik sınır koşulları girilmediği sürece çözülemez.

Bilinmeyen deplasmanlar için çözüm: Bilinmeyen deplasmanlar için yukarıdaki eşitlikler çözülür. Lineer analizlerde matris teknikleriyle doğrudan çözüm yapılırken, doğrusal olmayan zemin davranışı için analizlerde her bir yük adımında yük vektörleri ve rijitlik matrisleri tekrar oluşturulur.

Gerilme ve zorlanmaların hesaplanması: Deplasmanlar hesaplandıktan sonra gerilme ve zorlanmalar bu deplasmanlara bağlı olarak elde edilirler.

5.1.2. Kazık - zemin ara yüzeyinin modellenmesi

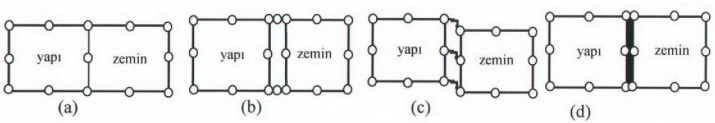
Yapı - zemin etkileşimi geoteknik problemlerinde geniş yer tutmaktadır. Sonlu eleman analizinde yapı ve zeminin birbiriyle uyumlu deplasman yapan sürekli elemanlarla modellenmesi gerçekte oluşacak farklı deplasmanları ve gerilmeleri yansıtamamaktadır (Şekil 5.1a). Bu nedenle ara yüzey elemanları kullanılarak, örneğin kazıkla zemin veya temel ile zemin arasındaki farklı deplasmanlar hesaplanabilmektedir. Potts ve Zdravkovic (2001), yapı - zemin ara yüzeyini modellemek için kullanılan yöntemleri şu şekilde özetlemiştir (Şekil 5.1b, c, d):

- Standart yapısal modellere dayanan ince sürekli ara yüzey elemanları (Pande ve Sharma, 1979; Griffiths, 1985).

- Sadece karşılıklı düğüm noktalarını birleştiren farklı yaylardan oluşan bağlantı elemanları (Hermann, 1978; Frank vd., 1982).

- Sıfır veya sonlu kalınlıkta özel ara yüzey elemanları (Goodman vd., 1968; Ghaboussi vd., 1973; Carol ve Alonso, 1983; Wilson, 1977; Desai vd., 1984; Beer, 1985; Potts ve Day, 1991).

- Yapı ve zeminin ayrı ayrı modellendiği, ara yüzeydeki gerilme ve deplasman uyumunu sağlayan eşitlikler yardımıyla birbirine bağlandığı melez yöntem (Francavilla ve Zienkiewicz, 1975; Sachdeva ve Ramakrishnan, 1981; Katona, 1983; Lai ve Booker, 1989).

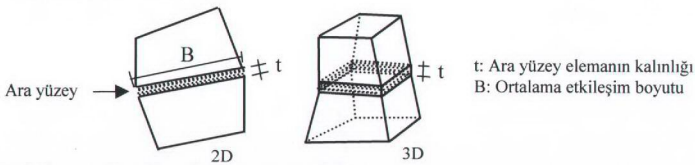


Şekil 5.1a: Sürekli elemanlar ile yapı - zemin etkileşimi
b: Yapı - zemin etkileşiminin ince ara yüzey elemanlarla modellenmesi
c: Yapı - zemin etkileşiminin yaylarla modellenmesi
d: Yapı - zemin etkileşiminin özel ara yüzey elemanlarıyla modellenmesi

Plaxis yazılımı, yapı - zemin etkileşiminin modellenmesinde yukarıda sayılan seçenekler içinde en çok kullanıldığı belirtilen sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarını kullanmaktadır. Yazılımda ayrıca, ince ara yüzey elemanları da modellenebilmektedir.

Sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarıyla çözüm yapılırken özellikle aşırı farklılıklar gösteren rijitliğe sahip elemanların olduğu modellerde sayısal çözümsüzlükler ve yakınsama sorunları ortaya çıkabilmektedir (Day ve Potts, 1994). Sıfır kalınlıklı elemanın her iki tarafındaki komşu düğüm noktaları aynı koordinatlara sahip olduğundan ağ oluştururken problem çıkabilmektedir. Ayrıca, ara yüzey elemanlarının kesiştiği durumlarda da sonlu eleman ağında problem olabilmektedir (Day ve Potts, 1991).

Desai vd. (1984), yaptıkları parametrik çalışmada ince ara yüzey elemanları için en uygun kalınlığın, komşu elemanın ortalama boyutuna oranının 0.01 ile 0.1 arasında olduğu durumda gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Şekil 5.2). Pande ve Sharma (1979), çok daha küçük oranlarla da tatminkar sonuç alınabileceğini belirtmişlerdir. Ara yüzey elemanın kalınlığı komşu elemanın kalınlığına oranla çok fazla olursa o da sürekli eleman gibi davranmakta; çok küçük olursa bu kez de hesaplama süresi uzamaktadır. Yukarıda verilen ampirik sonuçlar bir yaklaşım sunmakla birlikte, ince ara yüzey elemanların komşu zemin elemanından farklı malzeme modelleri ile oluşturulabileceği de düşünülürse ince eleman kalınlığının parametrik çalışma ile bulunması uygun olacaktır.

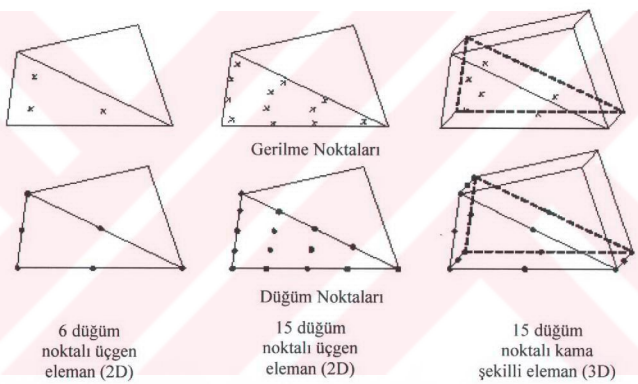


Şekil 5.2: İnce ara yüzey elemanları (Desai, vd., 1984)

5.2. Plaxis Yazılımı

"Plaxis 3D Tunnel", özellikle tünel projelerinde deformasyon ve stabilite problemlerini 3 boyutlu olarak çözmek için geliştirilmiş ticari bir sonlu eleman

yöntemi yazılımıdır. Yazılım, kazıkların dairesel modellenememesi gibi kısıtlar taşımasına rağmen, kazıklı yayılı temellerin üç boyutlu sonlu eleman analizlerinin yapılmasına olanak vermektedir. Zemin veya kayanın doğrusal olmayan, zamana bağlı ve eşyönsüzlük özellikleri, ileri yapısal modellerle temsil edilebilmektedir. Ayrıca, zeminin çok fazlı yapısı temsil edilebilmekte, statik boşluk suyu basınçları ve yükleme anında oluşan ek boşluk suyu basınçları hesaplanabilmektedir. Yapı - zemin etkileşimi, tünel problemlerinde özel ara yüzey elemanlarıyla (sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanları) otomatik olarak modellenebilmektedir. Ara yüzey elemanları, kazıkların dört bir yanında gerektiği için kazıklı yayılı temel problemlerinde bu işlem kayma direnci parametreleri düşürülmüş üç boyutlu sürekli ara yüzey elemanlarla gerçekleştirilmiştir.



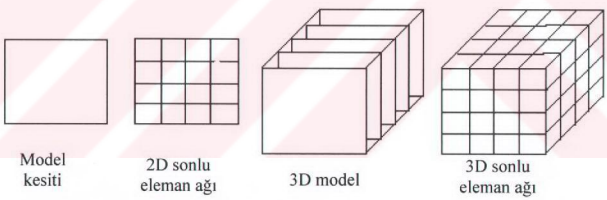
Şekil 5.3: Zemin elemanında düğümlerin ve gerilme noktalarının yerleşimi

Yazılımda istenilen kesitin zemin tabakaları, yapılar, yapım aşamaları (hesap aşamaları), yükler ve sınır şartları, grafik olarak tanımlanabilmektedir. Kesitin tümü için veya bölgesel olarak eleman boyutu ayarlaması seçeneğini içeren yazılımda, düzgün elemanlardan oluşmayan iki boyutlu sonlu eleman ağı otomatik olarak oluşturulmaktadır. 6 düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşan iki boyutlu sonlu eleman ağı z - ekseninde doğrusal uzatılarak modelin tümü için sonlu eleman ağı tamamlanmaktadır. Sonuçta, gerilme ve deplasmanların hesaplanması için 15 düğüm noktalı kama şekilli elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 5.3). İki boyutlu analizde kullanılan 15 düğümlü üçgen elemanların oluşturacağı üç boyutlu elemanlar, çok

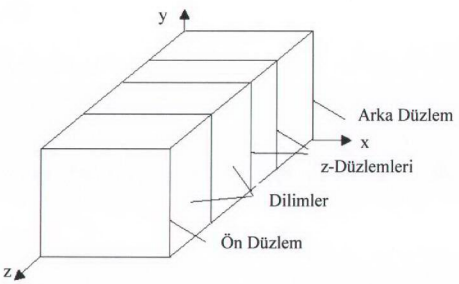
büyük bilgisayar kapasiteleri gerektirdiğinden ve çözüm süreleri kabul edilemez şekilde uzadığı için kullanılmamaktadır.

Yazılım, birbiriyle girişimli 4 ayrı alt programdan oluşmaktadır. Veri girişi INPUT, hesaplamalar CALCULATIONS programıyla yapılmakta, sonuçlara OUTPUT programıyla bakılırken CURVES programıyla istenen sonuçlar grafik olarak görülebilmektedir.

INPUT programında model geometrisi 3 boyutlu olarak oluşturulmakta, malzeme özellikleri ve sınır şartları tanımlanmaktadır. Öncelikle zemin tabakaları, yapılar ve yükleri kapsayan modelin x - y eksenlerinde düğüm noktaları, çizgiler ve kapalı alanlardan oluşan kesiti çizilmekte ve iki boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulmaktadır. Daha sonra z ekseninin gerekli koordinatları tanımlanmakta, böylece x - y eksenlerindeki kesitin istenen sayıda kopyası, z ekseni boyunca düzlemleri oluşturmaktadır. Düzlemler arasında kalan hacimler de dilimleri oluşturmaktadır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5).

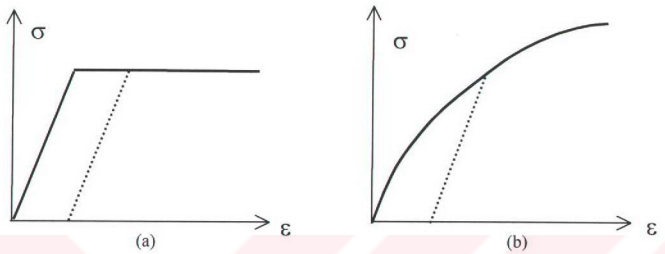


Şekil 5.4: Üç boyutlu sonlu eleman ağının oluşturulması



Şekil 5.5: z - düzlemlerinin ve dilimlerin tanımlanması

Yazılımda, temellerin son taşıma güçlerini bulmak için kullanılabilen lineer elastik-mükemmel plastik "Mohr - Coulomb" malzeme modeli yanında "pekleşen zemin" *(hardening soil)* gibi zeminin hiperbolik elastik - plastik davranışına izin veren gelişmiş malzeme modelleri de kullanılmaktadır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6: Zeminde gerilme - şekil değiştirme davranışı modelleri
a: Lineer elastik - mükemmel plastik (zemin - kaya: Mohr - Coulomb)
b: Nonlineer elastik - pekleşen plastik (kum - kil: pekleşen zemin)

Elasto - plastik Mohr - Coulomb modelinde E ve ν zeminin elastik, c ve ϕ plastik, ψ' de hacim değiştirme özelliklerini temsil etmektedir. Zemin ve kayada gerilme-şekil değiştirme davranışı incelenirken, ilk yaklaşım olarak Mohr - Coulomb yenilme kriteri ile her tabaka için seçilen sabit ortalama rijitlik değeri hesapların oldukça hızlı yapılmasını sağlamakta ve olası deplasmanlar hakkında bir ön bilgi sağlamaktadır.

Lineer elastik - mükemmel plastik malzeme modelinin tersine pekleşen zemin modelinde yenilme yüzeyi asal gerilmelerin oluşturduğu hacimle sınırlı olmayıp plastik şekil değiştirmelerle genişleyebilmektedir. Üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen gerilme - zorlanma ilişkisi bir hiperbolle temsil edilebilmektedir. Böyle bir bağıntı ilk kez Kondner (1963), daha sonra da Duncan ve Chang (1970) tarafından ortaya konmuştur. Plaxis tarafından kullanılan Schanz (1998) modeli, bu yaklaşımlardan farklı olarak elastisite teorisinin yerine plastisite teorisini kullanmakta, zeminin hacim değişimi ve yenilme başlığı *(yield cap)* etkisini dikkate almaktadır. Pekleşen zemin modeli, E, ν, c, ϕ ve ψ parametrelerine ek olarak üç eksenli hücre kesme ve konsolidasyon deneylerinden elde edilen üç parametreyle zeminin davranışını daha hassas bir şekilde tanımlayabilmektedir. Bu parametreler, üç eksenli yükleme (E_{50}) ve yeniden yükleme (E_{ur}) rijitlikleri ile ödometre yükleme

rijitliğidir (E_{oed}). Mohr - Coulomb modelinin aksine pekleşen zemin modeli zemin rijitliğinin gerilme bağımlılığını hesaba katabilmektedir. Başka bir deyişle, gerilme arttıkça zeminin rijitliği de artmaktadır. Dolayısıyla bu modelde tüm rijitlikler 100 kPa olarak alınan referans gerilmeye bağlı olarak verilmektedir. Zemin rijitliğinin gerilmeye bağımlılığını belirleyen m katsayısı, Von Soos (1980) tarafından $0.5<m<1.0$ aralığında verilirken; Janbu (1963), Norveç kum ve siltleri için bu değeri 0.5 olarak vermiştir.

Otomatik yük ve zaman arttırımı *(automatic load stepping)* özelliği ile plastik hesap adımlarında en uygun yük artışları sağlanırken, *"arc - length control"* özelliği ile göçme yükü tam olarak tespit edilebilmektedir.

Hesap alt programında *"Stage construction"* seçeneği ile yapım veya kazı aşamaları, yüklerin uygulanması ve yer altı su seviyesinin değişmesi gibi durumlar elemanların aktif hale getirilmesi / kaldırılması ile temsil edilebildiği için gerilme ve deplasmanlar kolaylıkla gerçekçi olarak tahmin edilebilmektedir.

Plaxis 3D Tunnel yazılımında ek boşluk suyu basınçları hesaplanmakla birlikte konsolidasyon analizi yapılamamakta ve dinamik modül bulunmamaktadır.

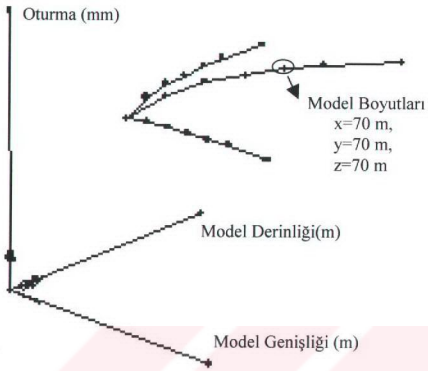
Donanım için, minimum 256 Mb RAM ve 100 Mb hard disk önerilmekle birlikte yapılan parametrik çalışmalarda verim alınabilmesi için 1Gb' lık RAM ve 40 Gb' lık hard disk kapasitesi gerektiği görülmüştür.

5.3. Model Özellikleri

5.3.1. Sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi ve eleman sayısının belirlenmesi

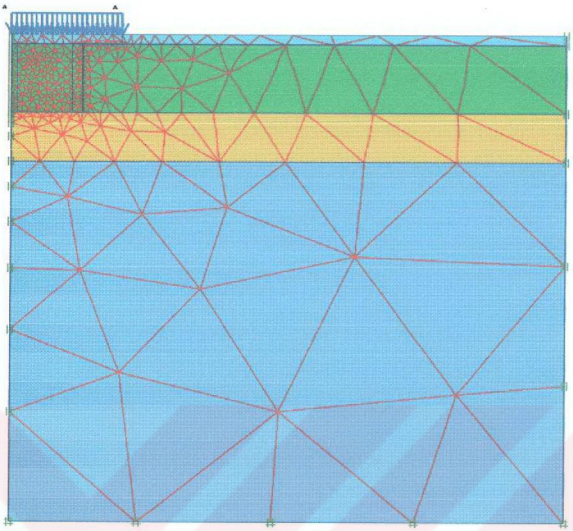
Sonlu eleman ağı boyutlarının x, y ve z eksenlerinde 30 m' den 100 m' ye kadar değiştiği 21 farklı modelde yapılan çözümler sonucunda, model boyutlarının daha büyük olduğu durumlarda gerilme ve deplasmanların dağılımında önemli değişiklikler görülmemesi nedeniyle 70 m*70 m*70 m' lik modelde sınır şartlarının

etkisinin kalmadığı bulgusuna varılarak bu boyutların ana çözümlerde kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 5.7).

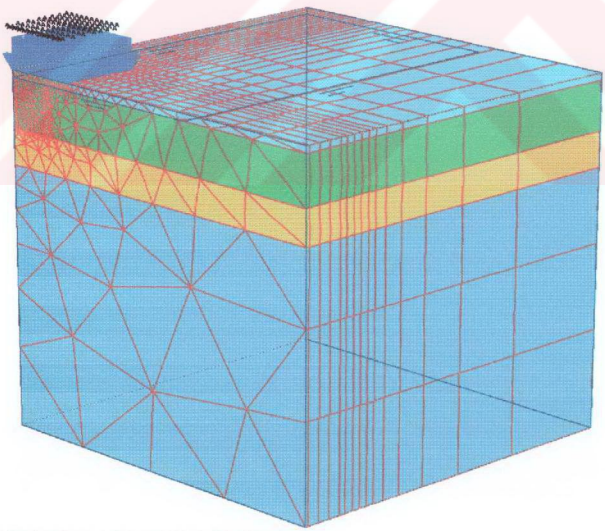


Şekil 5.7: Sonlu eleman ağı boyutlarının seçimi

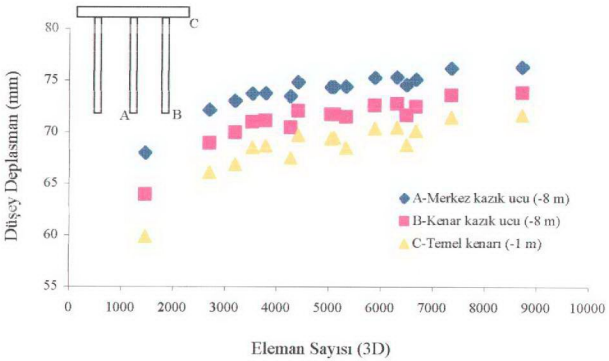
Sonlu eleman çözümünde gerilmelerin yüksek olduğu yerlerde elemanların sıklaştırılması ile sonuçlar daha gerçekçi olarak bulunmakta, ağın kenar ve köşelerine doğru ise elemanların büyütülmesi ile büyük hacimli problemlerde eleman sayısının gereğinden fazla olması önlenmekte, böylece çözüm zamanından önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır (Potts ve Zdravkovic, 2001; Reul ve Randolph, 2002). Bu doğrultuda eleman büyüklüklerinin ve sayılarının farklı olduğu 28 modelde deneme çözümü yapılarak sonuçta kullanımı uygun bulunan sonlu eleman modeli Şekil 5.8 ve 5.9' da görülmektedir. 50 m*50 m*50 m boyutlarındaki modelde yapılan çözümlerde eleman sayısı 736 ile 8724 arasında değişmektedir. Önce iki boyutta, sonra üçüncü eksende temel altında, kenarında ve kazık uçlarında eleman sıklaştırma, ağ kenarlarına ve aşağıya doğru eleman büyütme uygulandığı zaman (4000 elemanlı model) elde edilen sonuçlar modelin tamamının çok küçük elemanlardan oluştuğu durumlarla benzer sonuçları vermiştir (Şekil 5.10). Kazık sayısının artmasıyla eleman sayısı da artmakla birlikte aynı prensip kullanılarak uygun modeller hazırlanmıştır.



Şekil 5.8: Sonlu eleman ağının iki boyutlu görünümü



Şekil 5.9: Sonlu eleman ağının üç boyutlu görünümü



Şekil 5.10: Eleman sayısının deplasmanlara etkisi

5.3.2. Kazık - zemin ara yüzeyinin modellenmesi

Modellemede kullanılan yazılım "Plaxis 3D Tunnel", tünel problemlerinin sonlu eleman yöntemiyle çözümü amacıyla geliştirildiğinden kazıklı yayılı temelde yapı-zemin etkileşimi, programda otomatik olarak oluşturulabilen sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarıyla tam anlamıyla temsil edilememektedir. Tünel modülünde sıfır kalınlıklı otomatik ara yüzey elemanları tünel ekseni boyunca tünel çevresinde oluşturulabilmektedir. Bu da, kazıklı yayılı temel probleminde kazıkların veya temelin sadece iki yanında sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarının kullanılması anlamına gelmektedir. Modellerde kullanılacak ara yüzey eleman tipini belirlemek amacıyla deneme çözümleri iki alternatif yaklaşımla yapılmıştır. Birinci yaklaşımda sıfır kalınlıklı otomatik ara yüzey elemanları (kazığın iki yanında), üç boyutlu modellenen ince ara yüzey elemanlarıyla (kazığın önünde ve arkasında) birlikte kullanılmış, ikincide ise sadece ince ara yüzey elemanları kullanılmıştır. Sıfır kalınlıklı otomatik ara yüzey elemanları, geometri oluşturulurken tanımlanmakta ve malzeme özellikleri, komşu oldukları zeminin malzeme özellikleri girilirken R_f azaltma katsayısı ile temsil edilmektedir. İnce ara yüzey elemanları ise önce iki boyutta kazık yanlarında, daha sonra üçüncü boyutta kazık önünde ve arkasında tanımlanmaktadır. İnce ara yüzey elemanları için komşu oldukları zeminin azaltılmış kayma direnci parametreleri ile ayrı bir malzeme türü tanımlanmaktadır.

Sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarının kullanıldığı modellerde yakınsama problemi nedeniyle çözümler çok daha fazla zaman alabilmekte, ayrıca bazı modellerde hesap süreci tamamlanmadan kesilebilmektedir. Örneğin, 49 kazıklı bir modelde analiz, ince ara yüzey elemanlarıyla 1 saat 12 dakika, sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarıyla 11 saat zaman almıştır. Bunlara ek olarak sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarının kazıkların dört bir yanında oluşturulamaması ve sonuçlarda çok küçük farklar görülmesi nedeniyle deneme çözümleri sonunda modellerde ince ara yüzey elemanlarının kullanılmasına karar verilmiştir.

İnce ara yüzey eleman kalınlıkları, yapılan deneme çözümleri sonucunda 40 cm' lik kare kazıkta 10 cm, 60 ve 80 cm' lik kare kazıklarda ise 15 cm olarak seçilmiştir. Deneme çözümlerinde ince ara yüzey eleman kalınlığı 1 cm' ye kadar düşürülmüş fakat elde edilen deplasman sonuçları büyük farklılıklar göstermeyen bir bant içinde kalmıştır. İnce ara yüzey elemanlarının kalınlıkları azaldıkça modelleme zorlaşmış ve çözüm süreleri iki üç kata kadar artarken yakınsama problemleri belirmiştir.

5.3.3. Sınır şartları

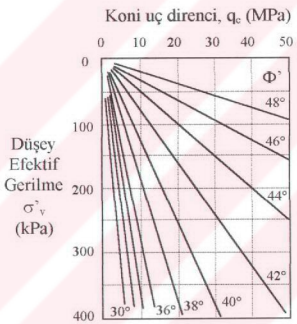
Modelin simetrik olması sebebiyle sadece dörtte biri üzerinde çözüm yapılmıştır. Model tabanındaki düğüm noktaları sabit; model kenarındakiler düşey yönde serbest, yatay yönde ise sabit alınmıştır.

200 kPa' lık yapı yükü, düzgün yayılı yük olarak tanımlanmış ve modellerin tümünde yer altı su seviyesi yüzeyde alınmıştır.

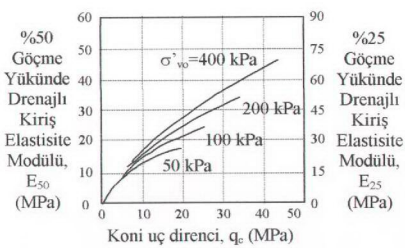
5.3.4. Kazık, yayılı temel, zemin ve ara yüzey özellikleri

Adapazarı zemin özellikleri dikkate alınarak seçilen kesitte beş tabaka bulunmaktadır. Üst 8 m' de kahverengi yumuşak siltli kil tabakaları, onun altında 5 m kalınlığında çok sıkı kum tabakaları modellenmiştir. 13 m ile 70 m arasında kil özelliği gösteren zemin ise, değişen aşırı konsolidasyon etkisini dikkate alabilmek üzere üç ayrı tabaka şeklinde modellenmiştir.

Malzeme tipi, sıkı kum tabakasında yükleme anında boşluk suyu basıncı oluşmadığı kabulüyle "drenajlı", diğerlerinde ise "drenajsız" seçilmiştir. Plaxis yazılımı, efektif parametreler (E', ν', c', ϕ') ile hesap yapmaktadır. Zemin özellikleri pekleşen zemin modeli ile temsil edilmiştir. Sıkı kum tabakasının özellikleri, koni penetrasyon deneyi sonuçları kullanılarak Robertson ve Campanella (1983), Lunne vd. (1997) ve Lengkeek (2003) uyarınca bulunmuştur (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12). Sıkı kum tabakasının üstünde ve altında yer alan killi tabakaların özellikleri, laboratuvarda yapılan CIU üç eksenli deneylerden ve konsolidasyon deneylerinde ölçülmüştür. UU üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen drenajsız kayma direnci değerleri yardımıyla ince ara yüzey elemanlarının kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Seçilen modelde kullanılan zemin, temel, kazık ve ara yüzey özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.11: Kumda koni uç direnci-efektif kayma direnci açısı ilişkisi (Robertson&Campanella, 1983)



Şekil 5.12: Kumda koni uç direnci-elastisite modülü ilişkisi (Robertson&Campanella, 1983)

Tablo 5.1: Modelde kullanılan zemin, kazık, temel ve ara yüzey özellikleri

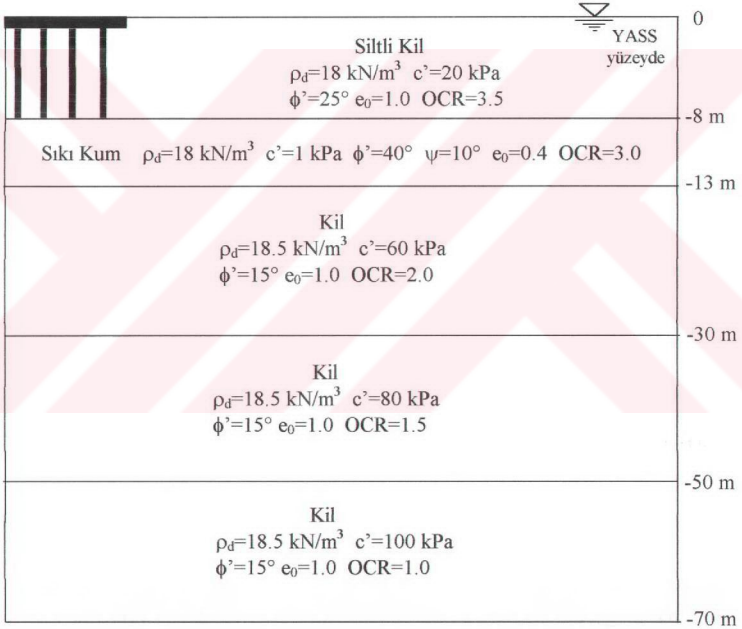
Derinlik (m)	0-8	8-13	13-30	30-50	50-70	Temel ve Kazıklar
İsim	Siltli Kil	Sıkı Kum	Kil	Kil	Kil	Beton
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Drenajsız *(Undrained)*	Drenajlı *(Drained)*	Drenajsız *(Undrained)*	Drenajsız *(Undrained)*	Drenajsız *(Undrained)*	Geçirimsiz *(Non-porous)*
ρ_{doygun} (kN/m^3)	18	18	18.5	18.5	18.5	24
e_0	1.0	0.4	1.0	1.0	1.0	-
$E_{50}^{'ref}$ (kPa)	8000	62000	20000	20000	20000	30000000
$E_{oed}^{'ref}$ (kPa)	7000	65000	20000	20000	20000	-
Üstlük, m	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	-
c' (kPa)	20 c'_{int}=15	1	60	80	100	-
ϕ' ($^\circ$)	25 ϕ'_{int}=20	40	15	15	15	-
ψ ($^\circ$)	0	10	0	0	0	-
$E_{ur}^{'ref}$ (kPa)	25000	246000	60000	60000	60000	-
υ'_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
p^{ref} (kPa)	100	100	100	100	100	-
K_n^{nc}	0.577	0.449	0.666	0.666	0.666	-
$c'_{artış}$ (kPa)	0	0	1	1	1	-
y_{ref} (m)	0	0	-13	-30	-50	-
R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-
R_{inter}	0.75	-	-	-	-	-
OCR	3.5	3.0	2.0	1.5	1.0	-

5.3.5. Hesap adımları

Geometri, sınır şartları ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra modelde K_o koşullarındaki gerilme durumu oluşturulmaktadır. Öncelikle boşluk suyu basınçları hesaplanmakta, daha sonra OCR değerleri göz önünde bulundurularak efektif gerilmeler bulunmaktadır. Çözüm aşaması ise iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci aşamada kazıklar ve yayılı temel zemin ile yer değiştirmekte; bu sırada ek boşluk suyu basıncı oluşmadığı kabul edilmektedir. İkinci aşamada ise daha önce ilgili dilimlere atanan 200 kPa' lık yayılı yük, yazılımın zeminde elasto - plastik davranışı dikkate alan otomatik yük arttırım özelliği *(automatic step size procedure)* ile adım adım uygulanmaktadır.

BÖLÜM 6. SAYISAL ÇÖZÜMLER

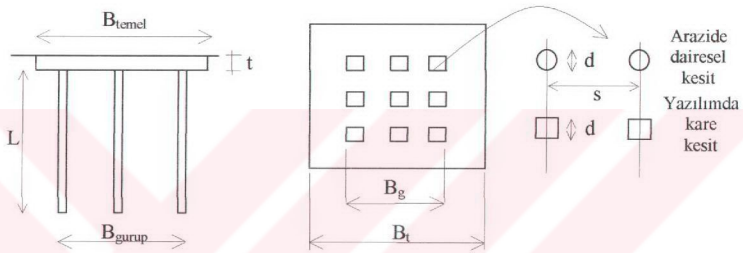
Seçilmiş olan zemin profilinde toplam oturma ve farklı oturma ölçütlerini sağlayan en uygun boyutların bulunması amacıyla, üç boyutlu sonlu eleman yazılımı olan "PLAXIS 3D Tunnel ver1.2" programıyla geniş kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1: Analizlerde kullanılan zemin profili

Şekil 6.1' de gösterilen zemin profilinde kazıklar -8 m derinlikteki sıkı kum tabakası üzerine oturduğundan kazıkların boyu her temel kalınlığı için sabittir. Kullanılan paket programın özelliği gereği dairesel kazık yerine kare kesitli kazıklar

modellenmiş ve 20 m*20 m' lik temelde kazıkların genişlikleri (d) 0.4 m, 0.6 m ve 0.8 m olmak üzere üç farklı değerde seçilmiştir. Yayılı temel kalınlıkları (t) 0.6 m, 0.8 m ve 1.0 m alınmış olup gömme derinlikleri (D_f) yayılı temel kalınlıklarına eşittir. Modellemelerde kazıklar, yayılı temel genişliğinin önceden belirlenmiş oranlarına eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Kazık gurubunun genişliğinin yayılı temel genişliğine oranı olarak tanımlanan kazık yayılım oranı (B_g/B_t), 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 olarak alınmıştır. Şekil 6.2' de 3*3=9 kazıktan oluşan modelde çözümlerde kullanılan değişkenler örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Kazıklı yayılı temelde değişkenlerin gösterimi

Yukarıda verilen kazık genişliği (d), temel kalınlığı (t) ve kazık yayılım oranının (B_g/B_t) farklı değerleri için kazık sayısı (n) arttırılarak, yani kazıklar arası uzaklık (s) azaltılarak 165 çözüm yapılmıştır. Tablo 6.1' de modellemede kullanılan geometrik değişkenlere (d, t, B_g/B_t, n) bağlı olarak kazık aralığı oranları (s/d) verilmiştir.

Tablo 6.1: Kazık aralığı oranının (s/d) değerleri

			Kazık Sayısı (n)								
Kazık Genişliği d (m)	Temel Kalınlığı t (m)	B_g/B_t	3*3 9	5*5 25	7*7 49	9*9 81	10*10 100	13*13 169	15*15 225	17*17 289	21*21 421
0.4	0.6	1.0	24.50	12.25	8.17		5.44	4.08		3.06	2.45
	0.8	0.8	19.50	9.75	6.50	4.88		3.25			
	1.0	0.6	14.50	7.25	4.83						
		0.4	9.50	4.75	3.17						
0.6	0.6	1.0	16.17	8.08	5.39		3.59	2.69	2.31		
	0.8	0.8	12.83	6.42	4.28	3.21					
	1.0	0.6	9.50	4.75	3.17						
		0.4	6.17	3.08	2.06						
0.8	0.6	1.0	12.00	6.00	4.00		2.67	2.00	1.71		
	0.8	0.8	9.50	4.75	3.17	2.38					
	1.0	0.6	7.00	3.50	2.33						
		0.4	4.50	2.25	1.50						

Ana çözümlere geçmeden önce iki ve üç boyutlu sonlu eleman yöntemi çözümleri arasındaki farklılığı göstermek ve üç boyutlu yazılımla çalışma nedenini açıklamak amacıyla 12 ön çözümleme yapılmıştır.

Yapılan ana çözümlerden sonra ortamda olabilecek çeşitli farklılıkların davranışa olan etkisini görebilmek amacıyla ek çözümler yapılmıştır.

Kazık boyunun arttırılmasının etkisini incelemek amacıyla bir modelde (d=0.4 m, t=0.6 m, n=25, s=9.75, B_g/B_t=0.8) kazıklar sıkı kum tabakasına 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m ve 5 m girecek şekilde ek çözümler yapılmıştır.

16 modelde yayılı temel altında sıkı kum tabakasına kadar olan zeminin kayma direnci parametreleri azaltılarak bunun sistemin oturma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir.

Kayma direnci düşük zeminde kazık boyunun artışının oturmalara etkisini görebilmek amacıyla 25 ve 49 kazıklı toplam 10 modelde kazık boyu 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m ve 5 m arttırılarak çözümler yapılmıştır.

Ana çözümlerde 20 m*20 m olarak modellenen yayılı temelde, temel genişliğinin etkisini görmek amacıyla ayrıca temel genişliği 9 modelde 10 m ve 9 modelde de 30 m alınarak yeni çözümler yapılmıştır.

Sıkı kum tabakasının başlangıç derinliği ve kalınlığı değiştirilerek oturmalarda belirebilecek farklılıklar incelenmiştir. İlk durumda -8 m' de olan sağlam tabaka başlangıcı -6 m' ye çekilmiş; her iki durumda kum tabakasının kalınlığı 5 m ve 3 m olarak çözümler yapılmıştır.

Yaklaşık on katlı bir yapıyı temsil eden 200 kPa' lık düşey yük altında ani oturma davranışı yanında yapının bu yük altında göstereceği uzun süreli oturmaların hangi değerlere ulaşabileceğini tahmin etmek ve meydana gelebilecek oturmaların ölçütler içinde kalıp kalmayacağını görmek amacıyla da 6 modelde drenajlı çözümler yapılmıştır.

6.1. İki ve Üç Boyutlu Çözümlerin Karşılaştırılması

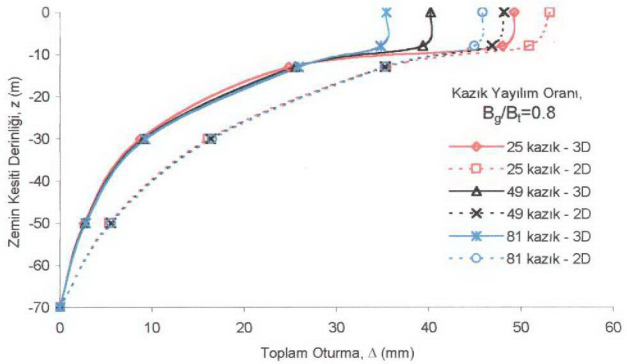
Kazıklı yayılı temel problemi, günümüzde sonlu eleman yöntemini kullanan iki boyutlu yazılımlarla hızlı bir şekilde çözülebilmektedir. Ancak bu yöntemlerde kazıklar, yayılı temel ve zemin arasındaki karmaşık etkileşimin modellenebilmesi için bir çok kabulün yapılması gerekliliği sonuçları tartışmalı hale getirmektedir. Aradaki farkı göstermek amacıyla kazık yayılım oranının 0.8 ve 1.0 olduğu 25, 49 ve 81 kazıklı toplam 12 modelde iki ve üç boyutlu çözümler yapılmıştır. İki boyutlu çözümler yapılırken, kazıkların oluşturduğu eşlenik duvarın elastisite modülü ve birim hacim ağırlığıyla kazık - zemin ara yüzeyindeki etkileşim bölgesinin kayma direnci parametreleri için dönüşümler yapılmıştır.

İki boyutlu modellerin çözüm süresi, PIII-600 MHz ve PIV-1700 MHz işlemcili bilgisayarlarda 30 saniyenin altında çıkmıştır. Üç boyutlu modellerde PIII-600 MHz işlemcili, 128 MB bellekli bilgisayar "yetersiz" mesajı verirken çözüm süresi PIV-1700 MHz işlemcili, 1 GB bellekli bilgisayarda 3 saate kadar düşmüştür (Tablo 6.2). Hesaplar sonucunda iki ve üç boyutlu çözümler arasında %5' den %20' ye varan farkların çıkması, kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanılması durumunda üç boyutlu çözüm yapılmasının gerekliliğini göstermiş ve kullanılan bilgisayarların kapasitelerinin artması ile çözüm süreleri kabul edilebilir seviyelere düşmüştür.

Tablo 6.2: İki ve üç boyutlu modellerde model değişkenleri ve çözüm süreleri

B_g/B_t	D	n	s/d	t	2D				3D			
	(m)			(m)	El. Say.	Düğ. Say.	Ger. Nok. S.	Süre	El. Say.	Düğ. Say.	Ger. Nok. S.	Süre
1,0	0,4	25	12,25	0,6	934	1945	2802	< 30s	19448	52649	116688	3sa 26dak
1,0	0,4	49	8,17	0,6	966	2009	2898	< 30s	23085	61760	138510	3sa 46dak
0,8	0,4	25	9,75	0,6	824	1725	2472	< 30s	19656	53267	117936	4sa 43dak
0,8	0,4	49	6,50	0,6	930	1937	2790	< 30s	22590	60756	135540	4sa 48dak
0,8	0,4	81	4,88	0,6	974	2025	2922	< 30s	25984	69687	155904	5sa 19dak
Yayılı Temel				0,6	307	676	921	< 30s	8379	23576	50274	3sa 4dak

Şekil 6.3' de temel merkezi altında hesaplanan oturmalar gösterilmiştir. Buna göre iki boyutlu sonlu eleman çözümünde oturmalar tüm kesit derinliğince daha fazla çıkmaktadır. Bu da kazıkların eşlenik duvara dönüştürüldüğü çözümlerde gerilmelerin daha aşağı tabakalara kadar ulaştığını göstermektedir.



Şekil 6.3: İki ve üç boyutlu çözümde temel merkezi altında derinlik boyunca oturmalar

İki boyutlu modellerde farklı oturmalar sadece merkez - kenar arasında hesaplanabilmektedir. Kazık yayılım oranının 1.0 olduğu 49 kazıklı modelde merkez - kenar arasındaki farklı oturmalar iki ve üç boyutlu çözümlerde sırasıyla 18,1 mm ve 16,0 mm çıkarken, merkez - köşe arasındaki farklı oturma üç boyutlu çözümde 29,0 mm bulunmuştur. İki boyutlu çözümde eğilme momenti hesaplanabilirken burulmalarla ilgili bir sonuç elde edilememektedir.

Toplam oturmalar için 81 kazıklı model örnek verilirse, temelin ortalama oturması iki boyutlu modelde 45,5 mm bulunurken, üç boyutlu çözümde 36,8 mm olarak hesaplanmıştır.

Kazıkların oturma azaltıcı olarak kullanıldığı durumlarda iki ve üç boyutlu çözümler arasında %20' ye varan fark nedeniyle üç boyutlu çözüm yapılmasının gerektiği açık olarak belirmiştir.

Çalışma süresince, model boyutları, eleman büyüklükleri, malzeme modeli ve parametreleri ile ara yüzey elemanı tipinin belirlenmesi amacıyla 135, karar verilen model üzerinde 165 ve çeşitli farklılıkların etkisini araştırmak amacıyla 70 olmak üzere toplam 370 civarında üç boyutlu model hazırlanmış ve analiz yapılmıştır. Ön çözümlemeler, ana çözümlemelere göre daha basit modeller üzerinde yapıldığından

model hazırlama ve çözüm süreleri daha kısa olmuştur. Ana çözümlerde model hazırlama süresi toplam 100 saati bulmuştur.

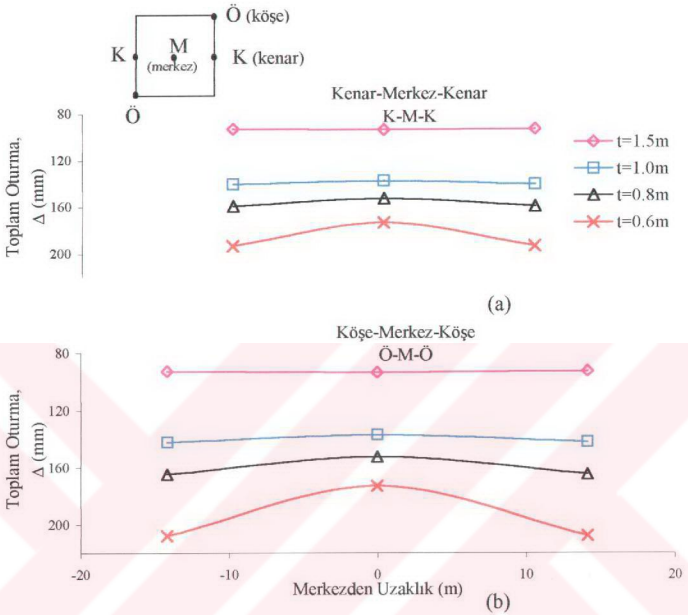
Model hazırlama süresi, yeni hazırlanan bir model için 30 dakika civarındadır. Model hazırlanırken mevcut modellerden yararlanılabildiği için bu sürenin 10 dakikanın altına düştüğü modeller de olmuştur. Model hazırlama süresi, kazık sayısına bağlı olarak artmış ve en çok kazığın bulunduğu modelde iki saati aşmıştır. Kazıkların önüne ve arkasına ara yüzey elemanların atandığı düzlemler tanımlandığı için kazık sayısı arttıkça, elemanlar küçülmüş ve sayıları artmıştır. Örneğin, uç durum olarak 441 kazıklı modelde z ekseni boyunca kazıkların önü, kendisi ve arkası için oluşturulan 33 düzlemde (çeyrek modelde 11 sıra kazık), her biri (x - y ekseninde de 11 kazık ve iki tarafında ara yüzey elemanları) için tek tek farklı malzeme ataması yapılmıştır. Bu da sayısı en az 1000 olan bir işlemdir. Sonlu eleman ağında, elemanların yerleşimini ve sayısını değiştirmeyen durumlarda (temel kalınlığı veya kazık genişliğinin artması) malzeme atama tekrar gerekmezken, kazık sayısının değiştiği her durumda işlemlerin tamamı tekrar yapılmıştır.

Hesaplar, belli bir sayıda model hazırlandıktan sonra yazılımın "çoklu çözüm" özelliği kullanılarak yapılmıştır. Çözümleme, eleman sayısına bağlı olarak ana modellerde en az 1, en çok 5 saat sürmüş, genelde 3-4 saat aralığında yoğunlaşmıştır. Çeşitli farklılıkların etkisinin incelendiği modellerde çözüm süreleri 20 dakika ile 8 saat 40 dakika arasında değişmiştir. Çalışma sırasında toplam çözüm süresi, 700 saat civarında gerçekleşmiştir. 165 ana modelin çözümü 472 saat, 70 ek modelin çözümü 220 saat sürmüştür. Ana modellerin ortalama çözüm süresi 3 saatin altındadır.

6.2. Yayılı Temel Çözümleri

Kazıklı yayılı temel çözümlerine başlamadan önce seçilmiş zemin kesitinde kazıksız yayılı temellerin davranışının belirlenebilmesi amacıyla çözümler yapılmıştır. Yayılı temellerde durum, 20 m*20 m boyutlarındaki temelin dört farklı kalınlığı için ve 0.6 m kalınlığındaki temelin üç farklı genişliği için incelenmiştir. İlk durumda 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m ve 1.5 m kalınlıklarındaki temeller modellenmiş, ikinci durumda da 10 m*10 m ve 30 m*30 m boyutlarındaki yayılı temeller için çözümler yapılmıştır.

Tüm yayılı temel ve kazıklı yayılı temel çözümlerinde gömme derinliği (D_f) yayılı temel kalınlığına eşit alınmıştır.

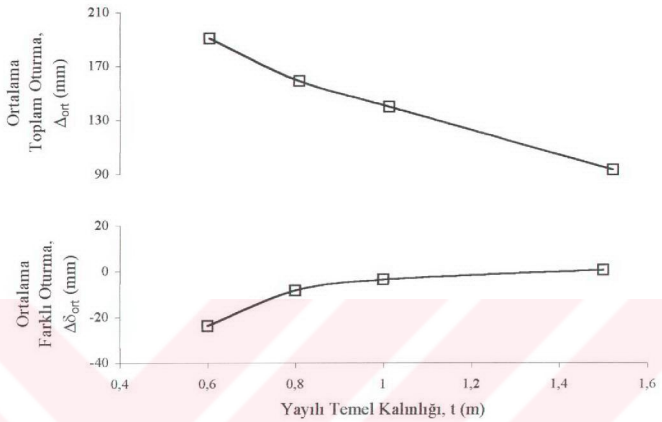


Şekil 6.4: Yayılı temelin oturma kalıbı a: Kenar-Merkez-Kenar b: Köşe-Merkez-Köşe

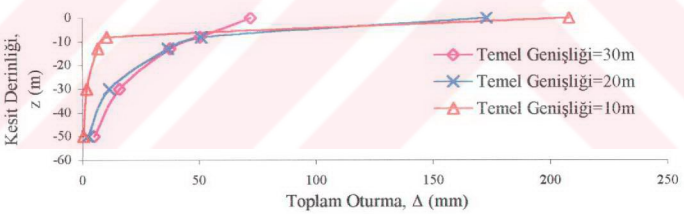
Şekil 6.4' de farklı kalınlıklardaki yayılı temelin 200 kPa' lık düzgün yayılı yükle yüklenmesi sonucunda aldığı şekil görülmektedir. Yayılı temel ince olduğu durumlarda esnek davranış göstermekte, bunun sonucunda kenar ve köşelerdeki taban basınçları ve oturmalar daha fazla çıkmaktadır. Temel kalınlığı arttıkça taban basıncı dağılımı düzgün hale gelmekte; bu da beklendiği gibi temelin yaptığı toplam ve farklı oturmaları azaltmaktadır.

Şekil 6.5' de artan temel kalınlığına karşılık ortalama toplam oturma (Δ_{ort}) ve ortalama farklı oturma ($\Delta\delta_{ort}$) değerleri görülmektedir. 0.6 m' lik temel kalınlığında farklı oturmanın 20 mm gibi yapıların dayanabileceği değerde çıkmasına karşın ortalama toplam oturma 190 mm gibi kabul edilemez büyüklükte belirmektedir (Önalp, 1983; Bowles, 1988). Temel kalınlığı arttırıldıkça, farklı oturma değerlerinin

sıfıra yönelmekte olduğu ve kalınlığın 1 m olduğu durumda sıfır çıktığının görülmesine rağmen ortalama toplam oturma değeri 1.5 m kalınlığındaki temelde dahi 90 mm gibi yüksek bir değer almaktadır.



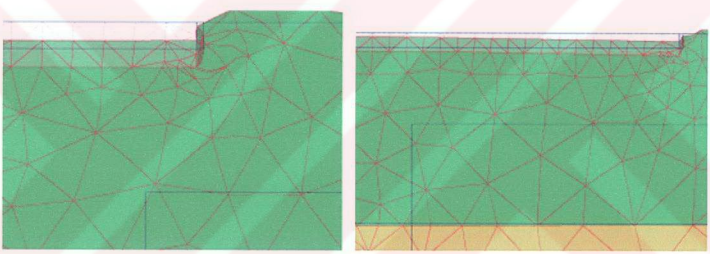
Şekil 6.5: Yayılı temel kalınlığının oturmalara etkisi



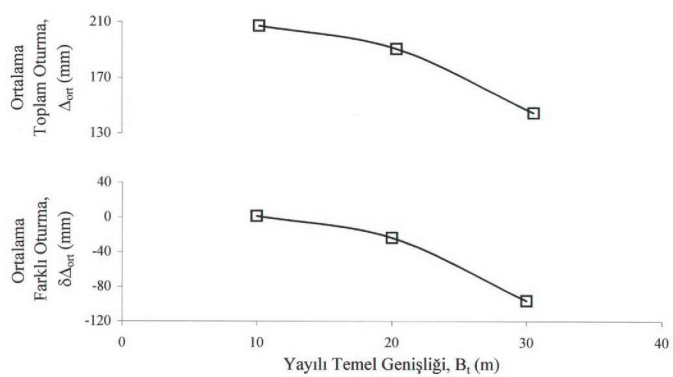
Şekil 6.6: Farklı genişlikteki yayılı temellerin ortasında meydana gelen oturmalar

Şekil 6.6' da temelin farklı boyutları için derinliğe karşılık gelen temel ortasındaki oturmalar görülmektedir. Temel boyutunun büyümesiyle oturmaların artacağı beklentisi, temel rijitliğinin giderek azalması ve -8 m' deki sıkı kumun gerilme dağılışını etkilemesi sebebiyle gerçekleşmemektedir. Derin tabakalarda meydana gelen sıkışmalar büyük boyutlu temelde daha fazla iken yüzeyde gerçekleşen en büyük oturma en küçük boyutlu temel altında oluşmaktadır. Temelin merkezindeki oturmalara bakıldığında, 10 m genişliğindeki temelde oturmaların yaklaşık %95' inin, 20 m' lik temelde %70' inin ve 30 m' lik temelde %30' unun sıkı tabakanın

üzerinde meydana geldiği görülmektedir. Ancak her üç durumda da temel köşesindeki oturmalar neredeyse eşit (207.2, 207.8 ve 206.4 mm) çıkmıştır. Temel boyutu artıp temel kalınlığı sabit kaldığından temel giderek daha esnek davranış göstermektedir (Şekil 6.7). Taban basınçları 10 m genişlikteki temelde düzgün dağılırken, boyut büyüdükçe temel köşelerindeki gerilmeler artmakta, bu da köşelerde meydana gelen oturmalara yansımaktadır. Şekil 6.8' de farklı oturmaların temel boyutunun büyümesiyle doğrusaldan saparak arttığı görülmektedir. Küçük boyutlu temellerde (rijit) ortalama toplam oturmalar yüksek çıkarken farklı oturma değerleri sıfır olmaktadır. Büyük boyutlara sahip temellerde (esnek) ise farklı oturmalar aşırı değerler almaktadır. Sadece yayılı temel olması durumunda temel genişliğinin büyütülmesi ile aynı zamanda temel kalınlığının da arttırılmasının gerektiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 6.7: Farklı genişlikteki yayılı temellerde meydana gelen oturmalar



Şekil 6.8: Yayılı temel genişliğinin oturmalara etkisi

Yukarıdaki sonuçlara bakılarak seçilen modelde ve bir çok aluviyal ortamda da olduğu gibi -8 m ve yüzeye daha yakınlarda kalınlığı 5 m' ye varabilen sıkı kum/çakıllı kum içeren zemin profillerinde oturmaları kabul edilebilir değerlere çekmek için yayılı temel kalınlığını arttırarak çözüm aramanın uygun bir yol olmadığı ortaya çıkmaktadır. Bunu göstermek amacıyla sıkı kum tabakasının -6 m' de olduğu durumda yapılan çözümlerde 0.6 m kalınlığındaki yayılı temelin ortalama oturması 147,5 mm iken, temel sisteminin bodrumlu seçilmesi durumunda 30,0 mm ve 0,4 m genişliğinde 25 kazık kullanılması durumunda ise 56,9 mm çıkmıştır. Farklı oturmalar da yayılı temelde 25 mm dolayında iken diğer iki durumda sıfıra yakın değer almıştır. Sonuç olarak yayılı temelin kalınlığını arttırmak yerine temel sistemlerinin bodrumlu yapılması veya bu çalışmanın konusu olan kazıklı yayılı temellerin kullanılması daha uygun çözümler olabilecektir (Şekil 6.9).

Şekil 6.9:Değişik temel sistemleri

a: Yayılı temel b: Bodrumlu yayılı temel c: Kazıklı yayılı temel

6.3. Kazıklı Yayılı Temel Çözümleri

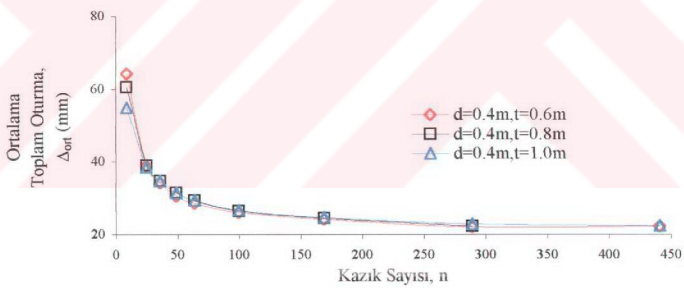
6.3.1. Ana çözümler

6.3.1.1. Kazıklı sistemde kazık sayısının etkisi

Modellerde kazıklar temelin önceden belirlenmiş genişliklerine kare oluşturacak şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmişlerdir. 3*3 = 9 kazık, 5*5 = 25 kazık ve 7*7 = 49 kazığın bulunduğu modeller tüm kazık genişlikleri ve temel kalınlıkları için çözülmüş, artan kazık sayısının oturmalara etkisini görmek amacıyla 13*13,

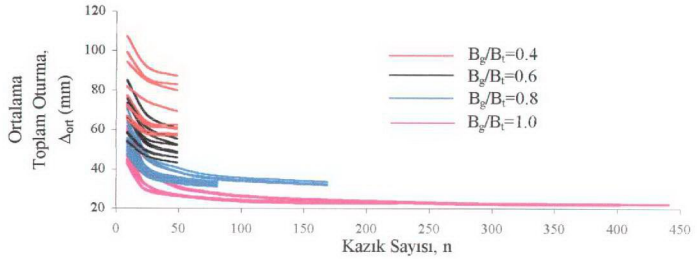
15*15, 17*17 ve 21*21 gibi geleneksel çözümlerden de gerekmediği bilinen sayıda kazığa sahip olan modeller de denenmiştir.

Şekil 6.10' da kazık genişliği 0.4 m olan kazıklı yayılı temelin farklı kalınlıkları için kazık sayısına karşılık ortalama toplam oturmalar (Δ_{ort}) gösterilmiştir. Cooke (1986) tarafından kullanılan ifadeyle kazık sayısının artması özellikle az sayıda kazığın bulunduğu aralıklarda oturmaları belirgin derecede düşürmüş, kazık - zemin bloğu davranışının oluşabileceği kazık aralığına yaklaşıldıkça, artan kazık sayısının oturma azaltıcı etkisi belirgin biçimde düşmüştür. Blok hareketi başladıktan sonra ise daha sık kazık kullanmanın oturma azaltıcı etkisi tümüyle ortadan kalkmıştır. Örnekle, kazık sayısının 9' dan 25' e çıktığı durumların birinde oturmalar 65 mm' den 40 mm' ye düşmüş; 25' den 49' a çıkması ile elde edilen yaklaşık 10 mm' lik oturma azalması, kazık sayısının 100' den 450' ye çıkması durumunda sadece birkaç mm mertebesinde kalmıştır. Bir diğer deyişle 100 kazık uygulaması çözümde üst limiti göstermektedir.

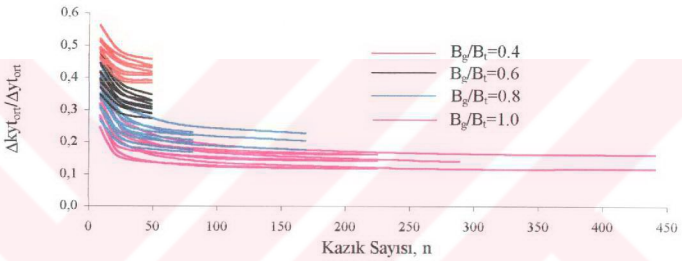


Şekil 6.10: Ortalama toplam oturmaların kazık sayısına bağlı değişimi

Şekil 6.11' de çözülen tüm modellerdeki ortalama toplam oturmalar kazık sayısına karşılık olarak verilmiştir. Oturma düzeyleri model değişkenlerine bağlı olarak farklılık gösterse de tüm modellerde belli bir sayıdan fazla kazık kullanmanın oturmaları azaltıcı etkisinin ortadan kalktığı görülmektedir.

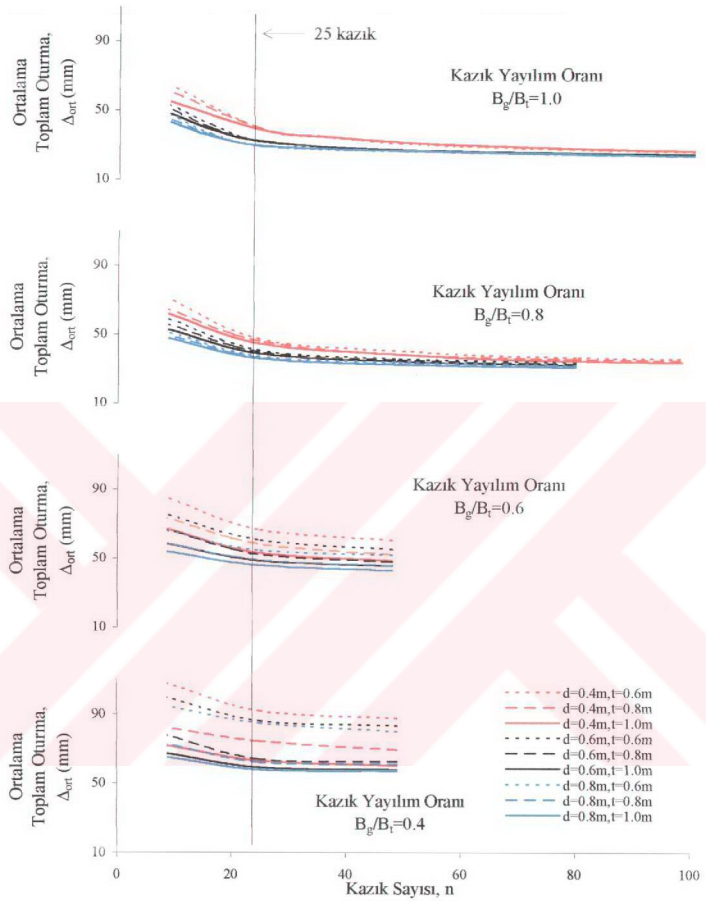


Şekil 6.11: Tüm modellerde ortalama toplam oturmaların kazık sayısına bağlı değişimi



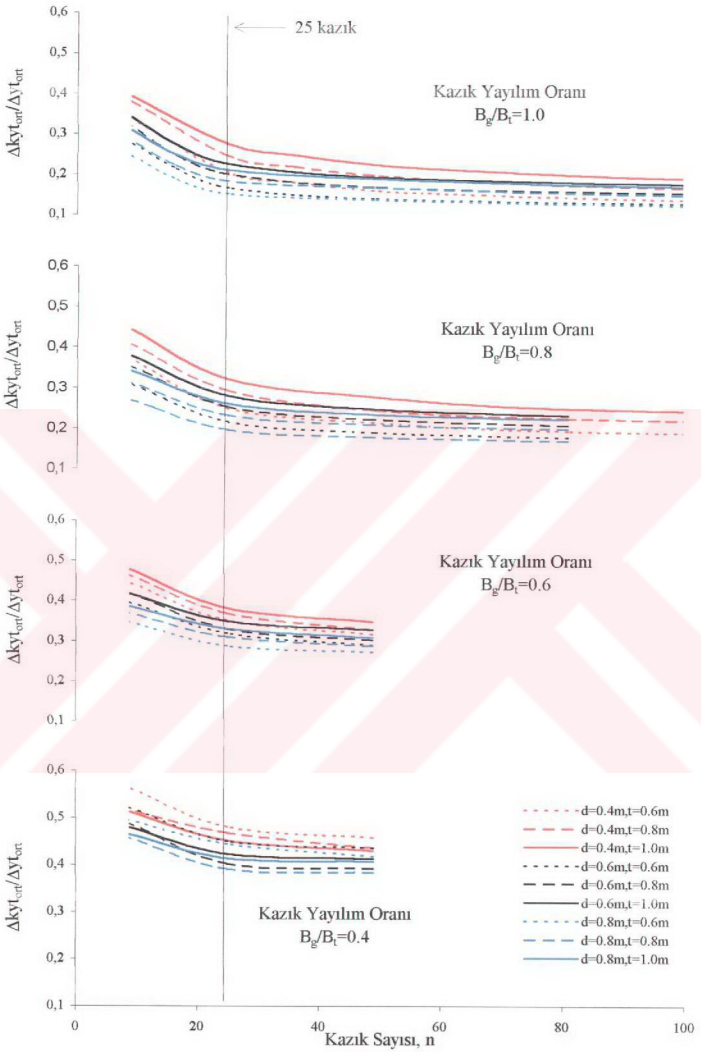
Şekil 6.12: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı yayılı temelde oturmaların yayılı temele oranı

Kazıklı yayılı temellerde meydana gelen oturmalar aynı kalınlıktaki yayılı temelin oturmasına göre normalleştirilerek verildiğinde tekrar bir optimizasyon problemiyle karşı karşıya olunduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 6.12). Kazıklı yayılı temellerde toplam oturmaların en fazla çıktığı durumda (B_g/B_t=0.4) 9 kazık bulunması halinde meydana gelen oturma, yayılı temelin %56' sı iken 25 kazık olması durumunda bu değer %48 oranına düşmekte, 49 kazıkta ise %46 civarında gerçekleşmektedir. Yani kazık sayısı 9' dan 25' e çıkarken sağlanan fayda %8 iken, kazık sayısı 25' ten 49' a çıkarken elde edilen fayda ise sadece %2 olmaktadır. Aynı şekilde toplam oturmaların en az hesaplandığı duruma (B_g/B_t=1.0) bakıldığında kazıklı yayılı temelde meydana gelen oturmaların kazıksız durumda meydana gelen oturmalara oranı ise 9 kazık için %24, 25 kazık için %16 ve 49 kazık için de %14 olmaktadır. Aynı durumda kazık sayısı 450' ye yükseltildiğinde ise bu oran ancak %12' ye düşmektedir. Sonuçta kazık sayısını belli bir değerden fazla arttırmanın hiç oturma azaltıcı etki yapmadığı anlaşılmaktadır.



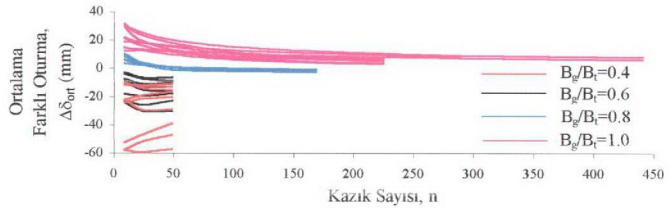
Şekil 6.13: Kazık sayısının artışı ile ortalama toplam oturmaların değişimi

Şekil 6.13 ve 6.14' de farklı kazık yayılım oranları (B_g/B_t) için kazık sayısına bağlı olarak oturmaların değişimi sunulmaktadır. Buradan görülen, verilmiş zemin kesitinde kazık sayısının 25' ten fazla olmasının, sağlanacak oturma azaltma etkisinde önemsenecek düşüşler göstermemesidir.

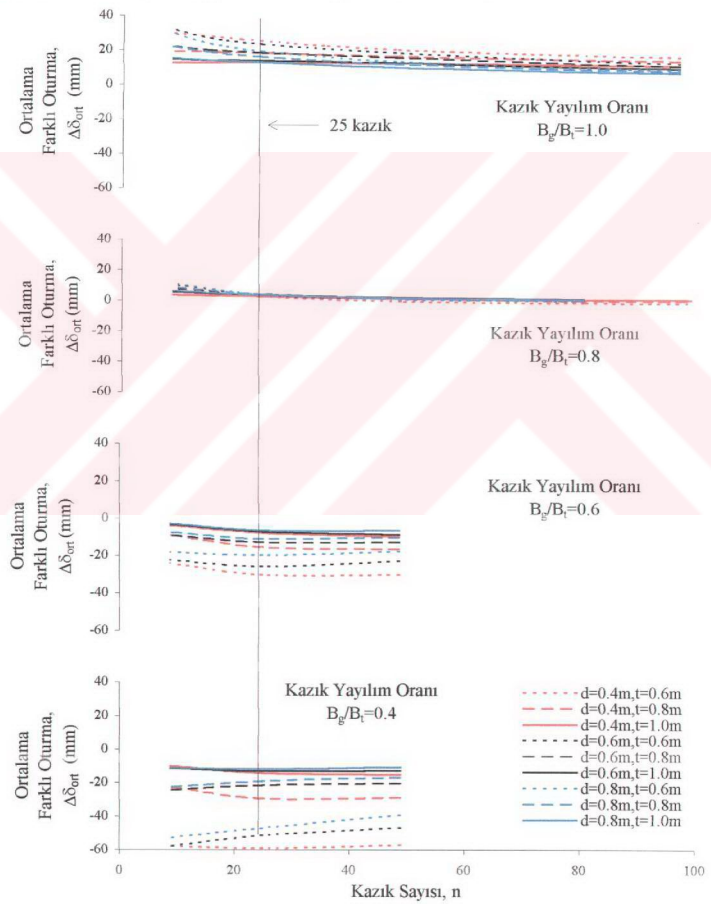


Şekil 6.14: Kazık sayısının artışı ile ortalama toplam oturmaların değişimi

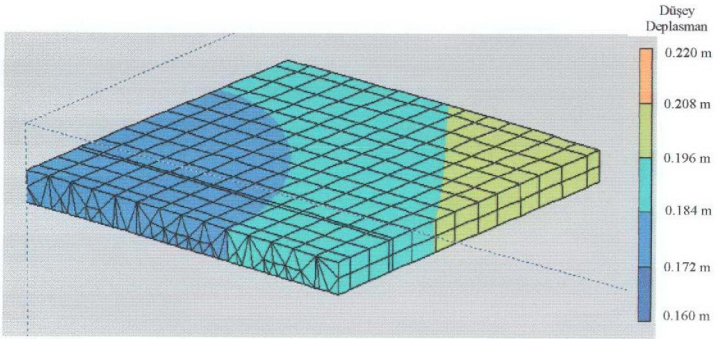
Sonuçlara farklı oturmalar açısından bakıldığında da benzer eğilimler daha açık olarak görülmektedir (Şekil 6.15 ve 6.16).



Şekil 6.15: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı yayılı temelde farklı oturmalar



Şekil 6.16: Kazık sayısına bağlı olarak kazıklı temelde farklı oturmalar



Şekil 6.17: Yükleme sonucunda temel plağının eş deplasman eğrileri

Şekil 6.17' de yükleme sonucunda temel plağının aldığı şekil eş oturma eğrileri biçiminde verildiğinde merkez - kenar ve merkez - köşe arasındaki farklı oturmaların aynı olmadığı dikkat çekmektedir.

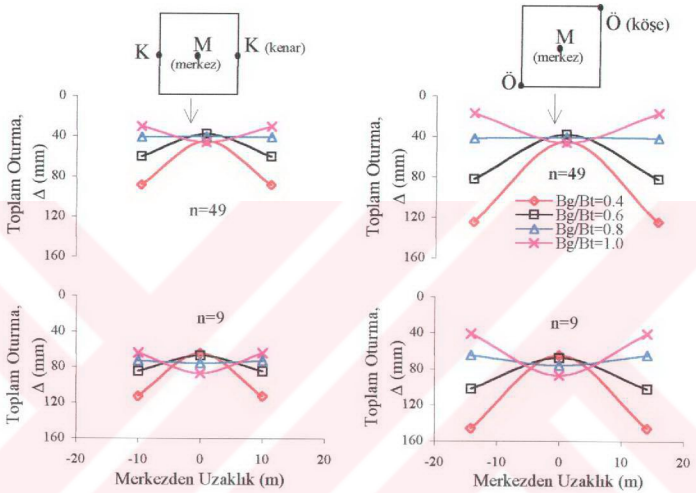
Şekil 6.18' de kazık genişliğinin ve temel kalınlığının en küçük, Şekil 6.19' da ise en büyük olduğu durumlarda temel plağının aldığı şekil gösterilmiştir. Bu şekillere bakıldığında kazık sayısının artmasının toplam oturmaları azalttığı ancak farklı oturmaları azaltmak için uygun bir yol olmadığı anlaşılmaktadır. Şekillerde dikkat çeken husus, B_g/B_t=0.8 olması durumunda oturmaların neredeyse eşit çıktığıdır.

6.3.1.2. Kazık alanının etkisi

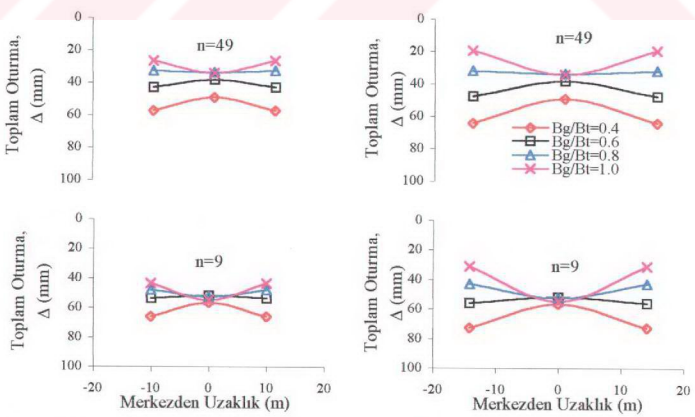
Kazık sayısını fazla arttırmanın oturmalar açısından yarar sağlamadığı kullanılan kazıkların toplam alanına karşılık oturmalar çizilerek de görülebilir (Şekil 6.20 ve Şekil 6.21). Çözüm yapılan modeller arasında kazık alanının 100 m^2' den fazla olduğu yani kazık alanının yayılı temel alanına oranının %25' i aştığı örnekler bulunmaktadır. Kazık alanının 10 m^2 ve kazık alanının yayılı temel alanına oranının da %2 olduğu durumlar oturma azaltmanın etkin olduğu sınırları göstermektedir.

Şekil 6.22.a' da toplam oturmalar, Şekil 6.22.b' de ise yayılı temele göre normalleştirilmiş oturmalar, kazıkların yerleşim oranına göre normalleştirilmiş alanlarına karşılık verilmişlerdir. Sonuçlara göre, B_g/B_t=1.0 olduğu durumda %2

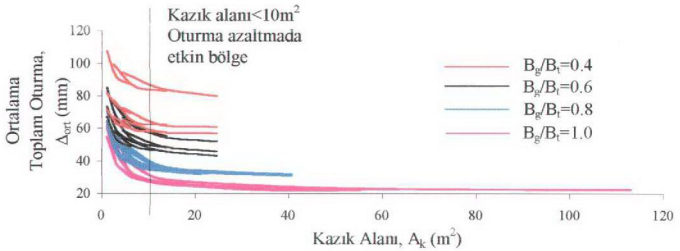
(400*0.02=8 m^2) olan normalleştirilmiş kazık alanı değeri B_g/B_t=0.8 durumunda %3 (0.8*400*0.025=8 m^2), B_g/B_t=0.6 durumunda %3.5 (0.6*400*0.035=8.4 m^2) ve B_g/B_t=0.4 durumunda %5 (0.4*400*0.05=8.0 m^2) olmaktadır. Kazık yayılım oranlarının tamamı için söylenirse, toplam kazık kesit alanının yayılı temel alanının sadece %2' si mertebesinde olduğu durumlar kazıkların oturma azaltıcı etkisinin sona erdiği oranı göstermektedir.



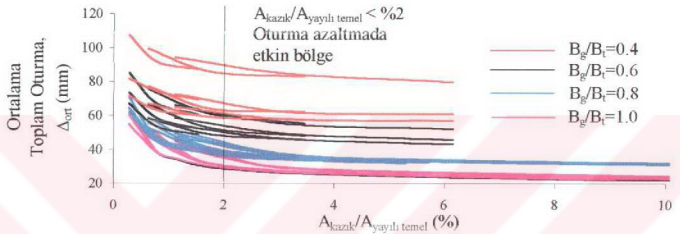
Şekil 6.18: Kazık sayısına (n) bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (d=0.4 m, t=0.6 m)



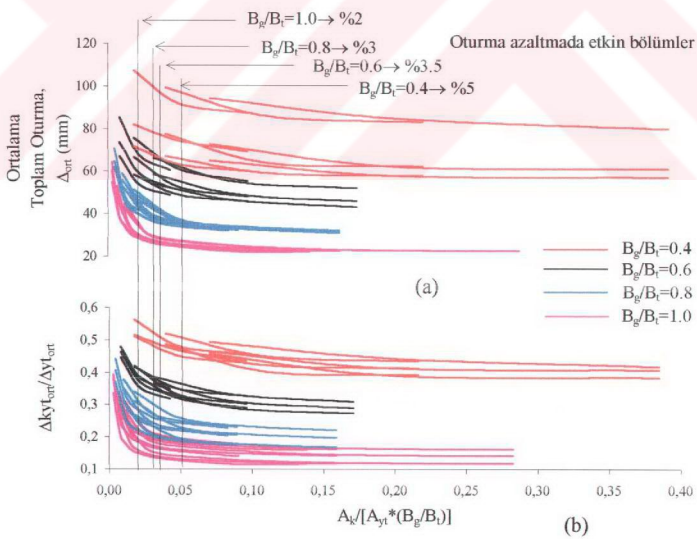
Şekil 6.19: Kazık sayısına (n) bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (d=0.6 m, t=1.0 m)



Şekil 6.20: Kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi



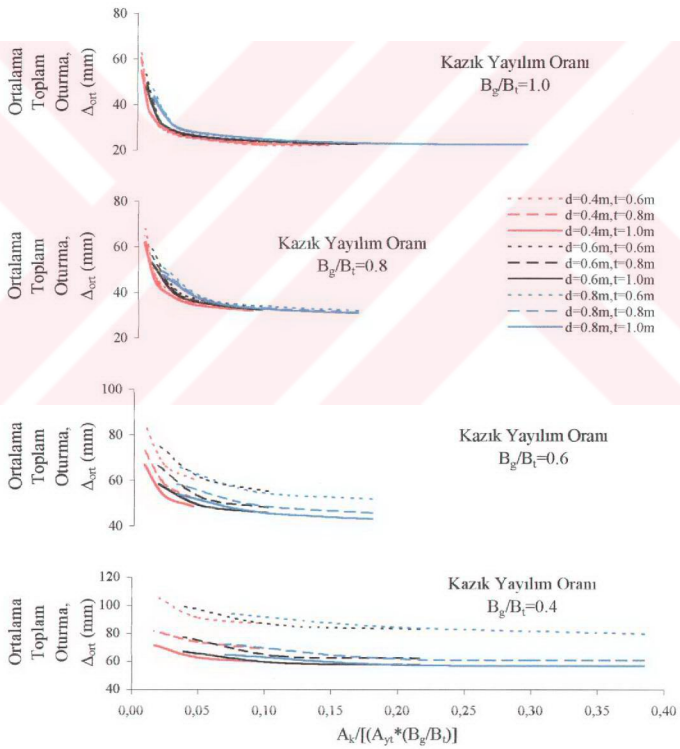
Şekil 6.21: Kazık alanı yüzdesi - ortalama toplam oturma değişimi



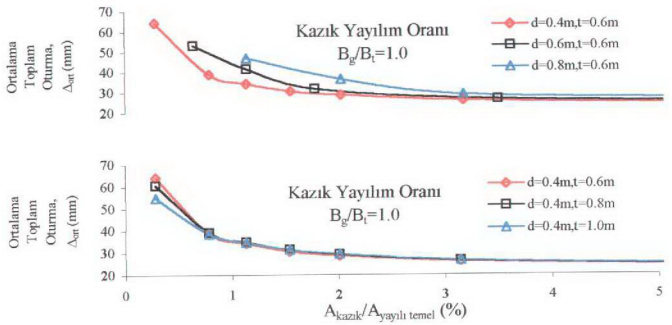
Şekil 6.22.a: Normalleştirilmiş kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi

b: Normalleştirilmiş kazık alanı - normalleştirilmiş ortalama toplam oturma değişimi

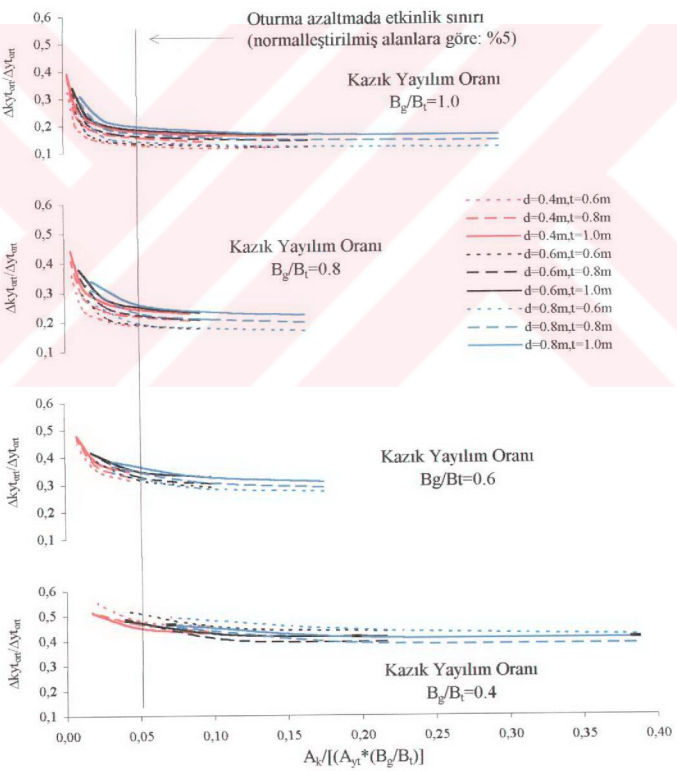
Şekil 6.23' de farklı kazık yayılım oranları için normalleştirilmiş kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi ayrı ayrı verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında eğrilerin kendi içlerinde küçük farklar gösteren guruplara ayrıldıkları görülmektedir. Şekil 6.20 ve Şekil 6.21' de de farkedilen bu durum ayrıca incelenmiş ve örnek olarak kazık yayılım oranının 1.0 olduğu durum değerlendirilerek Şekil 6.24' de sunulmuştur. Buna göre, kazık boyutu arttıkça oturmaları azaltmakta etkili olan alan oranı bir miktar artmaktadır. Kazık genişliği 0.4 m iken %1 olan bu oran, kazık genişliği 0.6 m' ye çıkınca %2, 0.8 m olunca %2.5 olmuştur. Temel kalınlığındaki artış oturma azaltma alan sınırını hiçbir şekilde etkilememektedir.



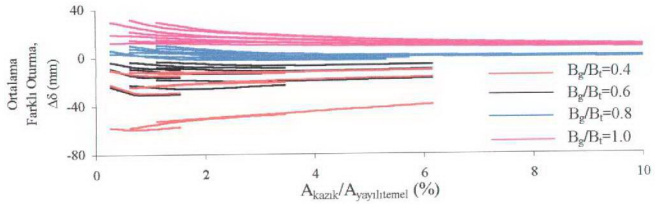
Şekil 6.23: Normalleştirilmiş kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi



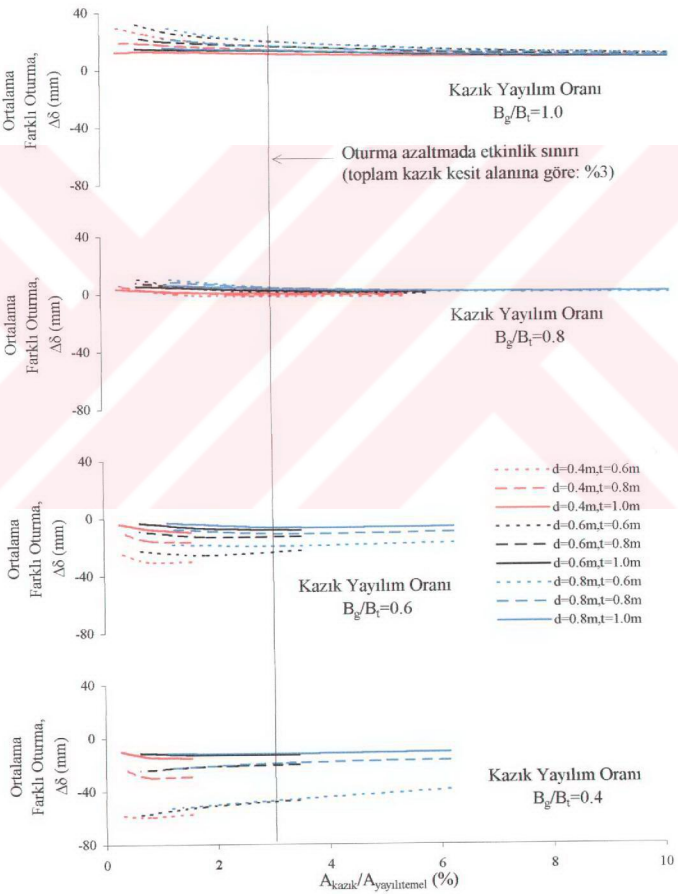
Şekil 6.24: Farklı kazık genişliği ve temel kalınlığı için kazık alanı - oturma ilişkisi



Şekil 6.25: Kazık alanı - ortalama toplam oturma değişimi



Şekil 6.26: Kazık alanı - ortalama farklı oturma değişimi (tüm değerler)



Şekil 6.27: Kazık alanı - ortalama farklı oturma değişimi

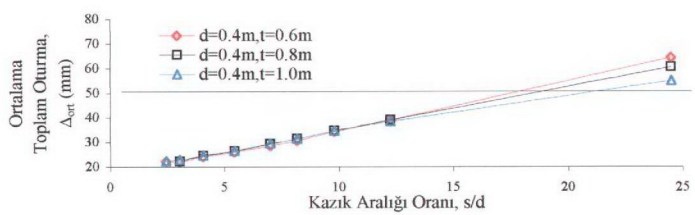
Kazıklı yayılı temel çözümlerinden elde edilen oturma sonuçları kazıksız yayılı temelin sonuçlarına göre normalleştirilip verilirse (Şekil 6.25), tüm durumlarda en yüksek sınır kazık alanı değerinin %5 mertebesinde olduğu görülmektedir.

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27' de farklı oturmalardaki değişimler kazık alanının yayılı temel alanına oranına karşılık sunulmuştur. Bu eğriler yardımıyla, kullanılan kazık alanının %3' den fazla olması durumunda oturmalarda azalmanın duracağı bir kez daha görülmektedir.

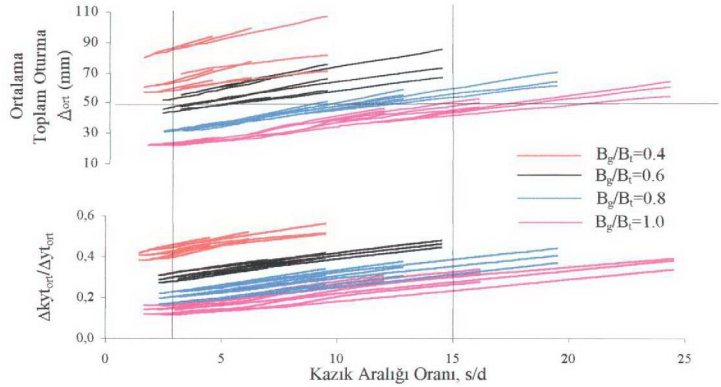
6.3.1.3. Kazık aralığı oranı etkisi

Şekil 6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31' de kazık aralığı oranının toplam oturma üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Şekil 6.28' de görüldüğü gibi 0.4 m genişliğinde kazıklara sahip yayılı temellerde 15' den büyük s/d değerleri 50 mm' den daha küçük ani oturmalar vermektedir (B_g/B_t=1.0). Bu değer, yükün tamamının kazıklar tarafından taşındığını kabul eden geleneksel çözüm yöntemlerinde hesaplanacak s/d oranlarına göre küçük kalacaktır. s/d=12.25 (25 kazık) olan modelde oturmalar 35 mm hesaplanırken, s/d=5.44 (100 kazık) olan modelde 25 mm' ye düşmektedir. Kazık aralığı oranını çok küçültmek oturmalar açısından büyük katkı sağlamadığı gibi ekonomik olma özelliğini yitirecektir.

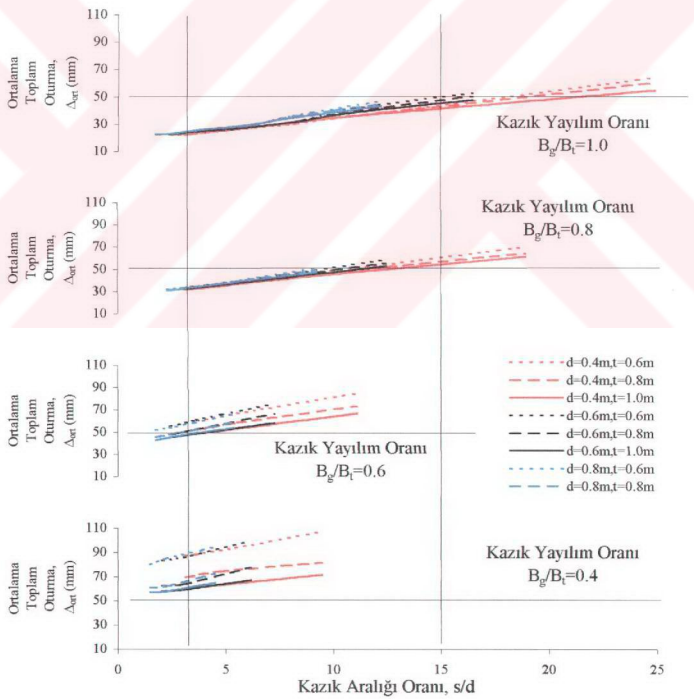
Şekil 6.29' da kazık aralığına karşılık ortalama toplam oturmalar ve normalleştirilmiş toplam oturmalara bakıldığında özellikle B_g/B_t' nin 1.0 ve 0.8 olduğu durumlarda s/d' nin 3' den küçük değerlerinde oturma azaltıcı etki hiç belirmemektedir. 50 mm' lik ani ortalama toplam oturma sınırı olarak alındığında B_g/B_t' nin 1.0 ve 0.8 olduğu durumlarda s/d' nin 15' e kadar olan değerlerinin bu koşulu sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.28: d=0.4 m olan kazıklı temelde ortalama oturmaların kazık aralığı oranına bağlı değişimi



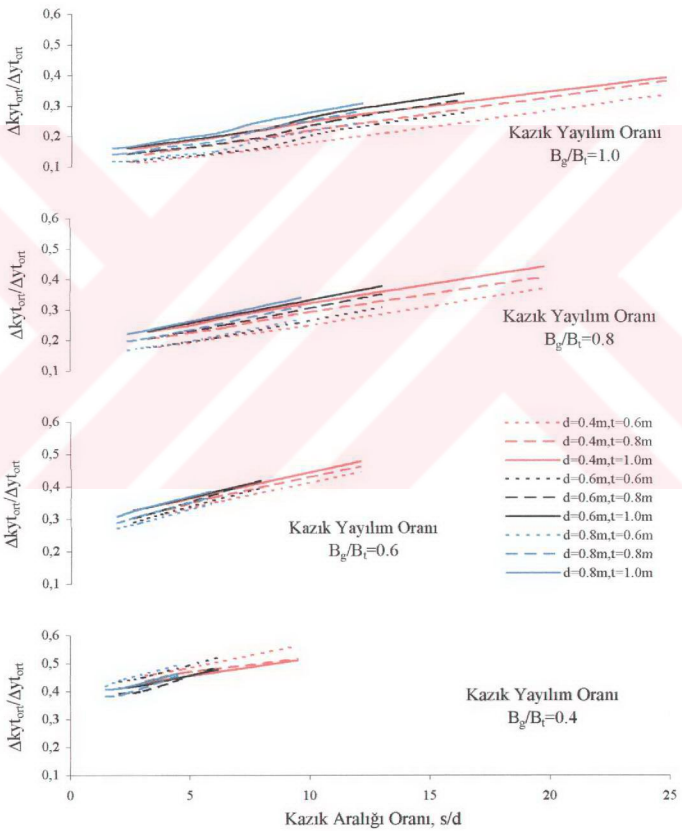
Şekil 6.29: Ortalama ve normalleştirilmiş ortalama oturmaların kazık aralığı oranına bağlı değişimi



Şekil 6.30: B_g/B_t oranlarına bağlı olarak ortalama oturma - s/d oranı değişimi

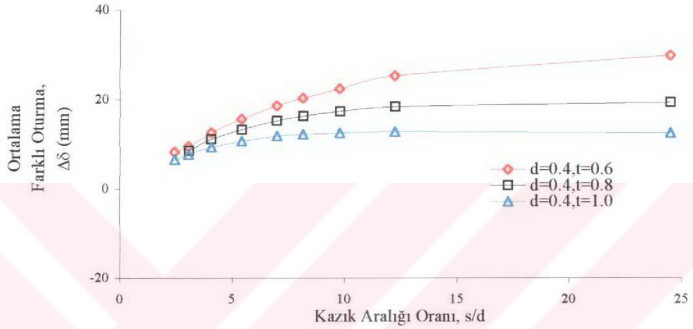
Şekil 6.30' da B_g/B_t' nin farklı değerleri için eğrilere ayrı ayrı bakıldığında B_g/B_t=0.6 ve 0.4 olan durumlarda s/d' nin geleneksel çözümlerde kullanılan 3 değerinden çok daha düşük değerlerinde bile toplam oturmaların çok yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 6.31' de s/d' nin 10 olması durumunda B_g/B_t=1.0 ve 0.8 değerleri için kazıklı yayılı temelde meydana gelecek oturmaların yayılı temelin oturmalarının %30' u civarına düşeceği görülmektedir. B_g/B_t=0.4 durumunda ise çok küçük s/d oranlarında dahi oturma oranları %40' ın altına düşmemektedir.

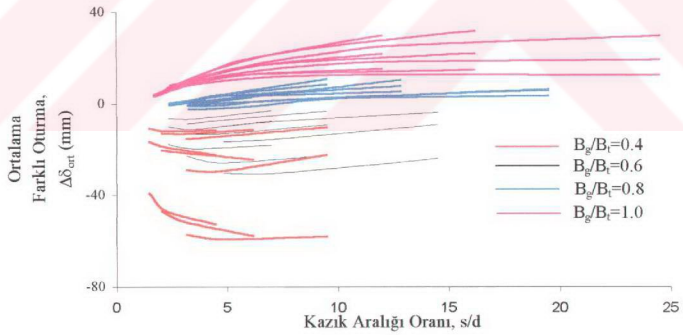


Şekil 6.31: B_g/B_t oranlarına bağlı olarak normalleştirilmiş ortalama oturma - s/d oranı değişimi

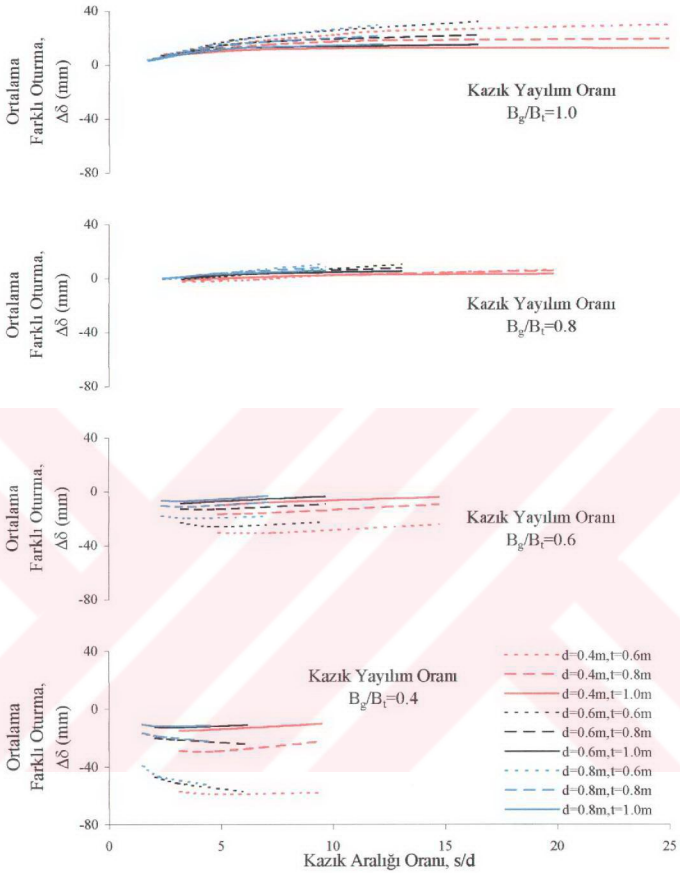
Şekil 6.32, 6.33 ve 6.34' de farklı oturmaların s/d' ye göre değişimi sunulmuştur. Şekil 6.32' de, 0.4 m' lik kazıklara oturtulmuş temel için s/d' nin 10' dan küçük değerlerinin farklı oturmaları 20 mm' den düşük tuttuğu görülmektedir (B_g/B_t=1.0). Şekil 6.33' de, B_g/B_t' nin 1.0 ve 0.8 olduğu durumlarda da bu değerlerin sağlandığı anlaşılmaktadır. Şekil 6.34' de farklı oturmaların s/d oranına göre değişimi ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 6.32: d=0.4 m olan kazıklı temelde ortalama farklı oturma - s/d değişimi (B_g/B_t=1.0)



Şekil 6.33: Kazıklı yayılı temelde ortalama farklı oturma - s/d değişimi (tüm modeller)

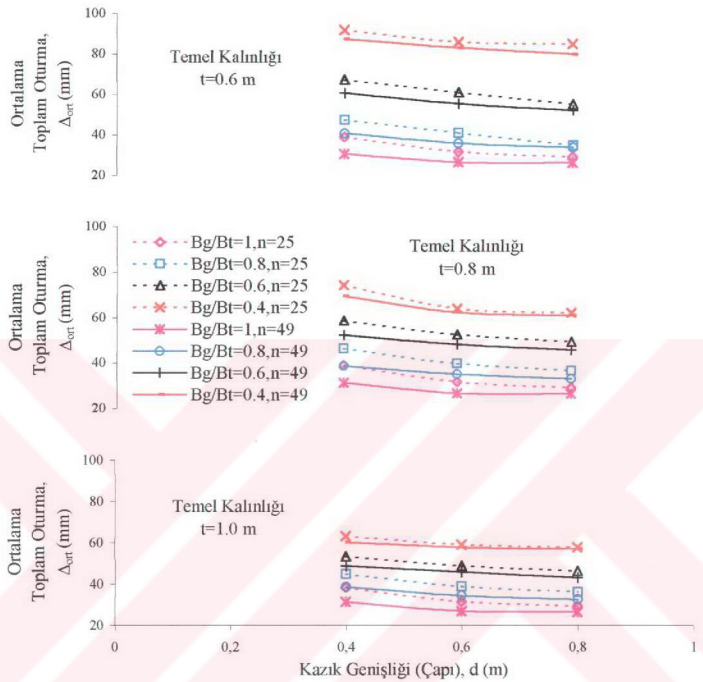


Şekil 6.34: Kazıklı temelde ortalama farklı oturma - s/d değişimi

6.3.1.4. Kazık genişliğinin (çapının) etkisi

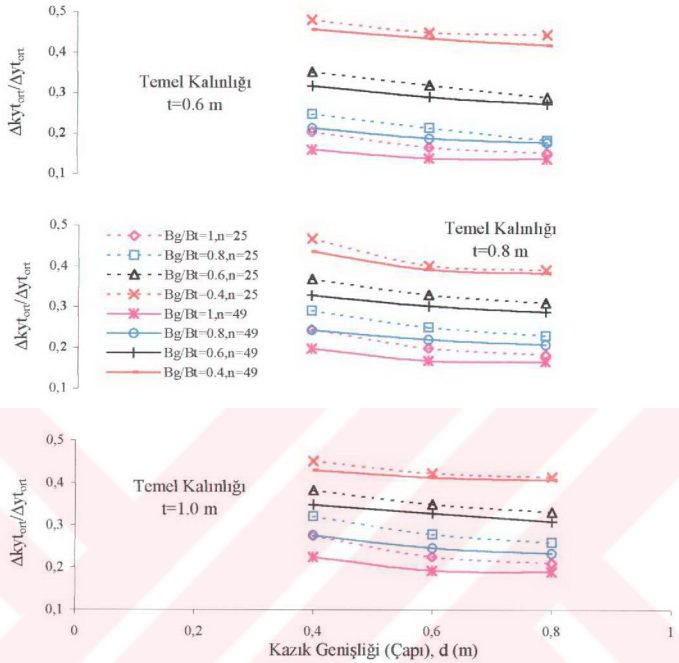
Şekil 6.35 ve 6.36' da 25 ve 49 kazıklı modellerde artan kazık genişliğiyle ortalama toplam oturmaların değişimi sunulmaktadır. Bunlara göre artan kazık genişliği ile oturmalar azalmakla birlikte bazı modellerde 0.4 m' den 0.6 m' ye geçişte oluşan oturma farkı 0.6 m genişlikten 0.8 m' ye geçişte daha az olmaktadır (Şekil 6.34). Kazık genişliği arttıkça farklı kazık sayılarında alınan sonuçların birbirine yaklaştığı

görülmektedir. Öte yandan, diğer hesaplamalarda olduğu gibi kazık genişliğinin oturmalara etkisi temel kalınlığı azaldıkça belirginleşmektedir.



Şekil 6.35: Ortalama oturmaların kazıkların genişliğine bağlı değişimi

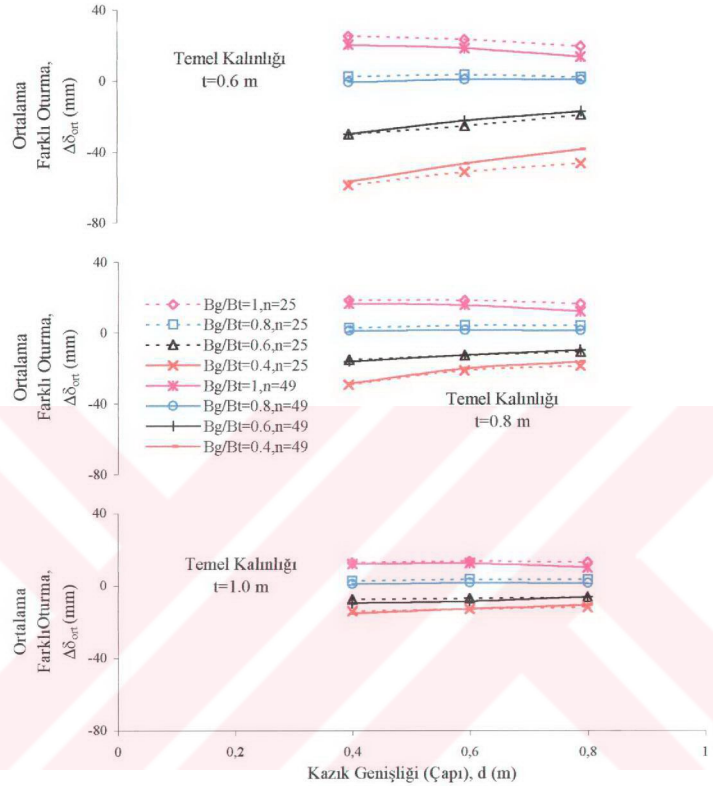
Şekil 6.35 ve 6.36' daki değerler sorgulandığında kazık genişliğinin artması ile elde edilen oturma azalmasının önemsenecek boyutta olmadığı ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki, toplam oturma üst sınırı olarak verilen 50 mm oturmayı sağlayan B_g/B_t=1.0 ve 0.8 değerleri için örnek verilirse en büyük oturma farkı 25 kazık için 0.6 m kalınlıklı temelde 10 mm ile olmaktadır. 49 kazıklı ve 1.0 m kalınlıklı temelde ise bu fark sadece 3 mm' de kalmaktadır. 0.8 m genişlikte bir kazığın kesit alanının 0.4 m genişlikli bir kazığın kesit alanının 4 katı olduğu düşünülürse kazık genişliğini arttırarak oturmaları azaltmaya çalışmanın uygun olmadığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.36: Normalleştirilmiş toplam oturmaların kazık genişliğine bağlı değişimi

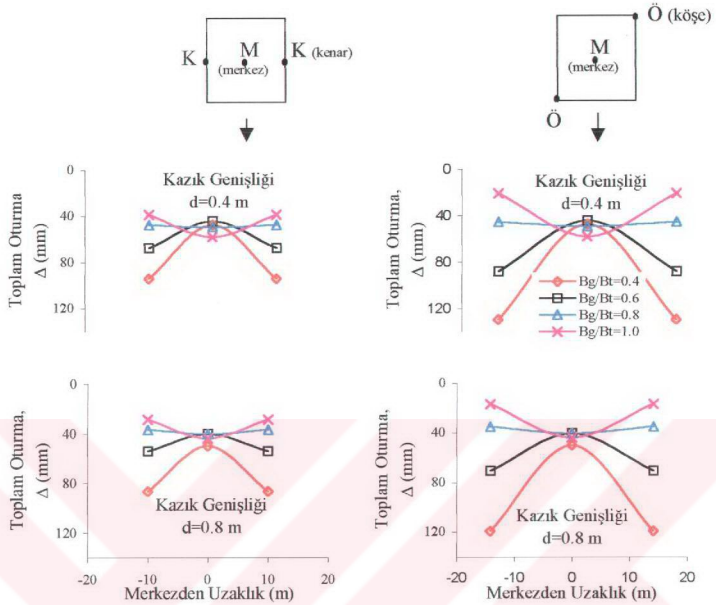
Şekil 6.37' de kazık genişliğinin artışıyla ortalama farklı oturmaların değişimi ortaya konmuştur. Bu şekillerden anlaşılan, temel kalınlığı arttıkça kazık genişliği artışının farklı oturma azaltıcı etkisinin hiç kalmadığıdır. Burada en önemli bulgu B_g/B_t' nin 0.8 olduğu durumda yayılı temelin kalınlığından bağımsız olarak farklı oturmaların sıfır dolayında olmasıdır.

Kazık genişliğindeki artışın en etkin olduğu durumlar; yayılı temelin en ince seçildiği, toplam oturma ölçütlerini sağlamayan B_g/B_t' nin 0.4 ve 0.6 olduğu modellerdir.

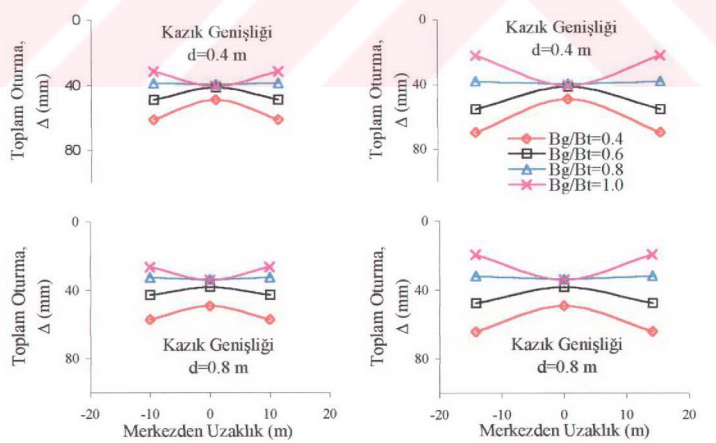


Şekil 6.37: Ortalama farklı oturmaların kazık genişliğine bağlı değişimi

Şekil 6.38 ve Şekil 6.39' da kazık genişliğinin yayılı temel plağının şekil değiştirmesine etkisi gösterilmiştir. Kazık sayısının 25, temel kalınlığının 0.6 m olduğu modelde merkez - köşe arasındaki farklı oturmalar, kazık genişliği 0.4 m' den 0.8 m' ye çıkınca 80 mm' den 50 mm civarına düşmüştür. Yukarıda da belirtildiği gibi bu azaltma miktarı temel kalınlığı arttıkça iyice düşmüştür. Toplam oturmalarda da kazık genişliğinin artmasıyla elde edilen oturma azalması yeterli düzeyde olmamaktadır.



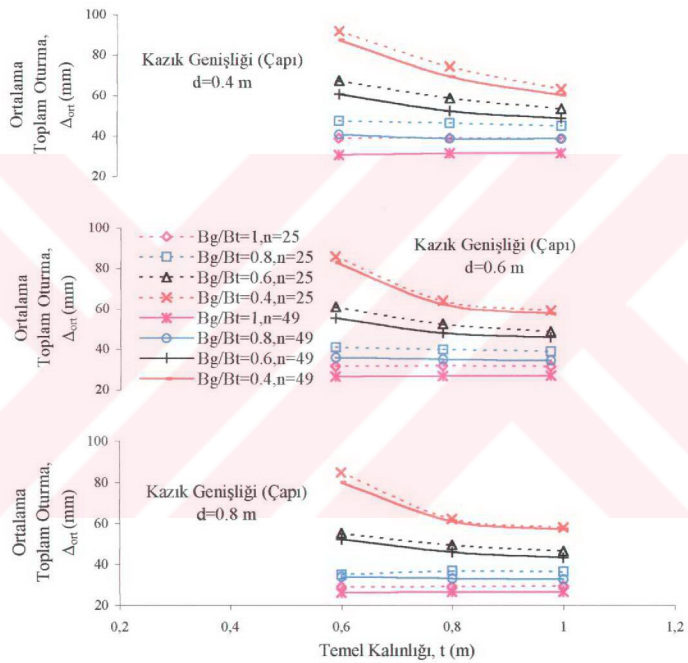
Şekil 6.38: Kazık genişliğine bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=25 m, t=0.6 m)



Şekil 6.39: Kazık genişliğine bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=49 m, t=1.0 m)

6.3.1.5. Temel kalınlığının etkisi

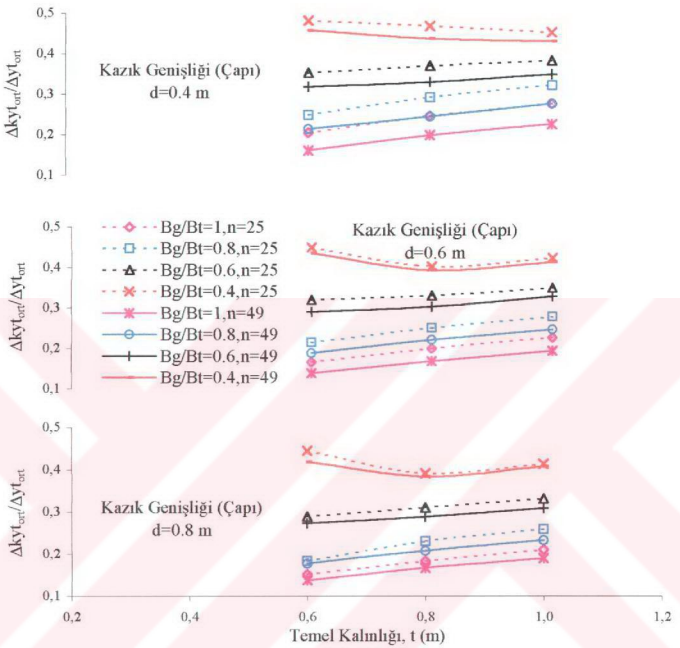
Şekil 6.40' da temel kalınlığındaki artışın toplam oturmalar üzerindeki etkisi görülmektedir. B_g/B_t' nin 0.4 ve 0.6 olduğu durumlarda temel kalınlığının artışıyla görülen azalmalar B_g/B_t' nin 0.8 ve 1.0 olduğu durumlarda sıfır olmaktadır. Bir diğer deyişle, kazıkları daha geniş bir alana yaydıkça temel kalınlığını arttırmanın toplam oturmalar açısından bir yararı olmamaktadır.



Şekil 6.40: Ortalama toplam oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi

Daha ilginç bir durum Şekil 6.41' de ortaya çıkmaktadır. Kazıklı temelin toplam oturma sonuçları aynı kalınlıktaki yayılı temelin oturmalarına oranlandığında tüm durumlarda temel kalınlığını arttırmanın oturma oranlarında azalma değil artış meydana getirdiği görülmektedir. Sadece B_g/B_t' nin 0.4 olduğu durumda 0.4 m genişlikli kazık için oturma oranı 0.46 değerinden 0.42 değerine düşerken, kazık

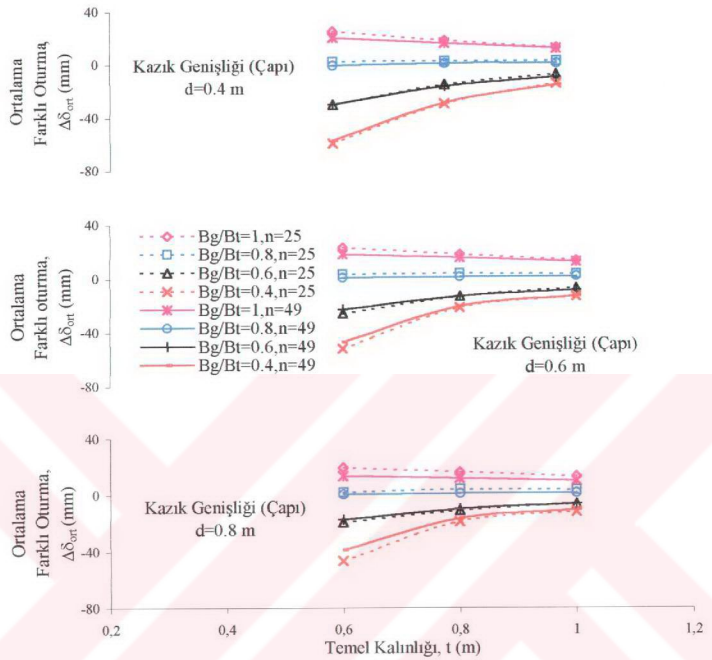
genişliğinin 0.6 m ve 0.8 m olması durumunda bu oranda önce bir düşüş görülmesine karşın temel kalınlığının 0.8 m' den 1 m' ye çıkmasıyla oturma oranı tekrar artmıştır.



Şekil 6.41: Ortalama normalleştirilmiş toplam oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi

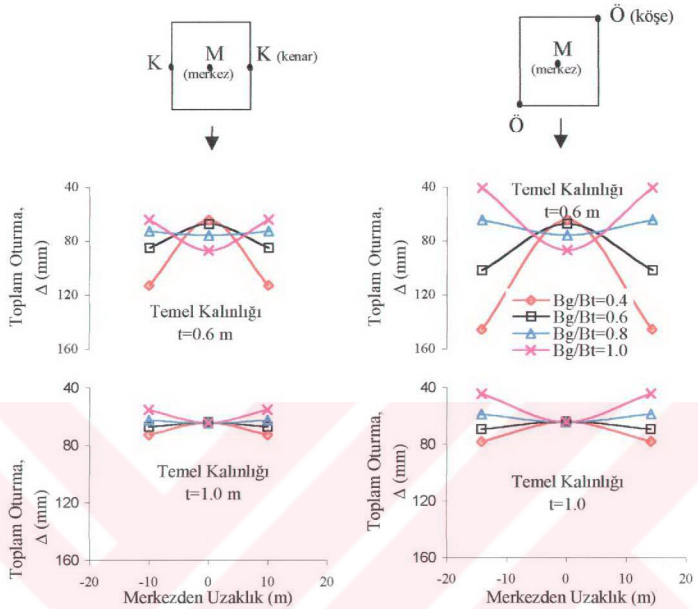
Temel kalınlığının arttırılması toplam oturmalara azaltma getirmemekle birlikte, farklı oturmaları azaltıcı yönde etkisi özellikle kazıkların dar bir alana yerleştirildiği durumlarda belirmektedir (Şekil 6.42). Şöyle ki, kazık genişliğinin 0.4 m olduğu 25 kazıklı durumda B_g/B_t=0.4 için kalınlığın 0.6 m' den 1.0 m' ye çıkarılmasıyla 45 mm' lik bir farklı oturma azalması ortaya çıkmaktadır.

Şekil 6.40, 6.41 ve 6.42 birlikte değerlendirildiğinde yayılı temel kalınlığını arttırmanın getireceği en büyük faydanın farklı oturmaları azaltıcı yönde olduğu sonucuna varılmaktadır.

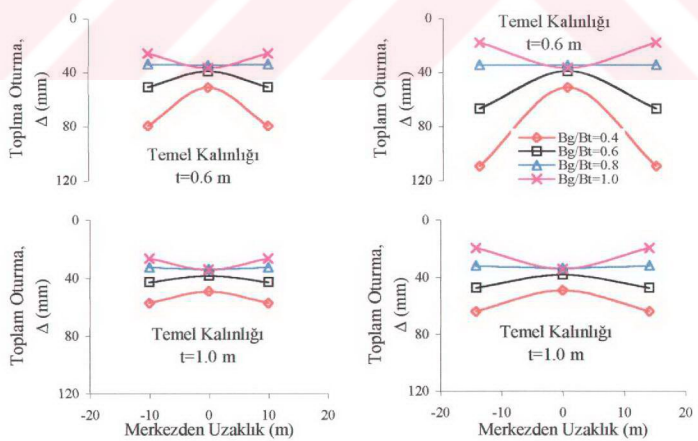


Şekil 6.42: Ortalama farklı oturmaların yayılı temel kalınlığına bağlı değişimi

Şekil 6.43 ve Şekil 6.44' de temel kalınlığı arttıkça toplam oturmalarda önemli değişiklikler olmadığı, merkez - kenar ve merkez - köşe farklı oturmalarında ise dikkate değer azalmaların olduğu görülmektedir. 0.4 m genişliğindeki 9 kazıklı yayılı temelin 0.6 m kalınlığı için farklı oturmalar 80 mm civarında iken, temel kalınlığı 0.8 m' ye çıkınca bu değer 40 mm' ye, 1.0 m olunca da 20 mm' ye düşmüştür. 0.8 m genişlikli 49 kazık içeren temelde ise 50 mm, 20mm ve 10 mm' ye düşmüştür. Bu azalmalar önemli olsa da kazık yayılım oranının 0.8 olduğu modellerde sıfıra yakın farklı oturmaların yukarıdaki şekillerde de görünmesi kazıklı yayılı temel tasarımında en önemli değişkenin "kazık yayılım oranı (B_g/B_t)" olduğunu göstermektedir.



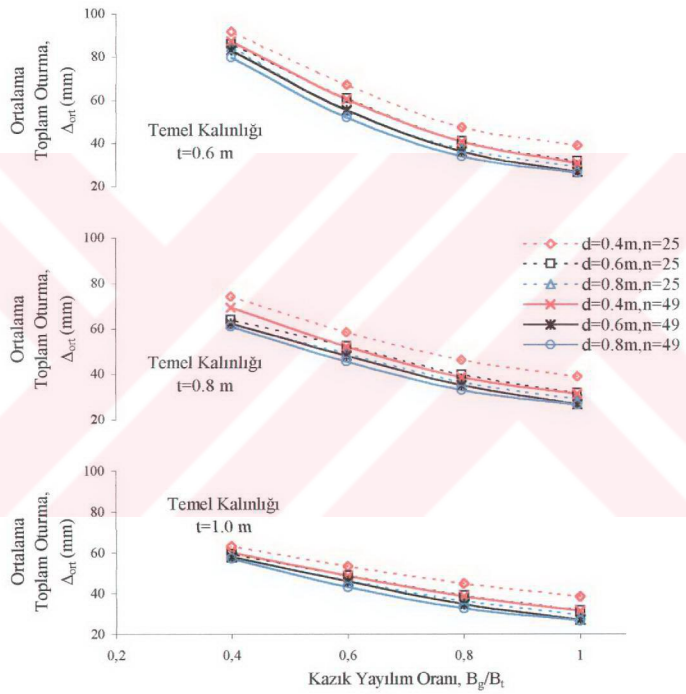
Şekil 6.43: Temel kalınlığına bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=9 m, d=0.4 m)



Şekil 6.44: Temel kalınlığına bağlı olarak temel plağının şekil değiştirmesi (n=49 m, d=0.8 m)

6.3.1.6. Kazık yayılım oranı etkisi

Genel olarak kazık genişliğini arttırarak toplam oturmaların, yayılı temel kalınlığını arttırarak da farklı oturmaların azaltıldığı ortaya çıktığına göre her ikisini kullanarak toplam oturma ve farklı oturma ölçütlerini sağlayan bir çözüme gitmenin bir "aşırı boyutlandırma" problemi olup olmadığı sorgulanmalıdır.

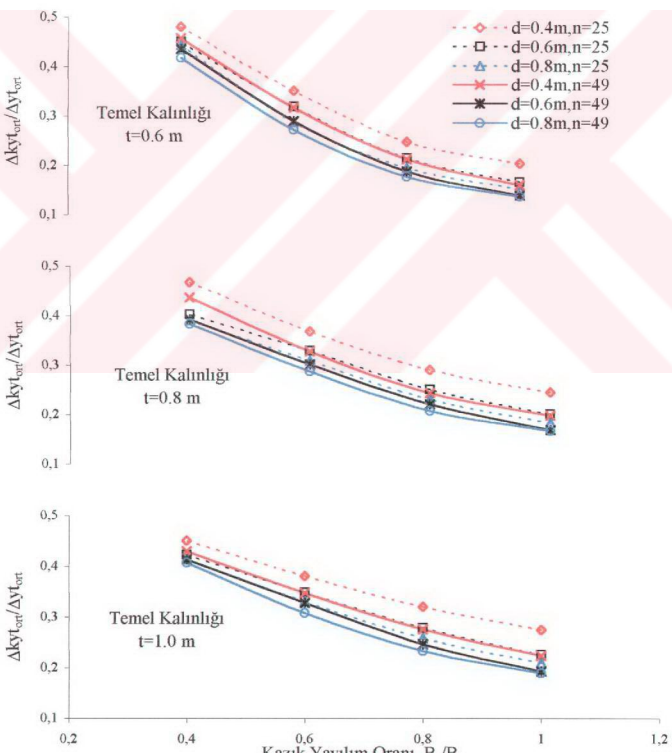


Şekil 6.45: Ortalama toplam oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi

Şekil 6.45' de kazıklı yayılı temelin toplam oturması kazık yayılım oranına (B_g/B_t) karşı noktalanmıştır. Burada göze ilk çarpan kazık yayılım oranı arttıkça oturmalardaki düşüşün kazık genişliği, temel kalınlığı ve kazık sayılarının tümünde sürdüğüdür. Kazıkların temel genişliğinin %40' ına yayıldığı durumda çok fazla olan oturmalar, bu oranın %60 ve %80' e çıkmasıyla hızla düşmektedir. Kazıkların

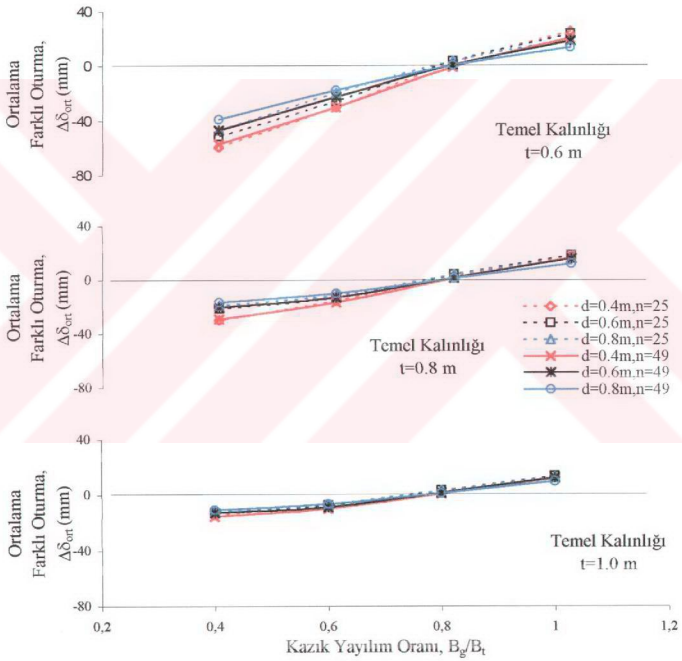
yayılışı temelin %80' inden tamamına çıkarılırsa oturmalar azalmaya devam etmekle birlikte düşme eğiminde bir azalma oluşmaktadır. %80 oranı bir ölçüt olarak alınabilir.

50 mm' lik oturma limiti dikkate alındığında, B_g/B_t=0.8 ve 1.0 olduğunda çözüm yapılan en ince temelde dahi 0.4 m kazık genişliği ve 25 kazıkla bu ölçüt sağlanmaktadır. Özellikle temelin ince olması durumunda kazıkların yerleşimi uygun yapılırsa elde edilecek oturma azalmasının çok büyük olacağı görülmektedir. B_g/B_t' nin artmasıyla oturmalarda elde edilen azalma miktarı kazık genişliğini veya temel kalınlığını arttırmakla elde edilemeyecek kadar büyüktür.



Şekil 6.46: Normalleştirilmiş ortalama toplam oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi

Şekil 6.46' ya bakıldığında kazık yerleşim oranının toplam oturmaları azaltma açısından ne kadar önemli olduğu bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Kazık sayısını, kazık genişliğini ve temel kalınlığını hiç değiştirmeden sadece kazıkların yerleşimini değiştirmekle belirecek oturmalar aynı kalınlıktaki yayılı temelde meydana gelecek oturmaların %50' sinden %20' sine çekilebilmektedir. Bu oranın kazık genişliğini arttırmakla en fazla %8 düşürülebildiği, temel kalınlığı arttırıldığında ise düşmek yerine arttığı hatırlanırsa, kazık yayılım oranının kazıklı temel tasarımının en önemli değişkeni olduğu söylenebilir.



Şekil 6.47: Ortalama farklı oturma - kazık yayılım oranı ilişkisi

Şekil 6.47' de kazık yayılım oranının farklı oturmalar üzerindeki etkisi görülmektedir. Kazık yayılım oranının 0.8 seçildiği modellerde farklı oturmaların sıfır mertebesinde çıkması, toplam oturmalardan sonra farklı oturmaların da bu

değişken tarafından etkin biçimde kontrol edildiğini göstermektedir. Daha önceden yayılı temel kalınlığını arttırmanın farklı oturmaları azalttığı bulgusu ortaya konmuştu. Ancak burada dikkati çeken, özellikle küçük yayılım oranlarında bu etkinin yeterli olmadığı, aynı kalınlıktaki yayılı temelde farklı kazık genişlik ve sayıları için elde edilen değerlerin saçılmış olduğudur. Farklı oturmalar, B_g/B_t=0.8 olduğu durumda ise temel kalınlığı, kazık genişliği ve sayısından bağımsız olarak sıfır civarında çıkmaktadır. Temel kalınlığı arttıkça farklı oturmaların azalması, açık bir makasın dönerek kapanmasına benzetilebilir.

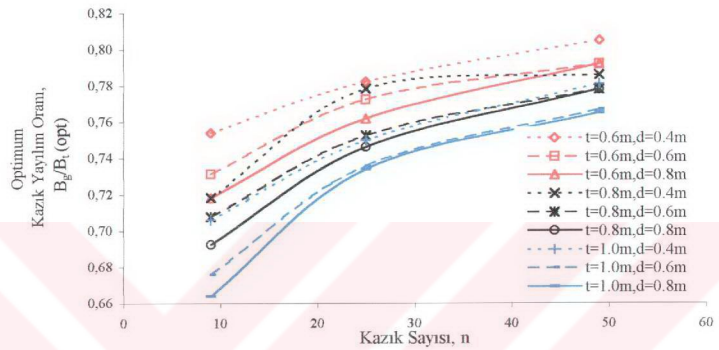
Daha önce kazık sayısı, kazık genişliği ve yayılı temel kalınlığının etkisine değinilirken kazık yayılım oranının (B_g/B_t) 0.8 olduğu durumda özellikle farklı oturmaların sıfır veya çok yakınında bir değer olarak ortaya çıktığı görülmüştü. Aynı zamanda ortalama toplam oturmalar da kazıkların temelin tamamına yayılmış olduğu (B_g/B_t=1.0) durumdan yüksek olmakla birlikte verilen 50 mm ölçütünden küçük çıkmaktaydı. Dolayısıyla bu çalışma sonunda ortaya çıkan en önemli bulgu kazıkların temel alanına doğru yayılması durumunda en az kazık sayısı, en küçük kazık genişliği ve en ince temel kullanılarak toplam oturma ve farklı oturma kriterlerini sağlayan bir çözüm elde edilebileceğidir.

6.3.1.6.1. Optimum kazık yayılım oranı değişimi

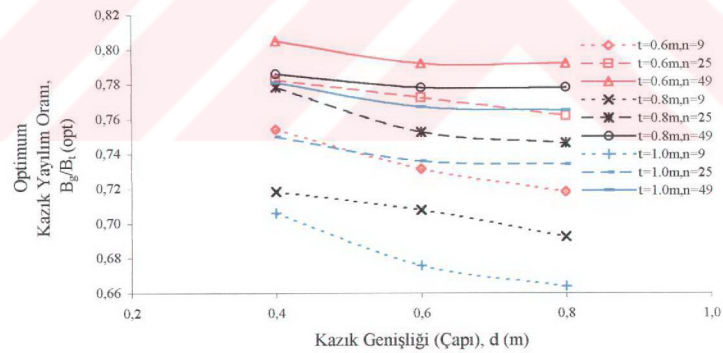
Yapılan çözümler sonunda kazık yayılım oranının 0.8 olduğu durumda farklı oturmaların sıfır veya sıfıra çok yakın değerler aldığı belirlenmişti. Sonuçlar ayrı değerlendirildiğinde farklı oturmaların sıfıra yakın çıktığı kazık yayılım oranlarının küçük aralıklarda değişebileceği görülmüştür. Kazık yayılım oranının 1.0 olması halinde toplam oturmaların en az olduğu düşünülürse optimum yayılım oranının değeri azaldıkça toplam oturma miktarının artacağı unutulmamalıdır.

Şekil 6.48' de kazık sayısının fazlalaşmasıyla optimum kazık yayılım değerinin arttığı ve bu artışın eğiminin kazık sayısının büyüyen değerleri için azalmakta olduğu görülmektedir. Bu nedenle 49 kazıkta elde edilen değerlerin daha fazla sayıda kazık için kullanılmasında bir sakınca olmadığı düşünülmektedir. 0.6 m kalınlığındaki yayılı temel ve 0.4 m genişliğindeki kazıklar için değişim 9 kazıkta 0.75' ten 49

kazıkta 0.81' e yükselmektedir. 1 m kalınlıkta temel ve 0.8 m genişliğinde kazıklar için değişim 0.67→0.76 olmaktadır. Kazık genişliği ve yayılı temel kalınlığı dikkate alınmazsa optimum kazık yayılım oranı 9 kazıklı modellerde 0.67→0.75, 25 kazıklı modellerde 0.73→0.78 ve 49 kazıklı modellerde 0.76→0.81 arasında değişmektedir.



Şekil 6.48: Optimum kazık yayılım oranı - kazık sayısı ilişkisi



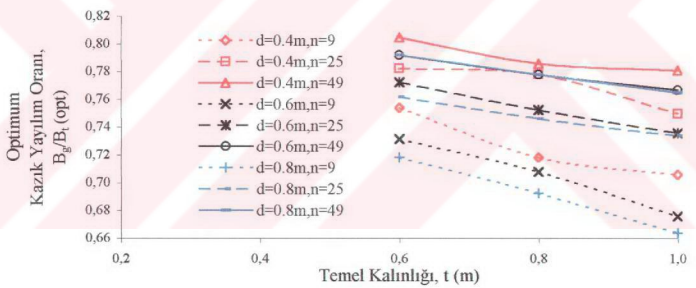
Şekil 6.49: Optimum kazık yayılım oranı - kazık genişliği ilişkisi

Şekil 6.49' da optimum kazık yayılım oranının kazık genişliğine bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Kazık genişliği arttıkça optimum yayılım oranının düştüğü ve bu düşüşün de en fazla 0.05 birim olduğu görülmektedir. Bazı durumlarda kazık

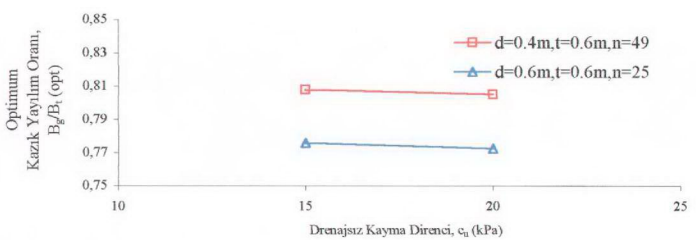
genişliğinin 0.6 m' den 0.8 m' ye çıkmasıyla oluşan düşüş çok küçüktür. Örneğin, temel kalınlığının 1 m, kazık sayısının 9 olduğu durumda kazık genişliği artışına bağlı olarak B_g/B_t oranı 0.71' den 0.66' ya düşmüştür. Temel kalınlığının 0.6 m, kazık sayısının 49 olduğu durumda ise düşüş 0.81' den 0.79' a olmuştur. Bu durumda düşüşün tamamı 0.4 m' den 0.6 m genişliğe geçişte oluşmuştur.

Şekil 6.50' de optimum kazık yayılım oranının yayılı temel kalınlığı arttıkça düştüğü görülmektedir. Buradaki düşüş miktarı 0.03 birimle 0.06 birim arasında olmaktadır. Görülen değerler, 0.6 m kalınlığındaki temelde 0.72-0.80, 0.8 m kalınlığındaki temelde 0.69-0.79, 1.0 m kalınlığındaki temelde ise 0.66-0.79 arasında belirmektedir.

Sıkı kum tabakasının üzerindeki zeminin drenajsız kayma direnci 20 kPa' dan 15 kPa' a düştüğünde $B_g/B_{t(opt)}$ oranında değişim çok küçük (0.01 birim civarında artış) olmuştur (Şekil 6.51).



Şekil 6.50: Optimum kazık yayılım oranı - yayılı temel kalınlığı ilişkisi



Şekil 6.51: Optimum kazık yayılım oranı - zemin özellikleri ilişkisi

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Yukarıda değinilen bulgular Tablo 6.3' de özet olarak verilmiştir. Çözümü yapılan örnekle benzer özellikler gösteren herhangi bir zemin kesitinde, farklı oturma değerlerinin sıfır veya sıfıra yakın çıkması için hesaplamaya Tablo 6.3' deki değişkenlerin etkisi gözönüne alınarak başlanması uygun olacaktır.

Tablo 6.3: Kazık yayılım oranının optimum değerleri

	n = 9			n = 25			n ≥ 49		
$t_{(m)}$ \ $d_{(m)}$	0.4	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8
0.6	0.75	0.73	0.72	0.78	0.77	0.76	0.81	0.79	0.79
0.8	0.72	0.71	0.69	0.78	0.75	0.75	0.79	0.78	0.78
1.0	0.71	0.68	0.66	0.75	0.74	0.73	0.78	0.77	0.77

n: Kazık sayısı d: Kazık genişliği t: Temel kalınlığı

6.3.2. Model değişkenlerinin değerlendirilmesi

Tablo 6.4' de 25 ve 49 kazıkta farklı kazık genişliği, kazık yayılım oranı ve temel kalınlığı için oluşan ortalama toplam oturmalar ve bu oturmaların yayılı temelde meydana gelen oturmalara oranları verilmiştir.

Bu tablodan kazıkların yayılım oranı arttıkça, ortalama oturmaların azaldığı görülmektedir. Kazıkların yayılı temelin tamamına yayıldığı durumda oturmalar tüm seçeneklerde 50 mm' nin oldukça altında kalmakta, 26 mm' ye kadar düşmektedir. B_g/B_t' nin 0.8 olduğu durumda oturmalar daha fazla olmasına karşın tüm durumlarda 50 mm' nin altında kalmaktadır. 0.6 m' lik en ince temel kalınlığı, 0.4 m' lik en küçük kazık genişliği için bu değer 47 mm olarak ortaya çıkmaktadır. 50 mm ölçütü B_g/B_t' nin 0.6 olduğu durumda ancak genişliği 0.8 m olan 49 kazıklı 0.8 m kalınlığındaki temelde ve 1.0 m kalınlıklı temelde elde edilebilmektedir. Yayılım oranının 0.4 olması durumunda ise hiçbir durumda toplam oturma ölçütü sağlanamamaktadır. Tüm değişkenlerin en küçük olduğu durumda (d=0.4 m, t=0,6 m, n=25) oturmalar yayılım oranının 0.4-0.6-0.8-1.0 değerlerine karşılık olarak 92-67-47-39 mm olarak azalmaktadır. Yani aynı sayıda kazık daha geniş alana yayılırsa oturmalar arasında yaklaşık 50 mm' lik fark çıkabilmektedir.

Durum kazık genişlikleri açısından değerlendirildiğinde, kazık genişliğindeki artışın kazık yayılım oranına göre çok daha az etkin olduğu görülmektedir. Kazık genişliğinin 0.4 m' den 0.8 m' ye çıkması ile oturmalarda elde edilen en büyük azalma 12 mm olmaktadır. Kazık sayısının artması ile kazık genişliğini arttırmanın oturmaları azaltıcı yönde etkisi düşmektedir.

Yayılı temel kalınlığının artması ile sadece yayılım oranının küçük olduğu durumlarda toplam oturmalarda azalma olduğu, yayılım oranı büyüdükçe etkinin kaybolduğu, bazı durumlarda oturmaların arttığı görülmektedir.

Tablo 6.4: Model değişkenlerine bağlı olarak ortalama toplam oturmalar (Δ_{ort})

			n = 25				n = 49		
	t (m)		d (m)				d (m)		
		B_g/B_t	0.4	0.6	0.8	B_g/B_t	0.4	0.6	0.8
Ortalama Toplam Oturma, Δ_{ort} (mm)	0.6	1.0	39	32	29	1.0	31	27	26
		0.8	47	41	35	0.8	41	36	34
		0.6	67	61	55	0.6	61	55	52
		0.4	92	86	85	0.4	87	83	80
	0.8	1.0	39	32	29	1.0	31	27	26
		0.8	46	40	37	0.8	39	35	33
		0.6	59	52	49	0.6	52	48	46
		0.4	74	64	62	0.4	69	62	61
	1.0	1.0	39	32	30	1.0	31	27	26
		0.8	45	39	36	0.8	39	35	33
		0.6	53	49	46	0.6	49	46	43
		0.4	63	59	58	0.4	60	58	57

$\Delta kyt_{(ort)} / \Delta yt_{(ort)}$ (%)	0.6	1.0	20	17	15	1.0	16	14	14
		0.8	25	21	18	0.8	21	19	18
		0.6	35	32	29	0.6	32	29	27
		0.4	48	45	44	0.4	46	44	42
	0.8	1.0	25	20	18	1.0	20	17	17
		0.8	29	25	23	0.8	24	22	21
		0.6	37	33	31	0.6	33	30	29
		0.4	47	40	39	0.4	44	39	38
	1.0	1.0	27	23	21	1.0	22	19	19
		0.8	32	28	26	0.8	28	25	23
		0.6	38	35	33	0.6	35	33	31
		0.4	45	42	41	0.4	43	41	41

Tablo 6.4' de ortalama toplam oturmaların yayılı temeldeki oturmalara oranlarına bakıldığında kazık yayılım oranının oturmaları azaltmada yine en etkin değişken olduğu görülmektedir. Örnekle açıklanırsa, 0.6 m kalınlıklı yayılı temelde, 0.4 m genişliğindeki 25 kazık için oturma oranının B_g/B_t=0.4 olması durumunda kazıklı yayılı temelin oturmasının yayılı temelin oturmasına oranı %48 iken B_g/B_t=1.0 olunca bu oran %20' ye düşmektedir. Aynı temel kalınlığı ve kazık sayısı için sabit B_g/B_t değerlerinde kazık genişliği arttırılınca oturma oranındaki azalma %4 ile %7 arasında olmaktadır. Kazık genişliği sabit tutulup temel kalınlığı arttırılınca azalma miktarı B_g/B_t=0.4 için %3 iken, B_g/B_t=1.0 olması durumunda %20' den %27' ye çıkmaktadır. Yani yayılım oranının büyümesiyle temel kalınlığının artması ters yönde bir etki ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6.5' de farklı oturmalardaki durum ortaya konulmuştur. Buna göre ilk göze çarpan B_g/B_t=0.8 olması durumunda farklı oturmaların neredeyse sıfır değerini vermesidir. Toplam oturmalardaki durumdan farklı olarak B_g/B_t=1.0 olması durumunda temel merkezinin daha fazla oturduğu 25 mm' ye varan farklı oturmalar ortaya çıkmaktadır. Kazık genişliğini veya temel kalınlığını arttırmanın farklı oturmaları azaltıcı etkisi olmakla birlikte bunlardan birinin artmasıyla ötekinin farklı oturmaları azaltıcı etkisi ortadan kalkmaktadır.

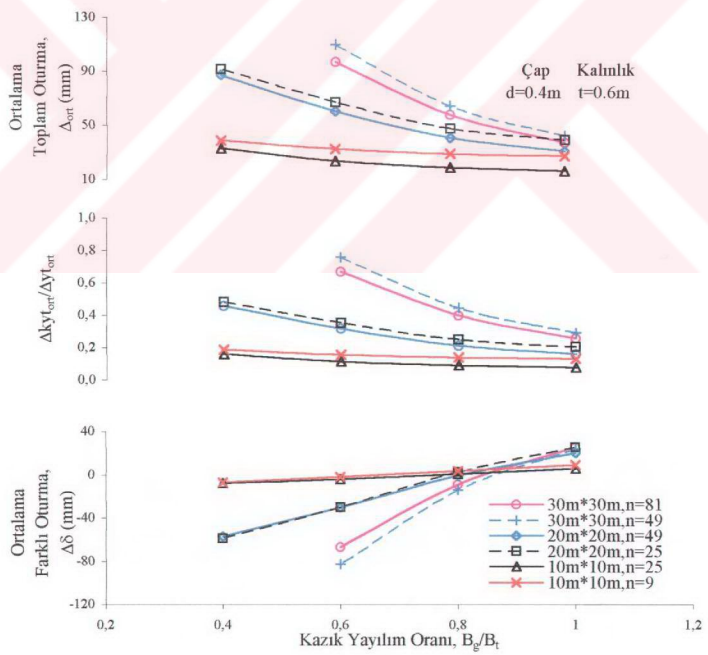
Tablo 6.5: Model değişkenlerine bağlı olarak ortalama farklı oturmalar

			n = 25				n = 49		
	t (m)		d (m)				d (m)		
		B_g/B_t	0.4	0.6	0.8	B_g/B_t	0.4	0.6	0.8
Ortalama Farklı Oturma, $\Delta\delta_{ort}$ (mm)	0.6	1.0	25	23	19	1.0	20	18	13
		0.8	2	3	2	0.8	-1	1	1
		0.6	-30	-26	-20	0.6	-30	-23	-18
		0.4	-59	-51	-47	0.4	-57	-47	-39
	0.8	1.0	18	18	16	1.0	16	16	12
		0.8	3	4	4	0.8	1	2	1
		0.6	-15	-13	-11	0.6	-17	-13	-10
		0.4	-29	-21	-19	0.4	-29	-20	-17
	1.0	1.0	13	14	13	1.0	12	13	10
		0.8	3	4	3	0.8	1	2	1
		0.6	-8	-7	-7	0.6	-10	-9	-6
		0.4	-14	-13	-12	0.4	-15	-13	-11

Tablo 6.4 ve 6.5 birlikte değerlendirildiğinde özetle ortaya şöyle bir durum çıkmaktadır: B_g/B_t' nin 1.0 olması durumunda yani kazıklar temelin tamamına yayıldığında, toplam oturmalar en aza inmektedir. B_g/B_t=0.8 olduğunda ise toplam oturmalar artmakla birlikte boyutların en küçük seçildiği durumlarda bile 50 mm' den küçük çıkmakta, toplam oturma ölçütü sağlanmaktadır. B_g/B_t=1.0 iken farklı oturmalar 25 mm' ye ulaşırken, B_g/B_t=0.8 olması durumunda en fazla 4 mm çıkmaktadır. Yani, kazık yayılım oranı (B_g/B_t), kazıklı yayılı temelin oturma davranışını belirleyen en önemli etkendir.

6.3.3. Temel boyutu etkisi

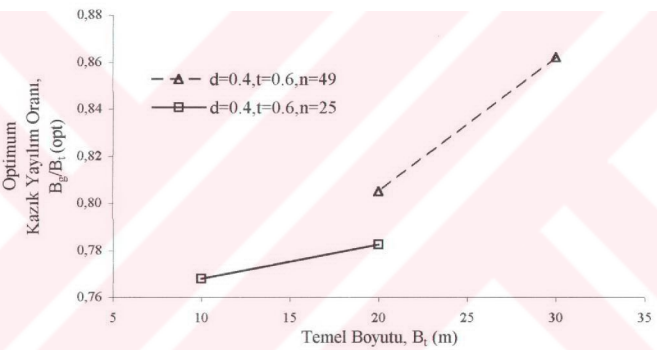
Şekil 6.52' de temel boyutundaki değişikliğin oturmaları nasıl etkilediği gösterilmiştir. Artan temel boyutu için toplam ve farklı oturmalar da artmaktadır.



Şekil 6.52: Temel boyutu - oturma ilişkileri

10 m genişliğindeki temelde tüm kazık yayılım oranları için toplam oturmalar 50 mm' den, farklı oturmalar da 10 mm' den küçük kalmaktadır. Temel boyutu büyüdükçe özellikle küçük yayılım oranları için bu değerlerde aşırı artışlar belirmektedir. Örneğin, 30 m genişlikteki temelde B_g/B_t=0.6 için kenar ve köşeler daha fazla oturmakta, 80 mm' ye varan farklı oturmalar çıkabilmektedir.

Şekil 6.53, temel boyutunda meydana gelecek artışın optimum yayılım oranı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Temel boyutu büyüdükçe artışın eğimi de artmaktadır. 25 kazıkta 10 m' den 20 m' lik temel genişliğine geçilirken görülen artış miktarı 0.01 birimken, 49 kazıkta 20 m' den 30 m' ye geçişte artış miktarı 0.06 birim olmuştur.



Şekil 6.53: Optimum kazık yayılım oranı - yayılı temel boyutu ilişkisi

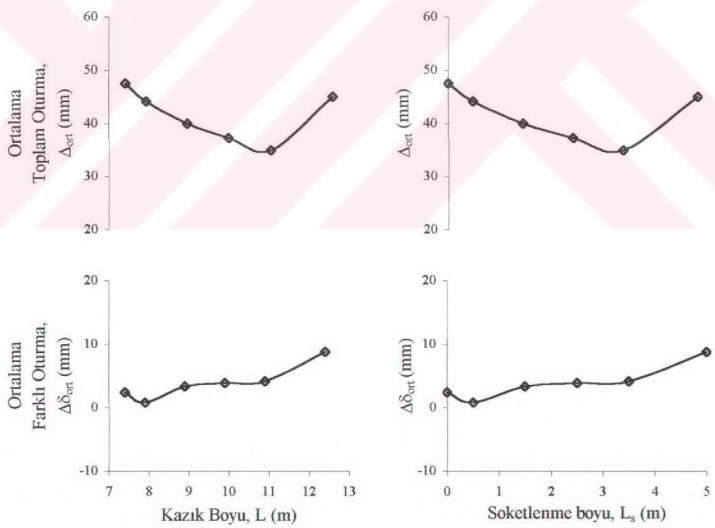
Temel boyutu büyüdükçe toplam oturmaları azaltmak için sabit temel kalınlığı ve kazık genişliği için kazık sayısını arttırmak, farklı oturmaları sıfırda tutmak için de kazıkları daha geniş bir alana yaymak gerekmektedir.

6.3.4. Kazık boyu değişimi etkisi

Ana çözümlerin yapıldığı modellerde kazık boyu, oturmaların en fazla çıkacağı durum için kazıkların sıkı kum tabakasının üzerine geleceği şekilde seçilmiştir. 5 m kalınlığında sıkı kum tabakası içeren kesitte kazık boyunun uzatılmasının etkisini görmek amacıyla tek modelde (d=0.4 m, t=0.6 m, s/d=9.75, n=25 , B_g/B_t=0.8) ek

çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerde kazık, sıkı kum içine 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m ve 5 m soketlenecek şekilde uzatılarak modellenmiştir. Son durumda kazıklar sıkı kumun bitip yeni tabakanın başladığı derinliğe kadar gelmiştir.

Şekil 6.54' den anlaşılacağı gibi kazık boyunun sıkı kum içinde soketlenen boyu arttırıldıkça toplam oturmalar kazık ucunda oluşan yüksek gerilmelerin alttaki tabakaları etkilediği duruma kadar azalma eğilimi göstermiştir. 3.5 m soketlenme boyuna kadar azalan oturmalar daha büyük uzunluklarda neredeyse ilk durumuna yükselmiştir. Daha açık bir deyişle, toplam oturmalar açısından kazık boyunun 12.4 m olması 7.4 m olmasına göre bir fayda sağlamamıştır. Sonuç olarak, sıkı kum / çakıl tabakası altında daha yumuşak / gevşek zemin tabakaları içeren kesitlerde soketlenme boyunun seçiminde dikkatli olmak gerekmektedir. Önerilen yol, çözümleri önce kazıkların sıkı tabakanın üzerinde olduğu durum için yapıp kazık boyunu daha sonra yapılacak sınırlı sayıda çözüm sonucunda uzatmak şeklindedir.

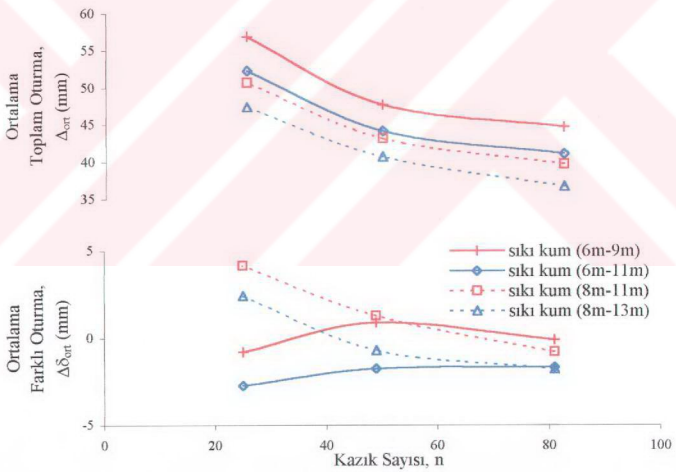


Şekil 6.54: Kazık boyunun oturmalara etkisi

Başlangıçta sıfır olan farklı oturma değerleri kazık soketlenme boyunun artmasıyla merkezdeki oturmaların artacağı şekilde (0' dan +10 mm' ye) farklılık göstermiştir. Bu sonuca göre kazık boyu uzadıkça farklı oturmaları azaltmak için kazık yayılım oranının düşürülmesi gerektiği söylenebilir.

6.3.5. Sıkı kum tabakasının yüzeye uzaklığının ve kalınlığının etkisi

Çözüm yapılan model kesitte sıkı kum tabakası -8 m derinlikten başlamaktadır ve kalınlığı 5 m' dir. Sıkı kum tabakasının daha ince ve yüzeye daha yakın olması durumlarını incelemek amacıyla B_g/B_t=0.8, d=0.4 m ve t=0.6 m olan modelde kazık sayısı arttırılarak yeni çözümler yapılmış, buradan elde edilen bulgular aşağıdaki şekillerle açıklanmıştır. Sıkı kum tabakasının yüzeye daha yakın olduğu durumlar için başlangıç derinliği -6 m alınmış, yüzeye çok daha yakın durumlar için bodrumlu yapılaşmanın uygun olduğu gerekçesiyle kazıklı temel çözümü yapılmamıştır.



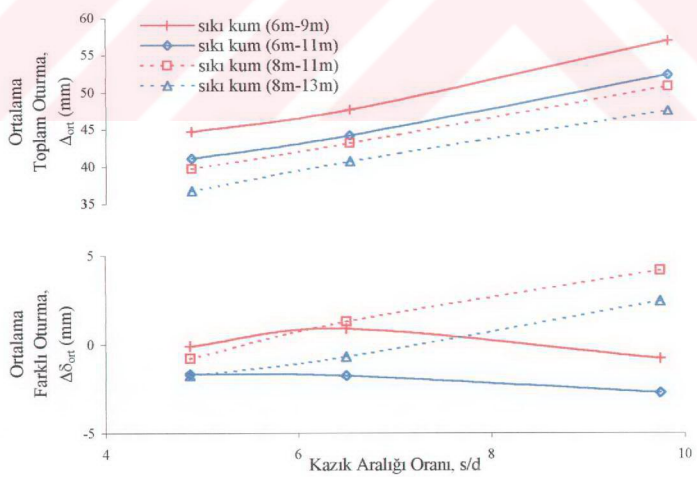
Şekil 6.55: Sıkı tabaka kalınlığının ve yüzeye uzaklığının oturmalara etkisinin kazık sayısına bağlı gösterimi

Şekil 6.55' e bakıldığında ilk olarak sıkı kum tabakası inceldikçe ve yüzeye yaklaştıkça ortalama toplam oturmaların arttığı göze çarpmaktadır. 50 mm ölçütü, sıkı kumların -8 ve -13 m' ler arasında olduğu durumda 25 kazıkla sağlanırken

kalınlık 3 m' ye düşünce ve kalınlığın 5m olup yüzeye 6m uzaklıkta olan durumda 36 kazıkla, yüzeye yakın ve ince olan durumda da 49 kazıkla sağlanabilmektedir. Kazık sayısının daha fazla olması durumunda sağlanacak oturma azalmasının iyice düştüğü de ortaya çıkmaktadır.

Yüzeye uzak (8 m) ve ince (3 m) olan durumda meydana gelen oturmalar yüzeye yakın (6 m) ve kalın (5 m) olan durumdan tüm kazık sayıları için daha az çıkmıştır. Buna göre sıkı kum tabakasının yüzeye olan yakınlığı kalınlığına göre oturmaları daha fazla etkilemektedir. Bunun sebebi, sıkı kum tabakasının altındaki daha yumuşak / gevşek tabakaların gerilme dağılışından daha fazla etkilenmesidir. Başka bir deyişle, sıkışabilir tabakanın daha fazla kalınlığı kazık uçlarından gerilme artışı alacaktır.

Farklı oturmalara bakıldığında, düşük kazık sayılarında (ve sadece yayılı temel) yüzeye yakın durumlarda temelin kenar ve köşelerinin daha fazla oturduğu, yüzeye uzak durumlarda temel merkezinin daha fazla oturduğu görülmektedir. 5 mm gibi küçük değerde olan bu farklı oturmalar, artan kazık sayılarıyla sıfıra yönelmektedir.

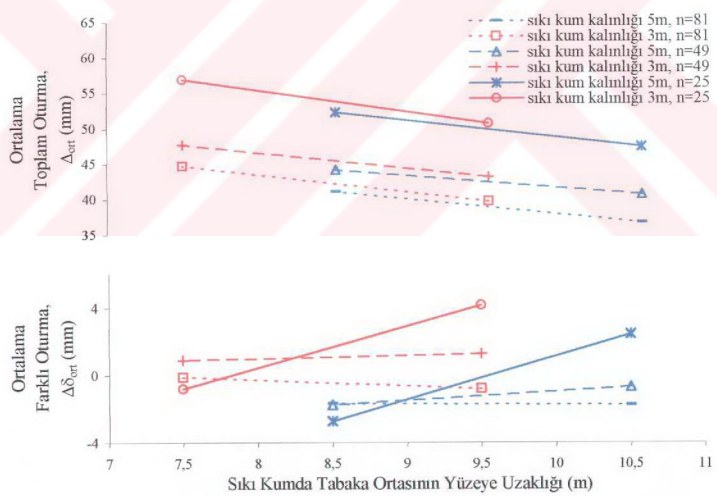


Şekil 6.56: Sıkı tabaka kalınlığının ve yüzeye uzaklığının oturmalara etkisinin kazık aralığı oranına bağlı gösterimi

Şekil 6.56' da kazık aralığı oranına göre sonuçların değişimi sunulmuştur. Buna göre daha derinde olan tabakalarda s/d' nin 10 olması durumunda bile toplam oturmalar yeterince azalırken, temelin daha ince ve yüzeye yakın olduğu durumlarda bu değer 7' ye düşmektedir. Farklı oturmalar da bu değerlerde kabul edilebilir sınırlarda kalmaktadır.

Şekil 6.57' de sıkı kum tabakasının ortasının yüzeye uzaklığı arttıkça oturmaların azaldığı açıkça görülmektedir. Ancak, yüzeye uzak olan her üç durumda da tabaka kalınlığının artmasına rağmen eğimlerin azalması bu etkinin belli bir derinlikten sonra duracağının işareti olmaktadır.

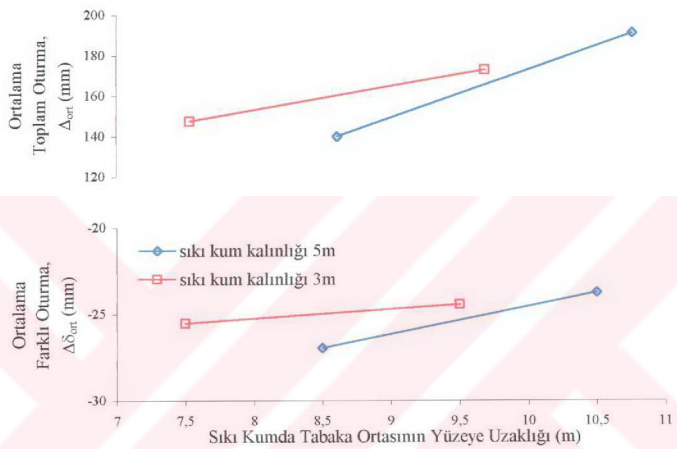
25 kazıklı durumda farklı oturmalar tabaka kalınlığından bağımsız olarak sıkı tabaka yüzeyden uzaklaştıkça temel merkezi fazla oturacak yönde artmaktadır. Artan kazık sayıları için ise bu etki belirmemektedir.



Şekil 6.57: Tabaka ortasının yüzeye uzaklığı - oturma ilişkileri

Şekil 6.58' de yayılı temelde sıkı tabaka kalınlığının ve yüzeye uzaklığının etkisi gösterilmiştir. Kazıklı yayılı temeldeki davranışın aksine kazıksız yayılı temellerde

sıkı tabaka yüzeyden uzaklaştıkça oturmalar artmaktadır. Çünkü gerilmeler sadece veya büyük çoğunlukla sıkı tabaka üzerindeki yumuşak tabaka tarafından alınmaktadır. Sıkı kumun daha kalın olduğu durumdaki doğruların eğimlerinin daha yüksek olduğuna dikkat edilirse sıkı kum tabakasının kalınlığının artmasının önemi bir kez daha görülecektir.



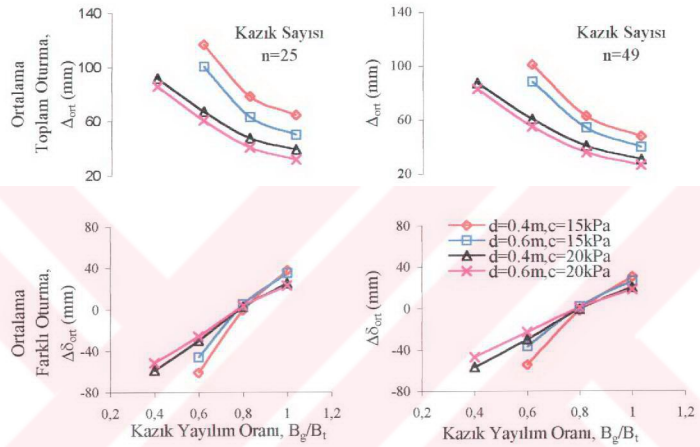
Şekil 6.58: Sıkı tabaka ortasının yüzeye uzaklığı ve kalınlığı - oturma ilişkileri

6.3.6. Kayma direnci düşük zeminin etkisi

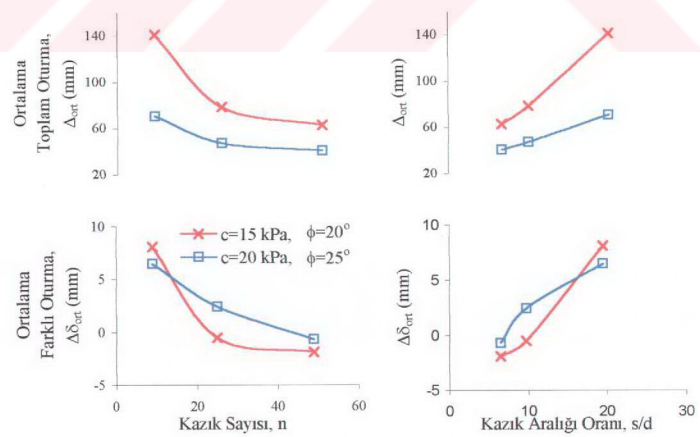
Kayma direncindeki düşüşün etkisi 0.6 m kalınlığındaki temel için iki farklı genişlikte 25 ve 49 kazık için denenmiştir. Sıkı tabakanın üstündeki zeminin drenajsız kayma direnci değeri 20 kPa' dan 15 kPa' a ve kayma direnci açısı da 25° den 20° ye düşürülerek elde edilen sonuçlar Şekil 6.59' da karşılaştırılmaktadır. c_u değerindeki 5 kPa' lık ve kayma direnci açısındaki 5°' lik bir düşüş aynı genişlikteki kazıklarda 20 mm' ye varabilen oturma artışlarına neden olmuştur. Farklı oturmaların sıfır olduğu yayılım oranı ise önemli değişiklik göstermemektedir. Ancak kazık yayılım oranı uygun seçilmezse oluşabilecek farklı oturmaların zemin kayma direnci düştükçe aşırı artacağı ortaya çıkmıştır. Bu durumda, temel köşe ve kenarları daha fazla oturmaktadır.

d=0.4 m, t=0.6 m, B_g/B_t=0.8 olan modellerde yapılan çözümlerde kazık sayısının düşük değerlerinde (9 kazık) 70 mm' ye varan toplam oturma farkı kazık sayısı arttıkça azalmaya başlamış ve 49 kazıkta 20 mm civarına düşmüştür (Şekil 6.60).

Farklı oturmaların tam sıfır olduğu kazık yayılım oranı zemin özellikleri düşünce 0.75' ten 0.80' e doğru yönelmiştir.



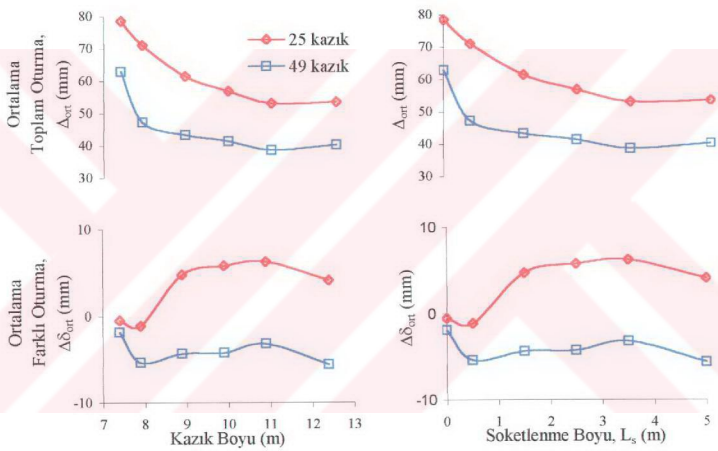
Şekil 6.59: Zemin özellikleri - oturma ilişkileri



Şekil 6.60: Zemin özellikleri - oturma ilişkilerinin kazık sayısı ve s/d' ye göre değişimi

6.3.7. Zayıf zeminde kazık boyunun etkisi

Temel kalınlığının ve kazık genişliğinin en düşük olduğu (t=0.6 m, d=0.4 m) durumda kazık boyu uzatılarak toplam oturmaların izleyeceği yol incelenmiştir (Şekil 6.61). 25 kazıkta başlangıçta 80 mm civarında bulunan oturmalar kazık boyu 3.5 m uzatılınca 55 mm civarına düşmüştür. Daha fazla uzatılması durumunda ise bir yarar elde edilememiştir. 49 kazıklı durumda ise başlangıçta 65 mm civarında olan oturmalar sadece 0.5 m boy artışıyla 50 mm' nin altına inmiştir. Ancak kazık boyu uzayınca farklı oturmalar hafifçe artmıştır.

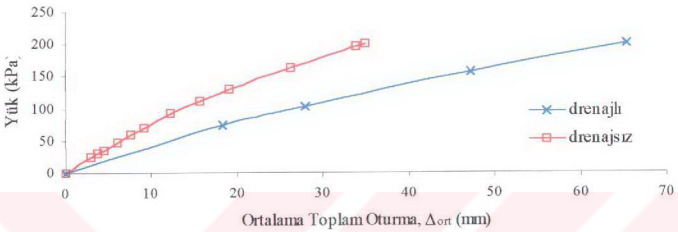


Şekil 6.61: Kayma direnci düşük zeminde kazık boyunun oturmalara etkisi

6.3.8. Drenajlı - drenajsız çözümler

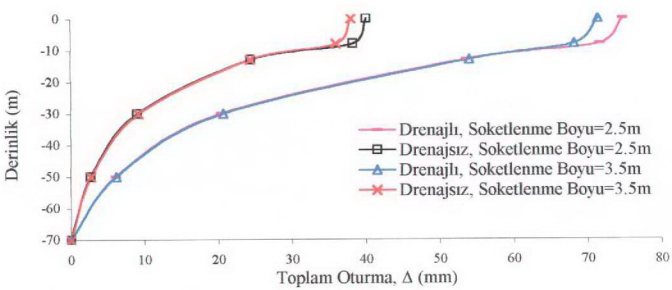
Modellerde çözümler 200 kPa' lık düzgün yayılı yükün temele ani uygulanmasıyla yapılmıştır. Çözümler sonunda 0.4 m genişlikli 25 kazık ve 0.6 m kalınlığında yayılı temelden oluşan sistemin kazıkların temel genişliğinin %75' ine yayıldığı durumda toplam oturma ve farklı oturma ölçütlerini sağladığı belirlenmiştir. Uzun sürede bu değerlerin nasıl değişeceği ve sonuçta ulaşılacak değerlerin yapıların dayanabileceği oturma sınırları içinde kalıp kalmayacağı da ayrıca incelenmiştir. Kullanılan yazılım

konsolidasyon analizi yapmadığı için bazı modellerde drenajlı çözümler yapılarak durum anlaşılmaya çalışılmıştır. Konsolidasyon analizi ile oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi yerine yapılan bu analizde yükleme anında efektif parametreler kullanılmakta böylece hiç boşluk suyu basıncı oluşmamaktadır. Sonuçta da oluşan oturmalar konsolidasyon oturmalarına karşılık gelmektedir. Şekil 6.62' de bu şekilde yapılan çözümlere örnek verilmiştir.



Şekil 6.62: Drenajlı ve drenajsız durumda yük - oturma ilişkisi

Farklı kazık genişliği, temel kalınlığı, kazık sayısı ve boyu için yapılan drenajlı ve drenajsız çözümler karşılaştırıldığında drenajlı çözümlerden elde edilen oturma değerlerinin ani oturmaların 1.70-1.95 katı mertebesinde gerçekleşeceği görülmüştür. Bu oturmaların uzun sürede gerçekleşeceği ve 100 mm' den küçük oldukları düşünülürse gerçekte oluşabilecek oturmaların problem olmayacakları düşünülmektedir. Şekil 6.63' de drenajlı ve drenajsız çözümlerden elde edilen sonuçlar bir örnekte derinliğe karşılık oturmalar çizilerek verilmiştir. Buradan aradaki farkın büyük bir bölümünün sıkı kum tabakasının altında yer alan killi zeminden kaynaklanacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.63: Drenajlı ve drenajsız durumda derinlik - oturma ilişkisi

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Adapazarı gibi zeminlerin yumuşak ve derin olduğu aluviyal ortamlarda yüksek yapılaşmanın mümkün olduğunu gösterme amacı ile kazıklı yayılı temelin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Kazıklı yayılı temellerin eskiye oranla çok daha ekonomik boyutlandırması artık yapılabilmektedir.

2. Adapazarı zeminlerinin genel olarak üst 3 - 5 m' sinde kayma direnci düşük katmanlar bulunmaktadır. Ancak, özellikle eski akarsu yataklarının bulunduğu bölgelerde bu katmanların altında yüksek yapılaşma için uygun ortam oluşturan, kalınlığı 5 m' yi geçebilen sıkı - çok sıkı kum ve çakıllı kum tabakaları mevcuttur. Bunların altında ise en üstteki kadar düşük kayma dirençleri göstermeyen genelde hafif / orta derecede aşırı konsolide göl kökenli killi zeminler bulunmaktadır.

3. Yukarıda belirtilen zemin özellikleri göz önüne alınarak yapıların bodrumlu inşa edilmesi veya kazıklı temel sistemlerinin kullanılması ile kentte yüksek yapılaşmaya gidilmesi mümkün olacaktır. Nitekim, sayıları az da olsa 1999 depreminden önce bu teknikle inşa edilmiş yapılarda hiçbir zemin kaynaklı problemin görülmemesi bunu doğrulamaktadır. Kazıklı yayılı temeller, Adapazarı zemin koşullarında yüksek yapılar altında oturma limitleri ve taşıma gücü açısından problem yaşanmadan kullanılabilir.

4. Kazıklı temel sistemlerinde geleneksel hesaplamalarda dikkate alınamayan yayılı temel - kazık ve zemin arasındaki karmaşık etkileşimler PLAXIS gibi ileri sonlu eleman yazılımları ile kolayca modellenebilmekte, çözüm yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile kısa sürede elde edilebilmektedir.

5. Sonlu eleman yönteminin iki ve üç boyutlu çözümlerinde oturmalar açısından % 20' ye varabilen farklılıklar çıkabilmektedir. İki boyutlu çözümlerde daha fazla hesaplanan oturmalar nedeniyle kazıkların oturma kontrolü amacıyla kullanıldığı durumlarda üç boyutlu çözüm yapmanın gerekliliği ortaya çıkartılmıştır.

6. Zeminin yük altındaki davranışını temsil eden malzeme modellerinin de gerçeğe uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir. "Mohr - Coulomb kriteri" ile drenajsız şartlarda hızla göçme yüküne ulaşılırken, "pekleşen zemin modeli" ile gerilme-deplasman davranışı gerçekçi olarak modellenebilmektedir. Bu modelde kullanılan deformasyon modülleri, yükleme - boşaltma - yeniden yükleme durumlarını temsil edebilmekte, ayrıca "aşırı konsolidasyon oranı" hesaplara katılabilmektedir.

7. Yayılı temelin yapı yükünü paylaştığı ve kazıkların oturmaları azaltıcı olarak kullanıldığı üç boyutlu sonlu eleman çözümlerinde, kazıklı yayılı temel sistemlerinde davranışı belirleyen en önemli parametre olarak kazık yayılım oranı (B_g/B_t) bulunmuştur. Modellemeye kazık yayılım oranının optimum değeri ile başlanırsa farklı oturmalar sıfır olacak, dolayısıyla temelde eğilme ve burulma momentleri oluşmayacaktır. Optimum kazık yayılım oranı, kazık sayısının artmasıyla, temel kalınlığının azalmasıyla ve kazık genişliğinin (çapının) azalmasıyla büyümektedir. Oturma ölçütlerini sağlayan ve kazık boyutları ve temel kalınlığı açısından en uygun olduğu düşünülen durumlarda kazık yayılım oranı 0.75 - 0.80 arasında değişmektedir.

8. Toplam oturmalar, kazık yayılım oranının artmasıyla düşmekte ve kazıkların temel alanının tamamına yayıldığı durumda en aza inmektedir. Optimum kazık yayılım oranının kullanıldığı durumlarda, toplam oturmalar daha yüksek çıksa da toplam oturma ölçütünü sağlamakta, ancak farklı oturmalar da sıfır olmaktadır.

9. Literatürdeki bilgilere benzer olarak kazık sayısının belli bir değerden fazla seçilmesinin oturmalar açısından hiçbir yarar sağlamadığı görülmüştür. Yapılan çözümlerde kazık sayısının 25 olması bir çok durumda yeterli olmakta; kazık sayısının 100' den fazla olması, hiçbir durumda oturmaları azaltıcı yönde önemsenecek bir etki oluşturmamaktadır.

10. Toplam kazık kesit alanının yayılı temel alanına oranının ($A_{kazık}/A_{yayılı\ temel}$) %2' den küçük değerleri oturmaları kabul edilebilir seviyelere indirmek için yeterlidir.

11. Kazık yayılım oranı doğru seçildiğinde, kazık aralığı oranının (s/d) 15' e kadar değerlerinde oturma ölçütleri sağlanmaktadır. Bu bulgu, geleneksel hesaplara göre kazık sayısının çok az olacağını doğrulamaktadır.

12. Kazık genişliğinin (çapının) artmasıyla toplam oturmaların, yayılı temel kalınlığının artmasıyla farklı oturmaların azaldığı görülmekle birlikte, azalma miktarları bütün durumlarda kazık yayılım oranının (B_g/B_t) etkisinin çok altında kalmaktadır. Ayrıca, kazık genişliği (çapı) arttıkça temel kalınlığının; yayılı temel kalınlığı arttıkça da kazık genişliğinin etkisi azalmaktadır.

Yukarıda belirtilen sonuçlar ışığında kazık sayısının, yükün sadece kazıklar tarafından taşındığı kabulüyle yapılan hesapların yarısına kadar düşebildiği oturma kontrollü çözümler için basit bir yaklaşım getirilmiştir. Kazık sayısının 25, yayılı temel kalınlığının 0.60 m, kazık genişliğinin (çapının) 0.40 m, kazık yayılım oranının (B_g/B_t) 0.78 olması ve kazıkların sıkı kum tabakası üzerine oturtulması durumunda 20 m*20 m' lik temelde farklı oturmalar sıfır olmakta ve ani toplam oturmalar 50 mm' den az çıkmaktadır. Benzer zemin profilleri ile karşılaşıldığında kazık genişliği (çapı) ve yayılı temel kalınlığı minimumda tutularak (örneğin d=0.40 m, t=0.6 m) ve yayılı temel genişliği dikkate alınarak optimum kazık yayılım oranı seçilir; kazıklar sıkı kum tabakasına kadar uzatılarak birkaç farklı kazık sayısı için model hazırlanır (örneğin 25, 36 ve 49 kazıklı modeller). Bütün modellerde farklı oturmaların sıfır çıktığı bilindiğine göre kontrol, toplam oturmalar açısından olacaktır. En uygun çözüm, kazık sayısının en az olduğu durumdan başlayarak kazıkların sıkı kuma soketlenme boyunun arttırılarak birkaç yeni çözüm yapılmasıyla bulunur. Yayılı temel kalınlığı, üst yapı yükleri ile yapılacak zımbalama tahkiki sonunda gerekiyorsa arttırılır.

BÖLÜM 8. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu tezde geoteknik mühendisliği açısından birçok sorunu bulunan Adapazarı kent merkezi zemin özellikleri dikkate alınarak kazıklı yayılı temel sistemlerinin uygulanması ile taşıma gücü ve oturma sorunu olmadan yüksek yapılaşmaya gidilebileceği sayısal olarak gösterilmiştir. Kazıklı yayılı temel sistemi üç boyutlu olarak modellenmiş, yayılı temel - kazıklar - zemin arasındaki etkileşimler ve zeminin yük altında göstereceği doğrusal olmayan davranış dikkate alınarak çözüm yapılmıştır.

Kullanılan üç boyutlu sonlu eleman yazılımı, deprem durumunu modelleyememekte, deprem sırasında oluşabilecek sıvılaşma veya tekrarlı yükler nedeniyle zeminin kayma direncinde meydana gelecek düşüşleri dikkate alamamaktadır. Araştırmanın bundan sonraki aşaması kazıklı yayılı temelin deprem koşullarında analizi olacaktır. Sonlu eleman yazılımları hızla geliştiğinden, örneğin tezde kullanılan yazılımın tünel modülü yerine temel modülü kullanıldığında sadece deprem durumunun değil, aynı zamanda üst yapının özelliklerinin de modele içerilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] ANAGNOSTOPOULOS, C., GEORGIADIS, M., "A Simple Analysis of Piles in Raft Foundations", Geot. Eng., Vol. 29, No. 1, pp. 71-83, 1998.

[2] ARSLAN, U., KATZENBACH, R., REUL, O., "Soil-Structure-Interaction of a Piled Foundation of a 121m High Office Building on Loose Sand in Berlin", Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Eds: Van Impe&Haegeman, Balkema, Rotterdam, pp. 215-221, 1998.

[3] ASCE, "Design of Pile Foundations", US Army Corps of Engineers, No:1, 99 pp, Virginia, 1993.

[4] ASTM D 4767-88, "CU Triaxial Compression Test on Cohesive Soils in Triaxial Compression", 1988.

[5] AWAD, M., BİRAND, A.A., "Dalga Yayılma Denklemlerinin İzmir, Aliağa'daki Bir Kazığa Uygulanması ", TMMOB İMO Teknik Dergi, Cilt 3, Sayı:2, 1992.

[6] BEER, G., "An Isoparametric Joint/Interface Element for Finite Element Analysis", Int. Jnl. Num. Meth. Eng., Vol. 21, pp. 585-600, 1985.

[7] BİRAND, A.A., "Kazıklı Temeller", Teknik Yayınevi, Ankara, 433 sayfa, 2001.

[8] BİRAND, A.A., "Kum İçinde Düşey Yük Taşıyıcı Kazıkların ve Kazık Guruplarının Oturması", TMMOB İMO Teknik Dergi, Cilt 3, Sayı:1, 1992.

[9] BİRAND, A.A., "Kazıklı Temellerde Güvenlik Katsayıları Üzerinde bazı Görüşler", İMO II. Teknik Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 1995.

[10] BOL, E., ÖNALP, A., "Adapazarı Zeminlerinin Jeomorfolojik ve Geoteknik Özellikleri", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Cilt 1, s. 1-8, 2002.

[11] BOL, E., "Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri", Doktora Tezi, SAÜ FBE, 195 sayfa, Adapazarı, 2003.

[12] BOWLES, J.E., "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1004pp., 1988.

[13] BRAY, J., STEWART, J.P., "Damage Patterns and Foundation Performance in Adapazarı", Earthquake Spectra, Supplement to Vol. 16, pp. 163-187, 2000.

[14] BRINKGREVE, R.B.J., VERMEER, P.A., "Plaxis 3D Tunnel User's Manual, Version 1, Balkema, Netherland, 2001.

[15] BROWN, P.T., WIESNER, T.J., "The Behaviour of Uniformly Loaded Piled Strip Footings", Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 13-21, 1975.

[16] BURLAND, J.B., BROMS, B.B., MELLO, V.F.B., "Behaviour of Foundations and Structures", Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, pp. 495-546, 1977.

[17] BURLAND, J.B., "Piles as Settlement Reducers", Keynote Address, 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy, 1995.

[18] BUTTERFIELD, R., BANERJEE, P.K., "The Elastic Analysis of Comressible Piles and Pile Groups, Geotechnique, Vol. 21, No. 1, pp. 43-60, 1971.

[19] BUTTERFIELD, R., BANERJEE, P.K., "The Problem of Pile Group-Pile Cap Interaction", Geotechnique, Vol. 21, No. 2, pp. 135-142, 1971.

[20] CAROL, I., ALONSO, E.E., "A New Joint Element for the Analysis of Fractured Rock", 5th Int. Congr. Rock Mech., Melbourne, Vol. F, pp. 147-151, 1983.

[21] CLANCY, P., RANDOLPH, M.F., "An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 17, pp. 849-869, 1993.

[22] CLANCY, P., RANDOLPH, M.F., "Simple Design Tools for Piled Raft Foundations", Geotechnique, Vol. 46, No. 2, pp. 313-328, 1996.

[23] CODUTO, D.P., "Foundation Design, Principles and Practices", Prentice-Hall Inc., Englewood Clifs, N.J., 1994.

[24] COOKE, R.W., "Developments in Soil Mechanics-1: The Design of Piled Foundations", Ed: C. R. SCOTT, Applied Science Publishers Ltd., pp. 275-315, 1978.

[25] COOKE, R.W., BRYDEN-SMITH , D.W., GOOCH, M.N., SILLETT, D.F., "Some Observations of the Foundation Loading and Settlement of a Multi-Story Building on a Piled Raft Foundation in London Clay", Proc. Inst. of Civil Engineers, Part 1, Vol. 70, pp. 433-460, 1981.

[26] COOKE, R.W., "Piled Raft Foundations on Stiff Clays-a Contribution to Design Philosopy", Geotechnique, Vol. 36, No. 2, pp. 169-203, 1986.

[27] COYLE, H.M., REESE, L.C., "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", J. Soil Mech. For Engng, ASCE, Vol. 92, No. 2, pp. 1-26, 1966.

[28] CUNHA, R.P., POULOS, H.G., SMALL, J.C., "Investigation of Design Alternatives for a Piled Raft Case History", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 127, No. 8, pp. 635-641, 2001.

[29] DAVIS, E.H., POULOS, H.G., "The Analysis of Piled Raft Systems", Aust. Geomech. J., No. 2, pp. 21-27, 1972.

[30] DAY, R.A., POTTS, D.M., "Automatic Mesh Generation of Zero Thickness Interface elements", Proc. 7th I. C. Compt. Meth. Adv. Geomech, pp. 101-106, 1991.

[31] DAY, R.A., POTTS, D.M., "Zero Thickness Interface Elements-Numerical Stability and Application", Int. Jnl. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol. 18, pp. 689-708, 1994.

[32] DESAI, C.S., JOHNSON, L.D., HARGETT, C.M., "Analysis of Pile-Supported Gravity Lock", ASCE J. Geotech. Eng. Div., Vol., 100, No. 9, pp. 1009-1029, 1974.

[33] DESAI, C.S., ZAMAN, M.M., LIGHTNER, J.G., SIRIWARDANE, H.J., "Thin-Layer Element for Interfaces and Joints", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 8, pp. 19-43, 1984.

[34] DUNCAN, J.M., CHANG, Y.C., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", ASCE, SM5, Vol. 96, pp. 1629-1653, 1970.

[35] FLEMING, W.G.K., WELTMAN, A.J., RANDOLPH, M.F., ELSON, W.K., "Piling Engineering", 2nd Ed., Surrey Univ. Press, 1992.

[36] FRANCAVILLA, A., ZIENKIEVICZS, O.C., "A Note on Numerical Computation of Elastic Contact Problems", Int. Jnl. Num. Meth. Eng., Vol. 9, pp. 913-924, 1975.

[37] FRANK, R., GUENOT, A., HUMBERT, P., "Numerical Analysis of Contacts in Geomechanics", Proc. 4th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Rotterdam, pp. 37-42, 1982.

[38] FRANKE, E., LUTZ, B., El-MOSSALLAMY, Y., "Measurements and Numerical Modelling of High-Rise Building Foundations on Frankfurt Clay", Geot. Spec. Pub. 40, ASCE, Vol. 2, pp. 1325-1336, 1994.

[39] FRASER, R. A., WARDLE, L.J., "Numerical Analysis of Rectangular Rafts on Layered Soils", Geotechnique, Vol. 26, No. 4, pp. 613, 1976.

[40] GHABOUSSI, J., WILSON, E.L., ISENBERG, J., "Finite Element for Rock Joint Interfaces", ASCE, SM10, Vol.99, pp.833-848, 1973.

[41] GRIFFITHS, D.V., "Numerical Modelling of Interfaces Using Conventional Finite Elements", Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Nagoya, pp. 837-844, 1985.

[42] GOODMAN, R.E., TAYLOR, R.L., BREKKE, T.L., "A Model for the Mechanics of Jointed Rocks", ASCE, SM3, Vol.94, pp. 637-659, 1968.

[43] GUO, W.D., RANDOLPH, M.F., "Vertically Loaded Piles in Non-Homogeneous Media", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 21, pp. 507-532, 1997.

[44] GUO, W.D., RANDOLPH, M.F., "An Efficient Approach for Settlement Prediction of Pile Groups", Geotechnique, Vol. 49, No. 2, pp. 161-179, 1999.

[45] HAIN, S.J., LEE, I.K., "The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems", Geotechnique, Vol. 28, No. 1, pp. 65-83, 1978.

[46] HONGLADAROMP, T., CHEN, N.J., LEE, S.L., "Load Distributions in Rectangular Footings on Piles", Geotech. Eng., Vol. 4, No. 2, pp. 77-90, 1973.

[47] HANSBO, S., "Developments in Geotechnical Engineering: Foundation Engineering", Elsevier, pp. 230-232, 1994.

[48] HERMANN, L.R., "Finite Element Analysis of Contact Problems", ASCE, EM5, Vol.104, pp.1043-1057, 1978.

[49] HEWITT, P.B., GUE, S.S., "Piled Raft Foundation in a Weathered Sedimentary Formation", Proc. Geotropika, pp. 1-11, Malaysia, 1994.

[50] HOOPER, J.A., "Observations on the Behaviour of a Piled-Raft Foundation on London Clay", Proc. Instn Civil Engrs., Vol. 55, No. 2, pp. 77-90, 1973.

[51] HOOPER, J.A., "Review of Behaviour of Piled Raft Foundations", CIRIA Report No. 83, 1974.

[52] HORIKOSHI, K., RANDOLPH, M.F., "Centrifuge Modelling of Piled Raft Foundations on Clay", Geotechnique, Vol. 46, No. 4, pp. 741-752, 1996.

[53] HORIKOSHI, K., RANDOLPH, M.F., "Optimum Design of Piled Raft Foundations", Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 2, pp. 1073-1076, 1997.

[54] HORIKOSHI, K., RANDOLPH, M.F., "Technical Note: On the Definition of Raft-Soil Stiffness Ratio for Rectangular Rafts", Geotechnique, Vol. 47, No. 5, pp. 1055-1061, 1997.

[55] HORIKOSHI, K., RANDOLPH, M.F., "A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts", Geotechnique, Vol. 48, No. 3, pp. 301-317, 1998.

[56] HORIKOSHI, K., RANDOLPH, M.F., "Estimation of Overall Settlement of Piled Rafts", Soils and Foundations, Vol. 39, No. 2, pp. 59-68, 1999.

[57] JANBU, J., "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests", Proc. ECSMFE Wiesbaden, Vol. 1, pp. 19-25, 1963.

[58] KATONA, M.G., "A Simple Contact-Friction Interface Element with Application to Buried Culverts", Int. Jnl. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol. 7, pp. 371-384,1983.

[59] KATZENBACH, R., ARSLAN, U., GUTWALD, J., "A Numerical Study on Pile Foundation of the 300m High Commerzbank Tower in Frankfurt am Main", Proc. 3rd European Conf. on Num. Meth. in Geomechanics, Manchester, pp. 271-277, 1994.

[60] KATZENBACH, R., ARSLAN, U., "Foundations of Tall Buildings in Frankfurt Clay and Frankfurt Limestone Examples for Soil-Structure-Interaction", Proc. Symposium '70 Years of Soil Mechanics', Turkish Nat. Commitee for ISSMFE, İstanbul, 1995.

[61] KATZENBACH, R., ARSLAN, U., GUTWALD, J., HOLZHAUSER, J., "Soil-Structure-Interaction of the 300 m High Commerzbank Tower in Frankfurt am Main Measurements and Numerical Studies", Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 2, pp. 1081-1084, 1997.

[62] KATZENBACH, R., ARSLAN, U., MOORMANN, C., REUL, O., "Piled Raft Foundation-Interaction between Piles and Raft", Darmstadt Geotechnics, Darmstadt University of Technology, No. 4, pp. 279-296, 1998.

[63] KATZENBACH, R., MOORMANN, C., "Recommendations for the Design and Construction of Piled Rafts", Proc. 15th ICSMGE, İstanbul, 2001.

[64] KIM, K.N., LEE, S.-H., KIM, K.-S., CHUNG, C.-K., KIM, M.M., LEE, H.S., "Optimal Pile Arrangement for Minimizing Differential Settlements in Piled Raft Foundations", Computers and Geotechnics, Vol. 28, pp. 235-253, 2001.

[65] KOÇYİĞİT, A., BOZKURT, E., CİHAN, M., ÖZACAR A, TEKSÖZ, B., "17 Ağustos Gölcük-Arifiye (KD Marmara) Depremi Jeolojik Ön Raporu", ODTÜ, 26 sayfa, Ankara, 1999.

[66] KONDNER, R.L., "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils", ASCE, SM1, Vol. 82, pp. 115-143, 1963.

[67] KRAFT, L.M., RAY, R.P., KAGAWA, T., "Theoretical *t-z* Curves", ASCE J. Geotech. Eng. Division, Vol. 107, No. 11, pp. 1543-1561, 1981.

[68] KULHAWY, F.H., "Limiting Tip and Side Resistance, Fact and Fallacy", Proc. Symp. on Anal. and Design of Pile Found., ASCE, San Fransisco, pp. 80-98, 1984.

[69] KUWABARA, F., "An Elastic Analysis for Piled Raft Foundations in a Homogeneous Soil", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp. 82-92, 1989.

[70] LAI, J.Y., BOOKER, J.R., "A Residual Force Finite Element Approach to Soil-Structure Interaction Analysis", Research Rep. No. 604, University of Sydney, 1989.

[71] LAMAN, M., KING, G.J.W., DICKIN, E.A., "Three-Dimensional Finite Element Studies of the Moment-Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Cohesionless Soil", Computers and Geotechnics, Vol. 25, pp. 141-155, 1999.

[72] LEE, I.K., "Analysis and Performance of Raft and Raft-Pile Systems", Keynote Lect., 3rd Int. Conf. Case Hist. in Geot. Eng. , St Louis, 1993.

[73] LEE, K.M., XIAO, Z.R., "A Simplified Nonlinear Approach for Pile Group Settlement Analysis in Multilayered Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp. 1063-1080, 2001.

[74] LENGKEEK, H.J., "Estimation of Sand Stiffness Parameters from Cone Resistance". PLAXIS Bulletin, Netherland, No. 13, pp.15-19, 2003.

[75] LIANG, F.Y., CHEN, L.Z., SHI, X.G., "Numerical Analysis of Composite Piled Raft with Cushion Subjected to Vertical Load", Computers and Geotecnics, Vol. 30, pp. 443-453, 2003.

[76] LUNNE, T., ROBERTSON, P.K., POWELL, J.J.M., "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", E&FN Spon, 1997.

[77] MANDOLINI, A., VIGGIANI, C., "Settlement of Piled Foundations", Geotechnique, Vol. 47, No. 4, pp. 791-816, 1997.

[78] MAYNE, P.W., POULOS, H.G., "Approximate Displacement Influence Factors for Elastic Shallow Foundations", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 125, No. 6, pp. 453-460, 1999.

[79] Mc DONALD, D.H., SKEMPTON, A.W., "A Survey of Comparison between Calculated and Observed Settlements of Structures on Clay, Conf. on Correlation of Calculated and Observed Stresses and Displacements, ICE London, pp. 318-337, 1955.

[80] MENDONCA, A.V., PAIVA, J.B., "A Boundary Element Method for the Static Analysis of Raft Foundations on Piles", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 24, pp. 237-247, 2000.

[81] MINDLIN, R.D., "Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid", Physics, Vol. 7, No. May, pp. 195-202, 1936.

[82] MUQTADIR, A., DESAI, C.S., "Three-Dimensional Analysis of a Pile-Group Foundation", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 10, pp. 41-58, 1986.

[83] NAYLOR, D.J., HOOPER, J.A., "An Effective Stress Finite Element Analysis to Predict the Short and Long term Behaviour of a Piled-Raft Foundation on London Clay, Proc. Conf. on Settl. of Structures, Cambridge, pp. 394-402, 1974.

[84] NYSTROM, G.A., "Finite – Strain Axial Analysis of Piles in Clay", Anal. Design Pile Foundations, ASCE, pp. 1-20, 1984.

[85] OTTAVIANI, M., "Un'esempio di Applicazione del Metodo Degli Elementi Finiti Allo Studio di Pali di Fondazione in Terreni Stratificati", Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. 6, No.1, pp. 1-13, 1972.

[86] OTTAVIANI, M., "Three Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups, Geotechnique, Vol. 25, No. 2, pp. 159-174, 1975.

[87] ÖNALP, A., "İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi", Cilt 2, KTÜ Yayın No:3, sayfa 594-1225, Trabzon, 1983.

[88] ÖNALP, A., BOL, E., "Adapazarı Kent Merkezi Jeoloji ve Jeomorfolojisi", Sakarya Üniversitesi, Adapazarı, 1998.

[89] ÖNALP, A., SERT, S., BOL, E., "Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 373-382, 2000.

[90] ÖNALP, A., AREL, E., BOL, E., "A General Assesment of the Effects of 1999 Earthquake on the Soil-Structure Interaction in Adapazarı", Jubilee Papers in Honour of Prof. Dr. Ergün Toğrol, İstanbul, pp. 76-89, 2001.

[91] PADFIELD, C.J., SHARROCK, M.J., "Settlement of Structures on Clay Soils", Special Publ. 27, Construction Ind. Res. and Information Association, London, 1983.

[92] PANDE, G.N. and SHARMA, K.G., "On Joint/Interface Elements and Associated Problems of Numerical Ill- Conditioning", Int. Jnl. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol. 3, pp. 293-300, 1979.

[93] PLACZEK, D., JENTZSCH, E., "Pile-Raft-Foundation under Exceptional Vertical Loads-Bearing Behaviour and Settlements", Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 2, pp. 1115-1118, 1997.

[94] PLACZEK, D., JENTZSCH, E., SCHULTE, K., "A Contribution to the Analysis and the Design Concept of Piled Raft Foundations", Proc. 15th ICSMGE, İstanbul, 2001.

[95] POTTS, D.M. and DAY, R.A., "Automatic Mesh Generation of Zero Thickness Interface Elements", Proc. of the 7th Int. Conf. on Comp. Meth. and Adv. in Civil Eng., Cairns, pp.101-106, 1991.

[96] POTTS, D.M., ZDRAVKOVIC, L., "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory", Vol:1, Thomas Telford, 440 pp., London, 2001.

[97] POTTS, D.M., ZDRAVKOVIC, L., "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application", Vol:2, Thomas Telford, 427 pp., London, 2001.

[98] POULOS, H.G., "Analysis of the Settlement of Pile Groups", Geotechnique, Vol. 18, No. 4, pp. 449-471, 1968.

[99] POULOS, H.G., DAVIS, E.H., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley&Sons, 397 pp., 1980.

[100] POULOS, H.G., "Pile Behaviour-Theory and Application", Geotechnique, Vol. 39, No. 3, pp. 365-415, 1989.

[101] POULOS, H.G., HULL, T.S., "The Role of Analytical Geomechanics in Foundation Engineering", Proc. ASCE Found. Eng. Congress, Chicago, 1989.

[102] POULOS, H.G., "Analysis of Piled Strip Foundations", Comp. Methods & Adv. in Geomechs., Ed. Beer et al., Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 183-191, 1991.

[103] POULOS, H.G., "Settlement Prediction for Bored Pile Groups", Proc. 2nd Int. Geot. Sem. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 103-117, 1993a.

[104] POULOS, H.G., "Piled Rafts in Swelling or Consolidating Soils", Jnl. Geot. Eng., ASCE, Vol. 199, No. 2, pp. 374-380, 1993b.

[105] POULOS, H.G., "An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 18, pp. 73-92, 1994a.

[106] POULOS, H.G., "Alternative Design Strategies for Piled Raft Foundations", Proc 3rd Int. Conf. Deep Foundations, Singapore, pp. 239-244, 1994b.

[107] POULOS, H.G., CHEN, L.T., "Pile Response due to Excavation-Induced Lateral Soil Movement", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 123, No. 2, pp. 94-99, 1997.

[108] POULOS, H.G., SMALL, J.C., TA, L.D., SINHA, J., CHEN, L., "Comparison of Some Methods for Analysis of Piled Rafts", Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 2, pp. 1119-1124, 1997.

[109] POULOS, H.G., "Piled Raft Foundations: Design and Applications", Geotechnique, Vol. 51, No. 2, pp. 95-113, 2001.

[110] POULOS, H.G., CARTER, J.P., SMALL, J.C., "Theme Lectures: Foundations and Retaining Structures –Research and Practice", Proc. 15th ICSMGE, İstanbul, Vol. 4: pp. 2525-2606, 2001.

[111] POULOS, H.G., "Methods of Analysis of Piled Raft Foundations", A Report Prepared on Behalf of Technical Commitee TC18 on Piled Foundations, Chairman: Prof. Dr. W.F. van IMPE, ICSMGE, 2001.

[112] PRAKASH, S., SHARMA, H.D., "Pile Foundations in Engineering Practice", Wiley-Interscience Publication, USA, pp. 734, 1990.

[113] PRAKOSO, W.A., KULHAWY, F.H., "Contribution to Piled Raft Foundation Design", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 127, No. 1, pp. 17-24, 2001.

[114] PRESSLEY, J.S., POULOS, H.G., "Technical Notes on Practical Applications: Finite Element Analysis of Mechanisms of Pile Group Behaviour", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 10, pp. 213-221, 1986.

[115] RANDOLPH, M.F., WROTH, C.P., "Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles", Jnl. Geot. Eng. Divn., ASCE, Vol. 104, No. 12, pp. 1465-1488, 1978.

[116] RANDOLPH, M.F., "Design of Piled Raft Foundations", CUED/D, Soils TR 143, Cambridge University, 1983.

[117] RANDOLPH, M.F., "Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts: State-of-the-Art Report", Proc. 13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, New Delhi, Vol. 5, pp. 61-82, 1994.

[118] RANDOLPH, M.F., CLANCY, P., "Efficient Design of Piled Rafts", Proc. Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 119-130, 1993.

[119] REUL, O., RANDOLPH, M.F., "Study of the Influence of Finite Element Mesh Refinement on the Calculated Bearing Behaviour of a Piled Raft", Proc. 8th Int. Symp. Numer. Models Geomechs., Rome, pp. 259-264, 2002.

[120] REUL, O., RANDOLPH, M.F., "Piled Rafts in Overconsolidated Clay: Comparison of *in situ* Measurements and Numerical Analyses", Geotechnique, Vol. 53, No. 3, pp. 301-315, 2003.

[121] ROBERT, Y., "A Few Comments on Pile Design", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, pp. 560-567, 1997.

[122] ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., "Interpretation of Cone Penetration Tests, Parts 1&2", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 718-745, 1983.

[123] RUSSO, G., VIGGIANI, C., "Some Aspects of Numerical Analysis of Piled Rafts", Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 2, pp. 1125-1128, 1997.

[124] RUSSO, G., VIGGIANI, C., "Factors Controlling Soil-Structure Interaction for Piled Rafts", Darmstadt Geotechnics (Darmstadt University of Techology), No. 4, pp. 297-322, 1998.

[125] RUSSO, G., "Numerical Analysis of Piled Rafts", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 22, pp. 477-493, 1998.

[126] SACHDEVA, T.D., RAMAKRISHNAN, C.V., "A Finite Element Solution for the Two Dimensional Elastic Contact Problem", Int. Jnl. Num. Meth. Eng., Vol. 17, pp. 1257-1271.

[127] SANCIO, R.B., BRAY, J.D., STEWART, J.P., YOUD, T.L., CHRISTENSEN, C., DURGUNOĞLU, H.T., ÖNALP, A., KARADAYILAR, T., SEED, R.B., "Correlation Between Ground Failure and Subsurface Soil Conditions in Adapazarı, Turkey", Int. Jnl. of Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 22, No. 9-12, pp. 1093-1102, 2002.

[128] SCHANZ, T., "Zur modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialen, Habilitation, Stuttgart Universitat, 1998.

[129] SHANTSER, E.V., "Alluvium of River Plains in a Temperate Zone and its Significance for Understanding the Laws Governing the Structure and Formation of Alluvial Studies", Akad. Nauk. S.S.S.R., Geol. Ser. 135, pp. 1-271, 1951.

[130] SHEN, W.Y., CHOW, Y.K., YONG, K.Y., "Practical Method for Settlement Analysis of Pile Groups", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 126, No. 10, pp. 890-897, 2000.

[131] SIMONINI, P., "Analysis of Behaviour of Sand Surrounding Pile Tips", ASCE J. Geotech. Geoenv. Eng., Vol. 122, No. 11, pp. 897-905, 1996.

[132] SINHA, J., "Piled Raft Foundations Subjected to Swelling and Shrinking Soils", PhD. Thesis, Univ. of Sdney, Australia, 1997.

[133] SKEMPTON, A.W., "The Bearing Capacity of Clays", Building Research Congress, ICE, pp. 180-189, London, 1951.

[134] SMITH, I.M., WANG, A., "Analysis of Piled Rafts", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 22, pp. 777-790, 1998.

[135] TA, L.D., SMALL, J.C., "Analysis of Piled Raft System in Layered Soils", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 20, pp. 57-72, 1996.

[136] TA, L.D., SMALL, J.C., "An Approximation for Analysis of Raft and Piled Raft Foundations", Computers and Geotechnics, Vol. 20, No. 2, pp. 105-123, 1997.

[137] TA, L.D., SMALL, J.C., "Analysis and Performance of Piled Raft Foundations on Layered Soils-Case Studies", Soils and Foundations, Vol. 38, No.4, pp. 145-150, 1998.

[138] TERZAGHI, K., PECK, R.B., "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed., John Wiley & Sons, 729 pp., 1967.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

[139] TOMLINSON, M.J., "Pile Design and Construction Practice", 4th Ed., E&FN Spon, 411 pp., 1994.

[140] TROCHANIS, A.M., BIELAK, J., CHRISTIANO, P., "Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles", ASCE J. of Geotech. Eng., Vol. 117, No. 3, pp. 429-447, 1991.

[141] TSE, "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri: TS 1900", 153 sayfa, Ankara, 1987.

[142] TSE, "İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması: TS 1500", 12 sayfa, Ankara, 2000.

[143] VALLIAPPAN, S., TANDJIRIA, V., KHALILI, N., "Design of Raft-Pile Foundation Using Combined Optimization and Finite Element Approach", Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol. 23, pp. 1043-1065, 1999.

[144] VAN IMPE, W.F., CLERQ, L., "A Piled Raft Interaction Model", Geotechnica, No. 73, pp. 1-23, 1995.

[145] VAN IMPE, W.F., LUNGU, I., "Technical Report on Settlement Prediction Methods for Piled Raft Foundations", Ghent Uni., Belgium, 1996.

[146] VERMEER, P.A., BRINKGREVE, R.B.J., "PLAXIS User' s Manual, version 7.2, Balkema, Rotterdam, The Netherland, 1995.

[147] VESIC, A.S., "Design of Pile Foundations", Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Nat. Res. Council, Washington DC, pp. 68, 1977.

[148] VIGGIANI, C., "Pile Groups and Piled Raft Behaviour", In Deep Foundations on Bored and Auger Piles (Eds: Van Impe & Haegman), Rotterdam, pp. 77-90, 1998.

[149] Von SOOS, P., "Properties of Soil and Rock (in German)", In: Groundbautaschenbuch Part 4, Edition 4, Ernst&Sohn, Berlin, 1990.

[150] WANG, A., "Three Dimensional Finite Element Analysis of Pile Groups and Piled-Rafts", PhD dissertation, University of Manchester, UK, 1996.

[151] WIESNER, T.J., BROWN, P.T., "Behaviour of Piled Strip Footings Subject to Concentrated Loads", Aust. Geomechs. Jnl., G6, pp. 1-5, 1976.

[152] WILSON, E.L., "Finite Elements for Foundations, Joints and Fluids", Chapter 10 in Finite Elements in Geomechanics, Edt.Gudehus, John Wiley&Sons, 1977.

[153] WITHIAM, J.L., KULHAWY, F.H., "Analytical Model for Drilled Shaft Foundations", Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Meth. in Geomechs, Aachen, pp. 1115-1122, 1979.

[154] YAMASHITA, K., KAKURAI, M., YAMADA, T., "Investigation of a Piled Raft Foundation on Stiff Clay", Proc. 13th Int. Conf. Soil Mechs. Found. Eng., New Delhi, Vol. 2, pp. 543-546, 1994.

[155] YAMASHITA, K., YAMADA, T., KAKURAI, M., "Simplified Method for Analysing Piled Raft Foundations", Deep Foundations on Bored and Auger piles, Ed: W.F. van Impe, Balkema, Rotterdam, pp. 457-464, 1998.

[156] ZHUANG, G.M., LEE, I.K., ZHAO, X.H., "Interactive Analysis of Behaviour of Raft-Pile Foundations", Proc. Geo-Coast '91, Vol. 2, pp. 759-764, Yokohama, 1991.

ÖZGEÇMİŞ

Sedat SERT, 1973 yılında Adapazarı' nda doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Adapazarı' nda tamamlamıştır. 1989' da İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nde yüksek öğrenimine başlamıştır. Yüksek lisansını Sakarya Üniversitesi FBE, İnşaat Mühendisliği EABD, Geoteknik EBD' nda 1996' da İnşaat Yük. Müh. olarak tamamlamıştır.

Haziran - Aralık 1995 tarihleri arasında İzmit Entegre Çevre Projesi' nde YESTİ Ltd. Şti. adına şantiye sorumlusu olarak "çöp depolama alanlarının geomembranla kaplanması" projesinde çalışmıştır. 1995 yılı sonunda Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı' na Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Halen bu görevi sürdürmektedir.