

**KAZIKLI TEMELLERE ETKİ EDEN  
DİNAMİK YÜKLERİN STATİK YÜKLER  
CİNSİNDEN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

Gülşah AVCI

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2008

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Gülşah AVCI'nın "Kazıklı Temellere Etki Eden Dinamik Yüklerin Statik Yükler Cinsinden Uygulanabilirliğinin Araştırılması" başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans Tezi, 25.01.2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.**

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
<b>Üye (Tez danışmanı)</b>	<b>: Prof. Dr. AHMET TUNCAN</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. YÜCEL GÜNEY</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. SAVAŞ KOPARAL</b>	.....

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**Enstitü Müdür**

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KAZIKLI TEMELLERE ETKİ EDEN DİNAMİK YÜKLERİN STATİK YÜKLER CİNSİNDEN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Gülşah AVCI**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN**

**2008, 254 sayfa**

Bu çalışmada, sıvılaştan zeminde inşa edilen yüzen kazık gruplarına etki eden dinamik yüklerin statik yükler cinsinden uygulanabilirliği incelenmiştir. Tez çalışmasında, Plaxis paket programı dinamik modülü yardımı ile dinamik etki altında kazık grubu deformasyonları belirlenmiş, bu deformasyonlardan geri hesap yapmak sureti ile kazık grubuna aynı deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik yükler bulunmuştur.

Sonuç olarak, dinamik etkilerin de hesaba katıldığı programların kullanılmadığı durumlarda, üst yapıdan gelecek yüklere göre sıvılaştan zeminlerde kazık temel tasarımı için dinamik kuvvetler statik yük cinsinden uygulanabilirliği belirlenmiştir. 6,0 şiddetine kadar olan depremler için kazık temele etkiyen statik düşey yük %100 arttırılarak; şiddeti 6,0~8,0 arasında değişen depremler için kazık temele etkiyen düşey statik yük %200 arttırılarak dinamik etki statik yük cinsinden göz önüne alınmış olur.

**Anahtar Kelimeler:** Kazık Temeller, Sürtünme Kazıkları, Deprem, Sıvılaştırma, Plaxis

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF DYNAMIC LOADS ACTING ON PILE FOUNDATIONS AS STATIC LOADS**

**Gülşah AVCI**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN**

**2008, 254 pages**

In this study, the applicability of the dynamic loads acting on floating pile groups in liquefied soils as static loads is studied. The group pile deformations under dynamic effects are modelled by the Plaxis software dynamic module and the equivalent static loads that cause the same deformations on pile group are determined by back-calculations.

As a result, in the case of not using programs that consider the dynamic effects, dynamic forces can be considered as static loads to design of the pile foundations in liquefied soils. Total vertical loads applied to the pile foundations can be increased 100% to consider the earthquakes up to magnitude of 6,0. Total vertical static loads applied to the pile foundations can be increased 200% to consider earthquake loads between 6,0~8,0.

**Key words:** Pile Foundations, Friction Piles, Earthquake, Liquefaction, Plaxis

## TEŞEKKÜR

Gerek yüksek lisans eğitimimin gerekse tez alıőmanın her aőamasında bana engin bilgi birikimi ile destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a ve Sayın hocam Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, benden yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaőım Mehmet İnanç ONUR'a ve hayatımın őansı canım aileme sonsuz teőekkürler..

Gülşah AVCI

Şubat-2008

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Genel.....	1
1.2. Temel Tipleri ve Genel Özellikleri.....	2
1.3. Kazık Temelleri Gerekli Kılan Durumlar.....	4
<b>2. KAZIK TEMELLER</b>	<b>5</b>
2.1. Tarihçe.....	5
2.2. Kullanım Amaçları Ve Kullanım Alanları.....	6
2.3. Kazık Temel Çeşitleri.....	9
2.3.1. İmal edildikleri malzemeye göre kazık temeller.....	9
2.3.1.1. Çelik kazıklar.....	9
2.3.1.2. Beton kazıklar.....	10
2.3.1.3. Ahşap kazıklar.....	10
2.3.1.4. Kompozit kazıklar.....	11
2.3.2. Kullanım amaçlarına göre kazık temeller.....	11
2.3.2.1. Uç kazıkları.....	11
2.3.2.2. Sürtünme kazıkları.....	11
2.3.2.3. Kompaksiyon kazıkları.....	12
2.3.2.4. Çekme kazıkları.....	12
2.3.2.5. Tampon kazıklar.....	12
2.3.2.6. Eğik kazıklar.....	12

2.3.3. Zemine yerleştirilme şekillerine göre kazık temeller.....	12
2.3.3.1. Çakma kazıklar.....	12
2.3.2.2. Sondaj kazıkları.....	13
2.4. Farklı Tipteki Kazıkların Kıyaslanması.....	14

### **3. DÜŞEY STATİK YÜKLER ALTINDAKİ TEKİL KAZIKLARIN**

#### **TAŞIMA KAPASİTESİ** **16**

3.1. Kazıkların Zemine Yük Aktarma Mekanizmaları.....	16
3.2. Kazık Kapasitesinin Hesaplanması.....	17
3.2.1. Uç taşıma kapasitesinin hesabı.....	18
3.2.1.1. Meyerhof yöntemi.....	18
3.2.1.2. Vesic yöntemi.....	21
3.2.1.3. Coyle & Castello yöntemi.....	23
3.2.1.4. Kaya üzerine oturan kazıklar.....	23
3.2.2. Sürtünme (yüzey) direncinin hesaplanması.....	24
3.2.2.1. Kumlarda sürtünme direnci.....	25
3.2.2.2. Killerde sürtünme direnci.....	27
3.2.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi.....	31

### **4. YATAY STATİK YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIKLARIN**

#### **TAŞIMA KAPASİTESİ** **32**

4.1. Granüler Zeminler İçin Yanal Yüklü Kazık Hesabı.....	33
4.2. Kohezyonlu Zeminler İçin Yanal Yüklü Kazık Hesabı.....	35
4.3. Dayanıma Bağlı Yanal Yük Kapasitesi.....	36
4.3.1. Kazıkların maksimum yanal direnci.....	36
4.3.1.1. Homojen kohezyonlu zeminlerdeki kazıklar.....	36
4.3.1.2. Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıklar.....	41
4.4. Deformasyonlara Bağlı Yanal Yük Kapasitesi.....	45
4.4.1. Lineer elastik yöntem.....	46
4.4.1.1. Serbest uçlu (ankrajsız/konsol) kazıklar.....	47
4.4.1.2. Sabit uçlu (ankrajlı) kazıklar.....	50

4.4.2. Lineer olmayan yöntemler.....	50
4.4.2.1. Rijitlik matrisi çözüm yöntemi.....	50
4.4.2.2. Yanal basınç-deformasyon(p-y) yöntemi.....	52
4.4.2.3. p-y eğrilerinin birleştirilmesi.....	54
4.5. Yanal Yüklü Kazıklarda Yük ve Direnç Faktörlerine Bağlı Tasarım.....	55
4.6. Su Jetinin Yanal Yük Kapasitesine Etkisi.....	55
4.7. Matkapla Kuyu Açılarak Yerleştirilen Kazıkların Yanal Yük Kapasiteleri...57	
<b>5. YATAK KATSAYISI KAVRAMI</b>	<b>59</b>
5.1. Düşey Yatak Katsayısı Hesabı.....	59
5.1.1. Kohezyonsuz zeminlerden düşey yatak katsayısı hesabı.....	61
5.1.2. Kohezyonlu zeminlerde düşey yatak katsayısı hesabı.....	63
5.1.3. Kirişler altında düşey yatak katsayısı.....	65
5.2. Yatay Yatak Katsayısı Hesabı.....	67
5.2.1. Zemin elastisite modülü kullanılarak yatay yatak katsayısının belirlenmesi.....	71
5.2.2. Zemin taşıma gücü bağıntıları kullanılarak yatay yatak katsayısının belirlenmesi.....	72
5.3. Dinamik Yatak Katsayısı.....	74
5.4. Yatak Katsayısının Derinlikle Değişimi.....	77
<b>6. KAZIKLARIN ÇEKİP ÇIKARMA / ÇEKME DAYANIMI</b>	<b>79</b>
6.1. Kohezyonlu Zeminler İçin Net Taşıma Kapasitesi Hesabı.....	79
6.2. Granüler Zeminler İçin Net Taşıma Kapasitesi Hesabı.....	80
6.3. İzin Verilebilir Kaldırma Kapasitesi.....	82
<b>7. TEKİL KAZIKLARIN OTURMASI</b>	<b>83</b>
7.1. Oturmaların Sebepleri Ve Yarattıkları Sorunlar.....	83
7.2. Tekil Kazıkların Elastik Oturması.....	85
7.2.1. $S_1$ 'in hesaplanması.....	85
7.2.2. $S_2$ 'nin hesaplanması.....	85



7.2.3. $S_3$ 'ün hesaplanması.....	87
7.3. Oturmalara Karşı Alınabilecek Önlemler.....	87
<b>8. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ</b>	<b>89</b>
8.1. Negatif Çevre Sürtünmesi Oluşumu İçin Gereken Hareket.....	90
8.1.1. Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması durumunda negatif çevre sürtünmesi.....	91
8.1.2. Kil zemin üzerine granüler dolgu yapılması durumunda negatif çevre sürtünmesi.....	92
8.2. Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltmak İçin Öneriler.....	93
<b>9. GRUP KAZIKLARIN STATİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI</b>	<b>94</b>
9.1. Rijitlik Yöntemleri .....	94
9.1.1. Kazık-zemin modeli.....	94
9.1.2. Rijit döşemenin esnek döşemeyle kıyaslanması.....	96
9.2 Grup Kazıkların Düşey Statik Yük Altında Davranışı.....	96
9.2.1. Granüler zemindeki grup kazıklar.....	97
9.2.2. Kil zemindeki grup kazıklar.....	99
9.2.3. Kaya zemindeki grup kazıklar.....	99
9.3. Grup Kazıkların Yatay Statik Yük Altında Davranışı.....	100
9.3.1. Grup azaltma faktörü yöntemi.....	100
9.3.2. Grup büyütme faktörü yöntemi.....	100
9.4. Grup Kazıkların Oturması.....	101
9.4.1. Kazık gruplarının konsolidasyon oturması.....	101
9.4.2. Kazık gruplarının elastik oturması.....	103
<b>10. NARİN KAZIKLARIN BURKULMASI</b>	<b>104</b>
10.1. Tamamen Gömülü Kazıklar.....	104
10.1.1. Durum 1: $k=\text{sabit}$ .....	106
10.1.2. Durum 2: $k=n_h x$ .....	106
10.2. Kısmen Gömülü Kazıklar.....	108

10.2.1. Sabit $k$ için çözümler.....	109
10.2.2. Doğrusal değişen $k$ için çözümler.....	110
10.3. Burkulma Durumunda Grup Etkisi.....	111
<b>11. KAZIK TEMELLERE ETKİYEN TİTREŞİMLİ YÜKLER</b>	<b>112</b>
11.1. Düşey Titreşimlere Maruz Tekil Kazıklar.....	113
11.1.1. Düşey titreşimlere maruz tekil uç kazıkları.....	113
11.1.1.1. $W$ çok küçükse.....	113
11.1.1.2. $W$ kazık ağırlığına eşitse.....	113
11.1.1.3. $W$ kazık ağırlığından büyükse.....	114
11.1.2. Düşey titreşimlere maruz tekil sürtünme kazıkları.....	115
11.2. Yatay Titreşimlere Maruz Tekil Kazıklar.....	117
11.3. Sallanma/Çalkantı Titreşimlerine Maruz Tekil Kazıklar.....	117
11.4. Burulma Titreşimlerine Maruz Tekil Kazıklar.....	118
11.5. Titreşim Kuvvetine Maruz Grup Kazıklar.....	121
11.5.1. Düşey titreşimlere maruz kazık grupları.....	121
11.5.2. Yatay titreşimlere maruz kazık grupları.....	123
11.5.3. Sallanma/Çalkantı titreşimlerine maruz kazık grupları.....	125
11.5.4. Burulma titreşimlerine maruz kazık grupları.....	127
<b>12. DEPREM YÜKLERİ ALTINDA KAZIK TEMELLER</b>	<b>129</b>
12.1. Deprem Açısından Zeminlerin Sınıflandırılması.....	129
12.2. Sismik Tehlike Sınırının Belirlenmesi.....	131
12.3. Zemin Koşullarının Sarsıntı Şiddetine ve Yapısal Hasara Etkisi.....	135
12.4. Zemin Koşullarının Yer Hareketlerinin Özelliklerine Etkisi.....	136
12.4.1. Deprem kayıtlarının toplanması (Strong motion).....	136
12.4.2. Mikrotremor deneylerinden yararlanma.....	136
12.4.3. Hesap yöntemleri.....	136
12.5. Zemin Sıvılaşması.....	138
12.5.1. Sıvılaşmaya etki eden faktörler.....	139
12.5.2. Yerinde ölçümlerle sıvılaşma direncinin belirlenmesi.....	141

12.6. Kazık-Zemin Etkileşimi.....	143
12.7. Tekil Kazıkların Sismik Yükler Altında Çözümü.....	144
12.7.1. Winkler temeli üzerindeki kiriş modeli.....	145
12.7.2. Psedo-statik yöntem.....	148
12.8. Grup Kazıkların Sismik Yükler Altındaki Çözümü.....	150
12.8.1. Kazık grubu çözümlerinde kazık etkileşim faktörlerinin kullanımı... 151	
12.8.1.1. Elastisiteyi temel alan çözüm.....	151
12.8.1.2. Dalga yayılımını temel alan çözüm.....	151
12.8.2. Kazık grubu çözümlerinde p-y çarpanlarının kullanımı.....	154
<b>13. KAZIKLARIN ZEMİNE YERLEŞTİRİLMELERİ</b>	<b>155</b>
13.1. Yerleştirmeden Önce Yapılacak Araştırmalar.....	155
13.2. Çakma Kazıklar İçin Gereken Donanım.....	157
13.3. Kazık Çakma Formülleri.....	158
13.4. Kazık Çakımı Sırasında Karşılaşılabilecek Bazı Problemler.....	162
<b>14. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ</b>	<b>164</b>
14.1. Eksenel Basınç Kazık Yükleme Deneyleri.....	164
14.1.1. Eksenel yükleme deney yöntemleri.....	167
14.1.1.1. Yavaş yükleme deney yöntemi (SM deneyi).....	168
14.1.1.2. Hızlı yükleme deney yöntemi (QM deneyi).....	168
14.1.1.3. Sabit penetrasyon oranı yöntemi (CRP deneyi).....	169
14.1.1.4. İsveç döngüsel deney yöntemi (SC deneyi).....	169
14.1.1.5. Deney yöntemlerinin kıyaslanması.....	170
14.1.2. Deney verilerinin yorumlanması.....	170
14.1.2.1. Davisson yöntemi.....	171
14.1.2.2. De Beer yöntemi.....	171
14.1.2.3. Brinch Hansen %90 kriteri.....	172
14.2. Çekip Çıkarma Dayanım Deneyleri.....	172
14.2.1. Çekip çıkarma deney yöntemi.....	174
14.2.2. Deney verilerinin yorumlanması.....	174

14.3. Yanal Kazık Yükleme Deneyleri.....	174
14.3.1. Yanal yükleme deney yöntemi.....	176
14.3.1.1. Standart yükleme usulü.....	176
14.3.1.2. Standardın üstünde yükleme usulü.....	176
14.3.2. Deney verilerinin yorumlanması.....	177
14.4. Dinamik Kazık Yükleme Deneyleri.....	177
14.4.1. Dinamik yükleme deney yöntemi.....	179
14.4.2. Deney verilerinin yorumlanması.....	180
<b>15. KAZIK TEMEL TASARIMINA AİT DİNAMİK UYGULAMALAR</b>	<b>182</b>
15.1. Hesaplarda Kullanılan Malzemelere Ait Parametreler.....	182
15.2. Tekil Kazıkların Taşıma Kapasitesi Hesapları.....	183
15.2.1. K1 (Ø 0,60) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı.....	183
15.2.1.1. Uç taşıma kapasitesi.....	183
15.2.1.2. Sürtünme direnci.....	184
15.2.1.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi.....	184
15.2.2. K2 (Ø 0,80) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı.....	184
15.2.2.1. Uç taşıma kapasitesi.....	184
15.2.2.2. Sürtünme direnci.....	185
15.2.2.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi.....	185
15.2.3. K3 (Ø 1,00) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı.....	186
15.2.3.1. Uç taşıma kapasitesi.....	186
15.2.3.2. Sürtünme direnci.....	186
15.2.3.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi.....	187
15.3. Tekil Kazıkların Yerleşim Düzenlerinin ve Buna Bağlı Olarak Her Bir Kazığa Etkiyecek Statik ve Dinamik Yüklerin Belirlenmesi.....	187
15.4. Tekil Kazıkların ve Kazık-Radye Sistemlerinin Belirlenen Düşey Statik Kazık Yükleri Altında Düşey Deformasyon (Oturma) Hesapları.....	190
15.4.1. K1 kazığı için düşey deformasyon hesabı.....	190
15.4.1.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması).....	190
15.4.1.2. K1 kazığının grup içerisindeki oturması.....	194

15.4.2. K2 kazığı için düşey deformasyon hesabı.....	195
15.4.2.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması).....	195
15.4.2.2. K2 kazığının grup içerisindeki oturması.....	196
15.4.3. K3 kazığı için düşey deformasyon hesabı.....	197
15.4.3.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması).....	197
15.4.3.2. K3 kazığının grup içerisindeki oturması.....	199
15.5. Belirlenen Düşey Statik Yükler ve Dinamik Etkiler Altında Plaxis Programından Elde Edilen Veriler.....	201
15.6. Dinamik Çözümler Sonucu Elde Edilen Düşey Deformasyonlardan Geri Hesap Yapılması Suretiyle Kazıklara Gelen Eşdeğer Düşey Statik Yüklerin Belirlenmesi.....	202
15.6.1. K1 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	202
15.6.1.1. 6x6 kazık grubu için hesap.....	202
15.6.1.2. 5x5 kazık grubu için hesap.....	204
15.6.1.3. 4x4 kazık grubu için hesap.....	207
15.6.2. K1 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	209
15.6.2.1. 6x6 kazık grubu için hesap.....	209
15.6.2.2. 5x5 kazık grubu için hesap.....	212
15.6.2.3. 4x4 kazık grubu için hesap.....	214
15.6.3. K1 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	216
15.6.3.1. 6x6 kazık grubu için hesap.....	217
15.6.3.2. 5x5 kazık grubu için hesap.....	219
15.6.3.3. 4x4 kazık grubu için hesap.....	221
15.6.4. K2 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	224
15.6.4.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	224
15.6.5. K2 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	226
15.6.5.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	227
15.6.6. K2 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	229
15.6.6.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	229
15.6.7. K3 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	232
15.6.7.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	232

15.6.7.2. 3x3 kazık grubu için hesap.....	234
15.6.8. K3 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	237
15.6.8.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	237
15.6.8.2. 3x3 kazık grubu için hesap.....	239
15.6.9. K3 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap.....	242
15.6.9.1. 4x4 kazık grubu için hesap.....	242
15.6.9.2. 3x3 kazık grubu için hesap.....	244
15.7. Sonuçlar.....	247
<b>16. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>253</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>255</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1	Yüzeysel temel	2
2.1	Kullanım amaçlarına göre kazık temeller	8
2.2	Kullanımdaki çelik kazıklar	9
2.3	Kullanımdaki betonarme kazıklar	10
2.4	Farklı tip ve büyüklüklerde fore kazıklar	13
3.1	Kazıkların yük aktarma mekanizması	16
3.2	Kazıkların maksimum yükle yüklenmesi	17
3.3	Meyerhof'a göre uç direncinin derinlikle değişimi	19
3.4	Meyerhof yöntemiyle çözüm yaparken dayanma kapasitesi katsayılarını bulmak için gerekli grafik	20
3.5	Coyle & Castello yöntemiyle çözüm yaparken dayanma kapasitesi katsayısı $N_q^*$ 'ı bulmak için gerekli grafik	23
3.6	Kumlarda sürtünme direncinin derinlikle değişimi	25
3.7	Toprak basınç katsayısının gömülme oranına bağlı değişimi	27
3.8	Tabakalı zemin durumunda $\lambda$ yönteminin uygulanışı	28
3.9	$\lambda$ katsayısının kazık gömülme boyuna bağlı değişimi	29
3.10	Drenajsız kohezyona bağlı $\alpha$ değerleri	30
4.1	Yanal yük etkisi altındaki kazıklarda ötelenmeler	32
4.2	Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü kısa kazıkların yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve moment dağılımları	37
4.3	Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü uzun kazıkların yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve moment dağılımları	38
4.4	Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü, ankrajlı kazıkların göçme mekanizmaları	39
4.5	Kohezyonlu zeminlerdeki kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yükler	40
4.6	Kohezyonlu zeminlerdeki uzun kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yükler	41

4.7	Kohezyonsuz zeminlerdeki yanal yüklü kısa kazıkların göçme mekanizmaları	42
4.8	Kohezyonsuz zeminlerdeki yanal yüklü uzun kazıkların göçme mekanizmaları	43
4.9	Kohezyonsuz zeminlerdeki kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler	43
4.10	Kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler	44
4.11	Yanal yüklü kazık şekli	47
4.12	M momentine maruz kazık şekli	49
4.13	Yanal yüklü kazıkların çözümü için rijitlik matrisi yöntemi	51
4.14	Yanal yüklü kazıkların çözümü için p-y eğrisi yöntemi	52
4.15	Kazıktaki eğilmenin gösterimi	52
4.16	Su jetinin $K_{max}$ değerine etkisi	56
4.17	Su jetinin $p_u$ değerine etkisi	56
5.1	Deformasyon alanından yola çıkılarak efektif dinamik k katsayısının belirlenmesi için grafik	75
6.1	Rölatif sıkılığa bağlı olarak $(L/D)_{cr}$ değerinin değişimi	81
6.2	$\emptyset$ sürtünme açısına bağlı olarak $K_u$ değerinin değişimi	81
7.1	L/B oranına bağlı olarak etki faktörünün değişimi	86
8.1	Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması durumunda kazık çevresinde meydana gelen negatif çevre sürtünmesi	91
8.2	Kil zemin üzerine granüler dolgu yapılması durumunda kazık çevresinde meydana gelen negatif çevre sürtünmesi	92
9.1	Komşu kazıkların düşey yük altında zemine yük aktarma biçimleri	97
9.2	Granüler zemindeki grup kazıklar	98
9.3	Kil zemindeki grup kazıklar	102
10.1	Kazık sınır koşulları	104
10.2	Kısmen gömülü kazıklar (Davisson ve Robinson, 1965)	109
10.3	Kısmen gömülü kazıkların boyutsuz gösterimi	110



11.1	Sürtünme kazıklarına etkiyen düşey titreşimler	115
12.1	Yatay yüklü tekil kazık için Winkler temeli üzerindeki kiriş modeli	146
14.1	Statik kazık yükleme deney düzeneği	165
15.1	Sistem sembolleri ve temsil ettikleri sistemler	189
15.2	Çap sabit kalmak koşuluyla ( $K=0,60m$ ) kazık sayısının ve yerleşiminin değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları	248
15.2	Çap sabit kalmak koşuluyla ( $K=1,00m$ ) kazık sayısının ve yerleşiminin değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları	248
15.2	Kazık sayısı ve yerleşimi sabit ( $4 \times 4$ ) kalmak koşuluyla kazık çapının değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları	248

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1	Kazık türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları	14
3.1	Farklı zeminler için rijitlik indeksi ( $I_r$ ) değerleri	22
4.1	Lineer çözüm için etki faktörleri	48
4.2	Su jetinin yanal yük kapasitesine etkisini belirlemek için kullanılan katsayılar	57
4.3	Matkapla kuyu açılarak yerleştirilen kazıkların yanal yük kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan katsayılar	58
5.1	Bazı zeminler için $k_{0,3}$ değerleri	61
5.2	Kum zeminde $0,30m^2$ alanındaki plaka kullanılarak yapılan plaka yükleme deneyinde elde edilmiş düşey yatak katsayıları	63
5.3	Kum zeminde SPT darbe sayılarına ait denklemlerle elde edilmiş düşey yatak katsayıları	63
5.4	Kohezyonlu zeminlerde $0,30m$ yarıçaplı plaka ile yapılan yükleme deneyinde elde edilmiş düşey yatak katsayıları	63
5.5	Çeşitli zeminler için yaklaşık düşey yatak katsayıları	65
5.6	Kohezyonsuz zeminlerde yatak katsayısının hesabı için kullanılan $n$ katsayıları	68
5.7	Terzaghi'ye göre yatay yatak katsayısı değerleri	69
5.8	Soletanche'ye göre yatay yatak katsayısı değerleri	70
5.9	Sulzberger'e göre yatay yatak katsayısı değerleri	70
5.10	Çeşitli zeminler için yaklaşık yatay yatak katsayıları	71
5.11	Farklı zeminlerde dinamik yatak katsayısı değerleri	77
7.1	Farklı zemin türlerine göre ortalama $C_p$ değerleri	86
11.1	Kütle oranı, sönümlenme oranı ve yay sabiti için U.S. Army Corps of Engineers'ın önerdiği formüller	120
12.1	Zeminlerin sınıflandırılması	130
12.2	Pik zemin dalga hızı ve pik yer ivmesi arasındaki bağıntı	134
13.1	Çekiç tiplerine göre çekiç verimleri	159
13.2	Kazık malzemesine göre $n$ katsayısı	159
15.1	Hesaplarda kullanılan zeminin özellikleri	182

15.2	Hesaplarda kullanılan kazık temellerin özellikleri	183
15.3	Kazık-radye sisteminin özellikleri	188
15.4	Kazık-radye sistemine etkitilen dinamik kuvvetler	188
15.5	Plaxis programı kullanılarak ve çeşitli yöntemlerle çözüm yapılarak sisteme etkitilen yükler ve bu yüklere bağlı olarak sistemin yaptığı deformasyonlar	201
15.6	Dinamik kuvvetlerle aynı düşey deformasyonları yaptıran eşdeğer düşey statik yükler	247
15.7	Kazık grubuna deprem etkisinden gelen ilave yük	247
15.8	Kazık grubunda deprem nedeniyle oluşan yük artış yüzdeleri	248

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$P$	: Kazık enkesitinin çevresi
$Q_u$	: Maksimum taşıma kapasitesi
$Q_p$	: Uç taşıma kapasitesi
$Q_s$	: Sürtünme direnci (kazık üzerindeki yükün sürtünmeyle taşınan kısmı)
$c$	: Kohezyon
$q'$	: Düşey efektif gerilme
$A_p$	: Kazık ucunun kesit alanı
$N^*_c$	: Dayanma kapasitesi katsayısı
$N^*_q$	: Dayanma kapasitesi katsayısı
$\emptyset$	: Zemin sürtünme açısı
$L$	: Kazık boyu
$L_b$	: Kazığın sağlam zemine gömülme derinliği
$D$	: Kazık çapı
$\sigma'_0$	: Kazık ucundaki ortalama efektif gerilme
$K_0$	: Sükûnetteki toprak basıncı
$I_{rr}$	: Zeminin azaltılmış rijitlik indeksi
$I_r$	: Zeminin rijitlik indeksi
$\Delta$	: Kazık altındaki plastik bölgede meydana gelen ortalama hacimsel şekil değiştirme
$G_s$	: Zeminin kayma modülü
$E_s$	: Zeminin Young modülü
$\mu_s$	: Zeminin Poisson oranı
$q_{ur}$	: Kayanın tek eksenli basınç dayanımı
$f$	: Birim sürtünme direnci
$\sigma'_v$	: Düşey efektif gerilme
$\delta$	: Zemin-kazık sürtünme açısı
$K$	: Toprak basınç katsayısı
$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$\gamma'$	: Efektif birim hacim ağırlık
$\tilde{N}$	: SPT değeri

$f_{av}$	: Ortalama birim sürtünme direnci
$\lambda$	: Killerde sürtünme direnci bulunurken kullanılan bir katsayı
$\alpha$	: Ampirik adhezyon katsayısı
$c_u$	: Drenajsız kohezyon
$\phi_R$	: Örselenmiş numunenin sürtünme açısı
$\beta$	: Killerde sürtünme direnci bulunurken kullanılan bir katsayı
$Q_{all}$	: İzin verilebilir (emniyetli) kazık kapasitesi
FS	: Güvenlik katsayısı
k	: Yatak katsayısı
$n_h$	: Yatay yatak katsayısı sabiti
$E_p$	: Kazık malzemesinin Young modülü
$I_p$	: Kazık kesitinin atalet momenti
$x_z$	: Kazığın dönmesi
$\theta_z$	: Kazığın eğimi
$M_z$	: Kazığa etkiyen moment
$V_z$	: Kazığa etkiyen kesme kuvveti
$p'_z$	: Zemin reaksiyonu
T	: Zemin-kazık sisteminin karakteristik uzunluğu
Z, Z'	: Boyutsuz derinlik değerleri
$\mu_v$	: Hacimsel sıkışabilirlik katsayısı
g	: Yer çekimi ivmesi
$P_u$	: Kazığın taşıyabileceği maksimum yanal yük
B	: Kazık genişliği
$E_{pI}$	: Kazık rijitliği
$k_h$	: Yatay yatak katsayısı
p	: Yanal yayılı yük şiddeti
y	: Yanal deformasyon
w	: Yatak katsayısı tayini için yapılan deneyde temel yapısının oturması
$w_1$	: Yatak katsayısı tayini için yapılan deneyde 30cm çapındaki deney plakasının oturması
$k_{0,3}$	: 30cm çapındaki deney plakası kullanılarak yapılan deneyde elde edilen yatak katsayısı

$P_0$	: Dilatometre deneyiyle elde edilen düzeltilmiş değer
$\sigma_h$	: Sükunetteki arazi yatay gerilmesi
$k_p$	: Dinamik yatak katsayısı
$T_{u(\text{brüt})}$	: Kazığın çekip çıkarma kuvvetlerine karşı brüt taşıma kapasitesi
$T_{u(\text{net})}$	: Kazığın çekip çıkarma kuvvetlerine karşı net taşıma kapasitesi
$\alpha'$	: Adhezyon faktörü
$K_u$	: Çekip çıkarma dayanımı hesabı için kaldırma katsayısı
$S$	: Toplam oturma
$S_1$	: Kazık malzemesinin shaft boyunca elastik kısılması
$S_2$	: Kazık ucunda aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma
$S_3$	: Kazık boyunca sürtünmeyle aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma
$Q_{wp}$	: Çalışma yükü altında kazık ucunda taşınan yük
$Q_{ws}$	: Çalışma yükü altında shaft boyunca taşınan yük
$\xi$	: Birim çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımına bağlı bir katsayı
$q_{wp}$	: Kazık ucundaki gerilme
$I_{wp}$	: Etki faktörü
$C_p$	: Ampirik faktör
$f_z$	: Negatif çevre sürtünmesi
$Q_n$	: Negatif çevre sürtünmesine bağlı olarak kazığa aşağı yönde etkiyen toplam kuvvet
$H_f$	: Dolgu yüksekliği
$\eta$	: Grup etkisi
$Q_{g(u)}$	: Kazık grubunun maksimum dayanma kapasitesi
$f_{ort}$	: Ortalama birim sürtünme direnci
$L_g$	: Kazık grubunun plandaki uzunluğu
$B_g$	: Kazık grubunun plandaki genişliği
$C_y$	: Yanal öteleme büyütme faktörü
$c_u$	: Drenajsız kayma mukavemeti
$C_m$	: Moment büyütme faktörü
$\Delta p$	: Tabakanın orta noktasındaki basınç artışı
$\Delta s$	: Konsolidasyon oturması
$\Delta e$	: Basınç artışından dolayı meydana gelen boşluk oranı değişimi

$e_0$	: Başlangıç boşluk oranı
$N_{cor}$	: Düzeltilmiş ortalama SPT sayısı
$q_c$	: Ortalama koni penetrasyon dayanımı
$T$	: Rölatif rijitlik faktörü
$W$	: Kazık üzerine gelen ağırlık
$f_n$	: Titreşimin doğal frekansı
$\omega_n$	: Doğal dairesel frekans
$\rho_p$	: Kazık malzemesinin yoğunluğu
$v_{c(p)}$	: Kazıkta boyuna dalga yayılma hızı
$Q$	: Kazığa etkiyen dinamik yük
$k_z$	: Yay sabiti (rijitlik katsayısı)
$c_z$	: Eşdeğer viskoz sönümlenme katsayısı
$v_s, V_s$	: Zemin kayma (kesme) dalgası hızı
$G^*$	: Karmaşık kayma modülü
$G_p$	: Kazık malzemesinin kayma modülü
$J$	: Kazık kesitinin kutupsal momenti
$D_f$	: Kazık başlığının gömülme derinliği
$J_{zz}$	: Merkezden geçen düşey aksa göre kazık başlığının ve makinelerin kütleli atalet momenti
PGA	: Pik zemin ivmesi
PGV	: Pik zemin dalga hızı
$M_s$	: Yüzey dalga şiddeti
$m_b$	: Gövde dalga şiddeti
$M_w$	: Moment şiddeti
PHGA	: Yatay pik zemin ivmesi
BNWF	: Doğrusal olmayan Winkler temeli üzerine oturan kiriş
$F_{s,max}$	: Zemin tarafından kazığa uygulanan maksimum kuvvet
$c$	: Amortisör katsayısı
$a_0$	: Boyutsuz frekans parametresi
$\omega$	: Açısal frekans
$\rho_s$	: Zemin yoğunluğu
$\theta$	: Hareket açısı

$V_{La}$	: Basınç-çekme dalgası hızı (analog Lysmer hızı)
ENR	: Mühendislik veri kaydı
$W_R$	: Şahmerdan ağırlığı
$h$	: Tokmağın düşüş yüksekliği
$S$	: Kazığın darbe başına penetrasyonu
$E$	: Tokmak verimi
$H_E$	: Tokmak enerjisi
$Q_{va}$	: Eksenel basınç deneyinde gerilme sayacının bulunduğu noktadaki yük
$\xi_x$	: Yatay öteleme sönümlenme oranı
$\omega_{nd}$	: Sönümlenmiş doğal frekans
$F_x$	: Osilatör tarafından oluşturulan çift-genlikli, istikrarlı kuvvet
$I_0$	: Kütle kutupsal atalet momenti
$C_\emptyset$	: Dönel sönümlenme değeri



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel

Üst yapı, bir sistemde temele (altyapıya) yük olarak etkiyen kısımdır. Üst yapıdan gelen yükleri temel zeminine yeterli güvenlikle aktaran yapı elemanlarına “temel” denir.

Kolon veya perdeler zemine doğrudan yapılamazlar. Betonarme kolonun dayanımı, zeminin dayanımına göre çok daha yüksektir. Kolon kesitleri kendi yüklerini güvenle taşıyacak şekilde seçilir. Ancak, bu kesitler dayanımı çok küçük olan zemine doğrudan oturtuldukları takdirde zeminde, zemin dayanımının çok üstünde gerilmeler oluşur ve kolon zemini zımbalayarak saplanır. Zemindeki gerilmeyi düşürebilmek için, kolonların alt ucu ile zemin arasına kesit alanı kolonun kesitinden çok daha büyük olan veya yükü kendi boyunca başka şekillerde zemine yayarak iletebilen taşıyıcı elemanlar yapılır. Bu elemanlara “temel” denir.

Temelin tek amacı zeminde oluşan gerilmeyi zeminin taşıyabileceği seviyeye indirgemek değildir. Diğer önemli bir amaç da kolon veya perdenin altındaki zeminde oluşacak oturmayı sınırlı bir düzeyde tutmak ve üst yapının farklı oturmalarından zarar görmesini de önlemektir. Tüm kolonların aynı miktarda oturması üst yapıya zarar vermezken, farklı oturmalar çok tehlikeli olabilir. [1]

Buna göre temellerin sağlaması gereken iki şart vardır[2]:

- Taşıma Kapasitesi Şartı: Kabul edilebilir bir güvenlik katsayısı kullanılarak, maksimum tasarım yükü altında, temeli meydana getiren malzemenin ve temel zemininin taşıma kapasitesi aşılmamalıdır.
- Oturma Şartı: Yapı ömrü boyunca meydana gelecek toplam ve farklı oturmalar yapısal hasara yol açmayacak seviyede, yani kabul edilebilir sınırlar dahilinde olmalıdır.

Bu iki şartın yanında ekonomiyi de unutmamak gerekir. Üst yapıdan gelen yükü en ekonomik şekilde taşıyabilecek temel sistemi seçilip, sistemin tasarımında da aynı ölçüt göz önüne alınmalıdır.

Bu şartlara ek olarak, daha çok göl ve nehir kıyılarında sivilaşmanın da kontrol edilmesi gereklidir.

## 1.2. Temel Tipleri ve Genel Özellikleri

Temeller başlıca iki gruba ayrılır:

- Yüzeysel temeller
- Derin temeller

Yüzeysel temeller, taşıma kapasitesi yüksek olan zeminin yüzeye yakın olduğu durumlarda ve nispeten daha iyi zeminlerde uygulanan, yük taşıma kapasitesi derin temellere göre daha az, yapımları daha basit ve daha ekonomik olan temel tipleridir. Bu temeller de kendi aralarında

- Tekil (münferit) temeller
- Sürekli (mütemadi) temeller
- Radye Jeneral (plak) temeller

olarak üç gruba ayrılır. Yüzeysel temeller için kesin bir derinlik yoktur. Farklı araştırmacılar farklı derinlikteki temelleri yüzeysel temel olarak adlandırır.

Şekil 1.1 yüzeysel temellere örnek olarak verilmiştir. Burada:

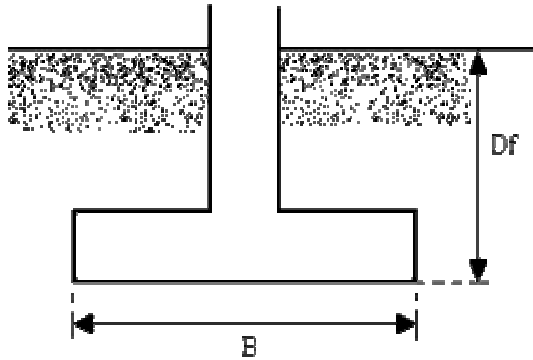
$D_f$ : temel derinliği (zemin yüzeyi ile temel tabanı arasında kalan mesafe)

$B$ : temel genişliği (kısa mesafe)

olmak üzere:

- Terzaghi'ye göre:  $D_f / B \leq 1$
- Bazı araştırmacılara göre:  $D_f / B \leq 3\sim 4$
- Maksimum:  $D_f / B \leq 5$

olan temeller “sığ temel” olarak adlandırılır.



Şekil 1.1: Yüzeysel temel

Yüzeysel temelerde kabul edilebilir maksimum oturmalar da şu şekilde verilebilir[2]:

- Tekil temelerde: 2,54 cm (1 inç)
- Sürekli temelerde: 5 cm (2 inç)
- Radye temelerde: 10 cm (4 inç)

Bunun yanında, komşu temellerin birbirlerine göre (rölatif) oturmaları da 1cm'i aşmamalıdır!

Eğer hesapla elde edilen oturmalar bu sınırları aşıyorsa ya da zemin taşıma gücü çok düşükse ( $\sigma_z^{em} < 1,0\text{kg/cm}^2$ ) zemin iyileştirmesi veya derin temel yapılması uygundur.

Derin temeller, üst yapıdan gelen yüklerin fazla ve zeminin bu yükleri taşıyamayacak kadar elverişsiz veya bu yükü taşıyabilecek sağlam zeminin yüzeyden derinde olduğu durumlarda uygulanan ve oturmaları en aza indiren temel çeşididir. Derin temeller çeşitli gruplara ayrılabilirler:

- Keson temeller
- Ayak temeller
- Kazık temeller

Keson temeller, sağlam zeminin derinde olması ve kazık temellerden daha geniş ve sağlam bir elemana gereksinim bulunması durumunda, dairesel, kare veya dikdörtgen kesitli, 3~4m çapında, içi boş olarak üretilmiş ağır yapı elemanlarının kendi ağırlıklarından da yararlanılarak zemine yerleştirilmeleriyle elde edilen yapısal elemanlardır. Yerinde imal edilmeleri de mümkündür.

Ayak temeller, yüzeydeki dayanımı düşük zeminden çok fazla derine inilmeden (5~7m arasında) sağlam zemine geçiş oluyorsa uygulanabilecek temel türleridir.

Kazık temeller, derinlikleri genişliklerine oranla oldukça fazla, narin yapı elemanlarıdır. Yüksek maliyetlerine karşın üstün dayanım özellikleri ve oturmaları önemli ölçüde azaltmaları sebebiyle tercih edilmektedirler.

### 1.3. Kazık Temelleri Gerekli Kılan Durumlar

Kazık temellerin yapımları yüzeysel temellere nazaran daha zor ve maliyetli olmasına karşın, bazı durumlarda yapının güvenliği açısından kullanılmaları gerekli olabilir. Bu durumlar aşağıda özetlenmiştir:

- Üst zemin katmanlarının sıkışabilir ve yapıdan gelen yükü taşıyamayacak kadar zayıf olduğu durumlarda, yükü alttaki sağlam tabakaya iletmek için,
- Yine üst zemin katmanlarının sıkışabilir ve zayıf olması durumunda, eğer sağlam zemin çok derinde ise yapısal yükü kazık boyunca sürtünme yoluyla zemine iletmek için,
- Yanal yüklerin bulunması durumunda, düşey yükleri güvenle taşıırken, eğilmeyle bu yanal yüklere de direnebildikleri için,
- Şişme/büzülme yapan ve çöken zeminlerde, yükü alttaki sağlam tabakaya ileterek yapının zeminin su muhtevsındaki değişiklikler nedeniyle zarar görmesini engellemek için,
- Zemin suyundan kaynaklanan kaldırma kuvvetine sürtünme yoluyla direnebildikleri için,
- Köprü ayakları gibi suyun aşındırıcı kuvvetine maruz yerlerde, ayakların çevresindeki zeminin aşınmasıyla temelin dayanma kapasitesinin azalmasını önlemek için yapılırlar.

Unutulmamalıdır ki kompaksiyon, vibroflatasyon, katkı maddeleri kullanılması, donatılı zemin gibi diğer zemin iyileştirme yöntemleri kazık temel uygulamasına göre daha maliyetli olduğu takdirde kazık temel inşa edilir.

## 2. KAZIK TEMELLER

Kazık temeller, derinde sağlam zemin bulunması durumunda yükü bu sağlam zemine, aksi takdirde yüzeyleri boyunca sürtünme yoluyla çevreleyen zemine iletme için, kullanım amaçlarına ve zemine bağlı olarak farklı malzemelerden, farklı boyut ve şekillerde üretilirler.

### 2.1 Tarihçe

Kazık temeller yüzyıllardır insanoğlu tarafından yük taşıma ve iletme üniteleri olarak kullanılmaktadırlar. Uygarlık tarihinin ilk zamanlarında, gerek savunma gerek stratejik önem açısından yerleşim yerleri nehir ve göl kıyılarına yakın kesimlerde kurulmaktaydı. Bu kesimlerde zemine ahşap kazıklar yerleştirmek veya elle açılan derin çukurlara taş ve çakıl doldurmak suretiyle zeminin kalitesi ve yük taşıma kapasitesi arttırılmaya çalışılmıştır.

Britanya'da Romalılar tarafından inşa edilen nehir kıyısı yerleşimlerinde ve köprülerde pek çok ahşap kazık kullanımı örneği bulunmaktadır. Çin'de Han Dynasy'deki köprü inşaatçıları ahşap kazıklar kullanmışlardır. (M.Ö. 200 ~ M.S. 200) İsviçre'de günümüzden 1200 yıl önce sığ göl tabanlarına ahşap kazıklar çakarak üzerlerine barınaklar inşa ettikleri belirlenmiştir. [3]

Yirminci yüzyılın başlarına kadar kazık elemanı olarak genellikle 30 cm çaplı, boyu 10 m. kadar olan ağaç kütükleri kullanılmıştır. Bu kazıkların çakımı ise, ağır bir cismin kazık üzerine düşürülmesiyle yapılmaktaydı. 1740 yılında Christoffoer Polhem, günümüzde kullanılan kazık çakma tertibatına benzer bir mekanizma geliştirmiştir. Buna takiben 1800lü yıllardan itibaren çelik, 1900lü yıllardan itibaren de beton kazıklar kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel gelişimin sonucu olan buharlı ve dizel kazık çakma makineleri, kazık çakma yöntemlerine önemli ölçüde yenilik ve değişiklik getirmiştir. [4]

## 2.2. Kullanım Amaçları Ve Kullanım Alanları

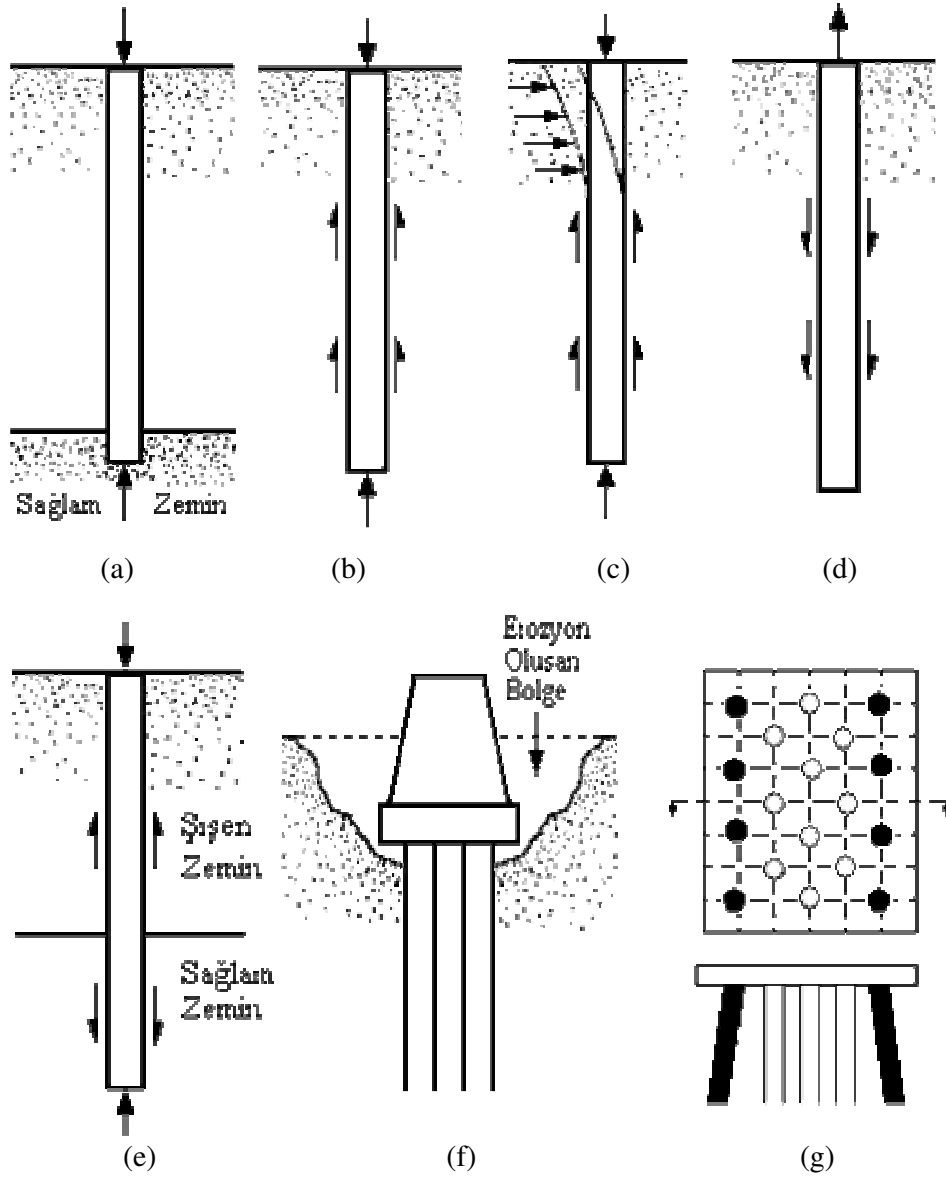
Kazık temeller aşağıda belirtilen amaçlar doğrultusunda, ekonomik açıdan en uygun çözüm yöntemi oldukları takdirde inşa edilirler.[2]

- Yüzeğe yakın zemin katmanlarının yüksek derecede sıkışabilir ve üstyapıdan gelen yükleri taşımak için yetersiz olduğu durumlarda veya sıvılaşma potansiyeli bulunan bölgelerde yükü alt katmanlardaki sağlam zemine iletmek amacıyla kazıklar kullanılır. (Bkz. Şekil 2.1. (a))
- Sağlam zeminin kazık yapımı için makul bir derinlikte olmaması durumunda, gelen yükü sürtünme vasıtasıyla kademeli olarak zemine aktarabilmek için kazıklar kullanılırlar. (Bkz. Şekil 2.1. (b))
- Yanal yüklere maruz kaldıklarında, kazık temeller, eğilme yoluyla yanall yüklerle direnirken aynı zamanda düşey yükleri taşıyabilme kabiliyetine sahiptirler. Bu nedenle hem yatay, hem düşey yüklere maruz kesimlerde inşa edilmeleri uygundur. (Bkz. Şekil 2.1. (c))
- İletim hattı direkleri, açık deniz platformları, yeraltı su seviyesinin altında kalan bodrum zeminleri gibi bazı yapıların temelleri kaldırma kuvvetlerine maruzdurlar. Kazık temeller bu gibi durumlarda kaldırma kuvvetlerine direnebilmek için de inşa edilirler. (Bkz. Şekil 2.1. (d))
- Pek çok uygulamada, yüzeyden çok derinlere uzanan genleşen veya çöken zeminlerle karşılaşılabilir. Genleşen (şişen) zeminler su muhtevsındaki artış durumunda şişer veya azalması halinde çatlarlar. Su eklendiğinde şişen ve su kaybıyla rötreye uğrayan pek çok plastik kil vardır. Bu zeminler üzerine inşa edilen temeller, şişmenin etkisiyle büyük kaldırma kuvvetlerine maruz kalırlar. Bu kuvvetler yapıda şişme, çatlama ve kırılmalara sebep olurlar. Genleşen killerde genelde likit limit  $LL > 50$ , plastisite indisi  $PI > 15$ 'tir. Su muhtevası değerinin değiştiği derinliğe kadar olan kısım "aktif bölge" olarak adlandırılır. Aktif bölgenin derinliği, zemin profiline bağlı olarak değişir. Bu derinlik, zemin profilinde iklim değişimlerine bağlı olarak likit limitteki değişimleri gösteren grafikler yardımıyla kolayca belirlenebilir. Çöken zeminler ise suya doydıkları zaman büyük hacim değiştirmeler görülen, doygun olmayan zeminlerdir. Bu hacim değişimi ek bir yükten kaynaklanmak

zorunda değildir. Zemine su girişi, kırılan su boruları, kanalizasyon sızıntıları, rezervuar ve yüzme havuzlarının drenajı veya yeraltı su seviyesindeki yavaş artışlar gibi pek çok nedenden meydana gelebilir. Bu tip oturmalar yapıya ciddi zararlar verecek boyutta olabilir. En sık rastlanan çöken zeminler aeolain diye adlandırılan, lös, volkanik atık tortuları, aeolic kumsallar gibi rüzgârla taşınan kum ve/veya kil silt tipi zeminlerdir. Bu tortular büyük boşluk oranına ve düşük birim hacim ağırlığa sahip, kohezyonsuz veya çok az kohezyonlu zeminlerdir. Lösler silt boyutlu tanelerdir ve bu tür zeminlerde olabilecek kohezyon, bu tanelerin doygun olmayan durumda nispeten daha stabil kalmalarını sağlayan, silt boyutlu tanelerin çevresini kaplayan killer olabilir. Kohezyon aynı zamanda yağmurdan süzülen kimyasal çökeltilerden de kaynaklanabilir. Zemin suya doyduğunda kil bağlayıcılar dayanımını kaybeder ve zeminde yapısal çökmeler meydana gelir. Bu tür zeminlerde sığ temel inşa edildiği takdirde büyük çaplı yapısal hasarlar meydana gelebilir. Bu tür zeminlerde, sağlam zemine ulaşan kazıklar yapılması gereklidir. (Bkz. Şekil 2.1. (e))

- Nehir yatakları gibi yüzey erozyonu görülen bölgelerde akışkanın hızı ve sürekliliği bir süre sonra temel altındaki zeminde hacim azalmasına ve buna bağlı olarak dayanım kaybına sebep olmaktadır. Bu tür bölgelerde kazık temel yapılarak bu tehlikenin önüne geçilmektedir. (Bkz. Şekil 2.1. (f))

- Büyük ölçekli düşey yüklerin yanında, önemli boyuttaki yatay yüklere de direnebilmeleri açısından bazen grup kazıkların bir kısmı eğik olarak inşa edilebilir. (Bkz. Şekil 2.1. (g))



**Şekil 2.1:** Kullanım amaçlarına göre kazık temeller (a) uç kazıkları, (b) sürtünme kazıkları, (c) eğilme kazıkları, (d) çekme kazıkları, (e) genişleyen ve çöken zeminlerde kazık temeller, (f) yüzey erozyonu olan bölgelerde kazık temeller, (g) eğik kazıklar



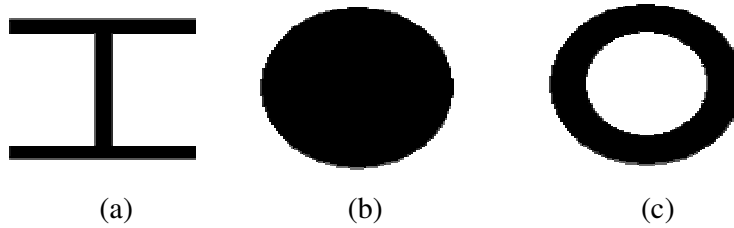
- Çakma suretiyle gevşek granüler zeminleri sıkıştırarak stabilitelerini arttırmak amacıyla kompaksiyon kazıkları kullanılır.
- Kıyı yapılarında, deniz araçlarının ve dalgaların çarpmaları suretiyle meydana gelen ve yapılara zarar verebilecek boyutlara ulaşan enerjileri sönmölemek amacıyla tampon kazıklar inşa edilir.
- İstinat yapılarının stabilitelerini arttırmak veya tek başlarına istinat yapısı olarak kullanılmak amacıyla, yanal yüklere karşı ankraj kazıkları kullanılır.
- Şev stabilitesini sağlamak amacıyla, kayma yüzeyini kesecek şekilde bitişik düzende yerleştirilerek kullanılabilirler. Fakat bitişik inşa edildikleri takdirde yalnızca yatay yük taşıyabilirler.

### 2.3. Kazık Temel Çeşitleri

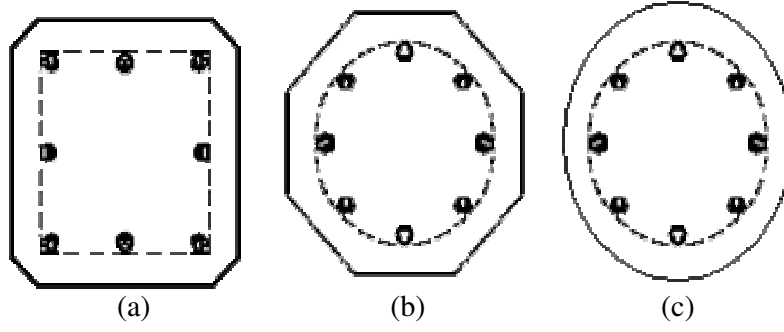
#### 2.3.1. İmal edildikleri malzemeye göre kazık temeller

##### 2.3.1.1. Çelik kazıklar

En çok kullanılan kazık türüdür. Boru veya H-kesitli olabilirler. Boru şeklindekiler ucu açık veya kapalı olarak zemine sokulabilir. Eğer gerekli görülürse içleri betonla dondurulabilir. Zemine sokarken hasar görmesini engellemek için kazığın ucuna pabuç takılabilir. Korozyondan korumak için kalınlık artırılabilir, epoksiyle kaplanabilir veya beton kılıflama uygulanabilir. Kazık boyunun değiştirilmek istenmesi durumunda kaynak veya perçin kullanılabilir. Kazık alanı ve çevresi hesaplanırken (H ve boru kesitli kazıklarda da) kazığın dış sınırları göz önünde tutulur. Şekil 2.2’de sık kullanılan çelik kazık tipleri verilmiştir.



**Şekil 2.2:** Kullanımdaki çelik kazıklar (a) H kesitli, (b) daire kesitli dolu gövdeli, (c) daire kesitli boru tipi



Şekil 2.3: Sık kullanılan beton kazıklar (a) kare kesitli, (b) altıgen kesitli, (c) daire kesitli

### 2.3.1.2. Beton kazıklar

Beton kazıklar prekast olabilecekleri gibi yerinde de imal edilebilirler. Prekast kazıklarda boy değişimi yapılması güçtür. Ayrıca taşınma sırasında hasar görme ihtimalleri de vardır. Fakat kılıf gerektirmezler ve çakmayla yerleştirilebildikleri için gevşek granüler zeminlerde ek bir sıkışma sağlarlar. Prekast kazıklar kare veya sekizgen olabilir ve gerekli görülürse donatı kullanılabilir. Donatı kullanılması kazığın taşıma kapasitesini arttıracığı gibi, taşınması sırasında zarar görmesini de önler. Donatılar ön gerilmeye maruz bırakılıp beton döküldükten sonra fazlalıklar kesilerek kazıkta ek bir sıkışma da sağlanabilir. Şekil 2.3’de sık kullanılan beton kazıp tipleri verilmiştir.

### 2.3.1.3. Ahşap kazıklar

Basınç dayanımları çok fazla olmadığı, su seviyesi değişimlerinden ve zemin içindeki zararlı organizmalardan dolayı dayanımları düştüğü için çok fazla kullanılmayan bir kazık türüdür. Fakat taşıma gücüne oranla ağırlığının az olması, taşıma kolaylığı, boy değişimlerinin kolayca yapılabilmesi gibi sebeplerle nadiren de olsa tercih edilmektedirler. En sağlam türü meşe olmasına karşın, çam, sedir ve köknar da kazık yapımında kullanılabilirler.

#### **2.3.1.4. Kompozit kazıklar**

Mevcut kazık boyunun yeterli olmadığı durumlarda boy uzatmak için uygulanırlar. Çelik(alt)-beton(üst) veya ahşap(alt)-beton(üst) kazıklardır. Birleşim bölgelerinin özel koruma gerektirmesi ve bu kısımlarda ek gerilmeler oluşması sebebiyle kullanımları çok yaygın değildir.

#### **2.3.2. Kullanım amaçlarına göre kazık temeller**

##### **2.3.2.1. Uç kazıkları**

Yapıdan gelen yükü alttaki sağlam zemine basınç yoluyla aktaran kazıklardır. Sağlam zemin çok derinde değilse uygulanır. Kazık sağlam zemine oturtulabilir veya gömülebilir. Bu tür kazıklar, taşıdıkları yüke ve yükü ilettikleri zeminin taşıma gücüne bağlı olarak iki şekilde imal edilebilirler:

- Ayaklı: Genelde yerinde dökme kazıklarda kullanılan bir yöntem olup, eğer kazığın ulaştığı sağlam zeminin emniyet gerilmesi yeterince büyük değilse bir ayak yardımıyla yük daha geniş alana yayılarak gerilme azaltılır. Bu yöntemle uç direncinde, ayaksız kazıklara oranla %50~100 oranında bir artış sağlanır.
- Ayaksız: Eğer kazığın sağlam zemine ileteceği yük çok büyük değilse ve zeminin taşıma kapasitesi yeterli güvenlikle kazığı taşıyabiliyorsa, ayak yapılması gerekli değildir.

##### **2.3.2.2. Sürtünme kazıkları**

Yapıdan gelen yükü zemine sürtünme yoluyla aktaran kazıklardır. Uç kazığı yapılması için gereken sağlam zemin makul bir derinlikte değilse uygulanır.

### **2.3.2.3. Kompaksiyon kazıkları**

Genelde gevşek kumlarda, kazık çakılarak granüler zeminin sıkışması sağlanır. Bu sıkışma da uç direncinde %50~100 artış sağlar.

### **2.3.2.4. Çekme kazıkları**

Temelde çekme gerilmeleri veya üstyapıya gelen kuvvetler yüzünden döndürme etkileri meydana gelmesi durumunda, sürtünmeyle bu kuvveti zemine aktarmak ve çekme gerilmesini yenmek için kullanılır.

### **2.3.2.5. Tampon kazıklar**

Gemilerin iskeleyle çarpmasından, dalgalardan vb oluşan yatay kuvvetleri almak için kullanılan kazıklardır.

### **2.3.2.6. Eğik kazıklar**

Düşey yüklerin yanında yatay yükleri de emniyetli şekilde taşımak için yapılan kazık türüdür. Genel olarak düşeyle 20° açı yaparlar ve bu açının 26°'nin üzerine çıkması istenmez. Negatif çevre sürtünmesinin, ani ve büyük yüklerin ve deprem kuvvetlerinin etkimesinin muhtemel olduğu bölgelerde kullanılmaları tavsiye edilmez.

## **2.3.3. Zemine yerleştirilme şekillerine göre kazık temeller**

### **2.3.3.1. Çakma kazıklar (Deplasman kazıkları)**

Serbest düşüm yapan mekanik bir tokmak veya titreşim yaratan mekanik bir donanım vasıtasıyla zemine çakılırlar. Çakma, gevşek taneli zeminde mukavemeti arttırırken, kohezyonlu zemini örseleyerek geçici bir kayma mukavemeti düşüşü yaratabilir. Çakma sırasında kazığın zarar görmesini önlemek için kazığın ucuna

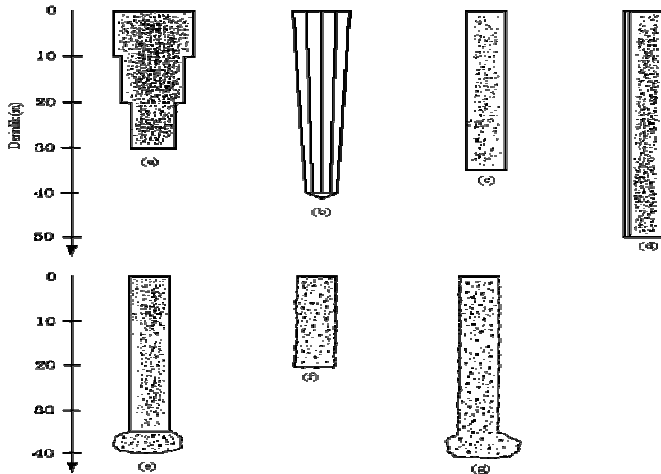
ve üst kısmına koruyucu bir başlık yapılması uygundur. Daha çok sürtünme kazıklarında kullanılan bir yöntemdir.

### 2.3.3.2. Sondaj kazıkları (Fore kazıklar)

Zeminde açılan çukurların içine donatı yerleştirilip üzerine beton dökülerek yapılan kazıklardır. Çakmanın zor olacağı sert kil, kaya parçaları, moloz ve kaba taneler ihtiva eden zeminlerde, aynı zamanda çakmadan dolayı oluşacak gürültü ve titreşimin sorun yaratacağı bölgelerde yapımları uygundur. Daha çok uç kazıkları bu yöntemle yapılırlar. Ayak yapılarak zemine etkiyen basınç azaltılabilir. Bu tip kazıklar, yerleştirildikleri zemine göre iki şekilde imal edilebilir:

- Kılıflı: Eğer kazığın yapıldığı zemin kendini tutamayacak durumdaysa (genelde kohezyonsuz gevşek kum) bir kılıf vasıtasıyla çukurun zeminle dolması engellenir. Yapım sonrasında kılıf alınabileceği gibi, dayanımı arttırmak amacıyla yerinde de bırakılabilir fakat bu oldukça masraflıdır.
- Kılıfsız: Kendisini tutabilen (kohezyonlu) zeminlerde kılıfa ihtiyaç duyulmadan fore kazık inşa edilebilir.

Şekil 2.4’de farklı tip ve boyutta sondaj kazıkları verilmiştir.



**Şekil 2.4:** Farklı tip ve büyüklüklerde fore kazıklar. (a), (b), (c), (d) kılıflı, ayaksız, (e) kılıflı ayaklı, (f) kılıfsız ayaksız, (g) kılıfsız ayaklı

## 2.4. Farklı Tipteki Kazıkların Kıyaslanması

Kazık temellerin pek çok çeşidi olmasına rağmen, iyiden kötüye bir kıyaslama yaparak bu temelleri kalitelerine göre sınıflandırmak mümkün değildir. Gerek zemin açısından, gerek su muhtevası açısından, gerek üstyapıdan gelen yükler veya etkimesi mümkün dinamik ve sismik yükler açısından her bir kazığın kullanımının avantajlı olduğu koşullar vardır. Bunlar 2.2. ve 2.3.'de detaylı olarak anlatılmıştır. Zemin, bölge ve üst yapı detaylı şekilde araştırıldıktan ve temele etkimesi muhtemel yükler belirlendikten sonra kazık seçimi yapılır. Tablo 2.1'de farklı kazık tiplerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları verilmiştir..

**Tablo 2.1:** Kazık türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları

Kazık Türü	Uzunluk (m)	Yük (kN)	Avantaj ve Dezavantajları
Çelik	<b>Ortalama:</b> 15~60 <b>Max:</b> Pratik olarak sınırsız	<b>Ortalama:</b> 300~1200 <b>Max:</b> $A_s \cdot \sigma_{çelik}$	+ Boy değişimleri kolay yapılır + Yüksek çakma basıncına dayanıklıdır + Sert katmanlara girebilir + Yük taşıma kapasitesi yüksektir - Pahalıdır - Çakılırken gürültü kirliliği yaratırlar - Korozyona uğrarlar - Sert katmanlara çakılırken deforme olabilirler
Prekast Beton	<b>Ortalama:</b> Prekast:10~15 Ön gerilmeli: 10~35 <b>Max:</b> Prekast: 30 Ön gerilmeli: 60	<b>Ortalama:</b> 300~3000 <b>Max:</b> Prekast: 800~900 Ön gerilmeli: 7500~8500	+ Sert zeminlere çakılabilirler + Korozyona uğramazlar + Beton üst yapıyla uyum içerisinde çalışırlar - Boy değişimleri zordur - Taşınmaları zor ve hasar görme tehlikeleri yüksektir.

**Tablo 2.1 (Devam):** Kazık türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları

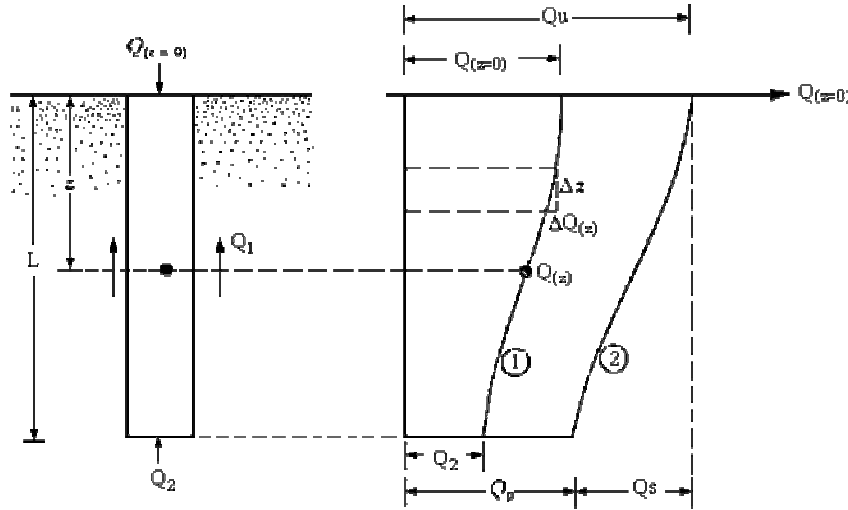
Kazık Türü	Uzunluk (m)	Yük (kN)	Avantaj ve Dezavantajları
Kılıflı Yerinde Dökme Beton	<b>Ortalama:</b> 5~15 <b>Max:</b> 15~40	<b>Ortalama:</b> 200~500 <b>Max:</b> 800	+ Ekonomiktir + Beton dökümü öncesinde denetlemek mümkündür + Boy değişimi yapmak kolaydır - Beton dökümünden sonra ek yapmak zordur - İnce kılıflar, çakma sırasında hasar görebilir
Kılıfsız Yerinde Dökme Beton	<b>Ortalama:</b> 5~15 <b>Max:</b> 30~40	<b>Ortalama:</b> 300~500 <b>Max:</b> 700	+ Ekonomiktir + Herhangi bir yükseklikte bitirilebilir - Beton hızlı döküldüğü takdirde hava kabarcıkları oluşabilir - Beton dökümünden sonra ek yapmak zordur - Yumuşak zeminlerde, kazık çukurunu çevreleyen zemin çukura doğru çökerek yapımı zorlaştırabilir ve kaliteyi düşürebilir
Ahşap	<b>Ortalama:</b> 10~15 <b>Max:</b> 30	<b>Ortalama:</b> 300~500 <b>Max:</b> 700	+ Ekonomiktir + İşlenmesi kolaydır + Tamamen suya gömülü kazıklar çürümeye oldukça dayanıklıdır - Su seviyesinin üstünde çürüme görülür - Sert zeminlere çakılırken hasar görebilir - Yük taşıma kapasiteleri azdır -Ekli ahşap kazıkların çekme gerilmelerine karşı dirençleri azdır

### 3. DÜŞEY STATİK YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİ

Kazık temeller değişik doğrultulardaki statik ve dinamik yükleri sürtünme yoluyla kazık boyunca çevreleyen zemine ve/veya uç direnci yoluyla sağlam zemine ileten taşıyıcı unsurlardır. Tek başlarına kullanılabilecekleri gibi (köprü ayakları) grup halinde kullanımları da mümkündür.

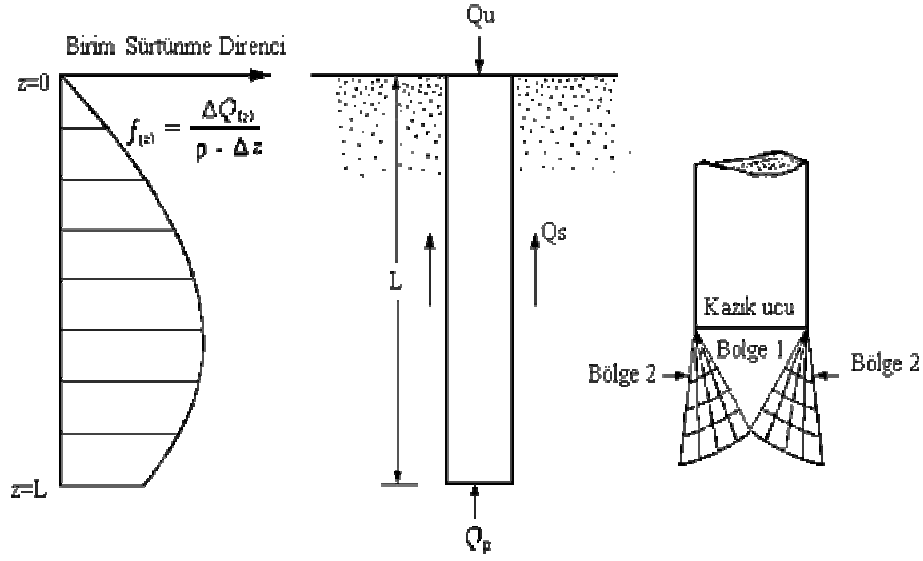
#### 3.1. Kazıkların Zemine Yük Aktarma Mekanizmaları

Kazık üzerindeki  $Q_{(z)}$  yükü derinlik arttıkça azalmaktadır. Bunun sebebi, derinlik arttıkça kazık üzerindeki yükün çevre sürtünmesiyle zemine iletilen miktarının artmasıdır. Toplam yükün bir kısmı kazık çevresinde oluşan yüzey sürtünmesi ( $Q_1$ ) ile karşılanırken, bir kısmı da uç direnci ( $Q_2$ ) ile taşınmaktadır. Yük aktarma mekanizması, toplam yükün ne kadarının yüzey sürtünmesiyle, ne kadarının uç mukavemetiyle karşılanacağını belirler. Şekil 3.1'de kazıkların yük aktarma mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.1: Kazıkların yük aktarma mekanizması





Şekil 3.2: Kazıkların maksimum yükte yüklenmesi

Herhangi bir “z” derinliğinde birim shaft alanına isabet eden yüzeysel sürtünme direnci aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$f_z = \Delta Q_z / [p \cdot \Delta z] \quad (3.1)$$

Burada p kazık enkesitinin çevresidir.

Kazığa etkiyen yük nihai taşıma kapasitesine ulaşırsa ( $Q_z = Q_u \Rightarrow Q_1 = Q_s$ ,  $Q_2 = Q_p$ ), kazığın uç bölgesinde çatlaklar oluşacaktır. Bu durum Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Daha büyük yüklerde ise zeminde kesme makaslaması oluşur ve kazık zemine gömülür (Bölge 1). Bölge 2 genelde sıkı kum ve sert kilde oluşur.

### 3.2. Kazık Kapasitesinin Hesaplanması

Kazıklarda toplam taşıma kapasitesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunur:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3.2)$$

$Q_u$ : maksimum taşıma kapasitesi

$Q_p$ : uç taşıma kapasitesi

$Q_s$ : sürtünme direnci

### 3.2.1. Uç taşıma kapasitesinin (Qp) Hesabı

Kazıklarda birim alanın uç taşıma kapasitesi aşağıdaki formülle bulunur:

$$q_p = c \cdot N_c^* + q \cdot N_q^* + \gamma D \cdot N_\gamma^* \quad (3.3)$$

Burada son terim diğerlerine nazaran çok küçük olduğu için ihmal edilir. Eşitlik efektif gerilmeler cinsinden aşağıdaki şekilde yazılır:

$$q_p = c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^* \quad (3.4)$$

c: kohezyon

q': düşey efektif gerilme

$$q' = \gamma' \cdot L = (\gamma_{doygun} - \gamma_{su}) \cdot L \quad (3.5)$$

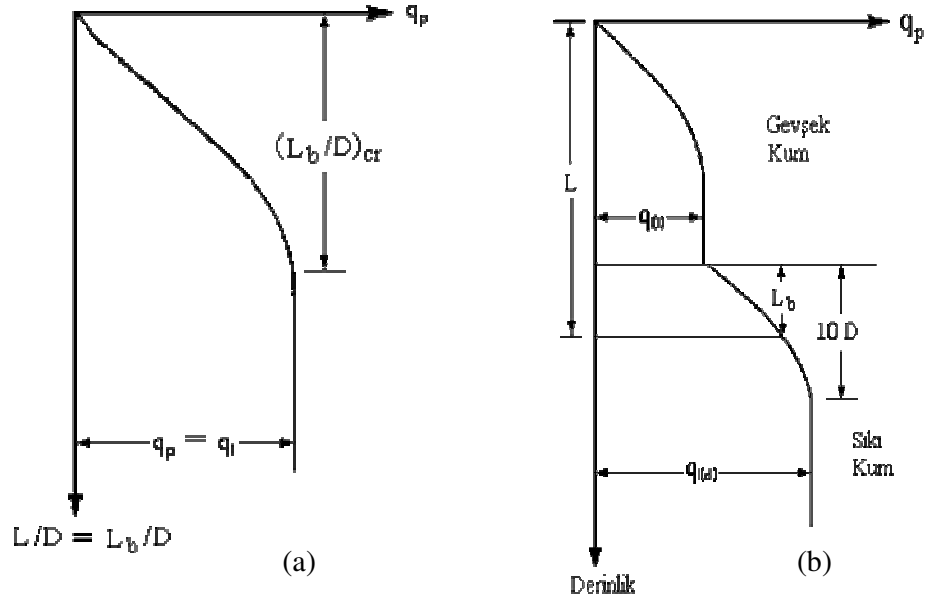
Buna göre bir kazığın uç kapasitesi (3.6) eşitliği ile bulunur.

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*) \quad (3.6)$$

Burada  $A_p$  kazık ucunun kesit alanıdır. Kare ve sekizgen kesitli kazıklar için tablolar yardımıyla bulunabileceği gibi hesapla da elde edilebilir. Dairesel ve dikdörtgen kesitli kazıklar için hesap yapılır.  $N_c^*$  ve  $N_q^*$  değerleri ise tablolardan elde edilen, kohezyona ve derinliğe bağlı dayanma kapasitesi katsayılarıdır. Uç taşıma kapasitesinin hesabı için Meyerhof, Vesic ve Coyle&Castello farklı yöntemler önermişlerdir.

#### 3.2.1.1. Meyerhof yöntemi

Şekil 3.3.(a)'da görüldüğü gibi, Meyerhof'a göre uç direnci kritik bir derinliğe kadar artmakta, bu derinlikten sonra sabit kalmaktadır. Burada  $L_b$  kazığın sağlam zemine gömülme derinliği olup, homojen zeminlerde  $L_b = L$  olur. D ise kazığın çapıdır. Kazığın sağlam zemine girme boyu ne kadar fazlaysa, kazığın uç direnci de o derece yüksek olmaktadır.



**Şekil 3.3:** Meyerhof'a göre uç direncinin derinlikle değişimi (a) tek tabakalı zeminde (b) iki tabakalı zeminde

İki tabakalı zemin durumundaysa ( $L \neq L_b$ ) uç direnci şekil 3.3 (b)'de görüldüğü gibi değişim göstermektedir. Tabakalı zemin durumunda kritik derinliğin taşıyıcı tabakanın üst yüzeyinden başlayacak şekilde alınması ve üst tabakanın sadece sürüşarj yaratan etkisinin göz önünde tutulması daha doğrudur.

Kohezyonsuz zeminlerde ( $c=0$ ) uç taşıma kapasitesi formülü aşağıdaki hali alır:

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (q' \cdot N_q^*) \leq Q_p' = A_p \cdot q_1 \quad (3.7)$$

$$q_1 = 50 N_q^* \cdot \tan \emptyset \quad (3.8)$$

Hangi  $Q_p$  değeri küçükse o hesaba esas alınır! Buradaki  $N_q^*$  değeri, Meyerhof yöntemi için verilen tablodan alınır.  $\emptyset$  ise zemin sürtünme açısıdır.

Meyerhof (1976), homojen bir zeminde ( $L=L_b$ )  $q_p$ 'nin standart penetrasyon sayısına ( $N$ ) bağlı olarak (3.9)'da verildiği şekilde de elde edilebileceğini belirtir:

$$q_p = 40NL/D \leq q_p' = 400N \quad (3.9)$$

Hangi  $q_p$  değeri küçükse, o hesaba esas alınır!

Üstte zayıf(loose), altta sıkı(dense) kuma giren kazık durumunda  $q_p$  aşağıdaki şekilde bulunur:

$$q_p = q_{l(l)} + [(q_{l(d)} - q_{l(l)})L_b / (10D)] \leq q_{l(d)} \quad (3.10)$$

Suya doymun killerde drenajlı durumda( $\emptyset=0$ ) kazığın uç taşıma kapasitesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunur:

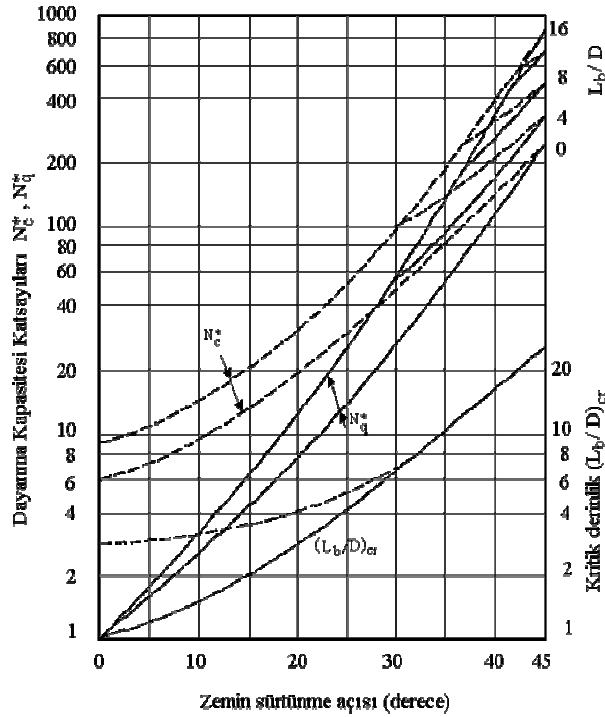
$$Q_p = A_p \cdot (c_u \cdot N_c^*) = 9c_u A_p \quad (3.11)$$

Burada  $N_c^*$  değeri, Meyerhof yöntemi için verilen tablodan alınır.

Drenajsız durumdaki( $c, \emptyset$ ) killerde (3.12) eşitliği de kullanılabilir:

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*) \quad (3.12)$$

Burada da  $N_c^*$  ve  $N_q^*$  değerleri, Meyerhof tarafından verilen grafikten alınırlar. Şekil 3.4'de bu grafik verilmiştir.



Şekil 3.4: Meyerhof yöntemiyle çözüm yaparken dayanma kapasitesi katsayılarını bulmak için gerekli grafik

Grafiğin kullanılışı:

- Önce  $L_b / D$  bulunur.  $L_b / D > 10$  ise üst çizgi,  $L_b / D < 10$  ise alt çizgi kullanılır.  $L_b / D > 16$  ise  $L_b / D = 16$  varsayılp devam edilir.
- $\emptyset$ 'ye bağlı olarak  $(L_b/D)_{cr}$  bulunur.  $L_b/D > (L_b/D)_{cr}$  olmalıdır!
- $\emptyset$ 'ye bağlı olarak  $N_c^*$  ve  $N_q^*$  bulunur.

### 3.2.1.2 Vesic yöntemi

Vesic (1977), uç taşıma kapasitesini boşlukların genişlemesi teorisine göre hesaplamak için, efektif gerilmelere bağlı formüller geliştirmiştir:

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (c \cdot N_c^* + \sigma_0' \cdot N_\sigma^*) \quad (3.13)$$

$\sigma_0'$ : kazık ucundaki ortalama efektif gerilme

$$\sigma_0' = [(1+2K_0)/3]q' \quad q' = \gamma'_1 L_1 + \gamma'_2 L_2 + \dots \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (3.14)$$

$N_c^*$ ,  $N_\sigma^*$ : dayanma kapasitesi faktörleridir ve aşağıdaki şekilde bulunurlar:

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \emptyset \quad (3.15)$$

$$N_\sigma^* = \frac{3 N_q^* q}{1+2K_0} \quad (3.16)$$

$K_0$ : sükûnetteki toprak basıncı

$$K_0 = 1 - \sin \emptyset \quad (3.17)$$

$N_q^*$ : dayanma kapasitesi faktörü

$$N_q^* = f(I_{rr}) \quad (3.18)$$

$I_{rr}$ : zeminin azaltılmış rijitlik indeksi

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} \quad (3.19)$$

$I_r$ : rijitlik indeksi

$\Delta$ : kazık altındaki plastik bölgede meydana gelen ortalama hacimsel şekil değiştirme

**Tablo 3.1:** Farklı zeminler için rijitlik indeksi ( $I_r$ ) değerleri

Zemin Türü	$I_r$
Kum	70~150
Silt ve Kil (drenajlı durumda)	50~100
Kil (drenajsız durumda)	100~200

Farklı zeminler için rijitlik indeksi değerleri Tablo 3.1 ile verilmiştir.

Hacim değişimi yoksa  $\Delta=0 \Rightarrow I_{rr}=I_r$  olur. (Sıkı kum ve suya doygun kilde)

Rijitlik indeksi aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$I_r = \frac{G_s}{c + q' \cdot \tan \phi} \quad (3.20)$$

$G_s$ : zeminin kayma modülü

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)} \quad (3.21)$$

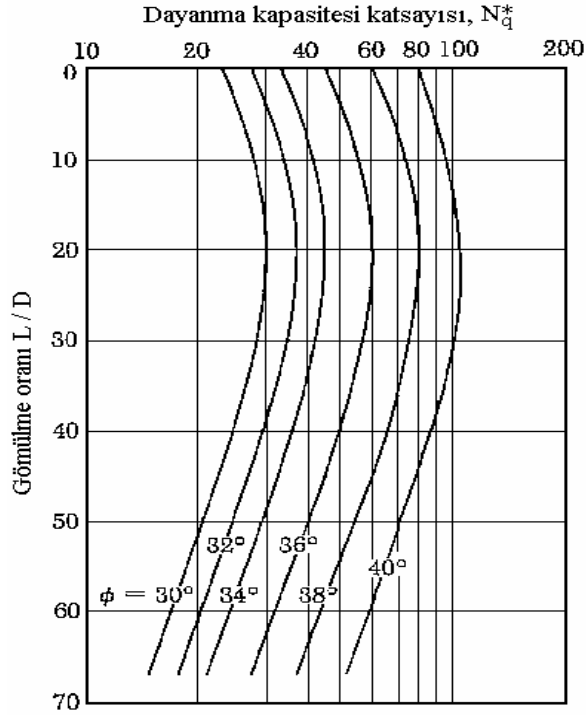
$E_s$ : zeminin Young modülü ( $\sigma/\epsilon$ )

$\mu_s$ : zeminin Poisson oranı ( $\epsilon_h/\epsilon_v$ )

Drenajsız durum ( $\phi=0$ ) için  $N_c^*$  değeri ise aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$N_c^* = \frac{4(\ln I_{rr} + 1)}{3} + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (3.22)$$

Yukarıdaki formüllerle azaltılmış rijitlik indeksi hesaplandıktan sonra, ilgili tablolardan sürtünme açısına ve azaltılmış rijitlik indeksine ( $I_{rr}$ ) bağlı olarak dayanma kapasitesi katsayıları doğrudan alınabilir.



**Şekil 3.5:** Coyle&Castello yöntemiyle çözümden dayanma kapasitesi katsayısı  $N_q^*$ 'ı bulmak için geliştirilmiş grafik (Coyle&Castello, 1981)

### 3.2.1.3. Coyle & Castello yöntemi

Coyle & Castello (1981) kumlardaki çakma kazıklar üzerine çalışmalar yapmış ve dayanma kapasitesi faktörü  $N_q^*$  hesabı için farklı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemin Meyerhof yönteminden farkı, daha spesifik oluşudur. Kullanılan formül aynıdır. Yalnızca, üzerinde çalışılan zemin kohezyonsuz olduğu için formülün kohezyona bağlı kısmı çıkarılmıştır:

$$Q_p = A_p \cdot q_p = A_p \cdot (q' \cdot N_q^*) \quad (3.23)$$

Burada değişen tek şey, dayanma kapasitesi faktörünün sürtünme açısına bağlı olarak Coyle&Castello'nun kohezyonsuz zeminlere özel hazırladıkları grafikten alınmasıdır. Bu grafik Şekil 3.5 ile verilmiştir.

### 3.2.1.4. Kaya üzerine oturan kazıklar

Kaya üzerine oturan kazıklarda uç taşıma kapasitesi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

$$q_p = q_{ur} (N_{\emptyset} + 1) \quad N_{\emptyset} = \tan^2(45 + \emptyset/2) \quad (3.24)$$

$$Q_{p(\text{all})} = [q_{u(\text{tasarım})} (N_{\emptyset} + 1)] A_p / FS \quad (FS \geq 3) \quad (3.25)$$

$q_{ur}$ : kayanın tek eksenli basınç dayanımı

$\emptyset$ : drenajsız sürtünme açısı

Fakat  $q_{ur}$  değeri kullanılırken (kaya içerisinde olabilecek çatlaklar ve boyut etkisi sebebiyle) bir azaltma yapmak gereklidir:

$$q_{ur(\text{tasarım})} = q_{ur(\text{laboratuvar})} / 5 \quad (3.26)$$

### 3.2.2. Sürtünme (yüzey) direncinin ( $Q_s$ ) hesaplanması

Bir kazığın yüzey direnci, kazık yüzeyiyle zemin arasında meydana gelen ve kazığın taşıma kapasitesini arttıran bir faktör olup, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_s = \sum p L f \quad (3.27)$$

$p$ : kazık çevresi ( $p = \pi D$ )

$L$ : kazık uzunluğu

$f$ : verilen bir  $z$  derinliğindeki birim sürtünme direnci

Bu direnç zemin türüne göre değişiklik gösterdiği için, farklı zeminlerde farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır.



### 3.2.2.1. Kumlarda sürtünme direnci

Kumlardaki sürtünme direnci aşağıda verilmiştir:

$$f = K \sigma_v' \tan \delta \quad (3.28)$$

$\sigma_v'$ : düşey efektif gerilme

$\delta$ : zemin-kazık sürtünme açısı ( $0,5\emptyset \sim 0,8\emptyset$ )

K: toprak basınç katsayısı

Zeminle kazık arasındaki sürtünme açısı pratik amaçlarla ortalama bir değer olan  $0,6 \emptyset$  kabul edilebilir fakat detaylı çözüm gerektiren büyük çaplı ve önemli projelerin yapımı sırasında bu katsayuyu kesme kutusu deneyiyle belirlemek, daha gerçekçi sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.

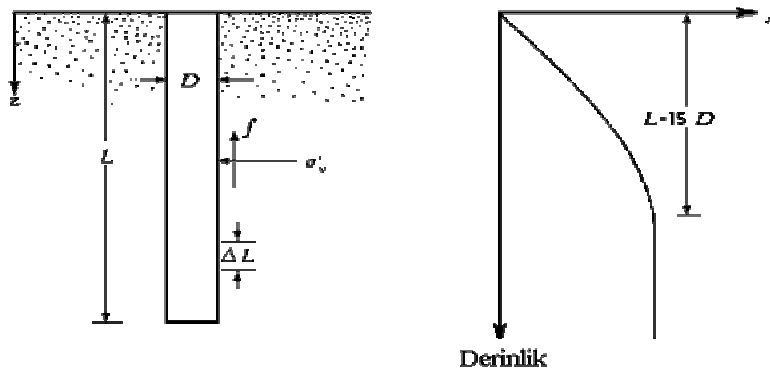
Kumlarda sürtünme direncinin derinlikle değişimi Şekil 3.6 ile verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken,  $f$  hesabı yapılırken  $L=15D$  derinliğine kadar  $\sigma_v'$  değerinin değişken olduğudur. Bu derinliğe kadar sürekli doğrusal bir artış gösteren sürtünme direncinin, bu derinlikten sonra sabit kaldığı varsayılır. Bu yüzden,  $\sigma_v'$ , ( $0 \sim 15D$ ) ve ( $15D \sim L$ ) arasında farklı hesaplanır:

( $0 \sim 15D$ ) arasında:

$$\sigma_v' = \gamma' 7,5D \quad f = K (\gamma' 7,5D) \tan \delta \quad (3.29)$$

( $15D \sim L$ ) arasında:

$$\sigma_v' = \gamma' 15D \quad f = K (\gamma' 15D) \tan \delta \quad (3.30)$$



Şekil 3.6: Kumlarda sürtünme direncinin derinlikle değişimi

Meyerhof (1976), ortalama birim sürtünme direncinin, ortalama SPT değerine ( $\tilde{N}$ ) bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilmesini önermiştir:

Düşük yer değiştirmeli çakma kazıklarda:

$$f_{av}(kN/m^2) = \tilde{N} \quad (3.31)$$

Yüksek yer değiştirmeli çakma kazıklarda:

$$f_{av}(kN/m^2) = 2\tilde{N} \quad (3.32)$$

Kazık çevresindeki toplam sürtünme ide (3.33) eşitliğiyle belirlenir:

$$Q_s = p L f_{av} \quad (3.33)$$

K (toprak basınç katsayısı) derinlikle değişir. Bu değişim Şekil 3.7 ile gösterilmiştir. Kazığın üst kısmında pasif Rankine basınç katsayısına eşitken, kazık ucunda sükûnetteki toprak basınç katsayısından daha küçük olabilir. Fore ve çakma kazıklar için farklı şekilde hesaplanır:

Fore kazıklarda:

$$K=K_0=1-\sin\emptyset \quad (3.34)$$

Düşük yer değiştirmeli çakma kazıklarda:

$$K=K_0 \text{ (alt limit)} \quad K=1,4K_0 \text{ (üst limit)} \quad (3.35)$$

Yüksek yer değiştirmeli çakma kazıklarda:

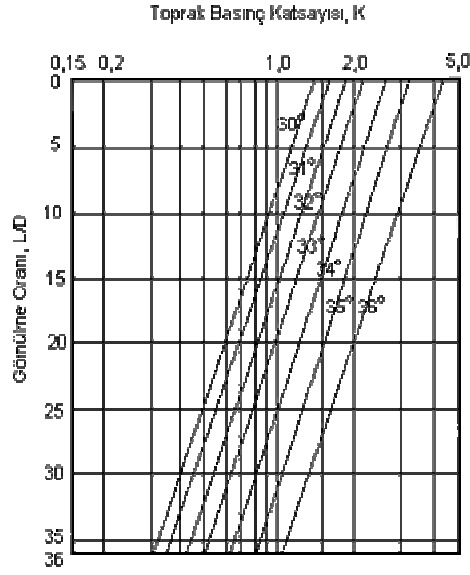
$$K=K_0 \text{ (alt limit)} \quad K=1,8K_0 \text{ (üst limit)} \quad (3.36)$$

Coyle&Castello ise, kumlarda sürtünme direncini farklı bir şekilde hesaplamışlardır. Buna göre sürtünme direnci aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$Q_s = K \cdot \sigma_{v'(ort)} \cdot \tan\delta \cdot p \cdot L \quad (3.37)$$

$$\sigma_{v'(ort)} = \gamma L / 2 \quad \delta = 0,8\emptyset \quad (3.38)$$

Yapılan deneyler sonucunda K değerinin L/D (boy/çap) oranına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 3.7: Toprak basınç katsayısının gömülme oranına bağlı değişimi

### 3.2.2.2. Kilerde sürtünme direnci

Kilerde sürtünme direnci üç değişik yöntemle hesaplanır. Bu üç yöntemi birbirinden ayıran özellikler aşağıda kısaca verilmiş, arkasından da maddeler halinde bu üç yöntemin açıklaması yapılmıştır:

- $\lambda$  Yöntemi: Sürtünme direnci efektif gerilme, drenajsız kayma mukavemeti ve derinlik faktörüne bağlı olarak hesaplanır.
- $\alpha$  Yöntemi: Sürtünme direnci drenajsız kohezyona ve adhezyona bağlı hesaplanır.
- $\beta$  Yöntemi: Drenajlı durum ve yanal toprak basınçlarına bağlı olarak sürtünme direnci hesaplanır.

Aşağıda bu üç yöntem detaylarıyla açıklanmıştır.

**$\lambda$  Yöntemi:** Kazık çakımından dolayı zeminde meydana gelen yer değiştirmenin, pasif yanal toprak basıncına sebep olduğu varsayımından yola çıkarak Vijayvergia ve Focht (1972) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Birim yüzey dayanımı aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$f_{av} = \lambda (\sigma_{v'(ort)} + 2c_u) \quad (3.39)$$

Burada  $\sigma_v'(\text{ort})$  kazık boyunca etkiyen ortalama düşey efektif gerilmedir. Tek tabaka durumunda (3.40) eşitliğiyle bulunur:

$$(\text{kazık ucundaki düşey gerilme}) / 2 \quad (3.40)$$

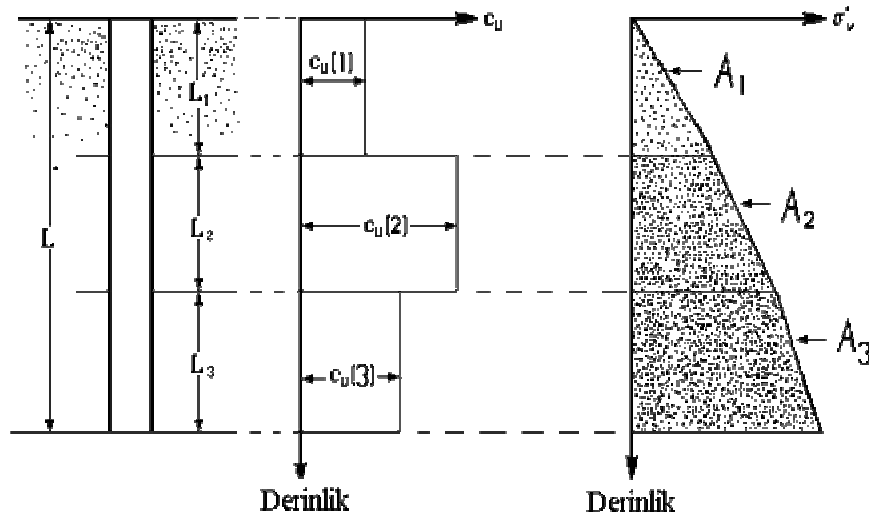
$\lambda$  katsayısı ise, kazığın gömüldüğü derinliğe(L) bağlı olarak grafik yardımıyla bulunabilir.  $\lambda$  katsayısının kazık gömülme derinliğine bağlı değişimi Şekil 3.9 ile verilmiştir. Buna göre kazık çevresindeki(p) toplam sürtünme de aşağıda verildiği şekilde bulunur:

$$Q_s = p L f_{av} \quad (3.41)$$

Tabaklı zemin durumunda (bkz. Şekil 3.8), her bir tabaka için kohezyon ve düşey efektif gerilme değerleri ayrı ayrı hesaplanarak, bu değerlerin ortalaması denklemde yerine konulur:

$$c_u = (c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2 + \dots) / L \quad (3.42)$$

$$\sigma_v' = (A_1 + A_2 + \dots) / L \quad (3.43)$$



Şekil 3.8: Tabakalı zemin durumunda  $\lambda$  yönteminin uygulanışı

**$\alpha$  Yöntemi:** Bu yöntemde, Şekil 3.10 ile verilen drenajsız kohezyona bağlı grafikten  $\alpha$  ampirik adhezyon katsayısı alınır ve (3.44) eşitliği ile sürtünme direnci hesaplanır:

$$f = \alpha c_u \quad (3.44)$$

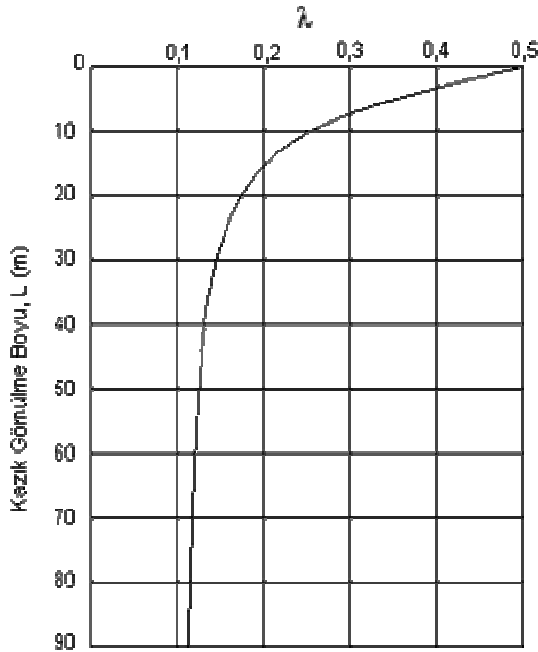
Buna bağlı olarak toplam sürtünme de aşağıda verilen eşitlikten bulunur:

$$Q_s = \sum f p L = \sum \alpha c_u p L \quad (3.45)$$

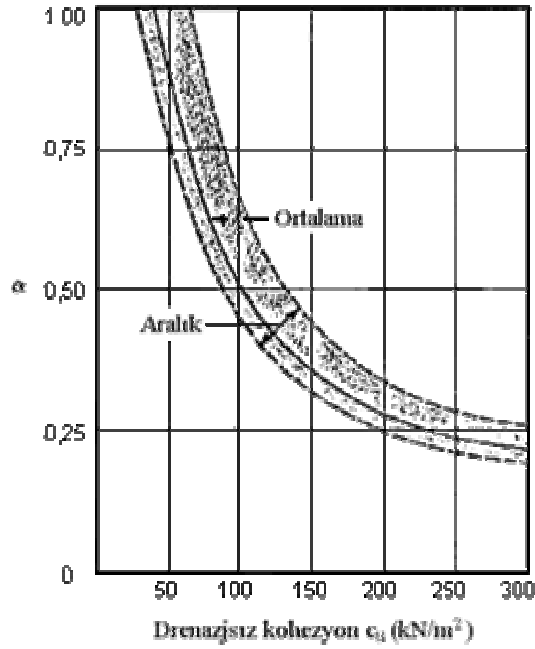
Tabakalı zemin durumunda ise çözüm (3.46)'da verildiği şekilde hesap yapılır:

$$Q_s = \sum f p L = \alpha_1 c_{u1} p L_1 + \alpha_2 c_{u2} p L_2 + \dots \quad (3.46)$$

p: kazık çevresi



Şekil 3.9:  $\lambda$  katsayısının kazık gömülme boyuna bağlı değişimi



Şekil 3.10: Drenajsız kohezyona bağlı  $\alpha$  değerleri

**$\beta$  Yöntemi:** Doygun kile kazık çakıldığı zaman kazık çevresindeki boşluk suyu basıncı yüksektir. Fakat birkaç ay içerisinde bu basınç düşer. Bu halde kazık için birim sürtünme direnci, örselenmiş durumdaki efektif gerilmeler cinsinden hesaplanabilir:

$$f = \beta \sigma_v' \quad \beta = K \tan \phi_R \quad \sigma_v' = \gamma' L \quad (3.47)$$

$\phi_R$ : örselenmiş kilin drenajlı sürtünme açısı

K: toprak basınç katsayısı

Toprak basınç katsayısı normal ve aşırı konsolide killer için farklı şekillerde belirlenir.

Normal konsolide killer için:

$$K = 1 - \sin \phi_R \quad (3.48)$$

Aşırı konsolide killer için:

$$K = (1 - \sin \phi_R)(A.K.O)^{1/2} \quad (A.K.O: \text{Aşırı Kons. Oranı}) \quad (3.49)$$

Toplam sürtünme ise aşağıda verildiği şekilde hesaplanır:

$$Q_s = \Sigma f p L \quad (3.50)$$

### 3.2.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi

Maksimum kazık kapasitesi:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3.51)$$

İzin verilebilir kazık kapasitesi:

$$Q_{all} = Q_u / GS \quad (3.52)$$

Burada GS güvenlik faktörüdür ve maksimum kazık kapasitesi hesaplarındaki verilerin ve hesapların güvenilirliğine bağlı olarak 2,5~4 arasında değişir.

Aynı zamanda sürtünmenin sifıra eşit alınabileceği, suya doygun kohezyonlu zeminlerde:

$$\emptyset=0 \Rightarrow N^*_c = 9, \quad N^*_q = 1 \quad (3.53)$$

Buna bağlı olarak uç direnci:

$$q_{p(brüt)} = c_u \cdot N^*_c + q' \quad (3.54)$$

$$q_{p(net)} = (c_u N^*_c + q') - q' = c_u N^*_c = 9c_u = q_p \quad (3.55)$$

Burada q' kazık ağırlığıdır. Taneli zeminlerde bu azaltmaya gerek yoktur.

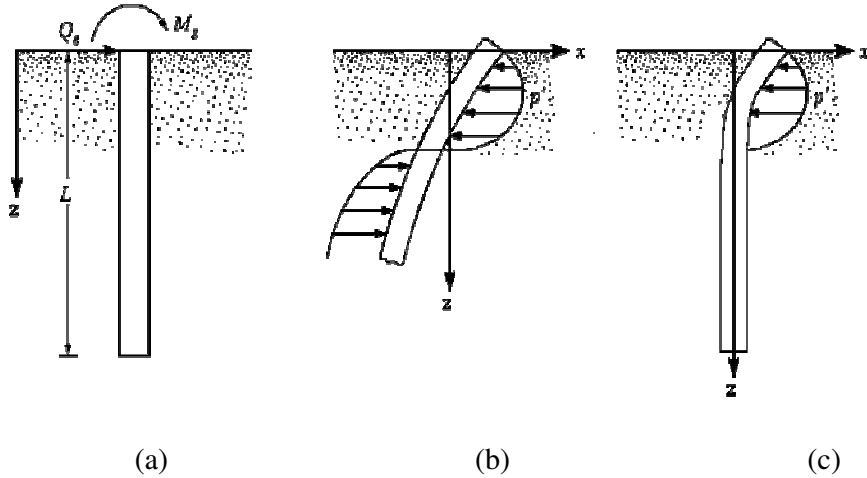
#### 4. YATAY STATİK YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİ

Tekil ve grup kazıklar rüzgar yükü, dalga yükü, deprem yükü, yanal toprak basıncı, darbe ve çekme kuvvetleri gibi büyük boyutlu yanal yüklere maruz kalabilirler. Bu nedenle, kazık tasarımı yapılırken yanal yük kapasitesinin belirlenmesi büyük önem taşır. [3]

Eksenel yük kapasitesi hesabından farklı olarak, yanal yük kapasitesi iki farklı göçme mekanizmasının değerlendirilmesiyle belirlenir:

- Kazık malzemesinin eğilmesine bağlı olarak kazığın yapısal çökmesi veya zeminin eğilmesine bağlı olarak çevreleyen zeminin kayarak çökmesi
- Aşırı yanal yüklemeye maruz kalan kazığın, taşıyıcı görevini meydana getiremeyecek duruma gelmesiyle oluşan çökme

Her ne kadar potansiyel çökme durumu çevreleyen zeminin pasif çökmesi olsa da, bu tür çökmeler izin verilebilir hareketleri aşan oldukça büyük yer değiştirmelerde meydana gelir. Düşey bir kazık rijit bir başlıkla zemine tespit edilmemişse, kazığa gelen yatay yükün tamamını zemin alır. Uzun kazıklarda ise alt kısım düşey olarak kalırken üst kısım ötelenir. Bu durumlar Şekil 4.1 ile verilmiştir.



**Şekil 4.1:** Yanal yük etkisi altındaki kazıklarda ötelenmeler (a) kazığa etkiyen yanal yük ve moment, (b) kısa kazıkta zemin çökmesi, (c) uzun kazıkta kazık çökmesi



Yanal yükler altında kazıkların davranışını incelerken proje yükleri altında kazığın eğilmesi ve kazığın nihai direnci ayrı ayrı göz önüne alınır. Her iki durum açısından da kazık güvende olmalıdır. Bu hesap için iki farklı yaklaşım yapılabilir:

- Zeminin davranışını temsil eden bir yatak katsayısı tanımlamak
- Zemini ideal elastik bir cisim olarak kabul etmek

Aşırı derecede basitleştirici bir kavram olan “yatak katsayısı”, herhangi bir noktadaki zemin direnci ile o noktadaki yer değiştirme arasındaki ilişkiyi verir. Fakat yatak katsayısının tayini zordur çünkü yatak katsayısı gerçek bir zemin sabiti olmayıp fiziksel bir özelliği tayin etmemektedir. Zemini homojen, izotrop, elastik yarı ortam; kazığı elastik bir cisim olarak kabul ederek yaklaşık bir çözüm elde edilmektedir. Bu ikinci yolda elastik sabitler  $E_s$  elastisite modülü ve  $\mu_s$  Poisson oranı kullanılarak, üniform kohezyonlu zeminler için zemin davranışının bir ölçüde temsili mümkün kılınabilir. Kazığın nihai direncinin hesaplanabilmesi için mümkün kırılma mekanizmaları göz önüne alınır. Kırılma mekanizması kazık boyu, kazık başlığının rijitliği ve zemin cinsine bağlıdır.

#### 4.1. Granüler Zeminler İçin Yanal Yüklü Kazık Hesabı

Elastik ortamı (zemini) bir dizi sonlu-kapalı elastik yay kabul edilerek şu formül yazılabilir:

$$k = p'(kN/m^2)/x(m) \quad (4.1)$$

k: yatay yatak katsayısı

p': zemin üzerindeki basınç

x: çökme

Granüler zeminlerde z derinliğindeki taban tepki katsayısı (4.2) eşitliği ile bulunabilir:

$$k_z = n_h z \quad (4.2)$$

Burada  $n_h$  yatay yatak katsayısı sabitidir.

Elastik temel üzerine oturan kiriş teorisini kullanarak, kazığa gelen yatay yükten dolayı zeminde oluşan gerilmeyi (4.3) ile ifade etmek mümkündür:

$$p'=(E_p I_p) \frac{dx^4}{dz^4} \quad (4.3)$$

$E_p$ : kazık malzemesinin Young modülü

$I_p$ : kazık kesitinin atalet momenti

Aynı zamanda Winkler modeline göre:

$$p'=-kx \quad (4.4)$$

olduğuna göre, bu iki denklemin birleşiminden (4.5) elde edilir:

$$[(E_p I_p) dx^4/dz^4] + kx=0 \quad (4.5)$$

Bu denklemin çözümünden de, kazıkla ilgili pek çok formüle ulaşılır. Bu formüller aşağıda sıralanmışlardır.

Kazığın herhangi bir z derinliğindeki dönmesi:

$$x_z(z)=[A_x Q_g T^3/(E_p I_p)] + [B_x M_g T^2/(E_p I_p)] \quad (4.6)$$

Kazığın herhangi bir z derinliğindeki eğimi:

$$\theta_z(z)= [A_\theta Q_g T^2/(E_p I_p)] + [B_\theta M_g T/(E_p I_p)] \quad (4.7)$$

Kazığa herhangi bir z derinliğinde etkiyen moment:

$$M_z(z)=[A_m Q_g T] + [B_m M_g] \quad (4.8)$$

Kazığa herhangi bir z derinliğinde etkiyen kesme kuvveti:

$$V_z(z)=[A_v Q_g T] + [B_v M_g/T] \quad (4.9)$$

Herhangi bir z derinliğindeki zemin reaksiyonu:

$$p'_z(z)=[A_{p'} Q_g/T] + [B_{p'} M_g/T^2] \quad (4.10)$$

Bu formüllerde kullanılan  $A_x$  ,  $B_x$  ,  $A_\theta$  ,  $B_\theta$  ,  $A_m$  ,  $B_m$  ,  $A_v$  ,  $B_v$  ,  $A_p$  ve  $B_p$  Z boyutsuz derinlik değerine bağlı katsayılar olup tablolardan alınır. Bu Z değeri ise aşağıdaki denklem yardımıyla bulunur:

$$Z = z/T \quad (4.11)$$

T, zemin-kazık sisteminin karakteristik uzunluğu olup (4.12) eşitliği kullanılarak bulunur:

$$T = \sqrt[5]{(E_p I_p/n_h)} \quad (4.12)$$

Bu T uzunluğu aynı zamanda kazık tipini belirlemek için de kullanılır:

$$L \geq 5T \Rightarrow \text{Uzun kazık} \quad L \leq 2T \Rightarrow \text{Rijit kazık} \quad (4.13)$$

#### 4.2. Kohezyonlu Zeminler İçin Yanal Yüklü Kazık Hesabı

Çözümler, granüler zemindeki yanal yüklü kazıkların hesaplarına benzer şekilde yapıp ve aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir:

Kazığın herhangi bir z derinliğindeki dönmesi:

$$x_z(z) = [A'_x Q_g R^3 / (E_p I_p)] + [B'_x M_g R^2 / (E_p I_p)] \quad (4.14)$$

Kazığa herhangi bir z derinliğinde etkiyen moment:

$$M_z(z) = [A'_m Q_g R] + [B'_m M_g] \quad (4.15)$$

Bu formüllerde kullanılan  $A'_x$  ,  $B'_x$  ,  $A'_m$  ve  $B'_m$  yine Z' boyutsuz derinlik değerine bağlı katsayılar olup grafiklerden alınır. Bu Z' değeri ise (4.16) eşitliği kullanılarak bulunur:

$$Z' = z/R \quad Z'_{(\max)} = L/R \quad (4.16)$$

R ise (4.17) eşitliğiyle elde edilir:

$$R = (E_p I_p/k)^{1/4} \quad (4.17)$$

Kohezyonlu zeminlerde taban katsayısının derinlikle değişmediği varsayılarak (4.18) eşitliği verilmiştir(Vesic):

$$k=0,65^{12}\sqrt{[E_s D^4/(E_p I_p)]} \cdot E_s/(1-\mu_s^2) \quad (4.18)$$

$E_s$ : zeminin Young modülü (laboratuar konsolidasyon testi yardımıyla hesaplanabilir):

$$E_s=3(1-\mu_s)/\mu_v \quad (4.19)$$

$\mu_v$ : hacimsel sıkışabilirlik katsayısı

$$\mu_v = \Delta e / [\Delta p(1+e_{ort})] \quad (4.20)$$

D: kazığın çapı veya dörtgen enkesitli kazıklar için genişliği(kısa kenar)

$\mu_s$ : zeminin Poisson oranı ( $\mu_s = 0,3 \sim 0,4$ )

### 4.3. Dayanıma Bağlı Yanal Yük Kapasitesi

#### 4.3.1. Kazıkların maksimum yanal direnci

Brooms(1964), zeminin maksimum dayanma kapasitesini ve kazık malzemesinin eğilme gerilmelerini göz önüne alarak, kazıkların maksimum yanal yük kapasitelerinin hesabı için kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için ayrı ayrı basitleştirilmiş çözümler geliştirmiştir. [5]

##### 4.3.1.1. Homojen kohezyonlu zeminlerdeki kazıklar

Kazık, ağırlıklı olarak ince tanelerden oluşan bir zeminde bulunduğunda, zeminin drenajsız durumda olması en kritik tasarım koşuludur. Kazığa uygulanabilecek maksimum yük şu faktörlere dayanır:

- Kazık başının serbest veya rijit oluşu: Tekil kazıkların çoğu yanal yükleme altında serbest uçlu kabul edilirken, kazık başlığıyla bağlanmış grup kazıklar genellikle rijit uçlu kabul edilir.

- Kazığın, çevreleyen zemine göre rölatif sıklığı: Eğer deformasyon durumunda zemin, kazık malzemesinden daha önce eğiliyorsa kazık “kısa kazık” olarak kabul edilir. Benzer şekilde eğer önce kazık malzemesi eğiliyorsa, o zaman da kazık “uzun kazık” olarak kabul edilir.

**Serbest uçlu (ankrajsız / konsol) kazıklar:** Maksimum momentin olduğu noktada kesme kuvveti sıfır olduğuna göre, zemin reaksiyon eğrisinin alanından (4.21) eşitliği elde edilebilir:

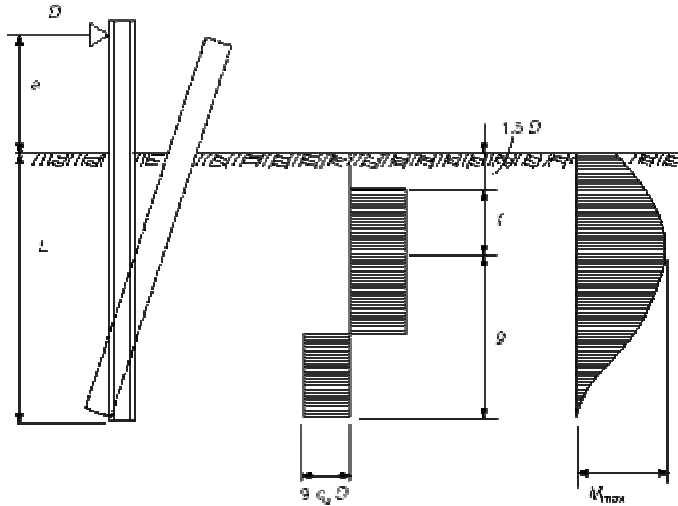
$$f = \frac{P_u}{9c_u D} \quad (4.21)$$

Benzer biçimde, Şekil 4.2’deki eğilme noktasına göre birinci momentler alınarak aşağıdaki ifade elde edilir:

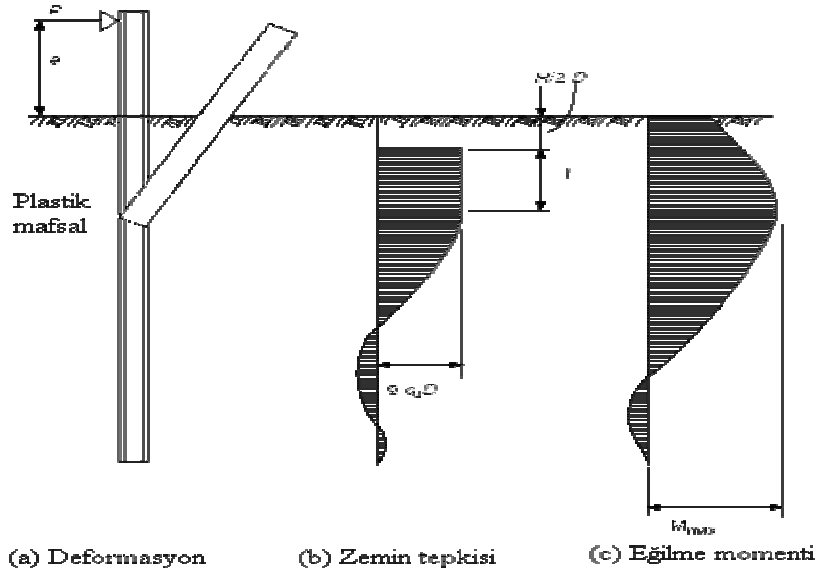
$$\begin{aligned} M_{\max} &= 2.25Dg^2c_u \\ M_{\max} &= H_u(e + 1.5D + 0.5f) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Kazığın toplam boyu için de (4.23) eşitliği verilebilir:

$$L = g + 1.5D + f \quad (4.23)$$



**Şekil 4.2:** Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü kısa kazıkların yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve moment dağılımları

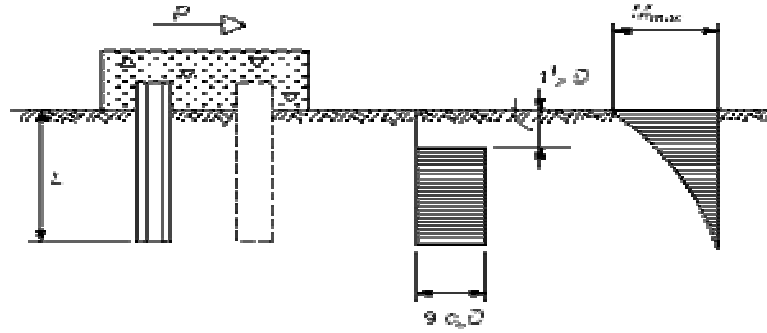


Şekil 4.3: Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü uzun kazıkların yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve moment dağılımları

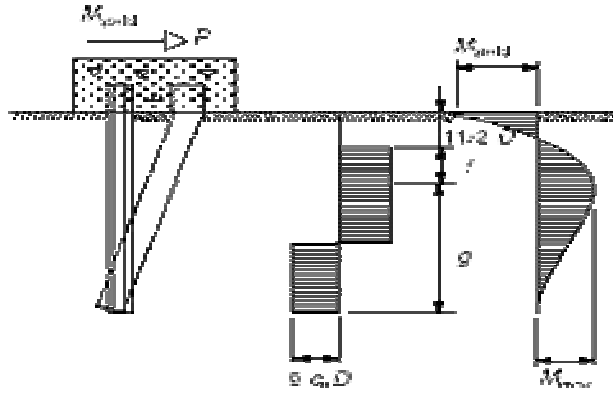
Kohezyonlu zeminlerdeki yanal yüklü kısa ve uzun kazıkların yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve moment dağılımları sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ile verilmiştir.

**Sabit uçlu (ankrajlı) kazıklar:** Brooms formüllerine göre ankrajlı kazıklar, kısa kazıklar, orta boy kazıklar ve uzun kazıklar olmak üzere üç farklı mekanizmayla maksimum kapasitelerine ulaşırlar. Bu üç farklı durum Şekil 4.4 ile verilmiştir.

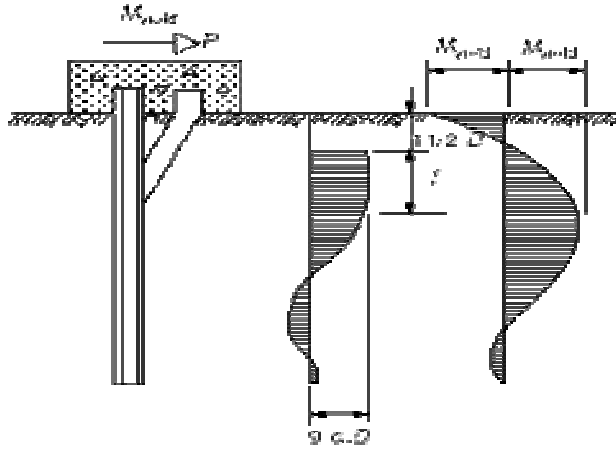
Bu durumlar için geliştirilen analitik çözümler için yapılan varsayım ise, kazık başında (tepesinde) oluşan momentin, kazığın, tepedeki sınır koşullarını sağlayacak şekilde kazık başlığıyla ankrajlanarak sağlandığıdır. Kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler( $P_u$ ), gömülme boyuna, kazık çapına ve kazık başının durumuna göre Şekil 4.5 yardımıyla doğrudan bulunabilirler.



1) (a) Deformasyon (b) Zemin tepkisi (c) Eğilme momenti



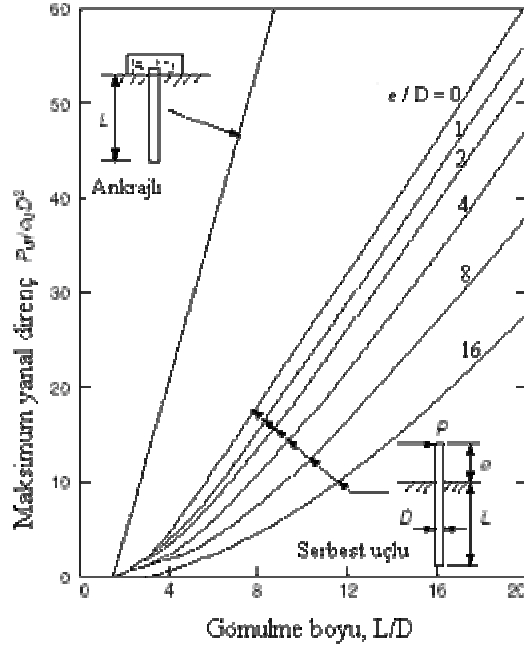
2) (a) Deformasyon (b) Zemin tepkisi (c) Eğilme momenti



3) (a) Deformasyon (b) Zemin tepkisi (c) Eğilme momenti

**Şekil 4.4:** Kohezyonlu ( $c \neq 0$ ) zeminlerdeki yanal yüklü, ankrajlı kazıkların göçme mekanizmaları

1) Kısa kazıklar 2) Orta boy kazıklar 3) Uzun kazıklar



Şekil 4.5: Kohezyonlu zeminlerdeki kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yükler

Kazığın dayanabileceği maksimum moment ve maksimum yanal yük aşağıdaki eşitliklerle de hesaplanabilir:

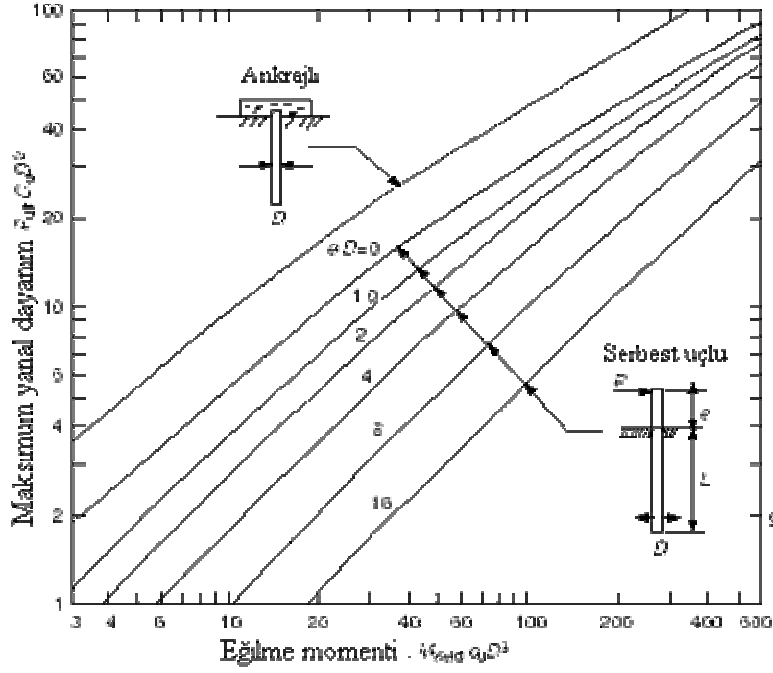
$$P_u = 9 c_u D (L - 1.5D) \quad (4.24)$$

$$M_{\max} = P_u (0.5L + 0.75D) \quad (4.25)$$

Uzun kazıklar için maksimum yanal yük benzer biçimde Şekil 4.7 yardımıyla bulunup, aşağıdaki eşitlik kullanılarak  $f$  uzunluğu ve buna bağlı olarak kazığın eğilme noktası bulunabilir:

$$P_u = \frac{2M_y}{(1.5d + 0.5f)} \quad (4.26)$$





Şekil 4.6: Kohezyonlu zeminlerdeki uzun kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler.

Orta boy kazıklarda eğilme tepede meydana gelir (Şekil 4.4 3(b)) ve  $P_u$ 'yu elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılabilir:

$$f = \frac{P_u}{9c_u D} \quad (4.27)$$

$$M_y = 2.25c_u Dg^2 - 9c_u Df(1.5D + 0.5f) \quad (4.28)$$

$$L = g + 1.5D + f \quad (4.29)$$

#### 4.3.1.2. Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıklar

Brooms, kohezyonsuz zeminlerdeki kazıklar için de, bir dizi varsayıma dayanarak maksimum yanal yük kapasitesini formülize etmiştir. En önemli varsayımlar şunlardır:

- Kazık ucunun öne doğru hareketinden dolayı kazığın arkasında meydana gelen aktif toprak basıncı ihmal edilmiştir.

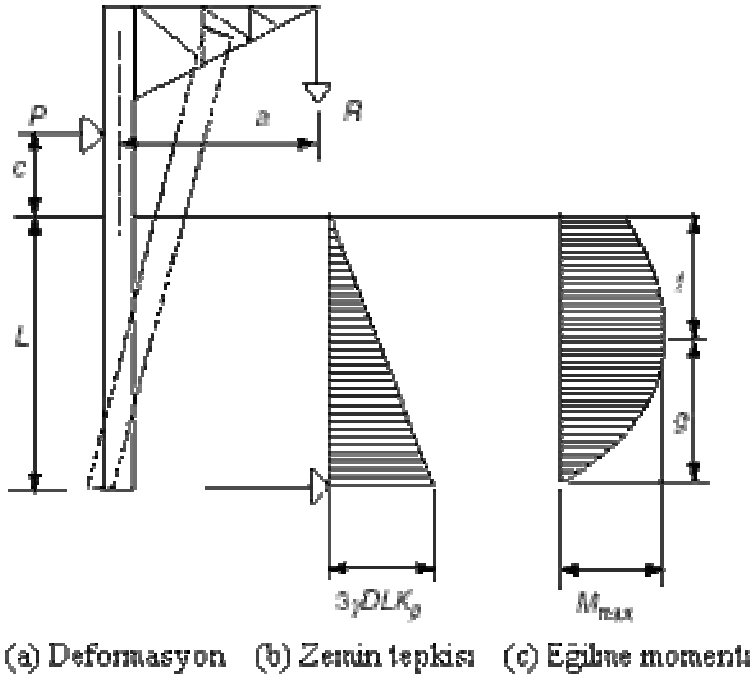
- Kazığın üst ön kısmında üç kademeli pasif toprak basıncı meydana gelmektedir.

Bu varsayımlara bağlı olarak pasif itki (4.30) ile verilebilir:

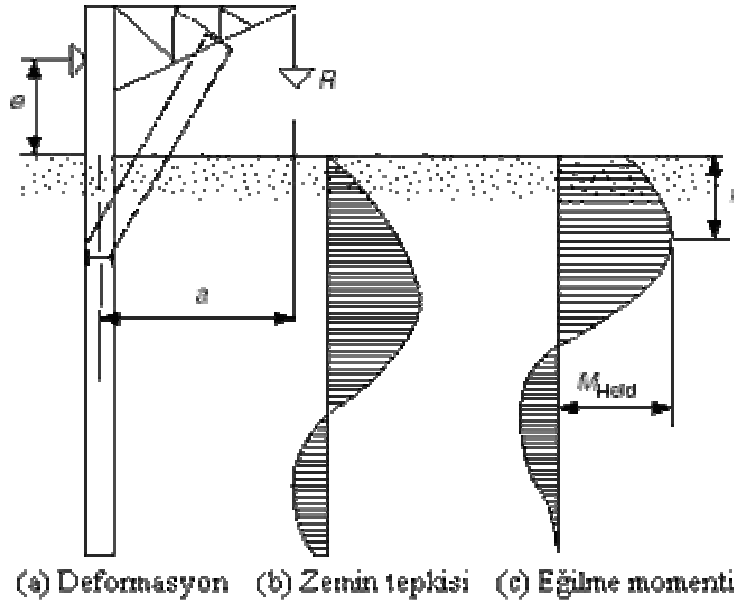
$$P_p = 3 \sigma_v' K_p \quad (4.30)$$

**Serbest uçlu (ankrajsız / konsol) kazıklar:** Kohezyonlu zeminlerdekine benzer şekilde, kısa ve uzun kazıkların göçme mekanizmaları Şekil 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. Kısa kazıkların taşıyabileceği maksimum yanal yük aşağıda verilen denklem (4.31) yardımıyla hesaplanır veya Şekil 4.9 kullanılarak doğrudan bulunur:

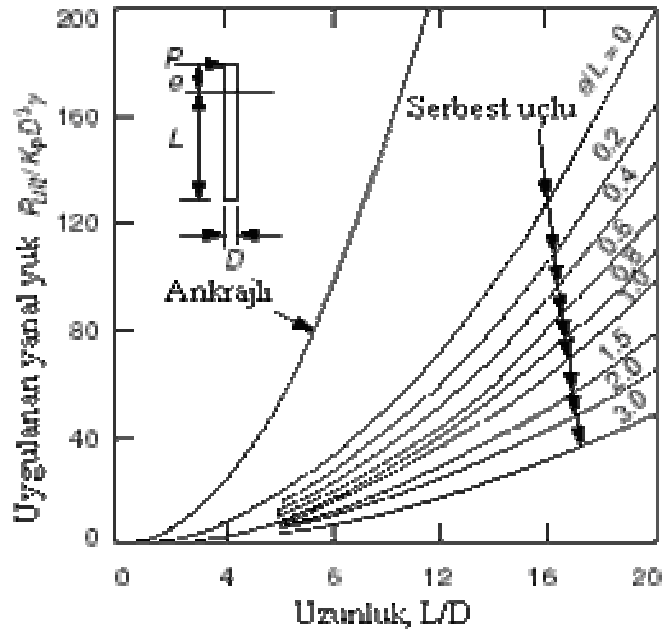
$$P_u = \frac{0.5\gamma DL^3 K_p}{e + L} \quad (4.31)$$



Şekil 4.7: Kohezyonsuz zeminlerdeki yanal yüklü kısa kazıkların göçme mekanizması



Şekil 4.8: Kohezyonsuz zeminlerdeki yanal yüklü uzun kazıkların göçme mekanizması



Şekil 4.9: Kohezyonsuz zeminlerdeki kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler

Maksimum momentin yerini belirlemek için gereken  $f$  mesafesi aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir:

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{P_u}{DK_p \gamma}} \quad (4.32)$$

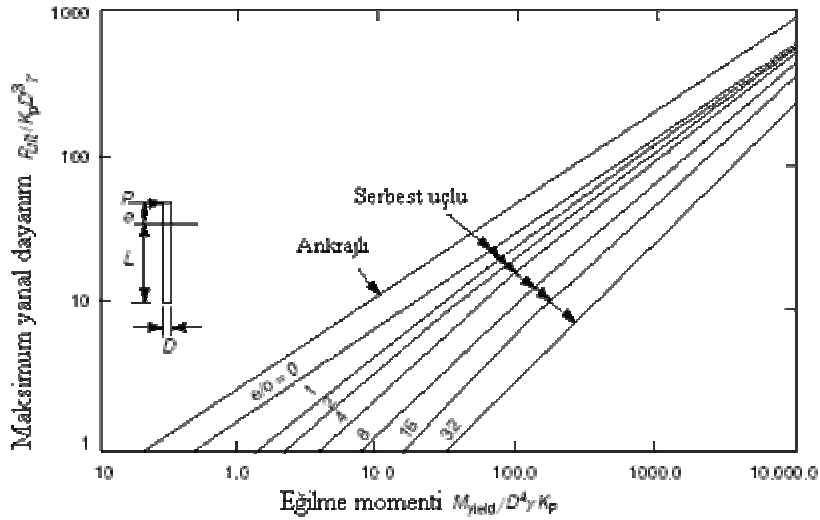
Sonuç olarak maksimum moment (4.33) denklemiyle bulunur:

$$M_{\max} = P_u \left( e + \frac{2}{3} f \right) \quad (4.33)$$

Eğer hesapla bulunan  $M_{\max}$  değeri, kazık malzemesi için verilen  $M_{\text{eğilme}}$  değerinden büyükse, kazık uzun kazık gibi davranır ve gerçek maksimum yanal yük  $P_u$ , denklem (4.33)'de

$$M_{\max} = M_{\text{eğilme}}$$

alınarak hesaplanır veya uzun kazıklar için verilen tablo yardımıyla doğrudan elde edilir.



Şekil 4.10: Kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yükler

**Sabit uçlu (ankrajlı) kazıklar:** Ankrajlı kısa kazıkların taşıyabilecekleri maksimum yanal yük Şekil 4.9 yardımıyla doğrudan bulunabileceği gibi, aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir:

$$P_u = 1.5\gamma L^2 DK_p \quad (4.34)$$

$P_u$  değerine bağlı olarak maksimum moment (4.35) ile hesaplanabilir:

$$M_{\max} = \frac{2}{3} P_u L \quad (4.35)$$

Eğer hesapla bulunan  $M_{\max}$  değeri, kazık malzemesi için verilen  $M_{eğilme}$  değerinden büyükse, bu durumda önce kazığın orta boy kazık gibi davrandığı düşünülerek bir kez daha hesap yapılır. Bu durumda maksimum yanal yükün hesabı için, kazık alt ucundan (4.36) ifadesi kullanılarak moment alınır:

$$M_y = (0.5 \gamma DL^3 K_p) - P_u L \quad (4.36)$$

Eğer hala hesapla bulunan  $M_{\max}$  değeri, kazık malzemesi için verilen  $M_{eğilme}$  değerinden büyükse, o zaman kazık uzun kazık gibi davranıyor demektir. Bu durumda kazığın taşıyabileceği maksimum yanal yük ya Şekil 4.10 yardımıyla elde edilir, ya da aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$P_u \left( e + \frac{2}{3} f \right) = 2M_y \quad (4.37)$$

#### 4.4. Deformasyonlara Bağlı Yanal Yük Kapasitesi

Tasarım prosedürünün amacına ulaşabilmesi için, izin verilebilir maksimum zemin deformasyonlarının, yanal yüklü kazığın yanal deformasyonlarıyla kıyaslanması gerekir. Bu deformasyonların elde edilebilmesi içinse doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (non-linear) yöntemler geliştirilmiştir.

#### 4.4.1. Lineer elastik yöntem

Yanal yüklü bir kazık, sonsuz elastik bir ortamda denklem (4.38) ile ifade edilen yatay deformasyonla, yanal deformasyona uğrayan sonsuz uzunlukta bir silindir gibi idealize edilebilir:

$$p = k_h \cdot y \quad (4.38)$$

Yayıllı yük ve moment bağıntılarından (4.39) elde edilir:

$$pB = \frac{d^2 M}{dz^2} = -E_p I \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (4.39)$$

B: kazık genişliği

$E_p I$ : kazığın rijitliği

Bu ifade yardımıyla, yatay deformasyonu yöneten denklem aşağıdaki hali alır:

$$E_p I \frac{d^4 y}{dz^4} + B k_h y = 0 \quad (4.40)$$

(4.40) eşitliğinin  $y$ 'ye göre çözümünün karakteristik katsayısı da aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\beta = \left( \frac{k_h D}{4 E_p I} \right)^{1/4} \quad (4.41)$$

$1/\beta$ : boyutsuz uzunluk

$k_h$ : yatay zemin reaksiyon katsayısı

Brooms,  $\beta$  katsayısı 2'den az olduğu takdirde yanal yüklü kazığın sonsuz rijit davrandığını kanıtlamıştır.  $\beta L \geq 4$  olduğu durumda ise kazık, maksimum eğilme momenti kazık kesitinin eğilme dayanımına ulaştığı zaman çöken sonsuz uzun bir eleman gibi davranır.

Konunun alt bölümlerinde  $k_h$  kazık boyunca sabit kabul edilerek Hetenyi tarafından geliştirilmiş kapalı çözümler anlatılmaktadır.

#### 4.4.1.1. Serbest uçlu (ankrajsız / konsol) kazıklar

**1. Durum: H yanal yüküne bağlı deformasyon:** Bu konu ile ilgili aşağıda verilen denklemler Şekil 4.11 ile verilen yanal yüklü konsol kazıklarla bağlantılı olarak, d geniŐliėinde bir kazık için geliştirilmiştir.

Yatay yer değiştirme:

$$\Delta = \frac{2H\beta}{k_h d} K_{\Delta H} \quad (4.42)$$

Eğim:

$$\theta = \frac{2H\beta^2}{k_h d} K_{\theta H} \quad (4.43)$$

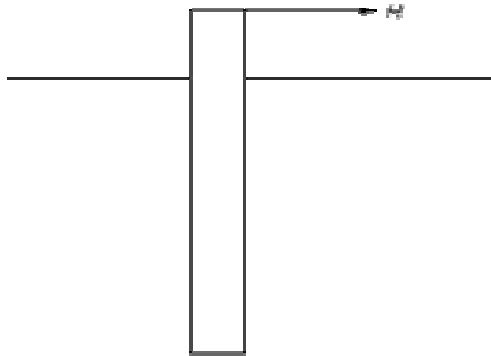
Moment:

$$M = -\frac{H}{\beta} K_{MH} \quad (4.44)$$

Kesme kuvveti:

$$V = -HK_{VH} \quad (4.45)$$

Etki faktörleri olan  $K_{\Delta H}$ ,  $K_{\theta H}$ ,  $K_{MH}$  ve  $K_{VH}$  Tablo 4.1'de verilmiştir.



**Şekil 4.11:** H yanal yüküne maruz konsol kazık

**Tablo 4.1:** Lineer çözüm için etki faktörleri

$\beta L$	Z/L	K(AH)	K(0H)	K(MH)	K(VH)	K( $\Delta M$ )	K( $\theta M$ )	K(MM)	K(VM)
2,0	0	1,1376	1,1341	0	1	-1,0762	1,0762	1	0
2,0	0,125	0,8586	1,0828	0,1848	0,5015	-0,6579	0,8314	0,9397	0,2214
2,0	0,25	0,6015	0,9673	0,262	0,1377	-0,2982	0,6133	0,7959	0,3387
2,0	0,375	0,3764	0,8333	0,2637	-0,1054	-0,0376	0,4366	0,6138	0,3788
2,0	0,5	0,1838	0,7115	0,218	-0,2442	0,1463	0,3068	0,4262	0,3639
2,0	0,625	0,0182	0,6192	0,1491	-0,2937	0,2767	0,222	0,2564	0,3101
2,0	0,75	-0,1288	0,5628	0,0776	-0,2654	0,3747	0,1757	0,1208	0,2282
2,0	0,875	-0,2659	0,5389	0,0222	-0,1665	0,4572	0,1578	0,0318	0,1241
2,0	1	-0,3999	0,5351	0	0	0,5351	0,1551	0	0
3,0	0,125	0,6459	0,8919	0,2508	0,3829	-0,3854	0,6433	0,8913	0,2514
3,0	0,25	0,3515	0,6698	0,3184	0,0141	-0,0184	0,3493	0,6684	0,3202
3,0	0,375	0,1444	0,4394	0,285	-0,1661	0,1607	0,1429	0,436	0,2887
3,0	0,5	0,0164	0,2528	0,2091	-0,2223	0,2162	0,0168	0,2458	0,215
3,0	0,625	-0,0529	0,1271	0,1272	-0,2057	0,2011	-0,0489	0,1148	0,1353
3,0	0,75	-0,0861	0,0584	0,0594	-0,1519	0,1524	-0,0763	0,0396	0,0684
3,0	0,875	-0,1021	0,0321	0,0154	-0,0807	0,0916	-0,0839	0,0069	0,0225
3,0	1	-0,133	0,0282	0	0	0,0282	-0,0847	0	0
4,0	0	1,0008	1,0015	0	0	0,0282	-0,0847	0	0
4,0	0,125	0,5323	0,8247	0,2907	0,2411	-0,2409	0,5344	0,8229	0,2910
4,0	0,25	0,1979	0,5101	0,3093	-0,1108	0,1136	0,2010	0,5082	0,3090
4,0	0,375	0,014	0,2403	0,2226	-0,2055	0,2118	0,0178	0,2397	0,2200
4,0	0,5	-0,059	0,0682	0,1243	-0,1758	0,1858	-0,0558	0,0720	0,1176
4,0	0,625	-0,0687	-0,0176	0,0529	-0,1084	0,1200	-0,0696	-0,0043	0,0406
4,0	0,75	-0,0505	-0,0488	0,0147	-0,0475	0,0538	-0,0616	-0,0206	-0,0025
4,0	0,875	-0,0239	-0,0552	0,0014	-0,0101	-0,0033	-0,0535	-0,0096	-0,0148
4,0	1	0,0038	-0,0555	0	0	-0,0555	-0,0517	0	0
5,0	0	1,0003	1,0003	0	1	-1,0003	1,0002	1	0
5,0	0,125	0,4342	0,7476	0,3131	0,1206	-0,1210	0,4343	0,7472	0,3133
5,0	0,25	0,0901	0,3628	0,2716	-0,1817	0,1818	0,0907	0,3620	0,2720
5,0	0,365	-0,0466	0,1013	0,1461	-0,1919	0,1930	-0,0455	0,1002	0,1461
5,0	0,5	-0,0671	-0,0157	0,0494	-0,1133	0,1163	-0,0654	-0,0161	0,0482
5,0	0,625	-0,0456	-0,0435	0,0026	-0,0412	0,0461	-0,0444	-0,0409	-0,0012
5,0	0,75	-0,0197	-0,0369	-0,0088	-0,0008	0,0055	-0,0221	-0,0276	-0,0159
5,0	0,875	0,0002	-0,0279	-0,0044	0,0108	-0,0139	-0,0110	-0,0086	-0,0125
5,0	1	0,0167	-0,0259	0	0	-0,0259	-0,0091	0	0



**2. Durum: M momentine bağlı yanal deformasyon:** Aşağıdaki denklemler Şekil 4.12 ile verilen M momentine bağlı konsol kazıklarla bağlantılı olarak, d genişliğinde bir kazık için geliştirilmiştir.

Yatay yer değiştirme:

$$\Delta = \frac{2M_0\beta^2}{k_h d} K_{\Delta M} \quad (4.46)$$

Eğim:

$$\theta = \frac{2M_0\beta^3}{k_h d} K_{\theta M} \quad (4.47)$$

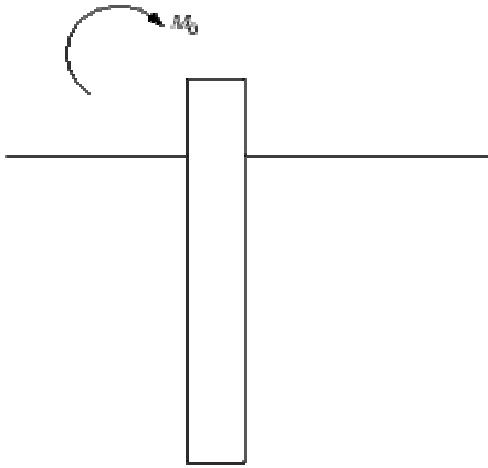
Moment:

$$M = M_0 K_{MM} \quad (4.48)$$

Kesme kuvveti:

$$V = -2M_0\beta K_{VM} \quad (4.49)$$

Etki faktörleri olan  $K_{\Delta H}$ ,  $K_{\theta H}$ ,  $K_{MH}$  ve  $K_{VH}$  yine Tablo 4.1'den alınabilir.



**Şekil 4.12:**M momentine maruz konsol kazık

#### 4.4.1.2. Sabit uçlu (ankrajlı) kazıklar

Çözümün elastik doğasına bağlı olarak, ankrajlı kazıkların yanal deformasyonları, aşağıdaki nedenlerle oluşan deformasyonlar toplanarak elde edilebilir:

- Bilinen yanal deformasyon oluşturan kuvvet ve kazık başındaki bilinmeyen ankraj momenti,
- Bilinen deformasyon oluşturan moment ve kazık başındaki bilinmeyen ankraj momenti.

Sonrasında, ankrajlı olduğundan dolayı kazık başındaki momenti sıfır kabul ederek, bilinmeyen ankraj momenti ve bileşke çözüm elde edilebilir.

#### 4.4.2. Lineer olmayan yöntemler

Son zamanlarda, üstün hesap kabiliyetleri nedeniyle doğrusal olmayan pek çok sayısal yöntem oldukça popüler hale gelmiştir. Bunlar içinden sıklıkla kullanılanları rijitlik matrisi çözüm yöntemi (sonlu elemanlar yöntemi) ve yanal yük-deformasyon (p-y) yaklaşımıdır.

##### 4.4.2.1. Rijitlik matrisi çözüm yöntemi

Bu yöntem, klasik sonlu elemanlar ve rijitlik matrisi yöntemlerinin temel formülasyonları arasındaki benzerliklerden ötürü “sonlu elemanlar yöntemi” olarak da adlandırılmaktadır. İlk olarak kazık belli sayıda bir boyutlu giriş elemanlarına bölünür. Şekil 4.13’de bu durum gösterilmiştir.

Şekildeki ifadeleri açıklamak gerekirse:

1, 2, ..., N (Koyu renkli) : düğüm noktası numarası

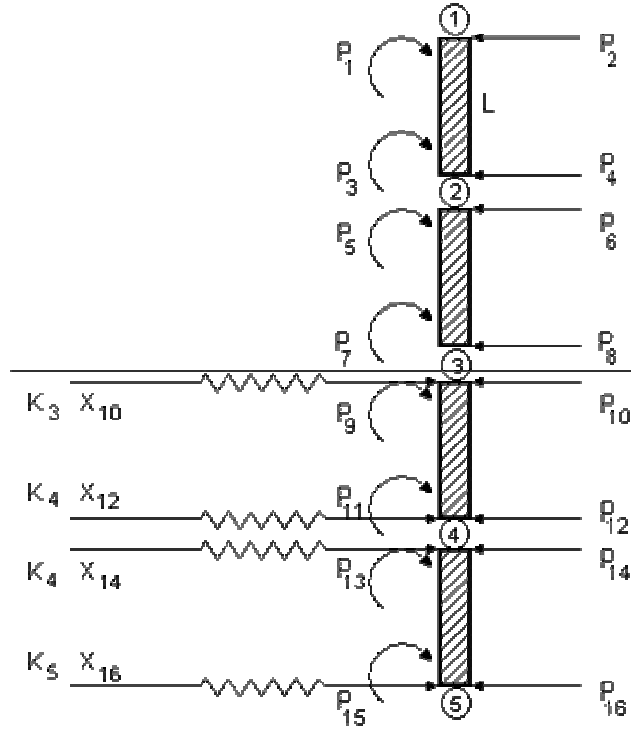
$P_i$ (i çift) : kazıkta düğüm noktalarında toplanmış yanal yükler

$P_i$ (i tek) : kazıkta düğüm noktalarında toplanmış iç momentler

$X_i$ (i çift) : her bir kazık elemanının düğüm noktası deformasyonu

$X_i$ (i tek) : her bir kazık elemanının düğüm noktası dönmesi

$K_j$  : eşdeğer bir yay rijitliğiyle ifade edilen yanal zemin direnci



Şekil 4.13:Yanal yüklü kazıkların çözümü için rijitlik matrisi yöntemi

Yapısal analizdeki eğim-deformasyon bağıntıları yardımıyla, serbest bir kazık elemanı için aşağıdaki rijitlik bağıntısı yazılabilir:

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4EI/L & 6EI/L^2 & 2EI/L & -6EI/L^2 \\ 6EI/L^2 & 12EI/L^2 & 6EI/L^2 & -12EI/L^3 \\ 2EI/L & 6EI/L^2 & 4EI/L & -6EI/L^2 \\ -6EI/L^2 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 12EI/L^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}^T \quad (4.50)$$

Burada EI kazığın rijitliği, L ise her bir kazık elemanının boyudur.

Eğer kazık elastik zemin üzerindeki bir kiriş olarak ele alınır, aşağıdaki ifade yardımıyla herhangi bir derinlikteki yanal zemin reaksiyonu modülü  $k_h$ 'ın herhangi bir derinlikteki yanal kazık deformasyonu ile ilişkilendirilmesi sağlanır:

$$p = k_h y \quad (4.51)$$

Böylece  $K_j$  yay rijitliği de, yanal zemin reaksiyonu modülü  $k_h$  cinsinden ifade edilebilir.

Gömülü düğüm noktaları için:

$$K_j = LBk_h \quad (4.52)$$

Zemin yüzeyinin üstünde kalan düğüm noktaları için:

$$K_j = 0,5LBk_h \quad (4.53)$$

Burada B kazık genişliği veya çapıdır.

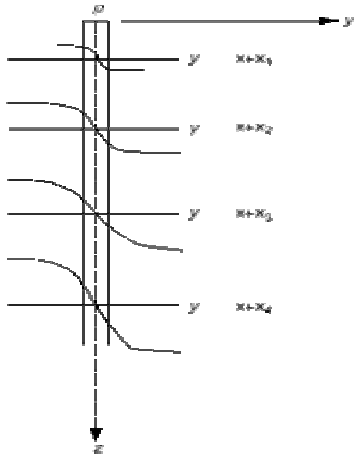
#### 4.4.2.2. Yanal basınç-deformasyon (p-y) yöntemi

Lineer elastik yöntemde kullanılan yayılı yük-moment bağıntısının aşağıdaki hali Reese tarafından p-y eğrisi yaklaşımına uyarlanmıştır:

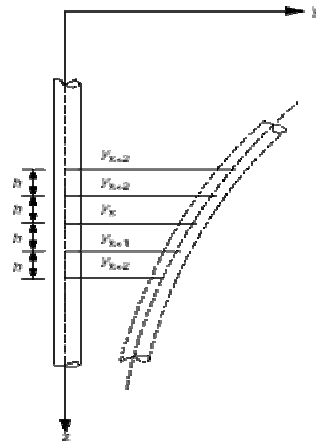
$$\frac{d^2 M}{dz^2} + P(z) \frac{d^2 y}{dz^2} - p' = 0 \quad (4.54)$$

Burada p' kazığın birim uzunluğuna gelen zemin tepkisidir.

Bu denklemde yanal yüklemekten dolayı kazıkta meydana gelen sonlu eğilmeye bağlı olarak P(z) aksenal yükünün sebep olduğu kesme ve moment etkileri de göz önüne alınmaktadır. (Şekil 4.14 ve 4.15)



Şekil 4.14: Yanal yüklü kazıkların çözümü için p-y eğrisi yöntemi



Şekil 4.15: Kazıktaki eğilmenin gösterimi

Buna göre, kesme kuvveti ve kazık boyunca herhangi bir derinlikteki zemin reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$S = EI \frac{d^3 y}{dz^3} + P(z) \frac{dy}{dz} \quad (4.55)$$

$$p' = EI \frac{d^4 y}{dz^4} + P(z) \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (4.56)$$

Yukarıdaki denklemin sonlu farklar (Finite differences:FD) formu (4.57) ifadesiyle verilmiştir:

$$y_{m-2}R_{m-1} + y_{m-1}(-2R_{m-1} - 2R_m + P_2h^2) + y_m(R_{m-1} + 4R_m + R_{m+1} - 2P_2h^2 + k_m h^4) + y_{m+1}(-2R_m - 2R_{m+1} + P_2h^2) + y_{m+2}R_{m+1} = 0 \quad (4.57)$$

Burada:

$$R_m = E_m I_m \quad (4.58)$$

Bu denklemde kullanılan ifadelerin anlamlarını açıklamak gerekirse:

$R_m$ : m'inci düğüm noktasının rijitliği

$y_m$ : m'inci düğüm noktasındaki yatay deformasyon

$h$ : sonlu fark adım boyu (kazık boyunca nodal mesafe)

$P_z$ : m'inci düğüm noktasında ve  $z$  derinliğindeki aksenal yük

$k_m$  parametresi aşağıdaki eşitlik kullanılarak, her  $m$  düğüm noktası için, o noktaya tekabül eden derinliğe bağlı olarak belirlenecek p-y eğrisi yardımıyla bulunabilir:

$$p' = k_m y \quad (4.59)$$

Sonuç olarak, aşağıdaki sınır koşulları kullanılır:

- Kazığın ortasında kesme ve moment sıfırdır.
- Kazık başındaki yanal yük ve moment (veya eğim ya da açısal sınırlılık) bilinmemektedir.

Sonlu farklar (FD) algoritması çözülerek herhangi bir derinlik için yanal deformasyon, kazıktaki dönme, kazık boyunca moment ve kesme sayısal olarak belirlenebilir. Reese'e göre p-y yönteminde zeminin herhangi bir derinlikteki

davranışı, diğer derinliklerdeki davranışından bağımsız olmasını gerektirir ki bu doğru bir varsayım değildir. Fakat yapılan deneyler, yukarıdaki ifadenin uygulamaya yönelik koşullarda doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

#### 4.4.2.3. p-y eğrilerinin birleştirilmesi

Yanal yüklenecek deneye tabi tutulmuş bir kazık boyunca elde edilen gerilme sayacı okumaları, Hameed tarafından, kazık boyunca sonlu sayıda noktada yanal yük geçiş eğrilerini (p-y eğrileri) geliştirmek için kullanılmıştır. Verilen herhangi bir yanal yükleme durumu için kazık üzerinde herhangi bir noktadaki p (yanal yayılı yük şiddeti) ve y (yanal deformasyon) değerleri, aşağıdaki sayısal işlemler kullanılarak hesaplanabilir. Basit kiriş teorisine göre:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{\varepsilon}{h} \quad (4.60)$$

y: yanal deformasyon

z: kazık üzerinde düşey koordinat

h: kazık kesitinin tarafsız eksenine gerilme sayacı arasındaki mesafe

$\varepsilon$ : z'deki gerilme sayacı okuması

Böylece yanal deformasyon (y) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$y = \frac{1}{h} \iint \varepsilon dz \quad (4.61)$$

Benzer şekilde, önceki formüller kullanılarak yayılı zemin yükü (p) de (4.62) kullanılarak hesaplanabilir:

$$p = -\frac{E_p I}{hB} \frac{d^3 \varepsilon}{dz^2} \quad (4.62)$$

Buradan görülüyor ki, p ve y değerleri, ölçülen eğilme gerilmelerine uygun matematiksel bir  $\varepsilon$  eğrisi yaklaşımıyla hesaplanabilmektedir. Bu problem genelde ya doğru ölçülmüş gerilme verilerinin olduğu noktalar arasında üçüncü dereceden bir eğri denklemi uyarlanarak veya gerilme verilerinin alındığı bütün noktalar için uygun, daha yüksek dereceli bir polinom kullanılarak sonuçlandırılır.

#### 4.5. Yanal Yüklü Kazıklarda Yük ve Direnç Faktörüne Bağlı Tasarım

FHWA verilerine göre, kazıkların yanal yüklere göre tasarımında, seçilen kazık kesitinin zemine yerleştirilme yöntemi göz önüne alınarak tekil kazık için “servis limit durumu”nda maksimum yanal zemin çizgisi deformasyonlarının ve “dayanım limit durumu”nda maksimum momentin belirlenmesi ve bunların, her iki limit durumu da aşılmayacak şekilde, sırasıyla, izin verilebilir deformasyonlarla ve kazığın maksimum aksenal direnciyle kıyaslanması gerekmektedir.

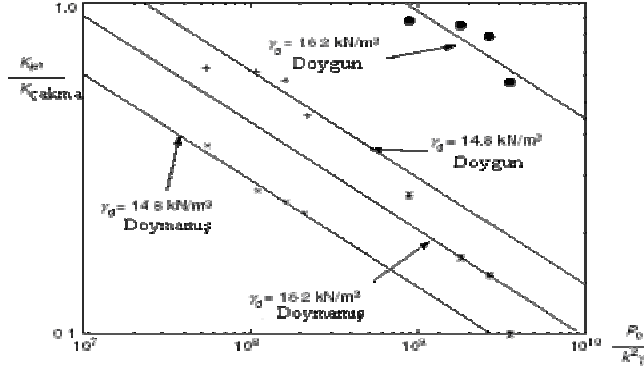
#### 4.6. Su Jetinin Yanal Yük Kapasitesine Etkisi

Su jeti, kazık uç seviyesinin üzerinde sert bir katmanla karşılaştığı takdirde kazık yerleştirme etkisini güçlendiren bir uygulamadır. Su jeti uygulanması sırasında ilk olarak kazığın yakın çevresindeki zemin su jeti etkisiyle oluşan yüksek boşluk suyu basıncı nedeniyle sıvılaşır, ardından bu basıncın dağılmasıyla ani bir yoğunlaşma görülür. Ek olarak, sızan su, kazıktan daha uzakta bir süzme bölgesi oluşturur. Bu nedenlerle su jeti, çevreleyen zeminde önemli örselenmeler meydana getirerek zeminin yanal yüke karşı davranışında değişikliklere sebep olur.

Tsinker ve Hameed aynı zemine biri çakılarak diğeri su jetiyle yerleştirilen iki kazığın düzenlenmiş p-y eğrilerini kıyaslayarak bu iki tür kazığın yanal yük performanslarını incelemişlerdir. Aynı zamanda jet suyu basıncının, zeminin birim hacim ağırlığının ve yeraltı suyu durumunun p-y eğrileri üzerindeki etkilerini de belirlemişlerdir. Yukarıdaki çalışmaları ışığında Hameed, çakma kazıklar için yanal yük davranışını temel alarak, aynı tür zeminlere su jetiyle yerleştirilen kazıklar için bir kılavuz geliştirmiştir.

Bu çalışmada model deney programından elde edilen  $K_{max}$  ( $K_{jet}/K_{çakma}$ ) ve  $p_u$  ( $p_{u,jet}/p_{u,çakma}$ ) oranları boyutsuz jet basıncına ( $\pi_3=P_0/k^2\gamma$ ) bağlı olarak grafik haline getirilmiştir. (k: permeabilite katsayısı) Temel zemini kumla karışık bentonit kilidir.

Su jetinin  $K_{max}$  ve  $p_u$  değerlerine etkisi sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17 ile verilmiştir.



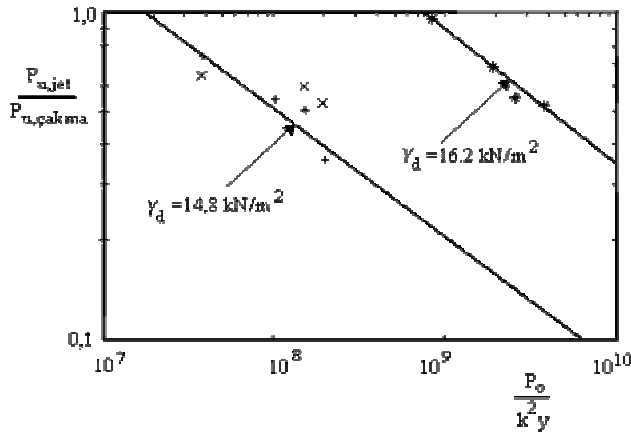
Şekil 4.16: Su jetinin  $K_{max}$  değerine etkisi

$K$  ve  $p_u$  oranları, aşağıdaki denklemler vasıtasıyla boyutsuz jet basıncıyla ilişkilendirilebilir:

$$\frac{K_{jet}}{K_{çakma}} = \alpha_1 \left( \frac{P_0}{k^2 \gamma} \right)^{\beta_1} \quad (4.63)$$

$$\frac{p_{u,jet}}{p_{u,çakma}} = \alpha_2 \left( \frac{P_0}{k^2 \gamma} \right)^{\beta_2} \quad (4.64)$$

Burada  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  zemin türüne bağlı parametreler olup Tablo 4.2'den alınabilirler.



Şekil 4.17: Su jetinin  $p_u$  değerine etkisi



**Tablo 4.2:** Su jetinin yanal yük kapasitesine etkisini belirlemek için kullanılan katsayılar

Sabit	$\gamma=16,2 \text{ kN/m}^2$		$\gamma=16,2 \text{ kN/m}^2$	
	Doygun değil	Doygun	Doygun değil	Doygun
$\alpha_1$	165,32	748,82	110,8	237,42
$\beta_1$	-0,323	-0,323	-0,323	-0,323
$\alpha_2$	3509,67	797,02		
$\beta_2$	-0,4	-0,4		

Tablo 4.2'den de görülebileceği gibi  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  temel zemininin birim hacim ağırlığından ve yeraltı suyu durumundan bağımsızken,  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  değerleri temel zemininin birim hacim ağırlığı arttıkça artmaktadır. Bu nedenle,  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  değerlerinin temel zemininin birim hacim ağırlığıyla doğru orantılı değiştikleri düşünülmektedir, verilmeyen  $\gamma$  değerleri için tahmini yaklaşımlar yapmak mümkündür.

#### 4.7. Matkapla Kuyu Açılarak Yerleştirilen Kazıkların Yanal Yük Kapasiteleri

Hameed bu durum için de yine p-y eğrilerinin parametreleri arasında benzer bağıntılar kurarak aşağıdaki eşitlikleri geliştirmiştir:

$$\frac{K_{\dot{ö}n}}{K_{\dot{ç}akma}} = \alpha_3 \left( \frac{d}{D} \right)^{\beta_3} \quad (4.65)$$

$$\frac{P_{u,\dot{ö}n}}{P_{u,\dot{ç}akma}} = \alpha_4 \left( \frac{P_0}{k^2 \gamma} \right)^{\beta_4} \quad (4.66)$$

Burada  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  zemin türüne bağlı parametreler olup Tablo 4.3'den alınabilirler.

**Tablo 4.3:** Matkapla kuyu açılarak yerleştirilen kazıkların yanal yük kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan katsayılar

Sabit	$\gamma=16,2 \text{ kN/m}^2$		$\gamma=16,2 \text{ kN/m}^2$	
	Doygun değil	Doygun	Doygun değil	Doygun
$\alpha_3$	0,14	0,69	0,38	0,69
$\beta_3$	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17
$\alpha_4$	0,64	0,39		
$\beta_4$	-0,68	-0,68		

## 5. YATAK KATSAYISI KAVRAMI

Yatak katsayısı ve zemin modülü kavramı Winkler tarafından öne sürülmüştür. Bu teorinin temel noktası zeminin elastik olduğu ve birbirine bitişik sonsuz sayıda yaydan oluştuğu kabulüne dayanmaktadır. Yatak katsayısı, zeminin belirli bir noktasındaki taban basıncının, o nokta altında meydana gelen yer değiştirmeye oranı olarak tarif edilebilir. Bu orantı Winkler tarafından doğrusal olarak tarif edilmiş ve zeminin, elastik davranış gösterdiği yükleme sınırları içerisinde Hooke kanunlarına uygun olarak değiştiği çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan yükleme deneyleriyle kanıtlanmıştır. Buna göre, yatak katsayısının hesabı için (5.1) bağıntısı verilebilir[3]:

$$k=p/\delta \quad (5.1)$$

k: yatak katsayısı

p: zemine uygulanan gerilme

$\delta$ : gerilmenin uygulandığı nokta altında meydana gelen yer değiştirme

### 5.1. Düşey Yatak Katsayısı Hesabı

Winkler modeli elastik bir zemine oturan plak altında meydana gelen gerilmeler üzerinde yatak katsayısının çok küçük bir etkisi vardır. Yatak katsayısının tespiti için 30~80cm çapında rijit plakalarla yükleme deneyleri yapılmaktadır. Üst yapı özelliklerine bağlı olarak yatak katsayısı büyük değişiklikler gösterdiği ve üst yapı yüklerine göre deney yapmak güç olduğu için Terzaghi çapı 1 ft (yaklaşık 30,5 cm) olan bir plaka kullanılarak yapılan yükleme deneylerinden elde edilen  $k_0$  zemin modülünden, çeşitli ampirik denklemlerle temel yapısı altındaki zemine ait yatak katsayısı sabitinin hesaplanmasını önermiştir. Buna göre, farklı boyut ve şekillerdeki, farklı zeminlere oturan temeller için (5.2)-(5.4) formülleriyle yatak katsayıları dönüşümü yapılabilir.

Kum zeminde kare temel:

$$k_{BB} = k_{0,3} \left( \frac{B+0,3}{2B} \right)^2 \quad (5.2)$$

Kil zeminde kare temel:

$$k_{BB} = k_{0,3} \left( \frac{0,3}{B} \right) \quad (5.3)$$

Dikdörtgen temel için:

$$k_{BL} = k_{BB} \left( \frac{1 + \frac{B}{L}}{1,5} \right) \quad (5.4)$$

Scott'a göre kum zeminlerde(N: düzeltilmiş SPT sayısı olmak üzere):

$$k_{0,3} \text{ (MN/m}^3\text{)}=1,8 \text{ N} \quad (5.5)$$

Bazı zeminler için  $k_{0,3}$  değerleri Tablo 5.1 ile verilmiştir.

Vesic(1961) uzun kirişler için aşağıdaki formülü önermiştir:

$$k' = B.k = 0,654 \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_F I_F} \cdot \frac{E_s}{1 - \mu_s}} \quad (5.6)$$

Pratik amaçlar için aşağıda eşitlik de kullanılabilir:

$$k = \frac{E_s}{B(1 - \mu^2)} \quad (5.7)$$

$\mu$ : Poisson oranı

B: temel genişliği

$E_F, I_F$ : temel için elastisite modülü ve rijitlik indeksi

$E_s$ : zemin elastisite modülü

**Tablo 5.1:** Bazı zeminler için  $k_{0,3}$  değerleri

Zemin	Sıklık-Kıvam	$k_{0,3}$ (MN/m <sup>3</sup> )
Kuru veya nemli kum	Gevşek	8~25
	Orta sıkı	25~125
	Sıkı	125~375
Suya doymuş kum	Gevşek	10~15
	Orta sıkı	35~40
	Sıkı	130~150
Kil	Katı ( $s_u=50\sim 100$ kPa)	12~25
	Çok katı ( $s_u=50\sim 100$ kPa)	25~50
	Sert ( $s_u> 200$ kPa)	>50

### 5.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde düşey yatak katsayısı hesabı

Bu tip zeminlerde Terzaghi ve Peck tarafından (5.8) bağıntısı verilmiştir:

$$\frac{w}{w_1} = \left( \frac{2B}{B+1} \right)^2 \quad (5.8)$$

w: (cm) temel yapısının oturması

$w_1$ : (cm) 30cm çapındaki deney plakasının oturması

B: temel genişliği (kısa kenar)

Kohezyonsuz zeminlerde kare temellerde aşağıda verilen formül uygulanabilir:

$$k = k_{0,3} \left( \frac{B+1}{2B} \right)^2 \quad (5.9)$$

Kohezyonsuz zeminlerde (B)x(mB) boyutundaki dikdörtgen temellerde ise (5.10) eşitliği kullanılır:

$$k = k_{0,3} \left( \frac{m+0,5}{1,5m} \right) \quad (5.10)$$

Terzaghi ve Peck tarafından deneyler sonucu elde edilen yatak katsayısı değerleri Tablo 5.2 ile verilmiştir.

**Tablo 5.2:** Kum zeminde 0,30m<sup>2</sup> alanındaki plaka kullanılarak yapılan plaka yükleme deneyinde elde edilmiş düşey yatak katsayıları (MN/m<sup>3</sup>)

Zemin özelliği	Gevşek	Orta sıkı	Sıkı
Kuru veya nemli kum	6~18	18~90	90~300
Suya doygun kum	7,5	24	90

Hesaplara başlanılırken henüz temel genişliği tayin edilmediği için, kohezyonsuz zeminlerde genişliğin, tahmini temel kalınlığının 15 katı olarak alınması uygundur. Buna göre hesap yapıp k değeri elde edildikten sonra, aşağıdaki eşitlikler yardımıyla temelin karakteristik uzunluğu  $1/\beta$  bulunur:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{D}} \quad (5.11)$$
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Denklemler yardımıyla bulunan temel karakteristik uzunluğu ( $1/\beta$ ) 5 ile çarpılarak temel tabanındaki gerilmenin etki alanı çapı bulunur. Bu çap başlangıç için tahmin edilen B temel genişliği değeri ile kıyaslandığında oran 2'den büyükse  $1/\beta$  değeri B değeri yerine konularak k yatak katsayısı yeniden hesaplanır. Burada, karakteristik uzunluğun 5 katının temel genişliği B'nin etki alanı olan 1,5B'ye yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilmiştir.

Kohezyonsuz zeminlerde SPT darbe sayısına bağlı olarak (5.12) eşitliği de kullanılabilir. Bazı zeminler için bu eşitlik yardımıyla elde edilmiş değerler tablo 5.3 ile verilmiştir.:

$$k_{0,3} = 6N \quad (5.12)$$

Vesic, Terzaghi tarafından kohezyonsuz zeminlerde zemin modülünün saptanması için önerilen ve karakteristik uzunluğun beş katı olan eşdeğer plakanın çok büyük olduğunu düşünmüştür. Yarı sonsuz elastik bir zemin üzerindeki dairesel rijit plağın oturmalarını, Winkler zeminindeki plak oturmaları ile

karşılaştırarak, gerçek durumu temsil edecek plaka çapının, Terzaghi'nin önerdiği çapın yaklaşık yarısı olduğu sonucuna varmıştır. Buna göre  $q_c$  uç mukavemeti olmak üzere, Vesic tarafından önerilen eşdeğer plaka çapı (5.13) ile verilen eşitlikten hesaplanabilir:

$$B = \frac{4h}{\pi} \sqrt[3]{\frac{E}{E_s}} \quad E_s = 2q_c \quad (5.13)$$

**Tablo 5.3:** Kum zeminde SPT darbe sayılarına ait denklemlerle elde edilmiş düşey yatak katsayıları ( $\text{MN/m}^3$ )

Zemin özelliği	Gevşek	Orta sıkı	Sıkı
Kuru veya nemli kum	9~27	27~135	135~450
Suya doymuş kum	10,5	36	135

### 5.1.2. Kohezyonlu zeminlerde düşey yatak katsayısı hesabı

Kohezyonlu zeminlerde kalıcı yükler altında zamana bağlı olarak konsolidasyon oturması meydana gelir. En büyük moment ve gerilmeler de konsolidasyon sonrasında ortaya çıkmaktadır. Plaka yükleme deneyleri nadiren konsolidasyon oturmasının tamamlanması gereken süre boyunca uygulanmaktadır. Bu nedenle Terzaghi  $k_{0,3}$  değerlerini sadece katı killer için vermiştir. Terzaghi tarafından verilen  $k_{0,3}$  değerleri Tablo 5.4'de görülmektedir.

**Tablo 5.4:** Kohezyonlu zeminlerde 0,30m yarıçaplı plaka ile yapılan yükleme deneyinde elde edilmiş düşey yatak katsayıları

Zemin karakteristiği	Katı kil	Çok katı kil	Sert kil
Serbest basınç mukavemeti $q_u$ ( $\text{MN/m}^2$ )	0,1~0,2	0,2~0,4	>0,4
$k_{0,3}$ ( $\text{MN/m}^3$ )	15~30	30~60	>60

Katı killer ideal elastik homojen malzeme olarak tanımlanabilecekleri için, uygulanan yük altındaki oturmalar alanın genişliği ile doğru orantılı değişir. Bu durumda yatak katsayısı da B boyutu ile ters orantılı olarak değişir:

$$k = k_{0,3} \frac{1}{B} \quad (5.14)$$

Yumuşak ve orta katı, normal konsolide, serbest basınç mukavemeti  $0,1\text{MN/m}^2$  değerinden küçük killer için tam drenajlı yükleme deneyinden elde edilen  $k_{0,3}$  değerleri çok düşüktür. Bu yüzden Terzaghi plak ve kiriş temellerin eğilme momentlerinin hesabında rijit olarak düşünülmesi gerektiğini söylemiştir. Hesaplar için plak sonlu boyutlarda ve çapı, kalınlığının 15 katı olarak düşünülmelidir.

Şerit yük veya tekil yüke maruz radye temel durumunda, yüklenmiş alanın boyutları tekil yükün etkime alanından büyük veya küçük olabilir. Eğer yükleme alanı, tekil yükün etkime alanı olan  $5/\beta$  değerinden büyükse, yatak katsayısı  $5/\beta$  ile belirlenir. Eğer küçükse, k'nın hesabı gerçek genişlik düşünülerek yapılır. İki doğrultuda eşit olmayan kolon aralıkları olması durumunda Terzaghi hesaplarında yatak katsayısı için iki ayrı değere ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Kolon merkezleri arasındaki büyük açıklık  $L_1$ , küçük açıklık  $L_2$ ,  $L_1$ 'e dik doğrultuda binanın oturduğu toplam alan L olmak üzere, büyük açıklık doğrultusundaki eğilme momentlerinin hesabında yüklü alan olarak  $L_1 \times L$ , küçük açıklık doğrultusundaki eğilme momentlerinin hesabında yüklü alan olarak  $L_1 \times L_2$  kullanılır.

Kum zemindeki bir plak için, temelin merkez ve kenarındaki aynı şiddette gerilmelerin kenarlarda daha büyük oturmalara yol açacağı beklendiği için, yatak katsayısının merkezden kenarlara doğru azalacak şekilde düzeltilmesi gereklidir. Kil zeminlerde ise tam tersi bir davranış beklenir. Bu durum Baker tarafından tanımlanan yöntemde yaklaşık olarak dikkate alınmıştır.

Çeşitli zeminler için düşey yatak katsayıları Tablo 5.5 ile verilmiştir.



**Tablo 5.5:** Çeşitli zeminler için yaklaşık düşey yatak katsayıları

Zemin cinsi	k (kN/m <sup>3</sup> )	
Gevşek kum	4800~16000	
Orta sıkı kum	9600~80000	
Sıkı kum	64000~128000	
Killi orta sıkı kum	32000~80000	
Siltli orta sıkı kum	24000~48000	
Killi zeminler	q <sub>u</sub> < 200 kPa	12000~24000
	200 kPa < q <sub>u</sub> < 400 kPa	24000~48000
	q <sub>u</sub> > 800 kPa	> 48000

### 5.1.3. Kirişler altında düşey yatak katsayısı

Zemin ortamı sıkı kil ve kiriş genişliği 30cm'den fazla ise Terzaghi yatak katsayısının (5.15) eşitliği kullanılarak hesaplanmasını önermektedir:

$$k_{0L} = k_{0,3} \frac{L + 0,5}{1,5L} \quad (5.15)$$

B genişliğindeki bir temel için yatak katsayısı genişlikle ters orantılı olarak değişir:

$$k = \frac{k_{0L}}{B} \quad (5.16)$$

Çok uzun bir kiriş için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$k = \frac{2k_{0,3}}{3B} \quad (5.17)$$

Katı kil üzerine oturmuş sonlu ve çok uzun kirişlerde yer değiştirmeleri ve momentleri hesaplamak için kullanılacak yatak katsayısı (5.18) ile elde edilebilir:

$$k' = k \cdot B \quad (5.18)$$

Çok uzun kirişler için Brooms tarafından aşağıdaki eşitliğin kullanılması önerilmiştir:

$$k = \frac{\alpha k_{0,3}}{B} \quad (5.19)$$

Buradaki  $\alpha$  katsayısı ise Vesic tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\alpha = 0,52 \sqrt[12]{\frac{kB^4}{EI}} \quad (5.20)$$

Brooms, önerdiği eşitliği, zemin ve kiriş özelliklerini ayrı ayrı simgeleyen iki parçaya ayırmıştır:

$$\alpha = n_1 \cdot n_2 \quad (5.21)$$

$n_1$ : zeminin serbest basınç mukavemetine bağlı terim

$n_2$ : kiriş özelliklerine bağlı terim

Vesic'in önerdiği eşitlikte yer alan 12. dereceden kök nedeniyle bu katsayılar çok küçük aralıklarda değişebilmektedirler. Brooms çalışmalarında katı zeminlerde  $n_1$  ve  $n_2$  için yaklaşık 0,40 değerini elde etmiştir. Bu katsayılarla hesaplanacak olan  $\alpha$  değerinin 0,16 çıktığı ve bu değer Terzaghi'nin önerdiği 2/3 değerinden çok daha küçük olduğu görülmektedir.

Kögler ve Scheiding tarafından kare temellerin yatak katsayısının hesabı için (5.22) eşitliği önerilmiştir:

$$k = E_s \frac{B + 2H}{BH} \quad (5.22)$$

B: temel genişliği

H: sıkışabilir tabaka kalınlığı

$E_s$ : sıkışabilir tabakanın elastisite modülü

## 5.2. Yatay Yatak Katsayısı Hesabı

Yanal yüklere maruz yapılarda, yapı hareketi, zemin-yapı arasında doğacak pasif kuvvetler tarafından engellenecektir. Bu durum Winkler modeliyle tanımlanabilir. Fakat bu tip yapılara uygulanan yüklerin genellikle zemin yüzeyinde hasara yol açabilecek büyüklükte deformasyonlara veya en azından doğrusal olmayan davranışlara sebep olmasından dolayı bu durum için Winkler modelinin uygulanmasının sonuçları oldukça şüphelidir. Özellikle kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killerde, hatta bazen aşırı konsolide killerde dahi bu düşünce doğrudur. Ama en azından ön boyutlandırma için bir fikir vermesi açısından yatay yatak katsayısının kullanılması ile Winkler modeli uygulanabilir.

Katı kilde yatak katsayısı derinlik boyunca sabit kabul edilebilir ve 30 cm çapında alana zemin yüzeyinde uygulanan düşey yükleme testi ile elde edilen yatak katsayısı değerinin iki katı kullanılabilir. Aşırı konsolide olan Londra kili üzerinde yapılan deneyler, yatay yatak katsayısının, düşey yatak katsayısının 1,6 katı olduğunu göstermiştir.

Yatay yüklerin çok uzun süre etkimesi durumunda kazık deformasyonları artacaktır. Killi zeminlerde eksenel ve yatay yüklü kazıklar ve kazık grupları ile yapılan araştırmalar, yüzeysel temellerin aksine, kazıklarda uzun dönem içinde oturmanın, ani çökmenin 1,1~1,25 katı olduğunu göstermiştir. Yer değiştirmeler yatak katsayısıyla ilişkili olduğundan, burada verilen ani oturmalara bağlı katsayılar yukarıdaki oranlarda azaltılmalıdır.

Kum zeminde yatay doğrultudaki yatak katsayısı, düşey doğrultudaki yatak katsayısından farklıdır ve derinlikle de artar. Kazık genişliği etkisini dahil ederek ve katsayının derinlikle doğrusal değiştiğini kabul ederek kohezyonsuz bir zeminde B genişliğindeki bir kazık için (5.23) eşitliği verilebilir:

$$k_{0h} = \frac{nz}{B} \quad (5.23)$$

z: zemin yüzeyinden itibaren derinlik

n: Terzaghi tarafından zeminin rölatif sıklığının bir fonksiyonu olarak tanımlanan yatay zemin reaksiyon sabiti (Tablo 5.6 kullanılarak elde edilebilir)

Terzaghi bu konuda verdiği rakamların kaynağı hakkında açıklama yapmamıştır. Fakat sonrasında kohezyonsuz zeminlerde kazıkların yatay yer değiştirmeleri üzerinde yapılan çalışmalar, kazık yer değiştirmelerinin bu sabitlerle yapılan hesaplardan daha küçük olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle aşağıdaki tabloda, Terzaghi tarafında verilen değerler iki katına çıkarılarak sunulmuştur.

**Tablo 5.6:** Kohezyonsuz zeminlerde yatak katsayısının hesabı için kullanılan n katsayıları

Zemin cinsi	Gevşek	Orta sıkı	Sıkı
Kuru veya nemli kum	4.2	12.6	33.6
Su altındaki kum	2.4 (5.1)	8.4 (15)	20.4 (33)

Reese, Cox ve Koop, su altındaki zeminlerde tam ölçekli olarak yaptıkları deneyler sonucunda daha büyük n katsayı değerleri bulmuşlardır. Bu değerler tabloda parantez içinde verilmiştir.

Arazide yatay yatak katsayısının hesabı için, düşey yatak katsayısında yapılabilecek bir yükleme deneyi yoktur. Bu değerler hesaplanmak istenirse kazık yükleme deneyleri yapılması gerekmektedir. Killi zeminler için deney yükü, kazık etrafındaki zeminin aşırı konsolidasyonunu sağlayacak şekilde uzun süreli uygulanmalıdır. Üniform kum zeminlerde ise elastisite modülü ve bundan dolayı da yatak katsayısı derinlikle 1'den farklı bir kuvvetle artabilmektedir. Bu durumda n katsayısının yerini alabilecek başka sabitlere gerek duyulmaktadır.

Bazı çalışmalar orta sıkı bir kum zeminde yatak katsayısı yaklaşık 40 ardışık yüklemeden sonra üç kat azaldığını göstermiştir. Reese, Cox ve Koop, deneylerinde azalmanın daha az olduğunu bulmuşlardır. Zemin özelliğinin bozulması rölatif sıkılığın bir fonksiyonudur ve bu bozulma gevşek kumlarda diğer tüm zeminlerdekinden fazladır. Bundan dolayı, doğru bir hesap yaklaşımı için zeminin başlangıç ve nihai zemin modülü değerleri veya bu durumdaki zeminin davranış modeli bilinmelidir.

Brooms, kazık uzunluğunun kazık çapının beş katından büyük olması durumunda yatay yatak katsayısının hesaplanması için, kohezyonlu zeminlerde

kısa ve uzun süreli yüklemeler için aşağıda verilen iki ayrı eşitliğin kullanılmasını önermiştir:

$$k_h = \frac{120C_u}{D} \quad (\text{kısa süreli yükleme durumu}) \quad (5.24)$$

$$k_h = \frac{20C_u}{D} \quad (\text{uzun süreli yükleme durumu}) \quad (5.25)$$

$C_u$ : drenajsız kohezyon

$D$ : kazık çapı

Eşitliklerden de görülebileceği gibi Brooms, uzun süreli yükler altında oluşan yer değiştirmelerin, kısa süreli yükler altında oluşan yer değiştirmelerden 6 kat daha büyük olduğunu kabul etmiştir.

Gabr ve Borden (1988), dilatometre deneyi sonuçları kullanılarak yatay yatak katsayısının hesaplanması için (5.26) eşitliğinin kullanılmasını önermiştir:

$$k_{h0} = (P_0 - \sigma_h) / \text{bıçak yarı kalınlığı} \quad (5.26)$$

$P_0$ : dilatometre deneyiyle elde edilen düzeltilmiş değer

$\sigma_h$ : sükunetteki arazi yatay gerilmesi

Bu yöntem,  $P_0$ 'ın tespit edilebildiği bütün zeminler için uygundur.  $\sigma_h$ 'ın hesaplanması için Marchetti ve Lacasse&Lune bazı yöntemler vermişlerdir.

**Tablo 5.7:** Terzaghi'ye göre yatay yatak katsayısı değerleri

Zemin Cinsi	Yatak katsayısı (MN/m <sup>3</sup> )
%88 kum %12 killi yıkanmış zemin	20~30
Sıkı tabakalaşmış sert kum	100~125
Yaşlı dolgu kumu	7~13
Temiz yıkanmış kum	20~40
Sağlam tabakalaşmamış örselenmemiş kum	20
Yıkanmış zemin (%16 su içeren kumlu balçık)	73~120
Küçük daneli maden cürufllu zemin	50~60
Çakıl yatağı	30~40

**Tablo 5.8:** Soletanche'ye göre yatay yatak katsayısı değerleri

İçsel sürtünme açısı, $\emptyset$	$k_h$ (MN/m <sup>3</sup> )
10	7,85
20	13,67
30	26,40
40	58,75

**Tablo 5.9:** Sulzberger'e göre yatay yatak katsayısı değerleri

Zemin Cinsi	Yatak katsayısı (MN/m <sup>3</sup> )	
Hafif turba ve bataklık arazi	5~10	
Ağır turba ve bataklık arazi	10~15	
İnce kıyı kumu	10~15	
Kum, çakıl ve humuslu dolgu	10~20	
Balçık zemin	Islak	20~30
	Rutubetli	40~50
	Kum	60~80
	Sıkı kum	100
Az taşlı balçık ve sıkı kumlu humus	60~80	
Çok taşlı balçık	80~100	
Çok miktarda ince kumlu ince çakıl	70~90	
İnce kumlu orta çakıl	90~110	
Kaba kumlu orta çakıl	110~130	
Çok miktarda kaba kumlu kaba çakıl	110~130	
Az miktarda kaba kumlu kaba çakıl	130~160	
Az miktarda kaba kumlu ve çok sağlam tabakalaşmış kaba çakıl	160~200	

Pek çok araştırmacı farklı zeminler üzerinde yaptıkları deneylerden yola çıkarak bu zeminler için yatay yatak katsayıları vermişlerdir. Terzaghi, Soletanche, Sulzberger ve farklı araştırmacılar tarafından elde edilen yatay yatak katsayısı değerler sırasıyla Tablo 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10 ile verilmiştir.

**Tablo 5.10:** Çeşitli zeminler için yaklaşık yatay yatak katsayıları

Zemin cinsi	k (MN/m <sup>3</sup> )
Sıkı kumlu çakıl	220~400
Orta sıkı kaba kum	157~300
Orta sıkı kum	110~280
İnce kum	80~200
Sert kil (ıslak)	60~220
Sert kil (suya doymuş)	30~110
Orta-sert kil (ıslak)	39~140
Orta-sert kil (suya doymuş)	10~80
Yumuşak kil	2~40

### 5.2.1. Zemin elastisite modülü kullanılarak yatay yatak katsayısının belirlenmesi

DIN 4014'de (1977) yatay yatak katsayısının elastisite modülüne bağlı yaklaşık hesabı için, B temel genişliği olmak üzere aşağıdaki eşitlik önerilmiştir:

$$k_h = E_s / B \quad (5.27)$$

Glick (1948), diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlardan yararlanarak,  $\mu$  Poisson oranı olmak üzere aşağıdaki bağıntıyı vermiştir:

$$k_h' = \frac{22,4E_s(1-\mu)}{(1+\mu)(3-4\mu)[21n(2L/B)-0,443]} \quad (5.28)$$

Çelik ve beton kazıklar için (5.28) bağıntısı Francis (1964) tarafından iterasyonla hesaplanarak aşağıdaki hale getirilmiştir:

$$k_h' = \frac{19,5E_s(1-\mu)}{(1+\mu)(3-4\mu)(8,5-\log k_h')} \quad (5.29)$$

Verilen iki denklemden yararlanılarak yatay yatak katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$k_h = k_h' / B \quad (5.30)$$

Elastik zemine oturan yüzeysel temeller için, EI temelin eğilme rijitliği olmak üzere, Vesic (1961) aşağıdaki eşitliğin kullanılmasını önermiştir:

$$k_s' = 0,65 \left[ \frac{E_s B^4}{EI} \right]^{1/12} \frac{E_s}{1-\mu} \quad (5.31)$$

Bowles ise kazık temeller için bu bağıntının iki katının kullanılmasını önermiştir. Bu durumda yatay yatak katsayısı (5.32) ile elde edilebilir:

$$k_h = 2k_s' / B \quad (5.32)$$

### 5.2.2. Zemin taşıma gücü bağıntıları kullanılarak yatay yatak katsayısının belirlenmesi

Bowles (1989), yatay ve düşey yatak katsayılarının derinlikle değişiminin tahmin edilmesi için aşağıdaki genel bağıntıyı önermiştir:

$$k_s = A_s + B_s z^n \quad (5.33)$$

Burada  $A_s$ ,  $B_s$  ve  $n$  önceden bilinmeyen ve her özel arazi koşulu için yatay yükleme deneyi sonuçları kullanılarak hesaplanan sabitlerdir ve sığ temellerin taşıma gücü ifadelerine bağlı olarak aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$A_s = 40[cN_c + BN_\gamma/2] \quad (5.34)$$

$$B_s = 40[\gamma z N_q] \quad (5.35)$$

Bowles, düşey yatak katsayısını, sürekli bir temelin taşıma gücü bağıntılarından yararlanarak (5.36) ile ifade etmiştir:

$$k_s = 40[cN_c + \gamma z N_q + BN_\gamma/2] \quad (5.36)$$



Francis(1964), kazık cidarındaki zeminin kayma gerilmelerini de göz önüne alarak, yatay yatak katsayısının, düşey yatak katsayısının iki katı kadar alınmasını önermiştir. n=1 için:

$$k_h = [80cN_c + 40BN_\gamma] + [80\gamma zN_q] \quad (5.37)$$

Bowles(1989), yaptığı araştırmalarda  $k_h$  değerinin kazık kesit şekline de bağlı olduğunu göstermiş ve (5.37) denkleminin kare kazıklar için kullanılmasını önermiştir. Daire kesitli kazıklar içinse aşağıdaki denklemi vermiştir:

$$k_h = s_1 A_s + s_2 B_s z^n \quad (5.38)$$

Burada  $s_1$  ve  $s_2$  (5.39) ile verilen aralıklarda değişen sabitlerdir:

$$s_1 = 1,3 \sim 1,7 \quad s_2 = 2,0 \sim 4,4 \quad (5.39)$$

Bowles ise bu hesap için farklı katsayılarla benzer bir yöntem önermiştir. Bowles, farklı derinliklerdeki farklı düğüm noktalarına tekabül eden  $k_h$  değerlerinin hesaplanması için (5.40) formülünü vermiştir:

$$k_h = s_1 A_s + s_2 B_s z^n \quad (5.40)$$

$A_h$  ve  $B_h$ , aşağıdaki dayanma kapasitesi ifadeleri kullanılarak hesaplanabilir:

$$A_h = F_{w1} C_m C (cN_c + 0,5\gamma BN_\gamma) \quad (5.41)$$

$$B_h = F_{w2} C_m C \gamma N_q \quad (5.42)$$

Z:  $k_h$ 'ın hesaplanmaya çalışıldığı derinlik

Bowles tarafından, yukarıdaki sabitler için aşağıdaki değerlerin alınması önerilmiştir:

$kN/m^3$  cinsinden çalışılırken:  $C \approx 40$ ,  $C_m = 1,5 \sim 2,0$ ,  $n = 0,4 \sim 0,6$

kohezyonlu zeminlerdeki kare ve HP kazıklar için:  $F_{w1}, F_{w2} = 1,0$

dairese kazıklar için:  $F_{w1} = 1,3 \sim 1,7$   $F_{w2} = 2,0 \sim 4,4$

Yukarıdaki denklemler yardımıyla hesaplanan  $k_h$  değerleri yardımıyla, ilgili düğüm noktalarındaki  $K_j$  değerleri elde edilebilir.

### 5.3. Dinamik Yatak Katsayısı

Kazık temeller için geliştirilmiş mevcut tasarımlar, geleneksel sismik katsayı yöntemi, sismik yatay yük taşıma kapasitesi yöntemi, dinamik analiz yöntemi gibi çözüm yöntemleri kullanarak kazıkların sismik davranışını belirlerler. Bu tasarım yöntemleri aynı yapı mühendisliği düşüncesindedirler: sismik yükler altında kesin deformasyon kapasitesi derecelerini elde etmek. Fakat zeminin sismik dayanımının belirlenmesinde, deprem sırasındaki zemin yayı (dinamik yatay yatak katsayısı), zemin dayanım parametresi olmaktan çok bir zemin sabiti olan statik yatak katsayısından yola çıkılarak elde edilir.

Kazık temeller zeminle çevrili oldukları için, hemen hemen hiç tepki titreşimi oluşturmazdıkları varsayılır. Oysa kazık temeller sismik hareketlere tepki gösterirler, bu da çevreleyen zemindeki ani tepki deformasyonlarını artırır. Deprem sırasında kazık temele etkiyen kuvvetler üst yapıya iletilir. Üst yapının tepkisi ise zemine iç kuvvet olarak geri döner. Sismik hareketlerin dalga formları her depremde farklılık gösterdiği için, bu kuvvetler de depremden depreme farklılık gösterirler. Bu nedenlerle kazık temellerin sismik davranışları çok karmaşıktır ve mevcut sismik tasarım yöntemleri bu detayları kapsayacak kadar gelişmiş değildir. Kazık temellerin sismik davranışlarının belirlenmesinde, deprem sırasındaki yay özelliklerini ve doğrusal olmayan diğer zemin faktörlerini iyi incelemek gereklidir.

K katsayısı genellikle, yapısal geometri, malzeme özellikleri veya eksenel yükleme değişse bile sabit kalan statik bir değer olarak hesaplanmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar ışığında Minnesota Üniversitesi İnşaat mühendisliği bölümü tarafından bir rapor hazırlanmıştır. Daha çok yol, kaldırım gibi yapıların hesabına yönelik hazırlanmış olan bu raporda yer alan tablo, dinamik k değerlerinin farklı geometrilere, malzeme modellerine ve yüklemelere göre nasıl hesaplanacağına dair formüller sunmaktadır. Bu formüllerden gerçeğe en yakın değerler vereni, tekil eksenel yükleme (P) için hazırlanmış olan (5.43) denklemdir. [6]

$$k_p = \frac{151448e^{0,054P^2}}{e^{(0,647P+0,171E)}} \quad (5.43)$$

Dinamik yatak katsayısının bir diğer hesap şekli ise, basit kiriş teorisini kullanarak yükleme sırasında kaydedilen kazık boyunca eğilme momenti dağılımı  $M(z)$ 'den geri hesap yapmaktır. [7]

$$k = \frac{d^2}{dz^2} M(z) \quad (5.44)$$

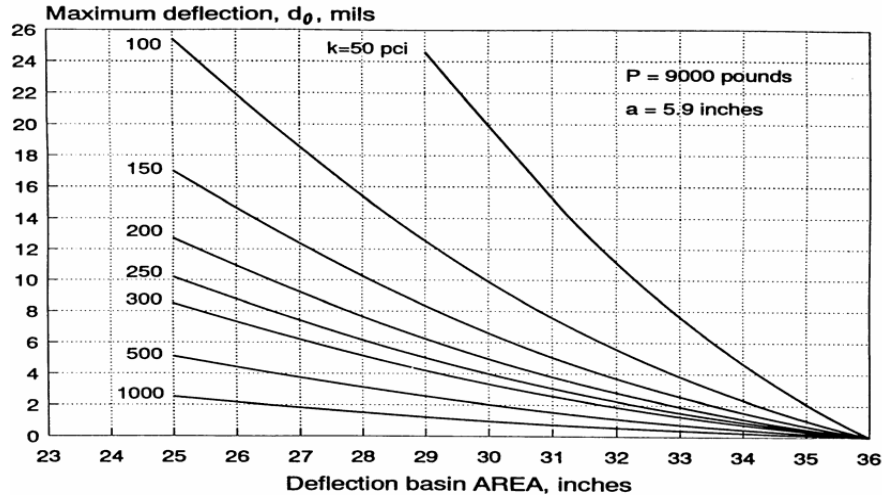
k: kazık üzerindeki yanal tepki

z: derinlik

AASHTO tarafından yol yapılarının tasarımı için hazırlanmış kaynakta, geri hesap yönteminin yanında, deformasyon alanlarından yola çıkılarak da dinamik yatak katsayısı değerinin elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu yöntemle göre, standart yükleme plakasının merkezindeki ( $d_0$ ) ve sırasıyla merkezden 12 in ( $d_{12}$ ), 24 in ( $d_{24}$ ), 36 in ( $d_{36}$ ) mesafelerdeki deformasyonlardan yola çıkılarak alan belirlenir. Bu deneyin yapılabilmesi için 9000 lb (40 kN) yük uygulanmalıdır. Buna göre alan (5.45) ile hesaplanır: [8]

$$A = 6(1 + 2(d_{12} / d_0)) + 2(d_{24} / d_0) + (d_{36} / d_0) \quad (5.45)$$

(5.45) denkleminle belirlenen alan kullanılarak, Şekil 5.1 yardımıyla dinamik k katsayısı bulunur.



Şekil 5.1: Deformasyon alanından yola çıkılarak efektif dinamik k katsayısının belirlenmesi için grafik[8]

Sridharan ve Gandhi, yaptıkları araştırmalar sonucunda dinamik yay sabiti diye tabir ettikleri katsayıyı, herhangi bir frekanstaki dinamik yükün ilgili şiddete oranı olarak tanımlamışlardır. Bu araştırmalar sonucunda, dinamik yay sabitiyle dinamik yük şiddeti arasında ters bir bağıntı olduğunu, deprem şiddeti arttıkça dinamik yay sabiti değerinin azaldığını belirlemişlerdir. [10]

Yapılan arazi çalışmaları sonucunda kohezyonlu zeminlerdeki dinamik k katsayısının statik k katsayısı değerinin yaklaşık iki katı olduğu, granüler zeminlerde ise her iki değerin hemen hemen eşit oldukları ve pratik amaçlarla bu şekilde alınabilecekleri belirtilmiştir. Tomisawa ve Nishikawa tarafından yapılan Uluslararası Geoteknik Santrifüj Modelleme ve Ağ Oluşturma Sempozyumu'nun 2001 yılında yayınlanan bildirimde yayınlanan araştırmalara göre ise, kaolin kilinde dinamik yatay yatak katsayısı, statik k değerinin 3 katı iken, volkanik küllerde bu iki değer birbirine eşit olmaktadır.

Fukushima ve arkadaşları tarafından, uçta zemin çimentosuna giren volkanik tüfe gömülü 1:50 oranındaki çelik model kazık üzerinde yapılan araştırmalarda, dinamik yatak katsayısının hesabı için  $p\sim\delta$  (tepki kuvveti~deformasyon) ve sınır değer çözümleri kullanılmıştır. Deneyler ve hesaplamalar sonucunda  $p\sim\delta$  yöntemiyle belirlenen dinamik yatay yatak katsayısı statik değerin 3,3 katı olurken, sınır değer yönteminde statik değerin 2,3 katı olduğu belirlenmiştir. Aynı yöntemleri silika kumu ve kaolin kili üzerinde yaptıklarında ise, oranların zemin türüne göre ciddi boyutta değiştiği görülmüştür. Bu nedenle sonuç olarak, dinamik yatak katsayısının statik yatak katsayısından yola çıkılarak hesaplanamayacağını belirtmişlerdir. [11]

Yapım ve onarım aşamasındaki ulaştırma yapılarının mekanik ve ampirik tasarımı için 2004 yılında hazırlanan final raporunda ise, farklı zeminlerde yapılan plaka yükleme deneyinden geri hesapla belirlenmiş dinamik yatak katsayıları Tablo 5.11 ile verilmiştir. Bu tablo rijit döşemeler için hazırlanmış olup, yüzeysel temellerin tasarımında kullanılabilir. Derin temel tasarımı için güvenilir sonuçlar vermemesi mümkündür.

**Tablo 5.11:** Farklı zeminlerde dinamik yatak katsayısı değerleri [9]

Zemin cinsi	Dinamik yatak katsayısı değerleri (MN/m <sup>3</sup> )		
	En az	En çok	Ortalama
Çakıl	97	125	111
Kaba kum	55	111	83
İnce kum	42	83	62
Silt	7	46	26
Siltli çakıl	83	138	111
Plastik kil	7	71	39
Orta plastisiteli kil	7	60	34
Yüksek plastisiteli kil	11	61	36

#### 5.4. Yatak katsayısının derinlikle değişimi

Kohezyonlu zeminlerde Terzaghi tarafından tanımlanmış yatay yatak katsayısı, zeminin basınç mukavemeti  $q_u$  ile yakından ilişkilidir. Sadece, üzerindeki yükün kalkması sebebiyle aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatay katsayısı derinlikle değişmez. Fakat kuruma ile konsolide olmuş killer ve diğer zeminlerde yatak katsayısı derinlikle artar. Bu durum aşağıdaki bağıntıyla gösterilebilir:

$$k=k_n z^n \quad (5.46)$$

Yatak katsayısının derinlikle değişimi genellikle yatay yüklü kazıkların hesaplanmasında dikkate alınır. Bunun yanında kazıkların eksenel yükler veya burulma momentleri için hesabında da yatak katsayısı ön boyutlandırma için kullanılır.

Winkler modelinin aksine, gerçekte zeminler elasto-plastik bir davranış gösterirler. Yatak katsayısının elasto-plastik bir davranış gösterebilmesi için akma durumunu da içermesi gerekir. Reese, Cox ve Koop zamana bağlı özellikleri de içine alan doğrusal-olmayan davranışı incelemişlerdir. İdealize edilmiş plastik zemin davranışını tensil etmek için elastik zemin yayı  $k$  ve akma değeri  $t_y$  tanımlanmalıdır. Analizi basitleştirmek için, her iki değer de derinlikle değişmediği aşırı konsolide zemin durumu göz önüne alınmıştır. Bu durumda,

zemin mukavemeti herhangi bir derinlikte S maksimum deformasyon değerine kadar doğrusaldır. S maksimum deformasyon değeri (5.47) ile hesaplanabilir:

$$S = \frac{t_y}{k} \quad (5.47)$$

Maksimum deformasyondan daha büyük yer değiştirmelerde zemin mukavemeti sabittir. Maksimum deformasyon hesabında kullanılan her iki değişken de derinlikle değişmediğinden S de sabittir.

## 6. KAZIKLARIN ÇEKİP-ÇIKARMA/ÇEKME DAYANIMI

Bazı durumlarda kazıklar zeminden dışarı yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Bu gibi durumlarda kazığın maksimum direnci aşağıdaki formülle bulunur:

$$T_{u(\text{brüt})}=T_{u(\text{net})}+W \quad (6.1)$$

$T_{u(\text{brüt})}$ : kazığın brüt taşıma kapasitesi

$T_{u(\text{net})}$ : kazığın net taşıma kapasitesi

W: kazık ağırlığı

Net taşıma kapasitesi  $T_{u(\text{net})}$  kohezyonlu ve taneli zeminler için farklı şekillerde hesaplanır.

### 6.1. Kohezyonlu Zeminler İçin Net Taşıma Kapasitesi $T_{u(\text{net})}$ Hesabı

Kohezyonlu zeminlerde net taşıma kapasitesi (6.2) ile hesaplanır:

$$T_{u(\text{net})}=Lp\alpha'c_u \quad (6.2)$$

L: kazık uzunluğu

p: kazık çevresi

$c_u$ : zeminin drenajsız kohezyonu

$\alpha'$ : adhezyon faktörü

Adhezyon faktörü seçimi kazık malzemesi ve yapım şekline göre değişiklik gösterir:

Yerinde dökme beton kazıklarda:

$$c_u \leq 80 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \alpha' = 0,9 - 0,00625 c_u \quad (6.3)$$

$$c_u > 80 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \alpha' = 0,4 \quad (6.4)$$

Boru kesitli kazıklarda:

$$c_u \leq 27 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \alpha' = 0,715 - 0,0191 c_u \quad (6.5)$$

$$c_u > 27 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \alpha' = 0,2 \quad (6.6)$$

## 6.2. Granüler Zeminler İçin Net Taşıma Kapasitesi $T_{u(net)}$ Hesabı

Granüler zeminlerde net taşıma kapasitesi şu formülle hesaplanır:

$$T_{u(net)} = \int_0^L (f_u + p) dz \quad (6.7)$$

L: kazık uzunluğu ( $L > L_{cr}$  ise  $L_{cr}$ 'den parçalı integrasyon yapılır)

p: kazık çevresi

$f_u$ : çekme sırasındaki birim yüzey sürtünmesi

$f_u$  değeri  $z = L_{cr}$  derinliğine kadar lineer olarak artar, bu derinlikten sonrası sabit kalır.  $L_{cr}$  değeri zeminin rölatif sıklığıyla bağlantılıdır ve sıklık arttıkça bir noktaya ( $\approx 70$ ) kadar  $L_{cr}$  de artar. Bu noktadan sonra sabit kalır. (bkz. Şekil 6.1)

$(L/D)_{cr}$  değeri elde edildikten sonra aşağıdaki formülle  $L_{cr}$  bulunur:

$$L_{cr} = (L/D)_{cr} (D) \quad (6.8)$$

$L \leq L_{cr}$  ise:

$$T_{u(net)} = p \int_0^L f_u dz = p \int_0^L (\sigma_v' K_u \tan \delta) dz \quad (6.9)$$

$L \leq L_{cr}$  ve zemin kuru ise:

$$T_{u(net)} = p \int_0^L (\sigma_v' K_u \tan \delta) dz = (1/2) p \gamma L^2 K_u \tan \delta \quad (6.10)$$

$L > L_{cr}$  ise:

$$\begin{aligned} T_{u(net)} &= p \int_0^L f_u dz \\ &= p \left[ \int_0^{L_{cr}} (\sigma_v' K_u \tan \delta) dz + \int_{L_{cr}}^L (\sigma_v' K_u \tan \delta) dz \right] \end{aligned} \quad (6.11)$$

$z \leq L_{cr}$  için  $f_u$  aşağıdaki şekilde hesaplanır:

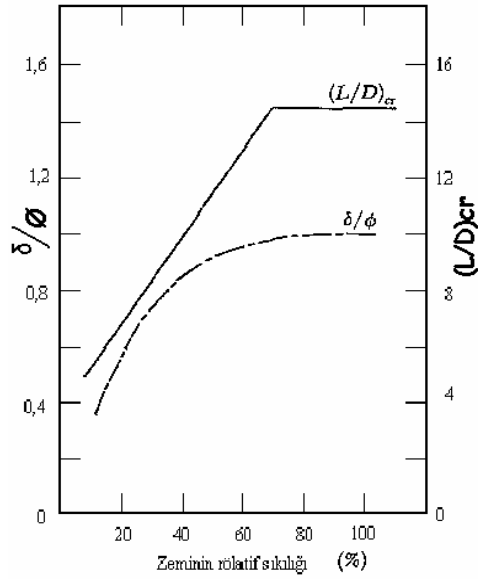
$$f_u = K_u \sigma_v' \tan \delta \quad (6.12)$$

$K_u$ : kaldırma katsayısı (zemin sürtünme açısı  $\delta$ 'ye bağlı olarak grafiklerden alınır)

$\sigma_v'$ : z derinliğindeki düşey efektif gerilme

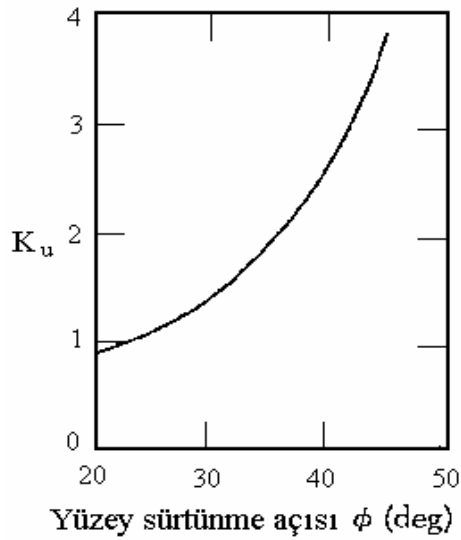
$\delta$ : zemin-kazık sürtünme açısı





Şekil 6.1: Rölatif sıklığa bağlı olarak  $(L/D)_{cr}$  değerinin değişimi

Kaldırma katsayısının zemin sürtünme açısı  $\phi$ 'ye bağlı değişimi Şekil 6.2 ile verilmiştir.



Şekil 6.2:  $\phi$  sürtünme açısına bağlı olarak  $K_u$  değerinin değişimi

### 6.3. İzin Verilebilir Kaldırma Kapasitesi

İzin verilebilir kaldırma kapasitesi, bir kazığın emniyetle taşıyabileceği çekme kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$T_{u(\text{emniyetli})} = T_{u(\text{brüt})} / GS \quad (6.13)$$

$$T_{u(\text{brüt})} = T_{u(\text{net})} + W \quad (6.14)$$

Burada kullanılması gereken güvenlik sayısı  $GS=2\sim3$  civarındadır.

## 7. TEKİL KAZIKLARIN OTURMASI

Kazıkların yük transferi-oturma bağıntısı oldukça karmaşıktır. Pek çok oturma analizi deneye dayalı yöntemler üzerine kuruludur ve kaba yaklaşımlar sunar. Fakat yine de, yapı davranışı hakkında bilgi vermesi ve oturmaların izin verilen sınırlar dahilinde olup olmadığının belirlenmesi açısından gereklidir. Hesaplanan oturmalar, yapı tasarımında kullanılan yük-oturma bağıntılarıyla uygun olmalıdır.

### 7.1. Oturmaların Sebepleri ve Yarattıkları Sorunlar

Kazıklar farklı nedenlerle, farklı şekillerde oturur ve meydana gelen bu oturmalar yapıda pek çok farklı soruna yol açar. İlk olarak oturma sebeplerini inceleyelim:

- Statik yükler altında temel zemininin sıkışması (Yumuşak, normal konsolide killer ve turba zeminler büyük ölçüde sıkışabilirler. Gevşek silt, kum ve çalılar da sıkışabilir zeminlerdir).
- Alçalan yeraltı suyu seviyesine bağlı olarak killerin sıkışması (Su çıkışına bağlı olarak artan efektif gerilme, yüzeyde yük artışı olmasa bile oturmaya yol açar).
- Kohezyonsuz zeminlerin titreşimlere bağlı sıkışması (Gevşek kumlar ve çakıllar bu şekilde sıkışır. Oturma, makine titreşimleri, depremler ve patlamalar nedeniyle oluşabilir).
- Kohezyonlu zeminlerin kurumaya bağlı rötreye uğraması (Plastisitesi yüksek killerde görülür. Farklı sebeplerle yapı zemininde meydana gelen sıcaklık artışları hızlı kurumalara yol açar. Bu tür yüksek plastisiteli killerin su alması da kabarmalara ve temelde çatlamalara yol açabilir).
- Erozyona bağlı olarak temel yapısının zemin desteğini kaybetmesi (Su altı temelleri maksimum erozyon derinliğinin altına kadar uzatılmalıdır).
- Komşu arsalarda yapılan kazı çalışmaları nedeniyle temel yapısının zemin desteğini kaybetmesi (Genelde yumuşak, doymun killerde bu sorun yaşanır).

- Komşu zeminin yanal kaymalarına bağlı olarak temel yapısının zemin desteğini kaybetmesi (Bu tür hareketler toprak kaymaları, yavaş sürüklenmeler veya dayanma yapılarının hareketleri sebebiyle meydana gelebilir.).
- Çukur oluşumu sebebiyle temel yapısının zemin desteğini kaybetmesi (Kalkerli araziler ve kırılan su kanalları bu tür oturmalara sebep olabilir).
- Sıvılaşmaya bağlı olarak temel yapısının zemin desteğini kaybetmesi (Gevşek doygun kumlarda dinamik etkiler sebebiyle gözlenen çok ciddi bir sorundur).
- Negatif çevre sürtünmesi sebebiyle kazığın zemin içine çekilmesi (Yumuşak killerde, çöken zeminlerde meydana gelir).

Yukarıda belirtildiği gibi değişik sebeplerle meydana gelen oturmalar temel yapısına ve üst yapıya ciddi hasarlar verebilir. Büyük çaplı oturmaların yanında, aynı yapıya ait temellerin birbirine göre görelî oturmaları da belirli sınırları aştığı takdirde çatlamalara ve yapısal hasara yol açabilir. Bu farklı oturmalar devam ederse kapılar ve pencereler hasar görür ve açılıp kapanmaları zorlaşır. Daha büyük farklı oturmalar döşeme ve merdivenlerde eğilmelere ve bu yapıların tehlikeli hale gelmesine sebep olur. Bu duruma gelinmişse binanın kullanım izni tekrar gözden geçirilmelidir. Ciddi boyutta farklı oturmalar yapısal bütünlüğü bozarak deprem veya diğer titreşimlerle yapıların yıkılmasına sebep olabilir. Yapının çevreleyen zemine veya çevreleyen zeminin yapıya göre rölatif oturması ise yapı girişlerine ve yapının kamusal alanlarla bağlantılarına hasar verebilir.

Oturmalar üniform veya üniforma yakın olsa bile, belli sınırları aşmaları istenmez. Nükleer santraller gibi hassas çalışma koşulları gerektiren yapılarda hiç oturma olması istenmez. Bunu haricinde, nehir, göl veya deniz kenarındaki yapılarda büyük çaplı oturmalar su baskınlarında ciddi tehlikeler oluşmasına sebep olabilir.

Bu tehlikelere karşı koyabilmek için temel yapılarının üst yapı yüküne ve diğer faktörlere göre oturmaları hesaplanarak, bunların izin verilebilir sınırlar dahilinde olup olmadığı belirlenmelidir.

## 7.2. Tekil Kazıkların Elastik Oturması

Kazıkların elastik oturması üç sebepten meydana gelir. Dolayısıyla toplam oturma (S) da, bu üç sebepten meydana gelen oturmaların toplamına eşittir:

$$S=S_1+S_2+S_3 \quad (7.1)$$

$S_1$ : kazık malzemesinin shaft boyunca elastik kısalması

$S_2$ : kazık ucunda aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma

$S_3$ : kazık boyunca sürtünmeyle aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma

### 7.2.1. $S_1$ 'in hesaplanması

Kazık malzemesi elastik kabul edilirse, shaft boyunca kazığın elastik kısalması (7.2) eşitliği ile hesaplanır:

$$S_1=(Q_{wp}+\xi Q_{ws})L/(A_p E_p) \quad (7.2)$$

$Q_{wp}$ : çalışma yükü altında kazık ucunda taşınan yük

$Q_{ws}$ : çalışma yükü altında shaft boyunca taşınan yük

L: kazık uzunluğu

$A_p$ : kazık kesit alanı

$E_p$ : kazık malzemesinin elastisite modülü

$\xi$ : birim çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımına bağlı bir katsayı (üniform ve parabolik sürtünme direnci dağılımları için  $\xi=0,5$ , üçgen dağılımlar için  $\xi=0,67$ )

### 7.2.2. $S_2$ 'nin hesaplanması

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma, yüzeysel temellerin oturma denklemlerine benzer denklemlerle hesaplanır:

$$S_2=(q_{wp} D/E_s)(1-\mu_s^2) I_{wp} \quad (7.3)$$

$q_{wp}$ : kazık ucundaki gerilme ( $q_{wp}=Q_{wp}/A_p$ )

D: kazık çapı veya genişliği(kısa kenar)

$E_s$ : kazık ucunun çevresindeki zeminin elastisite modülü

$\mu_s$ : zeminin Poisson oranı

$I_{wp}$ : etki faktörü (L/B oranına bağlı olarak Şekil 7.1'den  $I_{wp}=\alpha_r$  değeri alınabilir)

Vesic (1977) ise  $S_2$  oturmasının hesabı için aşağıdaki yarı ampirik bağıntının kullanılmasını önermektedir:

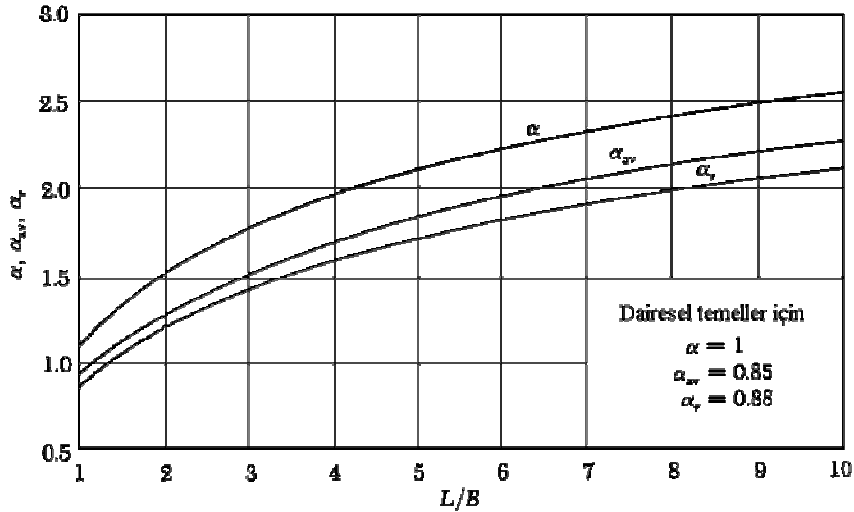
$$S_2=(Q_{wp} C_p)/(D \cdot q_p) \quad (7.4)$$

$q_p$ : kazık ucunda birim alanda taşınabilecek nihai yük

$C_p$ : ampirik faktör (zemin ve kazık türüne bağlı olarak Tablo 7.1'den alınır.)

**Tablo 7.1:** Farklı zemin türlerine göre ortalama  $C_p$  değerleri

Zemin cinsi	Çakma kazık	Fore kazık
Kum (Sıkıdan gevşeye)	0,02~0,04	0,09~0,18
Kil (Katıdan yumuşağa)	0,02~0,03	0,03~0,06
Silt (Sıkıdan gevşeye)	0,03~0,05	0,09~0,12



**Şekil 7.1:** L/B oranına bağlı olarak etki faktörünün değişimi

### 7.2.3. S<sub>3</sub>'ün hesaplanması

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma (7.5) ile verildiği şekilde hesaplanabilir:

$$S_3 = [Q_{ws}/PL][D/E_s][1 - \mu_s^2] I_{ws} \quad (7.5)$$

P: kazık çevresi

L: boy

D: çap

I<sub>ws</sub>: etki faktörü

$$I_{ws} = 2 + 0,35\sqrt{(L/D)} \quad (7.6)$$

$$Q_{ws}/PL = q_{ws} \quad (7.7)$$

Vesic (1977) S<sub>3</sub> oturmasının hesabı için aşağıdaki eşitliğin kullanılmasını önermiştir:

$$S_3 = Q_{ws} \cdot C_s / (L \cdot q_p) \quad (7.8)$$

$$C_s = [0,93 + 0,16\sqrt{(L/D)}] C_p \quad (7.9)$$

Burada C<sub>p</sub>, Vesic'in önerdiği S<sub>2</sub> hesabında kullanılan; kazık ve zemin türüne göre Tablo 7.1 yardımıyla bulunan ampirik faktördür.

### 7.3. Oturmalara Karşı Alınabilecek Önlemler

Büyük çaplı oturmaları engellemek için kazık temel seçimi oldukça maliyetli olmasına karşın en garantili yöntemlerden biridir. Fakat bazen kazık temeller de istenilen maksimum oturma değerini aşabilirler. Bu durumlarda başka tedbirler alınması da gerekebilir.

Oturma potansiyeli yüksek zemini kaldırarak yerine temiz granüler dolgu yapmak, uygulanabilecek çözümlerden birisidir. Fakat oturan tabaka çok derinlere uzanıyorsa yüksek maliyetli olabilir. Ayrıca, dolgu sırasında yapılabilecek yanlış uygulamalar sonrası oluşabilecek cepler ve boşluklar da büyük ölçekte farklı oturmalar yaratabilir.

Kazı yaparak net yükün azaltılması sağlanabilir. Bir katın ağırlığı yaklaşık olarak 1~2ft zemin ağırlığına eşittir. Ayrıca, bodrum tarzı zeminin içine gömülen üstyapı kısımları, binanın zemine ankastreliğini de sağlar.

Sürşarj veya ön yükleme yapılarak, inşaat yapılacak zeminin yapımdan önce oturması sağlanabilir. Taze dolgular üzerine yapılacak inşaatlardan önce bir süre beklenmesi, sürşarj uygulanması veya kum drenleri yapılması da yapımdan önce zeminin oturması için uygulanabilecek yöntemlerdir.

Temelle yapı arasına yerleştirilecek düzey krikoları da yapı oturdukça istenilen şekilde ayarlanarak aşırı ve/veya farklı oturmaların önüne geçilebilir. Çelik kafes, metal kaplama, asfalt döşeme gibi farklı oturmalara karşı yüksek dayanıklı bir yapı türü seçilerek, büyük oturmalar sonrasında da yapının hizmete devam etmesi sağlanabilir.



## 8. NEGATİF ÇEVRE SÜRTÜNMESİ

Kazık ve zemin arasındaki rölatif (görelî) bir hareket, kazık-zemin arayüzünde kayma gerilmeleri oluşmasına sebep olur. Bu tür bir hareket, kazığın üzerinde, kazığı zeminin içine iten veya yukarı çeken yönde kuvvetler olması durumunda mümkündür. Zeminin kazığa göre görelî oturması veya şişen zeminlerin kabarması da bu tür hareketlere yol açar. Tanım olarak, eğer kazığın görelî hareketi aşağı yönde ise (yani kazık yüzündeki kayma gerilmeleri yukarı yönde ise) kaymanın yönü pozitifdir. Benzer şekilde eğer kazığın görelî hareketi yukarı yönde ise, kayma gerilmelerinin yönü negatiftir. [12]

Eskiden terim olarak “yüzey sürtünmesi” kullanılırken, son zamanlarda bu terim yerine “şaft direnci” kullanılmaktadır. Buna bağılı olarak “pozitif ve negatif çevre sürtünmesi” terimleri, kazık üzerindeki itme veya çekme kuvvetlerine bağılı olarak meydana gelen kayma gerilmelerini belirtmekte kullanılırken, “pozitif ve negatif şaft direnci” terimleri ise zeminin görelî oturmasına veya kabarmasına bağılı olarak kazık üzerinde meydana gelen kayma kuvvetlerini anlatmaktadır.

Negatif çevre sürtünmesi, uzun kazıklarda ciddi boyutlara varabilen bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet etkisiyle kazık zemin içine çekilir. Burada bahsedilen “çekme kuvveti”, kazığın bu şekilde zemin içine çekilmesini anlatmaktadır.

Johannesen, Bjerrum ve Bozozuk, kazıklara uygulanabilecek izin verilebilir yükleri aşan çekme yükü ölçümlerini bildirmişlerdir. Bjerrum aynı zamanda negatif çevre sürtünmesini azaltmak için kazığın bitümle kaplanmasının etkilerini kanıtlamıştır. Fellenius ve Brooms, kazık çakarken meydana gelen örselenmeyi takiben zeminin yeniden-konsolidasyonuna bağılı olarak da çekme yükü oluşabileceğine dair ölçümlerini sunmuşlardır.

Şu ana kadar yayınlanan araştırmaların çoğunda, negatif çevre sürtünmesi hesaba katıldığı takdirde izin verilebilir yüke bağılı olarak kazığın dayanma kapasitesinin azaltılması gerekliliğı savunulmuştur. Oysaki negatif çevre sürtünmesi, bir “dayanma kapasitesi sorunu” değil, “oturma” sorunu yaratmaktadır çünkü çekme kuvvetinin şiddeti kazığın dayanma kapasitesiyle doğrudan ilgili değildir. Sonuç olarak, aşağı yönde çekme kuvvetinin bulunduğu bir durumda tasarım yaparken, oturma dağılımına dikkat edilmelidir.

## 8.1. Negatif Çevre Sürtünmesi Oluşumu İçin Gereken Hareket

Negatif çevre sürtünmesi oluşturacak kuvvetler farklı araştırmacılar tarafından farklı tanımlanmıştır.

Walker ve Darvall (1973), tekil kazıkların çevresine yerleştirilen 3m yüksekliğinde bir sürşarj yüküne bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelecek 35mm oturmanın 18m derinliğe kadar negatif çevre sürtünmesi oluşması için yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerde derinliğe bağlı oturma dağılımı ölçülmemiştir.

Bjerin (1977), kazığa 0,12m mesafede meydana gelen 5mm'lik görelî bir yer değiştirmenin 25m derinliğe kadar negatif çevre sürtünmesi yarattığını belirtmiştir. Bu deneyde 5m'lik mesafede görelî yer değiştirme değeri 8mm bulunmuştur.

Bozozuk (1981), kazığı yükleyerek kazık başında 5mm'lik bir görelî hareket meydana getirildiğinde, 20m derinliğe kadar kayma kuvvetlerinin yön değiştirdiğini gözlemlemiştir.

Bjerrum (1969), araştırma yaptıkları bölgede yeni bir dolgu altındaki toplam 2m'lik oturmaya bağlı olarak negatif çevre sürtünmesi oluşurken, bu bölgeye bitişik bir bölgedeki 70 yıllık, aynı yükseklikte ve aynı tip dolgu zemine çakılan aynı tip kazıkların çevresinde de hemen hemen aynı miktarda negatif çevre sürtünmesi olduğunu, fakat kazık çakımı sonrası yeni bir ek oturmanın gözlenmediğini belirtmişlerdir.

Kazık malzemesi zeminden çok daha rijit olduğu için, zamanla, zeminde, kazıkla zemin arasında kazık boyunca kayma kuvvetleri oluşturmaya yetecek boyutta küçük yer değiştirmeler mutlaka oluşacaktır. Yani bütün kazıklar, az ya da çok, muhakkak zemine doğru çekme kuvvetlerine maruz kalacaklardır.

Negatif çevre sürtünmesinin oluşma sebeplerinden bazıları şöyledir:

- Kazığın çakıldığı granüler zeminin üzerine kil dolgu yapılırsa, kil dolguda zamanla meydana gelecek konsolidasyon oturması negatif çevre sürtünmesi yaratır.
- Granüler zeminin altında yumuşak kil zemin varsa, artan yük sebebiyle kilde konsolidasyon meydana gelir. Bu da negatif çevre sürtünmesi yaratır.

- Yer altı su seviyesinin azalması, düşey efektif basıncı artırarak kilde konsolidasyona sebep olur.

### 8.1.1. Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması durumunda negatif çevre sürtünmesi

Şekil 8.1’de, bu durumda negatif çevre sürtünmesinin hangi bölgede meydana geldiği görülüyor.  $\beta$  yöntemine benzer şekilde çevre sürtünmesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$f_z = K' \sigma_v' \tan \delta \quad (8.1)$$

$K'$ : toprak basınç katsayısı ( $K_0=1-\sin\phi$ )

$\sigma_v'$ : herhangi bir  $z$  derinliğindeki efektif düşey gerilme

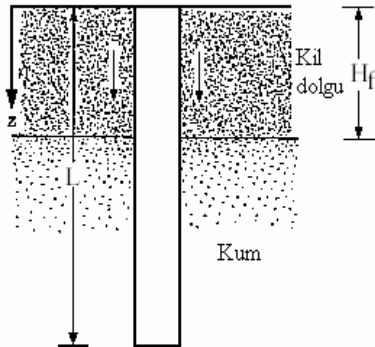
$\delta$ : zemin-kazık sürtünme açısı ( $\approx 0,6\phi$ )

Buna bağlı olarak kazığa aşağı yönde etkiyen toplam kuvvet (toplam negatif çevre sürtünmesi):

$$Q_n = \int_0^{H_f} (pK' \gamma' \tan \delta) z \, dz = (pK' \gamma' H_f^2 \tan \delta) / 2 \quad (8.2)$$

$P$ : kazık çevresi

$H_f$ : dolgu yüksekliği



**Şekil 8.1:** Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması durumunda kazık çevresinde meydana gelen negatif çevre sürtünmesi



## 8.2. Negatif Çevre Sürtünmesini Azaltmak İçin Öneriler

Hesaplar sonucunda kazık oturmasının istenilenden fazla çıkması durumunda kazık boyunu uzatmak veya kazık çapını azaltmak gibi değişiklikler oturmanın istenilen sınırlar dahiline çekilmesini sağlayabilir.

Hesaplar sonucunda kazığın yapısal kapasitesinin (taşıma gücünün) yeterli olmadığı sonucuna varılırsa, kazık kesitini büyütmek, kazık malzemesini değiştirmek veya iyileştirmek gibi çözümler uygulanabilir.

Eğer bu tür uygulamalar pratik veya ekonomik görünmüyorsa, bu durumda yerleştirmeden önce kazık yüzeyi bitüm veya diğer akıcı kaplamalarla kaplanarak negatif çevre sürtünmesi azaltılabilir. ( Fellenius (1975~1979) ve Clemente (1981))

## 9. GRUP KAZIKLARIN STATİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

Kazık gruplarının çözümlenmesi için pek çok yaklaşık yöntem kullanılmıştır. Bu grafik veya sayısal yöntemlerde, uygulanan yükler kazık yerleşimlerine, kesit alanlarına ve eğimlerine göre her bir kazığa paylaştırılır. Bu yaklaşımlar yanal zemin direncini, kazık rijitliğini, kazık başının ankastre veya serbest oluşunu, yapısal esnekliği ve zemin kazık etkileşimine bağlı herhangi bir etkiyi göz önüne almazlar. Oysa bu tür faktörler yük dağılımını önemli ölçüde etkiler ve ihmal edildikleri takdirde yetersiz ve hatalı kazık tasarımı yapılmasına sebep olabilirler. Bu nedenle, yanal yüklerin küçük (düşey yüklerin %20'si civarında) olduğu iki boyutlu basit yapılar haricinde bu yöntemler uygulanmamalıdır. [13]

### 9.1. Rijitlik Yöntemleri

Yapı-kazık-zemin sisteminin davranışı doğrusal değildir. Fakat yapım sırasında büyük çaplı kazık gruplarının çözüm ve tasarımına doğrusal olmayan yöntemleri uygulamak pek pratik değildir. Bu nedenle, doğrusal ve elastik olmayan davranışı yeterli seviyede tanımlamak için elastik sabitler geliştirmek gereklidir. Kazık gruplarının çözümü için, Hrennikoff'un çalışmasını temel alan, yük-yer değiştirme bağıntılarının kullanıldığı bir yöntem geliştirilmiştir. Rijitlik yöntemi adı verilen bu yöntemde, yukarıda bahsedilen bütün değişkenler hesaba katılmıştır. Hrennikoff'un iki boyutlu ve özdeş kazıkları konu aldığı çalışması Aschenbrenner tarafından üç boyuta genişletilmiş, Saul ise matris yöntemlerini kullanarak kazık yerleşimini, eğimini, farklı boyuttaki ve farklı malzemeden yapılan kazıkları da çözüme dahil etmeyi başarmıştır.

#### 9.1.1. Kazık-zemin modeli

Rijitlik yöntemiyle kazık çözümü yapılırken, yapıların, yapının tabanına yerleştirilmiş altı adet tekil-serbestlik dereceli yayla desteklendiği varsayılır. Bu yaylar yapıya gelen yüklere bağlı olarak kazık-temel sisteminin hareketlerini

temsil eden, lineer-elastik ve temelin doğrusal olmayan bütün değişkenlerini hesaba katan yapılardır. Her bir kazığın davranışı yay (veya rijitlik) sabitleri cinsinden matris şeklinde ifade edilir:

$$\{q_i\}=[B]_i \{\mu\}_i$$

$$\{q_i\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} \quad \text{İ'ninci kazığa etkiyen yükler ve momentler}$$

$[B]_i$ =i'ninci kazığın rijitlik matrisi

$$\{\mu_i\} = \begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \quad \text{İ'ninci kazığın yer değiştirmeleri ve dönmeleri}$$

Toplam temel rijitliği ise bütün tekil kazık rijitliklerinin toplam temel rijitlik matrisinde bir araya getirilmiş halidir.

### 9.1.2 Rijit döşemenin esnek döşemeyle kıyaslanması

Üst yapıya gelen yüklerin kazıklara dağılımı pek çok faktörden etkilenir. Kazık başlığının rijitliği de bu faktörlerden biridir. Kazık başlığının rijitliği kazık-zemin sisteminin rijitliğiyle yakından ilgilidir. Kazık başlığının rijit olduğu kabulünde yapı içindeki deformasyonlar ihmal edilebilir ve uygulanan yükler, rijit gövde davranışı temel alınarak kazıklara dağıtılır. Eğer kazık başlığı esnek olarak düşünülürse yapının iç deformasyonları da modellenir ve uygulanan yüklerin kazıklara dağılımında önemli rol oynar. Kazık başlığının türünü belirlemek için piyasada kullanılan programlardan yardım alınabilir. Bu tarz programlar kirişlerin (yapının) ve yayların yanıl ve eksene rijitliklerinin belirlenmesini sağlayarak, hangi tür başlık varsayımının daha uygun olacağı konusunda fikir verebilirler.

### 9.2. Grup Kazıkların Düşey Statik Yük Altında Davranışı

Genelde kazıklar gruplar halinde inşa edilirler. Düşey yük altındaki kazık grubunun taşıma kapasitesi, grubu oluşturan kazıkların tekil taşıma kapasitesinin toplamından daha azdır. Bunun nedeni, kazıkların destek aldıkları zemin bölgelerinin çakışmasıdır. Aynı zamanda kazık gruplarında tek kazıklara göre daha büyük oturmalar gözlenir. Bunun nedeni de, kazık grubunun altındaki zeminde oluşan gerilme etki bölgesinin daha geniş ve derin bir alana yayılmasıdır.

Şekil 9.1’de aynı zemin kütesinden destek alan grup kazıklar görülüyor. Bu kesişim bölgeleri, neden kazık grubunun taşıma kapasitesinin, grubu oluşturan kazıkların tekil taşıma kapasitesinin toplamından daha az olduğunu açıklıyor. Kazıkların etkileşiminden dolayı oluşacak dayanım kaybını önlemek için kazık merkezleri arasında en az 2,5D kadar mesafe bırakılması gereklidir. Uygulamalarda bu mesafenin 3~3,5D olması önerilir.

Bir kazık grubunun verimliliği aşağıdaki formülle verilebilir:

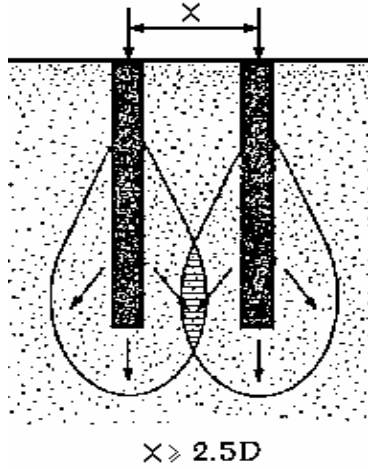
$$\eta = Q_{g(u)} / \sum Q_u \quad (9.1)$$

$\eta$ : grup etkisi

$Q_{g(u)}$ : kazık grubunun maksimum dayanma kapasitesi

$Q_u$ : her bir kazığın, grup etkisi ihmal edilmiş haldeki tekil dayanma kapasitesi





**Şekil 9.1:** Komşu kazıkların düşey yük altında zemine yük aktarma biçimleri.

### 9.2.1. Granüler zemindeki grup kazıklar

Granüler zeminlerdeki kazık gruplarının davranışlarını anlamak için Şekil 9.2'ye bakmak gerekir. Bu şekilden yola çıkılarak, zemin içindeki yerleşimlerine göre kazıklar iki şekilde davranabilirler:

- $L_g \times B_g \times L$  boyutlarında bir blok gibi çalışabilirler. Bu durumda sürtünme direnci aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir:

$$Q_{g(u)} = f_{ort} p_g L \quad (9.2)$$

$$p_g = 2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D \quad (9.3)$$

$f_{ort}$ : ortalama birim sürtünme direnci

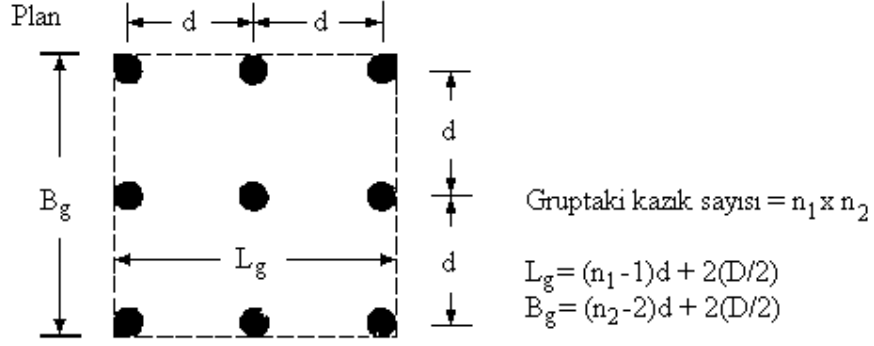
$p_g$ : bloğun çevresi

- Bireysel olarak çalışabilirler. Bireysel olarak çalışmaları durumunda:

$$Q_u \approx pL f_{ort} \quad (9.4)$$

Bu durumda grup etkisi (9.5) ile hesaplanır:

$$\eta = [2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D] / [pn_1n_2] \quad (9.5)$$



Şekil 9.2: Granüler zemindeki grup kazıklar

Buna göre:

$$Q_{g(u)} = \left\{ \frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{[pn_1n_2]} \right\} \Sigma Q_u \quad (9.6)$$

Kazık merkezleri arasındaki  $d$  mesafesi çok fazla ise  $\eta > 1$  çıkabilir. Bu durumda kazıklar bireysel çalışır. Uygulamalarda grup etkisi aşağıdaki bağıntılar yardımıyla bulunur:

$$\eta < 1 \text{ ise } Q_{g(u)} = \eta \Sigma Q_u \quad (9.7)$$

$$\eta \geq 1 \text{ ise } Q_{g(u)} = \Sigma Q_u \quad (9.8)$$

Etki katsayısı için diğer bir denklem de (9.9) ile verilmiştir:

$$\eta = 1 - \left[ \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta \quad (9.9)$$

$$\theta(\text{derece}) = \tan^{-1}(D/d) \quad (9.10)$$

Grup kazıklar üzerinde yapılan incelemelerden şu genellemelere varılabilir:

- Kum zemine çakılan kazıklarda  $d \geq 3D$  olması durumunda:

$$Q_{g(u)} = \Sigma Q_u \quad (9.11)$$

alınabilir. Buradan görülüyor ki, bu durumda kazıklar bireysel olarak davranır.

- Kum zeminde inşa edilen grup kazıklarda  $d \approx 3D$  olması durumunda sürtünme direnci (9.12) ile bulunabilir:

$$Q_{g(u)} = 2/3 \sim 3/4 \Sigma Q_u \quad (9.12)$$

### 9.2.2. Kil zemindeki grup kazıklar

Aşağıda (9.16) ve (9.19) denklemleriyle verilen iki  $\Sigma Q_u$  değerinden küçüğü  $Q_{g(u)}$  olarak alınır:

- Kazıkların bireysel davrandıkları varsayılarak aşağıdaki eşitlikler yardımıyla maksimum taşıma kapasitesi hesaplanır:

$$\Sigma Q_u = n_1 n_2 (Q_p + Q_s) \quad (9.13)$$

$$Q_p = A_p [9 c_{u(p)}] \quad (9.14)$$

$$Q_s = \Sigma \alpha p c_u \Delta L \quad (9.15)$$

$$\Sigma Q_u = n_1 n_2 (9 A_p c_{u(p)} + \Sigma \alpha p c_u \Delta L) \quad (9.16)$$

- Kazıkların blok halinde davrandıkları varsayılarak maksimum taşıma kapasitesi aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$Q_s = \Sigma \alpha p c_u \Delta L = \Sigma 2 (L_g + B_g) c_u \Delta L \quad (9.17)$$

$$Q_p = A_p q_p = (L_g B_g) c_{u(p)} N^*_c \quad (9.18)$$

$$\Sigma Q_u = (L_g B_g) c_{u(p)} N^*_c + \Sigma 2 (L_g + B_g) c_u \Delta L \quad (9.19)$$

### 9.2.3. Kaya zemindeki grup kazıklar

Kaya zeminde inşa edilen uç kazıkları için, merkezler arası mesafe asgari  $D+300\text{mm}$  olmak koşuluyla:

$$\Sigma Q_{g(u)} = Q_u \quad (9.20)$$

alınabilir. Dörtgen ve H enkesitli kazıklarda  $D$  değeri, kazık enkesitinin köşegen uzunluğudur.

### 9.3. Grup Kazıkların Yatay Statik Yük Altında Davranışı

Yanal yüke maruz kazık grupları, geniş ve dar aralıklı olarak iki gruba ayrılabilir. Geniş aralıklı gruplarda bir kazığın yer değiştirmesi diğerini etkilemez ve yük kazıklara eşit bölünüp tek kazık analizi yapılabilir. Dar aralıklı gruplardaysa etkileşim söz konusudur. Ayrıca kazık başlığının rijitliği de göz önüne alınmalıdır. Kazığın zemine yerleştirilme biçimi (çakma, delme vs) de bu etkileşimde önemlidir. Burada, bu hesaplar için en sık kullanılan iki yöntem anlatılacaktır.

#### 9.3.1. Grup azaltma faktörü yöntemi

Daviosson (1970) tarafından geliştirilen bu yöntemde, yatak katsayısı değerleri, kazıklar arasındaki mesafeye bağlı olarak tablolardan alınan değerlerle çarpılarak azaltılır (Sadece taneli zeminler için).

Veya tek bir kazığın taşıma gücü bulunur. Bu değer, kazık aralığına ve zemin cinsine göre tablolardan alınacak grup etkinlik faktörü değeriyle çarpılarak azaltılır (Her iki zemin türü için de).

#### 9.3.2. Grup büyültme faktörü yöntemi

Tek kazık için hesaplanan “yanal ötelenme” ve “moment” değerleri, bir grup büyültme faktörü kullanılarak arttırılır. Yanal ötelenme büyültme faktörü farklı zeminler için farklı şekillerde hesaplanır:

Kumda:

$$C_y = [9 + N_k] / [3 \sqrt{((S/B) + (P_s / 16 K_p \gamma B^3))}] \quad (9.21)$$

Kilde:

$$C_y = [16 + N_k] / [5,5 \sqrt{((S/B) + (P_s / 3 S_u B^2))}] \quad (9.22)$$

$C_y$ : yanal ötelenme büyültme faktörü

$N_k$ : gruptaki kazık sayısı

$S$ : ortalama kazık aralığı

B: ortalama kazık çapı

P<sub>s</sub>: bir kazığa gelen ortalama yük

S<sub>u</sub>: drenajsız kayma mukavemeti

Grup yer değiştirmesi bulunduktan sonra S<sub>u</sub> veya Ø azaltılarak zemin “yumuşatılır” ve tek kazık yer değiştirmesinin grubunkine eşit hale gelmesi sağlanır. Maksimum moment bu yumuşatılmış zemin parametresine göre hesaplanır. Buna göre moment büyültme faktörü:

$$C_m=(C_y)^n \quad (9.23)$$

olarak elde edilir. Burada n ise farklı zeminler için (9.24) ve (9.25) bağıntularından uygun olanı kullanılarak hesaplanır:

Kumda:

$$n=(P_s/(300S_uB^2))+0,30 \quad (9.24)$$

Kilde:

$$n=(P_s/(150K_p\gamma B^3))+0,25 \quad (9.25)$$

#### 9.4. Grup Kazıkların Oturması

##### 9.4.1. Kazık gruplarının konsolidasyon oturması

Konsolidasyon oturması hesabı için 2:1 gerilme dağılışı yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem ve aşağıda aşama aşama anlatılmıştır:

- Kazıkların gömülme boyları L, grubun maruz kaldığı toplam yük Q<sub>g</sub> olsun. Eğer kazık başlığı tabi zemin seviyesinin altındaysa Q<sub>g</sub> şu şekilde hesaplanır: Q<sub>g</sub>=(gruba gelen toplam yük)–(kazık başlığı üstündeki efektif zemin ağırlığı)
- Q<sub>g</sub>’nin kazık üst ucundan itibaren 2/3L derinlikte (z=0 olarak adlandırılır) zemine iletmeye başlandığı ve bu derinlikten itibaren Q<sub>g</sub>’nin dağılışının düşeyde 2, yatayda 1 birim olduğu varsayılır.(aa’ ve bb’ çizgileri)
- Her bir zemin tabakasının ortasında Q<sub>g</sub>’den dolay oluşan basınc artışı ayrı ayrı hesaplanır:

$$\Delta p_i=Q_g/[(B_g + z_i)(L_g + z_i)] \quad (9.26)$$



$\Delta e_i$ : i'ninci tabakada basınç artışından dolayı meydana gelen boşluk oranı değişimi

$e_{0(i)}$ : i'ninci tabakanın başlangıç boşluk oranı

$H_i$ : i'ninci tabakanın yüksekliği (sadece  $z=0$  hattının altında kalan kısım yükten etkilenir)

- Toplam konsolidasyon oturması aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\Delta s_{g(e)} = \sum \Delta s_i \quad (9.29)$$

#### 9.4.2. Kazık gruplarının elastik oturması

Elastik oturma hesabı için en pratik formül (9.30) ile verilmiştir:

$$s_{g(e)} = \sqrt{(B_g/Ds)} \quad (9.30)$$

$s_{g(e)}$ : kazık grubunun elastik oturması

$B_g$ : kazık grubunun plandaki genişliği

$D$ : gruptaki her bir kazığın genişliği veya çapı,

$s$ : her bir kazığın çalışma yükü altındaki elastik oturması

Kum ve çakıla giren kazıklar için aşağıdaki ampirik formülden de faydalanılabilir:

$$s_{g(e)}(\text{mm}) = 0,92q\sqrt{(B_g I) / N_{\text{cor}}} \quad (9.31)$$

$$q(\text{kN/m}^2) = Q_g / (B_g L_g) \quad (9.32)$$

$I$ : etki faktörü ( $I = 1 - [L/SB_g]$ )

$N_{\text{cor}}$ : düzeltilmiş ortalama SPT sayısı

$L$ : kazıkların gömülme derinliği

Benzer şekilde, koni penetrasyon dayanımına bağlı olarak da kazık grubunun oturması hesaplanabilir:

$$s_{g(e)} = q B_g I / 2q_c \quad (9.33)$$

Burada  $q_c$  ortalama koni penetrasyon dayanımıdır.

## 10. NARİN KAZIKLARIN BURKULMASI

Granholm (1929), ortalama uzunluktaki kazıkların, zemin çok yumuşak olmadıkça burkulmayacaklarını göstermiştir. Fakat günümüzde çok uzun ve narin kazıklar kullanılmaya başlanması sebebiyle bu tür kazıkların burkulma ihtimali de göz önüne alınmak zorundadır. [14]

### 10.1. Tamamen Gömülü Kazıklar

Gömülü kazıkların elastik burkulma yükleriyle çözümünde, kazık boyunca sabit olduğu varsayılan bir yatak katsayısı kullanılır. Hetenyi (1946), Forssell (1918, 1926) ve Granholm (1929) tarafından yapılmış çalışmaların incelemesi sonucunda aşağıdaki bağıntıya ulaşmıştır:

$$EI = \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} + ky = 0 \quad (10.1)$$

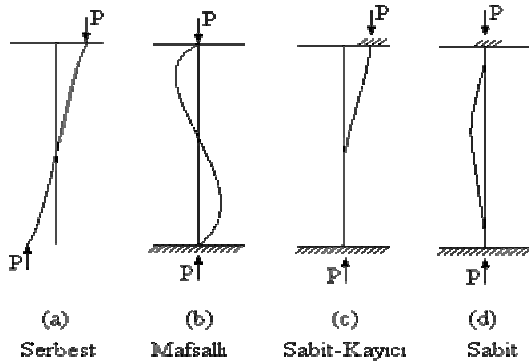
EI: kazığın esneme rijitliği

P: eksenel yük

K: yatak katsayısı

Bahsi geçen çözümlerde bütün değerler sabitler olarak alınmıştır.

Farklı tip kazıklarda meydana gelebilecek burkulmalar Şekil 10.1 ile verilmiştir.



Şekil 10.1: Kazık sınır koşulları (a) Serbest, (b) Mafsallı, (c) Sabit-Kayıcı, (d) Sabit



Şekil 10.1 kazık sınır koşullarını göstermektedir. Denklem (10.1)'in aşağıdaki boyutsuz ifadelerle yeniden düzenlenmiştir:

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{k}} \quad Z = \frac{x}{R} \quad Z_{\max} = \frac{L}{R} \quad (10.2)$$

L: kazığın gömülme boyu

R: rölatif sıklık faktörü

EI: kazığın esneme rijitliği

Z: boyutsuz derinlik katsayısı

Bu ifadeleri denklem (10.1)'de yerine koyup yeniden düzenleme yapıldığı takdirde, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{PR^2}{EI} \times \frac{d^2 y}{dz^2} + y = 0 \quad (10.3)$$

$PR^2/EI$  ifadesi de eksenel yük katsayısı U olarak adlandırılırsa:

$$U_{cr} = \frac{P_{cr} R^2}{EI} \quad (10.4)$$

Burada "cr" alt indisi, U'nun ve P'nin kritik değerlerini gösterir.

Bu ifade de yerine konularak (10.5) elde edilir:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + U \times \frac{d^2 y}{dz^2} + y = 0 \quad (10.5)$$

Eksenel yük katsayısı  $U_{cr}$ 'nin kritik değerleri, kazık sınır koşullarını ve kazık uzunluğu  $Z_{\max}$ 'ı da hesaba katarak (10.5) ifadesinin U'ya göre çözülmesiyle elde edilir.

### 10.1.1. Durum 1: k=sabit

Bu çözümde aksenal yükün kazık boyunca sabit olduğu ve yük transferi olmadığı varsayılır. Kazık başlangıçta düzdür.

Mafsallı uçlarda kazık, kazık boyuna bağlı sayıda sinüs yarı-dalgaları şeklinde deforme olur. Bütün haller için  $U_{cr}$  değerleri 2'nin üzerindedir,  $Z_{max}$ 'ın tamsayı değerlerinde ise  $U_{cr}=2$  olur. Pratik çözümler için  $U_{cr}=2$  kabul edilir.

Sabit uçlu kazıklarda  $Z_{max}$  sıfır olduğunda  $U_{cr}$  de sıfırdır ve  $Z_{max}$  arttıkça artarak 1'de maksimum değerine ulaşır. Bu noktada mod değişiminden dolayı 1'in altına düşen  $U_{cr}$ , bir sonraki mod değişiminde tekrar 1'e ulaşır. Kazık boyu uzadıkça 1 değerinden sapmaların şiddeti azalır. Pek çok pratik durum için  $Z_{max}$  5'den büyük olduğu için,  $U_{cr}$  1'e eşit kabul edilebilir.

Bir serbest, bir mafsallı uç durumunda  $Z_{max}$  sıfır olduğunda  $U_{cr}$  de sıfırdır ve  $Z_{max}$  arttıkça  $U_{cr}$  de ani bir artış göstererek 1 değerine ulaşır. 1 değerine ilk kez ulaştıktan sonra,  $U_{cr}$ 'nin üst değerleri 1'den çok az farklıdır. Burkulma, en az kısıtlama gösteren sınırlarla kontrol edilir. Bu nedenle bu sınır koşullarında  $U_{cr}$ 'nin limit değeri 1'dir.

Kayıcı mesnetli kazıklar, grup içindeki bir kazığı temsil ederler. Diğer ucun serbest olması durumunda  $U_{cr}$  değeri 1 civarında salınım yapar. Diğer ucun mafsallı olması durumunda ise  $U_{cr}$  değeri 2'ye teğet olur.

### 10.1.2. Durum 2: k= $n_h \cdot x$

Bu durumda kazık başındaki sınır koşulu, kazık ucundaki sınır koşuluna göre daha önemli hale gelir. Kazık, yatak katsayısının en düşük olduğu noktada burkulma eğiliminde olduğu için, dayanıksızlık kazık başına komşu bir noktada meydana gelir.

$k=n_h \cdot x$  olduğu durumda (10.1) denklemi (10.6) halini alır:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} + n_h \cdot xy = 0 \quad (10.6)$$

Derinlik katsayısının maksimum değeri  $Z_{\max}$ , bu değeri elde etmek için kullanılan rölatif rijitlik faktörü  $T$  ve boyutsuz derinlik katsayısı  $Z$  de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad Z = \frac{x}{T} \quad Z_{\max} = \frac{L}{T} \quad (10.7)$$

Yukarıdaki ifadeler denklem (10.6)'da yerlerine koyulursa:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{PT^2}{EI} \times \frac{d^2 y}{dz^2} + Zy = 0 \quad (10.8)$$

Eksenel yük katsayısı  $PT^2/EI$  değerine  $V$  denirse:

$$V_{cr} = \frac{P_{cr} T^2}{EI} \quad (10.9)$$

Bu ifade de (10.8)'de yerine koyulursa:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + V \times \frac{d^2 y}{dz^2} + Zy = 0 \quad (10.10)$$

(10.10) denklemi  $V_{cr}$  için analog bir bilgisayar yardımıyla çözülmüştür.

Her iki ucu da serbest olan kazıklarda  $V_{cr}$  sıfırdan başlayarak  $Z_{\max}$  arttıkça yaklaşık 0,71 sınırına kadar artış gösterir.

Serbest başlı ve mafsallı uçlu kazıklarda,  $V_{cr}$  serbest uçtakine nazaran daha hızlı bir şekilde artar fakat bu durumda da ulaşılan sınır değer 0,78'dir.

Mafsallı başlı serbest uçlu kazıklarda  $V_{cr}$ 'nin verilen herhangi bir  $Z_{\max}$  uzunluğu için gözlemlenen değeri oldukça yüksektir. Bu durumda iki burkulma modu görülür fakat pratikte uygulanan hemen hemen bütün kazık uzunlukları için  $V_{cr}$  değeri 1,44'ü aşar.

Başı kayıcı mafsallı, ucu serbest kazıklarda  $V_{cr}$ 'nin asgari değeri 0,88'dir ve bu değer  $Z_{\max}=2,3$  gibi oldukça küçük bir kazık uzunluğunda gözlenir.  $Z_{\max}$  2,3'ün üzerine çıktığında  $V_{cr}$  değerinde hızlı bir artış görülür.

Her iki ucu da mafsalı kazıklarda  $Z_{\max}=2,60$  iken  $V_{cr}$  2,30 minimum değerine ulaşır.

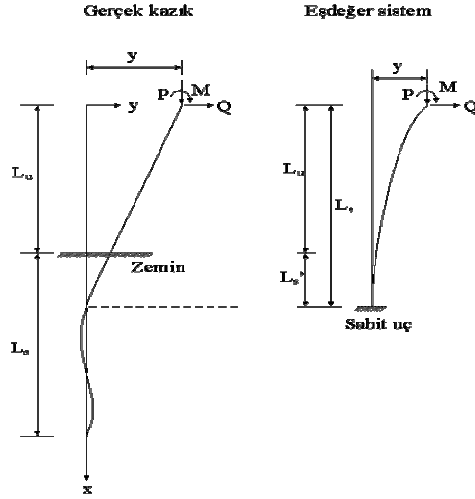
Gerçekte kazıkların çoğu başlangıçta deformasyona uğramış oldukları ve elastik burkulma yükü gerçek burkulma yükünün korunumsuz bir üst sınırı olduğu için, hesaplanan burkulma yükleri mühendise, kazığın burkulma yükünü belirlemede ancak yardımcı olabilir fakat mühendislik kararı gereklidir. Pek çok kazık yükleme deneyi ise kısa sürede yapıldığı için bu deneylerde uygulanan aksel yükün büyük bölümü çevre sürtünmesiyle taşınır. Servis koşulları altında ise sürtünme direnci kısa süreli deneylerdekine nazaran çok daha düşük olabilir ve bu da burkulma eğilimini artırır.

Prakash (1987) enerji yöntemlerini kullanarak iki ucu da mafsalı ve iki ucu da sabit tamamen gömülü düşey kazıklar için  $k_0$  başlangıç değeri sıfırdan büyük ve doğrusal olarak kazık boyunca artan durumda burkulma yükleri için kapalı çözümler geliştirmiştir. Boyları 24m'ye kadar olan kazıklar için,  $EI=477tm^2$  ve  $k_0$  0~2000t/m<sup>2</sup> arasında değişken kabul edilerek kazık uzunluğunun, zemin rijitliğinin ve sınır koşullarının burkulma yüküne ve burkulma şekline etkileri incelenmiştir.

Burkulma yükleri enerji yöntemiyle belirlenir. Örneğin kiriş deformasyonu sırasındaki gerilme enerjisi artışı, dış kuvvetler tarafından yapılan işe eşittir. Kirişteki farklı sınır koşullarını sağlayan deformasyon eğrilerinin denklemleri, iş-enerji denkleminde yerlerine konular. Kritik burkulma yükü  $P_{cr}$ 'yi belirlemek için, enerji denkleminin türevi sıfıra eşitlenir ve standart bir özdeğer şeklinde matris haline dönüştürülür.

## 10.2. Kısmen Gömülü Kazıklar

Kısmen gömülü kazıklarla desteklenen yapıların tasarımında kolon kararsızlığı sık rastlanan bir sorundur. Dahası, hem yatay hem düşey yüklere maruz yapılarda esneme analizi temel tasarımının önemli bir parçasıdır. Basitleştirici bazı kabuller yapılmadığı takdirde çözümler oldukça belirsiz ve kullanışsızdır.



Şekil 10.2: Kısmen gömülü kazıklar (Davisson ve Robinson, 1965)

Kısmen gömülü kazıklarda burkulma mekanizması Şekil 10.2 ile verilmiştir. Şekilde  $L_u$  kazığın zemin üzerindeki desteksiz boyunu gösteriyor. Düşey yük,  $Q$  ve  $M$  nedeniyle meydana gelen deformasyonu artırma eğilimindedir.

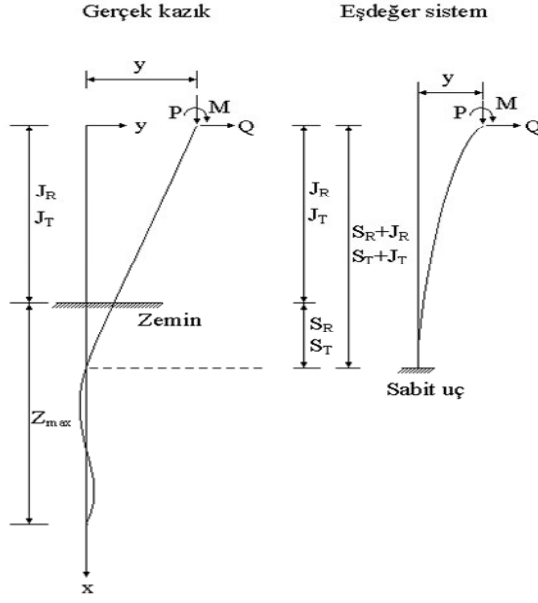
### 10.2.1. Sabit $k$ için çözümler

Davisson ve Robinson (1965) kısmi gömülü kazıkların burkulma yükleri için çözümler geliştirmişlerdir. Kazık üzerindeki aksenal yükler sabit ve kazıklar oldukça uzundur. Bu çözümlerde, Şekil 10.2'de görülen gerçek kazığın, sabit uçlu ve  $L_e$  boyunda bir kazığa eşdeğer olduğu varsayılmıştır.  $L_s'$  boyu ise gerçek sistemdeki burkulma yükünü eşdeğer sistemdekine eşitleyen boy olarak düşünülebilir.

(10.1) denklemi gömülü olmayan kısım da dahil ederek çözüldüğünde çözüm, aşağıdaki ifadeler yardımıyla boyutsuz bir şekil alır:

$$S_R = \frac{L_s'}{R} \quad J_R = \frac{L_u}{R} \quad (10.10)$$

Burada  $R$  denklem (10.2)'de tanımlanmıştır. Bu eşitlikler yerlerine konularak, Şekil 10.2'deki boyutlar Şekil 10.3'deki boyutsuz parametrelerle ifade edilebilir. Eşdeğer uzunluk ( $S_R + J_R$ ) ile gösterilmiştir.



**Şekil 10.3:** Kısmen gömülü kazıkların boyutsuz gösterimi

$S_R$  ve  $J_R$  arasındaki bağıntılar, Davisson ve Robinson (1965) tarafından kazık ucundaki iki farklı yükleme durumu (sadece kesme kuvveti  $Q$  ve sadece  $M$  momenti) için geliştirilmiştir. Buradan,  $S_R$ 'nin 1,33~1,6 gibi dar bir aralıkta değiştiği gözlenmiştir. Bu yüzden pratik çözümler için  $S_R= 1,33$  alınması önerilir.

Her iki ucun da serbest ve kazık başının kayıcı mafsallı, kazık ucunun serbest olması durumlarında kritik burkulma yükünün ( $P_{cr}$ ) hesabı için (10.11) denklemi kullanılabilir:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{4(S_R + J_R)^2 R^2} \quad (10.11)$$

### 10.2.2. Doğrusal değişen $k$ için çözümler

Uzun kazıkların çözümünde ( $L_s$  gömülme derinliği olmak üzere  $Z_{max}>4$ )  $k=n_h \cdot x$  durumu için tanımlanan boyutsuz ifadeler de Şekil (10.3)'de görülmektedir. Bu ifadeler (10.12) ile formülize edilmiştir:

$$S_T = \frac{L'_s}{T} \quad J_T = \frac{L_u}{T} \quad (10.12)$$

Buna göre burkulma yükü de (10.13) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{4(S_T + J_T)^2 T^2} \quad (10.13)$$

Lee (1968) kuru kumda model deneyleri yapmış ve deneylerden elde ettiği sonuçlarla hesapla bulunan burkulma yükleri arasında büyük benzerlikler bulmuştur.

### 10.3. Burkulma Durumunda Grup Etkisi

Toakley (1964) tarafından yumuşak siltte ikili ve üçlü şeritler halinde grup kazıklarla yapılan model deneylerinde, kritik yükün grup etkisiyle azaldığı görülmüştür. Fakat Hoadley (1969) tarafından yapılan gerçek ölçekli deneylerde, yakın yerleştirilmiş kazıklar arasından çok küçük etkileşimler olduğu görülmüştür.

Patikte grup halindeki kazıklara düşey ve yatay yükler etkir. Yatak katsayısı ise grup etkisinden dolayı değişir. Bu nedenle, grup halindeki kazıkların burkulma yüklerinin hesabında yatay yatak katsayısının kullanılması tavsiye edilir. Yanal yükün varlığı, düşey yükün eksantrikliğine eşdeğerdir ve bu da kritik burkulma yükünü azaltır.

## 11. KAZIK TEMELLERE ETKİYEN TİTREŞİMLİ YÜKLER

Düşey titreşimler yaratan makinelerin bulunduğu bir ortamda, temel-zemin sisteminin doğal frekansı, işletim frekansının en az iki katı olmaktadır. Sığ temellere bu tarz titreşimlerin etkimesi oturma sınırlarını aşabilir. Bu tip temellerin tasarımında boyut ve kütle değişimi yeterli koşulları sağlamıyorsa kazık temeller kullanılmalıdır. Pek çok durumda zeminin dayanma kapasitesi makineden ve sığ temelden gelen statik ve dinamik yüklere oranla düşük olmaktadır. Bu durumda kazık temel kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Makine temellerini taşıyan kazıkların, deprem kuvvetlerine nazaran daha düşük genlikli titreşim durumları için olduğu da akılda tutulmalıdır. Bu nedenle, zemin için doğru parametrelerin seçiminde düşük genlikli gerilmelere denk gelen değerler seçilmelidir. [15]

Titreşim altındaki kum kütlelerinde boşluk oranı azalırken yoğunluk artar. yer altı su seviyesinin altındaki doymuş kumlarda sıvılaşma eğilimi görülebilir. Bu durumda zemin tanelerinin hareketi efektif gerilmenin azalmasıyla sonuçlanır.

Kazık temeller zemin kütlelerinde ek kayma gerilmeleri yaratırlar. Titreşim altında aşırı oturmalar meydana gelebilir. Titreşimlerin kazıklar üzerindeki etkilerini incelemek için Swiger (1948) kuma gömülü kazıklar üzerinde deneyler yapmıştır. Önce kazık üzerine statik yük etkilmiştir. Sonra bu statik yük altında titreşim uygulanmıştır. Vibratörün hızı dakikada 300~4000 devir arasında değişmektedir. Kazık, doğal frekansı olan dakikada 500 devire göre titreştirilmiş, bu değer deneysel olarak belirlenmiştir. 61 ve 121 kip olmak üzere iki değişik düşey statik yük uygulanmış ve büyük yük altındaki oturma küçük yük altındakine oranla birkaç kat fazla olduğu gözlenmiştir.

### 11.1. Düşey Titreşimlere Maruz Tekil Kazıklar

Burada kazık temellerin düşey titreşimler altındaki davranışları uç kazıklarında ve sürtünme kazıklarında ayrı ayrı incelenmiştir.



### 11.1.1. Düşey titreşimlere maruz tekil uç kazıkları

Kayaya oturan, L boyunda ve kazık başlığından gelen W ağırlığını taşıyan bir kazık düşünelim. Bu yapı, ucu sabit başı serbest bir çubuk gibi düşünülebilir. Kazığın doğal frekansı belirlenirken üç farklı durum göz önüne alınır:

#### 11.1.1.1. W çok küçükse

W ağırlığının çok küçük ( $\approx 0$ ) olması durumunda titreşim frekansı denklem (11.1) ile verilebilir:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}} \quad (11.1)$$

$f_n$ : titreşimin doğal frekansı

$\omega_n$ : doğal dairesel frekans

$E_p$ : kazık malzemesinin elastisite modülü

$\rho_p$ : kazık malzemesinin yoğunluğu

#### 11.1.1.2. W kazık ağırlığına eşitse

W kazık ağırlığına eşit şiddetteyse, titreşimin doğal frekansı (11.2) kullanılarak bulunabilir:

$$\frac{AL\gamma_p}{W} = \left[ \frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \tan \left[ \frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \quad (11.2)$$

A: kazık enkesitinin alanı

$\gamma_p$ : kazık malzemesinin birim hacim ağırlığı

$\omega_n$ : doğal dairesel frekans

$v_{c(P)}$ : kazıkta boyuna dalga yayılma hızı

(11.2) denklemi aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir:

$$\sigma_0 = \frac{W}{A} \Rightarrow \frac{L\gamma_P}{\sigma_0} = \left[ \frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \tan \left[ \frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \quad (11.3)$$

Doğal dairesel hareket  $\omega_n$  değeri grafikler yardımıyla bulunabilir. Bu değere bağlı olarak da doğal frekans hesaplanır:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (11.4)$$

### 11.1.1.3. W kazık ağırlığından büyükse

W kazık ağırlığından büyükse kazık ağırlığı ihmal edilebilir ve denklem (11.2) aşağıdaki hali alır:

$$\frac{AL\gamma_P}{W} \approx \left[ \frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right]^2$$

Kazıkta boyuna dalga yayılma hızı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$v_{c(P)} = \sqrt{\frac{E_P}{\rho_P}} = \sqrt{\frac{E_P g}{\gamma_P}}$$

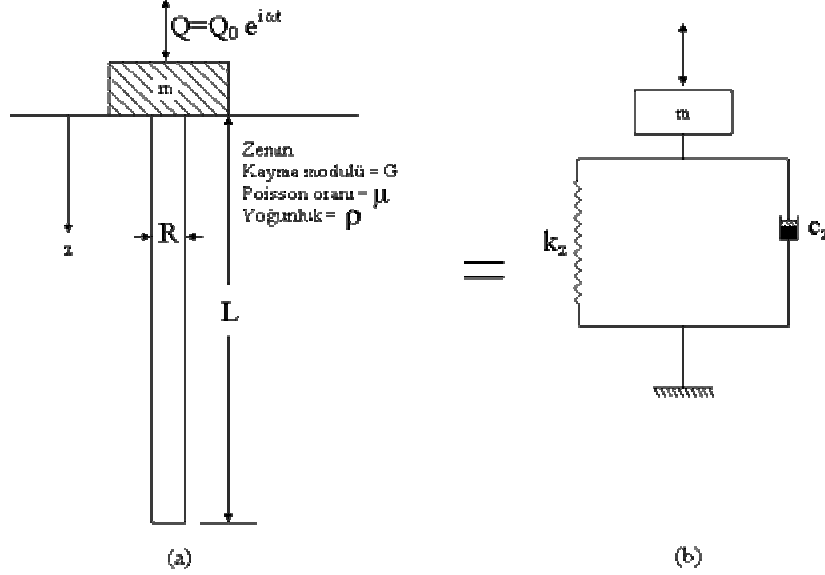
Burada g yerçekimi ivmesidir. Buna göre:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{AE_P g}{LW}}$$

veya

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_P g}{\sigma_0 L}} \quad (11.5)$$

Richart (1962) farklı malzemelerden imal edilmiş, uzunlukları (L) ve zemin yüzündeki gerilmeleri ( $\sigma_0$ ) farklı kazıklar için  $f_n$  değişimini gösteren bir grafik hazırlamıştır.



Şekil 11.1: Sürtünme kazıklarına etkiyen düşey titreşimler (a) gerçek kazık, (b) eşdeğer sistem

### 11.1.2. Düşey titreşimlere maruz tekil sürtünme kazıkları

Şekil 11.1 ile verilen  $L$  boyunda ve  $R$  çapında bir sürtünme kazığı düşey bir  $Q$  dinamik yüküne maruz olsun. Bu  $Q$  yükü (11.6) ile ifade edilebilir:

$$Q = Q_0 e^{i\omega t} \quad (11.6)$$

Rijitlik ( $k_z$ ) ve azaltma ( $c_z$ ) parametrelerinin matematiksel ifadesi Novak (1977) tarafından verilmiştir. Teori geliştirilirken şu varsayımlar yapılmıştır:

- Kazık düşey, elastik ve dairesel kesitlidir.
- Kazık yüzmektedir.
- Kazık zeminle kusursuz bir temas içerisindedir.
- Kazık ucunun üstündeki zemin sonsuz küçük, ince, bağımsız, lineer elastik katmanlar şeklinde davranmaktadır

Son varsayım, düzlem gerilme durumuna yol açar. Kazığın dinamik rijitlik ve azaltma faktörleri (11.7) ile ifade edilebilir:

$$K = K_1 + iK_2 \quad (11.7)$$

Uygulanan Q yükü ve z yer değiştirmesi K ile (11.8) bağıntısında verildiği şekilde ilişkilendirilebilir:

$$Q = Kz = (K_1 + iK_2)z \quad (i = \sqrt{-1}) \quad (11.8)$$

Burada  $K_1$  K'nın reel kısmı,  $K_2$  K'nın sanal kısmı,  $i$  ise karmaşık sayıdır. Buna göre yay sabiti  $k_z$  ve eşdeğer viskoz azaltma  $c_z$  aşağıda verilen bağıntılarla bulunabilir:

$$k_z = K_1 = \text{Re } K \quad (11.9)$$

$$c_z = \frac{K_2}{\omega} = \frac{\text{Im } K}{\omega} \quad (11.10)$$

(11.7), (11.9) ve (11.10) denklemleri birleştirilirse:

$$K = k_z + i\omega c_z \quad (11.11)$$

Buna bağlı olarak da kuvvet-yer değiştirme bağıntısı aşağıdaki iki şekilden herhangi birisiyle verilebilir:

$$Q = (k_z + i\omega c_z)z \quad Q = k_z z + c_z \dot{z} \quad (\dot{z} = \frac{dz}{dt}) \quad (11.12)$$

$k_z$  ve  $c_z$  arasındaki bağıntı Novak ve El-Sharnouby (1983) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$k_z = \left( \frac{E_p A}{R} \right) f_{z1} \quad (11.13)$$

$$c_z = \left( \frac{E_p A}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}} \right) f_{z2} \quad (11.14)$$

Burada  $f_{z1}$  ve  $f_{z2}$  boyutsuz parametrelerdir. L/R oranlarına bağlı olarak yüzen kazıklar ve uç kazıkları için ayrı hazırlanmış tablolardan alınabilirler.

## 11.2. Yatay Titreşimlere Maruz Tekil Kazıklar

Novak (1974) ve Novak ve El-Sharnouby (1983) tekil kazıkların yanal titreşim durumu için rijitlik ve azaltma sabitlerini, düşey titreşimlerdeki benzer şekilde aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

$$k_x = \frac{E_p I_p}{R^3} f_{x1} \quad (11.15)$$

$$c_x = \frac{E_p I_p}{R^2 v_s} f_{x2} \quad (11.16)$$

$E_p$ : kazık malzemesinin elastisite modülü

$I_p$ : kazık kesitinin atalet momenti

$R$ : kazık çapı

$v_s$ : zemindeki kayma dalgası hızı

Novak (1974) ve Novak ve El-Sharnouby (1983) tarafından yapılan çözümlere bağlı olarak  $f_{x1}$  ve  $f_{x2}$ 'nin hareket açısına bağlı değişimlerini kazık rijitliklerine bağlı olarak grafikler haline dönüştürmüşlerdir. Bu değerler tablolar vasıtasıyla bulunabilir.

## 11.3. Sallanma/Çalkantı Titreşimine Maruz Tekil Kazıklar

Bu tarz titreşimlere maruz kazıkların rijitlik ve azaltma katsayıları için de yine aynı yolla Novak ve El-Sharnouby (1987) aşağıdaki bağıntıları bulmuşlardır:

$$k_\theta = \frac{E_p I_p}{R} f_{\theta1} \quad (11.17)$$

$$c_\theta = \frac{E_p I_p}{v_s} f_{\theta2} \quad (11.18)$$

Novak (1974) ve Novak ve El-Sharnouby (1983) tarafından yapılan çözümlere bağlı olarak  $f_{\Theta 1}$  ve  $f_{\Theta 2}$ 'nin sayısal değerleri, kazık rijitliğine, zeminin kayma modülüne ve Poisson oranına göre tablolardan alınabilmektedir.

Sallanma titreşimine ve yatay titreşime maruz kazıklar içinde rijitlik ve azaltma katsayıları aşağıdaki eşitliklerle bulunabilmektedir. Yine buradaki  $f_{x\Theta 1}$  ve  $f_{x\Theta 2}$  değerlerini elde etmek için de hazır tablolar kullanılmaktadır.

$$k_{x\theta} = \frac{E_p I_p}{R^2} f_{x\theta 1} \quad (11.19)$$

$$c_{x\theta} = \frac{E_p I_p}{R v_s} f_{x\theta 2} \quad (11.20)$$

#### 11.4. Burulma Titreşimine Maruz Tekil Kazıklar

Gömülü bir kazığın burulma titreşimleri Novak ve Howell (1977) ve Novak ve El-Sharnouby (1983) çözümlenmiştir. Bu çözümler kazığın dik, dairesel kesitli, R çaplı, elastik ve zeminle kusursuz etkileşen uç kazığı olduğu varsayımlarına göre yapılmıştır. Zemin ise lineer visko-elastik ve frekanstan bağımsızdır. Kazık burulma titreşimi altında, aşağıda formülü verilen karışık bir harmonik dönmeye uğramaktadır:

$$\alpha(z, t) = \alpha(z) e^{i\omega t} \quad (11.21)$$

Burada  $\alpha(z)$  kazığın z derinliğindeki dönmesinin karışık şiddetidir.

Kazığın hareketine karşılık zemin burulma tepkisi gösterir. dz kadar bir kazık elemanının elastik etkileşimi (11.22) ile verilebilir:

$$GR^2 (S_{\alpha 1} + iS_{\alpha 2}) [\alpha(z, t)] dz \quad (11.22)$$

$S_{\alpha 1}$ : ( $a_0$ ) rijitlik parametresi

$S_{\alpha 2}$ : ( $a_0$ ) azaltma parametresi

$a_0$ : boyutsuz frekans

Bu ifadeler aşağıdaki şekilde verilebilirler:

$$S_{\alpha 1}(a_0) = 2\pi \left( 2 - a_0 \frac{J_0 J_1 + Y_0 Y_1}{J_1^2 + Y_1^2} \right) \quad (11.23)$$

$$S_{\alpha 2}(a_0) = \frac{4}{J_1^2 + Y_1^2} \quad (11.24)$$

$$a_0 = \omega R \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (11.25)$$

Burada  $J_0(a_0)$  ve  $J_1(a_0)$  sırasıyla sıfırıncı ve birinci dereceden ilk tip,  $Y_0(a_0)$  ve  $Y_1(a_0)$  sırasıyla sıfırıncı ve birinci dereceden ikinci tip Bessel fonksiyonlarıdır.

$S_{\alpha 1}$  ve  $S_{\alpha 2}$  zeminin malzeme sönümlenmesine bağlı parametrelerdir ve malzeme sönümlenmesi burulma titreşimlerinde diğer titreşim türlerine nazaran daha önemlidir. Bu azaltma, zemin kayma modülüne faz-dışı bir bileşen eklenerek hesaba katılabilir.  $G_1$  ve  $G_2$  karmaşık kayma modülünün sırasıyla reel ve sanal kısımları,  $\delta$  kayıp açısı olmak üzere sönümlenme, zemin kayma modülüne aşağıdaki şekilde eklenebilir:

$$G^* = G_1 + iG_2 = G_1(1 + i \tan \delta) \quad (11.26)$$

$$\tan \delta = \frac{G_2}{G_1} \quad (11.27)$$

Bu şekilde elde edilen  $G^*$  değeri, denklem (1.22)'de yerine konularak sönümlenme de hesaba katılmış olur.  $G^*$  aynı zamanda (11.23) ve (11.24) denklemlerindeki  $a_0$  katsayısı vasıtasıyla bu denklemlere de dahil olur. Bu yöntemle yapılan çözümler sonrasında Novak ve Howell (1977) rijitlik ve azaltma katsayılarını aşağıdaki şekilde vermektedirler:

$$k_\alpha = \frac{G_p J}{R} f_{\alpha 1} \quad (11.28)$$

$$c_\alpha = \frac{G_p J}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}} f_{\alpha 2} \quad (11.29)$$

Gp: kazık malzemesinin kayma modülü

J: kazık kesitinin kutupsal momenti

$f_{a1}, f_{a2}$ : boyutsuz parametreler

Bu parametreler de,  $a_0$  ve L/R oranına bağlı olarak hazırlanmış grafikler yardımıyla elde edilebilirler.

Tablo 11.1'de genel olarak U.S. Army Corps Of Engineers tarafından bu sabitleri bulmak için önerilen formüllerin tablosu verilmiştir.

**Tablo 11.1:** Kütle oranı, sönümlenme oranı ve yay sabiti için U.S. Army Corp of Engineer'ın önerdiği formüller

Titreşim Şekli	Kütle (Atalet) Oranı, B	Sönümlenme (Azaltma) Oranı, D	Yay Sabiti, k
Düşey	$B_z = \frac{(1-\nu)}{4} \frac{m}{\rho r_0^3}$	$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}}$	$k_z = \frac{4Gr_0}{1-\nu}$
Yatay	$B_x = \frac{(7-8\nu)m}{32(1-\nu)\rho r_0^3}$	$D_x = \frac{0,288}{\sqrt{B_x}}$	$k_x = \frac{32(1-\nu)}{7-8\nu} Gr_0$
Sallan	$B_\psi = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_\psi}{\rho r_0^5}$	$D_\psi = \frac{0,15}{(1+B_\psi)\sqrt{B_\psi}}$	$k_\psi = \frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}$
Burulma	$B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho r_0^5}$	$D_\theta = \frac{0,50}{1+2B_\theta}$	$k_\theta = \frac{16}{3} Gr_0^3$

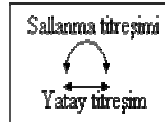
NOT

Titreşim şekillerinin gösterimi

Düşey titreşim



Burulma titreşimi



Sallanma titreşimi



Yatay titreşim



## 11.5. Titreşim Kuvvetine Maruz Grup Kazıklar

Kazıklar genellikle gruplar halinde inşa edilirler. Kazık gruplarının rijitlikleri ve sönümlenmeleri, grup etkisi dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Fakat bu değerler, kazıklarının her birinin rijitlik ve sönümlenme faktörleri toplanarak elde edilemeyecek kadar karmaşıktır. Grup etkileşimi kazıklar arası mesafelere ve kazık çaplarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu bölümde kazık gruplarının farklı titreşimler altında rijitlik ve sönümlenme katsayıları ayrı ayrı irdelenmiştir.

### 11.5.1. Düşey titreşimlere maruz kazık grupları

Novak (1977) yaptığı araştırmalar sonucunda kazık grupları için rijitlik ve sönümlenme katsayılarını (11.30) ve (11.31) ile ifade etmiştir:

$$k_{z(T)} = \frac{\sum_{z=1}^n k_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} + G_s D_f \bar{S}_1 \quad (11.30)$$

$$c_{z(T)} = \frac{\sum_{z=1}^n c_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} + D_f r_0 \bar{S}_2 \sqrt{G_s \rho_s} \quad (11.31)$$

$k_z, c_z$ : her bir kazığın rijitlik ve sönümlenme katsayıları

$\alpha_r$ : r'ninci kazığın referans kazığın yer değiştirmesine katkısını belirten etkileşim faktörü (kazıklar arası mesafelere ve kazık çapına bağlı olarak tablolardan alınır)

$D_f$ : kazık başlığının gömülme derinliği

n: kazık sayısı

$r_0$ : kazık başlığının yarıçapı

$S_1, S_2$ : tablolardan alınan sabitler

$k_{z(T)}$  ve  $c_{z(T)}$  değerleri hesaplandıktan sonra, sistemin davranışı aşağıdaki prosedür takip edilerek belirlenebilir:

a) Sönümlenme oranı bulunur:

$$D_z = \frac{c_{z(T)}}{2\sqrt{k_{z(T)} m}} \quad (11.32)$$

Burada  $m$  kazık başlığının ve başlık tarafından taşınan makinenin kütlesidir.

b) Sönümlenmemiş doğal frekans hesaplanır:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{z(T)}}{m}} \quad (11.33)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{z(T)}}{m}} \quad (11.34)$$

c) Sönülmenmiş doğal frekans bulunur:

$$f_m = f_n \sqrt{1 - 2D_z^2} \quad (\text{sabit kuvvetle tahrik durumunda}) \quad (11.35)$$

$$f_m = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2D_z^2}} \quad (\text{değişken kütle-tipi tahrik durumunda}) \quad (11.36)$$

d) Rezonans durumunda titreşim şiddeti hesaplanır:

$$A_s = \frac{Q_0}{k_{z(T)}} \times \frac{1}{2D_z \sqrt{1 - D_z^2}} \quad (\text{sabit kuvvetle tahrik durumunda}) \quad (11.37)$$

$$A_z = \frac{m_1 e}{m} \times \frac{1}{2D_z \sqrt{1 - D_z^2}} \quad (\text{değişken kütle-tipi tahrik durumunda}) \quad (11.38)$$

e) Rezonans haricindeki frekanslarda titreşim şiddeti bulunur:

$$A_z = \frac{\frac{Q_0}{k_{z(r)}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4D_z^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (\text{sabit kuvvetle tahrik} \quad (11.39)$$

durumunda)

$$A_z = \frac{\frac{m_1 e \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{m}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4D_z^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (\text{değişken kütle-tipi} \quad (11.40)$$

tahrik durumunda)

### 11.5.2. Yatay titreşimlere maruz kazık grupları

Kazıklar gruplar halinde yerleştirildiklerinde ve yatay titreşimlere maruz bırakıldıklarında yay sabiti ve sönümlenme katsayısı (11.41) ve (11.42) bağıntılarıyla hesaplanabilir:

$$k_{x(g)} = \frac{\sum_{x=1}^n k_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (11.41)$$

$$c_{x(g)} = \frac{\sum_{x=1}^n c_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (11.42)$$

$c_{x(g)}$ : kazık grubu için sönümlenme katsayısı

$n$ : gruptaki kazık sayısı

$\alpha_{L(r)}$ : etkileşim faktörü

Etkileşim faktörü, referans kazıkla etkileştiği kazık arasında kalan ve “hareket açısı” olarak adlandırılan açığa bağlı olarak grafiklerden elde edilir.

Kazık başlığı da dikkate alındığında formüller aşağıdaki hali alır:

$$k_{x(T)} = \frac{\sum_{x=1}^n k_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + G_s D_f \bar{S}_{x1} \quad (11.43)$$

$$c_{x(T)} = \frac{\sum_{x=1}^n c_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + D_f r_0 \bar{S}_{x2} \sqrt{G_s \rho_s} \quad (11.44)$$

Sistemin sönümlenme oranı (11.45) ile bulunabilir:

$$D_x = \frac{c_{x(T)}}{2\sqrt{k_{x(T)}^m}} \quad (11.45)$$

Burada  $m$  kazık başlığının ve başlık tarafından taşınan makinelerin kütesidir. Sönümlenmiş doğal frekans  $f_m$  ve sönümlenmemiş doğal frekans  $f_n$  ise aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \sqrt{\frac{k_z(T)}{m}} \right] \left[ \sqrt{1 - 2D_x^2} \right] \quad (11.46)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\frac{k_z(T)}{m}}}{\sqrt{1 - 2D_x^2}} \quad (11.47)$$

### 11.5.3. Sallanma/Çalkantı titreşimlerine maruz kazık grupları

Kazıklar grupları için rijitlik ( $k_{\Theta(g)}$ ) ve sönümlenme ( $c_{\Theta(g)}$ ) sabitleri (11.48) ve (11.49) ile hesap edilebilir:

$$k_{\theta(g)} = \sum_1^n [k_{\theta} + k_z x_r^2 + k_x Z_c^2 - 2Z_c k_{x\theta}] \quad (11.48)$$

$$c_{\theta(g)} = \sum_1^n [c_{\theta} + c_z x_r^2 + c_x Z_c^2 - 2Z_c c_{x\theta}] \quad (11.49)$$

Kazık başlığı da dikkate alındığında ise rijitlik ( $k_{\Theta(cap)}$ ) ve sönümlenme ( $c_{\Theta(cap)}$ ) matrisleri aşağıdaki şekli alır:

$$k_{\theta(cap)} = G_s r_0^2 D_f \bar{S}_{\theta 1} + G_s r_0^2 D_f \left[ \frac{\delta^2}{3} + \left( \frac{Z_c}{r_0^2} \right) - \delta \left( \frac{Z_c}{r_0} \right) \right] \bar{S}_{x1} \quad (11.50)$$

$$c_{\theta(cap)} = \delta r_0^4 \sqrt{G_s \rho_s} \left[ \bar{S}_{\theta 2} + \left[ \frac{\delta^2}{3} + \left( \frac{Z_c}{r_0^2} \right) - \delta \left( \frac{Z_c}{r_0} \right) \right] \bar{S}_{x2} \right] \quad (11.51)$$

$Z_c$ : başlığın ağırlık merkezinden, başlığın bitip kazıkların başladığı seviyeye olan düşey mesafe

$r_0$ : kazık başlığının eşdeğer yarıçapı

$x_r$ : başlığın ağırlık merkezinden hesabı yapılan kazığa x eksenini doğrultusunda olan yatay mesafe

$$\delta = \frac{D_f}{r_0} \quad (11.52)$$

Bu bağıntılar yardımıyla toplam rijitlik ve sönümlenme oranları da aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$k_{\theta(T)} = k_{\theta(g)} + k_{\theta(cap)} \quad (11.53)$$

$$c_{\theta(T)} = c_{\theta(g)} + c_{\theta(cap)} \quad (11.54)$$

Bir defa  $k_{\theta(T)}$  ve  $c_{\theta(T)}$  değerleri elde edildikten sonra, aşağıdaki yol izlenerek sistemin davranışı hesaplanabilir:

a) Sönümlenme oranı bulunur:

$$D_x = \frac{c_{\theta(T)}}{2\sqrt{k_{\theta(T)}I_g}} \quad (11.55)$$

$I_g$ : y aksına göre kütle atalet momenti

$$I_g = \frac{m}{12}(L^2 + h^2) \quad (\text{kare başlıklar için}) \quad (11.56)$$

$$I_g = \frac{m}{12}(3r_0^2 + h^2) \quad (\text{dairesel başlıklar için}) \quad (11.57)$$

b) Sönümlenmemiş doğal frekanslar bulunur:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{\theta(T)}}{I_g}} \quad (11.58)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\theta(T)}}{I_g}} \quad (11.59)$$

c) Sönümlenmiş doğal frekanslar hesaplanır:

$$f_m = f_n \sqrt{1 - D_\theta^2} \quad (11.60)$$

$$f_m = \frac{f_n}{\sqrt{1 - D_\theta^2}} \quad (11.61)$$

#### 11.5.4. Burulma titreşimlerine maruz kazık grupları

Bir kazık grubu burulma titreşimine maruz kaldığında toplam rijitlik ( $k_{\alpha(T)}$ ) ve toplam sönümlenme ( $c_{\alpha(T)}$ ) sabitleri sırasıyla (11.62) ve (11.63) kullanılarak hesaplanır:

$$k_{\alpha(T)} = k_{\alpha(g)} + k_{\alpha(cap)} \quad (11.62)$$

$$= \sum_1^n [k_{\alpha} + k_x(x_r^2 + y_r^2)] + D_f G_s r_0^2 S_{\alpha 1}$$

$$c_{\alpha(T)} = c_{\alpha(g)} + c_{\alpha(cap)} \quad (11.63)$$

$$= \sum_1^n [c_{\alpha} + c_x(x_r^2 + y_r^2)] + D_f G_s r_0^3 S_{\alpha 2} \sqrt{G_s \rho_s}$$

Aşağıda, sistemin davranışının hesabı için gerekli bağıntılar verilmiştir:

a) Sönümlenme oranı:

$$D_{\alpha} = \frac{c_{\alpha(T)}}{2\sqrt{k_{\alpha(T)} J_{zz}}} \quad (11.64)$$

Burada  $J_{zz}$  merkezden geçen düşey aksa göre kazık başlığının ve makinelerin kütleli atalet momenti olup farklı geometride başlıklar için farklı bağıntılar kullanılarak elde edilir:

$$J_{zz} = \frac{m}{12} (L^2 + B^2) \quad (\text{dörtgen başlıklar için}) \quad (11.65)$$

$$J_{zz} = \frac{mr_0^2}{2} \quad (\text{daireli başlıklar için}) \quad (11.66)$$

b) Sönümlenmemiş doğal frekans:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{\alpha(T)}}{J_{zz}}} \quad (11.67)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\alpha(T)}}{J_{zz}}} \quad (11.68)$$

c) Sönümlenmiş doğal frekans:

$$f_m = f_n \sqrt{1 - D_\alpha^2} \quad (11.69)$$

$$f_m = \frac{f_n}{\sqrt{1 - D_\alpha^2}} \quad (11.70)$$



## 12. DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ KAZIK TEMELLER

Kazık temellerin deprem yükleri altında davranışı, üst yapının performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür. Orta ve yüksek şiddetli sismik yüklemelerde kazık temellerde büyük yer ve şekil değiştirmeler görülebilir ve zemin-kazık sisteminin davranışı doğrusallıktan uzaklaşır. Aynı zamanda zemin-kazık sistemi üst yapıyla da etkileşim halindedir ve bu nedenle doğrusallıktan uzaklaşan davranış kazıklarla desteklenen yapılar açısından büyük önem taşır.

Genelde kazık temeller gruplar halinde inşa edildiği için grup faktörünün depremdaki performansa etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Tekil kazıkların depremdaki performansının belirlenmesinde genellikle, kazığının ve zeminin doğrusallıktan uzak davranışlarına uygunluğu açısından Winkler yay modeli kullanılmaktadır. Grup kazıklarda ise elastisite ve dalga yayılımı temelli yöntemlerle, p-çarpanı yöntemi tercih edilmektedir.

Kazık temeller üzerinde, geçmiş dönemlerde meydana gelen depremler sonrası yapılan araştırmalar ve deneyler göstermiştir ki deprem yükleri altında sıkı ve sert zeminlerdeki kazıklarda genellikle iyi sonuçlar alınırken, yumuşak, gevşek ve sıvılaşabilen zeminlerde mükemmelden zayıfa çok değişken bir tablo ortaya çıkmaktadır. Buna göre, kazıkların inşa edildiği zemin türünün, kazık temelin deprem durumundaki performansı açısından çok önemli olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle, kazık temellerin sismik tasarımını yaparken zeminin sismik özelliklerinin de araştırılması gerekmektedir.

Aynı zamanda, ne emniyetten ve ne de ekonomiden ödün vermemek için, sismik kayıtlardan yararlanarak o bölgenin sismolojisi hakkında bilgi edinmek ve tasarımı muhtemel en büyük deprem şiddetine göre yapmak gereklidir.

### 12.1. Deprem Açısından Zeminlerin Sınıflandırılması

Tablo 12.1’de zemin yüzünden itibaren 30m derinliğe kadar olan zeminlerin deprem açısından sınıflandırılması görülmektedir. Fakat pek çok durumda zeminin kayma dalgası hızlarına ulaşmak mümkün olmamaktadır. [16]

**Tablo 12.1:** Zeminlerin sınıflandırılması

Zemin Sınıfı	Zemin Tipi	Kayma Dalgası ( $V_s$ ) Hızı [m/s]	Drenajsız Kayma Mukavemeti ( $c_u$ ) [kN/m <sup>2</sup> ]	Düzeltilmiş SPT Sayısı (N)
A	Sert kaya	>1500	-	-
B	Kaya	760~1500	-	-
C	Çok sıkı zemin veya yumuşak kaya	360~760	$\geq 98$	> 50
D	Sıkı / sert zemin	180~360	49~98	15~50
E	Gevşek / yumuşak zemin	< 180	< 49	<15
	Yumuşak zemin (PI>10)	-	<24	-
F*	Sıvılaşılabilen, hassas, çöken zemin gibi sismik yük etkisinde kolayca çökebilen zeminler Turba ve organik kil (H>3m) Yüksek plastisiteli kil (H >7,5m, PI >75) Çok kalın yumuşak kil tabakaları (H >35m)	-	-	-

NOT: F tipi zeminler için bölgede özel araştırmalar yapılmalıdır. Zemin hakkında yeterli bilgi bulunmadığı takdirde D sınıfı kabulü yapılabilir.

Zeminin ilk 30mlık kısmı çok farklı zemin katmanlarından oluşuyorsa,  $V_s$  kayma dalgası hızı,  $c_u$  drenajsız kayma mukavemeti ve N düzeltilmiş SPT sayısı için normalize edilmiş değerler kullanılabilir.

Bu değerleri belirlemek için kullanılan formüller sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (12.1)$$

N: üst 30m'lik kısımdaki katmanların numaraları

$d_i$ : i'ninci katmanın kalınlığı

$V_{si}$ : i'ninci katmanın kesme dalgası hızı

$$\bar{c}_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_{ci}}{c_{ui}}} \quad (12.2)$$

k: üst 30m'lik kısımdaki kohezyonlu zemin tabakalarının numaraları

$d_c$ : üst 30m'lik kısımdaki kohezyonlu tabakaların toplam kalınlığı

$d_{ci}$ : i'ninci kohezyonlu zemin tabakasının kalınlığı

$c_{ui}$ : i'ninci kohezyonlu zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemeti

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (12.3)$$

Burada kullanılan diğer simgeler yukarıdaki formüllerin açıklamalarında verilmiş olup,  $N_i$  i'ninci tabakanın SPT değeridir.

## 12.2. Sismik Tehlike Sınırının Belirlenmesi

Kazık temellerin sismik tasarımı yapılırken, ekonomi ve güvenliği aynı anda sağlamak için, o bölgede meydana gelmesi muhtemel deprem şiddetini belirlemek gereklidir. Bölgede beklenen en büyük şiddetli deprem (MCE), 50 yıl içerisinde meydana gelme olasılığı %2 olan en büyük şiddetli deprem olarak kabul edilir. Bir başka deyişle, bölgede meydana gelebilecek en büyük deprem, periyodu 2475 yıl olan en şiddetli depremdir. Fakat kazık temellerin ve köprülerin yapımında 25 veya 50 yıl içerisindeki gerçekleşme ihtimali %5 olan (periyodu 500~1000 yıl

olan) en şiddetli depremleri kullanmak yeterlidir. Bu bilgiler deprem kayıtlarından elde edilebilir. Tasarım sırasında kullanılacak deprem şiddeti (DE) ise, bölgede beklenen en şiddetli depremin (MCE) 2/3 kadarı olmalıdır.

Bu tür verilere doğrudan ulaşma imkanı yoksa yönetmeliklerden, bölgede beklenen en şiddetli deprem değerleri alınarak bunlar da (MCE) olarak kullanılabilir.

Deprem şiddetinden ziyade zeminin sismik davranışıyla ilgili başka bir takım verilere ve tanımlara da ihtiyaç vardır. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

P dalgaları birincil dalga, basınç dalgası, dönmesiz dalga olarak da bilinirler. Bunlar en hızlı kütle dalgalarıdır. Zemin boyunca enerjiyi taşıyan ve zemin partiküllerini dalga doğrultusunda hareket ettiren boyuna dalgalarıdır.

S dalgaları ikincil dalga, kayma dalgası, sabit hacim dalgası olarak da bilinirler. Enerji iletim doğrultusuna dik açılar yapacak şekilde zemin partiküllerini çalkalayan kütle dalgalarıdır. Bu dalgalar hava, su, erimiş kayalar gibi akışkanlardan geçemezler.

R dalgaları (Rayleigh Dalgaları) zemin danelerini dalga hareketi doğrultusu boyunca düşey düzlemde eliptik bir yörüngede çalkalayan yüzey dalgalarıdır.

L dalgaları (Love Dalgaları) yatay bir düzlemde, zeminin bir yandan öbür yana yatay hareketine sebep olan sismik yüzey dalgalarıdır.

Pik zemin ivmesi (PGA) deprem durumunda sismik dalganın zemin yüzeyinde beklenen en büyük ivmesidir. Etkili pik zemin ivmesi (EPGA) ise, bu ivmenin yapıya hasar verebilecek en büyük değeridir.

Pik zemin dalga hızı (PGV) deprem durumunda sismik dalganın zemin yüzeyinde beklenen en yüksek hızıdır. Efektif pik zemin dalga hızı da yapıya zarar verebilecek boyuttaki en büyük zemin dalga hızıdır.

Pik zemin ivmesi deprem haritalarından yaklaşık olarak bulunabileceği gibi, aşağıdaki bağıntı kullanılarak da hesaplanabilir:

$$\log(\text{PGA}) = 0,437 + 0,545M_s - 0,739 \log(r) - 0,00279r \quad (12.4)$$

$M_s$ : yüzeysel deprem dalgasının şiddeti

r: km cinsinden episantra olan mesafe

İşlemden PGA'nın birimi  $\text{cm}^2/\text{sn}^2$ 'dir.

$M_s$  yüzey dalga şiddeti, gövde dalga şiddeti  $m_b$ 'ye bağlı olarak (12.5) ile hesaplanabilir [17]

$$\begin{aligned} M_s &= 1,64m_b - 3,16 & (m_b \geq 5,59) \\ M_s &= 1,02m_b - 0,30 & (m_b < 5,59) \end{aligned} \quad (12.5)$$

Johnston (1989) tarafından bulunan bağıntıyla,  $M_s$  yüzey dalgası şiddeti,  $M_w$  moment şiddetine aşağıdaki bağıntı kullanılarak çevrilebilir:

$$M_w = 4,355 - 0,268M_s + 0,094M_s^2 \quad (12.6)$$

Yukarıdaki (12.6) denklemini yalnızca  $M_w > 4,5$  olduğu takdirde doğru sonuçlar vermektedir. Bu denklemlerle hesaplanan  $M_w$  ve  $M_s$  değerleri arasındaki fark küçüktür.

Nuttli ve Hermann, Mississippi Vadisi depreminin verilerini kullanarak yatay pik zemin ivmesi (PHGA) için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir:

$$\log \text{PHGA} = 0,57 + 0,50m_b - 0,83 \log(R^2 + h^2)^{1/2} - 0,00069R \quad (12.7)$$

R: km cinsinden episantra olan mesafe

h: km cinsinden odak derinliği

Bağıntıda  $m_b \geq 4,5$  olmak üzere PHGA  $\text{cm/sn}^2$  cinsinden bulunur. Nuttli ve Hermann (1984) minimum odak derinliği için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir:

$$\log h_{\min} [\text{km}] = -1,73 + 0,456m_b \quad (12.8)$$

Campbell (1981) odağı yakın ve zemin hareketleri güçlü Kuzey Amerika Merkezi için (12.9) eşitliğini vermiştir:

$$\begin{aligned} \text{PHGA} &= 0,0142 e^{0,79M_s} (R + 0,0286 e^{0,778M_s})^{-0,862} e^{-\gamma R} \\ \gamma &= - (0,023 - 0,0048 M_s + 0,00028 M_s^2)R \end{aligned} \quad (12.9)$$

R: km cinsinden faydan uzaklık

g: yerçekimi ivmesi

Bağıntılar deneysel verilere dayalı olarak kurulmuştur ve odak uzaklığından bağımsızdır.

Pik zemin dalga hızı ise eğer dinamik deney yapılamıyorsa, SPT değerine bağlı olarak kohezyonsuz zeminler için (12.10) eşitliği ile hesaplanabilir:

$$V_s = 97N_{SPT}^{0,314} \quad (12.10)$$

Kohezyonlu ve siltli zeminler içinse aşağıdaki bağıntının kullanılması uygundur:

$$V_s = 114N_{SPT}^{0,217} \quad (12.11)$$

Pik zemin ivmesi ve pik zemin dalga hızı arasında Tablo 12.2'de gösterildiği şekilde bir bağıntı vardır. Pik zemin ivmesi biliniyorsa bu tablo yardımıyla pik zemin dalga hızı için yaklaşık bir değer elde edilebilir.

Bunların yanında kohezyonsuz suya doymuş zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin de irdelenmesi ve sismik yük durumunda sıvılaşma ihtimali varsa önlemlerin bu durum da göz önünde bulundurulması gereklidir.

**Tablo 12.2:** Pik zemin dalga hızı ve pik yer ivmesi arasındaki bağıntı

Deprem Moment Şiddeti ( $M_w$ )		PGV [cm/sn] / PGA [ $m/s^2$ ] oranı		
		İnşaat alanının deprem kaynağına uzaklığı [km]		
		0~20	20~50	50~100
Kaya	6.5	66	76	86
	7.5	97	109	97
	8.5	127	140	152
Sert Zemin	6.5	94	102	109
	7.5	140	127	155
	8.5	180	188	193
Yumuşak Zemin	6.5	140	132	142
	7.5	208	165	201
	8.5	269	244	251

NOT: Unutulmamalıdır ki zemin sertten yumuşağa değişim gösterdikçe, PGV ve PGA değerleri arasındaki bu bağıntıların kesinliği azalır.

### 12.3. Zemin Koşullarının Sarsıntı Şiddetine ve Yapısal Hasara Etkisi

Bu konuda ilk önemli bilgiler 1957 San Francisco depreminde değişik noktalardan alınan bazı ölçümlerle elde edilmiştir. Bu ölçümler, deprem enerjisi boşalım merkezinden aynı uzaklıkta, birbirine yakın bölgelerde oluşan yer ivmelerinin bazen birbirinden %100'e varan farklılıklar gösterdiğini ve bunun büyük olasılıkla ölçüm istasyonları altındaki zemin koşullarından ileri geldiğini ortaya koymuştur. Benzer farklılıklar 1965 Osaka depreminde de gözlenmiştir. [18]

Bir sahada oluşabilecek pik zemin ivmesi çok önemli olmakla beraber, tek başına yer sarsıntılarının yol açacağı etkileri belirlemeye yetmemekte, aynı zamanda yer hareketlerinin frekans özellikleri ve süresi de önemli olmaktadır. Bazen yüksek frekanslı ve kısa süreli bir depremde yer ivmesi 0,5 g. değerine kadar yükseldiği halde önemli bir hasar gözlenmezken, pik yer ivmesi 0,1 g. olduğu halde yer hareketinin frekans özellikleri ve süresinden dolayı çok katlı yapıların tamamen göçmesine varan hasarlar gözlenmiştir.

Yer ivmesinin genliği, frekans özellikleri ve süresinin değişik yapılar üzerindeki ortak etkisi en uygun biçimde "davranış spektrumları" ile karakterize edilebilmekte, değişik sahalarda oluşmuş deprem hareketleri en iyi şekilde onların davranış spektrumlarının karşılaştırılması ile değerlendirilebilmektedir. Davranış spektrumları yer hareketlerinin tek serbestlik dereceli ve değişik hakim periyotlu fakat aynı içsel sönüm özellikleri olan osilatörlerde yol açtığı maksimum davranışı gösteren şekillerdir.

Daha önemlisi, bir davranış spektrumu bir taban hareketinin yapılarda meydana getireceği yatay yüklerin hesaplanmasında çok faydalı olmaktadır. Bir yapıya etkiyecek maksimum atalet kuvvetleri dorudan doruya ivme davranış spektrumu ve yapının hakim periyodundan hesap edilebilmektedir.

## **12.4. Zemin Koşullarının Yer Hareketlerinin Özelliklerine Etkisi**

Bir sahada oluşabilecek yer hareketlerinin özelliklerine zemin koşullarının etkisini ve bu koşullar altında o sahada beklenilebilecek yer hareketlerini belirlemek için değişik yöntemlere başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden sık kullanılanları konu içerisinde özetlenmiştir.

### **12.4.1. Deprem kayıtlarının toplanması (Strong motion)**

Değişik zemin koşullarına sahip çok sayıda sahada, çeşitli şiddette ve episantr uzaklığında depremlerden toplanacak deprem kayıtlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması sonucu inşaat sahalarında beklenebilecek muhtemel yer hareketleri geçmiş bilgilere dayanarak tahmin edilebilir. Bunun için çok sayıda geçmiş deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır ve her zemin profili için bu kayıtların toplanması mümkün değildir.

### **12.4.2. Mikrotremor deneylerinden yararlanma**

Çok küçük depremler ve mikrotremorlar sık sık meydana geldiği için, inşaat mahalline bu hareketleri kaydedecek aygıtların götürülmesi ve elde edilecek kayıtların değerlendirilmesiyle o sahada oluşacak daha kuvvetli depremler sırasında görülebilecek yer hareketleri tahmin edilebilir. Fakat zeminlerin doğrusal olmayan yapılarının ve deprem şiddetinin değişimine bağlı olarak görülen gerilme-şekil değiştirme mertebelerinin farklılıkları da göz önünde bulundurularak, bu deneylerle elde edilen verilerin sadece hesaplarda kullanılan alt sınır değerlerin kontrol edilmesi amacıyla yapılması tavsiye olunur.

### **12.4.3. Hesap yöntemleri**

Genellikle bir deprem sırasında zemin yüzünde oluşan yer hareketleri, zemin tabakaları altında yer alan kayada meydana gelen titreşimlerin, dalgaların zemin yüzüne doğru yayılması sonucu iletilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Son



yıllarda bu koşullar altında zemin davranışını inceleyen farklı hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Bu hesap yöntemlerinden bazıları şu şekilde verilebilir:

- Dalga denkleminin çözümü esasına dayanan ve zeminin yatay, birbirine paralel, üniform ve viskoelastik özellikleri olan tabakalardan oluştuğunu ve dalgaların taban kayan zemin yüzüne doğru sinüzoidal hareketler halinde yayıldığını kabul eden sistem
- Yatay zemin tabakalarını, birbirine kayma yayları ile bağlı toplu kütleler olarak ele alan ve tabanında yaratılan bir hareket sonucu bu sistemin davranışını klasik dinamik analiz yöntemleriyle inceleyen yöntem
- Karmaşık tabakalaşma ve sınır koşulları olan zemin problemlerinde, zemini sonlu elemanlar olarak idealize eden ve iki yönlü toplu kütlelerin dinamik davranışı olarak inceleyen yöntem

Bu hesap yöntemleri zeminin dinamik davranışını farklı kabullerle ve farklı şekillerde ele almakla beraber, izledikleri yol hemen hemen aynıdır ve şu aşamalardan oluşur:

- İnşaat sahası altında yer alan taban kayası formasyonlarında muhtemel yer hareketlerinin özelliklerinin belirlenmesi ve hesapta kullanılmak üzere bu özelliklere uygun bir ivme kaydının seçilmesi: En büyük ivme, hakim periyot ve etkiye süresi, bir depremin en önemli özellikleri olmaktadır. Değişik şiddette depremler için bu parametrelerle sahanın büyük fay hatlarına uzaklığı arasında ampirik bağıntılar ve grafikler geliştirilmiştir. İstenilen özelliklere sahip bir proje yer hareketi, geçmişte benzer zemin koşullarına sahip bölgelerde kaydedilmiş kuvvetli hareket ivme kayıtlarından (strong motion accelerograms) veya yapay olarak üretilmiş ivme kayıtlarından yararlanılarak seçilebilmektedir.
- Zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin seçilmesi: Zeminlerin dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının birim kayma seviyesi ve onların statik özellikleri ile değişimini veren deneysel yöntemler ve bağıntılar geliştirilmiştir. Bu yöntemler yardımı ile temel zeminini oluşturan tabakaların dinamik özellikleri seçilebilir.
- Taban kayada oluşan yer hareketinin etkisi altında zemin tabakalarının davranışının hesaplanması: Eğer zemin tabakalaşması yatay veya yataya yakın

ise, tek boyutlu bir hesap yöntemi kullanılabilir. Bu durumda, zemin tabakalarının davranışı dalga denkleminin çözümü veya toplu kütle (lumped mass) benzeşim yaklaşımı ile hesaplanabilmektedir. Daha karmaşık zemin tabakalaşması gösteren durumlarda ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

### 12.5. Zemin Sıvılaşması

Depremlerin mühendislik yapıları üzerinde yol açtığı hasarlar arasında en dramatik olanı suya doymuş gevşek kum tabakalarının sıvılaşması sonucu ortaya çıkan hasarlardır. Bu durumlarda zemin yüzeyindeki yapılar önemli ölçüde zemin içine bataabilmekte veya zemine gömülü yapılar yüzerek zemin yüzüne çıkabilmektedir. Zemin sıvılaşmasının en çok bilinen örnekleri 1964 Japonya Niigata ve 1938 Montana Fort Peck, 1971 California San Fernando barajlarında gözlenen hidrolik dolu gövdelerin akmaları ile 1964 Alaska Anchorage'deki zemin akmaları ve kaymalarıdır.

Genellikle suya doymuş bir kum tabakası deprem titreşimlerine uğradığı zaman sıkışma ve hacimce küçülme eğilimi gösterir. Fakat drenaj mümkün değilse (ki depremlerin drenaj için yetersiz sürelerde gerçekleştiği de göz önüne alınırsa drenajın çoğunlukla mümkün olmadığı görülür) hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncının artması sonucunu doğurmakta, boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncına eşit olacak mertebeye ulaştığı zaman efektif gerilmeler sıfır olmakta ve kum tabakası mukavemetini tamamen kaybetmekte yani sıvılaşmaktadır. Sıvılaşma sonucu kaybolan mukavemet, artan şekil değiştirme sürecinde yeniden kazanılır. Yani sadece gevşek granüler zeminlerde titreşimlerin oluşturduğu sıvılaşmayı bir sertleşme (pekleşme) olayı izlemektedir. [18]

Sıvılaşma için bir diğer tanım ise şu şekilde yapılmaktadır: Kritik boşluk oranından daha büyük bir boşluk oranına sahip doymuş bir doğal kum kütleli bir depreme veya patlamaya bağlı olarak ani bir kayma gerilmesine maruz kaldığında, kumda ani bir hacim azalması görülür. Bu da boşluk suyu basıncının ( $u$ ) artmasıyla sonuçlanır. Herhangi bir derinlikteki efektif gerilme  $\sigma' = \sigma - u$  bağıntısıyla

hesaplandığına göre, eğer  $\sigma$  sabit kalıp  $u$  artarsa  $\sigma'$  değerinin azalacağı çok net görülmektedir. Bu da zeminin kayma dayanımındaki düşüşle sonuçlanır. Eğer zeminin kayma dayanımı, zemine etkiyen kayma gerilmesinden daha düşük bir değere inerse zemin göçer. Bu olay sıvılaşma olarak adlandırılır. [19]

### 12.5.1. Sıvılaşmaya etki eden faktörler

Deprem titreşimleri sonucu zeminlerde sıvılaşmayı ortaya çıkaran faktörler sıvılaşmanın gözleendiği arazilerdeki zemin koşullarının incelenmesi ve laboratuvar deneyleri sonuçlarının değerlendirilmesi ile ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sıvılaşma nedeni ile en şiddetli hasarın gözleendiği bölgelerde temel zemininin genellikle kalın, üniform, suya doygun kum tabakalarından oluştu gözlenmiştir. Bu bölgelerdeki kumların granülometrisi incelendiğinde bunların yüzde on dane çapının ( $D_{10}$ ) 0,01 ile 0,25mm arasında olduğu ve uniformluk katsayısının 2 ile 10 arasında değiştiği görülmüştür. Sıvılaşmanın oluştuğu kum tabakalarının SPT darbe sayısının da genellikle 25'in altında kaldığı gözlenmiştir.

Sıvılaşma üzerine laboratuvarda yapılan çok sayıda çalışmada ise sıvılaşmanın titreşimli gerilmelerin şiddeti, titreşim sayısı, kumun boşluk oranı (rölatif sıkılık), başlangıç gerilme durumu gibi pek çok faktörden etkilendiği ortaya konulmuştur.

Laboratuvar çalışmaları sonucunda bazı araştırmacılar her sıkılık derecesinde bir sıvılaşma durumunun oluştuğunu, bazıları ise gevşek kumlarda oluşan sıvılaşma durumunun sıkı kumlarda söz konusu olamayacağını söylemektedirler.

Sıkı kumladaki sıvılaşma durumu “birim şekil değiştirmesi sınırlanmış sıvılaşma” olarak ifade edilmektedir. Bu durum, tekrarlı yükler altında, bir yükleme devresinin sonunda, sıvılaşma başlangıcının oluşması, fakat bunu izleyen yükleme devrelerinde zemin elemanın bir artık mukavemet kazanmasından veya sıkı kumlarda hacim genişlemesi neticesinde boşluk suyu basıncının düşerek kaymak mukavemetinde bir artış olmasından ötürü, şekil değiştirmelerin “sınırlı kalması” ve zemin elemanın tekrarlı yükler altında kararlı bir konuma gelmesidir.

Bu tanımdan da görülebileceği gibi, gevşek kumlarda gözlenen sıvılaşma hali sıkı kumlarda farklı bir şekilde oluşmakta ve diğer faktörlerin etkisi ile daha karmaşık bir olay olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sıvılaşmaya etki eden faktörleri ve sıvılaşmayı ne yönde etkiledikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Rölatif sıklık: Tipik alüvyon kumları için gevşek sıvılaşmanın olabileceği maksimum rölatif sıklık değeri, çevre basıncına bağımlı olarak 0,40~0,50 arasında değişmektedir.  $0,40 < D_r < 0,60$  arasında yer alan orta sıkı kumlarda tekrarlı yükler büyük şekil değiştirmelere yol açabilir fakat gerçek sıvılaşma çok nadir olur.  $D_r > 70$  olan kumlarda ise gerçek sıvılaşma görülmez.
- Başlangıç gerilme durumu: Seed (1976) ve Ishihara (1977) laboratuvar deneyleri sonuçlarında aşırı konsolide kumların sıvılaşabilmesi için normal konsolide kumlara nazaran daha büyük dinamik gerilmelere maruz kalması gerektiği sonucuna varmışlardır. Wenshao ise Çin Halk Cumhuriyeti'nde 1959'dan bu yana kendi geliştirdikleri üç eksenli deney aletinde yaptıkları çalışmalar sonucunda anizotropik konsolidasyon uygulanan numunelerde  $K_c = \sigma_1 / \sigma_3$  konsolidasyon oranı arttıkça boşluk suyu basıncı artışlarının azaldığını ve sıvılaşma başlangıcının oluşmadığını ifade etmiştir. Bu açıklamalara karşın Castro ve Poulos (1976) gevşek kumlarda başlangıç kayma gerilmelerinin mevcudiyetinin sıvılaşma olasılığını arttırdığını ve kolaylaştırdığını,  $\sigma_1 / \sigma_3$  oranı arttıkça daha küçük bir dinamik gerilme değerinin ani sıvılaşmaya ve büyük şekil değiştirmelere yol açtığını belirtmişlerdir.
- Dane özellikleri: Üniform ve yuvarlak daneli zeminlerde sıvılaşma ihtimali, iyi derecelenmiş ve köşeli daneli zeminlere nazaran daha fazladır.
- Dane iç yapısı (çökeltme, numune hazırlama yöntemleri)
- Yük altında bulunma süresi (tabakaların jeolojik yaşı)
- Gerilme tarihçesi

Laboratuvarda yapılan deneylerde suya doymuş kum numunelerinin gerçek sıvılaşması ancak izotropik konsolidasyonlu veya çok küçük konsolidasyon oranlı gevşek numunelerde görülmekte, sıkı ve anizotropik numunelerde ise yaygın olarak kullanıldığı anlamda bir sıvılaşma meydana gelmemektedir. Bu deneysel

sonuçlar, arazide görülen sıvılaşma olaylarının azlığını ve ender olarak görülen bu olayların nedenlerini yorumlamayı kolaylaştırmaktadır. Arazideki zemin tabakalarının sıvılaşmasının ancak gevşek hidrolik dolgular veya denizden kazanılmış dolgularda ve/veya Niigata depreminde gözlemlendiği gibi şok tipi bir ani yükleme ve onu takip eden belirli bir seviyedeki kayma gerilmelerinin mevcudiyeti altında meydana gelebileceği düşünülmektedir.

### 12.5.2. Yerinde ölçümlerle sıvılaşma direncinin belirlenmesi

Kumun devirsel dayanımının doğru hesaplanması için yüksek kaliteli örselenmemiş numuneler elde etmek ve bu numuneleri laboratuarda deneye tabi tutmak en uygun yöntemdir. Fakat yeraltı su seviyesinin altındaki kum zeminlerden numune alınması sıvılaşmanın belirlenmesi açısından oldukça pahalı bir yöntemdir ve çok önemli projelerin yapımı haricinde pek tavsiye edilmemektedir. Bu nedenle, kumların devirsel dayanımlarının tespitinde daha basit ve ekonomik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle dünya çapında sıklıkla kullanılan SPT ve CPT deneylerinden elde edilen verilerden yola çıkılarak sıvılaşma ihtimalinin belirlenmesi mantığı üzerine kuruludur. [20]

Sıvılaşmanın SPT sayısına bağlı olarak bulunuşu (12.12) eşitliği ile verilmiştir.

$$\left( \frac{\sigma_{dl}}{2\sigma_0'} \right)_{20} = \frac{\tau_{max,l}}{\sigma_v'} = \frac{1}{1000} (9,5N_1 + 0,466N_1^2) \quad (12.12)$$

$\sigma_{dl}$ : sıvılaşma meydana getirecek eksenel gerilme

$\sigma_0'$ : efektif çevreleyen gerilme

$\sigma_v'$ : efektif düşey gerilme

$\tau_{max,l}$ : sıvılaşma yaratacak kayma gerilmesi

$N_1$ :  $\sigma_v'=1\text{kgf/m}^2$  efektif düşey gerilme altında elde edilen SPT değeri

Bu formül laboratuvar deneylerinden elde edilmiş olup, deneyler devirsel yüklerle yapıldığı için parantezin altında görülen 20 rakamı 20 devri ifade etmektedir. Eğer  $\tilde{N}$  değeri  $\sigma_v'=1\text{kgf/m}^2$  değerinden farklı bir değerde elde

edilmişse, (12.13) denkleminde  $\sigma_v'$  yerine bu değer yazılıp  $N_1$  değerine çevrilebilir.

$$N_1 = \frac{1,7}{\sigma_v' + 0,7} \bar{N} \quad (12.13)$$

Sıvılaşma meydana getirebilecek ivme ise (12.14) yardımı ile bulunabilir.

$$a_{\max,l} = \frac{5}{6} \bar{N}^2 + \frac{70}{6} \bar{N} \quad (12.14)$$

Sıvılaşmanın CPT değerine bağlı olarak elde edilişi daha sonraki zamanlarda belirlenmiş bir yaklaşımdır. Bu konu üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda Robertson ve Campanelle (1985), Shibata ve Teparaska (1988) ve Seed ve Alba (1986) normalize edilmiş koni penetrasyon direnci ( $q_{c1}$ ) ile devirsel gerilme oranları  $\tau_{\max,l} / \sigma_v'$  arasında bağıntılar belirlemiş, bunları formülize etmek yerine grafik haline getirmişlerdir.

Sıvılaşmaya sebep olacak gerilmeyi rölatif sıkılığa bağlı hesaplamak gerekirse (12.15) denklemi kullanılabilir. Bu denklemde bütün terimler önceden tanımlanmış olup  $D_r$  terimi de rölatif sıkılığı belirtmektedir.

$$\left( \frac{\sigma_{dl}}{2\sigma_0'} \right)_{20} = 0,0042 D_r \quad (12.15)$$

Dane çapının ve SPT direncinin aynı anda dikkate alındığı bir başka sıvılaşma gerilmesi formülü ise (12.6) ile verilmektedir.

$$0,04 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,6 \text{ mm} \Rightarrow \left( \frac{\sigma_{dl}}{2\sigma_0'} \right)_{20} = 0,0676 \sqrt{N_1} + 0,225 \log_{10} \left( \frac{0,35}{D_{50}} \right)$$

$$0,6 \text{ mm} < D_{50} \leq 1,5 \text{ mm} \Rightarrow \left( \frac{\sigma_{dl}}{2\sigma_0'} \right)_{20} = 0,0676 \sqrt{N_1} - 0,05 \quad (12.16)$$

$D_{50}$ : milimetre cinsinden numunenin ortalama dane çapı

## 12.6. Kazık-Zemin Etkileşimi

Tekil kazıkların dinamik davranışıyla ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Bunlardan birisi de doğrusal olmayan Winkler temeli üzerine oturan kiriş (BNWF) modelidir. Bu modelde kazık-zemin etkileşimi, doğrusal olmayan paralel yaylarla temsil edilmiştir.

p-y eğrileri yöntemi ise daha çok statik ve döngüsel yanal yükleme deneyleri üzerine kurulu oldukları ve bu deneyler sismik yükleme mekanizmalarını (zeminden etkileyen yükler, yerel ve küresel boşluk suyu değişimleri gibi) içermedikleri için, yakın zamana kadar sismik durumlarda kullanılmaları pek tercih edilmiyordu. Fakat yapılan son araştırmalar ve santrifüj model deneyleri sonrasında sismik yükleme ve hatta sıvılaşabilen zemin durumlarında da belli katsayılar ve oranlar yardımıyla kullanılmaları yaygınlaşmaktadır.

Sıvılaşan zeminlerdeki kazıklar üzerine Bhattacharya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda ise sıvılaşan bir zeminden geçip çok sert bir zemine oturan eksenel yüke maruz uç kazıkları incelenmiştir. [21]

İlk olarak en zayıf aksta kazık kesitinin ikincil atalet momentine (I) ve kazık enkesit alanına (A) bağlı olarak  $r_{\min}$  minimum çap tanımlanmıştır.

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (12.17)$$

Kazığın zemin içindeki durumuna göre efektif boylar ( $L_{\text{eff}}$ ) belirlendikten sonra narinlik oranı diye tabir edilen bir oran belirlenmiştir. ( $L_{\text{eff}} / r_{\min}$ ) İncelenen 14 yaşanmış durumdan yola çıkılarak, narinlik oranı 50'nin üzerinde olan kazıklarda basınçla çökme beklenirken, narinlik oranı 50'nin altında olan kazıkların burkularak çöktükleri görülmüştür.

Bu teorem, makale hazırlanırken yapılan merkezkaç (santrifüj) deneyleriyle bulunan benzerliklerle de kanıtlanmıştır. Bu deneylerde ESB (equivalent shear beam) kutusu kullanılmış, deney 4 farklı kazık modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çevreleyen zemin varken yapılan deneylerde kazıkta plastik mafsall oluşumu kazık yüksekliğinin yüzeyden itibaren 1/3 mesafesinde meydana

gelirken, çevreleyen zemin olmadan aynı tür kazık üzerinde yapılan deneylerde bu mafsalsın kazık yüksekliğinin tabandan itibaren 1/3 mesafesinde meydana geldiği görülmüştür. Her iki kazık da sarsma doğrultusuna zıt yönde burkulma görülmüştür.

Bu çalışmada, sıvılaştıran zeminlerde kazık-zemin etkileşimi şu şekilde açıklanmıştır: Sarsıntı başladığı anda zemindeki boşluk suyu basıncı yüzeyden başlayarak artmakta, bu artış sonradan aşağı yönde ilerlemektedir. Sarsıntı başladığı andan itibaren 0,25 saniye içerisinde arazideki boşluk suyu basıncı önceden mevcut olan düşey efektif gerilmeye eşdeğer bir düzeye ulaşır, yani  $\sigma_v'$  sifıra düşmüş varsayılır. 0,5~1,0 saniye aralığında kazık yanal efektif gerilmelerini yukarıdan aşağıya doğru artan şekilde kaybeder. Bu artan kayıp formülle ifade edilen kritik bir derinliğe ( $H_c$ ) ulaştığı anda kazık elastik olarak kararsız bir duruma gelir.

$$H_c = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{4P}} \quad (12.18)$$

Bu kararsızlık kazığın yavaşça çevresindeki zemini iterek yanlara hareket etmesine sebep olur. Aynı anda kazığın zemin tanelerinden kazık boyunca destek alamayacağı hale geldiği durum oluşuncaya kadar sıfır efektif gerilme hattı da hızla aşağı doğru ilerler.

## 12.7. Tekil Kazıkların Sismik Yükler Altında Çözümü

Pek çok kazık grubu çözüm yöntemi, tekil kazıkların çözüm yöntemlerinin genişletilmesiyle elde edilmiştir. Bu nedenle, tekil kazık davranışının hesabı için geliştirilmiş sayısal ve analitik çözüm yöntemlerini detaylı incelemek gereklidir.

Bazı araştırmacılar tarafından, eksenel veya yatay yüklü kazıkların çözümü için, zeminin visko-elastik kazığın lineer elastik olduğu varsayımlarıyla kapalı formda analitik çözümler geliştirilmiştir. Fakat bu kapalı formdaki çözümlerle kazık-zemin sisteminin davranışını yansıtmak zordur. Bazı araştırmacılar eşdeğer viskoz bir yay kullanarak zeminin doğrusal olmayan davranışını da kapsayan bir çözüm geliştirmişlerdir.



Gerçeğe en yakın çözüm ise, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmak suretiyle kazık ve zemin iki veya üç boyutlu olarak ele alındığında elde edilmektedir. Fakat, bu yöntem doğru sonuçlar vermesinin yanında, kazığın ve çevresindeki büyük çapta zeminin değerlendirilmesini gerektirdiği için oldukça zor ve pahalıdır. Aksine, Winkler temeli üzerindeki kiriş modeli kullanışlı ve doğru uygulandığında çözümlerde yeterli yaklaşıklık sağlayan bir metottur.

### 12.7.1. Winkler temeli üzerindeki kiriş modeli

Bu model genellikle tekil kazıkların çözümü için kullanılır. Kazık kiriş, çevresindeki zeminse düzgün ve sürekli yayılan yaylar veya amortisörler olarak modellenir. Kazığın doğrusal olmayan davranışı, doğrusal olmayan bir malzeme modeli kullanılarak ele alınabilir. Zemindeki histerik enerji kaybı, parametreleri yük-deformasyon eğrilerinden deneysel olarak elde edilen doğrusal olmayan yaylar kullanılarak modellenebileceği gibi analitik olarak da rijitlik ve dayanım parametreleri yardımıyla hesaba katılabilir. [22]

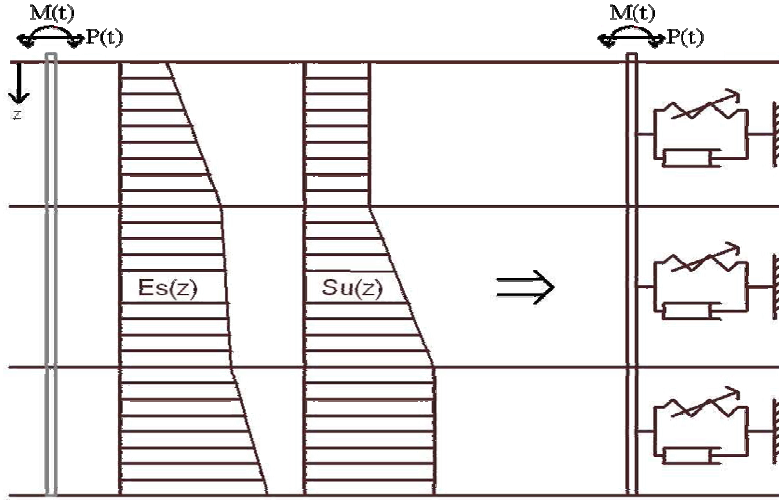
Amortisörler, radyasyon sönümlenmesine bağlı enerji kaybının hesabı için, doğrusal olmayan yaylarla paralel olarak yerleştirilirler. Radyasyon sönümlenmesi frekans-bağımlı bir olay olduğu için amortisör katsayıları da genellikle frekansa bağlıdır..

Doğrusal olmayan kazık-zemin sistemlerinin çözümü için standart bir boyutlu sonlu eleman programları kullanılarak Winkler modeli kolaylıkla uygulanabilir Şekil 12.1 yatay dinamik (ve sismik) yükler altındaki tekil kazığa Winkler modelinin uygulanışını temsil etmektedir. Benzer bir model yatay statik yüklü kazıklarda da kullanılabilir fakat bu durumda amortisörlerin kullanılması gereksiz olacaktır. [23]

Modelde kullanılan parametrelerden biri doğrusal olmayan yaylardır. Yanal yükleme durumunda zemin yaylarının birim uzunluktaki rijitliklerine ( $k_x$ ) denklem (12.19) ile yaklaşım yapılabilir:

$$k_x = 1,2 E_s(z) \quad (12.19)$$

$E_s(z)$ : derinliğin bir fonksiyonu olarak zeminin elastisite modülü



**Şekil 12.1:** Yatay yüklü tekil kazık için Winkler temeli üzerindeki kiriş modeli

Kesin yay rijitliğini elde etmek için, denklem (12.19)'la bulunan değer komşu iki yay arası mesafeyle çarpılır.

Yaydaki maksimum kuvvet, kazığın birim uzunluğuna etkiyen yanal reaksiyona eşittir. Kohezyonlu zeminlerde teorik çalışmalara ve plastisite teorisine dayalı olarak aşağıdaki bağıntı bulunmuştur:

$$F_{s,max}(z) = \lambda c_u(z) d \quad (12.20)$$

$F_{s,max}(z)$ : derinliğin bir fonksiyonu olarak zemin tarafından kazığa uygulanan maksimum kuvvet

d: kazık çapı

$c_u(z)$ : derinlikle değişen kayma mukavemeti

$\lambda$ : boyutsuz bir parametre

Düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu derinliklerde  $\lambda$  değeri 9~12 arasında değişmekle birlikte, düşey deformasyona bağlı olarak düzlem gerilme durumunun geçerli olmadığı sığ derinliklerde 2~3 civarı değerler alır.

$\lambda$  değerine aşağıdaki denklem vasıtasıyla ulaşmak da mümkündür:

$$\lambda(z) = 3 + \frac{\sigma_x}{c_u} + J \frac{z}{d} \quad (12.21)$$

$\sigma_x$ : aşırı yükleme basıncı

J: bilinen deneysel verilere bağlı olarak modelin kalibrasyonu ile elde edilen bir katsayı (Bu veriye ulaşılamaması durumunda J=0,5 alınabilir.)

Kohezyonsuz zeminlerde derinliğin bir fonksiyonu olarak zemin tarafından kazığa uygulanan maksimum kuvvet  $F_{s,max}(z)$  (12.22) ile hesaplanır:

$$F_{s,max}(z) = \mu \gamma_s d \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (12.22)$$

$\gamma_s$ : zeminin özgül ağırlığı

$\phi$ : zeminin içsel sürtünme açısı

$\mu$ : boyutsuz bir parametre ( $\mu=3$  alınması önerilir.)

Yayın maksimum kuvveti, (12.6) veya (12.8) denklemleriyle elde edilen sonuçların komşu yaylar arası mesafeyle çarpılmasıyla bulunur.

Amortisör katsayısının hesabı için bir dizi ifade mevcuttur. Aşağıdaki ifade frekans bağımlı oluşu nedeniyle tercih edilmiştir:

$$c(a_0, z) = Q a_0^{-0.25} \rho_s V_s ds \quad (12.23)$$

c: amortisör katsayısı

$a_0$ : boyutsuz frekans parametresi ( $=\omega d / V_s$ )

$\omega$ : açısal frekans

$\rho_s$ : zemin yoğunluğu

$V_s$ : kayma dalgası hızı

d: kazık çapı

s: iki komşu amortisör arasındaki mesafe

Q katsayısı ise aşağıda verilen ifadeyle hesaplanabilir:

$$Q = 3 \quad z < 3d \text{ ise} \quad (12.24)$$

$$Q = 2 \left[ 1 + \frac{3,4}{\pi(1-\nu_s)} \right]^{1,25} \left( \frac{\pi}{4} \right)^{0,75} \quad z > 3d \text{ ise}$$

$\nu_s$ : zeminin Poisson oranı

### 12.7.2. Psedo-statik yöntem

Bu çözüm yönteminde zemin-kazık-yapı sistemi üstyapı ve temel olmak üzere iki ayrı problem şeklinde çözülür. İlk aşamada üstyapının doğrusal dinamik davranışı, temel yerine efektif temel rijitliğini temsil eden yaylar konularak belirlenir. Bu çözümün sonucunda üstyapının deplasman eğilimi belirlenir. Buradan bulunan yükler, üst yapının gerçekte doğrusal olmayan dinamik davranışına bağlı olarak azaltılır.

İkinci aşamada ise üstyapı, ilk adımda bulunan deplasman seviyesi kadar statik olarak hareket ettirilir. Bu çözüm üstyapının ve temelin doğrusal olmayan davranışını da içermektedir. Yapısal eğilmenin de eşlik ettiği deplasman, yapının sünekliğini hesaplamak için, hesaplanan deplasman eğilimiyle kıyaslanır. Tasarım yükü, üstyapıdaki yük etkileşimleri ve plastik mafsalları gibi sebeplerle sınırlandırılabilir. Sonuç olarak, bu adımda belirlenen temel deplasmanı, üstyapının doğrusal dinamik çözümünde kullanılan efektif temel rijitliğiyle tutarlı olmalıdır.

Psedo-statik çözüm metodolojisi, temelin ilk aşamada üst yapıdan gelen atalet kuvvetleriyle yüklendiğini varsayar. Bunun yanında kazık temel, deprem sırasında çevredeki zemin kütlelerinin kazığa göre farklı hareket etmesi sebebiyle, zeminden gelen önemli ölçüde kinematik yüklere de maruzdur. Kinematik yükler, deprem sırasında oldukça küçük gerilmeler ve deformasyonlar gösteren yetkin zeminlerde önemli değillerdir. Fakat sıvılaştıran zeminlerdeki yanal yayılmalar, yumuşak killerdeki büyük gerilme bileşenleri gibi etkilerle önemli kinematik

yükler meydana gelebilir ve yumuşak kil veya sıvılaşılabilen zemin üzerindeki sert tabakalar gibi bazı tabakalaşmalarda hasara yol açabilirler.

Byrne (1984) tarafından, kinematik yükleri BNWF yöntemine doğrudan dahil eden bir psedo-statik yöntem geliştirilmiştir. Byrne, statik BNWF çözümünde şekil değiştirmiş bir zemin profiliyle beraber kayma ve moment kuvvetlerinin bileşkesinin etkiltilmesini önermektedir. Bu tür bir çözümde BNWF modeli için gereken girdiler, kazık başına etkiyen kayma ve momentle, serbest arazi deplasmanlarıdır. Abghari ve Chai (1995), zemin profilinin maksimum kinematik deplasmanlarını belirlemek için bir arazi tepki programı ve maksimum kazık yüklerini üstyapı atalet kuvvetlerine bağlı olarak belirlemek için de yüzey ivmelerinin tepki tayflarını kullanarak bu modeli uygulamıştır. Bu iki tip yük statik BNWF çözümlerinde birleştirildiklerinde ise, dinamik BNWF çözümlerinde olduğu gibi kazığa etkiyen maksimum momentlerin fazla hesaplandığı görülmüştür. Bunun çözümü olarak da, tasarımda uygun değerler kullanabilmek için bazı düzeltmeler yapılması önerilmiştir. Tabesh (1997) psedo-statik yöntem üzerinde parametrik bir çalışma yapmış ve yöntemin pek çok durumda uygun çözümler verdiğini, fakat yapının ve arazinin periyotları yakın olduğu takdirde kazıktaki maksimum momentin ve kesmenin gerçek değerinden büyük hesaplandığını görmüştür. Her iki araştırmada da yazarlar, bu fazla hesaplamanın, maksimum kinematik ve maksimum atalet kuvvetlerinin aynı anda etkiltilmesinden kaynaklandığı görüşüne varmışlardır.

Tabesh ve Polous, tekil kazıkların sismik analizi için yaptıkları psedostatik yaklaşımı açıkladıkları çalışmalarında önce deprem nedeniyle meydana gelen maksimum zemin hareketlerini hesaplayıp, ikinci adımda ise statik hareketler olarak ele alınan bu maksimum yer değiştirmelere ve desteklenen yapının spektral ivmesine bağlı olarak kazık üzerine etkiyen bir statik eksenel yüke karşı kazığın verdiği tepki hesaplanmıştır. Çalışmalarda tek bir sismik veri, 8 değişik kazık-zemin durumuna uygulanmıştır. Çıkan sonuçlarda, kazık başlık ağırlığı hesaba katılmadığı takdirde statik ve dinamik analizlerin büyük bir uyum içerisinde olduğu, başlık ağırlığı 160 tonun üzerine çıktığı takdirde ise statik analizin dinamiğe göre daha büyük maksimum moment ve kesme kuvveti sonucu verdiğini görülmüştür. Buradan, eğer başlık ağırlı kazık-başlık-zemin sisteminin doğal

periyodunu yüzey hareketlerinin baskın periyodunun sınırlarına getirebilecek kadar fazla değilse hesaplarda önemli bir etkisi olmadığı ve hesapların maksimum yüzey ivmesi kullanılarak yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Aksi bir durumda ise hesaplarda maksimum yüzey ivmesi yerine maksimum spektral ivmenin kullanılması, gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. [23]

## **12.8. Grup Kazıkların Sismik Yükler Altındaki Çözümü**

Kazık temeller tekil kazıklardan ziyade kazıkların grup halinde yerleştirilmelerinden oluşmaktadır. Bu nedenle kazık gruplarının doğru ve etkili çözümü, kazık temellerle desteklenen yapıların çözümünün önemli bir parçasıdır. Tekil kazıklarda olduğu gibi, kazık gruplarının çözümü için de pek çok sayısal ve analitik çözüm geliştirilmiştir. Bunlardan en gerçekçi sonuçlara ulaşmamızı sağlayan, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çözümlerdir. Fakat bu çözümler çok uzun ve karmaşık olduğu için, daha kolay ve etkin sayısal çözümler geliştirilmeye çalışılmıştır. Kazık grupları tekil kazıklardan imal edildiği için, grup davranışının belirlenmesi için bir katsayı kullanmak kazık gruplarının çözümünde sık kullanılan bir tekniktir. Genellikle grup direnci, tekil kazık dirençleri toplamında daha azdır ve hem kazıklar arası mesafelerin hem de kazık grubu konfigürasyonunun fonksiyonudur. Poulos ve Davis, kazık gruplarının çözümü için, etkileşim faktörlerinin kullanıldığı ve elastisite teorisine dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem statik durumlarda elastik zemindeki kazık gruplarına uygulanabilmektedir. Dinamik yükler altında frekans aralığı çözümlerine bağlı kazık-kazık etkileşim faktörleri için yaklaşık analitik kapalı form çözümleri de mevcuttur. Sonrasında bu çözüm yöntemleri, doğrusal olmayan problemler için zaman aralığı çözümlerini de kapsayacak şekilde geliştirilmişlerdir.

## **12.8.1. Kazık grubu çözümlerinde kazık etkileşim faktörlerinin kullanımı**

### **12.8.1.1. Elastisiteyi temel alan çözüm**

Poulos ve Davis, kazık gruplarının çözümü için, tekil kazık çözüm sonuçlarını ve kazık-kazık etkileşim faktörlerini kullanarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Çözümler elastisite üzerine kuruludur ve statik yük altındaki kazık gruplarına uygulanır. Eksenel ve/veya yanal yüklü kazıkların çözümü için birbirinden ayrı fakat benzer çözümler geliştirilmiştir.

Elastisite temelli çözüm yöntemlerinin başlıca avantajlarından birisi, zemini sürekli bir ortam olarak ele aldığı için, kazıklar arası etkileşim etkilerinin de göz önüne alınabilmesidir. İlk olarak komşu iki tekil kazığın etkileşimiyle başlayan çözümler, kazık grubunun genel davranışına ulaşılacak şekilde genişletilir. Eşit yüklü iki tekil kazık belli sayıda parçaya bölünür. Elastik durum söz konusu olduğu için, zemindeki ve her bir kazık elemanındaki deplasmanlar eşit kabul edilir ve bilinmeyen basınçlar için çözüm yapılır. Bu çözümde tek etki, yüklemekten dolayı bir kazığın yanal yer değiştirmesinin diğer kazık üzerindeki etkisidir. Etkileşim faktörleri, komşu kazıktan kaynaklanan ek yer değiştirmenin, kazığın kendi yükü altındaki yer değiştirmesine oranı şeklinde ifade edilir.

Bu yöntemin başlıca dezavantajı ise doğrusal olmayan, birleşik ve sismik yüklemeler altında kazık temellerin yük-deformasyon davranışlarının belirlenmesi için kullanımının zor ve karmaşık oluşudur.

### **12.6.1.2. Dalga yayılımını temel alan çözüm**

Dalga yayılımını temel alan yöntemler, dinamik yükler altında grup içindeki kazıkların etkileşimini hesaplamak için dalga yayılımı teorisini kullanırlar. Bu yöntemler tepki alanında geliştirilmişlerdir ve kazık tepkisinin elastik, zeminin doğrusal visko-elastik olduğu varsayımı üzerine kuruludur.

Dobry ve Gazetas, kazık başından harmonik yüke maruz yüzen kazık gruplarının dinamik rijitlik ve sönümlenme çözümleri için basit bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Her bir kazığın titreşimi, bütün doğrultularda yayılan

dalgalar meydana getirir ve komşu kazıklarda ek deplasmanlara sebep olur. Titreşen kazık “aktif kazık”, komşu kazık ise “pasif kazık” olarak adlandırılır. Dobry ve Gazetas, oluşan dalga alanının doğası ve komşu kazıklarda bunu izleyen deplasmanlar için bazı basitleştirici varsayımlar yapmışlardır. Frekans sahasında oluşan dalga alanı için kapalı formda ifadeler kullanmışlardır ve pasif kazıkta meydana gelen ek deplasmanın, dinamik deplasman alanına eşit olduğunu varsaymışlardır.

Eksenel yük altındaki kazıklar için etkileşim faktörü, titreşen kazığın çevresinde oluşan dalga alanı için varsayılan asimptotik silindirik dalga ifadesinden türetilmiştir. Buna göre eksenel yüklü kazıklar için etkileşim faktörü  $\alpha_v(S)$  (12.25) ile belirlenebilir:

$$\alpha_v(S) \approx \left(\frac{d}{2S}\right)^{0.5} \exp\left(\frac{-\beta\omega S}{V_s}\right) \exp\left(\frac{-i\omega S}{V_s}\right) \quad (12.25)$$

S: kazıklar arası mesafe

d: kazık çapı

$\beta$ : zemin sönümlenmesi

$\omega$ : açısal frekans

$V_s$ : kesme dalgası hızı

Yanal yüklü kazıklar için etkileşim faktörü, etkileşen iki kazığı birleştiren doğruyla, etkiyen yatay yükün doğrultusu arasında kalan ve “hareket açısı” olarak adlandırılan  $\theta$ 'nın bir fonksiyonudur. Fakat etkileşim faktörü,  $\theta=0^\circ$  ve  $\theta=90^\circ$  için etkileşim faktörleri hesaplandıktan sonra bulunabilir:

$$\alpha_h(S, \theta) \approx \alpha_h(S, 0^\circ) \cos^2 \theta + \alpha_h(S, 90^\circ) \sin^2 \theta \quad (12.26)$$

$\theta=0^\circ$  ve  $\theta=90^\circ$  için etkileşim faktörlerini hesaplarırken,  $0^\circ$ 'de kazığın sadece aktif kazıktan yayılan ve  $V_{La}$  hızıyla hareket eden basınç-çekme dalgalarından,  $90^\circ$ 'de ise kazığın sadece aktif kazıktan yayılan ve  $V_s$  hızıyla hareket eden S-dalgalarından etkilendiği varsayılır. Burada  $V_{La}$  analog Lysmer hızıdır.



Buna göre aşağıdaki ifadeler verilebilir:

$$V_{La} = \frac{3,4V_s}{\pi(1-\nu)} \quad (12.27)$$

$$\alpha_h(S, 0^\circ) \approx \left(\frac{d}{2S}\right)^{0,5} \exp\left(\frac{-\beta\omega S}{V_s}\right) \exp\left(\frac{-i\omega S}{V_s}\right) \quad (12.28)$$

$$\alpha_h(S, 90^\circ) \approx \left(\frac{d}{2S}\right)^{0,5} \exp\left(\frac{-\beta\omega S}{V_{La}}\right) \exp\left(\frac{-i\omega S}{V_{La}}\right) \quad (12.29)$$

Daha sonra Gazetas ve Makris tarafından genişletilen araştırmaya, komşu kazığın görelî rijitliğinden ve gelen dalga alanının düşey düzensizliklerinden kaynaklı olarak gelen dalga alanını ( $u_s(\omega, z)$ ) değiştirdiği varsayımı eklenmiştir. Pasif kazıklardaki ek deplasmanlar, uzun esnek kazıklar için gelen dalga alanına yaklaşık olarak eşittir ve  $u_s(\omega, z)$  düzgün değişir. Rijit kazıklarda ise deplasmanlar sıfıra yakındır ve  $u_s(\omega, z)$  ani değişim gösterir. Fakat genelde ek tepki, bu iki uç arasında bir yerlerde bulunur. Bu ek deplasmanlar,  $u_s(\omega, z)$ 'i pasif kazığa tahrik desteği şeklinde uygulayarak hesaplanabilirler. Burada Winkler modelinden yardım alınabilir.

Yukarıda bahsedilen bu teknik, doğrusal sistemlerle kısıtlanmıştır. Doğrusal olmayan etkilerse, enerji kaybının hesabı için, eşdeğer viskoz sönümlenme şeklinde dolaylı olarak yönteme dahil edilebilirler. Fakat, aktif kazık tarafından oluşturulan dalga alanı için zaman aralığı ifadelerini elde etmek amacıyla, dalga yayılımı temelli yöntem genişletilmiştir. Bu da kazık grubu davranışı için zaman aralığı ifadelerinin kullanılmasına, buna bağlı olarak da doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanarak doğrusal olmayan etkilerin doğrudan hesaba katılmasına olanak tanır.

Zaman aralığı yöntemleri daha çok ve çeşitli problemlerin çözümüne imkan tanıyorsa da, hala bazı kısıtlamaları vardır. Doğrusal olmayan etkilerin belirlenmesi, tekil kazık davranışının çözümüyle sınırlıdır. Kazık-kazık etkileşim faktörleri, frekans etki alanında elde edilen kapalı formda ifadelerin Fourier dönüşümleri üzerine kuruludur. Bu nedenle zeminin doğrusal olmayan yapısının kazık-kazık etkileşimi üzerindeki etkisi göz önüne alınmamaktadır.

### 12.8.2. Kazık grubu çözümlerinde p-y çarpanlarının kullanımı

Bu yöntem, tekil kazıklar için kullanılan Winkler model tekniğinin bir uzantısıdır. Winkler modelinde zemin yerine ayırık yaylar kullanılır ve zeminin doğrusal olmayan yapısı, yanal yükleme için, p-y eğrileri olarak adlandırılan doğrusal olmayan yük-deformasyon eğrileriyle temsil edilir. Bu p-y eğrileri genellikle deneysel veya üç boyutlu sonlu eleman tepki verileriyle elde edilir.

Grup kazıklarda her bir kazık, zemin tepkisi olarak hesaba katılan yatay yaylarla desteklenen kirişler olarak modellenir. Her bir zemin yayının doğrusal olmayan tepkileri, p-y eğrileriyle gösterilir. Kazık gruplarının çözümünde kullanılan p-y eğrileri, tekil kazıkların çözümündeki p-y eğrilerinin p-y çarpanları kullanılarak uyarlanmasıyla elde edilir. Kazık-kazık etkileşimlerinin zeminin p-y eğrileri üzerindeki etkileri pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Bu yöntem geniş çaplı kullanım alanı bulmuş ve pek çok yazılım programına dahil edilmiştir. Fakat özellikle dinamik yüklere maruz kazık gruplarının çözümünde geniş kapsamlı modelleme gerektirir ve çözüm süresi çok uzun olabilir. Bu nedenle, hassas çözüm gerektiren uygulamalarda bu modelin kullanılması pek verimli olmamaktadır.

### **13. KAZIKLARIN ZEMİNE YERLEŞTİRİLMELERİ**

Zemine ve yeraltı suyu durumuna bağlı olarak, kazık temellerin yerleştirilmesi ve denetimi diğer temel tiplerine göre kontrol edilmesi daha zordur ve belirsizlikler daha fazladır. [14]

Sık kullanılan iki yerleştirme yöntemi çakma ve sondajla zemine yerleőtirmedir. Bunlar içinden en sık kullanılan yöntem, tokmak veya titreşimli Őahmerdanlarla akma yöntemleridir. Özel durumlarda kazıklar zemine sürülebilir veya kısmi sondaj uygulanabilir.

Kazık çakımı için gereken başlıca gereçler tokmak, tokmağın enerjisini hasarsız bir Şekilde kazığa aktarmakta kullanılan tampon ve (gerekiyorsa) pabutur. Sondaj için de, zeminde kazık kuyusu amaya yarayacak bir sondaj makinesi ve kazığı yerine yerleştirmek için bir vinç gereklidir. Eğer kazık yerinde imal edilecekse, gerek görüldüğü takdirde kılıf kullanılmalıdır.

#### **13.1. Yerleştirmeden nce Yapılacak Araştırmalar**

Bu araştırma kapsamında ilk aşama, kazık özelliklerinin belirlenmesidir. Bu zellikler uygun arazi sondajları ve deneyleri, laboratuvar deneyleri, geoteknik araştırmalar, kazık yükleme deneyleri ile kazık tasarım ve yapım ltleri saptandıktan sonra belirlenir. Bu zellikler bölgedeki zemin durumu, sondaj kazıkları kullanılıyorsa sondaj yöntemleri, çakma kazıklar için çakma yöntemi ve sırası, malzeme özellikleri, toleranslar, denetim ve deneylerle bunların verilerini ve kayıtları içerir.

Sonrasında ofis çalıŐmalarına geçilir. Bu çalışmada kazıklara numaralar verilerek yerleştirme sırası belirlenir. Bu da, tasarım mühendisi ve Őantiye mühendisi arasındaki iletiŐimin belirleyici etiketlerle yapılmasını sağlayarak bilgi akıŐında meydana gelebilecek karmaŐayı önler. Aynı zamanda Őantiye mühendisine yapım sırasında kılavuzluk eder ve iş-akıŐ planının düzenlenmesini kolaylaŐtırır.

nc adım yerleştirmeden önceki arazi planlamasıdır. Bu adım etüt, kazığın yerleőtirmeye hazırlanması için gereken önlemler ve gerekiyorsa n

kazıyı içerir. Arazi etüdü, yerleştirmeyi engelleyici faktörleri belirlemek ve çubuklar vasıtasıyla kazık yerlerini tespit etmek amacıyla yapılır. Engelleyici faktörler zemin yüzeyindeki mevcut yapılar gibi, yapımdan etkilenecek veya yapımı zorlaştıracak unsurlar veya zemin içinde yer alan atık su boruları, elektrik kabloları gibi yapılar olabilir.

Bir sonraki adım kazığın yerleştirme işlemine hazırlanmasıdır. Bu işlem kazığı mevcut zemin durumunda korumayı, gerekiyorsa eklemeleri ve kaplamaları içerir. Çakma kazıklarda kazık ucunun zarar görmesini engellemek için pabuçlar kullanılabilir. Ahşap çakma kazıklarda, pabuçlara ek olarak, kazığın çakılırken çatlamasını ve yarılmasını önlemek amacıyla kazık boyunca belli aralıklarla çelik bantlar geçirilir. Çelik kazıklarda ise katodik (negatif elektrotlu) koruyucu kablolar eklenebilir.

Eklemeler, yeterli uzunluğu sağlayamayan çelik kazıklar için şantiyede kaynak veya manşon/perçin tarzı birleştirici elemanlarla, beton kazıklar içinse kazığın imal edildiği yerde yapılmalıdır. Fakat eklem bölgelerinde sorun yaşanabileceği düşünülerek ekli kazıkların kullanımından mümkün olduğunca kaçınılması tavsiye edilir.

Kaplamaların üç temel amacı vardır: kazık malzemesinin korunması, çevreleyen yumuşak zeminin negatif çevre sürtünmesi oluşturarak kazığı zemin içine çekebileceği durumlarda kazık yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmak ve soğuk bölgelerde zeminde görülebilecek donmaya bağlı olarak yüzeydeki zeminin hacimsel artışının kazığa ek kaldırma yükü olarak gelmesini önlemek için kazık yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmak. Kazıklara uygulanan en yaygın kaplama türü bitümlü kaplamalardır. Kaplama sırasında kaplama malzemesi üreticilerinin önerileri dikkate alınmalıdır.

Çakma kazıkların zemine yerleştirilmesini kolaylaştırmak için, yüzeye yakın sert tabakada ön kazı veya ön sondaj yapılması gerekebilir. Ön kazının çeşidi zemin durumuna göre değişiklik gösterir. tabi bu ön kazının, kazığın performansını ne ölçüde etkileyeceği de göz önüne alınmalıdır.

Son adım ise kazığın yerleştirilmesidir. Bu adım kazığın taşınması, hizalanması ve yerleştirilmesi aşamalarından oluşur. Taşıma sırasında kazığın hasar görmemesi için azami gayret sarf edilmeli, kazıklar (eğer varsa) uygunluğu

belirlenmiş taşıma noktalarından kaldırılmalıdır. Kazık hizalanması içinse, kazık çizimlerinde dik kazıkların çekülü, eğik kazıklarınsa eğim açıları net bir şekilde belirtilmelidir. Kazık çakılmadan önce kazık ve kazık çakma ekipmanı, hizalama ve uygun çalışma açısından kontrol edilmelidir.

### **13.2. Çakma Kazıklar İçin Gereken Donanım**

Kazıkların zemine çakılarak yerleştirilmeleri durumunda kullanılan başlıca elemanlar kazık çakımı için geliştirilmiş vinçler, tokmaklar, titreşimli sürücüler, pabuçlar ve tamponlardır.

Vinçler kazığın güvenli şekilde yerinden kaldırılmasını, çakılacağı doğrultuda hizalanmasını ve zemine uygun şekilde yerleştirilmesini sağlayan mekanizmalardır. Vinçlerde en çok dikkat edilmesi gereken, ana gövdenin ve kazığı taşıyan kısmın zemine rijitliğidir.

Tokmaklar genel olarak serbest düşümlü tokmaklar, tek-etkili tokmaklar (buhar veya hava), çift-etkili tokmaklar (buhar veya hava), dizel tokmaklar (tek veya çift etkili) ve titreşimli sürücüler olmak üzere gruplara ayrılabilir. Serbest düşümlü tokmaklar genellikle elle belli bir yüksekliğe kadar kaldırılarak serbest düşmeye bırakılırlar. Tek-etkili tokmaklar, tokmağın buhar veya hava vasıtasıyla istenilen yüksekliğe çıkarılarak serbest düşmeye bırakıldığı bir serbest düşümlü tokmaklardır. Çift etkili tokmalarda, tokmak istenilen yüksekliğe buhar veya sıkıştırılmış hava yoluyla çıkarıldıktan sonra, yine aynı akışkan yardımıyla aşağı doğru düşüşü sırasında ivme kazanması sağlanır. Titreşimli sürücüler ise, dönme merkezlerine eksantrik olarak yerleştirilmiş parçalı dönen ağırlıklar uygularlar. Bu etkiler, mekanik sinüs dalgası osilatörü gibi çalışarak kazığı zemin içine sürer.

Tamponlar, tokmaktan gelen enerjiyi etkin şekilde kazığa iletirken, aynı zamanda kazığın bu enerji yüzünden hasar görmesini de önlerler. Tampon olarak sert ahşap, lamine veya mekanik tamponlar kullanılabilir. Sert ahşap tamponlar genelde 15cm kalınlığında olup, çakma sırasında çatladıkları ve yandıkları için sık sık değiştirilmeleri gerekmektedir. Lamine tamponlar birbirini izleyen alüminyum ve micarata (işlenmiş taş tozu) disklerden oluşurlar. Bütün tokmak enerjisini kazığa iletirler ve kullanım ömürleri daha uzun, kullanım ömrü boyunca

gördükleri hasar daha azdır. Mekanik tamponlar bir silindir, bir piston ve yaylardan oluşurlar. Aşırı kuvvetli darbeleri azaltır ve tokmak darbelerinin süresini uzatırlar.

Kazık başlığı, tamponun üzerine konulan ve tokmaktan gelen kuvveti kazığa uniform şekilde aktarmaya yarayan bir aksesuardır. Boyutu verimi etkilediği için kazık başına tam oturacak şekilde seçilmesi en etkin sonucu sağlar.

Pabuçlar, sert zeminlere çakılan kazıklarda kazık ucunun çakma sırasında hasar görmesini engellemek için kullanılan malzemelerdir. Genelde çelikten yapılırlar ve kazık ucuna tam oturacak şekilde boyutlandırılır veya seçilirler.

### 13.3. Kazık Çakma Formülleri

Bir uç kazığının istenilen taşıma kapasitesine ulaşması için sıkı zemine yeterli derecede gömülmesi veya bir kaya tabakasıyla yeterli temasın sağlanması gerekir. Fakat zemin profili değiştiği için, kazığın istenilen dayanma kapasitesine ulaşip ulaşmadığı net olarak saptanamaz. Kazık çakma formülleri ile, arazi çalışması sırasında, kazığın istenilen uç direncine ulaşip ulaşmadığı kontrol edilebilir.

İş-enerji teorisinden yola çıkılarak ilk kazık çakma formülü (genellikle Mühendislik Veri Kaydı (ENR) formülü olarak bilinir) aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\begin{aligned} &\text{darbe başına tokmaktan gelen enerji} = \\ &(\text{kazık dayanımı}) \times (\text{darbe başına penetrasyon}) \end{aligned}$$

ENR formülüne göre kazık dayanımı, kazığın maksimum taşıma kapasitesi  $Q_u$ 'dur ve (13.1) ile hesaplanır:

$$Q_u = \frac{W_R h}{S + C} \quad (13.1)$$

$W_R$ : şahmerdan ağırlığı

$H$ : tokmağın düşüş yüksekliği

$S$ : kazığın darbe başına penetrasyonu

$C$ : bir sabit

Penetrasyon sayısı S genellikle son birkaç vuruşta elde edilen penetrasyonların ortalamasıdır. C sabiti ise serbest düşümlü tokmaklar için 2,54cm (1 in.), buharlı tokmaklar için 0,254cm (0,1 in.) olarak alınabilir.

İzin verilebilir taşıma kapasitesinin hesabında ise güvenlik katsayısının GS=6 olarak alınması önerilir.

Bunun yanında, tek ve çift etkili tokmalarda  $W_R h$  ifadesi yerine  $E H_E$  ifadesi kullanılabilir. Burada E tokmak verimi,  $H_E$  ise tokmağın enerjisidir.

Bu formül pek çok araştırmanın ardından aşağıdaki son hali almıştır:

$$Q_u = \frac{E W_R h}{S + C} \cdot \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p} \quad (13.2)$$

E: tokmak verimi

$W_p$ : kazık ağırlığı

n: şahmerdanla kazık arasındaki iade katsayısı

(13.2) denklemi için GS=4~6 civarında bir güvenlik katsayısı kullanılması önerilir.

Tokmak verimi ve n katsayısı için Tablo 13.1 ve 13.2 kullanılabilir.

**Tablo 13.1:** Tokmak tiplerine göre tokmak verimleri

Tokmak Tipi	Tokmak Verimi €
Tek ve çift etkili şahmerdanlar	0,7~0,85
Dizel şahmerdanlar	0,8~0,9
Serbest düşümlü şahmerdanlar	0,7~0,9

**Tablo 13.2:** Kazık malzemesine göre n katsayısı

Kazık Malzemesi	n
Demir tokmak ve başlıksız beton kazık	0,4~0,5
Ahşap başlıklı çelik kazık	0,3~0,4
Ahşap kazık	0,25~0,3

Michigan devlet karayolu komisyonu (1985) üç farklı bölgede ve toplam 88 kazık üzerinde yaptıkları araştırmalardan sonra, daha gerçeğe yakın olan bir ENR formülü geliştirmişlerdir:

$$Q_u = \frac{2,5H_E}{S+C} \cdot \frac{W_R + n^2W_p}{W_R + W_p} \quad (13.3)$$

$H_E$ : tokmağın üretici tarafından belirtilen maksimum enerjisi

$C$ : 0,254cm (0,1 in.) olarak alınabilir.

Güvenlik sayısının  $GS=6$  alınması önerilir.

Danish formülü olarak bilinen bir diğer denklem de, diğer denklemler kadar makul sonuçlar vermektedir. Bu formül (13.4) ile verilmiştir:

$$Q_u = \frac{E H_E}{S + \sqrt{\frac{E H_E L}{2A_p E_p}}} \quad (13.4)$$

$E$ : tokmak verimi

$H_E$ : maksimum tokmak enerjisi

$E_p$ : kazık malzemesinin elastisite modülü

$L$ : kazık uzunluğu

$A_p$ : kazığın enkesit alanı

Burada boru ve H kesitli kazıklar için kazık enkesit alanı hesaplanırken, profil sınırları dahilinde kalan zemin kütesinin alanı hesaba katılmaz! İzin verilebilir taşıma kapasitesi hesabında ise  $GS=3\sim6$  kullanılması önerilmektedir.

Pasifik Kıyısı İnşaat Kanunu (1952) ise ENR formülünü aşağıdaki şekilde vermiştir:

$$Q_u = \frac{(E H_E) \left( \frac{W_R + n W_p}{W_R + W_p} \right)}{S + \frac{Q_u L}{AE}} \quad (13.5)$$

Bu denklemdeki  $n$  değeri çelik kazıklar için 0,25, diğer tüm kazıklar için 0,1 alınır.  $GS = 4$  kullanılarak izin verilebilir taşıma kapasitesinin belirlenmesi tavsiye edilmiştir.



Janbu (1953) ise ENR formülü olarak (13.6) ifadesinin kullanılmasını önermiştir:

$$Q_u = \frac{E H_E}{K_u S} \quad (13.6)$$

Burada:

$$K_u = C_d \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) \quad (13.7)$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \left( \frac{W_p}{W_R} \right) \quad (13.8)$$

$$\lambda = \left( \frac{E H_E L}{A_p E_p S^2} \right) \quad (13.9)$$

Bu denklemlerle izin verilebilir taşıma kapasitesinin belirlenmesi için kullanılması gereken güvenlik sayısı ise  $GS = 4-5$  olarak verilmiştir.

Kazık çakılması sırasında kazıkta meydana gelecek maksimum gerilmelerin tayini için de şöyle bir yol izlenebilir: kazığın taşıyabileceği maksimum  $Q_u$  yükü denklem (13.3) ile bulunabiliyordu. Bu denklemde  $S$  darbe başına ortalama penetrasyon miktarı olup (13.10) ile hesaplanır:

$$S = \frac{2,54}{N} \quad (13.10)$$

(13.3) ve (13.10) denklemleri birleştirilirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$Q_u = \frac{E W_R h}{\frac{2,54}{N} + 0,254} \cdot \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p} \quad (13.11)$$

(13.11) formülü kullanılarak, bilinen bir tokmak ve kazık için, farklı  $N$  değerlerine bağlı olarak farklı  $Q_u$  değerleri belirlenir. Her bir  $N$  değeri için çakma sırasında oluşan  $Q_u / A_p$  çakma gerilmesi hesaplanır ve bunlar bir tablo haline getirilir. Her 2,54cm'lik penetrasyona tekabül eden gerilmeler grafik olarak

düzenlenir. Bu tablo hazırlandıktan sonra, izin verilebilir çakma gerilmesi için kazığın 2,54cm'lik penetrasyonuna tekabül eden vuruş sayıları tablodan belirlenir.

#### **13.4. Kazık Çakımı Sırasında Karşılaşılabilecek Bazı Problemler**

Çakma suretiyle kazık yerleştirilmesi sırasında karşılaşılabilecek problemlerden birkaçı kazık çakımı sırasından kazık boyunun tahmin edilmeyen şekilde değişimi, zeminin donması, kazığın çatlaması ve gevşemidir.

Çakma sırasında kazık boyundaki beklenmeyen değişimlerin olası sebepleri engelleyici faktörler, zemin profilinde değişme, kireçtaşı mağarası oluşumları ve çakma sırasında dipteki zeminin çakmaya bağlı artan sıklığıdır. Çakma sırasında meydana gelebilecek sıklık artışını en aza indirmek için, grup kazıklarda çakmaya orta sıradan başlayıp dışa doğru devam edilecek şekilde bir çakma sırası belirlenmesi uygundur. Bir grup içinde 1,5m'nin üzerindeki boy değişimleri araştırılmalı ve olası sebepleri tanımlanmalıdır. Bundan sonra, eğer gerekli görülürse, uygun düzeltme ölçümleri yapılmalıdır.

Zeminin donması kohezyonlu zeminlerde karşılaşılan bir sorundur. Kohezyonlu zeminler örselenmeye bağlı mukavemet kaybına uğrar ve zamanla kaybettikleri bu mukavemeti yeniden kazanırlar. Bu olaya tizotropi adı verilir. Mukavemetlerinin ne kadarını geri kazandıkları, bu miktarı kazandıkları süre ve buna bağlı olarak zeminin donması, kohezyonlu zeminlerin duyarlılığına bağlıdır. Eğer bu tür zeminlerde kazık çakımına, elde olmayan sebeplerden ötürü ara verilirse zemin donar. Çakmaya devam edildiğindeyse, zemin kazıklara daha fazla direnç uygular. Bu durumda, zemindeki donmayı kırmak için dayanıklı zemine veya istenilen derinliğe ulaşıncaya kadar çakmaya devam edilmelidir. Nadir karşılaşılan bazı durumlarda ise kazık yerinden çıkarılıp yeniden yerleştirilmelidir çünkü zemin çakmaya karşı aşırı mukavemet gösterdiği takdirde kazığa zarar vermeden sağlam tabakaya ulaşmak imkansız olabilir.

Yüksek yer değiştirmeli kazıklar kohezyonlu zeminlere çakıldıkları takdirde, mevcut çakılmış kazıklarda çatlamalar veya kaldırma kuvvetleri görülebilir. Çatlama görüldüğü takdirde kazıklar yeniden çakılmalıdır. Çakmaya, çakılmış mevcut kazıklarda yeni çatlak oluşmayacak ve mevcut çatlakların

dayanımı ciddi ölçüde etkilemeyecek olduğu durumlarda devam edilebilir. Koutsoftas (1982) çok sıkı kuma giren H kesitli çelik kazıklar üzerinde yaptığı çalışmalara bağlı olarak, 1 in. (2,54 cm)'e kadar olan çatlakların dayanma kapasitesi üzerinde etkisi olmadığı ortaya koymuştur. Aynı zamanda, kazık çakılan noktadan uzaklaştıkça, tahmin edildiği gibi, çatlaklarda azalma gözlenmiştir.

Bazı zeminlerde ise, kesme sırasındaki negatif boşluk suyu basıncına bağlı olarak artan dayanım, kazık çakımı sırasında zeminin büyük direnç göstermesine sebep olur. Bu durum genellikle suya doymun, sıkı, ince kum tabakalarında ve siltlerde görülür. Çakıma ara verildiğinde negatif boşluk suyu basıncı dağılır ve zamanla zeminin kesme dayanımı azalır. Bu da kazık direncinin düşmesi demektir ve gevşeme olarak adlandırılır. Bu tür bir durumda mevcut çakılmış kazıklara vurularak istenilen çakma dayanımına ulaşılmaya çalışılır.

## 14. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

Belirli bir yük altında kazığın taşıma kapasitesinin ve oturma miktarının hesabı kullanılan ifadeler arazi çalışmalarında elde edilmiş sonuçlardan, laboratuvar deneylerinden, ampirik ve yarı-ampirik yöntemlerden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Bu yollarla elde edilen formüllerle hesaplanan değerler, kazık yükleme deneyleriyle doğrulanmalıdırlar. Uygulamada kazık yükleme deneyleri iki farklı şekilde yapılabilir [14]:

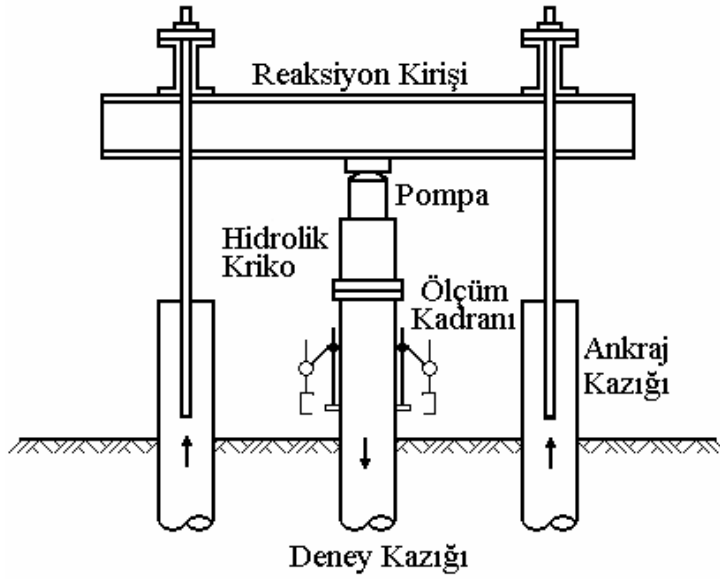
- **Deney Kazığı Kullanılarak:** Kazık tasarımı için farklı yöntemlerle hesaplar yapıldıktan ve kazık boyutları, donatıları, taşıma kapasitesi ve oturması belirlendikten sonra, arazide tahribatlı deneyler yapılarak hesaplanan değerlerle kıyaslanırlar.
- **Çalışmakta Olan Kazıkların Deneye Tabi Tutulması:** Daha önce yapılmış çalışmalara ulaşılabilecek bölgelerde, tasarım yapıldıktan sonra, tasarımdaki kazık kapasitesinin kontrolü için mevcut ve çalışır durumda kazıklar üzerinde deney yapılabilir. Bu durumda, kazıklar genellikle tasarım taşıma kapasitelerinin iki katı kadar yük altında test edilir.

Bu iki yöntem için kullanılan malzeme ve deney yöntemleri büyük ölçüde benzerdir. Başlıca fark, son yüklemelerin derecesidir.

Kazık tasarımında en önemli yükler aksel basınç yükleri, çekip çıkarma kuvvetleri ile yanal ve dinamik yüklerdir. Bu nedenle kazık yükleme deneyleri de bu doğrultuda geliştirilmiştir ve arazi koşullarında bu yükler altında kazık kapasitelerinin belirlenmesi için uygulanmaktadırlar.

### 14.1. Aksel Basınç Kazık Yükleme Deneyleri

Bu deneyde, deney kazığının her iki yanına, deney kazığından eşit mesafelerde birer ankraj kazığı yerleştirilir. Bu kazıkların yükleme sırasında deney kazığını etkilemesini önlemek için, bu kazıklarla deney kazığı arasında en az kazık çapının beş katı kadar mesafe bırakılması önerilmektedir. Ankraj kazıklarının üzerine bir reaksiyon kirişi yerleştirilip, deney kazığının merkezinin üzerine yerleştirilen hidrolik bir kriko vasıtasıyla kazık yüklenir.



**Şekil 14.1:** Statik kazık yükleme deney düzeneği

Bu yükleme, deney kazığında basınç, ankraj kazıklarında çekme kuvveti oluşturur. (Bkz. Şekil 14.1) Hidrolik krikoyla kazığa uygulanan yük, ya kriko ve kazık arasına konulan bir yük ünitesiyle, ya da pompa ve hidrolik kriko arasına konulan bir basınç sayacıyla ölçülür. Yük ünitesi veya basınç sayacı, her deneyden önce, %5'ten daha büyük hata vermeyecek şekilde ayarlanmalıdır. Sonuçları kıyaslayabilmek ve ölçüm sistemlerinden herhangi birinin hata verme ihtimalini göz önünde bulundurmak amacıyla hem yük ünitesi hem basınç sayacı kullanılarak iki ölçüm alınması daha güvenlidir.

Yükleme deneyi planlanırken, reaksiyon kirişinin uygulanacak azami yüke göre boyutlandırıldığı ve hidrolik kriko şahmerdanlarının tahmin edilen kazık oturmalarını, reaksiyon kirişindeki deformasyonları ve ankraj üniteleri bağlantılarının uzamalarını gerçekleştirmeye yeter derecede hareket ettikleri varsayılır. Gerçek göçme yükünün hesapla bulunandan daha fazla çıkması ihtimaline karşı, reaksiyon kirişinin maksimum yükün %50 fazlasına göre boyutlandırılması tavsiye edilir. Eğer bu yapılmazsa, göçmeye yakın durumdaki yük-deformasyon davranışı elde edilemeyebilir.

Kazık yükleme deneyinde yapılan iki ölçümü, kazık ucunda meydana gelen aksel hareket ve kazık boyunca oluşan artan gerilmedir. Kazık ucundaki aksel

hareketin ölçümü, bütün kazık yükleme deneylerinde yapılması gereken bir ölçümdür. Artan gerilme ölçümleriyse kazıktan zemine aktarılan yükün dağılımını belirlemek için yapılır ve isteğe bağlıdır.

Ölçüm için en sık kullanılan alet dijital sayaçlardır. Bu sayaçlar deney kazığının her iki yanına monte edilerek ölçüm sonrasında bu iki sayaçtan elde edilen verilerin ortalamaları alınır. Bu sayaçlar sert ve deney kazığından en az 8ft (2,5m) uzaklıktaki desteklerle sabitlenen referans kirişleri üzerine oturtulur. Dijital sayaçlar en az 0,01 in hassaslıkla ölçüm yapabilmelidirler.

Dijital sayaçların yanında tel, ayna ve skala sistemi de kullanılmaktadır. Bu sistem, kazığın zemin yüzeyinde kalan kısmında iki taraftan yerleştirilen aynalı skalalar ve bu skalalardan yaklaşık 1in (25mm) mesafedeki, deney kazığına her iyi taraftan paralel teller vasıtasıyla deney kazığının aksenal hareketini ölçmeye yarar. Teller piyano teli veya eşdeğer kalitede teller olmalı, ankraj kazıklarından mümkün olduğu kadar uzakta zemine sabitlenmeli ve mümkün olduğunca gergin olmalıdırlar. Deney öncesinde, süresince ve sonrasında hizalanmış telden alınan ölçümlerle kazığın hangi yükte zemine ne derece gömüldüğü tespit edilebilir.

Gerilme ölçümü için sık kullanılan aletlerden biri ise elektrikli gerilme sayaçları veya titreşimli tel gerilme sayaçlarıdır. Bu sayaçlar kazık boyunca belli aralıklarla kazığa donatı çubukları ve tellerle bağlanırlar. Çakma kazık üzerinde deney yapılması durumunda bu sayaçların yerleştirilme sırasında hasar görmemesi için azami gayret sarfedilmeli ve gereken önlemler alınmalıdır. Aynı zamanda bu sayaçlar ısıya duyarlı oldukları için ısı yalıtımlı sayaçlar tercih edilmelidir. Gerilme sayacındaki değişimler kaydedilerek  $\epsilon$  gerilmeleri doğrudan belirlenebilir. A kazığın enkesit alanı, E kazık malzemesinin elastisite modülü olmak üzere, gerilme sayacının bulunduğu noktadaki yük ( $Q_{va}$ ) aşağıdaki formülle belirlenebilir.

$$Q_{va} = AE\epsilon \quad (14.1)$$

Bu gerilme ölçümlerini yapabilmemiz için bir diğer yöntem de PVC borular ve paslanmaz çelik çubuklar kullanmaktır. Deney kazıklarına kazık boyunca belirli aralıklarla üç adet paslanmaz çelik uç levhası gömülür veya yerleştirilir. PVC borular, bu uç levhalarına kadar kazık boyunca uzatılır. Bu boruların

içerisinden, uç levhalarına kadar paslanmaz çelik çubuklar geçirilir. PVC boruların ve paslanmaz çelik çubukların boyları kazık başından uç levhalarına kadardır. Her bir çelik çubuk PVC borular içerisinde serbest hareket edebilecek şekildedir. 0,001in hassalıkta bir dijital sayaçla, kazık başı ile ölçüm çubukları arasındaki hareket farkı belirlenir. Genelde her üç çubuk için kazık başında farklı okumalar elde edilir. Ankraj levhalarının yerleri not edilip, çelik çubukların göreceli hareketleri ölçülerek, kazıkta ortadaki ankraj levhasının olduğu noktadaki boy kısalması belirlenebilir.  $\Delta L$  iki çelik çubuk arasındaki hareket farkı,  $L$  iki ankraj levhası arasındaki mesafe,  $E$  kazık malzemesinin elastisite modülü ve  $A$  kazığın enkesit alanı olmak üzere, iki ankraj levhasının ortasındaki  $Q_{va}$  yükü (14.2) kullanılarak bulunabilir:

$$Q_{va} = A E (\Delta L / L) \quad (14.2)$$

Bu deneylerle ilgili yapılan araştırmalar sonucunda titreşimli tel gerilme sayacı yönteminin çelik çubuk yöntemine nazaran daha gerçekçi sonuçlar verdiği ve gerilme sayaçlarının kazık çakımı sırasında ciddi hasar görmedikleri belirlenmiştir. (Rieke ve Crowser, 1986)

Sharma (1986) tarafından yapılan aksenal basınç deneyleri de Rieke ve Crowser'ın deneylerini doğrular niteliktedir. Sonraki araştırmalar da, yeterli şekilde korundukları takdirde, titreşimli tel gerilme sayaçlarının kazık boyunca artan gerilmeler ve yük transferi konusunda gerçekçi veriler sağladıklarını göstermiştir.

#### **14.1.1. Aksenal yükleme deney yöntemleri**

Uygulama mühendisleri ve araştırmacılar, uzun süren çalışmalar sonucunda bu deneyler için pek çok yöntem geliştirmişlerdir. Bunlardan en çok kabul görmüş olanları burada ele alınmıştır.

#### 14.1.1.1. Yavaş yükleme deney yöntemi (SM deneyi)

Bu yöntem şu adımlardan oluşur:

- a) Deney kazığı, tasarım yükünün %200'üne kadar sekiz eşit aralıkla yüklenir. (Örn: Sırasıyla tasarım yükünün %25'i, %50'si, %75'i, %100'ü, %125'i, %150'si, %175'i ve %200'ü ile deney kazığı yüklenir.)
- b) Her bir yükte oturma 0,01in/saat oluncaya kadar beklenir ve bu süre iki saatin üstüne çıkarılmaz!
- c) %200'lük yük 24 saat boyunca uygulanır.
- d) Gereken bekleme süresi tamamlandıktan sonra, uygulanan yük yine aynı yüzdelerle ve birer saat arayla kazık üzerinden kaldırılır.(Kazık üzerindeki yük önce %175'e, 1 saat sonra %150'ye ... düşürülür)
- e) Yükleme ve yük kaldırma işlemi sona erdikten sonra bu sefer kazık, tasarım yükünün %50 kadarı miktarlarda ve 20 dakika aralıklarla tasarım yüküne ulaşıncaya kadar yeniden yüklenir.
- f) Tasarım yüküne ulaşıldıktan sonra ise 20 dakika aralıklarla ve tasarım yükünün %10'u kadar artışlarla çökünceye kadar yüklenir.

Bu yöntem çoğunlukla ASTM standart deney yöntemi olarak bilinir ve kazık yerleştirilmesinden önceki arazi incelemesi olarak uygulanır. Bu yöntemin başlıca dezavantajı, uygulamasının uzun sürmesidir. Bu yöntemle yapılan bir deney toplamda 40~70 saat alabilmektedir.

#### 14.1.1.2. Hızlı yükleme deney yöntemi (QM deneyi)

Bu yöntem şu aşamalardan oluşur:

- a) Deney kazığı, tasarım yükünün %300'üne kadar eşit aralıklar yüklenir. (Örn. Her bir aralık tasarım yükünün %15'i olacak şekilde)
- b) Yük artışları 5 dakika arayla yapılır ve her 2,5 dakikada bir okuma alınır.
- c) Deney yüküne ulaşıncaya kadar yük artışına devam edilir.
- d) Deney yüküne ulaşıldıktan sonra kazık üzerindeki yük 5'er dakika aralıklar dört eşit parçada kaldırılır.



Bu deney yöntemi hızlı ve ekonomiktir. Bu şekilde yapılan deneylerin süresi 3~5 saat sürmektedir. Bu yöntem drenajsız koşullara daha uygun sonuç vermektedir. Hızlı bir yöntem olduğu için, oturma hesabında kullanılması uygun değildir.

#### **14.1.1.3. Sabit penetrasyon oranı yöntemi (CRP deneyi)**

Bu yöntem şu aşamalardan oluşmaktadır:

- a) Kazık başı, dakikada 0,05 in (1,25 mm) oturacak şekilde yüklenir.
- b) Penetrasyon oranı için gereken yük miktarı her aşamada kaydedilir.
- c) Toplam penetrasyon 2~3 in (50~75 mm) oluncaya kadar deneye devam edilir.

Bu yöntemin başlıca avantajları hızlı (2~3 saat) ve ekonomik olmasıdır. Bu yöntem sürtünme kazıklarına özel bir yöntem olup, uç kazıklarında sert tabakada penetrasyon yaratmak için gereken enerji çok fazla olduğu için uygun değildir.

#### **14.1.1.4. İsvaç döngüsel deney yöntemi (SC deneyi)**

Bu yöntem şu aşamalardan oluşmaktadır:

- a) Kazık, tasarım yükünün 1/3'ü kadar bir yükle yüklenir.
- b) Tasarım yükünün 1/6'sına kadar yük boşaltılır. Bu yükleme ve boşaltma döngüsü 20 kere tekrarlanır.
- c) Yük, a şıkkındaki %50 fazla olacak şekilde artırılıp yine aynı şekilde yükleme ve boşaltmalar yapılır.
- d) Kazık çökünceye kadar devam edilir.

Bu yöntem oldukça zaman alıcıdır ve döngüsel yüklemeler kazığın davranışını değiştirerek orijinal kazıktan farklı çalışmasına sebep olur. Bu yüzden, sadece döngüsel yüklemenin ciddi önem taşıdığı projelerde bu deneyin uygulanması önerilmektedir.

#### **14.1.1.5. Deney yöntemlerinin kıyaslanması**

SM ve SC deneyleri en yavaş, CRP deneyi ise en hızlı deneydir. CRP deney yönteminde yük-deformasyon eğrileri iyi tanımlıdır ve QM deneyi eğrileriyle uyumludur. SM deney yöntemi daha çok kuzey Amerika'da kullanılmaktadır. Tercih edilme sebebi ise, kolay uygulanabilmesi, brüt ve net oturmaların yorumunun kolay yapılması, çalışma yükü altında kazıkta beklenen oturmalar için de kaba tahminler vermesidir.

#### **14.1.2. Deney verilerinin yorumlanması**

Genellikle yük ve oturma deney verileri, yük apsis boyunca oturma ordinat boyunca gösterilecek şekilde grafik haline dönüştürülür. Bu koordinatla, mühendisin seçimine göre değiştirilebilir. Oturmalar brüt (kazığın, deney yükünün tamamı altındaki toplam oturması) veya net (deney yükünün kaldırılmasını takiben esneyen kazığın tekrar yüklenmesiyle yaptığı hareket) olarak göz önüne alınabilir. Grafiğe dönüştürülen bu veriler göçme yükünün ve kazık kapasitesinin belirlenmesi için kullanılır.

Azami göçme yükü, uygulanan yük altında kazığın saplandığı veya oturmaların hızlı gerçekleştiği yük olarak tanımlanır. Fakat saplanma, kazık-zemin sisteminin kabul edilebilir sınırlarını aşan büyük hareketler gerektirebilir. Diğer göçme tanımları ise, kazık başının kazık uç çapının %10'u kadar hareket etmesi veya brüt oturmanın 1,5 in (38 mm)'yi ve net oturmanın 0,75 in (19 mm)'yi aşması gibi kabaca tanımlanmış kriterlerdir. Pek çok mühendis göçme yükünü yük-deformasyon eğrisinin son teğeti olarak tanımlarlar. İdeal göçme yükünün tespiti ise bir takım matematiksel kurallara dayanmalıdır ve tekrarlanabilir nitelikte olmalıdır. Aynı zamanda bu değer ölçek etkisinden bağımsız olmalıdır. Verilerin yorumlanması için sık kullanılan yöntemlerden bazıları konunun devamında açıklanmıştır.

### 14.1.2.1. Davisson yöntemi

Bu yöntemle göçme yükü tayini için şu adımlar izlenmelidir:

- a) Yük-hareket eğrisi çizilir. (hareketin birimi inçtir.)
- b) Kazığın elastik hareketi  $\Delta = (Q_{va})L / AE$  denklemiyle elde edilir. Burada  $Q_{va}$  uygulanan yük, L kazık boyu, A kazık enkesit alanı, E ise elastisite modülüdür.
- c) Orijinden başlayarak elastik hareket denkleminin uygun bir OA doğrusu çizilir.
- d) Bu OA doğrusunun sağ tarafına, OA doğrusuna paralel ve yatayda  $x=0,15+D/120$  in (D=inç cinsinden kazık çapı) mesafede bir BC doğrusu daha çizilir.
- e) Bu BC doğrusunun yük,hareket eğrisini kestiği nokta göçme yükünü verir.

Bu yöntem daha çok çakma kazıkların ve QM deney yönteminin hesabı için önerilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajı, BC ana çizgisinin, deneye başlanmadan önce çizilebilmesidir.

### 14.1.2.2. De Beer yöntemi

Bu yöntem şu adımlardan oluşur:

- a) Yük ve hareket değişimleri logaritmik ölçekle çizilir.
- b) Bu değerler iki düz çizgi (tek kırıklı bir doğru) üzerine düşerler.
- c) Göçme yükü bu iki doğrunun kesiştiği veya doğrunun kırıldığı noktaya tekabül eder.

Bu yöntemle göçme yükü hesabı daha çok SM ve SC deneyleri gibi yavaş uygulanan deneyler için önerilir.

### 14.1.2.3. Brinch Hansen %90 kriteri

Bu daha çok bir deneme-yanılma yöntemi olup aşağıdaki adımlardan oluşur:

- a) Yük-hareket eğrisi çizilir.
- b) Göçme yükü  $(Q_v)_{ult}$  ve bu yük altında kazık başında meydana gelen yer değiştirme  $\Delta_u$  olsun.  $(Q_v)_{ult}$  yükünün %90'ı kadar yük  $(%90(Q_v)_{ult})$  altında kazık başında meydana gelen yer değiştirme,  $(Q_v)_{ult}$  yükü altında meydana gelen  $\Delta_u$  yer değiştirmesinin yarısı  $(\Delta_u/2)$  olacak şekilde grafik üzerinde deneyerek göçme yükü bulunur.

Bu hesap yöntemi, zemin tipinden bağımsız olarak CRP deney yöntemi için uygulanabilir niteliktedir.

### 14.2. Çekip Çıkarma Dayanım Deneyleri

Bu deney iki farklı düzenekle yapılabilir. İlkinde deney kazığının her iki yanına ankraj kazıkları veya destek üniteleri konulup, deney kirişi bu desteklerin üzerine yerleştirilir. Deney kirişinin üzerine, deney kazığıyla merkezleri çakışacak şekilde bir hidrolik bir kriko ve bu krikonun üzerine reaksiyon kirişi monte edilir. Reaksiyon kirişine bağlı çekme bağlantıları deney kazığına kadar uzatılıp ankrajlanır. Hidrolik kriko vasıtasıyla uygulanan yük destek ünitelerine basınç, deney kazığına ise çekme kuvveti uygulanır.

İkinci bir yöntemdeyse, yine deney kazığının her iki yanına ankraj kazıkların veya destek üniteleri konulur. Bunların her biri üzerine birer (toplam iki adet) hidrolik kriko yerleştirilir. Hidrolik krikolar çelik levhalarla alttan ve üstten desteklenir. Üst destek levhalarının üzerine deney kirişi yerleştirilir. Bu deney kirişinin ortasından deney kazığına ankrajlanacak şekilde çekme bağlantıları getirilip, bu bağlantılar deney kirişinin üzerinde sabitlenir. Bu yöntemde destek üniteleri üzerindeki her iki kriko da eş zamanlı ve eşit miktarlarda yük uygulatacak şekilde çalıştırıldıklarında, destek ünitelerinde basınç, deney kazığında ise çekme kuvveti meydana gelir. Bu yöntemde kazığa uygulanan yük, hidrolik krikoyla verilen yükün iki katıdır. (iki kriko kullanıldığı için)

Deney kazığı ile reaksiyon kazıkları veya destek üniteleri arasındaki net mesafe en az kazık çapının beş katı olmalı ve 8 fit (2,5 m)'den az olmamalıdır. Eksenel basınç deneyinde olduğu gibi kazığın her iki yanına ölçüm sayaçları yerleştirilir. Deneyden önce bu sayaçların, hidrolik pompanın, hidrolik kriko(lar)ın aynı birime göre kalibrasyonu yapılmalıdır. Eğer birden fazla kriko kullanılıyorsa bu krikoların şahmerdan çapı aynı olmalıdır, ortak bir basınç sayacına bağlanmaları gereklidir ve uygun düzenele tek bir hidrolik pompa vasıtasıyla çalıştırılmalıdırlar. İki yük ölçü sisteminin (Örn. Basınç sayacı ve yük hücresi) aynı anda kullanılması, sistemlerden birinin hatalı ölçüm yapması durumunda deneyi yenilemeden diğer ölçüm sisteminden faydalanılarak yola devam edilmesini sağladığı için önerilmektedir. Deney kirişi ve reaksiyon kazıkları, deney yükünü taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Hidrolik kriko şahmerdanlarının, beklenen kazık hareketlerini, ankraj uzamalarını ve deney kirişi deformasyonlarını bir arada karşılayabilecek derecede hareket kabiliyetleri olmalıdır.

Çekip çıkartma deneyinde de, eksenel basınç deneyinde olduğu gibi iki temel ölçüm vardır. Bunlar kazık ucunun eksenel hareketinin ve kazık boyunca artan gerilmelerin ölçümüdür.

Kazık ucunun eksenel hareketinin ölçümü birincil ve ikincil sistemlerden oluşur. Birincil sistemler(dijital sayaçlar ve tel, ayna, skala sistemleri) ana ölçümleri, ikincil sistemlerse (araştırmacı derecelendirme sistemi) kontrolleri yapmaya yarar. Deney kazığının her iki yanına simetrik olarak yerleştirilen dijital sayaçlar, gerek deney kazığından gerek reaksiyon kazıklarından veya destek ünitelerinden en az 8 ft (2,5 m) uzaklıkta zemine ankrajlanmış bağımsız referans kirişleri üzerine oturtulurlar. Diğer bütün ayar ve gereksinimler, eksenel basınç deneyindekilerle aynıdır.

Kazık boyunca artan gerilmelerin ölçümü, kazıktan zemine yük transferinin dağılımını belirlemek amacıyla yapılır. Bu ölçüm için genellikle gerilme çubukları ve elektrikli gerilme sayaçları kullanılır. Bu aletler de yine eksenel basınç deneyinde detaylarıyla açıklanmışlardır.

### 14.2.1. Çekip çıkarma deney yöntemi

Eksenel basınç deneyinde uygulanan dört yöntem de bu deney için uygundur. Aradaki tek fark, deney kazığına uygulanan yükün, eksenel basınç deneyinde uygulanan yükle ters doğrultuda, yani yukarı yönde oluşudur. İçlerinden en sık uygulananı ise “yavaş yükleme deney yöntemi” olarak bilinen SM deneyidir.

### 14.2.2. Deney verilerinin yorumlanması

Çekip çıkarma deneyinde göçme yükünün belirlenmesi için kullanılan yöntemler, yapının izin verilebilir hareketlerine bağlı olarak değişir. Genel olarak çekip çıkarma deneyinde göçme yükü, eksenel basınç deneyine göre çok daha kolay belirlenebilmektedir çünkü bu deneyde göçme yüküne ulaşıldıktan sonra çekip çıkarma dayanımı çok belirgin şekilde düşmektedir. Genel olarak, azami çekip çıkarma dayanımının belirlenirken şu üç değerden en küçüğü dikkate alınır:

- Kazık ucunun yukarı yönde 0,25 inç (6,25 mm) hareketini sağlayan yük
- Yük-hareket eğrisindeki teğetlerin kesiştiği noktaya tekabül eden yük
- Yukarı yönde hareketin aniden ve aşırı derecede arttığı (yük-hareket eğrisinde en keskin eğimin görüldüğü) noktaya denk gelen yük

Bu üç değerden en küçüğü, çekip çıkarma deneyi için göçme yükünü verir.

### 14.3. Yanal Kazık Yükleme Deneyleri

Bu deneyde yanal yük deney kazığına, yatayda rijit bir düzeneğe bağlı bir hidrolik kriko vasıtasıyla uygulanır. Bu düzenek bir veya daha fazla referans kazığının taşıdığı rijit bir başlık veya rijit herhangi bir deney yapısı olabilir. Deney kazığını çevreleyen zemin, bu yapının altında kalan yüklü zeminle etkileşime girmeyecek bir mesafede olmalıdır. Deney kazığıyla destek yapısı arasındaki mesafeyi ayarlamak için de payanda ve bu payandanın bir yandan destek yapısıyla, diğer taraftan hidrolik krikoyla tam temasını sağlamak amacıyla başlangıç ve bitiş kısımlarına çelik levhalar yerleştirilir. Payanda, hasar görmeden

ve uygulanacak kuvveti tam olarak iletebilecek derecede dayanıma sahip olmalıdır. Payandanın devamına da hidrolik kriko yerleştirilir. Bu kriko da deney kazığıyla tam temas halinde olmalıdır. Deney kazığının diğer tarafında da bir dijital sayaç ve bu sayacın mesnetlendiği bir referans kirişi bulunmaktadır.

Hidrolik krikoyla uygulanan yanal yük ya bir yük ünitesiyle ya da basınç sayacıyla ölçülür. Basınç sayacı kullanıldığı takdirde, hidrolik kriko, vanalar, pompa ve basınç sayacının aynı birime göre kalibrasyonu yapılmalıdır. Deney ekipmanının kalibrasyonu her deneyden önce yapılmalıdır.

Bu deneyde ölçümü yapılacak iki büyüklük, kazık başının uygulanan yük doğrultusundaki yer değiştirmesi ve kazık aksındaki hareketin derinlikle değişimidir. Kazık başının yanal hareketi her deneyde ölçülürken, kazık aksının derinlik boyunca değişen hareketi sadece özel projeler için yapılan bir ölçümdür.

Kazık başının yanal hareketi dijital sayaçlarla veya tel-ayna-skala sistemiyle ölçülebilir. İki ayrı ölçü sisteminin aynı anda kullanılması, kontrol yapılması ve sistemlerden birinin hata vermesi durumunda diğer sistemle yola devam edilmesi açısından tavsiye edilir.

Dijital sayaçların en az 3 in. (75 mm) hareket serbestisi olmalıdır ve 0,01 in (0,25 mm) hassaslıkla ölçüm yapabilmelidirler. Tel-ayna-skala sistemiyle ölçüm yapılırken skala ya kazık başına ya da yük uygulanan tarafın aksi yönünde kazığa ankrajlanmış bir kola monte edilir. Tel, yükün uygulandığı doğrultuya dik ve skalanın üzerine gelecek şekilde uygun bir mesafede zemine sabitlenmelidir. Skala 0,01 in (25 mm) hassaslıkta olmalıdır. Yük uygulanmaya başladığında tel sabit kalırken ayna ve skala hareket eder. Skaladaki başlangıç ve bitiş ölçümleri farkı, kazık hareketini verir.

Kazık aksının derinlik boyunca yanal hareketi veya deformasyonu ise kazık merkezinden geçirilen bir boru yardımıyla ölçülebilir. Bu boru, içine inklinometre (eğimölçer) yerleştirmek için uygun olmalıdır.

Kazık başının dönmesi ölçülmek istendiği takdirde iki ayrı noktadan, kazık aksına dik deformasyon ölçümleri alınır. İki okuma arasındaki fark eğimdeki değişimi gösterir.

### 14.3.1. Yanal yükleme deney yöntemi

Mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan iki deney yöntemi vardır. Bu konu dahilinde bu iki yöntem açıklanmıştır.

#### 14.3.1.1. Standart yükleme usulü

Bu yöntem şu aşamalardan oluşur:

- a) Toplam yük, tasarım yükünün %200'üne kadar 10 adımda uygulanır. (Örn. Sırasıyla tasarım yükünün %25'i, %50'si, %75'i, %100'ü, %125'i, %150'si, %170'i, %180'i, %190'ı, %200'ü) %25 ve %50'lik yükler 10'ar dakika boyunca, %75'lik yük 15 dakika boyunca, diğer yükler 20'şer dakika boyunca uygulanır.
- b) Tasarım yükünün %200'ü olan toplam deney yükü 60 dakika boyunca uygulandıktan sonra, tasarım yükünün %50'si kadar parçalarla ve 10'ar dakika aralıklarla kazık üzerinden yük kaldırılır. (kazık üzerindeki yük sırasıyla tasarım yükünün %150'sine, %100'üne, %50'sine ve %0'ına indirilir.)
- c) Her bir aşama için yük ve hareket miktarları kaydedilir. Son olarak bütün yük kalktıktan sonra geri dönüş miktarı ve esneme kaydedilir.

#### 14.3.1.2. Standardın üstünde yükleme usulü

Bu yöntem aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- a) 14.3.1.1.'de anlatılan şekilde standart usulde yük uygulandıktan sonra, tasarım yükünün %200'üne ulaşılacak şekilde, tasarım yükünün %50'si kadar miktarlarda kazık yeniden yüklenir ve her aşamada yükler yeni aşamaya geçilmeden önce 10'ar dakika kazık üzerinde bekletilir.
- b) Sonra belirlenen maksimum deney yüküne ya da göçmeye ulaşılıncaya kadar, tasarım yükünün %10'u kadar parçalar halinde ve yüklemeler arası 15 dakika olacak şekilde kazığı yüklemeye devam edilir.



- c) Maksimum deney yüküne veya göçmeye ulaşıldıktan sonra kazık üzerindeki toplam yük 4 eşit aşamada ve 10'ar dakika aralıklarla kazık üzerinden kaldırılır.

Özel projelerde, projenin ihtiyaçlarına bağlı olarak döngüsel yükleme, sürşarj yüklemeleri, ters yüklemeler ve istenilen deformasyona ulaşıncaya kadarki yüklemeler gibi farklı usullerden yararlanılabilir. Döngüsel yüklemede tasarım yükünün belirli bir yüzdesi döngüler halinde her aşamada yük kazığa 10~20 dakika etkiyecek şekilde uygulanır. Sürşarj yüklemesi, belirlenen sayıda çoklu yük döngülerinin belli bir yük seviyesinde uygulanmasıdır. Ters yüklemede yanal yük, birbirini izleyen itme ve çekme kuvvetleri şeklinde kazığa uygulanır. Yapının kullanım ömrü boyunca maruz kalma ihtimalinin yüksek olduğu kuvvetlere göre gerekli görülen deneyler belirlenip uygulanır.

#### **14.3.2. Deney verilerinin yorumlanması**

Yanal kazık yükleme deneylerinde göçme yükünün belirlenme yöntemi, kazıklarla desteklenen yapının izin verilebilir hareket miktarlarına göre değişiklik gösterir. Genel olarak maksimum yanal yük, aşağıda belirtilen iki yükten küçük olanıdır:

- 0,25 in (6,25 mm) yanal deformasyon yaratan yük göçme yüküdür
- Yük-hareket eğrisinin teğetlerinin kesişim noktasına tekabül eden yük göçme yüküdür

Bu iki yükten en küçüğünün, üzerinde deney yapılan kazık için göçme yükü olduğu kabul edilir.

#### **14.4. Dinamik Kazık Yükleme Deneyleri**

Geleneksel kazık çakma işlemleri sırasında kullanılan kazık yerleştirme yöntemlerinin, zemin-kazık sınır koşulları ve kazık-temel arayüzündeki dinamik davranış üzerinde önemli etkisi olabilir. Bu nedenle dinamik kazık yükleme deneyleri, tekil veya grup kazıkların tepki parametreleri üzerinde çalışmak için yapılmaktadır. Kazıkların tepkileri, kazıkların kullanım ömürleri boyunca maruz

kalacakları yüklere bağılı olarak (1) düşey titreşimler, (2) yatay titreşimler, (3) çalkantılı titreşimler (birleşik modlar) ve (4) burulma titreşimleri olarak göz önüne alınırlar. Farklı araştırmacılar (Prakash ve Sharma (1969); Gle ve Woods (1984); Blaney (1987), ...) tarafından çok sayıda tam ölçekli kazık yükleme deneyleri yapılmış ve farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir.

Burada sadece tekil bir kazık üzerindeki yanal titreşimli yükleme deneyi açıklanmıştır. Diğer titreşim deneyleri de bu deneyden çok az farklıdır.

Titreşimli bir yükte, temel in her serbestlik derecesi için dinamik rijitlik ve sönümlenme faktörleri hesaplanır. Gle ve Woods (1984) tam ölçekli, yalıtılmış zemin kazık sistemi üzerindeki yanal titreşim deneyi için bir yöntem belirlemişlerdir. Kazık, bir Lazan osilatörü ile harekete geçirilir. Kazığın doğal frekansını osilatörün işleyiş sınırları dahilinde tutmak için kazığa düşey yük uygulanması gereklidir. Bu da kazık başına 610x610x19 mm boyutlarında ve her biri 560 N ağırlığında olan kare kütle levhaları yerleştirilerek yapılır. Bu levhalardan birinin ortasında, üzerinde deney yapılacak kazığın çapından çok az büyük bir delik açılır. Bu levha kazık başlığının tam üzerine yerleştirilerek kaynaklanır. Bu levhanın üzerine, osilatörü monte etmek için kullanılan bir çerçeveye beraber diğer levhalar yerleştirilir. Levhalar köşelerinden sıkıca bağlanarak ve her bir kenarın ortasından geçirilen demir çubuklarla tutturularak rijit bir kütle gibi çalışmaları sağlanır.

Yatay bir düzlemde dalgalı bir kuvvet yaratan, ters hareket eden şahmerdanlar üzerine monte edilmiş dengelenmemiş kütlelerin merkezkaç kuvvetini kullanan mekanik bir osilatör yardımıyla sabit, sinüzoidal kuvvet etkililir. Bu kuvvetin şiddeti, kütleler arasındaki faz açısı ayarlanarak kontrol edilir. Osilatörün hızı ise, esnek bir gövdeyle osilatöre bağlanan değişen hızda bir elektrik motoruyla kontrol edilir. Bu motor, kazığa uygulanmak üzere 5~55 Hz frekans aralığında değişen kuvvetler yaratır. Yer değiştirmeler, rijit kütle in her iki yanına monte edilen iki dönüştürücü ile ölçülür. Bu dönüştürücülerden gelen çıktı sinyalleri, çift-kanallı şerit grafik üzerine kaydedilir. Hız dönüştürücülerin kalibrasyonu, hızın doğru şekilde yer değiştirmeye çevrilmesine yardım eder. Dönüştürücüleri rijit kütle in her iki yanına yatay bir düzlem üzerinde monte etmek, belirlenen yer değiştirme şiddetlerinin bağımsız kontrolünü sağlar.

#### 14.4.1. Dinamik yükleme deney yöntemi

Rijit kütle için sadece kazık-zemin etkileşiminden kaynaklanan yanal dinamik tepkisinin belirlenmesi için, bu kütle için zemine değmeyecek şekilde olabildiğince alçak yerleştirilmesi gerekmektedir. Zemin yüzeyiyle rijit kütle için tabanı arasındaki mesafe arttıkça dinamik davranış daha çok konsol üzerindeki kütle için yapısal tepkisine yaklaşmaktadır.

Arazi deneyine başlanmadan önce hız dönüştürücülerin bağlantı elemanları birkaç kütle levhasına kaynaklanır. Hız dönüştürücüler rijit kütle kesitinin ağırlık merkezine mümkün olduğunca yakın yerleştirilir. Osilatörle motor esnek bir bağ ile birleştirilir.

İlk önce osilatörle oldukça düşük şiddette bir kuvvet uygulanır. Ardından zemin-kazık-kütle sistemi 5~55 Hz arasında değişen frekanslarda titreştirilir. Her frekansta, sabit tepkinin kaydedilmesine yetecek kadar süre osilatör çalıştırılır. Osilatörün maksimum çıktısına ulaşıldığında frekans azaltılarak ek tepki verileri elde edilir.

Aynı kazık üzerinde farklı kuvvetlerde 5~7 deney yapılır. Gle ve Woods'un (1984) deney raporlarına göre, çift genlikli kuvvet seviyeleri 20~4450 N arasında değişim göstermektedirler.

Tekil kazık üzerinde bir de koparma deneyi yapılması tavsiye edilir. Bu deneyde çelik levha kütle için bir itme kuvveti uygulanarak koparılır ve bu sırada zemin-kazık-kütle sisteminin serbest titreşim tepkileri kaydedilir. Bu itme kuvveti, rijit kütle için yatay olarak tahta bir kalas veya bir tokmakla vurularak uygulanır. Ölçülen serbest titreşim davranışlarından yola çıkılarak zemin-kazık-kütle sisteminin sönümlenmesi ve Sönümlenmiş doğal frekansı belirlenir.

Titreşimin genliği kontrol edilemediği ve düzenli titreşim deneyindekinden daha büyük olduğu için bu deneyin sabit dinamik deneyden sonra yapılması tavsiye edilir. Ayrıca, kazık çevresindeki olası zemin örselenmesi etkilerine en aza indirmek için, bu deneyin, sabit dinamik deneyin uygulama doğrultusuna dik uygulanması önerilir.

#### 14.4.2. Deney verilerinin yorumlanması

Dönen kütle tahriği yaratan bir frekansta titreşimin maksimum genliği aşağıdaki denklemle verilebilir:

$$A_x / (m_e \bar{e} / M) = 1 / [2 \xi_x (1 - \xi_x^2)^{1/2}] \quad (14.3)$$

$$m_e \bar{e} = \sin(\theta / 2) / 2\pi^2 \text{ (çift genlikli Lazan kuvveti çıktısı için)} \quad (14.4)$$

$A_x$ : ölçülen genlik

$M$ : kg cinsinden kazık üzerindeki yük

$\xi_x$ : ise yatay öteleme doğrultusundaki sönümlenme oranı

Denklem (14.3) yatay öteleme sönümlenme oranını ( $\xi_x$ ) verir. Kazık-zemin sisteminin sönümlenmemiş doğal frekansı  $\omega_n$  ise (14.5) bağıntısıyla bulunur:

$$\omega_n = \omega_{nd} \times \sqrt{(1 - \xi_x^2)} \quad (14.5)$$

$\omega_{nd}$ : sönümlenmiş doğal frekans

Ötelenme yay katsayısı  $k_x$ , kazık başındaki bilinen kütleden geri hesap yapılarak elde edilebilir. Eğer pik tepki iyi tanımlanmışsa, benzer bir yöntemle çalkantılı titreşim tepkisi de elde edilebilir.

Zemin-kazık-kütle sisteminin dinamik tepkisi, iki serbestlik dereceli kayma ve çalkantı çözümü ile belirlenebilir. Hareket denklemleri ötelenme ve dönme serbestlik derecelerinin her biri için yazılıp, dinamik tepki için beraber çözülür. Kuvvetler ve momentler kütle merkezine göre toplandıklarında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\begin{bmatrix} A & B & C & -D \\ -B & A & D & C \\ C & -D & E & F \\ -D & C & -F & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{x2} \\ A_{\phi1} \\ A_{\phi1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ 0 \\ F_x h_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14.6)$$

Burada  $F_x$ , osilatör tarafından oluşturulan çift-genlikli, istikrarlı kuvvettir.

A'dan F'e kadar olan değişkenler ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned}
 A &= M\omega^2 - k_x & D &= C_x h_1 \omega \\
 B &= C_x \omega & E &= I_0 \omega^2 - k_\phi - h^2 k_x \\
 C &= h_1 k_x & F &= C_\phi \omega + h_1 C_x \omega
 \end{aligned} \tag{14.7}$$

M: kg cinsinden kazık başındaki yük

$I_0$ : M-m-s<sup>2</sup> cinsinden kütle kutupsal atalet momenti

$\omega$ : rad/s cinsinden dairesel frekans

$k_x$ : N/m cinsinden yanal ötelenme yay rijitliği

$k_\phi$ : N-m/rad cinsinden açısai yay rijitliği

$C_x$ : N-s/m cinsinden yatay ötelenme sönüm değeri

$C_\phi$ : N-s/rad cinsinden dönel sönümlenme değeri

$h_1$ : tabandan itibaren kazık başlığının ağırlık merkezine olan mesafe

Kütlenin yanal ötelenmesi aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$X = A_x \sin(\omega t - \theta_x) \tag{14.8}$$

Kütlenin çalkantı titreşimleriyle dönme miktarı ise (14.9) ile verilir:

$$\phi = A_\phi \sin(\omega t - \theta_\phi) \tag{14.9}$$

Burada kullanılan sabitler ise (14.10) ile verilen bağıntılar yardımıyla elde edilir:

$$\begin{aligned}
 A_x &= (A_{x1}^2 + A_{x2}^2)^{1/2} \\
 A_\phi &= (A_{\phi1}^2 + A_{\phi2}^2)^{1/2} \\
 \theta_x &= \tan^{-1} \left( \frac{A_{x2}}{A_{x1}} \right) \\
 \theta_\phi &= \tan^{-1} \left( \frac{A_{\phi2}}{A_{\phi1}} \right)
 \end{aligned} \tag{14.10}$$

## 15. KAZIK TEMEL TASARIMINA AİT DİNAMİK UYGULAMALAR

Bu tasarımda sıvılaştan zemin içerisindeki K1 (0,60m), K2 (0,80m) ve K3 (1,00m) sürtünme kazıklarının 5 (M5), 6 (M6) ve 7,10 (M7) şiddetlerindeki üç depremde yaptıkları oturmalar Plaxis programıyla belirlenmiştir. Daha sonra kazıklara bu yer değiştirmeleri yaptıracak statik yükler çeşitli hesap yöntemleriyle (Vesic, Meyerhof, Coyle&Castello, Grup etkinlik faktörü, Tekil ve grup kazıkların oturmaları) bulunmuştur.

### 15.1 Hesaplarda Kullanılan Malzemelere Ait parametreler

Bu bölümde, Plaxis programında ve çeşitli yöntemlerle yapılan hesaplamalar için kullanılan parametreler tablolar halinde belirtilmiştir.

Hesaplarda kullanılan zeminin ve kazık temellerin özellikleri sırasıyla Tablo 15.1 ve Tablo 15.2 ile verilmiştir.

**Tablo 15.1:** Hesaplarda kullanılan zemin özellikleri

Zemin Özellikleri	Çok gevşek (sıvılaştan) zemin
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	17
$\nu$	0,2
E (kN/m <sup>2</sup> )	12000
$k_x, k_y$ (m/gün)	864
$\phi$ (°)	22
c (kohezyon, kN/m <sup>2</sup> )	20
e (boşluk oranı)	0,8
YAS (yüzeyden itibaren, m)	-2,00
$\delta$ (zemin-kazık sürtünme açısı, °)	13,2
$k_h$ (t/m <sup>3</sup> )	1394

**Tablo 15.2:** Hesaplarda kullanılan kazık temellerin özellikleri

Kazık Özellikleri			
d (m)	0,60 (K1)	0,80 (K2)	1,00 (K3)
Malzeme Modeli	Elastik	Elastik	Elastik
L (=L <sub>b</sub> ) (m)	15	15	15
EA (kN/m)	1,08x10 <sup>7</sup>	1,92x10 <sup>7</sup>	6,48x10 <sup>8</sup>
EI (kN/m <sup>2</sup> /m)	3,24x10 <sup>5</sup>	1,02x10 <sup>6</sup>	2,50x10 <sup>6</sup>
w <sub>ort</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	5,04	6,72	8,4
v	0,2	0,2	0,2
A (m <sup>2</sup> )	0,2827	0,5027	0,7854

## 15.2 Tekil Kazıkların Taşıma Kapasitesi Hesapları

### 15.2.1. K1 (Ø 0,60m) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı

#### 15.2.1.1. Uç taşıma kapasitesi

##### a) Meyerhof yöntemi

$$L_b/D = 15/0,6 = 25 \quad \emptyset=22^\circ \Rightarrow N_q^* = 17, \quad N_c^* = 37$$

$$q' = (\gamma_d) \cdot 2 + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot 13 = (14)(2) + (17 - 9,81)(13) = 121,47 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*] = (0,283) [(2)(37) + (121,47)(17)] = \underline{605,334 \text{ kN}}$$

$$q_1 = 50 \cdot N_q^* \cdot \tan \emptyset = (50)(17)(\tan 22^\circ) = 343,422 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p \cdot q_1 = (0,283)(343,422) = \underline{97,189 \text{ kN}}$$

##### b) Coyle & Castello yöntemi

$$L/D = 25 \quad \emptyset=22^\circ \Rightarrow N_q^* \approx 19$$

$$Q_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* = (0,283)(121,47)(19) = \underline{653,144 \text{ kN}}$$

### c) Vesic yöntemi

$$\sigma_0' = (1+2K_0) q'/3 = 91,134 \text{ kN/m}^3 \Rightarrow N_{\sigma}^* = 15,50, N_c^* = 35,89$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + \sigma_0' \cdot N_{\sigma}^*]$$

$$= (0,283)[(2)(35,89)+(91,134)(15,50)] = \underline{420,073 \text{ kN}}$$

### 15.2.1.2. Sürtünme direnci

0 ~ 15D  $\Rightarrow$  0 ~ 9m arası:

$$\sigma_v' = (14)(2)+(17-9,81)(7) = 78,33 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = P \cdot L' \cdot f_{av}$$

$$= (0,6\pi)(9) [(0,625)(78,33)(\tan 13,2^\circ)/2] = 97,399 \text{ kN}$$

15D ~ L  $\Rightarrow$  9 ~ 15m arası:

$$Q_s = P \cdot L' \cdot f_{av}$$

$$= (0,6\pi)(6) [(0,625)(78,33)(\tan 13,2^\circ)] = 129,865 \text{ kN}$$

$$Q_s = 97,399 + 129,865 = \underline{227,264 \text{ kN}}$$

### 15.2.1.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi

$$Q_{\text{all (min)}} = (97,189 + 227,264) / 3 = 108,151 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all (max)}} = (653,144 + 227,264) / 3 = 293,469 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all}} = 100 \sim 300 \text{ kN}$$

### 15.2.2. K2 (Ø 0,80m) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı

#### 15.2.2.1. Uç taşıma kapasitesi

##### a) Meyerhof yöntemi

$$L_b/D = 15/0,8 = 18,75 \quad \emptyset=22^\circ \Rightarrow N_q^* = 17, N_c^* = 37$$

$$q' = (\gamma_d) \cdot 2 + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot 13 = (14)(2) + (17 - 9,81)(13) = 121,47 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*] = (0,503) [(2)(37) + (121,47)(17)] = \underline{1075,912 \text{ kN}}$$



$$q_1 = 50 \cdot N_q^* \cdot \tan \emptyset = (50)(17)(\tan 22^\circ) = 343,422 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p \cdot q_1 = (0,503)(343,422) = \underline{172,741 \text{ kN}}$$

### b) Coyle & Castello yöntemi

$$L/D = 18,75 \quad \emptyset = 22^\circ \Rightarrow N_q^* \approx 20$$

$$Q_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* = (0,503)(121,47)(20) = \underline{1221,988 \text{ kN}}$$

### c) Vesic yöntemi

$$\sigma_0' = (1+2K_0) q'/3 = 91,134 \text{ kN/m}^3 \Rightarrow N_{\sigma}^* = 15,50, \quad N_c^* = 35,89$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + \sigma_0' \cdot N_{\sigma}^*]$$

$$= (0,503)[(2)(35,89) + (91,134)(15,50)] = \underline{746,632 \text{ kN}}$$

### 15.2.2.2. Sürtünme direnci

0 ~ 15D  $\Rightarrow$  0 ~ 12m arası:

$$\sigma_v' = (14)(2) + (17-9,81)(10) = 99,9 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = P \cdot L' \cdot f_{av}$$

$$= (0,8\pi)(12) [(0,625)(99,9)(\tan 13,2^\circ)/2] = 220,835 \text{ kN}$$

15D ~ L  $\Rightarrow$  12 ~ 15m arası:

$$Q_s = P \cdot L' \cdot f_{av}$$

$$= (0,8\pi)(3) [(0,625)(99,9)(\tan 13,2^\circ)] = 110,418 \text{ kN}$$

$$Q_s = 220,835 + 110,418 = \underline{331,253 \text{ kN}}$$

### 15.2.2.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi

$$Q_{all \text{ (min)}} = (172,741 + 331,253) / 3 = 167,998 \text{ kN}$$

$$Q_{all \text{ (max)}} = (1221,988 + 331,253) / 3 = 517,747 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = 150 \sim 500 \text{ kN}$$

### 15.2.3. K3 (Ø 1,00m) kazığı için taşıma kapasitesi hesabı

#### 15.2.3.1. Uç taşıma kapasitesi

##### a) Meyerhof yöntemi

$$L_b/D = 15/1,00 = 15 \quad \emptyset=22^\circ \Rightarrow N_q^* = 17, N_c^* = 37$$

$$q' = (\gamma_d) \cdot 2 + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot 13 = (14)(2) + (17 - 9,81)(13) = 121,47 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*] = (0,785) [(2)(37) + (121,47)(17)] = \underline{1679,107 \text{ kN}}$$

$$q_1 = 50 \cdot N_q^* \cdot \tan \emptyset = (50)(17)(\tan 22^\circ) = 343,422 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = A_p \cdot q_1 = (0,785)(343,422) = \underline{269,586 \text{ kN}}$$

##### b) Coyle & Castello yöntemi

$$L/D = 15 \quad \emptyset=22^\circ \Rightarrow N_q^* \approx 19$$

$$Q_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* = (0,785)(121,47)(19) = \underline{1811,725 \text{ kN}}$$

##### c) Vesic yöntemi

$$\sigma_0' = (1 + 2K_0) q'/3 = 91,134 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow N_\sigma^* = 15,50, N_c^* = 35,89$$

$$Q_p = A_p [c \cdot N_c^* + \sigma_0' \cdot N_\sigma^*]$$

$$= (0,785)[(2)(35,89) + (91,134)(15,50)] = \underline{1165,220 \text{ kN}}$$

#### 15.2.3.2. Sürtünme direnci

$$0 \sim 15D \Rightarrow 0 \sim 15\text{m arası:}$$

$$\sigma_v' = (14)(2) + (17 - 9,81)(13) = 121,47 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = P \cdot L' \cdot f_{av}$$

$$= (1,00 \cdot \pi)(15) [(0,625)(121,47)(\tan 13,2^\circ)/2] = 419,588 \text{ kN}$$

$$Q_s = \underline{419,588 \text{ kN}}$$

### 15.2.3.3. İzin verilebilir kazık kapasitesi

$$Q_{\text{all (min)}} = (269,586 + 419,588) / 3 = 229,715 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all (max)}} = (1811,725 + 419,588) / 3 = 743,761 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all}} = 200 \sim 700 \text{ kN} \Rightarrow 500 \text{ kN}$$

## 15.3 Tekil Kazıkların Yerleşim Düzenlerinin ve Buna Bağlı Olarak Her Bir Kazığa Etkiyecek Statik ve Dinamik Yüklerin Belirlenmesi

Bu bölümde, yükler sabit kalmak koşuluyla kazık çapı değişimlerinin ve çap sabit kalmak koşuluyla kazık adedi değişimlerinin deformasyonlar üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için üç farklı çapta kazık, 10mx10mx0,80m boyutlarında seçilen radye plağa farklı düzenlerde yerleştirilmiştir. Yerleşimler belirlenirken, hesap kolaylığı olması için sistemler simetrik seçilmiştir.

10mx10m boyutlarındaki radye plağa, kazık merkezleri arasındaki minimum mesafeler dikkate alınarak 1,00m çapındaki K3 kazığından maksimum 4x4 (yatayda 4, düşeyde 4) toplam 16 adet kazık yerleştirilebilmektedir. Bu nedenle kazık adedi ve yerleşimi sabit kalmak koşuluyla kazık çapının deprem durumunda deformasyonlara etkisi araştırılmak üzere her 3 kazık tipi de (K1, K2, K3) 3 farklı deprem yükü altında (M5, M6, M7) 4x4 düzende denenmiştir.

Çap sabit kalmak koşuluyla kazık yerleşimlerinin deformasyonlara etkisi araştırılmak üzere ise 0,60m çapındaki K1 kazığı 6x6 (toplam 36), 5x5 (toplam 25) ve 4x4 (toplam 16) düzenlerinde, K3 kazığı da 4x4 (toplam 16) ve 3x3 (toplam 9) düzenlerinde söz konusu deprem yükleri altında Plaxis programında çözülmüştür. K2 kazığının tek yerleşimde (4x4) denenmesinin sebebi kazık adedi arttığı takdirde (5x5) kazık merkezleri arası minimum mesafe koşulunun sağlanamaması, kazık adedi azaldığında (3x3) taşıma kapasitesinin aşılmasıdır.

Kazıklara gelebilecek maksimum düşey statik kuvvet, ortalama bir değer olması açısından, K2 kazığının taşıma kapasitesi hesaba esas alınarak belirlenmiştir. (bkz. 15.2.2.3) K2 kazığının izin verilebilir taşıma kapasitesi 37,5 ton olarak alındığında, radyeye gelecek toplam yük 600 ton olmaktadır. Bütün

kazıklar bu toplam yük altında denenmiş, tekil kazıklarda bu yük etkisiyle meydana gelecek deformasyonlar belirlenmiştir. Daha sonra aynı statik yükler altında kazıklar Plaxis programında deprem etkisi de göz önüne alınarak çözülmüş ve bu durumdaki deformasyonlar bulunmuştur. Hesaplar yapılırken kolaylık olması açısından söz konusu sistemdeki her kazığa eşit yük geldiği varsayılmıştır.

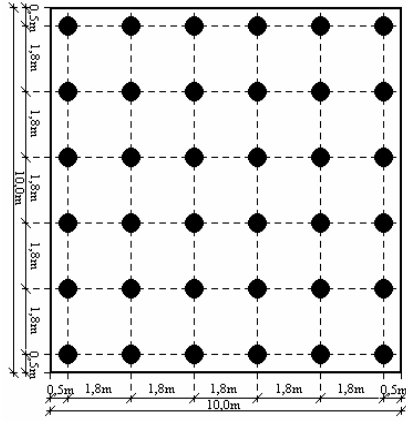
Kazık grubuna etkiyen tekil ve toplam düşey yükler, dinamik kuvvetler (deprem yükleri) ve kazık yerleşimleri sırasıyla Tablo 15.3, Tablo 15.4 ve Şekil 15.1 ile verilmiştir.

**Tablo 15.3:** Kazık-radye sistemlerinin özellikleri

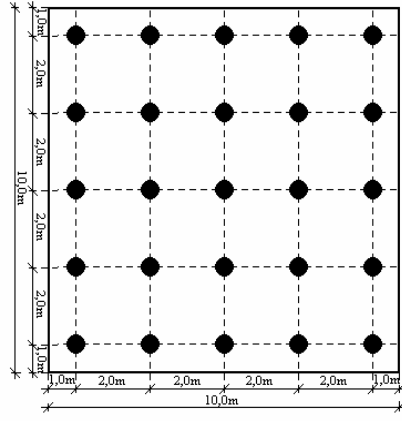
Kazık	K1 (Ø 0,60)			K2 (Ø 0,80)	K3 (Ø 1,00)	
	Radye boyutları (mxmxm)	10x10x0,80				
Radyeye gelen toplam düşey statik yük (t)	600					
Kazık çapı (m)	0,60			0,80	1,00	
Sistem sembolü	6x6	5x5	4x4	4x4	4x4	3x3
Bir aks üzerindeki kazık adeti	6	5	4	4	4	3
Sistemdeki toplam kazık adeti	36	25	16	16	16	9
Tek kazığa gelen düşey statik yük (t)	16,7	24,0	37,5	37,5	37,5	67,0

**Tablo 15.4:** Kazık-radye sistemlerine etkitilen dinamik kuvvetler

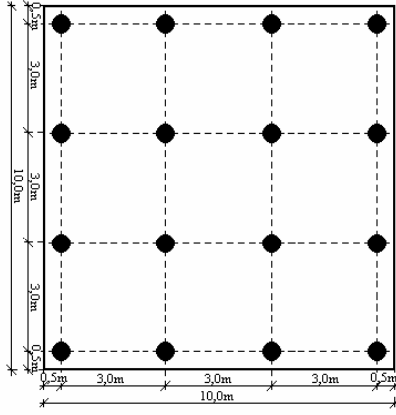
Dinamik kuvvetin sembolü	M5	M6	M7
Magnitüd	5,00	6,00	7,10
Episantr mesafesi (km)	66,20	67,60	66,81
Pik değer (cm)	-0,05	-0,34	-8,62
Meydana geldiği tarih	03/09/00	15/10/06	16/10/99
Meydana geldiği saat	08:36:00	17:14:00	09:46:00
Meydana geldiği yer	Hector Mine	Mahukona/Hawaii	Yountville



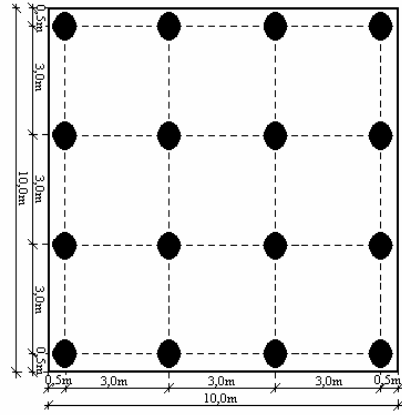
(a)



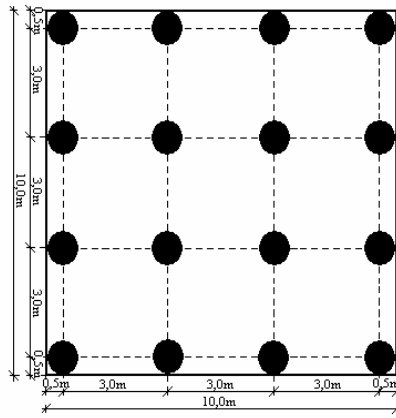
(b)



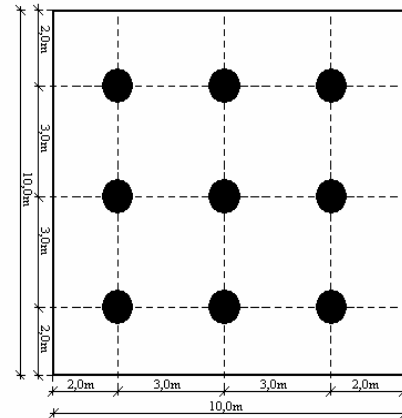
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 15.1:** Sistem sembolleri ve temsil ettikleri sistemler: (a) K1 6x6 sistemi; (b) K1 5x5 sistemi; (c) K1 4x4 sistemi; (d) K2 4x4 sistemi; (e) K3 4x4 sistemi; (f) K3 3x3 sistemi

\*NOT:  $D_{K1}=0,60m$ ,  $D_{K2}=0,80m$ ,  $D_{K3}=1,00m$

## 15.4. Tekil Kazıkların ve Kazık-Radye Sistemlerinin Belirlenen Düşey Statik Kazık Yükleri Altında Düşey Deformasyon (Oturma) Hesapları

### 15.4.1. K1 kazığı için düşey deformasyon hesabı

#### 15.4.1.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması)

##### a) Q=16,7t için oturma hesabı

###### s<sub>1</sub> oturması

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 9,7 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (9,7 + 0,6 \times 7) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,9306 \times 10^{-4} \text{ m}$$

###### s<sub>2</sub> oturması

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 9,7 \text{ t}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (9,7 \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,0145 \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (7) / (1,885 \times 15) (0,6 / 1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 4,456 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00019306 + 0,0145 + 0,0004456 = 0,0151 \text{ m} = 1,51 \text{ cm}$$

### **b) Q=24t için oturma hesabı**

#### **s<sub>1</sub> oturması**

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 17,0 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (17 + 0,6 \times 7) (15) / (1,08 \times 10^6) = 2,945 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s<sub>2</sub> oturması**

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 17,0 \text{ t}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (17 \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,0254 \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D / E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (7) / (1,885 \times 15) (0,6 / 1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 4,456 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0002945 + 0,0254 + 0,0004456 = 0,0257 \text{ m} = 2,57 \text{ cm}$$



### c) Q=37,5t için oturma hesabı

#### s<sub>1</sub> oturması

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 30,5 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (30,5 + 0,6 \times 7) (15) / (1,08 \times 10^6) = 4,820 \times 10^{-4} \text{ m}$$

#### s<sub>2</sub> oturması

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 30,5 \text{ t}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (30,5 \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,0455 \text{ m}$$

#### s<sub>3</sub> oturması

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D / E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 7,0 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (7)/(1,885 \times 15) (0,6/1200) (1-0,2^2) (3,75) = 4,456 \times 10^{-4} \text{ m}$$

#### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0004820 + 0,0455 + 0,0004456 = 0,0464 \text{ m} = 4,64 \text{ cm}$$

#### **15.4.1.2. K1 kazığının grup içerisindeki oturması**

Bu hesaplamalar yapılırken, basit ve güvenilir olması sebebiyle Skempton yöntemi kullanılmıştır.

#### **a) Q=16,7t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = 0,0151 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,0151 \times ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,0208 \text{ m}$$

#### **b) Q=24t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = 0,0257 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,0257 \times ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,0354 \text{ m}$$

#### **a) Q=37,5t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = 0,0464 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,0464 \times ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,0640 \text{ m}$$

## 15.4.2. K2 kazığı için düşey deformasyon hesabı

### 15.4.2.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması)

#### a) Q=37,5t için oturma hesabı

##### s<sub>1</sub> oturması

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 27,5 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 10,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,92 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (27,5 + 0,6 \times 10) (15) / 1,92 \times 10^6 = 2,617 \times 10^{-4} \text{ m}$$

##### s<sub>2</sub> oturması

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 27,5 \text{ t}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,503 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (27,5 \times 0,8) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,503 \times 1200) = 0,03079 \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 10,0 \text{ t}$$

$$p = 2,513 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,516$$

$$s_3 = (10) / (2,513 \times 15) (0,8 / 1200) (1 - 0,2^2) (3,516) = 5,970 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0002617 + 0,03079 + 0,0005970 = 0,0317 \text{ m} = 3,17 \text{ cm}$$

### **15.4.2.2. K2 kazığının grup içerisindeki oturması**

Bu hesaplamalar yapılırken, basit ve güvenilir olması sebebiyle Skempton yöntemi kullanılmıştır.

#### **a) Q=37,5t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$s = 0,0317 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,0317 \times ((4 \times 0,8 + 3) / (0,8 + 4))^2 = 0,0528 \text{ m}$$

### 15.4.3. K3 kazığı için düşey deformasyon hesabı

#### 15.4.3.1. Tekil kazığın düşey deformasyonu (oturması)

##### a) Q=37,5t için oturma hesabı

###### s<sub>1</sub> oturması

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 23,5 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 14,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (23,5 + 0,6 \times 14) (15) / 6,48 \times 10^7 = 7,384 \times 10^{-6} \text{ m}$$

###### s<sub>2</sub> oturması

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 23,5 \text{ t}$$

$$D = 1,00 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (23,5 \times 1,00) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,0211 \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 14,0 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,00 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (14) / (3,142 \times 15) (1,00 / 1200) (1 - 0,2^2) (3,356) = 7,975 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,000007384 + 0,0211 + 0,0007975 = 0,0292 \text{ m} = 2,92 \text{ cm}$$

### **b) Q=67t için oturma hesabı**

#### **s<sub>1</sub> oturması**

Şaft boyunca kazığın elastik kısalması nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 53,0 \text{ t}$$

$$Q_{us} = 14,0 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (53 + 0,6 \times 14) (15) / 6,48 \times 10^7 = 1,421 \times 10^{-5} \text{ m}$$

### **s<sub>2</sub> oturması**

Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s)$$

$$Q_{up} = 53,0 \text{ t}$$

$$D = 1,00 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (53 \times 1,00) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,0476 \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

Kazık boyunca çevreye aktarılan yük nedeniyle meydana gelen oturma:

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D / E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 14,0 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,00 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (14) / (3,142 \times 15) (1,00 / 1200) (1 - 0,2^2) (3,356) = 7,975 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0000142 + 0,0476 + 0,0007975 = 0,04841 \text{ m} = 4,84 \text{ cm}$$

### **15.4.3.2. K3 kazığının grup içerisindeki oturması**

Bu hesap yapılırken, kazıkların 10x10m boyutlarındaki radye plakla birleştirildiğini varsayılmıştır. Oturma hesabında Skempton yöntemi kullanılmıştır.

**a) Q=37,5t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = 0,0292 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,0292 \times ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,0573 \text{ m}$$

**b) Q=67t için oturma hesabı**

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = 0,04841 \text{ m}$$

$$s_{g(e)} = 0,04841 \times ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,09492 \text{ m}$$



### 15.5. Belirlenen Düşey Statik Yükler ve Dinamik Etkiler Altında Plaxis Programından Elde Edilen Veriler

Bu bölümde, bölüm 15.3'de belirlenen statik düşey yükler Plaxis programında kazıklara etkililmiş, bu düşey yükler ve sırasıyla M5, M6, M7 depremleri etkisinde kazık grupları çözümlenmiştir. Elde edilen veriler Tablo 15.5'de verilmiştir.

**Tablo 15.5:** Plaxis programı kullanılarak ve çeşitli yöntemlerle çözüm yapılarak sisteme etkililen yükler ve bu yüklerle bağlı olarak sistemin yaptığı düşey deformasyonlar

KAZIK		K1			K2	K3	
Sistem sembolü		6x6	5x5	4x4	4x4	4x4	3x3
Tekil kazığa etkiyen düşey statik yük (t)		16,70	24,00	37,50	37,50	37,50	67,00
Kazık grubuna etkiyen düşey statik yük (t)		600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
Mevcut statik yük altında tekil kazığın oturması (cm)		1,51	2,57	4,64	2,08	2,92	4,84
Mevcut statik yük altında kazık grubu deformasyonu (cm)		2,08	3,54	6,40	5,28	5,73	9,49
M5 altında kazık grubu deformasyonu (cm)	Düşey	10,60	14,25	14,59	14,59	15,83	28,61
	Yatay	0,22	0,24	0,31	0,31	0,31	0,22
M6 altında kazık grubu deformasyonu (cm)	Düşey	10,72	14,52	14,84	14,84	16,10	29,05
	Yatay	0,22	0,24	0,35	0,31	0,31	0,24
M7 altında kazık grubu deformasyonu (cm)	Düşey	13,80	19,04	18,35	18,41	19,85	35,69
	Yatay	1,79	1,79	1,45	1,45	1,39	1,54

NOT: Tablodan da görüleceği gibi yatay deformasyonlar düşey deformasyonlara oranla çok küçük olduğu için hesaplarda düşey deformasyonlar kullanılmış, yatay deformasyonlar için geri hesap yapılmamıştır.

## 15.6 Dinamik Çözümler Sonucu Elde Edilen Düşey Deformasyonlardan Geri Hesap Yapılması Suretiyle Kazıklara Gelen Eşdeğer Düşey Statik Yüklerin Belirlenmesi

### 15.6.1. K1 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap

M5 depreminde K1 kazığının düşey deformasyonu 3 farklı yerleşim için bulunmuştu. Bu bölümde, K1 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.1.2.)

#### 15.6.1.1. 6x6 kazık grubu için hesap

##### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 6x6'lık K1 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 10,597 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,106 \text{ m} \Rightarrow s = 0,0769 \text{ m}$$

##### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,0769\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,075 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,075 \Rightarrow Q_{up} \approx 50 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 50 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (50 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 8,838 \times 10^{-4} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s toplam oturması

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0008838 + 0,075 + 0,00147 = 0,0774 \text{ m} \approx 0,0769 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 50 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 50 \times 36 = 1800 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 1,80 \text{ m}$$

$$m = n = 6$$

$$E = 0,659$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1800 \times 0,659 = 1186,20$$

### 15.6.1.2. 5x5 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 5x5'lik K1 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4D+3}{D+4} \right)^2 = 14,25 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4 \times 0,6 + 3}{0,6 + 4} \right)^2 = 0,1425 \text{ m} \Rightarrow s = 0,1034 \text{ m}$$

### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,1034\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,102 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,101 \Rightarrow Q_{up} \approx 67 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 67 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (67 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,120 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D/E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) \cdot (0,6 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001120 + 0,101 + 0,00147 = 0,1036 \text{ m} \approx 0,1034 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 67 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 67 \times 25 = 1675 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 2,00 \text{ m}$$

$$m = n = 5$$

$$E = 0,703$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1675 \times 0,703 = 1177,53 \text{ t}$$

### 15.6.1.3. 4x4 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K1 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 14,585 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3) / (0,6 + 4))^2 = 0,146 \text{ m} \Rightarrow s = 0,106 \text{ m}$$

#### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,106\text{m}$  oturmasını yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### $s_2$ oturması

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,103 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,103 \Rightarrow Q_{up} \approx 69 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 69 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (68 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,148 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001148 + 0,103 + 0,00147 = 0,1056 \text{ m} \approx 0,106 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 69 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 69 \times 16 = 1104 \text{ t}$$



Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60\text{m}$$

$$s = 3,00\text{m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,812$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{\text{up(g)}}' = Q_{\text{up(g)}} \cdot E = 1104 \times 0,812 = 1565,78 \text{ t}$$

### 15.6.2. K1 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap

M6 depreminde K1 kazığının düşey deformasyonu 3 farklı yerleşim için bulunmuştu. Bu bölümde, K1 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{\text{us}}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.1.2.)

#### 15.6.2.1. 6x6 kazık grubu için hesap

##### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 6x6'lık K1 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 10,715 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,107 \text{ m} \Rightarrow s = 0,0778 \text{ m}$$

### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,0778$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,0760 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,0760 \Rightarrow Q_{up} \approx 51 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 51 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (51 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 8,977 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D/E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) \cdot (0,6 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0008977 + 0,0760 + 0,00147 = 0,0784 \text{ m} \approx 0,0778 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 51 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 51 \times 36 = 1836 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 1,80 \text{ m}$$

$$m = n = 6$$

$$E = 0,659$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1836 \times 0,659 = 1209,92 \text{ t}$$

### 15.6.2.2. 5x5 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 5x5'lik K1 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 14,52 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3) / (0,6 + 4))^2 = 0,145 \text{ m} \Rightarrow s = 0,1052 \text{ m}$$

#### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,1052\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### $s_2$ oturması

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,103 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,103 \Rightarrow Q_{up} \approx 69 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 69 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (69 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,148 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00148 + 0,103 + 0,00147 = 0,106 \text{ m} \approx 0,1052 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 69 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 69 \times 25 = 1725 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60\text{m}$$

$$s = 2,00\text{m}$$

$$m = n = 5$$

$$E = 0,703$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{\text{up(g)}}' = Q_{\text{up(g)}} \cdot E = 1725 \times 0,703 = 1212,68 \text{ t}$$

### 15.6.2.3. 4x4 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K1 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4D+3}{D+4} \right)^2 = 14,843 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{(4 \times 0,6 + 3)}{(0,6 + 4)} \right)^2 = 0,148 \text{ m} \Rightarrow s = 0,107 \text{ m}$$

#### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına s=0,107m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın s<sub>2</sub> olduğu görülüyor. Bu nedenle s<sub>2</sub> oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış, s<sub>1</sub> ve s<sub>3</sub> oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,104 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,104 \Rightarrow Q_{up} \approx 70 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 70 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (70 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,162 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001162 + 0,104 + 0,00147 = 0,1066 \text{ m} = 0,107 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 70 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 70 \times 16 = 1120 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,812$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1120 \times 0,812 = 909,44 \text{ t}$$

### **15.6.3. K1 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap**

M7 depreminde K1 kazığının düşey deformasyonu 3 farklı yerleşim için bulunmuştu. Bu bölümde, K1 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.1.2.)



### 15.6.3.1. 6x6 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 6x6'lık K1 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 13,797 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3) / (0,6 + 4))^2 = 0,138 \text{ m} \Rightarrow s = 0,100 \text{ m}$$

#### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,100\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### $s_2$ oturması

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,098 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,098 \Rightarrow Q_{up} \approx 66 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 66 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (66 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,106 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001106 + 0,098 + 0,00147 = 0,101 \text{ m} \approx 0,100 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 66 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 66 \times 36 = 2376 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60\text{m}$$

$$s = 1,80\text{m}$$

$$m = n = 6$$

$$E = 0,659$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{\text{up(g)}}' = Q_{\text{up(g)}} \cdot E = 2376 \times 0,659 = 1565,78 \text{ t}$$

### 15.6.3.2. 5x5 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 5x5'lik K1 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 19,038 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,190 \text{ m} \Rightarrow s = 0,138 \text{ m}$$

#### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına s=0,138m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın s<sub>2</sub> olduğu görülüyor. Bu nedenle s<sub>2</sub> oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış, s<sub>1</sub> ve s<sub>3</sub> oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,134 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,134 \Rightarrow Q_{up} \approx 90 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 90 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (90 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,439 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) (0,6/1200) (1 - 0,2^2) (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001439 + 0,134 + 0,00147 = 0,137 \text{ m} \approx 0,138 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 90 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 90 \times 25 = 2250 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 2,00 \text{ m}$$

$$m = n = 5$$

$$E = 0,703$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 2250 \times 0,703 = 1581,75 \text{ t}$$

### 15.6.3.3. 4x4 kazık grubu için hesap

#### a) K1 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K1 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 18,352 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,6 + 3)/(0,6 + 4))^2 = 0,184 \text{ m} \Rightarrow s = 0,134 \text{ m}$$

### b) K1 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K1 tekil kazığına  $s=0,134\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,131 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,283 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,6) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,283 \times 1200) = 0,131 \Rightarrow Q_{up} \approx 88 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 88 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 227,264 \text{ kN} = 22,726 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,08 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (88 + 0,6 \times 22,726) (15) / (1,08 \times 10^6) = 1,412 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D / E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 22,726 \text{ t}$$

$$p = 1,885 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,75$$

$$s_3 = (22,726) / (1,885 \times 15) \cdot (0,6 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,75) = 1,470 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,001412 + 0,131 + 0,00147 = 0,1338 \text{ m} \approx 0,134 \text{ m}$$

Bu durumda K1 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 88 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 88 \times 16 = 1408 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,60 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,812$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1408 \times 0,812 = 1143,30 \text{ t}$$

#### 15.6.4. K2 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap

M5 depreminde K2 kazığının düşey deformasyon tek yerleşim için 14,59 cm bulunmuştur. Bu bölümde, K2 kazığına bu düşey deformasyonu yaptıracak eşdeğer statik düşey yük hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.2.2.)

##### 15.6.4.1. 4x4 kazık grubu için hesap

###### a) K2 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K2 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 14,59 \text{ cm}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,8 + 3)/(0,8 + 4))^2 = 0,146 \text{ m} \Rightarrow s = 0,088 \text{ m}$$

###### b) K2 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K2 tekil kazığına  $s=0,088\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.



**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,085 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,503 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,8) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,503 \times 1200) = 0,085 \Rightarrow Q_{up} \approx 76 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 76 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 331,253 \text{ kN} = 33,125 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,92 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (76 + 0,6 \times 33,125) (15) / (1,92 \times 10^6) = 0,749 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 33,125 \text{ t}$$

$$p = 2,513 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,516$$

$$s_3 = (33,125) / (2,513 \times 15) (0,8/1200) (1 - 0,2^2) (3,516) = 1,977 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,000749 + 0,085 + 0,00198 = 0,0877 \text{ m} \approx 0,088 \text{ m}$$

Bu durumda K2 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 76 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 76 \times 16 = 1216 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,80 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,751$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1216 \times 0,751 = 913,22 \text{ t}$$

### **15.6.5. K2 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap**

M6 depreminde K2 kazığının düşey deformasyonu tek yerleşim için 14,843 cm bulunmuştu. Bu bölümde, K2 kazığına bu düşey deformasyonu yaptıracak eşdeğer statik düşey yük hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.2.2.)

### 15.6.5.1. 4x4 kazık grubu için hesap

#### a) K2 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K2 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 14,843 \text{ cm}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,8 + 3) / (0,8 + 4))^2 = 0,148 \text{ m} \Rightarrow s = 0,089 \text{ m}$$

#### b) K2 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K2 tekil kazığına  $s=0,089\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### $s_2$ oturması

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,086 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,503 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,8) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,503 \times 1200) = 0,086 \Rightarrow Q_{up} \approx 77 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 77 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 331,253 \text{ kN} = 33,125 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,92 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (77 + 0,6 \times 33,125) (15) / (1,92 \times 10^6) = 0,757 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 33,125 \text{ t}$$

$$p = 2,513 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,516$$

$$s_3 = (33,125) / (2,513 \times 15) (0,8/1200) (1 - 0,2^2) (3,516) = 1,977 \times 10^{-3} \text{ m}$$

**s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,000757 + 0,086 + 0,00198 = 0,0887 \text{ m} \approx 0,089 \text{ m}$$

Bu durumda K2 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 77 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 77 \times 16 = 1232 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,80\text{m}$$

$$s = 3,00\text{m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,751$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{\text{up(g)}}' = Q_{\text{up(g)}} \cdot E = 1232 \times 0,751 = 925,23 \text{ t}$$

### 15.6.6. K2 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap

M7 depreminde K2 kazığının düşey deformasyonu tek yerleşim için 18,407 cm bulunmuştu. Bu bölümde, K2 kazığına bu düşey deformasyonu yaptıracak eşdeğer statik düşey yük hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{\text{us}}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.2.2.)

#### 15.6.6.1. 4x4 kazık grubu için hesap

##### a) K2 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K2 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 18,407 \text{ cm}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 0,8 + 3)/(0,8 + 4))^2 = 0,184 \text{ m} \Rightarrow s = 0,110 \text{ m}$$

## b) K2 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K2 tekil kazığına  $s=0,110$  m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,105 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,503 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 0,8) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,503 \times 1200) = 0,105 \Rightarrow Q_{up} \approx 94 \text{ t}$$

### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 94 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 331,253 \text{ kN} = 33,125 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 1,90 \times 10^6 \text{ t}$$

$$s_1 = (94 + 0,6 \times 33,125) (15) / (1,92 \times 10^6) = 0,890 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s<sub>3</sub> oturması

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D/E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 33,125 \text{ t}$$

$$p = 2,513 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,516$$

$$s_3 = (33,125) / (2,513 \times 15) \cdot (0,8/1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,516) = 1,977 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s toplam oturması

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,0000890 + 0,105 + 0,00198 = 0,108 \text{ m} \approx 0,110 \text{ m}$$

Bu durumda K2 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 94 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 94 \times 16 = 1504 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 0,80 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,751$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1504 \times 0,751 = 1129,50 \text{ t}$$

### 15.6.7. K3 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi için geri hesap

M5 depreminde K3 kazığının düşey deformasyonu 2 farklı yerleşim için bulunmuştur. Bu bölümde, K3 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.3.2.)

#### 15.6.7.1. 4x4 kazık grubu için hesap

##### a) K3 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K3 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 15,83 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,158 \text{ m} \Rightarrow s = 0,0806 \text{ m}$$

##### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,0806$  m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.



**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,078 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,078 \Rightarrow Q_{up} \approx 87 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 87 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (87 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 2,597 \times 10^{-5} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) (1,0/1200) (1 - 0,2^2) (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s toplam oturması

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,000026 + 0,078 + 0,00239 = 0,0804 \text{ m} \approx 0,0806 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 87 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 87 \times 16 = 1392 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,693$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1392 \times 0,693 = 964,66 \text{ t}$$

### 15.6.7.2. 3x3 kazık grubu için hesap

#### a) K3 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 3x3'lük K3 kazık grubunun M5 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4D+3}{D+4} \right)^2 = 28,607 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4 \times 1,0 + 3}{1,0 + 4} \right)^2 = 0,286 \text{ m} \Rightarrow s = 0,146 \text{ m}$$

### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,146$  m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,144 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,144 \Rightarrow Q_{up} \approx 161 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 161 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (161 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 4,310 \times 10^{-5} \text{ m}$$

### s<sub>3</sub> oturması

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D/E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) \cdot (1,0 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s toplam oturması

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00004310 + 0,144 + 0,00239 = 0,1464 \text{ m} \approx 0,146 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M5 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 161 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 161 \times 9 = 1449 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,727$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1449 \times 0,727 = 1053,42 \text{ t}$$

### 15.6.8. K3 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi için geri hesap

M6 depreminde K3 kazığının düşey deformasyonu iki farklı yerleşim için bulunmuştur. Bu bölümde, K3 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.3.2.)

#### 15.6.8.1. 4x4 kazık grubu için hesap

##### a) K3 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K3 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 16,099 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,161 \text{ m} \Rightarrow s = 0,0821 \text{ m}$$

##### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,0821$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,0821 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,080 \Rightarrow Q_{up} \approx 89 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 89 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (89 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 2,643 \times 10^{-5} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) (1,0/1200) (1 - 0,2^2) (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00002643 + 0,080 + 0,00239 = 0,0824 \text{ m} \approx 0,0821 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 89 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 89 \times 16 = 1424 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,693$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1424 \times 0,693 = 986,83 \text{ t}$$

### **15.6.8.2. 3x3 kazık grubu için hesap**

#### **a) K3 kazığının tekil oturması**

Bu bölümde Plaxis programından 3x3'lük K3 kazık grubunun M6 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4D+3}{D+4} \right)^2 = 29,048 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s \left( \frac{4 \times 1,0 + 3}{1,0 + 4} \right)^2 = 0,291 \text{ m} \Rightarrow s = 0,149 \text{ m}$$

### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,149\text{m}$  oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,146 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,146 \Rightarrow Q_{up} \approx 163 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 163 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (163 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 4,356 \times 10^{-5} \text{ m}$$



### **s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D/E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) \cdot (1,0 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,000004356 + 0,146 + 0,00239 = 0,1484 \text{ m} \approx 0,149 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M6 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 163 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 163 \times 9 = 1467 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 3$$

$$E = 0,727$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1467 \times 0,727 = 1066,51 \text{ t}$$

### 15.6.9. K3 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi için geri hesap

M7 depreminde K3 kazığının düşey deformasyonu iki farklı yerleşim için bulunmuştur. Bu bölümde, K3 kazığına bu düşey deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik düşey yükler hesaplanmıştır. Bu hesaplar yapılırken  $Q_{us}$  sürtünme kuvvetinin, taşıma kapasitesi hesabında bulunan  $Q_s$  sürtünme direncine eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. (bkz. 15.2.3.2.)

#### 15.6.9.1. 4x4 kazık grubu için hesap

##### a) K3 kazığının tekil oturması

Bu bölümde 4x4'lük K3 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 19,852 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,199 \text{ m} \Rightarrow s = 0,102 \text{ m}$$

##### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,102$  m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturmanın  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

**s<sub>2</sub> oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,100 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,100 \Rightarrow Q_{up} \approx 112 \text{ t}$$

**s<sub>1</sub> oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 112 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (112 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 3,175 \times 10^{-5} \text{ m}$$

**s<sub>3</sub> oturması**

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) (D/E_s) (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) (1,0/1200) (1 - 0,2^2) (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### **s toplam oturması**

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00003175 + 0,100 + 0,00239 = 0,1024 \text{ m} \approx 0,102 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 112 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 112 \times 16 = 1792 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 4$$

$$E = 0,751$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1792 \times 0,751 = 1345,79 \text{ t}$$

### **15.6.9.2. 3x3 kazık grubu için hesap**

#### **a) K3 kazığının tekil oturması**

Bu bölümde Plaxis programından 3x3'lük K3 kazık grubunun M7 dinamik yüklemesi altında yaptığı grup oturmasından geri hesap yöntemiyle tekil kazığın oturması belirlenmiştir.

$$s_{g(e)} = s (4D+3/D+4)^2 = 35,69 \text{ cm}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$s = ?$$

$$s_{g(e)} = s ((4 \times 1,0 + 3)/(1,0 + 4))^2 = 0,357 \text{ m} \Rightarrow s = 0,182 \text{ m}$$

### b) K3 tekil kazığına etkiyen eşdeğer statik yük

Bu bölümde K3 tekil kazığına  $s=0,182$  m oturma yaptıracak eşdeğer statik yük belirlenmiştir. Oturma hesaplarında en büyük oturma  $s_2$  olduğu görülüyor. Bu nedenle  $s_2$  oturmasından başlanarak geri hesap yapılmış,  $s_1$  ve  $s_3$  oturmaları da sonraki adımlarda kontrol edilmiştir.

#### **$s_2$ oturması**

$$s_2 = (Q_{up} \cdot D) (1 - \mu_s^2) I_{wp} / (A_p \cdot E_s) = 0,179 \text{ m}$$

$$Q_{up} = ?$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{wp} = \alpha_r = 0,88$$

$$A_p = 0,785 \text{ m}^2$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$s_2 = (Q_{up} \times 1,0) (1 - 0,2^2) (0,88) / (0,785 \times 1200) = 0,179 \Rightarrow Q_{up} \approx 200 \text{ t}$$

#### **$s_1$ oturması**

$$s_1 = (Q_{up} + \xi Q_{us}) (L) / (A_p \cdot E_p)$$

$$Q_{up} = 200 \text{ t}$$

$$Q_{us} = Q_s = 419,588 \text{ kN} = 41,959 \text{ t}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\xi = 0,6$$

$$EA = 6,48 \times 10^7 \text{ t}$$

$$s_1 = (200 + 0,6 \times 41,959) (15) / (6,48 \times 10^7) = 5,212 \times 10^{-5} \text{ m}$$

### s<sub>3</sub> oturması

$$s_3 = (Q_{us}) / (p \cdot L) \cdot (D / E_s) \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot I_{ws}$$

$$Q_{us} = 41,959 \text{ t}$$

$$p = 3,142 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$E_s = 1200 \text{ t/m}^2$$

$$\mu_s = 0,2$$

$$I_{ws} = 3,356$$

$$s_3 = (41,959) / (3,142 \times 15) \cdot (1,0 / 1200) \cdot (1 - 0,2^2) \cdot (3,356) = 2,390 \times 10^{-3} \text{ m}$$

### s toplam oturması

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00005212 + 0,179 + 0,00239 = 0,1814 \text{ m} \approx 0,182 \text{ m}$$

Bu durumda K3 kazığına uygulanan M7 dinamik yüklemesi ile aynı düşey deformasyonu yaptıran eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up} = 200 \text{ t}$$

Kazık-radye sistemine etkiyen toplam eşdeğer statik düşey yük:

$$Q_{up(g)} = 200 \times 9 = 1800 \text{ t}$$

Grup etkinlik faktörü:

$$E = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{s} \right) \frac{m(n-1) + n(m-1)}{90mn}$$

$$d = 1,00 \text{ m}$$

$$s = 3,00 \text{ m}$$

$$m = n = 3$$

$$E = 0,727$$

Kazık-radye sistemine etkiyen azaltılmış eşdeğer statik yük:

$$Q_{up(g)}' = Q_{up(g)} \cdot E = 1800 \times 0,727 = 1308,60 \text{ t}$$

## 15.7. Sonuçlar

Bu bölümde, önceki bölümlerde elde edilen sayısal değerler, tablolar ve grafikler vasıtasıyla özetlenmiş ve yorumlanmıştır.

Dinamik kuvvetlerle aynı düşey deformasyonları yaptıran statik kuvvetler Tablo 15.6 ile verilmiştir. Kazık gruplarına ilave olarak gelen yükler ise Tablo 15.7’de verilmiştir. Tablo 15.8 ise kazık gruplarında deprem nedeniyle oluşan yük artış yüzdelerini vermektedir.

**Tablo 15.6:** Dinamik kuvvetlerle aynı düşey deformasyonları yaptıran eşdeğer düşey statik yükler

Dinamik Yük	Kazık Grubuna Etkiyen Toplam Eşdeğer Düşey Statik Yükler [ton]					
	K1			K2	K3	
	6x6	5x5	4x4	4x4	4x4	3x3
M5	1186,20	1179,63	896,45	913,22	964,66	1053,42
M6	1209,92	1212,68	909,44	925,23	986,83	1066,51
M7	1565,78	1581,75	1143,30	1129,50	1241,86	1308,60

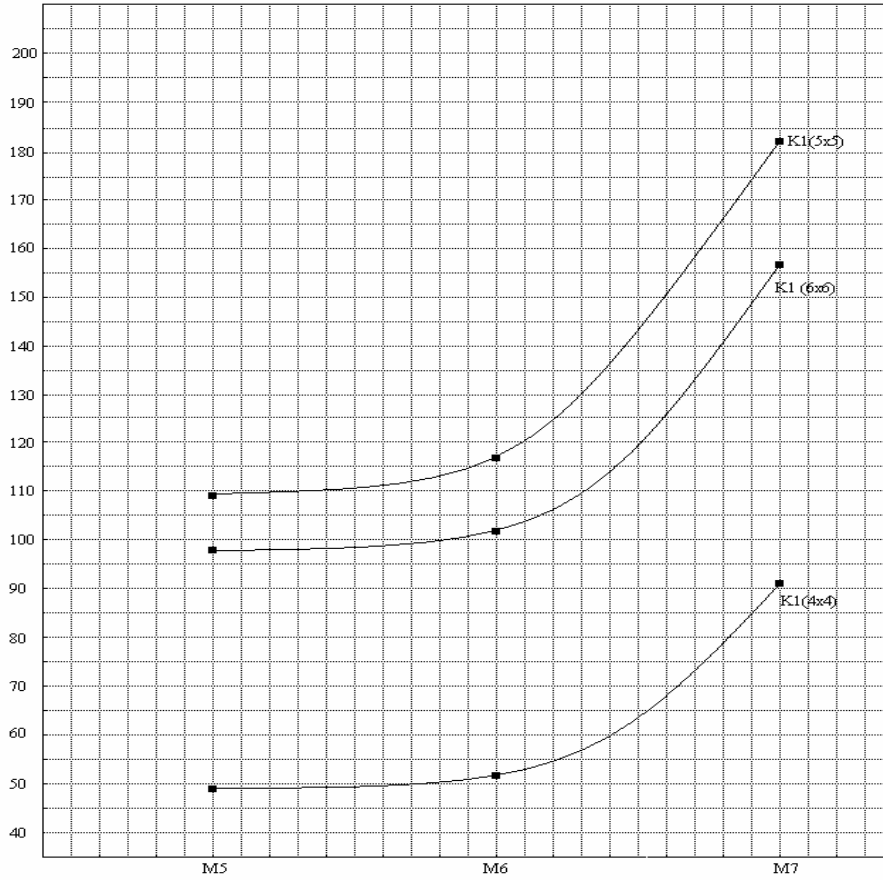
**Tablo 15.7:** Kazık grubuna deprem etkisinden gelen ilave yük

Dinamik Yük	Kazık Grubuna Deprem Nedeniyle Etkiyen İlave Eşdeğer Düşey Statik Yükler [ton]					
	K1			K2	K3	
	6x6	5x5	4x4	4x4	4x4	3x3
M5	586,20	579,63	296,45	313,22	364,66	453,42
M6	609,92	612,68	309,44	325,23	386,83	466,51
M7	965,78	981,75	543,30	329,50	641,86	708,60

**Tablo 15.8:** Kazık grubunda deprem nedeniyle oluşan yük artışı yüzdesi

Dinamik Yük	Deprem Nedeniyle Meydana Gelen Yük Artışı Yüzdesi (%)					
	K1			K2	K3	
	6x6	5x5	4x4	4x4	4x4	3x3
M5	97,7	109,66	49,41	52,20	60,78	75,57
M6	101,65	115,91	51,57	54,21	64,47	77,75
M7	160,96	181,62	90,55	88,25	107,98	118,10

Eşdeğer Statik Yükün  
Mevcut Statik Yüğe Oranlı %'lik Artışı

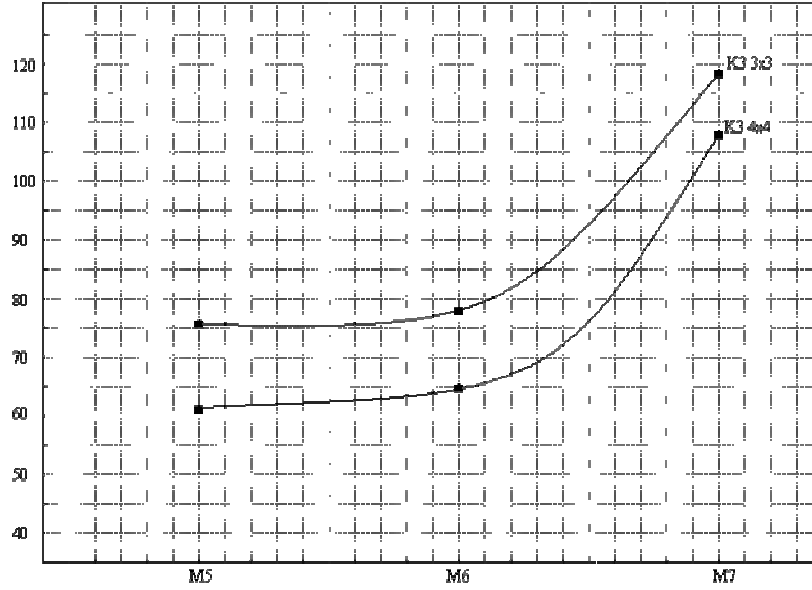


**Şekil 15.2:** Çap sabit kalmak koşuluyla (K1=0,60m) kazık sayısının ve yerleşiminin değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları

\*NOT: K1 kazığı 4x4'lük sistemde yerleştirildiğinde kazık başına  $600/16=37,5$  ton yük gelmekte ve K1 kazığının izin verilebilir taşıma kapasitesi (max 30 ton) aşılmaktadır. Bu nedenle K1 4x4 sistemi çok güvenilir sonuçlar vermeyebilir.

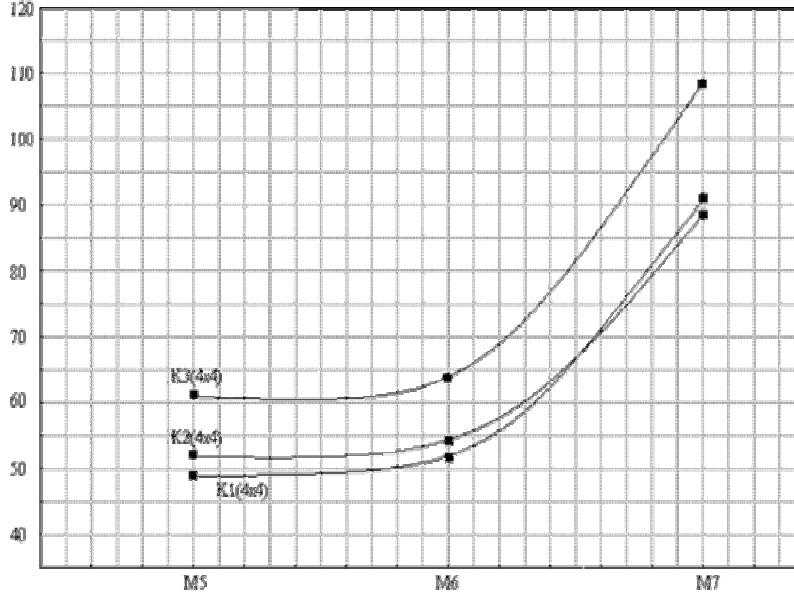


Eşdeğer Statik Yükün  
Mevcut Statik Yüküne Oranla %'lik Artışı



**Şekil 15.3:** Çap sabit kalmak koşuluyla ( $K_3=1,00m$ ) kazık sayısının ve yerleşiminin değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları

Eşdeğer Statik Yükün  
Mevcut Statik Yüküne Oranla %'lik Artışı



**Şekil 15.4:** Kazık sayısı ve yerleşimi sabit (4x4) kalmak koşuluyla kazık çapının değişmesi sonucu eşdeğer statik yüklerin % olarak artışları

\*NOT:  $D_{K1}= 0,60m$ ,  $D_{K2}= 0,80m$ ,  $D_{K3}= 1,00m$

Şekil 15.2 ve 15.3'de kazık çapı sabit kalmak koşuluyla kazık adedi değişimlerinin deprem durumunda kazık-radye sistemlerine etkisi görülmektedir. K1 4x4 sisteminde taşıma kapasitesi aşıldığı için bu sistemden elde edilen sonuçlar gerçeği çok fazla yansıtmayabilirler. Fakat K1 (6x6) ve K1 (5x5), yine aynı şekilde K3 (4x4) ve K3 (3x3) sistemlerine bakıldığında aynı şiddetteki deprem yüklerinin eşit çapta daha çok sayıda kazıktan oluşan gruplarda daha az deformasyon (bkz. Tablo 15.5) ve daha küçük eşdeğer statik yük oluşturduğu görülmektedir. Bu da, sıvılaşan zeminde yapılan sürtünme kazıklarında aynı toplam yük ve dinamik etkiler altında çap değişimi olmaksızın kazık sayısı artışının sistemi daha stabil hale getirdiğini kanıtlıyor.

Kazık adedi ve yerleşimi değişmeksizin kazık çapı artışlarının kazık-radye sistemleri üzerinde etkileri ise Şekil 15.4 ile verilmiştir. K1 (4x4) sisteminin taşıma kapasitesi koşulunu sağlamadığı için yanlış sonuç verebileceği önceden belirtilmişti. Fakat burada K1 (4x4) ve K2 (4x4) sistemlerinin aynı yükler altında aynı deformasyonları yaptıkları ve eşdeğer statik yük artış yüzdelерinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Yani K1 (4x4) sisteminin, taşıma kapasitesi aşıldığı ve eşit yüklerle yüklendikleri takdirde K2 (4x4) sistemi gibi davrandığı söylenebilir. K2 (4x4) ve K3 (4x4) sistemlerine bakılacak olursa, daha stabil olması beklenen K3 (4x4) sisteminin aynı deprem yükleri altında K2 (4x4) sistemine göre daha fazla deformasyon yaptığı (bkz. Tablo 15.5) ve eşdeğer statik yük artış yüzdelерinin K3 (4x4) sisteminde K2 (4x4) sistemine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise kazıkların suya doymuş sıvılaşan zemine yapılımları ve sürtünme kazığı olmaları ile açıklanabilir. Sürtünme kazıkları, bilindiği gibi, sağlam zemin çok derinde olduğu takdirde yapılan ve üzerlerine gelen yükleri (ağırlıklı olarak) çevresel sürtünme yoluyla taşıyan kazıklardır. Buradan da, taşıma kapasitelerindeki en önemli faktörün sürtünme yüzeyleri olduğu açıktır. Kazık çapı artışı sürtünme yüzeyini arttıran bir faktör olmakla beraber, kazık kesit alanını da arttırdığı bilinmektedir. Sürtünme yüzeyi (yani çevre) yarıçapla doğru orantılı artarken, kesit alanı (dolayısıyla ağırlık) yarıçapın karesiyle artmaktadır. Bu da kazığın çevre uzunluğuna bağlı olarak sürtünme yoluyla kazandığı ek taşıma kapasitesinin yanında, alan artışına bağlı olarak ağırlık değişiminden gelen daha büyük oranda ilave yük nedeniyle daha fazla

deformasyon yapmasını ve daha büyük eşdeğer statik yük artışlarına maruz kalmasını açıklamaktadır. Özet olarak, yerleşim şekli ve kazık adedi sabit kalmak koşuluyla kazık çapının artırılması, sıvılaştan zeminlerdeki sürtünme kazıklarında sistem stabilitesini azaltarak sistemde daha büyük deformasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada gerek deformasyonlar gerekse eşdeğer statik kuvvetler açısından dikkat çeken bir özellik de, M5 ve M6 depremleri kıyaslandığında, söz konusu değerler arasında çok fazla fark gözlenmezken, M7 depreminde farkın açılmasıdır. Bu durum deprem magnitüdlerinin Richter ölçeğine göre logaritmik olarak hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Yani depremin magnitüdündeki 1 birimlik artış, (örneğin magnitüdün 5,0'dan 6,0'a çıkması) istasyonlarda kaydedilen sismogramların genliğinin 10 kat, depremde açığa çıkan gerilme enerjisi miktarının ise 30 kat artmasına karşılık gelir. Magnitüdün 5,0'dan 7,0'a çıkması ise (ki bu çalışmada M7 ile belirtilen depremin magnitüdü 7,10dur) sismogram genliğinin  $10 \times 10 = 100$  kat, gerilme enerjisi miktarının ise  $30 \times 30 = 900$  kat artması anlamına gelmektedir. Bu durumu sistemlere uygulanan dinamik kuvvetlerle ilgili detaylı bilgilerin verildiği Tablo 15.4'deki pik değerlerde görmek de mümkündür. M5 depreminde -0,05cm olarak belirlenen pik değer M6 depreminde -0,34cm'e, M7 depreminde ise -8,62cm'e yükselmektedir. Buna bağlı olarak da, M5 ve M6 depremlerinde deformasyonlar, eşdeğer statik kuvvetler ve bu kuvvetlerdeki artışlar çok fazla değişmezken, M7 depreminde fark açılmaktadır.

Bu çalışmadan çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise, sabit statik düşey yükler ve dinamik yükler arasındaki bağlantılarla ilgilidir. Buna göre, sıvılaştan zeminde yapılan 0,60m, 0,80m ve 1,00m çaplarındaki sürtünme kazıklarında 6,0 şiddetindeki depremler de dahil olmak üzere sistem üzerine gelen toplam statik yük %100 artırılarak bu şiddetteki deprem etkisi de göz önüne alınmış olur. 6,0 şiddetinden büyük, 8 şiddetinden az depremler için sistem üzerine gelen toplam statik düşey yük %200 artırılarak bu şiddetteki depremlerin etkisi de göz önüne alınmış olur.

Sonuç olarak Plaxis programı gibi dinamik etkilerin de hesaba katıldığı programların kullanılmadığı durumlarda, üst yapıdan gelecek yüklere göre dizayn

edilen kazık temellerde, üst yapıdan gelen bu yükler yukarıda bahsedilen deprem durumlarına göre belirtilen oranlarda arttırılarak kazık taşıma kapasitesi ve deformasyonlar kolaylıkla elde edilebilir.

## 16. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olan kazık temeller incelenmiş, kazık temellerin çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaları, kullanım amaçları, avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Sonraki bölümlerde düşey ve yatay statik yükler altında tekil ve grup kazıkların davranışlarından bahsedilmiş, ilgili yüklere göre taşıma kapasitesi ve deformasyon hesapları verilmiştir. Aynı zamanda kazıkların çekip çıkarma dayanımları, negatif çevre sürtünmesi ve narin kazıkların burkulması gibi durumlar da incelenmiş, hesap yöntemleri anlatılmıştır. Statik yükler altında kazıkların taşıma kapasitesini ve deformasyon miktarlarını etkileyen faktörlerden biri olan yatak katsayısı da ayrı bir bölümde ele alınmıştır.

Kazık temellerin hesaplanmasında önemli faktörlerden birisi de dinamik etkilerdir. Bu konu da titreşim etkileri ve deprem etkileri olarak iki bölümde açıklanmış, ilgili araştırmalar ve hesaplarda kullanılacak yöntemler anlatılmıştır.

Kazık yapımının son aşamaları olan kazık yükleme deneyleri ve kazıkların zemine yerleştirilmesi konuları da araştırma kısmının son iki bölümü halinde verilmiştir.

Uygulama kısmında ise suya doygun sıvılaştıran zemin içerisindeki, sabit boyutlarda bir radye plağa bağlı farklı çap ve adetteki yüzen kazık grupları, radye plağa gelen toplam statik düşey yük sabit kalacak şekilde statik ve dinamik yükler altında çözümlenmiştir. Elde ve Plaxis programında yapılan çözümler sonucunda kazık gruplarının dinamik yükler etkisinde yaptıkları deformasyonlar ve kazık gruplarına bu deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik yükler belirlenmiş, elde edilen veriler detaylı olarak anlatılıp yorumlanmıştır.

Söz konusu çalışma sonucunda ulaşılan sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Sıvılaştıran zeminde yapılan sürtünme kazıklarında, kazıklar arası minimum mesafe ve taşıma kapasitesi koşulları sağlandığı takdirde, radye plağa gelen toplam yük ve kazık çapı değişmeksizin kazık adedinin artırılması, gerek statik gerek dinamik yüklemelerde düşey deformasyonları azaltırken

stabiliteyi arttırmaktadır. Fakat bu stabilite artışının mali açıdan getireceği yük de hesaba katılarak tasarım yapılmalıdır.

- Sıvılaştan zeminde yapılan sürtünme kazıklarında, kazıklar arası minimum mesafe ve taşıma kapasitesi koşulları sağlandığı takdirde, radye plağa gelen toplam yük ve kazık adedi değişmeksizin kazık çapının artırılması, (beklenenin aksine) statik ve dinamik yüklemelerde sistemin yaptığı deformasyonları arttırarak stabiliteyi azaltmaktadır. Bunun sebebi olarak kazıkların yüzen kazık olarak inşa edilmiş olması gösterilmiş ve bu durum bölüm 15.7’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.
- Deprem magnitüdüleri Richter ölçeğine göre logaritmik olarak hesaplandığı için, deprem magnitüdündeki 1 birimlik artış, sismogram genliğinde 10 kat, gerilme enerjisinde 30 kat artışa tekabül etmektedir. Bu da, deprem magnitüdülerindeki doğrusal artışa karşılık deformasyonların ve eşdeğer ilave yüklerin neden ani artışlar yaptığını açıklamaktadır. (bkz. Bölüm 15.7)
- Sıvılaştan zeminde yapılan 0,60m, 0,80m ve 1,00m çaplarındaki sürtünme kazıklarında, 6,0 şiddetindeki depremler de dahil olmak üzere 6,0 şiddetine kadar olan depremlerin etkileri, sistem üzerine gelen toplam statik yük %100 arttırılarak; şiddeti 6,0 ~ 8,0 arasında değişen depremlerin etkileri ise, sistem üzerine gelen toplam statik düşey yük %200 arttırılarak hesaba katılmış olmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Topçu A., “Betonarme II Ders Notları- Temeller”  
[http://mmf.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular2006\\_2007/Betonarme\\_2\\_8.pdf](http://mmf.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular2006_2007/Betonarme_2_8.pdf)
- [2] Das B.M., “Principles of Foundation Engineering” (Ed: Kingman R.)  
Wadsworth Inc, California, USA, 1984
- [3] Çalışkan Ö. Yüksek Lisans Tezi “Kazıklı Temellerin Analitik Yöntemlerle Statik ve Betonarme Çözümleri” Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ağustos 2003
- [4] Abebe A., Dr. Smith I.G. “Pile Foundation Design: A Student Guide”  
<http://www.sbe.napier.ac.uk/projects/piledesign/guide/index.htm>
- [5] Gunaratne M. “Foundation Engineering Handbook” CRC, London, New York, 2006
- [6] University of Minnesota, Department of Civil Engineering, “Load Testing of Instrumented Pavement Sections”, Minneapolis, 2002
- [7] Brandenburg S. J. “Behavior of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground”, University of California, Davis, 2002
- [8] AASHTO, “Guide for Design of Pavement Structures”, Washington DC, USA, 1993
- [9] ARA, Inc., ERES Consultants Division, “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures” Final Report, Champaign, Illinois, 2004
- [10] Sitharam. T.G., GovindaRaju L., Sridharan A. “Dynamic Properties and Liquefaction Potential of Soils” Current Science, Vol. 87, No. 10, 2004
- [11] Fukushima H., Nishikawa J., Tomisawa K., “Experimental Study on Characteristics of Horizontal Dynamic Subgrade Reaction Using a Single-Pile Model”, Geotechnical Division, Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, 2003
- [12] Fellenius. B. H., “Negative skin Friction and Settlement of Piles”, Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1984
- [13] US Army Corps of Engineers, “Design of Pile Foundations”, Washington DC, 1991
- [14] Prakash S., Sharma H. D., “Pile Foundations In Engineering Practice”, Wilry-Interscience Publication, New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore, 1989
- [15] Das B. M., “Principles of Soil Dynamics”, PWS-KENT Publishing Company, 1993
- [16] Dash S. R., Jain S. K., “Guidelines for Seismic Design of Bruid Pipelines”, Indian Institute of Technology, Civil Engineering Department, Kanpur, 2005
- [17] Bobet A., Salgado R., Loukidis D., “Seismic Design of Deep Foundations”, Joint Transportation Research Program Final Report, Purdue University, India, 2001
- [18] Özaydın K., “Zemin Dinamiği”, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1982

- [19] Das B. M., “Advanced Soil Mechanics”, Hemisphere Publishing Corporation, Washington / New York / London, 1987
- [20] Ishihara K., “Soil Behavior in Earthquake Geotechnics”, Clarendon Press, Oxford, New York, 2003
- [21] Bhattacharya S., Madabhushi S. P. G., Bolton M. D., “An Alternative Mechanism of Pile Failure in Liquefiable Deposits During Earthquakes”, *Géotechnique* 54, No. 3, 203-213, 2004
- [22] Wilson D. W., “Soil-Pile-Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay”, Department of Civil&Environmental Engineering, University of California, Davis, 1998
- [23] Tabesh A., Polous H. G., “Pseudostatic Approach for Seismic Analysis of Single Piles”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001