

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Erdal UNCUOĞLU

**KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDEKİ KAZIKLARIN YATAY YÜK VE
MOMENT ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ ANALİZİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2009

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDEKİ KAZIKLARIN YATAY YÜK VE
MOMENT ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ ANALİZİ**

Erdal UNCUOĞLU

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Bu tez / / 2009 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.**

İmza:.....

**Prof. Dr. Mustafa LAMAN
DANIŞMAN**

İmza:.....

**Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY
ÜYE**

İmza:.....

**Prof. Dr. Hasan ÇETİN
ÜYE**

İmza:.....

**Yrd. Doç. Dr. H. Bekir KARA
ÜYE**

İmza:.....

**Yrd. Doç. Dr. A. Azim YILDIZ
ÜYE**

Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. İlhami YEĞİNGİL
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür**

**Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından
Desteklenmiştir.**

Proje No:MMF2006D2

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Sevgili eşim Evrim, biricik kızım Ilgın ve aileme

ÖZ

DOKTORA TEZİ

**KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDEKİ KAZIKLARIN YATAY YÜK VE
MOMENT ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ ANALİZİ**

Erdal UNCUOĞLU

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Mustafa LAMAN

Yıl : 2009 **Sayfa:** 277

Jüri : Prof. Dr. Mustafa LAMAN

Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY

Prof. Dr. Hasan ÇETİN

Yrd. Doç. Dr. H. Bekir KARA

Yrd. Doç. Dr. A. Azim YILDIZ

Bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların zemin yüzeyi üzerinden belli bir yükseklikte uygulanan bir yanal yük etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Çalışmalar kapsamında; çok sayıda küçük ölçekli laboratuvar model deneyi gerçekleştirilmiş, problem üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analiz edilmiş ve mevcut analitik yaklaşımlar kullanılarak yanal yük taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Yapılan model deney çalışmaları ile yükleme hızı, kazık geometrisi ve zemin koşullarının yanal yük ve moment taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında araştırma olanağının bulunmadığı dilatasyon açısı, zemin-kazık ara yüzey davranışı ve zemin elastisite modülü değişiminin davranış üzerindeki etkileri yapılan parametrik çalışmalar ile sayısal olarak araştırılmıştır. Mevcut analitik yaklaşımlar ile problem çözülmüş ve her bir yöntemden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar, relatif sıkılık derecesinin, dilatasyon açısının, zemin elastisite modülünün ve zemin-kazık ara yüzey davranışının yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte; yükleme hızının, yanal yük ve moment taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Mevcut analitik yöntemler kullanılarak hesaplanan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasında önemli miktarda farklılıklar olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: yanal yük, kısa kazık, moment taşıma kapasitesi, sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis 3D Foundation.

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

THE BEHAVIOUR OF THE PILES SUBJECTED TO LATERAL LOAD AND OVERTURNING MOMENT FOUNDED IN COHESIONLESS SOILS

Erdal UNCUOĞLU

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF CUKUROVA**

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa LAMAN

Year : 2009 **Pages:** 277

Jury : Prof. Dr. Mustafa LAMAN

Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY

Prof. Dr. Hasan ÇETİN

Assist. Prof. Dr. H. Bekir KARA

Assist. Prof. Dr. A. Azim YILDIZ

In this study, the behaviour of short rigid piles founded in sand subjected to a lateral load applied at a certain height above sand surface has been investigated. The study comprises an extensive series of small scale laboratory model tests, three dimensional non-linear finite element analyses and calculations made by existing design formulae. In the experimental studies; the effects of loading rate, pile geometry and soil conditions on the lateral load and moment carrying capacity have been explored. The parameters of which effects can not be investigated with the experimental studies such as dilatation angle, interface behaviour and elasticity modulus have been evaluated performing numerical analyses. The problem of laterally loaded pile has been solved with the existing analytical approaches. The lateral load capacities obtained from these calculations have been compared. The results obtained from experimental studies, numerical analyses and analytical approaches indicate that relative density, dilatation angle, elasticity modulus and interface behaviour have major importance on the lateral load capacity. However, the loading rate has a negligible effect on the lateral load and moment carrying capacity. The lateral load capacity values obtained from different analytical approaches are significantly different from each other.

Key words: lateral load, short pile, moment carrying capacity, finite element method, Plaxis 3D Foundation.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve tecrübesini paylaşan, değerli katkılarını ve zamanını esirgemeyen, günlük yaşantısında güler yüzünü eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Mustafa LAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY, Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Bekir KARA, Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Azim YILDIZ, Sayın Doç. Dr. Cafer KAYADELEN, Sayın Prof. Dr. Hasan ÇETİN ve bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Desteklerinden dolayı başta Dr. M. Salih KESKİN olmak üzere Murat ÖRNEK, Veysel GÜMÜŞ, Ahmet DEMİR, Burhan ÜNAL, Dr. Murat ÇOBANER, Selçuk BİLDİK, Baki BAĞRIAÇIK, G. Müge İNALKAÇ ve Gizem MISIR'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dekanlık personeli Ahmet DURSUN'a, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Atölye teknisyenlerine, İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvar teknisyeni Ömer KÜTÜK'e, bitirme öğrencilerinden başta Gökhan YALÇIN ve Tolga YARDIMCI olmak üzere Haluk LAMAN ve M. Ferhat YİĞİT'e ve bölüm personeli Süleyman EVLEKSİZ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Çukurova Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Bana sonsuz destek olan, sıkıntılarımı paylaşan, güç ve moral veren sevgili eşim Evrim UNCÜOĞLU'na ve dünya tatlısı biricik kızım Ilgın UNCÜOĞLU'na teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında bana destek olan başta annem Fatma UNCÜOĞLU olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIX
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
2.1. Analitik Yaklaşımlar	9
2.1.1. Brinch-Hansen (1961).....	13
2.1.2. Broms (1964)	15
2.1.3. Meyerhof ve Ark. (1981)	18
2.1.4. Prasad and Chari (1999).....	21
2.1.5. Zhang ve ark. (2005)	24
2.2. Deneysel Çalışmalar.....	30
2.2.1. Arazi Deneyleri	31
2.2.2. Model Deney Çalışmaları	36
2.2.2.1. Klasik Model Deney (1g) Çalışmaları	36
2.2.2.2. Centrifuge Model Deney (Ng) Çalışmaları.....	48
2.3. Sayısal Analiz Çalışmaları	57
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	72
3.1. Deney Düzenegi	72
3.1.1. Deney Kasası.....	72
3.1.2. Model Kazıklar.....	74
3.1.3. Yükleme Düzenegi.....	75
3.1.4. Yük Hücresi	76
3.1.5. Deplasman Transduserleri.....	78
3.1.6. Veri Kaydetme Ünitesi (ADU)	78

3.1.7. Titreşim Cihazı.....	80
3.1.8. Model Kazık Sabitleme Aparatı.....	81
3.1.9. Şev Oluşturma Düzeneği.....	82
3.2. Kum Zemin	84
3.2.1. Endeks Deneyler	84
3.2.1.1. Elek Analizi.....	84
3.2.1.2. Piknometre Deneyi.....	86
3.2.1.3. Rölatif Sıkılık Deneyleri	86
3.2.2. Kayma Mukavemeti Deneyleri	88
3.2.2.1. Kesme Kutusu Deneyleri	89
3.2.2.2. Üç Eksenli Basınç Deneyleri	90
3.3. Deney Yöntemi	92
3.3.1. Ölçüm Aletleri ve Yükleme Düzeneğinin Kalibrasyonu	92
3.3.2. Deneylerin Yapılışı	100
4. DENEY SONUÇLARI	104
4.1. Yükleme Hızı	109
4.2. Kazık Geometrisi	115
4.2.1. Kazık Gömülü Uzunluğu	116
4.2.2. Kazık Çapı.....	121
4.3. Kazık En Kesit Şekli	127
4.4. Tabakalı Kum Zemin Durumu	134
4.5. Şevli Zemin Yüzeyi Durumu	139
4.6. Kazığın İmal Edildiği Malzeme	145
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	153
5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanıtımı	155
5.2. Zemin Davranışının Modellenmesi.....	161
5.2.1. Mohr-Coulomb (MC) Malzeme Modeli	164
5.2.2. Model Parametrelerinin Gerçek Zemin Davranışı ile İlişkilendirilmesi	165
5.2.3. Mohr-Coulomb (MC) Malzeme Modeli Parametreleri.....	166
5.2.3.1. Elastisite Modülü (E)	166
5.2.3.2. Poisson Oranı (ν)	168

5.2.3.3. Kohezyon (c).....	168
5.2.3.4. İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	169
5.2.3.5. Dilatasyon Açısı (ψ).....	169
5.3. Kazık Davranışının Modellenmesi ve Lineer Elastik (LE) Malzeme Modeli	169
5.4. Ara Yüzey Davranışı.....	170
5.5. Plaxis 3D Foundation Programı	172
5.5.1. Çalışma Düzlemlerinin Oluşturulması.....	172
5.5.2. Kazık Elemanın Oluşturulması	173
5.5.3. Yükün Uygulanması	174
5.5.4. Zemin Profilinin Elde Edilmesi	175
5.5.5. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	176
5.5.6. Sınır Koşulları	176
5.5.7. Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması	177
5.5.8. Başlangıç Gerilme Durumunun Tanımlanması.....	179
5.5.9. Sayısal Analiz.....	180
6. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ.....	182
6.1. Mesh Analizi	183
6.2. Parametrik Çalışma	189
6.2.1. Elastisite Modülünün Etkisi	190
6.2.2. Dilatasyon Açısının Etkisi.....	194
6.2.3. Ara Yüzey Elemanın Etkisi.....	198
6.3. Sayısal Analizler	202
6.3.1. Kazık Gömülü Uzunluğu	203
6.3.2. Kazık Çapı.....	208
6.3.3. Kesit Geometrisi.....	212
6.3.4. Tabakalı Zemin Durumu	217
6.3.5. Kazık Malzemesi.....	222
6.3.6. Şevli Durum	229
7. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	235
7.1. Kazık Gömülü Uzunluğu	235

7.2. Kazık Çapı.....	241
7.3. Kazık En Kesit Şekli	247
7.4. Kazık Malzemesi.....	253
7.5. Tabakalı Zemin Durumu	255
7.6. Şevli Durum	258
7.7. Sonuçların Karşılaştırılmasına İlişkin Genel Değerlendirmeler	260
8. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	263
KAYNAKLAR	271
ÖZGEÇMİŞ	277

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA NO

Çizelge 2.2 Kulhawy ve ark. (1983) ve Kulhawy (1991) Tarafından Önerilmiş Olan K Katsayısı Değerleri (Zhang ve ark., 2005)	27
Çizelge 2.3 Kulhawy ve ark. (1983) ve Kulhawy (1991) Tarafından Önerilmiş Olan δ Katsayısı Değerleri (Zhang ve ark., 2005)	28
Çizelge 2.8 Analitik Yaklaşımlar ile Sonlu Elemanlar Yönteminin Karşılaştırması.	71
Çizelge 3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kazık ve Çekme Kolu Özellikleri ...	74
Çizelge 3.2 Yük Hücresi Özellikleri (www.esit.com.tr)	77
Çizelge 3.3 Elek Analizi Sonuçları	85
Çizelge 3.4 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları	88
Çizelge 3.5 Yük Hücresi Kalibrasyon Değerleri.....	92
Çizelge 3.6 1 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Değerleri.....	93
Çizelge 3.7 2 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Değerleri.....	94
Çizelge 4.2 Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Sayısal Deney Sonuçları	113
Çizelge 4.3 Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Sayısal Deney Sonuçları	114
Çizelge 4.4 Farklı L/D Oranları için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (L, Değişken)	119
Çizelge 4.5 Farklı L/D Oranları için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (L, Değişken).....	120
Çizelge 4.6 Farklı L/D Oranları için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (D, Değişken).....	124
Çizelge 4.7 Farklı L/D Oranları için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (D, Değişken)	125
Çizelge 4.8 Farklı En kesit Şekilleri için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları	132
Çizelge 4.9 Farklı En kesit Şekilleri için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları	132
Çizelge 4.10 Tabakalı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları.....	138

Çizelge 4.11 Şevli Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları.....	144
Çizelge 4.12 Deneylerde Kullanılan Kazık Malzemelere Ait Özellikler.....	147
Çizelge 4.13 Farklı Kazık Malzemeleri için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları	150
Çizelge 4.14 Farklı Kazık Malzemeleri için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları	150
Çizelge 6.1 Kum Zemine Ait Malzeme Özellikleri	183
Çizelge 6.2 Kazık Malzemelerine Ait Malzeme Özellikleri.....	183
Çizelge 6.3 Mesh Analizleri Sırasında Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	184
Çizelge 6.5 Gevşek Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi.....	191
Çizelge 6.6 Sıkı Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi	192
Çizelge 6.7 Gevşek Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi	196
Çizelge 6.8 Sıkı Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi.....	196
Çizelge 6.9 Gevşek Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanın Etkisi	199
Çizelge 6.10 Sıkı Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanın Etkisi.....	200
Çizelge 6.11 Kum Zemin için Tanımlanan Parametreler.....	203
Çizelge 6.12 Gevşek Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	204
Çizelge 6. 13 Sıkı Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	205
Çizelge 6.14 Gevşek Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	209
Çizelge 6.15 Sıkı Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	209
Çizelge 6.16 Gevşek Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	213
Çizelge 6.17 Sıkı Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	214
Çizelge 6.18 Farklı Yanal Yük Değerleri ve Farklı Yükleme Adımlarının Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	218

Çizelge 6.19 Tabakalı Kum Zemin Durumunda Yanal Yük Taşıma Kapasitesi	
Değerleri (Plaxis 3D Foundation)	221
Çizelge 6.20 Gevşek Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma	
Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	228
Çizelge 6. 21 Sıkı Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma	
Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	228
Çizelge 7.1 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Sonuçların	
Karşılaştırılması	236
Çizelge 7.2 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Sonuçların	
Karşılaştırılması	237
Çizelge 7.3 Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Dönme Noktası (Pivot Nokta)	
Derinliklerinin Karşılaştırılması.....	240
Çizelge 7.4 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Sonuçların	
Karşılaştırılması	242
Çizelge 7.5 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Sonuçların Karşılaştırılması	
.....	244
Çizelge 7.6 Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Dönme Noktası (Pivot Nokta)	
Derinliklerinin Karşılaştırılması.....	246
Çizelge 7.9 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Sonuçların	
Karşılaştırılması	253
Çizelge 7.10 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Sonuçların	
Karşılaştırılması	254
Çizelge 7.11 Tabakalı Kum Zeminde Farklı H/L Oranları için Sonuçların	
Karşılaştırılması	255

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA NO

Şekil 1.1. Rijit Kısa Kazık Temellerin Kullanıldığı Yapı Tiplerine Örnekler	2
Şekil 2.1. Brinch-Hansen Yanal Zemin Basıncı Dağılımı (Laman, 1995)	13
Şekil 2.2. Brinch-Hansen Katsayıları K_q ve K_c 'nin Değerleri (Brinch Hansen, 1961)	15
Şekil 2.3. Serbest Başlı Rijit Kısa Kazık-Ötelenme-Zemin Reaksiyonu ve Eğilme Momenti Dağılımları (Broms,1964-Gunanaratne, 2006)	16
Şekil 2.4. Tabakalı Zeminde Göçme Anında Rijit Duvara Etkiyen Net Toprak Basıncının Dağılımı (Meyerhof ve ark., 1981)	18
Şekil 2.5. Kum Zemindeki Yanal Yüklü Rijit Bir Kazık için Şekil Faktörleri (Meyerhof ve ark., 1981)	21
Şekil 2.6. Önerilen Zemin Basıncı Dağılımı (Prasad ve Chari, 1999)	23
Şekil 2.7. Yanal Yüke Maruz Kazığa Etkiyen Normal ve Kayma Gerilmelerinin Dağılımı (Zhang ve ark., 2005)	25
Şekil 3.1. Deney Düzeneği	73
Şekil 3.2. (a) Model Çelik Kazık (b) Çekme Kolu, Çelik Halat ve Bilyalı Kanca	75
Şekil 3.3. Yük Hücresi (www.esit.com.tr)	77
Şekil 3.4. Deplasman Transduseri	78
Şekil 3.5. ADU Cihazı ve DIALOG Programı	79
Şekil 3.6. Titreşim Cihazı	80
Şekil 3.7. Kazık Temel Sabitleme Aparatı	81
Şekil 3.8. Model Kazığın Zeminde Dik Konumda Tutulması	82
Şekil 3.9. Şev Oluşturma Düzeneği (Keskin, 2009)	83
Şekil 3.10. Deney Kumunun Kurutulması	85
Şekil 3.11. Model Kum Zeminin Dane Çapı Dağılımı Eğrisi	86
Şekil 3.12. Gevşek Kum Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi	87
Şekil 3.13. Sıkı Kum Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi	88
Şekil 3.14. Gevşek Kum Zeminde Kesme Kutusu Deney Sonucu	89
Şekil 3.15. Sıkı Kum Zeminde Kesme Kutusu Deney Sonucu	90
Şekil 3.16. Gevşek Kum Zeminde CD-Üç Eksenli Basıncı Deneyi Sonuçları	91

Şekil 3.17. Sıkı Kum Zeminde CD-Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	91
Şekil 3.18. Yük Hücresi Kalibrasyon Eğrisi	93
Şekil 3.19. 1 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Eğrisi	94
Şekil 3.20. 2 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Eğrisi	95
Şekil 3.21. Deneyin Hazırlanması.....	102
Şekil 4.1. Yanal Yüke Maruz Rijit Kısa Kazığın Davranışı (Broms, 1964).....	104
Şekil 4.2. Gevşek Kum Zemindeki Rijit Kısa Kazıklar için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri	106
Şekil 4.3. Sıkı Kum Zemindeki Rijit Kısa Kazıklar için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri.....	106
Şekil 4.4. Model Deney Sistemi Geometrisi.....	109
Şekil 4.5. Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi	111
Şekil 4.6. Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi	112
Şekil 4.7. Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi.....	112
Şekil 4.8. Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	113
Şekil 4.9. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Yanal Yükleme Hızı-Yanal Yük İlişkisi	115
Şekil 4.10. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi (L, Değişken).....	117
Şekil 4.11. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi (L, Değişken)	117
Şekil 4.12. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (L, Değişken).....	118
Şekil 4.13. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (L, Değişken).....	118
Şekil 4.14. Kazık Başındaki 2° lik Dönme Açısı için L/D-Yanal Yük ilişkileri	121
Şekil 4.15. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi (D, Değişken)	122

Şekil 4.16. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi (D, Değişken).....	122
Şekil 4.17. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (D, Değişken)	123
Şekil 4.18. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (D, Değişken)	123
Şekil 4.19. Kazık Başındaki 2°'lik Dönme Açısı için L/D-Yanal Yük İlişkileri.....	126
Şekil 4.20. Kazık Başındaki 2°'lik Dönme Açısı için L ve D' ye Bağlı L/D-Yanal Yük İlişkileri.....	126
Şekil 4.21. Gevşek Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi.....	129
Şekil 4.22. Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi.....	129
Şekil 4.23. Gevşek Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	130
Şekil 4.24. Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi.....	130
Şekil 4.25. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için 2°'lik Dönme Açısında Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması.....	133
Şekil 4.26. Tabakalı Kum Zemin Durumunun Modellenmesi.....	135
Şekil 4.27. Tabakalı Kum Zeminde Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi	136
Şekil 4.28. Tabakalı Kum Zeminde Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	137
Şekil 4.29. Tabakalı Kum Zeminde H/L-Yanal Yük	139
Şekil 4.30. Şevli Zemin Yüzeyi Durumunda Model Deney Geometrisi.....	141
Şekil 4.31. Şevli Kum Zeminde Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi	142
Şekil 4.32. Şevli Kum Zeminde Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	143
Şekil 4.33. Şevli Kum Zeminde Şev Tepesine Uzaklık-YYTKO İlişkisi.....	145
Şekil 4.34. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi.....	148

Şekil 4.35. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi.....	148
Şekil 4.36. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	149
Şekil 4.37. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi	149
Şekil 4.38. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için 2°'lik Dönme Açısında Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması ..	152
Şekil 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	154
Şekil 5.2. Problem Geometrisinin Sonlu Elemanlara Ayrılması.....	155
Şekil 5.3. Sonlu Eleman Örnekleri.....	156
Şekil 5.4. Düğüm Noktası Serbestlik Dereceleri	157
Şekil 5.5. Global Matris Eşitliklerinin Elde Edilmesi.....	158
Şekil 5.6. Sınır Şartlarının Probleme Uygulanması	159
Şekil 5.8. Elasto-Plastik Malzeme için Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Johnson ve ark., 2006).....	162
Şekil 5.9. Mohr-Coulomb Göçme Yüzeyi (Johnson ve ark., 2006).....	162
Şekil 5.10. İdealize Edilmiş Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Johnson ve ark., 2006)	164
Şekil 5.11. (Plaxis 3D Foundation V2-Manual).....	166
Şekil 5.12. E_0 ve E_{50} Elastisite Modüllerinin Tanımlanması (Plaxis 3D V2-Manual)	167
Şekil 5.13. Çalışma Düzlemlerinin Temsili Gösterimi	173
Şekil 5.14. Tekil Yük Veri Penceresi.....	174
Şekil 5.15. Sondaj Kuyusu Veri Penceresi	175
Şekil 5.16. Üç Boyutlu Model Geometrisi.....	177
Şekil 5.17. İki ve Üç Boyutlu Mesh Oluşumunda Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri	178
Şekil 6.1. Kazık Başındaki 1° lik Dönme Açısı için Yanal Ötelenme-Yanal Yük İlişkileri.....	185

Şekil 6.2. Üniform Sıkı Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı	187
Şekil 6.3. Tabakalı Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı.....	188
Şekil 6.4. Şevli Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı	188
Şekil 6.5. Gevşek Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi.....	192
Şekil 6.6. Sıkı Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi	193
Şekil 6.7. Ereferans-Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi	194
Şekil 6.8. Gevşek Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi	197
Şekil 6.9. Sıkı Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi.....	197
Şekil 6.10. ψ (°)-Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi	198
Şekil 6.11. Gevşek Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanının Etkisi	201
Şekil 6.12. Sıkı Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanının Etkisi.....	201
Şekil 6.13. Rinter Katsayısının Kazık-Zemin Etkileşimine Etkisi.....	202
Şekil 6.14. Rinter -Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi	202
Şekil 6.15. Gevşek Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	206
Şekil 6.16. Sıkı Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	206
Şekil 6.17. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	207
Şekil 6.18. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	207
Şekil 6.19. Gevşek Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	210
Şekil 6.20. Sıkı Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	210
Şekil 6.21. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	211
Şekil 6.22. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	212

Şekil 6.23. Gevşek Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma	
Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation).....	214
Şekil 6.24. Sıkı Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine	
Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	215
Şekil 6.25. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kesit Geometrileri için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	216
Şekil 6.26. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kesit Geometrileri için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	216
Şekil 6.27. Tabakalı Kum Zemin Durumunda Rinter Katsayısının Değişimi	220
Şekil 6.28. Tabakalı Zemin Durumunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi...	221
Şekil 6.29. Tabakalı Kum Zemin Durumunda $H/L=0.25$ için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	222
Şekil 6.30. $R_{inter}=0.035$ için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkileri (Plaxis 3D Foundation).....	223
Şekil 6.31. $R_{inter}=0.200$ için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkileri (Plaxis 3D Foundation).....	224
Şekil 6.32. Farklı Çekme Kolu Malzemesi Durumunda Gevşek Kum Zeminde Elde	
Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri	224
Şekil 6.33. Sıkı Kum Zeminde Yanal Yüke Maruz Model Derlin Kazık	225
Şekil 6.34. Gevşek Kum Zeminde Alüminyum Model Kazık için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	226
Şekil 6.35. Sıkı Kum Zeminde Alüminyum Model Kazık için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	227
Şekil 6.36. Gevşek Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma	
Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundatin).....	228
Şekil 6.37. Sıkı Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine	
Etkisi (Plaxis 3D Foundation)	229
Şekil 6.38. Kendi Ağırlığı Etkisinde Stabil Olmayan Şevlendirilmiş Kum Zemin .	231
Şekil 6.39. Şevli Durumda Şev Tepesine En Yakın ve En Uzak Konumda Elde	
Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri	231

Şekil 6.40. Şevli ve Şevsiz Durumda Elde Edilen Kazık Başı Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	233
Şekil 6.41. Şevli Kum Zeminde Şev Tepesine Uzaklık-YYTKO İlişkisi.....	233
Şekil 7.1. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Yanal Yük	
Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması.....	236
Şekil 7.2. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Yanal Yük	
Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması.....	238
Şekil 7.3. Gevşek Kum Zeminde $L/D=5$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	240
Şekil 7.4. Sıkı Kum Zeminde $L/D=5$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	241
Şekil 7.5. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Yanal Yük Taşıma	
Kapasitelerinin Karşılaştırılması	242
Şekil 7.6. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Yanal Yük Taşıma	
Kapasitelerinin Karşılaştırılması	244
Şekil 7.7. Gevşek Kum Zeminde $L/D=3$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	246
Şekil 7.8. Sıkı Kum Zeminde $L/D=3$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal	
Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	247
Şekil 7.9. Gevşek Kum Zeminde Farklı En Kesit Şekilleri için Yanal Yük Taşıma	
Kapasitelerinin Karşılaştırılması	250
Şekil 7.10. Sıkı Kum Zeminde Farklı En Kesit Şekilleri için Yanal Yük Taşıma	
Kapasitelerinin Karşılaştırılması	251
Şekil 7.11. Gevşek Kum Zeminde $B=50\text{mm}$ Genişlikteki Kare Kesitli Kazık için.	252
Şekil 7.12. Sıkı Kum Zeminde $B=50\text{mm}$ Genişlikteki Kare Kesitli Kazık için	252
Şekil 7.13. Gevşek Kum Zeminde Derlin Model Kazık için Deneysel ve Sayısal	
Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması	254
Şekil 7.14. Tabakalı Kum Zeminde Farklı H/L Oranları için Yanal Yük Taşıma	
Kapasitelerinin Karşılaştırılması	256
Şekil 7.15. Tabakalı Kum Zeminde $H/L=0.50$ Oranı için Deneysel ve Sayısal Yanal	
Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	257

Şekil 7.16. Tabakalı Kum Zeminde $H/L=0.75$ Oranı için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	258
Şekil 7.17. Şevlendirilmiş Gevşek Kum Zeminde YYTKO-Şev Tepesine Uzaklık İlişkilerinin Karşılaştırılması	259

SİMGELER VE KISALTMALAR

c	; kohezyon
ϕ	; içsel sürtünme açısı
P_z	; z derinliğindeki efektif örtü basıncı
K_{qz}, K_{cz}	; Brinch Hansen pasif zemin basınç katsayıları
γ	; zemin birim hacim ağırlığı
D	; kazık çapı
K_p	; Rankine pasif zemin basınç katsayısı
L	; kazık gömülü uzunluğu
e	; yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliği
Q_u	; nihai yanal yük
K_b	; kohezyonsuz zemin için yanal zemin basınç katsayısı
K_c	; kohezyonlu zemin için yanal zemin basınç katsayısı
P_u	; nihai yanal direnç
B	; kazık genişliği
η	; zemin basıncı için şekil faktörü
ξ	; kayma direnci için şekil faktörü
K_0	; sükunetteki toprak basınç katsayısı
δ	; zemin ve kazık arasındaki ara yüzey sürtünme açısı
$E_p I_p$	; kazık eğilme rijitliği
D_d	; dane çapı
C_u	; üniformaluk katsayısı
D_r	; relatif sıkılık derecesi
γ_k	; kuru birim hacim ağırlık
L/D	; narinlik oranı
D_k	; deney kasasının çapı
L_k	; deney kasasının uzunluğu
B_k	; deney kasasının genişliği
H_k	; deney kasasının yüksekliği
g	; yerçekim ivmesi

N	; centrifuge ivmesi
R_D	; dönme noktası derinliği
$R (^{\circ})$	; kazık başındaki dönme açısı
U_e	; e yüksekliğindeki yanal ötelenme
t	; deney süresi
P	; yatay yük taşıma kapasitesi
M	; moment taşıma kapasitesi
$U_{0.10D}$	; kazık çapının %10'u değerindeki yanal ötelenme
H/L	; tabakalanma oranı
β	; şev açısı
x	; kazığın şev tepesine yatay mesafesi
E	; elastisite modülü
I	; atalet momenti
u	; ötelenme hareketi
θ	; dönme hareketi
$\{u\}$	; düğüm noktası deplasman vektörü
$\{u\}_e$	; eleman deplasman vektörü
$[k]_e$	; eleman rijitlik matrisi
$\{f\}_e$	; eleman yük vektörü
$[K]$	; sistem rijitlik matrisi
$\{F\}$	; sistem yük vektörü
$\{U\}$	; deplasman vektörü
σ_1	; büyük asal gerilme
σ_2	; orta asal gerilme
σ_3	; küçük asal gerilme
ν	; poisson oranı
ψ	; dilatasyon açısı
E_0	; başlangıç elastisite modülü
E_{50}	; sekant elastisite modülü
$\sigma_1 - \sigma_3$	; deviatorik gerilme
$E_{\text{increment}}$	; birim derinlik başına elastisite modülündeki artım miktarı

E_{referans}	; referans elastisite modülü
$y_{\text{ref.}}$	; referans derinlik
σ_h	; yatay gerilme
σ_v	; düşey gerilme
τ	; kayma mukavemeti
σ_n	; normal gerilme
R_{inter}	; mukavemet azaltma katsayısı
$\sigma_{v, 0}$	; başlangıç düşey gerilmesi
$\sigma_{h, 0}$	; başlangıç yatay gerilmesi
γ_{dry}	; zemin kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_{\text{sat.}}$	; zemin doymun birim hacim ağırlığı
$u_{x, y=0}$	; kazık başındaki yanal ötelenme

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim hattı kuleleri, elektrik direkleri, otobanlarda yolun üst kısmında belirli bir yükseklikte yer alan işaret ve bilgilendirme levhaları ile trafik ışıklarını taşıyan köprü veya konsol tipi direkler, otoban ve demiryollarındaki büyük reklam panolarını taşıyan direkler ve ticari reklam panolarını taşıyan direkler için kullanılan temel sistemleri esas olarak zemin yüzeyi üzerinden oldukça yüksekte etkiyen yanal yüklere karşı koyacak şekilde tasarlanmalıdır (Şekil 1.1). Büyük devrilme momentlerine maruz olan bu tip yapıların temel sistemleri rölatif olarak küçük sayılan düşey ve yatay kuvvetlere de maruzdur. Yukarıda sayılan yapılar için temel sistemi olarak, genellikle, rijit kısa kazıklar kullanılmaktadır.

Kısa kazıklar, çapları veya genişlikleri büyük ancak derinlikleri küçük olan kazıklardır. Dairesel veya kare en kesit geometrisine sahip olabilirler. Kısa kazıklar, imal edilecekleri sahada zeminin özelliklerine ve şartlarına bağlı olarak muhafaza borulu ya da muhafaza borusuz bir kuyunun açılması daha sonra da bu kuyunun içerisine donatının koyulup kuyu içinin beton ile doldurulması şeklinde imal edilmektedirler. Rijit kısa kazık temeller (short bored piles), ayak (pier) temeller ile aynı görevi yerine getirmektedirler.

Yanal yüke maruz rijit kısa bir kazığın göçme mekanizması flexible uzun bir kazığın göçme mekanizmasından farklıdır. Rijit kısa kazık zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte etkiyen yanal bir yüke maruz kaldığında kazığın etkiyen yanal yük ve moment etkisi ile gömülü uzunluğu boyunca herhangi bir derinlikte yer alan bir nokta etrafında dönerek kendisini çevreleyen zemine yaslandığı kabul edilir. Bu durumda; dönme noktasının üst tarafında kazık ön yüzünde, dönme noktasının alt tarafında da kazık arka yüzünde pasif zemin basınçları oluşur. Zemin tarafından kazığa etkitilen yanal zemin basınçlarının değerinin zeminin nihai yanal direncine ya da başka bir ifade ile zeminin pasif basınç değerine ulaşması ile göçme meydana gelir.

(a) (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Acosta_Bridge_southbound_end.jpg)(b) (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:A27.jpg>)(c) (www.clickindia.com)(d) (<http://img218.imageshack.us/i/04in6.jpg/>)

Şekil 1.1. Rijit Kısa Kazık Temellerin Kullanıldığı Yapı Tiplerine Örnekler

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Bu tip temel sistemlerinin analizi için kullanılan yöntemler eksenel yüke maruz derin temellerin analizinde kullanılan yöntemler kadar ileri düzeyde değildir. Bununla birlikte; yanal yüklü kazık probleminde yük-transfer mekanizması son derece karmaşık olup eksenel yüke maruz derin temellerin davranışları kadar iyi anlaşılamamıştır.

Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların analizi için kullanılan mevcut tasarım yöntemlerinin çoğunluğu arazi ya da laboratuvar model deneylerinden elde edilen deneysel bilgilere veya basit sayılabilen limit durum yaklaşımlarına dayanmaktadır. Arazi deney sonuçlarının, özellikle, deney yapılan saha ve zemin koşulları için geçerli olması, model deneylerden elde edilen sonuçlarda ölçek etkisinin bulunması bununla birlikte elde edilen deneysel ilişkilerin çoğunlukla homojen zemin koşulları için geçerli olması ve zemin parametrelerinin keyfî seçilmesi gibi nedenlerden dolayı bahsedilen yöntemler çok güvenilir kabul edilmemektedir. Öyle ki; kohezyonsuz zeminler içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri farklı analitik yöntemler kullanılarak tahmin edildiklerinde elde edilen taşıma gücü değerleri arasında önemli derecede farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu yüzden; uygulamacı mühendisler, tasarım aşamasında yanal yük taşıma kapasitesi tahmin edilirken hangi yaklaşımın daha efektif olduğu konusunda zorluk yaşamaktadırlar.

Yanal yüke maruz kazıkların davranışlarının tahmin edilmesinde kullanılmak üzere son yıllarda geliştirilmiş olan yeni yaklaşımlar da mevcuttur. Bunlar arasında centrifuge modelleme tekniği ve sonlu elemanlar yöntemi sayılabilir.

Centrifuge modelleme tekniği, tam ölçekli arazi deneylerine ekonomik ve pratik bir alternatif olarak kullanılabilir. Ancak; düzeneğin dünya genelinde az sayıda araştırma merkezinde bulunuyor olması bu yöntem ile yapılacak çalışmalar ve geliştirilecek çözüm teknikleri için bir sınırlama oluşturmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, zemin mekaniği ve temel mühendisliği problemlerinin tasarım ve analizlerinde, özellikle, son yirmi yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, bir sistemin davranışını etkileyebilecek çok sayıdaki faktörü göz önüne alarak çözümleme yapabilen güçlü bir hesaplama

aracıdır. Zeminin gerilme-deformasyon davranışının non-lineer olması ve bu özelliğin non-lineer davranış özelliğini tanımlayan malzeme modelleri ile dikkate alınabilmesi sonlu elemanlar yönteminin en önemli avantajlarından birisidir. Buna karşılık; zeminin belirsizlikler içeren ve özellik değişimi olan bir malzeme olması, anizotrop ve heterojen bir yapısının olması, kullanılan zemin modellerinin hala eksiklikler içeriyor olması gibi nedenlerden dolayı sonlu elemanlar yöntemi, yaygın olarak, tasarım aşamasında ön fikir edinmek ve problem ile ilgili parametrik çalışma yapmak amacı ile kullanılmaktadır.

Yanal yüke maruz rijit kısa kazık problemi üç boyutlu ve non-lineer bir problem olup problemin çözümünde birçok parametrenin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu yüzden; problemin çözümü ile ilgili kesin sonuç veren genel bir çözüm tekniği hala geliştirilememiştir.

Bu tez çalışması, kuru kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitelerinin araştırılmasına yönelik olarak yapılmıştır. Çalışmalar kapsamında; çok sayıda küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiş, problem üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analiz edilmiş ve mevcut analitik yaklaşımlar kullanılarak yanal yük taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Çalışmalar boyunca, yanal yüke maruz rijit kısa bir kazığın davranışının daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için literatürdeki çalışmalardan farklı olarak aşağıda sıralanan çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışlarını araştırmaya yönelik arazi ve laboratuvar yükleme deneyleri, genellikle, yatay yükün sabit bir hızda uygulanması yolu ile gerçekleştirilmektedir. Yükleme hızının kum zeminin kayma mukavemeti üzerindeki etkisi, genellikle, farklı kesme hızlarında gerçekleştirilmiş kesme kutusu deneyleri ile araştırılmıştır. Literatürdeki mevcut deneysel çalışmalar incelendiğinde yükleme hızının kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine etkisini araştırmaya yönelik yapılmış küçük ölçekli bir model deney çalışmasına rastlanılmamıştır. Bu amaçla; deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere yeni bir yükleme düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir.

Böylelikle; yanal yükün farlı hızlarda uygulanması ve uygulanan yükleme hızının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumlarında araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yükleme hızındaki değişme, yanal yük taşıma kapasitesine önemli bir etkide bulunmamaktadır.

- Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların tasarımı için kullanılan mevcut analitik yöntemler, kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin kazığın en kesit şekline bağımsız olduğunu kabul etmektedirler. Broms (1964)' un bildirdiğine göre Shilts ve ark. (1948), Ramelot ve Vandepierre (1950) ve Roscoe (1957), en kesit şekilleri farklı model kazıklar üzerinde laboratuvar yanal yükleme deneyleri yaparak kazık en kesit şeklinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine etkisini incelemiş ve çalışmalar sonucunda kazık en kesit şeklinin kısa kazıkların nihai yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli sayılmayacak bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yanal yüke maruz kazıkların davranışı zemin ve kazık arasındaki etkileşim tarafından kontrol edildiği için kazık en kesit şeklinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olabilir. Bu amaçla; dairesel ve kare en kesitli model kazıklar üzerinde bir seri model deney çalışması yapılarak eşdeğer dairesel alan kabulü ve çapa eşdeğer genişlik kabulü için kazık en kesit şeklinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanılarak analitik yaklaşımlarda kullanılan eşdeğer dairesel alan kabulü yaklaşımının doğruluğu da yorumlanmıştır.
- Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışlarını araştırmak için yapılmış olan laboratuvar model deneylerinin çoğunluğu üniform zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde; mevcut analitik yöntemlerin çoğunluğu da sadece üniform zemin koşullarında kullanılabilmektedir. Oysa; pratikte, kazık temeller, çoğunlukla, mukavemet ve deformasyon özellikleri birbirinden farklı zemin tabakalarının oluşturduğu zemin profilleri içerisinde yer almaktadır. Tabakalı zemin profilleri içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazık temellerin davranışlarını incelemeye yönelik çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada; model kazığın tabakalı kum zemin içerisinde yer

alması durumunda yanal yük etkisi altındaki davranışı bir seri model deney çalışması yapılarak araştırılmıştır. Yanal yük taşıma kapasitesinin tabakalanma oranı H/L ile nasıl bir değişim göstereceği belirlenerek matematiksel bir ilişkinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte; Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilmiş olan analitik yaklaşımın güvenilirliği de elde edilen deney sonuçları kullanılarak yorumlanmıştır.

- Deneysel çalışmalar ile araştırılma olanağının olmadığı kum zeminin dilatasyon açısı, elastisite modülü ve zemin-kazık ara yüzey davranışının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri yapılan parametrik çalışmalar ile sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar ile yanal yük taşıma kapasitesinin her bir parametre ile değişimi ve bu değişimi ifade eden matematiksel eşitlikler elde edilmiştir. Sayısal analizler Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kum zeminin dilatasyon açısı, elastisite modülü ve zemin-kazık ara yüzey davranışı için Plaxis programının önerdiği yaklaşımların model deney çalışmalarını ne kadar doğru modelleyebildiği ortaya konmuş ve sayısal analizlerde model sistemin en uygun parametreler kullanılarak modellenmesinin sayısal analiz çalışmalarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artıran en önemli unsur olduğu sonucu vurgulanmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda bahsedilen parametrelerin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür.
- Analitik yöntemlerde; göçme anındaki yanal yük taşıma kapasitesini ifade eden değerlerin kazık başında ne kadar bir dönme açısı oluşturduğu veya kazık başındaki yanal ötelenme değerlerinin ne olduğu konusunda güvenilir yaklaşımlar bulunmamaktadır. Analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak gerek gevşek kum zeminde gerekse de sıkı kum zeminde göçmenin ne kadarlık bir dönme açısında meydana geleceği yorumlanmıştır.
- Yaygın olarak kullanılan mevcut analitik yaklaşımlardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek hangi yaklaşımın daha güvenilir olduğu ve analitik yöntemler arasındaki farklılıkların nedenleri ortaya konmuştur.

Tez çalışması aşağıda özetlenen bölümlerden oluşmaktadır.

İkinci bölümde; kum zemin içerisinde yer alan yanal yüklü kazıklar ile ilgili olarak yapılmış önceki çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki mevcut deneysel çalışmalar, arazi ve laboratuvar deneyleri ile ilgili çalışmalar olmak üzere iki ana başlıkta toplanmış, laboratuvar deney çalışmaları da küçük ölçekli laboratuvar model deney çalışmaları ve centrifuge model deney çalışmaları olarak iki gruba ayrılmıştır. Konu ile ilgili sayısal çalışmalar kısmında, çoğunlukla, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilmesi amacıyla geliştirilmiş analitik tasarım yöntemleri de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde; deneysel çalışmalar anlatılmaktadır. Deney düzeneği, deney kumu ve model kazıklar ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Deney kumunun endeks ve mukavemet özelliklerinin belirlendiği deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar, yükleme ve ölçüm sistemlerinin kalibrasyonları ve deneylerin yapılması sırasında uygulanacak adımlar da bu bölüm başlığı altında sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; uygulanacak deney programı, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin nasıl değerlendirileceği, gerekli hesaplamaların nasıl yapılacağı anlatılmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Beşinci bölümde; sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili tanımlamalar yapılarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı hesap yapabilmek için izlenmesi gerekli prosedür açıklanmıştır. Üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar programı Plaxis 3D Foundation tanıtılmış ve yanal yüklü kazık probleminin Plaxis 3D Foundation programı ile modellenerek analiz edilebilmesi için gerçekleştirilmesi gerekli işlemler maddeler halinde özetlenmiştir.

Altıncı bölümde; deneysel çalışmalarda inceleme imkanımızın bulunmadığı bazı parametrelerin yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışına etkisi yapılan parametrik çalışmalar ile araştırılmıştır. Ayrıca; Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar da bu bölümde sunulmuştur.

Yedinci bölümde; deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değeri karşılaştırılmaktadır.

Tez çalışmasının son bölümü olan sekizinci bölümde ise; gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve ileride yapılabilecek çalışmalar ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde; kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilmesinde kullanılan analitik yaklaşımlar, yanal yüke maruz tek kazık ve kazık grupları üzerinde gerçekleştirilmiş deneysel ve sayısal analiz çalışmaları anlatılmaktadır. Bu çalışma; kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi ile ilgili olduğu için özellikle, rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerini tahmin etmeye yönelik çalışmalar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1. Analitik Yaklaşımlar

Yanal yüklü kazık probleminde yük-transfer mekanizması son derece karmaşık olup hala tam anlamı ile anlaşılamamıştır. Bu nedenle; günümüze kadar birçok tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve nonlineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık özellikleri (kazığın eğilme rijitliği, kazığın geometrisi), zeminin gerilme-deformasyon davranışı (kayma mukavemeti, zeminin rijitliği ve dilatasyon özelliği) ve kazık-zemin ara yüzeyi yanal yüke maruz bir kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir (Fan ve Long, 2005).

Yanal yüke maruz kazık temeller aşağıda sıralanmış olan üç şartı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır (Duncan ve ark., 1994).

- Uygulanan yanal yük, kazığı çevreleyen zeminin nihai yanal yük taşıma kapasitesini aşacağı büyüklükte olmamalıdır.
- Uygulanan yanal yük nedeni ile kazık bünyesinde oluşan eğilme momentleri kazık kesit alanının moment taşıma kapasitesini aşmamalıdır.
- Yanal yük etkisinde meydana gelen yanal ötelenme miktarı üst yapı için izin verilebilir ötelenme değerinden küçük olmalıdır.

Yanal yüklü kazıkların analizi için kullanılan mevcut tasarım yöntemleri dört ana grupta toplanabilir. 1-sınır durum yöntemi (limit state method) 2- temel zemini reaksiyon yöntemi (subgrade reaction method) 3- p-y eğri yöntemi 4-elastik analiz yöntemi (Fan ve Long, 2005).

Bir kazığın nihai yanal yük taşıma kapasitesinin tahmin edilmesindeki en basit yaklaşım serbest başlı bir kazığın statik dengesinin göz önüne alınmasıdır. Yatay bir H yüküne ve bir M momentine maruz kazığın rijit bir kazık olduğu kabul edilip, yatay kuvvetlerin dengesi prensibi ve momentler kullanılarak elde edilen denklemlerin çözülmesi ile göçmeye neden olan yatay kuvvet ve moment değeri hesaplanabilir. Çözümler; zemin direncinin derinlik boyunca üniform olduğu durum, derinlik ile beraber doğrusal olarak arttığı durum ve derinlik ile beraber nonlinear olarak değiştiği durum olmak üzere farklı zemin direnci dağılımları için elde edilmiştir (Poulos ve Davids, 1980). Günümüzde en yaygın şekilde kullanılan sınır durum yöntemleri Brinch-Hansen (1961) ve Broms (1964) tarafından önerilmiş olan yöntemlerdir.

Temel zemini reaksiyon yöntemi ve p-y Eğri Yöntemi elastik zemine oturan kiriş kabulünü (beam-on-elastic foundation) kullanmaktadır. Belirtilen yöntemler, basit olmaları ve uygun doğrulukta sonuçlar vermeleri nedenleri ile yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte; zemin direnci nonlinear özellikte olmasına karşın zemin direncinin kazık deplasmanının doğrusal bir fonksiyonu olarak modellenmesi, yatay temel zemini reaksiyon katsayısının zeminin temel bir özelliği olmasından ziyade bir model parametresi olması, zeminin sürekli bir ortam olarak kabul edilip zemin direncinin süreksiz yaylar ile modellenmesi, kazık geometrisinin doğrudan göz önüne alınmaması temel zemini reaksiyon yönteminin dezavantajları olarak sıralanabilir. p-y Eğri Yöntemi, temel zemini reaksiyon yöntemine benzer avantaj ve sınırlamalara sahiptir. p-y Eğri Yöntemi; kazığı elastik bir eleman olarak, zemini de nonlinear özellik gösteren bir seri yay olarak modellemektedir. Farklı olarak; p-y Eğri Yönteminde, zemin direnci kazık deplasmanının nonlinear bir fonksiyonu olarak göz önüne alınmakta ve elastik zemine oturan Winkler kirişi yaklaşımında zemin, deneysel olarak elde edilmiş

nonlinear özellikteki yaylar (p-y eğrileri) ile temsil edilmektedir (Brown ve Shie, 1990; Duncan ve ark., 1994; Fan ve Long, 2005).

Elastik analiz yönteminde zemin homojen, izotrop ve elastik davranış özelliğine sahip sürekli bir ortam olarak kabul edilmektedir. Eğer zemin kütlesi içerisinde tamamı ile elastik şartlar hakim ise, kazık uzunluğu boyunca kazığın ve zeminin yatay deplasmanları birbirine eşit olacaktır. Zeminin lineer elastik özellikte sürekli bir ortam olarak kabul edildiği bu yaklaşımda; kazık ve zemin ortamı ayrı ayrı analiz edilir ve iteratif bir işlem uygulanarak kazık-zemin ara yüzeyi boyunca kazık ve zemin için elde edilmiş olan ötelenme ve basınç değerlerinin birbiri ile eşleşmesi sağlanır. Zemin deplasmanları, yarı sonsuz bir kütle içerisinde tekil bir yatay yük nedeni ile bir noktada oluşan yatay deplasman değerinin belirlenmesi için Mindlin tarafından önerilen eşitliğe dayanılarak elde edilmektedir. Kazık deplasmanları hesaplanırken de kirişlerdeki eğilmeyi idare eden differansiyel denklem kullanılmaktadır. (Poulos, 1971; Poulos ve Davids, 1980, Laman ve ark., 1999). Yanal yüke maruz kazık davranışının analizi için geliştirilmiş mevcut yöntemler Çizelge 2.1’de karşılaştırılmıştır.

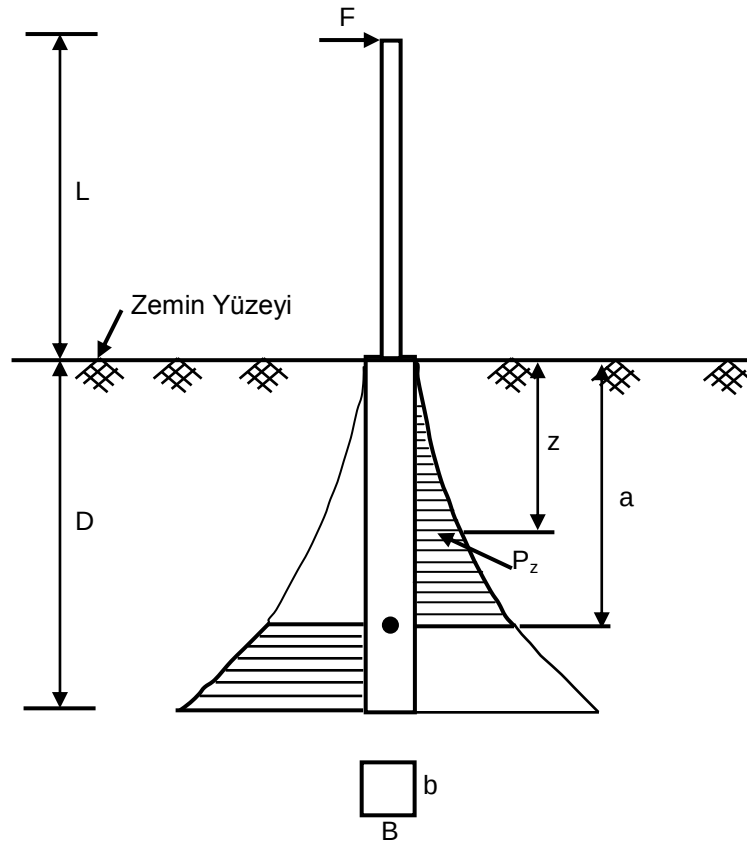
Temel zemini reaksiyon yöntemi, p-y eğri yöntemi ve elastik analiz yöntemi gömülü uzunluk / çap oranının büyük olduğu flexible kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin gömülü uzunluk / çap oranının küçük olduğu rijit kısa kazıkların davranışlarının tahmin edilmesinde kullanılması uygun değildir. Çünkü; iki farklı durum için iki farklı göçme mekanizması söz konusudur. Flexible (uzun) kazıklarda yanal yük etkisi altında kazıkta meydana gelen ötelenmeler sonucu kazık kesit alanının yenilme momentinin aşılması ile göçme meydana gelirken rijit kısa kazıklarda kazığın yanal yük etkisinde bir bütün şeklinde bir nokta etrafında dönerek zemine yaslanması ve zeminin taşıma gücünün aşılması söz konusudur. Rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitesi ile ilgili mevcut tasarım yöntemlerinin çoğunluğu tam ölçekli arazi deneyleri ya da laboratuvar model deneylerinden elde edilen deneysel bilgilere ya da oldukça basit limit durum yaklaşımlarına dayanmaktadır (Laman ve ark., 1999). Bu yöntemlerden en önemli olanları ayrıntılı bir şekilde aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

Çizelge 2. 1 Yanal Yüklü Kazık Analiz Yöntemleri ve Özellikleri (Kim ve ark., 2004)

Analiz Yöntemi	Analiz Yönteminin Özellikleri
Brinch-Hansen (1961)	• Kısa, rijit kazıklar için geliştirilmiştir. • Kil zeminlere, kum zeminlere ve tabakalı zeminlere uygulanabilir.
Broms (1964 a,b)	• Probleme kolaylıkla uygulanabilecek basit bir yöntemdir. • Uniform zemin şartlarında uygulanabilir.
Temel Zemin Reaksiyon Yöntemi (Winkler Modeli)	• Elastik zemine oturan kiriş kabulüne dayalıdır. • Kazıkta oluşan ötelenmeleri, eğilme momentlerini, kesme kuvvetlerini ve reaksiyonları hesaplayabilir. • Bu yöntem, zeminin nonlineer davranış özelliğini göz önüne almaz. • Temel zemin reaksiyon modülünün sağlıklı bir şekilde tanımlanabilmesinin zorluğu sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir. • Zeminin sürekli bir ortam olarak kabul edilmesine karşın zemin direncinin süreksiz yaylar ile modellenmesi yöntemin önemli dezavantajlarından birisidir.
p-y Eğri Yöntemi	• Elastik zemine oturan kiriş kabulüne dayalıdır. • Zemin yayları, nonlineer davranış özelliğine sahip olup, zemin tepkisi-kazık ötelenmesi (p-y) eğrileri ile temsil edilir. • Zeminin sürekli bir ortam olarak kabul edilmesine karşın zemin direncinin süreksiz yaylar ile modellenmesi yöntemin önemli dezavantajlarından birisidir. • Temel zemin reaksiyon modülünün sağlıklı bir şekilde tanımlanabilmesinin zorluğu sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir. • Uygulamada en yaygın kullanılan tasarım yöntemlerinden birisidir.
Elastik Ortam Yöntemi	• Zemin elastik davranış özelliğine sahip sürekli bir ortam olarak modellenir. • Zemin ortamı homojen ve izotropdur. • Elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu ya da derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı durumlar için çözüm üretebilmektedir. • Zemin modülünün sağlıklı bir şekilde tanımlanabilmesinin zorluğu sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir. • Problemin nonlineer doğası dikkate alınmamaktadır. • Mindlin eşitliklerine dayalıdır. • Tabakalı zeminlerde uygulanması zordur.

2.1.1. Brinch-Hansen (1961)

Brinch-Hansen (1961), nihai dayanım teorisi ve bir dönme noktasına dayalı olan bir tasarım formülü geliştirmiştir. Bu yöntem, hem üniform zeminlerde hem de tabakalı zeminlerde uygulanabilir. Yöntem temel olarak yanal zemin basıncı teorisine dayanmaktadır. Brinch-Hansen (1961) önerdiği yöntemde, ayrıca, kazık uzunluğu boyunca zemin direncinin değişimini de göz önüne almaktadır.



Şekil 2.1. Brinch-Hansen Yanal Zemin Basıncı Dağılımı (Laman, 1995)

Şekil 2.1’de D derinliğine çakılmış $B \times b$ kesit alanına sahip düşey bir kazık görülmektedir. Düşey kazık b genişliğine dik yönde etkiyen yatay bir F kuvvetine maruzdur. Yatay F kuvveti zemin yüzeyinden itibaren L yüksekliğinde etkimektedir. Zemin tabakası kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) sahip genel zemin durumunu ($c - \phi$ zemini) temsil etmektedir.

Kazığın çok sağlam olduğu ve uygulanan F kuvveti etkisinde kazıkta mafsallı oluşmadığı, kazığın rijit bir kütle olarak zemin yüzeyinden itibaren a kadar derinde bulunan bir nokta etrafında döndüğü kabul edilir. Bu kabule dayanılarak, göçme anında, o ana kadar oluşmuş olan elastik deformasyonlar ihmal edilmektedir.

Brinch-Hansen tarafından önerilmiş olan bu yöntemde dönme noktası derinliği deneme-yanılma işlemleri sonucu belirlenir. Dönme noktasının üstünde ve altında meydana gelen pasif zemin basınç alanlarının yanal yükün uygulandığı noktaya göre momentleri birbirine eşittir. İki basınç alanı arasındaki fark yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesini verecektir.

Zemin yüzeyinden itibaren herhangi bir z derinliğinde kazığa etkiyen pasif direncin değeri (2.1) eşitliğinde ifade edildiği gibidir.

$$P_z = \gamma z K_{qz} + c K_{cz} \quad (2.1)$$

P_z ; z derinliğindeki efektif örtü basıncı,

c; zeminin kayma mukavemetidir. Kısa süreli yüklemelerde drenajsız kayma mukavemeti c_u kullanılır.

K_{qz} , K_{cz} ; zemin özellikleri, z derinliği ve kazık genişliğine (çapına) bağlı pasif zemin basınç katsayılarıdır.

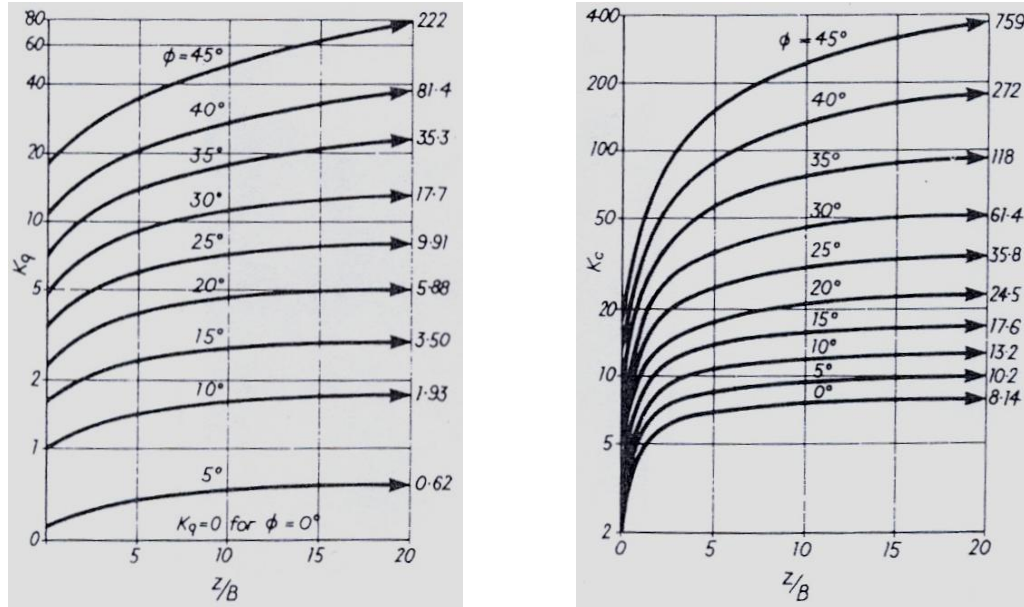
Brinch-Hansen (1961) tarafından önerilmiş olan K_{qz} ve K_{cz} katsayılarının değerleri grafikler halinde Şekil 2.2’de sunulmuştur.

Kohezyonsuz zemin içerisinde yer alan bir kazığın birim uzunluğuna etkiyen nihai zemin direncinin değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{ult.} = P_z K_{qz} B \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte yer alan;

B; kazığın genişliği ya da çapıdır.



Şekil 2.2. Brinch-Hansen Katsayıları K_q ve K_c 'nin Değerleri (Brinch Hansen, 1961)

2.1.2. Broms (1964)

Broms (1964); kohezyonsuz zeminler içerisinde yer alan çakma kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerini tahmin edebilmek için bir yöntem önermiştir. Broms (1964)'un önermiş olduğu bu yöntem kolay anlaşılır ve basit olması nedeni ile temel mühendisleri tarafından kule ve direk temellerinin tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde; yanal yük etkisine maruz kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin kazığı çevreleyen kohezyonsuz zeminin yanal yöndeki mukavemeti ya da kazık kesit alanının eğilme momenti taşıma kapasitesi tarafından kontrol edildiği kabul edilmektedir. Broms (1964) önermiş olduğu yöntemde; göçme anındaki yanal zemin basınçlarının pasif Rankine zemin basıncının üç katına eşit olduğunu ve yanal zemin basıncının yanal yüklenmiş kazığın kesit alanının şeklinden bağımsız olduğunu kabul etmiştir. Göçme anında kazığı çevreleyen zeminde pasif yanal direncin tamamı ile aktif hale geldiği diğer bir ifade ile kazığı çevreleyen zemindeki yanal zemin basınç değerinin pasif zemin basıncı değerine ulaştığı kabul edilmektedir. Yanal yüklü bir kazığın göçme şekli kazığın gömülü uzunluğuna ve

kazık başı sınır şartına bağlıdır. Serbest başlı rijit kısa bir kazığın göçme şekli ve göçme anındaki yanal zemin basıncı dağılımı Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir.

Zemin yüzeyinden z kadar bir derinlikte kazık birim uzunluğuna etkiyen zemin reaksiyonu, Q , aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

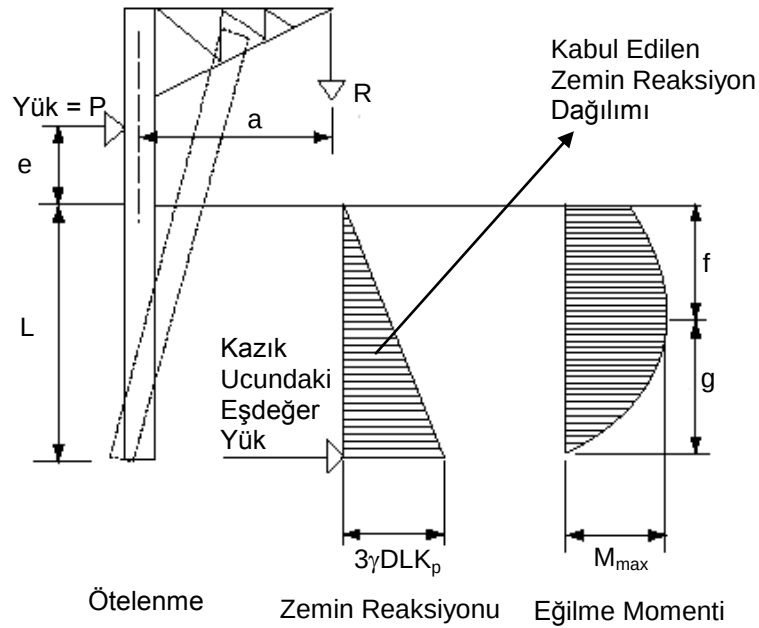
$$Q=3\gamma DzK_p \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte yer alan;

D ; kazık çapı,

γ ; zemin birim hacim ağırlığı,

K_p ; Rankine pasif zemin basınç katsayısı, $K_p=\tan^2(45+\phi/2)$.



Şekil 2.3. Serbest Başlı Rijit Kısa Kazık-Ötelenme-Zemin Reaksiyonu ve Eğilme Momenti Dağılımları (Broms,1964-Gunanaratne, 2006)

Göçme anında meydana gelmiş olan yanal ötelenmelerin, pasif Rankine zemin basıncının üç katına eşit olduğu kabul edilen yanal direncin oluşabilmesi için yeterli büyüklükte olduğu kabul edilmektedir. Kazık ucu civarında kazığın arka yüzeyinde etkiyen büyük değerdeki pasif zemin basınçlarının önerilen yöntemde

kazık ucunda etkiyen tekil bir yük olarak kabul edildiği belirtilmiştir. Yanal yüke maruz bir kazığın yanal yük taşıma kapasitesi kuvvetlerin dengesi prensibi göz önüne alınarak sisteme etkiyen kuvvetlerin kazık ucuna göre momentleri alınarak hesaplanır.

Sisteme etkiyen P ve R kuvvetlerinin kazık ucuna göre momenti M_d dir.

$$M_d = P(e+L)+Ra \quad (2.4)$$

Göçme anında kazık gömülü uzunluğu boyunca kazığa etkiyen yanal zemin basınçlarının kazık ucuna göre momenti M_r 'dir.

$$M_r = 0.50 \gamma D L^3 K_p \quad (2.5)$$

Göçme anında M_d ve M_r momentlerinin birbirine eşit olduğu kabul edilirse;

R=0 için

$$P = 0.50\gamma DL^3 K_p / (e+L) \quad (2.6)$$

P=0 için

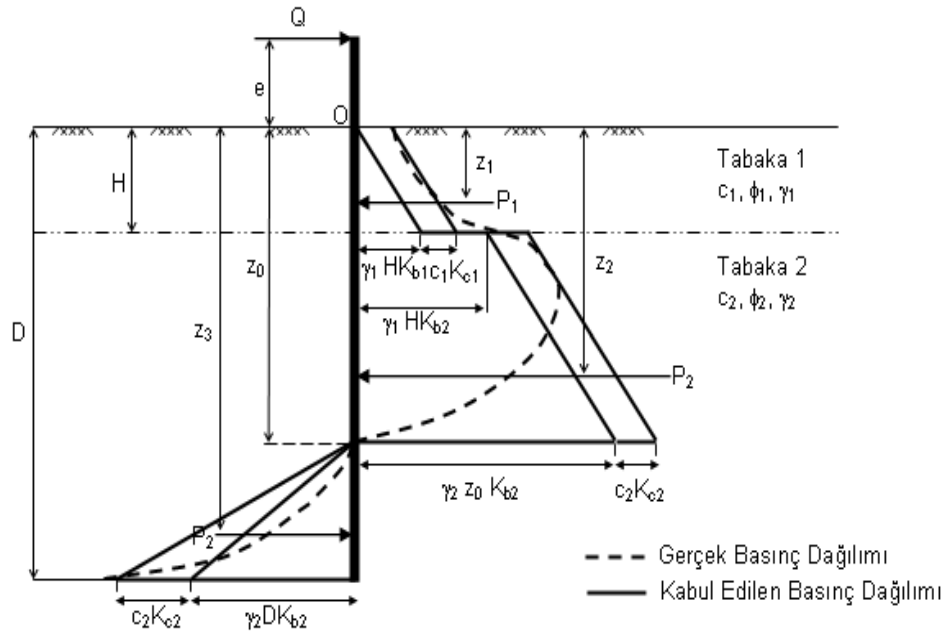
$$R = 0.50\gamma DL^3 K_p / a \quad (2.7)$$

Maksimum eğilme momenti zemin yüzeyinden f kadar derinde meydana gelmektedir. Meydana gelen maksimum eğilme momentinin kazık kesit alanının yenilme momenti değeri M_y 'den küçük olduğu kabul edilir.

$$f = 0.82 \sqrt{P / (\gamma D K_p)} \quad (2.8)$$

2.1.3. Meyerhof ve Ark. (1981)

Meyerhof ve ark. (1981) kum ve kil zemin tabakalarından oluşan iki tabakalı bir zemin kütlesi içerisinde yer alan yanal yüke maruz serbest başlı rijit bir duvarın nihai yanal yük taşıma kapasitesini ve yanal ötelenmesini araştırmışlardır. Homojen zemin kütlesi içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit duvarların yanal yük taşıma kapasiteleri ve yanal ötelenme değerlerini tahmin etmek için kullanılan mevcut teoriler tabakalı zemin durumu için geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan bu teorik yaklaşım şekil faktörleri kullanılarak modifiye edilmiş ve tabakalı zeminler içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Tabakalı Zeminde Göçme Anında Rijit Duvara Etkiyen Net Toprak Basıncının Dağılımı (Meyerhof ve ark., 1981)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi tabakalı bir zemin içerisine kısmen gömülü haldeki serbest başlı, pürüzlü, rijit bir duvar, duvar üst kotunda etkiyen yatay bir Q_u yüküne maruz kaldığında duvar dönme noktasının üst tarafında duvarın ön yüzünde

ve dönme noktasının altında duvar arka yüzünde pasif zemin basınçları oluşmaktadır. Duvar üzerinde etkili olan net zemin basıncı dağılımının her bir tabakada tabaka derinliği boyunca doğrusal olarak değiştiği ve bununla birlikte bir tabakadan diğerine geçerken süreksizlik gösterdiği kabul edilmektedir. Net zemin basıncının duvar gömülü uzunluğu boyunca dağılımı Coulomb teorisine göre tanımlanmıştır. Dönme noktasının altında duvar arka yüzünde etkili olan pasif zemin basıncının dağılımının kabaca bir üçgen olduğu kabul edilir. Duvar uç noktasında etkiyen maksimum pasif zemin basıncının değeri Coulomb teorisine göre hesaplanmaktadır.

Duvar birim genişliğine etkiyen nihai yanal yük değeri Q_u , şekil 2.4’de görülen yatay kuvvetlerin dengesi ve kuvvetlerin O noktasına göre momentleri alınarak elde edilebilir. Nihai yanal yük değeri hesaplanırken zemin birim hacim ağırlığı değeri olarak tabakaların birim hacim ağırlık değerlerinin ortalaması alınmaktadır.

$$\gamma = (\gamma_1 + \gamma_2) / 2 \quad (2.9)$$

$$Q_u = \gamma D^2 K_{b2} F_b r_b + c_2 D K_{c2} F_c r_c \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte yer alan;

Q_u ; duvar birim genişliğine etkiyen nihai yanal yük değeri,

D ; duvar gömülü uzunluğu,

F_b, F_c ; sırası ile zeminin ağırlığı ve kohezyonu için yanal direnç faktörleridir. Üst tabaka kalınlığının duvar gömülü uzunluğuna oranı H/D ’ye ve zemin tabakalarının rölatif yanal dirençleri arasındaki orana bağlı olarak tabakalı zeminlerin farklı tabakalaşma durumları için grafikler halinde tanımlanmıştır.

K_b, K_c ; sırası ile kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminlerdeki yanal zemin basınç katsayılarıdır.

$$K_b = \tan^2 (45+\phi/2) - \tan^2 (45-\phi/2)$$

$$K_c = 2\tan(45+\phi/2)$$

c ; kohezyon,

r_b, r_c ; $M = Q_u e$ momentinin etkisini göz önüne alan azaltma faktörüdür.

$$r_b = 1/(1+1.40e/D)$$

$$r_c = 1/(1+1.90e/D)$$

e ; yatay yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliğidir.

Kohezyonsuz zemin durumunda ($c=0$) 2.10 eşitliği aşağıda belirtildiği gibi elde edilir.

$$Q_u = \gamma D^2 K_{b2} F_b r_b \quad (2.11)$$

Homojen kum zemin içerisinde yer alan serbest başlı rijit düşey bir kazığın nihai yanal yük taşıma kapasitesi s_{bu} şekil faktörü kullanılarak rijit duvarlar için elde edilmiş yaklaşımdan hareketle hesaplanabilir. s_{bu} şekil faktörü, yanal yüke maruz rijit duvarlar için önerilmiş olan eşitlik ile çarpılarak yanal yüke maruz serbest başlı rijit kazığın yanal yük taşıma kapasitesini tahmin eden ifade elde edilebilir.

$$Q_u = B(\gamma D^2 K_b F_b r_b s_{bu}) \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte yer alan B , kazık çapı ya da kazık genişliğini ifade etmektedir.

Tabakalı bir zemin içerisinde yer alan serbest başlı rijit düşey bir kazığın yanal yük taşıma kapasitesi ise s_b ve s_c şekil faktörleri kullanılarak elde edilmektedir. Çapı veya genişliği B olan bir kazığın yanal yük taşıma kapasitesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak tahmin edilebilir.

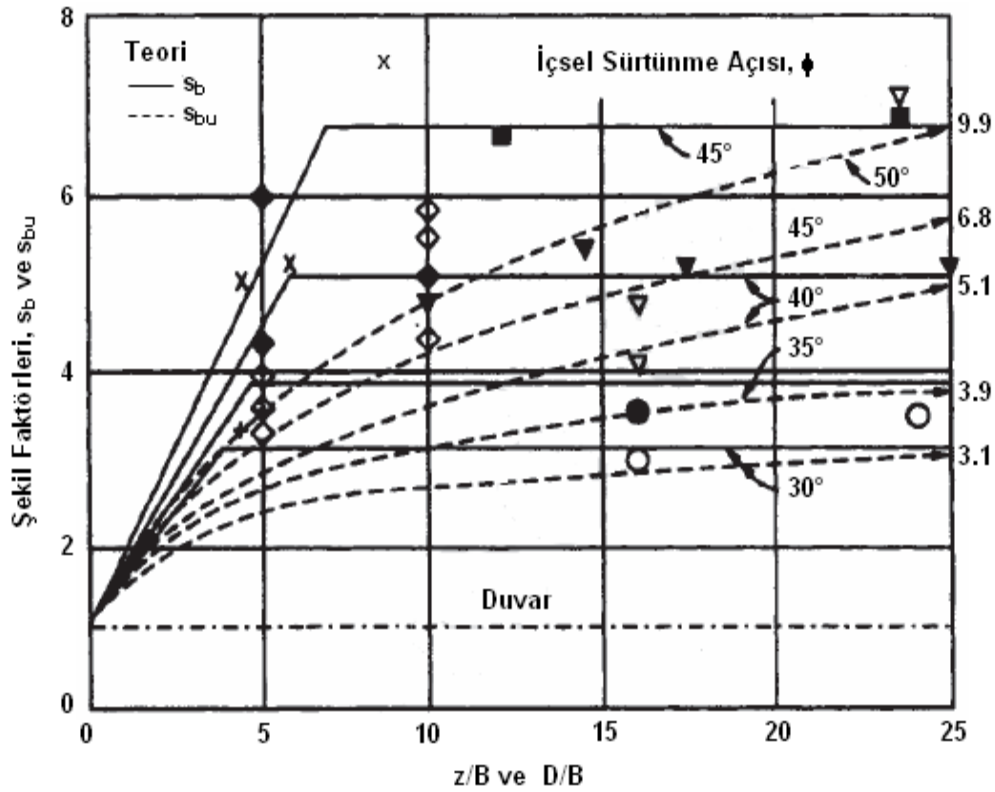
$$Q_u = (\gamma D^2 K_{b2} F_b r_b s_b + c_2 D K_{c2} F_c r_c s_c)B \quad (2.13)$$

İki tabakalı zemin durumunda yanal direnç faktörleri F_b ve F_c 'nin değerlerinin tanımlanması için rölatif direnç değerleri $K_{b1}s_{b1} / K_{b2}s_{b2}$ ve $c_1K_{c1}s_{c1} / c_2K_{c2}s_{c2}$ kullanılır. Rölatif direnç oranları hesaplanırken kullanılan şekil faktörleri s_b ve s_c , üstte yer alan tabaka için $z/B=H/2$, altta yer alan tabaka için de $z/B = (D+H)/2$ ortalama derinliğinde tanımlanmaktadır.

Şekil faktörleri s_{bu} , s_b ve s_c , z/B , D/B ve içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olarak homojen ve tabakalı kum zeminler için Şekil 2.5’de grafik halinde sunulmuştur.

Homojen kum zemin içerisinde yer alan rijit bir kazığın birim uzunluğuna etkiyen nihai yanal zemin direncinin değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ult.} = \gamma z K_b s_{bu} B \quad (2.14)$$



Şekil 2.5. Kum Zemindeki Yanal Yüklü Rijit Bir Kazık için Şekil Faktörleri (Meyerhof ve ark., 1981)

2.1.4. Prasad and Chari (1999)

Prasad ve Chari (1999) yapmış oldukları deneysel çalışmada rijit bir model kazığın uzunluğu ve genişliği boyunca gerçek zemin basınç dağılımlarını ölçmüşlerdir. Prasad ve Chari (1999) çalışma sonucunda kohezyonsuz zeminlerde

yer alan rijit kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerini ve rijit kazıklara etkiyen zemin basınç dağılımını tahmin etmek için bir yöntem önermişlerdir.

Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilen yöntemde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara dayanılarak yanal basıncın derinlik boyunca değişimi Şekil 2.6'da görüldüğü gibi idealize edilmiştir. Pasif zemin basıncının zemin yüzeyindeki değeri sıfırdır. Şekil 2.6'da görülen x derinliği dönme noktasının zemin yüzeyine olan uzaklığını göstermektedir. Yanal zemin basıncı lineer bir şekilde artarak dönme noktası derinliğinin %60'ı derinlikte maksimum değerine ulaşmaktadır. $0.6x$ derinliğinde maksimum değerine ulaşan yanal zemin basıncı bu derinlikten sonra lineer bir şekilde azalarak dönme noktası derinliğinde sıfır olur. Dönme noktası derinliğinin altında pasif zemin basıncı kazığın arka yüzünde etkimeye başlar. Yanal basıncın değeri dönme noktasında sıfır iken derinlik ile birlikte lineer olarak artıp kazık ucunda maksimum bir değere ulaşır. Kazık ucunda etkiyen yanal basıncın değeri $0.6x$ derinliğinde etkiyen basınç değerinin 1.7 katı büyüklüğündedir. Kazığın ön yüzünde etkiyen maksimum pasif zemin basıncının değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{0.6x} = s K_p \gamma 0.6 x \quad (2.15)$$

Bu eşitlikte;

s ; şekil faktörü,

K_p ; Rankine pasif zemin basınç katsayısı, $K_p = \tan^2 (45 + \phi/2)$,

x ; dönme noktası derinliğidir.

Hem şekil faktörü s hem de K_p katsayısı içsel sürtünme açısı ϕ 'nin fonksiyonu olup aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$sK_p = 10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)} \quad (2.16)$$

Rijit kısa kazıkların dönme noktası derinliği ve yanal yük taşıma kapasiteleri 2.17 ve 2.18 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$x = [-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}] / 2.1996 \quad (2.17)$$

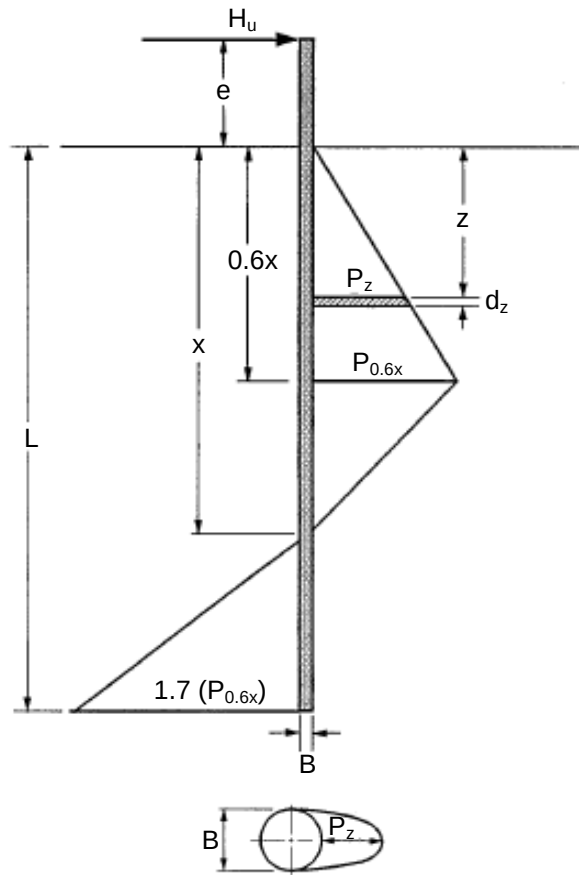
$$Q_u = 0.24 [10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)}] \gamma \times B \{2.7a - 1.7L\} \quad (2.18)$$

Bu eşitliklerde yer alan;

L = kazık gömülü uzunluğu,

e = yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliği,

x = dönme noktası derinliğidir.



Şekil 2.6. Önerilen Zemin Basınç Dağılımı (Prasad ve Chari, 1999)

Bununla birlikte; dairesel bir kazıkta kazığın şeklinden dolayı kazığa etkiyen yanal zemin basıncının değeri kazık kenarlarında muhtemelen sıfır veya sıfıra yakın bir değer iken, kazık merkezine karşılık gelen yüzeyde basınç değeri pik bir değerdir.

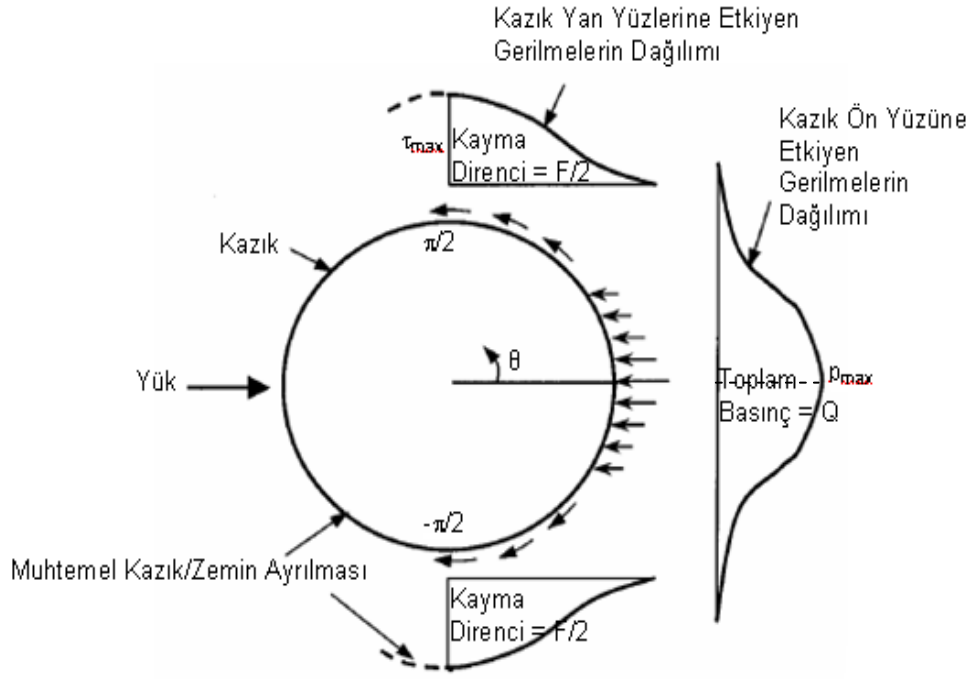
Bu durum; Prasad ve Chari (1999) tarafından kazık çevresindeki farklı lokasyonlara basınç transduserleri yerleştirmek sureti ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Kazığın yanal yük taşıma kapasitesi teorik olarak hesaplanırken kazık genişliği boyunca üniform olmayan bu basınç dağılımının dikkate alınması gerekmektedir. Değişken basınç dağılımı ortalama üniform bir basınç dağılımı şeklinde düşünülmüştür. Ortalama üniform basınç değeri ölçülen pik basınç değerinin 0.8 katıdır.

Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilmiş olan basınç dağılımında kazığın ön yüzündeki maksimum pasif basınç noktası, sadece, üniform kohezyonsuz zeminlerde yer alan rijit model kazıklar üzerinde yürütülmüş deney sonuçlarına dayanılarak geliştirildiğinden yöntem sadece üniform kohezyonsuz zeminler içerisinde yer alan rijit kısa kazıklara uygulanabilir. Bununla birlikte önerilen eşitlikler içsel sürtünme açısının ϕ , 30° ile 50° derece arasında olduğu durumlar için geçerlidir.

2.1.5. Zhang ve ark. (2005)

Zhang ve ark. (2005) yapmış oldukları çalışmada ilk olarak kohezyonsuz zeminler içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıkların nihai yanal yük taşıma kapasitelerini tahmin etmek için kullanılan mevcut tasarım yöntemlerini incelemişlerdir. Kazık genişliği boyunca yanal zemin direncinin dağılımı analiz edilerek, literatürde yayınlanmış, kohezyonsuz zeminlerdeki rijit kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiş, sekiz adet model deneyin sonuçlarına dayanılarak basit bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntem zeminin nihai taşıma gücünü dikkate aldığından hem rijit hem de flexible kazıklar için uygulanabilir.

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, kazığın yanal yöndeki hareketine karşı zeminin göstermiş olduğu direnç iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilki; kazığın ön yüzüne etkiyen normal reaksiyon direnci, ikincisi ise kazığın kenar yüzlerinde etkili olan kayma direncidir.



Şekil 2.7. Yanal Yüke Maruz Kazığa Etkiyen Normal ve Kayma Gerilmelerinin Dağılımı (Zhang ve ark., 2005)

Zemin tarafından kazığa uygulanan nihai yanal direnç, P_u , aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir;

$$P_u = Q + F \quad (2.19)$$

Q = Kazığın ön yüzüne dik (normal olan) olarak etkiyen nihai zemin direncinin net değeri,

F = Nihai yanal kayma direncinin (kazık yüzeyine teğet kenar-zemin sürtünmesi) net değeri.

Q ve F ifadeleri birim uzunluğa etkiyen kuvvetlerdir. Q ve F ifadeleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile elde edilirler.

$$Q = \eta P_{\max} B \quad (2.20)$$

$$F = \xi \tau_{\max} B \quad (2.21)$$

Bu eşitliklerde yer alan parametrelerden;

B : Kazık çapı,

η : Kazığın ön yüzünde etkiyen ve üniform olmayan bir dağılım gösteren zemin basıncı için şekil faktörü,

ξ : Yanal kayma sürüklenme direncinin üniform olmayan dağılımı için şekil faktörü,

$P_{\max} \rightarrow \theta = 0$ daki maksimum zemin basıncı değeri,

$\tau_{\max} \rightarrow \pm \pi/2$ deki maksimum kenar kayma direncidir.

η ve ξ şekil faktörleri kullanılarak basınç dağılımları üniform hale getirilmektedir. Briaud ve Smith (1983)'e göre; η ve ξ 'nin değerleri aşağıdaki gibi alınabilir;

Dairesel Kazık için; $\eta = 0.8$ ve $\xi = 1.0$

Kare Kesitli Kazık için; $\eta = 1.0$ ve $\xi = 2.0$

(2.20) ve (2.21) eşitlikleri (2.19) eşitlikliğinde yerine konacak olursa; zemin tarafından kazığa uygulanacak yanal direnç, P_u , aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$P_u = (\eta P_{\max} + \xi \tau_{\max}) B \quad (2.22)$$

$P_{\max}$ ve $\tau_{\max}$ ifadelerinin elde edilmesine yönelik de bir çalışma yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre $P_{\max}$ ve $\tau_{\max}$ ifadelerinin en doğru ve güvenilir olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilecekleri belirtilmiştir;

$$P_{\max} = K_p^2 \gamma z \quad (2.23)$$

$$\tau_{\max} = K \gamma z \tan \delta \quad (2.24)$$

K : Yanal zemin basınç katsayısı,

δ : Zemin ve kazık arasındaki ara yüzey sürtünme açısıdır. δ değeri; zemin tipi ve sıklığının bir fonksiyonudur.

Hem kazığın ön yüzüne etkiyen zemin direnci hem de kazığın kenarlarında etkili olan kayma direnci için Şekil 2.8’de görülen Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilmiş olan basınç dağılımının şekli kullanılmıştır. 2.25 ve 2.26 eşitlikleri; kohezyonsuz zeminlerdeki rijit deney kazıklarının (arazi ve laboratuvar) yanal yük taşıma kapasitelerini belirlemede kullanılır. Eşitliklerde yer alan K ve δ katsayıları Kulhawy ve ark. (1983) ve Kulhawy (1991) tarafından Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’de önerilmiş olan değerler kullanılarak elde edilmektedir.

$$a = [-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}] / 2.1996 \quad (2.25)$$

$$H_u = 0.3(\eta K_p^2 + \xi K \tan \delta) \gamma a B (2.7a - 1.7L) \quad (2.26)$$

Çizelge 2.2 Kulhawy ve ark. (1983) ve Kulhawy (1991) Tarafından Önerilmiş Olan K Katsayısı Değerleri (Zhang ve ark., 2005)

Kazık Tipi ve İmalat Yöntemi	K
Pile-jetted	(0.5-0.7) K_0
Küçük deplasman kazığı, çakma kazık	(0.7-1.2) K_0
Büyük deplasman kazığı, çakma kazık	(1.0-2.0) K_0
Kuru yöntem kullanılarak yapılan, kuyu çeperlerindeki örselenmenin minimum olduğu ve betonlamanın çabuk yapıldığı fore kazık	(0.9-1.0) K_0
İyi bir işçilikle sulu harç yöntemi ile yapılan fore kazık	(0.9-1.0) K_0
Kötü bir işçilikle sulu harç yöntemi ile yapılan fore kazık	(0.6-0.7) K_0
Yeraltı su seviyesi altında muhafaza borusu kullanılarak yapılan fore kazık	(0.7-0.9) K_0

K_0 = Sükunetteki toprak basınç katsayısıdır. $K_0 = 1 - \sin \phi'$.

Çizelge 2.3 Kulhawy ve ark. (1983) ve Kulhawy (1991) Tarafından Önerilmiş Olan δ Katsayısı Değerleri (Zhang ve ark., 2005)

Kazık Tipi	δ
Sürtünmeli beton kazık	$1.0\phi'$
Sürtünmesiz, pürüzsüz (prefabrik kazık)	$(0.8-1.0)\phi'$
Sürtünmeli çelik (enkesiti adım adım incelen kazık)	$(0.7-0.9)\phi'$
Sürtünmesiz, pürüzsüz (boru kazık ya da H kazık)	$(0.5-0.7)\phi'$
Ahşap kazık	$(0.8-0.9)\phi'$
Kuru yöntem ya da geçici muhafaza borusu kullanılarak iyi bir işçilikle yapılmış olan fore kazık	$1.0\phi'$
Sulu harç yöntemi ile yapılan fore kazık	$(0.8-1.0)\phi'$

Anlatılan analitik yöntemler karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Rijit Kısa Kazıkların Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Tahmin Edilmesinde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması

Analitik Yöntem	Yapılan Kabuller	Tanımlamalar	Avantajları	Sınırlamaları
Brinch Hansen (1961)	Toprak basıncı teorisine dayanmaktadır. Zemin direncinin kazık uzunluğu boyunca değişimi doğrusal değildir. Kazık rijit bir kütle olarak a kadar derinde bulunan bir nokta etrafında dönmektedir.	Dönme noktasının derinliği deneme-yanılma işlemleri sonucunda bulunur. Dönme noktasının altında ve üstünde kalan basınç alanlarının yanal yükün uygulandığı noktaya göre momentleri birbirine eşittir.	Genel zemin durumunda (c, ϕ) uygulanabilir. Tabakalı zemin durumunda uygulanabilir.	Sadece rijit kısa kazıklara uygulanabilir. Dönme noktasının yeri deneme-yanılma işlemleri sonucunda bulunur. Gerilme kazık genişliği boyunca uniform dağılıyor. Hesaplamalar kazık en kesit şeklinden bağımsızdır.
Broms (1964)	Göçme anında zemindeki pasif direncin tam anlamıyla aktif halde olduğu kabul edilir. Göçme anındaki yanal toprak basıncı pasif Rankine toprak basıncının üç katına eşittir. Dönme noktası kazık ucu civarındadır.	Yanal yük taşıma kapasitesi kuvvetlerin dengesi prensibi göz önüne alınarak sisteme etkiyen kuvvetlerin kazık ucuna göre momentleri alınarak hesaplanır. Maksimum momentin meydana geldiği derinlik tanımlanmıştır.	Basit ve kolay anlaşılır bir yöntemdir. Kazık başı sınır şartlarını göz önüne alır. Teori kısa ve uzun kazıkları kapsamaktadır.	Sadece tek kazıkları ele alır. Tabakalı zemin durumunda ve genel zemin durumunda (c, ϕ) uygulanamaz. Sadece kum ya da sadece kil zemin gibi homojen zemin profili durumunda uygulanabilir. Gerilme kazık genişliği boyunca uniform dağılıyor. Hesaplamalar kazık en kesit şeklinden bağımsızdır.
Meyerhof ve ark. (1981)	Duvaya etkiyen net toprak basıncı dağılımını dikkate alır. Net toprak basıncı dağılımının her bir tabakada derinlik boyunca doğrusal olarak değiştiği kabul edilir.	Homojen zemin kütesi içerisinde yer alan yanal yük maruz rijit duvarların yanal yük taşıma kapasitelerini tahmin etmek için kullanılan mevcut teoriler modifiye edilerek tabakalı zeminler içerisinde yer alan yanal yük maruz rijit kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri tahmin edilmiştir. Sisteme etkiyen kuvvetlerin zemin yüzeyine göre momentleri alınarak kuvvetlerin dengesi prensibinden yanal yük taşıma kapasitesi belirlenir.	Homojen ve tabakalı zemin durumunda uygulanabilir.	Özellikle tabakalı zemin durumunda hesaplamalarda çok fazla değişken kullanılıyor olması hesaplamaları karmaşılaştırılmaktadır. Gerilme kazık genişliği boyunca uniform dağılıyor. Hesaplamalar kazık en kesit şeklinden bağımsızdır.
Prasad ve Charl (1999)	Yanal toprak basıncı doğrusal bir şekilde artarak dönme noktası derinliğinin %60' ı derinlikte maksimum değerine ulaşmaktadır. Kazık ucunda etkiyen yanal basıncın değeri dönme noktası derinliğinin %60' ı derinlikteki maksimum basınç değerinin 1,70 katıdır. Yanal toprak basıncının değeri dönme noktasında sıfırdır.	Kum zemin içerisinde yer alan rijit model bir kazığın uzunluğu ve genişliği boyunca gerçek zemin basınç dağılımlarını model deney çalışmaları ile ölçmüşlerdir.	Kolay anlaşılır ve basit bir yöntemdir. Kazık uzunluğu ve kazık genişliği boyunca gerçek zemin basınç dağılımları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Kazık genişliği boyunca uniform olmayan basınç dağılımı dikkate alınmaktadır.	Sadece uniform kum zeminler içerisinde yer alan rijit kısa kazıklara uygulanabilir. Önerilen ifadeler içsel sürtünme açısı ϕ 'nin 30° ile 50° arasındaki değerleri için geçerlidir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Yanal yük etkisine maruz kazıkların davranışlarının araştırılmasında kullanılan mevcut deneysel yöntemler tam ölçekli arazi yükleme deneyleri ve küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilirler. Laboratuvar model deneyleri de kendi arasında klasik laboratuvar model deneyleri (1g model deneyler) ve centrifuge laboratuvar model deneyleri (Ng model deneyler) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Centrifuge modelleme tekniği, prototip ve model arasında gerilme benzerliği ($\sigma_{\text{prototip}} = \sigma_{\text{model}}$) sağlayabilen bir model deney yöntemidir. Bu gerilme benzerliği $1/N$ ölçeğindeki bir modelin yerçekimi ivmesi g 'nin N katı bir ivme ile hızlandırılması ile sağlanmaktadır.

Arazi deneylerinde, zemin ortamı ve temel sistemi prototip boyutlarında kullanıldığından ve yükleme doğal arazi şartlarında gerçekleştirildiğinden elde edilen sonuçlar son derece güvenilirdir. Arazi yükleme deneylerinde elde edilmiş olan değerler deneyin gerçekleştirildiği zemin durumu ve yükleme koşulları için geçerlidir. Bu yüzden; bazı basitleştirmeler yapılarak, elde edilen sonuçların genelleştirilmesi hatalara yol açabilir. Projenin uygulanacağı her arazide tam ölçekli yükleme deneylerinin yapılarak sistem davranışının tahmin edilmesi en güvenilir ve en doğru sonucu verecek yoldur. Ancak; arazi deneylerinin maliyetlerinin yüksek olması, deney sisteminin kurulmasının çok fazla zaman ve işgücü gerektirmesi, parametrik çalışma yapılabilmesinin çok zor oluşu, bilgi ve tecrübe yönünden birikimli insanların oluşturduğu iyi bir ekiple gerçekleştirilme zorunluluğu gibi nedenlerden dolayı arazi yükleme deneyleri çok sık yapılamamaktadır.

Küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri; deney düzeneğinin sınırlı bir zaman dilimi içerisinde rahatlıkla kurulabilmesi, maliyetlerinin arazi deneylerine göre oldukça düşük olması, parametrik çalışma yapılabilmesine olanak tanınması ve böylelikle sistem davranışının farklı yönlerden ele alınabilmesine imkan vermesi, deney sistemi ve model zemin şartlarının daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi gibi avantajları ile arazi yükleme deneylerine alternatif olarak uygulanmaktadır.

Laboratuvar model deney çalışmalarında kullanılan model temel belli bir ölçekte küçültülmüş olmasına rağmen kullanılan model zemin prototip boyutlarındadır. Bu nedenle; model temel ya da model zemin prototip boyutlardaki davranışının aynısını sergileyemeyeceğinden, deney sonuçları üzerinde ölçek etkisi olarak adlandırılan bir etki oluşacaktır (Sawwaf, 2006). Klasik model deney (1g) sonuçlarına dayanılarak prototip boyutlardaki temellerin davranışlarının tahmin edilmesi ölçek etkisinin varlığından dolayı hatalı sonuçlar verebilmektedir. Centrifuge model deneyleri (Ng), prototip ve model arasında gerilme benzerliği sağlayabildiğinden, prototip gerilme seviyeleri altında model deneyler yapılabilmesine imkan vermektedir. Bununla birlikte; centrifuge model deneylerde (Ng), model sistemin oluşturulması ve yüklemenin yapılmasının centrifuge deney düzeneği deney ivmesinde (Ng) hareket halinde iken gerçekleştirilmesi ile sistemin 1g durumda oluşturulup yüklemenin Ng durumunda yapılması durumunda gözlenen davranışlar arasında farklılıklar olabilmektedir.

Model deney çalışmalarında; gerçekleştirilen her bir model deneyde model zeminin birim hacim ağırlıkları ve relatif sıklıkları arasında sürekli bir uyumun bulunması deneysel sonuçların güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Bu yüzden model zeminin deney kasasına yerleştirilmesi işlemi deney sonuçları açısından çok önemlidir.

2.2.1. Arazi Deneyleri

Brown ve ark. (1988) yapmış oldukları bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan kazık gruplarının çevrimsel yanal yük etkisi altındaki davranışlarını büyük ölçekli arazi yükleme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Yükleme deneyleri, karşılaştırma amaçlı olarak tek kazık üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneyleri, aralarında üç kazık çapı mesafe bulunan 3x3 dizilimindeki kazık grubu üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda çelik boru kazıklar kullanılmıştır. Grup içerisinde yer alan her bir kazık donatılarak grup yanal yük taşıma kapasitesinin her bir kazık tarafından nasıl paylaşıldığı ve her bir kazığın uzunluğu boyunca eğilme momenti dağılımlarının nasıl oluştuğu belirlenmiştir. Yapılan

deneysel çalışmalar sonucunda; grup içerisindeki bir kazık başına düşen ortalama yanal yük değerinde grup içerisindeki kazığın yanal ötelenmesinin aynı yanal yük değerine maruz tek kazığın yanal ötelenmesinden oldukça fazla olduğu görülmüştür. Yanal yüke maruz bir kazık grubunda grup verimliliğinin azalmasının başlıca nedeninin shadowing olarak adlandırılan gölgeleme etkisi olduğu belirtilmiştir. Gölgeleme etkisi; grup içerisindeki kazıkları çevreleyen zeminde yanal yükleme etkisinde oluşan gerilme bölgelerinin çakışmasından dolayı yanal temel zemini reaksiyon modülü ve kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin azalması olarak açıklanmaktadır. Kazık grubunda arka sırada yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri ön sırada yer alan kazıkların etkisinden dolayı oldukça düşüktür. Yanal yük etkisindeki bir kazık grubunda ön sırada yer alan kazıkların her birine düşen yanal yük değerinde kazıkta meydana gelen eğilme momenti dağılımları aynı değerdeki yanal yüke maruz tek kazığinki ile çok benzerdir. Grup yanal yük taşıma kapasitesinin büyük bölümü ön sırada yer alan kazıklar tarafından karşılandığı için herhangi bir yanal yük değerinde maksimum eğilme momentleri de bu sırada yer alan kazıklarda meydana gelir. Kazık gruplarında, ön sırada yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitesindeki azalma oldukça azdır. Grup etkisinden dolayı grup içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitesindeki azalmayı ifade eden en güvenilir yollardan birisi p-multiplier yaklaşımının kullanılmasıdır. Bu yaklaşımda; tek kazığa ait p-y eğrileri sabit değerdeki bir katsayı ile çarpılarak modifiye edilmektedir.

Ruesta ve Townsend (1997) tarafından yapılan bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan tek kazık ve kazıklar arasında üç kazık çapı mesafenin bulunduğu 16 kazıktan oluşan 4x4 dizilimindeki bir kazık grubunun yanal yük etkisi altındaki davranışları arazi yükleme deneyleri yapılarak araştırılmıştır. Deneyin yapılacağı sahada zemin profilinin belirlenmesi ve p-y eğrilerinin oluşturulmasında kullanılacak zemin özelliklerinin tanımlanması için standart penetrasyon (SPT), koni penetrasyon (CPT), dilatometre (DMT) ve presyometre (PMT) arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda donatılmış kazıklardan elde edilmiş olan deformasyon verileri kullanılarak deneysel p-y eğrileri elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada; mevcut sonlu elemanlar programı FLPIER' in doğrulanması

için yük-deplasman-eğilme momenti verilerinin elde edilmesi, kazık grubu için gerekli p-multipliers katsayılarının tanımlanması ve deneysel p-y eğrilerinin elde edilmesinde hangi arazi deneyinin (SPT, CPT, DMT ve PMT) daha efektif olduğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kazık grubunda ön sırada yer alan kazıkların uygulanan yanal yükün büyük bir bölümünü taşıdığı ve tek kazığın davranışına oldukça benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca; bir kazık sırasında dış tarafta yer alan kazıkların ortada yer alan kazıklardan daha fazla yanal yük taşıdıkları belirtilmiştir. Kazık grubunda yer alan kazık sıraları için p-multipliers katsayılarının değerleri ön sıra için 0.8, ikinci sıra için 0.7, üçüncü ve arka sıra için de 0.3 olarak belirlenmiştir. SPT deneyine dayanılarak elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri Reese ve ark. (1974)' nın kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıklar için önermiş olduğu p-y eğri yaklaşımında kullanıldığında oldukça uygun nihai zemin direnci değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bununla birlikte; SPT deneylerine dayanılarak tahmin edilmiş olan temel zemini reaksiyon katsayısı değerlerinin muhafazakar tarafta kaldığı belirtilmiştir.

Anderson ve ark. (2003) tarafından yapılan bu çalışmada; kazık temeller üzerinde gerçekleştirilen tam ölçekli yanal yükleme deneyleri ile ilgili yedi vaka analizi üzerinde inceleme yapılarak yanal yüke maruz kazık temellerin davranışlarının tahmin edilmesinde hangi arazi deneyinin daha efektif olduğu araştırılmıştır. Arazi deneyleri olarak standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT), dilatometre deneyi (DMT) ve presyometre (PMT) deneyi yapılmıştır. Her bir deney sahasında adı geçen arazi deneylerine ait deneysel veriler bulunmaktadır. Birinci yaklaşım olarak; SPT ve CPT deney verileri bu deneylere dayanılarak geliştirilmiş korelasyonlarda kullanılarak geleneksel p-y eğri yöntemleri için gerekli olan zemin parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra, SPT ve CPT deneylerine bağlı p-y eğrileri çizilmiştir. İkinci yaklaşım olarak da p-y eğrileri, DMT ve PMT deneylerinde ölçülen gerilme-deformasyon verileri kullanılarak direk olarak elde edilmiştir. Arazi deneylerine bağlı olarak elde edilen p-y eğrileri, tam ölçekli yükleme deneylerinde ölçülen verilere dayanılarak elde edilmiş olan deneysel p-y eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; SPT korelasyonlarına

dayalı tahminlerin bütün yükleme kademelerinde güvenli tarafta kalan (muhafazakar) sonuçlar verdiği görülmüştür. Nihai yanal yükün %25'i seviyelerindeki düşük yük değerlerinde DMT deneyine bağlı olarak elde edilen p-y eğrileri arazi davranışını iyi bir şekilde tahmin ederken yüksek değerdeki yanal yük seviyelerinde yapılan tahminlerin güvenilir olmadığı belirtilmektedir. Bu sonuç beklenen bir durumdur, çünkü; DMT membranı zemin içerisine doğru sadece 1 mm lik bir yanal deformasyon yapabilmekte bu nedenle de büyük deformasyon değerlerindeki zemin yumuşaması modellenememektedir. Arazi davranışını en iyi CPT deneylerinin tahmin ettiği bununla birlikte; PMT deneyine dayalı olarak yapılan tahminlerin ise kullanılan arazi deney yöntemleri arasındaki en tutarsız sonuçları verdiği belirtilmiştir.

Zhang (2003) tarafından yapılmış olan bu çalışmada; Hong Kong' da iki baret temel üzerinde gerçekleştirilmiş olan tam ölçekli yanal yükleme deneylerine ait sonuçlar aktarılmaktadır. Bu çalışmanın amacı; büyük kesitli baret temellerin yanal yük etkisi altındaki davranışlarının araştırılması, baret temelin imal edildiği malzemeler olan beton ve donatı çeliğinin non-lineer davranış özelliklerinin dikkate alınarak konu edilen iki deney baretinin davranışlarının modellenmesi ve baret temellerin yanal yüke karşı tepkileri üzerinde yükleme doğrultusunun etkisinin araştırılmasıdır. Deney baretlerinin yanal yüke karşı göstermiş olduğu tepkiyi modelleyebilmek için beş farklı yükleme doğrultusu göz önüne alınarak zemin davranışı non-lineer p-y eğrileri ile baret temel davranışı da non-lineer gerilme-deformasyon ilişkileri ile tanımlanmıştır. Yanal yüklenmiş baret temellerin non-lineer tepkileri üç boyutlu sonlu elemanlar programı FLPIER kullanılarak analiz edilmiştir. Deney baretlerinden ilki üzerinde üç seri yanal yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler; deplasman kontrollü çevrimsel yükleme deneyi, yük kontrollü çevrimsel yükleme deneyi ve statik yükleme deneyidir. İkinci deney baretini üzerinde ise iki tane statik yükleme deneyi yapılmış olup, bu deneylerin ilkinde yanal yük major eksen doğrultusunda, ikincisinde ise minor eksen doğrultusunda uygulanmıştır. Baret temellerin yanal yük taşıma kapasitesi uygulanan yanal yükün doğrultusuna bağlı olup temel kesitinin eğilme rijitliği tarafından kontrol edilmektedir. Uygulanan yanal yükün büyüklüğü arttıkça baret temel

uzunluğu boyunca ötelenmenin sıfır olduğu nokta aşağıya doğru kaymasına rağmen belirli bir derinliğin altında bütün yük kademelerindeki ötelenmelerin çok küçük değerlerde oldukları görülmüştür. Bu durum ise baret temellerin büyük kesit alanına sahip olmasına karşın flexible bir kazık gibi davrandığını göstermektedir. Büyük yanal yük değerlerinde baret temellerin tepkisi non-lineerdir. Baret temellerin yanal yük taşıma kapasitesi; hem baret kesitinde meydana gelecek olan çatlaklar hem de zeminin kayma mukavemetine bağlı olarak sınırlıdır. Büyük eğilme momenti değerlerinde kazık kesitinde çatlakların oluşması kazığın eğilme rijitliği $E_p I_p$ ' yi azalacaktır. Baret kesitinde çatlakların oluşması ile birlikte yanal yük değerindeki küçük bir artış yatay deplasman ve dönme değerlerinde ani artışlara neden olacaktır. Bununla birlikte; zemin kütlesi içerisindeki yük iletim derinliği de azalacaktır. Baret temelin major eksen boyunca olan tepkisi ($\alpha=0^\circ$, yatay F kuvveti x- eksenine ile çakışıktır) en büyüktür. Yükleme açısı α 'nın değeri büyüdükçe baret temelin tepkisi de zayıflar. Bunun nedeni; baret temelin x- doğrultusundaki eğilme rijitliğinin y- doğrultusundaki eğilme rijitliğinden çok daha büyük olmasındandır. x- ve y- eksenleri boyunca $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ doğrultulu yüklemelerde meydana gelen yatay deplasmanların yönü β , yükleme doğrultusu ile aynıdır ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$). Ancak x- ve y- eksenleri arasındaki yüklemenin doğrultusu ve yükleme sonucu meydana gelen deplasmanların doğrultusu aynı değildir (x-, major eksen ve y-, minor eksen). Bu farklılığın nedeni x- ve y- doğrultularında baret temelin eğilme rijitliklerinin farklı olmasındandır. Dairesel ve kare kesitli kazıklarda sistemin x- ve y- yönündeki eğilme rijitlikleri aynı olduğundan α ve β değerleri de aynı olacaktır.

Rollins ve Ark. (2005) tarafından yapılmış olan bu çalışmada; yanal yüke maruz kazık grubunun davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için bir seri tam ölçekli yanal yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Tam ölçekli yükleme deneyleri için kil tabakası üzerinde yer alan gevşek ve orta sıkı kum tabakalarının oluşturduğu zemin profili içerisinde kazıklar açık uçlu olarak çakılarak 3x3 diziliminde bir kazık grubu oluşturulmuştur. Grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafe kazık çapının 3.30 katı kadardır. Deneysel çalışmalar sırasında; grup içerisinde yer alan her bir kazığın karşıladığı yanal yük miktarı ölçülmüş, her bir kazığın uzunluğu boyunca meydana gelmiş olan eğilme momenti dağılımları da, strain-gauge ler yardımı ile

ölçülmüş deformasyon verileri kullanılarak, elde edilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olmak üzere tek kazık üzerinde de tam ölçekli yanal yükleme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kazıkların taşıdığı yanal yük miktarının grup içerisinde bulundukları kazık sırasına bağlı olduğu ve ön sırada yer alan kazıkların arka sırada yer alan kazıklara göre çok daha fazla miktarda yanal yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür. Kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin aynı zamanda kazık sırası içerisindeki pozisyonlarına da bağlı olduğu belirtilmiştir. Öyle ki; her bir kazık sırasında kenarlarda yer alan kazıkların aynı sırasının ortasında yer alan kazıklardan %20 ila %40 daha büyük değerlerde yük taşıdıkları görülmüştür. Grup etkisi, LPILE ya da GROUP gibi yanal yük analiz programlarında p-multiplier yaklaşımı kullanılarak yeterli derecede hesaba katılabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen p-multiplier değerleri ön sıra için 0.80, orta sıra için 0.40 ve arka sıra için de 0.40 dır. Belirtilen p-multiplier değerleri, diğer tam ölçekli yanal yükleme deneyleri ve centrifuge deneylerinden elde edilmiş olan p-multiplier değerleri ile oldukça iyi bir uyum sergilemektedir. Bu sonuç p-multiplier değerlerinin kazıkların zemine yerleştirilme yönteminden ve zeminin sıkılığından önemli derecede etkilenmediğini göstermektedir. Grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafe arttıkça p-multiplier katsayısının değerleri de artmaktadır.

2.2.2. Model Deney Çalışmaları

2.2.2.1. Klasik Model Deney (1g) Çalışmaları

Meyerhof ve ark. (1988) tarafından yapılan çalışmada gevşek kum zemin ve yumuşak kil zemin içerisinde yer alan flexible model kazıklar ve küçük kazık grupları üzerinde bir seri yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda farklı malzemelerden imal edilmiş dolayısı ile eğilme rijitlikleri farklı olan model kazıklar kullanılmıştır. Model kazıklar farklı gömülü uzunluk değerlerinde deneye tabii tutulmuşlardır. Böylelikle; çalışma yüklerinin etkisi altındaki model kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri ve kazık başında gözlenen yanal deplasmanları üzerinde kazık eğilme rijitliğinin ve kazık gömülü uzunluğunun etkisi araştırılmıştır.

Kazıkta yapısal göçmenin oluşmadığı durumlarda flexible kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin efektif gömülü uzunluk kavramı kullanılarak eşdeğer rijit kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri cinsinden ifade edilebileceği belirtilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar eşdeğer rijit kazıkların davranışı cinsinden efektif gömülü uzunluk kavramına dayanan teorik analizlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; flexible kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin, kazık eğilme rijitliği ve kazık gömülü uzunluğunun azalması ile birlikte, hızlı bir azalma gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte; kazık eğilme rijitliğinin ve kazık gömülü uzunluğunun azalması sonucu, kazık başındaki yanal deplasman değerlerinin de önemli oranda arttığı gözlenmiştir.

Shen ve ark. (1988) tarafından yapılmış olan çalışmada; düz ve şevli zemin yüzeyine sahip kum ve siltli kil zeminler içerisinde yer alan fore kazıkların davranışı donatılmış model kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiş laboratuvar model deneyleri ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda; model kazıklar şev tepesi, şev topuğu ve düz zemin yüzeyine paralel doğrultularda yanal yükler ile yüklenmiş ve model kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri ile yük-deplasman ilişkileri ölçülmüştür. Kazık gömülü uzunluğu, şev eğimi, yükleme doğrultusu ve model kazığın şev tepesine olan uzaklığı gibi parametrelerin yanal yüklü rijit kazıkların davranışına etkileri araştırılmıştır. Farklı yatay yükleme değerlerinde kazığın uzunluğu ve çevresi boyunca kazığa etkiyen yanal zemin basınçları ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda; zemin yüzeyinin düz olduğu durumda kazığın ön tarafında yer alan zeminde yelpaze şeklinde bir göçme bölgesi olduğu gözlenmiştir. Göçme bölgesi, kazığın ön yüzünden itibaren başlamakta ve yükleme doğrultusu ile $\geq 45^\circ$ lik bir açı yaparak yelpaze şeklinde yayılmaktadır. Kazık üzerinde etkili olan pasif toprak basıncı hem kazığın çevresi hem de kazığın uzunluğu boyunca üniform olmayan bir dağılım göstermektedir. Bununla birlikte; kazığa etkiyen yanal zemin basınçlarının büyüklüğünün kazığın zemine göre hareketine bağlı olduğu belirtilmiştir. Şev üzerinde yer alan kazık şev topuğuna paralel doğrultuda bir yatay yük ile yüklendiğinde sahip olduğu yanal yük taşıma gücü kazığın şev tepesine paralel doğrultuda yüklenmesi durumunda ve zemin yüzeyinin düz olduğu durumda sahip olduğu yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha küçüktür. Bu yüzden, güvenli

tarafıta kalmak için, Şev tepesinde veya Şev tepesi civarında yer alan rijit bir fore kazığın yanal yük taşıma gücü için Şev topuğuna paralel doğrultuda yüklendiğı durumda sahip olduğı yanal yük taşıma gücü kullanılmalıdır.

Abduljawad ve ark. (1990) tarafından yapılan çalışmada kum zemin içerisinde yer alan yanal yüklenmiş kazıkların performansları küçük ölçekli model deneyler yapılarak araştırılmıştır. Çalışmada; doymun kum zemin içerisinde yer alan model kazıklar statik ve çevrimsel yükleme olmak üzere farklı yükleme koşullarında deneye tabii tutulmuşlardır. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak hem statik hem de çevrimsel yükleme durumu için kazık uzunluğu boyunca farklı derinliklerde deneysel yük-ötelenme eğrileri elde edilmiştir. Çevrimsel yükleme durumunda büyük ötelenmelerin başlangıç yük çevrimlerinde oluştuğı ve bu yük çevrimlerinde aynı zamanda zeminin sıkılaştığı ve bu nedenle artan yükleme çevrimlerinde ötelenmelerde daha küçük değışimlerin oluştuğı gözlenmiştir. Kazık uzunluğu boyunca elde edilmiş olan deneysel eğilme momenti ve ötelenme değeri nümerik çözümlemeler sonucu elde edilmiş değeri ler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda deneysel sonuçların nümerik sonuçlar ile iyi bir uyum sergilediğı belirtilmiştir.

Abendroth ve Greimann (1990) tarafından yapılmış olan çalışmada; sürtünme ve uç kazıklarının, gevşek ve sıkı kumda farklı kazık başı sınır şartlarında düşey, yatay ve kombine yükleme etkisi altındaki davranışları model deney çalışmaları ile araştırılmıştır. Kazık dış yüzeyine yerleştirilen elektrik dirençli strain gaugeler kullanılarak ölçülen deformasyon verilerine eğri uydurularak kazık deformasyon fonksiyonları elde edilmiştir. Bu fonksiyonların türevi ve integrali alınarak elde edilen zemin reaksiyonu ve deplasman ilişkileri Modifiye Ramberg-Osgood ifadesi ile matematiksel olarak tanımlanmıştır. Çevre sürtünmesi-düşey deplasman (f-z eğrisi), uç taşıma gücü-oturma (q-z eğrisi) ve yanal zemin reaksiyonu-yanal deplasman (p-y eğrileri) ilişkilerini tanımlayan karakteristik zemin parametreleri zeminin non-linear davranışını Winkler yayları ile idealize eden sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Analitik yaklaşım ve iki boyutlu sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum gösterdiğı belirtilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda; gevşek kumda yer alan sürtünme

kazıklarının uç taşıma kapasitesinin kazık başında uygulanan düşey yükün nihai değerinin %70'i kadar sıkı kumda yer alan sürtünme kazıklarında ise %49'u kadar olduğu görülmüştür. Kombine yükleme durumunda kazık gömülü uzunluğunun alt kısmında oluşan düşey sürtünme dirençleri üst kısımda oluşan düşey sürtünme dirençlerinden önemli miktarda büyüktür. Bunun nedeni; yanal deplasmanların kazık gömülü uzunluğunun üst kısmı boyunca sürtünme dirençlerinde bir azalmaya neden olduğu şeklinde açıklanmıştır.

Sastry ve Meyerhof (1990) tarafından yapılmış olan çalışmada; homojen kum zemin ve homojen kil zemin içerisine itilerek yerleştirilmiş olan tamamen donatılmış flexible kazıkların eğik yükleme etkisi altındaki davranışları model deneyler yapılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, eğik yükleme etkisi altında meydana gelen yanal zemin basınçlarının ve eğilme momentlerinin kazık uzunluğu boyunca dağılımı, kazık ucunda etkiyen reaksiyon kuvveti ve kazık başı deplasmanları ölçülmüştür. Gerekli eğik yük değeri uygun büyüklükteki yatay ve düşey yüklerin aynı anda uygulanması ile sağlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, eşdeğer rijit kazıkların efektif gömülü uzunluk kavramına dayalı teorik yöntemden elde edilen sonuçlar ve bazı vaka analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Flexible kazıkların eğik yükleme etkisinde deneysel çalışmalarda gözlenen davranışı belirtilen teorik yaklaşım kullanılarak tahmin edilen davranış ile iyi bir uyum sergilemektedir. Bununla birlikte; önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara göre muhafazakar tarafta kaldıkları görülmüştür.

Yalçın ve Meyerhof (1990) tarafından yapılan çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan rijit model kazıklar ile küçük kazık gruplarının düşey, yatay ve eğik yükleme etkisi altındaki davranışları model deneyler yapılarak araştırılmıştır. Model rijit kazıklar ve küçük kazık grupları gevşek durumdaki üniform kum zemin, sıkı durumdaki üniform kum zemin ve farklı tabaka kalınlıklarına sahip gevşek ve sıkı haldeki kum tabakalarından oluşan tabakalı kum zemin şartlarında deneye tabii tutulmuşlardır. Model rijit kazıklar zemin içerisine hem çakma yoluyla hem de gömülü halde olmak üzere iki farklı yöntem ile yerleştirilmiş ve kazığın zemine yerleştirilme yönteminin kazığın taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Mevcut teoriler ve yarı-deneysel yaklaşımlar kullanılarak tahmin edilen taşıma gücü değerleri

deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; tabakalı zemin durumunda, üstte yer alan tabaka kalınlığının kazık gömülü uzunluğuna oranının ve uygulanan yükün eğiminin kazığın hem çakma kazık hem de gömülü kazık olması durumlarında yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Tabakalı zemin durumunda gömülü haldeki kazıkların çakma kazıkların taşıma kapasitesi değerlerinin %40-%80'i arasında bir taşıma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Tabakalı kum zemin içerisinde yer alan eğimli yüke maruz küçük kazık grupları nihai yük değerinde aynı yöntemle zemine yerleştirilmiş tek kazığın davranışına benzer bir davranış sergilemektedir. Taşıma kapasitesi teorisi ile gömülü haldeki tek kazıklar ve kazık grupları için elde edilen değerler muhafazakar tarafta kalmaktadır.

Naggar ve Wei (1999) laboratuvar ortamında büyük ölçekli model kazıklar üzerinde on sekiz adet yanal yükleme deneyi yaparak çeşitli kazık geometrileri ve zemin çevre basıncı değerleri için kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney kasası hava kesesi ile kaplanarak kasa içerisinde yer alan kum zeminin farklı çevre basıncı değerlerinde bulunması sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda gömülü uzunlukları ve gömülü uzunlukları boyunca ortalama çapları aynı olan fakat farklı konik açılara (0° - 0.60° - 0.95°) sahip üç farklı model kazık kullanılmıştır. Konik açının 0° olduğu durumda, diğer bir ifade ile, kazık uzunluğu boyunca kazık en kesitinin sabit olduğu dairesel kazıklar üzerinde de deneyler yapılarak kazık geometrisinin kazığın taşıma gücü üzerindeki etkisi daha açık bir şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Model kazıklar elektrik dirençli strain gaugeler ile donatılarak kazık uzunluğu boyunca kazık dış yüzeyinde yatay yöndeki kazık hareketi ölçülmüştür. Yükleme noktasındaki yatay kazık hareketi ise, deplasman transduserleri kullanılarak belirlenmiştir. Strain gaugeler kullanılarak ölçülen deformasyon verilerine eğri uydurularak kazık uzunluğu boyunca eğilme momenti fonksiyonları elde edilmiş ve bu eğilme momenti fonksiyonlarının türevi ve integrali alınarak zemin reaksiyonu (p) ve kazık yanal ötelenmesi (y) arasındaki ilişki p-y eğrileri şeklinde ortaya konmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda; zemindeki çevre basıncının artması ile kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin arttığı bununla birlikte kazık başındaki yanal ötelenmelerin

azaldığı görülmüştür. Ayrıca; konik açılı kazıkların yanal yük taşıma kapasitesinin sabit en kesitli dairesel kazıkların yanal yük taşıma kapasitesinden %77 daha fazla olduğu belirtilmektedir. Bütün model kazıklarda maksimum eğilme momenti kazık gömülü uzunluğunun 1/3'ü derinlikte meydana gelmiştir. Maksimum eğilme momentinin gözlemlendiği bu derinlikte konik açılı kazığın kesit alanı daha büyük olduğundan konik kazıkta daha küçük gerilmeler oluşmaktadır.

Prasad ve Chari (1999) tarafından yapılan çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan donatılmış rijit model kazıklar üzerinde laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler kullanılarak zemin özellikleri ve kazık geometrisine dayalı zemin basınç dağılımı tanımlanmıştır. Deneylerde kazık uzunluğu ve kazık genişliği boyunca zemin tarafından kazığa etkiyen yanal basınçlar ölçülmüştür. Çalışma sonucunda; zemin basınç dağılımına dayalı olarak yanal yük taşıma kapasitesini tahmin eden kapsamlı bir yöntem önerilmiştir. Yayınlanmış olan model ve arazi deney sonuçları kullanılarak önerilen yöntemin doğruluğu gösterilmiştir.

Hameed ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmada aynı zemin koşulları içerisinde yer alan darbe yolu ile zemine yerleştirilmiş çakma kazıklar ile basınçlı su kullanılarak zemine yerleştirilmiş çakma kazıkların (jet kazıklar) yanal yük etkisi altındaki davranışları model deneyler yapılarak araştırılmıştır. Çalışmada; farklı yerleştirme yöntemleri kullanılarak zemine yerleştirilmiş model kazıkların yük-deplasman davranışları p-y eğrileri cinsinden elde edilmiştir. Bu amaçla; deneysel çalışmalarda ölçülen yük-deformasyon verileri kiriş teorisi ve polinom yaklaşımı kullanılarak geleneksel yanal yük-deplasman (p-y) eğrilerine dönüştürülmüş ve hem çakma kazıklar hem de jet kazıklar için kazık uzunluğu boyunca normalize yük-deplasman eğrileri tanımlanmıştır. Bununla birlikte; jet kazıkların zemine yerleştirilmeleri sırasında kullanılan su jeti basıncının, zemin birim hacim ağırlığının ve yeraltı suyu durumunun p-y davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Aynı zemin koşulları içerisinde yer alan çakma kazıklara ait p-y eğrilerine dayanarak jet kazıklara ait p-y eğrilerinin nasıl elde edilebileceği bir örnek ile açıklanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda; deneysel p-y ilişkilerinin nonlineer özellikte olduğu ve yüzeysel derinliklerde daha yumuşak daha derinlerde ise, daha rijit bir

davranış ortaya koyduğu gözlenmiştir. Kullanılan su jeti basıncından dolayı kazığı çevreleyen zeminde oluşan boşluk suyu basınçları ve meydana gelen örselenmelerin zeminin deformasyon özelliklerini ve kazığın davranışını etkilemesi nedeni ile çakma kazıklar jet kazıklara göre bütün derinliklerde daha rijit bir davranış sergilemektedir. Bir çakma kazığa ait, arazi deneyleri veya genel deneysel yöntemler ile belirlenmiş, p-y eğrilerinin mevcut olması durumunda aynı zemin koşullarında yer alacak bir jet kazığın p-y eğrileri çalışmada önerilmiş olan boyutsuz parametreler ve eşitlikler kullanılarak elde edilebilmektedir.

Patra ve Pise (2001) tarafından yapılan çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan tek kazığın ve kazık gruplarının yanal yük etkisindeki davranışları model deneyler yapılarak araştırılmıştır. d, kazık çapı olmak üzere, kazıklar arasındaki mesafenin 3.0d, 4.5d ve 6.0d olduğu 2x1, 3x1, 2x2 ve 3x2 dizilimlerdeki farklı konfigürasyonlarda oluşturulan model kazık grupları üzerinde deneyler yapılmıştır. Kazık grubunun yük-deplasman davranışının, yanal yük taşıma kapasitesinin ve grup verimliliğinin grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafe ve grup içerisindeki kazık sayısı ile ilişkisi incelenmiştir. Tek kazıkların ve kazık gruplarının yanal yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilebilmesi için analitik bir yöntem önerilmiştir. Önerilen analitik yaklaşım, kazık-zemin ara yüzeyindeki sürtünme açısını, kazık gömülü uzunluğu/kazık çapı oranını (L/d), grup içerisindeki kazıklar arasındaki mesafeyi, kazık grubunun konfigürasyonunu ve zemin özelliklerini hesaba katabilmektedir. Önerilen yaklaşım ile tahmin edilen değerler yazarlar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait sonuçlar ve diğer araştırmacıların önerdiği yaklaşımlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında önerilen analitik yaklaşımın tek kazıkların ve kazık gruplarının yanal yük taşıma kapasitesini iyi bir doğrulukta tahmin edebildiği görülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda; kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinin grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafeye, kazık grubunun geometrisine, kazık-zemin ara yüzeyindeki sürtünme açısına, grup içerisindeki kazıkların L/d oranına ve zeminin sıkılığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Kazık gruplarının yanal yük etkisindeki yük-deplasman davranışları non-lineer özelliktedir. Sürtünmeli yüzeye sahip kazıklardan oluşan kazık grubu sürtünmesiz yüzeye sahip kazıklardan oluşan kazık grubuna göre daha fazla yanal

yük taşıma kapasitesine sahiptir. Grubu oluşturan kazıklar arasındaki mesafe arttıkça kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesi ve kazık grubunun verimliliğinin arttığı gözlenmiştir. Kazıklar arasındaki mesafenin 6d ve daha fazla olması durumunda grup içerisinde yer alan kazıklar tek kazık durumunda sahip oldukları yanal yük taşıma kapasitesine sahip olmaktadır.

Kim ve ark. (2004); Nak-Dong nehir kumu içerisinde yer alan yanal yüke maruz tek kazığın davranışını bir seri laboratuvar model deneyi yaparak incelemişlerdir. Çalışmada esas olarak Nak-Dong nehir kumu içerisinde yer alan yanal yüklenmiş kazıklar için p-y eğri modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte; kum zeminin relatif sıkılığının, kazığın zemine yerleştirilme yönteminin ve kazık başı sınır şartlarının yanal yük etkisindeki kazığın davranışına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları mevcut model deney çalışmalar ile karşılaştırılarak hem farklı kazık yerleştirme yöntemi hem de farklı kazık başı sınır şartları için modifikasyon faktörleri tanımlanmıştır. Önerilen p-y eğri modeli literatürde mevcut olan p-y eğri modelleri ile karşılaştırıldığında hem şekil hem de değerler yönünden önemli derecede farklılıklar olduğu görülmüştür. Model deneylerden elde edilen veriler önerilen p-y eğri modeli ile tahmin edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, kazığın zemine yerleştirilme yönteminin etkileri ve kazık başı sınır şartlarının etkilerini hesaba katabilen, modelin kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda; çakma kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin gömülü kazıklardan daha büyük olduğu ve uygulanan çakma enerjisindeki artış ile birlikte çakma kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin de arttığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra kazık başının tutulu olması durumunda serbest başlı kazık haline göre daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir.

Sawwaf (2006) tarafından yapılmış olan çalışmada; geogrid tabakaları ile güçlendirilmiş kumlu bir şev yakınında yer alan düşey bir kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışının güçlendirilmiş şevden ne şekilde etkilendiğini belirlemek amacı ile bir seri laboratuvar model deneyi gerçekleştirilmiştir. Gevşek, orta sıkı ve sıkı olmak üzere üç farklı sıkılıkta hazırlanmış 1(düşey):1.5(yatay) eğimindeki kumlu bir şev geogrid tabakaları kullanılarak güçlendirilmiştir. Tek geogrid

tabakasının derinliği, geogrid tabaka sayısı, geogrid tabakalarının uzunluğu ve geogrid tabakaları arasındaki düşey mesafe gibi farklı geogrid parametrelerinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi ile ilişkisi belirlenmiştir. Bununla birlikte; kumun sıkılığının, kazığın şev tepesine olan uzaklığının ve kazık gömülü uzunluğunun kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bir şevin geogrid tabakaları kullanılarak güçlendirilmesi şev tepesi civarında yer alan düşey tek kazığın yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu artış kazığın şev tepesine uzaklığına, kumun relatif sıkılığına, kazığın gömülü uzunluğuna ve geogrid parametrelerine önemli ölçüde bağlıdır. Kazığın şev tepesine uzaklığı beş kazık çapından daha fazla ise şevin kazık performansı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Geogrid tabaka sayısının artırılması kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde önemli artışlara neden olmaktadır. Geogrid tabakaları, zemin yüzeyine yakın sığ derinliklere aralarındaki düşey uzaklık küçük tutularak yerleştirildiklerinde kazık yanal yük taşıma kapasitesinde daha efektif artışlar gözlenmiştir.

Model deney çalışmalarında kullanılan model zeminin özellikleri (zeminin cinsi, deney kasasına yerleştirilme şekli veya hazırlanma şekli, dane çapı (D_d), üniformluk katsayısı (C_u), relatif sıkılık derecesi (D_r), kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve zeminin yapısı), model kazığın özellikleri (kazığın davranış şekli, kazığın imal edildiği malzeme, kazığın uzunluğu (L_p), kazığın çapı ya da genişliği (D_p ya da B_p), kazığın narınlık oranı (L_p/D_p ya da L_p/B_p), yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliği (e), kazığın zemine yerleştirilme şekli, konfigürasyonu ve kazığın enine kesit şekli), deney kasasının boyutları (kasanın çapı (D_k), kasanın uzunluğu (L_k), kasanın genişliği (B_k) ve kasanın yüksekliği (H_k)), model deney tipi (klasik model deney (1g), centrifuge model deney (Ng) ve centrifuge ivmesi (N)) ve model zemin yüzeyinin durumuna (zemin yüzeyi düz (D) ve zemin yüzeyi şevli (S)) ait bilgiler Çizelge 2.5 de sunulmuştur.

Çizelge 2.5 Model Deneylerin Malzeme ve Deney Sistemi Özellikleri

Referans	Meyerhof ve ark. (1988)	Shen ve ark. (1988)	Abduljawwad ve ark. (1990)	Abendroth ve Greimann (1990)
Cinsi	Kum	Kum-Siltli Kil	Kum	Kum
Hazırlanma Şekli	-	Sıkıştırma	Sererek	Yağmurlama-Sıkıştırma
D_4 (mm)	$D_{10}=0.30$	-	$D_{10}=0.15$	-
C_u	2.80	-	1.73	-
D_r (%)	30	77.70-84.80	85	-
γ_k (kN/m ³)	-	16.83-17.13	16.68	14.10-14.90
ϕ (°)	32	40-43	34	-
Yapısı	Üniform	Üniform	Üniform	Üniform
Davranış Şekli	Flexible	Rijit	Flexible	Flexible
Malzemesi	Çelik, Ahşap, Naylon	Alüminyum Boru	Çelik Boru	Çelik Boru
L_p (mm)	100 190 305 610	1016	775	1500
D_p (mm)	12.50	88.90	28.80	B=25
L_p/D_p	8 15 24 48	9.35	21.70	-
e (mm)	0	304.80	150	-
Yerleştirilme Şekli	Çakma	Sondaj	Gömülü	Gömülü
Konfigürasyonu	Tek-Grup	Tek	Tek	Tek
Kesit Şekli	Dairesel	Dairesel	Dairesel	Kare
D_k (mm)	-	-	-	-
L_k (mm)	-	3658	1200	920
B_k (mm)	-	1219	800	458
H_k (mm)	-	1219	600	1800
(1g)	+	+	+	+
(Ng)	-	-	-	-
N	-	-	-	-
Düz (D) – Şevli (Ş)	D	D-Ş	D	D

Çizelge 2.5 (Devam)

Referans	Sastry ve Meyerhof (1990)	Yalçın ve Meyerhof (1990)	Dickin ve Nazir (1999)	Naggar ve Wei (1999)
Cinsi	Kum	Kum	Kum	Kum
Hazırlanma Şekli	Yağmurlama	Sererek-Yağmurlama	Sıkıştırarak	Yağmurlama
D_d (mm)	-	$D_{10}=0.85$	-	$D_{10}=0.35$
C_u	-	1.20	1.50	2.85
D_r (%)	20	-	85	18.40
γ_s (kN/m ³)	13.60	14.00	16.40	16.25
ϕ (°)	30	33	46	32
Yapısı	Uniform	Uniform-Tabakalı	Uniform	Uniform
Davranış Şekli	Flexible	Rijit	Rijit	Flexible
Malzemesi	PVC Boru	Çelik	Beton Dolu Çelik Boru	Çelik
L_p (mm)	1250	200	200-500	1520
D_p (mm)	73	12.50	100	160-200
L_p/D_p	15.50	15	2-5	7.25
e (mm)	115	10	-	195
Yerleştirilme Şekli	Çakma	Gömülü, Çakma	Gömülü	Gömülü
Konfigürasyonu	Tek	Tek-Grup	Tek	Tek
Kesit Şekli	Dairesel	Dairesel	Dairesel	Konik-Dairesel
D_k (mm)	1000	-	-	1500
L_k (mm)	-	450	1360	-
B_k (mm)	-	450	1220	-
H_k (mm)	1600	350	840	1445
(1g)	+	+	+	+
(Ng)	-	-	-	-
N	-	-	-	-
Düz (D) – Şevli (Ş)	D	D	D	D

Çizelge 2.5 (Devam)

Referans	Prasad ve Chari (1999)	Hameed ve ark. (2000)	Patra ve Pise (2001)	Kim ve ark. (2004)	Sawwaf (2006)
Cinsi	Kum	Kum (%10Kil)	Kum	Kum	Kum
Hazırlanma Şekli	Sererek-Sıkıştırarak	Sıkıştırma	Yağmurlama	Yağmurlama	Sererek-Sıkıştırarak
D_d (mm)	$D_{10}=0.21$	$D_{50}=0.25$	-	-	$D_{10}=0.15$
C_u	6.10	-	1.60	2	4.07
D_r (%)	25	-	80	50	35
γ_k (kN/m ³)	16.50	14.80	16.08	13.13	17.44
ϕ (°)	33.30	35.32	37.74	-	34
Yapısı	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
Davranış Şekli	Rijit	Flexible	Rijit-Flexible	Flexible	Rijit
Malzemesi	Çelik Boru	Alüminyum Boru	Alüminyum Boru	Çelik Boru	Çelik Boru
L_p (mm)	1135	1520	228	250-400	453
D_p (mm)	102	$B=50.80$	19	12	19
L_p/D_p	3, 4, 5 ve 6	$L/B=20$	12	17.50	12
e (mm)	150	127	0	30	225
Yerleştirilme Şekli	Gömülü	Çakma, Su Jeti	Gömülü	Gömülü, Çakma	Gömülü
Konfigürasyonu	Tek	Tek	Grup	Tek	Tek
Kesit Şekli	Dairesel	Kare	Dairesel	Dairesel	Dairesel
D_k (mm)	1830	-	-	-	-
L_k (mm)	-	2440	914	760	1000
B_k (mm)	-	2440	762	760	500
H_k (mm)	2000	2130	914	500	500
(1g)	+	+	+	+	+
(Ng)	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	-
Düz (D) – Şevli (Ş)	D	D	D	D	Ş

2.2.2.2. Centrifuge Model Deney (Ng) Çalışmaları

Mc Vay ve Ark. (1994) tarafından yapılan çalışmada; centrifuge deney aleti hareket halinde iken model tek kazıkların veya model kazık gruplarının zemine yerleştirilmesi ve yanal olarak yüklenmesi amacı ile tasarlanmış yeni bir centrifuge model deney aparatının kullanımı anlatılmaktadır. Kazıklar arasında üç kazık çapı ve beş kazık çapı mesafenin bulunduğu dokuz kazıktan oluşan iki farklı konfigürasyondaki serbest başlı kazık grupları gevşek ve orta sıkı kum zeminde yanal yük etkisinde deneye tabii tutulmuşlardır. Zemin sıklığı ve grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafenin kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesine ve bu toplam taşıma gücünün kazık sıraları arasındaki paylaşımına etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte; kazıkların zemine 1g durumunda yerleştirilmesi ile, centrifuge düzeneği deney ivmesinde hareket halinde iken (Ng) durumunda yerleştirilmesi sonucunda kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinin nasıl etkileneceği de araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kazıkların zemine 1g durumunda yerleştirildiği zaman kazık grubunun sahip olduğu yanal yük taşıma kapasitesi değerinin Ng durumundakine göre daha küçük olduğu görülmüştür. Zeminin sıklığı kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilemektedir. Öyle ki; zemin sıklığının $D_r = \%45$ değerinden $D_r = \%17$ değerine azalması sonucunda kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinde %22'lik bir azalma olduğu gözlenmiştir. Grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafenin artırılmasının kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesini artırdığı belirtilmiştir.

Mc Vay ve ark. (1998) ve Zhang ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmalarda; yanal yük etkisine maruz köprü ayaklarının davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için köprü yapısı ve temel sistemini birlikte analiz edebilen bir sonlu elemanlar yazılımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böyle bir yazılımın geliştirilebilmesi ve ortaya konan programın doğruluğunun gösterilebilmesi için, büyük kazık grupları üzerinde yanal yükleme deneylerinin yapılmış olması ve deneysel verilere sahip olunması gerekmektedir. Bu amaçla Florida Üniversitesinde bir araştırma projesi başlatılmıştır. Köprü ayakları altında yer alan kazık grubu temeller genellikle dört, beş, altı veya yedi kazık sırasından oluşan büyük kazık

gruplarıdır. Bu yüzden; öncelikle, hem gevşek hem de orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan tek kazıklar ve 3x3, 4x3, 5x3, 6x3 ve 7x3 dizilimlerdeki büyük kazık grupları üzerinde centrifuge deney aletinde yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra; hem gevşek hem de orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan tek kazıkların ve büyük kazık gruplarının yanal yük etkisi altındaki davranışları FLPIER sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarda ölçülmüş olan değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda zemin sıkılığının ve kazık grubu boyutunun değişmesinin p-multiplier yaklaşımının doğruluğuna olan etkisi araştırılmıştır. Gevşek ve orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan kazık grupları için p-multiplier katsayıları tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; bir kazık grubuna bir kazık sırası ilave edildiğinde kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinin daima arttığı görülmüştür. Bununla birlikte; 3x3 dizilimindeki kazık grubundan 4x3 dizilimindeki kazık grubuna geçildiğinde elde edilen taşıma gücü artım oranı 4x3 dizilimindeki kazık grubundan 5x3 dizilimindeki kazık grubuna geçildiğinde elde edilen taşıma gücü artım oranından daha büyüktür. Beş kazık sırasından daha fazla kazık sırasına sahip büyük kazık gruplarında beşinci kazık sırasından sonra ilave edilen her bir kazık sırası için elde edilen taşıma gücü artım oranı sabit bir değerdedir. Aynı kazık sırası içerisinde yer alan kazıklardan ortada yer alan kazığın yanal yük taşıma kapasitesi kenarlarda yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitesinden daha küçüktür. Kazık grubunda yük doğrultusunda en önde yer alan kazık sırası en fazla yanal yük taşıma kapasitesine sahiptir. Her bir kazık sırasının yanal yük taşıma kapasitesi, zemin sıkılığı ve kazıklar arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olup, grup içerisindeki kazık sıra sayısından bağımsızdır. Reese ve ark. (1974) tarafından geliştirilmiş olan p-y eğri yaklaşımını, Brown ve ark. (1988) tarafından sunulan p-multiplier yaklaşımını ve büyük kazık grupları için Mc Vay ve ark. (1998) tarafından tanımlanmış olan p-multiplier faktörlerini bünyesinde bulunduran FLPIER sonlu elemanlar programının yanal yüke maruz tek kazığın ve kazık gruplarının davranışını oldukça iyi bir doğrulukta tahmin edebildiği belirtilmiştir.

Dickin ve Nazir (1999) tarafından yapılan bu çalışmada; büyük devirme momentlerine maruz kısa kazık temeller üzerinde gerçekleştirilmiş centrifuge ve laboratuvar model deneyleri anlatılmaktadır. Centrifuge model deneyleri; hem sıkı hem de gevşek kum zemin durumunda, uzunlukları 40 ila 100mm ve çapları da 20 ila 50mm arasında değişen küçük model kazıklar üzerinde yapılmıştır. Yanal çekme kuvveti zemin yüzeyi üzerinde 40 ila 320mm arasında değişen yüksekliklerden uygulanmıştır. Centrifuge deneyleri; çapları 0.125m ve 1m aralığında yer alan prototip kazıkların davranışlarının modellenenebilmesi amacı ile 12 ve 50g aralığındaki ivmelerde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; zeminin sıklığının, çekme kuvveti uygulama yüksekliğinin, kazık geometrisinin ve zemin yüzeyi profilinin kısa kazıkların moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Kum zemin içerisinde yer alan model duvarlar üzerinde de centrifuge model deneyleri yapılmış ve iki boyutlu teorik analizlerde kullanılmak üzere deneysel şekil faktörleri elde edilmiştir. Bu şekil faktörlerinin değerlerinin kazık gömülü uzunluğu ile birlikte önemli miktarda arttığı gözlenmiştir. Çapı 100mm olan uzunlukları 200 ila 500mm arasında değişen model kısa kazıklar üzerinde laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların centrifuge deneylerindeki davranışları doğruladığı görülmüştür. Centrifuge model sonuçlarına dayanılarak elde edilen prototip moment sınır değerlerinin Broms, Mc Corkle ve UIC/ORE gibi tasarım yöntemleri kullanılarak tahmin edilen değerler ile iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte; 1g model deneylerden elde edilen moment faktörlerinin centrifuge deneylerinden elde edilen moment faktörlerinden önemli derecede büyük olduğu görülmüştür. Bu farklılık, farklı hazırlama teknikleri ile yapılmış iki farklı deneye karşın görünen bir ölçek etkisi olduğunu da ortaya koymaktadır.

Dyson ve Randolph (2001) tarafından yapılan çalışmada kalkerli kum zemin içerisinde yer alan kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışları bir seri centrifuge model deneyi yapılarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda; kazığın zemine yerleştirilme yönteminin, kazık ucu durumunun, drenaj derecesinin (yükleme hızının) ve kazık başındaki sınır şartının kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışına etkileri araştırılmıştır. Zeminin kazığa karşı göstermiş olduğu yanal

direnci koni direnci gibi zeminin ölçülebilen mukavemet özellikleri ile ilişkilendirilerek kalkerli kum zemin içerisinde yer alan kazıklar için bir p-y eğri modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde; kazığın zemine yerleştirilme yöntemi ve farklı yükleme hızlarının etkilerini hesaba katabilmek için modifikasyon faktörleri önerilmiştir. Geliştirilen p-y eğri modeli, kalkerli ve silisli kum zeminler içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıklar için geliştirilmiş mevcut p-y eğri modelleri ile birlikte PYload adındaki yanal yüklü kazıkların davranışını analiz eden bir programa uygulanmış ve elde edilen kazık başı tepkileri, eğilme momentleri ve ötelenme değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; geliştirilen p-y eğri modeli kullanılarak elde edilen kazık tepkilerinin deneysel değerler ile oldukça iyi bir uyum sergilediği gözlenmiştir. Önerilen p-y eğri modeli ile elde edilen p-y davranışları silis kumu için geliştirilmiş mevcut p-y eğri modelleri kullanılarak elde edilen p-y davranışları ile karşılaştırıldığında sonuçlar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Öyle ki; silis kumu için geliştirilmiş mevcut modeller ile kalkerli kum zeminde yer alan kazıkların küçük deplasman değerlerinde çok rijit bir davranış sergilediği bununla birlikte büyük deplasman değerlerindeki yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin olması beklenenden küçük değerlerde tahmin edildiği belirtilmiştir. Bu sonuç; kalkerli kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıkların davranışlarının kalkerli kum için geliştirilmiş p-y eğri modelleri kullanılarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Önerilen p-y eğri modelinin hafif çimentolaşmış sedimentler ve silis kumlarını da içeren daha geniş bir uygulama alanına sahip olabilmesi için yük-deplasman eğrileri koni direnci ile normalize edilmiştir.

Dickin ve Laman (2003), kum zemin içerisinde yer alan farklı boyutlara sahip dikdörtgen kesitli kısa ayak temeller üzerinde centrifuge model deneyleri yaparak ayak temellerin moment taşıma kapasitesi davranışını araştırmışlardır. Centrifuge model deneylerdeki prototip boyutlar kullanılarak üç boyutlu non-lineer sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli kısa ayak temellerin moment taşıma kapasitesi, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, ayak temelin en kesit uzunluğu ve gömülü uzunluğu arttıkça artmaktadır. Zemin sıklığının moment taşıma kapasitesini

önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Öyle ki; gevşek durumda elde edilen moment taşıma kapasitesi değeri sıkı durumda elde edilen değerinin yaklaşık 1/3'ü kadardır. Sıkı kum zeminde yer alan ayak temellerin 1° ve 2°'lik sınır dönme açılarında sahip olduğu moment taşıma kapasiteleri maksimum moment taşıma kapasitesinin sırası ile %75 ve %90'ı kadar iken bu oranlar gevşek kum zeminde %70 ve %85 şeklindedir. Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda hem deneysel hem de sayısal veriler için 1° ve 2°'lik sınır dönme açıları ve 3.5°'lik dönme açısı (maksimum moment taşıma kapasitesini temsil ediyor) için temel geometrisi ile moment taşıma kapasitesini ilişkilendiren matematiksel ilişkiler elde edilmiştir. Centrifuge model deney sonuçları, sayısal analiz sonuçları ve analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Broms yönteminin centrifuge deney sonuçları ve 1°'lik sınır dönme açısı için elde edilen sayısal analiz sonuçları ile iyi bir uyum sergilediği buna karşılık UIC/ORE formülü kullanılarak hesaplanan moment taşıma kapasitesi değerlerinin oldukça muhafazakar tarafta kaldığı belirtilmiştir.

Hu ve ark. (2006) tarafından yapılan bu çalışmada; ankastre kollu direk yapılarının (cantilever mast arm/pole structures) temeli olarak görev yapan fore kazıkların yatay yük ve burulma momenti etkisindeki davranışları centrifuge model çalışmaları yapılarak araştırılmıştır. Son yıllarda yaşanmış olan kasırgalar sonucu ortaya çıkan hasarlar köprü ve bina yapımında kullanılan standartlarda önemli değişikliklerin yapılmasına neden olmuştur. Örneğin; 1992 yılındaki Andrew Kasırgası sonrasında Florida Ulaşım Birimi güney Florida'da yapılacak bütün yapıların saatte 190 km hızla esen bir rüzgara dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca; kıyı şeridinden itibaren 8 km'lik bir alan içerisinde kalan yüksek ışıklandırma, sinyal ve işaret sistemlerinin kablo askılı (cable stayed) taşıyıcı sistemler yerine, derin temellere birleştirilmiş direklerle bağlanan ankastre kollar ile desteklenmesine karar verilmiştir. Ankastre kollu direk yapıları şekil itibari ile ters L şeklinde olup bu yapıların temeli olan fore kazıklar önemli büyüklükte yanal yük ve burulma momenti etkisine maruz kalabilirler. Bu çalışmada; hem kuru hem de doymuş kum zemin içerisinde yer alan model ankastre kollu direk sistemi üzerinde centrifuge deney aletinde çok sayıda yanal yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin bir bölümünde kazığın sadece yanal yük

etkisi altındaki davranışı incelenirken, geriye kalan deneylerde, hem yanal yük hem de burulma momentinin birlikte etkidiği durumdaki davranışı incelenmiştir. Yapılan deneylerde kazık gömülü uzunluğunun, kum zeminin sıkılığının ve yatay yük uygulama noktasının (yatay yükün direk üst noktasında etkimesi, ankastre kolun orta noktasında etkimesi, ankastre kolun uç noktasında etkimesi) kazığın taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; yanal yüklenmiş bir fore kazığın aynı zamanda bir burulma momenti etkisine de maruz kalması durumunda yanal yük taşıma kapasitesinde %50'lere varan azalmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Burulma momentinden dolayı kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde gözlenen azalmanın, zeminin sıkılığından bağımsız olduğu kazık gömülü uzunluğu ve burulma momenti ile yanal yük arasındaki oranın bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte; kazığın burulma momenti taşıma kapasitesinin yanal yükün varlığından etkilenmediği görülmüştür.

Kong ve Zhang (2006) tarafından yapılan çalışmada; robot manipülatör kullanılarak, centrifuge deney aletinde model kazıklar üzerinde farklı yükleme hızlarında yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uzaktan kumanda edilen robot manipülatörler (remote controlled robotic manipulators) centrifuge model deney çalışmaları için son yıllarda geliştirilmiş olan yeni bir araçtır. Robot manipülatör kullanımının sağladığı en büyük yarar, geoteknik problemlerin centrifuge deney düzeneği deney ivmesinde hareket halinde iken modellenenbilmesine olanak tanımasıdır. Öyle ki; kazığın zemine yerleştirilmesi ve kazıkların yüklenmesi gibi işlemler robot manipülatör kullanımı ile centrifuge deney düzeneği hareket halinde iken gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada; centrifuge deney düzeneği hareket ederken dört model kazık zemin içerisine yerleştirilmiş ve ardından da dört model kazığın her biri farklı yükleme hızlarında art arda yanal olarak yüklenmişlerdir. Bu sayede, farklı zamanlarda gerçekleştirilen yanal yükleme deneylerinde model zeminin hazırlanmasından dolayı oluşabilecek potansiyel hatalar minimuma indirilmiştir. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı yükleme hızları kullanılarak yükleme hızının yanal yüklü kazıkların davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonunda; deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme hızı aralığında yükleme hızının

yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli derecede bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte yükleme hızının etkisi sıkı kumda gevşek kuma göre daha açık bir şekilde görülmektedir. Yükleme hızı, kazık uzunluğu boyunca elde edilen eğilme momenti dağılımını ve zemin reaksiyonu dağılımını önemli derecede etkilemektedir.

Centrifuge model deney çalışmalarında kullanılan model zeminin özellikleri (zeminin cinsi, deney kasasına yerleştirilme şekli veya hazırlanma şekli, dane çapı (D_d), üniformalık katsayısı (C_u), relatif sıkılık derecesi (D_r), kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve zeminin yapısı), model kazığın özellikleri (kazığın davranış şekli, kazığın imal edildiği malzeme, kazığın uzunluğu (L_p), kazığın çapı ya da genişliği (D_p ya da B_p), kazığın narinlik oranı (L_p/D_p ya da L_p/B_p), yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliği (e), kazığın zemine yerleştirilme şekli, konfigürasyonu ve kazığın enine kesit şekli), deney kasasının boyutları (kasanın çapı (D_k), kasanın uzunluğu (L_k), kasanın genişliği (B_k) ve kasanın yüksekliği (H_k)), model deney tipi (klasik model deney (1g), centrifuge model deney (Ng) ve centrifuge ivmesi (N)) ve model zemin yüzeyinin durumuna (zemin yüzeyi düz (D) ve zemin yüzeyi şevli (Ş)) ait bilgiler Çizelge 2.6'da sunulmuştur.

Çizelge 2.6 Centrifuge Model Deneylerde Malzeme ve Deney Sistemi Özellikleri

Referans	Mc Vay ve ark. (1994)	Mc Vay ve ark. (1998)	Dickin ve Nazir (1999)	Dyson ve Randolph (2001)
Cinsi	Kum	Kum	Kum	Kum
Hazırlanma Şekli	Yağmurlama	Yağmurlama	Yağmurlama-Sıkıştırarak	-
D_d (mm)	$D_{10}=0.20$	$D_{50}=0.23$	-	$D_{50}=0.10$
C_u	1.50	1.70	1.50	-
D_r (%)	17	36	37	85
γ_k (kN/m ³)	14	14.05	14.40	$\gamma'=8.10$
ϕ (°)	31	34.50	39	$\phi_{cv}=38^\circ$ - $\phi_{peak}=43^\circ$
Yapısı	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
Davranış Şekli	Flexible	Flexible	Rijit	Flexible
Malzemesi	Alüminyum Boru	Alüminyum	Çelik	Alüminyum
L_p (mm)	279.40	304.80	40-100	340
D_p (mm)	9.50	$B=9.50$	20-50	13
L_p/D_p	25	$L/B=25$	1-5	20
e (mm)	44.50	50-56	40-320	-
Yerleştirilme Şekli	Çakma	Çakma	Gömülü	Çakma, Gömülü
Konfigürasyonu	Grup	Grup	Tek Kazık	Tek
Kesit Şekli	Dairesel	Kare	Dairesel	Dairesel
D_k (mm)	-	-	-	-
L_k (mm)	457	457	460	650
B_k (mm)	254	254	380	390
H_k (mm)	305	305	230	325
(1g)	-	-	-	-
(Ng)	+	+	+	+
N	48	45	12-50	160
Zemin Yüzevi	Düz (D) – Şevli (Ş)	D	D-Ş	D

Çizelge 2.6 (Devam)

Referans	Dickin ve Laman (2003)	Hu ve ark. (2006)	Kong ve Zhang (2006)
Cinsi	Kum	Kum	Kum
Hazırlanma Şekli	Yağmurlama-Sıkıştırma	-	Yağmurlama
D _d (mm)	D ₅₀ =0.20	D ₁₀ =0.16	D ₅₀ =0.14
C _u	1.31	1.88	1.30
D _r (%)	37	32	32
γ _k (kN/m ³)	14.60	16.40	13.68
φ (°)	39	32.50	33
Yapısı	Üniform	Üniform	Üniform
Davranış Şekli	Rijit	Rijit-Flexible	Flexible
Malzemesi	Çelik	Beton	Alüminyum Boru
L _p (mm)	75	100	300
D _p (mm)	B ₀ =25	33	15.74
L _p /D _p	L ₀ =25-50-75-100-150	3	17
e (mm)	150	135	30
Yerleştirilme Şekli	Gömülü	-	Çakma
Konfigürasyonu	Tek	Tek	Tek
Kesit Şekli	Kare-Dikdörtgen	Dairesel	Dairesel
D _k (mm)	-	-	-
L _k (mm)	460	-	707
B _k (mm)	370	-	580
H _k (mm)	230	-	379
(I _g)	-	-	-
(I _{Ng})	+	+	+
N	40	45	40
Zemin Yüzeyi	Düz (D) - Şevli (Ş)	D	D

2.3. Sayısal Analiz Çalışmaları

Zemin mekaniği ve temel mühendisliği problemlerinin tasarım ve analizlerinde en yaygın olarak kullanılan sayısal analiz yöntemi sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi, bir sistemin davranışını etkileyebilecek çok sayıdaki faktörü göz önüne alarak çözümleme yapabilen güçlü bir hesaplama aracıdır. Sonlu elemanlar yönteminin ana fikri; analiz edilen yapıyı ve bu yapıyı çevreleyen zemini çok sayıdaki sonlu elemanlara ayırmaktır. Üç boyutlu sonlu eleman modelleri kullanılarak kazık temellerin davranışlarının daha iyi anlaşılması mümkündür. Çünkü; sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda hem kazığın hem de kazığı çevreleyen zeminin davranışı ile ilgili önemli bilgiler edinilebilir. Üç boyutlu sonlu eleman modelleri ile kazığı çevreleyen zemindeki gerilmelerin ve deformasyonların üç boyutlu etkiler göz önüne alınarak hesaplanabilmesi mümkündür. Sonlu eleman analizlerinde senaryo zenginliğinin elimizde olması farklı zemin koşullarının, farklı yükleme tiplerinin ve farklı geometrik özelliklerin bir arada değerlendirilebilmesine imkan sağlar. Bu tip bir zenginliğin deneysel çalışmalarda elde edilmesi hem zaman hem maliyet hem de her türlü zemin koşulunun oluşturulamayacak olmasından dolayı çok zordur.

Bu bölümde; kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazık temellerin yanal yük ve moment taşıma kapasitelerinin incelenmesi konusunda gerçekleştirilmiş sayısal analiz çalışmaları anlatılmaktadır.

Muqtadir ve Desai (1986) tarafından yapılan bu çalışmada; kazık gruplarının analizi için üç boyutlu, non-linear bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Kazık grubu problemi; kazık grubu başlığı, zemin ve kazıklar arasındaki etkileşimleri içeren üç boyutlu bir problemdir. Problemin gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için problemin üç boyutlu geometrisinin, kazık-zemin ara yüzey etkilerinin ve zeminin non-linear davranış özelliklerinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Geliştirilen sonlu elemanlar modeli, kazık-zemin ara yüzeyindeki rölatif hareketleri dikkate alabilmekte ve zemin davranışını lineer elastik, non-linear elastik ve elasto-plastik (Von Misses, Drucker-Prager, Critical State) malzeme davranışları ile

modelleyebilmektedir. Önerilen sonlu eleman prosedürü, deneye tabi tutulan bir model kazık grubunun modellenmesinde kullanılmış ve sayısal analizler sonucu elde edilen deplasman ve moment değerleri deneysel değerler ile karşılaştırılarak sonuçların yeterli doğrulukta olduğu görülmüştür. Zeminin non-lineer davranış özelliğinin ve kazık-zemin ara yüzeyindeki ara yüzey etkilerinin dikkate alınması kazık grubunun davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Önerilen sayısal prosedürün diğer yaklaşımlara göre en önemli avantajının; kazık başlığı-kazık-zemin sisteminde, yükleme boyunca oluşan gerilmelerin, deformasyonların, momentlerin ve kuvvetlerin tarihçesinin elde edilebilmesi olduğu belirtilmiştir. Dolayısı ile önerilen üç boyutlu sonlu eleman modeli, üç boyutlu kazık grubu davranışının çok daha iyi anlaşılmasına imkan sağlayacaktır.

Brown ve Shie (1990) yapmış oldukları çalışmada yanal yüke maruz kazık problemini gerçekçi bir şekilde modelleyebilen bir sonlu eleman modeli geliştirmeye çalışmışlardır. Önerilen model, yanal yüklemeye dolayı kazığı çevreleyen zemindeki plastik deformasyonların oluşumunu, kazık ile kazığın arka yüzüne temas eden zemin arasındaki boşluk oluşumunu ve kazık-zemin ara yüzeyinde kazık ile zemin arasındaki rölatif kayma davranışını göz önüne alabilen üç boyutlu ve non-lineer bir sonlu eleman modelidir. Böyle gerçekçi bir modelin geliştirilmesinin kazıklar arası mesafe, kazık başı tutululuğu ve zemin rijitliği parametrelerinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine olan etkilerini araştırmak için yapılacak parametrik çalışmalar için de bir temel oluşturacağı düşünülmüştür. Geliştirilen sonlu eleman modelinin büyük ölçekli yükleme deneylerinden elde edilen ölçüm ve gözlemlere göre yanal yüklü kazık probleminin birçok özelliğini yansıtabildiği belirtilmiştir. Kazık-zemin ara yüzeyindeki rölatif kayma davranışı ve kazık ile zemin arasındaki boşluk oluşumu kazıktan zemine ve zeminden kazığa iletilen gerilme dağılımını etkilemektedir. Kil zemin durumunda drenajsız yükleme etkisinde zemin direnci esas olarak problem geometrisinden etkilenirken kum zemin durumunda zemin direnci problemin geometrisinden etkilendiği kadar çevre basıncından da etkilenmektedir. Zemin yüzeyinin zemindeki yenilme bölgelerinin oluşumu üzerindeki etkisi ve zemin direncinin derinlik boyunca dağılımı göz önüne alınabilmekte böylelikle problemin üç boyutlu doğası yansıtılmaktadır. Rölatif olarak

küçük deplasman değerlerinde zemin yüzeyine yakın derinliklerde göçmeler gözlenmiş artan deplasman ile birlikte yenilme bölgesinin yanal yönde büyüyerek daha derinlere yayıldığı görülmüştür. Bu sonuç, modelin non-linear zemin reaksiyonunu hesaba katabildiğini göstermektedir.

Trochanis ve ark. (1991) yapmış oldukları çalışmada; non-linear zemin davranışının monotonik ve çevrimsel yüklemeye maruz kazıkların eksenel ve yanal yük taşıma kapasitelerini ne ölçüde etkilediğini araştırmışlar ve bu amaçla da kazık-zemin-kazık etkileşimini dikkate alabilen bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen üç boyutlu elasto-plastik sonlu eleman modeli kazık-zemin arasında meydana gelen kayma ve ayrılma davranışı gibi etkileri içerdiği ara yüzey elemanları ile temsil edebilmektedir. Zeminin non-linear davranış özelliği ve kazık-zemin ara yüzey etkileşimlerinin tek kazık ve kazık gruplarının davranışı üzerindeki etkileri geliştirilmiş olan bu üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile araştırılmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar malzeme non-linearitesinin kazık ve zemin tepkisi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Kazık-zemin ara yüzeyinde meydana gelen kayma davranışı kazığın sadece eksenel yüke maruz olması durumunda davranışı etkileyen en önemli unsur iken, kazığın sadece yanal yüke maruz olduğu durum için kazık-zemin ara yüzeyinde meydana gelen ayrılma davranışı ve elastik olmayan zemin deformasyonları davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. Non-linear davranışa sebep olan bu etkilerin ihmal edilmesi kazıklar arasındaki etkileşimin olduğundan çok daha fazla miktarda tahmin edilmesine neden olacaktır.

Laman ve ark. (1999), yapmış oldukları çalışmada, büyük devirme momentlerine ve buna nazaran küçük yatay kuvvetlere maruz ayak (pier) temellerde temel geometrisinin (temelin genişliği, en kesit uzunluğu, temel gömülü uzunluğu) moment taşıma kapasitesine etkisini araştırmak için bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle, sıkı kum zeminde yer alan dairesel bir model ayak temel üzerinde yapılmış olan centrifuge model deneyi PIER3DNL üç boyutlu non-linear sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak PIER3DNL programının doğruluğu ortaya konmuştur. Ayak temel geometrisinin moment taşıma

kapasitesine etkisini araştırmak için yapılan analizler, gevşek ve sıkı kum zeminde yer alan farklı genişlik ve farklı gömülü uzunluk değerlerine sahip kare kesitli ayak temeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile yanal yük etkisi altındaki ayak temellerde 1° ve 2° 'lik sınır dönme açısı değerlerinde moment taşıma kapasitesi ile temel geometrisini ilişkilendiren deneysel bir ilişki elde edilmiştir. Çalışmada ele alınan boyut aralığında herhangi bir değere sahip kare kesitli ayak temellerin 1° ve 2° 'lik sınır dönme açısı değerlerindeki moment taşıma kapasitelerinin bu deneysel eşitlik ile güvenli bir şekilde hesaplanabileceği belirtilmiştir.

Wakai ve ark. (1999), kazık grubundan oluşan gerçek bir temel sisteminin davranışının üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile efektif bir şekilde değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. Önerilen sonlu eleman yöntemi ile etkili sonuçlar alınabilmesi için zeminin uygun bir yapısal model ile modellenmesi ve bu yapısal modelin gerektirdiği parametrelerin değerlerinin deneysel olarak doğru bir şekilde elde edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Kum zemin içerisinde yer alan ve her biri dokuz kazıktan oluşan, yanal yüklemeye maruz, serbest ya da sabit başlı kazık grupları üzerinde yapılmış olan model deneyler üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile analiz edilmiştir. Bununla birlikte; Saito ve ark. (1983) tarafından arazide 3x3 dizilimindeki prototip kazık grubu üzerinde gerçekleştirilmiş olan çevrimsel yanal yükleme deneyleri de üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile analiz edilerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile son derece uyumlu olduğu ve sunulan üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modelinin hem model deneyleri hem de arazi yükleme deneylerini iyi bir doğrulukta modelleyebildiği belirtilmiştir. Bir kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinin grup içerisinde yer alan kazık sayısının tek kazığın yanal yük taşıma kapasitesi ile çarpımından elde edilen değerden daha küçük olduğu görülmüştür. Bu sonuç grup etkisinin önemini ortaya koymaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin grup etki faktörlerinin tahmin edilmesinde son derece etkili olduğu belirtilmiştir. Kazık grubu içerisinde öndeki kazık sırasının orta ve arkada yer alan kazık sıralarından benzer şekilde kazık

sıralarının kenarlarında yer alan kazıkların da ortada yer alan kazıklardan daha fazla yük taşıdıkları belirtilmiştir.

Yang ve Jeremic (2003) tarafından yapılan çalışmada; gevşek ve orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz 3x3 ve 4x3 dizilimlerindeki kazık gruplarının tepkisi üç boyutlu sonlu elemanlar programı OpenSees kullanılarak analiz edilmiş ve kazık grubu içerisinde yer alan kazıkların birbirleri ile olan etkileşimleri araştırılmıştır. Analizlerde, uygulanan yükün grup içerisindeki kazıklar tarafından nasıl paylaşıldıkları, her bir kazıkta meydana gelen eğilme momentleri ve kazık grubunun içerisinde yer aldığı zemin kütlelerinde kazık grubunun yanal yüklenmesi sonucu meydana gelen plastik bölgelerin oluşumu incelenmiştir. Analizler sonucu elde edilen eğilme momenti verileri kullanılarak grup içerisindeki her bir kazığa ait p-y eğrileri sayısal olarak elde edilmiş ve kazıkların yük etkisindeki davranışları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli centrifuge deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Kazık grubundaki her bir kazık sırasının karşıladığı yük miktarı birbirinden farklı olduğu gibi bir kazık sırası içerisinde yer alan her bir kazığın karşıladığı yük miktarı da birbirinden farklıdır. Analizler sonucunda; yük doğrultusunda en önde yer alan kazık sırasının en fazla yükü taşıdığı bununla birlikte bu kazık sırasının kenarında yer alan kazığın da grup içerisinde taşıma kapasitesi en yüksek kazık olduğu ve maksimum eğilme momentinin de bu kazıkta meydana geldiği belirtilmiştir. Kazık grubu içerisinde yer alan kazıklar, grubun küçük yanal ötelenme değerlerinde oldukça farklı p-y davranışı sergilemektedir. Bunun nedeni, her bir kazığın ön tarafında yer alan zeminin yenilmesi ile direk ilişkili olduğu ve elastik sınırlar içerisinde kalan bir yükleme durumunda kazıklar arasındaki etkileşimin plastik sınırlar içerisinde kalan bir yükleme durumundakinden farklı olduğu şeklinde açıklanmıştır. Bu yüzden p-multiplier yaklaşımının, özellikle, küçük yanal ötelenme değerlerinde uygun olmadığı, uygulanan yükün elastik veya plastik sınırlar içerisinde kalacağına bağlı olarak farklı etkileşim faktörleri kullanılmasının en uygun yaklaşım olacağı belirtilmiştir. Kazık grubu içerisinde yer alan kazıklar arası mesafe arttıkça kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Kum zemin sıklığının yükün kazıklar arasındaki paylaşımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Chae ve ark. (2004), şev tepesi civarında yer alan yanal yüke maruz kısa rijit kazıklar üzerinde yapılmış model deneyler ile yine şev tepesi civarında yer alan yanal yüke maruz bir keson temel üzerinde gerçekleştirilmiş arazi deneyini üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek analiz etmişlerdir. Elde edilen analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırarak önerdikleri sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu ortaya koymaya çalışmışlardır. Model deneyler, 30°'lik bir şev açısına sahip homojen kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit tek kazık ve kısa kazık grupları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kazık şev tepesine doğru yaklaştıkça şevli yüzeyin etkisinden dolayı kazığın taşıma gücü azalmaktadır. Azalma küçük deplasman değerlerinde önemli miktarda olmasına karşın deplasman arttıkça, önemli derecede bir değişiklik gözlenmemektedir. Şevli yüzeyin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi kazık ile şev tepesi arasındaki uzaklık kazık çapının 4 katından daha büyük olduğunda ortadan kalkmaktadır. Kazık ile şev tepesi arasındaki mesafe azaldıkça zeminde oluşan göçme bölgesi de genişleyerek büyümektedir. Kısa kazık grubu içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafe azaldıkça kazık grubunun taşıma kapasitesi hem şevli hem de şevsiz zemin durumunda azalmaktadır. Bununla birlikte; kazıklar arası mesafe arttıkça kazık grubunun verimi de artmaktadır. Kazık gruplarında ön sırada yer alan ve şev tepesine oturan kazıkların yük taşıma kapasiteleri kazıklar arasındaki mesafe arttıkça azalmaktadır. Ön sırada yer alan kazıkların taşıma gücündeki azalmanın oranı serbest başlı kazık grubu durumunda kazık başlığı kullanılarak oluşturulan sabit başlı kazık grubu durumuna göre daha fazladır. Laboratuvar model ve arazi deneyinde, rijit kazığın dönme noktası derinliği, küçük deplasman değerlerinde, kazık ucuna yakın bir derinlikte belirlenmiş ve yanal deplasman miktarının artmasının dönme noktası derinliğini etkilemediği belirtilmiştir.

Fan ve Long (2005) tarafından yapılan bu çalışmada kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz tek kazığın davranışı üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Kazığı çevreleyen zeminde kazığa yakın konumda bulunan zemin elemanlarında gerilme izlerinin oluşumları incelenmiştir. Kazık özelliklerinin (kazığın eğilme rijitliği ve kazık çapı) ve zemin özelliklerinin (yatay zemin basınç katsayısı ve dilatasyon) zemin direnci üzerindeki

etkileri parametrik bir çalışma yapılarak araştırılmıştır. Non-lineer sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar kum zemin içerisindeki yanal yüklenmiş kazıkların nihai zemin dirençlerinin tahmin edilmesinde kullanılan mevcut analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda; kazık eğilme rijitliğinin p-y eğri davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, nihai zemin direncinin kazık çapı ile non-lineer bir ilişkisinin olduğu, nihai zemin direncinin yatay zemin basınç katsayısındaki artışa bağlı olarak arttığı, zeminin dilatasyon özelliğinin nihai zemin direncini önemli ölçüde etkilediği ve Hansen yönteminin kum zemindeki yanal yüklenmiş kazıkların nihai zemin dirençlerinin tahmin edilmesinde diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Martin ve Chen (2005), dolgu altında yer alan zayıf ya da sıvılaşabilir bir zemin tabakasından dolayı göçen bir şev dolgusunun ötelenme hareketi nedeni ile oluşan yüklemeye maruz kazıkların tepkisini Flac^{3D} programı kullanarak uygulamış oldukları deplasman yöntemi ile incelemişlerdir. Deplasman yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tam dinamik analizlerden elde edilen eğilme momenti değerlerine çok yakın değerlerde eğilme momentleri elde edilebilmektedir. Yanal zemin hareketi nedeni ile oluşan yükleme, geometrik modelin zemin hareketi doğrultusundaki düşey sınırlarına belirli değerlerde deplasmanlar uygulanarak modellenmiştir. Uygulanan deplasmanlar kolaylık olması bakımından, çoğunlukla, yüzeyden zayıf ya da sıvılaşabilir zemin tabakası alt yüzeyine kadar üniform olarak dağıtılmıştır. Önerilen sayısal modelleme yayımlanmış olan vaka analizlerine ait veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda; pasif kazıkların göçme şeklinin sadece deplase olan zemin tabakası ile stabil olan zemin tabakasının rölatif derinliklerine göre belirlenmediği, bunun yanı sıra, kazık ve zeminin rölatif rijitliklerinin de kazığın göçme şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Kazık ve zeminin rölatif deplasmanları yanal zemin hareketinin pasif kazık üzerinde reaksiyon kuvveti mi yoksa sürüklenme kuvveti mi olacağını etkilemektedir.

Yang ve Jeremic (2005) tarafından yapılan bu çalışmada; yanal yüke maruz tek kazığın davranışı, kazığın üniform kum zemin, üniform kil zemin, arada kum tabakası içeren kil zemin ve arada kil tabakası içeren kum zemin içerisinde

bulunduğu durumlarda üç boyutlu OpenSees sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, dört farklı zemin profili durumu için dört farklı sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Her bir modelden elde edilen p-y eğrileri birbirleri ile karşılaştırılarak iki orta sıkı kum tabakası arasında yer alan yumuşak kil tabakasının kum tabakalarının p-y eğrileri üzerindeki etkileri ve kum tabakalarının arada yer alan yumuşak kil zeminin p-y eğrisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Benzer araştırma, iki yumuşak kil tabakası arasında orta sıkı kum tabakası yer alması durumunda da yapılmıştır. Böylelikle; tabakalı zemin durumunun p-y davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kil-kum-kil zemin profili durumunda; kazık genişliğinin %1'inden küçük yanal deplasman değerlerinde aradaki kum tabakasından dolayı üstte yer alan yumuşak kil zeminin yanal direncinde %30' lara varan bir artış gözlenmiştir. Kum tabakasının üstte yer alan kil tabakası içerisindeki etkisi kil-kum ara yüzeyinden itibaren kil zemin içerisinde bir kazık genişliği derinliğe kadar uzanmaktadır. Yanal deplasman değerlerinin kazık genişliğinin %8 ila %10'u arasında olduğu durumlarda kum zeminin kil zemin içerisindeki etki derinliği oldukça azalmaktadır. Bununla birlikte; yumuşak kil tabakalarından dolayı arada yer alan kum tabakası boyunca kum zeminin yanal direncinde azalmalar gözlenmiştir. Kum-kil-kum zemin profili durumunda ise, ortada yer alan yumuşak kil tabakası üstte yer alan kum tabakasının direncinde azalmaya neden olurken, kum zemin tabakalarından dolayı kil zeminin yanal direncinde %10 ila %40 arasında bir artış gözlenmektedir. Kil zeminin üstte yer alan kum zemin içerisindeki etki derinliği küçük deplasman değerlerinde (kazık genişliğinin %1'inden küçük) ara yüzeyin bir kazık genişliği üzerine kadar uzanmakta iken büyük deplasman değerlerinde (kazık genişliğinin %6.5) bu derinlik kazık genişliğinin iki katına ulaşmaktadır. Kazık genişliğinin %1'inden daha küçük yanal deplasman değerlerinde; arada yer alan tabakanın içsel sürtünme açısı ve drenajsız kayma mukavemetindeki değişim üstte yer alan tabakanın yanal direncini etkilemezken, büyük yanal deplasman değerlerinde içsel sürtünme açısı ve drenajsız kayma mukavemetindeki değişimin üstte yer alan tabakanın yanal direncini etkiledikleri görülmüştür.

Johnson ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmada kazığın enine kesit şeklinin kazık taşıma kapasitesine etkisini bir seri sonlu eleman analizi yaparak

araştırmışlardır. Hem kare hem de dairesel kesitli kazıklar için toplam 24 model analiz edilmiştir. Analizlerde; kum zeminin iki farklı sıklığı (gevşek ve orta-sıkı durum), kazık narinlik oranının (L/d) iki farklı değeri ($L/d=10$ ve $L/d=20$) ve üç farklı yükleme açısı (0° , 45° ve 90°) göz önüne alınmıştır. Her bir analize ait yük-deplasman ilişkisi elde edilerek kazık nihai taşıma gücüne ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda; kazığın kesit şeklinin kazığın yanal yük ve eğik yük taşıma kapasiteleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Sayısal analizlerden ulaşılan bu sonuca Ashour ve Norris (2000)'in yapmış oldukları deneysel çalışmalarda da ulaştıkları yazarlar tarafından bildirilmektedir. Dairesel kazığın taşıma gücünden kare kazığın taşıma gücüne geçişte kullanılmak üzere bir şekil faktörü tanımlanmıştır. Yükleme açısı, kazığın narinliği ve kum zeminin sıklığına bağlı olan bu şekil faktörü, kare ve dairesel kazıkların nihai taşıma gücü değerlerinin oranı olarak elde edilmektedir. Önerilen tasarım abakları tasarımcıların dairesel kazığa dayalı olarak geliştirilmiş olan klasik yöntemleri kullanabilmelerine imkân tanımaktadır. Kare kazık ile aynı uzunluğa ve aynı narinliğe sahip dairesel bir kazığın taşıma gücü hesaplanıp şekil faktörü kullanılarak kare kazık taşıma gücü değeri elde edilebilmektedir.

Karthigeyan ve ark. (2006), kazık başına uygulanan düşey yükün kum zemin içerisinde yer alan kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizi yaparak araştırmışlardır. Çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan tek kazıkların sadece yatay yük etkimesi durumunda ve hem yatay hem de düşey yükün birlikte etkideği kombine yükleme durumunda yapılan sonlu eleman analizlerine ait sonuçlar sunulmaktadır. Kombine yükleme durumunda yükleme sırasının, zemin parametrelerinin (içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı, elastisite modülü), kazık başı tutuluğunun ve kazığın narinliğinin (L/B) davranış üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Kazık başına uygulanan düşey yük, düşey yükün yatay yükten önce uygulandığı yükleme durumunda, sıkı kum zemin içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitesinde hissedilir bir artışa neden olmakta ve aynı zamanda kazığın yanal ötelenme miktarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna karşılık gevşek kum zeminde yer alan kazıkların davranışında kayda değer benzer bir iyileşme gözlenmemiştir. Düşey yükün kazığın yanal yük taşıma

kapasitesi üzerindeki etkisi kumun içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısından önemli derecede etkilenmektedir. L/B oranı arttıkça kazığın yanal yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Narinliğin artması, kazık başına uygulanan düşey yük nedeni ile zemindeki yatay gerilmelerde oluşan iyileşme oranını azalttığından düşey yüklemenin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine etkisi uzun flexible kazıklarda en az seviyede iken, kısa kazık durumunda bu etki daha fazladır.

Karthigeyan ve ark. (2007); homojen kum zemin ve homojen kil zemin içerisinde yer alan düşey kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine düşey yüklemenin etkisini araştırmak için bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ilk olarak; serbest başlı kazığın hem kum zemindeki hem de kil zemindeki nihai düşey yük taşıma kapasitesi tek kazığın düşey yüke maruz olduğu durum için analiz edilerek belirlenmiştir. Daha sonra; kazığın hem kum hem de kil zemindeki yanal yük taşıma kapasitesi kazığın sadece yanal yüke maruz kaldığı durum için analiz yapılarak belirlenmiştir. Kazığın kombine yükleme durumundaki davranışını belirlemek için yapılan analizlerde ise kazığa ilk olarak düşey yük taşıma kapasitesinin belli bir oranında düşey yük uygulanmış ve uygulanan bu sabit düşey yük etkisinde ikinci adım olarak yatay yükleme yapılmıştır. Kazık narinlik oranının, kazık kombine yükleme etkisinde iken, kazığın yanal yük taşıma kapasitesine etkisi farklı narinlik oranları için yapılan analizlerle irdelenmiştir. Homojen kum zemin içerisinde yer alan tek kazığın yanal yük taşıma kapasitesi düşey yüklemenin var olması durumunda %40'lara varan bir artış gösterirken, kil zemin içerisinde yer alan kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde azalma gözlenmiştir. Hem kum hem de kil zeminde, kazığın narinlik oranı arttıkça, düşey yüklemenin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi azalmaktadır. Kum zeminlerde narinlik oranının 25'den kil zeminlerde ise, 16'dan büyük olduğu durumlarda düşey yüklemenin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi sabit kalmaktadır.

Mroueh ve Shahrour (2008) tarafından yapılmış olan bu çalışmada kombine (yatay ve düşey yönde birlikte etkiyen) çekme yüklemesine maruz eğimli bir kazığın taşıma kapasitesi bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri yapılarak araştırılmıştır. Kazık-zemin ara yüzeyindeki temas şartlarının kazığın tepkisine olan etkisi de

incelenmiştir. Zemin içerisine düşeyle 10° 'lik açı yapacak şekilde eğimli olarak yerleştirilen ve kazık-zemin ara yüzeyinde tam bir etkileşimin olduğu kabul edilen durumda kazığa farklı açılarda eğik yükler uygulanmıştır. Sonuçta; uygulanan kombine çekme yükünün kazık düşey eksenini ile yapmış olduğu açının eğimli kazığın yanal ve düşey yük taşıma kapasitesini etkilediği görülmüştür. Düşey kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi kombine yüklemenin eğiminden etkilenmese de aynı sonuç eğimli kazık durumunda gözlenmemiştir. Kazığın zemin içerisine yerleştirildiği açı, kazığın çekme kuvveti kapasitesini artırmaktadır. Bununla birlikte; uygulanan yükün kazık eksenini ile yaptığı açı büyüdükçe, eğimli kazığın çekme kuvveti taşıma kapasitesi azalmaktadır. Bu durum özellikle küçük açısal değişimlerde daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Öyle ki; uygulanan kombine çekme kuvvetinin eğimli kazığın düşey eksenini ile yapmış olduğu açı 0° den 10° 'ye kadar çıkarken çekme kuvveti taşıma kapasitesi de yaklaşık olarak %50 azalmaktadır. Uygulanan kombine çekme kuvvetinin kazık eksenini ile yapmış olduğu açı 10° 'yi aştığında, kazık-zemin ara yüzeyindeki etkileşimin etkisi de ihmal edilebilir derecededir.

Sonlu eleman analizlerinde kullanılmış olan malzeme bilgileri (kazığın davranış şekli, kazığın imal edildiği malzeme, kazık davranışının modellendiği malzeme modeli, zeminin cinsi, zemin davranışının modellenmesinde kullanılan malzeme modeli ve zemin elastisite modülü) ve sonlu elemanlar modeli ile ilgili bilgiler (kullanılan sonlu elemanlar programının adı, kullanılan sonlu eleman tipi, ara yüzey elemanı ve model geometrisinin simetrisi) Çizelge 2.7'de sunulmuştur. Bununla birlikte; analitik yaklaşımlar ile sonlu elemanlar yöntemi arasında yapılan karşılaştırmalar da Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 Sonlu Eleman Analizlerine Ait Bilgiler

Referanslar	Muqtadir ve Desai (1986)	Brown ve Shie (1990)	Laman ve ark. (1999)	Wakai ve ark. (1999)
Kazık Tipi	Flexible	Flexible	Rijit	Flexible
Kazık Malzemesi	Alüminyum	-	Çelik	Alüminyum, Çelik
Kazık Malzeme Modeli	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik
Zemin Cinsi	Kum	Kum	Kum	Kum
Zemin Malzeme Modeli	Nonlinear Elastik	Drager-Prager	Von Misses	Mohr-Coulomb Drager-Prager
Sonlu Elemanlar Programı	-	ABAQUS	PIER3DNL	3D Elasto-Plastik
Sonlu Eleman Tipi	8 Düğümlü 6 Yüzlü İzoparametrik Eleman	27 Düğümlü İzoparametrik Brick Eleman	8 Düğümlü İzoparametrik Brick Eleman	20 Düğümlü Brick Eleman
Ara Yüzey	Tanımlı	Tanımlı	Tanımlı Değil	Tanımlı
Simetri	+	+	+	+
Model Parametre Değerleri	Üç Eksenli Deney	-	Üç Eksenli CD Deneyi	Üç Eksenli CD Deneyi
Elastisite Modülü	$E_t = \left[1 - \frac{E_t(1-\sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right]^2 \frac{K_{t0}(\sigma_3)}{p_0} \right]^n$	-	$E = K p_a (\sigma_3 / p_a)^n$	E_{50}
Modelin Doğrulanması	Laboratuvar Model Deneyleri	Tam Ölçekli Arazi Deneyi	Centrifuge Deneyleri	Tam Ölçekli Arazi Deneyi

Çizelge 2.7 (Devam)

Referanslar	Yang ve Jeremic (2003)	Chae ve ark. (2004)	Fan ve Long (2005)	Martin ve Chen (2005)
Kazık Tipi	Flexible	Rijit	Flexible	Flexible
Kazık Malzemesi	Alüminyum	Alüminyum	Çelik	Beton
Kazık Malzeme Modeli	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik
Zemin Cinsi	Kum	Kum	Kum	Kum
Zemin Malzeme Modeli	Drager-Prager	Mohr-Coulomb Drager-Prager	Elastik-Plastik Model (Desai ve ark., 1991)	Elasto-Plastik Mohr-Coulomb
Sonlu Elemanlar Programı	OpenSees	3D Elasto-Plastik	PILE3D	FLAC ^{3D}
Sonlu Eleman Tipi	20 Düğümülü Brick Eleman	20 Düğümülü Brick Eleman	20 Düğümülü İzoparametrik Solid Eleman	-
Ara Yüzey	Tanımlı	Tanımlı	Tanımlı	-
Simetri	+	+	+	+
Model Parametre Değerleri	Üç Eksenli CD Deneyi	Üç Eksenli CD Deneyi	Üç Eksenli CD Deneyi	-
Elastisite Modülü	$E = E_0 (p / p_a)^a$	E_{50}	$E = K p_a (\sigma'_m / p_a)^n$	-
Modelin Doğrulanması	Centrifuge Deneyleri	Klasik Laboratuvar Model Deneyi ve Tam Ölçekli Arazi Deneyi	Tam Ölçekli Arazi Deneyi	Tam Ölçekli Arazi Deneyi Sayısal Analiz Sonuçları

Çizelge 2.7 (Devam)

Referanslar	Yang ve Jeremic (2005)	Johnson ve ark. (2006)	Karthigeyan ve ark. (2006)	Karthigeyan ve ark. (2007)
Kazık Tipi	Flexible	Flexible	Rijit, Flexible	Rijit, Flexible
Kazık Malzemesi	Alüminyum	Beton	Beton	Beton
Kazık Malzeme Modeli	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Lineer Elastik
Zemin Cinsi	Kum	Kum	Kum	Kum
Zemin Malzeme Modeli	Drager-Prager	Mohr-Coulomb	Drager-Prager	Drager-Prager
Sonlu Elemanlar Programı	OpenSees	ABAQUS	GEOfEM3D	GEOfEM3D
Sonlu Eleman Tipi	20 Düğümlü Brick Eleman	20 Düğümlü Brick Eleman	20 Düğümlü İzoparametrik Brick Eleman	20 Düğümlü İzoparametrik Brick Eleman
Ara Yüzey	Tanımlı	Tanımlı	Tanımlı	Tanımlı
Simetri	+	+	+	+
Model Parametre Değerleri	-	SPT Verileri	SPT Verileri	-
Elastisite Modülü	$E = E_0 (p / p_a)^a$	-	-	-
Modelin Doğrulanması	Centrifuge Deneyleri	Tam Ölçekli Arazi Deneyi	Tam Ölçekli Arazi Deneyi	Tam Ölçekli Arazi Deneyi Laboratuvar Model Deneyi

Çizelge 2.8 Analitik Yaklaşımlar ile Sonlu Elemanlar Yönteminin Karşılaştırması

Klasik Analitik Yaklaşımlar	Sonlu Elemanlar Yöntemi
Çoğunluğu üniform zemin koşulları için geçerlidir.	Her türlü zemin koşulu için uygulanabilir
Sadece, göçme anındaki taşıma gücü ve ötelenme değerleri hesaplanmaktadır.	İstenilen yükleme değerindeki yük ve ötelenme davranışı elde edilebilir.
Yanal zemin basınçları genişlik boyunca üniform dağılmaktadır.	Yanal zemin basınçlarının dağılımı genişlik boyunca üniform değildir.
Yanal toprak basınçlarının, çoğunlukla, kazık uzunluğu boyunca doğrusal değiştiği kabul edilir.	Yanal toprak basınçlarının kazık uzunluğu boyunca dağılımı non-lineer bir değişim gösterir.
Problemin üç boyutlu yapısı sadece, şekil katsayıları kullanılarak dikkate alınmaktadır.	Üç boyutlu gerilme-deformasyon davranışı göz önüne alınarak hesaplamalar yapılır.
Zemin-kazık ara yüzeyi sürtünmesiz kabul edilir.	Sürtünmeli ara yüzey elemanlar kullanılarak zemin-kazık ara yüzeyi modellenenebilir.
Kazık en kesit şeklinden bağımsız hesaplama yaparlar.	Kazık en kesit şeklini hesaba katabilmektedir.
Zeminin dilatasyon özelliği dikkate alınmaz.	Zeminin dilatasyon özelliği dikkate alınmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar, kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıklar üzerinde gerçekleştirilen yanal yükleme deneylerini içermektedir. Kum zemin, gevşek ve sıkı olmak üzere farklı relatif sıkılık derecelerinde hazırlanmıştır. Bununla birlikte; üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin ve şevlendirilmiş gevşek kum zemin durumlarında da model deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisini araştırmak amacıyla çelik, alüminyum ve derlin malzemeden üretilmiş model kısa kazıklar kullanılmıştır. Yanal yük zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte ve farklı yükleme hızlarında uygulanmış ve uygulanan yükleme hızının davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda; farklı gömülü uzunluk (L), farklı çap (D) ve farklı kesit geometrisine sahip model kazıklar üzerinde yapılan yanal yükleme deneyleri ile L/D oranı değişiminin ve kesit geometrisinin yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu bölümde; deney düzeneği, yükleme sistemi, deneylerde kullanılan kum zeminin özellikleri ve deneysel çalışmalar sırasında takip edilen çalışma prosedürü açıklanmaktadır.

3.1. Deney Düzeneği

3.1.1. Deney Kasası

Deneysel çalışmalar, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında, iç ölçüleri 960mmx480mmx500mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) olan dikdörtgen kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi deney kasası iskeleti 5mm kalınlıktaki çelik profilden olup yan yüzeyleri 10mm kalınlıktaki cam, ön ve arka yüzeyleri ile alt tabanı ise 20mm kalınlıktaki ahşap malzemeden oluşturulmuştur. Cam yüzeyler, kum zeminin kasa içerisine yerleştirilmesi sırasında görülmesine ve deneyler sırasında zeminde oluşabilecek deformasyonların izlenmesine imkan sağlamaktadır. Deney kasasının rijitliğini

boyutları seçilmiştir. Deney kasası, Şekil 3.1’den de görüldüğü gibi yükleme sehpası içerisine yerleştirilmiştir. Yükleme sehpası 5mm kalınlıktaki çelik profilden imal edilmiş olup, yüksekliği 800mm, genişliği de 510mm dir. Yükleme sehpasının yükleme sistemi altında yer alan uzunluğu 800mm iken deney kasası altında yer alan uzunluğu da 1200mm dir.

3.1.2. Model Kazıklar

Deneysel çalışmalarda model kazık olarak çelik, alüminyum ve derlin malzemeden imal edilen model kısa kazıklar kullanılmıştır. Malzeme etkisinin araştırıldığı deneyler dışında çalışmalar çelik model kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yanal yük, model kısa kazıklara vidalanmış bir çekme kolu aracılığı ile uygulanmış olup, çekme kolu olarak da çelik, alüminyum ve derlin malzemeden imal edilen çubuklar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan model kazıklara ve çekme kollarına ait çap (D) (veya genişlik (B)), uzunluk (L), birim hacim ağırlık (γ), elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

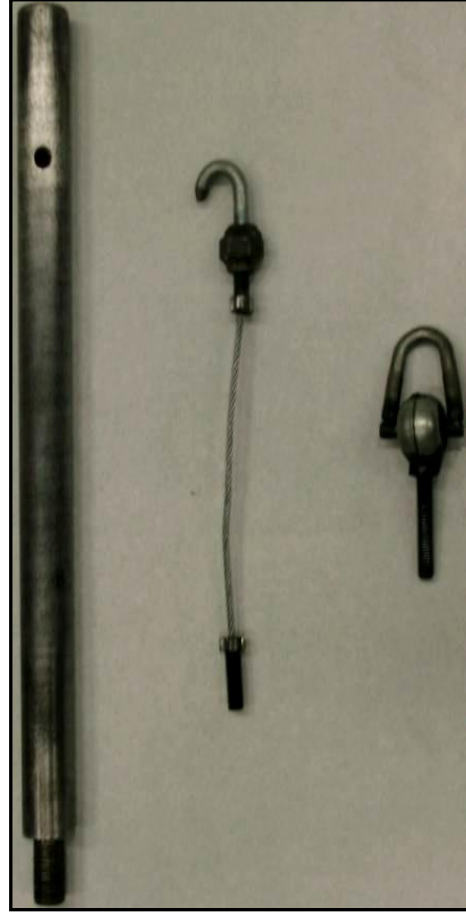
Çizelge 3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kazık ve Çekme Kolu Özellikleri

	Malzeme	D (mm)	B (mm)	L (mm)	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
Model Kısa Kazık	Çelik	50	-	150	77	210000	0.25
		50	-	200			
		50	-	250			
		40	-	200			
		66.60	-	200			
		-	44.30	200			
		-	50	200			
	Alüminyum	50	-	200	26	70000	0.33
	Derlin	50	-	200	14	3100	0.35
Çekme Kolu	Çelik	25	-	330	77	210000	0.25
	Alüminyum	25	-	330	26	70000	0.33
	Derlin	35	-	330	14	3100	0.35

Yanal yük, zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte, çekme koluna vidalanmış bilyalı bir kancaya bağlanan çelik halat yardımı ile uygulanmıştır. Model çelik kazık, çelik çekme kolu ve bilyalı kanca Şekil 3.2’de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.2. (a) Model Çelik Kazık (b) Çekme Kolu, Çelik Halat ve Bilyalı Kanca

3.1.3. Yükleme Düzeneği

Otoban ve demiryollarındaki işaret levhaları ile reklam panolarını taşıyan direkler, aydınlatma direkleri ve yüksek gerilim hatlarını taşıyan kuleler oldukça yüksekte etkileyen ve büyük devirme momentlerine neden olan yanal yüklere maruzdurlar. Bununla birlikte; etkileyen düşey yükler ise ihmal edilebilecek kadar

küçük değerdedir. Bahsedilen yapıların maruz kaldıkları yanal yükler, taşıdıkları kablo ya da levhalar ile bunlara etkiyen rüzgar basınçlarından kaynaklanmaktadır (Laman, 1995).

Bu tip bir yüklemeyi modelleyebilmek için yanal yük kum zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte çekme kuvveti olarak uygulanmıştır. 1/20 ölçekli model düzenekte seçilmiş olan bu yükseklik prototip boyutlarda 6m yüksekliği temsil etmektedir. Bu yükseklik değeri, karayolları kenarında, dışında veya üzerinde inşa edilecek olan levhalar, ışıklar ve yüksek gerilim enerji nakil hatları için kullanılan ilgili yönetmelikte belirtilen yükseklik değeri ile de uyumludur (www.kgm.gov.tr/asps/trafik/yonetmelik2.htm).

Yanal çekme kuvveti elektrik motoru tarafından hareket ettirilen bir dişli sistem aracılığı ile uygulanmıştır. Georgii Kobold firması tarafından üretilmiş elektrik motoru ile Schwaben Prazision firması tarafından üretilmiş JF 111.1 tipindeki redüktörden oluşan redüktörlü elektrik motoru, kullanılan varyatör sistemi ile birlikte, dişli sistemin farklı devir hızlarında hareketine imkan sağlamakta ve bu yolla yanal çekme kuvveti farklı hızlarda uygulanabilmektedir. Kurulan yükleme sistemi 0.01mm/dak. ile 3.50mm/dak. arasında değişen farklı hızlarda yükleme yapabilmektedir. Yanal çekme kuvveti, çekme koluna çelik bir halat aracılığı ile etkitilmiştir. Çelik halatın bir ucu yükleme dişlisinin ucunda yer alan yük hücresine vidalanmış iken, diğer ucu da çekme çubuğuna vidalanmış bilyalı kancaya bağlanmıştır.

3.1.4. Yük Hücresi

Deneyisel çalışmalar sırasında model kazıklara etkiyen yük değerlerini okumak amacı ile ESİT firması tarafından üretilen ve özellikleri Çizelge 3.2’de verilen elektronik yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 3.3’de görülen yük hücresi S tipi STCS 100 modelidir. Yük hücresinden elde edilen yük değerleri veri toplama cihazına aktarılmıştır.

Çizelge 3.2 Yük Hücresi Özellikleri (www.esit.com.tr)

Teknik Özellikler	Birim	Açıklama
Model	-	S Tipi STCS 100
Maksimum Kapasite (Emax)	kg	100
Aşırı Yükleme Kapasitesi	kg	150
Hassasiyet	gr	10
Kırılma Kapasitesi	%Emax	200
Esneleme (Emax Yük Değerinde)	mm	≤0.40
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	°C	-10.....+40
Yük Hücresi Malzemesi	-	Paslanmaz Çelik
Ağırlık	kg	0.50

Şekil 3.3. Yük Hücresi (www.esit.com.tr)

3.1.5. Deplasman Transduserleri

Deneylerde, model kısa kazıkların yanal çekme kuvveti etkisi altındaki ötelenmeleri zemin yüzeyi üzerinden 26mm ve 86mm yüksekliklerde yer alan ve çekme koluna temas eden deplasman transduserleri kullanılarak belirlenmiştir. Deplasman transduserleri, ELE firması tarafından üretilmiş olup, EL 27-1355 seri numarasına sahiptir. Şekil 3.4’de görülen deplasman transduserleri 0.0-9.9999mm arasında deplasman değerleri ölçebilmektedir.

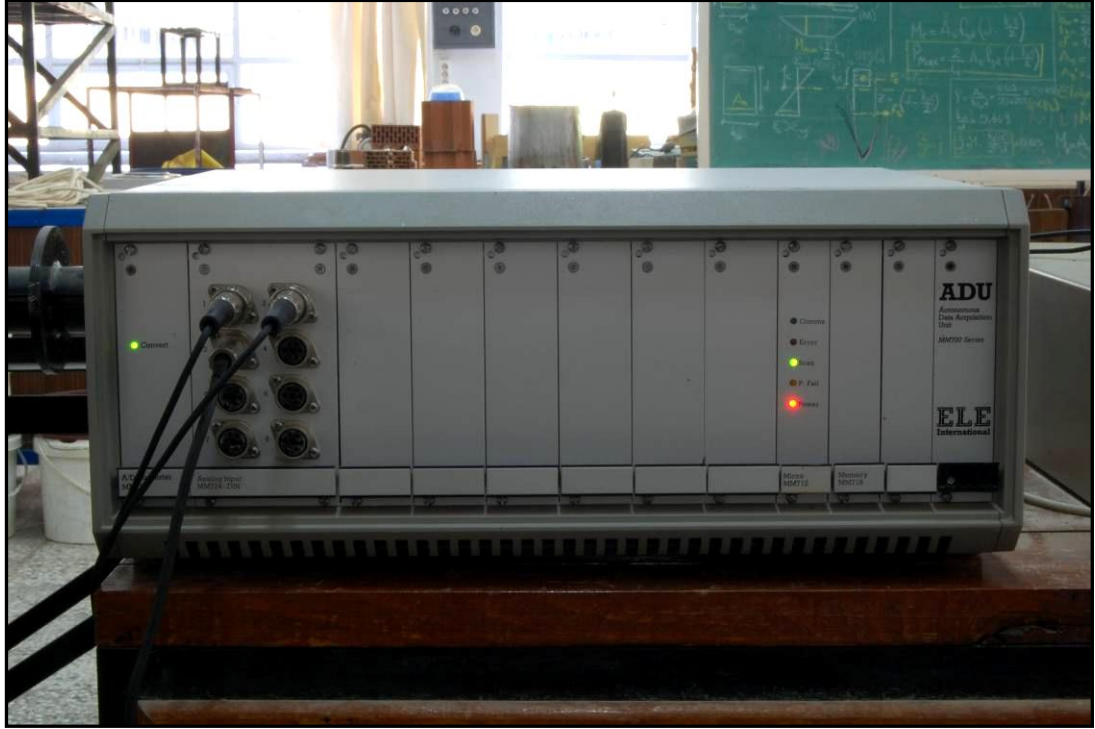


Şekil 3.4. Deplasman Transduseri

3.1.6. Veri Kaydetme Ünitesi (ADU)

Deneyler sırasında yük hücresinde ve deplasman transduserlerinde oluşan değerler EL 27-1495 seri numaralı ve 8 kanal girişli ADU (Autonomous Data Acquisition Unit) veri toplama (Data Logger) cihazına aktarılmıştır. Elde edilen yük

ve deplasman verileri daha sonra bilgisayar ortamında DIALOG programı yardımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. ADU Cihazı ve DIALOG Programı

3.1.7. Titreşim Cihazı

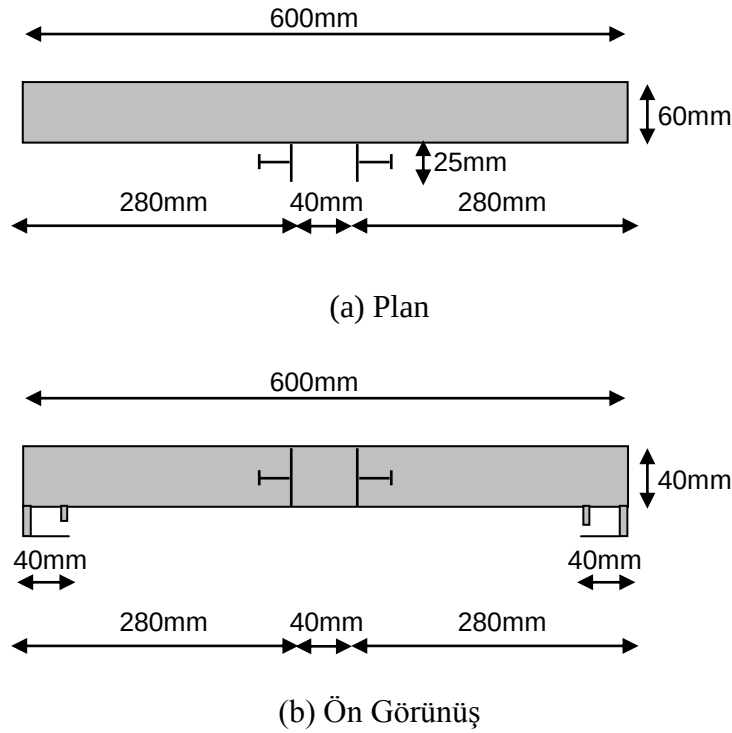
Deneysel çalışmalar hem gevşek hem de sıkı durumda hazırlanmış kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Sıkı kum zemin durumunda, kum zemin deney kasası içerisine 3'er cm'lik tabakalar halinde yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Bu amaçla deney kasasının iç yüzeyleri 3'er cm aralıklı yatay çizgiler ile bölünmüştür. Her bir kum tabakası serildikten sonra elektrikle çalışan BOSCH GBH 2-24 DSE titreşim cihazı ile belirlenen tabaka kalınlığı elde edilene kadar sıkıştırılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi sıkıştırma işlemi sırasında üniform sıkılık elde etmek ve kum danelerinin kırılmasını önlemek amacı ile titreşim cihazının uç kısmına 130mmx130mm boyutlarında ve 20mm kalınlığında derlin malzemeden imal edilmiş plaka monte edilmiştir.



Şekil 3.6. Titreşim Cihazı

3.1.8. Model Kazık Sabitleme Aparatı

Model kazığın zemin içerisine dik konumda yerleştirilmesi ve kum zemin tamamı ile deney kasasına yerleştirilene kadar dik konumda tutulması deney sonuçlarının güvenilirliği yönünden son derece önemlidir. Bu yüzden; deneysel çalışmalarda Şekil 3.7’de görülen sabitleme aparatı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Kazık Temel Sabitleme Aparatı

Hem gevşek hem de sıkı durumda hazırlanmış kum zeminde gerçekleştirilen deneylerde kazık ucunun oturacağı zemin kotuna kadar kum zemin tabakalar halinde serilerek ya da sıkıştırılarak deney kasası içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemin ardından kazık temel sabitleme aparatı deney kasası profiline geçirilerek kasa uzunluğunun orta noktasına kadar sürülmüş ve burada sabitlenmiştir. Daha sonra model kazık zemin içerisine konmuş ve çekme çubuğu sabitleme aparatı üzerinde yer alan kulaklar arasına yerleştirilerek kulaklara kaynaklı biçimde yer alan vidalar sıkılmıştır. Model kazığın sabitlenmesinin ardından hem kasa uzun kenarı

doğrultusunda, hem de kasa kısa kenarı doğrultusunda kazığın dikliği su terazisi kullanılarak kontrol edilmiştir (Şekil 3.8).

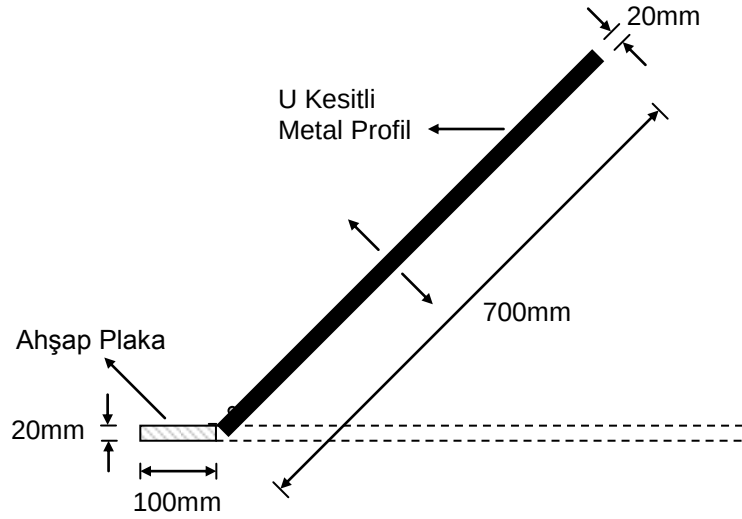


Şekil 3.8. Model Kazığın Zeminde Dik Konumda Tutulması

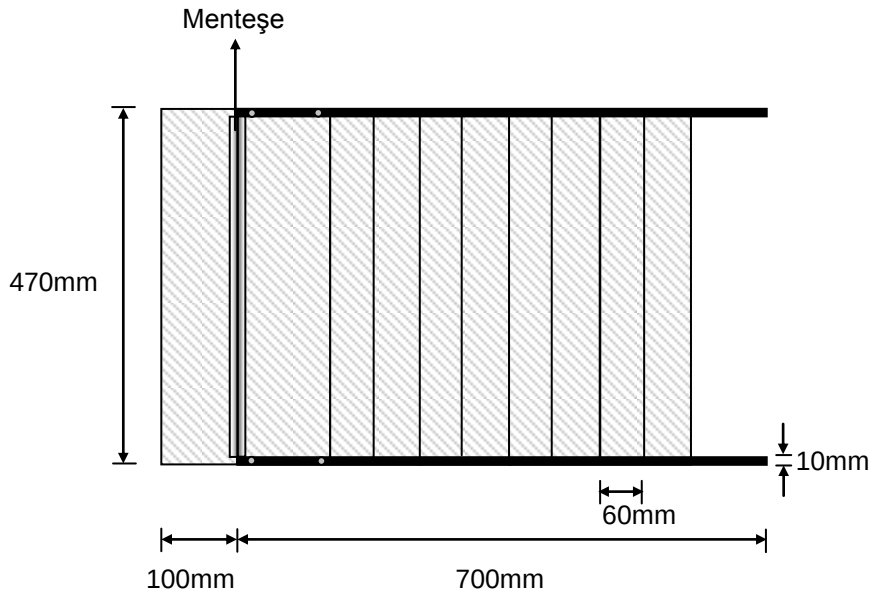
3.1.9. Şev Oluşturma Düzeneği

Şevlendirilmiş gevşek kum zeminde istenilen açıda şevli bir yüzey oluşturabilmek, gevşek kuru kum zeminin kolayca dağılmasından dolayı oldukça güç olmaktadır. Deneysel çalışmalarda şevli yüzey oluşturulurken Keskin (2009) tarafından geliştirilmiş olan Şekil 3.9'daki şev oluşturma düzeneği kullanılmıştır. Şev oluşturma düzeneği şev topuğuna oturan 470mm uzunluğunda, 100mm genişliğinde ve 20mm kalınlığındaki iki ahşap plakaya, menteşe yardımı ile, ileri-geri hareket edebilecek şekilde alt uçlarından monte edilmiş iki adet U kesitli metal profilden oluşmaktadır. U kesitli metal profillerin uzunluğu 700mm, genişliği ise 20mm olup

bu iki profil arasında aşağı-yukarı hareket edebilen 470mm uzunluğunda, 60mm genişliğinde ve 20mm kalınlığında ahşap plakalar yer almaktadır.



(a) Görünüş



(b) Plan

Şekil 3.9. Şev Oluşturma Düzeneği (Keskin, 2009)

Gevşek kum zemin, kasa içerisine şev topuğu seviyesine kadar yatay tabakalar halinde serilerek yerleştirildikten sonra şevli yüzeyi oluşturacak profil ve ahşap plaka düzeneği şevli yüzeyin başlangıç noktasına yerleştirilmekte ve istenilen açıda sabitlenmektedir. Şevli ilk tabaka oluşturulduktan sonra her ilave tabaka için ahşap plakalar profiller arasından geçirilmekte ve istenilen şev yüksekliğine ulaşıncaya kadar kum zemin serilerek yerleştirilmektedir.

3.2. Kum Zemin

Deneyisel çalışmada model zemin olarak Devlet Su İşleri (DSİ) Adana Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen, Çukurova Bölgesi, Çakıt Deresi yatağından getirilen kum numuneler kullanılmıştır. Kum numuneler, Ç.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda ASTM (American Standards of Testing Materials) standartlarına göre 18 No'lu (1mm çaplı) ve 200 No'lu (0.074mm çaplı) eleklerden yıkanarak elenmiştir. Eleme işlemi sonunda 18 ve 200 No'lu elekler arasında kalan kum numuneler, laboratuvarda geniş bir alana serilerek oda sıcaklığında kurutulmuştur (Şekil 3.10).

Deneyisel çalışmada kullanılan kumun endeks ve kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Ç.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda bir seri deney gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Endeks Deneyler

3.2.1.1. Elek Analizi

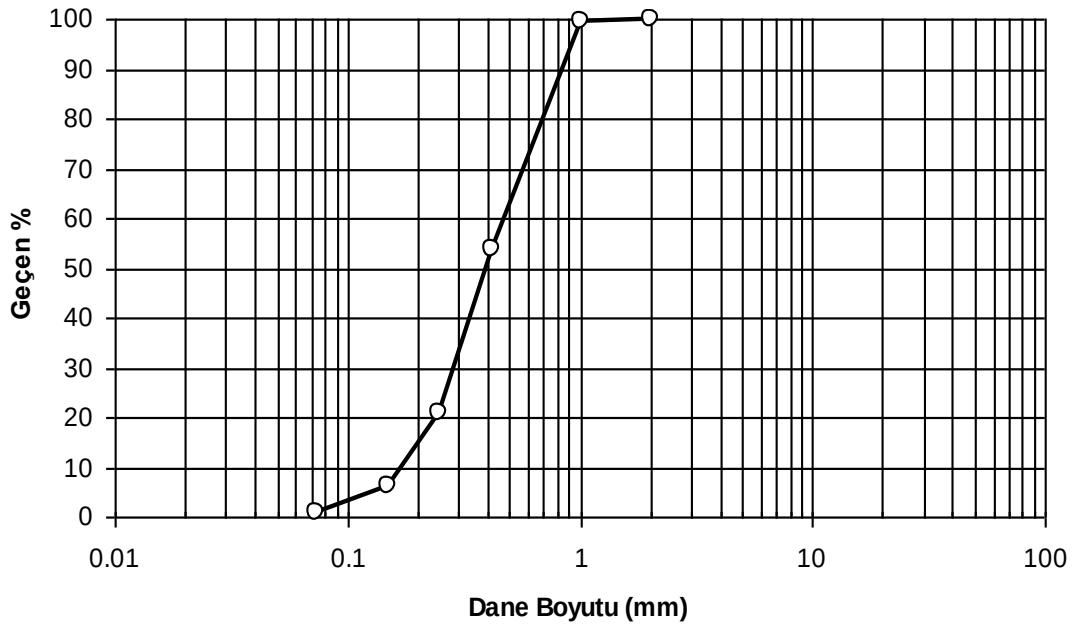
Deneyisel çalışmada kullanılan kum numuneler, ASTM standartlarına göre önceden belirlenen bir seri elekten elenerek dane çapı dağılımı eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.11). Dane çapı dağılımı eğrisinden yararlanılarak model kum zeminin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre kötü derecelenmiş ince ve temiz kum (SP) olarak tanımlanmıştır. Elek analizi deney sonuçları toplu olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Deney Kumunun Kurutulması

Çizelge 3.3 Elek Analizi Sonuçları

Granülometri Parametreleri	Birim	Değer
Kaba Kum Yüzdesi	%	0.0
Orta Kum Yüzdesi	%	46.40
İnce Kum Yüzdesi	%	53.60
Efektif Dane Çapı, D_{10}	mm	0.18
D_{30}	mm	0.30
D_{60}	mm	0.50
Üniformluk Katsayısı, C_u	-	2.78
Derecelenme Katsayısı, C_c	-	1.00
Zemin Sınıfı	-	SP



Şekil 3.11. Model Kum Zeminin Dane Çapı Dağılımı Eğrisi

3.2.1.2. Piknometre Deneyi

Deney kumunun dane birim hacim ağırlığını belirlemek için yapılan piknometre deneyleri sonucunda $\gamma_s=26.8 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir.

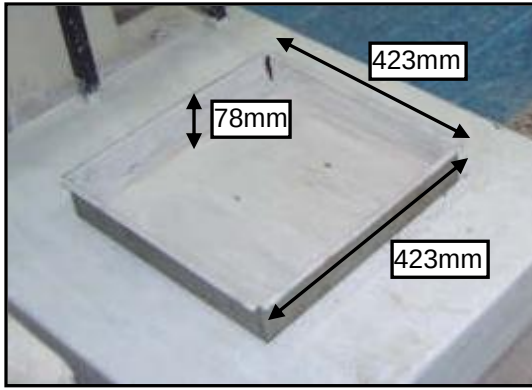
3.2.1.3. Rölatif Sıkılık Deneyleri

Deneyisel çalışmalar hem gevşek hem de sıkı relatif sıkılık derecelerinde hazırlanmış kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Deney kumunun gevşek ve sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek için 423mmx423mm boyutlarında ve 78mm yüksekliğindeki kap içerisinde rölatif sıkılık deneyleri yapılmıştır.

Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{k\text{-gevşek}}$, değeri belirlenirken kum numune kap içerisine herhangi bir sıkıştırmaya tabii tutulmadan yerleştirilmiştir. Daha sonra zemin yüzeyi düzeltilerek yüzeyin düzlüğü su terazisi ile kontrol edilmiştir. İçerisinde gevşek kum zemin bulunan kap tartılarak ağırlığı bulunmuştur (Şekil 3.12). Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{k\text{-sıkı}}$, değeri elde edilirken, kum

numune kap içerisine 5 tabaka halinde serilerek yerleştirilmiş ve her bir tabaka serildikten sonra titreşim cihazı ile sabit bir enerji verilerek sıkıştırılmıştır. Tabakaların her birinde uygulanan sıkıştırma enerjisinin aynı derecede olmasına özen gösterilmiştir. Son tabaka serilip sıkıştırıldıktan sonra zemin yüzeyi düzeltilmiş ve su terazisi ile yüzeyin düzlüğü kontrol edilmiştir (Şekil 3.13).

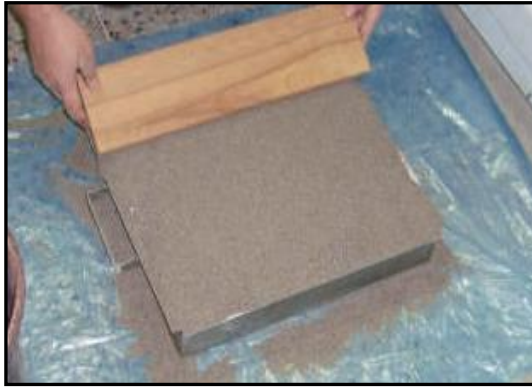
Deneyler gevşek ve sıkı durumda 5' er kere tekrarlanmış ve elde edilen ağırlık değerlerinin ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'de sunulmuştur.



(a) Deney Kabı Boyutları



(b) Zeminin Kap İçerisine Yerleştirilmesi



(c) Zemin Yüzeyinin Düzeltilmesi



(d) Yüzey Düzlüğünün Kontrolü

Şekil 3.12. Gevşek Kum Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi



Şekil 3.13. Sıkı Kum Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi

Çizelge 3.4 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

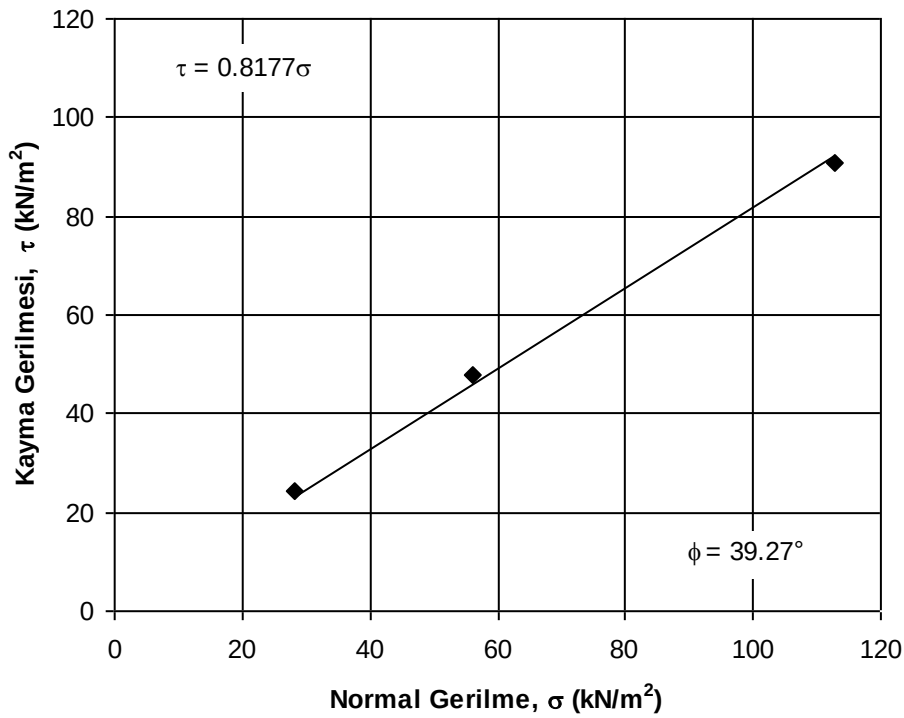
Parametreler	Birim	Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s	kN/m^3	26.800
Gevşek Haldeki Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{k\text{-gevşek}}$	kN/m^3	15.030
Sıkı Haldeki Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{k\text{-sıkı}}$	kN/m^3	17.060
Gevşek Haldeki Boşluk Oranı, $e_{\text{gevşek}}$	-	0.783
Sıkı Haldeki Boşluk Oranı, $e_{\text{sıkı}}$	-	0.570

3.2.2. Kayma Mukavemeti Deneyleri

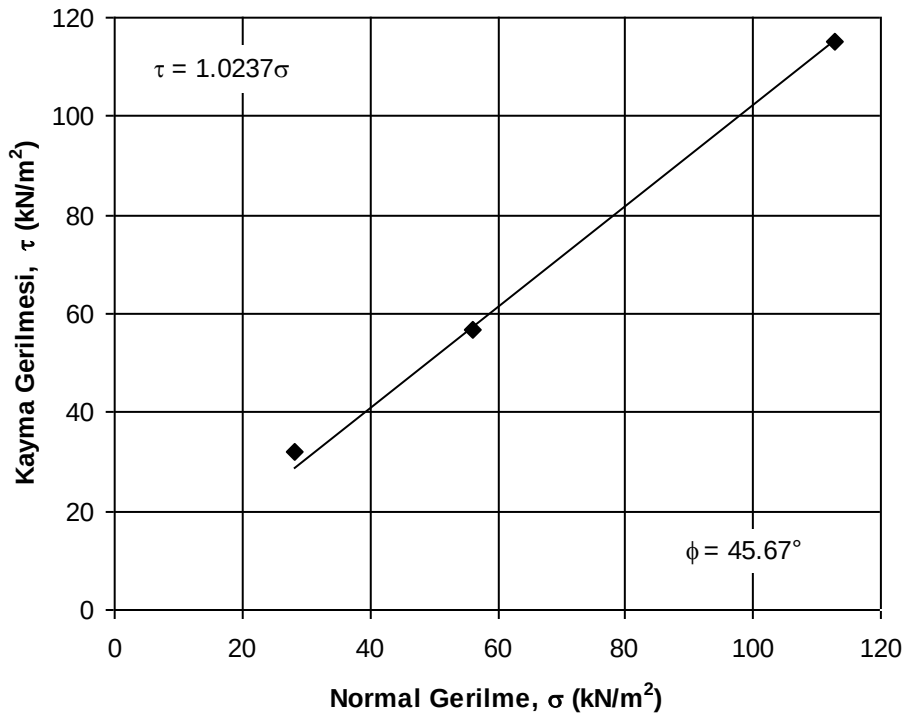
Deneylerde kullanılan kumun kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kum numuneler üzerinde kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1. Kesme Kutusu Deneyleri

Kum numuneler 60mmx60mm boyutlarındaki kare kesitli kesme kutusuna yüksekliği 38mm olacak şekilde gevşek ve sıkı halde yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Hem gevşek hem de sıkı durumdaki kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde numuneler, $\sigma_1 = 28$ kPa, 56 kPa ve 112 kPa değerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabii tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda elde edilmiş olan kırılma zarfları gevşek kum zemin için Şekil 3.14’de, sıkı kum zemin için de, Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Deney kumunun gevşek haldeki kayma mukavemeti açısı $\phi = 39.27^\circ$ olarak bulunmuşken sıkı haldeki kum zemin için kayma mukavemeti açısı $\phi = 45.67^\circ$ olarak elde edilmiştir.



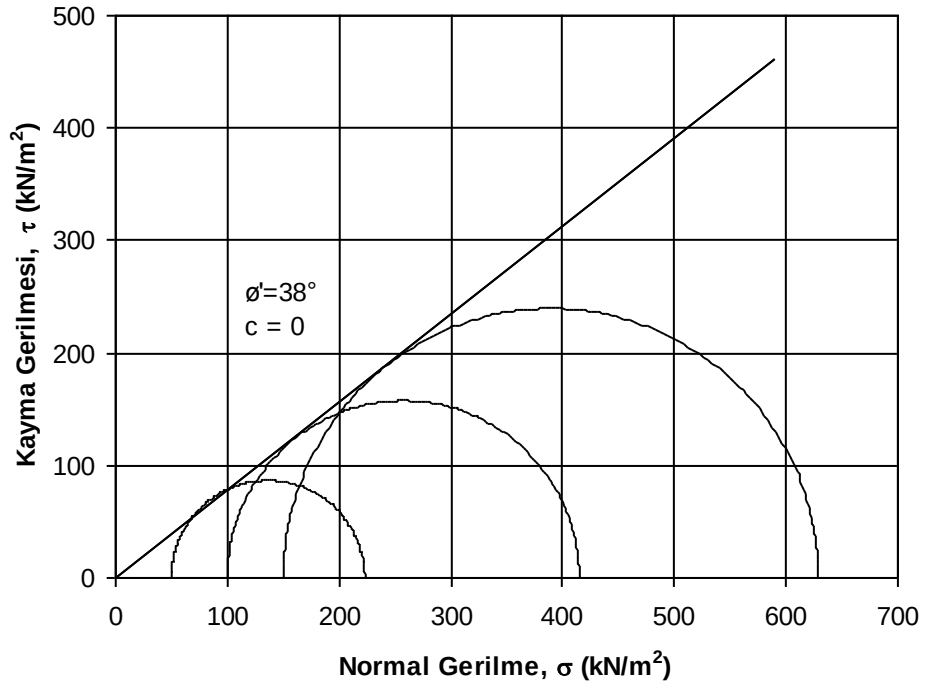
Şekil 3.14. Gevşek Kum Zeminde Kesme Kutusu Deney Sonucu



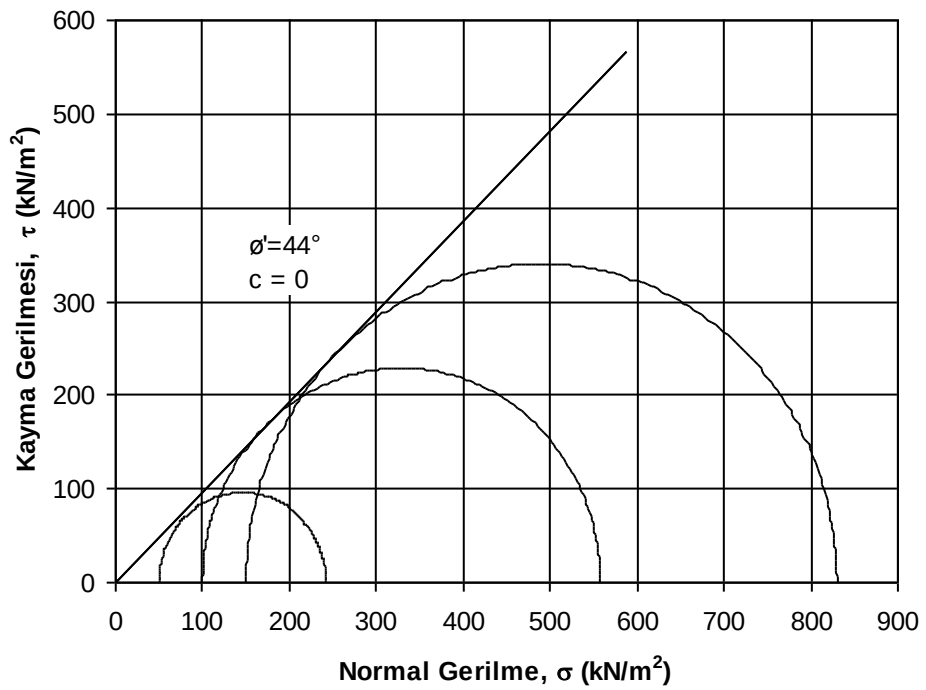
Şekil 3.15. Sıkı Kum Zeminde Kesme Kutusu Deney Sonucu

3.2.2.2. Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Gevşek ve sıkı halde hazırlanan kum numuneler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde numunelere $\sigma_3 = 50$ kPa, 100 kPa ve 150 kPa değerinde hücre basınçları uygulanmıştır. Üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar gevşek kum zemin için Şekil 3.16'da sıkı kum zemin için de Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Deneyler sonucunda gevşek kum zeminin kayma mukavemeti açısı $\phi = 38^\circ$ sıkı kum zeminin kayma mukavemeti açısı ise $\phi = 44^\circ$ olarak elde edilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde kohezyon değeri $c = 0$ kN/m² olarak bulunmuştur.



Şekil 3.16. Gevşek Kum Zeminde CD-Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.17. Sıkı Kum Zeminde CD-Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

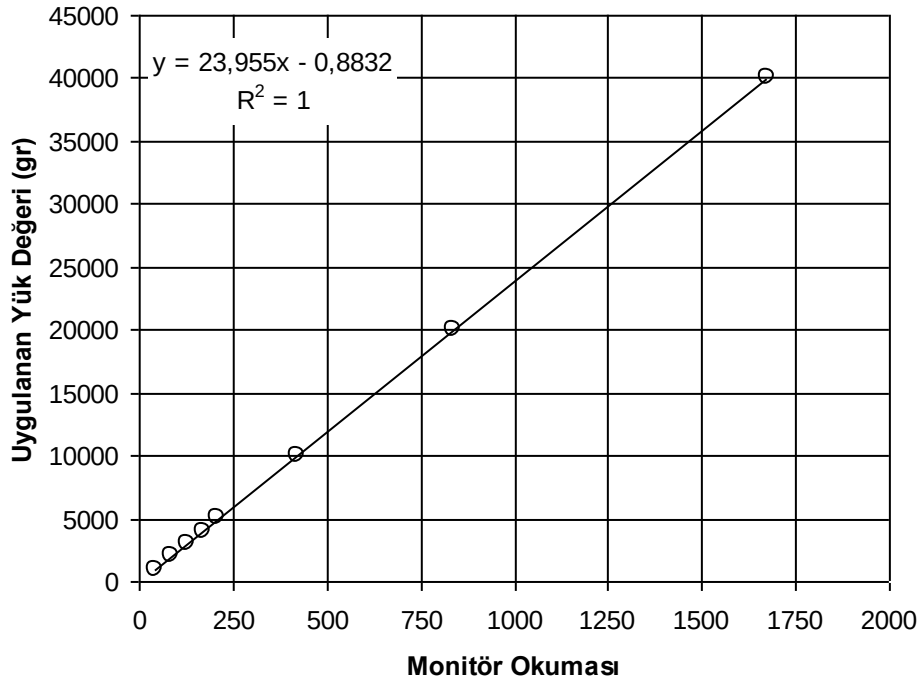
3.3. Deney Yöntemi

3.3.1. Ölçüm Aletleri ve Yükleme Düzeneklerinin Kalibrasyonu

Deneyisel çalışmada gerçekleştirilen yük ve deplasman ölçümlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde yapılabilmesi için yük hücresi ve deplasman transduserlerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Yük hücresi kalibrasyon değerleri Çizelge 3.5’de kalibrasyon eğrisi ise, Şekil 3.18’de verilmiştir. Deplasman transduserlerinin kalibrasyon değerleri Çizelge 3.6 ve 3.7’de kalibrasyon eğrileri ise Şekil 3.19 ve 3.20’de görülmektedir.

Çizelge 3.5 Yük Hücresi Kalibrasyon Değerleri

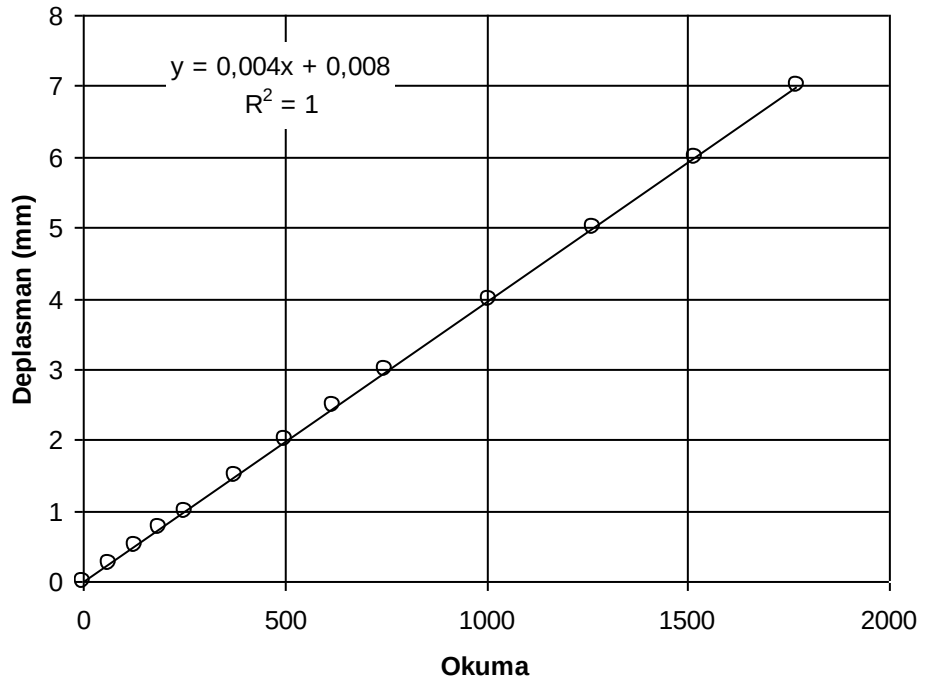
Uygulanan Yük Değeri (gr)	Monitör Okuması
1008.02	42.00
2009.01	84.00
3017.03	126.00
4020.07	168.00
5021.14	209.50
10060.19	420.00
20097.33	839.00
40099.76	1674.00



Şekil 3.18. Yük Hücresi Kalibrasyon Eğrisi

Çizelge 3.6 1 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Değerleri

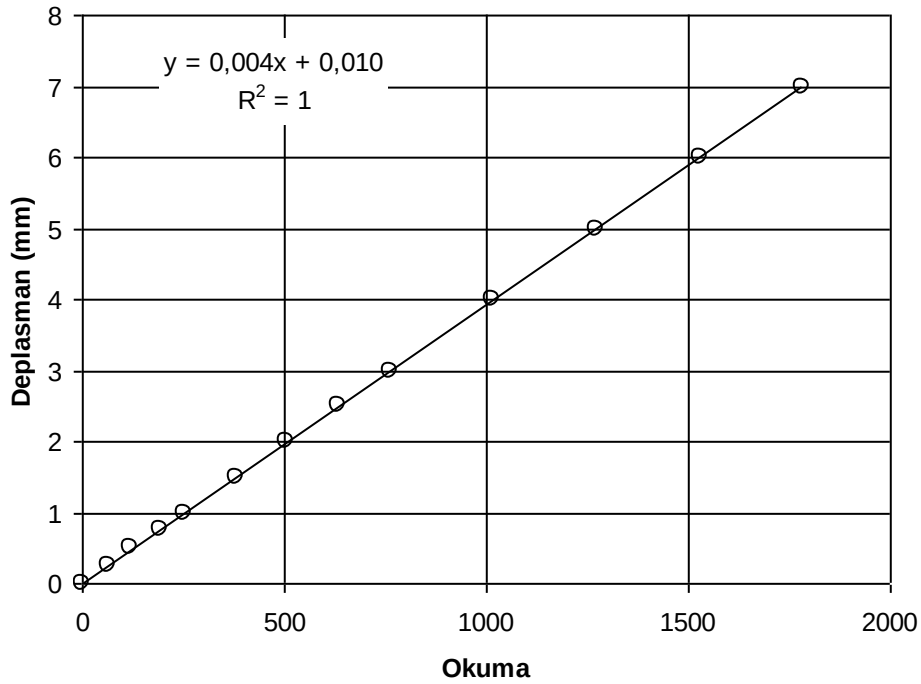
1 No'lu Deplasman Transduseri	
Deplasman (mm)	Okuma
0.00	0.00
0.25	62.85
0.50	129.85
0.75	190.35
1.00	253.85
1.50	377.20
2.00	500.50
2.50	620.85
3.00	750.85
4.00	1008.00
5.00	1266.50
6.00	1520.80
7.00	1772.50



Şekil 3.19. 1 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Eğrisi

Çizelge 3.7 2 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Değerleri

2 No'lu Deplasman Transduseri	
Deplasman (mm)	Okuma
0.00	0.00
0.25	66.50
0.50	118.50
0.75	191.00
1.00	252.50
1.50	379.00
2.00	505.50
2.50	633.50
3.00	761.00
4.00	1016.00
5.00	1272.30
6.00	1528.00
7.00	1783.00



Şekil 3.20. 2 No'lu Deplasman Transduseri Kalibrasyon Eğrisi

Kullanılan yükleme düzeneği farklı hızlarda yanal yük uygulayabilme özelliğine sahiptir. Varyatör adı verilen ve manuel olarak kontrol edilebilen bir anahtar yardımı ile motorun hızı ve buna bağlı olarak da uygulanacak yanal yüklemenin hızı ayarlanabilmektedir. Varyatörün hangi bölümde ne kadar büyüklükte bir yükleme hızı oluşturduğunu belirleyebilmek diğer bir ifade ile yükleme sisteminde hız kalibrasyonu yapabilmek için çok sayıda deneme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.8'de sunulmuştur. Yükleme düzeneğinde hız kalibrasyonu yapılırken yükün etkiyeceği noktada 5mm'lik yanal ötelenme için geçen süre dikkate alınarak yükleme hızı değerleri belirlenmiştir. Her bir hız kademesi için 6 deneme yapılmıştır.

Çizelge 3.8 Yükleme Düzenegi Hız Kalibrasyon Sonuçları

Yükleme Hızı No.	İlk Okuma (mm)	Son Okuma (mm)	Geçen Süre (dakika)	Toplam Yatay Hareket Miktarı (mm)	Ortalama Yükleme Hızı (mm/dakika)	
1	4.024	-0.264	25.013	4.288	0.171	Minimum
	4.798	0.337	25.028	4.461	0.178	
	4.162	-0.380	25.168	4.542	0.180	
	4.014	-0.652	25.060	4.666	0.186	Maksimum
	4.004	-0.484	25.053	4.488	0.179	
	3.909	-0.787	25.157	4.696	0.186	Maksimum
			Ortalama = 25.079	Ortalama = 4.524	Ortalama = 0.180	
2	4.306	-0.471	14.035	4.777	0.340	
	4.208	-0.690	14.034	4.898	0.349	
	4.004	-1.011	14.079	5.015	0.356	Maksimum
	4.333	-0.378	14.084	4.711	0.334	Minimum
	4.098	-0.686	14.091	4.784	0.339	
	4.029	-0.846	14.057	4.875	0.346	
			Ortalama = 14.063	Ortalama = 4.843	Ortalama = 0.344	
3	4.162	-0.771	10.060	4.933	0.490	Maksimum
	4.295	-0.529	10.133	4.824	0.476	
	4.189	-0.540	10.083	4.729	0.469	Minimum
	4.240	-0.783	10.318	5.023	0.486	
	3.997	-0.850	10.153	4.847	0.477	
	4.102	-0.815	10.075	4.917	0.488	
			Ortalama = 10.137	Ortalama = 4.878	Ortalama = 0.481	

Çizelge 3.8 (Devam)

Yükleme Hızı No.	İlk Okuma (mm)	Son Okuma (mm)	Geçen Süre (dakika)	Toplam Yatay Hareket Miktarı (mm)	Ortalama Yükseklik Hızı (mm/dakika)	
4	4.324	-0.503	7.042	4.827	0.685	
	4.354	-0.625	7.052	4.979	0.706	Maksimum
	4.307	-0.471	7.061	4.778	0.676	
	4.217	-0.536	7.090	4.753	0.670	Minimum
	4.636	-0.264	7.105	4.900	0.689	
	4.205	-0.703	7.052	4.908	0.695	
			Ortalama = 7.067	Ortalama = 4.853	Ortalama = 0.686	
5	3.829	-1.349	6.045	5.178	0.856	
	3.939	-1.212	6.119	5.151	0.841	
	3.856	-1.056	6.036	4.912	0.813	Minimum
	3.891	-1.263	6.049	5.154	0.852	
	3.884	-1.081	6.076	4.965	0.817	
	3.818	-1.380	6.042	5.198	0.860	Maksimum
			Ortalama = 6.061	Ortalama = 5.093	Ortalama = 0.839	
6	4.189	-0.662	5.046	4.851	0.961	Minimum
	4.250	-0.753	5.167	5.003	0.968	
	4.359	-0.623	5.070	4.982	0.982	
	4.348	-0.588	5.105	4.936	0.966	
	4.139	-0.802	5.066	4.941	0.975	
	4.217	-0.816	5.104	5.033	0.986	Maksimum
			Ortalama = 5.093	Ortalama = 4.958	Ortalama = 0.973	

Çizelge 3.8 (Devam)

Yükleme Hızı No.	İlk Okuma (mm)	Son Okuma (mm)	Geçen Süre (dakika)	Toplam Yatay Hareket Miktarı (mm)	Ortalama Yükseklik Hızı (mm/dakika)	
7	4.468	-0.268	4.123	4.736	1.148	Minimum
	4.154	-0.537	4.051	4.691	1.157	
	4.182	-0.594	4.024	4.776	1.186	
	4.314	-0.576	4.139	4.890	1.181	
	4.348	-0.523	4.041	4.871	1.205	
	4.431	-0.512	4.096	4.943	1.206	Maksimum
Ortalama = 4.079				Ortalama = 4.817	Ortalama = 1.181	
8	4.582	-0.482	3.299	5.064	1.535	
	4.307	-0.868	3.295	5.175	1.570	Maksimum
	4.203	-0.946	3.400	5.149	1.514	
	3.665	-1.336	3.362	5.001	1.487	
	4.536	-0.363	3.298	4.899	1.485	Minimum
	4.424	-0.750	3.355	5.174	1.542	
Ortalama = 3.334				Ortalama = 5.077	Ortalama = 1.522	
9	4.566	-0.408	2.530	4.974	1.966	
	4.239	-0.690	2.551	4.929	1.932	
	4.150	-1.059	2.542	5.209	2.049	Maksimum
	4.305	-0.508	2.555	4.813	1.884	Minimum
	4.099	-0.797	2.569	4.896	1.906	
	4.377	-0.443	2.542	4.820	1.896	
Ortalama = 2.548				Ortalama = 4.940	Ortalama = 1.938	

Çizelge 3.8 (Devam)

Yükleme Hızı No.	İlk Okuma (mm)	Son Okuma (mm)	Geçen Süre (dakika)	Toplam Yatay Hareket Miktarı (mm)	Ortalama Yüklem Hızı (mm/dakika)	
10	3.712	-1.295	1.675	5.007	2.989	Maksimum
	1.832	-3.178	1.731	5.010	2.894	Minimum
	2.687	-2.382	1.696	5.069	2.988	
	2.278	-2.670	1.697	4.948	2.915	
	2.068	-2.935	1.675	5.003	2.986	
	2.317	-2.671	1.683	4.988	2.963	
			Ortalama = 1.692	Ortalama = 5.004	Ortalama = 2.955	

3.3.2. Deneylerin Yapılışı

Kum zemin, hem gevşek hem de sıkı durumda, deney kasası içerisine 3cm'lik tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Deney kasasının iç yüzeyleri 3cm aralıklı yatay çizgiler ile bölünerek ölçeklendirilmiş böylelikle her bir tabaka için gerekli olan kum ağırlığı hesaplanıp tartılarak hazırlanmıştır.

Gevşek kum zemin durumunda, 3cm'lik tabaka için gerekli kum ağırlığı kumun sıkışmasının önlenmesi için mümkün olan en yakın mesafeden deney kasası içerisine boşaltılmış ve sonrasında mala yardımı ile kasa yüzeyi boyunca dağıtılmıştır. Uzunlukları kasa genişliği ve kasa uzunluğu kadar olan ince ahşap plakalar kullanılarak zemine baskı yapılmaksızın zemin yüzeyi düzeltilmiş ve kum zeminin tabaka boyunca homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Sıkı kum zemin durumunda ise yukarıda anlatılan işlemlere ilave olarak zemin tabakası titreşim cihazı ile kontrollü bir şekilde sıkıştırılmış ve konulan kum zeminin gerekli tabaka yüksekliği seviyesine gelmesi sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında hazırlık deneyleri aşamasında belirlenmiş olan miktarda enerji uygulanmıştır. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda yerleştirilen her bir tabakanın kalınlığı cam yüzeyler üzerinde bulunan ve tabaka sınırlarını belirleyen yatay çizgilere göre kontrol edilmiştir.

Kazık ucunun oturacağı zemin yüzeyi seviyesine ulaşıncaya kadar kum zemin kasa içerisine belirtilen yol izlenerek doldurulmuştur. Bu seviyeye gelindiğinde zemin yüzeyinin düzlüğü hem kasa uzun kenarı hem de kasa kısa kenarı doğrultusunda su terazisi kullanılarak kontrol edilmiştir. Daha sonra kazık sabitleyici aparat deney kasası profiline yerleştirilmiştir. Rijit kısa kazık ve çekme kolundan oluşan model temel, çekme kolu sabitleme aparatı üzerinde yer alan iki kulak arasına yerleşecek şekilde zemin yüzeyi üzerine konmuştur. Model temel sisteminin hem kasa uzun kenarı hem de kasa kısa kenarı doğrultusundaki dikliği su terazisi ile kontrol edildikten sonra kulaklara kaynaklanmış halde bulunan vidalar sıkılarak model kazığın hareketi önlenmiştir. Model kazığın zemin içerisine yerleştirilmesinin ardından kısa kazık üst kotu seviyesine kadar kum zeminin deney kasası içerisine konması işlemine devam edilmiştir. Kazığın yerleştirilmesinden sonra serilen kum

tabakalarında özellikle kazık çevresinde zeminin yerleştirilmesine azami özen gösterilmiş ve her bir tabakanın yerleştirilmesinin ardından kazığın dik konumda olup olmadığı su terazisi ile kontrol edilmiştir.

Kum zeminin deney kasası içerisine yerleştirilmesi işlemi tamamlandıktan sonra yük hücresi yükleme dişlisinin uç kısmına vidalanmak sureti ile takılmıştır. Daha sonra çelik halat bir ucu yük hücresine vidalanmak diğer ucu da çekme kolu üzerinde yer alan bilyalı kancaya takılmak sureti ile sisteme dahil edilmiştir. Bu işlemin ardından kazık sabitleyici çıkarılmış, yükleme dişlisi, yük hücresi, çelik halat ve bilyalı kancanın aynı hizada ve yatay doğrultuda oldukları doğrulanmış ve model kazığın dikliği kontrol edilmiştir. Son olarak deplasman transduserleri zemin yüzeyi üzerinden 26mm ve 86mm olacak şekilde çekme çubuğunun arka yüzeyine temas ettirilmiştir. Deplasman transduserlerinin zemin yüzeyine ve birbirlerine paralel konumda olup olmadıkları ve çekme kolu genişliğinin orta noktasından temas edip etmedikleri kontrol edilmiştir (Şekil 3.21).

Yük, yanal çekme kuvveti şeklinde zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte statik olarak çekme koluna uygulanmıştır. Yükleme, farklı hızlarda yükleme yapabilen ve redüktörlü elektrik motoru tarafından hareket ettirilen bir dişli sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yanal yükleme deneyleri, deplasman transduserlerinin ölçme kapasitesi (10mm) kadar devam ettirilmiştir.

Deneylerin sonunda elde edilen yük-deplasman verileri ADU cihazına aktarılmış ve DIALOG programı yardımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Her deney sonunda mevcut veriler kullanılarak kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri elde edilmiştir.

Şevlendirilmiş gevşek kum zeminde yapılan deneylerde, şevin başlayacağı seviyeye kadar kum zemin deney kasası içerisine tabakalar halinde yerleştirilmiş ve şev oluşturma düzeneği şev topuğu başlangıç noktasına konduktan sonra U kesitli metal profiller istenilen açıda deney kasasının üst kısmına sabitlenmiştir. Daha sonra, şevli kısma ait ilk tabakayı oluşturmak için 60mm genişliğindeki ahşap plaka metal profiller arasından geçirilerek kum zemin deney kasası içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlem, istenilen şev yüksekliğine ulaşıncaya kadar diğer tabakalar için de tekrarlanmıştır.



(a) Deney Kumunun Kasa İçerisine Konulması



(b) Deney Kumunun Serilmesi



(c) Deney Kumunun Sıkıştırılması



(d) Zemin Yüzeyinin Düzlüğü'nün Kontrol Edilmesi



(e) Kazık Sabitleyicinin Yerleştirilmesi



(f) Kazığın Yerleştirilmesi

Şekil 3.21. Deneyin Hazırlanması



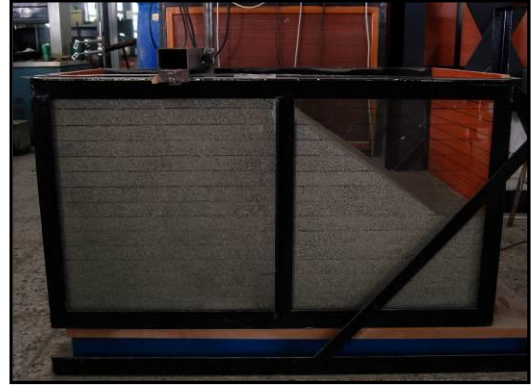
(g) Kazık Yerleştirildikten Sonra
Zeminin Yerleştirilmesi



(h) Yük Hücresi ve Çelik Halatın
Takılması



(i) Deplasman Transduserlerinin
Yerleştirilmesi

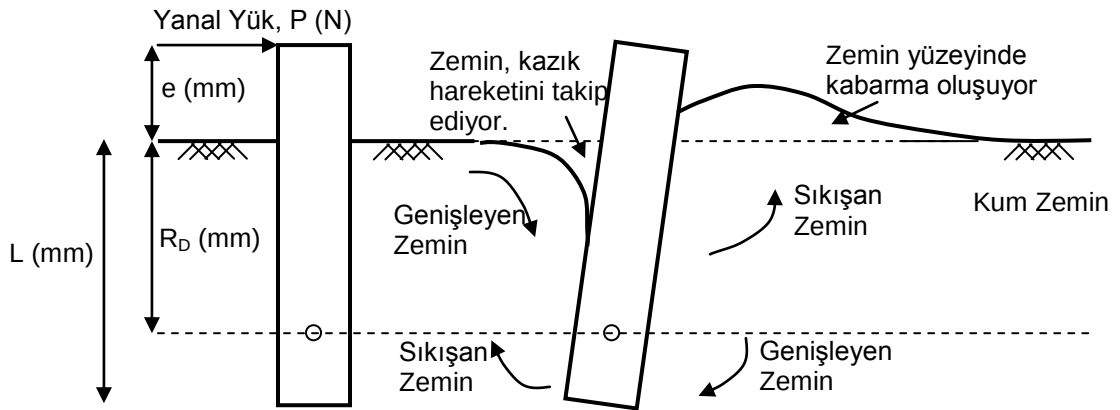


(j) Şevli Yüzeyin Görünümü

Şekil 3.21. (Devam)

4. DENEY SONUÇLARI

Rijit kısa bir kazık zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte etkiyen bir yanal yüke maruz kaldığında, kazığın etkiyen yanal yük ve moment etkisi ile gömülü uzunluğu boyunca belirli bir derinlikte yer alan bir nokta etrafında dönerek kendisini çevreleyen zemine yaslandığı kabul edilir. Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi dönme noktasının üst tarafında kazık ön yüzüne ve dönme noktasının alt tarafında da kazık arka yüzüne bitişik konumdaki zemin kazığın hareketi ile sıkışır. Kazığın uygulanan yanal yük etkisindeki hareketinden dolayı dönme noktasının üst tarafında kazık arka yüzüne ve dönme noktasının alt tarafında da kazık ön yüzüne bitişik konumdaki zeminde ise, genişleme davranışı görülür. Zeminin sıkışma ve genişleme hareketi zeminde pasif ve aktif durum olarak adlandırılan sınır basınç değerlerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Yanal yüke maruz rijit kısa bir kazıkta göçme durumu; kazığın gömülü uzunluğu boyunca zemin tarafından kazığa etkitilen yanal zemin basınçlarının değerinin zeminin nihai yanal direncine ya da başka bir ifade ile zeminin pasif basınç değerine ulaşması ile gözlenir.



Şekil 4.1. Yanal Yüke Maruz Rijit Kısa Kazığın Davranışı (Broms, 1964)

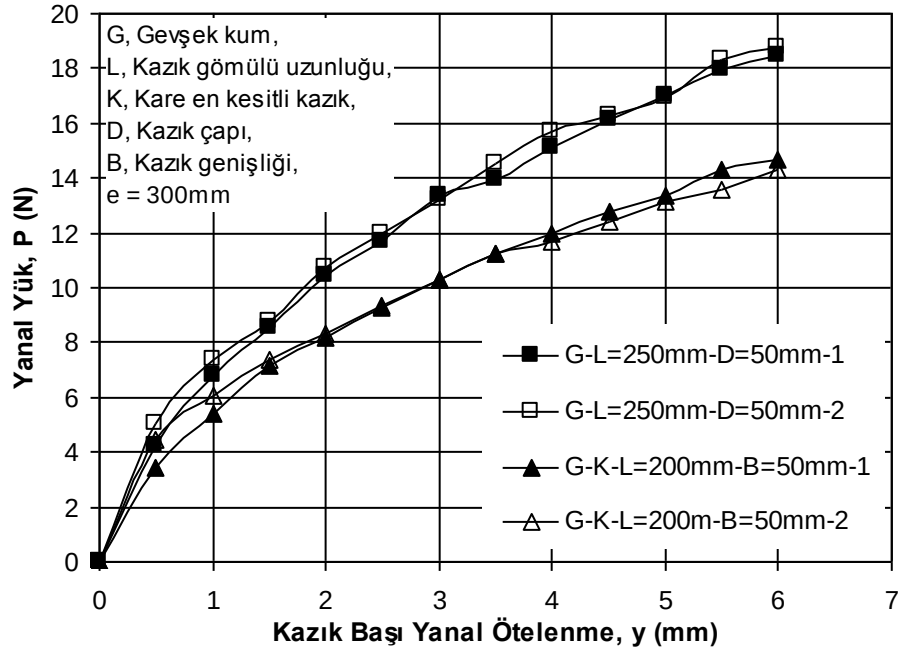
Model kısa kazıkların yanal yük ve moment etkisi altındaki davranışları çok sayıda model deney çalışması yapılarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında; yanal yükleme hızının, kazığın imal edildiği malzemenin, kazık gömülü

uzunluğunun, kazık çapının, kazık en kesit geometrisinin ve zeminin relatif sıkılığının kazığın davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bununla birlikte; üstte gevşek altta sıkı zemin tabakasının yer aldığı tabakalı zemin durumu ve zemin yüzeyinin eğimli olduğu şevli zemin durumu gibi farklı zemin koşullarında yapılan model deneyler ile de model zemin koşulunun yanal yüke maruz kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitelerine etkisi araştırılmıştır.

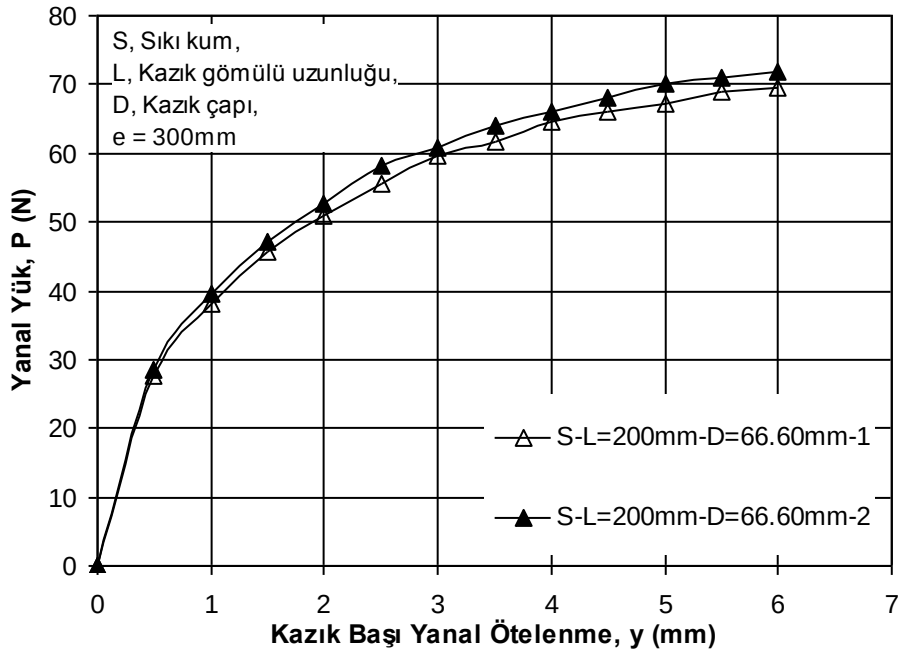
Deneyisel çalışmalar öncesinde 18 hazırlık deneyi yapılarak deney düzeneği, yükleme sistemi ve ölçüm sisteminde karşılaşılabilecek sorunlar ve bunların nasıl çözümlenmesi gerektiği konusunda bilgiler edinilmiştir. Hazırlık deneyleri aşamasında; model zeminin deney kasasına nasıl yerleştirileceği, model kazığın zemin içerisinde dik konumda sabit bir şekilde nasıl tutulacağı konusunda bir yöntem oluşturulmuştur. Yükleme sistemi ile ölçüm sisteminin birlikte sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi ve bunların bilgisayar aracılığı ile kontrol edilerek verilerin kaydedilmesi için yapılması gerekenler belirlenmiştir.

Küçük ölçekli model deney çalışmaları sırasında model zeminin birim hacim ağırlık ve relatif sıkılık değerleri arasında sürekli bir uyumun olması, yapılan her deneyde model zeminin homojenliğinin aynı olmasına özen gösterilmesi, model deney çalışmalarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Şekil 4.2 ve 4.3’de görüldüğü gibi bazı deney gruplarında aynı deney koşullarında iki deney yapılarak elde edilen yanal yük-yanal ötelenme eğrileri karşılaştırılmış ve model zeminin tekrarlanabilir bir şekilde hazırlanabildiği görülmüştür.

Deneyisel çalışmalar boyunca 60 yanal yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde; gerçekleştirilmiş olan 60 deneyden 44’üne ait sonuçlar yorumlanmıştır. Geriye kalan deneylerin bir kısmı sunulan deney sonuçlarına çok yakın sonuçlar verdiğinden diğer kısmı da deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında hatalar oluştuğu için kullanılmamıştır. Sonuçları sunulan deneyisel çalışmalar Çizelge 4.1’de tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Gevşek Kum Zemindeki Rijit Kısa Kazıklar için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri



Şekil 4.3. Sıkı Kum Zemindeki Rijit Kısa Kazıklar için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri

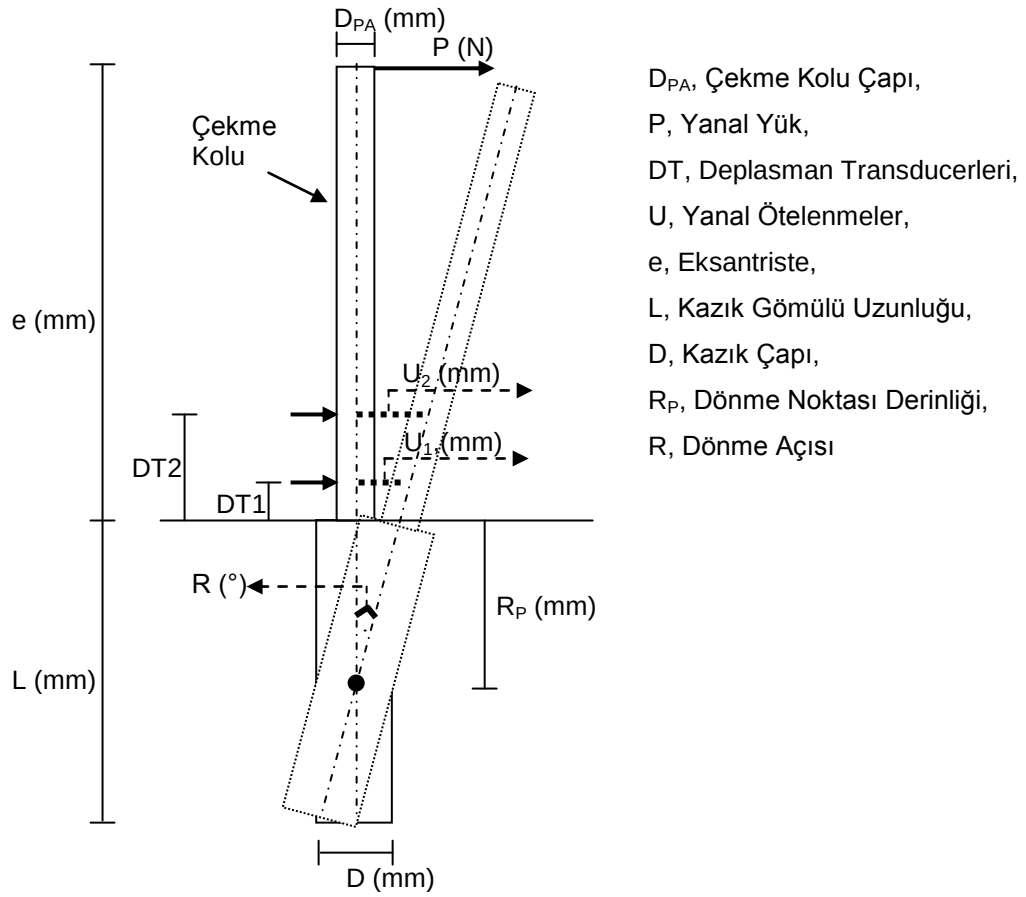
Çizelge 4.1 Gerçekleştirilen Model Deney Çalışmaları

Parametre	Zeminin Sıklığı		Kazık Boyu, L (mm)	Kazık Çapı, D (mm)	L/D	Eksantriste, e (mm)	Zemin Profili	Zemin Yüzeyi
	15.02 kN/m ³	17.06 kN/m ³						
Yanal Yükleme Hızı (mm/dak.)	0.18	0.19	200	50	4	300	Uniform	Düz
	0.45	0.48	200	50	4	300	Uniform	Düz
	0.95	0.98	200	50	4	300	Uniform	Düz
	1.83	1.89	200	50	4	300	Uniform	Düz
	2.99	2.99	200	50	4	300	Uniform	Düz
Kazığın İmal Edildiği Malzeme	Çelik	Çelik	200	50	4	300	Uniform	Düz
	Alüminyum	Alüminyum	200	50	4	300	Uniform	Düz
	Derlin	Derlin	200	50	4	300	Uniform	Düz
Kazık Enkesit Geometrisi	Daire, D	Daire, D	200	D=50mm	4	300	Uniform	Düz
	Kare, B	Kare, B	200	B=44.30mm	L/B=4.51	300	Uniform	Düz
	Kare, B	Kare, B	200	B=50mm	L/B=4	300	Uniform	Düz
Kazık Boyu	L150	L150	150	50	3	300	Uniform	Düz
	L200	L200	200	50	4	300	Uniform	Düz
	L250	L250	250	50	5	300	Uniform	Düz
Kazık Çapı	D40	D40	200	66.60	3	300	Uniform	Düz
	D50	D50	200	50	4	300	Uniform	Düz
	D66.60	D66.60	200	40	5	300	Uniform	Düz
Tabakalı Zemin Profili	H1=0-H2=20		200	50	4	300	Tabakalı	Düz
	H1=5-H2=15		200	50	4	300	Tabakalı	Düz
	H1=10-H2=10		200	50	4	300	Tabakalı	Düz
	H1=15-H2=5		200	50	4	300	Tabakalı	Düz
	H1=20-H2=0		200	50	4	300	Tabakalı	Düz
Şevli Zemin Yüzeyi	$\beta=0^\circ$	-	200	50	4	300	Uniform	Şevli
	$\beta=30^\circ-0.50D$	-	200	50	4	300	Uniform	Şevli
	$\beta=30^\circ-1.00D$	-	200	50	4	300	Uniform	Şevli
	$\beta=30^\circ-2.00D$	-	200	50	4	300	Uniform	Şevli
	$\beta=30^\circ-3.00D$	-	200	50	4	300	Uniform	Şevli

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda; yanal yük, kazık başına vidalanmış 25mm çapındaki bir çekme kolu kullanılarak zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte uygulanmıştır. Uygulanan yanal yük etkisinde kazık başında meydana gelen yanal ötelenmeler ve dönmeler, zemin yüzeyi üzerinde 26mm ve 86mm yükseklikte yer alan ve uygulanan yanal yük doğrultusuna paralel konumda bulunan deplasman transduserleri tarafından ölçülmüş veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Deneyler, zemin yüzeyi üzerinden 86mm yükseklikte bulunan deplasman transduserinin hareket miktarı tamamlandığında sonlandırılmıştır. Hesaplamalar; kısa kazığın yanal yük etkisinde bir bütün olarak döndüğü kabulüyle üçgen benzerliği prensibinden yararlanılarak yapılmıştır. Dönme noktasının derinliği, kazığın yanal yük etkisi ile dönmüş durumdaki eksenini ile yanal yük uygulanmadan önceki durumdaki ekseninin kesişimi kullanılarak hesaplanmıştır. Yanal yüklenmiş rijit kısa kazığın zemin yüzeyi seviyesindeki moment taşıma kapasitesi değerleri zemin yüzeyi üzerinden e yüksekliğinde etkiyen yanal yük değerinin e yüksekliği ile çarpılması sonucu bulunmuştur. Deneylerin ardından, deplasman transduserleri ve yük hücresi aracılığı ile veri toplayıcısına aktarılmış ölçülmüş veriler kullanılarak her bir yanal yükleme deneyi için dönme noktasının zemin yüzeyinden derinliği R_D (mm), kazık başındaki dönme açısı $R(^{\circ})$, yatay yükün uygulandığı yükseklikteki yanal ötelenme miktarı U_e (mm), deney süresi t (dak.), yatay yük P (N) ve moment M (Ncm) değerleri hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalar sırasında ölçülen veriler kullanılarak her bir deneye ait kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi elde edilmiştir. Bununla birlikte; kazık başında 1° ve 2° 'lik dönme açılarına karşılık gelen yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri ile kazık başında kazık çapının %10'u kadar bir yanal ötelenmeye neden olan yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanarak tablolar halinde sunulmuştur.

Model deney sisteminin geometrisi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Model Deney Sistemi Geometrisi

4.1. Yükleme Hızı

Yanal yüke maruz rijit kazıkların davranışlarını araştırmaya yönelik arazi ve laboratuvar yükleme deneyleri, genellikle, yatay yükün sabit bir hızda uygulanması yolu ile gerçekleştirilmektedir. Küçük ölçekli laboratuvar model deneylerinde yaygın olarak deplasman kontrollü yük uygulaması yapılmaktadır. Literatürdeki mevcut model deney çalışmaları incelendiğinde yatay yüklemenin, çoğunlukla, 0.5mm/dak. ile 1mm/dak. aralığındaki hız değerlerinde uygulandığı görülmüştür.

Rijit kısa kazıklar tarafından desteklenen bir yapı, özellikle, kasırga ve deprem gibi doğal afetlerde kısa süreli etkili olan büyük değerdeki yanal yüklere maruz kalabilirler. Dolayısı ile böyle bir doğal afet durumunda rijit kısa kazıkların

yanal yük ve moment taşıma kapasiteleri laboratuvar yükleme deneylerinde gözlenen davranışlarından farklı olabilir.

Yükleme hızının kum zeminin kayma mukavemeti üzerindeki etkisi, genellikle, farklı kesme hızlarında gerçekleştirilmiş kesme kutusu deneyleri ile araştırılmıştır. Yapılan kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlar; drenajlı durumda, zeminin kayma mukavemetinin farklı kesme hızlarından önemli derecede etkilenmediğini ve sabit kabul edilebilecek bir kayma mukavemeti değerine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık drenajsız durumda, uygulanan kesme hızının kum zeminin kayma mukavemetini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Al-Mhaidib, 2006).

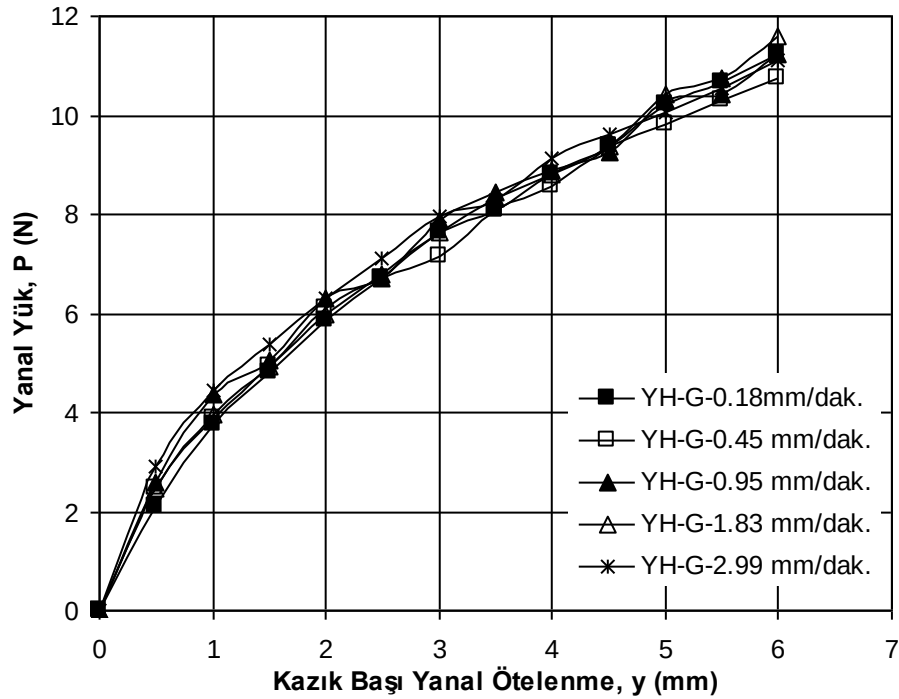
Literatürdeki mevcut model deney çalışmaları incelendiğinde, yükleme hızının kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitesine etkisini araştırmaya yönelik yapılmış küçük ölçekli bir model deney çalışmasına rastlanılmamıştır.

Yükleme hızının kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışı üzerindeki etkileri farklı yanal yükleme hızlarında gerçekleştirilmiş bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır. Deneyler hem gevşek hem de sıkı durumda hazırlanmış kum zeminde gerçekleştirilmiştir.

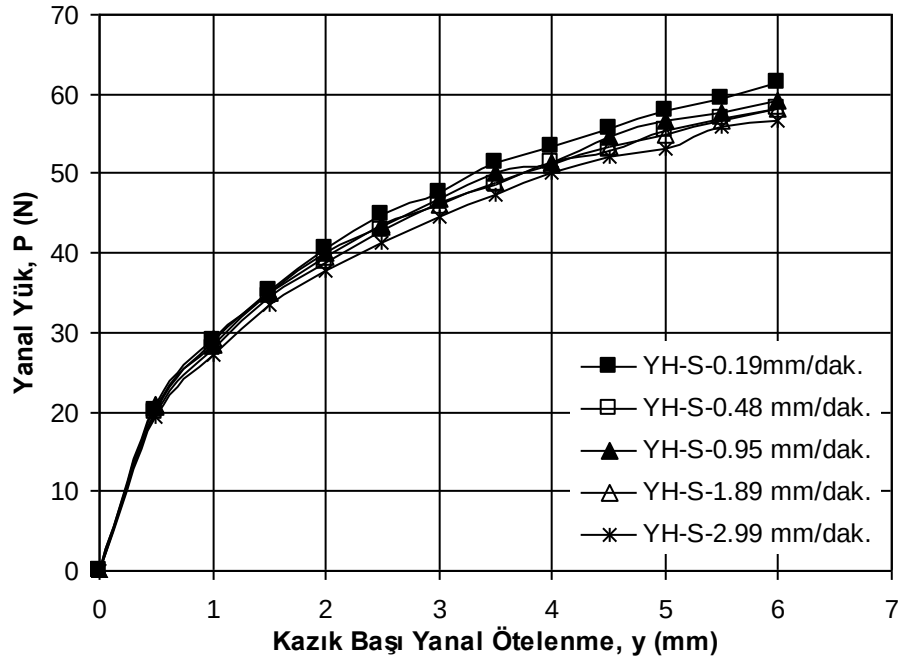
Kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıklar gevşek ve sıkı durumda hazırlanmış kum zemin içerisinde beş farklı yatay yükleme hızı (YYH) kullanılarak deneye tabii tutulmuşlardır. Uygulanan yatay yükleme hızları gevşek kum için sırası ile 0.18mm/dak., 0.45 mm/dak., 0.95 mm/dak., 1.83 mm/dak. ve 2.99 mm/dak. dır. Sıkı kum zeminde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan yatay yükleme hızları ise sırası ile, 0.19mm/dak., 0.48 mm/dak., 0.98 mm/dak., 1.89 mm/dak. ve 2.99 mm/dak. dır. Deneylerde; D=50mm çapında ve L=200mm uzunluğunda dolu kesitli model çelik kazık kullanılmıştır. Deneyler sırasında ölçülmüş veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar, kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde sunulmuştur. Şekil 4.5 ve 4.6'da görülen yanal ötelenme-yanal yük ilişkileri incelendiğinde, gevşek kum zemin durumunda, tam non-lineer bir davranış gözlenmezken sıkı kum zemin durumunda yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri non-lineer bir davranış

sergilemektedir. Özellikle gevşek kum zeminde olmak üzere hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda belirgin bir göçme noktası gözlenmemiştir. Göçme durumu yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinden belirgin bir şekilde tanımlanamadığı için kazık başındaki dönme açısının 1° , 2° ve R değerleri için ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10'u olduğu durum ($U_D=\%10$) için yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç değerler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

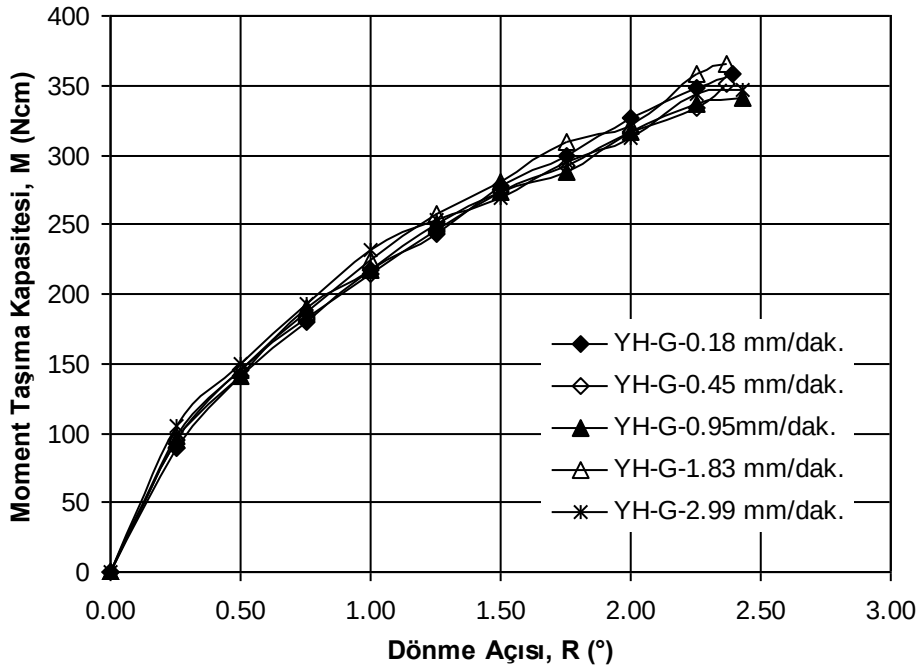
Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 incelendiğinde, gevşek kum zeminde kazık başında yaklaşık olarak 0.50° 'lık bir dönme açısı değerine kadar sıkı kumda ise 0.25° 'lık bir dönme açısı değerine kadar yük-deplasman ilişkilerinin doğrusal olduğu, daha sonra eğriye dönüştüğü görülmektedir.



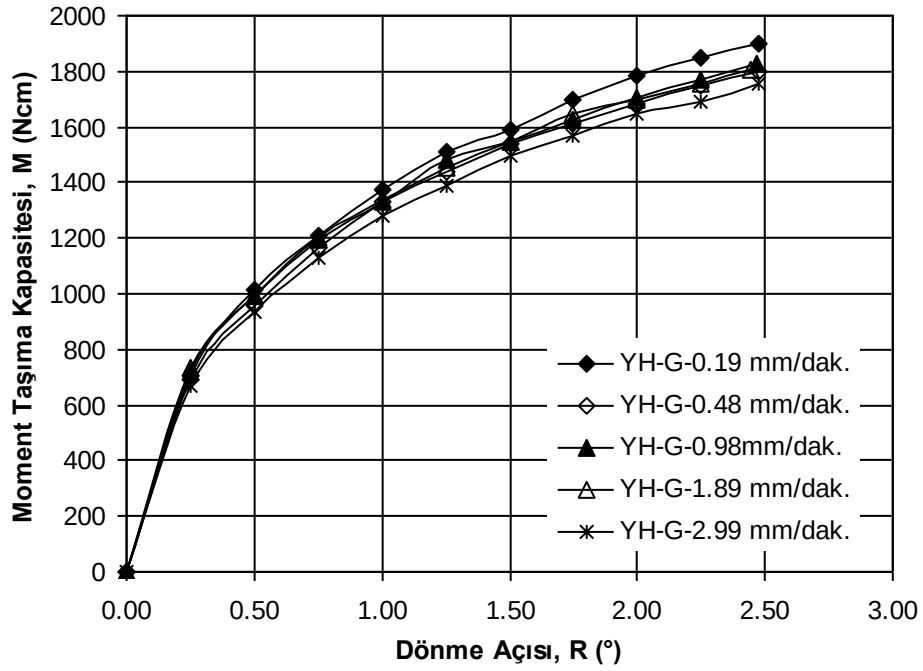
Şekil 4.5. Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.6. Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.7. Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi



Şekil 4.8. Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Kazık Başı Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi

Çizelge 4.2 Gevşek Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Sayısal Deney Sonuçları

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.02 \text{ kN/m}^3$ - $D=50\text{mm}$ - $L=200\text{mm}$						
YYH (mm/dak.)		0.18	0.45	0.95	1.83	2.99
R_D (mm)		160.459	162.716	157.042	163.560	156.638
R (°)		2.395	2.373	2.429	2.367	2.432
t (dakika)		109.60	42.80	20.37	10.45	6.48
Yanal Yük (N)	1°	7.255	7.161	7.255	7.489	7.724
	2°	10.907	10.532	10.532	10.672	10.393
	R	11.936	11.701	11.375	12.170	11.562
	$U_{0.10D}$	10.205	9.830	10.299	10.439	10.064
Moment (Ncm)	1°	217.650	214.830	217.650	224.670	231.720
	2°	327.210	315.960	315.960	320.160	311.790
	R	358.080	351.030	341.250	365.100	346.860
	$U_{0.10D}$	306.150	294.900	308.970	313.170	301.920

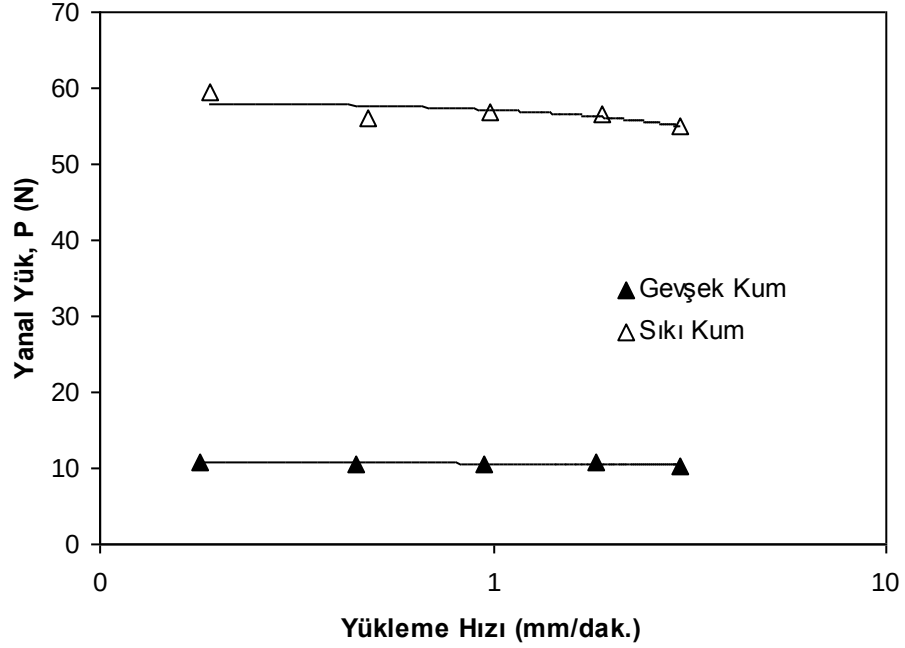
Çizelge 4.3 Sıkı Kum Zeminde Farklı Yanal Yükleme Hızları için Sayısal Deney Sonuçları

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - $D=50\text{mm}$ - $L=200\text{mm}$						
YYH (mm/dak.)		0.19	0.48	0.98	1.89	2.99
R_D (mm)		152.335	152.703	153.349	155.807	152.311
R (°)		2.478	2.473	2.465	2.442	2.477
t (dakika)		104.13	40.77	19.83	10.27	6.55
Yanal Yük (N)	1°	45.780	44.377	44.470	44.704	42.597
	2°	59.450	56.172	56.874	56.641	55.002
	R	63.194	60.058	60.995	60.292	58.420
	$U_{0.10D}$	57.811	55.471	56.641	54.909	53.130
Moment (Ncm)	1°	1373.400	1331.310	1334.100	1341.120	1277.910
	2°	1783.500	1685.160	1706.220	1699.230	1650.060
	R	1895.820	1801.740	1829.850	1808.760	1752.600
	$U_{0.10D}$	1734.330	1664.130	1699.230	1647.270	1593.900

Sonuçlar incelendiğinde; yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme hızı aralığında, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, yükleme hızının yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük ve moment taşıma kapasitesi üzerinde önemli sayılabilecek bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kazık başındaki 2°'lik dönme açısı için hem gevşek hem de sıkı kumda elde edilmiş yükleme hızı-yanal yük ilişkileri yarı logaritmik eksen takımında Şekil 4.9'da verilmiştir.

Farklı yükleme hızlarında elde edilmiş en yüksek yanal yük değeri ile en düşük yanal yük değeri arasında gevşek kum zemin durumunda ortalama %7, sıkı kum zemin durumunda da ortalama %8'lik bir fark olduğu gözlenmiştir. Sıkı kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesi gevşek kum zemin içerisinde yer alan kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak 5 katı kadardır. Rölatif sıklığın yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitesi üzerinde önemli derecede bir etkisinin olduğu bu sonuçtan da anlaşılmaktadır. Dönme noktası derinliği gevşek kumda yapılan deneylerde ortalama olarak zemin yüzeyinden itibaren kazık gömülü uzunluğunun %80'i derinlikte elde edilmiş olup, zeminin sıklığının artması ile birlikte, dönme noktası derinliğinin de zemin yüzeyine doğru hareketlendiği görülmüştür. Sıkı kum zeminde

yapılan deneylerde dönme noktası derinliği ortalama olarak kazık gömülü uzunluğunun %77'si derinlikte yer almıştır.



Şekil 4.9. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Yanal Yükleme Hızı-Yanal Yük İlişkisi

Yükleme hızının etkisinin araştırıldığı bu deneylerin ardından gerçekleştirilecek olan diğer yanal yükleme deneylerinde kullanılacak olan yükleme hızı, hem ortalama yükleme hızı olması hem de literatürdeki model deney çalışmalarında kullanılmış olan yükleme hızı değerleri ile uyumlu olması amacı ile 1.00mm/dak. olarak seçilmiştir.

4.2. Kazık Geometrisi

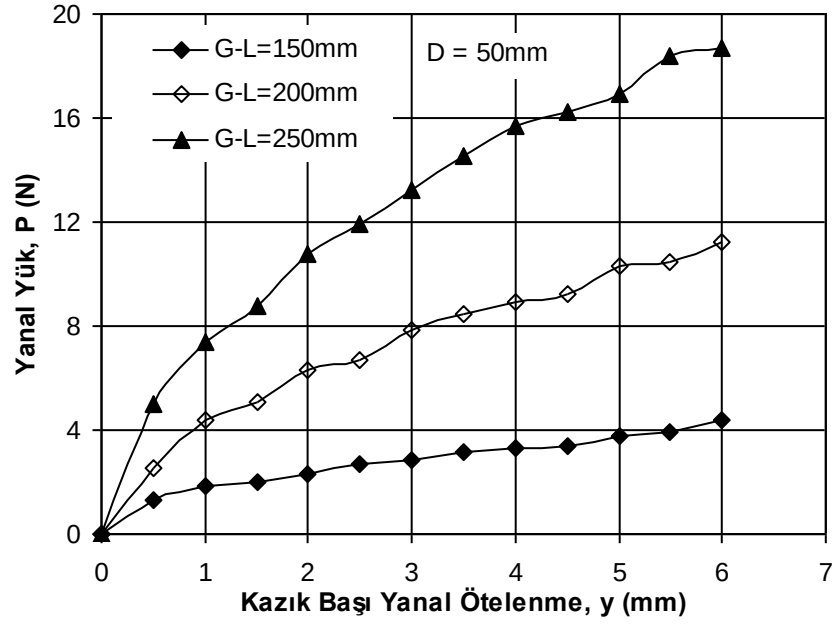
Kazık geometrisi başlığı altında; kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapındaki değişimlerin kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışına olan etkilerinin araştırıldığı model deney çalışmalarına ait sonuçlar sunulmaktadır. Kazık gömülü uzunluğunun kazık çapına oranı L/D oranı olarak tanımlanmaktadır. L/D oranı, hem kazık gömülü uzunluğunun hem de kazık çapının

değişiminden etkilenmektedir. L/D oranı; kazık çapının sabit olduğu durumda kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak, kazık gömülü uzunluğunun sabit olduğu durumda ise, kazık çapına bağlı olarak değişmektedir. Kazık çapının sabit tutularak kazık gömülü uzunluğunun değiştirildiği durumda $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=150, 200$ ve 250mm uzunluğunda dolu kesitli çelik model kazıklar üzerinde L/D oranının 3, 4 ve 5 değerleri için gevşek ve sıkı durumda hazırlanmış model zemin içerisinde yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde; kazık gömülü uzunluğunun sabit tutularak kazık çapının değiştirildiği durumda $L=200\text{mm}$ gömülü uzunluğunda ve $D=40, 50$ ve 66.60mm çaplarında dolu kesitli çelik model kazıklar kullanılarak L/D oranının 3, 4 ve 5 değerleri için gevşek ve sıkı kum zeminde yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu model deney çalışmalarında, yanal yük etkisine maruz rijit kısa kazığın davranışı üzerinde kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapından hangisinin daha önemli bir etkiye sahip olduğu irdelenmiştir.

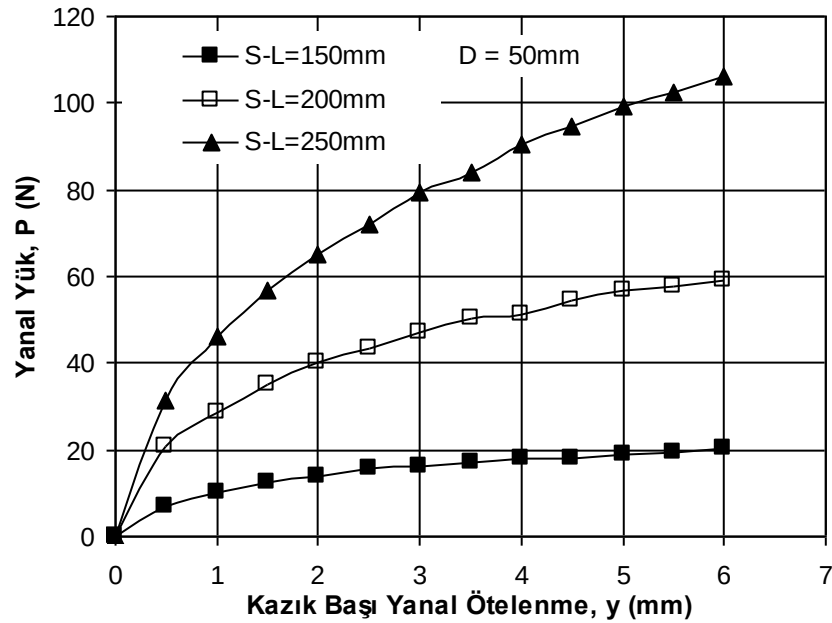
4.2.1. Kazık Gömülü Uzunluğu

Kazığın gömülü uzunluğu sadece kazığın davranış şeklini (rijit ya da flexible) değil, aynı zamanda kazığın yanal yük taşıma kapasitesini de etkilemektedir. Gerilme bağımlı mukavemet özelliğine sahip kum zeminlerin elastisite modülünün yüzeye yakın sığ derinliklerde oldukça küçük bir değere sahip olduğu ve derinlikle birlikte yaklaşık doğrusal olarak arttığı kabul edilmektedir. Kazık gömülü uzunluğunun artması ile birlikte kazık uzunluğu boyunca kazığı çevreleyen zemin daha rijit bir davranış sergileyecek ve kazığın yanal yöndeki hareketine karşı daha büyük bir direnç gösterecektir (Sawwaf, 2006). Diğer bir ifade ile, kazığın etkileşim göstereceği ve sıkıştırmaya çalışacağı zemin kütlelerinin büyümesi kazığın yanal yük taşıma kapasitesini de artıracaktır. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde farklı L/D oranları için gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen sonuçlar kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13’de sunulmuştur. Şekil 4.10 ve 4.11 incelendiğinde, hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin non-lineer bir davranış gösterdiği, bununla birlikte; sıkı kum zemin

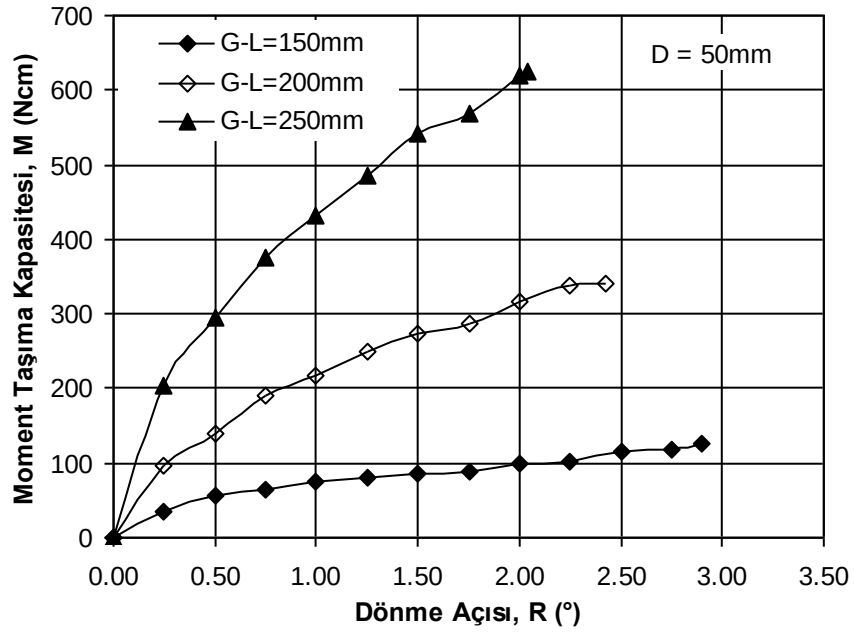
durumunda yanıl yük-yanıl ötelenme eğrilerinin daha dik olması nedeni ile bu davranışın daha belirgin olduğu görölmektedir.



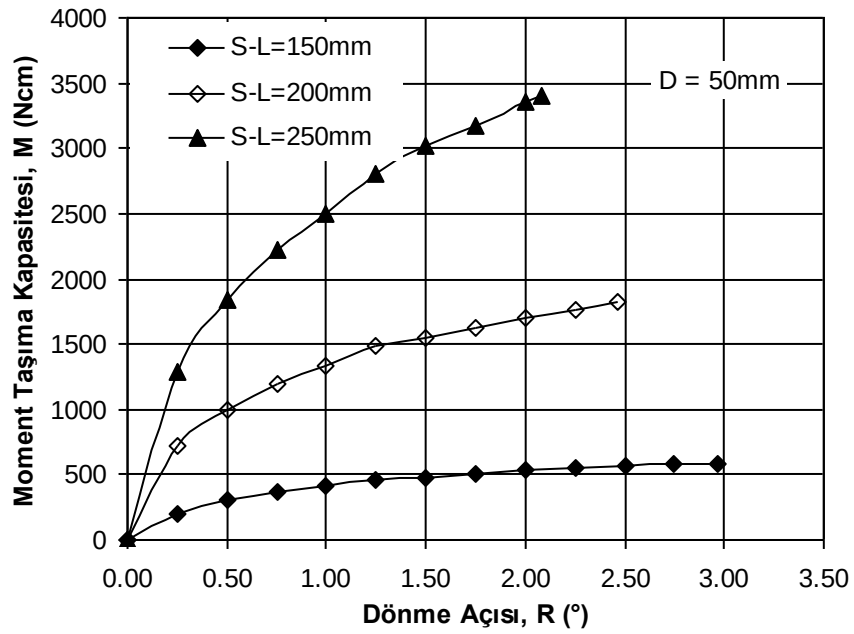
Şekil 4.10. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanıl Yük-Yanıl Ötelenme İlişkisi (L, Değişken)



Şekil 4.11. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanıl Yük-Yanıl Ötelenme İlişkisi (L, Değişken)



Şekil 4.12. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (L , Değişken)



Şekil 4.13. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (L , Değişken)

Kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkileri birbirine oldukça benzerdir. Çünkü; kazık başı dönme açıları, kazık yanal ötelenme değerleri kullanılarak, moment taşıma kapasitesi değerleri de yanal yük değerinin eksantrisite, e (mm), ile çarpılması sonucu bulunmaktadır.

Özellikle gevşek kum zeminde olmak üzere elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinde göçme noktası belirgin bir şekilde tanımlanamamaktadır. Bu yüzden; kazık başındaki dönme açısının 1° , 2° ve R değerlerinde ve kazık başındaki yanal ötelenme miktarının kazık çapının %10'una eşit olduğu yanal ötelenme değerinde yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4 ve 4.5'de sunulmuştur.

Çizelge 4.4 Farklı L/D Oranları için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (L, Değişken)

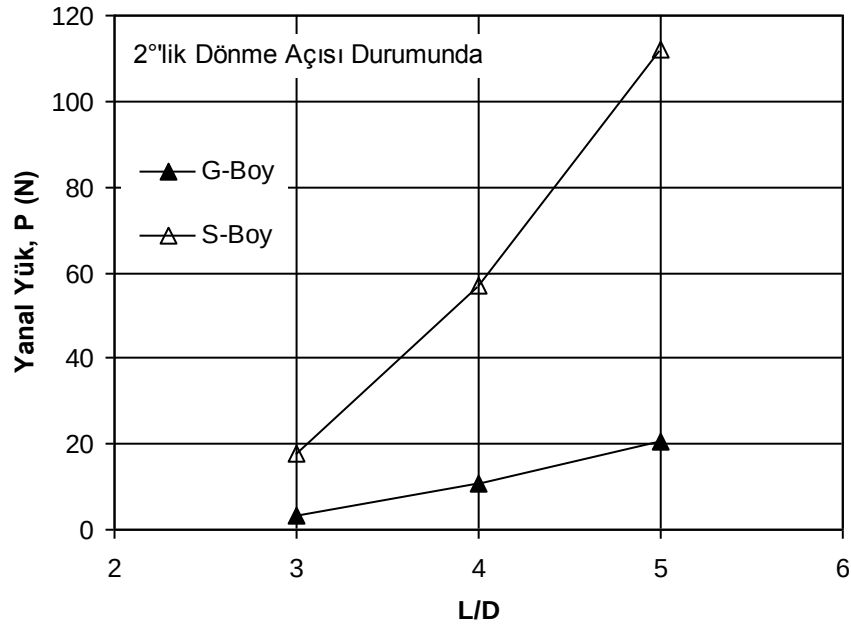
Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.02 \text{ kN/m}^3$				
D (mm)		50	50	50
L (mm)		150	200	250
L/D		3	4	5
R_D (mm)		117.629	157.042	203.546
R ($^\circ$)		2.900	2.429	2.039
Yanal Yük (N)	1°	2.481	7.255	14.371
	2°	3.277	10.532	20.690
	R	4.212	11.375	20.831
	$U_{0.10D}$	3.744	10.299	16.946
Moment (Ncm)	1°	74.430	217.650	431.130
	2°	98.310	315.960	620.700
	R	126.360	341.250	624.930
	$U_{0.10D}$	112.320	308.970	508.380

Çizelge 4.5 Farklı L/D Oranları için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (L, Değişken)

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$				
D (mm)		50	50	50
L (mm)		150	200	250
L/D		3	4	5
R_D (mm)		112.586	153.349	198.007
R (°)		2.971	2.465	2.078
Yanal Yük (N)	1°	14.043	44.470	83.462
	2°	17.882	56.874	111.877
	R	19.660	60.995	113.188
	$U_{0.10D}$	18.818	56.641	99.145
Moment (Ncm)	1°	421.290	1334.100	2503.860
	2°	536.460	1706.220	3356.310
	R	589.800	1829.850	3395.640
	$U_{0.10D}$	564.540	1699.230	2974.350

L/D oranı kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak büyüdüğünde kazığın ağırlığı da L/D değerleri arasındaki artım oranına eşit bir oranla artmaktadır. Bu durum; devirme momenti etkisine maruz rijit kısa kazıkların stabilitesini artırıcı yönde bir etki yapmaktadır. Kazık gömülü uzunluğunun artması hem gevşek hem de sıkı kum zeminde yanal yük taşıma kapasitelerinin aynı oranlarda artmasına neden olmuştur. Bu yüzden; gevşek ve sıkı kum zemindeki L/D-yanal yük ilişkileri Şekil 4.14'den de görüleceği gibi, birbirine paralel bir davranış sergilemektedir. L/D=3 ile L/D=4 arasında yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinde %218 değerinde bir artım gözlenirken L/D=4 ile L/D=5 arasında bu artım oranı %96 kadardır. Bu durumda L/D oranı büyüdüğünde artım oranı azalmaktadır.

Bütün L/D oranları için sıkı kum zemin durumunda gevşek kum zemindeki yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin 5.40 katı büyüklüğünde yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda L/D oranlarının artması ile birlikte R(°) değerleri de azalmıştır. Bu durum; aynı yanal ötelenme değerleri için daha uzun kazıkların daha küçük dönme açıları ile aynı yanal yük taşıma kapasitesi değerlerine ulaşacağı anlamına gelmektedir.



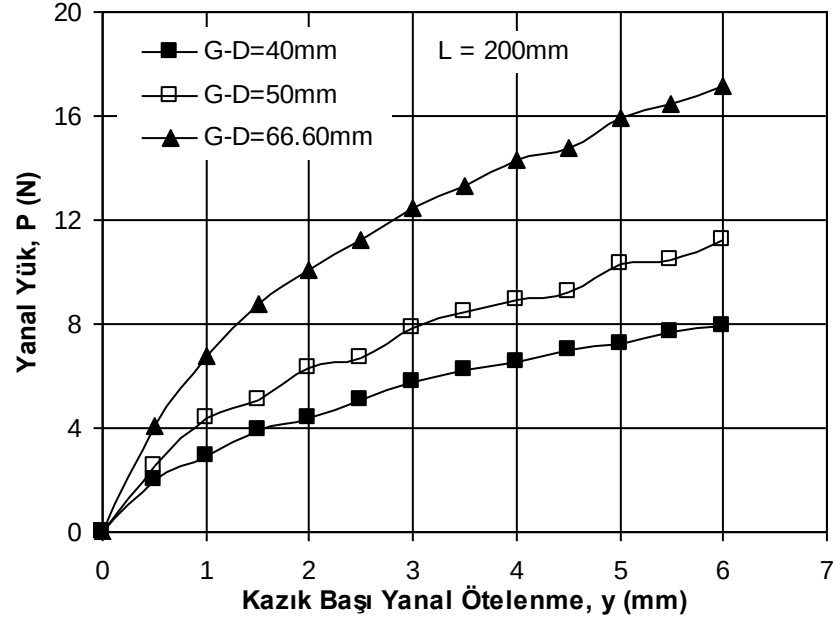
Şekil 4.14. Kazık Başındaki 2°'lik Dönme Açısı için L/D-Yanal Yük ilişkileri

4.2.2. Kazık Çapı

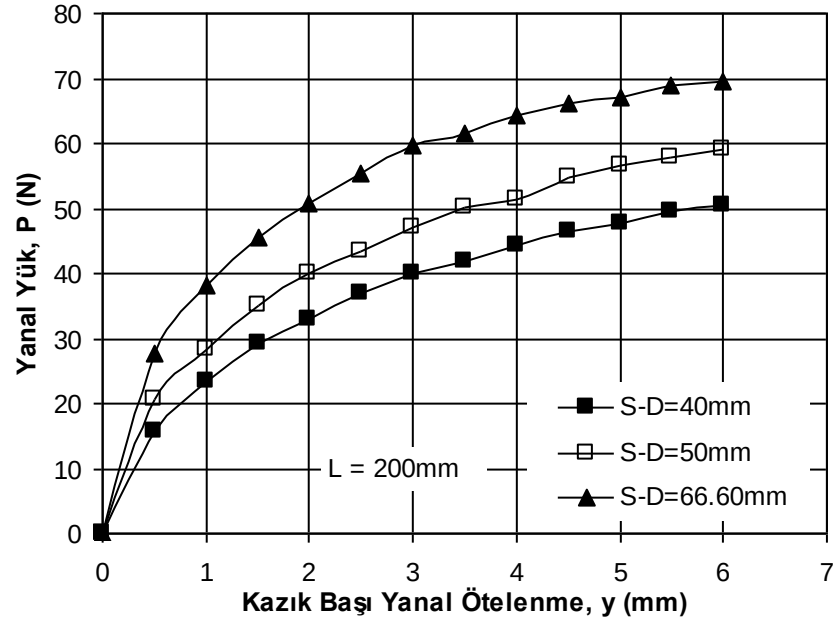
Kazığın yanal yöndeki hareketine karşılık zeminin göstermiş olduğu direnç iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi; kazığın ön yüzüne etkiyen normal reaksiyon direnci ikincisi ise, kenar yüzeylerde etkili olan kayma direncidir. L/D oranının kazık çapına bağlı olarak artması ile kazığın zemin ile temas eden çevre yüzey alanı azalacağından kazığın ön yüzüne etkiyecek normal reaksiyon direnci de azalacaktır. Ayrıca; artan L/D oranı ile birlikte zeminde meydana gelecek göçme kamasının hacmi de küçüleceğinden göçme kamasının yan yüzlerinde etkili olan kuvvetlerin yatay yöndeki bileşenleri de küçülecektir. Sıralanan bu nedenlerden dolayı yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde bir azalma gözlenmektedir.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18'de sunulmuştur. Şekil 4.15 ve 4.16'da hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal

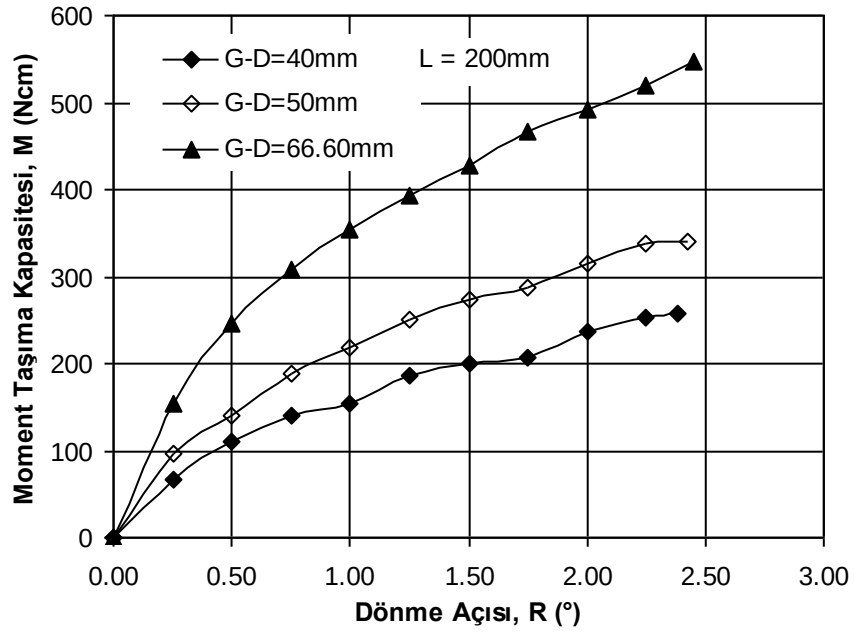
ötenme ilişkilerinin non-linear bir davranış sergilediği bununla birlikte; sıkı kum zeminde yanal yük-yanal ötenme ilişkilerinin daha rijit olduğu görülmektedir.



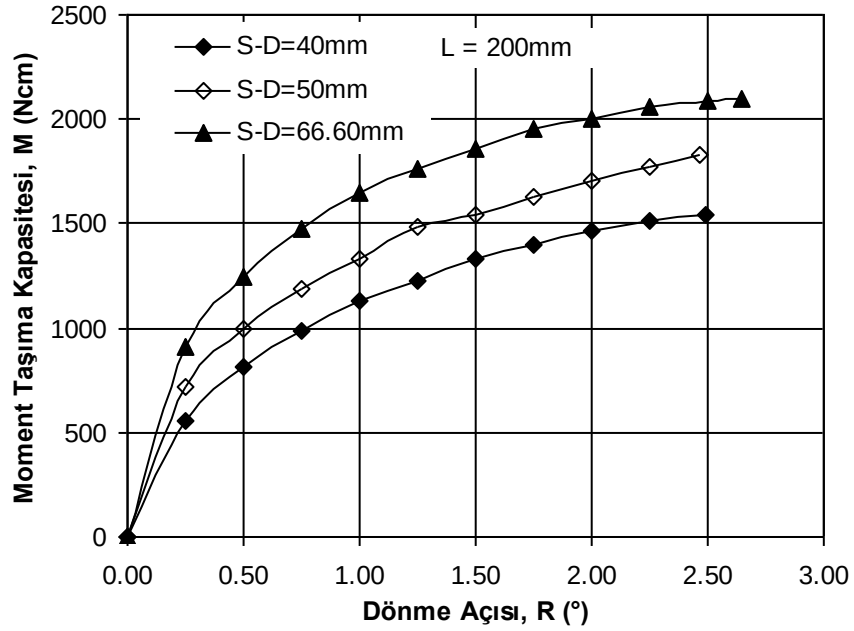
Şekil 4.15. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötenme İlişkisi (D, Değişken)



Şekil 4.16. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Yanal Yük-Yanal Ötenme İlişkisi (D, Değişken)



Şekil 4.17. Gevşek Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (D , Değişken)



Şekil 4.18. Sıkı Kum Zeminde Farklı L/D Oranları için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi (D , Değişken)

Özellikle gevşek kum zeminde olmak üzere elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinde belirgin bir göçme noktası gözlenmemiştir. Bu nedenle; kazık başı dönme açısının 1° , 2° ve R değerleri ve kazık başındaki yanal ötelenmenin kazık çapının %10'una eşit olduğu yanal ötelenme değeri için yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Farklı L/D Oranları için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (D, Değişken)

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.02 \text{ kN/m}^3$				
D (mm)		40	50	66.60
L (mm)		200	200	200
L/D		5	4	3
R_D (mm)		161.299	157.042	155.194
R ($^\circ$)		2.386	2.429	2.477
Yanal Yük (N)	1°	5.148	7.255	11.796
	2°	7.864	10.532	16.384
	R	8.566	11.375	18.255
	$U_{0.10D}$	6.553	10.299	17.881
Moment (Ncm)	1°	154.440	217.650	353.880
	2°	235.920	315.960	491.520
	R	256.980	341.250	547.650
	$U_{0.10D}$	196.590	308.970	536.430

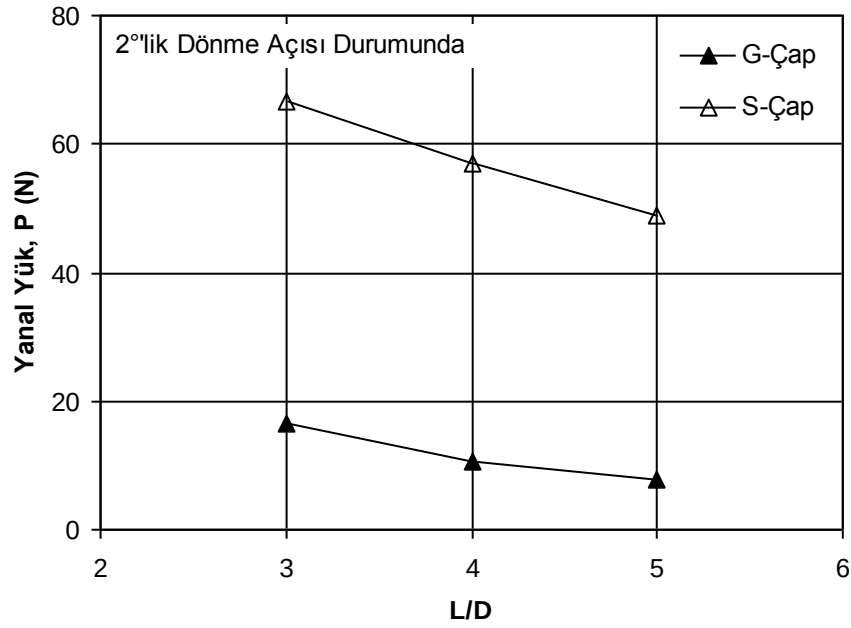
L/D oranı kazık çapına bağlı olarak büyüdüğünde başka bir ifade ile kazık çapı küçüldüğünde, hem kazığın çevre yüzey alanı hem de kazığın ağırlığı azalmaktadır. L/D oranının çapa bağlı olarak büyümesi daha narin bir kazık geometrisine geçilmesi anlamına da gelmektedir. Kazık çapı küçüldüğünde zeminle temas eden kazık çevre yüzey alanının azalması sonucu kazığın sıkıştıracağı zemin kütlesi hacmi küçülecek bunun sonucu olarak da kazığa etkiyecek zemin direnci azalacaktır. Kazığın ağırlığının azalması devirme momenti etkisine maruz rijit kısa kazıkların stabilitesini olumsuz yönde etkileyeceğinden, kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin azalmasına neden olacaktır.

Çizelge 4.7 Farklı L/D Oranları için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları (D, Değişken)

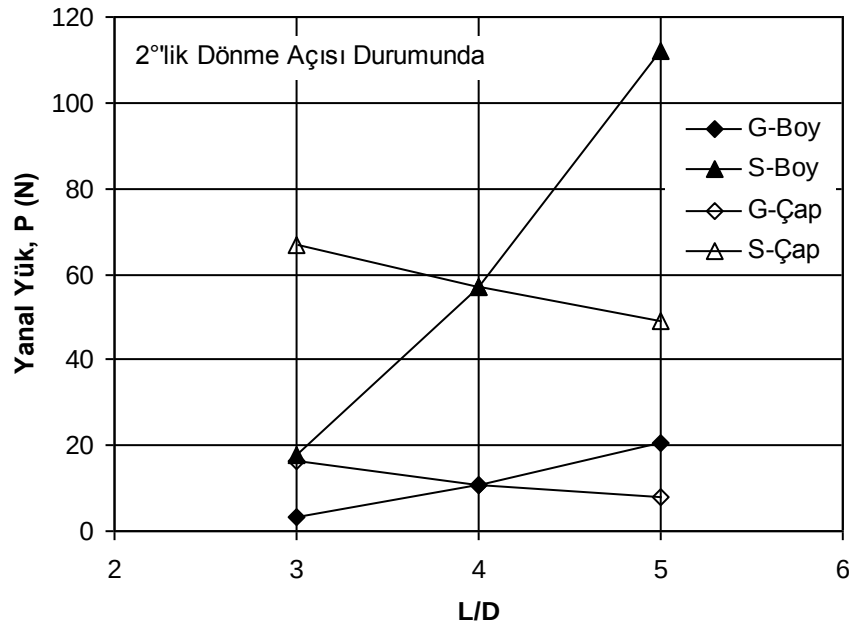
Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$				
D (mm)		40	50	66.60
L (mm)		200	200	200
L/D		5	4	3
R_D (mm)		150.648	153.349	137.266
R (°)		2.495	2.465	2.643
Yanal Yük (N)	1°	37.542	44.470	54.862
	2°	48.918	56.874	66.705
	R	51.351	60.995	69.841
	$U_{0.10D}$	44.329	56.641	70.684
Moment (Ncm)	1°	1126.260	1334.100	1645.860
	2°	1467.540	1706.220	2001.150
	R	1540.530	1829.850	2095.230
	$U_{0.10D}$	1329.870	1696.230	2120.520

L/D oranı L/D=5 değerinden L/D=4 değerine küçüldüğünde kazık ağırlığı %56 oranında artmakta, bununla birlikte kazık başında 2°'lik dönme açısı değerinde yanal yük taşıma kapasitesi gevşek kumda %33, sıkı kumda ise, %16 oranında artmaktadır. Benzer şekilde; L/D oranı L/D=4 değerinden L/D=3 değerine küçüldüğünde L/D oranındaki %33'lük bu azalmaya karşılık kazık ağırlığı %76 oranında, kazık başında 2°'lik dönme açısı değerinde yanal yük taşıma kapasitesi de gevşek kumda %55, sıkı kumda ise, %17 oranında artmaktadır. Görüldüğü gibi, gevşek ve sıkı kumda kazık çapındaki büyümeye karşılık yanal yük taşıma kapasitesindeki artış miktarları farklı oranlarda meydana gelmektedir. Bu nedenle Şekil 4.19'da görülen L/D-yanal yük ilişkisi bir paralellik sergilememektedir.

Relatif sıklığın etkisi L/D oranının değerine bağlı olarak değişmektedir. Öyle ki; L/D=3 için sıkı kumda elde edilmiş yanal yük taşıma kapasitesinin kazık başındaki 2°'lik dönme açısına karşılık gelen değeri gevşek kumdaki taşıma kapasitesi değerinin 4.071 katı iken, L/D=4 ve L/D=5 durumlarında sırası ile, 5.400 ve 6.220 katıdır. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda L/D oranının artması ile kazık başı dönme açısı değerlerinde önemli değişimler gözlenmemiştir.



Şekil 4.19. Kazık Başındaki 2°'lik Dönme Açısı için L/D-Yanal Yük İlişkileri



Şekil 4.20. Kazık Başındaki 2°'lik Dönme Açısı için L ve D' ye Bağlı L/D-Yanal Yük İlişkileri

Kazık gömülü uzunluğunun arttırılması sonucu $L/D=3$ ile $L/D=4$ arasında, kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, gevşek ve sıkı kum zeminde

yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinde %218, $L/D=4$ ile $L/D=5$ arasında da %96 değerinde bir artış gözlenmiştir. Kazık çapının arttırılması sonucu $L/D=5$ ile $L/D=4$ arasında, kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, gevşek ve sıkı kum zeminde yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinde gevşek kumda %33, sıkı kumda ise, %16 değerinde bir artış gözlenmiştir. $L/D=4$ ile $L/D=3$ arasında ise, gevşek kumda %55, sıkı kumda %17'lik bir yanal yük taşıma kapasitesi artımı elde edilmiştir.

Şekil 4.20'de kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda gevşek ve sıkı kum zemin durumunda elde edilmiş olan L/D -yanal yük ilişkileri görülmektedir. L/D -yanal yük ilişkileri ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde, L/D oranının kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak değişiminin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

4.3. Kazık En Kesit Şekli

Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların tasarımı için kullanılan mevcut analitik yöntemler, kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin kazığın en kesit şekline bağımsız olduğunu kabul etmektedirler. Analitik yaklaşımlar; kazığın dairesel en kesit şekline sahip olduğu ve gerilme-deformasyon ilişkisinin lineer-elastik olduğu esasına dayalı olarak hesaplama yaparlar. Tasarımcılar, farklı en kesit şekline sahip bir kazığın tasarımını mevcut analitik yaklaşımları kullanarak yapmak istediklerinde kazığın en kesit alanını eşdeğer dairesel alana dönüştürerek bu yaklaşımları uygulamaktadır (Johnson ve ark., 2006).

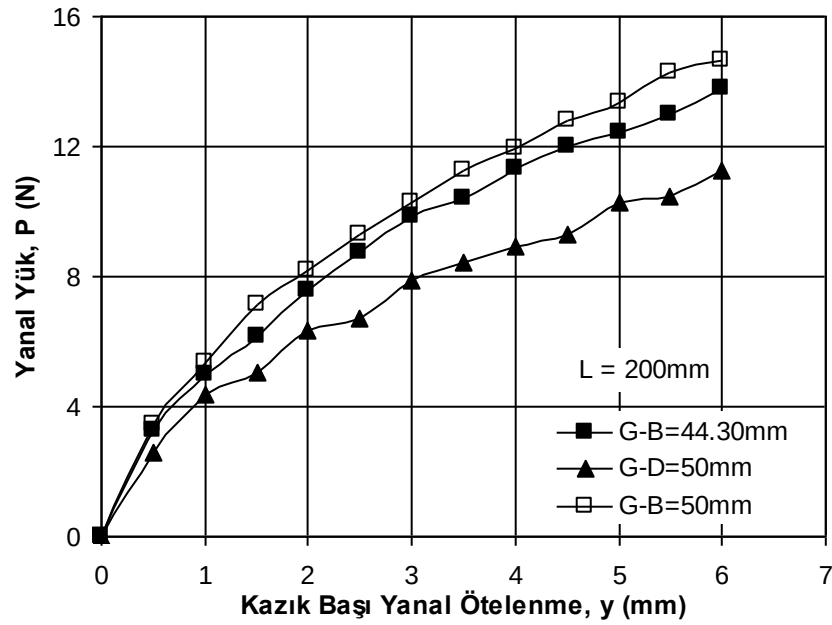
Broms (1964)'un bildirdiğine göre; Shilts ve ark. (1948), Ramelot ve Vandepierre (1950) ve Roscoe (1957), en kesit şekilleri farklı model kazıklar üzerinde laboratuvar yanal yükleme deneyleri yaparak kazık en kesit şeklinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda; kazık en kesit şeklinin kısa kazıkların nihai yanal yük taşıma kapasitesi ve kazık gömülü uzunluğu boyunca yanal zemin basıncı dağılımı üzerinde önemli sayılamayacak bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Broms (1964), önerdiği analitik tasarım yönteminde, göçme anındaki yanal zemin basıncı

dağılımının kazığın en kesit şeklinden bağımsız olduğunu kabul etmenin güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiğini ifade etmektedir.

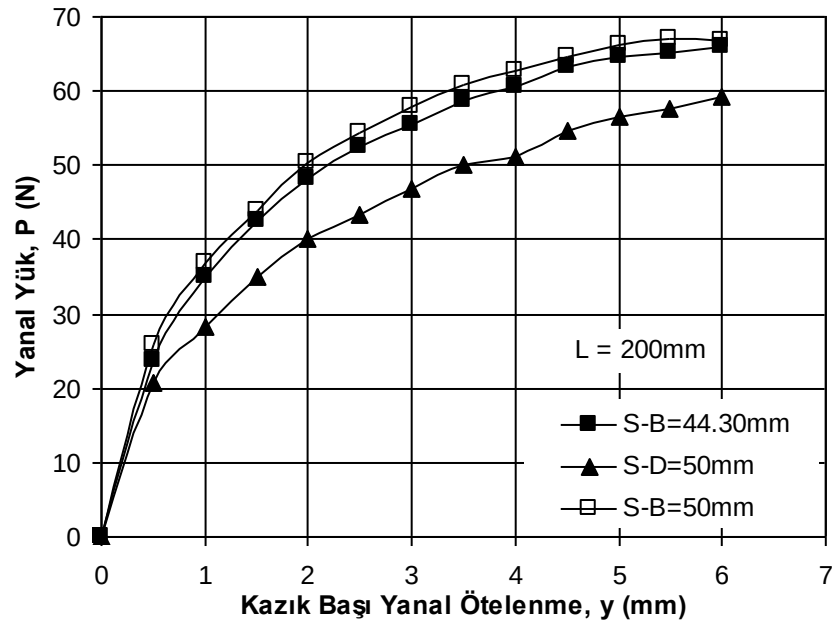
Yanal yüke maruz kazıkların davranışları zemin ve kazık arasındaki etkileşim tarafından kontrol edildiği için, kazık en kesit şeklinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olabilir. Kazık en kesit şeklinin yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışı üzerindeki etkisi dairesel ve kare en kesitli model kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiş bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır.

Kare kesitli kazığın yanal yük doğrultusunda zeminle temas eden yüzeyinin düz olması eğrisel bir temas yüzeyine sahip olan dairesel kesitli kazığa göre daha büyük bir temas yüzeyi olması anlamına gelmektedir. Bununla birlikte; yanal yüke maruz dairesel bir kazık yük etkisinde zemine yaslandığında kazığın ön yüzünde yer alan zemin kütlelerinin bir bölümü eğrisel çevre yüzey alanından dolayı yanal yönlere kaçabilmektedir. Kare en kesitli kazıklarda zeminle temas eden yüzeyin düz olması kazık ön yüzünde bulunan zeminin yanlara kaçışını zorlaştıracaktır. Bu nedenlerden dolayı, yanal yük etkisinde aynı miktarda yanal ötelenme göz önüne alındığında; kare kesitli kazığın ön yüzünde etkiyen normal reaksiyon direncinin ve buna bağlı olarak da kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin dairesel kesitli kazıktan daha büyük olması beklenmektedir.

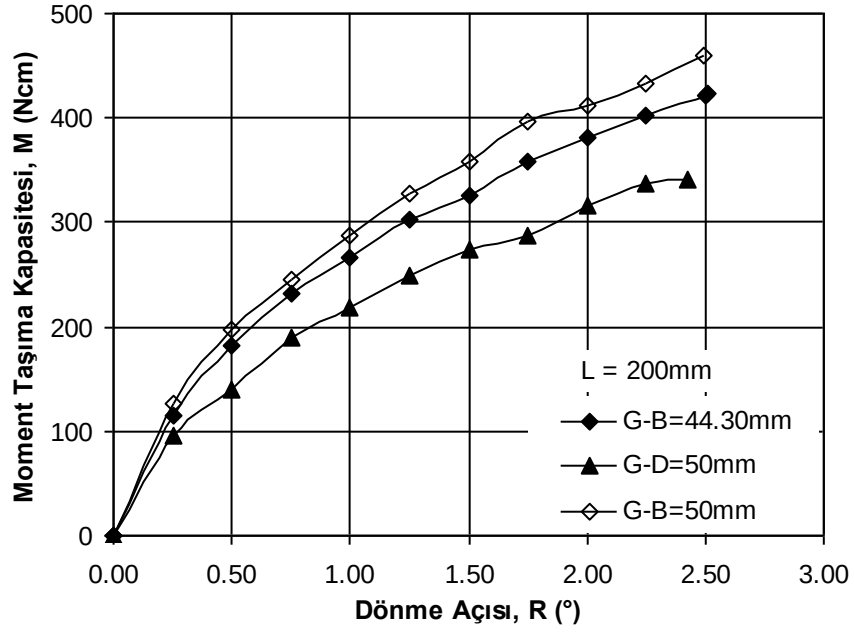
Deneysel çalışmalar sırasında; eşdeğer dairesel alan kabulü ve genişliğe eşdeğer çap kabulü fikirlerine dayalı olarak üç farklı model kazık kullanılmıştır. Dolu kesitli çelik model kazıklar $L=200\text{mm}$ uzunluğundadır. Eşdeğer dairesel alan kabulü için $B=44.30\text{mm}$ genişliğe sahip kare kazık ile $D=50\text{mm}$ çapa sahip dairesel kazığın davranışları karşılaştırılırken, genişliğe eşdeğer çap kabulü için $B=50\text{mm}$ genişliğinde kare kazık ile $D=50\text{mm}$ çapındaki dairesel kazığın davranışları karşılaştırılmıştır. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24’de sunulmuştur.



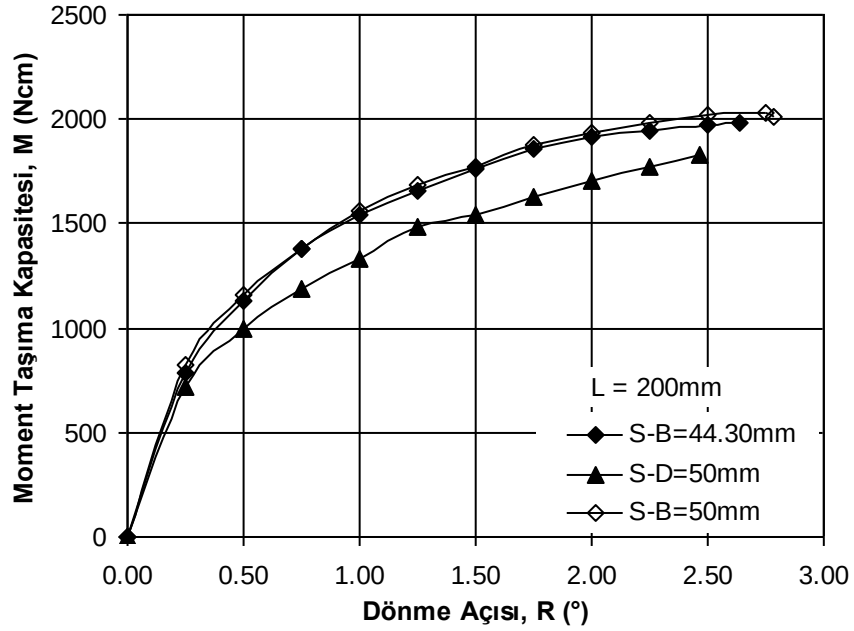
Şekil 4.21. Gevşek Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.22. Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.23. Gevşek Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi



Şekil 4.24. Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi

Şekil 4.21 ve 4.22’de hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin non-lineer bir davranış sergilediği, bununla birlikte sıkı kum zeminde bu non-lineer ilişkinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi, gevşek kum zeminde 0.50° ’lik dönme açısına kadar sıkı kum zeminde ise, 0.25° dönme açısına kadar doğrusal bir davranış sergilemektedir.

Özellikle; gevşek kum zeminde olmak üzere, elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinde belirgin bir göçme noktası gözlenmemiştir. Bu nedenle; kazık başı dönme açısının 1° , 2° ve R değerleri ve kazık başındaki yanal ötelenmenin kazık çapı veya kazık genişliğinin %10’una eşit olduğu yanal ötelenme değeri için yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.

Kazık başında 2° ’lik dönme açısı durumu göz önüne alındığında; gevşek kum zeminde, eşdeğer dairesel alan kabulü için kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesi dairesel kazığın yanal yük taşıma kapasitesinden %21 daha fazladır. Genişliğe eşdeğer çap kabulü için de kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin dairesel kazığinkinden %30 daha fazla olduğu görülmüştür. Sıkı kum zemin durumunda ise, kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesi dairesel kazığın yanal yük taşıma kapasitesine göre eşdeğer dairesel alan kabulü için %12, genişliğe eşdeğer çap kabulü için de %14 daha büyük elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar; kazık en kesit şeklinin özellikle gevşek kum zemin durumunda yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır.

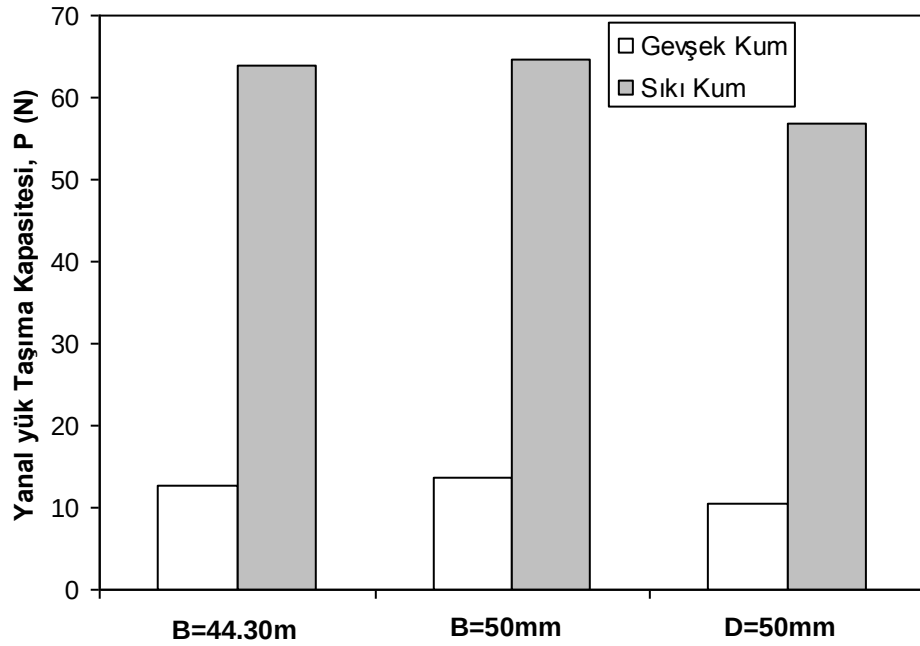
Şekil 4.25’de kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırılmaktadır. Farklı en kesit şekline sahip model kazıkların hepsi için sıkı kum zeminde elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri gevşek kum zemin durumunda elde edilmiş olan değerlerin yaklaşık beş katıdır.

Çizelge 4.8 Farklı En kesit Şekilleri için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.02 \text{ kN/m}^3$				
D veya B (mm)		B=44.30	B=50	D=50
L (mm)		200	200	200
L/D veya L/B		4.50	4	4
R_D (mm)		148.782	151.124	157.042
R (°)		2.514	2.490	2.429
Yanal Yük (N)	1°	8.894	9.596	7.255
	2°	12.732	13.715	10.532
	R	14.136	15.354	11.375
	$U_{0.10D-B}$	12.030	13.341	10.299
Moment (Ncm)	1°	266.820	287.880	217.650
	2°	381.960	411.450	315.960
	R	424.080	460.620	341.250
	$U_{0.10D-B}$	360.900	400.230	308.970

Çizelge 4.9 Farklı En kesit Şekilleri için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$				
D veya B (mm)		B=44.30	B=50	D=50
L (mm)		200	200	200
L/D veya L/B		4.50	4	4
R_D (mm)		137.477	126.173	153.349
R (°)		2.642	2.781	2.465
Yanal Yük (N)	1°	51.257	52.194	44.470
	2°	63.895	64.599	56.874
	R (°)	66.096	67.080	60.995
	$U_{0.10D-B}$	63.194	66.144	56.641
Moment (Ncm)	1°	1537.710	1565.820	1334.100
	2°	1916.850	1937.970	1706.220
	R (°)	1982.880	2012.400	1829.850
	$U_{0.10D-B}$	1895.820	1984.320	1699.230



Şekil 4.25. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Farklı En kesit Şekilleri için 2°'lik Dönme Açısında Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Gevşek kum zemin durumunda; dairesel kazığın dönme noktası derinliği kazık gömülü uzunluğunun %79'u derinlikte elde edilmiştir. Aynı kazık başı yanal ötelenme değeri için, kare kazıklarda dönme noktası derinliği B=44.30mm genişliğindeki kare kazık için kazık gömülü uzunluğunun %74'ü, B=50mm genişliğindeki kare kazık için de %76'sı derinliktedir. Sıkı kum zeminde ise, aynı yanal ötelenme değeri için kazık dönme noktası derinliği zemin yüzeyinden itibaren sırası ile kazık gömülü uzunluğunun %77, %69 ve %63'ü derinliklerde elde edilmiştir. Bu sonuç; aynı yanal ötelenme değeri için kare kazığın daha küçük hacimdeki bir zemin kütlesini sıkıştırarak daha büyük değerde yanal yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar; yaygın olarak kullanılan analitik tasarım yöntemlerinde, eşdeğer dairesel alan yaklaşımının özellikle gevşek kum zeminde yer alan yanal yüke maruz kazıkların tasarımı için güvenilir sonuçlar vermediğini ortaya koymaktadır.

4.4. Tabakalı Kum Zemin Durumu

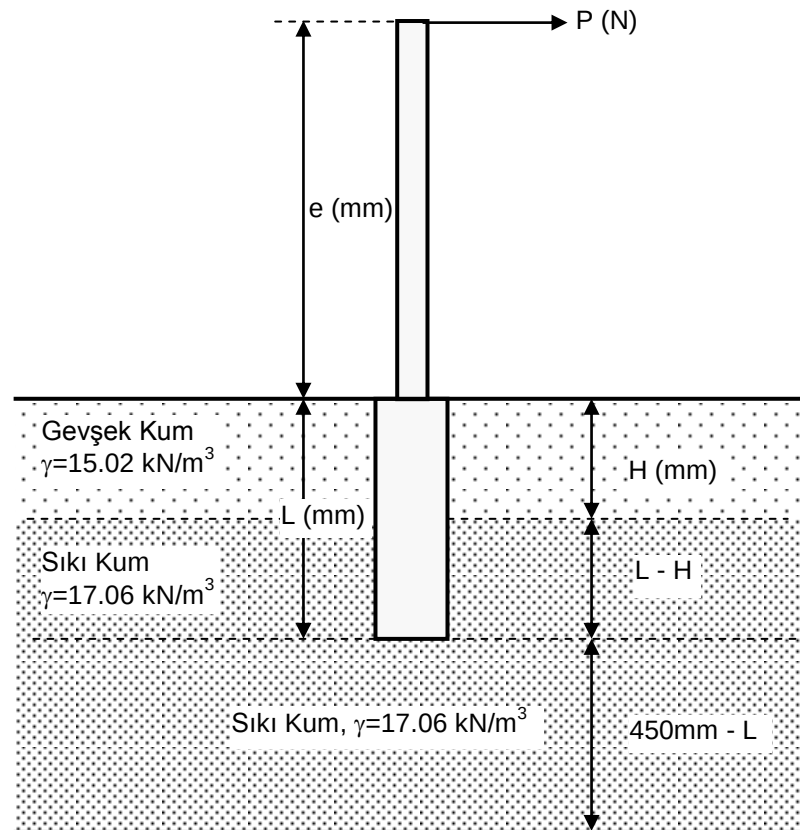
Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışlarını araştırmak için yapılmış olan laboratuvar model deneylerinin çoğunluğu homojen zemin koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde; mevcut analitik tasarım yöntemlerinin çoğunluğu da sadece homojen zemin koşullarında kullanılabilmektedir. Oysa ki; pratikte, kazık temeller çoğunlukla mukavemet ve deformasyon özellikleri birbirinden farklı zemin tabakalarının oluşturduğu zemin profilleri içerisinde yer almaktadır. Tabakalı zemin profilleri içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazık temellerin davranışlarını incelemeye yönelik çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Üstte kum altta kil tabakası, üstte kil altta kum tabakası, üstte gevşek kum altta sıkı kum tabakası, üstte yumuşak kil altta katı kil tabakası, iki kil tabakası arasında kum tabakası yer alması ve iki kum tabakası arasında kil tabakası yer alması durumları karşılaşılan tabakalı zemin profillerine örnek olarak gösterilebilir.

Tabakalı zemin profili durumunda; üstte yer alan tabaka kalınlığının altta yer alan tabaka kalınlığına oranı, üstteki ve alttaki zemin tabakalarının rijitliklerinin oranı, kazık gömülü uzunluğunun hangi tabaka içerisinde ne kadarlık bir uzunluğunun bulunduğu ve farklı zemin tabakaları arasındaki geçiş bölgeleri yanal yüke maruz kazığın davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. İki kum tabakası arasında bir kil tabakasının yer alması, ya da iki kil tabakası arasında bir kum tabakası yer alması durumlarında arada yer alan zemin tabakası üstünde ve altında yer alan zemin tabakalarının davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Aynı şekilde; üstte ve altta yer alan zemin tabakaları da ortada yer alan zemin tabakasının davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Zhang ve Jeremic, 2005). Tabakaların davranışlarının etkilenmesi, homojen zemin durumunda sergiledikleri davranışlarına göre gözlenen farklılıklardır.

Bu bölümde; model kazığın, tabakalı kum zemin içerisinde yer alması durumunda yanal yük etkisi altındaki davranışı bir seri model deney çalışması yapılarak araştırılmıştır. Tabakalı kum zemin durumu, çoğunlukla karşılaşıldığı gibi, üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının bulunduğu zemin profili şeklinde modellenmiştir. Tabakalı kum zemin durumunda tabakalanma yapısı H/L oranı

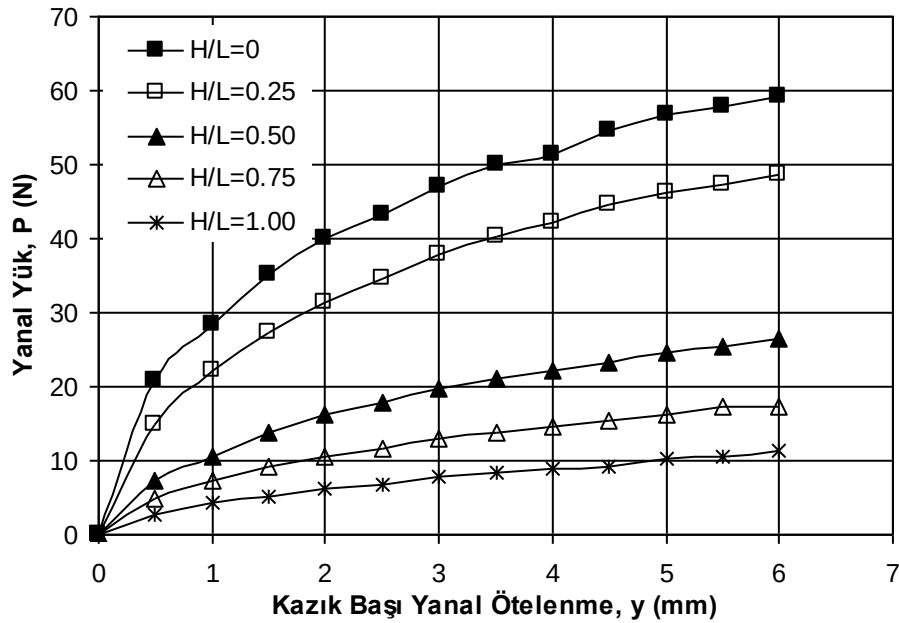
kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi, H, üstte yer alan gevşek kum tabakası kalınlığı, L ise kazık gömülü uzunluğudur. $H=0$ ve $H/L=0$ durumu homojen sıkı kum zemini, $H=L$ ve $H/L=1$ durumu da kazık gömülü uzunluğu boyunca homojen gevşek kum zemini ifade etmektedir. Deneysel çalışmalar sırasında; $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=200\text{mm}$ uzunluğunda dolu kesitli çelik model kazık kullanılmıştır. Model kazığın ucu sıkı kum zemin üzerine oturmaktadır. Model kazığın yanal yük etkisindeki davranışı üzerinde uç sürtünme direncinin ihmal edilebilecek değerde olduğu kabul edilmektedir.



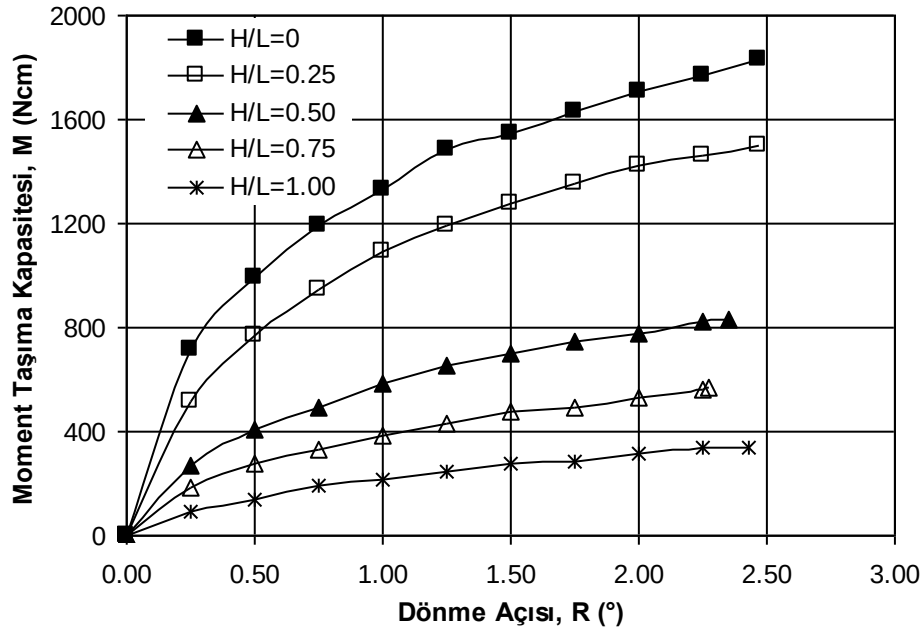
Şekil 4.26. Tabakalı Kum Zemin Durumunun Modellenmesi

Deneysel çalışmalar sırasında; üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığı zemin yüzeyinden itibaren her bir deneyde artırılarak, $H/L=0.25$, 0.50 ve 0.75 durumlarında yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Homojen sıkı kum $H/L=0$ durumu ve homojen gevşek kum $H/L=1$ durumu yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin sırası ile üst ve alt sınırını oluşturmaktadır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar yanal yük-yanal ötelenme ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasiteleri ilişkisi şeklinde Şekil 4.27 ve 4.28’de gösterilmiştir. Şekil 4.27’de görülen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile birlikte yanal ötelenme-yanal yük ilişkilerinin daha yumuşak bir davranış sergilediği ve kazığın yanal yük taşıma kapasitesi değerinin homojen gevşek kum durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi değerine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.28’de kazık başındaki dönme açısının 0.25° olduğu ana kadar doğrusal bir yük-ötelenme ilişkisi gözlenmektedir. Buradan da anlaşılabacağı gibi; zeminin gerilme-deformasyon ilişkisi çok küçük yanal ötelenme değerlerinde dahi non-lineer davranış özelliğine sahiptir.



Şekil 4.27. Tabakalı Kum Zeminde Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.28. Tabakalı Kum Zeminde Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi

Yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri kazık başındaki dönme açısının 1° , 2° ve R değerleri için ve ayrıca kazık çapının %10'una eşit olan yanal ötelenme değeri için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda Çizelge 4.10'da verilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde, tabakalı kum zemin durumunda kazık gömülü uzunluğunun sıkı kum içerisinde kalan kısmının kazığın yanal yük taşıma kapasitesini önemli oranda arttırdığı görülmüştür. Öyle ki; H/L=0.25 durumunda kazığın yanal yük taşıma kapasitesi homojen sıkı kum durumundaki (H/L=0) yanal yük taşıma kapasitesinden %17 daha küçüktür. Bununla birlikte; H/L oranının artması ile kazığın yanal yük taşıma kapasitesindeki azalma miktarları da artmaktadır. H/L=0.25 ile H/L=0.50 arasında %45, H/L=0.50 ile H/L=0.75 arasında da %32 değerinde bir yanal yük taşıma kapasitesi kaybı söz konusudur. Çünkü; üstte yer alan birim hacim ağırlığı düşük gevşek kum tabakasının kalınlığının artması hem üstte yer alan tabakanın altta yer alan sıkı kum tabakası üzerindeki etkisini hem de kazığın yanal yöndeki hareketine karşı koyacak zemin kütlelerinin rijitliğini azaltacaktır. Bunun sonucu olarak zeminin yanal yük etkisi

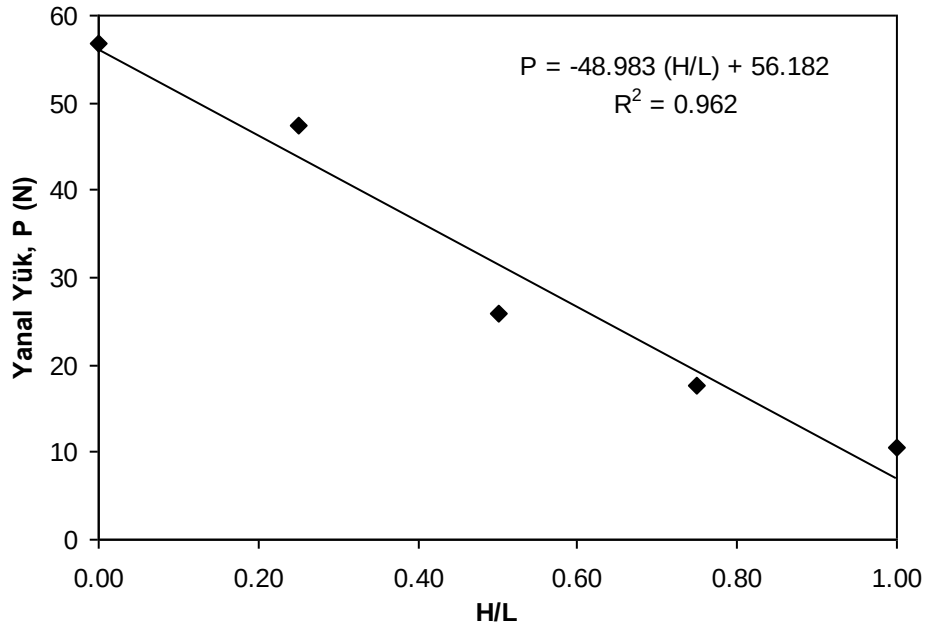
altındaki pasif taşıma gücü azalacaktır. $H/L=0.75$ durumunda, dönme noktası üzerinde yer alan sıkı kum tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak kazık gömülü uzunluğunun %13'ü olmasına rağmen yanal yük taşıma kapasitesi homojen gevşek kum durumuna göre %67 daha büyüktür.

Çizelge 4.10 Tabakalı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

Tabakalı Zemin Durumu - D=50mm - L=200mm						
Tabakalanma (mm)		H/L=0	H/L=0.25	H/L=0.50	H/L=0.75	H/L=1.00
R_D (mm)		153.349	153.257	164.759	174.143	157.042
R (°)		2.465	2.466	2.354	2.270	2.429
Yanal Yük (N)	1°	44.470	36.149	19.427	12.873	7.255
	2°	56.874	47.420	25.980	17.647	10.532
	R	60.995	50.088	27.758	18.958	11.375
	$U_{0.10D}$	59.122	46.249	24.576	16.149	11.234
Moment (Ncm)	1°	1334.100	1092.570	582.510	386.190	217.650
	2°	1706.220	1422.600	779.400	529.410	315.960
	R	1829.850	1502.640	832.740	568.740	341.250
	$U_{0.10D}$	1773.660	1387.470	737.280	484.470	337.020

Üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının değişmesi ile birlikte kazık uzunluğu boyunca kazığa etkiyen yanal zemin basınçlarının dağılımı da değişmektedir. Gevşek tabakadan sıkı tabakaya geçişte geçiş bölgesindeki yanal zemin basınçları her bir tabakalanma durumu için farklılık gösterecektir. Bu durum; kazığın yanal yük taşıma kapasitesini etkilediği gibi, dönme noktası derinliği ve kazığın yapacağı dönmenin miktarını da etkilemektedir. Üstteki gevşek kum tabakasının kalınlığının artması dönme noktası derinliğinin de kazık ucuna doğru aşağı yönde hareketlenmesine neden olmuştur.

Şekil 4.29'da H/L oranı ile yanal yük taşıma kapasitesi ilişkilendirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre çizilen en uygun doğru $R^2=0.962$ gibi yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olup, doğrunun denklemi (4.1) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 4.29. Tabakalı Kum Zeminde H/L-Yanal Yük

$$P = -48.983 (H/L) + 56.182 \quad (4.1)$$

4.5. Şevli Zemin Yüzeyi Durumu

Rijit kısa kazıklar, zemin yüzeyi üzerinden belli bir e yüksekliğinde etkiyen bir yanal yüke maruz kaldıklarında meydana gelecek ötelenme ve dönme gibi yanal hareketlere karşı taşıma güçlerini pasif zemin basıncı yolu ile elde ederler. Kısa kazıklar; çaplarının büyük olması, gömülü uzunlukları ile çapları arasındaki oranının (L/D) küçük olması ve kazığı çevreleyen zemine göre rijitliklerinin oldukça fazla olması gibi nedenlerden dolayı tasarım ve analizlerde rijit elemanlar olarak kabul edilirler.

İstinat duvarları, köprü ayakları, yüksek gerilim hattı direkleri, otobanlardaki işaret ve reklam direkleri ve otobanlarda gürültü kontrolü için inşa edilen ses duvarları gibi yapılar kısa kazık temeller tarafından desteklenmektedir. Bu tip yapılar, çoğunlukla, doğal yarmalar ya da dik şevlere yakın yerlerde inşa edilmekte, şiddetli rüzgar kuvvetleri ve deprem etkileri gibi büyük yanal yüklere maruz kalabilmektedirler. Bu durumda; bu yapıları destekleyen kazık temellerin yanal yük

etkisindeki davranışları zemin yüzeyinin düz olduğu durumda sergileyecekleri davranışlarından farklı olacaktır.

Şev tepesinde ya da şev tepesi civarında yer alan kazıkların yanal yük etkisindeki taşıma kapasiteleri zemin yüzeyinin düz olduğu durumda sahip oldukları yanal yük taşıma kapasitesi değerinden daha küçüktür. Çünkü; kazık üzerinde etkili olan başlangıç yatay çevre basıncının değeri şevli zemin yüzeyi tarafında zemin yüzeyinin düz olduğu duruma göre daha küçüktür. Bununla birlikte; kazık ön yüzünde yer alan ve yanal yük etkisinde sıkışarak pasif zemin direncini meydana getiren zemin kütlesi hacminin zemin yüzeyinin düz olduğu durumdakine göre daha az olması daha küçük değerlerde pasif zemin direnci oluşmasına neden olacaktır.

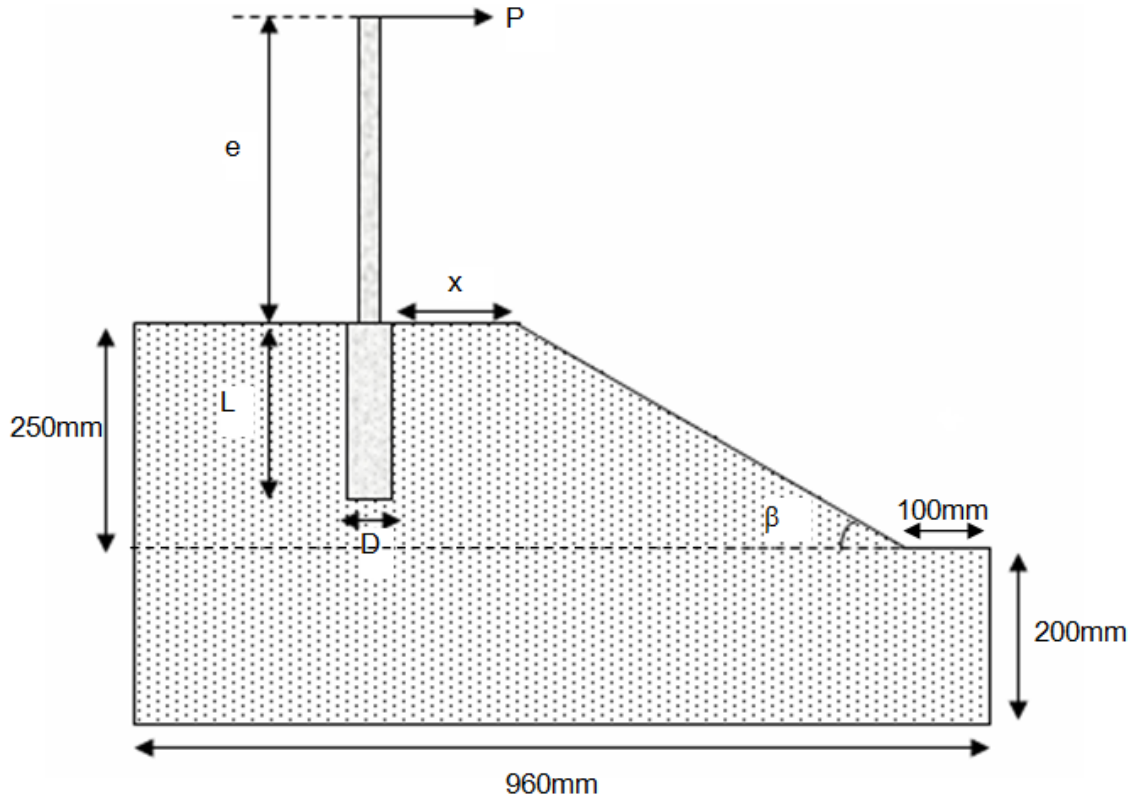
Şevli zemin yüzeyi durumunda yanal yüke maruz bir kısa kazık probleminde; kazığın şev tepesinde veya civarında yer alması durumunda yanal yük taşıma kapasitesinin zemin yüzeyinin düz olduğu duruma göre ne kadar azalacağı ve şevden dolayı yanal yük taşıma kapasitesinde meydana gelen kaybın şev tepesinden ne kadar uzaklıkta ortadan kalkacağı sorularının yanıtları aranmaktadır.

Bununla birlikte; zemin yüzeyinin şevli olması durumunda, yanal yüke maruz kısa kazığın tasarımında hangi yanal yükleme doğrultusunun kullanılacağı da önemli bir konudur. Şevli durumda kazığa etkiyecek yanal yük ya şev tepesine doğru ya da şev tepesinden dışarı doğru etkiyebilir. Şev tepesi civarında yer alan bir kazığın şevli yüzey doğrultusunda bir yanal yüke maruz kalması durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi, şev tepesinden dışarı doğru bir yanal yük etkimesi durumundaki yanal yük taşıma kapasitesinden daha küçüktür. Bu iki farklı yükleme durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitelerinin her ikisi de zemin yüzeyinin düz olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesinden daha küçüktür. Bu yüzden; en elverişsiz yükleme koşulu olması nedeni ile yanal yükleme deneyleri şevli yüzey doğrultusunda etkiyen yanal yük etkisinde gerçekleştirilmiş ve model kazığın şev tepesinden ne kadar uzağa yerleştirilmesi durumunda şev etkisinin ortadan kalkacağı araştırılmıştır.

Literatürde; şevli zemin yüzeyi durumunda, kum zeminde yer alan yanal yüke maruz kazıkların davranışlarını araştırmak için yapılmış sınırlı sayıda model deney çalışması (Shen ve ark. (1988), Dickin ve Nazir (1999), Chae ve ark. (2004), Sawwaf

(2006)) bulunmaktadır. Yapılmış olan model deney çalışmalara ait sonuçlar incelendiğinde, farklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu farklılığın nedenleri; kullanılan şev açısının farklı olması, deneysel çalışmalarda farklı model kazıkların kullanılmış olması, L/D oranlarının farklı olması, e yüksekliğinin farklı olması ve model kum zeminin ve sıkılığının farklı olması şeklinde açıklanabilir.

Zemin yüzeyinin şevli olduğu durumda gerçekleştirilen model deney çalışmalarında; 30° 'lik şev açısına sahip kum zeminde yanal yüke maruz rijit kısa kazığın şev tepesine olan uzaklığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler sadece, gevşek kum zemin durumunda yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında; $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=200\text{mm}$ uzunluğunda dolu kesitli model çelik kazık kullanılmıştır. Yanal yük zemin yüzeyi üzerinden $e=300\text{mm}$ yükseklikten uygulanmıştır. Model deney geometrisi Şekil 4.30'da görülmektedir.

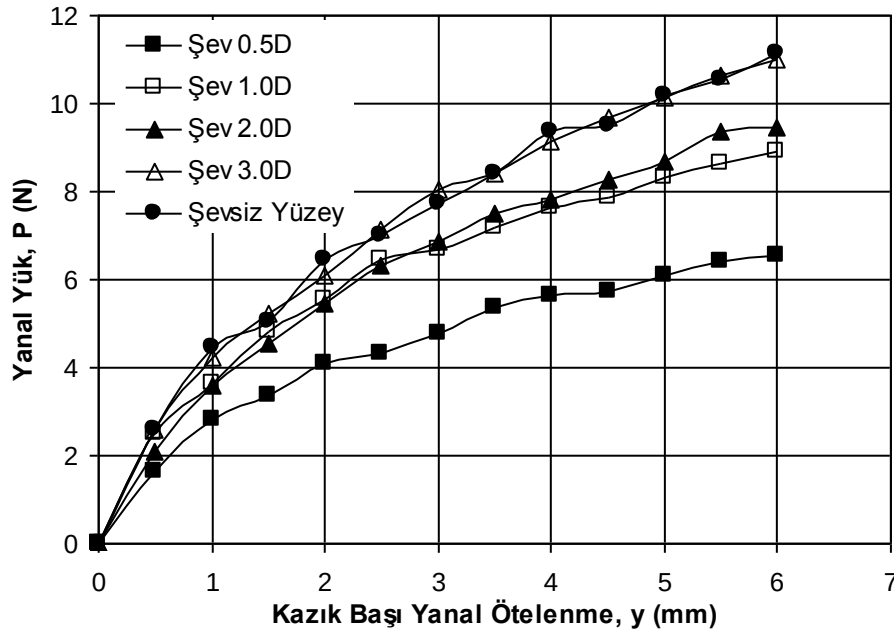


Şekil 4.30. Şevli Zemin Yüzeyi Durumunda Model Deney Geometrisi

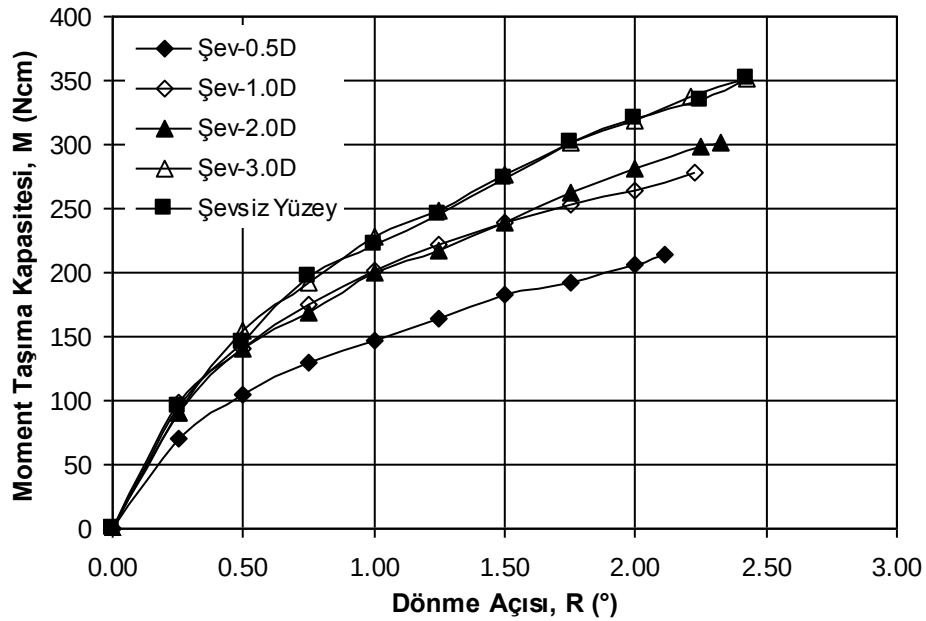
Deneysel çalışmalar sırasında; model kazık, şev tepesine dört farklı x yatay mesafesinde yerleştirilmiştir. Belirtilen yatay mesafe değerleri kazık dış yüzü ile şev tepesi arasındaki yatay uzaklığı ifade etmekte olup kazık çapı (D) cinsinden sırası ile $0.5D$, $1.0D$, $2.0D$ ve $3.0D$ dir.

Deneyler sırasında deplasman transduserlerinden ilki zemin yüzeyinden 26mm yükseklikte, ikincisi ise zemin yüzeyi üzerinden 89mm yükseklikte yer almıştır. Hesaplamalar, zemin yüzeyinin düz olduğu durumda gerçekleştirilmiş olan deneye ait sonuçlar ile karşılaştırma yapılabilmesi için, zemin yüzeyi üzerinden 26mm yükseklikte bulunan deplasman transduserinin yatay ötelenme değerinin 7.75mm olduğu değer için yapılmıştır. Zemin yüzeyinin şevli olduğu durumda gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar zemin yüzeyinin düz olduğu durumda yapılmış olan deneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, yanal yük-yanal ötelenme ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde Şekil 4.31 ve 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Şevli Kum Zeminde Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.32. Şevli Kum Zeminde Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi

Şekil 4.31'deki yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde yük-ötelenme davranışının non-linear özellikte olduğu ve kazığın şev tepesinden uzaklaşması ile bu non-linear davranışın daha dik ve belirgin bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte, kazığın şev tepesine olan yatay uzaklığının artması kazığın yanal yük taşıma kapasitesini de artırmaktadır. Şekil 4.32 deki dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkilerinin de non-linear özellikte olduğu görülmektedir. Kazığın şev tepesine olan uzaklığının $\geq 1.0D$ olduğu durumda, 0.75° 'lik dönme açısı değerine kadar moment taşıma kapasiteleri arasında önemli farklılıklar gözlenmemişken, özellikle 2.0D ve 3.0D arasında, 0.75° 'den büyük dönme açılarında moment taşıma kapasiteleri arasında önemli sayılabilecek farklar gözlenmiştir.

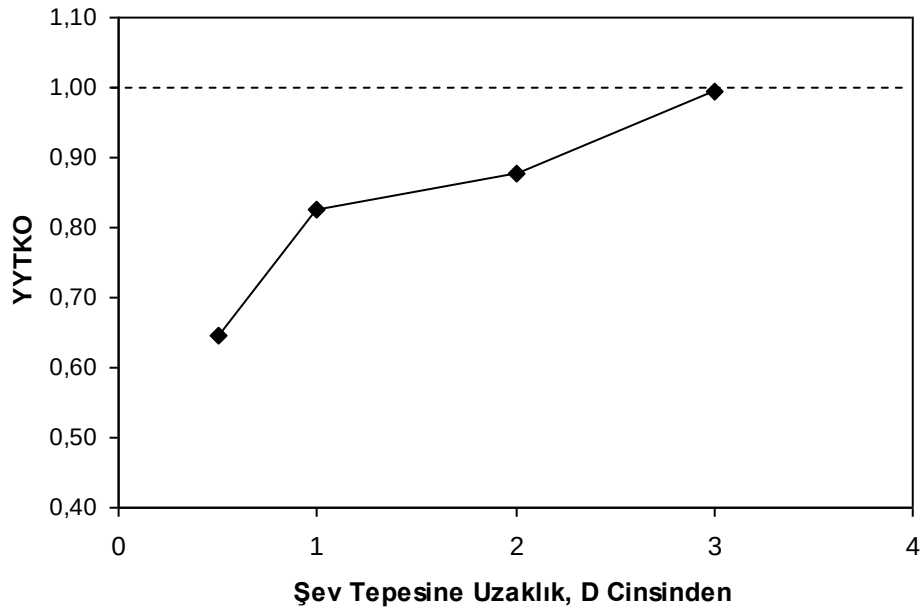
Yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri kazık başındaki dönme açısının 1° , 2° ve R değerleri için ve ayrıca kazık çapının %10'una karşılık gelen yanal ötelenme değeri için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11'de sunulmuştur.

Çizelge 4.11 Şevli Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

Şevli Zemin Yüzeyi - D=50mm - L=200mm						
Şev Tepesine Mesafe		0.5D	1.0D	2.0D	3.0D	Düz
R_D (mm)		184.761	173.256	165.070	157.279	156.998
R (°)		2.109	2.229	2.325	2.424	2.427
Yanal Yük (N)	1°	4.915	6.693	6.647	7.584	7.396
	2°	6.881	8.800	9.363	10.626	10.672
	R	7.115	9.268	10.064	11.700	11.702
	$U_{0.10D}$	6.085	8.332	8.660	10.158	10.204
Moment (Ncm)	1°	147.450	200.790	199.410	227.520	221.880
	2°	206.430	264.000	280.890	318.780	320.160
	R	213.450	278.040	301.920	351.000	351.060
	$U_{0.10D}$	182.550	249.960	259.800	304.740	306.120

Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda Çizelge 4.11’de verilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde, kazığın şev tepesine olan uzaklığının artması ile, kazık yanal yük taşıma kapasitesinin de önemli derecede arttığı görülmüştür. Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durum için şevli durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri zemin yüzeyinin düz olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile bölünerek yanal yük taşıma kapasitesi oranı (YYTKO) tanımlanmıştır. Kazığın şev tepesine olan uzaklığı kazık dış yüzünden itibaren 0.5D iken kazığın yanal yük taşıma kapasitesi zemin yüzeyinin düz olduğu durumdaki yanal yük taşıma kapasitesinin %64’ü kadardır. Bu oran; 1.0D, 2.0D ve 3.0D yatay uzaklıkları için sırası ile %82, %88 ve %99 olarak elde edilmiştir. Kazığın şev tepesine olan uzaklığının 2.0D olduğu durumda şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde bir miktar da olsa etkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; kazığın, şev tepesinden 3.0D veya daha uzağa yerleştirilmesi durumunda, yanal yük taşıma kapasitesi, şevli yüzeyden etkilenmeyecektir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak, kazığın şev tepesine 2.0D ile 3.0D arasında bir mesafede bulunması durumunda şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyelerde olduğu söylenebilir.

Şekil 4.33’de kazığın şev tepesine olan uzaklığı ile YYTKO arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 4.33. Şevli Kum Zeminde Şev Tepesine Uzaklık-YTKO İlişkisi

Kazığın şev tepesine olan uzaklığının artması kazığa etkiyecek başlangıç yatay çevre basıncını artıracaktır. Bunun sonucu olarak, kazığa etkiyecek pasif zemin direnci de artacağından, kazığın şev tepesine uzaklığının artması ile dönme noktasının zemin yüzeyinden derinliği de zemin yüzeyine doğru hareketlenmektedir.

4.6. Kazığın İmal Edildiği Malzeme

Flexible uzun kazıklar, gömülü uzunlukları ile çapları arasındaki oranın büyük değerinde olduğu narin yapılı kazıklardır. Flexible uzun bir kazık yanal yük etkisine maruz kaldığında kazığın bir nokta etrafında rijit bir bütün olarak dönmesi oldukça zordur. Uzun kazıklar, yanal yük etkisinde ötelenmeye uğrar ve eğilirler. Kazıkta oluşan maksimum eğilme momentinin kazık kesitinin moment dayanımını aşması sonucu göçme meydana gelmektedir. Maksimum eğilme momentinin olduğu kesit civarında plastik bir mafsal oluşmaktadır.

Kazığın eğilme rijitliği (EI), kazığın imal edildiği malzemenin elastisite modülü (E) değeri ile kazık kesitinin yanal yük doğrultusundaki atalet momentinin (I) çarpımı olarak ifade edilmektedir. Kazığın imal edildiği malzemenin farklı olması

kazığın eğilme rijitliğini değiştireceğinden, yanal yüke maruz uzun kazıkların yanal yük taşıma kapasitesini de etkileyecektir.

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Zemin-kazık ara yüzey davranışı; kazığın imal edildiği malzeme, kazığın imalat biçimi (örneğin; yerinde dökme beton kazık veya prefabrik beton kazık gibi) ve kazığın zemine yerleştirilme yöntemi gibi unsurlardan etkilenmektedir.

Kısa kazık temeller, çoğunlukla, büyük devirme momentlerine ve rölatif olarak küçük sayılabilen yatay ve düşey yüklere karşı koymaktadırlar. Bu yüzden, kısa kazık temeller için tasarım kriteri, genellikle, moment taşıma kapasitesi olmaktadır. Kısa kazık temellerin devrilmeye karşı göstermiş oldukları direnç ya da diğer bir ifade ile moment taşıma kapasitesi esas olarak zemindeki pasif direncin harekete geçirilmesi ile sağlanmaktadır. Buna ilave olarak, kazık temelin ve desteklediği sistemin toplam ağırlığının artması sistemin devrilmeye karşı stabilitesini de artıracaktır.

Bu bölümde; çelik, alüminyum ve derlin gibi farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen model deneylere ait sonuçlar sunulmaktadır. Deneylerde, model kazık malzemesinden imal edilmiş çekme kolları kullanılmıştır. Böylelikle; kısa kazık ve çekme kolundan oluşan model sistem ağırlığının yanal yüke maruz kısa kazığın davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kazığın imal edildiği malzemenin elastisite modülünün, özellikle, çekme kolunun davranışına olan etkisi de irdelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmış olan model kazıkların tamamı dolu kesitli olup $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=200\text{mm}$ uzunluğundadır. Çekme kolu yükseklikleri her bir farklı malzeme için 350mm olup yanal yük zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte uygulanmıştır. Çelik ve alüminyum çekme kolu çubuklarının çapı $D=25\text{mm}$ dir. Buna karşılık; elastisite modülü değeri çelik ve alüminyumunkine göre oldukça küçük olan derlin malzemeden imal edilmiş, çekme kolu çubuğunun çapı ise, $D=35\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmış farklı malzemelere ait özellikler Çizelge 4.12’de sunulmuştur.

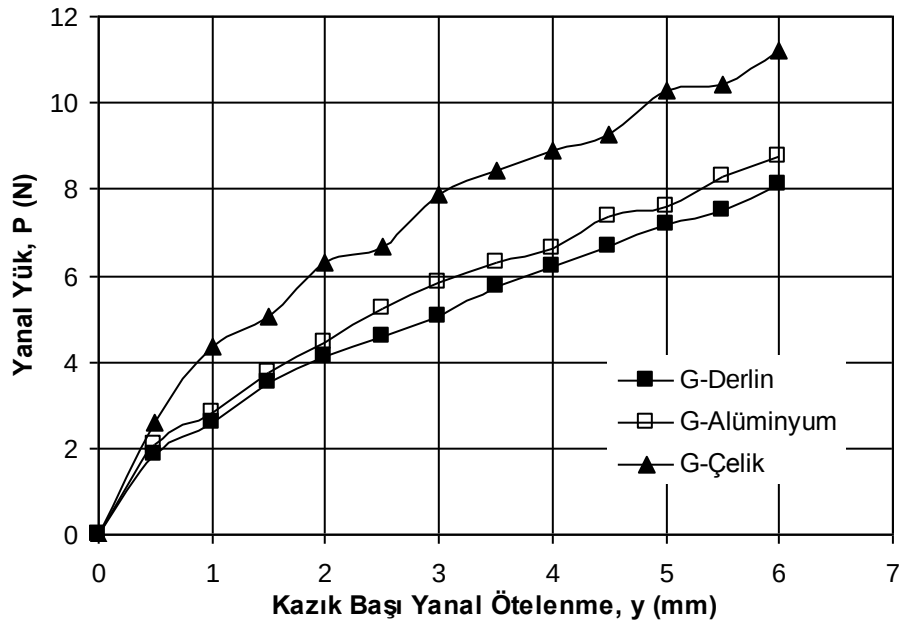
Çizelge 4.12 Deneylerde Kullanılan Kazık Malzemelere Ait Özellikler

Malzeme	Çap (mm)	Ağırlık (N/m)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Çelik	50	151	210000	0.25
Alüminyum	50	52	70000	0.33
Derlin	50	29	3100	0.35

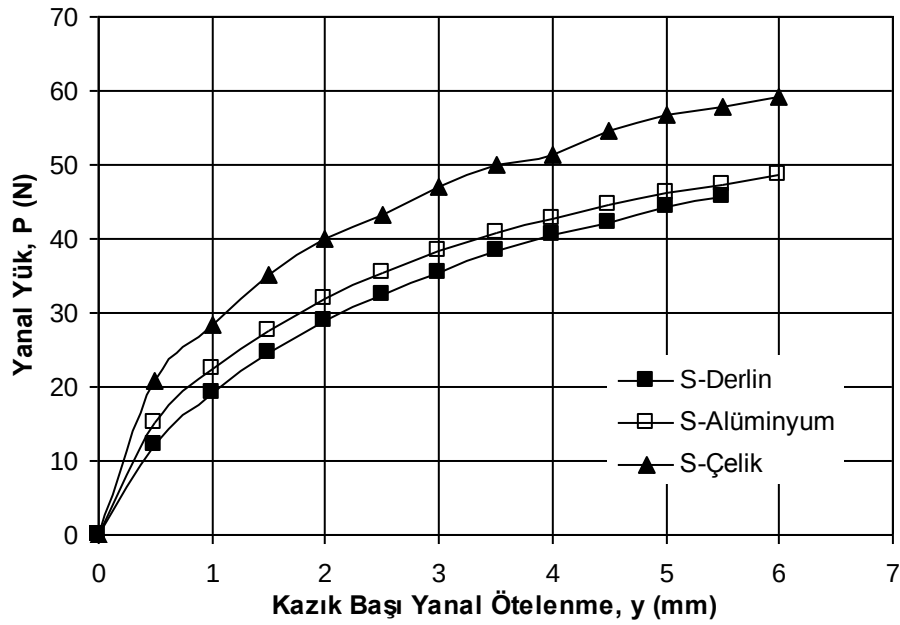
Çizelge 4.12’de verilen malzeme ağırlıkları incelendiğinde alüminyumun ağırlığının çeliğin ağırlığının %35’i kadar, derlinin ağırlığının ise çeliğin ağırlığının %20’si kadar olduğu görülmektedir. Benzer şekilde; derlinin ağırlığı da alüminyumun ağırlığının %56’sı kadardır. Malzemelere ait elastisite modülü değerleri incelendiğinde, en rijit malzemenin çelik olduğu bununla birlikte, derlin malzemenin elastisite modülünün çelik ve alüminyumun elastisite modüllerine göre çok küçük bir değere sahip olduğu görülmektedir.

Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde farklı kazık malzemeleri için gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen sonuçlar, kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ve kazık başı dönme açısı-moment taşıma kapasitesi ilişkisi şeklinde Şekil 4.34, 4.35, 4.36 ve 4.37’de sunulmuştur. Şekil 4.34 ve 4.35 incelendiğinde, hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin non-lineer bir davranış sergilediği, bununla birlikte, sıkı kum zeminde bu non-lineer davranışın daha belirgin olduğu görülmektedir.

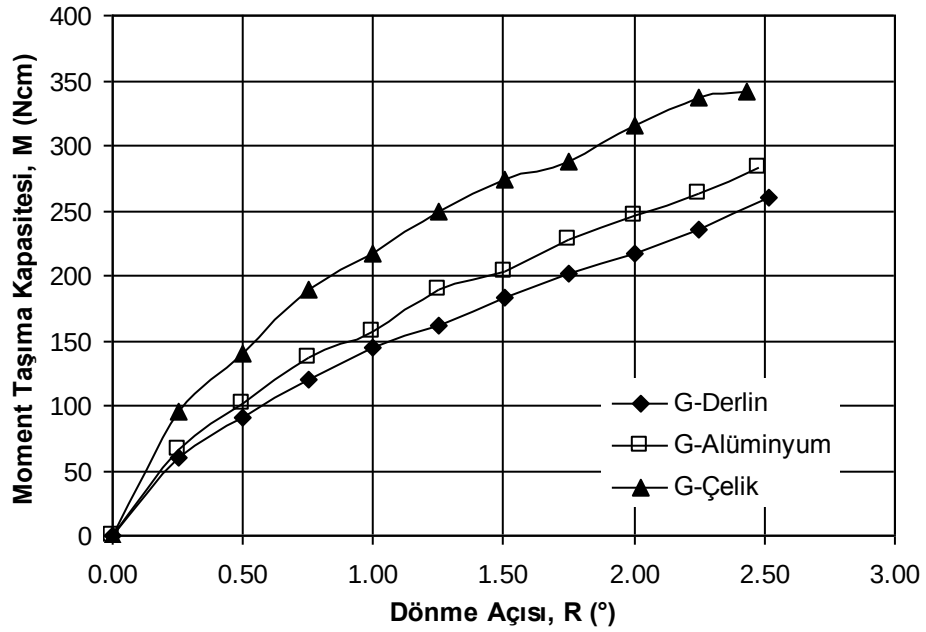
Özellikle, gevşek kum zeminde yapılan deneylerde yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinde göçme noktası belirgin bir şekilde tanımlanamamaktadır. Bu yüzden; kazık başındaki dönme açısının 1° , 2° ve R değerlerinde ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10’una eşit olduğu durumda, yanal yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.13 ve 4.14’de sunulmuştur.



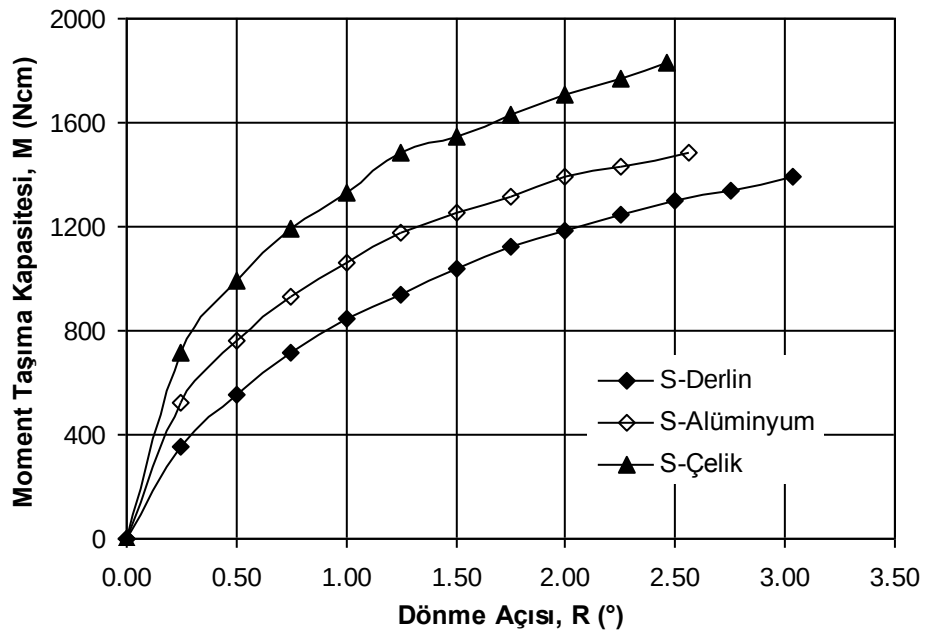
Şekil 4.34. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.35. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkisi



Şekil 4.36. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi



Şekil 4.37. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Dönme Açısı-Moment Taşıma Kapasitesi İlişkisi

Çizelge 4.13 Farklı Kazık Malzemeleri için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.02 \text{ kN/m}^3$ - D=50mm - L=200mm				
Kazık Malzemesi		Derlin	Alüminyum	Çelik
R_D (mm)		148.782	152.150	157.042
R (°)		2.514	2.478	2.429
Yanal Yük (N)	1°	4.822	5.242	7.255
	2°	7.255	8.192	10.532
	R	8.659	9.456	11.375
	$U_{0.10D}$	7.161	7.583	10.299
Moment (Ncm)	1°	144.660	157.260	217.650
	2°	217.650	245.760	315.960
	R	259.770	283.680	341.250
	$U_{0.10D}$	214.830	227.490	337.020

Çizelge 4.14 Farklı Kazık Malzemeleri için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Deney Sonuçları

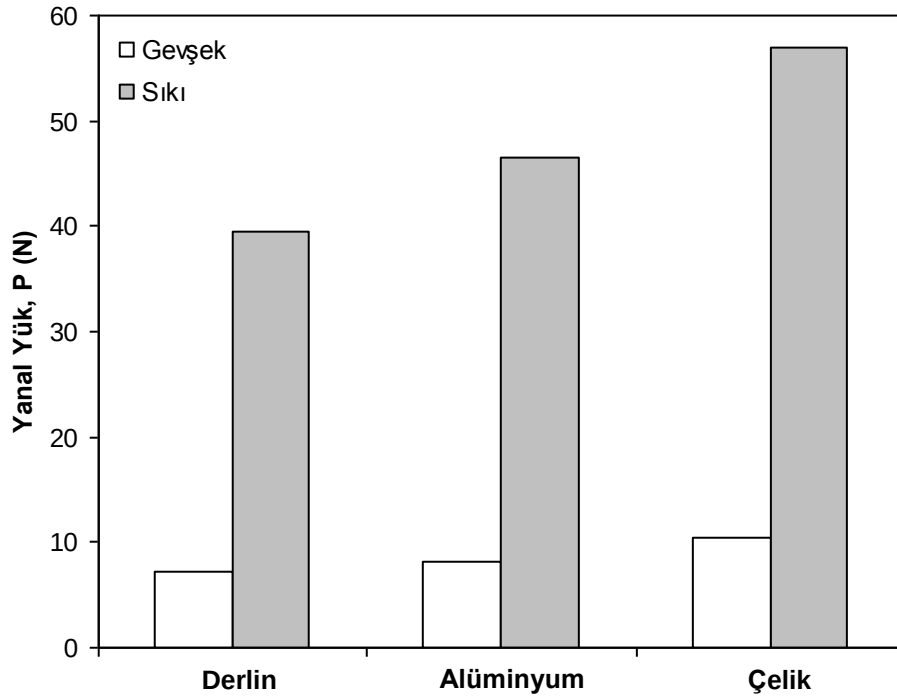
Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - D=50mm - L=200mm				
Kazık Malzemesi		Derlin	Alüminyum	Çelik
R_D (mm)		108.533	144.515	153.349
R (°)		3.035	2.561	2.465
Yanal Yük (N)	1°	28.087	35.435	44.470
	2°	39.415	46.436	56.874
	R	46.437	49.385	60.995
	$U_{0.10D}$	44.329	46.201	59.122
Moment (Ncm)	1°	842.610	1063.050	1334.100
	2°	1182.450	1393.080	1706.220
	R	1393.110	1481.550	1829.850
	$U_{0.10D}$	1329.870	1386.030	1773.660

Çizelge 4.13’de kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda gevşek kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, alüminyum model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin çelik model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %80’i kadar olduğu görülmektedir. Aynı şekilde; derlin malzemedan imal edilen model kazığın yanal yük taşıma kapasitesi de çelik model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %70’i değerindedir. Derlin ve alüminyum model kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında, derlin model kazığın alüminyum kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin %90’ı değerinde bir yanal yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

Sıkı kum zeminde yapılan deneylerde, çelik ve alüminyuma göre çok küçük elastisite modülü değeri olan derlin malzemedan imal edilmiş çekme kolunun yanal yük etkisinde deforme olduğu ve model kazık ile çekme kolundan oluşan sistemin rijit bir bütün olarak davranmadığı görülmüştür. Derlin model kazık, boyutsal anlamda, rijit kısa kazık kriterlerine uymasına rağmen, model sistemin bir bütün olarak rijit davranış sergileyememesi elde edilen sonuçları da etkilemiştir. Deplasman transduserlerinden elde edilen yanal ötelenme değerleri, dönme noktası derinliği ve kazık başındaki dönme açısı değerleri çelik ve alüminyum model kazıklara ait değerler ile karşılaştırıldığında, derlin model kazık kullanılarak yapılan deneylerde çekme kolunun deforme olduğu sonucu doğrulanmaktadır. Çizelge 5.14’de kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında, alüminyum model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin çelik model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %80’i değerinde olduğu görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar; model deney çalışmalarında kazık malzemesi seçiminin kazığın yanal yük etkisindeki davranışını ve yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıkların ağırlıkları arasındaki değişim ile yanal yük taşıma kapasiteleri arasındaki değişim arasında bir uyum gözlenememiştir. Kazığın yanal yük taşıma kapasitesi kazık ağırlığına bağlı olarak değişmekte ancak, ağırlığa bağlı bir oran dahilinde değişmemektedir.

Gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar karşılaştırıldığında relatif sıkılığın yanal yüke maruz kısa kazıkların davranışı üzerinde ne kadar önemli bir etkisinin olduğu görülür. Şekil 4.38’de kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, gevşek ve sıkı kum zeminde farklı kazık malzemeleri için elde edilmiş yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Her bir kazık malzemesi için sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, gevşek kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin beş katı büyüklüğündedir.



Şekil 4.38. Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için 2° ’lik Dönme Açısında Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

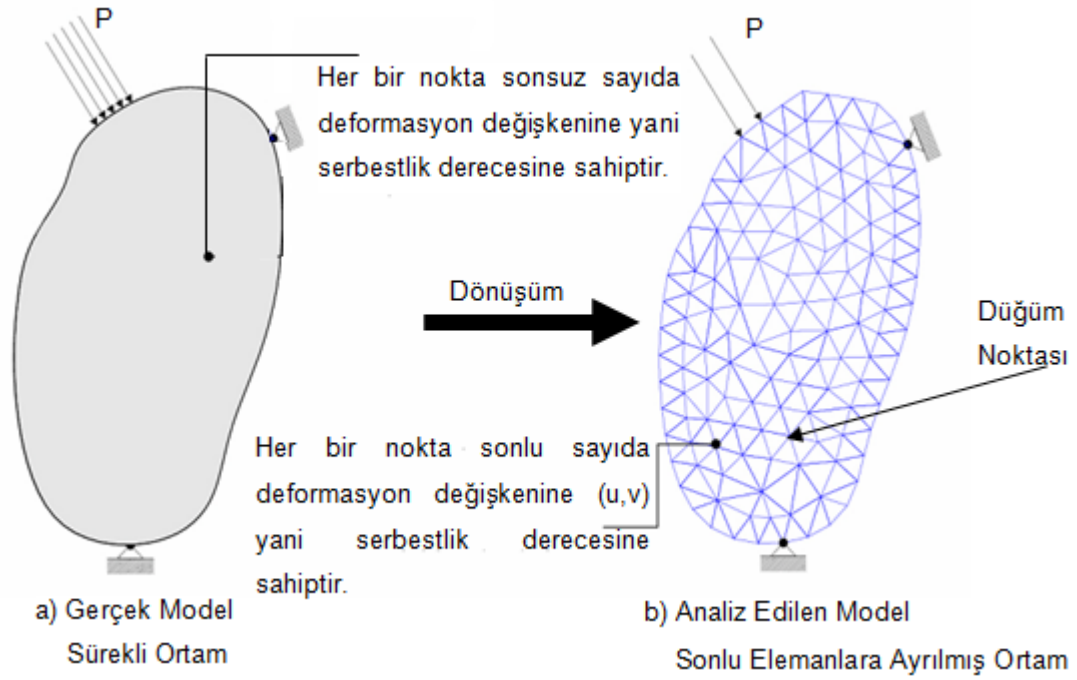
5. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ

Kiriş eğilmesi probleminde olduğu gibi, problem geometrisinin, yükleme koşullarının ve sınır şartlarının rölatif olarak basit kabul edilebileceği yapısal problemler için kapalı çözümler elde edilebilmektedir. Mühendislik problemlerinin çoğunluğu ise diferansiyel ya da integral eşitlikler tarafından kontrol edilmektedir. Bu tip problemlerin çözümü, problemi idare eden diferansiyel denklemlere yaklaşık çözümler üreten sayısal analiz yöntemleri kullanılarak elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi; dış etkilere maruz fiziksel bir sistemin davranışını idare eden diferansiyel denklemlerin yaklaşık sayısal çözümlerini elde etmek için kullanılan bilgisayar destekli bir hesaplama tekniğidir. Sonlu elemanlar yönteminin en önemli özelliği herhangi bir standart formülasyona uymayan problemleri oldukça başarılı bir şekilde çözümleyebilmesidir.

Sonlu elemanlar yönteminin ana fikri; Şekil 5.1’de görüldüğü gibi analiz edilecek problem geometrisini basit geometrik şekle sahip çok sayıdaki küçük elemanlara ayırmaktır. Sonlu eleman adı verilen bu küçük bölgelerin birleşimi sonlu elemanlar ağı (mesh) olarak adlandırılır. Sonlu elemanlar ağını oluşturan elemanlar birbirlerine elemanların kenarlarında yer alan düğüm noktaları (node) aracılığı ile bağlıdır. Analiz edilecek sürekli ortamın sonlu elemanlara ayrılması ile sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip sürekli fiziksel model ortamı sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip ayrıklaştırılmış model ile temsil edilmektedir.

Bu yöntem; inşaat mühendisliği uygulamalarındaki tüm yapıların ve temel sistemlerinin tasarım ve analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin geoteknik mühendisliğindeki ilk uygulamalarından biri Zienkiewicz ve Cheung (1964) tarafından gerçekleştirilmiştir. Zienkiewicz ve Cheung (1964), karmaşık bir temel sistemi üzerinde inşa edilen payandalı bir barajı çözmek için lineer üçgen elemanlar kullanmışlardır. Bu uygulamanın ardından sonlu elemanlar yöntemi kazık temellerin, barajların, kazıların, şevlerin ve diğer geoteknik problemlerin analizleri için de uygulanmıştır (Laman, 1995).



Şekil 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

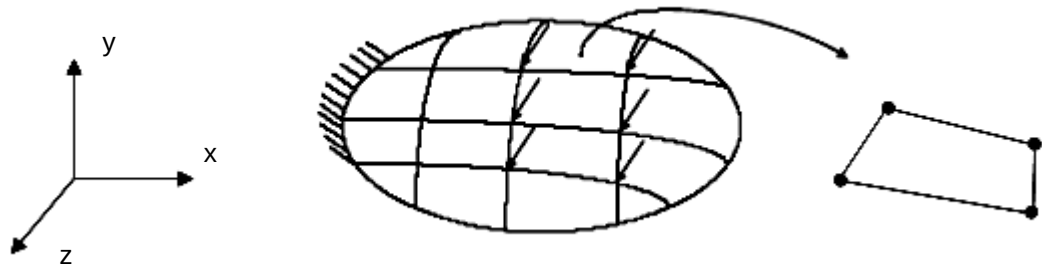
Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık özellikleri (kazığın eğilme rijitliği, kazık geometrisi), zeminin gerilme-deformasyon davranışı (kayma mukavemeti, zeminin rijitliği, zeminin hacim değiştirme karakteri) ve kazık-zemin ara yüzeyi yanal yüke maruz bir kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Geçmişte, yanal yüklü kazıkların tasarımı tam ölçekli arazi deneylerinden veya laboratuvar model deneylerinden deneysel olarak elde edilmiş analitik yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Bu analitik yöntemler, önemli derecede basitleştirmeler ve kabuller içermektedir. Buna karşılık; sonlu elemanlar yöntemi, zeminin sürekliliğini, non-lineer zemin davranışını, kazık-zemin ara yüzey davranışını ve üç boyutlu sınır koşullarını modelleyebilen çok yönlü ve objektif bir yöntemdir. Diğer mevcut yöntemlere göre daha kesin bir analitik yaklaşıma sahiptir. Bu yüzden yanal yüke maruz kazık problemlerinin analizi için üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilebilecektir.

Bir önceki bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılmış olan deneysel çalışmalar sonlu elemanlar yöntemine göre analiz yapabilen Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak modellenmiştir. Bu bölümde; sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analiz yapılırken izlenecek yol genel hatları ile özetlenmekte bununla birlikte; malzeme davranışları ve kazık-zemin ara yüzey davranışının nasıl modelleneceği, malzeme modellerinin kullanılabilmesi için gerekli olan model parametrelerinin neler olduğu açıklanmaktadır. Son olarak, deneysel çalışmalardaki deney düzeneği, yükleme koşulları ve malzeme özelliklerinin nasıl modellenip analiz edileceği konusunda Plaxis 3D Foundation programında uygulanacak adımlar genel hatları ile özetlenmektedir.

5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanıtımı

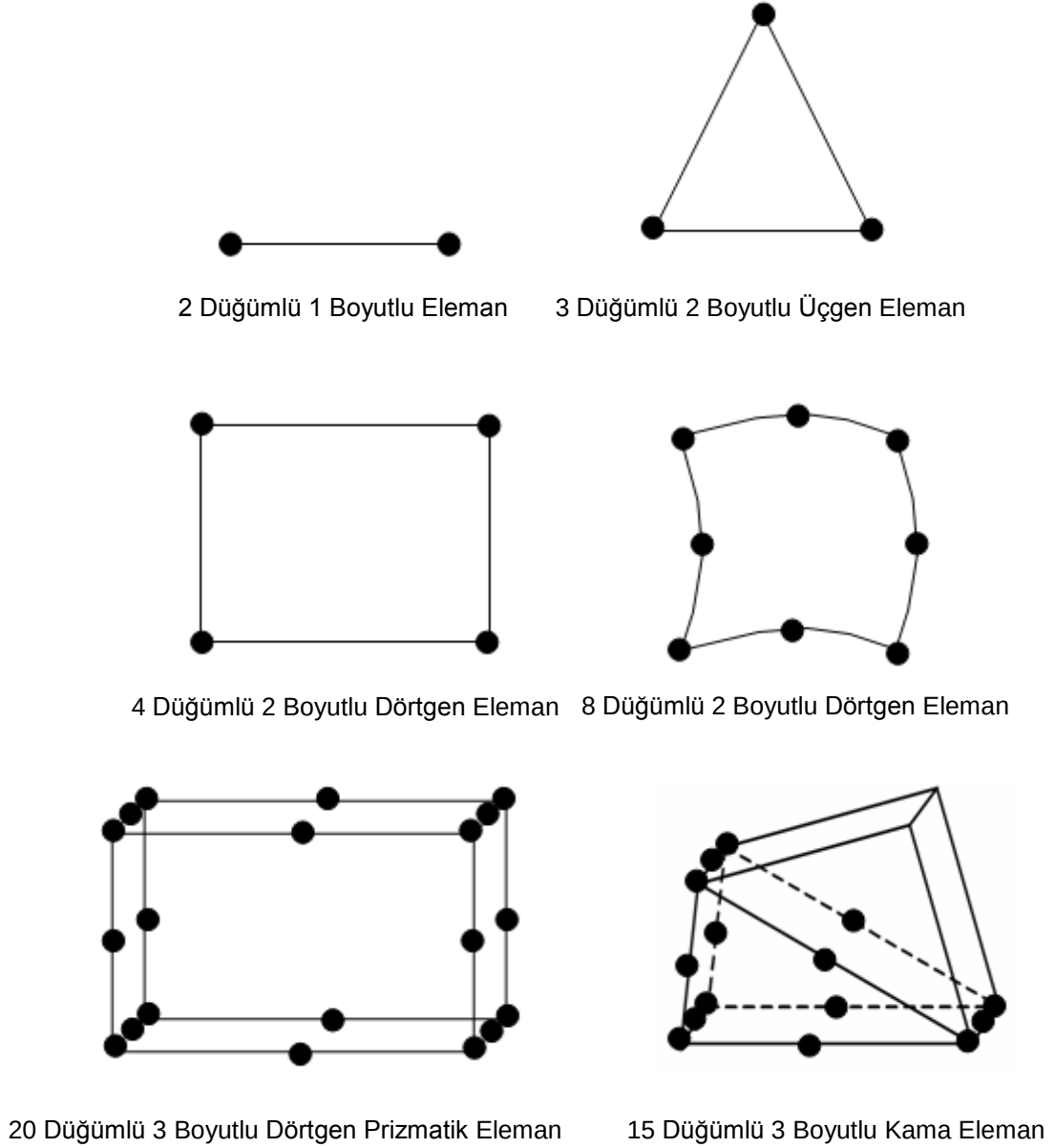
Fiziksel bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için izlenen hesaplama prosedürü adımlar halinde ana hatları ile özetlenmiştir.

İncelenen problem geometrisi, basit geometrik şekillere sahip elemanlar kullanılarak küçük bölgelere ayrılır. Sonlu eleman adı verilen bu küçük bölgelerin her biri birbirlerine düğüm noktaları aracılığı ile bağlıdır. Düz yüzeyli elemanlar için düğüm noktaları, genellikle, elemanın köşelerine yerleştirilmektedir. Eğrisel yüzeye sahip elemanlarda ise her kenarın orta noktasına da düğüm noktaları eklenmektedir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken geometrisi bozulmuş ya da uzun, ince elemanların kullanılmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 5.2. Problem Geometrisinin Sonlu Elemanlara Ayrılması

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi sonlu eleman bir, iki veya üç boyutlu olabilir.



Şekil 5.3. Sonlu Eleman Örnekleri

Şekil 5.4’de görüldüğü gibi her bir düğüm noktası birbirinden bağımsız altı farklı yönde hareket edebilmektedir. Bu hareketlerden üçü ötelenme üçü de dönme hareketidir. Düğüm noktalarının hareket edebildiği doğrultu sayısı düğüm noktası

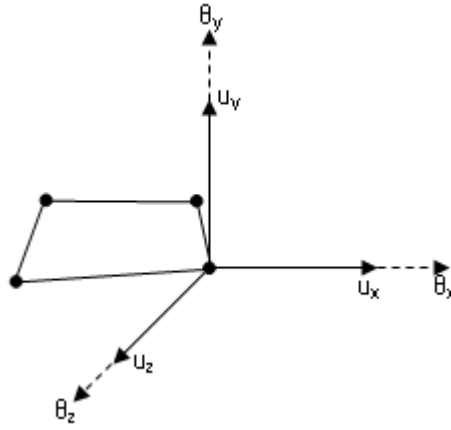
serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Bir düğüm noktasının hareket edebildiği doğrultuların birleşimi düğüm noktası deplasman vektörünü oluşturur.

$$\{u\} = \{u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte yer alan;

u ; ötelenme hareketini,

θ ; dönme hareketini temsil etmektedir.



Şekil 5.4. Düğüm Noktası Serbestlik Dereceleri

Bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi; deplasman yöntemi, kuvvet yöntemi ya da karma yöntemlerden birisi kullanılarak gerçekleştirilir. Geoteknik mühendisliğindeki problemlerin çoğunluğu deplasman yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. Deplasman yönteminde; bilinmeyen, deplasman olup gerilme ve birim şekil değiştirmeler ikincil büyüklükler olarak deplasmanların tanımlanmasına bağlı olarak elde edilirler. Bilinmeyen büyüklük olan deplasmanların bir sonlu elemandaki değişimi interpolasyon fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır. İnterpolasyon fonksiyonları olarak genellikle polinomlar seçilmektedir. Bir sonlu eleman ve bu sonlu elemanı çevreleyen düğüm noktaları arasındaki ilişki (5.2) eşitliği kullanılarak tanımlanmaktadır.

$$[k]_e \{u\}_e = \{f\}_e \quad (5.2)$$

(5.2) eşitliğindeki eleman deplasman vektörü $\{u\}_e$ bilinmeyen olup, uygulanan kuvvetler etkisinde düğüm noktalarının nasıl hareket edeceğini tanımlamaktadır. Eleman rijitlik matrisi $[k]_e$, eleman özellikleri, malzeme özellikleri ve eleman geometrisi kullanılarak elde edilir. Eleman yük vektörü $\{f\}_e$ ise eleman üzerinde etkili olan yükleri tanımlamaktadır.

Her bir elemana ait eleman rijitlik matrislerinin ve eleman yük vektörlerinin bir araya getirilip toplanması sonucu sisteme ait global rijitlik matrisi ve global yük vektörü elde edilmiş olur. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi bu işlemin sonucunda fiziksel problemin davranışını idare eden diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenir.

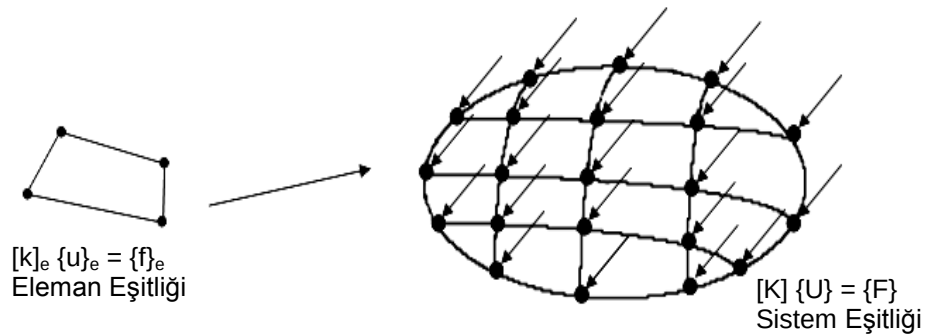
$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte yer alan;

$[K]$; sistem rijitlik matrisi,

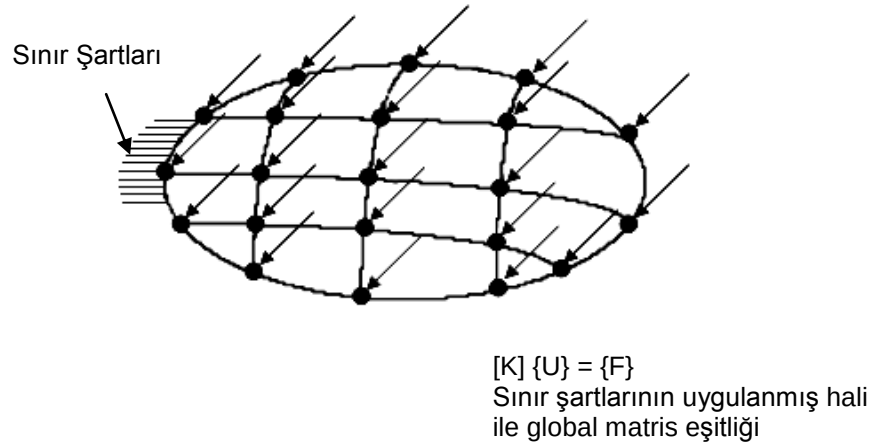
$\{F\}$; sistem yük vektörü,

$\{U\}$; deplasman vektörüdür.



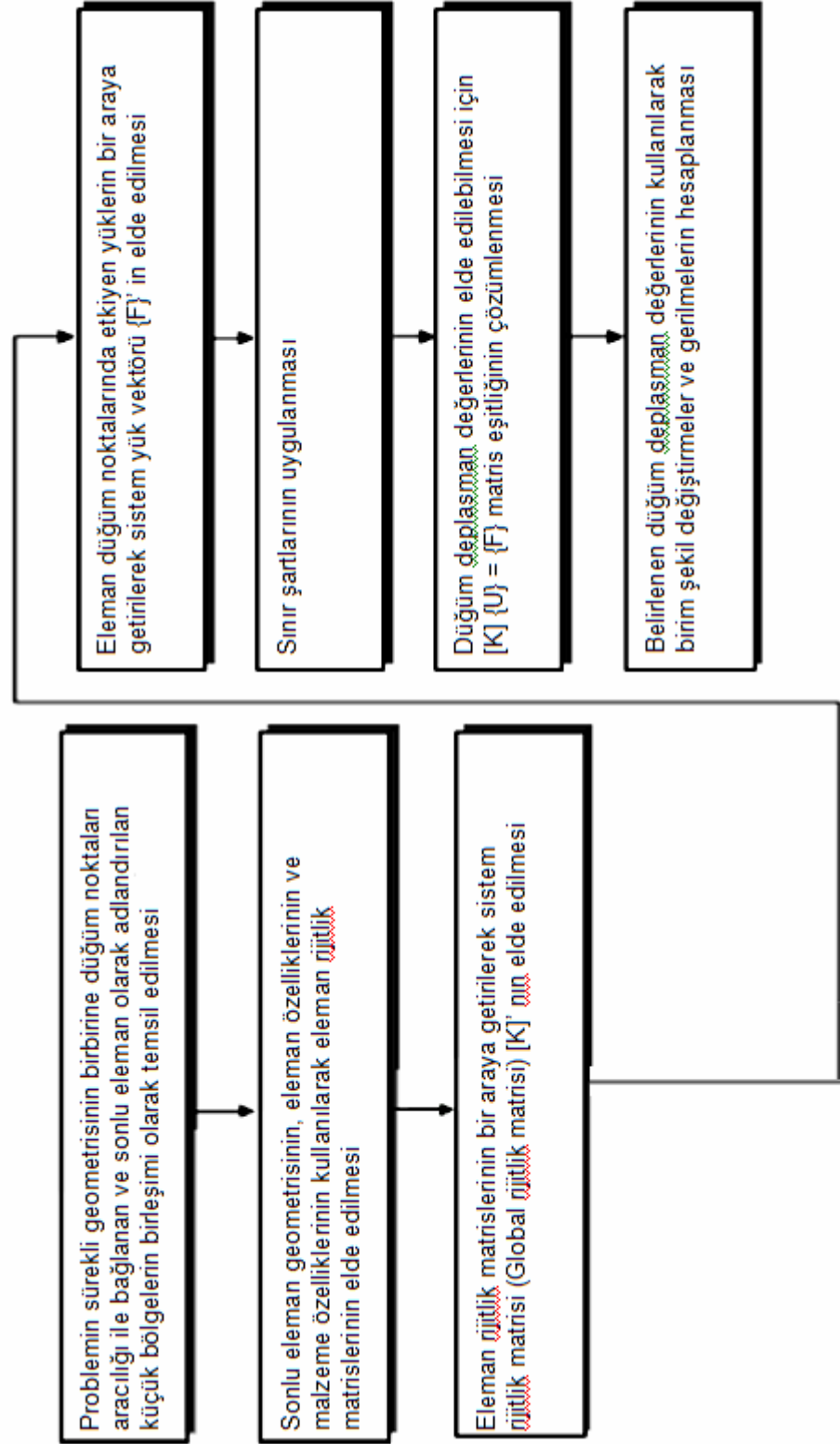
Şekil 5.5. Global Matris Eşitliklerinin Elde Edilmesi

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi model hareketinin engellendiği doğrultuları ifade eden sınır şartları problem geometrisine uygulanır. Bu işlem matematiksel olarak, global matris eşitliğinde düğüm noktasının hareketinin engellendiği doğrultulara karşılık gelen satır ve sütunların global matris eşitliklerinden çıkarılması yolu ile yapılmaktadır. Analiz aşamasında ise; global matris eşitlikleri çözümlenerek her bir düğüm noktasındaki deplasmanlar elde edilir. Elde edilen düğüm noktası deplasmanları kullanılarak her bir sonlu elemandaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanır. Analizler sonucunda elde edilmiş olan büyük miktardaki veri değerlendirilerek tasarım amaçları için anlaşılır bir kullanıma dönüştürülür. Anlatılan prosedüre ilişkin basit bir akış şeması Şekil 5.7’de gösterilmiştir (<http://opencourseware.kfupm.edu.sa>; www.uni.edu/~rao; www.aau.dk/bm/ansys/; Laman (1995); Potts ve Zdravkovic (1999)).



Şekil 5.6. Sınır Şartlarının Probleme Uygulanması

Şekil 5.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi Akış Şeması

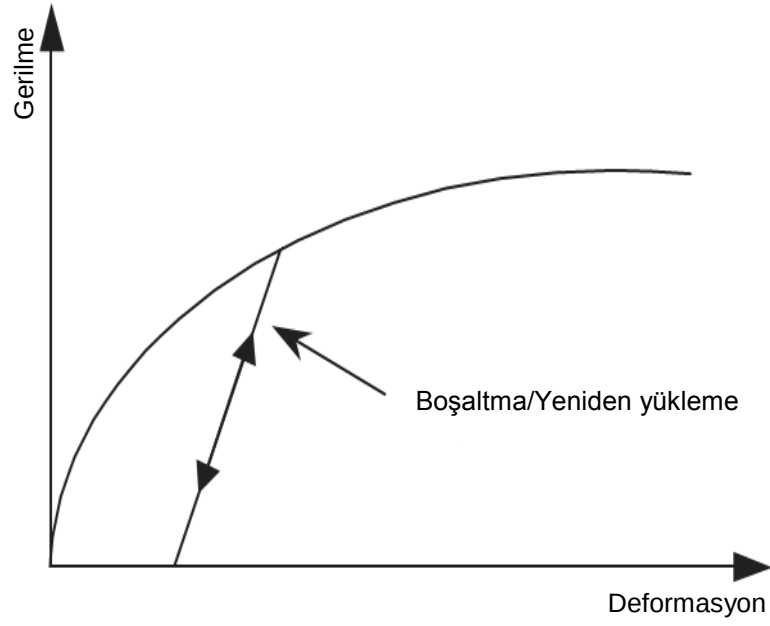


5.2. Zemin Davranışının Modellenmesi

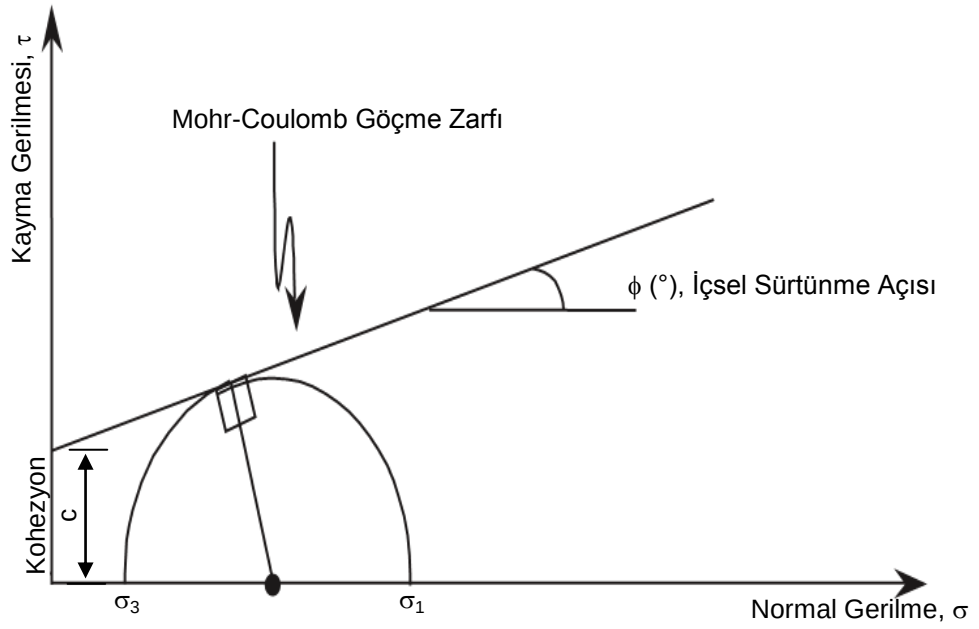
Malzeme modelleri, yük etkisi altındaki bir malzemede meydana gelecek gerilmeler ve deformasyonlar arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bir malzeme modelinin güvenilir olabilmesi için aşağıda sıralanmış olan şartları sağlaması gereklidir.

- Tüm gerilme ve deformasyon örnekleri için malzeme davranışını açıklayabilmelidir.
- Model parametreleri standart malzeme deneyleri ile tanımlanabilmelidir.
- Uygulanan gerilme ya da deformasyonlarda bir değişiklik olması durumunda malzemenin buna nasıl bir fiziksel tepki vereceği temsil edilmelidir.

Gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki elastik bölgede doğrusal olup elastisite modülü ve poisson oranı kullanılarak temsil edilmektedir. Bununla birlikte; çok az sayıdaki malzemenin davranışı elastik davranış ile tanımlanabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin çoğunluğu elasto-plastik davranış özelliğine sahiptir. Plastik bölge, yenilme noktasına ulaşılması ile başlamakta ve devamında pekleşme davranışı (work hardening) görülmektedir. Elasto-plastik davranışta yenilme noktasının belirlenmesi ve plastik bölgenin tanımlanması konusunda zorluklar yaşanmaktadır. Çünkü; malzemelerin yenilme noktaları birbirinden farklı olup yenilme noktasının yeri malzemedan malzemeye değişmektedir. Araştırmacılar; yapmış oldukları standart deneyler sonucunda, kum zeminin yükleme altında elasto-plastik bir davranış sergilediğini ortaya koymuşlardır. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi kum zemin yüklendiğinde meydana gelen deplasmanların bir kısmı geri dönebilir deplasmanlar iken bir kısmı da kalıcı deplasmanlardır. Bu yüzden; plastik deformasyonlara neden olan gerilme durumunun tanımlanabilmesi için elastik modellerin bir göçme kriteri içermesi gerekmektedir. Muhtemel göçme zarflarından birisi de Şekil 5.9’da görülen Mohr-Coulomb (MC) göçme yüzeyidir.



Şekil 5.8. Elasto-Plastik Malzeme için Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Johnson ve ark., 2006)



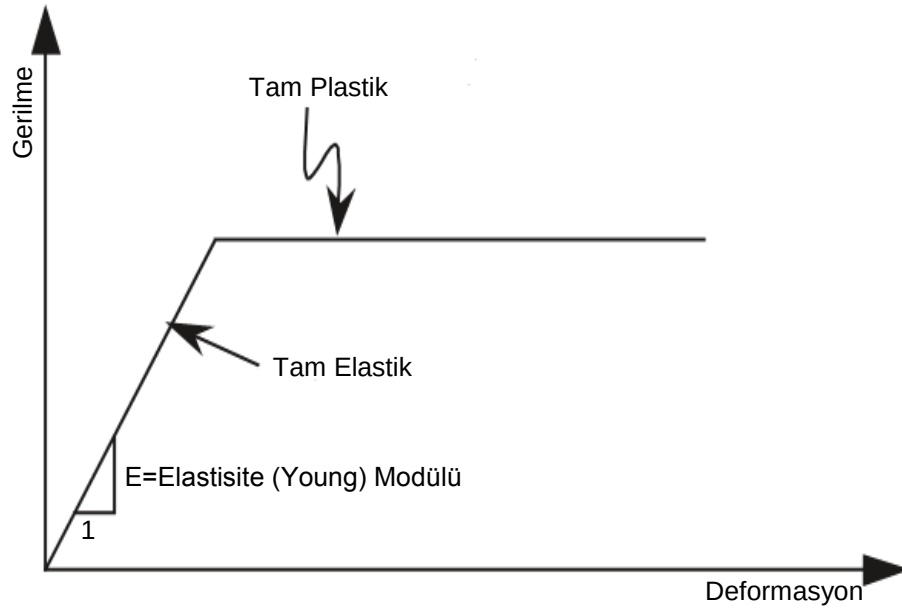
Şekil 5.9. Mohr-Coulomb Göçme Yüzeyi (Johnson ve ark., 2006)

Mohr-Coulomb göçme zarfı, sadece, büyük ve küçük asal gerilmelere (σ_1 ve σ_3) bağlı olup ara asal gerilme σ_2 ' den bağımsızdır. Mohr-Coulomb göçme zarfı üç boyutlu gerilme uzayına taşındığında Mohr-Coulomb kriteri altıgen bir piramite dönüşür. Bu altıgen piramit, zeminin yük etkisindeki davranışını idare eden göçme/yenilme zarfını şekillendirmektedir. Eğer gerilme noktaları göçme zarfı içerisinde kalıyorsa malzeme elastik davranış gösterecektir. Bununla birlikte; eğer gerilme dairesi yenilme yüzeyine (göçme zarfına) ulaşırsa malzemede plastik deformasyonlar oluşacaktır.

Sonlu elemanlar yönteminde, modellenen sistemde kullanılan malzemelerin yük etkisi altındaki davranışlarının hangi kriterler ve ilişkiler göz önüne alınarak düzenleneceği malzeme davranışını idare eden yapısal kanunlar diğer bir ifade ile malzeme modelleri kullanılarak tanımlanır. Yanal yüklü kazık probleminin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak araştırıldığı 1990 yılından önceki çalışmalarda zemin ya lineer elastik ya da non-lineer elastik olarak modellenmiştir. Ancak, plastisite teorisinde zemini temsil eden en uygun malzeme modelinin idealize edilmiş elastik-tam plastik malzeme modeli olduğu kabul edilmektedir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi elastik-tam plastik analizlerde zemin göçme noktasına ulaşıncaya kadar lineer elastik bir davranış sergilemektedir. Gerçek zemin davranışında yüklemenin başlamasının hemen ardından non-lineer bir gerilme-deformasyon ilişkisi söz konusudur. Bu durum; küçük deformasyon değerlerinde gerçek zemin davranışı ile analizlerdeki zemin davranışı arasındaki farklı gerilme-deformasyon karakterinden dolayı farklı davranış şekillerinin ortaya çıkmasına neden olabilir (Brown ve Shie, 1990; Trochanis ve ark., 1991; Wakai ve ark., 1999; Chae ve ark., 2004; Johnson ve ark., 2006).

Plaxis 3D Foundation programı bünyesinde yer alan bütün model parametreleri, esas olarak, efektif zemin tepkisini yani dane yapısına bağlı gerilme-deformasyon ilişkisini temsil etmektedir. Zeminin en önemli özelliklerinden birisi de boşluklarında su bulunmasıdır. Boşluk suyu basınçları zemin reaksiyonlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Plaxis 3D Foundation programı, zemin reaksiyonları elde edilirken boşluklarda bulunan su ile danelerin etkileşimini bir arada değerlendirebilmek için her bir zemin modelinde mevcut olan ve drenajlı, drenajsız

ve non-porous davranış olarak adlandırılan üç tip davranış biçimi önermektedir. Zeminin kuru olduğu, kum zeminlerde olduğu gibi yüksek permeabilite katsayısından dolayı tam bir drenajın gözlenebildiği veya yüklemenin çok düşük hızlarda yapıldığı ve aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmadığı durumlar için drenajlı davranış biçimi kullanılmaktadır.



Şekil 5.10. İdealize Edilmiş Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Johnson ve ark., 2006)

5.2.1. Mohr-Coulomb (MC) Malzeme Modeli

Zeminler, uygulanan yük etkisi altında non-lineer bir gerilme-deformasyon davranışı sergilemektedir. Bu non-lineer gerilme-deformasyon davranışı kullanılan malzeme modeline bağlı olarak çok yönlü bir şekilde modellenebilir. Kullanılan malzeme modeli için gerekli olan model parametre sayısının artması davranışın modellenmesindeki çok yönlülüğü de etkileyecektir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde zeminlerin davranışı, az sayıda model parametresine ihtiyaç duyulması, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi basit fiziksel özellikler kullanılarak göçme kriteri tanımlama olanağının bulunması, geoteknik mühendislerinin gerekli model parametrelerine aşina olmaları ve zemin numuneleri

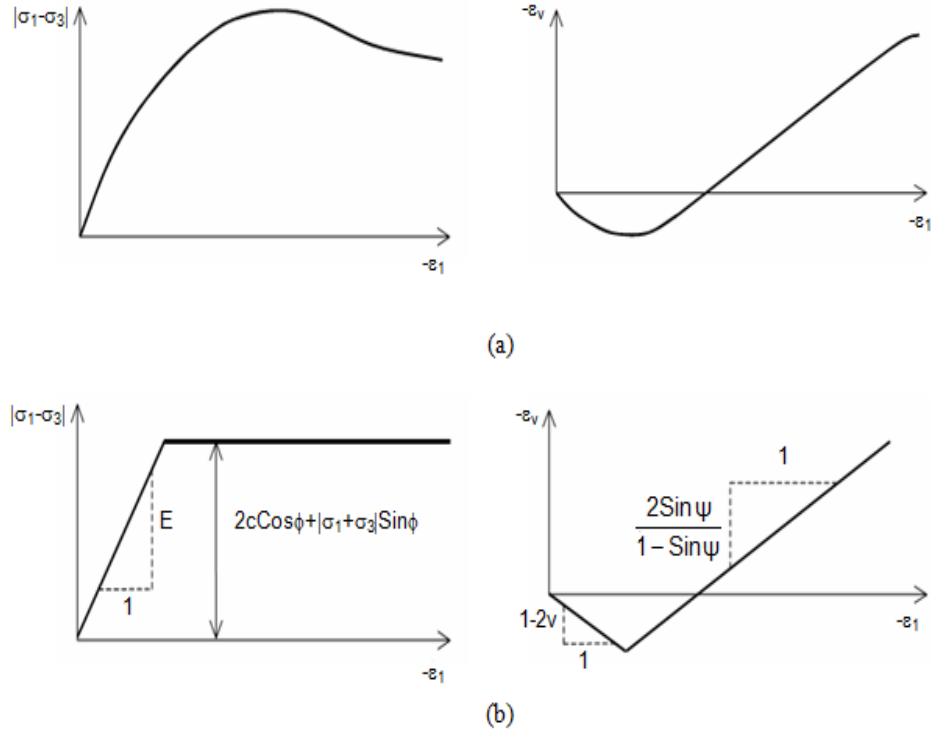
üzerinde gerçekleştirilecek temel zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile bu parametrelerin kolaylıkla elde edilebiliyor olması ve malzeme modelleri ile ilgili olarak literatürde yapılmış olan çalışmalar sonucunda Mohr-Coulomb gibi izotropik modellerin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlara götürdüğüne ortaya konmuş olması nedeni ile yaygın olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmektedir (Yang ve Jeremic, 2005; Johnson ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2007).

Zeminin gerilme-deformasyon davranışını lineer elastik-tam plastik olarak modelleyen bu malzeme modeli, elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere beş temel giriş parametresine sahiptir.

5.2.2. Model Parametrelerinin Gerçek Zemin Davranışı ile İlişkilendirilmesi

Model parametrelerinin gerçek zemin davranışı ile ilişkileri standart bir drenajlı üç eksenli basınç deneyinden elde edilen tipik gerilme-deformasyon eğrisi göz önüne alınarak açıklanmaktadır.

Standart drenajlı üç eksenli deneyde zemin numunesi izotropik olarak σ_3 değerindeki bir hücre basıncına kadar sıkıştırılmakta daha sonra çevre basıncının değeri sabit tutularak eksenel basınç σ_1 uygulanmaktadır. Yüklemenin bu ikinci aşamasında zemin numunesi Şekil 5.11 (a)'da görülen eğrilere uyan bir davranış sergilemektedir. Zemin numunesinin hacmindeki artış sıkı kum zemin ve aşırı konsolide kil zeminlere has tipik bir davranıştır. Şekil 5.11 (b)'de deney sonuçlarının Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak idealize edilmiş şekilleri görülmektedir. Dilatasyon açısı (ψ), numune hacminde geri dönüşü olmayan hacimsel deformasyon artışlarını modellemek için kullanılmaktadır.



Şekil 5.11. (Plaxis 3D Foundation V2-Manual)

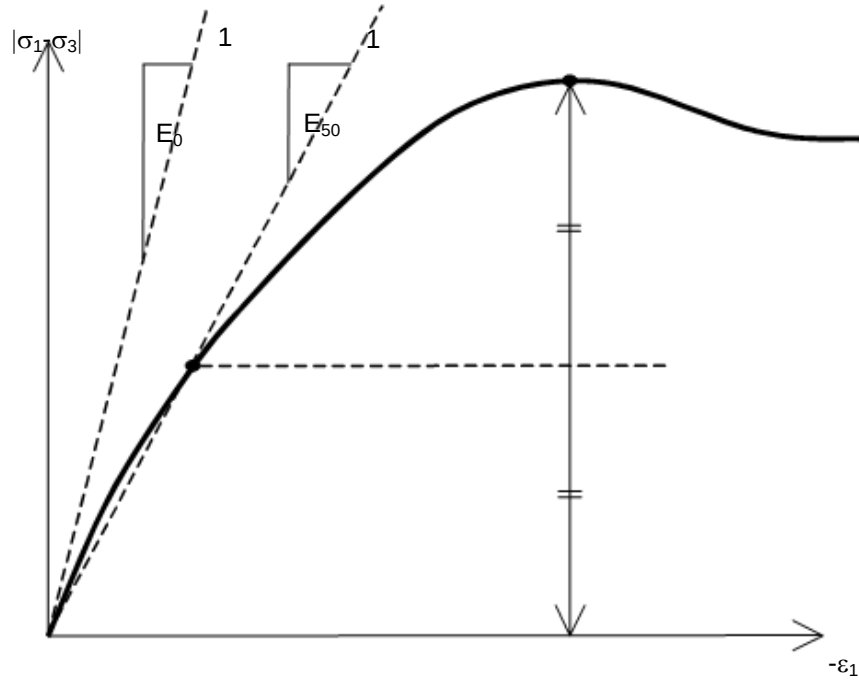
- (a) Standart Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar
- (b) Elastik-Plastik Malzeme Modeli Kullanılarak İdealize Edilmiş Davranışlar

5.2.3. Mohr-Coulomb (MC) Malzeme Modeli Parametreleri

5.2.3.1. Elastisite Modülü (E)

Mohr-Coulomb malzeme modelinde iki farklı elastisite modülü yaklaşımı bulunmaktadır. Bunlardan ilki; üç eksenli deney sonucu elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç eğiminden hesaplanan ve E_0 ile gösterilen başlangıç elastisite modülü diğeri ise deviatorik gerilme $|\sigma_1 - \sigma_3|$ ' ün maksimum değerinin %50 si gerilme değerine karşılık elde edilen ve E_{50} ile gösterilen sekant elastisite modülüdür. Çok aşırı konsolide kil zeminler ve bazı kayalar elastik davranış aralığı büyük olduğundan dolayı E_0 ' ın kullanılması daha gerçekçi olacaktır. Buna

karşılık; kum zeminler ve normal konsolide kil zeminlerde yüklemenin başlamasının hemen ardından non-linear bir gerilme-deformasyon ilişkisi gözlenmektedir. Bu nedenle; bu tip zeminler için elastisite modülü değeri olarak E_{50} ' nin kullanılması daha doğru olacaktır.



Şekil 5.12. E_0 ve E_{50} Elastisite Modüllerinin Tanımlanması (Plaxis 3D V2-Manual)

Kohezyonsuz zeminlerde, hem başlangıç elastisite modülünün değeri hem de sekant elastisite modülünün değeri artan çevre basıncı ile birlikte artma eğilimindedir. Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanıldığında elastisite modülünün değeri derinlik boyunca sabit kabul edilmektedir. Plaxis 3D Foundation programında elastisite modülünün derinlik ile birlikte artımı $E_{\text{increment}}$ opsiyonu kullanılarak hesaba katılmaktadır. $E_{\text{increment}}$ opsiyonu, birim derinlik başına elastisite modülündeki artış miktarını ifade etmektedir. Referans derinliği tanımlayan y_{ref} seviyesinde ve bu seviyenin üzerinde zeminin elastisite modülü, referans elastisite modülü değeri E_{referans} 'a eşit iken, y_{ref} derinliğinin altındaki gerilme noktalarında zeminin elastisite modülünün değeri E_{referans} ve $E_{\text{increment}}$ değerleri kullanılarak hesaplanır. Hesaplamalar

sırasında derinlik ile beraber doğrusal olarak artan elastisite modülü değeri zemin ortamındaki gerilme durumunun bir fonksiyonu olarak değişiklik göstermemektedir.

5.2.3.2. Poisson Oranı (ν)

Başlangıç gerilme durumunun Gravity Loading seçeneği ile oluşturulduğu problemlerde (şevli dolgu örneği gibi) poisson oranının değeri basit bir yaklaşımla elde edilmektedir. Bu tip bir yükleme durumunda Plaxis 3D Foundation programı sükunetteki toprak basıncı katsayısı K_0 ' ın değerini $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ eşitliğine dayanarak gerçekçi bir şekilde tahmin edebilmektedir. Mohr-Coulomb malzeme modeli, tek boyutlu sıkışma (ödometre) problemleri için $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ eşitliğini kullanmaktadır. Dolayısı ile K_0 katsayısının değerinden hareketle K_0 katsayısı ile eşleşen poisson oranı değeri tanımlanmaktadır. Başlangıç gerilme durumunun K_0 Procedure seçeneğine göre oluşturulması durumunda ise poisson oranının değeri tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Birçok durumda poisson oranı 0.3 ile 0.4 aralığında değerler alırken kum zeminler için poisson oranı, genellikle, 0.2 ile 0.4 aralığında bir değer almaktadır (Laman ve ark., 1999, Plaxis 3D Foundation V2-Reference Manual).

5.2.3.3. Kohezyon (c)

Plaxis 3D Foundation programında, kohezyonsuz kum zemin ($c' = 0$) ile analiz yapılırken efektif kohezyon değerinin sıfır alınması analiz aşamasında karmaşıklıklara neden olabilmektedir. Bu sorun ile zemin tabakasının zemin yüzeyine kadar uzanıyor olması durumunda daha fazla karşılaşılmaktadır. Bu tür bir sorunla karşılaşmamak için kohezyon değerinin $c' > 0.2$ kPa şeklinde küçük bir değer olarak girilmesi tavsiye edilmektedir. Efektif kohezyon katsayısı için pozitif bir değer kullanılması kum zeminin az olsa bir çekme mukavemetine sahip olması anlamına gelse de zeminler için gerçekçi olmayan bu durum tension cut-off opsiyonunun sıfır alınması yolu ile elimine edilebilmektedir. Böylelikle, kum zeminin çekme mukavemeti sıfır olarak tanımlanmış olur.

5.2.3.4. İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)

İçsel sürtünme açısı, genellikle, Mohr gerilme daireleri ile birlikte zeminin kayma mukavemetinin tanımlanmasında kullanılmaktadır.

5.2.3.5. Dilatasyon Açısı (ψ)

Kum zeminlerdeki dilatasyon davranışı hem zeminin sıkılığına hem de içsel sürtünme açısına bağlıdır. Zeminlerin dilatasyon açısı, içsel sürtünme açılarına göre çok daha küçük değerdedir. Plaxis 3D Foundation programında dilatasyon açısının değeri $\psi=\phi-30^\circ$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. İçsel sürtünme açısının 30° 'den küçük olduğu durumlarda dilatasyon açısının değeri sıfır olarak alınır. Dilatasyon açısının pozitif bir değere sahip olması, drenajlı davranış durumunda, zeminde kayma deformasyonları olduğu sürece hacimsel değişiminde devam edeceği anlamına gelmektedir. Ancak; bu yaklaşım gerçekçi değildir. Çünkü; zeminlerin kritik duruma ulaşması ile birlikte sabit gerilme altında oluşan sürekli deformasyonlar hacimsel değişim olmaksızın meydana gelmektedir.

5.3. Kazık Davranışının Modellenmesi ve Lineer Elastik (LE) Malzeme Modeli

Zemin davranışının modellenebilmesi için son derece yetersiz olan Lineer Elastik (LE) malzeme modeli sadece zemin içerisinde yer alan dolu kesitli rijit yapıların davranışlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Model Hooke yasası olarak da bilinen lineer, izotrop, elastik gerilme-deformasyon davranışı gerilme-deformasyon ilişkisini en basit hali ile sunmaktadır. LE model elastisite modülü ve poisson oranı olmak üzere sadece iki tane model parametresine sahiptir. Kazık eleman gibi dolu kesitli rijit yapısal elemanların davranış biçimleri non-porous davranış ile modellenmektedir. Non-porous davranış biçimi, çoğunlukla, LE malzeme modeli ile birlikte kullanılmaktadır.

5.4. Ara Yüzey Davranışı

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup, kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık-zemin ara yüzeyi yanal yüke maruz bir kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Kazık-zemin ara yüzeyindeki etkileşimin derecesi, kazık ve zemin arasında rölatif kayma davranışının gözlenmediği tam temas durumu ile kazık ve zemin arasında sürtünmenin olmadığı durum arasında farklı derecelerde olabilir. Ara yüzey elemanlarında üç farklı tipte deformasyon davranışı gözlenebilmektedir. Bunlar;

- Kazık-zemin ara yüzeyinde kayma davranışının olmadığı, kazık ve zeminin birbirlerine yapışmış gibi hareket ettiği durum,
- Ara yüzeyde kayma davranışının gözlemlendiği, kazık ve zeminin birbirlerine göre rölatif olarak farklı miktarda deplasman yaptıkları durum,
- Kazık ve zeminin birbirlerinden ayrıldıkları ve aralarında boşluğun olduğu durumdur.

Ara yüzey elemanı, rölatif kayma davranışı ya da ayrılma davranışı meydana gelmeden önce bitişik konumda bulunduğu zemin ile aynı malzeme özelliklerine sahiptir. Ara yüzey elemanları üzerinde onları sıkıştırmaya çalışan bir normal basınç etkisi olduğunda ara yüzey elemanları yüzeyleri boyunca sadece kayma kuvvetlerini iletirler. Aksi takdirde; kazık ile kazık-zemin ara yüzeyi arasında boşluk oluşur. Ayrılma ya da kopma şeklindeki deformasyon kum zemin içerisindeki yanal yüke maruz kazık problemi için kazık-zemin ara yüzey elemanına uygulanmaz.

Ara yüzey elemanının davranışı büyük ölçüde kazığın zemine yerleştirilme yöntemine, kazığın imal edildiği malzemeye ve zeminin sıklığına bağlıdır. Kum zemin içerisinde yer alan küçük ölçekli çelik model kazıklar modellenirken ara yüzey davranışının tanımlanmasının modellemenin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir (Muqtadir ve Desai, 1986; Trochanis ve ark., 1991; Fan ve Long, 2005; Yang ve Jeremic, 2005; Johnson ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2007).

Plaxis 3D Foundation programında; zemin-yapı etkileşimi modellenirken ara yüzey elemanlarının davranışı elastik-plastik bir model kullanılarak tanımlanmaktadır. Ara yüzey elemanında elastik ve plastik davranışlar arasındaki ayırım Coulomb kriterine göre yapılmaktadır. Ara yüzeyde küçük deplasmanların meydana geldiği elastik davranış aralığında ara yüzey elemanının kayma mukavemeti (5.4) eşitliği ile tanımlanırken büyük kayma deformasyonlarının gözlemlendiği plastik davranış aralığında ara yüzey elemanının kayma mukavemeti (5.5) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$|\tau| < \sigma_n \tan\phi_i + c_i \quad (5.4)$$

$$|\tau| = \sigma_n \tan\phi_i + c_i \quad (5.5)$$

Her iki eşitlikte de yer alan ϕ_i ve c_i parametreleri sırası ile ara yüzey elemanının içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeridir. Plaxis 3D Foundation programında kazık ve zemin arasındaki etkileşimin derecesi mukavemet azaltma faktörü R_{inter} kullanılarak modellenmektedir. R_{inter} katsayısı, aşağıda sıralanmış olan kurallara uygun olarak, ara yüzey mukavemetini zeminin mukavemeti ile ilişkilendirmektedir.

$$c_i = R_{inter} c_{zemin} \quad (5.6)$$

$$\tan\phi_i = R_{inter} \tan\phi_{zemin} \quad (5.7)$$

$$R_{inter} < 1 \text{ ise } \psi_i = 0 \text{ ve } R_{inter} = 1 \text{ ise } \psi_i = \psi_{zemin} \quad (5.8)$$

Gerçek zemin-yapı etkileşiminde, genellikle, ara yüzeyin mukavemeti ve rijitliği temas halinde bulunduğu zemin tabakasının mukavemeti ve rijitliğinden daha küçüktür. Diğer bir ifade ile R_{inter} katsayısı gerçek zemin-yapı etkileşimi problemlerinde 1' den küçük bir değere sahiptir.

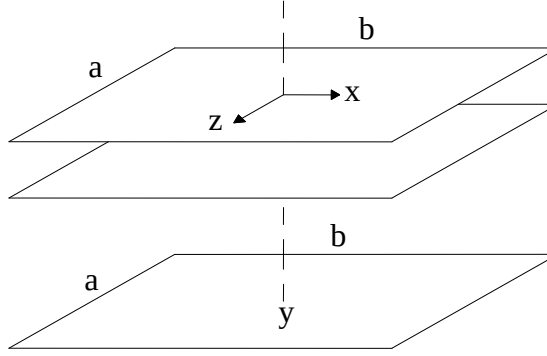
5.5. Plaxis 3D Foundation Programı

Plaxis 3D Foundation programı, özellikle, temel yapılarının üç boyutlu deformasyon analizlerinin gerçekleştirilmesi için geliştirilmiş üç boyutlu bir sonlu elemanlar programıdır. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği, yükleme koşulları ve malzeme özellikleri göz önüne alınarak, kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kazık probleminin Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak modellenmesi ve analiz edilmesi sırasında izlenecek adımlar maddeler halinde ana hatları ile aşağıda özetlenmiştir.

5.5.1. Çalışma Düzlemlerinin Oluşturulması

Probleme ait üç boyutlu geometrik model oluşturulurken öncelikle workplane olarak adlandırılan çalışma düzlemleri tanımlanır. Çalışma düzlemleri, farklı y koordinatlarına sahip yatay düzlemlerdir. Şekil 5.13’de görüldüğü gibi belirli düşey derinliklerde geometrik modelin üstten görünümünü temsil ederler. Her bir çalışma düzlemi yatay doğrultularda aynı dış sınırlara sahip olmalarına karşın aralarındaki düşey mesafe tanımlanan y koordinatlarına göre değişmektedir. Çalışma düzleminin düşey koordinatları ya da başka bir ifade ile hangi derinliklerde çalışma düzlemi kullanılacağı zemin yüzeyi seviyesi, kazık başı ve kazık ucu seviyesi, kazı taban kotu ve uygulanan yükün etkiyeceği yükseklik gibi probleme ait yapısal bilgiler göz önüne alınarak belirlenir. Herhangi bir çalışma düzleminde bir geometrik doğru ya da cluster olarak adlandırılan belirlenmiş bir alan tanımlandığında bunlar diğer tüm çalışma düzlemlerinde de görülür. Yapısal nesneler, tanımlanmış oldukları çalışma düzlemi ile o çalışma düzleminin altında yer alan çalışma düzlemi arasında oluşturulmaktadır. Çalışma düzlemleri; hesaplama aşamasında zemini, yapısal elemanları ve uygulanan yükleri aktif hale getirmek veya devre dışı bırakmak için kullanılırlar. Çalışma düzlemleri zemin tabakalarının oluşturulmasında kullanılmazlar. Analizler sırasında hangi derinliklerde çalışma düzlemi tanımlanacağı, yatay yük uygulama yüksekliği, zemin yüzeyi, gömülü kazık uzunluğu ve deney kasasının yüksekliği dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışma

düzlemlerinin yatay doğrultularda uzanan dış sınırları ise, model deney kasasının uzunluk ve genişliğine bağlı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.13. Çalışma Düzlemlerinin Temsili Gösterimi

5.5.2. Kazık Elemanın Oluşturulması

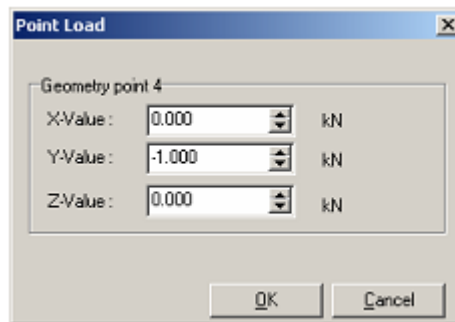
Kazık eleman “volume pile” olarak adlandırılan hacim kazık elemanı kullanılarak modellenmiştir. Kazık eleman, hacim kazığı kullanılarak tanımlandığında, zemin kütlesi içerisinde kazık kesit alanına bağlı olarak, kazık elemanı temsil edecek hacimsel bir bölge belirlenmekte ve bu bölgeye kazık malzemesine ait malzeme özellikleri atanmaktadır. Diğer bir ifade ile başlangıçta zemin elemana ait özellikler taşıyan bölgenin özellikleri değiştirilerek kazık eleman oluşturulmaktadır. Geometrik modellemede kazık eleman bulunuyor ise ilk olarak kazık başının ve kazık ucunun yer alacağı çalışma düzlemleri tanımlanır. Daha sonra kazık kesit alanı seçilerek kazık eleman geometrik model içerisine diğer yapı elemanları tanımlanmadan önce yerleştirilir. Son olarak da diğer çalışma düzlemleri ile diğer yapısal nesneler tanımlanır.

Plaxis 3D Foundation programında dairesel ve kare en kesit şekline sahip kazıkların yanı sıra en kesit geometrisi kullanıcı tarafından tanımlanabilen kazık elemanlar da oluşturulabilmektedir. Kullanılabilecek kazık eleman tipleri, dolu dairesel kesitli kazık, dairesel kesitli boru kazık, dolu kare kesitli kazık ve kare kesitli boru kazıktır. Kazık eleman oluşturulurken kazıkların zemine yerleştirilme yönteminin etkileri dikkate alınmamaktadır. Kazık ve kazığı çevreleyen zemin

arasındaki etkileşim ara yüzey elemanları kullanılarak modellenmektedir. Model deney çalışmalarında; dairesel ve kare en kesit geometrisine sahip farklı model kazıklar kullanılmıştır. Yatay yükün etkidiği çekme kolu da dairesel en kesite sahiptir. Gerek model kazıklar gerekse çekme kolu dolu kesitli olduklarından dolu kesitli dairesel kazık ve dolu kesitli kare kazık seçenekleri kullanılarak modellenmişlerdir.

5.5.3. Yükün Uygulanması

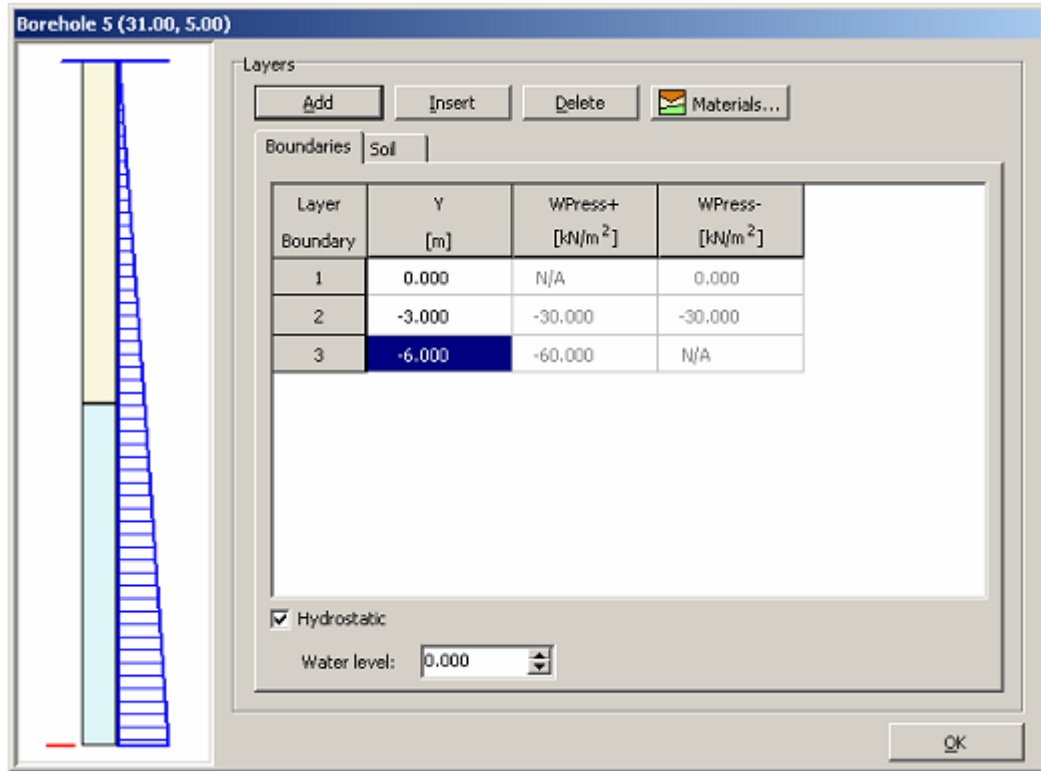
Plaxis 3D Foundation programında uygulanabilecek yükleme tipleri; yatay düzleme etkiyen yayılı yük, düşey düzleme etkiyen yayılı yük, şerit yük ve tekil yük şeklindedir. Tekil yük, sadece, mevcut geometrik doğrulara ve yapısal nesnelere uygulanabilmektedir. Şekil 5.14'de tekil yük veri penceresi görülmektedir. Bu pencere yardımı ile herhangi bir düğüm noktasında farklı doğrultularda etkiyen tekil yükleri aynı anda tanımlamak mümkündür. Birden fazla doğrultuda tekil kuvvet bileşeni tanımlandığında bu bileşenler sisteme bileşke bir kuvvet olarak etkimektedir. Model deney çalışmalarında, model kazık çekme koluna uygulanan yatay kuvvet yolu ile çekilmiştir. Bu yatay kuvvet x doğrultusunda etkiyen tekil bir yük olarak modellenmiştir.



Şekil 5.14. Tekil Yük Veri Penceresi

5.5.4. Zemin Profiline Elde Edilmesi

Zemin kütlesi içerisindeki tabakalaşma durumu ve zemin yüzeyi seviyesi “borehole” olarak adlandırılan sondaj kuyuları kullanılarak tanımlanmaktadır. Şekil 5.15’den görüldüğü gibi sondaj kuyuları, yer altı su seviyesi, boşluk suyu basınçlarının dağılımı ve başlangıç gerilme durumu ile ilgili bilgiler içermektedir. Zemin yüzeyinin veya zemin kütlesi içerisindeki tabakalaşmanın yatay olmadığı durumlarda zemin profili, çalışma düzlemi üzerinde farklı noktalarda tanımlanmış olan çok sayıdaki sondaj kuyusuna ait bilgiler kullanılarak elde edilir. Sondaj kuyuları arasında kalan bölgelerde zemin tabakaları sondaj kuyularında tanımlanmış olan zemin profillerine uygun olarak oluşturulmaktadır.



Şekil 5.15. Sondaj Kuyusu Veri Penceresi

İlk sondaj kuyusu tanımlandıktan sonra oluşturulan diğer sondaj kuyuları ilk tanımlanan sondaj kuyusunun kopyası olarak oluşturulmaktadır. Yeni oluşturulan

sondaj kuyularında zemin tabakalarının sınırları ve yer altı su seviyesi tasarımcı tarafından değiştirilebilmektedir. Sondaj kuyuları oluşturulurken zemin malzeme özelliklerinin tanımlanması ile birlikte zemin tabakalarına ait K_0 katsayısı değerleri de otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bununla birlikte; zemin kütlelerinin izotrop mu ($K_{0x} = K_{0z}$) yoksa anizotrop mu ($K_{0x} \neq K_{0z}$) davranacağı da bu aşamada belirtilmektedir. Zemin tabakalarına ait malzeme ve mukavemet özellikleri Şekil 5.15’de görülen “materials” butonu kullanılarak model parametrelerine ait bilgilerin girilmesi yolu ile elde edilmektedir. Tanımlanmış olan malzeme, mukavemet ve davranış özellikleri sondaj kuyusu üzerindeki ilgili zemin tabakasına atanmaktadır. Sayısal analizler sırasında model zemin profili, deneysel çalışma programına uygun olarak, üniform gevşek kum zemin, üniform sıkı kum zemin, üstte gevşek altta sıkı kum zemin tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin ve şevli kum zemin olmak üzere dört farklı şekilde modellenmiştir.

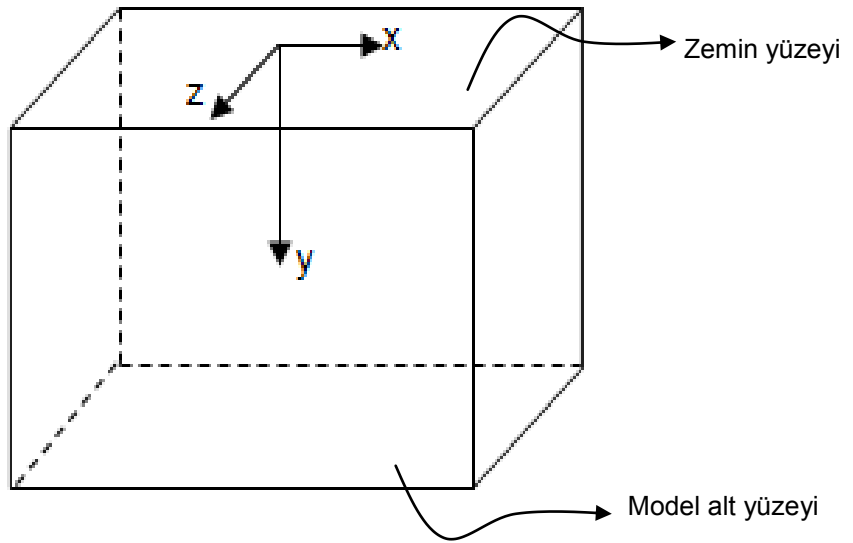
5.5.5. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Zemin ve yapısal elemanların davranışları ile malzeme ve mukavemet özellikleri, malzeme veri seti içerisinde yer alan parametreler için deneysel olarak bulunmuş verilerin atanması yolu ile tanımlanmaktadır. Plaxis 3D Foundation programının bünyesinde yedi farklı eleman tipi için tanımlanmış olan malzeme veri setleri yer almaktadır. Bu elemanlar; zemin ve ara yüzey elemanları, gömülü kazıklar, kirişler, duvarlar, döşemeler, yaylar ve ankrajlardır. Model zemin, zemin ve ara yüzey elemanları için kullanılan malzeme veri seti ile tanımlanırken kazık eleman ve çekme kolu ise zemin ve ara yüzey elemanlar için kullanılan malzeme veri setinde kazık ve çekme kolu malzemesine ait özelliklerin girilmesi yolu ile tanımlanmıştır.

5.5.6. Sınır Koşulları

Geometrik modele ait sınır koşulları, aşağıda belirtilen kurallar göz önünde tutularak, otomatik olarak tanımlanmaktadır.

- y-z düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının x doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_x = 0$) y ve z doğrultularında hareket serbestlikleri mevcuttur.
- x-y düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının z doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_z = 0$) x ve y doğrultularında hareket serbestlikleri mevcuttur.
- Geometrik modelin alt sınır yüzeyinin tüm doğrultulardaki hareketleri engellenmiştir ($u_x = u_y = u_z = 0$).
- Zemin yüzeyi her doğrultuda hareket serbestliğine sahiptir.
- Normalleri ne x ne de z doğrultusunda olan düşey model sınırların hareketleri hem x hem de z doğrultularında engellenmişken ($u_x = u_z = 0$) bu düşey sınırlar y doğrultusunda hareket serbestliğine sahiptir.

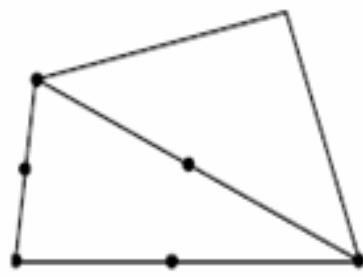


Şekil 5.16. Üç Boyutlu Model Geometrisi

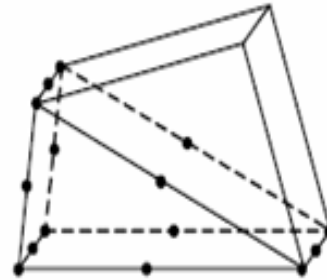
5.5.7. Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

Model geometrisi tanımlanıp zemin tabakaları ve yapısal nesneler için malzeme özelliklerinin atanmasının ardından problem geometrisi sonlu elemanlara

ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar ağı, ilk aşamada iki boyutlu, ikinci aşamada da üç boyutlu sonlu elemanlar ağının (mesh) oluşturulması ile iki aşamada elde edilmektedir. İki boyutlu sonlu elemanlar ağının oluşumu basit bir ifade ile çalışma düzleminin kabaca üçgenlere bölünmesine dayanmaktadır. Seçilen global ağ sıklığına göre iki boyutlu mesh işlemi sırasında çalışma düzleminin, kabaca, kaç üçgen eleman kullanılarak bölüneceğine karar verilmektedir. Yatay eleman dağılım faktörü, seçilen global ağ sıklığına göre çok kaba, kaba, orta, ince ve çok ince olarak ifade edilen farklı değerler alabilmektedir. İki boyutlu mesh işleminin tamamlanmasının ardından yatay eleman dağılım faktörüne benzer bir parametre olan düşey eleman dağılım faktörü kullanılarak üç boyutlu mesh otomatik olarak oluşturulur. Yatay eleman dağılım faktörü ile düşey eleman dağılım faktörü benzer olmalarına rağmen birbirlerinden bağımsızdırlar. İki boyutlu sonlu elemanlar ağı oluşturulurken gerekli görülen bölgelerde lokal ağ sıklaştırması yapılabildiği gibi tüm çalışma düzlemi boyunca global ağ sıklaştırması da yapılabilir. İki boyutlu sonlu elemanlar ağı 6 düğümlü üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulurken üç boyutlu sonlu elemanlar ağı 15 düğümlü kama elemanlar kullanılarak oluşturulmaktadır. Ara yüzey elemanları ise, 12 ve 16 düğümlü ara yüzey elemanlar kullanılarak modellenmektedir.



6 Düğümlü Üçgen Eleman



15 Düğümlü Kama Eleman

Şekil 5.17. İki ve Üç Boyutlu Mesh Oluşumunda Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri

Bir şev dolgusu probleminin modellenmesi örneğinde olduğu gibi zemin tabakası sınırlarında veya zemin yüzeyinde keskin geçişler yapılmak istendiğinde iki

boyutlu mesh oluşumundan önce “triangulate” opsiyonunun kullanılması gerekir. Triangulate opsiyonunun kullanılması ile mesh işlemi gerçekleştirilmeden önce model geometrisi çok kaba yoğunlukta üçgen elemanlara ayrılmaktadır. Deneysel çalışmaların modellenmesi sırasında yatay doğrultuda orta, dikey doğrultuda ise ince ağ sıklığı kullanılarak sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur.

5.5.8. Başlangıç Gerilme Durumunun Tanımlanması

Geoteknik mühendisliğindeki birçok problemin analizi başlangıç gerilme durumunun tanımlanmasını gerektirmektedir. Bir zemin kütleindeki başlangıç gerilmeleri, malzemenin birim hacim ağırlığından ve zemin formasyonunun oluşum tarihçesinden etkilenmektedir. Başlangıç gerilme durumu, genellikle, bir başlangıç dikey gerilmesi $\sigma_{v,0}$ kullanılarak karakterize edilmektedir. Başlangıç yatay gerilme değeri $\sigma_{h,0}$, yanal toprak basıncı katsayısı K_0 kullanılarak ($\sigma_{h,0} = K_0\sigma_{v,0}$) başlangıç dikey gerilmesi ile ilişkilendirilmektedir. Plaxis 3D Foundation programında, başlangıç gerilme durumu “ K_0 Procedure” ya da “Gravity Loading” seçeneklerinden uygun olanı kullanılarak tanımlanmaktadır.

K_0 Procedure; zeminin yükleme tarihçesini dikkate alarak başlangıç gerilme durumunun oluşturulması için kullanılır. Pratikte; normal konsolide bir zemin için K_0 katsayısının değeri (5.9) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (5.9)$$

Aşırı konsolide bir zeminde K_0 katsayısının (5.9) eşitliğine göre elde edilen değerden daha büyük olması beklenmektedir. “ K_0 Procedure”, sadece, zeminin ağırlığını ve boşluk suyu basınçlarını dikkate almaktadır. Yapısal nesnelerin ağırlığı ve uygulanan dış yükler dikkate alınmaz. Bu yüzden; “initial phase” olarak adlandırılan başlangıç hesaplama aşamasında yüklerin ve yapısal nesnelerin aktifleştirilmesinin başlangıç gerilme durumu üzerinde bir etkisi yoktur. “ K_0 Procedure”, sadece, zemin yüzeyinin yatay olduğu ve bütün zemin tabakaları ile yer altı su seviyesinin bu zemin yüzeyine paralel olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

Diğer tüm durumlarda başlangıç gerilmeleri “Gravity Loading” seçeneği kullanılarak oluşturulmaktadır.

“Gravity Loading” seçeneği ile yapılan hesaplamalarda başlangıç gerilmeleri zemin birim hacim ağırlığına bağlı olarak elde edilir. Mohr-Coulomb gibi elastik-tam plastik bir zemin modeli kullanılırken, yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranını ifade eden K_0 katsayısının değeri, kullanılan poisson oranına bağlı olarak hesaplanır. Bu yüzden; gerçekçi bir K_0 değeri tanımlayan poisson oranı değerinin seçilmesi önemlidir. Gravity Loading durumunda tek boyutlu sıkışma probleminde tanımlanmış olan $\nu = K_0 / (1+K_0)$ eşitliği kullanılmaktadır. Poisson oranı 0.5’ den küçük bir değer olacağından “Gravity Loading” seçeneği kullanılarak değeri 1’ den büyük olan K_0 katsayısı elde etmek mümkün olmayacaktır.

Bu çalışmada üniform gevşek kum zemin, üniform sıkı kum zemin ve üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiş deneysel çalışmaların sayısal analizleri yapılırken başlangıç gerilme durumu “ K_0 Procedure” kullanılarak tanımlanmıştır. Buna karşılık; şevli kum zemin durumunda yürütülmüş deneysel çalışmaların sayısal analizlerinde başlangıç gerilme durumu “Gravity Loading” seçeneği kullanılarak oluşturulmuştur.

5.5.9. Sayısal Analiz

Üç boyutlu sonlu elemanlar ağının oluşturulması ile birlikte modelleme işlemi tamamlanmış olmaktadır. Geometrik modelin oluşturulmasının ardından problemin sayısal analizinin gerçekleştirileceği hesaplama aşamasına geçilir. Plaxis 3D Foundation programında sayısal analizler ardışık hesaplama aşamaları şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Her bir hesaplama aşaması belirli bir yükleme ya da yapım aşamasını temsil etmektedir. Plaxis 3D Foundation programında birinci hesaplama aşaması, daima, başlangıç gerilme durumunun tanımlandığı “initial phase” olarak adlandırılan hesaplama aşamasıdır.

Deneysel çalışmaların sayısal analizleri üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sırası ile başlangıç gerilme durumunun tanımlanması, model kazık ve çekme kolunun imal edilmesi ve yatay yükün uygulanmasıdır. İkinci ve üçüncü

hesaplama adımları plastik analiz yapılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıç gerilmeleri oluşturulduktan sonraki hesaplama adımının başlangıcında “initial phase”de oluşan deplasmanlar sıfırlanarak sonraki hesaplama aşamalarında meydana gelecek olan deplasmanlar üzerinde “initial phase” aşamasındaki deplasmanların etkisi kaldırılmış olur. Buna karşılık başlangıç gerilmeleri aynen kalmaktadır.

6. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışları Plaxis 3D Foundation programı ile sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak analiz edilmiştir. Analizler sırasında; model deney çalışmalarında olduğu gibi, kazık gömülü uzunluğu, kazık çapı, kazık geometrisi, tabakalı zemin durumu, kazık malzemesi ve şevli zemin durumunun yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Sayısal analiz çalışmaları sırasında ilk olarak mesh analizi yapılarak problemin çözümü için uygun olan mesh yoğunluğu tanımlanmıştır. İkinci aşamada; parametrik çalışma yapılarak zemin elastisite modülü (E), dilatasyon açısı (ψ) ve ara yüzey davranışı için mukavemet azaltma faktörü R_{inter} 'in yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parametrik çalışmalar sırasında analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiş ve problemin çözümü için en güvenilir sonuçları üretebilecek E , ψ ve R_{inter} parametre değerleri tanımlanmıştır.

Sayısal analiz çalışmalarında kum zeminin davranışı Mohr-Coulomb (MC) malzeme modeli ile tanımlanırken model kazık ve çekme kolu davranışları Lineer Elastik (LE) malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Mohr-Coulomb malzeme modeli parametrelerinden zemin kuru birim hacim ağırlığı (γ_{dry}), elastisite modülü (E_{50}) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri gevşek ve sıkı kum zemin numuneleri için elde edilmiş olup, zemin doymun birim hacim ağırlığı ($\gamma_{sat.}$) ve kohezyon değerleri Plaxis tarafından önerilen hususlar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Poisson oranının değeri ise literatürde (Laman ve ark., 1999) belirtilen değer aralığı göz önüne alınarak ortalama bir değer olarak alınmıştır. Bahsedilen parametrelerin gevşek ve sıkı kum zemin durumundaki değerleri Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Analizlerde model kazık eleman malzemesi olarak çelik, alüminyum ve derlin kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan kazık elemana ait malzeme parametreleri literatürde mevcut değerlere (Laman, 1995; Karahan, 2007) benzer şekilde seçilmiştir. Çelik, alüminyum ve derlin malzemelere ait özellikler Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Kum Zemine Ait Malzeme Özellikleri

	Gevşek Kum	Sıkı Kum
Malzeme Modeli	MC	MC
Davranış Tipi	Drenajlı	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{dry} (N/cm ³)	0.015	0.017
Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_{sat} (N/cm ³)	0.020	0.020
Poisson Oranı, ν	0.300	0.300
E_{50} (N/cm ²)	2060	3000
c (N/cm ²)	0.030	0.030
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	38	44

Çizelge 6.2 Kazık Malzemelerine Ait Malzeme Özellikleri

	Çelik	Alüminyum	Derlin
Malzeme Modeli	LE	LE	LE
Davranış Tipi	Non-Porous	Non-Porous	Non-Porous
Birim Hacim Ağırlık, γ_{dry} (N/cm ³)	0.077	0.026	0.014
Poisson Oranı, ν	0.250	0.330	0.350
E (N/cm ²)	210×10^5	70×10^5	3.1×10^5

6.1. Mesh Analizi

Plaxis 3D Foundation programında sonlu elemanlar ağı (mesh) iki aşamada oluşturulmaktadır. İlk olarak iki boyutlu mesh oluşturulmakta ardından üç boyutlu mesh otomatik olarak elde edilmektedir. Yatay eleman dağılım faktörü ve düşey eleman dağılım faktörü, seçilen global ağ sıklığına göre, Çok Kaba (ÇK), Kaba (K), Orta (O), İnce (İ) ve Çok İnce (Çİ) olarak tanımlanan farklı sayıdaki eleman yoğunluklarında mesh oluşumuna imkan tanımaktadır. İki boyutlu mesh oluşumu sırasında ağ sıklığının çok ince seçilmesi üç boyutlu mesh oluşumu sonrasında çok fazla sayıda sonlu eleman oluşumuna neden olacaktır. Bu sonuç, problemin analizi

için gerekli hesaplama süresini önemli derecede artırmaktadır. Buna karşılık; seçilen mesh yoğunluğunun problemin analizi sonucu doğru sonuçları üretebilecek yeterli incelikte olmasına da özen gösterilmelidir.

Mesh analizleri; üniform sıkı kum zemin içerisinde yer alan $L=200\text{mm}$ uzunluğundaki ve $D=50\text{mm}$ çapındaki model çelik kazık üzerinde yapılmıştır. Mesh analizleri sırasında kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

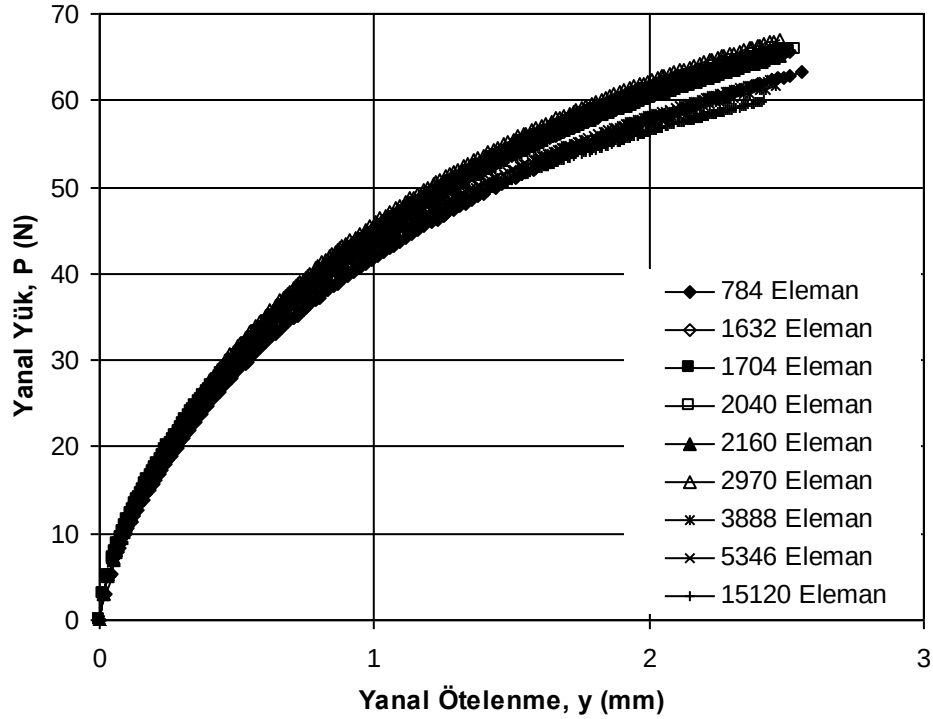
Çizelge 6.3 Mesh Analizleri Sırasında Kullanılan Malzeme Özellikleri

	Sıkı Kum
Malzeme Modeli	Mohr-Coulomb
Davranış Tipi	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{dry} (N/cm^3)	0.017
Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_{sat} (N/cm^3)	0.020
Poisson Oranı, ν	0.300
E_{referans} (N/cm^2)	1
$E_{\text{increment}}$ ($\text{N/cm}^2/\text{cm}$)	100
y_{referans} (cm)	0
R_{inter}	0.700
c (N/cm^2)	0.030
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ ($^\circ$)	44
Dilatasyon Açısı, ψ ($^\circ$)	0

Problemin analizi için en güvenilir sonuçların elde edilebileceği mesh yoğunluğu farklı eleman sayılarında dokuz farklı analiz yapılarak belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan sonlu eleman sayıları ile bu sonlu elemanların ortalama uzunlukları Çizelge 6.4’de verilmiştir. Mesh analizlerinin tamamında 150 N değerinde bir yanal yük uygulanmıştır. Uygulanan bu yük değeri, deneysel çalışmalarda gözlenmiş olan en büyük yanal yük değerinden daha büyük olacak şekilde seçilmiştir. Analizler sonucunda kazık başındaki 1° ’lik dönme açısı için elde

edilmiş olan kazık başı yanal ötelenme ($u_x, y=0$) ve yanal yük (P) değerleri Çizelge 6.4’de, kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri de Şekil 6.1.’de sunulmuştur.

Şekil 6.1 incelendiğinde farklı eleman sayıları ile gerçekleştirilmiş mesh analizleri sonucunda elde edilen yanal yük-yanal ötelenme eğrileri arasında önemli bir farklılık gözlenmemektedir. Kazık başındaki 1° ’lik dönme açısı için farklı mesh yoğunluklarında elde edilmiş olan yanal yük değerleri karşılaştırıldığında, elde edilen maksimum yanal yük değeri ile minimum yanal yük değeri arasında %10 kadar bir fark olduğu görülmüştür. Eleman sayısındaki artışa ya da azalmaya bağlı olarak yanal yük değerlerinde kararlı bir değişim oluşmamaktadır.

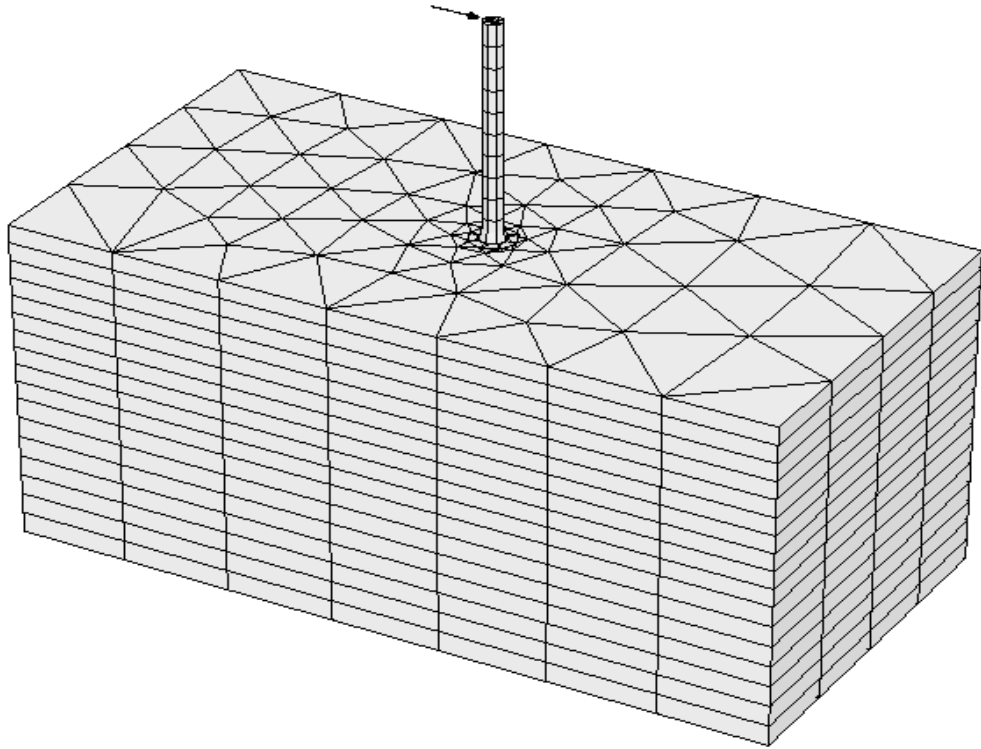


Şekil 6.1. Kazık Başındaki 1° lik Dönme Açısı için Yanal Ötelenme-Yanal Yük İlişkileri

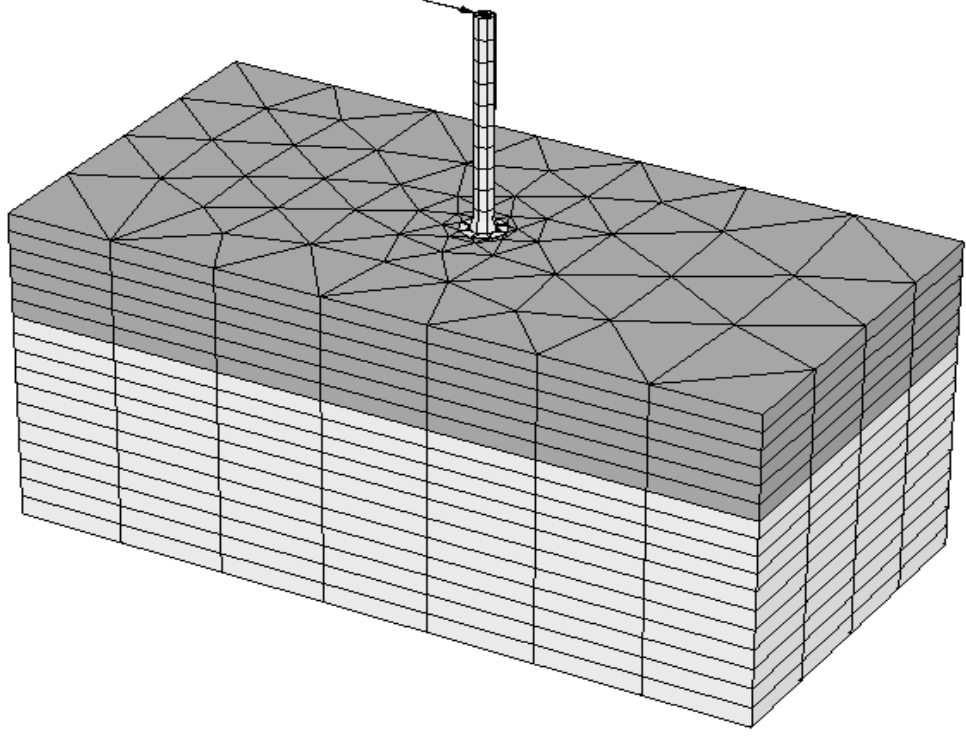
Çizelge 6.4 Farklı Eleman Sayılarında Gerçekleştirilmiş Mesh Analizlerine Ait Sonuçlar

Analiz No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yatay Eleman Dağılımı	ÇK	K	O	K	O	i	O	i	Çi
Düşey Eleman Dağılımı	ÇK	K	K	O	O	O	i	i	Çi
Eleman Sayısı	784	1632	1704	2040	2160	2970	3888	5346	15120
Ortalama Eleman Boyu (mm)	210	145.50	142.40	130.20	126.50	107.90	94.30	80.40	47.80
Kazık Başındaki 1° lik Dönme Açısı için Elde edilmiş Olan Yanal Ötelenme ve Yanal Yük Değerleri									
$u_{x,y}=0$ (mm)	2.549	2.508	2.487	2.529	2.466	2.473	2.445	2.454	2.418
P (N)	63.247	65.640	65.917	65.565	65.021	66.883	61.526	62.490	60

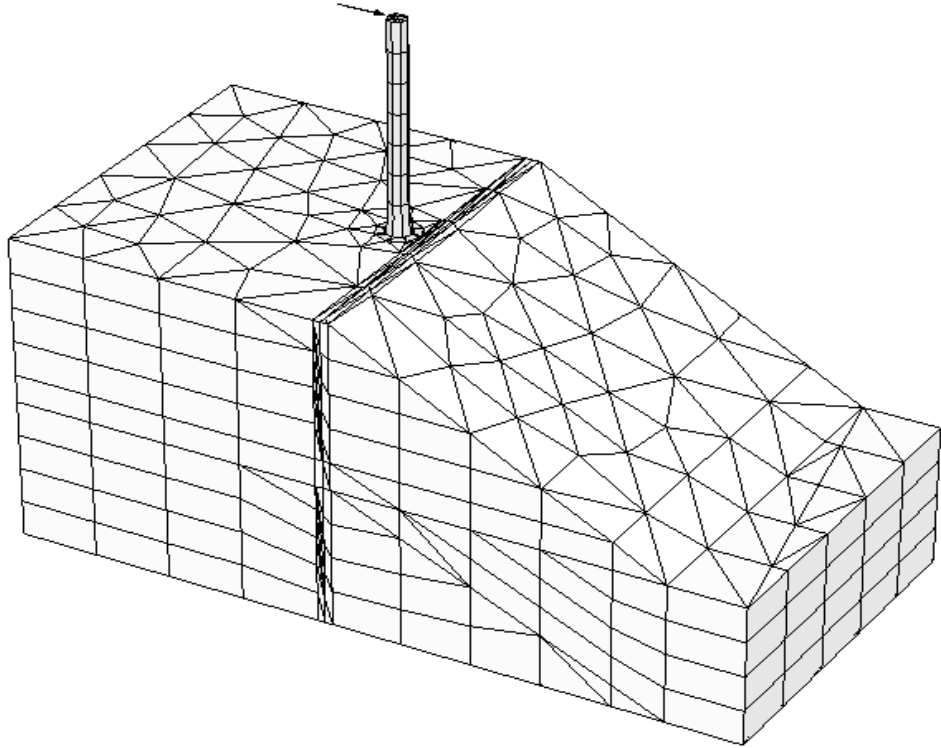
Deneyisel çalışmada kazık başındaki 1° 'lik dönme açısı için elde edilmiş yanal yük değerine en yakın sonuçlar 7, 8 ve 9 numaralı analizlerden elde edilmiştir. Problemin analizi için gerekli hesaplama süresi de göz önüne alındığında en uygun mesh yoğunluğunun yatay doğrultuda orta, düşey doğrultuda da ince ağ sıklığı oluşumuna imkan veren orta-ince mesh olduğuna karar verilmiştir. Orta-ince mesh yoğunluğu kullanılarak üniform sıkı kum zemin, üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin ve şevli kum zemin durumlarında elde edilmiş olan üç boyutlu sonlu eleman ağları örnekleri sırası ile Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Üniform Sıkı Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı



Şekil 6.3. Tabakalı Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı



Şekil 6.4. Şevli Kum Zemin Durumunda Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Ağı

6.2. Parametrik Çalışma

Deneyisel çalışmalarda kullanılan model deney kumunun gerilme-deformasyon davranışı ve mukavemet özellikleri kum numuneleri üzerinde gerçekleştirilen standart üç eksenli drenajlı deneyler ve kesme kutusu deneyleri ile elde edilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde zemin davranışı Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmektedir. Mohr-Coulomb (MC) malzeme modelindeki model parametrelerinden bazıları (elastisite modülü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon) bu deneylerden elde edilmiş olan veriler kullanılarak tanımlanmıştır. Zeminin hacim değiştirme karakterini ifade etmede kullanılan dilatasyon açısı (ψ), Plaxis 3D Foundation programında, $\psi=\phi-30^\circ$ eşitliği ile tanımlanırken ara yüzey davranışının modellenmesinde kullanılan mukavemet azaltma katsayısı R_{inter} değeri, kazığın zemine yerleştirilme yöntemi, kazık malzemesi ve kum zeminin sıkılığına göre tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Mohr-Coulomb malzeme modeli, referans elastisite modülü değeri $E_{referans}$ 'ın derinlik boyunca sabit olduğunu kabul etmektedir. Ancak; kum zemin gibi kohezyonsuz zeminlerde elastisite modülü zemin yüzeyi seviyesinde oldukça küçük bir değere sahip iken derinlik ile beraber elastisite modülünün değeri de artmakta diğer bir ifade ile zemin derinlik ile beraber daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Deneyisel çalışmalarda, model zeminin deney kasasına yerleştirilmesi, model kazığın zemin içerisindeki teşkili ve kazığın hemen çevresinde yer alan kum zeminin oluşturulması model zemin davranışını etkileyebilir. Ayrıca, kum zemin deney kasası boyutlarında değerlendirildiğinde davranış farklılıkları sergileyebilir. Bu nedenle; elastisite modülü, dilatasyon açısı ve mukavemet azaltma katsayısı parametrelerinin kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kazığın davranışı üzerindeki etkileri bir seri analiz yapılarak araştırılmıştır.

Analizlerin tamamı hem üniform gevşek kum zemin durumunda, hem de üniform sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiştir. Analizler, $L=200\text{mm}$ uzunlukta ve $D=50\text{mm}$ çaptaki model çelik kazıklar üzerinde yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda incelenen parametre değerinde değişiklikler yapılırken diğer tüm

parametre değerleri sabit tutulmuştur. Analizlerde uygulanan yanal yük değeri 150 N dur.

6.2.1. Elastisite Modülünün Etkisi

Kum zeminin elastisite modülü değerinin kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kazığın davranışı üzerindeki etkisi, iki farklı elastisite modülü yaklaşımı kullanılarak, dört farklı referans elastisite değeri için gerçekleştirilen analizler ile araştırılmıştır. Birinci yaklaşımda; elastisite modülü değerinin derinlik boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir. İkinci yaklaşımda ise, referans elastisite modülü E_{referans} için zemin yüzeyi seviyesinde bir değer tanımlanmakta ve bu değer birim derinlik başına belirlenen artım miktarı $E_{\text{increment}}$ kadar derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı kabul edilmektedir. Ancak; her bir derinlikteki elastisite modülü değeri yatay düzlem boyunca sabit değerde alınmaktadır.

Doğrusal artan elastisite modülü yaklaşımında uygulanan hesaplama yöntemi üniform gevşek kum zemin durumu için bir örnek ile açıklanmıştır. Gevşek kum zemin numunesi üzerinde 100 kPa değerindeki hücre basıncında gerçekleştirilmiş standart üç eksenli drenajlı deney sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon eğrisine göre sekant elastisite modülü değeri $E_{50}=2060 \text{ N/cm}^2$ olarak tanımlanmıştır. 1/20 ölçeğindeki model düzenek prototip boyutlarda düşünüldüğünde $L=19.20\text{m}$, $B=9.60\text{m}$ ve $H=9.00\text{m}$ boyutlarındaki bir zemin kütesini tanımlamaktadır. Gevşek kum zeminin kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_k=15.03 \text{ kN/m}^3$ dür. Bu durumda, 100 kPa hücre basıncı değeri, basit bir yaklaşımla, $H=6.65\text{m}$ derinlikte elde edilecektir. Bu prototip derinliğin model deneydeki karşılığı $H=33\text{cm}$ dir. E değerinin derinlik boyunca sabit olmadığı ve derinlik ile birlikte doğrusal olarak değişeceği kabul edilirse zemin yüzeyi seviyesinde ($y_{\text{ref.}}=0$) tanımlanmış olan E_{referans} değeri her birim derinlikte $E_{\text{increment}}$ kadar artarak $H=33\text{cm}$ derinliğinde E_{50} değerine eşit olacaktır.

Kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_k=17.06 \text{ kN/m}^3$ olan üniform sıkı kum zemin numunesi üzerinde 100 kPa değerindeki hücre basıncında gerçekleştirilmiş standart üç eksenli drenajlı deney sonucu elde edilen gerilme-deformasyon eğrisine göre sekant elastisite modülü değeri $E_{50}=3000 \text{ N/cm}^2$ olarak tanımlanmıştır.

Elastisite modülü etkisinin araştırıldığı analizler hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda referans elastisite modülü E_{referans} 'in E_{50} , 1, 100 ve 1000 N/cm^2 'ye eşit olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde dilatasyon açısının değeri $\psi=0$ ve mukavemet azaltma katsayısının değeri de $R_{\text{inter}}=0.70$ olarak sabit alınmıştır. Gevşek ve sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilen analizler sonucunda kazık başındaki 0.50° 'lik dönme açısı için elde edilen kazık başı yanal ötelenme ve yanal yük değerleri sırası ile Çizelge 6.5 ve 6.6'da, yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri de Şekil 6.5 ve 6.6'da sunulmuştur.

Çizelge 6.5'de gevşek kum zemin durumunda analiz sonuçları incelendiğinde, en büyük yanal yük taşıma kapasitesinin E_{referans} değerinin derinlik boyunca sabit kabul edildiği durumda elde edildiği görülmektedir. E_{referans} değerinin derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı durumda, zemin yüzeyi seviyesinde tanımlı E_{referans} değerinin küçülmesi birim derinlik boyunca elastisite modülü değerindeki artım miktarını artırmasına rağmen, yanal yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olmaktadır. Bununla birlikte; E_{referans} değerinin küçülmesi ile kazık başındaki yanal ötelenme miktarı da artmaktadır. $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$ durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi, elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık %65'i kadardır.

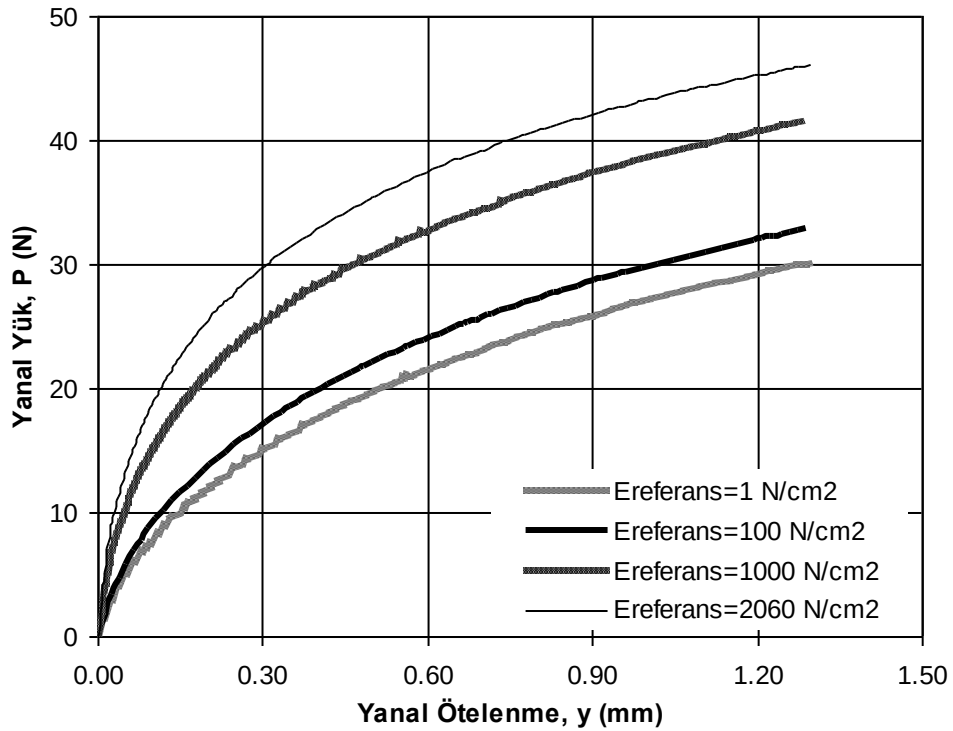
Çizelge 6.5 Gevşek Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi

Analiz No	1	2	3	4
$E_{\text{referans}} (\text{N/cm}^2)$	2060	1000	100	1
$E_{\text{increment}} (\text{N/cm}^2/\text{cm})$	0	32.121	59.400	62.400
R_{inter}	0.70	0.70	0.70	0.70
$U_{x, y=0} (\text{mm})$	1.229	1.245	1.273	1.281
P (N)	45.552	41.180	32.709	30.012

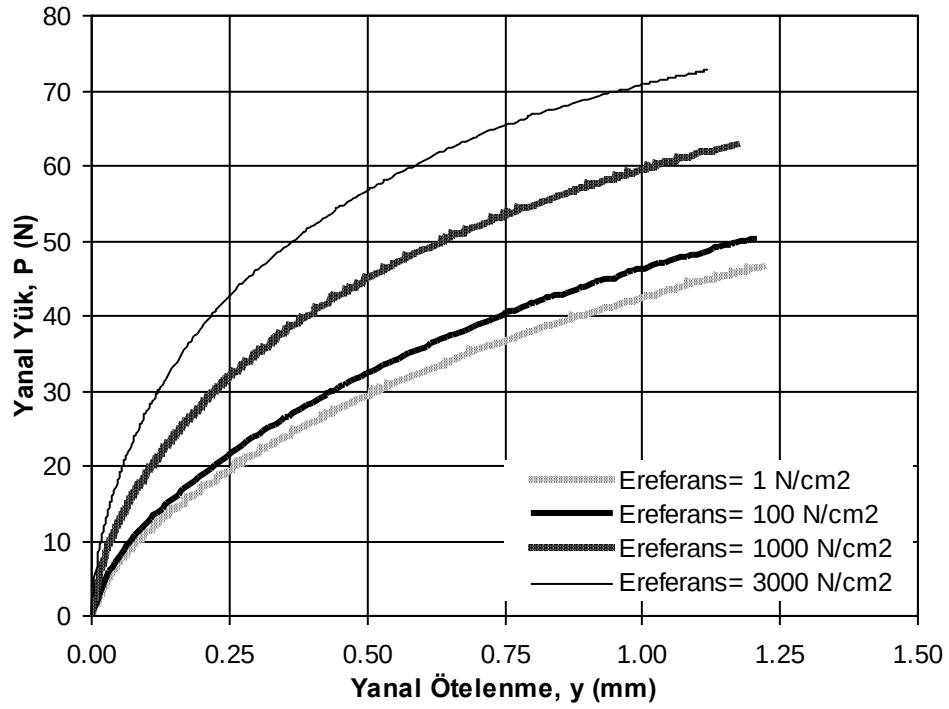
Çizelge 6.6 Sıkı Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi

Analiz No	1	2	3	4
$E_{referans} \text{ (N/cm}^2\text{)}$	3000	1000	100	1
$E_{increment} \text{ (N/cm}^2\text{/cm)}$	0	66.670	97	100
R_{inter}	0.70	0.70	0.70	0.70
$U_{x, y=0} \text{ (mm)}$	1.115	1.169	1.207	1.222
$P \text{ (N)}$	72.600	62.769	50.160	46.602

Elastisite modülünün yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi gevşek kumdakine benzer şekilde sıkı kumda da görülmektedir. Çizelge 6.6'dan da görüldüğü gibi $E_{referans}=1 \text{ N/cm}^2$ durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi, elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık %65'i kadardır.



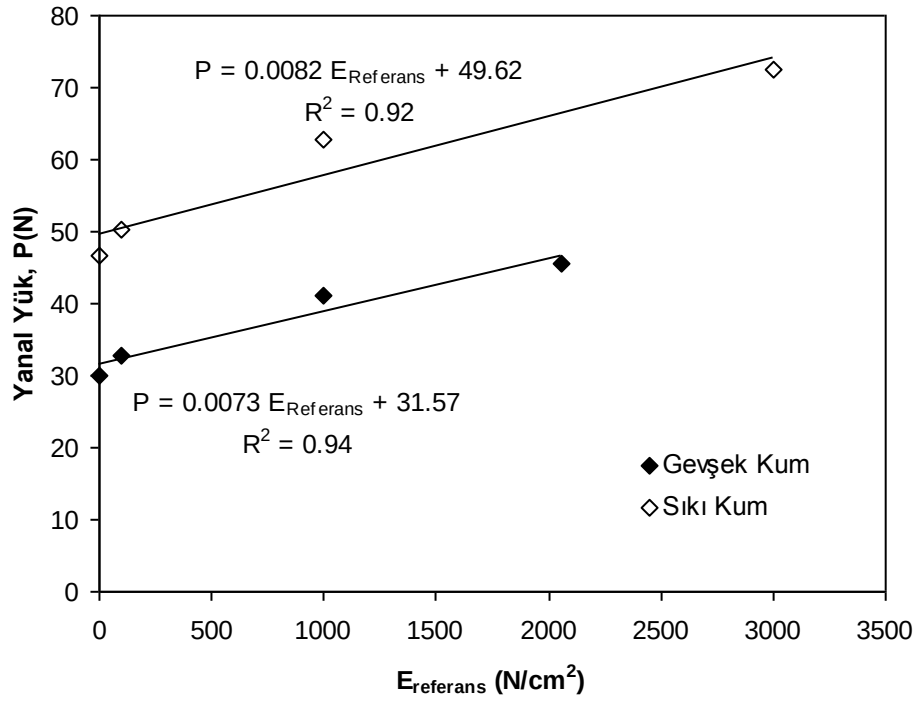
Şekil 6.5. Gevşek Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi



Şekil 6.6. Sıkı Kum Zeminde Elastisite Modülü Etkisi

Şekil 6.5 ve 6.6 incelendiğinde, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, zemin yüzeyi seviyesindeki E_{referans} değerinin artması ile zeminin daha rijit bir davranış sergilediği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar, zemin davranışının modellenmesi sırasında kullanılan zemin elastisite modülü değerinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Analizlerde kullanılan E_{referans} değerleri ile bu elastisite modülü değerleri için kazık başındaki 0.50° 'lik dönme açısına karşılık elde edilmiş yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ilişkilendirilmiştir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda elde edilmiş olan bu ilişkiler yaklaşık doğrusal bir davranışa sahip olup, gevşek kum zeminde %94 sıkı kum zeminde ise %92 gibi yüksek korelasyon katsayısı değerlerine sahiptir.

Şekil 6.7. E_{referans} -Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi

6.2.2. Dilatasyon Açısının Etkisi

Kum zeminlerin kayma mukavemetleri ve gerilme-deformasyon davranışları esas olarak relatif sıkılık derecelerine bağlıdır. Kum zeminin içsel sürtünme açısı, sadece dane temas yüzeylerindeki sürtünmeyi değil aynı zamanda danelerin birbirlerinin hareketini engelleme derecesini de temsil etmektedir. Danelerin birbirlerinin hareketini engelleme derecesi, özellikle sıkı kum zemin durumunda, kum zeminin mukavemeti üzerinde büyük öneme sahiptir. Çünkü; dilatasyon olarak adlandırılan bu özellik sıkı kum zemine ilave bir kayma mukavemeti sağlamaktadır (Craig, 1987; Bolton, 1996). Bu yüzden dilatasyon açısının (ψ) kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiş olan bir seri analizle araştırılmıştır.

Gevşek kum zemin durumundaki tüm analizlerde içsel sürtünme açısının değeri $\phi=38^\circ$ iken elastisite modülü $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$, birim derinlik başına elastisite modülündeki artım miktarı $E_{\text{increment}}=62.400 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve mukavemet azaltma katsayısı $R_{\text{inter}}=0.70$ değerlerine sahiptir. Analizler, $\psi=0^\circ$, 4° ve 8° durumları için yapılmıştır. Benzer şekilde sıkı kum zeminde gerçekleştirilen analizlerde ise içsel sürtünme açısının değeri $\phi=44^\circ$ iken elastisite modülü $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$, birim derinlik başına elastisite modülündeki artım miktarı $E_{\text{increment}}=100 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve mukavemet azaltma katsayısı $R_{\text{inter}}=0.70$ alınmış olup bu değerler tüm analizlerde sabit tutulmuştur. Analizler, $\psi=0^\circ$, 4° , 8° ve 14° değerleri için yapılmıştır.

Çizelge 6.7’de gevşek kum zeminde yapılmış olan analizlerde kazık başındaki 1° dönme açısı için elde edilmiş olan yanal ötelenme ve yanal yük değerleri görülmektedir. Kazık başındaki 1° dönme açısı durumunda elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ise Şekil 6.8’de sunulmuştur. Çizelge 6.7’deki sonuçlar incelendiğinde, Plaxis’in dilatasyon açısı için önermiş olduğu $\psi=\phi-30^\circ$ yaklaşımına göre $\psi=8^\circ$ durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değeri $\psi=0^\circ$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile karşılaştırıldığında $\psi=8^\circ$ durumuna göre yanal yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak %15 azalmaktadır.

Çizelge 6.8’de sıkı kum zemin için elde edilmiş olan sonuçlar incelendiğinde ise $\psi=14^\circ$ ve $\psi=0^\circ$ için yapılan analizler sonucu elde edilen yanal yük taşıma kapasiteleri arasında $\psi=14^\circ$ durumuna göre yaklaşık olarak %25 değerinde bir azalma olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, özellikle, sıkı kum zemin durumunda dilatasyon açısının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 6.8 ve 6.9’da gevşek ve sıkı kum zemin durumunda elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde, dilatasyon açısının artması ile zeminin daha rijit bir yük-ötelenme davranışı sergilediği görülmektedir.

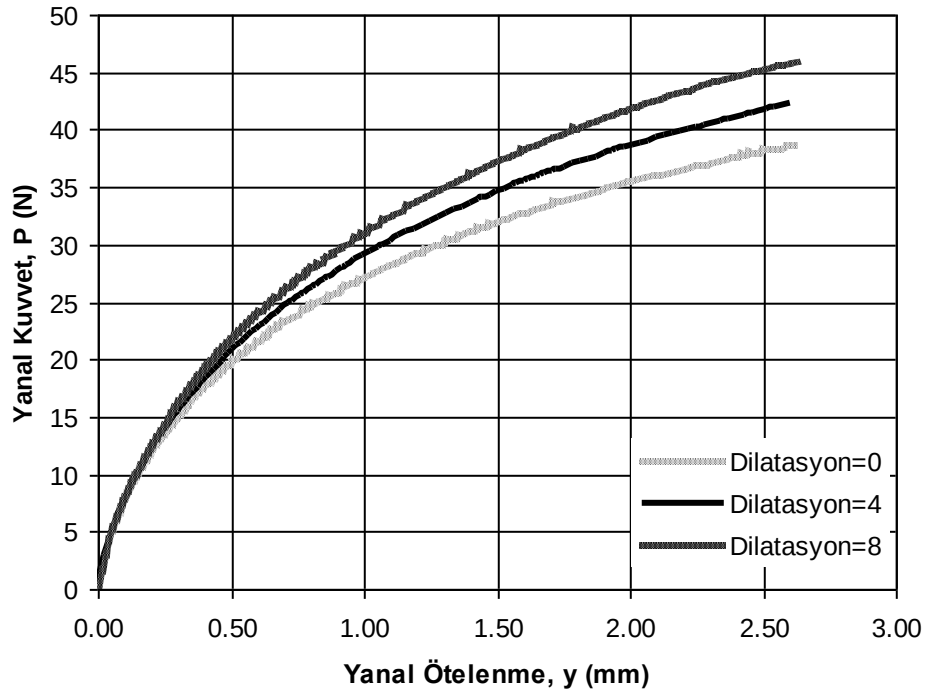
Çizelge 6.7 Gevşek Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi

Analiz No	1	2	3
$E_{\text{referans}} \text{ (N/cm}^2\text{)}$	1	1	1
$E_{\text{increment}} \text{ (N/cm}^2\text{/cm)}$	62.400	62.400	62.400
R_{inter}	0.70	0.70	0.70
$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	0	4	8
$U_{x, y=0} \text{ (mm)}$	2.563	2.537	2.513
P (N)	38.453	41.973	45.346

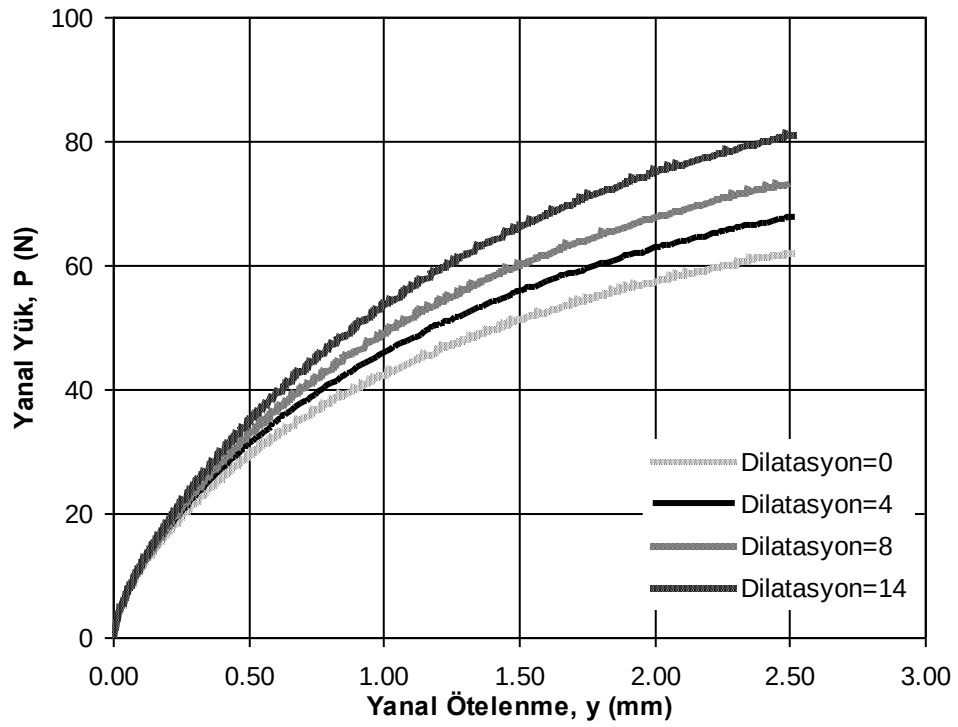
Çizelge 6.8 Sıkı Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi

Analiz No	1	2	3	3
$E_{\text{referans}} \text{ (N/cm}^2\text{)}$	1	1	1	1
$E_{\text{increment}} \text{ (N/cm}^2\text{/cm)}$	100	100	100	100
R_{inter}	0.70	0.70	0.70	0.70
$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	0	4	8	14
$U_{x, y=0} \text{ (mm)}$	2.445	2.149	2.358	2.387
P (N)	61.463	64.292	71.827	79.677

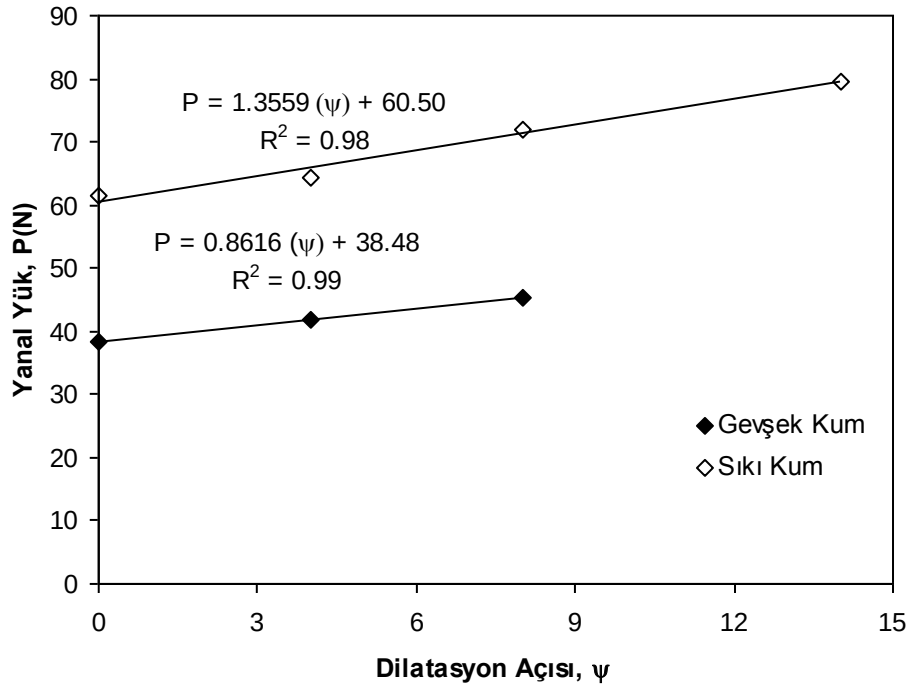
Farklı dilatasyon açısı değerlerinde kazık başındaki 1° dönme açısı için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin dilatasyon açısı ile ilişkisi Şekil 6.10'da görülmektedir. Şekil 6.10'dan da görüldüğü gibi yanal yük taşıma kapasitesi hem gevşek hem de sıkı kum zeminde dilatasyon açısındaki artışa bağlı olarak yaklaşık doğrusallıkta artmaktadır. Dilatasyon açısı-yanal yük ilişkisi için elde edilen eşitlikler gevşek kum zeminde %99 sıkı kum zeminde ise %98 gibi yüksek korelasyon katsayısı değerlerine sahiptir.



Şekil 6.8. Gevşek Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi



Şekil 6.9. Sıkı Kum Zeminde Dilatasyon Açısının Etkisi

Şekil 6.10. ψ (°)-Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi

6.2.3. Ara Yüzey Elemanının Etkisi

Yanal yüke maruz kazık problemi üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık-zemin ara yüzey davranışı büyük ölçüde kazığın zemine yerleştirilme yöntemine, kazığın imal edildiği malzemeye ve zeminin sıkılığına bağlıdır. Kazık ve zemin arasındaki etkileşimin derecesi mukavemet azaltma faktörü R_{inter} kullanılarak modellenmektedir. Ara yüzey davranışının kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiş bir seri analiz ile araştırılmıştır.

Gevşek kum zeminde gerçekleştirilen tüm analizlerde elastisite modülünün referans değeri için $E_{referans}=1 \text{ N/cm}^2$, birim derinlik başına elastisite modülündeki artım miktarı için $E_{increment}=62.400 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve dilatasyon açısı için de $\psi=0^\circ$ değerleri kullanılmış olup analizler R_{inter} katsayısının 0.020, 0.035, 0.700 ve 1

değerleri için yapılmıştır. Benzer şekilde; sıkı kum zeminde yapılan analizlerde ise referans elastisite modülü değeri için $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$, birim derinlik başına elastisite modülündeki artım miktarı için $E_{\text{increment}}=100 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve dilatasyon açısı için de $\psi=0^\circ$ değerleri tüm analizlerde sabit tutulurken analizler R_{inter} katsayısının 0.010, 0.200, 0.700 ve 1 değerleri için gerçekleştirilmiştir.

Gevşek kum zeminde yapılan analizler sonucunda kazık başındaki 1° dönme açısı için elde edilmiş olan yanal ötelenme ve yanal yük değerleri Çizelge 6.9'da sunulmuştur. Kazık başındaki 1° dönme açısı durumunda elde edilmiş olan yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ise Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Çizelge 6.9'da verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde R_{inter} değerinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öyle ki; R_{inter} katsayısının değerinin 0.020 olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değeri $R_{\text{inter}}=1$ durumunda elde edilmiş olan taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık olarak %15'i kadardır. Benzer şekilde; Çizelge 6.10'da sıkı kum zemin için elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde $R_{\text{inter}}=0.010$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesinin $R_{\text{inter}}=1$ durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık %10'u kadar olduğu görülmektedir. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, R_{inter} katsayısının 0.700 olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile $R_{\text{inter}}=1$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi arasında dikkate değer bir farkın olmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 6.9 Gevşek Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanın Etkisi

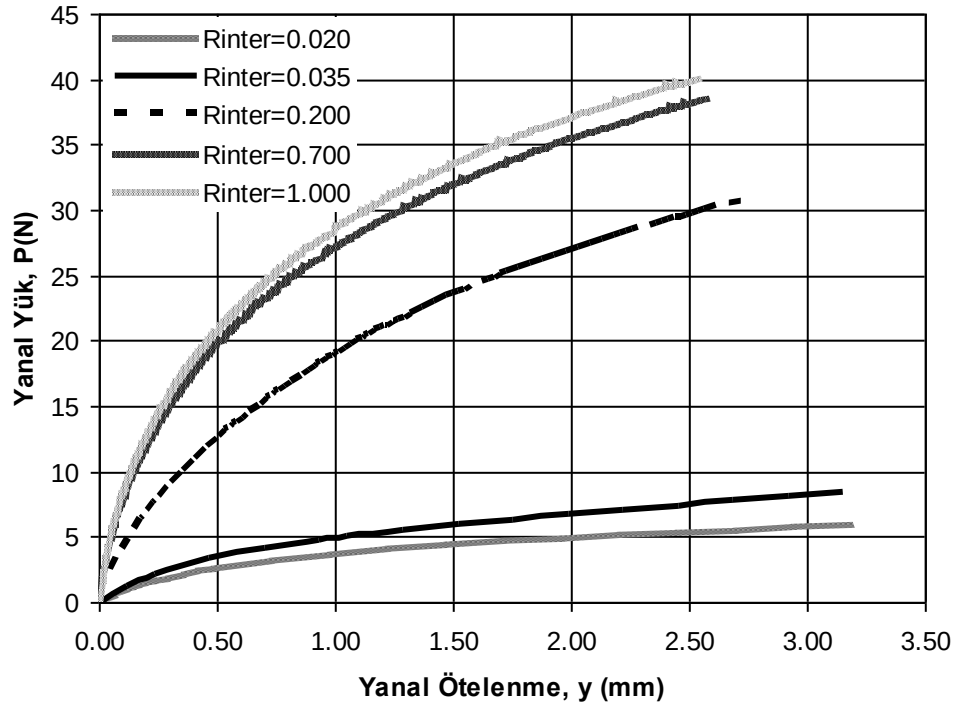
Analiz No	1	2	3	4	5
$E_{\text{referans}} \text{ (N/cm}^2\text{)}$	1	1	1	1	1
$E_{\text{increment}} \text{ (N/cm}^2\text{/cm)}$	62.400	62.400	62.400	62.400	62.400
R_{inter}	0.020	0.035	0.200	0.700	1.000
$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	0	0	0	0	0
$U_{x, y=0} \text{ (mm)}$	3.178	3.038	2.764	2.563	2.539
$P \text{ (N)}$	5.907	8.211	30.800	38.453	40.038

Çizelge 6.10 Sıkı Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanın Etkisi

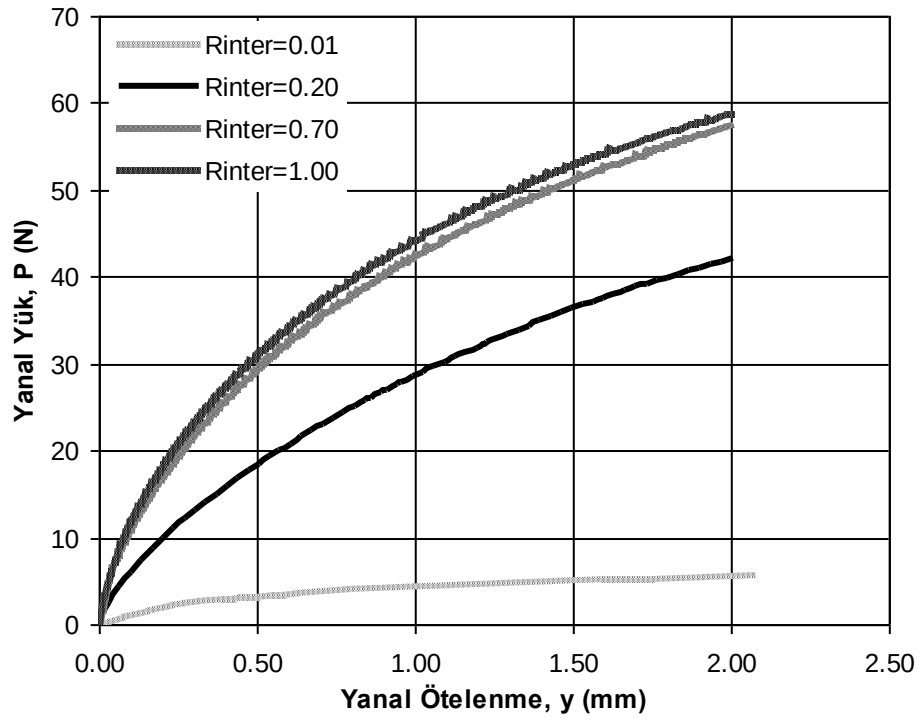
Analiz No	1	2	3	4
E_{referans} (N/cm ²)	1	1	1	1
$E_{\text{increment}}$ (N/cm ² /cm)	100	100	100	100
R_{inter}	0.01	0.20	0.70	1.00
ψ (°)	0	0	0	0
$U_{x, y=0}$ (mm)	3.477	2.681	2.445	2.424
P (N)	6.794	47.978	61.463	62.450

Şekil 6.11 ve 6.12’de gevşek ve sıkı kum zeminde kazık başındaki 1° dönme açısı için elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. R_{inter} katsayısının değerinin artmasına bağlı olarak kazık-zemin etkileşiminin artması ile birlikte hem zeminin mukavemeti artmakta hem de daha rijit bir yük-ötelenme davranışı elde edilmektedir. Buna karşılık; R_{inter} katsayısının değerinin azalması ile kazık-zemin etkileşimi ve bunların birlikte hareket edebilme kabiliyeti azalmaktadır. Şekil 6.13’de görüldüğü gibi kazık-zemin ara yüzeyindeki etkileşimin azalmasına bağlı olarak kazık ile zemin arasındaki sürtünme de azalmakta ve kazık zemine göre rölatif olarak daha büyük ötelenmeler yapmaktadır. R_{inter} katsayısının değerinin azalması sonucu kazığın dönme noktası derinliği de kazık ucuna doğru hareketlenmektedir.

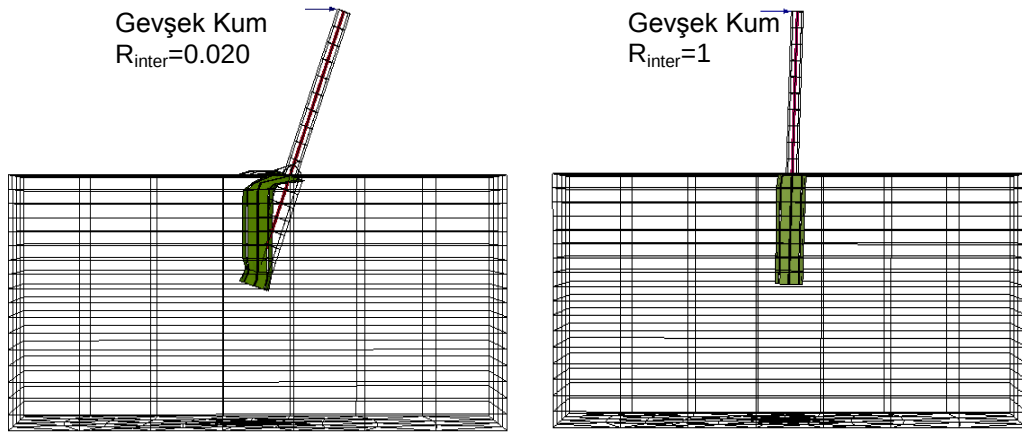
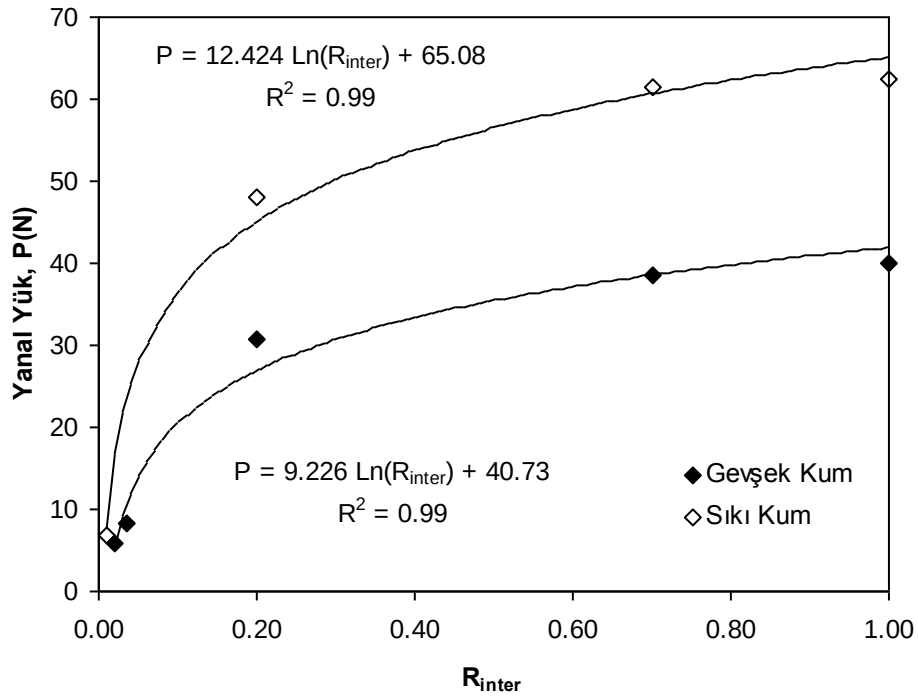
Şekil 6.14’de R_{inter} katsayısı ile yanal yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki görülmektedir. Kazık başındaki 1° dönme açısı için farklı R_{inter} değerlerinde gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edildikleri R_{inter} katsayıları ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 6.14’den de görüldüğü gibi R_{inter} -yanal yük ilişkisi non-lineer bir davranış sergilemektedir. Bu ilişkiyi ifade eden noktalara uydurulmuş olan eğri logaritmik bir fonksiyonla tanımlanmış olup hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda %99 değerinde yüksek bir korelasyon katsayısına sahiptir.



Şekil 6.11. Gevşek Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanının Etkisi



Şekil 6.12. Sıkı Kum Zeminde Ara Yüzey Elemanının Etkisi

Şekil 6.13. R_{inter} Katsayısının Kazık-Zemin Etkileşimine EtkisiŞekil 6.14. R_{inter} -Yanal Yük Taşıma Kapasitesi İlişkisi

6.3. Sayısal Analizler

Zeminin elastisite modülü, dilatasyon açısı ve R_{inter} katsayısı ile ilgili olarak yapılan parametrik çalışmalar sonucunda en güvenilir sayısal analiz sonuçlarının elde edilebileceği parametrik değerler tanımlanmıştır. Deneysel sonuçlara en yakın

sonuçlar elastisite modülünün derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı ve dilatasyon açısı değerinin sıfır kabul edildiği durumda elde edilmiştir. Gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilen parametrik çalışmalar sonrası seçilen parametreler Çizelge 6.11’de sunulmuştur. Bununla birlikte; üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunda ve kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisinin araştırıldığı analizlerde ara yüzey davranışlarında üniform kum zemin durumuna göre farklılıklar olacağından R_{inter} katsayıları bu analizler sırasında ayrıca tanımlanmıştır. Çizelge 6.11’de verilen R_{inter} katsayısı değerleri üniform kum zemin durumunda gerçekleştirilen analizler için geçerlidir.

Çizelge 6.11 Kum Zemin için Tanımlanan Parametreler

	Gevşek Kum	Sıkı Kum
$E_{ref.} (N/cm^2)$	1	1
$E_{increment} (N/cm^2/cm)$	62.400	100
$y_{ref.} (cm)$	0	0
$\psi (^{\circ})$	0	0
R_{inter}	0.035	0.200

6.3.1. Kazık Gömülü Uzunluğu

Kazık gömülü uzunluğunun kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine etkisini araştırmak için çapları aynı fakat gömülü uzunlukları farklı olan model kazıklar üzerinde analizler yapılmıştır. Analizler, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, $D=50mm$ çapındaki model çelik kazıkların $L=150mm$, $200mm$ ve $250mm$ gömülü uzunlukları için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde deneysel çalışma programı aynen modellenmiş olup yanal yük zemin yüzeyi üzerinden $300mm$ yükseklikte $D=25mm$ çapındaki dolu kesitli çelik çekme koluna etkitilmek sureti ile uygulanmıştır. Gevşek kum zemin durumunda $20 N$ değerinde bir yanal yük uygulanırken sıkı kum zemin durumunda

uygulanan yanal yük değeri 150 N dur. Uygulanan yanal yük değerleri deneysel çalışmalar sırasında gözlenmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri göz önünde tutularak belirlenmiştir.

Gevşek kum zemin durumunda belirlenen yük adımı sayısında yanal yük değeri tamamı ile uygulanmış olup zeminde göçme gözlenmemiştir. Gevşek kum zemin durumunda yapılan diğer analizlerde de zeminde göçme davranışı gözlenmemekte, analizler yük adımı sonuna kadar veya yanal yük değerinin tamamı uygulanana kadar devam etmektedir. Sıkı kum zeminde yapılan analizlerde ise belirli bir yük adımı sonunda zeminde göçme davranışı gözlenmektedir.

Gevşek kum zemin durumunda yapılan analizlerde zeminde göçme oluşmadığı için kazık başındaki dönme açısının 1° ve 2° olduğu durumlarda ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10'una eşit olduğu ($U_{0.10D}$) durumda yanal yük taşıma kapasitesi değerleri hesaplanarak Çizelge 6.12'de karşılaştırılmıştır. Sıkı kum zemin durumunda ise zeminde göçmenin meydana geldiği andaki yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile bu değere karşılık kazık başında elde edilen dönme açısı değerleri hesaplanarak Çizelge 6.13'de sunulmuştur. Çizelge 6.12 ve 6.13'de verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde kazık gömülü uzunluğunun artmasının rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesini artırdığı açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 6.12 Gevşek Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - $D=50\text{mm}$				
Kazık Boyu		$L = 150\text{mm}$	$L = 200\text{mm}$	$L = 250\text{mm}$
Yanal Yük (N)	1°	4.900	8.400	14.085
	2°	6.500	12.320	22.420
	$U_{0.10D}$	6.720	10.660	16.150

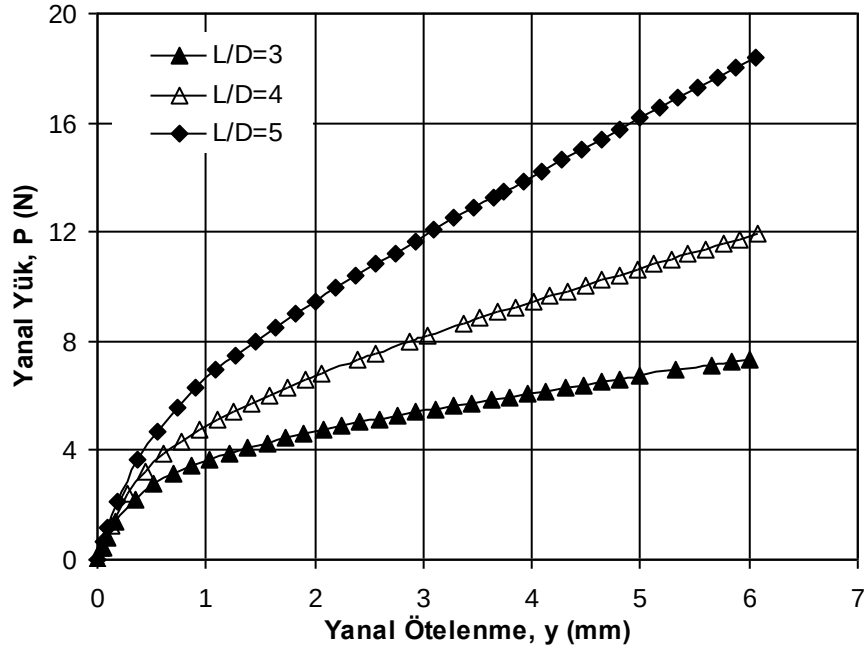
Çizelge 6. 13 Sıkı Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - $D=50\text{mm}$			
Kazık Boyu	$L = 150\text{mm}$	$L = 200\text{mm}$	$L = 250\text{mm}$
Yanal Yük (N)	$R (^{\circ})=4.511$ $P_{ult.} (N)= 34.050$	$R (^{\circ})=1.264$ $P_{ult.} (N)= 52.800$	$R (^{\circ})=1.201$ $P_{ult.} (N)= 91.800$

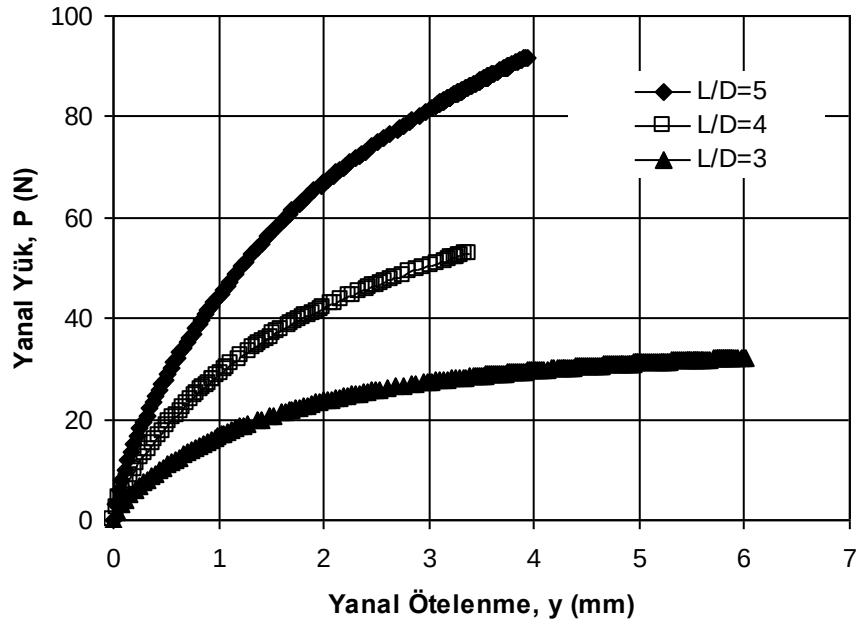
Gevşek kum zeminde kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda $L/D=3$ ile $L/D=4$ arasında yanal yük taşıma kapasitesi değeri $L/D=3$ 'e göre yaklaşık %90 artarken, $L/D=4$ ile $L/D=5$ arasında $L/D=4$ 'e göre yaklaşık %80 oranında artmaktadır. Sıkı kum zemin durumunda ise yanal yük taşıma kapasitesinin değeri $L/D=3$ ile $L/D=4$ arasında $L/D=3$ 'e göre %55, $L/D=4$ ile $L/D=5$ arasında $L/D=4$ 'e göre %75 oranında artmıştır.

Şekil 6.15 ve 6.16'da gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilmiş kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Şekil 6.15 ve 6.16 incelendiğinde hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda kazık gömülü uzunluğunun artması ile birlikte daha rijit bir yanal ötelenme-yanal yük davranışı elde edildiği görülmektedir.

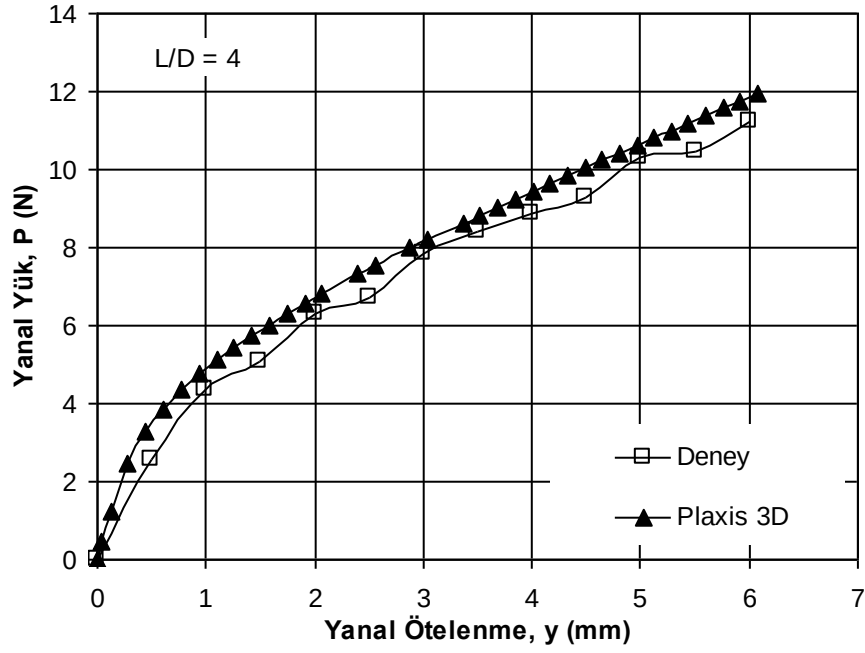
Analizler sonucunda, kazık başındaki ve çekme kolu üst kotundaki yanal ötelenme değerleri kullanılarak hesaplanmış olan dönme noktası derinlikleri karşılaştırıldığında gevşek kum zemin durumunda kazık gömülü uzunluğunun artması ile dönme noktası derinliğinin kazık ucuna doğru kaydığı ancak, sıkı kum zemin durumunda dönme noktası derinliğinin kazık gömülü uzunluğundan etkilenmediği görülmüştür. Gevşek kum zeminde kazık başındaki 2° 'lik dönme açısı için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sıkı kum zeminde göçme anında elde edilmiş değerler ile karşılaştırılarak relatif sıkılığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Öyle ki; $L/D=3$ durumunda sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi gevşek durumda elde edilen değer yaklaşık beş katı iken bu oran $L/D=4$ ve $L/D=5$ için yaklaşık dört kat kadardır.



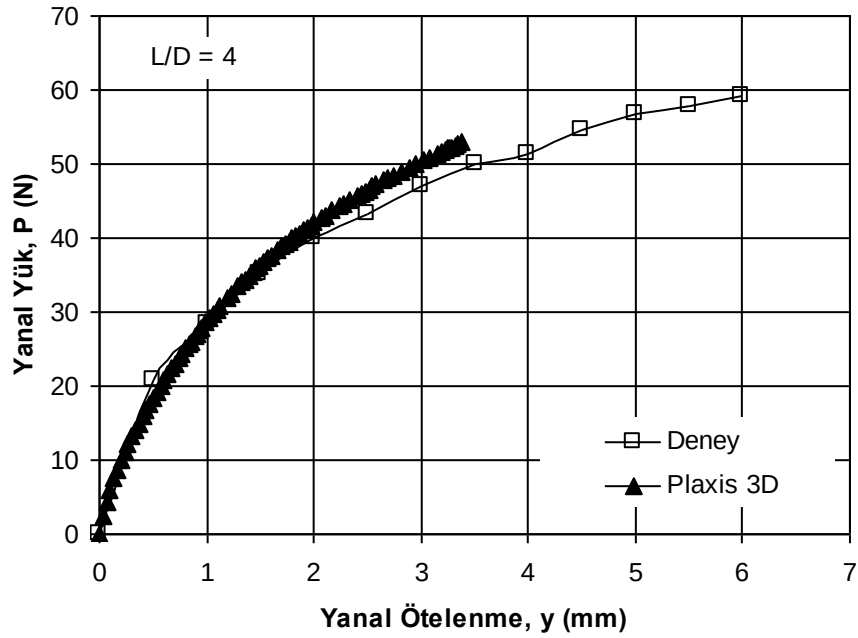
Şekil 6.15. Gevşek Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)



Şekil 6.16. Sıkı Kum Zeminde Kazık Gömülü Uzunluğunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)



Şekil 6.17. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Deneysel ve Sayısal Yanıl Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.18. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Deneysel ve Sayısal Yanıl Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Şekil 6.17 ve 6.18’de gevşek ve sıkı kum zeminde $L/D=4$ oranı için deneysel çalışmalarda elde edilmiş kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ile sayısal analizlerde elde edilmiş yanal yük-yanal ötelenme ilişkisinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.17 ve 6.18’den de görüldüğü gibi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda deneysel ve sayısal analiz eğrileri birbirleri ile iyi bir uyum sergilemektedir.

6.3.2. Kazık Çapı

Kazık çapının kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine etkisi gömülü uzunlukları aynı ancak çapları farklı olan model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen analizlerle araştırılmıştır. Analizler, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda $L=200\text{mm}$ uzunluğundaki model çelik kazıklar üzerinde $D=40\text{mm}$, 50mm ve 66.60mm çapları için yapılmıştır. Gevşek kum zemin durumunda uygulanan yanal yük değeri 20 N iken, sıkı kum zemin durumunda 150 N değerinde bir yanal yük uygulanmıştır. Gevşek kum zeminde yapılan analizlerde yanal yük değeri tamamı ile uygulanmış olup zeminde göçme gözlenmezken sıkı kum zeminde yapılan analizlerde belirli bir yükleme adımıyla zeminde göçme meydana gelmektedir.

Çizelge 6.14’de gevşek kum zemin durumunda kazık başındaki dönme açısının 1° ve 2° olduğu durumlarda ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10’una eşit olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri görülmektedir. Sıkı kum zemin için ise zeminde göçmenin meydana geldiği anda hesaplanmış olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ile bu yük değerlerine karşılık kazık başında elde edilmiş olan dönme açısı değerleri Çizelge 6.15’de sunulmuştur.

Çizelge 6.14 Gevşek Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

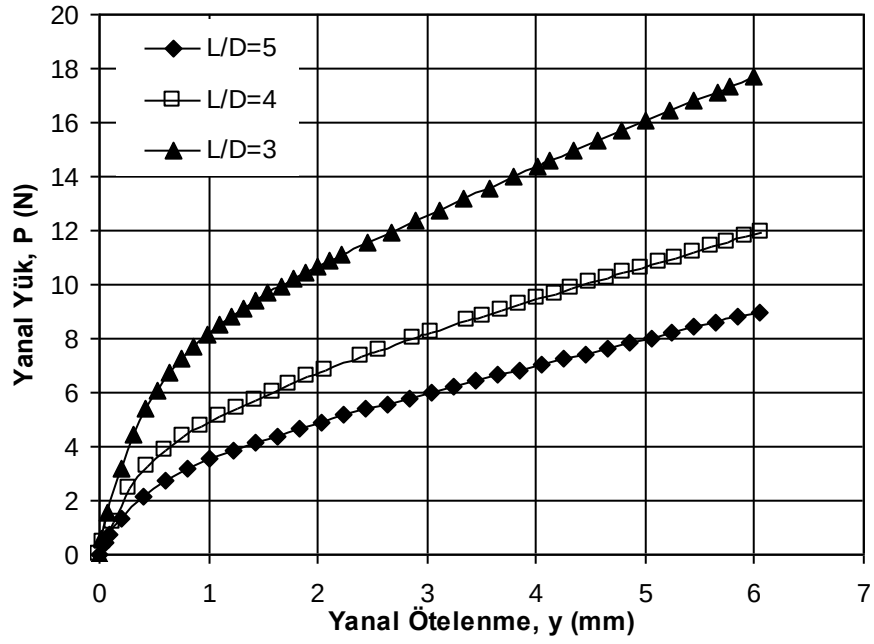
Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - $L=200\text{mm}$				
Kazık Çapı		D = 40mm	D = 50mm	D = 66.60mm
Yanal Yük (N)	1°	6.08	8.40	12.98
	2°	9.16	12.32	18.44
	$U_{0.10D}$	7.04	10.66	18.71

Çizelge 6.15 Sıkı Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

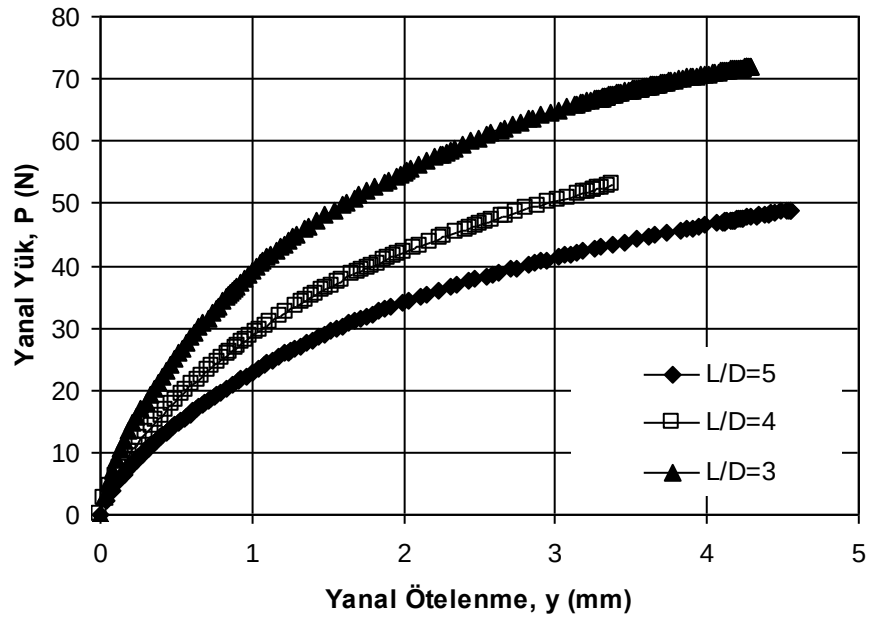
Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - $L=200\text{mm}$			
Kazık Çapı	D = 40mm	D = 50mm	D = 66.60mm
Yanal Yük (N)	R (°)=1.699 P _{ult.} (N)= 49.05	R (°)=1.264 P _{ult.} (N)= 52.80	R (°)=1.611 P _{ult.} (N)= 72.00

Çizelge 6.14 ve 6.15’de verilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde kazık çapındaki artışa bağlı olarak yanal yük taşıma kapasitesinin de önemli derecede arttığı görülmektedir. Gevşek kum zeminde kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda $L/D=5$ ile $L/D=4$ arasında yanal yük taşıma kapasitesi $L/D=5$ ’e göre yaklaşık olarak %35, $L/D=4$ ile $L/D=3$ arasında da $L/D=4$ ’e göre yaklaşık olarak %50 artmaktadır. Benzer şekilde, sıkı kum zeminde ise yanal yük taşıma kapasitesinin değeri $L/D=5$ ile $L/D=4$ arasında $L/D=5$ ’e göre yaklaşık olarak %8 artarken bu oran $L/D=4$ ile $L/D=3$ arasında $L/D=4$ ’e göre yaklaşık olarak %35 dir. Gevşek durumda yanal yük taşıma kapasitesi sıkı kum zemin durumuna göre daha büyük oranda artmaktadır.

Şekil 6.19 ve 6.20’de gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiş analizler sonucu elde edilmiş olan kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Şekil 6.19 ve 6.20’den de görüldüğü gibi kazık çapının artması ile birlikte yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri hem gevşek hem de sıkı kum zeminde daha rijit bir davranışı temsil etmektedir.



Şekil 6.19. Gevşek Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

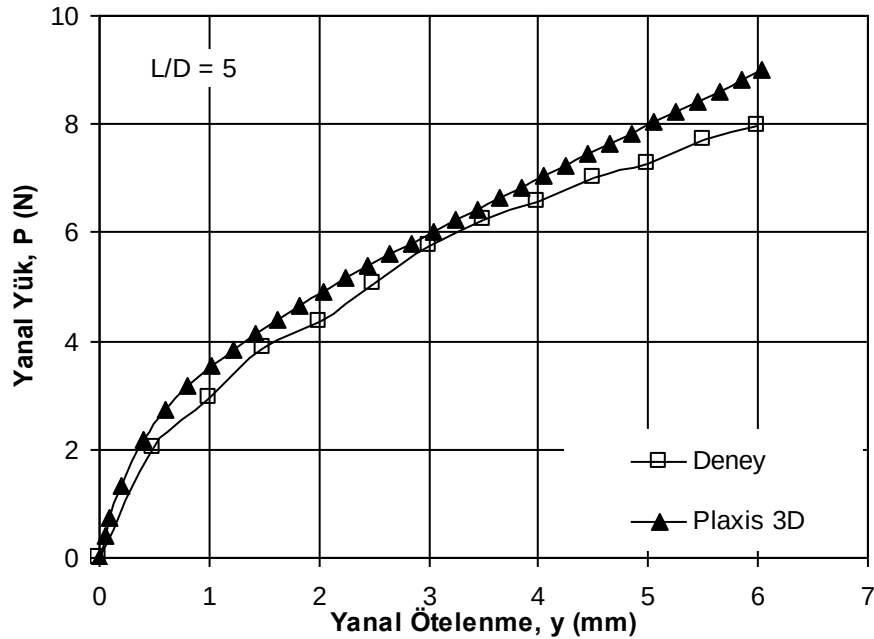


Şekil 6.20. Sıkı Kum Zeminde Kazık Çapının Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

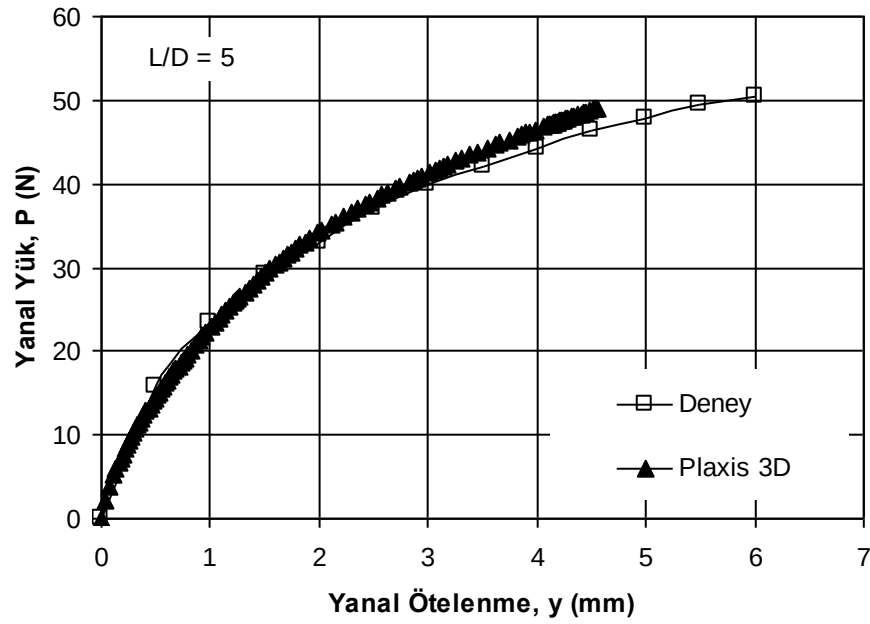
Kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri birlikte değerlendirildiğinde kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak yanal yük taşıma kapasitesinde daha büyük miktarda artış elde edildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Gevşek kum zeminde kazık başındaki 2°'lik dönme açısı için elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sıkı kum zeminde göçme anında elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ile karşılaştırıldığında relatif sıkılığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki önemli etkisi ortaya çıkmaktadır. Öyle ki; $L/D=5$ durumunda sıkı durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi gevşek durumda elde edilenin yaklaşık olarak beş katı iken bu oran $L/D=4$ ve $L/D=3$ için de yaklaşık olarak dört kattır.

Gevşek kum zeminde kazık çapının artması ile kazığın dönme noktası derinliği kazık ucuna doğru kaymakta iken sıkı kum zeminde dönme noktası derinliği kazık çapındaki değişimden etkilenmemektedir.



Şekil 6.21. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.22. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için DeneySEL ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Şekil 6.21 ve 6.22'de $L/D=5$ oranı için deneySEL çalışmalar sonucunda elde edilmiş kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisinin sayısal analizler sonucu elde edilmiş olan yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.21 ve 6.22'den de görüldüğü gibi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda deneySEL ve sayısal analiz eğrileri oldukça iyi bir uyum sergilemektedir.

6.3.3. Kesit Geometrisi

Kesit geometrisinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi dairesel ve kare en kesit geometrisine sahip model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen analizler ile sayısal olarak incelenmiştir. Analizler, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, $B=44.30\text{mm}$ ve $B=50\text{mm}$ genişliğinde ve $L=200\text{mm}$ uzunluğunda kare kesitli model çelik kazıklar ile $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=200\text{mm}$ uzunluğunda dairesel kesitli model çelik kazık üzerinde yapılmıştır. Gevşek kum zeminde gerçekleştirilen analizlerde uygulanan 20 N değerindeki yanal yük etkisinde zeminde göçme davranışı

gözlenmezken sıkı kum zemindeki analizlerde 150 N değerinde yanal yük uygulanmış ve belirli bir yük adımıda zeminde göçme meydana gelmiştir.

Analizlerden elde edilen sonuçlar, gevşek kum zemin için kazık başındaki 1° ve 2° 'lik dönme açısı durumlarında ve kazık başı yanal ötelenme değerinin kazık çapı ve/veya kazık genişliğinin %10'u olduğu durumda hesaplanmış yanal yük taşıma kapasitesi değerleri şeklinde Çizelge 6.16'da verilirken sıkı kum zemin için göçme anındaki yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ve kazık başı dönme açısı ilişkisi şeklinde Çizelge 6.17'de sunulmuştur. Çizelge 6.16 ve 6.17 incelendiğinde eşdeğer alan kabulünü temsil eden $B=44.30\text{mm}$ genişliğe sahip kare kazık ile çapa eşdeğer genişliği temsil eden $B=50\text{mm}$ genişliğindeki kare kazığın her ikisinin de hem gevşek hem de sıkı durumda dairesel kesitli kazığa göre daha büyük değerde yanal yük taşıma kapasitesi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Öyle ki; $B=44.30\text{mm}$ genişliğindeki kare kazığın gevşek kumda 2° 'lik dönme açısı için elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi dairesel kazığinkinden yaklaşık %20 daha büyük iken, sıkı kumda bu oran yaklaşık %8 dir. Aynı karşılaştırma $B=50\text{mm}$ genişliğindeki kare kazık ile dairesel kazık arasında yapıldığında kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin gevşek kumda %49 sıkı kumda ise %22 daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara dayanarak, gevşek kum zemin durumunda kesit geometrisinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

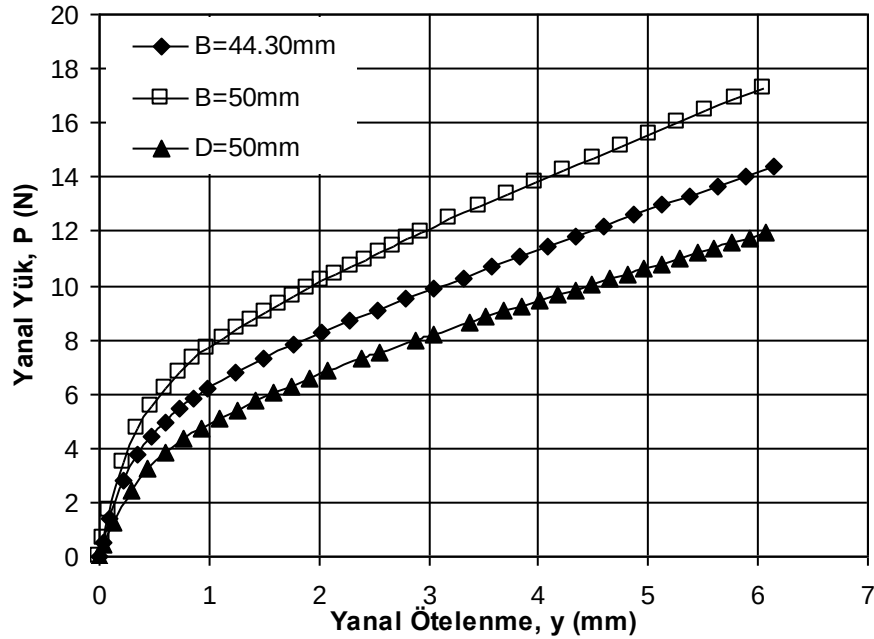
Çizelge 6.16 Gevşek Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ – Çelik Model Kazık – $L=200\text{mm}$				
Kazık Çapı veya Genişliği		$B = 44.30\text{mm}$	$B = 50\text{mm}$	$D = 50\text{mm}$
Yanal Yük (N)	1°	10.300	12.751	8.400
	2°	15.014	18.371	12.320
	$U_{0.10D}$	12.073	15.580	10.660

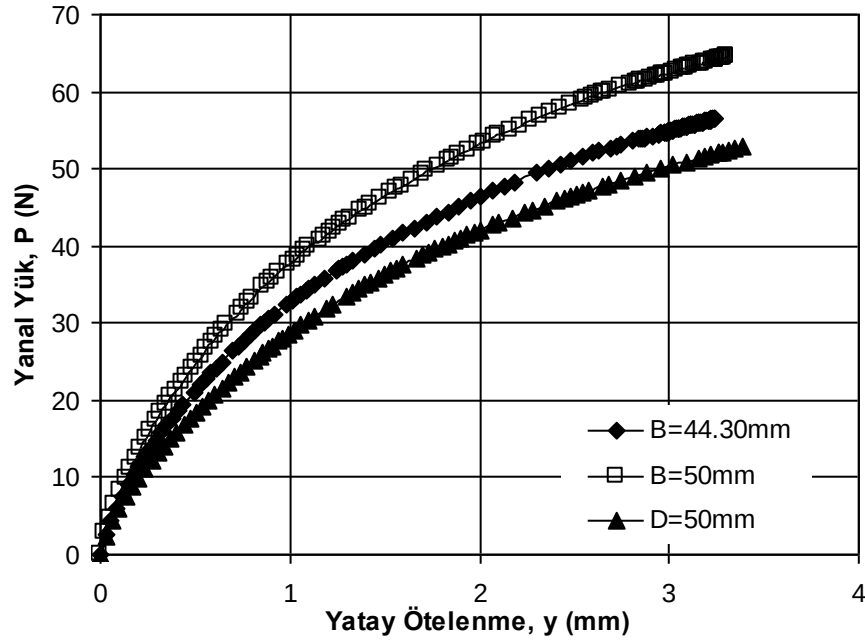
Çizelge 6.17 Sıkı Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - $L=200\text{mm}$				
Kazık Çapı veya Genişliği		$B = 44.30\text{mm}$	$B = 50\text{mm}$	$D = 50\text{mm}$
Yanal Yük (N)	1°	$R (^\circ)=1.199$ $P_{ult.} (N)= 56.550$	$R (^\circ)=1.221$ $P_{ult.} (N)= 64.500$	$R (^\circ)=1.264$ $P_{ult.} (N)= 52.800$
	2°			
	$U_{0.10D}$			

Gevşek kum zeminde kazık başındaki 2° 'lik dönme açısı durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sıkı kum zeminde göçme anında elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, relatif sıkılığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Kare kazıkların sıkı kum zemindeki yanal yük taşıma kapasiteleri gevşek kum zemindeki yanal yük taşıma kapasitelerinin yaklaşık dört katıdır.



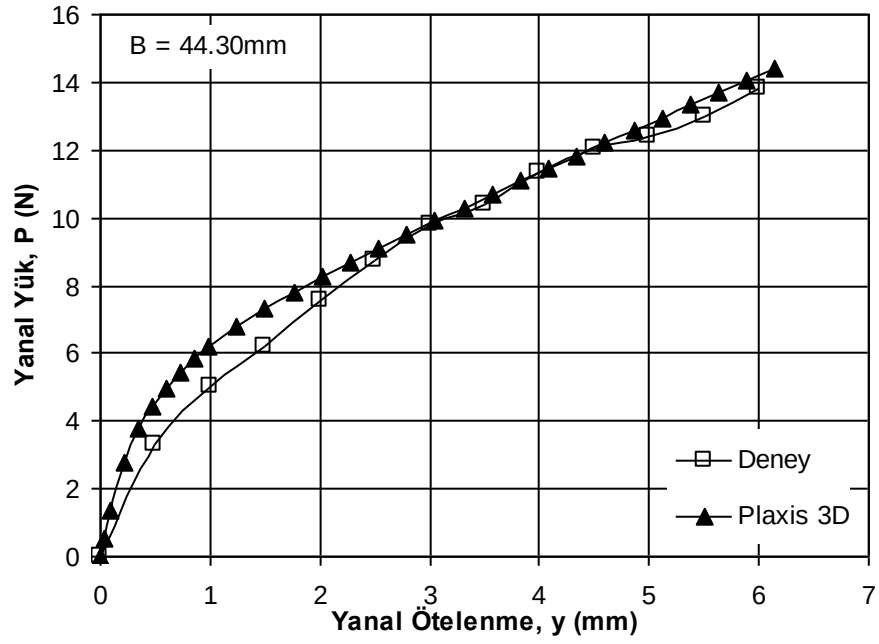
Şekil 6.23. Gevşek Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)



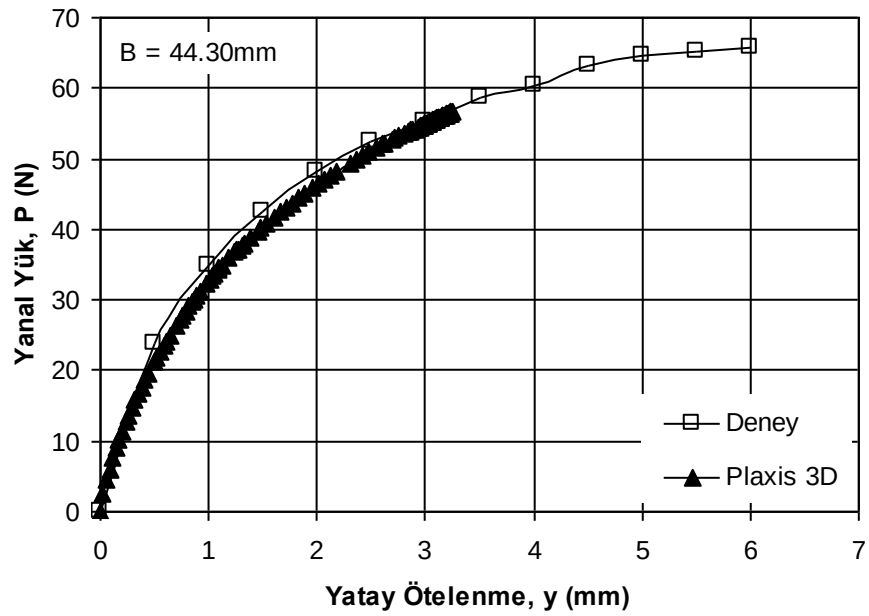
Şekil 6.24. Sıkı Kum Zeminde Kesit Geometrisinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Şekil 6.23 ve 6.24’de gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiş analizler sonucu elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Kare en kesitli kazıkların yanal yük-yanal ötelenme davranışlarının dairesel en kesitli kazığa göre daha rijit olduğu, bununla birlikte kare kazığın genişliğinin artması ile bu davranışın daha da rijit bir hal aldığı görülmektedir. Kare kazığın genişliğinin artması yanal yük taşıma kapasitesine de artırmaktadır. Kare kazıkların dönme noktası derinliği gevşek durumda dairesel kazığinkinden daha derinde iken sıkı kum zemin durumunda dönme noktası derinliği tüm kazıklar için hemen hemen aynı derinliktedir.

Şekil 6.25 ve 6.26’da B=44.30mm genişliğindeki kare kazık için gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiş olan analizlerden elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin deneysel yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.25. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kesit Geometrileri için DeneySEL ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.26. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kesit Geometrileri için DeneySEL ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Şekil 6.25 ve 6.26'dan da görüldüğü gibi analizlerden elde edilen davranış eğrileri deneysel eğriler ile oldukça iyi bir uyum içerisinde.

6.3.4. Tabakalı Zemin Durumu

Üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin içerisinde yer alan $D=50\text{mm}$ çapında ve $L=200\text{mm}$ uzunluktaki model çelik kazık üzerinde gerçekleştirilen yanal yükleme deneyleri deneysel çalışma programına benzer şekilde Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak sayısal analizleri yapılmıştır.

Analizlerde, deneysel çalışma programı aynen uygulanmış olup yanal yük zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte $D=25\text{mm}$ çapındaki dolu kesitli çelik çekme koluna etkitilmek sureti ile uygulanmıştır. Tabakalı kum zemin durumunda uygulanan yanal yük değeri 75 N olup deneysel çalışmalar sırasında gözlenmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri göz önünde tutularak belirlenmiştir. Üniform gevşek kum zeminde yapılan analizlerde yanal yük değeri 20 N iken, üniform sıkı kum zeminde yapılan analizlerde 150 N değerinde yanal yük uygulanmıştır. Üniform kum zemin durumunda yapılmış olan analizler yanal kuvvet değerinin 75 N olduğu durum için yeniden gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.18'de, üniform kum zemin durumunda 75 N 'luk yanal yük için yeniden yapılmış olan analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri önceki analizlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve uygulanan yanal yük değeri ile bu yükün uygulanması için seçilen yükleme adım sayısının sayısal analizlerden elde edilen davranış üzerinde hemen hemen hiç bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 6.18 Farklı Yanal Yük Değerleri ve Farklı Yükleme Adımlarının Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

		Gevşek Kum- $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$		Sıkı Kum- $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$	
Yanal Yük (N)		20	75	150	75
Seçilen Yük Adımı		250	500	500	500
Yanal Yük (N)	1°	8.400	8.184	R (°)=1.264 P _{ult.} (N)= 52.800	R (°)=1.240 P _{ult.} (N)= 52.425
	2°	12.320	11.886		
	U _{0.10D}	10.660	10.656		

Üniform kum zemin durumunda zemin elastisite modülünün derinlik ile doğrusal olarak arttığı kabul edilerek analizler yapılmıştır. Gevşek kum zemin durumunda $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$, $E_{\text{increment}}=62.400 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve $y_{\text{ref.}}=0$ değerleri kullanılırken sıkı kum zeminde $E_{\text{referans}}=1 \text{ N/cm}^2$, $E_{\text{increment}}=100 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ ve $y_{\text{ref.}}=0$ değerleri kullanılmıştır. Üniform kum zemin durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin tabakalı kum zemin durumunda elde edilen değerlerle birlikte değerlendirilebilmesi için tabakalı kum zemin durumundaki analizlerde de elastisite modülünün derinlikle birlikte doğrusal olarak arttığı kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan E_{referans} , $E_{\text{increment}}$ ve $y_{\text{ref.}}$ parametreleri için tanımlanan sayısal değerlerin elde edilmesinde kullanılan hesaplama yaklaşımı üstte 100mm kalınlığında gevşek kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumu için örneklendirilmiştir.

Hem gevşek hem de sıkı kum zemin için kullanılan E_{50} değerleri 100 kPa değerindeki hücre basıncında gerçekleştirilmiş standart üç eksenli drenajlı deneylerden elde edilen gerilme-deformasyon eğrilerine göre tanımlanmıştır. Bu yüzden; öncelikle, tabakalı kum zemin durumunda 100 kPa'lık hücre basıncının hangi derinlikte elde edileceği basit bir yaklaşımla (6.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 1/20 ölçeğindeki model boyutlarda 100mm kalınlıktaki gevşek kum tabakasının prototip ölçekteki karşılığı 2m'dir.

$$(15.03 \text{ kN/m}^3 \times 2\text{m}) + (17.06 \text{ kN/m}^3 \times H) = 100 \text{ kN/m}^2 \quad (6.1)$$

Bu denklemin çözümünden elde edilen H derinliği 4.099m olup model boyutlarda H=200mm tabaka kalınlığına karşılık gelmektedir. 100mm derinliğindeki gevşek kum tabakası boyunca elastisite modülünün derinlik ile beraber doğrusal olarak arttığı kabul edilerek sıkı kum tabakası başlangıcındaki elastisite modülü değeri (6.2) eşitliği ile hesaplanmıştır.

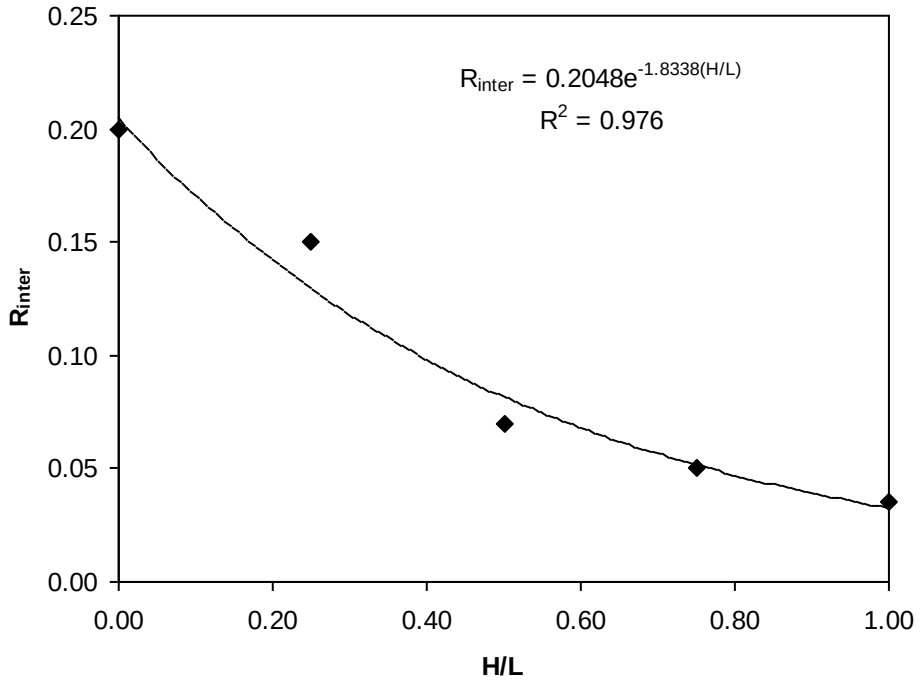
$$E=1 \text{ N/cm}^2 + (10\text{cm} \times 62.400 \text{ N/cm}^2/\text{cm}) = 625 \text{ N/cm}^2 \quad (6.2)$$

Elde edilen bu elastisite modülü değeri referans elastisite modülü olarak belirlenmiştir. Sıkı kum zemin tabakasının başlangıcındaki elastisite modülü değeri E_{referans} olarak seçildiğinden $y_{\text{ref.}}$ değeri de -10cm olacaktır. Bu durumda, elastisite modülünün sıkı kum zemin içerisindeki artım miktarı $E_{\text{increment}}$ da (6.3) eşitliği kullanılarak $118.750 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$ elde edilecektir.

$$E_{50} = 3000 \text{ N/cm}^2 = 625 \text{ N/cm}^2 + (20\text{cm} \times E_{\text{increment}}) \quad (6.3)$$

Kazık-zemin ara yüzey davranışı zeminin sıkılığından etkilenmektedir. Üniform kum zemin durumunda elde edilen R_{inter} katsayılarının tabakalı kum zemin durumunda kullanılmasının uygun olmadığı dolayısı ile tabakalı kum zemin durumunda tüm zemin profili için kullanılabilecek bir R_{inter} katsayısının tanımlanması gerektiği düşünülmüştür.

R_{inter} katsayıları, sayısal analizler sonucu elde edilen yanal yük-yanal ötelenme eğrilerinin deneysel eğriler ile kalibre edilmesi sureti ile her bir tabakalı kum zemin durumu için yeniden belirlenmiştir. Şekil 6.27’de H/L- R_{inter} katsayısı ilişkisi görülmektedir. Şekil 6.27’den görüldüğü gibi R_{inter} katsayısının H/L ile değişimi korelasyon katsayısı %98 gibi yüksek bir değere sahip olan üstel bir fonksiyonla tanımlanmıştır.



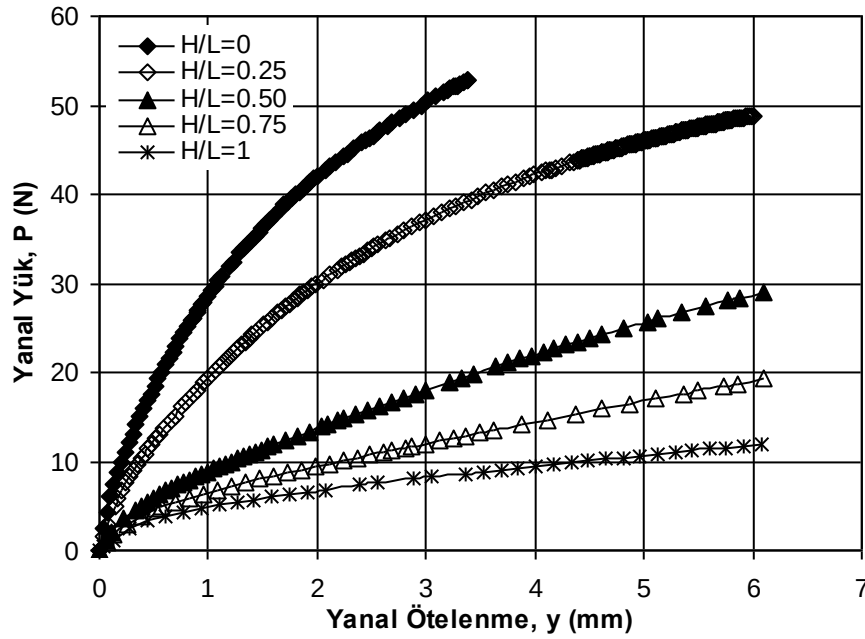
Şekil 6.27. Tabakalı Kum Zemin Durumunda R_{inter} Katsayısının Değişimi

Üniform gevşek kum zemin ve tabakalı kum zemin durumlarında yapılan analizlerde zeminde göçme davranışı gözlenmediği için kazık başındaki dönme açısının 1° ve 2° olduğu durumlarda ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10'una eşit olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 6.19'da sunulmuştur. Çizelge 6.19'da üniform sıkı kum zemin durumu için göçme anındaki yanal yük taşıma kapasitesi değeri ve buna karşılık elde edilen dönme açısı kullanılmaktadır. Çizelge 6.19'dan görüldüğü gibi üstte yer alan gevşek kum tabakası kalınlığının artması yanal yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerine göre $H/L=0$ ile $H/L=0.25$ arasında yanal yük taşıma kapasitesindeki azalma $H/L=0$ 'a göre %9 iken bu oran $H/L=0.25$ ile $H/L=0.50$ arasında %40, $H/L=0.50$ ile $H/L=0.75$ arasında %32 ve $H/L=0.75$ ile $H/L=1$ arasında %38 dir. Üstte yer alan gevşek kum tabakası ağırlığının artması kazık başındaki yanal ötelenme miktarını artırmakta ve kazığın dönme noktası derinliği kazık ucuna doğru hareketlenmektedir.

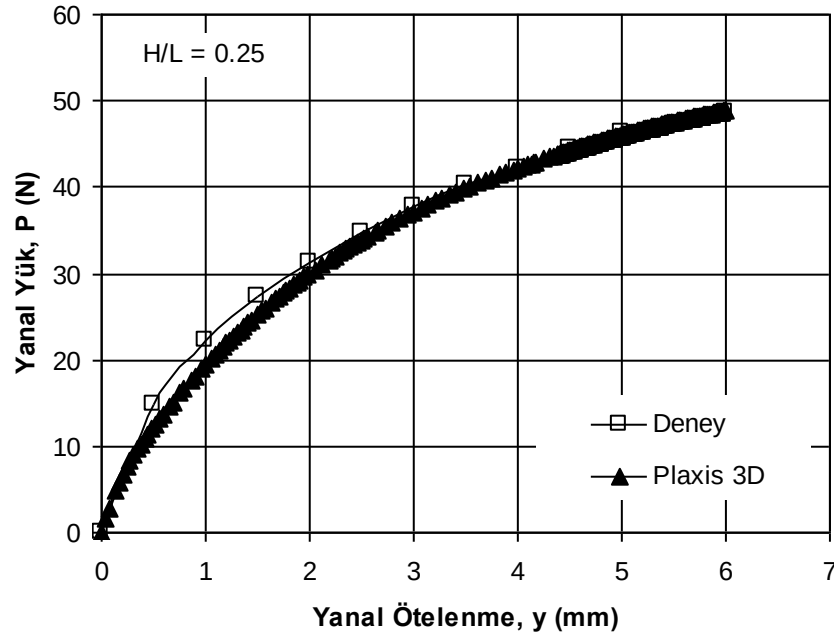
Çizelge 6.19 Tabakalı Kum Zemin Durumunda Yanal Yük Taşıma Kapasitesi Değerleri (Plaxis 3D Foundation)

H, Gevşek Kum Tabakası Kalınlığı-L, Kazık Gömülü Uzunluğu- D=50mm - L=200mm						
Yanal Yük (N)		H/L=0 $R_{inter}=0.200$	H/L=0.25 $R_{inter}=0.150$	H/L=0.50 $R_{inter}=0.070$	H/L=0.75 $R_{inter}=0.050$	H/L=1 $R_{inter}=0.035$
	1°	R (°)=1.240 $P_{ult.} (N)= 52.425$	35.900	17.967	12.163	8.184
	2°		47.850	28.655	19.376	11.886
	$U_{0.10D}$		45.975	25.725	16.737	10.656

Şekil 6.28’de tabakalı kum zemin durumunda kazık başındaki 2°’lik dönme açısı için elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Şekil 6.28’den görüldüğü gibi, gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri daha yumuşak bir davranış sergilemektedir. Şekil 6.29’da H/L=0.25 için deneysel çalışmalardan elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ile sayısal analizlerden elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkisinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.29’dan görüldüğü gibi deneysel ve sayısal analiz eğrileri birbirleri ile oldukça iyi bir uyum sergilemektedir.



Şekil 6.28. Tabakalı Zemin Durumunun Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi



Şekil 6.29. Tabakalı Kum Zemin Durumunda $H/L=0.25$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

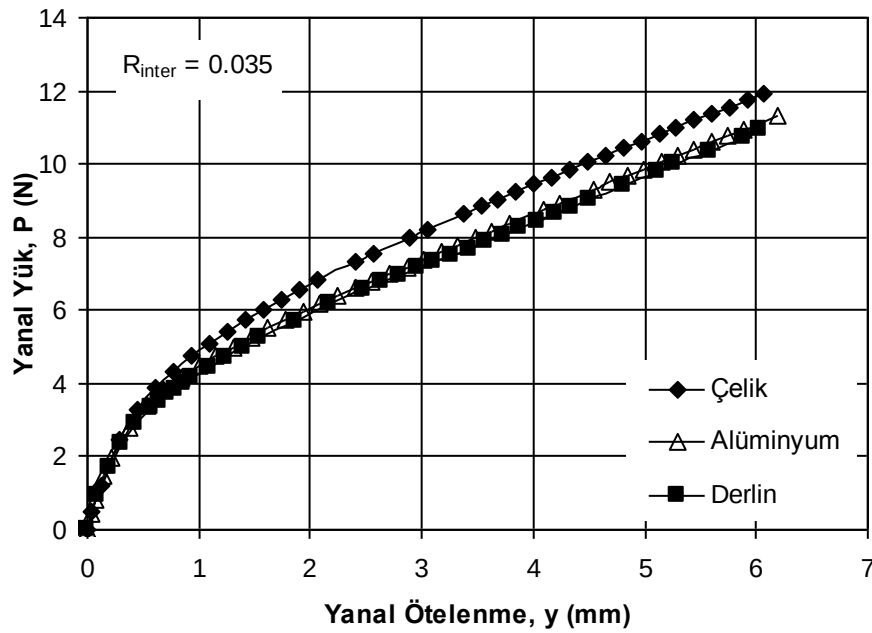
6.3.5. Kazık Malzemesi

Kazık elemanın imal edildiği malzemenin kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda çelik, alüminyum ve derlin malzemeden imal edilmiş model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen bir seri analiz ile araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan model kazıkların tamamı $D=50\text{mm}$ çapa ve $L=200\text{mm}$ gömülü uzunluğa sahiptir. Çekme kolu, model kazığın imal edildiği malzemeden olup gevşek kum durumunda 20 N sıkı kum durumunda ise 150 N değerindeki yanal yük zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte çekme koluna etkitilmek sureti ile modellenmiştir.

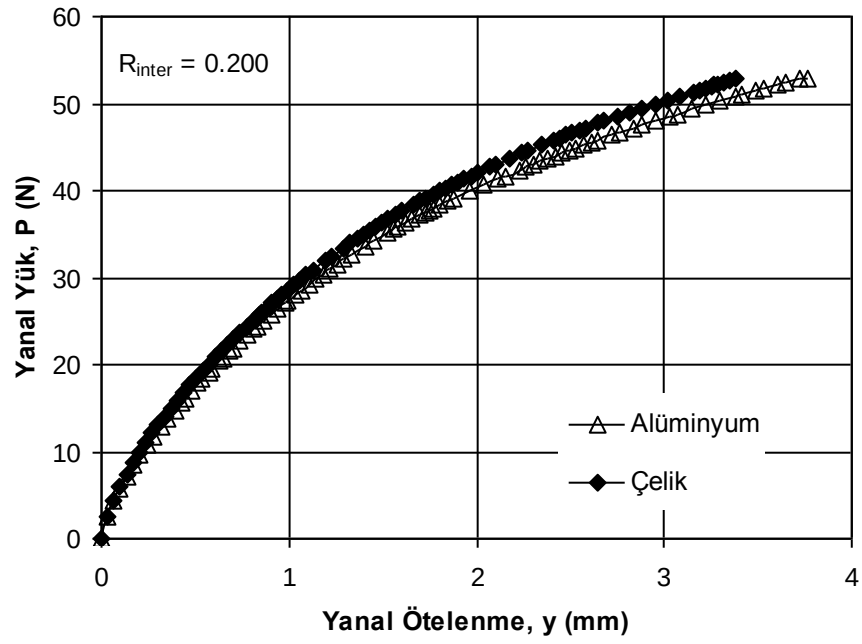
Kazığın imal edildiği malzemenin değişmesi, öncelikle, kazığın ağırlığını ve kazığın eğilme rijitliğini değiştirecektir. Eğilme rijitliği, özellikle, yanal yüke maruz uzun kazıkların davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olup rijit kısa kazıkların yanal yük etkisindeki davranışını ciddi derecede etkilememektedir. Kazık ağırlığı ise

büyük devrilme momentlerine maruz rijit kısa kazıklarda stabiliteyi artırıcı bir etkiye sahiptir.

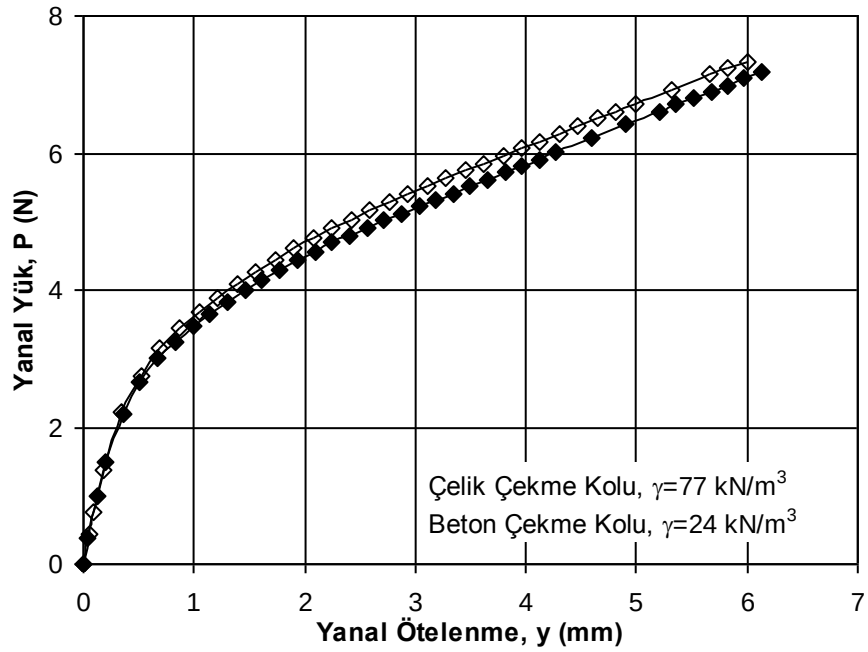
Alüminyum ve derlin model kazıklar üzerindeki analizler ilk olarak çelik model kazık durumunda tanımlanmış olan R_{inter} katsayıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.30'da gevşek kum zemin durumunda çelik, alüminyum ve derlin model kazıklar için elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri Şekil 6.31'de ise sıkı kum zemin durumunda çelik ve alüminyum model kazıklar için elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Şekil 6.32'de ise $D=50\text{mm}$ çapındaki ve $L=150\text{mm}$ gömülü uzunluğundaki model çelik kazıkta çekme kolu malzemesinin yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışına etkisini gösteren yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri verilmiştir. Şekil 6.30, 6.31 ve 6.32'den görüldüğü gibi, model kazık ağırlığının değişmesi yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerini önemli derecede etkilememiştir.



Şekil 6.30. $R_{inter}=0.035$ için Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri (Plaxis 3D Foundation)



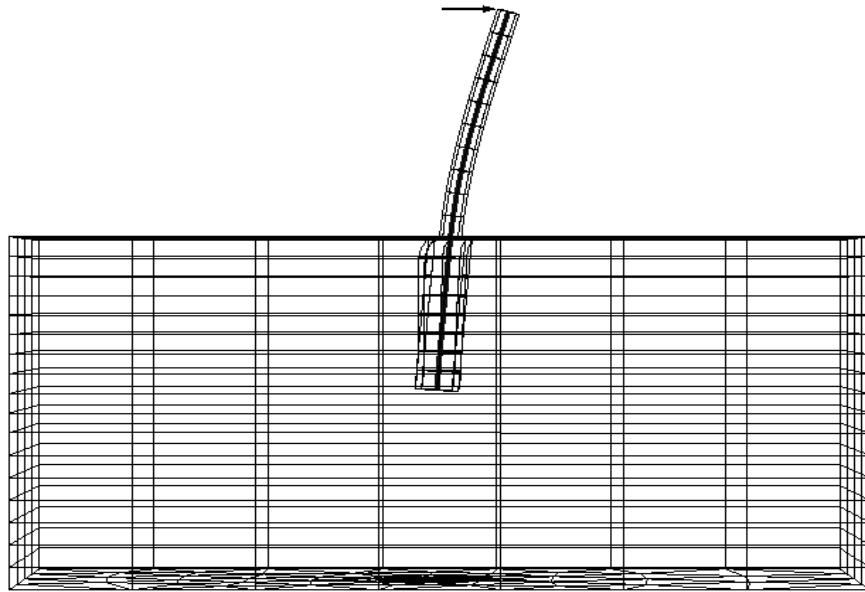
Şekil 6.31. $R_{inter}=0.200$ için Sıkı Kum Zeminde Elde Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri (Plaxis 3D Foundation)



Şekil 6.32. Farklı Çekme Kolu Malzemesi Durumunda Gevşek Kum Zeminde Elde Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri

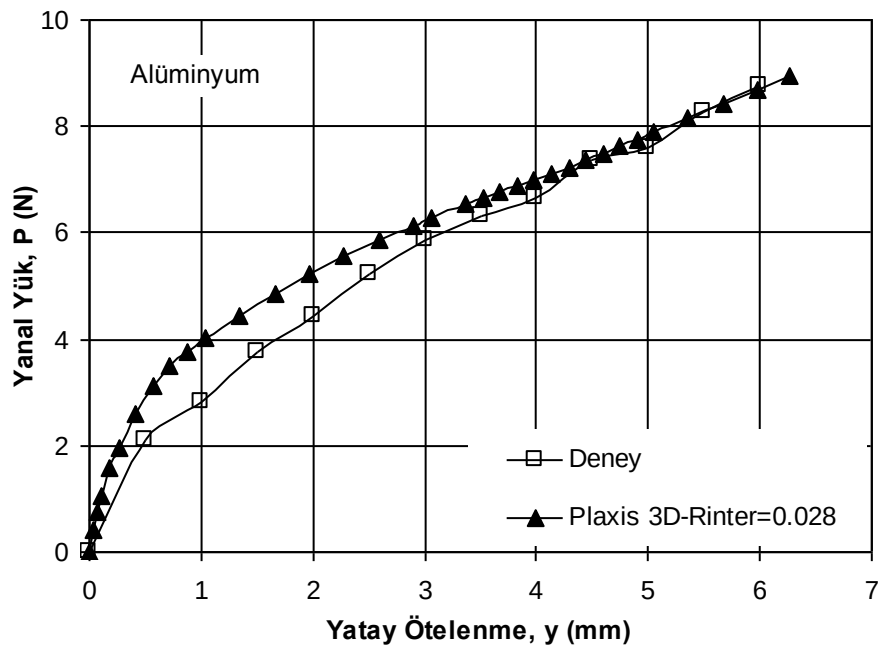
Sıkı kum zemin durumunda model derlin kazık üzerinde gerçekleştirilen analizler belirli bir yük adımından sonra iteratif işlem devam ettirilemediği için tamamlanamamıştır. Analizin sonlandırılmasının ardından Şekil 6.33’de verilen deforme şekil incelendiğinde, sıkı kum zemin durumunda derlin çekme kolunun uygulanan yanal yük etkisinde önemli derecede sehim yaptığı ve sistemin yanal yük etkisinde bir bütün olarak dönemediği dolayısı ile kısa kazık davranışının sergilenemediği görülmüştür. Bu davranışın benzeri deneysel çalışmalarda da gözlenmiştir.

Kazık-zemin ara yüzey davranışı kazığın imal edildiği malzemeden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu yüzden; hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, farklı R_{inter} değerleri için gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri deneysel yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılarak alüminyum ve derlin model kazıklar için kullanılacak R_{inter} katsayısı değerleri kalibre edilmiştir. Buna göre; gevşek kum zemin durumunda alüminyum model kazık için $R_{inter}=0.028$ ve derlin model kazık için de $R_{inter}=0.025$ değerleri elde edilmişken, sıkı kum zemin durumunda alüminyum model kazık için $R_{inter}=0.120$ değeri elde edilmiştir.



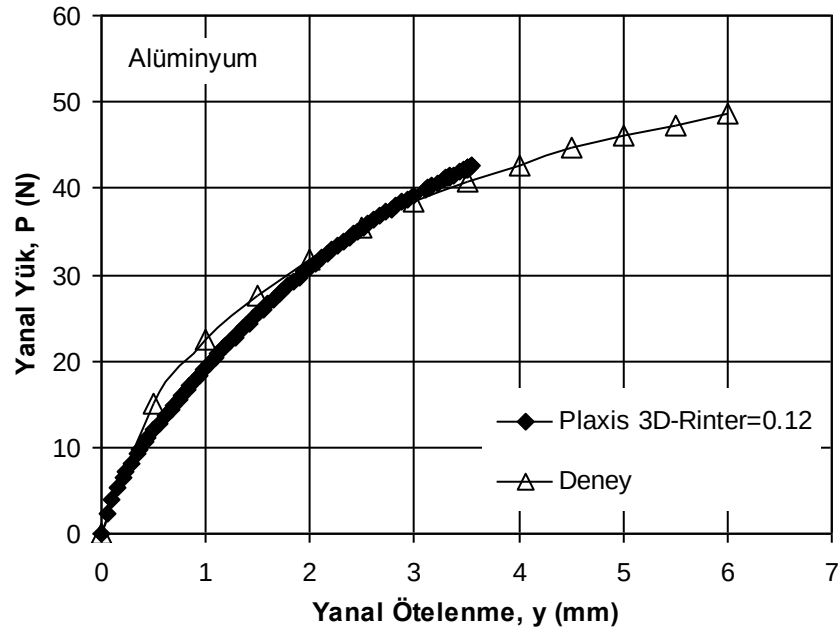
Şekil 6.33. Sıkı Kum Zeminde Yanal Yüke Maruz Model Derlin Kazık

Şekil 6.34 ve 6.35’de gevşek ve sıkı kum zemin durumunda alüminyum model kazık için tanımlanmış R_{inter} katsayısı değerlerine göre sayısal analizlerden elde edilen yanal yük-yanal ötelenme davranışlarının deneysel çalışmalardan elde edilmiş yanal yük-yanal ötelenme davranışları ile ilişkisi görülmektedir. Şekil 6.34 ve 6.35’den görüldüğü gibi deneysel ve sayısal yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri iyi bir uyum sergilemektedir.



Şekil 6.34. Gevşek Kum Zeminde Alüminyum Model Kazık için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Gevşek kum zemin durumunda yapılan analizlerde kazık başındaki dönme açısının 1° ve 2° olduğu durumlarda ve kazık başındaki yanal ötelenme değerinin kazık çapının %10’una eşit olduğu durumda yanal yük taşıma kapasitesi değerleri hesaplanarak Çizelge 6.20’de verilmiştir. Sıkı kum zemin durumunda ise zeminde göçmenin meydana geldiği andaki yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile bu değere karşılık kazık başında elde edilen dönme açısı değeri hesaplanarak Çizelge 6.21’de sunulmuştur.



Şekil 6.35. Sıkı Kum Zeminde Alüminyum Model Kazık için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Çizelge 6.20 ve 6.21’de verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında kazık ağırlığının artmasının yanal yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Gevşek kum zeminde kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda derlin kazık ile alüminyum kazık arasında derlin kazığa göre yanal yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak %20 artarken, alüminyum ve çelik model kazık arasında alüminyum kazığa göre yaklaşık olarak %37 artmaktadır. Benzer şekilde, sıkı kum zemin durumunda ise çelik kazığın yanal yük taşıma kapasitesi alüminyum kazığa göre yaklaşık %25 daha büyük elde edilmiştir.

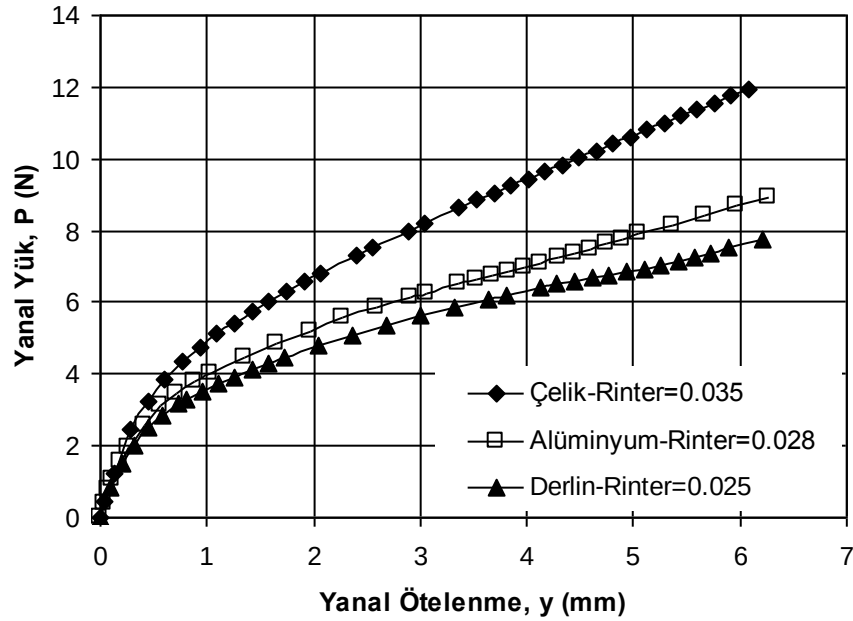
Şekil 6.36 ve 6.37’de gevşek ve sıkı kum zeminde gerçekleştirilen analizlerden elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri görülmektedir. Şekil 6.36 ve 6.37 incelendiğinde hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda kazık ağırlığının artması ile daha rijit bir yanal yük-yanal ötelenme davranışı elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.20 Gevşek Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

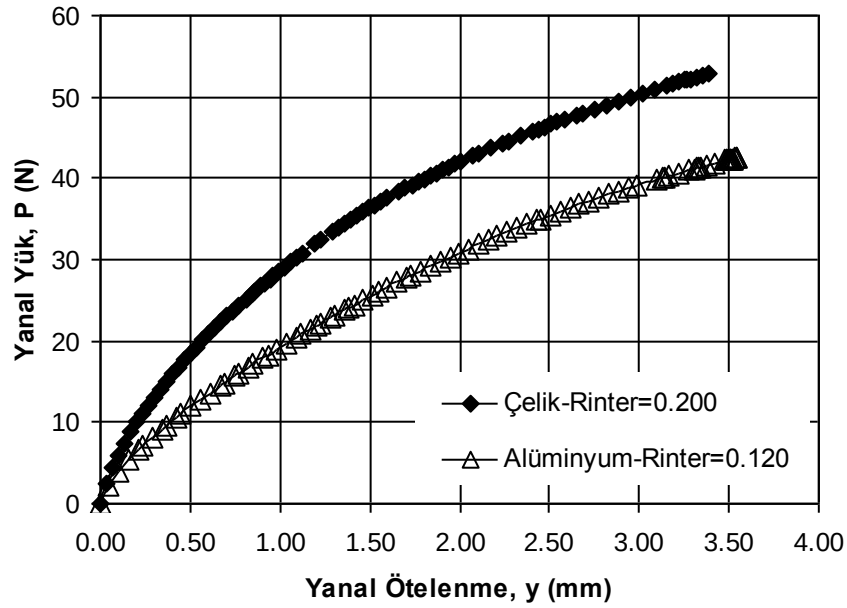
Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ - $L=200\text{mm}$ - $D=50\text{mm}$				
Kazık Malzemesi		Derlin	Alüminyum	Çelik
Yanal Yük (N)	1°	5.552	6.342	8.400
	2°	7.460	8.977	12.320
	$U_{0.10D}$	6.878	7.900	10.660

Çizelge 6.21 Sıkı Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - $L=200\text{mm}$ - $D=50\text{mm}$		
Kazık Malzemesi	Alüminyum	Çelik
Yanal Yük (N)	R (°)=1.332 $P_{ult.} (N)= 42.600$	R (°)=1.264 $P_{ult.} (N)= 52.800$



Şekil 6.36. Gevşek Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundatin)



Şekil 6.37. Sıkı Kum Zeminde Kazık Malzemesinin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi (Plaxis 3D Foundation)

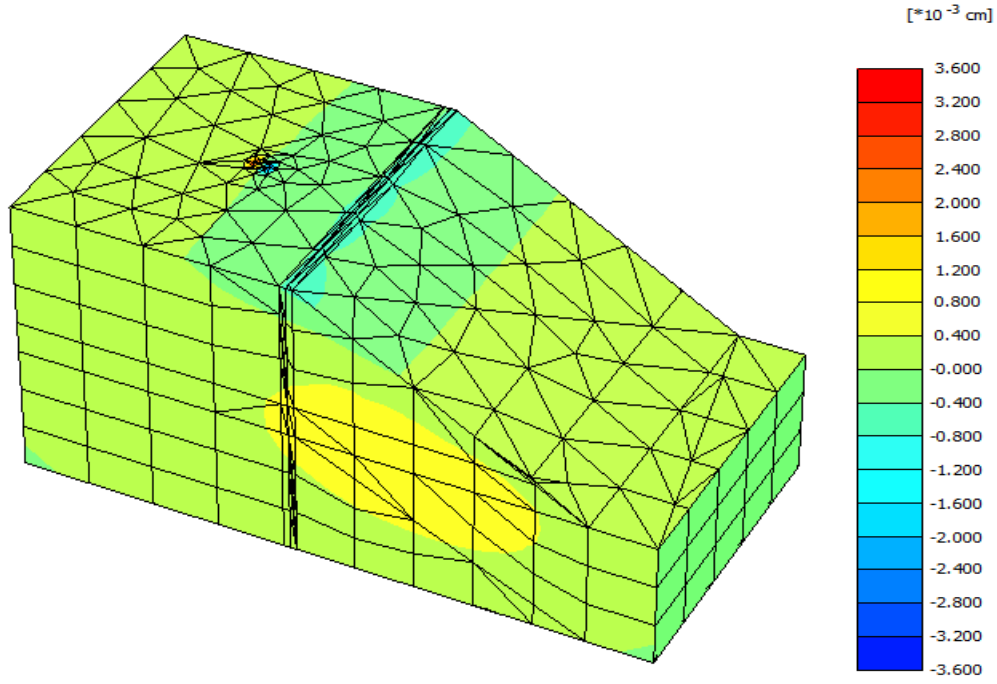
6.3.6. Şevli Durum

30°' lik bir açı ile şevlendirilmiş gevşek kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazığın şev tepesine uzaklığının kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi bir seri analiz yapılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma programına benzer şekilde, $D=50\text{mm}$ çapındaki ve $L=200\text{mm}$ gömülü uzunluğundaki model çelik kazık şev tepesinden $0.5D$, $1D$, $2D$ ve $3D$ uzaklıklara yerleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri şevsiz durum olarak adlandırılan, zemin yüzeyinin düz olduğu üniform gevşek kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile karşılaştırılarak şev etkisinin ortadan kalktığı yatay mesafe araştırılmıştır. Kazığın şev tepesine uzaklığı, kazık dış yüzü ile şev tepesi arasındaki yatay mesafedir. Analizlerde uygulanan yanal yük değeri 60 N olup zemin yüzeyi üzerinden 300mm yükseklikte dolu dairesel kesitli çelik çekme koluna etkitilmek sureti ile modellenmiştir.

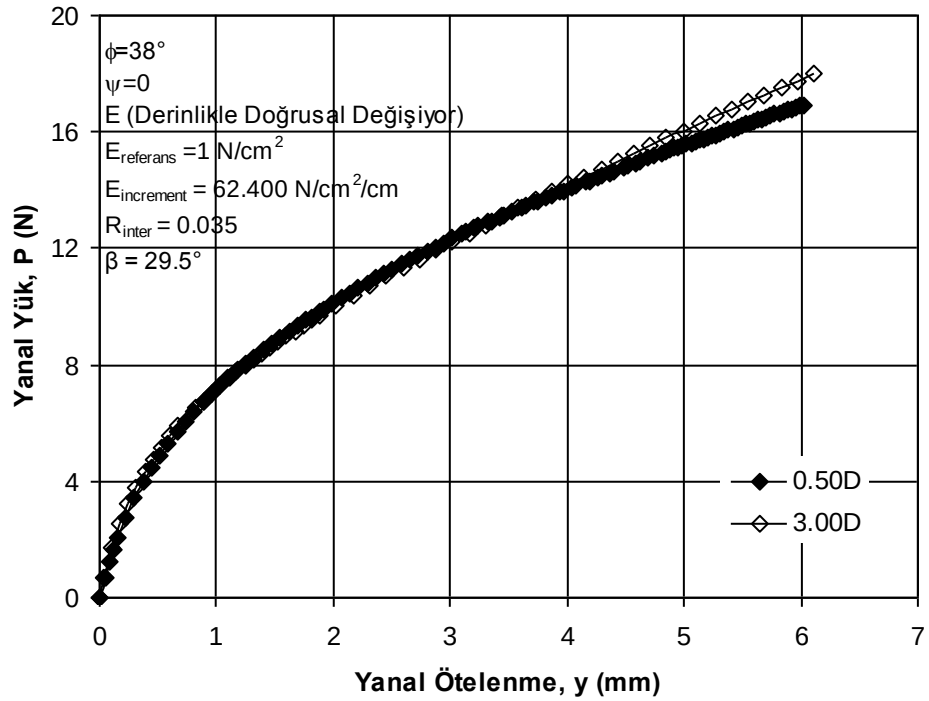
Zemin yüzeyi yatay olmadığından başlangıç gerilme durumu Gravity Loading seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Gravity Loading seçeneği kullanıldığında;

sükunetteki toprak basınç katsayısı K_0 'ın değeri poisson oranı (ν) dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu yüzden; gerçekçi K_0 değerleri verecek ν değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. Plaxis 3D Foundation programı K_0 ve ν değerleri arasında $\nu=K_0/(1+K_0)$ elastik bağıntısını kullanmaktadır. Analizlerde; sükunetteki toprak basınç katsayısı $K_0=1-\sin\phi$ eşitliği kullanılarak 0.384, poisson oranı ise $\nu=K_0/(1+K_0)$ bağıntısı yardımı ile 0.277 olarak hesaplanmıştır. Zemin yüzeyinin düz olduğu üniform gevşek kum zemin durumunda ise başlangıç gerilmeleri K_0 Procedure kullanılarak oluşturulmuş, poisson oranı olarak 0.300 değeri alınmıştır.

Şevlendirilmiş gevşek kum zemin durumunda yapılan analizler ilk olarak zemin yüzeyinin düz olduğu zemin durumunda kullanılmış olan model parametre değerleri ($\phi=38^\circ$, $\psi=0^\circ$, $E_{referans}=1 \text{ N/cm}^2$, $E_{increment}=62.400 \text{ N/cm}^2/\text{cm}$, $R_{inter}=0.035$) ile gerçekleştirilmiştir. Şevlendirilmiş gevşek kum zemin durumunda başlangıç gerilmeleri Gravity Loading seçeneğine göre tanımlanmış olup poisson oranı 0.277 olarak alınmıştır. Sonlu elemanın ortalama uzunluğunun şevsiz durumdaki ortalama eleman boyu ile yakın değerde olabilmesi için mesh yoğunluğu yatay ve düşey doğrultular için sıklaştırılarak seçilmiştir. Belirtilen değerler kullanılarak yapılan analizlerde; başlangıç gerilme durumunun oluşturulduğu hesaplama adımında şevde göçme gözlenmiştir. Şekil 6.38'de görüldüğü gibi 30° 'lik açı ile şevlendirilmiş gevşek kum zemin kendi ağırlığı etkisinde stabilitesini sağlayamamıştır. Bu yüzden; 250mm olarak modellenmiş olan şev yüksekliği 240mm olarak modellenmiş ve yaklaşık 29.5° 'lik bir şev açısı (β) elde edilmiştir. Şev açısının 29.5° olduğu şevlendirilmiş gevşek kum zemin profilinin toplam yüksekliği de 440mm'dir. Şev açısının 29.5° olduğu durumda kazık şev tepesinden 0.5D ve 3D uzaklıklara yerleştirilmiş ve yapılan analizler sonucunda Şekil 6.39'da görüldüğü gibi kazığın şev tepesinden uzaklaşmasının kazığın yanal yük taşıma kapasitesini etkilemediği görülmüştür.



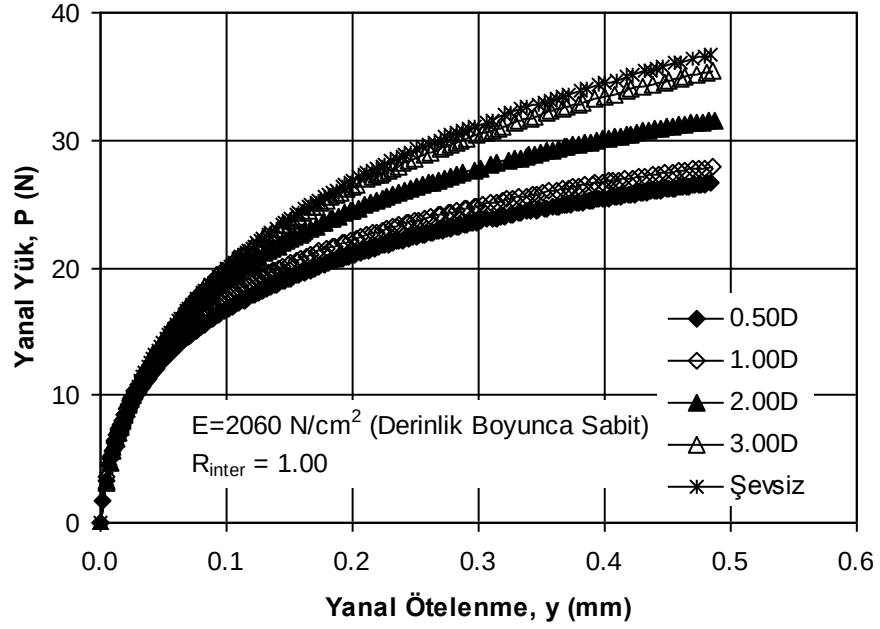
Şekil 6.38. Kendi Ağırlığı Etkisinde Stabil Olmayan Şevlendirilmiş Kum Zemin



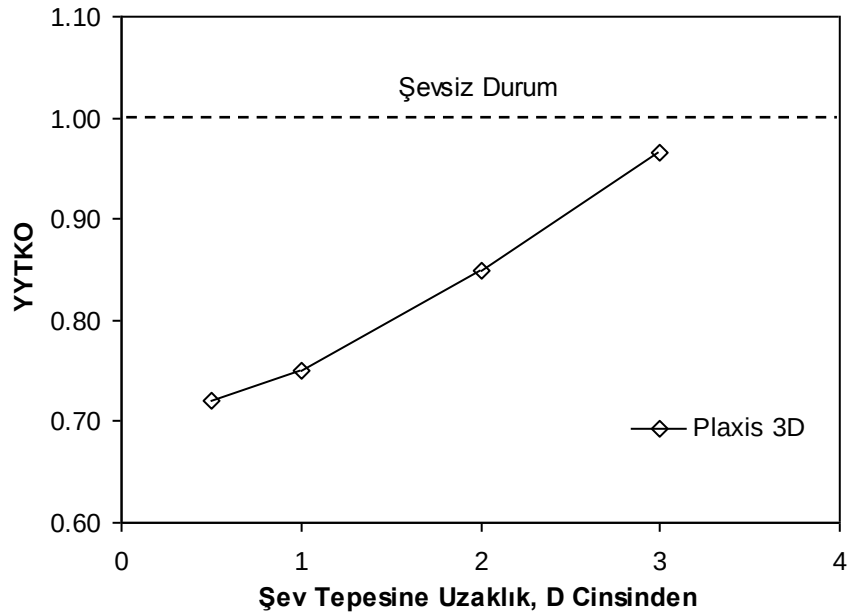
Şekil 6.39. Şevli Durumda Şev Tepesine En Yakın ve En Uzak Konumda Elde Edilen Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkileri

Analizler, elastisite modülü değerinin derinlik boyunca sabit olduğu durum için yeniden tekrarlanmıştır. Bu analizlerde elastisite modülü değeri $E_{\text{referans}}=E_{50}=2060 \text{ N/cm}^2$ olarak derinlik boyunca sabit kabul edilmiştir. Diğer tüm parametreler bir önceki adımda gerçekleştirilen analizlerdeki değerlerin aynısı olarak alınmıştır. Bu analizler yapılırken, model kazığın şev tepesinden 3D uzaklığa yerleştirildiği durumda hesaplama kısmının ikinci aşamasında kazık modellenememiştir.

Son olarak, analizler, elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu ($E_{\text{referans}}=E_{50}=2060 \text{ N/cm}^2$) ve mukavemet azaltma katsayısı R_{inter} değerinin 1 olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Bu esnada diğer tüm parametreler ilk olarak gerçekleştirilen analizlerde kullanılmış olan değerler ile aynı alınmıştır. Şevli durumda yapılan analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, şevlendirilmiş kum zemin durumunda gerçekleştirilen analizlerde kullanılmış olan parametrik değerlerin kullanıldığı zemin yüzeyinin düz olduğu 440mm tabaka kalınlığına sahip üniform gevşek kum zemin durumunda yapılan analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile karşılaştırılmıştır. Hem şevli durumda hem de zemin yüzeyinin düz olduğu durumda 60 N değerindeki yanal yük etkisinde belirlenen yükleme adımı boyunca göçme davranışı gözlenmemiştir. Bu nedenle; gerek şevli durumda gerekse zemin yüzeyinin düz olduğu gevşek kum zemin durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılabilmesi için bir yanal ötelenme kriteri belirlenmiş ve tüm analizlerde bu yanal ötelenme değerine karşılık elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerden elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri Şekil 6.40'da görülmektedir. Şekil 6.40'dan görüldüğü gibi kazık şev tepesinden uzaklaştıkça yanal yük taşıma kapasitesi artmakta, yanal yük-yanal ötelenme davranışı daha rijit bir hal almaktadır. Kazığın şev tepesinden 3D uzaklığa yerleştirilmesi durumunda şevin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin kalktığı görülmektedir.



Şekil 6.40. Şevli ve Şevsiz Durumda Elde Edilen Kazık Başı Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.41. Şevli Kum Zeminde Şev Tepesine Uzaklık-YYTKO İlişkisi

Şevli durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri zemin yüzeyinin düz olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerine bölünerek yanal yük taşıma kapasitesi oranı (YYTKO) tanımlanmıştır. Şekil 6.41’de kazığın şev tepesinden uzaklığı ile YYTKO arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 6.41’den görüldüğü gibi model kazık şev tepesinden 3D uzaklığa yerleştirildiğinde yanal yük taşıma kapasitesi değeri zemin yüzeyinin düz olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık olarak %97’ si kadar olup, şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde etkisi kalmamaktadır. Kazığın şev tepesine olan uzaklığının 2D olduğu durumda şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde bir miktar da olsa etkili olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak, kazığın şev tepesine 2D ile 3D arasında bir mesafede bulunması durumunda şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyelerde olduğu söylenebilir.

7. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırılmaktadır.

Kullanılan analitik yöntemler (Brinch Hansen, (1961); Broms, (1964); Meyerhof ve ark., (1981) ve Prasad ve Chari, (1999)) sınır durum yöntemleri olup, elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, nihai yanal yük taşıma kapasitesi değerlerini temsil etmektedir.

Deneysel çalışmalar sırasında, özellikle, gevşek kum zeminde olmak üzere elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinde göçme noktası belirgin bir şekilde tanımlanamamaktadır. Bu yüzden; hem gevşek hem de sıkı kum zeminde kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda elde edilen yanal yük değerleri yanal yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanmıştır.

Sayısal analiz çalışmalarında; gevşek kum zemin durumunda zeminde göçme davranışı gözlenmemiş ve analizler yük adımı sonuna kadar veya yanal yük tamamı ile uygulanana kadar devam etmiştir. Bu yüzden; kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda hesaplanan yanal yük değeri yanal yük taşıma kapasitesi olarak seçilmiştir. Sıkı kum zemin durumunda ise, zeminde göçme davranışı gözlenmiş ve bu andaki yanal yük değeri karşılaştırmalarda yanal yük taşıma kapasitesi olarak kullanılmıştır.

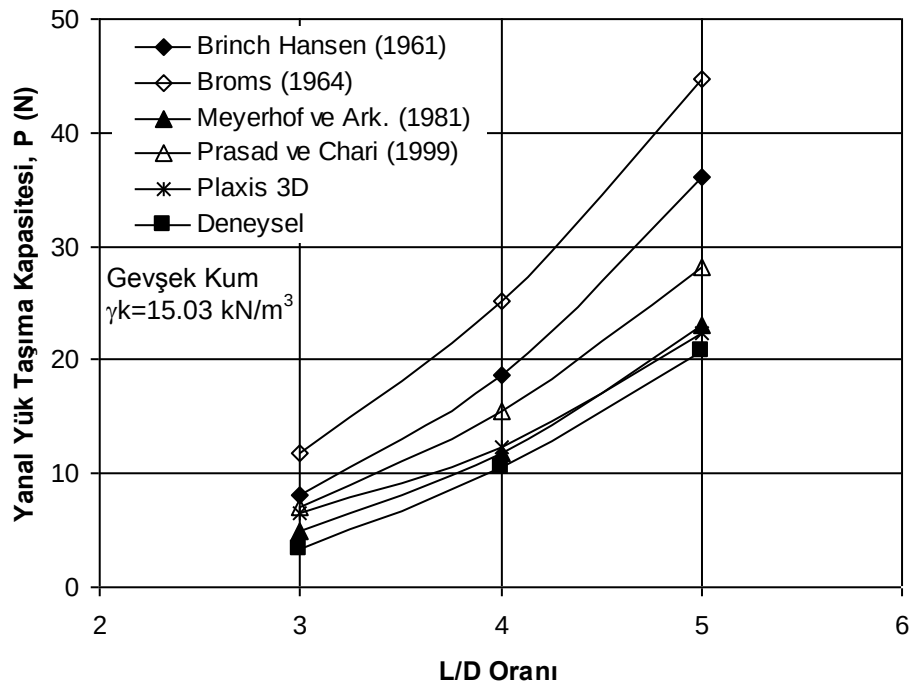
7.1. Kazık Gömülü Uzunluğu

Farklı L/D oranları için deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesine ait sayısal değerler gevşek kum zemin için Çizelge 7.1’de, sıkı kum zemin için ise Çizelge 7.2’de verilmiştir. Yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin L/D oranına bağlı olarak değişimi ise gevşek ve sıkı kum zeminler için sırası ile Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Şekil 7.1 incelendiğinde, gevşek kum zemin durumunda, analitik yöntemler ve sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin tüm L/D oranları için deneysel değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.1 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Sonuçların Karşılaştırılması

Gevşek Kum Zemin, $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 38^\circ$ - D=50mm				
Kazık Gömülü Uzunluğu, L (mm)		150	200	250
L/D Oranı		3	4	5
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult.} \text{ (N)}$	Brinch Hansen (1961)	8.122	18.684	36.171
	Broms (1964)	11.821	25.218	44.776
	Meyerhof ve Ark. (1981)	4.942	11.737	23.008
	Prasad ve Chari (1999)	7.024	15.471	28.194
	Plaxis 3D	6.500	12.320	22.420
	Deneysel	3.277	10.532	20.690

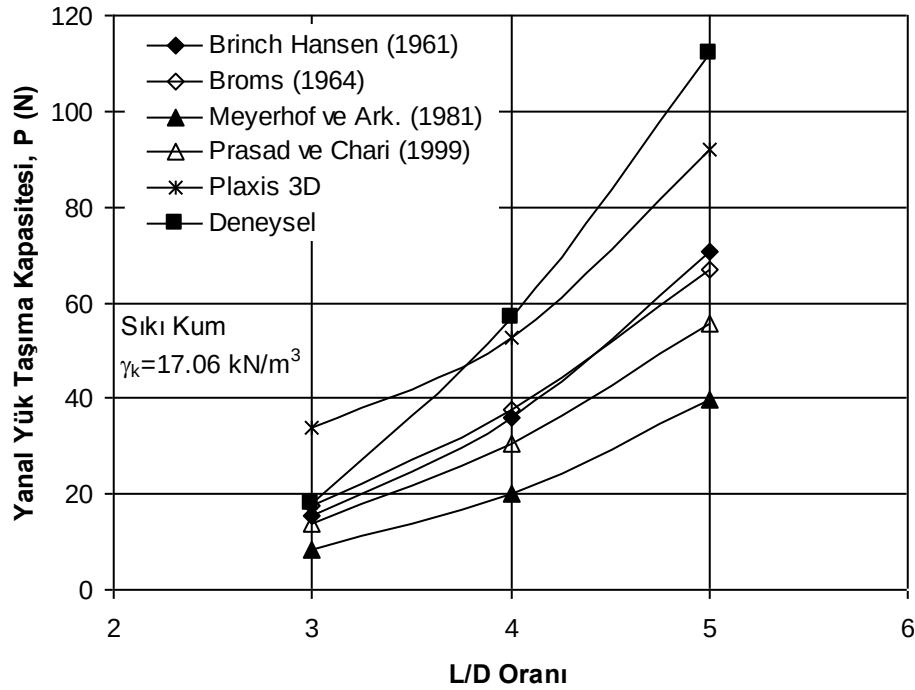


Şekil 7.1. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Bununla birlikte; deneysel yanal yük taşıma kapasitesine en yakın değerler Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilmiş olan analitik yöntem ve Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak gerçekleştirilmiş sayısal analizlerden elde edilmiştir. Öyle ki; Çizelge 7.1’de verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilmiş yönteme göre hesaplanan yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin deneysel değerlere göre $L/D=3$ için %50, $L/D=4$ ve 5 için de %10 daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; sayısal analiz sonuçları deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerine göre $L/D=3$ için %98, $L/D=4$ için %16 ve $L/D=5$ için de %8 daha büyüktür. Gevşek durumda en büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Broms (1964) yöntemi ile elde edilmiş olup deneysel sonuçlara göre $L/D=3$ için %260, $L/D=4$ için %140 ve $L/D=5$ için de %116 daha büyüktür. Analitik yöntemler ve sayısal analizlerden elde edilen değerler ile deneysel değerler arasındaki fark L/D oranının artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca; analitik yöntemlerin tamamı ve sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında en büyük farkın $L/D=3$ oranı için olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.2 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Sonuçların Karşılaştırılması

Sıkı Kum Zemin, $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 44^\circ$ - $D=50\text{mm}$				
Kazık Gömülü Uzunluğu, L (mm)		150	200	250
L/D Oranı		3	4	5
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult.} \text{ (N)}$	Brinch Hansen (1961)	15.510	36.022	70.660
	Broms (1964)	17.691	37.740	67.010
	Meyerhof ve Ark. (1981)	8.274	20.113	39.661
	Prasad ve Chari (1999)	13.809	30.414	55.427
	Plaxis 3D	34.050	52.800	91.800
	Deneysel	17.882	56.874	111.877



Şekil 7.2. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Gömülü Uzunlukları için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Şekil 7.2 incelendiğinde, sıkı kum zemin durumunda, analitik yöntemlerden elde edilen nihai yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin tüm L/D oranları için deneysel değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; deneysel sonuçlara en yakın taşıma kapasitesi değerleri sayısal analizler ile Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964)'un önerdiği analitik yöntemlerden elde edilmiştir. Öyle ki; Çizelge 7.2'de verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde Brinch Hansen (1961) yöntemine göre elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin deneysel değerlerden L/D=3 için %13, L/D=4 ve 5 için de %36 daha küçük olduğu görülmektedir. Broms (1964) yöntemi ile elde edilen sonuçlar ise L/D=3 için %1, L/D=4 için %33 ve L/D=5 için de %40 daha küçüktür. Bununla birlikte; sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında, L/D=3 için sayısal analiz sonucunun deneysel taşıma kapasitesinden %90 daha büyük olduğu ancak, L/D=4 için %7 ve L/D=5 için de %17 küçük olduğu görülmüştür. L/D=3 için sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri kazık başında

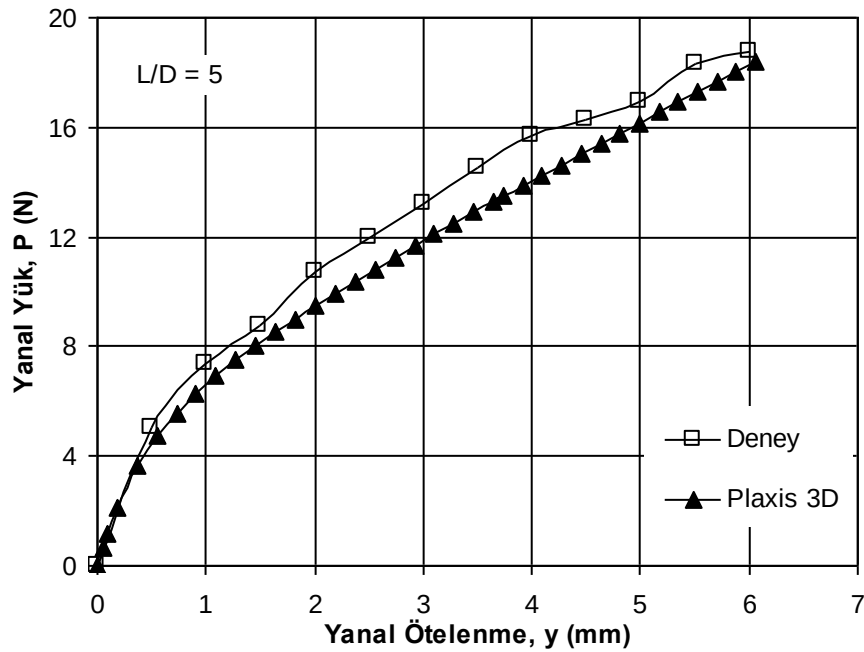
yaklaşık 4.5° 'lik bir dönme açısı meydana getirirken, $L/D=4$ ve $L/D=5$ durumlarında dönme açısı değeri yaklaşık olarak 1.2° dir. Bu yüzden; $L/D=3$ durumunda kazık başındaki 1.2° 'lik dönme açısına karşılık gelen yanal yük değeri deneysel değer ile karşılaştırılmış ve deneysel değerden %40 daha büyük olduğu görülmüştür. Sıkı kum zemin durumunda en küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilmiş olup deneysel değerlerden $L/D=3$ için %53, $L/D=4$ ve 5 için de %64 daha küçüktür. Analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel değerler arasındaki fark L/D oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Bununla birlikte; Şekil 7.2 incelendiğinde Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964) yöntemlerinin tüm L/D oranları için iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında relatif sıklığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öyle ki; deneysel çalışmalarda sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri gevşek kum zeminde elde edilenin yaklaşık olarak 5.4 katı iken bu oran sayısal analizlerde tüm L/D oranları için 4.5 kat civarındadır. Brinch Hansen (1961) yönteminde bu oran 1.90 kat iken Broms (1964) yönteminde 1.50 kat, Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntemde 1.70 kat ve Prasad ve Chari (1999)' nin önermiş oldukları yöntemde ise 1.96 kat şeklinde elde edilmiştir.

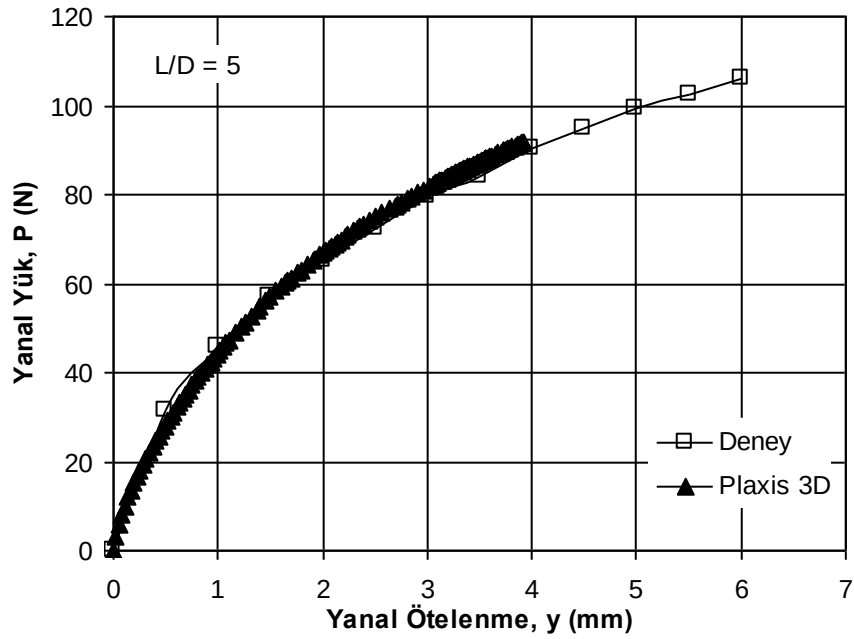
Çizelge 7.3'de deneysel çalışmalardan, sayısal analizlerden ve analitik yöntemlerden elde edilen dönme noktası derinlikleri verilmiştir. Dönme noktası derinliği kazık gömülü uzunluğunun (%) si olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalardan ve sayısal analizlerden elde edilen dönme noktası derinlikleri göz önüne alındığında, zemin sıklığının artması ile dönme noktasının da zemin yüzeyine doğru hareketlendiği görülmektedir. Analitik yöntemlerin her birinde dönme noktası derinliği farklı derinliklerde elde edilmiş olup değerleri zemin sıklığından bağımsızdır. Diğer bir ifade ile, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda dönme noktası derinlikleri hemen hemen aynı değerlere sahiptir.

Çizelge 7.3 Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Dönme Noktası (Pivot Nokta) Derinliklerinin Karşılaştırılması

G, Gevşek Kum – S, Sıkı Kum							
L/D Oranı		3		4		5	
Kum Zeminin Sıklılığı		G	S	G	S	G	S
Dönme Noktası Derinliği (%)	Brinch Hansen (1961)	75	76	76	77	76	77
	Broms (1964)	-	-	-	-	-	-
	Meyerhof ve Ark. (1981)	65	65	65	65	66	66
	Prasad ve Chari (1999)	68	68	69	69	69	69
	Plaxis 3D	88	76	91	76	93	75
	Deneysel	78	75	78	76	81	79



Şekil 7.3. Gevşek Kum Zeminde L/D=5 için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.4. Sıkı Kum Zeminde $L/D=5$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

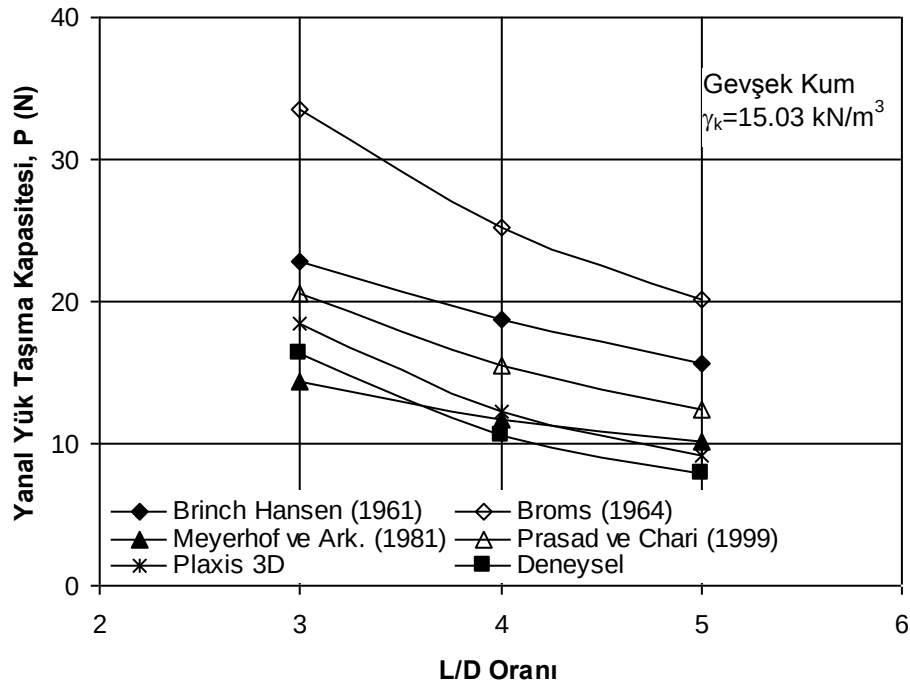
Şekil 7.3 ve 7.4'de $L/D=5$ oranı için gevşek ve sıkı kum zemin durumunda elde edilen deneysel kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin sayısal analizler sonucu elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.3 ve 7.4'den görüldüğü gibi deneysel ve sayısal olarak elde edilen yanal ötelenme-yanal yük ilişkileri hem gevşek hem de sıkı kum zeminde birbirleri ile oldukça uyumludur.

7.2. Kazık Çapı

Kazık çapına bağlı olarak farklı L/D oranları için deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırmalı olarak gevşek kum zemin için Çizelge 7.4'de sıkı kum zemin için de Çizelge 7.5'de verilmiştir. Yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin L/D oranı ile ilişkisi ise gevşek kum zemin için Şekil 7.5'de sıkı kum zemin için de Şekil 7.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.4 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Sonuçların Karşılaştırılması

Gevşek Kum Zemin, $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 38^\circ$ - $L=200\text{mm}$				
Kazık Çapı, D (mm)		40	50	66.60
L/D Oranı		5	4	3
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult.} \text{ (N)}$	Brinch Hansen (1961)	15.574	18.684	22.811
	Broms (1964)	20.174	25.218	33.590
	Meyerhof ve Ark. (1981)	10.169	11.737	14.330
	Prasad ve Chari (1999)	12.377	15.471	20.608
	Plaxis 3D	9.155	12.320	18.440
	Deneysel	7.864	10.532	16.384



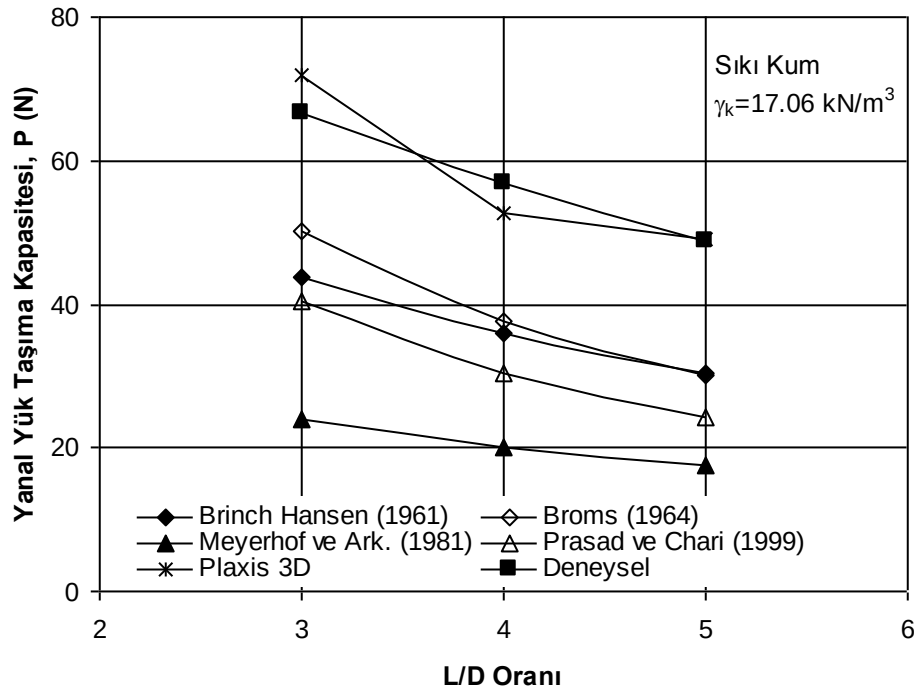
Şekil 7.5. Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Şekil 7.5 incelendiğinde, gevşek kum zemin durumunda, Brinch Hansen (1961), Broms (1964) ve Prasad ve Chari(1999) tarafından önerilen yöntemler kullanılarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin deneysel sonuçlardan tüm L/D oranları için daha büyük olduğu görülmektedir. Gevşek durumda en büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Broms (1964) yöntemi ile elde edilmişken deneysel değerlere en yakın taşıma kapasitesi değerleri Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilmiş yöntem ve Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak yapılan sayısal analizlerden elde edilmiştir. Çizelge 7.4’de sunulan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilmiş olan yönteme göre hesaplanan yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin deneysel değerlere göre L/D=5 için %22 ve L/D=4 için de %11 daha büyük olduğu görülmektedir. L/D=3 için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ise deneysel taşıma kapasitesinden %12 daha küçüktür. Bununla birlikte; Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak yapılan sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin deneysel değerlerden L/D=5 ve L/D=4 için %16 ve L/D=3 için de %12 daha büyük olduğu görülmüştür. Broms (1964) yöntemi ile deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerine göre L/D=5 için %156, L/D=4 için %139 ve L/D=3 için de %105 daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Analitik yöntemler ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki fark L/D oranı küçüldükçe azalmaktadır. Ayrıca; analitik yöntemlerin tamamı ve sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında en büyük farkın L/D=5 oranı için olduğu görülmüştür.

Şekil 7.6 incelendiğinde, sıkı kum zemin durumunda, analitik yöntemlerin tamamının tüm L/D oranları için deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha küçük taşıma kapasitesi değerleri ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte; deneysel sonuçlara en yakın taşıma kapasitesi değerleri sayısal analizlerden elde edilmiştir. Çizelge 7.5 incelendiğinde, sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlardan L/D=5 için %0.25 ve L/D=3 için de %7 daha büyük olduğu buna karşılık L/D=4 için ise %7 daha küçük olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.5 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Sonuçların Karşılaştırılması

Sıkı Kum Zemin, $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 44^\circ$ - L=200mm				
Kazık Çapı, D (mm)		40	50	66.60
L/D Oranı		5	4	3
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult.} \text{ (N)}$	Brinch Hansen (1961)	30.484	36.022	43.642
	Broms (1964)	30.192	37.740	50.270
	Meyerhof ve Ark. (1981)	17.530	20.113	23.990
	Prasad ve Chari (1999)	24.332	30.414	40.512
	Plaxis 3D	49.050	52.800	72.000
	Deneyssel	48.918	56.874	66.705



Şekil 7.6. Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Çapları için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Analitik yöntemler arasında deneysel taşıma kapasitesi değerlerine en yakın sonuçlar Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964) yöntemleri elde edilmiş olup bu iki yöntem, özellikle, $L/D=4$ ve $L/D=5$ için oldukça iyi bir uyum sergilemektedir. Broms (1964) yöntemi ile elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında $L/D=5$ için %38 $L/D=4$ için %33 ve $L/D=3$ için de %24 daha küçük olduğu görülmüştür. Sıkı kum zemin durumunda en küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilmiş olup tüm L/D oranları için deneysel değerlerden %64 daha küçüktür.

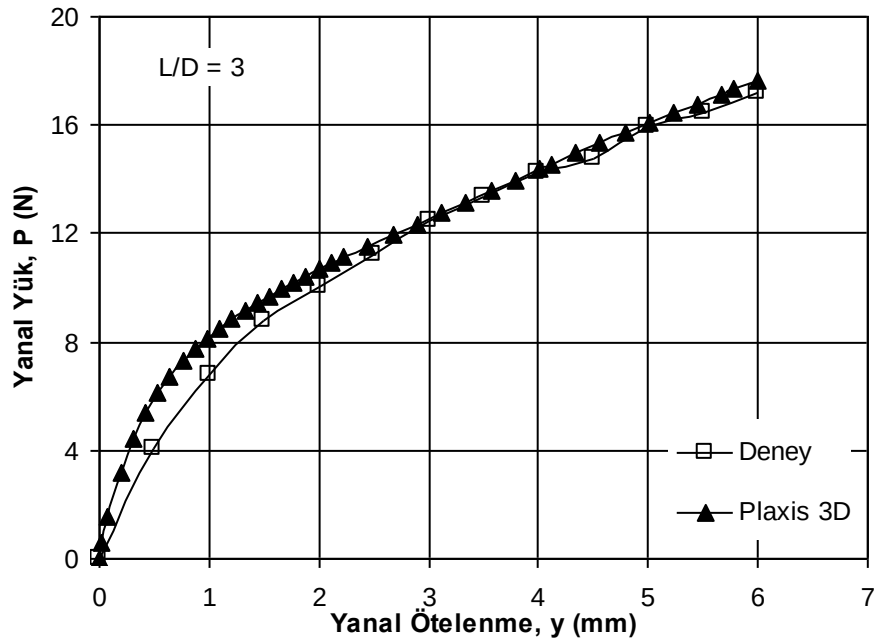
Gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında deneysel çalışmalarda sıkı kumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri gevşek kumda elde edilenin yaklaşık olarak 5 katı iken bu oran Plaxis 3D ile yapılan sayısal analizlerde tüm L/D oranları için ortalama 4.5 kat civarındadır. Brinch Hansen (1961) yönteminde bu oran 1.9 kat iken, Broms (1964) yönteminde 1.5 kat, Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntemde 1.7 kat, Prasad ve Chari (1999)'nin önermiş olduğu yöntemde de yaklaşık 2.0 kat şeklinde elde edilmiştir.

Çizelge 7.6'da deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemler kullanılarak tanımlanmış olan dönme noktası derinlikleri görülmektedir. Broms (1964) yönteminde dönme noktası derinliği verilmediğinden çizelgede görülmemektedir. Dönme noktası derinliği kazık gömülü uzunluğunun %'si olarak hesaplanmıştır.

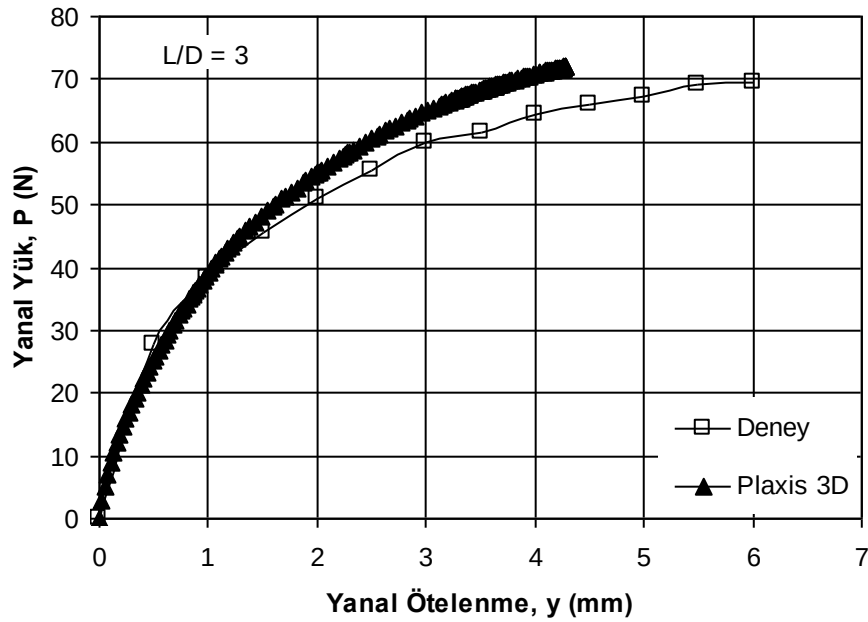
Şekil 7.7 ve 7.8'de $L/D=3$ oranı için gevşek ve sıkı kum zemin durumlarında elde edilen deneysel kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin sayısal analizler sonucu elde edilmiş yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.7 ve 7.8'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal olarak elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri oldukça iyi bir uyum sergilemektedir.

Çizelge 7.6 Gevşek ve Sıkı Kum Zeminde Dönme Noktası (Pivot Nokta) Derinliklerinin Karşılaştırılması

G, Gevşek Kum – S, Sıkı Kum							
L/D Oranı		5		4		3	
Kum Zeminin Sıklığı		G	S	G	S	G	S
Dönme Noktası Derinliği (%)	Brinch Hansen (1961)	76	77	76	77	76	77
	Broms (1964)	-	-	-	-	-	-
	Meyerhof ve Ark. (1981)	65	65	65	65	65	65
	Prasad ve Chari (1999)	69	69	69	69	69	69
	Plaxis 3D	88	77	91	76	92	76
	DeneySEL	80	75	78	76	78	68



Şekil 7.7. Gevşek Kum Zeminde $L/D=3$ için DeneySEL ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.8. Sıkı Kum Zeminde $L/D=3$ için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

7.3. Kazık En Kesit Şekli

Kare ve daire gibi farklı en kesit geometrisine sahip model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri gevşek ve sıkı kum zemin durumu için sırası ile Çizelge 7.7 ve Çizelge 7.8’de verilmiştir. Çizelge 7.7 ve 7.8’de kazık başındaki dönme açısının 1° ve 2° olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ile kazık başındaki yanal ötelenmenin kazık çapının %10’una eşit olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 7.7’de, gevşek kum zemin durumunda, kazık başındaki 2° ’lik dönme açısı için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri incelendiğinde, sayısal analizlerden elde edilen değerlerin deneysel değerlerden, $B=44.30\text{mm}$ genişliğindeki kare kazık için %17, $B=50\text{mm}$ genişliğindeki kare kazık için %33 ve $D=50\text{mm}$ çapındaki dairesel kazık için de %17 daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; Çizelge 7.8’de, sıkı kum zeminde, kazık başındaki 2° ’lik dönme açısı durumunda deneysel çalışmalardan elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri

sayısal analizlerde göçme anında elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlardan, B=44.30mm genişlikteki kare kazık için %11, B=50mm genişlikteki kare kazık için %0.15 ve D=50mm çapındaki dairesel kazık için de %7 daha küçük olduğu görülmüştür. Sayısal analiz değerleri zeminde göçmenin meydana geldiği andaki yanal yük taşıma kapasitesi değerleri olup, kazık başında yaklaşık 1.20°'lik bir dönme açısı oluşturmaktadır.

Bu yüzden; deneysel çalışmalar sırasında 1.25°'lik dönme açısı durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sayısal analiz değerleri ile karşılaştırılmış ve sayısal analiz değerlerinin B=44.30mm genişlikteki kare kazık için %2, B=50mm genişlikteki kare kazık için %14 ve D=50mm çapındaki dairesel kazık için de %6 daha büyük olduğu görülmüştür.

Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışlarının tahmin edilmesinde kullanılan analitik yöntemler kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin kazık en kesit şeklinden bağımsız olduğunu kabul etmektedirler. Bu analitik yöntemler, genellikle, dairesel en kesit şekline sahip kazıklar esas alınarak geliştirilmiştir. Bu yüzden; tasarımcılar, farklı en kesit şekline sahip bir kazığın yanal yük taşıma kapasitesini analitik yöntemleri kullanarak hesaplamak istediklerinde bu kazığın kesit alanına eşdeğer alana sahip dairesel bir kazığı kullanmaktadırlar. Çizelge 7.7 ve 7.8'de, eşdeğer alanı temsil eden B=44.30mm genişlikteki kare kazık ile D=50mm çapındaki dairesel kazığa ait yanal yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde, gevşek kum zemin durumunda kare kazığın dairesel kazıktan yaklaşık %20, sıkı kum zeminde ise yaklaşık %10 daha fazla yanal yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. B=44.30mm genişlikteki kare kazık için eşdeğer alan kabulü ile analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri gevşek kum zemin durumu için Şekil 7.9'da, sıkı kum zemin durumu için de Şekil 7.10'da, deneysel sonuçlar ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

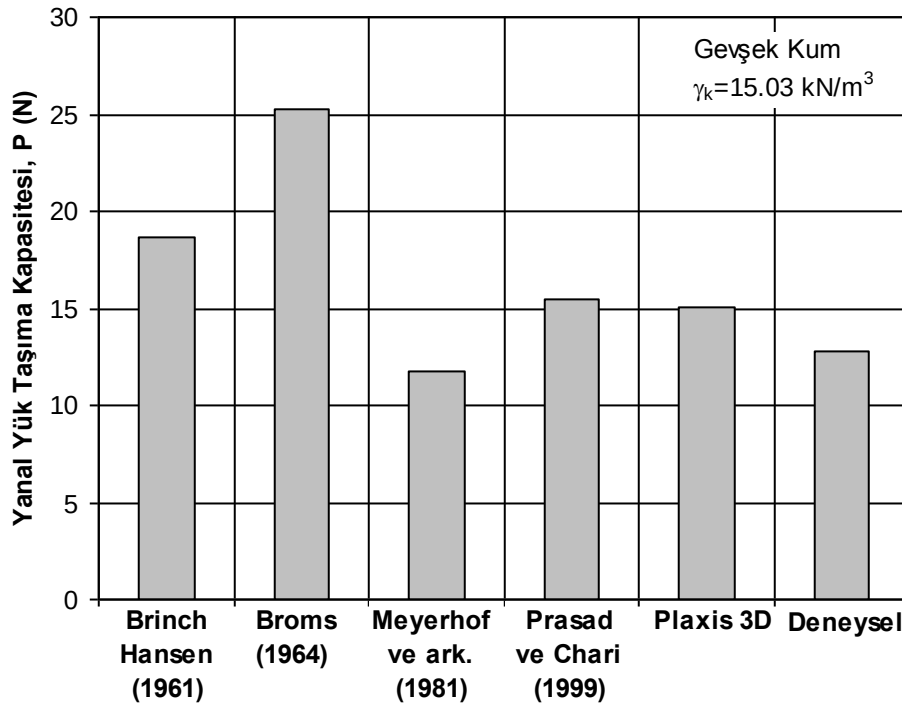
Çizelge 7.7 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık En Kesit Şekilleri için
Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ – Çelik Model Kazık – L=200mm							
Kazık Çapı veya Genişliği		B = 44.30mm		B = 50mm		D = 50mm	
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult} \text{ (N)}$		Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D
	1°	8.894	10.300	9.596	12.751	7.255	8.400
	2°	12.732	15.014	13.715	18.371	10.532	12.320
	$U_{0.10D}$	12.030	12.073	13.341	15.580	10.299	10.660

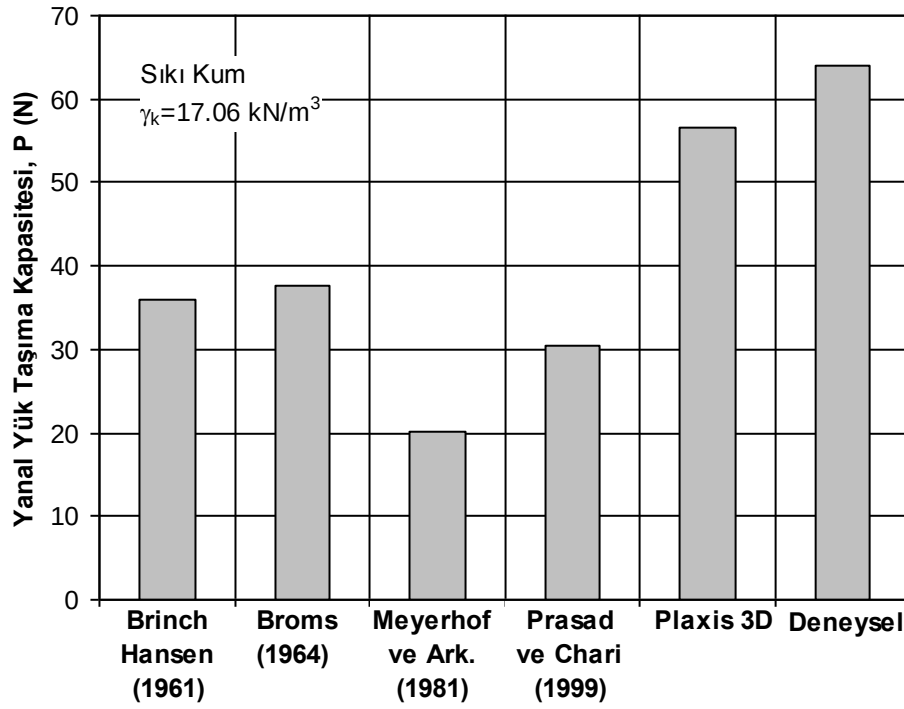
Çizelge 7.8 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık En Kesit Şekilleri için
Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - Çelik Model Kazık - L=200mm							
Kazık Çapı veya Genişliği		B = 44.30mm		B = 50mm		D = 50mm	
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi $P_{ult} \text{ (N)}$		Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D
	1°	51.257	$R (^{\circ})=1.199$ $P_{ult} \text{ (N)}= 56.550$	52.194	$R (^{\circ})=1.221$ $P_{ult} \text{ (N)}= 64.500$	44.470	$R (^{\circ})=1.264$ $P_{ult} \text{ (N)}= 52.800$
	2°	63.895		64.599		56.874	
	$U_{0.10D}$	63.194		66.144		56.641	

Şekil 7.9’da görüldüğü gibi, gevşek kum zemin durumunda, Brinch Hansen (1961) yöntemi ile elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri deneysel değerden %46 daha büyük iken bu oran Broms (1964) yöntemi için %98 ve Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilen yöntem için de %21 dir. Buna karşılık; Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem deneysel sonuçlardan %7 daha küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri vermektedir. Şekil 7.10’da görüldüğü gibi, sıkı kum zemin durumunda ise, Brinch Hansen (1961) tarafından önerilen yöntem deneysel yanal yük taşıma kapasitesinden %43 daha küçük bir değer verirken Broms (1964) yöntemi %40, Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem %68 ve Prasad ve Chari (1999)’ nin önerdiği yöntem de %52 daha küçük yanal yük taşıma kapasitesi değeri vermektedir.

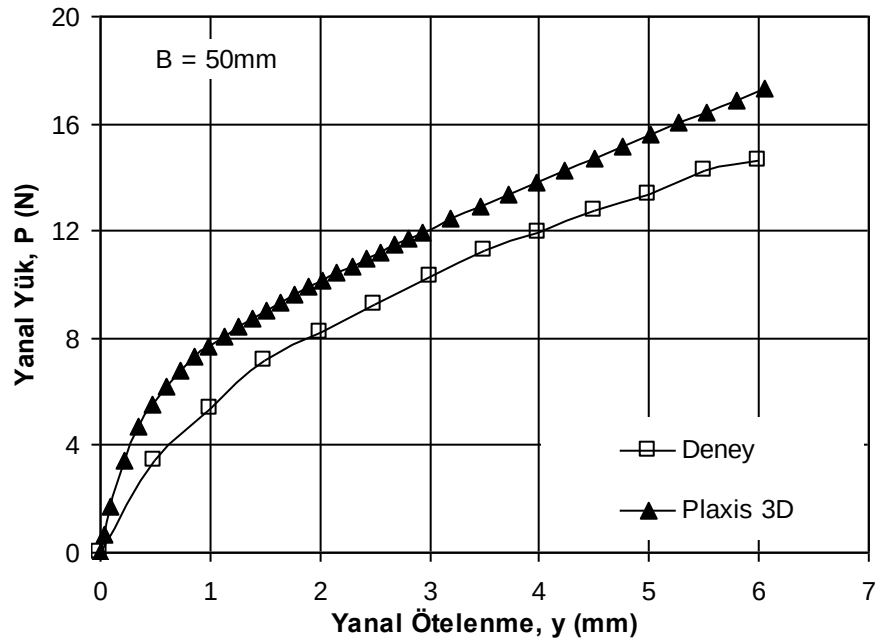


Şekil 7.9. Gevşek Kum Zeminde Farklı En Kesit Şekilleri için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

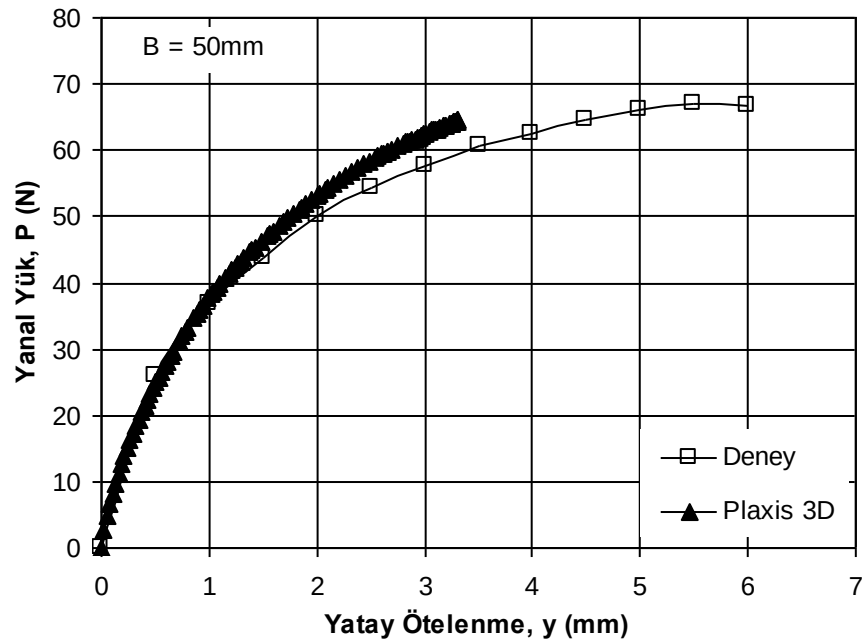


Şekil 7.10. Sıkı Kum Zeminde Farklı En Kesit Şekilleri için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Şekil 7.11 ve 7.12’de B=50mm genişliğindeki kare kazık için gevşek ve sıkı kum zemin durumlarında deneysel çalışmalardan elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin sayısal analizler sonucu elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.11’de gevşek kum zemin için verilmiş olan yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin birbirine paralel davranışlar sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte; deneysel olarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sayısal analizler sonucu elde edilen değerlerden yaklaşık %20 daha küçüktür. Şekil 7.12’de sıkı kum zemin durumu için verilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin ise birbiri ile iyi bir uyum sergilediği görülmektedir.



Şekil 7.11. Gevşek Kum Zeminde $B=50\text{mm}$ Genişlikteki Kare Kesitli Kazık için Deneysel ve Sayısal Yanıl Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.12. Sıkı Kum Zeminde $B=50\text{mm}$ Genişlikteki Kare Kesitli Kazık için Deneysel ve Sayısal Yanıl Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

7.4. Kazık Malzemesi

Farklı malzemelerden imal edilen model kazıklar üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan ve gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri gevşek kum zemin için Çizelge 7.9’da sıkı kum zemin için de Çizelge 7.10’da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.9’da, gevşek kum zemin için, kazık başındaki 2°’lik dönme açısı durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında derlin model kazık için sayısal analiz değerlerinin deneysel değerlerden %2 daha büyük olduğu görülürken alüminyum ve çelik model kazıklar için bu değerler sırası ile %9 ve %17 dir. Gevşek kum zemin durumunda model kazık ağırlığının artması ile birlikte deneysel ve sayısal yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasındaki fark da artmaktadır.

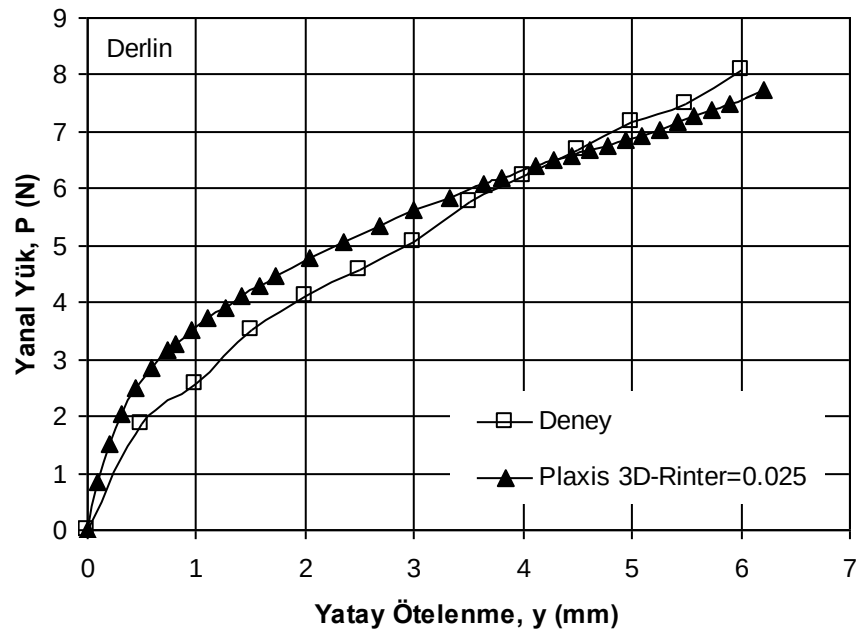
Çizelge 7.10’da, sıkı kum zemin için, kazık başındaki 2°’lik dönme açısı durumunda elde edilen deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sayısal analizlerde göçme anında elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ile karşılaştırıldığında, sayısal analizler sonucu elde edilen değerlerin deney sonuçlarından alüminyum kazık için %8, çelik kazık için de %9 daha küçük olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.9 Gevşek Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Sonuçların Karşılaştırılması

Gevşek Kum - $\gamma_k = 15.03 \text{ kN/m}^3$ – D=50mm – L=200mm							
Kazık Malzemesi		Derlin		Alüminyum		Çelik	
Yanal Yük Taşıma Kapasitesi P (N)		Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D
	1°	4.822	5.552	5.242	6.342	7.255	8.400
	2°	7.255	7.460	8.192	8.977	10.532	12.320
	U _{0,10D}	7.161	6.878	7.583	7.900	10.299	10.660

Çizelge 7.10 Sıkı Kum Zeminde Farklı Kazık Malzemeleri için Sonuçların Karşılaştırılması

Sıkı Kum - $\gamma_k = 17.06 \text{ kN/m}^3$ - $D=50\text{mm}$ - $L=200\text{mm}$					
Kazık Malzemesi		Alüminyum		Çelik	
Yanal Yük (N)		Deney	Plaxis 3D	Deney	Plaxis 3D
	1°	35.435	$R(^{\circ})=1.332$ $P_{ult.} (N)= 42.600$	44.470	$R(^{\circ})=1.264$ $P_{ult.} (N)= 52.800$
	2°	46.436		56.874	
	$U_{0.10D}$	46.201		56.641	



Şekil 7.13. Gevşek Kum Zeminde Derlin Model Kazık için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

Şekil 7.13’de derlin malzemeden imal edilmiş model kazık için gevşek kum zemin durumunda elde edilen deneysel kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisinin sayısal analizler sonucu elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.13’den de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal olarak elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri birbirleri ile iyi bir uyum sergilemektedir.

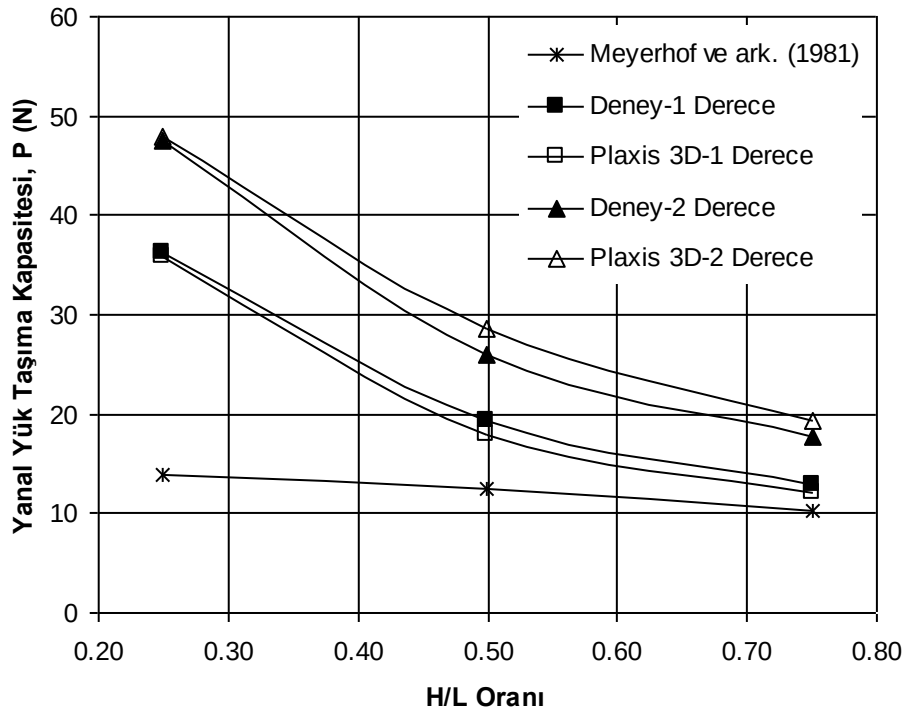
7.5. Tabakalı Zemin Durumu

Üstte gevşek altta ise sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunda deneysel çalışmalardan ve sayısal analizlerden elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değlerleri Çizelge 7.11’de verilmiştir. Çizelge 7.11’de kazık başındaki 2°’lik dönme açısı durumunda elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değlerleri karşılaştırıldığında sayısal analizlerden elde edilen sonuçların deney sonuçları ile $H/L=0.25$ için yaklaşık aynı, $H/L=0.50$ için %10 ve $H/L=0.75$ için de %9 daha büyük olduğu görülmüştür.

Şekil 7.14’de Meyerhof ve ark. (1981)’nın tabakalı kum zemin içerisinde yer alan yanıl yüke maruz rijit kısa kazıkların yanıl yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilmesi için önermiş oldukları yöntem ile elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değlerlerinin $H/L=0.25$, 0.50 ve 0.75 oranları için deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerden elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değlerleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Gerek deneysel çalışmalar, gerek sayısal analizler ve gerekse de analitik yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile yanıl yük taşıma kapasitesinin azaldığını göstermektedir.

Çizelge 7.11 Tabakalı Kum Zeminde Farklı H/L Oranları için Sonuçların Karşılaştırılması

H, Gevşek Kum Tabakası Kalınlığı-L, Kazık Gömülü Uzunluğu- D=50mm, L=200mm						
	Deney			Plaxis 3D		
H/L	1°	2°	$U_{0.10D}$	1°	2°	$U_{0.10D}$
H/L=0	44.470	56.874	56.641	R (°)=1.240 $P_{ult. (N)}= 52.425$		
H/L=0.25	36.149	47.420	46.249	35.900	47.850	45.975
H/L=0.50	19.427	25.980	24.576	17.967	28.655	25.725
H/L=0.75	12.873	17.647	16.149	12.163	19.376	16.737
H/L=1	7.255	10.532	10.299	8.184	11.886	10.656



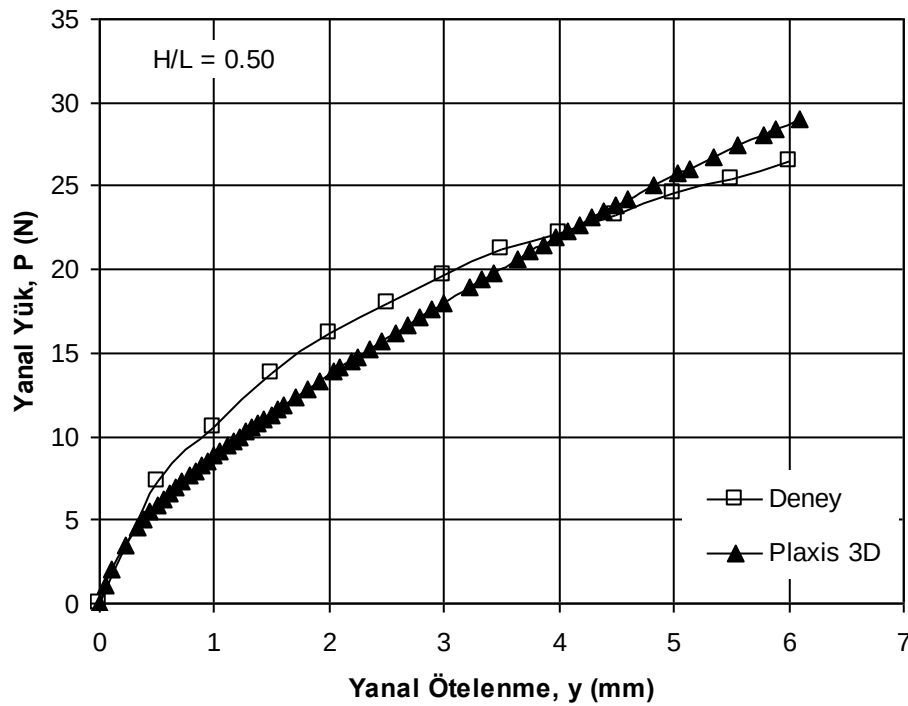
Şekil 7.14. Tabakalı Kum Zeminde Farklı H/L Oranları için Yanal Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri kazık başındaki 1° lik dönme açısı durumunda deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerden $H/L=0.25$ için %61, $H/L=0.50$ için %35 ve $H/L=0.75$ için de %19 daha küçüktür. Bununla birlikte; analitik yöntem ile hesaplanan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden $H/L=0.25$ için %61, $H/L=0.50$ için %30 ve $H/L=0.75$ için de %14 daha küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri verdiği görülmüştür. H/L oranının artması ile sonuçlar arasındaki fark azalmaktadır.

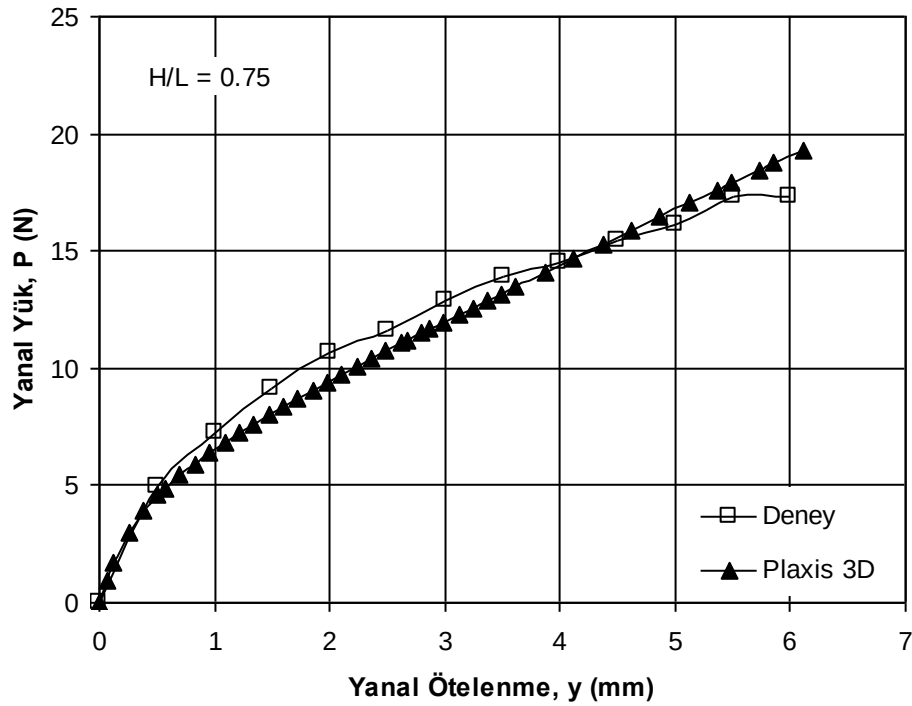
Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri H/L oranı ile yaklaşık doğru orantılı değişmesine rağmen deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçların H/L oranı ile ilişkisi non-lineerdir.

Meyerhof ve ark. (1981)'nın önerdiği yöntemde; tabakalı kum zemin yaklaşımı ile $H/L=0$ ve $H/L=1$ oranları için elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değerleri ile üniform kum zemin durumundaki yaklaşımla elde edilen yanıl yük taşıma kapasitesi değerleri arasında $H/L=0$ için %27 ve $H/L=1$ için de %30 fark olduğu görülmüştür.

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da $H/L=0.50$ ve $H/L=0.75$ oranları için tabakalı kum zemin durumunda elde edilen deneysel kazık başı yanıl yük-yanıl ötelenme ilişkilerinin sayısal analizler sonucu elde edilen yanıl yük-yanıl ötelenme ilişkileri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 7.15 ve 7.16'dan da görüldüğü gibi deneysel ve sayısal olarak elde edilen yanıl yük-yanıl ötelenme ilişkileri birbirleri ile iyi bir uyum sergilemektedir.



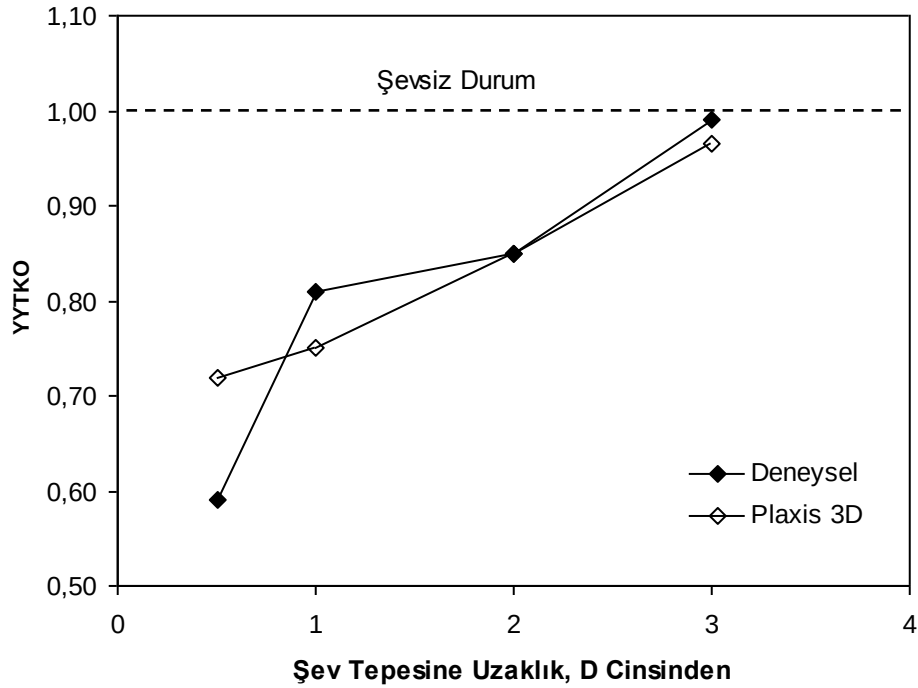
Şekil 7.15. Tabakalı Kum Zeminde $H/L=0.50$ Oranı için Deneysel ve Sayısal Yanıl Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.16. Tabakalı Kum Zeminde $H/L=0.75$ Oranı için Deneysel ve Sayısal Yanal Yük-Yanal Ötelenme İlişkilerinin Karşılaştırılması

7.6. Şevli Durum

Şevlendirilmiş gevşek kum zemin içerisinde yer alan yanall yüke maruz rijit kısa kazıkların yanall yük taşıma kapasitesi üzerinde kazığın şev tepesine olan yatay mesafesinin etkisi deneysel çalışmalar ve sayısal analizler yapılarak araştırılmıştır. Yanall yük taşıma kapasitesi oranının (YYTKO) kazığın şev tepesine olan uzaklığı ile ilişkisi Şekil 7.17’de gösterilmiştir. Yanall yük taşıma kapasitesi değerleri olarak kazık başındaki yanall ötelenmenin kazık çapının %10’una eşit olduğu andaki yanall yük değerleri alınmıştır.



Şekil 7.17. Şevlendirilmiş Gevşek Kum Zeminde YYTKO-Şev Tepesine Uzaklık İlişkilerinin Karşılaştırılması

Kazığın şev tepesine olan uzaklığının şev tepesinden itibaren $0.5D$ olduğu durumda deneysel çalışmalardan elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi şevsiz durumdakinin %60'ı kadar iken bu oran sayısal analizlerde %72 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde; kazık şev tepesinden $1D$ uzaklığa yerleştirildiğinde deneysel taşıma gücü şevsiz durumdakinin %80'i iken sayısal analizlerde bu oran %75 değerindedir. Kazığın şev tepesinden itibaren $2D$ ve $3D$ mesafelere yerleştirilmesi durumunda elde edilen deneysel ve sayısal YYTKO'ları iyi bir uyum sergilemektedir. Bununla birlikte; $2D$ uzaklıkta deneysel yanal yük taşıma kapasitesi şevsiz durumdaki yanal yük taşıma kapasitesinin %85'i iken $3D$ uzaklıkta bu değer %99 dur. Sayısal analizlerde ise $2D$ uzaklıkta YYTKO'nun değeri %85 iken $3D$ uzaklıkta %97 dir.

Hem deneysel çalışmalar hem de sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesinden itibaren $3D$ uzaklığa yerleştirilmesi durumunda şev etkisinin tamamen ortadan kalktığını göstermektedir. Sayısal analizlerde YYTKO'nun şev

tepesine uzaklık ile ilişkisi yaklaşık doğrusal iken deneysel çalışmalarda doğrusal bir ilişki elde edilmemiştir.

7.7. Sonuçların Karşılaştırılmasına İlişkin Genel Değerlendirmeler

Deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması sonucu aşağıda sıralanan genel yargılara ulaşılmıştır.

- Gevşek kum zemin durumunda, analitik yöntemler kullanılarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel taşıma kapasitesi değerlerinden daha büyük iken, sıkı kum zemin durumunda analitik yöntemlerin tamamı deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha küçük taşıma kapasitesi değerleri üretmektedir. Analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin göçme anındaki nihai yanal yük taşıma kapasitesi değerleri olduğu göz önüne alındığında, gevşek kum zemin durumunda göçmenin 2° 'den daha büyük, sıkı kum zemin durumunda ise 1° 'lik dönme açısı mertebelerinde meydana geldiği sonucuna varılabilir.
- Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda en küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilmişken, en büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri de Broms (1964) yöntemi ile elde edilmiştir. Bu iki yöntem ile elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasında hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda %100'lere varan farklar görülmektedir. Tasarım aşamasındaki gerekli proje yükü nihai yanal yük taşıma kapasitesi değerinin belirli bir güvenlik sayısı ile bölünmesi sonucu elde edilecektir. Bu nedenle; değeri 2 ile 3 arasında olan bir güvenlik sayısı kullanılması durumunda analitik yöntemler ile güvenli tarafta kalan sonuçlar elde edilebilir.
- Sıkı kum zemin durumunda Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964) yöntemleri birbirleri ile oldukça uyumlu yanal yük taşıma kapasitesi değerleri üretmektedir.

- Analitik yöntemlerde kazığın dönme noktası derinliği kullanılan yöntemle göre değişmektedir. Brinch Hansen (1961) yönteminde dönme noktası derinliği kazık gömülü uzunluğunun %76'sı iken Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntemde %65'i, Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilen yöntemde ise %69'u dur. Analitik yöntemlerde dönme noktası derinliği, genellikle, yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyine mesafesi (e) ve kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak belirlenmekte, zeminin sıklığı ve kazık çapı değişiminden etkilenmemektedir.
- Analitik yöntemler, yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin kazık en kesit geometrisinden bağımsız olduğunu kabul etmektedirler. Bu analitik yöntemler, genellikle, dairesel en kesit şekline sahip kazıklar esas alınarak geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve gerçekleştirilen üç boyutlu non-lineer sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar analitik yöntemlerin bu kabulünün doğru olmadığını ortaya koymaktadır.
- Analitik yöntemlerde, göçme anındaki yanal yük taşıma kapasitesini ifade eden değerlerin kazık başında ne kadar bir dönme oluşturduğu veya kazık başı yanal ötelenme değerlerinin ne olduğu konusunda güvenilir yaklaşımlar bulunmamaktadır.
- Özellikle gevşek kum zeminde, kazık gömülü uzunluğu, kazık çapı ve kazık ağırlığının oldukça büyük veya küçük değerler alması deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkı etkilemektedir. Bu davranışın sebebi; analitik yöntemlerin, mühendislik özellikleri belirli sınırlar içerisinde olan zeminlerde belirli L/D oranına sahip kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen sonuçlara dayanması ve sayısal analizlerde model kalibrasyonunun belirli mühendislik ve mukavemet özelliklerine sahip zemin içerisinde yer alan belirli bir model kazığa göre yapılması şeklinde açıklanabilir.
- Meyerhof ve ark. (1981)'nin önerdiği yöntemde; üniform kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin, tabakalı kum zemin yaklaşımı ile hesaplanan değeri ile üniform

kum zemin yaklaşımı ile hesaplanan değeri arasında %30'lara varan farklar olduğu belirlenmiştir.

- Hem deneysel çalışmalar hem de sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesinden itibaren kazık çapının üç katı uzaklığa yerleştirilmesi durumunda şev etkisinin tamamen ortadan kalktığını göstermektedir.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte etkiyen yanal yük etkisi altındaki davranışları yapılan küçük ölçekli model deney çalışmaları ile araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal analiz çalışmaları ile model deney sonuçlarının doğruluğu araştırılmış ve deneysel çalışmalarda dikkate alınmayan bazı parametrelerle parametrik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Literatürde mevcut analitik yöntemlerden yaygın olarak kullanılan dört tanesi ile rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar hem deneysel hem de sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

Deneysel Sonuçlar;

- Yükleme hızının kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük ve moment taşıma kapasitesine etkisi büyüklükleri 0.180mm/dak. ile 2.990 mm/dak. arasında değişen farklı yanal yükleme hızlarında gerçekleştirilmiş bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır. Farklı yükleme hızlarında elde edilen en büyük yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile en küçük yanal yük taşıma kapasitesi değeri arasında gevşek kum zemin durumunda ortalama %7 sıkı kum zemin durumunda da ortalama %8'lik bir fark olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme hızı aralığında, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, yükleme hızının yanal yük ve moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilemediğini göstermektedir.
- Yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışı üzerinde kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapından hangisinin daha büyük bir etkiye sahip olduğu yapılan bir seri deney ile araştırılmıştır. L/D oranı ile yanal yük taşıma

kapasitesi değerleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde L/D oranının kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak değişiminin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde daha önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda kazık gömülü uzunluğunun artırılması sonucu $L/D=3$ ile $L/D=4$ arasında yanal yük taşıma kapasitesi gevşek ve sıkı kum zeminde iki kat artarken $L/D=4$ ile $L/D=5$ arasında yanal yük taşıma kapasitesi bir kat artmıştır. Kazık çapının artırılması sonucu, kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda, $L/D=5$ ile $L/D=4$ arasında yanal yük taşıma kapasitesi gevşek kumda %33 artarken sıkı kum durumunda bu oran %16 dır. Benzer şekilde; $L/D=4$ ile $L/D=3$ arasında da gevşek ve sıkı kum zeminde sırası ile %55 ve %17 oranlarında artışlar elde edilmiştir.

- Eşdeğer dairesel alan kabulü ve genişliğe eşdeğer çap kabulüne dayalı olarak kare ve dairesel en kesit geometrisine sahip model kazıklar üzerinde bir seri model deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kazık en kesit şeklinin özellikle gevşek kum zemin durumunda yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte; yaygın olarak kullanılan analitik tasarım yöntemlerinde eşdeğer dairesel alan yaklaşımının özellikle gevşek kum zeminde yer alan yanal yüke maruz kazıkların tasarımı için güvenilir olmadığı sonucuna varılmıştır. Kazık başındaki 2° 'lik dönme açısı durumu göz önüne alındığında; eşdeğer dairesel alan kabulü için kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin dairesel kazığından gevşek kum zemin durumunda %21, sıkı kum zemin durumunda da %12 daha büyük olduğu görülmüştür. Genişliğe eşdeğer çap kabulü için ise bu oranlar gevşek ve sıkı kum zemin durumları için sırası ile %30 ve %14 olarak elde edilmiştir.
- Üstte gevşek altta sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunun yanal yük taşıma kapasitesine etkisi bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır. Üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile yük-deplasman ilişkileri daha esnek bir davranış sergilemekte ve kazığın yanal yük taşıma kapasitesi değeri homojen gevşek

kum durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi değerine yaklaşmaktadır. $H/L=0.25$ durumunda kazığın yanal yük taşıma kapasitesi $H/L=0$ durumundaki taşıma kapasitesi değerinden %17 daha küçük iken $H/L=0.25$ ile $H/L=0.50$ arasında %45, $H/L=0.50$ ile $H/L=0.75$ arasında da %32'lik bir yanal yük taşıma kapasitesi kaybı söz konusudur. Kazık gömülü uzunluğunun sıkı kum tabakası içerisinde kalan kısmı yanal yük taşıma kapasitesini önemli oranda değiştirmektedir. Öyle ki; $H/L=0.75$ durumunda, dönme noktası üzerinde yer alan sıkı kum tabakası kalınlığı kazık gömülü uzunluğunun %13'ü olmasına rağmen yanal yük taşıma kapasitesi değeri $H/L=1$ durumuna göre %67 daha büyüktür.

- Model kazığın şev tepesinden ne kadar uzakta yer alması durumunda şev etkisinin ortadan kalkacağı bir seri model deney çalışması yapılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kazığın şev tepesine olan yatay mesafesinin 2D olduğu durumda şevli yüzeyin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde az da olsa etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte; kazığın şev tepesinden 3D veya daha uzağa yerleştirilmesi durumunda yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde şev etkisinin ortadan kalkacağı sonucuna varılmıştır. Kazığın şev tepesine olan uzaklığı 0.5D iken kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin zemin yüzeyinin düz olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesinin %64'ü kadar olduğu bu oranın 1D, 2D ve 3D uzaklıklar için de sırası ile %82, %88 ve %99 olarak gerçekleştiği görülmüştür.
- Çelik, alüminyum ve derlin gibi farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen model deneyler ile farklı kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, model deney çalışmalarında kazık malzemesi seçiminin kazığın yanal yük etkisindeki davranışını ve yanal yük taşıma kapasitesini etkilediğini göstermektedir. Kazık başındaki dönme açısının 2° olduğu durumda alüminyum model kazığın yanal yük taşıma kapasitesi, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, çelik kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin %80'i kadar elde edilmiştir. Derlin model kazığın gevşek kum

zemin durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi ise çelik kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin %70'i kadardır.

- Deneysel çalışmalar, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında relatif sıkılığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öyle ki; kazık başındaki 2°'lik dönme açısı durumunda, gevşek kum zemin ve sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında, sıkı kum zemin durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerinin gevşek kum zemindekinin beş katı civarında olduğu görülmüştür.
- Zemin sıkılığının artması ile dönme noktası derinliği de zemin yüzeyine doğru hareketlenmektedir.
- Elde edilen kazık başı yük-deplasman ilişkileri, zeminin gerilme-deformasyon davranışının çok küçük yanal ötelenme değerlerinde dahi non-linear davranış özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Sayısal Analiz Sonuçları;

- Kum zeminin elastisite modülü (E), dilatasyon açısı (ψ) ve zemin-kazık ara yüzey etkileşimini ifade eden mukavemet azaltma katsayısı (R_{inter}) parametrelerinin kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışı üzerindeki etkileri bir seri analiz yapılarak araştırılmıştır. Deney sonuçları ile en uyumlu sayısal analiz sonuçları, zemin elastisite modülünün derinlik ile birlikte doğrusal olarak arttığı ve dilatasyon açısının sıfır olduğu durumda elde edilmiştir.
- Kum zemin elastisite modülünün rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilen bir seri analiz ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, zemin davranışının modellenmesi sırasında elastisite modülü değeri için seçilen yaklaşımın yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediğini

göstermektedir. Elastisite modülünün derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı durumda zemin yüzeyi seviyesinde tanımlanmış olan referans elastisite modülü (E_{referans}) değerinin küçülmesi birim derinlik başına elastisite modülü değerindeki artım miktarını büyütmesine rağmen yanal yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olmaktadır. Bununla birlikte; E_{referans} değerinin küçülmesi ile, kazık başı seviyesindeki yanal ötelenme miktarı da artmaktadır. En büyük yanal yük taşıma kapasitesi değeri hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda elastisite modülü değerinin derinlik boyunca sabit kabul edildiği durumda elde edilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, $E_{\text{referans}} = 1 \text{ N/cm}^2$ için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesinin %65'i kadardır.

- Dilatasyon açısının (ψ) kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiş bir seri analiz ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle, sıkı kum zemin durumunda dilatasyon açısının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Dilatasyon açısının artması ile zeminin daha rijit bir yük-deplasman davranışı sergilediği görülmektedir. Plaxis'de dilatasyon açısı için önerilmiş olan $\psi = \phi - 30^\circ$ yaklaşımına göre gevşek kum zeminde $\psi = 8^\circ$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri $\psi = 0^\circ$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile karşılaştırıldığında $\psi = 8^\circ$ durumuna göre yanal yük taşıma kapasitesi değeri yaklaşık olarak %15 azalmaktadır. Sıkı kum zemin durumunda ise $\psi = 14^\circ$ ve $\psi = 0^\circ$ için yapılan analizler sonucunda yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasında $\psi = 14^\circ$ durumuna göre yaklaşık %25 değerinde bir azalma gözlenmiştir.
- Ara yüzey davranışının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi gerçekleştirilen bir seri analiz ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, R_{inter} katsayısının yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediğini

göstermektedir. R_{inter} katsayısının artmasına bağlı olarak zemin-kazık etkileşiminin artması ile birlikte kum zeminin mukavemeti artmakta, hem de daha rijit yük-deplasman davranışları elde edilmektedir. Buna karşılık; R_{inter} katsayısının değerinin azalması ile, zemin-kazık etkileşimi ve bunların birlikte hareket edebilme kabiliyeti azalmaktadır. Gevşek kum zeminde $R_{inter} = 0.02$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi $R_{inter} = 1.00$ durumunda elde edilen değerin yaklaşık %15'i iken sıkı kum zeminde $R_{inter} = 0.01$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri $R_{inter} = 1.00$ durumunda elde edilenin %10'u kadardır. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde $R_{inter} = 0.70$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile $R_{inter} = 1.00$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi arasında önemli sayılabilecek bir farklılığın olmadığı gözlenmiştir. Zemin-kazık ara yüzey davranışı, zeminin sıkılığından, kazığın zemine yerleştirilme yönteminden ve kazığın imal edildiği malzemeden etkilenmektedir.

- Sayısal analizlerde, aynı R_{inter} katsayısı değeri için gerçekleştirilen analizlerde model kazık ağırlığının değişmesinin diğer bir ifade ile farklı malzemelerden imal edilen model kazıkların kullanılmasının kazık başı seviyesindeki yük-deplasman davranışını önemli derecede etkilemediği görülmüştür.
- Şevlendirilmiş kum zeminde gerçekleştirilen sayısal analizlerde başlangıç gerilme durumu Gravity Loading seçeneği kullanılarak tanımlanmalıdır.
- Sayısal analizlerde uygulanan yük değeri ve bu yükün uygulanması için seçilen yükleme adım sayısının değiştirilmesi sayısal analiz sonuçlarını etkilememektedir.
- Kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sergilemektedir.

Analitik Yöntem Sonuçları;

- Gevşek kum zemin durumunda, analitik yöntemler kullanılarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha büyük iken, sıkı kum zemin durumunda analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha küçük sonuçlar vermiştir. Analitik yöntemlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin göçme anındaki nihai yanal yük taşıma kapasitesi değerleri olduğu göz önüne alındığında, gevşek kum zemin durumunda göçmenin 2° 'den daha büyük, sıkı kum zemin durumunda ise 1° 'lik dönme açısı mertebelerinde meydana geldiği sonucuna varılmaktadır.
- Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda en küçük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntem ile elde edilmişken en büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ise Broms (1964) yöntemi ile elde edilmiştir. Bu iki yöntem ile elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasında hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda %100'lere varan farklar görülmektedir.
- Sıkı kum zemin durumunda Brinch Hansen (1961) ve Broms (1964) yöntemleri birbirleri ile oldukça uyumlu yanal yük taşıma kapasitesi değerleri vermektedir.
- Analitik yöntemlerde; dönme noktası derinliği, genellikle, yanal yük uygulama noktasının zemin yüzeyine mesafesi (e) ve kazık gömülü uzunluğuna bağlı olarak belirlenmekte, zeminin sıklığı ve kazık çapı değişiminden etkilenmemektedir. Brinch Hansen (1961) yönteminde dönme noktası derinliği kazık gömülü uzunluğunun %76'sı iken Meyerhof ve ark. (1981) tarafından önerilen yöntemde %65'i, Prasad ve Chari (1999) tarafından önerilen yöntemde ise %69'u dur.
- Meyerhof ve ark. (1981)'nin önerdiği yöntemde; üniform kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin tabakalı kum zemin yaklaşımı ile hesaplanan değeri ile

üniform kum zemin yaklaşımı ile hesaplanan değeri arasında %30'lara varan farklar olduğu belirlenmiştir.

Gelecekteki Çalışmalar için Öneriler;

- Yapılan deneysel çalışmalar küçük ölçekli model deney çalışmaları olup, elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinde ölçek etkisi irdelenmemiştir. Problem, tam ölçekli arazi deneyleri yapılarak araştırılıp ölçek etkisinin elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri üzerindeki etkisi değerlendirilebilir.
- Tabakalı kum zemin durumunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üstte kil altta kum, üstte kum altta kil, iki kum tabakası arasında kil tabakası bulunması ve iki kil tabakası arasında kum tabakası bulunması durumlarında deneysel ve sayısal olarak araştırılabilir.
- Şevlendirilmiş kum zeminde yapılan çalışmalar farklı şev açıları ve farklı relatif sıkılık değerleri için genişletilebilir.
- Zemin yüzeyi üzerinden farklı yüksekliklerde etkiyen yanal yükler etkisinde rijit kısa kazığın yanal yük ve moment taşıma kapasitesi deneysel ve sayısal olarak araştırılabilir.
- Yapılan deneysel çalışma kil zemin durumunda gerçekleştirilerek drenajlı ve drenajsız yükleme koşulları altında rijit kısa kazığın davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- ABDULJAUWAD, S.N., AL-SULAIMANI, G.J. and BASUNBUL, I.A., 1990. Model Piles Embedded in Submerged Sand and Subjected to Static and Cyclic lateral Loadings. *Geotechnical Engineering*, 21: 161-175.
- ABENDROTH, R. E. and GREIMANN, L. F., 1990. Pile Behavior Established From Model Tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (4): 571-588.
- AL-MHAIDIB, A.I., 2006. Influence of Shearing Rate on Interfacial Friction Between Sand and Steel. *Engineering Journal of the University of Qatar*, Vol. 19.
- ANDERSON, J. B., TOWNSEND, F. C. and GRAJALES, B., 2003. Case History Evaluation of Laterally Loaded Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (3):187-196.
- BOLTON, M.D., 1996. Geotechnical Design of Retaining Walls. *The Structural Engineer*, 74 (21/5): 365-369.
- BRINCH-HANSEN, J., 1961. The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces. *Geoteknisk Institut (The Danish Geotechnical Institute), Bulletin No. 12: 5-9.*
- BROMS, B.B., 1964. Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90 (3): 123-156.
- BROWN, D.A., MORRISON, C. and REESE, L.C., 1988. Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (11): 1261-1276.
- BROWN, D.A. and SHIE, C.F., 1990. Three-Dimensional Finite Element Model of Laterally Loaded Piles. *Computers and Geotechnics*, 10: 59-79.
- CHAE, K.S., UGAI, K. and WAKAI, A., 2004. Lateral Resistance of Short Single Piles and Pile Groups Located Near Slopes. *International Journal of Geomechanics*, 4 (2): 93-103.
- CRAIG, R.F., 1987. *Soil Mechanics (4th edn)*, ELBS (English Language Book Society) / Van Nostrand Reinhold (International): London, 410p.

- DICKIN, E.A. and NAZIR, R., 1999. Moment-Carrying Capacity of Short Pile Foundations in Cohesionless Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (1): 1–10.
- DICKIN, E.A. and LAMAN, M., 2003. Moment Response of Short Rectangular Piers in Sand. *Computers and Structures*, 81: 2717-2729.
- DUNCAN, J. M., EVANS, L. T. and OOI, P. S. K., 1994. Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (5):1018-1033.
- DYSON, G. J. and RANDOLPH, M. F., 2001. Monotonic Lateral Loading of Piles in Calcareous Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (4): 346-352.
- EL NAGGAR, M.H. and WEI J.Q., 1999. Response of Tapered Piles Subjected to Lateral Loading. *Can. Geotech. J.*, 36: 52-71.
- FAN, C.C. and LONG, J.H., 2005. Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 32: 274-289.
- GUNARATNE, M., 2006. Design of Laterally Loaded Piles-The Foundation Engineering Handbook, Taylor&Francis Group, p.: 327-361.
- HAMEED, R. A., GUNARATNE, M., PUTCHA, S., KUO, C. and JOHNSON, S., 2000. Lateral Load Behavior of Jetted Piles. *Geotechnical Testing Journal*, 23 (3): 358-368.
- <http://opencourseware.kfupm.edu.sa/colleges/ces/ae/ae328/files%5C4>
- <http://www.uni.edu/~rao/155%20FEA%201%20Introduction.pdf>
- http://en.wikipedia.org/wiki/File:Acosta_Bridge_southbound_end.jpg
- <http://en.wikipedia.org/wiki/File:A27.jpg>
- <http://img218.imageshack.us/i/04in6.jpg/>
- HU, Z., MCVAY, M., BLOOMQUIST, D., HERRERA, R., and LAI, P., 2006. Influence of Torque on Lateral Capacity of Drilled Shafts in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (4): 456-464.

- JOHNSON, K., LEMCKE, P., KARUNASENA, W. and SIVAKUGAN, N., 2006. Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading. *Environmental Modelling and Software*, 21: 1375-1380.
- KARAHAN, M., 2007. İki Kademeli Teleskopik Vincin Tasarım ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 99s.
- KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., 2006. Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 33: 121-131.
- KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., 2007. Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5): 512-521.
- KESKİN, M.S., 2009. Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin DeneySEL ve Teorik Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 377s.
- KIM, B.T., KIM, N.K., LEE, W.J. and KIM, Y.S., 2004. Experimental Load-Transfer Curves of Laterally Loaded Piles in Nak-Dong River Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (4): 416-425.
- KONG, L.G. and ZHANG, L.M., 2006. Rate-Controlled Lateral-Load Pile Tests Using A Robotic Manipulator in Centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, 30 (3): 1-10.
- LAMAN, M., 1995. The Moment Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Clay. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, U.K., 176p.
- LAMAN, M., KING, G.J.W. and DICKIN, E.A., 1999. Three-Dimensional Finite Element Studies of the Moment-Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Cohesionless Soil. *Computers and Geotechnics*, 25: 141-155.
- MARTIN, G.R. and CHEN, C.Y., 2005. Response of Piles due to Lateral Slope Movement. *Computers and Structures*, 83: 588-598.
- MATLOCK, H. and REESE, L.C., 1960. Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86 (5): 63-91.

- MCVAY, M., BLOOMQUIST, D., VANDERLINDE, D. and CLAUSEN, J., 1994. Centrifuge Modelling of Laterally Loaded Pile Groups in Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 17 (2): 129-137.
- MCVAY, M., ZHANG, L., MOLNIT, T. and LAI, P., 1998. Centrifuge Testing of Large Laterally Loaded Pile Groups in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (10): 1016-1026.
- MEYERHOF, G.G., MATHUR, S.K. and VALSANGKAR, A.J., 1981. Lateral Resistance and Deflection of Rigid Walls and Piles in Layered Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 18: 159-170.
- MEYERHOF, G.G., SASTRY, V.V.R.N. and YALCIN, A.S., 1988. Lateral Resistance and Deflection of Flexible Piles. *Can. Geotech. J.*, 25: 511-522.
- MROUEH, H. and SHAHROUR, I., 2008. Numerical Analysis of the Response of Battered Piles to Inclined Pullout Loads. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, DOI: 10.1002/nag.765.
- MUQTADIR, A. and DESAI, C.S., 1986. Three-Dimensional Analysis of A Pile-Group Foundation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10: 41-58.
- PATRA, N.R. and PISE, P.J., 2001. Ultimate Lateral Resistance of Pile Groups in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (6): 481-487.
- PLAXIS, 2007. Manuals. 3D Foundation Version 2, (Edited by BRINKGREEVE, R.J.B.), Delft University of Technology & PLAXIS bv., The Netherlands.
- POTTS, D.M. and ZDRAVKOVIĆ, L.T., 1999. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford, London, UK.
- POULOS, H.G., 1971. Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single Piles. *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division*, 97 (5): 711-731.
- POULOS, H.G. and DAVIDS, E.H., 1980. *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 397p.
- PRASAD, Y.V.S.N. and CHARI, T.R., 1999. Lateral Capacity of Model Rigid Piles in Cohesionless Soils. *Soils and Foundations*, 39 (2): 21-29.

- REESE, L.C., COX, W.R. and KOOP, F.D., 1974. Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. Proc. 6th Offshore Technol. Conf., Offshore Technology Conference, Dallas, 473-483.
- ROLLINS, K. M., LANE, J. D. and GERBER, T. M., 2005. Measured and Computed Lateral Response of a Pile Group in Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131 (1): 103-114.
- RUESTA, P.F. and TOWNSEND, F.C., 1997. Evaluation of Laterally Loaded Pile Group at Roosevelt Bridge. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (12): 1153-1161.
- SASTRY, V.V.R.N. and MEYERHOF, G.G., 1990. Behaviour of Flexible Piles Under Inclined Loads. Can. Geotech. J., 27: 19-28.
- SAWWAF, M.E., 2006. Lateral Resistance of Single Pile Located Near Geosynthetic Reinforced Slope. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (10): 1336-1345.
- SHEN, C.K., BANG, S., DESALVATORE, M. and PORAN, C.J., 1988. Laterally Loaded Cast-in-Drilled-Hole Piles. Transportation Research Record 1191, 155-165.
- TROCHANIS, A.M., BIELAK, J. and CHRISTIANO, P., 1991. Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles. Journal of Geotechnical Engineering, 117 (3): 429–447.
- WAKAI, A., GOSE, S. and UGAI, K., 1999. 3-D Elasto-Plastic Finite Element Analyses of Pile Foundations Subjected to Lateral Loading. Soils and Foundations, 39 (1): 97-111.
- www.aaue.dk/bm/ansys/sdu/SDU-FEM-introduction.pdf
- www.clickindia.com
- www.esit.com.tr
- www.kgm.gov.tr/asps/trafik/yonetmelik2.htm
- YALCIN, A.S. and MEYERHOF, G.G., 1990. The Effect of Installation on the Ultimate Resistance of Rigid Piles Under Inclined Loads in Layered Sand. Soils and Foundations, 30 (3): 37-52.

- YANG, Z. and JEREMIC, B., 2003. Numerical Study of Group Effects for Pile Groups in Sands. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27: 1255-1276.
- YANG, Z. and JEREMIC, B., 2005. Study of Soil Layering Effects on Lateral Loading Behavior of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (6): 762-770.
- ZHANG, L., MCVAY, M.C. and LAI, P., 1999. Numerical Analyses of Laterally Loaded 3x3 to 7x3 Pile Groups in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (11): 936-946.
- ZHANG, L.M., 2003. Behavior of Laterally Loaded Large-Section Barrettes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (7): 639-648.
- ZHANG, L., SILVA, F. and GRISMALA, R., 2005. Ultimate Lateral Resistance to Piles in Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (1): 78-83.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Kayseri’de doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimlerimi sırası ile Ahmet Paşa İlkokulu, 50.Yıl Dedeman Orta Okulu ve Melikgazi Lise’sinde tamamladım. 1996 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimime başladım. 2000 yılında bölümümden mezun olarak aynı yıl içerisinde Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans eğitimime başladım. 2001 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı’na araştırma görevlisi olarak atandım. 2003 yılında yüksek lisans çalışmamı tamamladıktan sonra 2004 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde doktora eğitimime başladım. Evli ve bir çocuk babasıyım.