

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Kazıklı Temelerde Uplift (Çekme) Dayanımının DeneySEL ve
Nümerik Olarak Analizi**

Ahmet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Eylül, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**Kazıklı Temellerde Uplift (Çekme) Dayanımının Deneysel ve
Nümerik Olarak Analizi**

Ahmet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu Doktora Tezi 08/09/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çoğunluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ (Danışman)
: Prof. Dr. Hasan ÇETİN
: Prof. Dr. M. Salih KESKİN
: Prof. Dr. Murat ÖRNEK
: Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

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

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Teorik Çalışmalar	4
2.1.1 Balla (1961)	4
2.1.2. Meyerhof ve Adams (1968)	6
2.1.3. Vesic (1971)	9
2.1.4. Saeedy (1987)	12
2.1.5. Teorilerin Tartışılması	13
2.2. Deneysel Çalışmalar	15
2.2.1 Shanker ve ark. (2007)	15
2.2.2. Ilamparuthi ve Dickin (2001)	16
2.2.3. Chattopadhyay ve Pise (1986)	17
2.2.4. Das (1986)	18
2.3. Nümerik Çalışmalar	19
2.3.1 Faizi ve Ark (2015)	19
2.3.2 Kumar, A. ve Ark. (2021)	19
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	21
3.1. Genel	21
3.2. Deney Düzenegi	21
3.2.1. Yükleme Sistemi	21
3.2.2. Deney Kasası	24
3.2.3. Model Kazık	25
3.2.4. Yük Hücresi	26
3.2.5. Deplasman Ölçer	27
3.2.6. Veri Kaydetme Ünitesi	28
3.2.7. Titreşim Cihazı	29
3.3. Kum Zemin Özellikleri	29
3.3.1. Endeks Deneyler	30
3.3.2. Kayma Mukavemeti Deneyleri	32

3.4. Deney Yöntemi	32
3.4.1. Ölçüm Aletlerinin Kalibrasyonu	32
3.4.2. Yükleme Düzenine Kalibrasyonu	35
3.4.3. Deneyin Yapılışı.....	35
3.5 Geogrid Donatı Özellikleri.....	39
3.6. Deney Programı	40
3.7 Deney Sonuçları.....	41
3.7.1. Gömülme Derinliğinin Düz Kazıklarda Gevşek ve Sıkı Kum Koşullarında Çekme Kapasitesine Etkisi.....	41
3.7.2. Gömülme Derinliğinin Çan Başlıklı Kazıklarda Gevşek ve Sıkı Kum Koşullarında Çekme Kapasitesine Etkisi	44
3.7.3. Geogrid İle Güçlendirilmiş Gevşek Kum Koşullarında Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi	46
3.7.4. Tekil Kazık.....	48
3.7.5. Kazık Gömülme Oranı (L/D)	48
3.7.6. Zemin Sıkılığı (D_r)	48
4. NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMASI.....	51
4.1. Genel.....	51
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	51
4.3. Zemin Davranışının Modellenmesi.....	53
4.4. Kazık Davranışının Modellenmesi.....	58
4.5. PLAXIS 3D.....	58
4.5.1. SOIL Sekmesi	58
4.5.2. STRUCTURES Sekmesi.....	59
4.5.3. MESH Sekmesi	62
4.5.4. STAGED CONSTRUCTION Sekmesi.....	62
4.6. Nümerik Analiz Sonuçları	64
4.6.1. Sonlu Elemanlar Ağı	65
4.6.2. Tekil Kazık Düz ve Çan Başlık.....	66
4.6.2.1. Düz Kazık Üzerinde Sıkı Kum Zeminde Yapılan Nümerik Analizler.....	69
4.6.2.2. Çan Başlı Kazık Üzerinde Sıkı Zeminde Yapılan Nümerik Analizler.....	69
4.6.2.3. Geogrid İle Güçlendirilmiş Sıkı Kum Zeminde Çan Başlı Kazığın Nümerik Analizleri.....	70
5. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	73
5.1. Genel.....	73
5.2. Gevşek ve Sıkı Kumda Düz Kazık Çekme Yüğü Kapasitesi.....	73
5.3. Gevşek ve Sıkı Kumda Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi.....	74

5.4. Geogridli Gevşek Kumda Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi	74
5.5. Sıkı ve Gevşek Kumda Düz ve Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesinin DeneySEL Karşılaştırması.....	75
5.6. Sıkı Kumda Düz ve Çan Başlı Kazıklarda Deney ve Nümerik Analiz Karşılaştırması.....	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
6.1 Genel.....	83
6.2. Sonuçlar	83
6.3. Öneriler	86
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	91



**Kazıklı Temellerde Uplift (Çekme) Dayanımının
Deneysel ve Nümerik Olarak Analizi**

Ahmet ARSLAN

Danışman: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ÖZ

Temel mühendisliği alanında son yıllarda teknolojiye yeni gelişmelere paralel olarak inşaat yapım tekniklerinde önemli mesafeler kat edilmiş olup, bu gelişmeler ile birlikte bazı yapı temellerinin farklı açıdan değerlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle yüksek gerilim hatları, radyo ve televizyon kuleleri, rüzgâr enerji türbinleri, GSM operatörleri baz istasyonları, uzun fabrika bacaları, deniz platformları, viyadük geçişleri ve boru hatları gibi özel yapıları yakından ilgilendirmektedir. Bu çalışmada, söz konusu yapı temellerinde de oluşan çekme kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik olarak önceden ortaya konulmuş teoriler ve son yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda göz önünde bulundurularak, farklı durumların belirlenmesi için laboratuvar model deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneği için şaft çapı 25 mm ve çan başı 75mm olan model kazık ile kumun sıklığı, gömülme oranı ve çan başı dikkate alınarak çalışmalar yapılmış ve sonuçlandırılmıştır. Çalışmalarda, gevşek ve sıkı kum zemine gömülü çan başlı tekil kazıkların hem laboratuvar hem de PLAXIS 3D bilgisayar programı kullanılarak donatılı ve donatısız olarak üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik çözümü yapılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda çan başlı kazıkların düz kazıklara kıyasla, gömülme oranı arttıkça çekme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Düz kazığa göre, çan başlı kazığın geometrik formunun zeminle etkileşimini optimize ederek yük transferini etkin biçimde artırdığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca, geogrid donatı yerleşiminin kazık çekme kapasitesini önemli mertebede etkilediği belirlenmiştir. Donatı mesafesinin çan başından olan optimum uzaklığı 0.250 olarak önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çan başlıklı çekme kazığı, Zemin sıklığı, Plaxis 3D, Sonlu eleman yöntemi.

Experimental and Numerical Analysis of Uplift (Tensile) Strength in Pile Foundations

Ahmet ARSLAN

Advisor: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ

Department of Civil Engineering

ABSTRACT

In foundation engineering, significant progress has been achieved in construction techniques in parallel with recent technological advancements. These developments have created a need to reassess certain foundation systems from different perspectives. This issue is particularly relevant for special structures such as high-voltage transmission lines, radio and television towers, wind energy turbines, GSM operator base stations, tall industrial chimneys, offshore platforms, viaduct crossings, and pipeline systems. In this study, a laboratory-scale model test setup was developed to investigate the tensile forces occurring in such foundation systems, taking into account previously established theories as well as recent experimental studies, and to explore scenarios that have not yet been addressed. The experimental setup employed a model pile with a shaft diameter of 25 mm and a bell diameter of 75 mm, and the effects of soil density, embedment ratio, and bell configuration were examined. The behavior of bell-shaped single piles embedded in loose and dense sand was investigated both experimentally and numerically using the three-dimensional finite element method in the PLAXIS 3D software, with and without geogrid reinforcement. The results demonstrated a good agreement between the experimental and numerical findings. At the conclusion of the study, it was determined that the uplift capacity of bell-shaped piles increased compared to straight piles as the embedment ratio increased. Furthermore, the geometric configuration of the bell-shaped pile was found to optimize soil–pile interaction and significantly enhance load transfer efficiency. In addition, the placement of geogrid reinforcement was shown to substantially influence the uplift capacity of the pile, with an optimal reinforcement distance of $u/D = 0.25$ from the bell head being recommended.

Keywords: Bell-headed uplift pile, Soil density, Plaxis 3D, Finite element method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında gösterdiği ilgi, verdiği destek ve sağladığı katkılardan dolayı, tez yürütücüm ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a, tezimin hazırlanması sırasında göstermiş olduğu ilgi ve katkılardan dolayı Sayın Doç. Dr. Buse EMİRLER TOLUN'a, model düzeneğinin oluşturulması ve laboratuvar çalışmaları sırasında verdiği destek ve katkıdan dolayı Geoteknik Ana Bilim Dalı çalışanlarına ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmam süresince manevi desteğini benden esirgemeyen eşim Sümran'a ve sevgili çocuklarım Ata ve Naz'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Vesic'in dairesel temeller için içsel sürtünme açısı (θ) ile koparma faktörünün (F_q) değişimi	11
Çizelge 2.2. Vesic'in sürekli temeller için içsel sürtünme açısı (θ) ile koparma faktörünün değişimi	12
Çizelge 2.3. Dairesel temeller için, laboratuvar deney sonuçları ile teorilerin karşılaştırılması.....	15
Çizelge 3.1. Model kazık özellikleri	26
Çizelge 3.2. Elektronik yük hücre özellikleri	27
Çizelge 3.3. Elek analizi sonuçları	30
Çizelge 3.4. Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık (Özaydın, 2011).....	31
Çizelge 3.5. Secugrid® 60/60 Q1 tipi geogrid özellikleri (Keskin, 2006)	39
Çizelge 3.6. Düz ve çan başlı kazık deney programı.....	41
Çizelge 3.7. Gevşek Zeminde Düz Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar	42
Çizelge 3.8. Sıkı Zeminde Düz Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	43
Çizelge 3.9. Düz Kazık İçin Sıkılığın Etkisi.....	44
Çizelge 3.10. Gevşek Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar	44
Çizelge 3.11. Sıkı Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar	45
Çizelge 3.12. Çan Başlıklı Kazıklar İçin Sıkılığın Etkisi	46
Çizelge 3.13. Gevşek Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin $L/D=10$ İçin Elde Edilen Donatılı Deney Sonuçları	46
Çizelge 4.1. Sıkı kum zemine ait malzeme özellikleri	65
Çizelge 4.2. Kazık eleman ve geogride ait malzeme özellikleri.....	65
Çizelge 5.1. Gevşek Zeminde Çan Başlı Kazıklar İçin $L/D=10$, Geogridli Elde Edilen Deney Sonuçları	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çekme (uplift) yüküne maruz yapılar	1
Şekil 2.1. Yüzeysel bir temelde çekme (uplift) durumu (Das, 1999).....	3
Şekil 2.2. Yüzeysel ve dairesel bir temelde çekme durumu (Das, 1999).....	4
Şekil 2.3. F_1+F_3 fonksiyonunun $\emptyset$ ve D_f/B 'ye bağlı olarak değişimi (Das, 1999)	5
Şekil 2.4. Gömülme oranı (D_f/B) ile kopma faktörünün (F_q) değişimi (Das, 1999)	6
Şekil 2.5. Sürekli temellerin çekme mekanizması (Das, 1999).....	7
Şekil 2.6. K_u 'nun içsel sürtünme açısı ($\emptyset$) ile değişimi	8
Şekil 2.7. Vesic (1971)'in genişleyen boşluk teorisi (Das,1999).....	9
Şekil 2.8. Dairesel temelde Vesic'in genişleyen boşluk teorisi.....	10
Şekil 2.9. Vesic'in dairesel temeller için içsel sürtünme açısı ($\emptyset$) ile kopma faktörünün (F_q) değişimi (Das, 1999).....	11
Şekil 2.10. Vesic'in sürekli temeller için içsel sürtünme açısı ($\emptyset$) ile kopma faktörünün (F_q) değişimi (Das,1999).....	12
Şekil 2.11. Saeedy (1987) teorisine göre F_q ve içsel sürtünme açısına ($\emptyset$) bağlı olarak D_f/B 'nin değişimi.....	13
Şekil 2.12. Dairesel temeller için, laboratuvar deney sonuçları ile teorilerin karşılaştırılması (Das,1999).....	14
Şekil 2.13. Laboratuvar deney düzeneği (K.Shanker ve ark, 2007).....	16
Şekil 2.14. Değişik güçlendirme düzenlemeler ve çekme yükü davranışı.....	17
Şekil 2.15. Tekil kazık ve göçme mekanizması (Chattopadhyay ve Pise, 1986).....	18
Şekil 3.1. Yükleme çerçevesi	22
Şekil 3.2. Deney düzeneği.....	23
Şekil 3.3. Deney düzeneği detayları.....	24
Şekil 3.4. Deney kasası	25
Şekil 3.5. Çan başlı ve düz model kazıklar	25
Şekil 3.6. Çan başlı kazık-geogrid etkileşim model kesiti	26
Şekil 3.7. Yük hücresi	27
Şekil 3.8. Deplasman ölçer.....	28
Şekil 3.9. Veri kaydetme ünitesi	28
Şekil 3.10. Titreşim cihazı.....	29
Şekil 3.11. Delrin plak.....	29
Şekil 3.12. Dane çapı dağılımı eğrisi	30
Şekil 3.13. Rölatif sıkılık deneyi.....	32
Şekil 3.14. Ölçüm aletlerinin sensör modunun seçilmesi.....	34
Şekil 3.15. Ölçüm aletlerinin kalibrasyonu ve ölçüm okuma şekilleri.....	34

Şekil 3.16. Yükleme düzeneğinin kalibrasyonu.....	35
Şekil 3.17. Hız-frekans ilişkisi	35
Şekil 3.18. Deneyin hazırlanması.....	37
Şekil 3.19. Geogrid donatılı deneyin hazırlanması	38
Şekil 3.20. Geogrid donatı yerleşme konfigürasyonları ($u/D=0.25, 0.50, 1.00$).....	38
Şekil 3.21. Secugrid® 60/60 Q1 (iki eksenli geogrid).....	39
Şekil 3.22. Düz kazık, gevşek kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi.....	42
Şekil 3.23. Düz kazık, sıkı kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi ($L/D=5, 10, 15, D_r=\%70$)	43
Şekil 3.24. Çan başlı kazık, gevşek kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi ($L/D=5, 10, 15, D_r=\%30$)	44
Şekil 3.25. Çan başlı kazık, sıkı kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi.....	45
Şekil 3.26. Geogridle donatılandırılmış çan başlı kazık, (u/D): 0.25, 0.50, 1.00, toplam çekme yükü-($L/D=10, D_r=\%30$)	47
Şekil 4.1. Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması (Sture, 2004)	52
Şekil 4.2. Global matris eşitliklerinin elde edilmesi (Uncuoğlu, 2009)	53
Şekil 4.3. Elastik-tam plastik model (PLAXIS Material Models Manual, 2015)	55
Şekil 4.4. E_0 , E_{50} ve E_{ur} Modülleri (PLAXIS Material Models Manual, 2015).....	56
Şekil 4.5. Mukavemet parametreleri (PLAXIS Material Models Manual, 2015)	57
Şekil 4.6. Zemin profilinin oluşturulması	59
Şekil 4.7. Kazık elemanın oluşturulması.....	60
Şekil 4.8. Malzeme özelliklerinin tanımlanması	61
Şekil 4.9. Yükün uygulanması	61
Şekil 4.10. Üç boyutlu zemin elemanı (10 düğümlü-dört yüzlü)	62
Şekil 4.11. Üç boyutlu model geometrisi.....	64
Şekil 4.12. Üç boyutlu sonlu eleman ağı.....	66
Şekil 4.13. Sıkı zemin çan başlı kazık gömülme oranı (L/D) etkisi.....	68
Şekil 4.14. Sıkı zemin çan başlı kazıkta gömülme oranının (L/D) deplasman dağılımına etkisi.....	69
Şekil 4.15. Düz kazık sıkı kum zemin üzerinde yapılan nümerik analizler ($L/D=5, L/D=10$ ve $L/D=15, D_r=\%70$)	69
Şekil 4.16. Çan başlı kazık sıkı kum zemin üzerinde yapılan nümerik analizler ($L/D=5,$ $L/D=10$ ve $L/D=15, D_r=\%70$)	70
Şekil 4.17. Çan başlı kazığın geogrid ile güçlendirilmiş sıkı kum zeminde yapılan çekme yükü nümerik analizleri ($L/D=10, u/D=0.25, u/D=0.50, u/D=1.00, D_r=\%70$).....	70

Şekil 4.18. Çan başlı kazığın geogrid ile güçlendirilmiş sıkı kum zeminde yapılan deplasman nümerik analizleri ($L/D=10$, $u/D=0.25$, $u/D=0.50$, $u/D=1.00$, $Dr=\%70$)	71
Şekil 5.1. Gevşek kumda çan başlı kazık deneysel çekme kapasiteleri	75
Şekil 5.2. Gevşek kumda, $L/D=5$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.3. Gevşek kumda, $L/D=10$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.4. Gevşek kumda, $L/D=15$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	77
Şekil 5.5. Sıkı kumda, $L/D=5$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	78
Şekil 5.6. Sıkı kumda, $L/D=10$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	78
Şekil 5.7. Sıkı kumda, $L/D=15$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması.....	79
Şekil 5.8. Düz kazık, sıkı zemin koşulları deney ve nümerik analiz sonuçları, ($Dr=\%70$).....	80
Şekil 5.9. Çan başlı kazık, sıkı zemin koşulları deney ve nümerik analiz sonuçları, ($Dr=\%70$).....	80
Şekil 5.10. Çan başlı kazığın geogrid donatılı sıkı kumda ve ($L/D=10$) gömülme derinliği nümerik analiz çekme kapasitesi sonuçlarının u/D oranına bağlı değişimi	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Temel alanı
A_s	: Kazık gövdesinin yüzey alanı
A_1	: Kazığın net çekme kapasite faktörü
B	: Temel genişliği, Dairesel temel çapı
c	: Kohezyon
c_u	: Zemin drenajsız kayma mukavemeti
c_u	: Üniformluk katsayısı
c_c	: Derecelenme katsayısı
D	: Kazık taban çapı
D_f	: Sığ temel gömülme derinliği
D_r	: Kumun rölatif sıklığı
D_r/B	: Sığ temel gömülme oranı
$(D_r/B)_{cr}$	: Sığ temel kritik gömülme oranı
D_{10}	: Efektif dane çapı
D_{30}	: Granülometri eğrisinde elekten geçen %30'a karşılık gelen dane çapı
D_{60}	: Granülometri eğrisinde elekten geçen %60'a karşılık gelen dane çapı
e	: Boşluk oranı
e_{maks}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
E_{ur}	: Boşaltma/tekrar yükleme modülü
E_0	: Başlangıç rijitlik modülü
E_{50}	: Sekant modülü
f	: Akma fonksiyonu
$\{f\}_e$	: Eleman yük vektörü
$\{F\}$	: Sistem yük vektörü
F_c	: Kil zeminlerin kopma faktörü
F_q	: Kopma faktörü
f_s	: Kazık ortalama birim yüzey sürtünmesi
H	: Kazık boyu
K_u	: Nominal çekme katsayısı
K_a	: Aktif zemin basınç katsayısı
K_p	: Pasif zemin basınç katsayısı
K_b	: Zemin sürtünme açısı ve gömülme oranına bağlı bir katsayı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

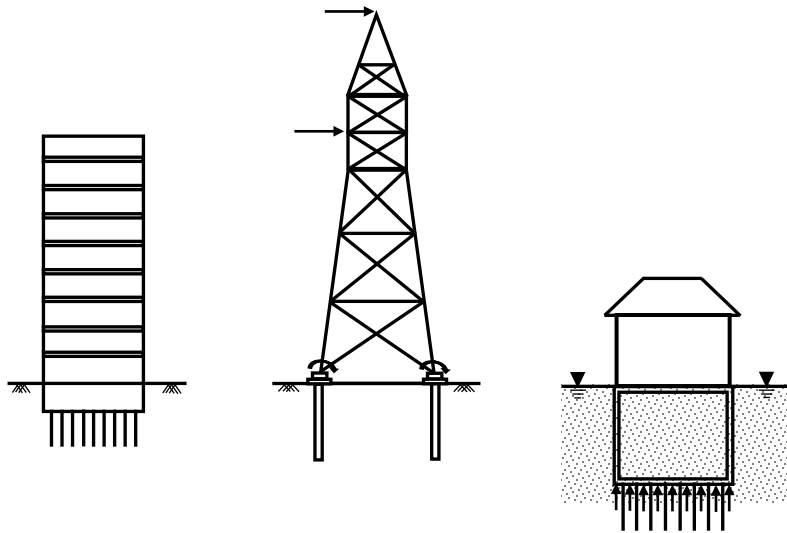
$[k]_e$	: Eleman rijitlik matrisi
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi
L	: Kazık gömülme boyu
L/D	: Kazık gömülme oranı
M	: Zemin sürtünme açısına bağlı bir katsayı
P_o	: Vesic'in (1965) önerdiği temel çekme kapasitesi
P_1	: İlave zemin basıncı
$P_u(\text{Net})$	: Düz bir kazığın net çekme kapasitesi
P_{ref}	: Referans basınç değeri
Q_u	: Temel çekme yükü
Q_u	: Kazık nihai çekme kapasitesi
R_f	: Göçme oranı
S_f	: Şekil faktörü
R	: Yenilme yayının yarıçapı
u	: Donatının çan başlıktan olan mesafesi
W	: Temel ve zemin ağırlığı
W	: Kasa genişliği
α	: Yenilme eğrisinin zemin yüzeyi ile yapmış olduğu açı
Δ	: Düşey yer değiştirme
δ	: Zemin ile kazık arasındaki sürtünme açısı
$\emptyset$	: Zemin içsel sürtünme açısı
γ	: Zemin birim hacim ağırlığı
γ_k	: Zemin kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
ψ	: Dilatasyon açısı
ν	: Zeminin poisson oranı
μ	: Deneysel sıkışma faktörü
σ	: Normal gerilme
σ_h	: Yatay gerilme
σ_v	: Düşey gerilme

1. GİRİŞ

Zemin Mekaniği konusu ilk defa bilimsel olarak Avusturyalı Mühendis Karl Terzaghi tarafından 20. yüzyılın başında İstanbul'da ortaya konmuştur. Bu tarihten itibaren gelişerek deprem, çevre ve hatta buz ile ilgili sorunların da inceleme sahasına alınması ile “Geoteknik Mühendisliği” olarak anılmaya başlanmıştır. Son olarak geline nokta Geoteknik Mühendisliği “Temel Mühendisliği”, “Zemin Mekaniği” ve “Zemin Dinamiği” bölümlerine ayrılarak nihai durumunu almıştır. Temel mühendisliği alanında son yıllarda teknolojiye yeni gelişmelere paralel olarak inşaat yapım tekniklerinde önemli mesafeler kat edilmiş olup, bu gelişmeler ile birlikte bazı yapı temellerinin farklı açılardan değerlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle yüksek gerilim hatları, radyo televizyon kuleleri, rüzgâr enerji santralleri (RES), uzun fabrika bacaları, deniz platformları ve boru hatları başta olmak üzere özgün mühendislik yapılarıyla doğrudan ilişkilidir Şekil 1.1. Bu tür yapılar, doğal olaylar ve çeşitli dış etkiler nedeniyle temellerine aktarılan çekme kuvvetlerinin etkisi altında kalabilmekte ve dolayısı ile bu tür yapıların temel sistemlerinde çekme kapasitesinin bulunması önem arz etmektedir.

Geoteknik mühendisliği son 65 yıldır temellerin çekme (uplift) kuvvetleri ile ilgili çalışma sahası bulmuş ve buna bağlı olarak konu ile ilgili tasarım kriterleri geliştirilmiştir. Geliştirilen teoriler ile değişik konfigürasyona sahip yapı temellerinin çekme kapasitesi araştırılmış ve birbirine olan avantajları ve dezavantajları sunulmaya çalışılmıştır.

Konu, laboratuvar ortamında oluşturulan model deney düzeneği ile literatürde daha önceden yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak belli çapta model kazık göz önüne alınarak çan başlık kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, Plaxis 3D paket programında analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları birlikte yorumlanarak çeşitli önerilerde bulunulmuştur.



Şekil 1.1. Çekme (uplift) yüküne maruz yapılar

Bu çalışmada, kum zemine gömülü düz ve çan başlı tekil kazığın çekme yükünün oluşturduğu etkiler altındaki davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca, u/D oranına bağlı olarak farklı seviyelere yerleştirilen geogrid donatının kazıkların çekme kapasitesi üzerindeki etkileri, deneysel çalışmalar ve nümerik modellemeler aracılığıyla incelenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile nümerik modellemelere dayalı analizlerde, dairesel kesitli çelik kazıklar ve çan başlı kazık tipleri kullanılmıştır. Kum zemine gömülü kazıkların davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan nümerik analizler, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak geliştirilen PLAXIS 3D paket programı kullanılarak yürütülmüştür. Deneysel ve nümerik analizlerde, tekil kazığın çekme kapasitesi, aşağıda belirtilen parametrelerin etkisi altında ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelenen ana başlıklar;

- Kazık gömülme oranı (L/D),
- Zemin sıkılığı (D_r),
- Kazık çan başlığının çekme kapasitesine etkisi
- Donatı etkisinin çekme kazıklarda optimizasyonu olarak sıralanmıştır.

Tez çalışması kapsamında “Giriş” bölümü dışında diğer bölümlerde yapılan çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

2. bölümde temellerin çekme kapasitesi hakkında yapılmış önceki teoriler, deneysel ve nümerik çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki temellerin çekme kapasitelerine yönelik çalışmalarda öncelikle yüzeysel temeller için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Konunun teorik altyapısını oluşturan çalışmaların büyük bir kısmını deneysel çalışmalar oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, tekil kazıkların çekme dayanımlarının öngörülmesine yönelik literatürde geliştirilmiş analitik tasarım yaklaşımları da ele alınmış ve ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

3. bölümde tez kapsamında kum zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Deney düzeneği, deneylerde kullanılan kum zeminin özellikleri ve kullanılan model kazıklara ilişkin ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilmiştir.

4. bölümde üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3D FEM) ile çözüm yapabilen PLAXIS 3D tabanlı sayısal modelleme aracı tanıtılmıştır. Tekil kazığın modellenmesi ve analizi kapsamında izlenen yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçların, laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ile uyumluluğu araştırılmış ve ayrıca sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

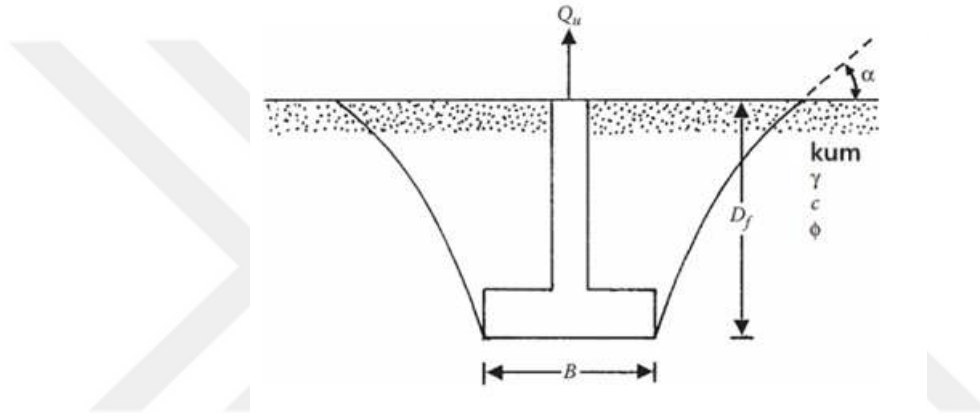
5. bölümde laboratuvar deney sonuçları ve Plaxis 3D’den elde edilen nümerik sonuçların tamamı mukayese edilmiştir.

6. bölümde araştırma kapsamında ulaşılan bulgular bütüncül bir biçimde derlenmiş, ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalara yönelik kapsamın belirlenmesine ilişkin öneriler sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, temellerin çekme kapasitesine ilişkin daha önce yapılmış teorik, deneysel ve nümerik çalışmalar sunulmuştur. Temeller ve üzerindeki yapılar, belirli özel koşullarda çekme kuvvetlerine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, tasarım aşamasında söz konusu temellerin çekme kuvvetlerine karşı yeterli güvenlik düzeyini sağlaması temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Son altmış beş yıldır, literatürde, kum zemin içerisine gömülü temellerin nihai çekme kapasitesinin belirlenebilmesi amacıyla farklı kuramsal modeller ortaya konulmuştur.

Konuya ilişkin mevcut durumun daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla (Das, 1999) tarafından sunulan Şekil 2.1 incelenebilir.



Şekil 2.1 Yüzeysel bir temelde çekme (uplift) durumu (Das, 1999)

- B : Temel genişliği c : Kohezyon ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı
D_f : Temel derinliği γ : Zemin birim hacim ağırlığı
Q_u : Yenilme yüzeyi boyunca sürtünme direnci + temel ve yenilme zonu içerisindeki toprak ağırlığı

Genişliği B ve gömülme derinliği D_f olan yüzeysel bir temelin nihai çekme kapasitesi (Q_u), yenilme yüzeyi boyunca mobilize edilen zemin sürtünme direncine ek olarak, yenilme bölgesi içerisinde yer alan temel ile zemin kütesinin ağırlıklarının toplamından oluşmaktadır. Bu konunun incelenmesi sırasında gerekli tanımlar yapılmış olup, söz konusu tanımlara dayanarak gömülme oranı (D_f/B) değerleri için yenilme mekanizmasının Şekil 2.1’de gösterildiği şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir. Gömülme oranının (D_f/B) daha büyük değerlerinde ise yenilmenin temel civarında olduğu ve yenilme yüzeyinin zemin üst kotuna kadar ulaşmadığı görülmektedir. Bu tür davranış sergileyen temeller, çekme yükleri altında “derin temel” olarak adlandırılmaktadır. Bir temelin yüzeysel temel davranışından derin temel koşullarına geçiş yaptığı gömülme oranına ise kritik

gömölme oranı $(D_f/B)_{cr}$ denilmektedir. Kritik gömölme oranının büyüklüğü kum zeminlerde 3 ile 11 arasında, doymun kil zeminlerde ise 3 ile 7 arasında değişmektedir (Das, 1999).

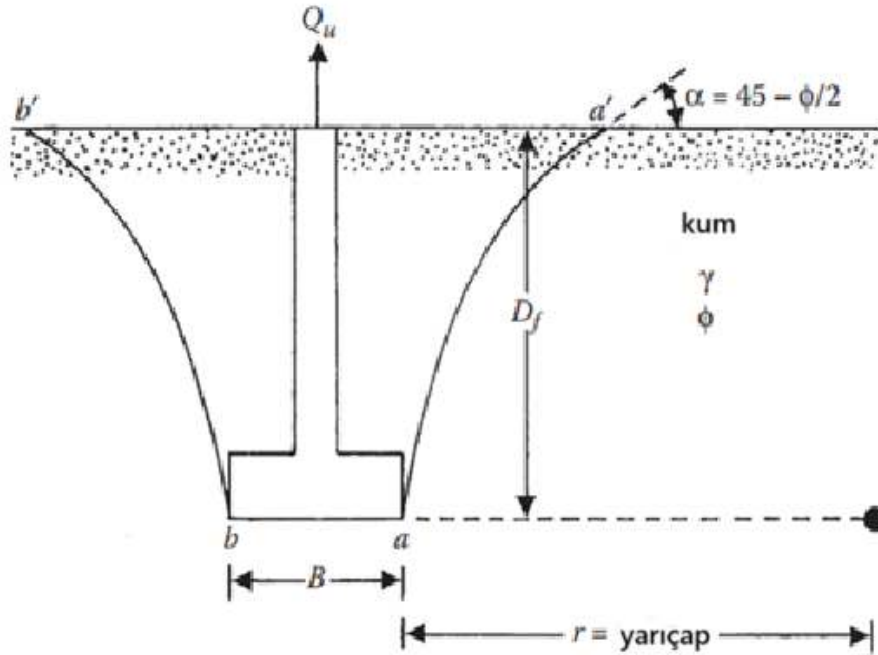
Temel mühendisliği, zemin mekaniği ve zemin dinamiği altbilim dallarına ayrılan geoteknik mühendisliğinde son 65 yıl boyunca; kum içerisine gömölü dairesel, dikdörtgen ve sürekli temellerin net çekme kuvvetinin tahmini için çok sayıda teorik ve deneysel metot geliştirilmiştir. Ancak, çekme etkisi altındaki kazıklı temel sistemleriyle ilgili literatür, basına maruz kazıklarla ilgili literatüre kıyasla görece daha sınırlı kalmıştır. Bu teorilerden belli başlıları aşağıda sunulmuştur.

Bu bölümde, çekme yükü etkisindeki tekil kazık davranışını içeren çalışmalar; teorik ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki ana başlıkta anlatılmıştır.

2.1. Teorik alışmalar

2.1.1 Balla (1961)

Bu teori, sıkı kum zeminlerde gerçekleştirilen çok sayıda arazi ve laboratuvar deneyinin sonuçlarına dayanmaktadır. Balla, söz konusu bulgulara dayanarak yüzeysel dairesel temeller için şekil 2.2’de gösterilen modeli önermiştir.



şekil 2.2. Yüzeysel ve dairesel bir temelde çekme durumu (Das, 1999)

şekil üzerinde aa’ ve bb’ yayları, dairesel yenilme yüzeyini temsil etmekte olup, yenilme yüzeyi ile zemin arasındaki α açısı $45^\circ - \phi/2$ ’ye eşittir. Ayrıca, dairenin yarıçapı ile aa’ ve bb’ yaylarının uzunluğu, eşitlik (2.1) kullanılarak belirlenmektedir.

$$r = \frac{D_f}{\sin(45 + \phi/2)} \quad (2.1)$$

Nihai çekme kapasitesi, temele etki eden iki temel bileşen tarafından belirlenmektedir:

- a) Yenilme zonu içerisinde kalan zemin ve temelin ağırlığı,
- b) Yenilme yüzeyi boyunca mobilize olan kayma direnci.

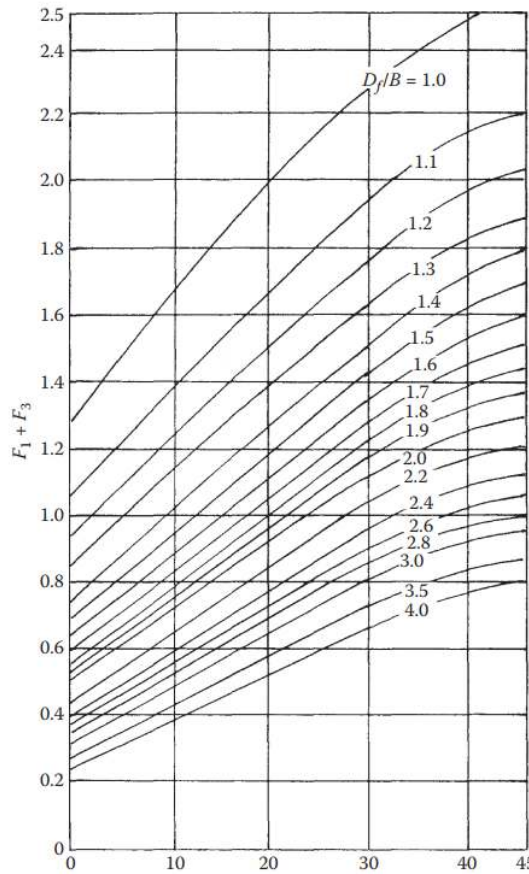
$$Q_u = D_f^3 \gamma \left[F_1 \left(\phi, \frac{D_f}{B} \right) + F_3 \left(\phi, \frac{D_f}{B} \right) \right] \quad (2.2)$$

γ : Birim ağırlık

ϕ : İçsel sürtünme açısı

B : Dairesel temelin çapı

Balla (1961), gömülme oranı (D_f/B) ve içsel sürtünme açısının (ϕ) farklı değerleri için $F_1(\phi, D_f/B)$ ve $F_3(\phi, D_f/B)$ fonksiyonlarını geliştirmiş ve bu fonksiyonların toplamını Şekil 2.3'te sunmuştur.



Zemin sürtünme açısı ϕ (derece)

Şekil 2.3. F_1+F_3 fonksiyonunun ϕ ve D_f/B 'ye bağlı olarak değişimi (Das, 1999)

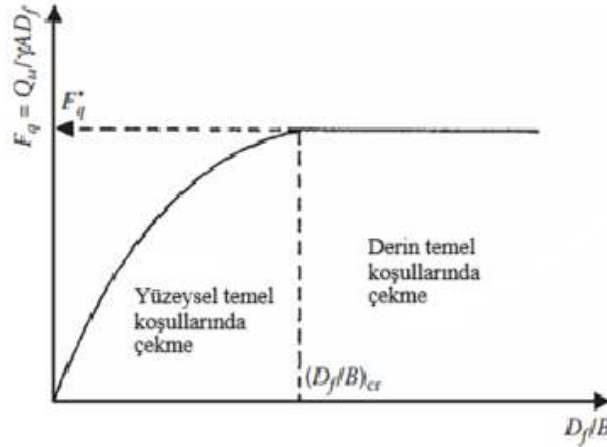
Balla'nın teorisi, genellikle gömülme oranı $D_f/B \leq 5$ olduğunda sıkı kum zeminlere gömülü yüzeysel temellerin çekme davranışı ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Ancak zayıf ve orta sıkılıktaki kum zeminlerde uygulanan temeller için bu teori, gerçekte olduğundan daha yüksek çekme kapasitesi değerleri öngörmektedir. Balla teorisinin en önemli sonuçlarından biri, sıkı kumlarda $D_f/B > 5$ durumunda çekme kapasitesinin olduğundan fazla tahmin edildiğinin ortaya konmasıdır. Bunun temel nedeni, bu koşullarda yenilme yüzeyinin zemin yüzeyine kadar uzanmaması ve dolayısıyla davranışın esasen derin temel koşullarına karşılık gelmesidir.

Balla, dairesel temelin nihai çekme kapasitesini belirlemek amacıyla en basit yaklaşım olarak, Şekil 2.4'te gösterildiği üzere gömülme oranı (D_f/B) ile boyutsuz kopma faktörü (F_q) arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Bu değerlendirme sonucunda derin temel koşullarına ulaşıldığını göstermiştir. Ayrıca, kopma faktörünün Eşitlik (2.3) kullanılarak hesaplanabileceğini ifade etmiştir.

$$F_q = \frac{Q_u}{\gamma A D_f} \quad (2.3)$$

A: temel alanı

Kopma faktörü (F_q), gömülme oranı $D_f/B = (D_f/B)_{cr}$ değerine kadar artış göstermekte ve bu noktada $F_q = F_q^*$ şeklinde maksimum değerine ulaşmaktadır. $D_f/B > (D_f/B)_{cr}$ durumunda ise kopma faktörünün pratik olarak sabit kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.4).

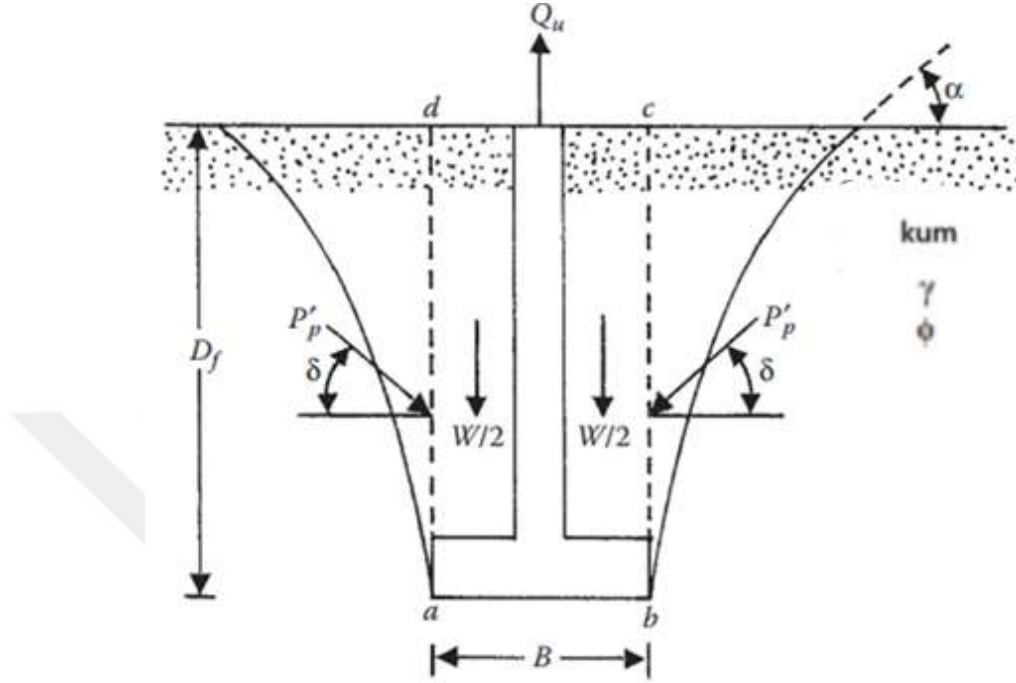


Şekil 2.4. Gömülme oranı (D_f/B) ile kopma faktörünün (F_q) değişimi (Das, 1999)

2.1.2. Meyerhof ve Adams (1968)

Yüzeysel temellerin nihai çekme kapasitesinin tahmininde kullanılan önemli yöntemlerden biri de Meyerhof ve Adams (1968) tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, uygulanan çekme kuvvetinin büyüklüğünün temelin genişliği (B) ile ilişkili olduğu ve nihai yük durumunda zemin içerisindeki yenilme yüzeyinin yatay ile α açısı yaptığı ortaya konmuştur.

Bu yöntemde, α açısının büyüklüğünün; zeminin rölatif sıkılığının, içsel sürtünme açısının (ϕ) ve diğer bazı parametrelerin etkisi altında olduğu, ayrıca $90^\circ - \phi/3$ ile $90^\circ - 2\phi/3$ aralığında değişim gösterdiği ifade edilmiştir.



Şekil 2.5. Sürekli temellerin çekme mekanizması (Das, 1999)

Şekil 2.5'te gösterilen *abcd* zonu dikkate alındığında, temelin birim uzunluğu üzerindeki kuvvetler şu şekilde tanımlanabilir:

a) Temel ve zeminin ağırlığı W ;

b) *ad* ve *bc* boyunca birim uzunluk başına etkiyen pasif kuvvetler ise P'_p olarak ifade edilmektedir. Bu kuvvetler, yatay doğrultu ile δ açısı yapacak şekilde eğilmiştir.

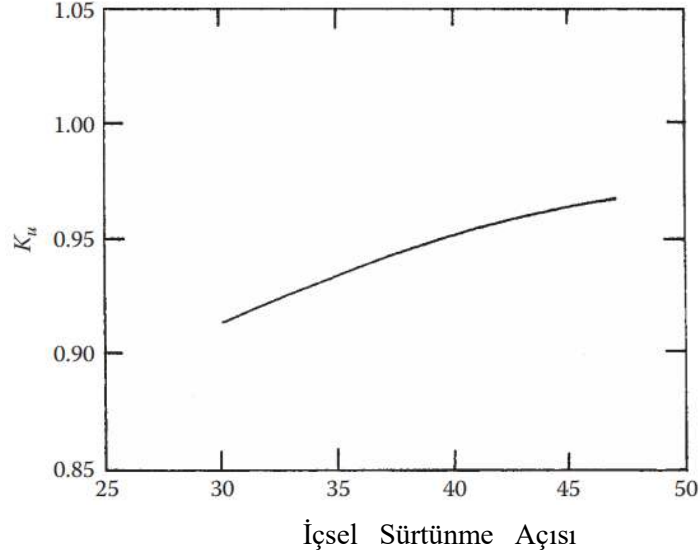
Ayrıca, $\alpha = 90^\circ - \phi/2$ için ortalama bir değer kabul edildiğinde, δ açısının büyüklüğünün yaklaşık olarak bu değer $\frac{2\phi}{3}$ olduğu belirlenmiştir.

Meyerhof ve Adams (1968), zeminin ve betonun birim hacim ağırlıklarının eşit olduğu varsayımıyla, Şekil 2.5'te gösterilen kuvvetlerin düşey bileşenlerini dikkate alarak, B genişliğindeki sürekli temelin nihai çekme (uplift) kapasitesini eşitlik (2.4) aracılığıyla tanımlamışlardır.

$$Q_u = W + K_u \gamma D_f^2 \tan \phi \quad (2.4)$$

K_u : Çekme katsayısı

K_u ' nun, içsel sürtünme açısı ile arasındaki değişim Şekilde 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. K_u 'nın içsel sürtünme açısı ($\emptyset$) ile değişimi

Şekil 2.6 incelendiğinde, değişim dar bir aralıkta olmakta ve $\emptyset$ 'nin 30° ile 48° arasındaki tüm değerleri için 0.95 gibi alınabileceği ifade edilmiştir.

Literatürde, dairesel temelin nihai çekme kapasitesinin eşitlik 2.5 kullanılarak hesaplanabileceği ortaya konulmuştur

$$Q_u = \frac{\pi}{4} B^2 D_f \gamma + \frac{\pi}{2} \left[1 + m \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] \gamma B D_f^2 K_u \tan \phi \text{ olarak} \quad (2.5)$$

Kopma faktörü (F_q), Eşitlik 2.6'da formüle edilmiştir

$$F_q = 1 + 2 \left[1 + m \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] \left(\frac{D_f}{B} \right) K_u \tan(\emptyset) \quad (2.6)$$

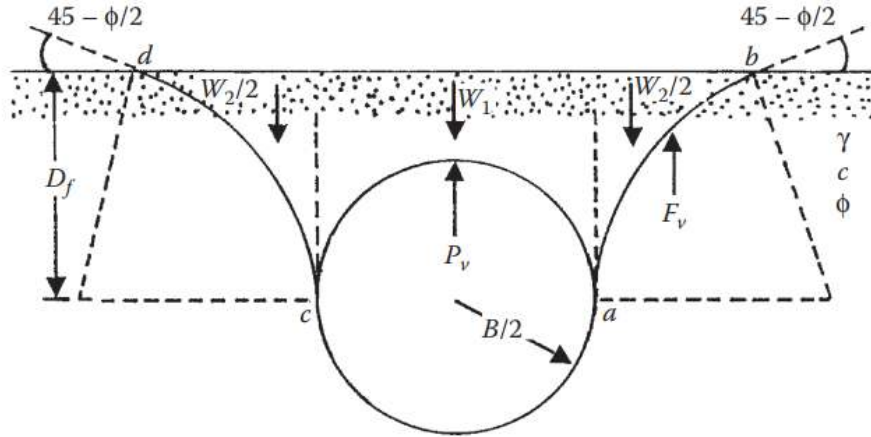
Dikdörtgen temel için sahip olduğu BxL boyutu için nihai kapasite aşağıdaki eşitlikle 2.7 kullanılarak hesaplanabileceği belirlenmiştir.

$$Q_u = \gamma B L D_f + \gamma D_f^2 \left\{ 2 \left[1 + m \frac{D_f}{B} \right] B + L - B \right\} K_u \tan(\emptyset) \quad (2.7)$$

Kopma faktörü (F_q) eşitlik 2.8'de gösterildiği formülasyon ile hesaplandığı belirlenmiştir.

$$F_q = 1 + \left\{ \left[1 + 2m \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] \left(\frac{B}{L} \right) + 1 \right\} \left(\frac{D_f}{B} \right) K_u \tan \emptyset \quad (2.8)$$

Vesic (1971), yarı sonsuz, homojen ve izotropik bir katı ortamda, zemin yüzeyine yakın konumlandırılmış küresel bir boşluğun genişlemesine bağlı göçme yükü problemini incelemiştir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7 Vesic (1971)'in genişleyen boşluk teorisi (Das,1999)

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere, gömülme derinliği (D_f) yeterince küçük olduğunda nihai basınç P_o olarak tanımlanmakta ve bu durumda boşluk, altındaki zemini uzakta kesmektedir. Bu koşullarda küresel boşluğun çapı temelin genişliği B ’ye eşit olmaktadır. Kayma yüzeyleri ab ve cd , sırasıyla a ve c noktalarında küresel boşluğa teğet olacak şekilde gelişmektedir. b ve d noktalarında ise yüzeyler, α açısı ($\alpha = 45^\circ - \phi/2$) ile yönlenmektedir. Denge koşulları dikkate alındığında, düşey yöndeki kuvvet bileşenlerinin toplamı kullanılarak boşluk içerisindeki nihai basınç (P_o) hesaplanabilmektedir. Bu durumda dikkate alınacak kuvvetler aşağıda sıralanmaktadır.

- 1) Boşluk içindeki kuvvetin düşey bileşeni (P_v)
 - 2) Zeminin, etkili kendi ağırlığı, $W=W_1+W_2$ ve
 - 3) İç kuvvetlerin meydana getirdiği düşey bileşen (F_v)
- c-Ø için ; aşağıdaki formülden çıkarılabileceği belirtilmiştir.

$$P_o = c\bar{F}_c + \gamma D_f \bar{F}_q \quad (2.9)$$

$$\bar{F}_q = 1 - \frac{2}{3} \left[\frac{(B/2)}{D_f} \right] + A_1 \left[\frac{D_f}{\left(\frac{B}{2} \right)} \right] + A_2 \left[\frac{D_f}{(B/2)} \right]^2 \quad (2.10)$$

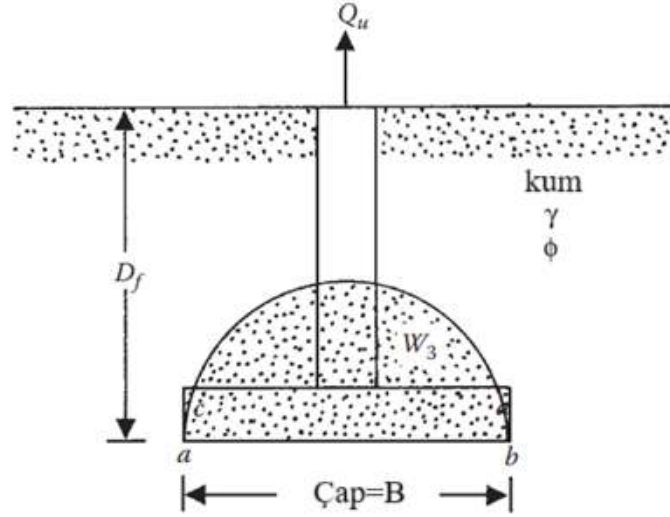
$$\bar{F}_C = A_3 \left[\frac{Df}{(B/2)} \right] + A_4 \left[\frac{Df}{(B/2)} \right] \quad (2.11)$$

A_1, A_2, A_3, A_4 : içsel sürtünme açısının fonksiyonlarıdır.

Granüler zemin için $c=0$ bu nedenle, P_o eşitlik (2.12) deki gibi ifade edilmiştir.

$$P_o = \gamma D_f \bar{F}_q \quad (2.12)$$

Vesic, yüzeysel dairesel temellerin nihai çekme kapasitesini elde etmek için yukarıdaki kavramı uygulamıştır.



Şekil 2.8 Dairesel temelde Vesic'in genişleyen boşluk teorisi

Şekil 2.8'de gösterilen boşluk genişleme teorisinin dairesel temelin çekme (uplift) davranışına uygulanması dikkate alındığında; yüzeyden D_f derinliğinde ve B çapına sahip dairesel bir temel yerleştirilmektedir. Analiz kapsamında, temelin birim hacim ağırlığının zeminin birim hacim ağırlığına yaklaşık olarak eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda, temel altındaki küresel boşluğun zemin ile doldurulması halinde, boşluk kütlesi aşağıdaki denklem ile ifade edilen ağırlığa (W_3) sahip olacaktır.

$$W_3 = \frac{2}{3} \pi \left(\frac{B}{2} \right)^3 \quad (2.13)$$

Zeminin bu ağırlığı, P_1 vasıtasıyla artacak veya

$$P_1 = \frac{W_3}{\pi \left(\frac{B}{2} \right)^2} = \frac{\frac{2}{3} \pi \left(\frac{B}{2} \right)^3 \gamma}{\pi \left(\frac{B}{2} \right)^2} = \frac{2}{3} \pi \left(\frac{B}{2} \right) \quad (2.14)$$

kohezyonsuz zemine gömülü ise ($c=0$) o zaman P_1 basıncı çekmenin tamamı için gerekli (q_u) birim alandaki kuvveti elde etmek için eşitlik (2.12)'ye eklenmesi gerektiği ifade edilmiş ve bu şekilde q_u ifadesi Eşitlik 2.15 deki gibi ifade edilmiştir.

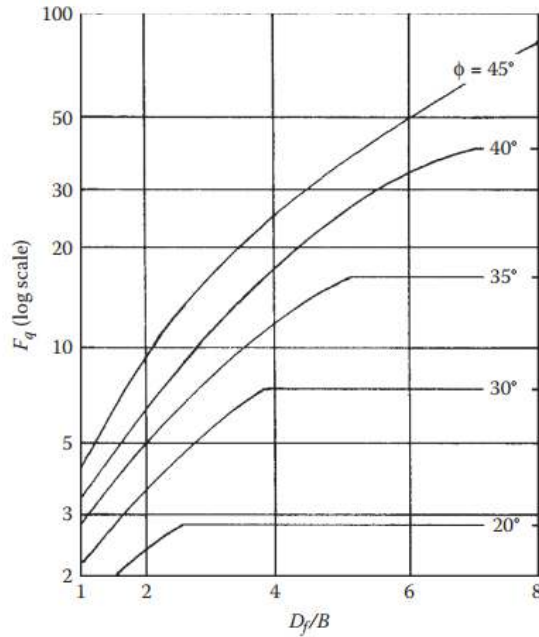
$$q_u = \frac{Q_u}{A} = \gamma D_f \left\{ 1 + A_1 \left[\frac{D_f}{B} \right] + A_2 \left[\frac{D_f}{B} \right]^2 \right\} = \gamma D_f F_q \quad (2.15)$$

F_q =Kopma faktörü

Yüzeysel dairesel temeller için kopma faktörünün (F_q) değişimi Şekil 2.9’da sunulmuştur. Benzer bir yöntemle, uzun silindirik boşlukların genişlemesi analojisinden yararlanan Vesic (1971), yüzeysel sürekli temeller için F_q kopma faktörünün değişimini ortaya koymuştur. Elde edilen bu değerler Çizelge 2.2 ve Şekil 2.10’te verilmektedir.

Çizelge 2.1. Vesic’in dairesel temeller için içsel sürtünme açısı (ϕ) ile koparma faktörünün (F_q) değişimi

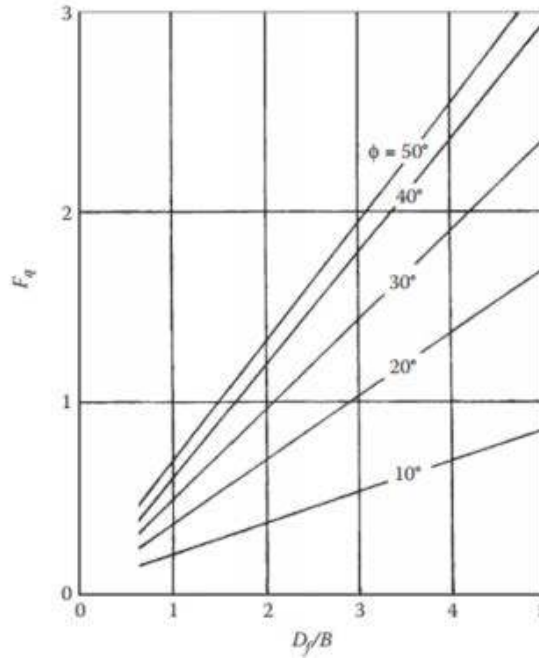
Zemin İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)(derece)	D_f/B				
	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.18	1.37	1.59	2.08	3.67
20	1.36	1.75	2.20	3.25	6.71
30	1.52	2.11	2.79	4.41	9.89
40	1.65	2.41	3.30	5.43	13.0
50	1.73	2.61	3.56	6.27	15.7



Şekil 2.9. Vesic’in dairesel temeller için içsel sürtünme açısı (ϕ) ile koparma faktörünün (F_q) değişimi (Das, 1999)

Çizelge 2.2 Vesic'in sürekli temeller için içsel sürtünme açısı (ϕ) ile koparma faktörünün değişimi

Zemin İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (derece)	D_f/B				
	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.09	1.16	1.25	1.42	1.83
20	1.17	1.33	1.49	1.83	2.65
30	1.24	1.47	1.71	2.19	3.38
40	1.30	1.58	1.87	2.46	3.91
50	1.32	1.64	2.04	2.60	4.20



Şekil 2.10 Vesic'in sürekli temeller için içsel sürtünme açısı (ϕ) ile kopma faktörünün (F_q) değişimi (Das,1999)

2.1.4. Saeedy (1987)

Kum zeminlere gömülü dairesel temellerin nihai çekme kapasitesine ilişkin bu teori Saeedy (1987) tarafından geliştirilmiştir. Teoride yenilme yüzeyinin logaritmik helisel bir kemer şeklinde olduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşıma göre yüzeysel temelerde yenilme yüzeyi, zemin yüzeyine kadar ulaşmaktadır. Ancak derin temeller için ($D_f > D_{fer}$) yenilme yüzeyinin yalnızca temel üstündeki D_{fer} mesafesine kadar uzandığı kabul edilmektedir. Bu analiz doğrultusunda Saeedy (1987) farklı D_f/B oranları ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri için nihai çekme kapasitesini boyutsuz formda önermiştir.

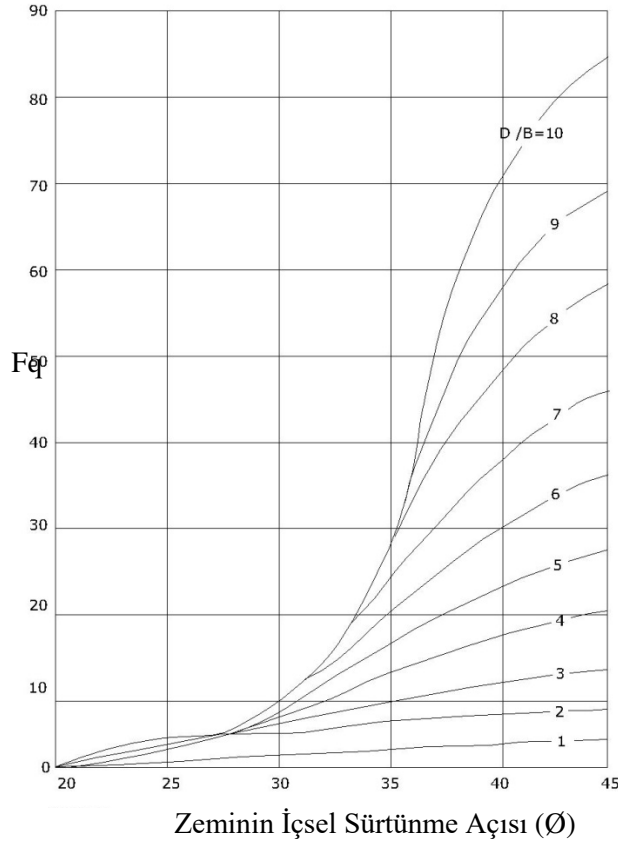
Teorisyen, söz konusu çözümü Şekil 2.11'de görüldüğü üzere kopma faktörü ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren bir diyagramla sunmuştur. Saeedy (1987)'ye göre, temelin çekme etkisi altında temel üzerindeki zemin kütlesi kademeli olarak sıkışmakta; bu nedenle zeminin kayma gerilmesi ve nihai çekme kapasitesi giderek artmaktadır. Bu bulgulara dayanarak Saeedy, aşağıda verilen formülde tanımlanan deneysel sıkışma faktörünü (μ) önermiştir.

$$\mu = 1.044D_r + 0.44 \quad (2.16)$$

D_r : kum zeminin rölatif yoğunluğu

Böylece gerçek nihai kapasite aşağıdaki formülle hesaplanmıştır ;

$$Q_{u(actual)} = (F_q \gamma A D_f) \mu \quad (2.17)$$



Şekil 2.11. Saeedy (1987) teorisine göre F_q ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı olarak D_f/B 'nin değişimi

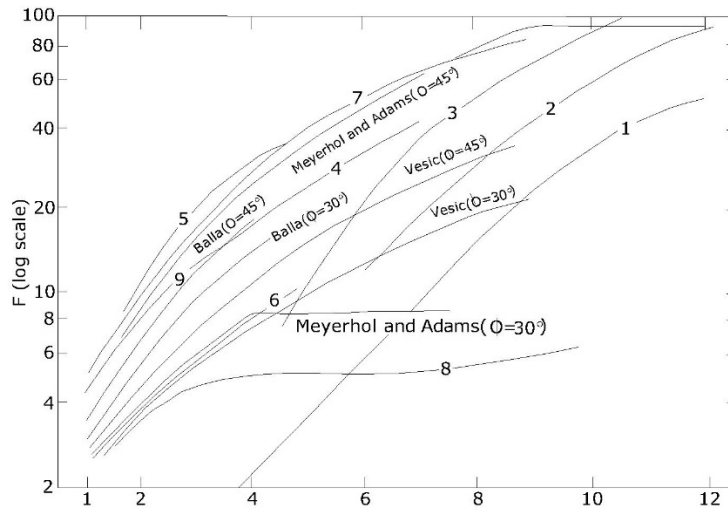
2.1.5. Teorilerin Tartışılması

Değişik teorisyenlere dayanılarak önceki bölümlerde sunulan bu teorilerden bazı genel gözlemler aşağıda verilmiştir.

- 1) Dikdörtgen temellerin problemi ile ilgili teori sadece Meyerhof ve Adams(1968) tarafından verilmiştir.
- 2) Teorilerin çoğunda yüzeysel temellerin koşulları $D_f/B < 5$ den oluştuğu farz edilmiştir. Meyerhof ve Adams (1968)'in teorisi, dairesel ve kare temellerin kritik gömülme oranı $(D_f/B)_{cr}$ 'nin içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olduğunu vermiştir.

- 3) Deneysel gözlemlerden genelde, zayıf zeminlerde, Balla (1961)'in teorisinde yüzeysel temellerdeki davranış görülmüştür. Böylece daha iyi uyuma sıkı zeminlerdeki temeller için gözlenir.
- 4) Vesic (1971)'in teorisi genelde zayıf kumdaki yüzeysel temellerin nihai çekme kapasitesinin tahmininde kesin doğrudur. Böylece laboratuvar deneysel gözlemleri, sıkı kumlar içindeki yüzeysel temeller için, bu teorisin çekme kapasitesinin %100 kadar veya daha fazla eksik tahmin edebildiğini göstermiştir. Şekil 2.12'de dairesel temellerin nihai çekme kapasitesi için, Balla, Vesic, Meyerhof ve Adams gibi bilim adamları tarafından laboratuvar deneylerinin yayınlanan sonuçlarının bazılarının karşılaştırılması görülmektedir. Çizelge 2.3 de laboratuvar deneysel eğrilerinin referansı (Şekil 2.12)'de sunulmuş ve teori ile laboratuvar deneysel çalışmaları arasındaki mukayeselere dayanan sonuçlar gösterilmiştir.

Sonuç olarak, Meyerhof ve Adams (1968) teorisinin geniş bir temel aralığında uygulanabilir olduğu ve nihai çekme kapasitesine ilişkin güvenilir tahminler sunduğu görülmektedir. Bu nedenle söz konusu teorisin kullanılmasının uygun olacağı önerilmektedir. Bununla birlikte, teorilerin karşılaştırılmasında literatürde elde edilen deneysel sonuçların büyük çoğunluğunun laboratuvar testlerine dayandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Gerçek temellerin tasarımında bu sonuçlar kullanıldığında, ölçek etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.



Şekil 2.12 Dairesel temeller için, laboratuvar deney sonuçları ile teorilerin karşılaştırılması (Das,1999)

Çizelge 2.3. Dairesel temeller için, laboratuvar deney sonuçları ile teorilerin karşılaştırılması

Eğri No	Referanslar	Dairesel Temel Çapı (mm))	Zemin Özellikleri
1	Baker ve Kondner	25.4	$\phi=42^\circ$; $\gamma=17.61 \text{ kN/m}^3$
2	Baker ve Kondner	38.1	$\phi=42^\circ$; $\gamma=17.61 \text{ kN/m}^3$
3	Baker ve Kondner	50.8	$\phi=42^\circ$; $\gamma=17.61 \text{ kN/m}^3$
4	Baker ve Kondner	76.2	$\phi=42^\circ$; $\gamma=17.61 \text{ kN/m}^3$
5	Sutherland	38.1-152.4	$\phi=45^\circ$
6	Sutherland	38.1-152.4	$\phi=31^\circ$
7	Esquivel-Diaz	76.2	$\phi=43^\circ$; $\gamma=14.81\text{-}15.14 \text{ kN/m}^3$
8	Esquivel-Diaz	76.2	$\phi=33^\circ$; $\gamma=12.73\text{-}12.89 \text{ kN/m}^3$
9	Balla	61-119.4	Sıkı kum

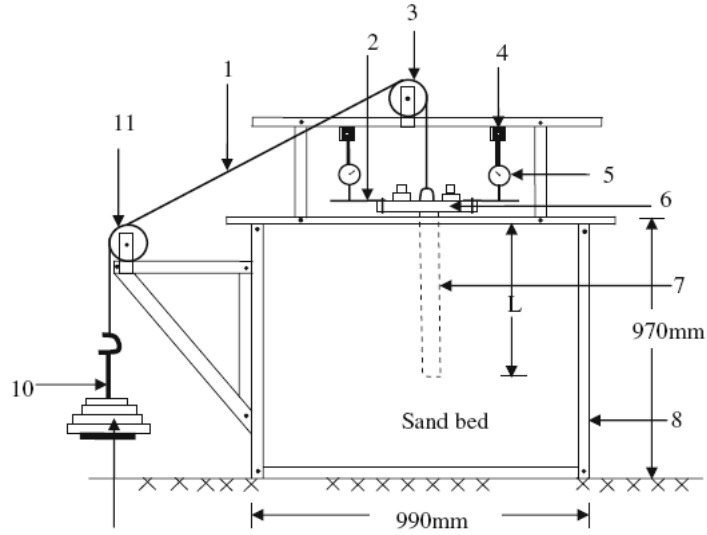
2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1 Shanker ve ark. (2007)

Bu deneysel çalışmada, kum içine gömülü kazıkların çekme kapasitesinin tahmin edilmesine yönelik olarak hazırlanan deney düzeneği ile yapılan çalışmalar sunulmuş ve bir model önerilmiştir. Çalışmalarda değişik kazık çapları (D) boylar (L) zemin-kazık sürtünme açısı (δ) ve birim ağırlık (γ) gibi parametrelerin kazıkların çekme kapasitesine doğrudan etkisi analiz edilmiştir. Karşılaştırılmalı olarak yapılan değerlendirmelerde nihai çekme kapasitesinin tahmin edilmesinde önceden önerilen teorilerle ve model deneyleri ile elde edilen ölçüm sonuçları ile kum içerisinde gömülü kazıkların çekme kapasitesinin tahmininde mevcut teoriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar neticesinde net çekme kapasitesinin eşitlik (2.17) ile hesaplanabileceğini göstermiştir.

$$P_{nu} = P_u - \frac{\pi D^2}{4} L \gamma \quad (2.17)$$

Deneysel çalışmalar (99.0x97.5x97.0x97.0 cm) boyutlarında çelik bir tank içerisinde yapılmıştır. Model kazık çapı 20 mm olarak seçilmiş ve deneyler L/D oranı 10, 20, 30 ve 40 değerlerinde olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kumun üniformluk katsayısı 1.71, özgül ağırlığı 2.65, maksimum ve minimum birim ağırlıkları 16.2 ve 14.74 kN/m³ olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda koniksel yenilme yüzeyinin düşeyle yaptığı açısı $\phi/4$ 'e eşit olması durumunda çekme kapasitesinin deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 2.13'de görülmektedir.

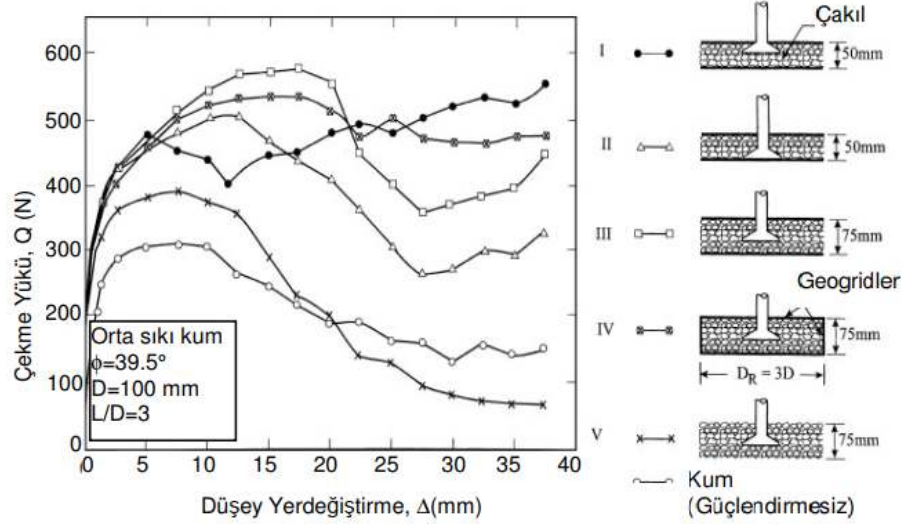


- | | | |
|-------------------------|--|-----------|
| 1-Taşıyıcı ip | 2-Deformasyonları almak için düz parça | |
| 3-Makara | 4-Komparatör için mıknatıslı destek | |
| 5-Deplasman komparatörü | 6-Kazık başlığı | |
| 7-Model çekme kazığı | 8-Model tank | |
| 9-Yükler | 10-Yükleme halkası | 11-Makara |

Şekil 2.13. Laboratuvar deney düzeneği (K.Shanker ve ark, 2007)

2.2.2. Ilamparuthi ve Dickin (2001)

Ucu çan şeklinde olan silindirik kazıkların çekme performansı üzerine, donatı ile güçlendirilmiş kumun değişik yoğunluklarda ve geometrilerde birçok konfigürasyon karşılaştırılmıştır. Çekme kapasitesinin model deneyinde de göz önünde bulundurulmuş geogrid donatı hücre çapının artması, kum yoğunluğunun artması, çan çapının artması ile gömülme oranları ile arttığı tespit edilmiştir. Deney uygulama tipi Şekil 2.14 de verilmiş olup, çalışmalarda en uygun güçlendirme düzenlemesinin yapılmasına yönelik olarak beş farklı durum göz önünde bulundurulmuştur.



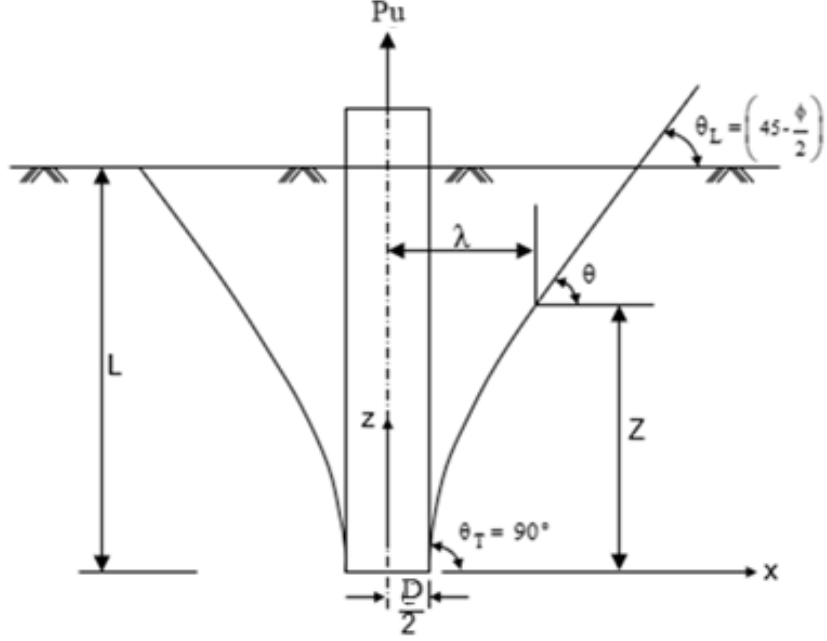
Şekil 2.14 Değişik güçlendirme düzenlemeler ve çekme yükü davranışı (Ilamparuthi ve Dickin, 2001)

Yapılan deneysel incelemeler, geogrid hücreleri kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme uygulamasının, özellikle sıkı gömülme derinliklerine sahip çan başlı kazıkların davranışında iyileşme sağladığını göstermiştir. Ayrıca güçlendirme elamanının kilitlenmeyi sağlayacak şekilde uygun bir malzemeden seçilmesinin önemli olduğu belirtilmiştir. Çan başlı kazıkların çekme kapasitesinin, kazık tabanı çevresinin geogrid donatı hücresi ile güçlendirilerek önemli mertebelerde arttığı tespit edilmiştir. Yüzeye yakın gömülü kazık, güçlendirilmiş duruma göre 7 kat daha fazla olduğu bu çalışmalar da tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, geogrid donatı hücreleri kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme uygulamasının etkinliğini ortaya koymuştur. Ayrıca, sıkı kum ortamında daha derin gömülmüş kazıkların çekme kapasitelerinde %25'in üzerinde bir artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

2.2.3. Chattopadhyay ve Pise (1986)

Bu çalışmada, kuma zemine gömülü düşey dairesel bir kazığın çekme dayanımının değerlendirilmesi için analitik olarak bir teorinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Yenilme yüzeyi zemin kütlesi içerisinde geçen bir eğri olarak tanımlanmıştır. Yenilme yüzeyinin zeminin içsel sürtünme açısına (ϕ), kazık-zemin sürtünme açısına (δ) ve gömülme oranına bağlı olduğu belirtilmiştir. Yazarlar, tekil kazık için göçme mekanizmasını Şekil 2.15 deki gibi vermişlerdir. Bu çalışmalar neticesinde net çekme kapasitesinin (P_u) eşitlik 2.18 ile bulunabileceği ortaya konmuştur.

$$P_u = A_1 \cdot \gamma \cdot \pi \cdot D \cdot L^2 \quad (2.18)$$



Şekil 2.15. Tekil kazık ve göçme mekanizması (Chattopadhyay ve Pise, 1986)

Burada; A1, Chattopadhyay ve Pise (1986) tarafından önerilen net çekme katsayısını ifade etmektedir. Söz konusu katsayı, kazığın gömülme oranı ile kazık-zemin arasındaki sürtünme açısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. D kazık çapını, L ise kazığın gömülme uzunluğunu temsil etmektedir.

2.2.4. Das (1986)

Tekil kazıkların nihai çekme kapasitesinin laboratuvarında belirlenmesi amacıyla 61x61x91 cm boyutlarında çelik kasa kullanılmıştır. Model deneylerde elde edilen net çekme kapasitesi (Q_u) kullanılarak, bütün deneyler için, ortalama birim yüzey sürtünmeleri (f_s) hesaplanmıştır. Orta sıkı kumda yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda, birim çevresel sürtünme direnci (f_s) değerinin, gömülme oranı $L/D = 12$ 'ye kadar yaklaşık doğrusal bir artış eğilimi sergilediği tespit edilmiştir. Ancak, L/D oranının 12'yi aşması halinde f_s değerinde belirgin bir değişim gözlenmemiş ve değerlerin durağanlaştığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, orta sıkı kum için kritik gömülme oranı $(L/D)_{cr} = 12$ olarak saptanmıştır. Elde edilen bulgular, Chaudhuri ve Symons (1983) tarafından rapor edilen sonuçlarla uyumlu niteliktedir. Ayrıca, söz konusu davranışın eğrisel karakteri, önceki araştırmaların büyük bir kısmında da özellikle vurgulanmıştır.

Bununla birlikte, sıkı kumda gerçekleştirilen deneylerde f_s değerinin, deneysel sınırlar içerisinde L/D oranıyla birlikte artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak $L/D \geq 20$ koşulunda kritik gömülme oranı tam olarak gözlemlenememiştir.

2.3. Nümerik Çalışmalar

2.3.1 Faizi ve Ark (2015)

Bu çalışmada, gevşek ve sıkı kumda kazıkların çekme (uplift) yükleri altındaki davranışını ve zemin deformasyon mekanizması incelenmiştir. Model testlerinde 5cm çapında beton kazık kullanılmış ve gömülme oranı L/D 'nin 1,2,3,4 olması durumun göre Plaxis 2D ve 3D paket programı ile modellemeler analizler yapılmış ve Chattopadhyay & Pise (1986) analitik modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak L/D 'nin artması ile çekme kapasitesinin arttığını, deneysel sonuçlarının Plaxis 2D ve 3D ile sonlu elemanlar yazılımı ile doğrulanmıştır. Ölçülen taşıma gücü, elde edilen göçme yüzeyi ve nümerik modelleme sonuçları arasında iyi bir uyum gözlemlendiğini belirtmiştir.

2.3.2 Kumar, A. ve Ark. (2021)

Bu çalışmada, kum zeminin farklı içsel sürtünme açılarında, çan başlı kazıkların çekme kapasitesi sonlu eleman analizi kullanılarak belirlenmiştir. Analizlerde Mohr-Coulomb göçme kriteri dikkate alınmıştır. Kazık geometrisi, zemin ve kazık özellikleri ilgili literatüre dayanarak seçildiği belirtilmiştir. Kumun içsel sürtünme açısı (ϕ) 25° ile 45° arasında, kazığın gömülme oranı (L/D) ise 7.0 ile 17.5 arasında alınmış ve hesaplanan çekme kapasitesi boyutsuz bir şekilde ifade edilmiştir. Çekme kapasitesi literatürdeki değerlerle karşılaştırıldıktan sonra, nümerik analizlerden elde edilen göçme şekilleri kullanılarak çan başlı kazıkların çekme kapasitesini tahmin etmeye yönelik analitik bir denklem geliştirilmiştir. Önerilen denklemin geçerliliği, hem arazi hem de laboratuvar deneylerini içeren veri seti kullanılarak kontrol edilmiştir. Geliştirilen denklemin tahmin ettiği çekme kapasitesi literatür ile yüksek uyum göstermiş; tüm durumlarda elde edilen R^2 değeri 0.99'dan büyük bulunmuştur



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalar, kum zeminler üzerinde sıkı ve gevşek koşullarda, düz kazık ve çan başlıklı model kazıklar kullanılarak çekme kazık deneyleri ile çekme kapasitesine geogridin etkisi araştırılmıştır. Deneyler Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Araştırmada; kazıkların gömülme oranı (L/D), çan başlık konfigürasyonu ve geogrid donatısının farklı gömülme derinliklerinde (u/D) konumlandırılmasının, çekme kapasitesi üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Bu bölümde öncelikle planlanan deney düzeneği, deneylerde kullanılan kum zemin ile ilgili yapılan çalışmalara ve elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

3.1. Genel

Deneysel çalışmalarda, kum zeminler içerisine yerleştirilen düz kazıklar ve çan başlıklı model çekme kazıkları üzerinde gerçekleştirilen deneylerle, çekme kapasitesi üzerine geogrid donatısının etkisi araştırılmıştır. Söz konusu deneyler, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Çalışma kapsamında; kazık gömülme oranının (L/D), çan başlık konfigürasyonlarının ve farklı derinliklere (u/D) yerleştirilen donatıların nihai çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kısımda öncelikle planlanan deneysel çalışmaların yürütüldüğü deney düzeneği, deneylerde kullanılan kum zeminin ve kazıkların özellikleri ile uygulanan deney yöntemleri açıklanacak; ardından tespit edilen deneysel sonuçlar sunulacaktır.

3.2. Deney Düzeneği

3.2.1. Yükleme Sistemi

Deneysel çalışmalar, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda bulunan MAGNUS HI-TECH marka çelik çerçeve sistemi üzerinde yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan yükleme çerçevesi, Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere dört adet STIII çeliğinden imal edilmiş dikmelerden ve bu dikmelere bağlanan elemanlardan oluşmaktadır. Bağlantı elemanları, altta iki adet ve üstte üç adet olmak üzere U-300 profillerden meydana gelmektedir. Çerçevenin kenar dikmeleri arasındaki açıklık 4.6 m, genişliği 60 cm ve yüksekliği 2.4 m'dir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme düzeneği, özel olarak tasarlanıp imal edildikten sonra çerçeve sistemine entegre edilmiştir. Hız kontrollü olarak tasarlanan düzenek, yükleme kolunun aşağı ve yukarı yönde hareket edebilmesine imkân sağlamaktadır. Sistemde motor olarak 60 Hz frekans kapasiteli GAMAK marka bir motor kullanılmıştır. Motordan elde edilen yatay dönme hareketi, 4 Hp gücünde dökme redüktör aracılığıyla düşey harekete

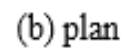
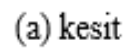
dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, motor ve redüktöre monte edilen dişliler ile bu dişliler arasındaki zincir mekanizması sayesinde gerçekleştirilmiştir.

Yükleme sisteminde hız kontrolü, 0–50 Hz aralığında çalışabilen PowerFlex marka kumanda ünitesi aracılığıyla sağlanmış, frekans değerine bağlı olarak motor farklı devirlerde güç üretmiştir. Motordan redüktöre iletilen güç, deneysel sistemdeki yükleme hızının temel belirleyicisi olmuştur. Çeşitli frekans değerleri için yükleme sisteminin hız kalibrasyonları gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Bölüm 3.4.2’de sunulmuştur. Yükleme sistemine ait tüm bileşenler birleştirilerek yükleme çerçevesine entegre edilmiştir.

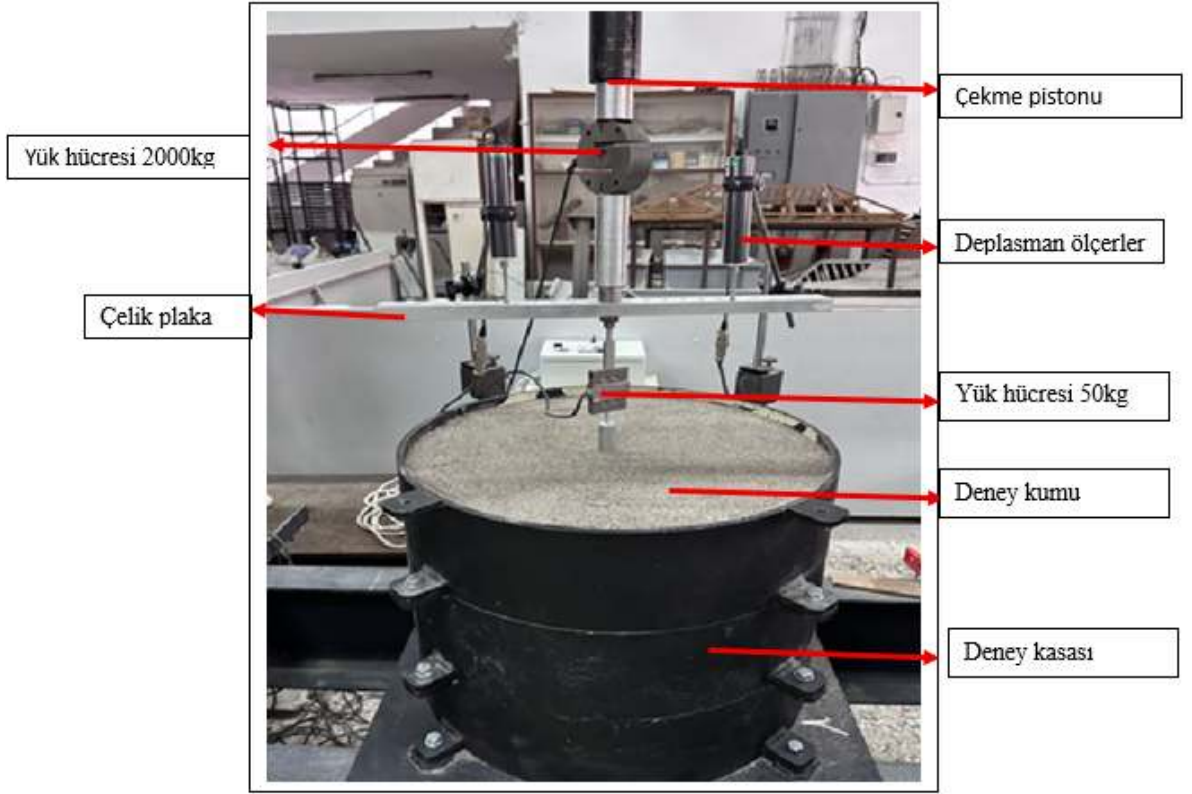
Şekil 3.1’de, deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme çerçevesinin genel görünümü sunulmaktadır. Şekil 3.2’de ise yükleme sistemi, kazık yerleşimi ve ölçüm elemanlarını içeren deney düzeneğinin şematik görünümü verilmektedir. Buna ek olarak, Şekil 3.3’de çekme işlemi gerçekleştirilmeden önce yapılan hazırlık aşamalarına ilişkin detaylar gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Yüklem çerçevesi



Şekil 3.2. Deney düzeneği



Şekil 3.3 Deney düzeneği detayları

3.2.2. Deney Kasası

Deneylerde, Şekil 3.4’de görülen, 60 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde, dört parçadan oluşan silindirik metal bir deney kasası kullanılmıştır. Deney kasasının boyutları belirlenirken, seçilen ölçülerin çalışmada kullanılan kazık geometrilerinde sınır etkisi oluşturmamasına dikkat edilmiştir. Bu kapsamda, çekme yüküne maruz kazık davranışı, farklı boyutlara sahip deney kasaları için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, deneysel uygulamalarda kullanılmak üzere uygun deney kasası boyutları belirlenmiştir.

Deney kasası, daha verimli kullanım amacıyla, her biri 150 mm yüksekliğe sahip dört modüler elemandan oluşturulmuştur. Ara elemanlarla birleştirilen bu modüler yapı sayesinde kasanın boyutları ihtiyaca göre ayarlanabilmektedir. Deney kasası, laboratuvar zeminin sabitlenmiş olan yükleme çerçevesine monte edilerek, deneyler sırasında herhangi bir yatay veya düşey hareketin oluşmaması sağlanmıştır.



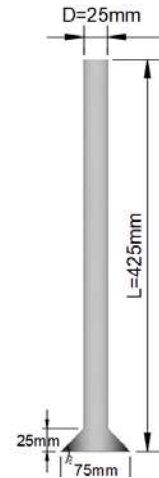
Şekil 3.4. Deney kasası

3.2.3. Model Kazık

Deneyisel uygulamalarda kullanılan model kazıklar, çelik malzemeden imal edilmiştir. Kullanılan model kazıkların genel görünümü Şekil 3.5'te verilmiş olup, kazıklara ait malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmaktadır. Şekil 3.6'da, çan başlı kazık ile geogrid donatının etkileşimini incelemek amacıyla hazırlanan model kesit gösterilmektedir.

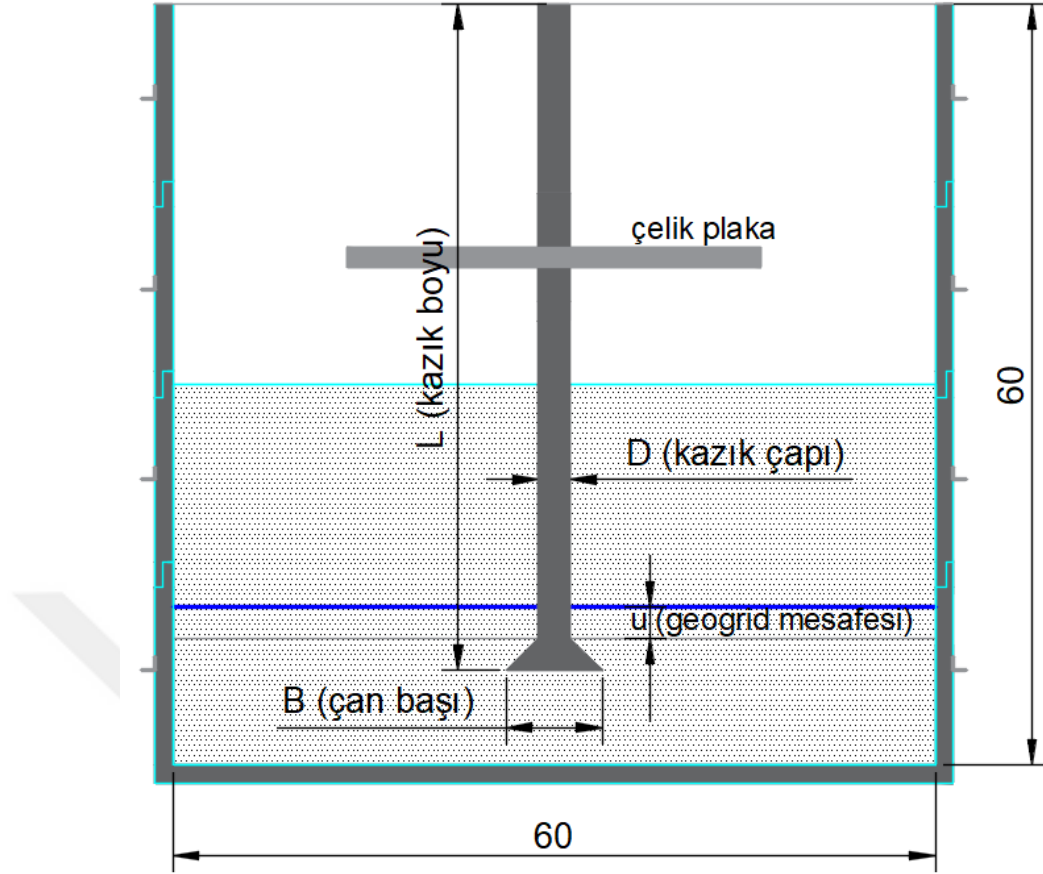


(a) Düz kazık



(b) Çan başlı kazık

Şekil 3.5. Çan başlı ve düz model kazıklar



Şekil 3.6 Çan başlı kazık-geogrid etkileşim model kesiti

Çizelge 3.1. Model kazık özellikleri

	Model
Malzeme	Çelik
Kazık çapı, D (mm)	25.0
Çan başlık çapı, D1 (mm)	75.0
Kazık boyu, H (cm)	42.5

3.2.4. Yük Hücresi

Deneyisel çalışmalar esnasında model kazıklara aktarılan yük değerlerinin ölçülmesi amacıyla, ESİT firması tarafından üretilen ve teknik özellikleri Çizelge 3.2’de sunulan elektronik yük hücreleri kullanılmıştır. Şekil 3.7’de gösterilen yük hücreleri, S tipi STCS 50 ve TB 2000 modelleri olup hem çekme hem de basınç yüklerinin ölçümünde kullanılabilmektedir. Deneylerde, her bir model kazığa 0.5 kN kapasiteli yük hücreleri yerleştirilerek çan başlığının kazıkların çekme kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, sistemin tamamına etkiyen yükün belirlenmesi ve doğrulanması amacıyla deneysel düzeneğe 20 kN kapasiteli ilave bir yük hücresi eklenmiş, bu yük hücrelerinden elde edilen veriler veri toplama sistemi üzerinden kayıt altına alınmıştır.



(a) STCS 50



(b) TB 2000

Şekil 3.7. Yük hücresi

Çizelge 3.2. Elektronik yük hücre özellikleri

Teknik özellikler	STC S 50	TB 2000
Maksimum kapasite (kN)	0.5	20
Toplam hata (%)	$\leq \pm 0.05$	$\leq \pm 0.02$
Minimum yük (%E _{max})	0	0
Aşırı yükleme kapasitesi (%E _{max})	150	150
Kırılma kapasitesi (%E _{max})	200	200
Esne (E _{max} yükte) (mm)	≤ 0.4	≤ 0.4
Çalışma sıcaklığı aralığı (°C)	-40...+80	-40...+80
Yük hücresi malzemesi	Paslanmaz çelik	Çelik
Ağırlık (kg)	0.5	1.9

3.2.5. Deplasman Ölçer

Deneysel çalışmalarda, çekme kuvvetine maruz bırakılan model kazıkların yer değiştirmeleri, kazıkların bağlandığı plakaya temas eden iki deplasman ölçer kullanılarak tespit edilmiştir. Çekme kuvveti etkisi altındaki model kazıkların ötelenmeleri, kazıkların sabitlendiği plakaya temas ettirilen iki deplasman ölçer yardımıyla kaydedilmiştir. Ölçümlerde, TML–Tokyo Sokki Kenkyujo firmasının ürettiği CDP-50 model deplasman ölçerler tercih edilmiştir. Deplasman ölçerler (seri no: BBD06093), Şekil 3.8’de gösterilmekte olup 0–50 mm aralığında ölçüm yapabilmektedir. Ölçüm hassasiyetini artırmak amacıyla sistemin merkezine eşit mesafede yerleştirilen iki farklı noktadaki deplasman değerlerinin ortalaması alınmış ve böylece her yük kademesi için kazıklı sistemde meydana gelen deplasmanlar elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Deplasman ölçer

3.2.6. Veri Kaydetme Ünitesi

Deneyisel çalışmalar kapsamında, yük ve deplasman olmak üzere iki farklı türde ölçüm yapılmıştır. Yük ve deplasman ölçümlerinde kullanılan cihazlar, direnç temelli ölçüm sistemine uygun olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen yük ve deplasman değerleri, direnç tabanlı çalışan ve TML–Tokyo Sokki Kenkyujo firması tarafından üretilen TDS-530 marka veri kaydetme ünitesine aktarılmıştır. Kullanılan veri kaydedici sistem 30 kanallı olup, 0.4 saniye gibi kısa bir sürede 1000 veriyi okuyabilme özelliğiyle deneysel süreçte yüksek veri yoğunluğunu karşılayabilmektedir. Veri kaydetme ünitesi aracılığıyla kaydedilen yük ve deplasman verileri, TDS-7130 yazılımı kullanılarak nümerik değerlere dönüştürülmüştür (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Veri kaydetme ünitesi

3.2.7. Titreşim Cihazı

Deneysel çalışmalar, gevşek ve sıkı olmak üzere iki farklı sıklık derecesine sahip kum zeminlerde gerçekleştirilmiştir. Sıkı kum zemin koşullarında, kum deney kasası içerisine 5 cm kalınlığındaki tabakalar halinde yerleştirilmiş ve her tabaka sıkıştırılarak uygulanmıştır. Bu amaçla, deney kasasının iç yüzeyleri 5 cm aralıklarla yatay çizgilerle işaretlenmiştir. Her bir kum tabakası, elektrikle çalışan BOSCH GBH 2-28 DV model titreşim cihazı kullanılarak, önceden belirlenen derinliğe ulaşmaya kadar sıkıştırılmıştır (Şekil 3.10). Sıkıştırma işlemleri sırasında üniform sıklık elde edilmesi ve kum danelerinin kırılmasının önlenmesi amacıyla, titreşim cihazının uç kısmına 100 mm × 100 mm boyutlarında ve 20 mm kalınlığında delrin malzemeden imal edilmiş bir plaka monte edilmiştir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.10. Titreşim cihazı



Şekil 3.11. Delrin plak

3.3. Kum Zemin Özellikleri

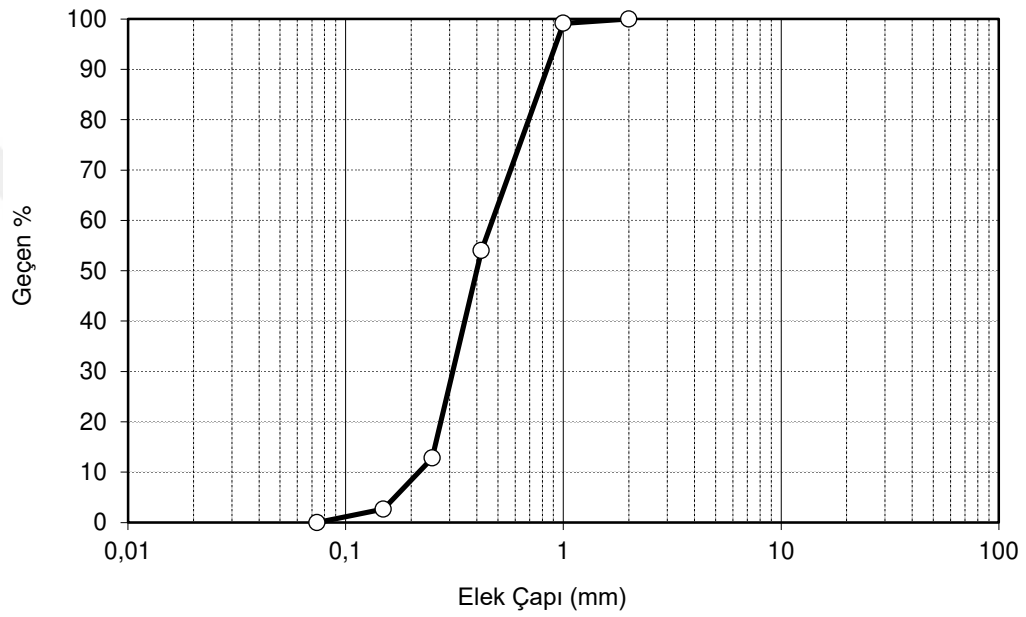
Deneysel çalışmalarda zemin olarak Çukurova Bölgesi, Seyhan Nehri yatağından temin edilen kum kullanılmıştır. Kum zeminin hazırlanması amacıyla, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına uygun olarak 18 No'lu (1 mm çaplı) ve 200 No'lu (0.074 mm çaplı) elekler kullanılarak eleme işlemi yapılmıştır. Eleme sürecinde 18 ve 200 No'lu elekler arasında kalan kum yıkanmış, ardından etüvde kurutularak deneylerde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kumun endeks özellikleri ve kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin içerikleri ve elde edilen sonuçlar, izleyen bölümlerde ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

3.3.1. Endeks Deneyler

Elek Analizi

Çalışmada kullanılan kum zeminin dane çapı dağılımı, ASTM D2487-2011 standardı doğrultusunda gerçekleştirilen elek analizi ile belirlenmiştir (Şekil 3.12). Analiz sonucunda elde edilen dağılım eğrisine göre, zemin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kapsamında kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Elek analizi deney sonuçları Çizelge 3.3'te topluca verilmiştir..



Şekil 3.12. Dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge 3.3. Elek analizi sonuçları

Granülometri parametreleri	Birim	Değer
Kaba kum	%	0.0
Orta kum	%	45.9
İnce kum	%	54.1
Efektif dane çapı, D_{10}	mm	0.2
D_{30}	mm	0.3
D_{60}	mm	0.5
Üniformluk katsayısı, C_u	-	2.5
Derecelenme katsayısı, C_c	-	0.9
Zemin sınıfı	-	SP

Piknometre Deneyi

Piknometre deneyi ile yapılan ölçümler sonucunda, deney kumunun dane birim hacim ağırlığı $\gamma_s = 26.8 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir.

Rölatif Sıkılık Deneyi

Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık derecesi, mühendislik literatüründe rölatif sıkılık (D_r) terimi ile ifade edilmektedir.

$$D_r = \frac{e_{\text{maks}} - e}{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}}$$

$$D_r = \frac{\gamma_{k_{\text{maks}}}}{\gamma_k} \times \frac{\gamma_k - \gamma_{k_{\text{min}}}}{\gamma_{k_{\text{maks}}} - \gamma_{k_{\text{min}}}}$$

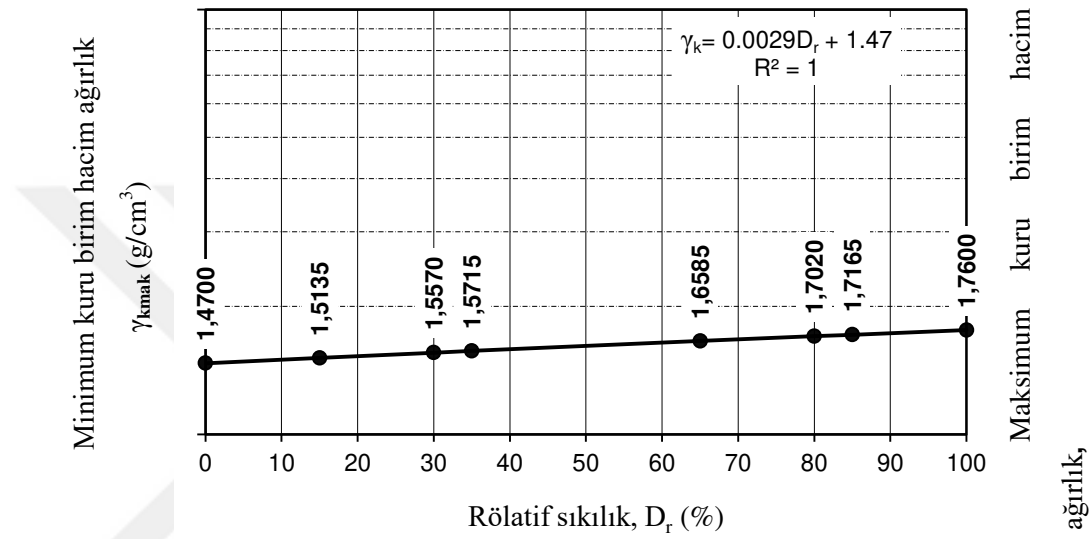
Bu bağıntıda, e_{maks} zeminin en gevşek durumdaki boşluk oranını, e_{min} en sıkı durumdaki boşluk oranını, e ise rölatif sıkılığın hesaplandığı andaki boşluk oranını göstermektedir. Benzer şekilde, $\gamma_{k_{\text{maks}}}$ ve $\gamma_{k_{\text{min}}}$ değerleri sırasıyla maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlığını, γ_k ise rölatif sıkılığın belirlendiği durumdaki kuru birim hacim ağırlığını göstermektedir. Kohezyonsuz zeminler, elde edilen D_r değerlerine göre sınıflandırılmaktadır..

Çizelge 3.4. Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık (Özaydın, 2011)

Rölatif sıkılık, D_r (%)	Sıkılık
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Deneyisel çalışmada, kum numunesinin minimum ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, ASTM D4253-2016 ve ASTM D4254-2016 standartlarına göre belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlıklarının tespitinde, en büyük dane boyutu için önerilen hacme sahip kap kullanılmıştır ($V = 940 \text{ cm}^3$) $\gamma_{k_{\text{min}}}$ değeri elde edilirken kum zemin, kap içerisine herhangi bir sıkıştırma uygulanmadan yerleştirilmiştir. $\gamma_{k_{\text{maks}}}$ değerinin belirlenmesinde ise kum numuneler ıslatılarak yoğunluk kabına konulmuş ve plastik çekiç yardımıyla titreşim verilerek sıkıştırılmıştır.

Deneyler, gevşek ve sıkı zemin koşulları için üçer kez tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. ASTM D4253-2016 ve ASTM D4254-2016’da tanımlanan yöntem doğrultusunda, belirli rölatif sıklık değerlerine karşılık gelen birim hacim ağırlıklar hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3.13’de sunulmuştur. Model deneylerde kum numuneler, deney kasasına rölatif sıklık dereceleri $D_r=\%30$ ($\gamma_k=15.6 \text{ kN/m}^3$) ve $D_r=\%70$ ($\gamma_k=16.7 \text{ kN/m}^3$) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çizelge 3.4’e göre, bu sıklık değerleri sırasıyla %30 için ‘gevşek’, %70 için ise ‘sıkı’ zemin sınıfına karşılık gelmektedir.



Şekil 3.13. Rölatif sıklık deneyi

3.3.2. Kayma Mukavemeti Deneyleri

Kesme Kutusu Deneyi

Kum zemin, 150 mm × 150 mm boyutlarında kare kesitli kesme kutusuna 118 mm yüksekliğinde olacak şekilde yerleştirilmiş ve hem gevşek hem de sıkı durumda doğrudan kesme deneyi uygulanmıştır. Deneylerde, zemin numuneleri $\sigma_1 = 22 \text{ kPa}$, 44 kPa ve 66 kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, gevşek durumdaki kum zeminin kayma mukavemeti açısı $\phi = 38^\circ$ olarak, sıkı durumdaki kum zeminin kayma mukavemeti açısı ise $\phi = 41.5^\circ$ olarak belirlenmiştir.

3.4. Deney Yöntemi

3.4.1. Ölçüm Aletlerinin Kalibrasyonu

Deneyisel çalışmalarda ölçümlerin hassasiyetini artırmak ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla, kullanılan yük hücreleri ve deplasman ölçerlerin kalibrasyonu titizlikle

gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan TML–Tokyo Sokki Kenkyujo TDS-530 model veri toplama ünitesinin el kitabında önerilen formüllerden yararlanılarak kalibrasyon katsayıları belirlenmiş ve elde edilen değerler veri toplama ünitesine tanımlanmıştır. Kalibrasyon katsayılarının hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda sunulmaktadır.

Yük hücrelerinin kalibrasyonu;

$$K.K. = \frac{Y.H.K.}{\dot{C}.V. \times 2000}$$

Burada;

K.K. : Kalibrasyon Katsayısı

Y.H.K. : Yük Hücresi Kapasitesi

Ç.V.: Çıkış Voltajı'nı ifade etmektedir.

$$0.5 \text{ kN kapasiteli yük hücresi için } K.K. = \frac{0.5}{2 \times 2000} = 1.25 \times 10^{-4}$$

$$20 \text{ kN kapasiteli yük hücresi için } K.K. = \frac{20}{2 \times 2000} = 5 \times 10^{-3} \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

Deplasman ölçerlerin kalibrasyonu;

$$K.K. = \frac{D.T.K.}{\dot{C}.V. \times 2000}$$

Burada;

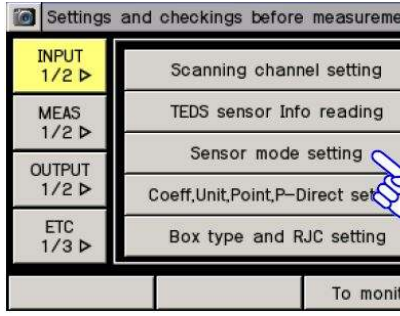
K.K. : Kalibrasyon Katsayısı

D.T.K. : Deplasman Ölçer Kapasitesi

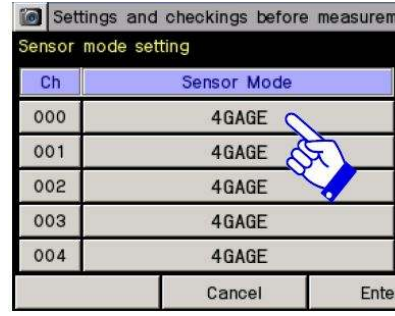
Ç.V.: Çıkış Voltajı'nı ifade etmektedir.

$$50 \text{ mm kapasiteli deplasman ölçer için } K.K. = \frac{50}{5 \times 2000} = 5 \times 10^{-3} \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

Deneylerde kullanılan tüm ölçüm cihazları, direnç değişimi prensibine göre çalışmaktadır. Bununla birlikte, her cihazın çalışma sistemi farklı direnç koşullarına bağlıdır. Yük hücreleri ve deplasman ölçerler, 2 giriş (input -, +) ve 2 çıkış (output -, +) olmak üzere 4 farklı direnç değişimine göre işlev göstermektedir. Bu doğrultuda, sensör modu 4GAGE olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.14)



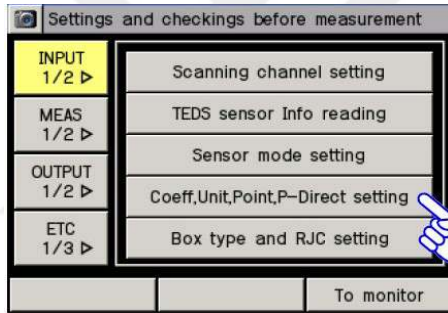
(a)



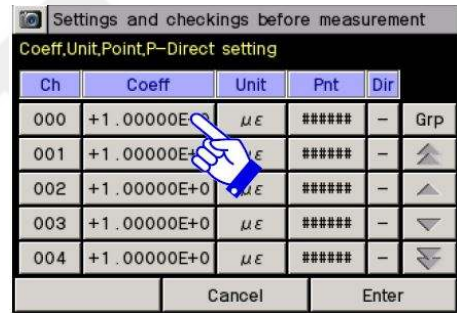
(b)

Şekil 3.14. Ölçüm aletlerinin sensör modunun seçilmesi

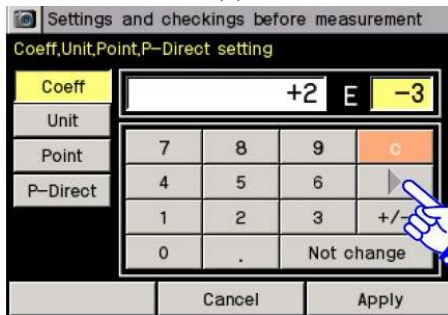
Deney sürecinde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyetini güvence altına almak amacıyla, kalibrasyon katsayıları ve okuma yöntemleri veri kaydetme ünitesine önceden tanımlanmıştır. Katsayılar başlığı altında girilen bu değerler, aynı zamanda ölçümde kullanılacak birimlerin de belirlenmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, veri kaydetme ünitesi ölçüm esnasında okunacak değerlerin duyarlılık düzeyini, yani hane sayısını, araştırmacının ihtiyaçlarına göre ayarlayabilmektedir (Şekil 3.15).



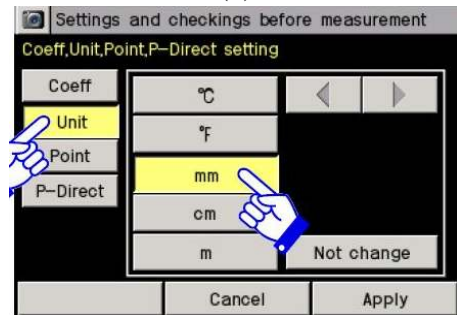
(a)



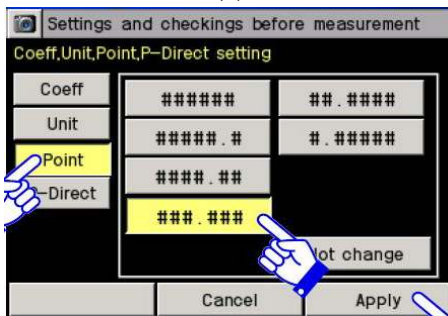
(b)



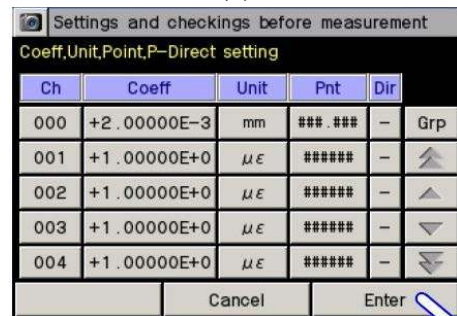
(c)



(d)



(e)

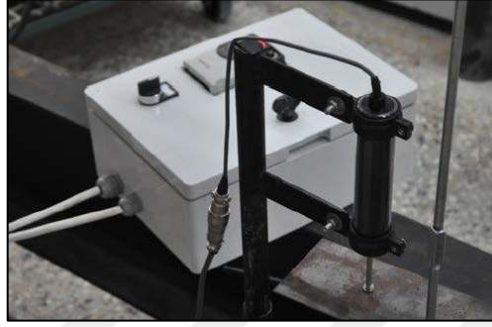


(f)

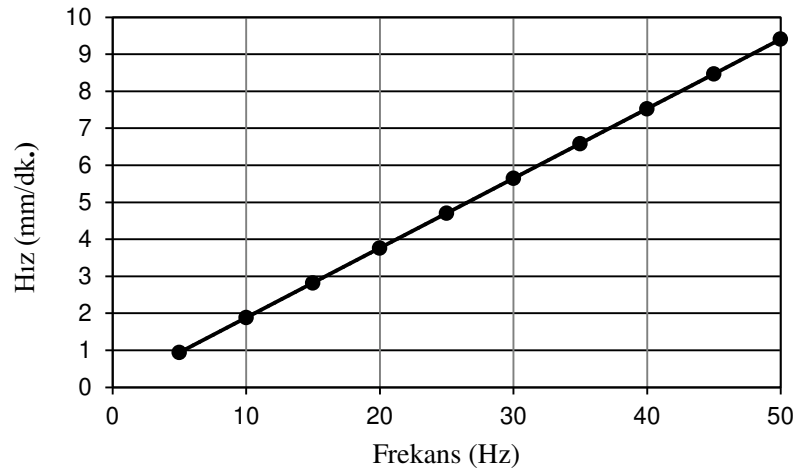
Şekil 3.15. Ölçüm aletlerinin kalibrasyonu ve ölçüm okuma şekilleri

3.4.2. Yükleme Düzenəğinin Kalibrasyonu

Bu araştırmada deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan yükleme düzeneği, farklı frekans değerlerine karşılık gelen hızlarda çalıştırılmıştır. Düzeneğe, şekil 3.3'te gösterildiği şekilde bağlanan deplasman ölçer ile sistemin zamanla değişen hareketi kaydedilmiştir. Her bir ölçüm üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler dikkate alınmıştır. Bu verilerden yararlanılarak, uygulanan frekanslara karşılık gelen yükleme hızları mm/dk cinsinden belirlenmiş; sonuçlar şekil 3.17'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



şekil 3.16. Yükleme düzeneğinin kalibrasyonu



şekil 3.17. Hız-frekans ilişkisi

3.4.3. Deneyin Yapılışı

Model kazığın çekme kapasitesi; kazığın ağırlığı, serbest yüzey boyunca gelişen sürtünme direnci ile kazık tabanı üzerindeki serbest bölgede yer alan zemin kütlesinin ağırlığının toplamından oluşmaktadır. Kum zeminlerde davranışı etkileyen başlıca unsur, zeminin rölatif sıklığıdır. Bunun yanı sıra, kazıkların çekme kapasitesi; temel boyutu, gömölme derinliği ve kazıkların diziliş düzenine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Deneysel düzenekte, yükleme sistemine öncelikle 20 kN kapasiteli bir yük hücresi entegre edilmiştir. Daha sonra, bu yük hücresi ile kazıklı sistem arasındaki bağlantıyı sağlamak ve deplasman ölçerlerin yerleştirilmesine olanak tanımak amacıyla elik plaka monte edilmiştir.

Model kazık üzerine ise 0.5 kN kapasiteli bir yük hücresi bağlanmış ve bu yük hücresi, üzerine takılan özel aparat yardımıyla çelik plakaya entegre edilmiştir.

Kum malzemesi, belirlenen rölatif sıklıklara uygun olacak şekilde hem gevşek hem de sıkı durumda, deney kasası içerisine 5 cm kalınlığındaki tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Her bir tabaka yerleştirildikten sonra geliştirilmiş düzeç cihazı kullanılarak yüzey düzeltilmiş, kasa yüzeyinden yapılan ölçümlerle istenilen sıklık derecesi sağlanmıştır. Ayrıca, her bir tabaka için gerekli kum miktarı önceden hesaplanarak tartılmış ve bu şekilde kasaya yerleştirilmiştir.

Sıkı kum zemin durumunda, yukarıda açıklanan işlemlere ek olarak her tabaka, titreşim cihazı ile kontrollü bir şekilde sıkıştırılarak gerekli tabaka yüksekliği sağlanmıştır. Her seviyede, zemin yüzeyinin düzgünlüğü kasanın iki doğrultusunda su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir.

Kazık yerleştirme aşamasında, model kazık deney kasasının merkezine dikkatle konumlandırılmıştır. Kazığın yerleştirilmesinden sonra, kazık üst kotu seviyesine ulaşıncaya kadar kum tabakalarının serilmesine devam edilmiştir. Bu süreçte özellikle kazık çevresindeki kum tabakalarının yerleştirilmesine özen gösterilmiş; her tabakanın yerleştirilmesinin ardından kazığın düşey konumu su terazisi ile kontrol edilmiştir.

Deney kasasına kum zeminin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra, deplasman ölçerler kazık ve yük hücresine bağlı çelik plaka üzerinde sistem merkezine eşit mesafede bulunan iki ayrı noktaya yerleştirilmiştir (Şekil 3.3).

Yüklemede kullanılan motordan elde edilen yatay dönme hareketi, 4 Hp gücündeki dökme redüktör aracılığıyla düşey harekete dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, motor ve redüktöre monte edilmiş dişliler ile bu dişliler arasındaki zincir mekanizması yardımıyla sağlanmıştır. Yüklemeler, farklı hızlarda yükleme yapabilme özelliğine sahip bu dişli sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme yükü deneyleri, 1.882 mm/dk sabit yer değiştirme hızı altında uygulanmış; gevşek kum zemin koşullarında 2.5 mm, sıkı kum zemin koşullarında ise 5 mm düşey deplasman değerlerine ulaşıncaya kadar sürdürülmüştür.

Deneyisel çalışmalar sonunda kaydedilen yük–deplasman verileri, TDS-530 veri toplama ünitesine aktarılmış ve TDS-7130 programı kullanılarak sayısal formata çevrilmiştir. Her deneyin sonunda elde edilen bu verilerden yararlanılarak çekme yükü–deplasman ilişkileri elde edilmiştir.

Kazık çekme deneyleri; düz kazık ve çan başlıklı kazık tiplerinde, gevşek ve sıkı kum koşullarında üç farklı gömülme oranı ($L/D = 5, 10$ ve 15) için tekrarlanmıştır. Ayrıca, sıkı zemin koşullarında geogrid donatılı kazıklar üzerinde de deneyler gerçekleştirilmiş olup, deneylerin uygulama aşamaları Şekil 3.18’de sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, Şekil 3.19’da $L/D = 10$ gömülme oranı için üç farklı u/D oranında yapılan deneylere ilişkin resimler verilmiştir. Geogrid donatı yerleşim konfigürasyonları ise $u/D = 0.25, 0.50$ ve 1.00 oranlarında düzenlenmiş olup, Şekil 3.20’de şematik olarak gösterilmektedir.



(a) Model kasası içersine kazık yerleştirilmesi



(b) Kumun kasa içersine dökülmesi



(c) Kumun kasaya serilmesi



(d) Kumunun kasaya yerleştirilmiş hali



(e) Deney düzeneğinin genel görünümü

Şekil 3.18. Deneyin hazırlanması



(a) Model kasaı ıçerisine kazık yerleştirilmesi



(b) Deney kum ve geogridin kasa ıçerisine konulması

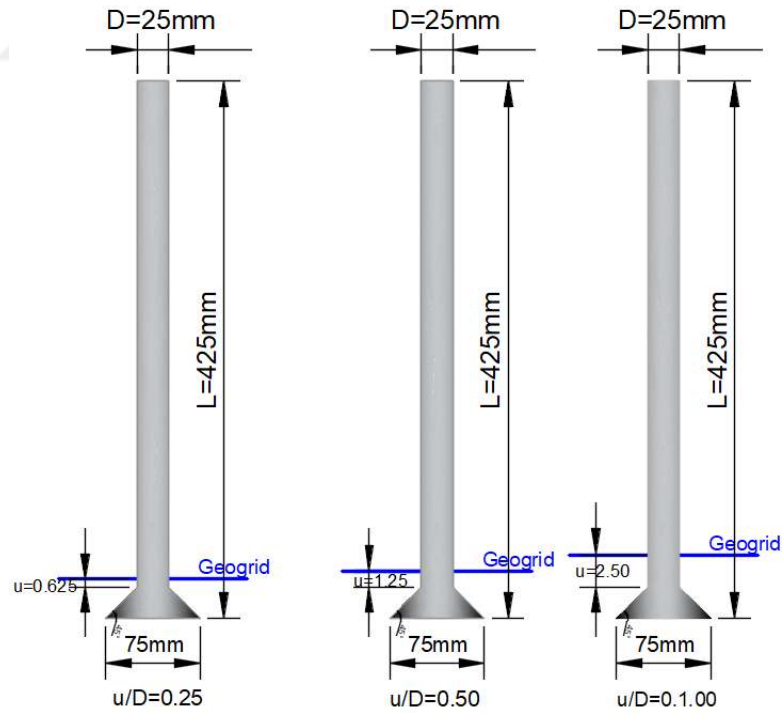


(c) Deney kumunun donatı üzerine serilmesi



(d) Deney kumu ve donatı yerleştirilmiş hali

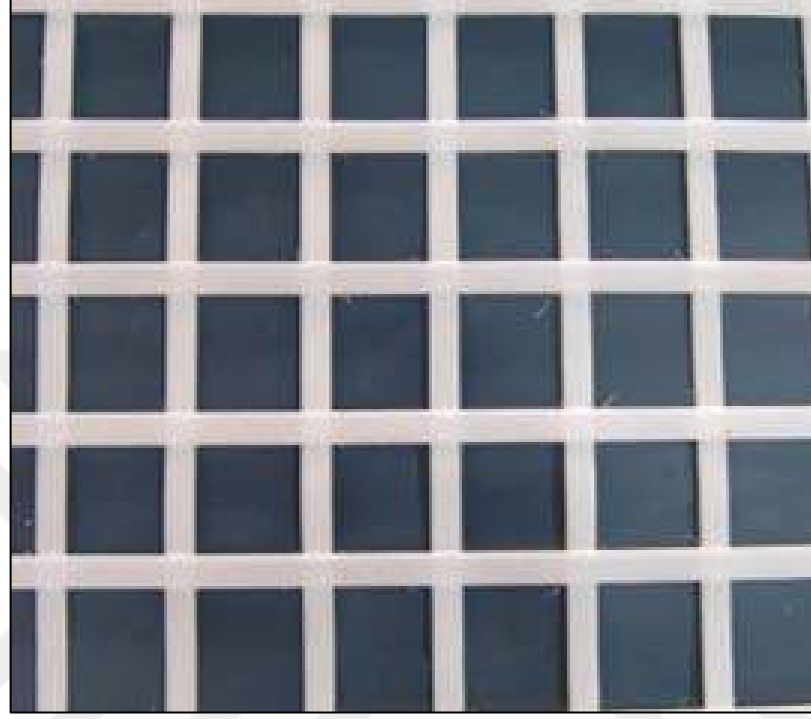
şekil 3.19 Geogrid donatılı deneyin hazırlanması



şekil 3.20 Geogrid donatı yerleşme konfigürasyonları ($u/D=0.25, 0.50, 1.00$)

3.5 Geogrid Donatı Özellikleri

Deneylerde, daha önce de kullanılmış olan, farklı rijitliklere ve geometrilere sahip ve kum zeminlerde daha etkin sonuçlar verdiği bilinen Secugrid® 60/60 Q1 (çift eksenli geogrid) kullanılmıştır (Şekil 3.21) Geogrid malzemesine ait teknik özellikler Çizelge 3.5'te sunulmaktadır.



Şekil 3.21. Secugrid® 60/60 Q1 (iki eksenli geogrid)

Çizelge 3.5. Secugrid® 60/60 Q1 tipi geogrid özellikleri (Keskin, 2006)

Teknik Özellikler	Birim	60/60 Q1 Geogrid
Malzeme	-	Polipropilen (PP), beyaz
Maks. Çekme Dayanımı, md/cmd*	kN/m	$\geq 60 / \geq 60$
%2 Uzamada Çekme Dayanımı, md/cmd*	kN/m	22 / 22
%5 Uzamada Çekme Dayanımı, md/cmd*	kN/m	48 / 48
Açıklık, md $\times$ cmd*	mm $\times$ mm	31 $\times$ 31
Rulo Uzunluğu	m $\times$ m	4.75 $\times$ 100

*md = machine direction, cmd= cross machine direction

3.6. Deney Programı

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sırasında; düz kazık ve çan başlı kazık tipleri, kazık gömülme oranı, donatının çekme kapasitesi üzerindeki katkısı ve zemin sıklığının kazıkların çekme davranışına etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışmalara geçilmeden önce, deney düzeneği, yükleme sistemi ve ölçüm sisteminin güvenilirliğini sağlamak amacıyla 15 adet hazırlık deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında, deney sisteminde karşılaşılabilecek olası sorunlar belirlenmiş ve bu sorunların çözümüne yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Hazırlık deneyleri kapsamında, öncelikle kazıklı sistemin nasıl kurulacağı, gevşek ve sıkı kum durumlarının nasıl hazırlanacağı ve kazıkların deney kasasına yerleştirilme yöntemleri sistematik bir biçimde ortaya konmuştur. Ayrıca, yükleme sistemi ile ölçüm sisteminin entegre bir şekilde sorunsuz çalışabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Bu sistemlerin bilgisayar aracılığıyla eşzamanlı olarak kontrol edilmesi ve deney süresince verilerin güvenilir şekilde kaydedilmesi için uygulanacak prosedürler belirlenmiştir. Hazırlık deneyleri sonucunda, deneysel düzenek ve ölçüm altyapısı nihai çalışmalar için optimize edilmiş, deneysel sürecin tekrarlanabilirliği ve doğruluğundan emin olunmuştur.

Deneysel çalışmalar kapsamında toplam 15 adet yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deney programı Çizelge 3.6'da ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Deney programı üç aşamada planlanmıştır:

Birinci aşama: Düz kazık üzerinde, gevşek ve sıkı kum koşullarında, gömülme oranları $L/D = 5$, 10 ve 15 olacak şekilde yükleme deneyleri yapılmıştır.

İkinci aşama: Çan başlı kazık üzerinde, yine gevşek ve sıkı kum koşullarında, aynı gömülme oranları $L/D = 5$, 10 ve 15 kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü aşama: Çan başlı kazık, yalnızca gevşek kum koşullarında, geogrid donatısı ile incelenmiştir. Bu kapsamda, $L/D = 10$ oranı sabit tutulmuş, geogridler kazık başından itibaren $u/D = 0.25$, 0.50 ve 1.00 mesafelerine yerleştirilmiştir. Bu koşullar altında üç ayrı deney yürütülmüştür (Çizelge 3.6).

Çekme kapasitesi üzerinde etkili olabilecek parametrelere ait kısaltmalar aşağıda verilmiştir.

Kazık çapı: D

Kazığın gömülme boyu: L

Kazık gömülme oranı: L/D

Zemin sıklığı: D_r

Donatının çan başlıktan olan mesafesi: u

Donatı mesafe etki oranı: u/D

Tüm deneylerde, 25 mm çaplı ve 75mm çan başlı dairesel kesitli çelik kazıklar kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Düz ve çan başlı kazık deney programı

Deney Serisi	D_r (%)	Kazık tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Donatı Kazık Tabanına Uzaklığı (u/D)
Gevşek	30	Düz	5	Donatısız
		Düz	10	
		Düz	15	
Sıkı	70	Düz	5	
		Düz	10	
		Düz	15	
Gevşek	30	Çan başlı	5	
		Çan başlı	10	
		Çan başlı	15	
Sıkı	70	Çan başlı	5	
		Çan başlı	10	
		Çan başlı	15	
Gevşek	30	Çan başlı	10	0,25
		Çan başlı	10	0,50
		Çan başlı	10	1,00

3.7 Deney Sonuçları

Deney sonuçlarından; düz kazık, çan başlı kazık, kazık gömülme oranı, donatı kullanımı ve zemin sıkılığı gibi parametrelerin kazıkların çekme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Model deney çalışmaları sırasında, zeminin birim hacim ağırlığı ile sıkılık değerleri arasında tutarlı bir uyum sağlanması ve her deneyde zemin homojenliğinin korunması amacıyla laboratuvarında özel bir aparat geliştirilmiş ve her deneyde aynı sıkılık değerlerinin elde edilmesi sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda oluşan deplasman ve yükler, deplasman ölçerler ve yük hücreleri aracılığıyla veri kaydetme ünitesine aktarılmış; elde edilen veriler kullanılarak her bir deney için çekme yükü, toplam çekme yükü ve deplasman değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.22–3.26).

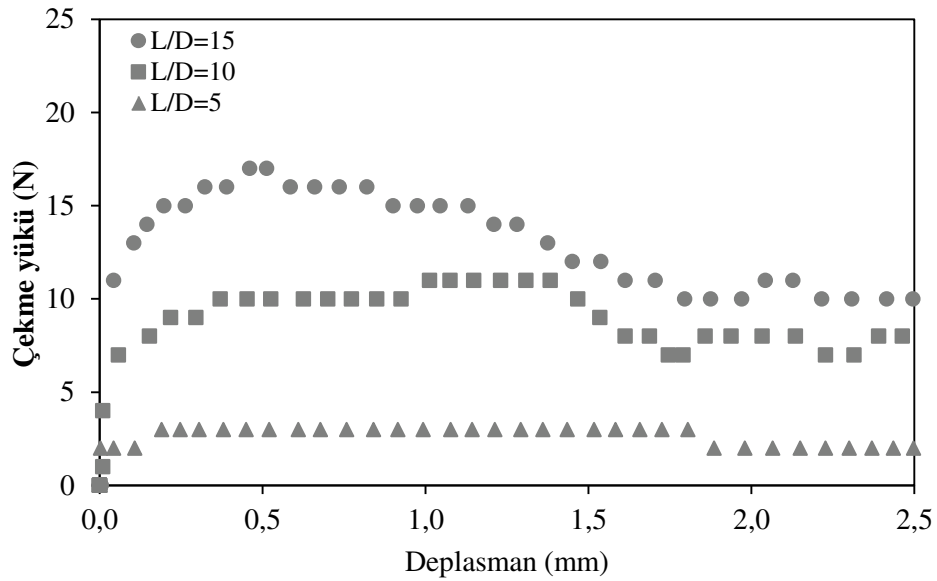
3.7.1. Gömülme Derinliğinin Düz Kazıklarda Gevşek ve Sıkı Kum Koşullarında Çekme Kapasitesine Etkisi

Bu deney serisinde düz başlıklı kazıkların çekme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.6’da sunulduğu gibi düz başlıklı kazıklarda iki farklı sıkılıkta deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde zemin sıkılığı %30 ve %70 olması ve gömülme oranı $L/D=5$, 10 ve 15 olması durumlarında çekme kapasiteleri belirlenmiştir.

Gevşek zeminde yapılan deney sonuçları Çizelge 3.7 ile Şekil 3.22’de, sıkı zeminde gerçekleştirilen deney sonuçları ise Çizelge 3.8 ve Şekil 3.23’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.7 Gevşek Zeminde Düz Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Deney Tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Çekme Kapasitesi (N)	Göçme Anındaki Deformasyon (mm)
Gevşek kum	5	3	0,5
	10	10	0,5
	15	17	0,5



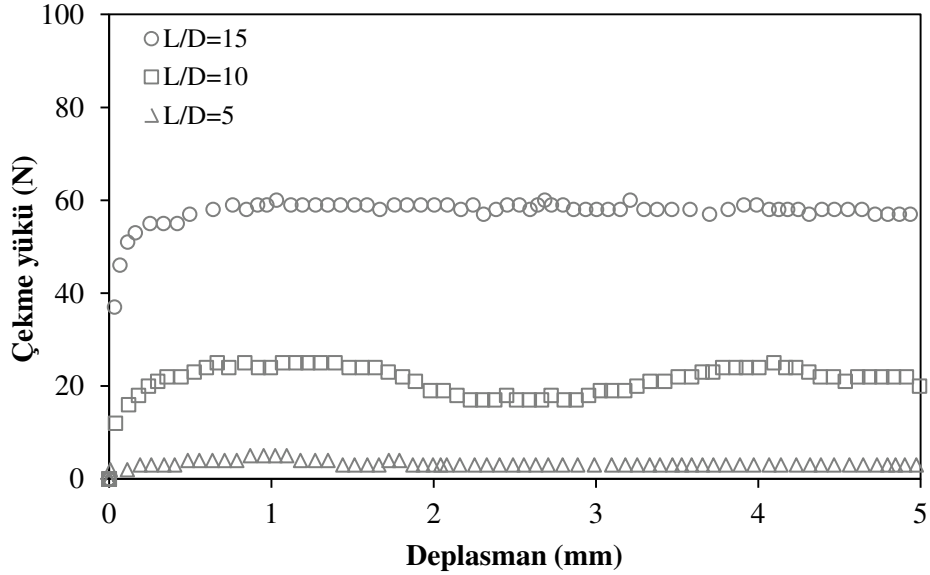
Şekil 3.22. Düz kazık, gevşek kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi (L/D=5, 10, 15, D_f =%30)

Gevşek zemin koşullarında düz kazıklar üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi sonucunda, gömülme oranının $L/D = 5$ 'den $L/D = 10$ 'a çıkarılması ile nihai çekme kapasitesinde yaklaşık 3.3 katlık bir artış meydana geldiği, $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının yaklaşık 5.7 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ 'dan $L/D = 15$ 'e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artış oranının 1.7 kat ile sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu sonuçlardan, gevşek kum zeminlerde gömülme derinliğinin artmasının nihai çekme kapasitesi üzerinde belirgin ve olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Ancak $L/D = 10$ değerinin üzerinde gerçekleştirilen ek gömülmelerde, kapasite artışının azalan bir eğilim sergilediği dikkat çekmektedir. Dolayısıyla, gevşek kum zeminler için $L/D = 10$ gömülme oranının, hem mühendislik uygulamaları açısından yeterli güvenliği sağladığı hem de kapasite artışı ile ekonomik verimlilik arasında uygun bir denge sunduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Çizelge 3.8. Sıkı Zeminde Düz Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Deney Tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Çekme Kapasitesi (N)	Göçme Anındaki Deformasyon (mm)
Sıkı kum	5	4	0,5
	10	23	0,5
	15	57	0,5



Şekil 3.23. Düz kazık, sıkı kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi (L/D=5, 10, 15, D_r =%70)

Sıkı zemin koşullarında düz kazıklar üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi sonucunda, gömülme oranının $L/D = 5$ 'den $L/D = 10$ 'a çıkarılması ile nihai çekme kapasitesinde yaklaşık 5.8 katlık bir artış meydana geldiği, $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının yaklaşık 14.3 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ 'dan $L/D = 15$ 'e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artışın 2.5 kat ile sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, sıkı kum zeminlerde gömülme derinliğinin artmasının nihai çekme kapasitesi üzerinde belirgin ve olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, $L/D = 10$ değerinin üzerinde yapılan ek gömülmelerde kapasite artışının görece daha düşük bir oranda gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bu nedenle, sıkı kum zemin koşulları için $L/D = 10$ gömülme oranının, uygulama açısından güvenli kapasite değerleri sunarken aynı zamanda efektif artış oranı bakımından da en uygun çözüm olduğu sonucuna varılmaktadır. Düz kazıkta aynı gömülme oranlarında gevşek kum ve sıkı kum koşullarında kapasite artış oranları hesaplanmış ve Çizelge 3.9.'da verilmiştir. Kapasite artış oranları incelendiğinde $L/D=5$ 'den, $L/D=10$ ' olan artışın daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.9 Düz Kazık İçin Sıkılığın Etkisi

Gömülme Oranı (L/D)	Zemin Sıkılığına Bağlı Kapasiteler		$Q_{usıkı} / Q_{gevşek}$
	Çekme Kapasitesi $Q_{gevşek}$ (Dr=%30)	Çekme Kapasitesi $Q_{usıkı}$ (Dr=%70)	
5	3	4	1,33
10	10	23	2.30
15	17	57	3.35

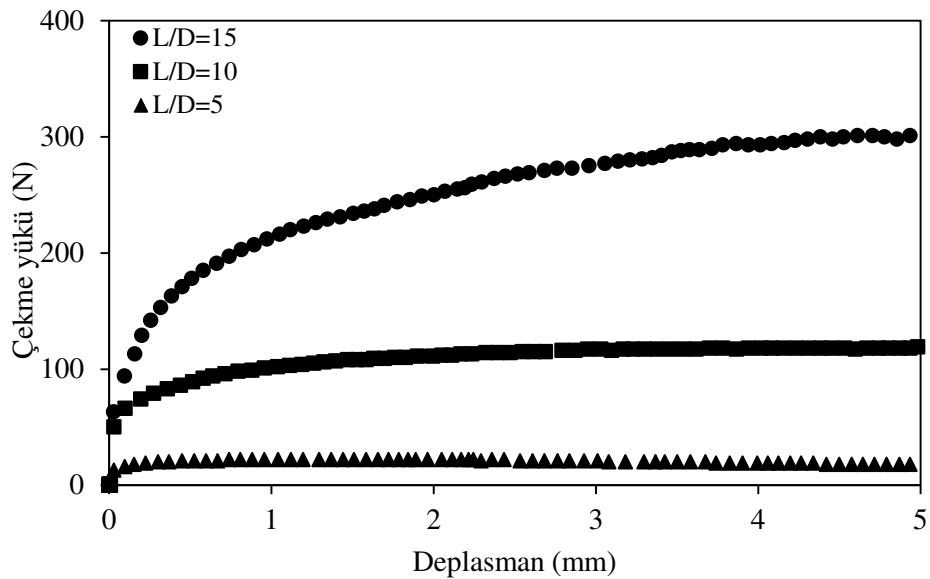
3.7.2. Gömülme Derinliğinin Çan Başlıklı Kazıklarda Gevşek ve Sıkı Kum Koşullarında Çekme Kapasitesine Etkisi

Bu deney serisinde, çan başlıklı kazıkların çekme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.6’da özetlendiği üzere, çan başlıklı kazıklar üzerinde iki farklı sıkılık derecesinde deney yapılmıştır. Bu kapsamda, zemin sıkılığı %30 ve %70 olacak şekilde ve gömülme oranları L/D = 5, 10 ve 15 durumlarında çekme kapasiteleri hesaplanmıştır.

Gevşek zemin koşullarında elde edilen deney sonuçları Çizelge 3.10 ve Şekil 3.24’te, sıkı zemin koşullarında elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.11 ve Şekil 3.25’te sunulmaktadır..

Çizelge 3.10 Gevşek Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Deney Tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Çekme Kapasitesi (N)	Göçme Anındaki Deformasyon (mm)
Gevşek	5	21	0,50
	10	89	0,50
	15	178	0,50



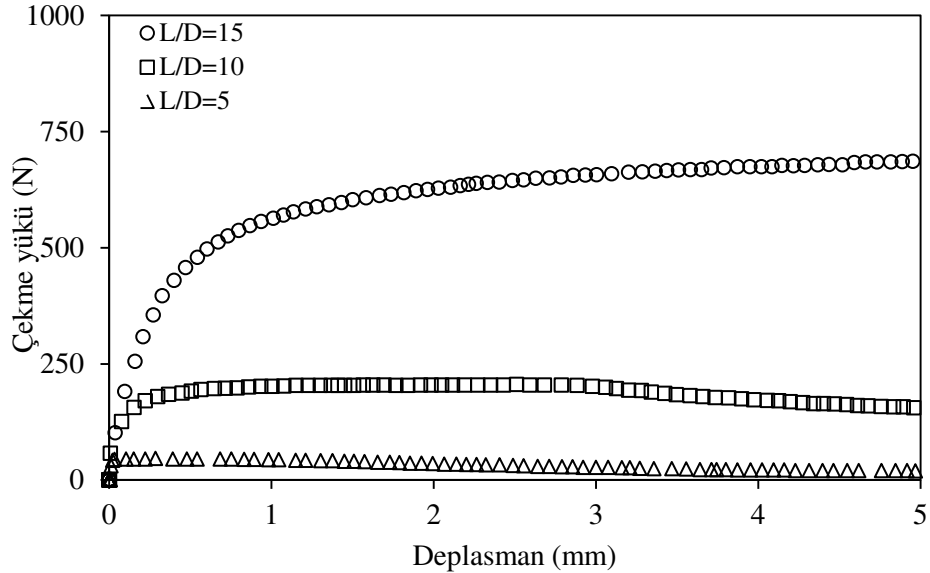
Şekil 3.24. Çan başlı kazık, gevşek kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi (L/D=5, 10, 15, Dr=%30)

Gevşek zeminlerde çan başlıklı kazıklarla gerçekleştirilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, gömülme oranının $L/D = 5$ 'den $L/D = 10$ 'a çıkarılmasıyla nihai çekme kapasitesinde yaklaşık 4.2 katlık bir artış meydana geldiği, $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının 8.5 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ 'dan $L/D = 15$ 'e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artışın 2.0 kat ile sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, gevşek kum zeminlerde kazık gömülme derinliğinin artmasının nihai çekme kapasitesi üzerinde belirgin ve olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, $L/D = 10$ değerinin üzerinde gerçekleştirilen ek gömülmelerde çekme kapasitesindeki artış oranının azaldığı, ayrıca göçme anında kazıkta meydana gelen deformasyonların arttığı dikkat çekmektedir. Bu nedenle, gevşek kum zemin koşulları için $L/D = 10$ gömülme oranının, uygulama açısından güvenli kapasite değerleri sağladığı ve efektif artış oranı bakımından en uygun koşulu sunduğu sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 3.11 Sıkı Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Deney Tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Çekme Kapasitesi (N)	Göçme Anındaki Deformasyon (mm)
Sıkı	5	45	0,50
	10	191	0,50
	15	479	0,50



Şekil 3.25. Çan başlı kazık, sıkı kum koşullarında toplam çekme yükü-deplasman ilişkisi ($L/D=5, 10, 15, D_r=\%70$)

Sıkı zeminlerde çan başlıklı kazıklarla gerçekleştirilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi sonucunda, gömülme oranının $L/D = 5$ 'den $L/D = 10$ 'a çıkarılması ile nihai

çekme kapasitesinde yaklaşık 4.2 katlık bir artış meydana geldiği, $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının 10.6 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ 'dan $L/D = 15$ 'e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artışın 2.5 kat ile sınırlı kaldığı görülmüştür.

Elde edilen bulgular, sıkı kum zeminlerde gömülme derinliğinin artmasının nihai çekme kapasitesi üzerinde önemli ve olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, $L/D = 10$ değerinin üzerinde gerçekleştirilen ek gömülmelerde kapasite artış oranının azaldığı dikkat çekmektedir. Bu nedenle, sıkı kum zemin koşulları için $L/D = 10$ gömülme oranının, uygulama açısından güvenli kapasite değerleri sağlarken aynı zamanda efektif artış oranı bakımından en uygun koşulu sunduğu sonucuna ulaşılmaktadır

Çizelge 3.12 Çan Başlıklı Kazıklar İçin Sıkılığın Etkisi

Gömülme Oranı (L/D)	Zemin Sıkılığına Bağlı Kapasiteler		$Q_{usıkı} / Q_{gevşek}$
	Çekme Kapasitesi $Q_{gevşek}$ (Dr=%30)	Çekme Kapasitesi $Q_{usıkı}$ (Dr=%70)	
5	21	45	2,14
10	89	191	2.15
15	178	479	2.69

3.7.3. Geogrid İle Güçlendirilmiş Gevşek Kum Koşullarında Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi

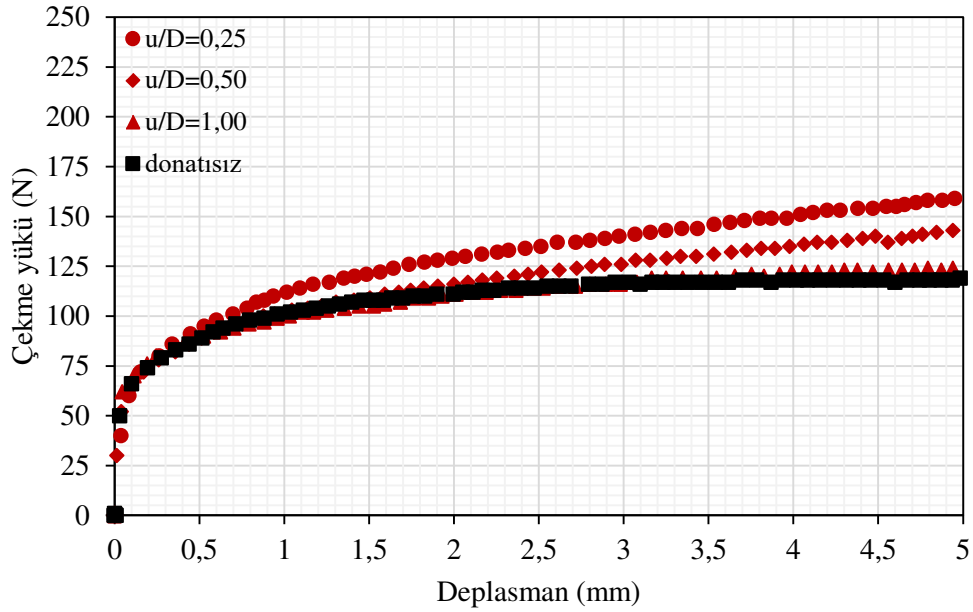
Çan başlıklı kazıklar için gevşek kum koşullarında geogrid ile güçlendirmenin etkisini araştırmak amacıyla laboratuvarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, donatının, çan tepesine olan uzaklığı değiştirilerek $u/D = 0.25, 0.50$ ve 1.00 oranları için deneyler yapılmıştır. Deneyler, %30 rölatif sıkılığa karşılık gelen gevşek kum koşullarında yürütülmüş olup, kazık gömülme oranı sabit tutulmuş ve $L/D = 10$ olarak dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.13. Gevşek Zeminde Çan Başlıklı Kazıklar İçin $L/D=10$ İçin Elde Edilen Donatılı Deney Sonuçları

Deney Tipi	Güçlendirme Derinliği (u/D)	Çekme Kapasites, Q_u (N)
Gevşek (Dr=%30)	donatısız	89
	1,00	90
	0,50	91
	0,25	95

Çan başlıklı kazıklarda geogrid ile güçlendirmenin etkisini araştırmak amacıyla gevşek kum zeminler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, donatının çan yüzeyine olan uzaklığı değiştirilerek $u/D = 0.25, 0.50$ ve 1.00 değerleri için deneyler yapılmıştır. Deneyler, %30

rölatif sıkılığa karşılık gelen gevşek kum koşullarında yürütülmüş olup, kazık gömülme oranı sabit tutulmuş ve $L/D = 10$ olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3.26. Geogridle donatılan kazık, (u/D): 0.25, 0.50, 1.00, toplam çekme yükü- ($L/D=10$, $D_r=\%30$)

Şekil 3.26’da görüldüğü üzere, geogrid donatılı olarak gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre, kum zeminlerde çan başından belirli mesafelerde yerleştirilen donatının çekme kapasitesi üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, optimum bir mesafede yerleştirilen donatının belirli bir u/D oranında maksimum çekme kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Bölüm 5’de sunulan “Sonuçların Karşılaştırılması” başlığı altında ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

Çekme yükü etkisindeki kazıkların davranışının incelenmesine yönelik arazi ve laboratuvar deneylerinde, yük genellikle sabit bir hızla uygulanmaktadır. Özellikle küçük ölçekli laboratuvar deneylerinde, deplasman kontrollü yükleme yöntemi yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, yükleme hızının kum zeminin kayma mukavemeti üzerindeki etkisi, farklı kesme hızlarında gerçekleştirilen doğrudan kesme kutusu deneyleri ile araştırılmaktadır. Bu deneylerden elde edilen bulgular, drenajlı koşullarda kum zeminin kayma mukavemetinin farklı kesme hızlarından anlamlı bir şekilde etkilenmediğini ve bu nedenle sabit kabul edilebilecek bir kayma mukavemeti değerine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın, drenajsız koşullarda uygulanan kesme hızının kum zeminin kayma mukavemeti üzerinde belirgin bir etki yarattığı literatürde bildirilmiştir (Al-Mhaidib, 2006).

3.7.4. Tekil Kazık

Tekil kazıkların çekme kapasitesi; temelin ağırlığı, shaft yüzeyi boyunca mobilize edilen sürtünme direnci ile kazık tabanı seviyesinin üzerindeki serbest bölgeyi dolduran zemin kütlelerinin ağırlığından meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra, kazıkların çekme kapasitesi; temel boyutları, gömülme derinliği ve kazık–zemin arayüzeyinde oluşan sürtünmenin derecesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Deneyler düz kazık modeli ve çan başlı kazık modelleri üzerinde yapılmış ve deneylerde $D=25$ mm çapında çelik kazık ile 75mm çan başlık kullanılmıştır. Çalışmada; kazık gömülme oranı, zemin sıklığı, çan başı konfigürasyonu ve donatı parametrelerinin çekme kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, çekme yükü ile deplasman arasındaki ilişkiyi ortaya koyan grafikler halinde verilmiştir.

Gevşek kum zeminlerde gerçekleştirilen deneylerde, kazığın yük–deplasman davranışında düzensiz yer değiştirmeler ve çekme yükünde dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, model kazığın tabanı altında boşluğa doğru gelişen kum akımı yaklaşımıyla açıklanmaktadır (Rowe ve Davis, 1982; Trautmann ve ark., 1985; Murray ve Geddes, 1987; Dickin, 1988).

3.7.5. Kazık Gömülme Oranı (L/D)

Kazığın gömülme derinliği, çekme kapasitesini önemli mertebede belirlemektedir. Gerilme bağımlı mukavemet özelliğine sahip kum zeminlerde elastisite modülünün yüzeye yakın sığ derinliklerde oldukça düşük değerlerde olduğu, derinlikle birlikte ise yaklaşık doğrusal bir artış gösterdiği kabul edilmektedir. Bu nedenle, kazık gömülme oranının artmasıyla birlikte kazık boyunca çevresindeki zemin daha rijit bir davranış sergilemekte ve kazığın çekme yönündeki hareketine karşı daha büyük bir direnç oluşturmaktadır (El Sawwaf ve Nazir, 2006). Başka bir ifadeyle, kazığın etkileşimde bulunduğu ve sıkıştırmaya çalıştığı zemin kütlelerinin artması, kazığın nihai çekme kapasitesini de artırmaktadır.

3.7.6. Zemin Sıklığı (D_r)

Kum zeminlerde taşıma kapasitesi, zeminin içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı olarak değişmektedir. İçsel sürtünme açısını kontrol eden en önemli parametre rölatif sıklık derecesidir. Bunun yanı sıra, dane çapı dağılımı, dane şekli ve danelerin mineralojik yapısı da içsel sürtünme açısını etkileyen diğer faktörler arasında yer almaktadır. Kum zeminin kuru ya da suya doymun durumunda bulunması ise içsel sürtünme açısını yalnızca çok sınırlı düzeyde etkilemektedir (Özaydın, 2011)

Yapılan literatür incelemeleri, çekme yükü altındaki kazıklarda gelişen göçme mekanizmasının zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olduğunu ve zemin sıklığı arttıkça göçme yüzeyinin daha geniş bir hacme yayıldığını göstermektedir. Zemin sıklığının artışıyla gözlenen bu davranış, sıkı zeminlerde yüzey sürtünmesinin gevşek zeminlere kıyasla daha yüksek olmasıyla

açıklanabilir. Ayrıca, kazığın gömülü olduğu derinlik boyunca deney kasasına yerleştirilen zeminin birim hacim ağırlığının sıkılıkla birlikte artması ve kazık yüzeyi boyunca direnç gösteren zemin kütlelerinin büyümesi, sıkı zeminde çekme kapasitesinin daha yüksek olmasını beklenen bir sonuç haline getirmektedir (Demir, 2006). Deneylerden elde edilen bulgular, literatürde yer alan teorik yaklaşımları destekler niteliktedir (Emirler, 2019).

Kazıkların çekme kapasitesi üzerindeki zemin sıkılığının etkisini belirlemek için, deney kasasında farklı sıkılık derecelerinde hazırlanmış kum zeminler kullanılarak model deneyler yapılmıştır. Deneylerde sıkılık dereceleri $D_r = \%30$ ve $\%70$ olarak seçilmiştir. Deneyler, $L/D=5$, 10 ve 15 olmak üzere üç farklı gömülme oranında gerçekleştirilmiştir.





4. NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMASI

4.1. Genel

Zeminlerin mukavemet davranışlarını tanımlayabilmek amacıyla farklı malzeme modelleri üretilmiştir. Bu modeller, ihtiyaç duydukları girdi parametrelerinin sayısına bağlı olarak basit veya karmaşık modeller şeklinde sınıflandırılabilir. Basit malzeme modellerinden biri olan lineer elastik modelde, gerilme–deformasyon davranışı iki girdi parametresi (elastisite modülü ve Poisson oranı) kullanılarak temsil edilebilmektedir. Buna karşılık, karmaşık modeller daha fazla sayıda girdi parametresine ihtiyaç duymakta olup, bu sayede elde edilen sonuçlar basit modeller ile kıyaslandığında daha gerçekçi olmaktadır. Dolayısıyla, geoteknik problemlerde güvenilir ve doğru çözümler elde edebilmek için zemine en uygun malzeme modelinin seçilmesi ve bu modele ait parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi kritik önem taşımaktadır (Brinkgreve ve ark., 2010)

Bu bölümde öncelikle sonlu elemanlar yöntemine ilişkin temel bilgiler sunulmuş, ardından zemin özellikleri ve statik analiz konuları ele alınmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapabilmek ve kazıkların çekme kapasitesi ile deplasman davranışını araştırmak amacıyla üç boyutlu nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümler üreten PLAXIS 3D bilgisayar programı ile yapılmıştır. Bu kapsamda, deneysel çalışmalara paralel olarak; düz tekil kazıkların farklı gömülme oranlarındaki çekme kapasiteleri, çan başlıklı kazıkların farklı gömülme oranlarındaki çekme kapasiteleri ve geogrid donatılı kazıkların çekme kapasiteleri nümerik analizler aracılığıyla incelenmiştir.

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

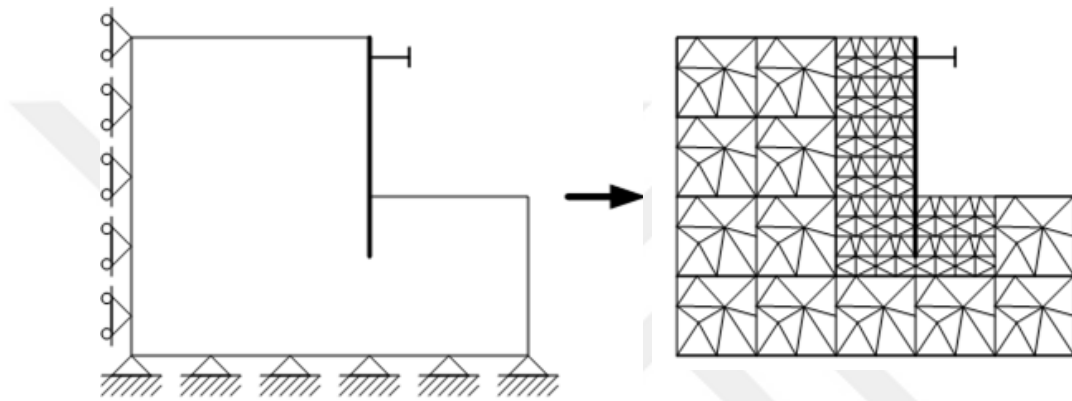
Problem geometrisinin, yükleme koşullarının ve sınır şartlarının görece basit kabul edilebildiği yapısal problemler için (kiriş eğilmesi probleminde olduğu gibi) kapalı çözümler elde edilebilmektedir. Ancak mühendislik problemlerinin büyük çoğunluğu diferansiyel veya integral denklemler ile tanımlanmakta ve bu tür problemlerin çözümü, söz konusu denklemlere yaklaşık çözümler üreten nümerik analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi, dış etkiler altındaki fiziksel bir sistemin davranışını tanımlayan diferansiyel denklemlere yaklaşık nümerik çözümler elde etmek amacıyla kullanılan bilgisayar destekli bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemin en önemli avantajı, herhangi bir standart formülasyona uymayan karmaşık problemlerin çözümünde de başarılı sonuçlar verebilmesidir.

Sonlu elemanlar yönteminin temel prensibi, analiz edilecek problem geometrisinin, Şekil 4.1’de gösterildiği üzere, basit geometrik şekillere sahip çok sayıda küçük elemana ayrılmasıdır. Sonlu eleman adı verilen bu küçük bölgelerin birleşimi, sonlu elemanlar ağı (mesh) olarak adlandırılmaktadır. Ağı oluşturan elemanlar, kenarlarında yer alan düğüm noktaları (node) aracılığıyla birbirlerine bağlanmaktadır. Böylece, sürekli ortamın sonlu elemanlara ayrıştırılması

ile, sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip sürekli fiziksel model, sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip ayrıklaştırılmış bir model aracılığıyla temsil edilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliği uygulamalarında yapıların ve temel sistemlerinin tasarım ve analizlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Zienkiewicz ve Cheung (1964) tarafından Geoteknik mühendisliğindeki ilk uygulamalarından biri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, bu çalışmada karmaşık bir temel sistemi üzerine inşa edilen payandalı bir barajın analizinde lineer üçgen elemanları kullanmışlardır. Bu öncü uygulama neticesinde sonlu elemanlar yöntemi; barajların, kazıklı temellerin, şevlerin, kazıların, ve çeşitli geoteknik problemlerin analizlerinde de yaygın bir şekilde uygulanmaya başlanmıştır (Laman, 1995).



Şekil 4.1. Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması (Sture, 2004)

Sonlu elemanlar yönteminde bir problemin analizi; kuvvet yöntemi, deplasman yöntemi veya karma yöntemlerden biriyle gerçekleştirilmektedir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında ise çoğunlukla deplasman yöntemi tercih edilmektedir. Bu yaklaşımda temel bilinmeyen parametre deplasman olup, gerilme ve birim şekil değiştirmeler deplasmanların tanımlanmasına bağlı olarak ikincil büyüklükler şeklinde hesaplanmaktadır.

Bir sonlu elemandaki deplasman dağılımı, interpolasyon fonksiyonları yardımıyla ifade edilmektedir. Bu interpolasyon fonksiyonları çoğunlukla polinom fonksiyonlar olarak seçilmektedir. Böylece, bir sonlu eleman ile bu sonlu elemanı çevreleyen düğüm noktaları arasındaki ilişki Eşitlik 4.1’de verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır.

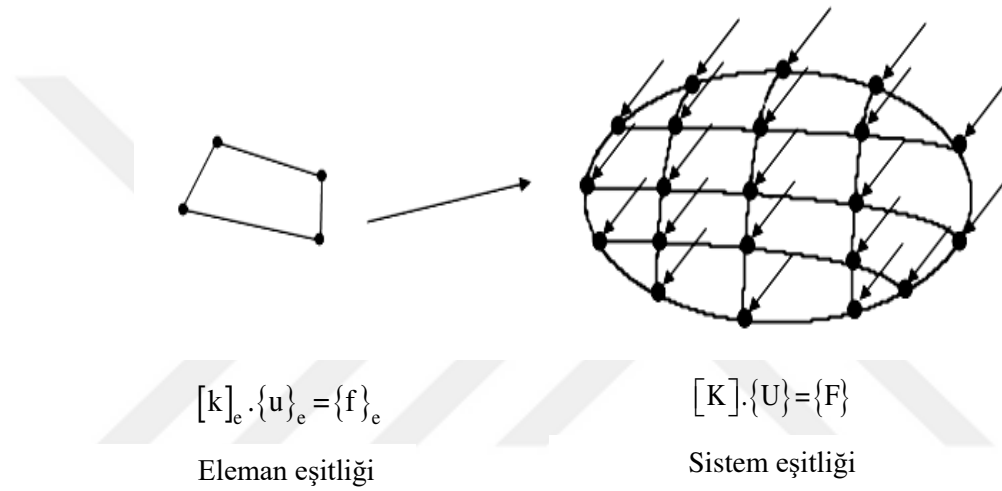
$$[k]_e \cdot \{u\}_e = \{f\}_e \quad (4.1.)$$

Eşitlik 4.2’deki eleman deplasman vektörü $\{u\}_e$ bilinmeyen parametre olup uygulanan kuvvetler etkisinde düğüm noktalarının nasıl hareket edeceğini tanımlamaktadır. Eleman rijitlik matrisi $[k]_e$; malzemenin mekanik özellikleri, kesit parametreleri ve geometrik biçim esas alınarak elde edilmektedir. Eleman yük vektörü $\{f\}_e$ ise eleman üzerinde etki eden dış kuvvetleri gösterir.

Her bir eleman için tanımlanan rijitlik matrisleri ile eleman yük vektörleri uygun dönüşümlerden geçirilip sistem düzeyinde birleştirildiğinde, bütün yapıyı temsil eden global rijitlik matrisi ile global yük vektörü ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.2’te de görüldüğü üzere, bu işlem neticesinde fiziksel problemin davranışını yöneten diferansiyel denklem lineer denklem takımına indirgenir.

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad \dots\dots (4.2.)$$

Verilen eşitlikte $[K]$ sistem rijitlik matrisini, $\{U\}$ deplasman vektörünü ve $\{F\}$ sistem yük vektörünü göstermektedir.



Şekil 4.2. Global matris eşitliklerinin elde edilmesi (Uncuoğlu, 2009)

Analiz sürecinde, global matris eşitliklerinin çözülmesiyle her bir düğüm noktasına karşılık gelen yer değiştirmeler elde edilmektedir. Bu düğüm deplasmanları kullanılarak, her bir sonlu elemandaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler belirlenir. Analiz tamamlandığında ise, ortaya çıkan geniş kapsamlı veriler mühendislik tasarımında kullanılabilecek anlamlı sonuçlara dönüştürülür.

4.3. Zemin Davranışının Modellenmesi

Zemin ve malzeme modelleri, dış yükler altında ortaya çıkacak gerilme–şekil değiştirme ilişkisini tanımlamayı amaçlamaktadır. Bir zemin veya malzeme modelinin güvenilir olarak değerlendirilebilmesi için aşağıda verilen belirli koşulları sağlaması gereklidir:

- Farklı gerilme ve deformasyon durumlarında malzemenin tepkisini temsil edebilmelidir.
- Model parametreleri, standart laboratuvar deneyleriyle belirlenebilir nitelikte olmalıdır.

- Uygulanan gerilme veya deformasyon koşullarında meydana gelen değişimleri yeterli doğrulukla yansıtabilmelidir.

Gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki, elastik bölgede doğrusal olup Poisson oranı ve Elastisite modülü kullanılarak ortaya konmaktadır. Bununla birlikte, yalnızca sınırlı sayıdaki malzemenin davranışı tamamen elastik davranışla açıklanabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan zemin ve yapı malzemelerinin çoğu elastoplastik davranış göstermektedir. Plastik bölge, yenilme noktasına ulaşılmasıyla başlamaktadır ve bu aşamadan sonra malzemede pekleşme davranışı (work hardening) gözlenmektedir.

Elastoplastik davranışta en önemli güçlüklerden biri, yenilme noktasının belirlenmesi ve plastik bölgenin tanımlanmasıdır; zira malzemelerin yenilme noktaları birbirinden farklılık göstermekte ve bu noktanın konumu malzeme türüne bağlı olarak değişmektedir. Araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen standart deneylere göre, kum zeminlerin yükleme altında elastoplastik bir davranış gösterdiği ortaya koymuştur.

Sonlu elemanlar analizlerinde, malzemelerin yük altındaki tepkileri, belirli kriterlere ve matematiksel ilişkilere dayanan malzeme modelleri aracılığıyla tanımlanmaktadır. Çekme yükü etkisindeki kazık problemlerini ele alan önceki üç boyutlu analizlerde zemin çoğunlukla lineer ya da nonlineer elastik olarak kabul edilmiştir. Ancak plastisite teorisine göre zemini en uygun biçimde temsil eden model, idealize edilmiş elastik–tam plastik yaklaşımdır. Bu modelde zemin, göçme noktasına ulaşmaya kadar lineer elastik davranış sergiler. Oysa gerçek zemin davranışında, yüklemenin başlamasıyla birlikte nonlineer bir gerilme–deformasyon ilişkisi gözlenir. Dolayısıyla, küçük deformasyon düzeylerinde analizler ile gerçek davranış arasındaki farklılık, bu karakteristik ayırmadan kaynaklanmaktadır (Brown ve Shie, 1990; Trochanis ve ark., 1991; Wakai ve ark., 1999; Chae ve ark., 2004; Johnson ve ark., 2006).

PLAXIS 3D bilgisayar programındaki tüm model parametreleri, zeminin efektif tepkisini, diğer bir ifadeyle dane yapısına bağlı gerilme–deformasyon davranışını temsil etmektedir. Zeminin en belirgin niteliklerinden biri, boşluk hacimlerinde suyun bulunabilmesidir. Zeminin tepkileri, boşluklarda oluşan su basınçlarından önemli derecede etkilenmektedir. PLAXIS 3D programı, zemin reaksiyonlarını elde ederken boşluklarda bulunan su ile danelerin etkileşimini birlikte değerlendirebilmek amacıyla her bir zemin modeli için üç farklı davranış biçimi sunmaktadır: drenajlı, drenajsız ve non-porous davranış. Kuru zeminler, yüksek permeabilite katsayısına sahip kum zeminler veya düşük hızdaki yükleme neticesinde aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmediği durumlar için drenajlı davranış biçiminin kullanılması önerilmektedir.

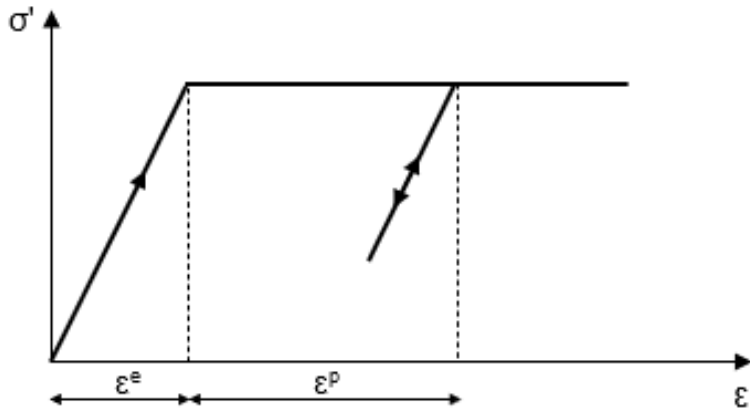
Mohr-Coulomb (MC) Model

Gerilme–deformasyon davranışını lineer elastik–tam plastik yaklaşımla tanımlayan bu malzeme modeli, basitliği nedeniyle sıkça tercih edilen yöntemlerden biridir. Modelin lineer elastik

kısmı Hooke yasasına, tam plastik kısmı ise Mohr–Coulomb yenilme kriterine dayandırılmaktadır (Şekil 4.3).

Plastik davranış, malzeme bünyesinde elastik sınırın aşılmasıyla geri dönüşsüz deformasyonların ortaya çıkması olarak tanımlanır. Malzemenin plastik tepkisini belirlemek amacıyla, gerilme–deformasyon ilişkisine bağlı olarak tanımlanan akma fonksiyonu (f) kullanılmaktadır. Plastik akma, $f=0$ koşulunun sağlandığı durumlarda gerçekleşir ve bu koşullar çoğunlukla asal gerilmeler uzayında bir yüzey ile temsil edilmektedir. Söz konusu akma yüzeyinin içerisinde kalan gerilme durumlarında, malzemenin tepkisi bütünüyle elastik nitelik göstermekte olup, meydana gelen tüm şekil değiştirmeler yük kaldırıldığında geri kazanılabilmektedir. Lineer elastik–tam plastik davranış varsayımı altında ise, toplam deformasyon iki ayrı bileşenden oluşur: geri döndürülebilir elastik deformasyon ve kalıcı plastik deformasyon (PLAXIS Material Models Manual, 2015).

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (4.3.)$$



Şekil 4.3. Elastik-tam plastik model (PLAXIS Material Models Manual, 2015)

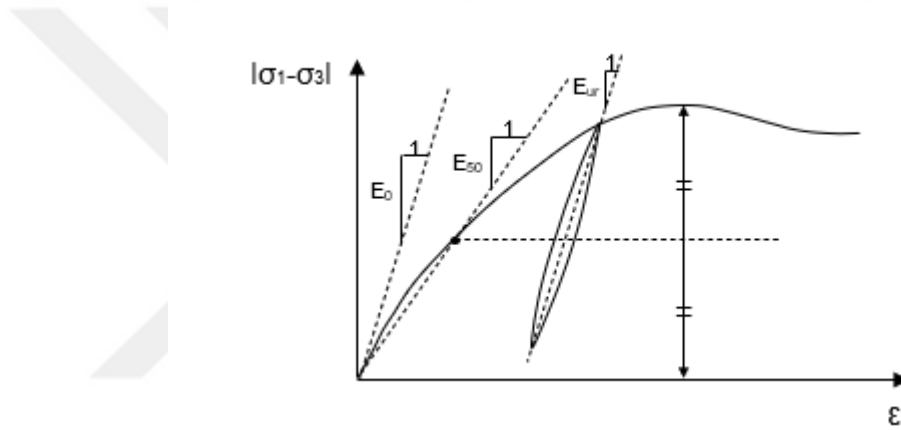
Bu modelde, lineer elastik malzeme modelinin temel girdi parametreleri olan Poisson oranına ve Elastisite modülüne ek olarak, plastik davranışı temsil eden içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve kohezyon değerlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanılabilmesi için geleneksel laboratuvar deneylerinden elde edilebilen beş adet temel girdi parametresi gereklidir. Bu parametrelere aşağıda kısaca değinilmektedir.

Elastisite Modülü (E)

Zeminler, aynı yük altında farklı davranış sergilediğinden, analizlerde kullanılan rijitlik modülünün dikkatle seçilmesi gerekmektedir. Lineer Elastik ve Mohr–Coulomb malzeme modellerinde rijitlik parametresi olarak elastisite modülü yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanında, farklı rijitlik tanımları da mevcuttur. Örneğin, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen

gerilme–deformasyon eğrisinin başlangıç eğiminden hesaplanan başlangıç rijitlik modülü E_0 ve deviatör gerilmenin $(|\sigma_1 - \sigma_3|)$ maksimum değerinin %50'sine karşılık gelen sekant modülü E_{50} bunlara örnek olarak verilebilir.

Bazı kayalarda ve çok aşırı konsolide kil zeminlerde, elastik davranış aralığı geniş olduğundan E_0 modülünün kullanılması daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Buna karşılık, normal konsolide kil ve kum zeminlerde yüklemenin başlamasıyla birlikte doğrusal olmayan bir gerilme–deformasyon ilişkisi gözlemlendiğinden, bu tip zeminler için E_{50} sekant modülünün kullanılması daha uygun olmaktadır (Şekil 4.4). Ayrıca, büyük miktarda kazının gerçekleştirildiği tünel ya da derin kazı problemlerinde zeminde şişme meydana gelebileceğinden, bu tür durumlarda boşaltma/tekrar yükleme modülü (E_{ur}) değerinin dikkate alınması daha doğru bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir (PLAXIS Material Models Manual, 2015)



Şekil 4.4. E_0 , E_{50} ve E_{ur} Modülleri (PLAXIS Material Models Manual, 2015)

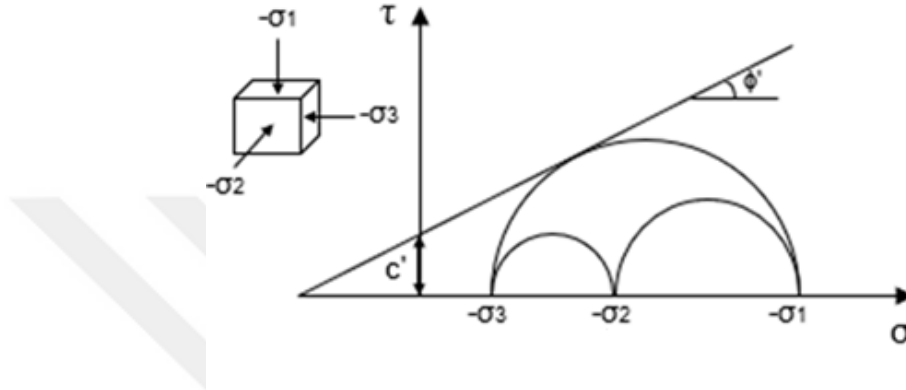
Poisson Oranı (ν)

Elastik malzemenin diğer temel parametresi olan Poisson oranının seçimi, başlangıç gerilmelerinin *Gravity Loading* seçeneği ile hesaplandığı problemlerde (örneğin; yer altı su seviyesinin yüzeye paralel olmadığı veya zemin yüzeyinin şevli olduğu durumlarda) oldukça basit bir yaklaşımla yapılabilmektedir. Bu tür yükleme koşullarında, sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0) değeri, $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ eşitliği yardımıyla gerçekçi bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Dolayısıyla Lineer Elastik ve Mohr-Coulomb zemin modellerinde tek boyutlu sıkışma (ödometre) problemleri için $K_0 = \sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$ eşitliği kullanılmakta; buradan elde edilen K_0 katsayısına karşılık gelen Poisson oranı belirlenmektedir.

Başlangıç gerilmelerinin K_0 *Procedure* seçeneği ile hesaplandığı problemlerde (örneğin, zemin yüzeyinin yatay olduğu veya yer altı su seviyesinin yüzeye paralel bulunduğu durumlarda) Poisson oranı doğrudan tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Bu tür problemlerde, Poisson oranı basınç etkisi altında genellikle 0.30–0.40 aralığında, çekme etkisi altında ise 0.15–0.25 aralığında seçilmektedir. Kum zeminler için ise bu değer çoğunlukla 0.20–0.40 aralığında alınmaktadır (PLAXIS Material Models Manual, 2015).

Kohezyon (c)

Mohr-Coulomb malzeme modelinin plastik davranış parametrelerinden birisi de kohezyondur. İnce daneli (kil, silt) ve kendini tutabilen zeminlerin mukavemetini temsil eden bu parametre, kaba daneli ve kendini tutamayan zeminlerde (kum, çakıl) ise $c = 0$ değerine sahiptir. Ayrıca, Mohr-Coulomb malzeme modelinde kohezyon parametresi, zeminin efektif kohezyon (c') değerini modellemek amacıyla, efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') ile birlikte bir kombinasyon halinde kullanılmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Mukavemet parametreleri (PLAXIS Material Models Manual, 2015)

Mohr-Coulomb malzeme modeli ile kum zeminlerin analizinde, efektif kohezyonun ($c' = 0$) kabul edilmesi, hesaplamalarda çeşitli zorluklara yol açabilmektedir. Bu güçlük, kum tabakasının doğrudan zemin yüzeyine kadar uzandığı durumlarda daha belirgin hale gelmektedir. Söz konusu problemleri minimize etmek için, efektif kohezyonun ($c' > 0.2$ kPa) düzeyinde küçük bir değerle tanımlanması önerilmektedir. Bununla birlikte, kum zeminler için kohezyonun pozitif kabul edilmesi, zemine kısmi bir çekme mukavemeti atfedilmesi anlamına gelmekte olup, bu varsayım gerçekçi değildir. Bu nedenle, PLAXIS yazılımında bulunan *Tension cut-off* seçeneğinin sıfır olarak tanımlanması, kum zeminlerin çekme mukavemetini gerçekçi şekilde ortadan kaldırmaya olanak tanımaktadır (PLAXIS Material Models Manual, 2015).

İçsel Sürtünme Açısı ϕ'

Mohr-Coulomb zemin modelinin plastik davranış parametrelerinden biri olan içsel sürtünme açısı, kaba daneli zeminlerin (kum ve çakıl) mukavemetinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Ancak bu parametrenin çok yüksek değerlere ulaşması (çoğunlukla sıkı kum koşullarında görülen bir durum), analizlerde yüksek işlem gücü gerektirmekte ve 'birim deformasyon yumuşaması' adı verilen davranışı ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, yüksek içsel sürtünme açısı değerlerinin büyük deformasyonlar altında sürdürülemeyeceğini göstermektedir. Bu nedenle, içsel sürtünme açısının kil ve silt zeminlerde 20° – 30° , kum ve çakıl zeminlerde ise 30° – 40° aralığında tanımlanması tavsiye edilmektedir (PLAXIS Material Models Manual, 2015).

Dilatasyon Açısı (ψ)

Mohr–Coulomb malzeme modelinde plastik davranış parametrelerinden biri olan dilatasyon açısı, özellikle kum zeminlerin deformasyon karakterini tanımlamada önemli bir rol oynamaktadır. Kil zeminlerde genellikle $\psi \approx 0^\circ$ kabul edilirken, kum zeminlerde dilatasyon açısı rölatif sıkılığa ve dolayısıyla içsel sürtünme açısına bağlıdır; ancak bu değer her zaman içsel sürtünme açısından daha düşük olmaktadır. PLAXIS yazılımında, kumlar için dilatasyon açısı genellikle $\psi \approx \phi - 30^\circ$ olarak önerilmekte, $\phi < 30^\circ$ koşullarında ise sıfır kabul edilmektedir. Pozitif dilatasyon açısı, drenajlı koşullarda kayma sırasında hacimsel değişimlerin devam edeceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu varsayım tam anlamıyla gerçeği yansıtmaz; çünkü zemin kritik duruma ulaştığında, sabit gerilme altında gerçekleşen deformasyonlar hacim değişimi olmaksızın ilerler. Drenajsız koşullarda ise pozitif dilatasyon açısı, çekme gözeneklerinin oluşmasına sebep olarak zeminin dayanımının gerçekte olduğundan daha yüksek hesaplanmasına yol açabilir (PLAXIS Material Models Manual, 2015).

4.4. Kazık Davranışının Modellenmesi

Zemin davranışını gerçekçi biçimde yansıtmakta yetersiz kalan Lineer Elastik model, genellikle zemine gömülü dolu veya boru kesitli rijit yapıların davranışlarını temsil etmek amacıyla kullanılmaktadır. Hooke yasasına dayanan lineer izotrop elastik gerilme–deformasyon yaklaşımı, bu ilişkiyi en basit düzeyde açıklamaktadır. Modelin tanımlanabilmesi için yalnızca Poisson oranı, elastisite modülü ve birim hacim ağırlık gibi sınırlı parametreler gereklidir.

4.5. PLAXIS 3D

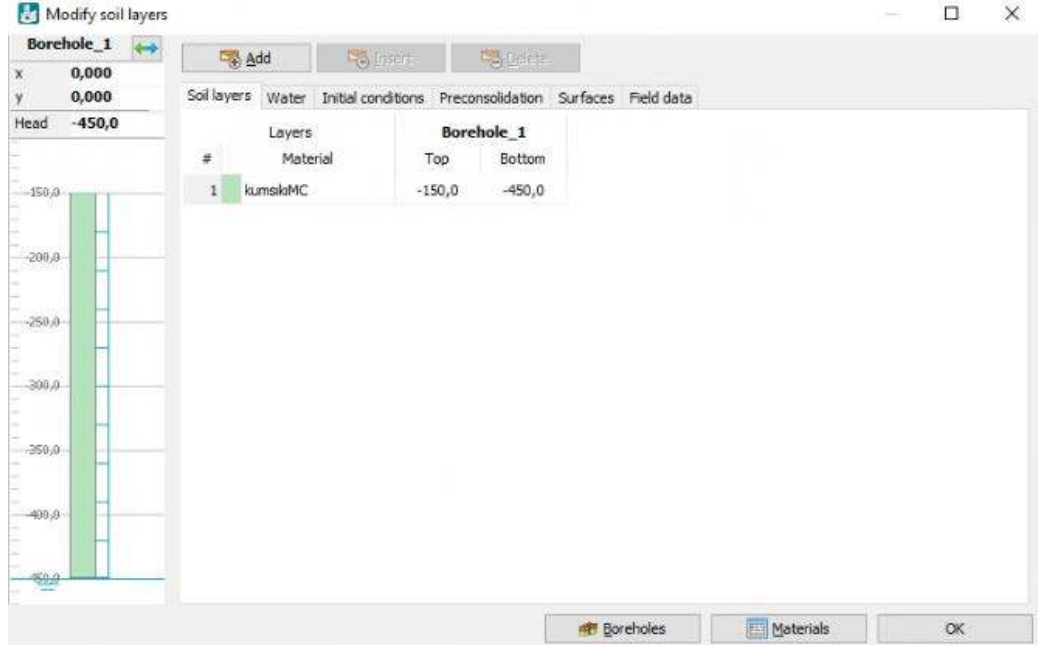
Özellikle temel sistemlerinin deformasyon analizlerinde yaygın olarak kullanılan PLAXIS 3D, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı gelişmiş bir bilgisayar yazılımıdır. Bu çalışmada, deneysel düzenek, yükleme koşulları ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak, kum zemin içerisinde çekme yüküne maruz rijit kazık problemi PLAXIS 3D aracılığıyla modellenmiş ve analiz edilmiştir. Modelleme ve analiz sürecinde izlenen aşamalar aşağıda özetlenmiştir.

4.5.1. SOIL Sekmesi

Zemin Profilinin Oluşturulması

Üç boyutlu bir geometrik modelin kurulmasında ilk aşama, çalışma sınırlarının tanımlanmasıdır. Zemin kütlesindeki tabakalanma ve zemin yüzeyinin konumu sondaj kuyuları (borehole) aracılığıyla belirlenmektedir. Şekil 4.6’da gösterildiği üzere, sondaj kuyuları, yer altı su seviyesi ile başlangıç gerilme koşullarına ilişkin veriler de içermektedir. Zemin yüzeyinin veya tabakaların yatay süreksizlik gösterdiği durumlarda, profil oluşturma sürecinde çok sayıda sondaj

kuyusundan elde edilen bilgiler kullanılmaktadır. Bu kapsamda, farklı noktalarda açılmış sondaj kuyularına ait veriler yardımıyla zemin profili oluşturulmakta, kuyular arasındaki boşluklarda kalan tabakalar ise interpolasyon yöntemiyle tanımlanmaktadır. İlk sondaj kuyusunun belirlenmesinden sonra, diğer kuyular genellikle onun kopyası şeklinde sisteme eklenir. Daha sonra kullanıcı tarafından tabaka sınırları ve yer altı su seviyesi yeniden düzenlenebilir. Bu sayede, sondaj kuyularında tanımlanan zemin tabakalarının özellikleri ile birlikte otomatik olarak K_0 katsayısı değerleri de programa aktarılmaktadır. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, zemin tabakalarına ilişkin parametreler ve malzeme özellikleri kullanıcı tarafından girilmekte (materials butonu yardımıyla), ardından program bu veriler doğrultusunda hesaplama yapmaktadır. Belirlenen malzeme parametreleri, mukavemet özellikleriyle birlikte sondaj kesiti üzerindeki ilgili zemin tabakasına tanımlanmıştır. Nümerik analizlerde ise model zemin profili, deneysel çalışma programı dikkate alınarak üniform sıkı kum zemini şeklinde oluşturulmuştur.

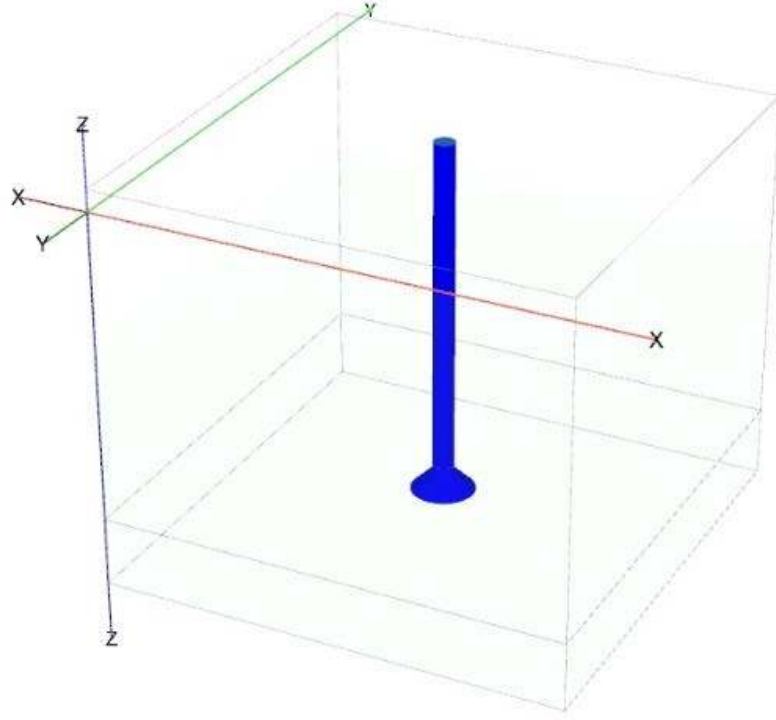


Şekil 4.6. Zemin profilinin oluşturulması

4.5.2. STRUCTURES Sekmesi

Yapısal Elemanın Oluşturulması

Kazık elemanı, PLAXIS 3D programında ‘plate’ kullanılarak modellenmiştir. Kazık elemanın oluşturulması sırasında zemine yerleştirilme yönteminin etkileri dikkate alınmamıştır. Kazıklar, deneysel çalışmada kullanılan kazık geometrisi ile uyumlu olacak şekil ve boyutta modellenerek, çelik malzemesine ait özellikler atanmıştır (Şekil 4.7.)



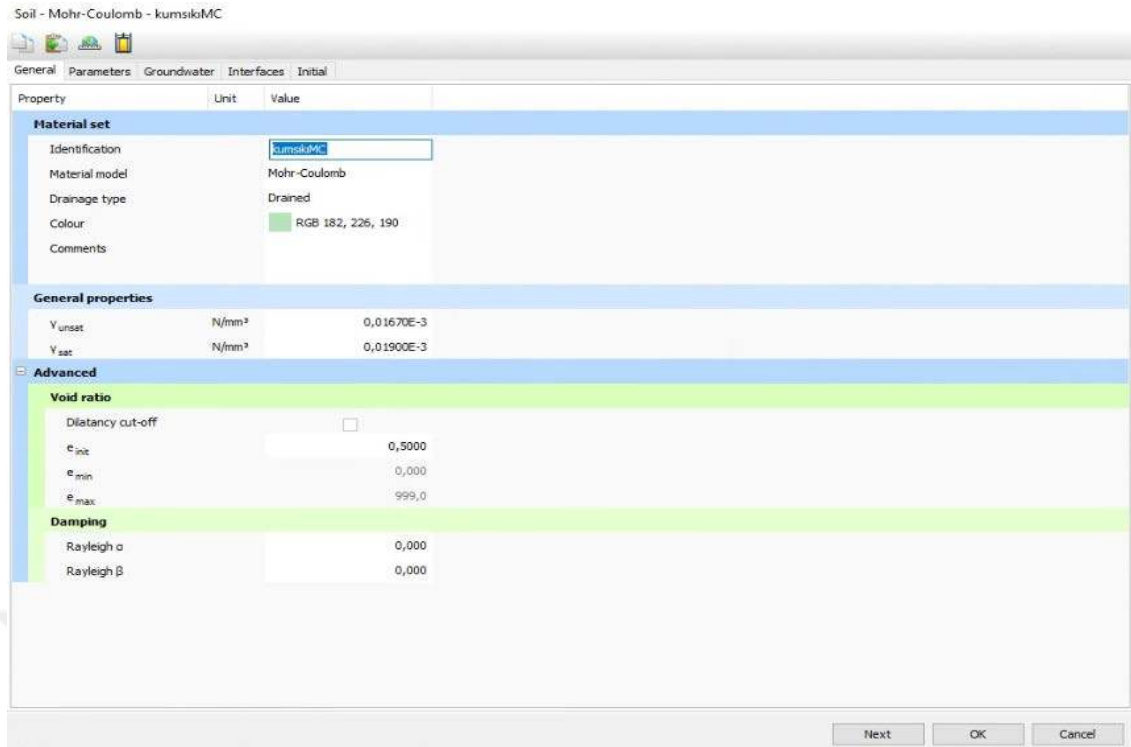
Şekil 4.7. Kazık elemanın oluşturulması

Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Malzemenin mukavemet ve davranış özellikleri, deneysel gözlemlerden türetilen parametrelerin malzeme veri tabanına aktarılması yoluyla sayısal modele entegre edilmektedir. PLAXIS 3D programı altı farklı eleman tipi için tanımlanmış malzeme veri setleri barındırmaktadır. Bu eleman tipleri şu şekildedir:

- düzlemsel elemanlar,
- zemin ve arayüzey elemanları,
- kirişler,
- geogridler,
- ankrajlar,
- gömülü kirişler

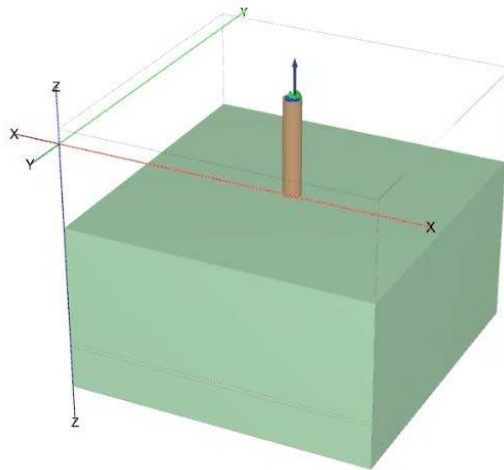
Modeldeki zemin kütlesi ‘zemin ve arayüzey elemanları’ için kullanılan malzeme veri seti aracılığıyla tanımlanırken, kazık elemanları ise ‘gömülü kiriş’ elemanları için tanımlanan malzeme veri setine kazık malzemesine ait özelliklerin girilmesiyle modellenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Yükün Uygulanması

PLAXIS 3D yazılımında yükleme ve deplasman türleri; 'x, y ve z' doğrultularında etkili olabilen noktasal, çizgisel ve yüzeye yayılı yükler şeklinde tanımlanmaktadır. Analizler, bu yükleme tiplerinden herhangi biri dikkate alınarak yük kontrollü ya da deplasman kontrollü biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanında, bir düğüm noktasında farklı doğrultularda yük bileşenleri aynı anda tanımlanabilir ve bu bileşenler sisteme bileşke kuvvet olarak yansır. Bu çalışmada, model deneylerde kazık elemanı üzerine uygulanan çekme kuvveti, sayısal analizlerde 'z' doğrultusunda etkiyen yüzeye yayılı yük olarak idealize edilmiştir (Şekil 4.9).

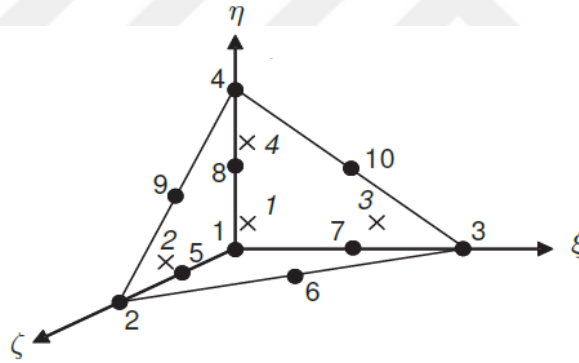


Şekil 4.9. Yükün uygulanması

4.5.3. MESH Sekmesi

Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

Zemin tabakaları ile yapısal elemanların malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra, problem geometrisi sonlu eleman ağına dönüştürülmektedir. Bu süreç, *mesh* sekmesi üzerinden yürütülmekte olup, ağ yoğunluğu çok kaba, kaba, orta, ince ve çok ince olmak üzere beş farklı düzeyde seçilebilmektedir. Ayrıca, analiz hassasiyetinin artırılması amacıyla belirli bölgelerde yerel ağ sıklaştırması yapılabileceği gibi tüm çalışma alanında homojen bir ağ yoğunluğu da uygulanabilmektedir. Yapısal eleman çapının sonlu eleman boyutlarına oranı, çözüm doğruluğu üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bu nedenle, ağ yoğunluğunun seçimi, analizlerin güvenilir sonuçlar üretebilmesi açısından kritik bir parametredir. Ancak, eleman sayısının aşırı derecede artırılması hesaplama süresini uzatacağından, çözüm hassasiyeti ile analiz verimliliği arasında dengeli bir seçim yapılmalıdır. PLAXIS 3D programında zemin bölgeleri, 10 düğümlü dört yüzlü elemanlar kullanılarak sonlu elemanlara ayrılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Üç boyutlu zemin elemanı (10 düğümlü-dört yüzlü)

4.5.4. STAGED CONSTRUCTION Sekmesi

Başlangıç Gerilme Durumunun Tanımlanması

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan problemlerin önemli bir kısmında, başlangıç gerilme koşullarının tanımlanması gereklidir. Zemin kütleğinde mevcut olan başlangıç gerilmeleri; malzemenin birim hacim ağırlığına, yer altı koşullarına ve zeminin oluşum sürecine bağlı olarak şekillenmektedir. PLAXIS 3D yazılımında bu başlangıç gerilme durumu, “ K_0 Procedure” veya “Gravity Loading” seçeneklerinden uygun olanı seçilerek tanımlanmaktadır.

K_0 Procedure, yalnızca zeminin birim ağırlığını ve boşluk suyu basıncını dikkate almakta, yapısal elemanların ağırlıkları ile dış yükleri hesaba katmamaktadır. Bu nedenle “initial phase” olarak tanımlanan başlangıç adımı, dış yüklerin ve yapısal elemanların etkinleştirilmesi başlangıç gerilme koşullarını etkilemez. K_0 Procedure, zemin yüzeyinin yatay kabul edildiği ve tüm tabakaların yanı sıra yer altı su seviyesinin de zemin yüzeyiyle paralel varsayıldığı durumlarda

uygulanmaktadır. Diğer koşullarda ise başlangıç gerilme durumu “Gravity Loading” seçeneği kullanılarak tanımlanmaktadır.

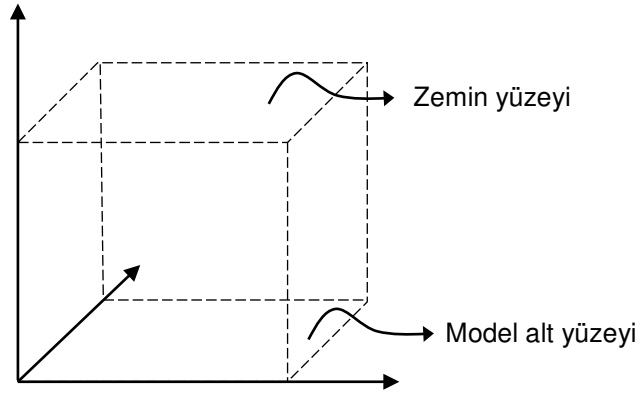
“Gravity Loading” seçeneği kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda, başlangıç gerilmeleri zeminin birim hacim ağırlığına bağlı olarak belirlenmektedir. Mohr–Coulomb gibi elastik–tam plastik modellerde, yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranını tanımlayan K_0 katsayısı, seçilen poisson oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle, gerçekçi bir K_0 değeri elde edebilmek için uygun poisson oranının tercih edilmesi önem arz etmektedir. “Gravity Loading” yaklaşımında, tek boyutlu sıkışma için $v=K_0/(1+K_0)$ bağıntısı kullanılmaktadır. Poisson oranının 0.5’ten küçük olması gerektiğinden, bu yöntemle 1’in üzerinde K_0 katsayısı elde edilememektedir.

Bu çalışmada, sıkı kum zemini koşullarında yürütülen deneysel araştırmaların sayısal analizleri gerçekleştirilirken, problemin özelliklerine bağlı olarak başlangıç gerilme durumu “ K_0 Procedure” yaklaşımıyla tanımlanmıştır.

Sınır Koşullarının Tanımlanması

Geometrik modele ait sınır koşulları aşağıda belirtilen kurallar göz önünde tutularak otomatik olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.11).

- Y-Z düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının X doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_x=0$), Y ve Z doğrultularında hareket serbestlikleri mevcuttur.
- X-Z düzlemine paralel olan model düşey sınırlarının Y doğrultusundaki hareketleri engellenmişken ($u_y=0$), X ve Z 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 Y doğrultusunda olan düşey model sınırlarının hareketleri hem X hem de Y doğrultularında engellenmişken ($u_x=u_y=0$), bu düşey sınırlar Z doğrultusunda hareket serbestliğine sahiptir.



Şekil 4.11. Üç boyutlu model geometrisi

Hesaplama

Sonlu elemanlar ağının üç boyutlu olarak oluşturulması ile birlikte modelleme süreci tamamlanmakta ve akabinde problemin nümerik analizinin gerçekleştirileceği hesaplama aşamasına geçilmektedir. PLAXIS 3D bilgisayar programında nümerik analizler, ardışık hesaplama aşamaları şeklinde yürütülmekte olup her bir aşama belirli bir yükleme veya yapım sürecini temsil etmektedir. Bu bağlamda, PLAXIS 3D’de ilk hesaplama aşaması her zaman başlangıç gerilme durumunun tanımlandığı ve ‘initial phase’ olarak adlandırılan aşamadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel model analizleri iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada başlangıç gerilme durumu tanımlanmış, ikinci aşamada ise model kazığın imalatı ile birlikte çekme yükü uygulanmıştır. Son hesaplama adımı plastik analiz olarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, son hesaplama adımının başlangıcında ilk aşamada meydana gelen deplasmanlar sıfırlanarak, sonraki aşamalarda oluşacak deplasmanların üzerinde ‘initial phase’ aşamasındaki deplasmanların etkisi ortadan kaldırılmıştır. Buna karşılık, başlangıç gerilmeleri korunmuştur.

4.6. Nümerik Analiz Sonuçları

Nümerik analizler; sıkı kum zemine gömülü çan başlı kazık için gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde öncelikle kazık gömülme oranının çekme yüküne etkisi araştırılmıştır. Analizler üç farklı kazık gömülme oranında ($L/D=5, 10$ ve 15) gerçekleştirilmiştir.

Nümerik analiz çalışmasında kum zeminin davranışı Mohr-Coulomb (MC) malzeme modeli ile tanımlanmıştır. MC malzeme modeli parametrelerinden zeminin kuru birim hacim ağırlığı (γ_{unsat}), elastisite modülü (E) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri sıkı kum zemin numuneleri için elde edilmiş olup zeminin doymun birim hacim ağırlığı (γ_{sat}) ise PLAXIS tarafından önerilen hususlar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Poisson oranı, literatürde (Laman ve ark., 1999) önerilen aralık dikkate alınarak ortalama bir değer şeklinde belirlenmiştir. Sıkı kum zemine ait parametreler ise Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Nümerik analizlerde kullanılan model kazık elemanının malzemesi çelik olarak tanımlanmıştır. Bu elemanlara ait parametreler, literatürde rapor

edilen değerlerle (Laman, 1995) uyumlu biçimde seçilmiştir. Çelik kazık malzemesine ve geogrid elemanına ait özellikler ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sıkı kum zemine ait malzeme özellikleri

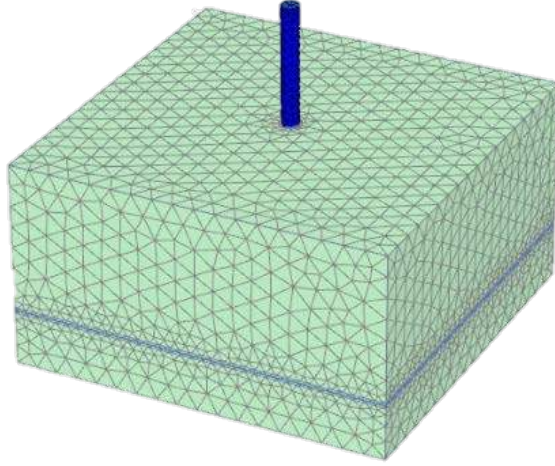
Parametreler	
Malzeme modeli	MC
Drenaj tipi	Drenajlı
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (N/mm ³)	$16,7 \times 10^{-6}$
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (N/mm ³)	19×10^{-6}
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	32
Poisson oranı, ν	0.3
Kohezyon, c (N/mm ²)	0
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	40

Çizelge 4.2. Kazık eleman ve geogride ait malzeme özellikleri

Parametreler	
Kazık	
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	20×10^4
Birim hacim ağırlık, γ (N/mm ³)	77×10^{-6}
Poisson oranı, ν	0.3
Geogrid (Secugrid® 60/60 Q1)	
Uzama rijitliği, EA (N/mm)	1100

4.6.1. Sonlu Elemanlar Ağı

PLAXIS 3D yazılımında ağ (mesh) oluşturma işlemi otomatik olarak yapılabilmekte, bunun yanı sıra kullanıcı tarafından belirli bölgelerde manuel sıkılaştırma da uygulanabilmektedir. Çalışmada, analiz sonuçlarının güvenilirliğini etkilemeyecek en uygun ağ yoğunluğu araştırılmış; deneysel verilerle en iyi uyumun ince ağ yoğunluğunda gerçekleştirilen analizlerde sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle, nümerik analizlerde ‘fine mesh’ seçeneğinin kullanılması tercih edilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Üç boyutlu sonlu eleman ağı

4.6.2. Tekil Kazık Düz ve Çan Başlık

Sıkı kum zemine gömülmüş tekil kazığın çekme kapasitesini etkileyen parametreler, nümerik analizler aracılığıyla incelenmiştir. Bu kapsamda, $D = 25$ mm çapındaki çelik kazık iki farklı konfigürasyonda (düz ve çan başlı) ve üç farklı gömülme oranında ($L/D = 5, 10$ ve 15) modellenmiştir. Analizler, deneysel çalışmalarda göçmenin meydana geldiği deplasman değerine kadar sürdürülmüş ve bu doğrultuda çekme yükü–deplasman ilişkileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgili grafikler aracılığıyla sunulmuştur.

Kazık Tipi

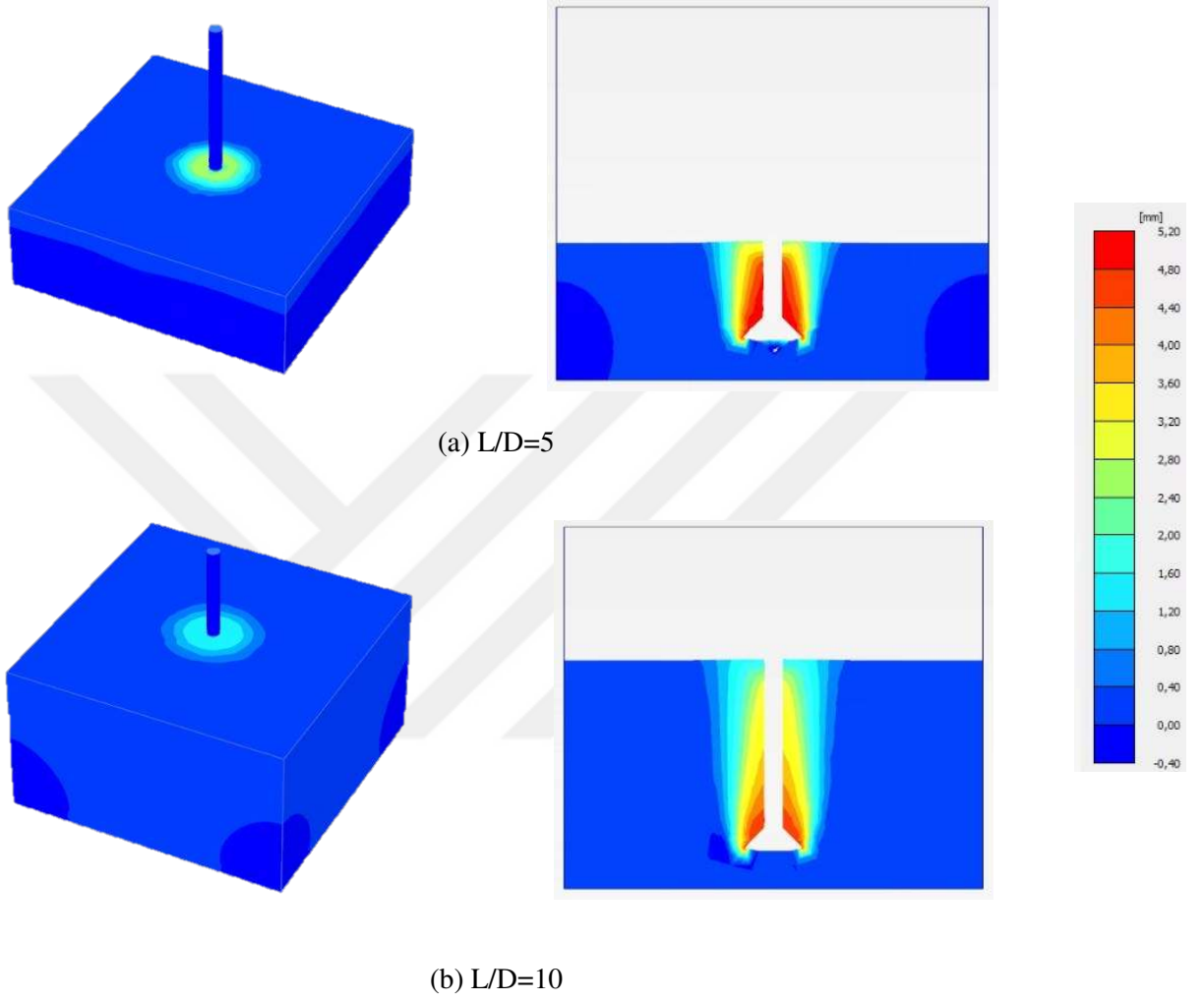
Kazık yüzeyinin, kum zemine gömülü tekil kazığın çekme kapasitesine etkisini araştırmak için farklı gömülme derinliklerinde analizler $L/D=5, 10$ ve 15 oranlarındaki çelik kazıkların düz ve çan başlıklı olması durumu ve ayrıca donatılı konfigürasyonda gerçekleştirilmiştir.

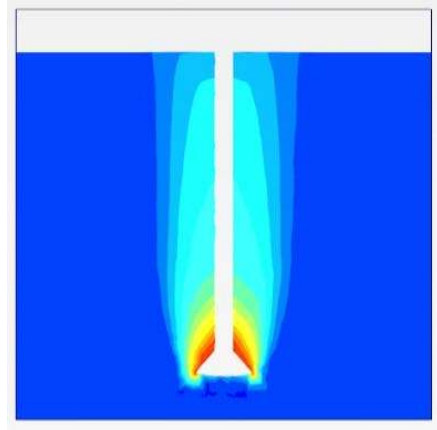
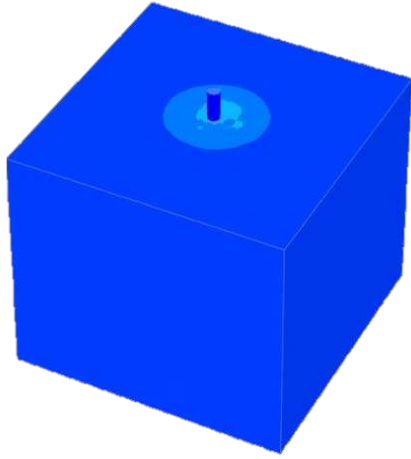
Kazık Gömülme Oranı (L/D)

Farklı gömülme oranlarında (L/D) kazık gömülü uzunluğunun artması çekme kapasitesinin benzer miktarda artmasına neden olmuştur. $L/D=5, L/D=10$ ve $L/D=15$ arasında çekme yükü değerinde arttığı belirlenmiştir.

Analiz sonuçları, gömülme oranının artmasıyla birlikte kazıkların çekme kapasitelerinin belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymuştur. Gömülme derinliği arttığında, kazık boyunca çevresinde yer alan zemin kütlesi daha rijit davranmakta ve çekme hareketine karşı daha büyük bir direnç göstermektedir (El Sawwaf ve Nazir, 2006). Diğer bir ifadeyle, kazığın etkilediği zemin hacminin büyümesi, çekme kapasitesinde artışa yol açmaktadır. Ayrıca, gömülme oranı kazığın göçme mekanizmasını da etkilemektedir. Her iki durumda da, kazık boyunca gelişen göçme mekanizmalarının benzerlik gösterdiği ve literatürde tanımlanan çekme göçmesi davranışı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 4.13’de, sıkı kum zemin içerisinde çan başlı kazığın gömülme

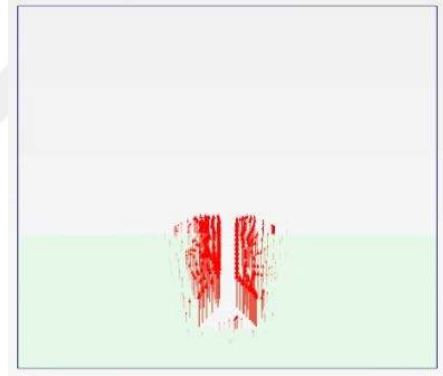
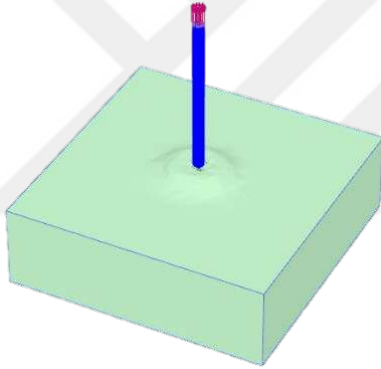
oranı (L/D) etkisi sunulmaktadır. L/D oranının artmasıyla birlikte deplasmanların, literatürde de aktarıldığı üzere, derin temel koşullarını yansıttığı gözlemlenmektedir. Bu durumlar Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



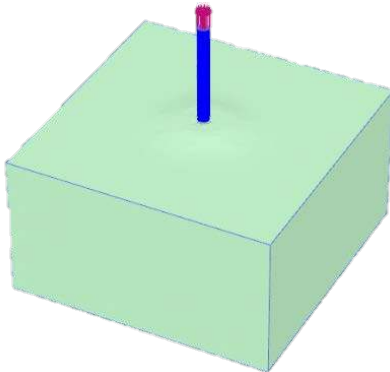


(c) $L/D=15$

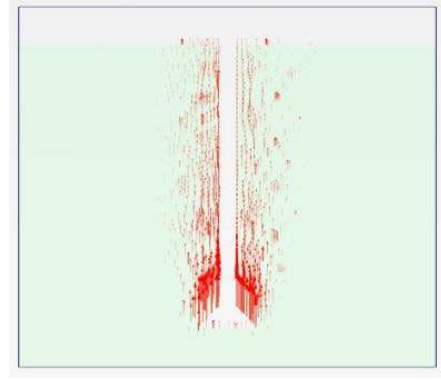
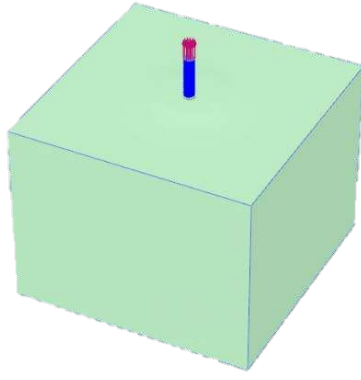
Şekil -4.13 Sıkı zemin çan başlı kazık gömülme oranı (L/D) etkisi



(a) $L/D=5$



(b) $L/D=10$

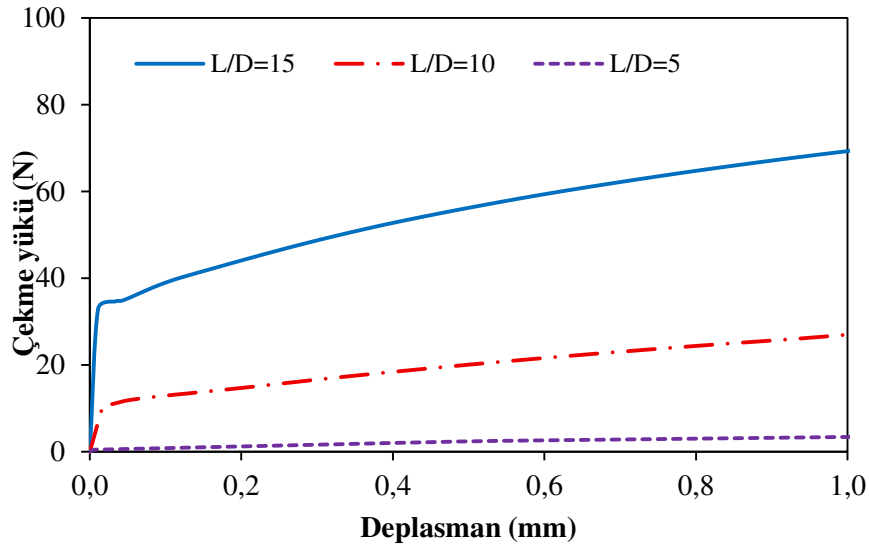


(c) $L/D=15$

Şekil -4.14 Sıkı zemin çan başlı kazıkta gömülme oranının (L/D) deplasman dağılımına etkisi

4.6.2.1 Düz Kazık Üzerinde Sıkı Kum Zeminde Yapılan Nümerik Analizler

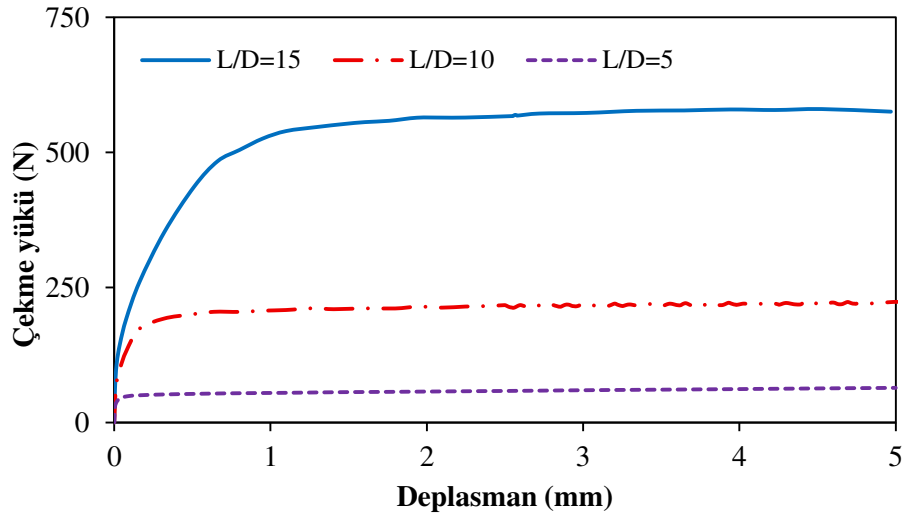
Düz kazık üzerinde sıkı kum zeminde gerçekleştirilen nümerik analizlerde, kazık gömülme oranı $L/D=5$, $L/D=10$ ve $L/D=15$ olarak seçilmiş ve bu farklı gömülme oranlarına ait çözüm sonuçları aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



Şekil 4.15. Düz kazık sıkı kum zemin üzerinde yapılan nümerik analizler ($L/D=5$, $L/D=10$ ve $L/D=15$, $D_r=70\%$)

4.6.2.2 Çan Başlı Kazık Üzerinde Sıkı Zeminde Yapılan Nümerik Analizler

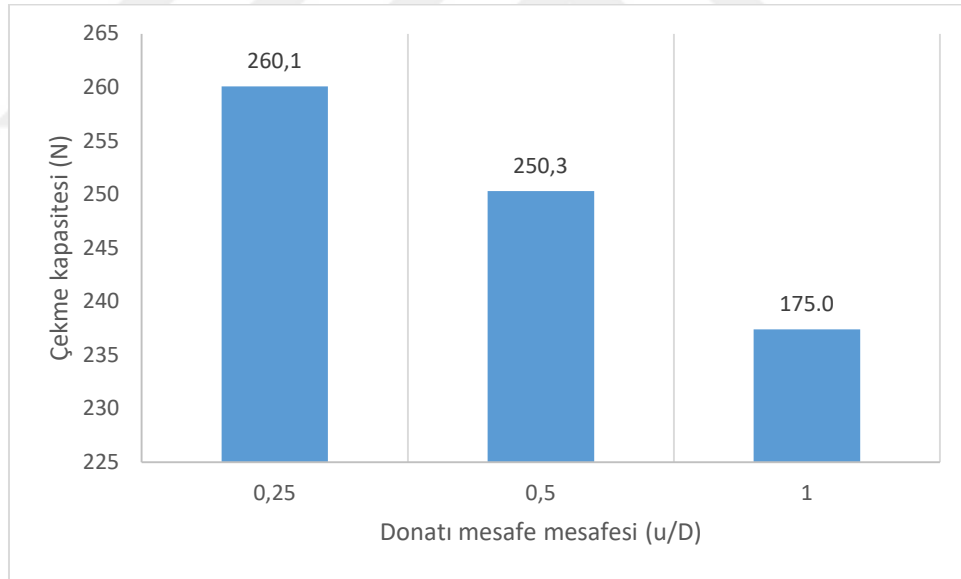
Çan başlı kazık üzerinde sıkı kum zeminde gerçekleştirilen nümerik analizlerde, kazık gömülme oranı $L/D=5$, $L/D=10$ ve $L/D=15$ olarak seçilmiş ve bu farklı gömülme oranlarına ait çözüm sonuçları aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



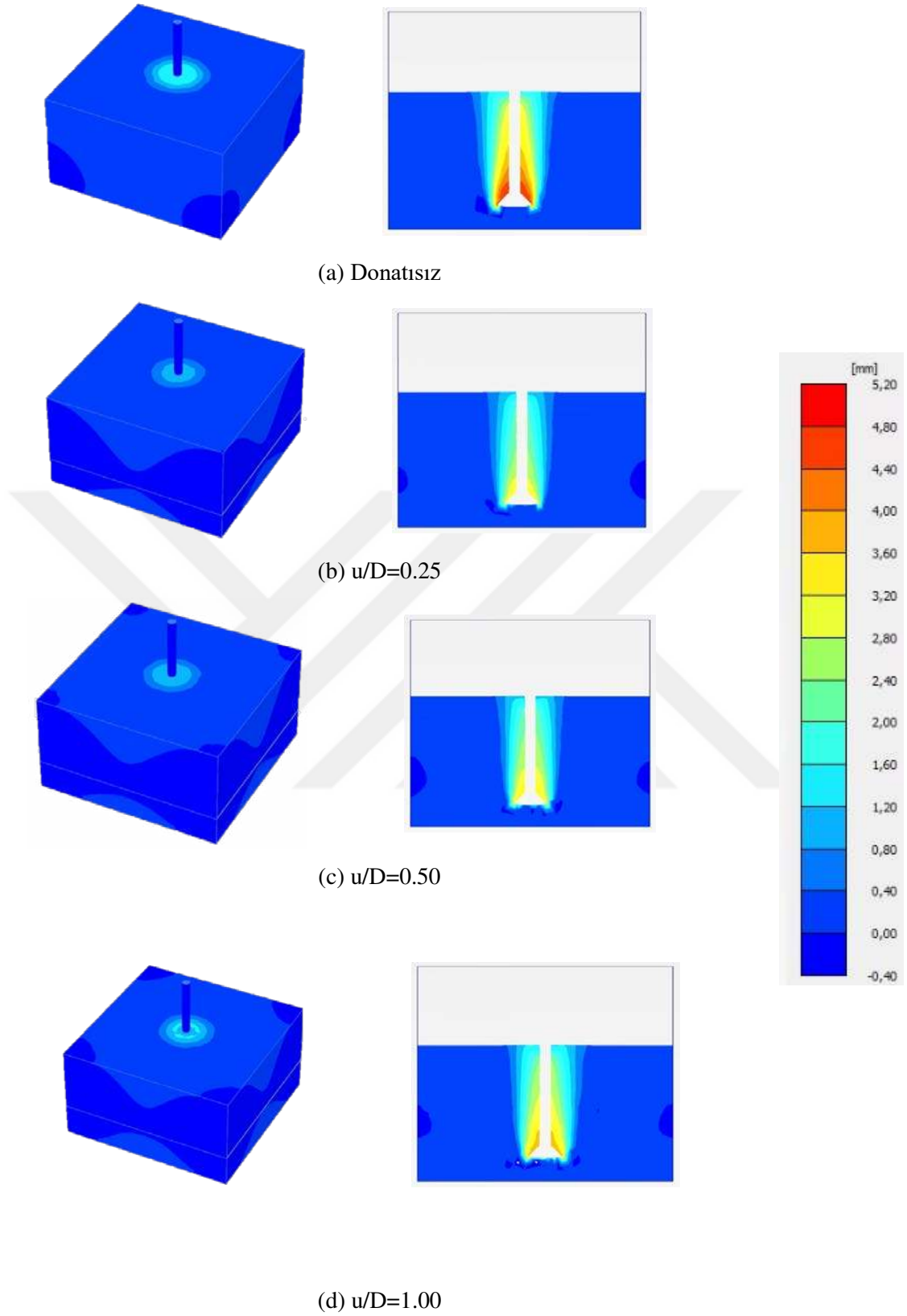
Şekil 4.16. Çan başlı kazık sıkı kum zemin üzerinde yapılan nümerik analizler ($L/D=5$, $L/D=10$ ve $L/D=15$, $Dr=\%70$)

4.6.2.3 Geogrid İle Güçlendirilmiş Sıkı Kum Zeminde Çan Başlı Kazığın Nümerik Analizleri

Sıkı zemin koşullarında $L/D=10$ oranında analizler yapılmıştır. Çekme yükü ve deplasman değişimleri sırası ile Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’ de farklı u/D oranlarında sunulmuştur.



Şekil 4.17. Çan başlı kazığın geogrid ile güçlendirilmiş sıkı kum zeminde yapılan çekme yükü nümerik analizleri ($L/D=10$, $u/D=0.25$, $u/D=0.50$, $u/D=1.00$, $Dr=\%70$)



Şekil 4.18 . Çan başlı kazığın geogrid ile güçlendirilmiş sıkı kum zeminde yapılan deplasman nümerik analizleri ($L/D=10$, $u/D=0.25$, $u/D=0.50$, $u/D=1.00$, $Dr=\%70$)



5. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. Genel

Bu bölümde, gevşek ve sıkı kum zemin koşullarında düz tekil kazık, çan başlı kazık ve geogrid donatılı kazıklar üzerinde yürütülen deneysel çalışmalar ile sıkı kum zeminde gerçekleştirilen nümerik analizlerin sonuçları karşılaştırılmış; elde edilen çekme yükü değerleri değerlendirilmiştir.

Öncelikle, gevşek ve sıkı kum zeminlerde gömülü düz tekil kazıklar üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular, çekme yükü–deplasman eğrileri ile ortaya konulmuştur. Ardından, çan başlı tekil kazıkların gevşek ve sıkı zeminlerdeki deneysel çekme yükü değerleri değerlendirilmiştir.

Daha sonra, çan başlı tekil kazıklarda gömülme oranının gevşek, sıkı ve geogrid ile donatılmış zemin koşullarındaki etkisi karşılaştırılmıştır. Takiben, Plaxis 3D programı kullanılarak sıkı kum zeminde düz kazık, çan başlı kazık ve geogridle güçlendirilmiş çan başlı kazıklar için yapılan analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Son aşamada ise sıkı kum zemin koşullarında çan başlı kazık için optimum donatı etki mesafesi (u/D) belirlenmiştir. Deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen bulgular, toplam çekme yükü esas alınarak karşılaştırılmıştır.

5.2. Gevşek ve Sıkı Kumda Düz Kazık Çekme Yükü Kapasitesi

Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te, gevşek ve sıkı kum zeminlere gömülü düz tekil kazık deneylerinden elde edilen veriler, çekme yükü–deplasman eğrileri aracılığıyla gösterilmiştir. Burada, kazık gömülme oranı (L/D) 5, 10 ve 15 olarak seçilmiştir. Her bir L/D için çekme yükü deplasman ilişkisi elde edilmiştir. Grafiklerden çekme yükü deplasman ilişkisi doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Çekme kapasitesi L/D oranı arttıkça çekme yükünün (kapasite) dikkate değer bir oranda arttığı anlaşılmaktadır. Başlangıçta çekme kapasitesi hızlı artmakta doğrusal davranış göstermektedir.

Gevşek kum zemin koşullarında, yaklaşık 0.50mm deplasman değerinde maksimum bir değere ulaşmakta izleyen deplasman değerleri için bir miktar sabit kalıp sonrasında düşmektedir. $L/D=5$ için çekme yükü 3N, $L/D=10$ için çekme yükü 10N ve $L/D=15$ için çekme yükü 17 N olarak elde edilmiştir. Bu durumda gevşek kum zeminde L/D 'nin 2 kat arttırılması ile (5 den 10'a) düz kazık çekme kapasitesi 3.3 katı artmıştır.

Sıkı kum koşullarında, yaklaşık 0.50mm deplasman değerinde maksimum bir değere ulaşmakta izleyen deplasman değerleri için bir miktar sabit kalıp sonrasında düşmektedir. $L/D=5$ için çekme yükü 4N, $L/D=10$ için çekme yükü 23N ve $L/D=15$ için çekme yükü 57 N olarak elde edilmiştir. Bu durumda sıkı kum zeminde L/D 'nin 2 kat arttırılması ile (5 den 10'a) düz kazık çekme kapasitesi 5.8 katı artmıştır.

5.3. Gevşek ve Sıkı Kumda Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi

Gevşek ve sıkı kum zemine gömülü çan başlı tekil kazıkta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de çekme yükü-deplasman ilişkisini gösteren şekiller ile sunulmuştur. Burada, kazık gömülme oranı (L/D) 5, 10 ve 15 olarak seçilmiştir. Her bir L/D için çekme yükü deplasman ilişkisi elde edilmiştir. Grafiklerden çekme yükü deplasman ilişkisi doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. çekme kapasitesi L/D oranı arttıkça çekme yükünün (kapasite) dikkate değer bir oranda arttığı anlaşılmaktadır. Başlangıçta çekme kapasitesi hızlı artmakta doğrusal davranış göstermektedir.

Gevşek zeminlerde çan başlıklı kazıklarla gerçekleştirilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, gömülme oranının $L/D = 5$ ’den $L/D = 10$ ’a çıkarılmasıyla nihai çekme kapasitesinde yaklaşık 4.2 katlık bir artış meydana geldiği, $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının 8.5 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ ’dan $L/D = 15$ ’e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artışın 2.0 kat ile sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

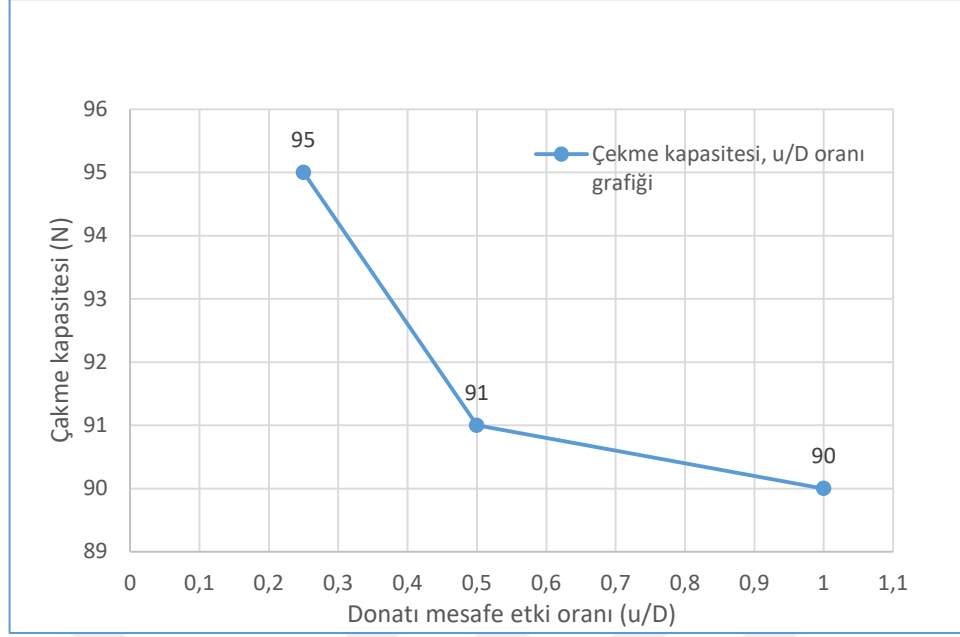
Sıkı kum koşullarında, çan başlıklı kazıklarla gömülme oranı $L/D=5$ için çekme yükü 45N, $L/D=10$ için çekme yükü 191N ve $L/D=15$ için çekme yükü 479 N olarak elde edilmiştir. Bu durumda sıkı kum zeminde L/D ’nin 2 kat artırılması ile (5 den 10’a) çan başlı kazık çekme kapasitesi 4.2 katı artmıştır. $L/D = 15$ değerinde ise bu artış oranının 10.6 kata ulaştığı belirlenmiştir. Öte yandan, gömülme oranının $L/D = 10$ ’dan $L/D = 15$ ’e yükseltilmesi durumunda nihai çekme kapasitesindeki artışın 2.5 kat ile sınırlı kaldığı görülmüştür.

5.4. Geogridli Gevşek Kumda Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesi

Geogridli gevşek kum zemine gömülü çan başlı tekil kazıkta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.1’de çekme yükü-deplasman ilişkisini gösteren şekilde sunulmuştur. Ayrıca, aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Gevşek Zeminde Çan Başlı Kazıklar İçin $L/D=10$, Geogridli Elde Edilen Deney Sonuçları

Deney Tipi	Gömülme Oranı (L/D)	Güçlendirme Derinliği (u/D)	Çekme Kapasites, Q_u (N)
Gevşek ($Dr=\%30$)	10	donatısız	89
		1,00	90
		0,50	91
		0,25	95



Şekil 5.1 Gevşek kumda çan başlı kazık deneysel çekme kapasiteleri ($D_r=30\%$, $L/D=10$), $u/D=0.25$, $u/D=0.50$ $u/D=1.00$)

Sonuç olarak u/D ile çekme yükü arasındaki ilişki non lineer olup optimum u/D değeri 0.25 mertebelerinde bulunmuştur.

5.5. Sıkı ve Gevşek Kumda Düz ve Çan Başlı Kazık Çekme Kapasitesinin Deneysel Karşılaştırması

Sıkı ve gevşek kum koşullarında düz ve çan başlı kazıklarda çekme kapasitesi değerleri yukarıda elde edilmiştir.

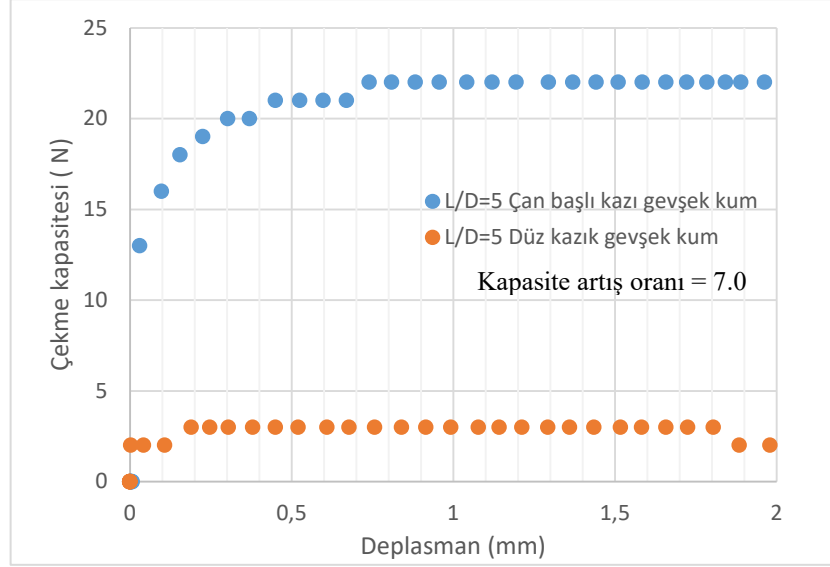
Buna göre; **gevşek kum** koşullarında,

Düz kazık için

- $L/D=5$ için çekme yükü 3N,
- $L/D=10$ için çekme yükü 10N ve
- $L/D=15$ için çekme yükü 17 N iken

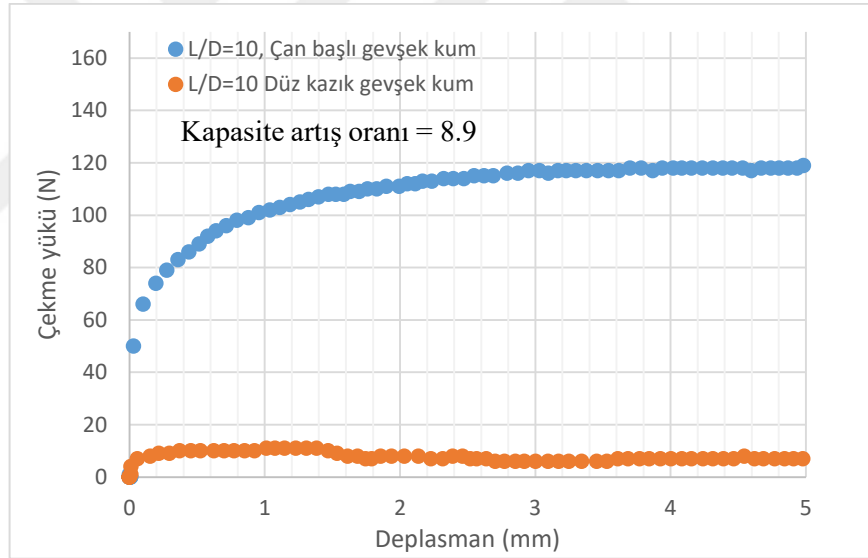
Çan başlı kazık için

- $L/D=5$ için çekme yükü 21N,
- $L/D=10$ için çekme yükü 89N ve
- $L/D=15$ için çekme yükü 178N olarak elde edilmiştir.



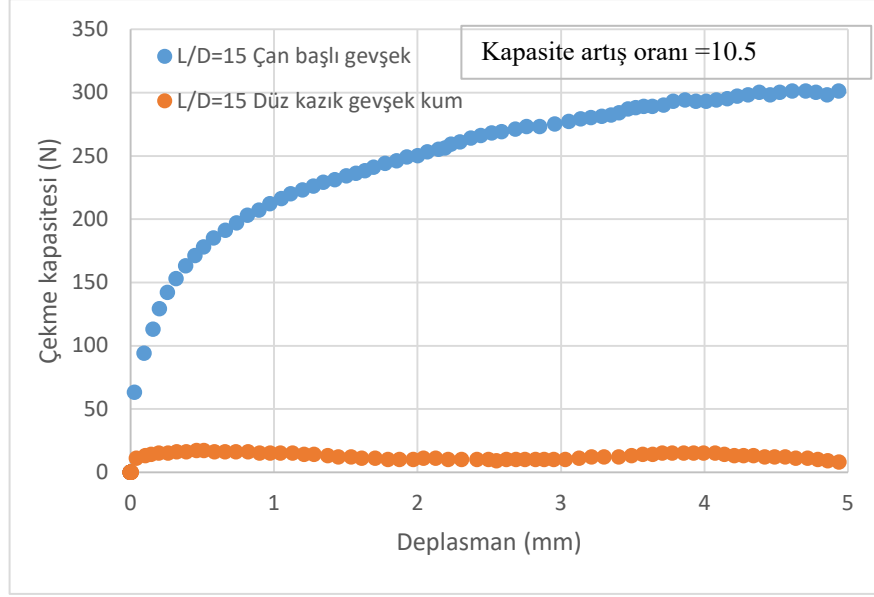
Şekil 5.2 Gevşek kumda, $L/D=5$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 7.0 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.3 Gevşek kumda, $L/D=10$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 8.9 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.4 Gevşek kumda, $L/D=15$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

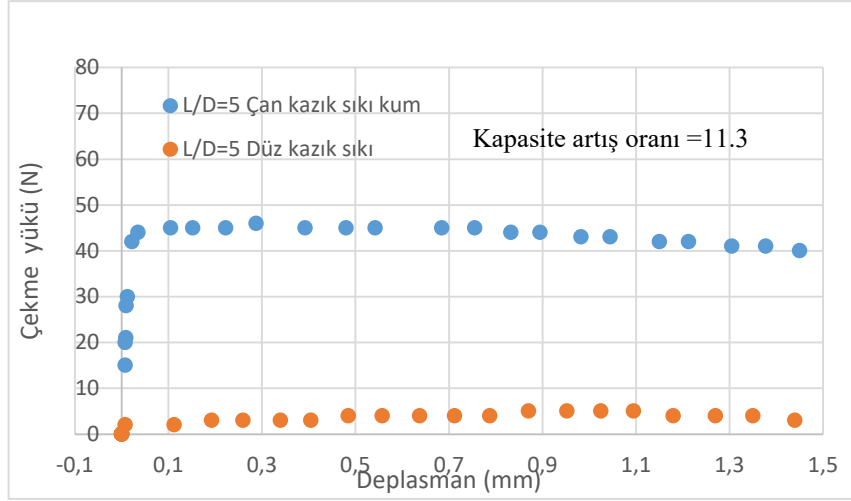
Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 10.5 olarak bulunmuştur. Buradan gevşek kum zemin için çan başlı kazık ile düz kazık çekme kapasiteleri karşılaştırıldığında, çan kazığının düz kazığa oranla sırasıyla yaklaşık 7, 8.9 ve 10.5 kat daha fazla kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Buna göre; **sıkı kum** koşullarında,

Düz kazık için

- $L/D=5$ için çekme yükü 4N,
- $L/D=10$ için çekme yükü 23N ve
- $L/D=15$ için çekme yükü 57N iken

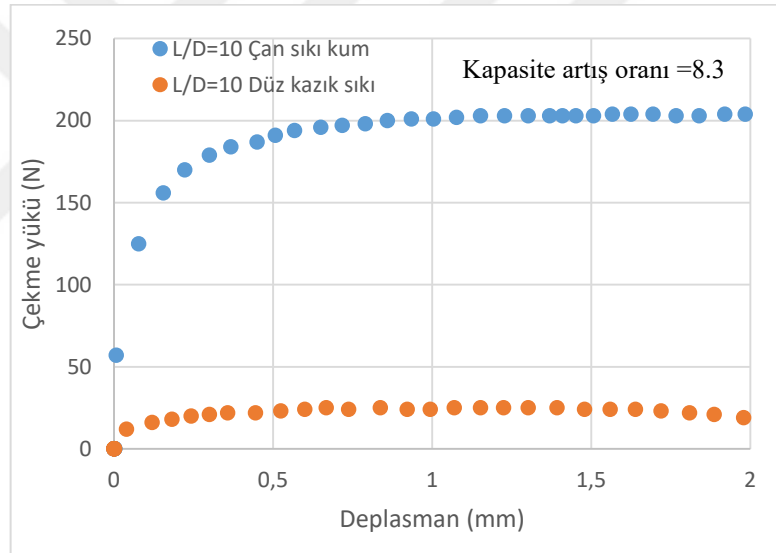
Çan başlı kazık için

- $L/D=5$ için çekme yükü 45N,
- $L/D=10$ için çekme yükü 191N ve
- $L/D=15$ için çekme yükü 479N olarak elde edilmiştir.



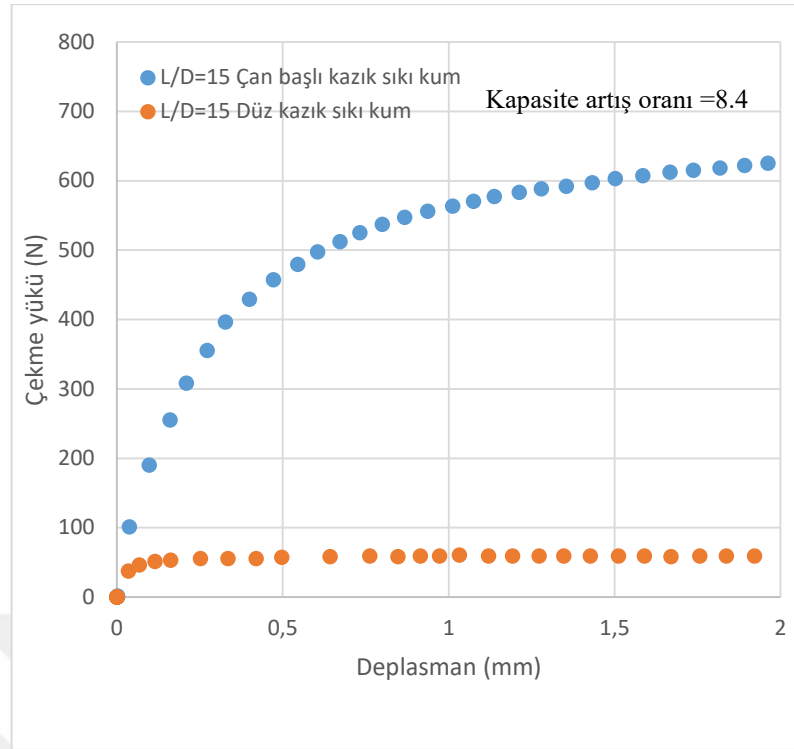
Şekil 5.5 Sıkı kumda, $L/D=5$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 11.3 olarak bulunmuştur



Şekil 5.6 Sıkı kumda, $L/D=10$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 8.3 olarak bulunmuştur



Şekil 5.7 Sıkı kumda, $L/D=15$ gömülme oranında düz başlı ve çan başlı kazık deneysel çekme kapasite karşılaştırılması

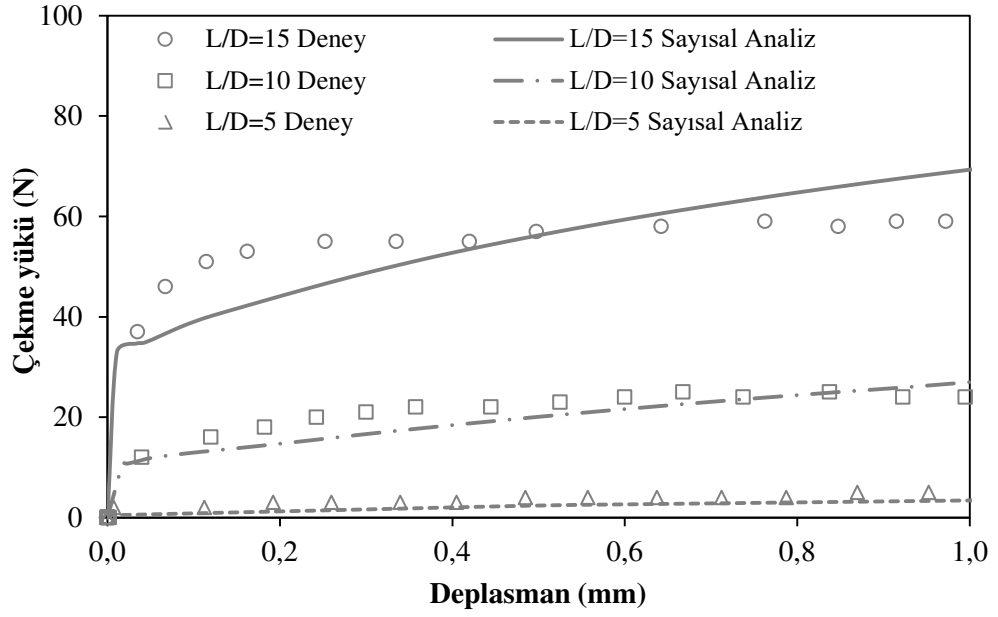
Deney sonuçlarına göre kapasite artış oranı 8.4 olarak bulunmuştur. Buradan sıkı kum zemin için çan başlı kazık ile düz kazık çekme kapasiteleri karşılaştırıldığında, çan kazığının düz kazığa oranla sırasıyla yaklaşık 11.3, 8.3 ve 8.4kat daha fazla kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, hem gevşek hem de sıkı kum koşullarında yapılan deneysel bulgular, çan başlı kazıkların düz kazıklara kıyasla L/D oranı arttıkça giderek daha belirgin bir çekme kapasitesi artışı sağladığını göstermektedir. Dolayısı ile bu üstün performans, düz kazığa göre, çan başlı kazığının geometrik formunun zeminle etkileşimini optimize ederek yük transferini etkin biçimde artırdığını ortaya koymaktadır.

5.6. Sıkı Kumda Düz ve Çan Başlı Kazıklarda Deney ve Nümerik Analiz Karşılaştırması

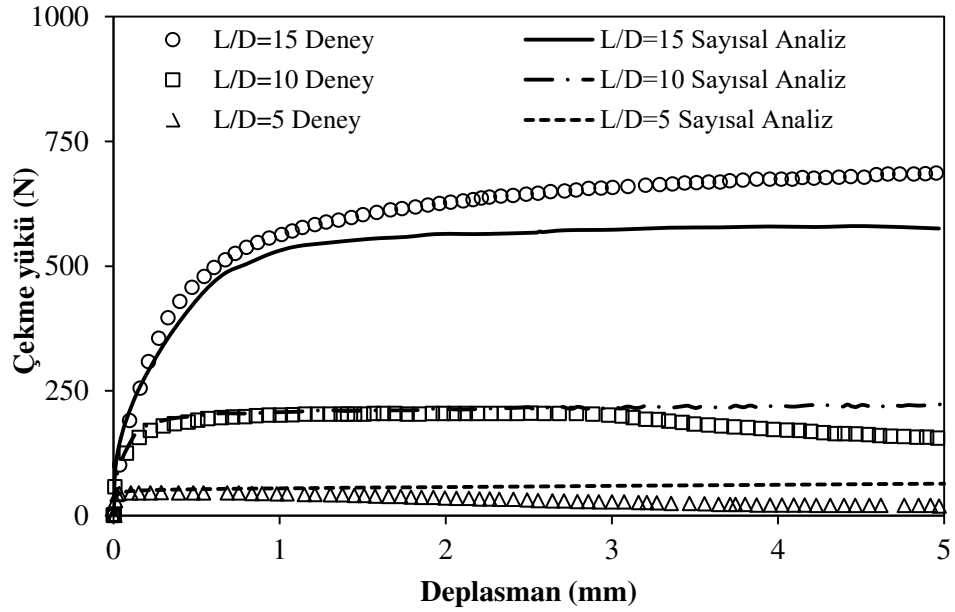
Sıkı kum zemine gömülü deney ve nümerik analizlerden elde edilen çekme yükü-deplasman değerleri, karşılaştırılmalı olarak, düz kazık ve çan başlı kazık için sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'de sunulmuştur.

Düz kazık için elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçları Şekil 5.8'de sunulmuş olup, grafiksel değerlendirme sonucunda değişkenler arasındaki ilişkinin genel olarak çok uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.8 Düz kazık, sıkı zemin koşulları deney ve nümerik analiz sonuçları, (Dr=%70)

Çan başlı kazık için elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçları Şekil 5.9'de sunulmuş olup, grafiksel değerlendirme sonucunda değişkenler arasındaki ilişkinin genel olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir.



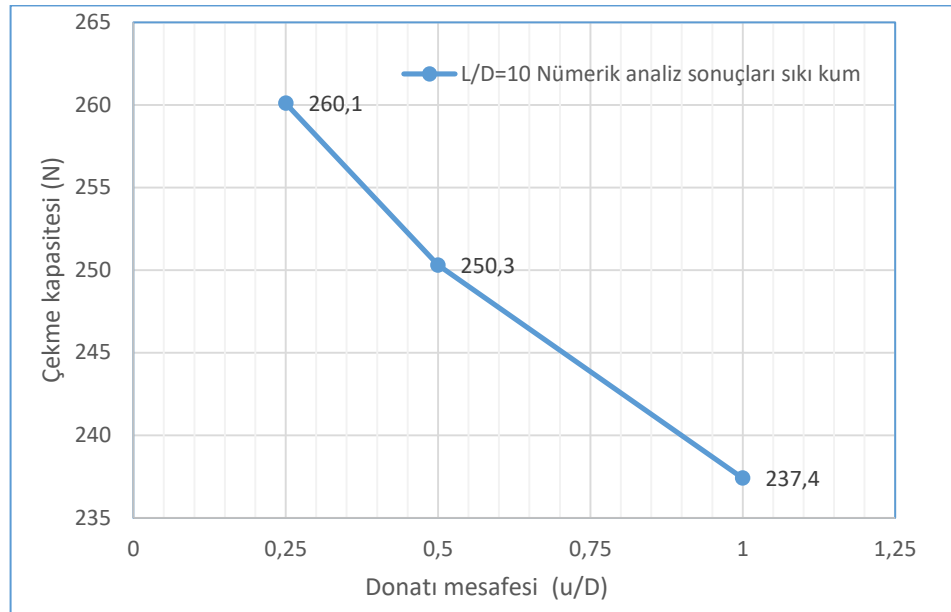
Şekil 5.9 Çan başlı kazık, sıkı zemin koşulları deney ve nümerik analiz sonuçları, (Dr=%70)

Geogrid donatılı çan başlı kazığın çekme kapasitesinin nümerik olarak belirlenmesine yönelik olarak, öncelikle deneysel bulgular ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen veriler arasındaki uyum düzeyi değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, çan

başlı kazık için en yüksek uyumun sıkı kum zemin koşullarında ve $L/D=10$ gömülme oranında sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle, geogrid donatılı kazıkların nümerik analizlerinin güvenilirliği ve temsil gücünün artırılması amacıyla, tüm analizler bu gömülme oranı temel alınarak yürütülmüştür.

Bu kapsamda gerçekleştirilen geogrid donatılı deneylerde, donatının çan başından farklı mesafelerde yerleştirilmesi sistematik biçimde incelenmiştir. Özellikle donatı mesafe etki katsayısı (u/D) oranlarının 0.25, 0.50 ve 1.00 değerlerinde uygulanmasıyla, donatı konumunun kazığın çekme kapasitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Böylece, geogrid donatının çan başına olan mesafesinin kazık davranışına etkisi hem deneysel hem de nümerik veriler ışığında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve optimum u/D oranı belirlenmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, u/D oranının 0.25 olması durumunda çan başlı kazık maksimum çekme kapasitesine ulaşmaktadır. Gevşek zemin koşullarında çan başlı kazık üzerinde $L/D=10$ gömülme derinliğinde yapılan geogrid donatılı laboratuvar deneyleri ile sıkı kum zemin $L/D=10$ gömülme derinliğinde yapılan nümerik analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde benzer bir eğilim gözlenmiştir. Donatısız deney sonuçları ile, donatının çan başından olan mesafesinin $u/D=0.50$ ve $u/D=1.00$ olarak alınması durumunda taşıma kapasitesi değerleri giderek azalarak apsis eksenine asimptot oluşturmaktadır. Buna karşılık, $u/D=0.25$ oranında maksimum kapasite elde edilmiştir (Şekil 5.10). Dolayısıyla, bu oran dikkate alındığında maksimum çekme kapasitesi $u/D=0.25$ için gerçekleşmekte olup, bu sonuç $(u/D)_{opt} = 0.25$ olarak önerilmiştir.



Şekil 5.10 Çan başlı kazığın geogrid donatılı sıkı kumda ve ($L/D=10$) gömülme derinliği nümerik analiz çekme kapasitesi sonuçlarının u/D oranına bağlı değişimi



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Genel

Bu çalışmada, düz ve çan başlı tekil kazıkların gevşek ve sıkı kum zeminlerde farklı gömülme oranlarındaki çekme kapasiteleri deneysel olarak incelenmiş; sıkı kum koşulları için nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çan başlı kazık için kum zemin içerisine yerleştirilen donatıların kazığın çekme kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Bu analizde geogrid donatının çan başlığa olan mesafelerine göre (u/D oranlarında), geogrid donatı etkisinde çekme kapasitesi deneysel olarak ve sıkı kum koşullarında, ayrıca nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda öncelikle düz ve çan başlı tekil kazıkların çekme kapasitesi ile ilgili laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Bu gruptaki deneylerde; sıklık, gömülme oranı (L/D), zemin sıklığının (D_r) çekme yüküne etkisi ve donatılı kum zeminin çekme kapasitesine olan katkıları araştırılmıştır.

Nümerik analiz çalışmasında, deneysel sonuçların doğru bir biçimde modellenenilmesi ve sıkı kum zemine gömülü düz ile çan başlı tekil kazıkların çekme yükü–deplasman davranışlarının parametrik olarak incelenenilmesi amacıyla, deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği, yükleme koşulları ve malzeme özellikleri sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 3D bilgisayar programında modellenmiştir. Analizlerde, kum zeminin davranışı Mohr–Coulomb malzeme modeli ile, kazık davranışı ise gömülü kiriş olarak tanımlanan “plate eleman” yapısal elemanı aracılığıyla temsil edilmiştir.

Çalışmada, sonlu elemanlar ağ sıklığının etkisinin ortadan kalktığı ve deneysel verilerle en yüksek uyumun sağlandığı ince (fine) ağ yoğunluğunda analizler yürütülmüştür. Elde edilen nümerik analiz sonuçları, deneysel bulgular ile karşılaştırılmış ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve nümerik analizler neticesinde elde edilen bulguların öne çıkanları, çalışmanın kapsamı ve amacı çerçevesinde aşağıda sunulmaktadır.

6.2. Sonuçlar

- Düz ve Çan başlı tekil kazık üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, kazık gömülme oranının (L/D) çekme kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bulgular, gömülme oranının artışıyla birlikte kazıkların çekme kapasitesinde anlamlı bir yükselme meydana geldiğini göstermektedir. Daha düşük gömülme oranlarında elde edilen çekme kapasitesi değerlerinin sınırlı kalması, kazık çevresinde mobilize olabilen sürtünme direncinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, gömülme oranının artmasıyla birlikte kazığın çevresindeki zemin hacmi daha geniş bir bölgede mobilize olmakta, zemin-kazık arayüzünde daha yüksek sürtünme gerilmeleri oluşmakta ve

sonuç olarak kazık, çekme yüküne karşı daha rijit ve dirençli bir davranış sergilemektedir.

- Tez kapsamında, kazık gömülme oranı (L/D) 5, 10 ve 15 olarak seçilmiştir. Her bir L/D için çekme yükü deplasman ilişkisi elde edilmiştir. Grafiklerden çekme yükü deplasman ilişkisi doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Çekme kapasitesi L/D oranı arttıkça çekme yükünün (kapasite) dikkate değer bir oranda arttığı anlaşılmaktadır. Başlangıçta çekme kapasitesi hızlı artmakta ve lineer davranış göstermektedir. Gevşek ve sıkı kum zeminde, yaklaşık 0.50mm deplasman değerinde maksimum bir değere ulaşmakta, izleyen deplasman değerleri için bir miktar sabit kalıp sonrasında düşmektedir. Gevşek kum zeminde L/D 'nin 2 kat artırılması ile düz kazık çekme kapasitesi minimum 3.3, sıkı kum zeminde minimum 5.8 kat artmıştır. Gevşek kum zeminde L/D 'nin 2 kat artırılması ile çan başlı kazık çekme kapasitesi 4.2, sıkı kum zeminde de aynı oranda 4.2 kat artmıştır.
- Düz tekil kazık ve çan başlı tekil kazık üzerinde gerçekleştirilen deneyler, kum zeminin sıklık derecesinin kazıkların çekme kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, sıklık derecesinin artmasıyla birlikte çekme kapasitesi değerlerinde belirgin bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen yük–deplasman eğrileri, literatürde raporlanan gevşek ve sıkı kum zeminlerin göçme davranışlarını doğrular niteliktedir. Buna göre, gevşek kum zeminlerde daha düşük taşıma kapasitesi ve daha yüksek deplasman değerleri gözlemlenirken, sıkı kum zeminlerde daha yüksek çekme kapasitesi ve daha rijit bir davranış karakteristiği elde edilmiştir.
- Deneysel ve nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucunda, araştırma kapsamında incelenen geogrid donatılı çan başlı kazık davranışına ilişkin en uygun korelasyonun, özellikle çan başlı kazığın sıkı kum koşullarında elde edilebildiği belirlenmiştir. Deneysel bulgular ve nümerik analizlerin sonucunda, kazık çan başından $u/D = 0.25$ mesafesinde yerleştirilen geogridli konfigürasyonda, kazığın çekme davranışı üzerinde en etkin katkıyı sağladığı ve bu konfigürasyonda maksimum çekme kapasitesine ulaşıldığı ortaya konulmuştur. Laboratuvar deneylerinde gevşek kum koşullarında kazık gömülme oranı (L/D) 10'da geogrid donatı çan başından $u/D=0.25$ mesafesine konması durumunda çekme yükü (kapasitesi) 95N, $u/D=0.50$ mesafesinde 91N oranlarında, $u/D=1.00$ mesafesinde 90N belirlenmiştir. Sonuç olarak u/D ile çekme yükü arasındaki ilişki non lineer olup optimum u/D değeri 0.25 mertebelerinde bulunmuştur.

- Sıkı ve gevşek kum koşullarında düz ve çan başlı kazıklarda çekme kapasiteleri karşılaştırıldığında, çan başlı kazığın düz kazığa oranla gevşek kum zeminde sırasıyla, $L/D=5$, 10 ve 15 için yaklaşık 7.0, 8.9 ve 10.5 kat daha fazla kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Çan kazığın düz kazığa oranla sıkı kum zeminde sırasıyla, $L/D=5$, 10 ve 15 için yaklaşık 11.3, 8.3 ve 8.4 kat daha fazla kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, hem gevşek hem de sıkı kum koşullarında yapılan deneysel bulgular, çan başlı kazıkların düz kazıklara kıyasla L/D oranı arttıkça giderek daha belirgin bir çekme kapasitesi artışı sağladığını göstermektedir. Dolayısı ile bu üstün performans, düz kazığa göre, çan başlı kazığın geometrik formunun zeminle etkileşimini optimize ederek yük transferini etkin biçimde artırdığını ortaya koymaktadır.
- Sıkı kum zemine gömülü düz tekil kazık ve çan başlı kazık çekme kapasitelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik çözümünden elde edilen sonuçlarla deneysel bulgular arasında iyi bir uyum söz konusudur. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, çan başlı kazık için en yüksek uyumun sıkı kum zemin koşullarında ve $L/D=10$ gömülme oranında sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle, geogrid donatılı kazıkların nümerik analizlerinin güvenilirliği ve temsil gücünün artırılması amacıyla, tüm analizler bu gömülme oranı temel alınarak yürütülmüştür. Bu kapsamda gerçekleştirilen geogrid donatılı deneylerde, donatının çan başından farklı mesafelerde yerleştirilmesi sistematik olarak incelenmiş; özellikle u/D oranlarının 0.25, 0.50 ve 1.00 değerlerinde uygulanmasıyla, donatı konumunun kazığın çekme kapasitesine olan etkisi ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Böylece, geogrid donatının çan başından olan mesafesinin kazık davranışı üzerindeki etkisi hem nümerik hem de deneysel veriler ışığında kapsamlı olarak değerlendirilerek u/D optimum değeri belirlenmiştir. Buna göre, u/D oranının 0.25 olması durumunda çan başlı kazıkta maksimum çekme kapasitesine ulaşılmaktadır. Ancak, u/D oranının 0.25'in üzerine çıkmasıyla birlikte çekme kapasitesinde belirgin bir azalma gözlenmekte; bu azalma özellikle 0.50 seviyesine kadar hızlı bir şekilde gerçekleşmekte, 0.50 değerinden sonra ise azalma eğiliminin daha yatay bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu maksimum çekme kapasitesinin elde edildiği geogrid yerleştirme mesafesi, optimum değer olarak kabul edilebilir ($u/D_{opt}=0.25$).

6.3. Öneriler

- Bu çalışmada yapılan deneyler küçük ölçekli olup elde edilen çekme yükü değerlerinde ölçek etkisi incelenmemiştir. Problem, büyük ölçekli laboratuvar veya arazi deneyleri yapılarak araştırılıp ölçek etkisi incelenebilir.
- Nümerik analizlerde sıkı kum zeminler için yapılan çalışmaların gevşek kum durumunda da yapılması önerilmektedir.
- Kil zemin durumu için benzer deneysel ve nümerik çalışmalar yapılabilir.
- Farklı kazık geometrileri ve çan konfigürasyonları için de Plaxis 3D programı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Alawneh, A. S., Malkawi, A. I. H., and Al-Deeky, H., 1999. Tension Tests on Smooth and Rough Model Piles in Dry Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4):746-753.
- Al-Mhaidib, A. I., 2006. Influence of Shearing Rate on Interfacial Friction between Sand and Steel. *Engineering Journal of the University of Qatar*, 19:1-16.
- ASTM D2487-11, 2011. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4253-16, 2016. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4254-16, 2016. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Balla, A. (1961). The resistance to breaking out of mushroom foundations for pylons. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris (Vol. 1, pp. 569–576).
- Emirler, B. (2019). Kum zemine gömülü tekil kazık ve kazık gruplarının çekme yükü (uplift) etkisindeki davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Adana.
- Bose, K. K., and Krishnan, A., 2009. Pullout Capacity of Model Piles in Sand. *Indian Geotechnical Society Chennai Chapter, Student Competition Paper*, 49-54.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., and Engin, H. K., 2010. Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands. *7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Norway, 137-142.
- Brown, D. A., and Shie, C. F., 1990. Three Dimensional Finite Element Model of Laterally Loaded Piles. *Computers and Geotechnics*, 10(1):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.
- Chattopadhyay, B. C., and Pise, P. J., 1986. Uplift Capacity of Piles in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(9):888-904.
- Chattopadhyay, B. C., 1994. Uplift Capacity of Pile Groups. *13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5-10 January, New Delhi, India, 539-542.
- Chaudhuri, K. P. R., and Symons, M. V., 1983. Uplift Resistance of Model Single Piles. *Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering*, 27-29 April, Texas, USA, 335-355.
- Das, B. M., Seeley, G. R., and Smith, J. E., 1976. Uplift Capacity of Group Piles in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 102(3):282-286.

- Das, B. M., Seeley, G. R., and Pfeifle, T. W., 1977. Pullout Resistance of Rough Rigid Piles in Granular Soil. *Soils and Foundations*, 17(3):72-77.
- Das, B. M., 1983. A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles. *Soils and Foundations*, 23(3):122-126.
- Das, B. M., H., Model Tests for Uplift Capacity of Foundation in Clay. *Soils and Foundation Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 18, No. 2, June 1978, pp. 17-24.
- Dash, B. K., and Pise, P. J., 2003. Effect of Compressive Load on Uplift Capacity of Model Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11):987-992.
- Das, M. B., "Shallow Foundation, Bearing Capacity and Settlement", 1999, USA.
- Davie, J.R., Sutherland, H.B., "Uplift Resistance of Cohesive Soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* Vol. 103 No. GT9 September 1977, pp. 935-952.
- Demir, A. (2006). Temel mühendisliğinde çekme dayanımının irdelenmesi ve kazıklı temellerin çekme dayanımının analizi (Yüksek lisans tezi)
- Dickin, E. A. (1988). Uplift Behaviour of Horizontal Anchor Plates in Sand. *Géotechnique*, 38(1), 61–74.
- Dickin, E.A., LEUNG, C.F., "Performance of Piles with Enlarged Bases Subject to Uplift Forces", *Canadian Geotechnical*, Vol. 27 ,1990, pp. 546-556.
- El Sawwaf, M., and Nazir, A., 2006. The Effect of Soil Reinforcement on Pullout Resistance of an Existing Vertical Anchor Plate in Sand. *Computers and Geotechnics*, 33(3):167-176.
- Emirler, B. 2013. Grup Ankrajların Çekme Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 125s.
- Emirler, B. (2019). Grup ankrajların çekme davranışının incelenmesi [Investigation of uplift behavior of group anchors]. PhD Thesis, Çukurova University, Institute of Science, Department of Civil Engineering. (Approved, 144 pages.)
- Faizi, K., Armaghani, D. J., Sohaei, H., Rashid, A. S. A., and Nazir, R., 2015. Deformation Model of Sand around Short Piles under Pullout Test. *Measurement*, 63:110-119.
- Faizi, K., Rashid, A. S. A., Armaghani, D. J., Nazir, R., and Momeni, E., 2017. The Influence of Bituminous Coating on Uplift Resistance of Short Pile Foundations in Sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(3):177-182.
- Gaaver, K. E., 2013. Uplift Capacity of Single Piles and Pile Groups Embedded in Cohesionless Soil. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3):365-372.
- Ilamparuthi, K., and Dickin, E. A. (2001). "Uplift behaviour of model piles in sand." *Ground Engineering*, 34(2), 30–34
- Karahan, M., 2007. İki Kademeli Teleskopik Vincin Tasarım ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 99s.

- Keskin, M. S. (2009). Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana. Tahmini sayfa sayısı: 368.
- Krishnaswamy, N. Parashar, S.P., “Uplift Behaviour of Plate Anchors with Geosynthetics”, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 13, 1994, pp. 67-89.
- Johnson, V. W. ve ark. (2006). “Finite element analysis of pile behavior under uplift and lateral loading
- Laman, M. (1995). The Moment Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Clay. PhD Tezi, University of Liverpool.
- Laman, M., King, G. J. W., & Dickin, E. A. (1999). *Three-dimensional finite element studies of the moment-carrying capacity of short pier foundations in cohesionless soil. Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), 1085–1096.
- Meyerhof, G. G., & Adams, J. I. (1968). The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(4), 225–244.
- Murray, E.J. and, Geddes, J.D., “Uplift of Anchor Plates in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, March, 1987, pp. 202-215.
- PLAXIS, 2015. Material Models Manual. (Edited by Brinkgreve, R. B. J., Kumaraswamy, S., and Swolfs, W. M.), Delft University of Technology & Plaxis bv, Netherlands, 216p.
- PLAXIS, 2016. PLAXIS 3D AE.02. Plaxis bv, Delft, Netherlands.
- Saedy, Y. B. (1965). Resistance to uplift of anchor plates in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 91(SM1), 1–25.
- Shanker, K., Basudhar, P. K., & Patra, C. R. (2007). Uplift Capacity of Single Piles: Predictions and Performance. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 7(4), 307–313.
- Sture, S., 2004. Finite Element Method in Geotechnical Engineering. Short Course on Computational Geotechnics + Dynamics, 5-8 January, Colorado, USA.
- Trochanis, A. M., Bielak, J., and Christiano, P., 1991. Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(3):429-447.
- Troutman, J. E. (1985). *Uplift capacity of piles in sand*. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111(1), 19–36. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:1(19))
- Özaydın, İ. K. (2005). *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Uncuoğlu, E., 2009. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıkların Yatay Yük ve Moment Etkisi Altındaki Davranışlarının Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 277s.
- Vesic, A. S. (1971). Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97(SM9), 1183–1205.
- Wakai, A., Gose, S., & Ugai, K. (1999). *3D elasto-plastic finite element analyses of pile foundations subjected to lateral loading*. *Soils and Foundations*, 39(1), 97–111.

Zienkiewicz, O. C., and Cheung, Y. K., (1964). The Finite Element Method for Analysis of Elastic Isotropic and Orthotropic Slabs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 28(4):471-488.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ARSLAN, 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Yüksek Lisansını 2001 yılında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı'nda tamamladı. 1989 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü TAKK Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nde Araştırma Mühendisi olarak göreve başladı ve 1993-1997 yılları arasında Zemin Mekaniği Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nde görev aldı. 2008-2015 yılları arasında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yapı Malzemeleri ve Zemin Mekaniği Laboratuvar Sorumlusu olarak çalıştı. 2015 yılından itibaren kendi firmasında yurt içi ve yurt dışı projelerinde Geoteknik Mühendisliği alanında projelendirme ve uygulama konularında profesyonel olarak hizmet vermektedir. Geoteknik Mühendisliği alanında çok sayıda yayını bulunmaktadır. Evli ve 2 çocuk babasıdır.