

Yakup TÜREDİ



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOKTORA
TEZİ**

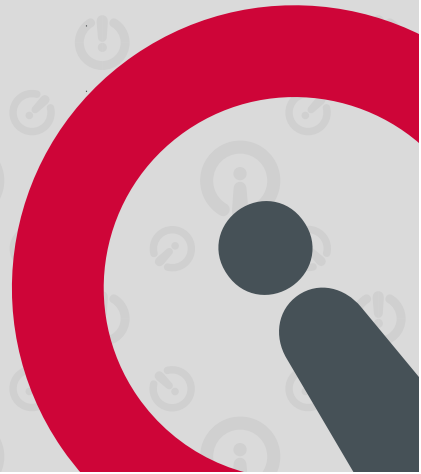
**BASINÇ YÜKÜNE MARUZ
HELİSEL KAZIK DAVRANIŞININ
LABORATUVAR VE ARAZİ
DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Yakup TÜREDİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

EYLÜL 2021

EYLÜL 2021





**BASINÇ YÜKÜNE MARUZ HELİSEL KAZIK DAVRANIŞININ
LABORATUVAR VE ARAZİ DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Yakup TÜREDİ

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

Yakup TÜREDİ tarafından hazırlanan “BASINÇ YÜKÜNE MARUZ HELİSEL KAZIK DAVRANIŞININ LABORATUVAR VE ARAZİ DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat ÖRNEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Prof. Dr. Murat OLGUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Erdal UNCUOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇALIŞICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 30 / 09 / 2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Yükseköğretim Kuruluna gönderilen kopya ile tarafımdan Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'ne verilen basılı ve/veya elektronik kopyaların birebir aynı olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,

Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yakup TÜREDİ

30 / 09 / 2021

BASINÇ YÜKÜNE MARUZ HELİSEL KAZIK DAVRANIŞININ LABORATUVAR VE
ARAZİ DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)

Yakup TÜREDİ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Helisel kazıklar, tork uygulanarak zemine yerleştirilen, basınç-çekme yükü gibi çeşitli yükleri karşılayabilen, birçok uygulama alanında (açık deniz, enerji yapıları, endüstri yapıları vb.) kullanımları giderek artan, diğer geleneksel kazıklara karşı da önemli bir alternatif olan çelik temel sistemleridir. Bu tez çalışmasında helisel kazıkların aksel basınç altındaki davranışı laboratuvar model deneyleri ve büyük ölçekli arazi deneyleri ile araştırılmıştır. Kum zeminin kullanıldığı deneylerde, zemin sıkılığı (D_r), helisel plaka çapı (D), helisel plaka sayısı (N), helisel plakalar arası mesafe (s) gibi farklı değişkenlerin etkisi irdelenmiştir. Deneylerde helisel kazıkların zemin içerisine kurulumu sırasında uygulanan tork değerleri de takip edilerek kurulum torku seçiminin etkisi yorumlanmıştır. Deneysel sonuçlar literatürde sunulan teorik yöntemlerle karşılaştırılmış ve aynı zamanda iki / üç boyutlu ortamlarda sonlu elemanlar yöntemini esas alan yazılımlarla örselenme etkisinin de dikkate alındığı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda helis çapının yaklaşık iki katı (2D) olan bir bölgenin örselendiği belirlenmiştir. Farklı kurulum torku seçiminin, kurulum torku-nihai yük ilişkisinden elde edilen sonuçları etkilediği görülmüştür. İlave bir helis eklenmesi ile nihai kapasitede yaklaşık %30'a varan bir artış tespit edilmiştir. Bu veriler eşliğinde geoteknik mühendisliğinde helisel kazıkların tasarımı ile ilgili çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Helisel kazık, aksel basınç, tork, kum, laboratuvar model deney, arazi deneyi, sayısal analiz

Sayfa Adedi: 170

Danışman: Prof. Dr. Murat ÖRNEK

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF HELICAL PILE SUBJECTED TO
COMPRESSIVE LOADINGS WITH LABORATORY AND FIELD TESTS
(Ph. D. Thesis)

Yakup TÜREDİ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

September 2021

ABSTRACT

Helical piles are steel made foundation systems that are placed on the soil by applying torque, can meet various loads such as compression and tensile, are increasingly used in many application areas (offshore, energy structures, industrial structures, etc.) and are also an important alternative to other traditional piles. In this thesis, the behavior of helical piles under axial compression was investigated by laboratory model tests and large-scale field tests. In the tests using sand soil, the effect of different variables such as soil density (D_r), helical plate diameter (D), helical plate number (N), distance between helical plates (s) were examined. In the tests, the torque values applied during the installation of the helical piles into the soil were also evaluated and the effect of the installation torque selection was interpreted. Test results were compared with the theoretical methods in the literature, and also numerically analyzed using finite element method-based software in two- and three-dimensional environments including the disturbance effect. In the tests, the disturbed zone was observed as two times the helix diameter ($2D$), approximately. An increase in final capacity of up to 30% was achieved with the addition of an extra helix. In the light of these data, various suggestions have been made regarding the design of helical piles in geotechnical engineering.

Keywords: Helical pile, axial compression, torque, sand, laboratory model test, field test, numerical analysis

Page Number: 170

Supervisor: Prof. Dr. Murat ÖRNEK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında bilgi ve tecrübelerini her daim paylaşan, beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat ÖRNEK'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması sırasında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve İskenderun Teknik Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

TÜBİTAK Araştırma projesi ekibinde yer alan başta görüşlerine değer verdiğim Sayın Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ hocama ve Arş. Gör. Dr. Buse EMİRLER'e teşekkür ederim. Bu mesleği seçmeme öncülük eden çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat OLGUN'a ayrıca teşekkür ederim. Doktora tez süreci boyunca sundukları destek ve önerileri ile başta Doç. Dr. Erdal UNCÜOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇALIŞICI hocama teşekkür ederim.

Bu ürünün ortaya çıkmasında kritik noktalarda sundukları çözümlerle ve gece gündüz demeden katkı sunan sevgili kardeşlerim Arş. Gör. Dr. Muhammet Musab ERDEM ve Yük. İnş. Müh. Muhammet DİNGİL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. TÜBİTAK proje ekibinde yer alan değerli kardeşlerim başta Yük. İnş. Müh. Salih KUNDUZ olmak üzere, İnş. Müh. Mehmet KARTAL ve İnş. Müh. Necdet CİĞERLİ'ye çok teşekkür ederim. Değerli mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Ada YILMAZ, Arş. Gör. Nurullah KARACA, Arş. Gör. Kaan DAL, Arş. Gör. Dr. Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR, Arş. Gör. Bestami TAŞAR, Arş. Gör. Halil Çağrı YILMAZ, Arş. Gör. Sezer SANCAR, Arş. Gör. Dr. Murat ÖZTÜRK, Arş. Gör. Kevser ÜNSALAN ve Dr. Öğr. Üyesi Olcay GENÇ olmak üzere tüm kıymetli hocalarıma teşekkür ederim.

Sunmuş oldukları maddi katkılarından dolayı Çavuş Demir Ltd. Şti. ve Zile Örnek Makine San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne de ayrıca teşekkür ederim.

Dualarımı hiç esirgemeyen, bu günlere gelmeme vesile olan, her zaman arkamda duran kıymetli annem Fatma TÜREDİ ve babam Mehmet TÜREDİ'ye sonsuz teşekkür ederim. Öz ağabeyim ve ablam gibi gördüğüm Yunus TÜREDİ, Saime AKÇA'ya ve bütün aileme teşekkür ederim.

Göstermiş oldukları fedakârlıklar ve desteklerle ilk günden bu yana her zaman yanımda olan güç ve moral kaynaklarım, sevgili eşim Esra TÜREDİ ve biricik oğlum Mehmet TÜREDİ'ye sonsuz sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. HELİSEL KAZIKLAR.....	4
2.1. Helisel Kazık Terminolojisi	5
2.2. Helisel Kazıkların Tarihçesi.....	6
2.3. Helisel Kazıkların Avantajları.....	9
2.4. Helisel Kazıkların Kullanım Alanları	11
2.4.1. Petrol ve gaz / enerji	12
2.4.2. Altyapı	14
2.4.3. Deniz yapıları.....	15
2.4.4. Konutlar	16
2.4.5. Sanayi	17
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	19
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	19
3.2. Sayısal Analiz Çalışmaları	23
4. HELİSEL KAZIKLARDA TAŞIMA KAPASİTESİ YÖNTEMLERİ	27

	Sayfa
4.1. Teorik Eksenel Kapasite Hesabı	27
4.2. Silindirik Kayma Yöntemi	28
4.3. Ayrık Taşıma Gücü Yöntemi	30
4.4. Kurulum Torku-Eksenel Kapasite İlişkisi.....	32
4.5. Deneysel Sonuçlar-Göçme Kriteri İlişkisi	37
4.5.1. Davisson göçme kriteri (1972)	38
4.5.2. Brinch Hansen yöntemi (1963).....	39
4.5.3. FHWA (%5D) yöntemi.....	40
4.5.4. L ₁ -L ₂ yöntemi	40
4.5.5. ISSMFE (%10D) yöntemi	41
4.5.6. %8D yöntemi	41
5. MATERYAL METOD	43
5.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	43
5.2. Endeks Deneyleri	44
5.2.1. Elek analizi deneyi.....	44
5.2.2. Rölatif sıklık deneyi.....	45
5.2.3. Piknometre deneyi	46
5.2.4. Kesme kutusu deneyi	47
5.3. Laboratuvar Model Deneyleri	47
5.3.1. Model deney düzeneği	48
5.3.2. Zemin aktarma düzeneği.....	49
5.3.3. Gevşek zemin yerleştirme elek düzeneği	49
5.3.4. Titreşimli sıkıştırma aleti	50
5.3.5. Model helisel kazıklar.....	51
5.3.6. Yükleme düzeneği	51
5.3.7. Laboratuvar model deneylerinin yapılışı	58

	Sayfa
5.3.8. Laboratuvar model deney planı	61
5.4. Büyük Ölçekli Arazi Deneyleri.....	63
5.4.1. Doğal zemin özelliklerinin belirlenmesi.....	63
5.4.2. Arazi ortamının hazırlanması	65
5.4.3. Deney düzeneği	70
5.4.4. Büyük ölçekli arazi deneylerinin yapılışı	76
5.4.5. Büyük ölçekli arazi deney planı	84
6. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	85
6.1. Model Deney Sonuçları.....	85
6.1.1. Model helisel kazıkların derinlik boyunca kurulum tork değerleri	85
6.1.2. Model helisel kazıkların aksenal basınç yükleme deney sonuçları	91
6.1.3. Model helisel kazıkların nihai aksenal yük kapasitesinin belirlenmesi.....	95
6.2. Büyük Ölçekli Arazi Deneyleri.....	106
6.2.1. Büyük ölçekli helisel kazıkların derinlik boyunca kurulum tork değerleri.....	106
6.2.2. Büyük ölçekli helisel kazıkların aksenal basınç yükleme deney sonuçları	108
6.2.3. Büyük ölçekli helisel kazıkların nihai aksenal yük kapasitesinin belirlenmesi.....	110
7. SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	117
7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	118
7.2. Sonlu Eleman Modelinin Kurulması ve Model Analizi.....	120
7.2.1. Zemin bünye modelleri.....	121
7.2.2. Mohr Coulomb (MC) bünye modeli.....	122
7.2.3. Pekleşen zemin (Hardening Soil-HS) bünye modeli	126
7.3. Laboratuvar Model ve Büyük Ölçekli Arazi Sayısal Analizleri	130
7.3.1. Zemin profili ve yapısal elemanın oluşturulması	130

	Sayfa
7.3.2. Sınır koşullarının tanımlanması	136
7.3.3. Yükün uygulanması	137
7.3.4. Başlangıç gerilme durumunun tanımlanması	138
7.3.5. Optimum ağ sıklığının belirlenmesi	139
7.3.6. Hesaplama aşaması	140
7.4. Laboratuvar Sayısal Analiz Sonuçları.....	140
7.4.1. Laboratuvar düz kazık analiz sonuçları	141
7.4.2. Laboratuvar tekli helisel kazık analiz sonuçları	143
7.4.3. Laboratuvar çoklu helisel kazık analiz sonuçları.....	147
7.5. Büyük Ölçekli Arazi Sayısal Analiz Sonuçları.....	152
7.5.1. Büyük ölçekli tekli helisel kazık analiz sonuçları	152
7.5.2. Büyük ölçekli çoklu helisel kazık analiz sonuçları.....	155
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	159
8.1. Sonuçlar.....	159
8.1.1. Laboratuvar model deneyi ve büyük ölçekli arazi deneyi sonuçları	159
8.1.2. Sayısal analiz sonuçları.....	163
8.2. Öneriler	164
KAYNAKLAR	165
DİZİN.....	170

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Elek analizi sonuçları.....	45
Çizelge 5.2. Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık (Özaydın, 2016).....	46
Çizelge 5.3. Yük hücresine ait teknik özellikler	53
Çizelge 5.4. Laboratuvar model deney serileri (Sıkı)	62
Çizelge 5.5. Laboratuvar model deney serileri (Gevşek)	63
Çizelge 5.6. SPT deney sonuçları ve zemin sınıflaması	64
Çizelge 5.7. Zemin profili.....	64
Çizelge 5.8. Zemin dinamik parametreleri	64
Çizelge 5.9. Yükleme pistonu özellikleri.....	70
Çizelge 5.10. Arazi deney planı ve helisel kazık parametreleri.....	84
Çizelge 6.1. Farklı yöntemlere göre kurulum tork değerleri	91
Çizelge 6.2. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri (Sıkı durum).....	97
Çizelge 6.3. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri (Gevşek durum).....	97
Çizelge 6.4. Farklı göçme kriterleri ve teorik hesaplamalar ile nihai kazık kapasiteleri.....	100
Çizelge 6.5. Farklı tork faktörü (Kt) değerleri için taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması	101
Çizelge 6.6. Nihai yükün deneysel ve tork esaslı tahmin oranları.....	102
Çizelge 6.7. Farklı göçme yöntemleri için nihai yüke karşı kurulum torku ve Kt değerleri	103
Çizelge 6.8. Sıkı zeminde farklı kurulum torkları için tork faktörleri (Kt)	105
Çizelge 6.9. Gevşek zeminde farklı kurulum torkları için tork faktörleri (Kt).....	105
Çizelge 6.10. Farklı zemin durumu için kurulum tork değerleri	108
Çizelge 6.11. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri.....	110
Çizelge 6.12. Deneysel-teorik nihai kazık kapasiteleri.....	112
Çizelge 6.13. Farklı tork faktörleri (Kt) ile taşıma kapasite değerleri	113

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.14. Farklı göçme yöntemleri için K_t değerleri.....	114
Çizelge 6.15. Farklı kurulum torku seçimine karşı K_t değerleri.....	115
Çizelge 7.1. Mohr-Coulomb (MC) bünye modeli için girdi parametreleri.....	126
Çizelge 7.2. Hardening Soil (HS) bünye modeli için girdi parametreleri	127
Çizelge 7.3. Farklı sıkılıklar için belirlenen kum zemin özellikleri	132
Çizelge 7.4. Model kazık elemana ait malzeme özellikleri	132
Çizelge 7.5. Büyük ölçekli kazık elemana ait malzeme özellikleri	132



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Helisel kazık temel görünüm (Perko, 2009).....	5
Şekil 2.2. Mitchell'in helisel kazık sistemi ve kazık demirleme parçaları	7
Şekil 2.3. Maplin Sands deniz feneri yapısı.....	7
Şekil 2.4. Açık denizde helisel kazık montajı.....	8
Şekil 2.5. İskele helisel kazık imalatında kullanılan çıkırık ve halat sistemi.....	8
Şekil 2.6. Ülkemizde helisel kazıklar ile ilgili yapılan ilk çalışmanın teknik çizimleri	9
Şekil 2.7. Boru hatları helisel ankraj uygulaması	12
Şekil 2.8. Gergi kablosu ankrajları	13
Şekil 2.9. Gömülü borularda kullanılan helisel kazıklar.....	13
Şekil 2.10. Rüzgâr türbinleri için helisel kazıklı çok temelli bir sistem konsepti	13
Şekil 2.11. Helisel kazıklar üzerine kurulmuş güneş paneli	14
Şekil 2.12. Rüzgâr türbini helisel kazık temel uygulaması.....	14
Şekil 2.13. İstinat duvarını destekleyen helisel kazık ankrajlar.....	15
Şekil 2.14. Helisel ankraj montajı.....	15
Şekil 2.15. Marina yapılarında helisel kazık uygulaması	16
Şekil 2.16. Yeni yapı helisel kazık montajı	16
Şekil 2.17. Helisel kazıklar ile temel takviyesi uygulaması	17
Şekil 2.18. Helisel ankrajlar ile tarihi bir evin palplanş duvar stabilizasyonu	17
Şekil 2.19. Bir trafo merkezindeki sınırlı alana helisel kazıklar kurulumu yapan mini yükleyici	18
Şekil 3.1. Üç helisel plakalı bir ankrajın yerleştirilmesinden sonra kum zeminin örselenme hipotezi (a) gevşek kum (b) sıkı kum	21
Şekil 3.2. Kazık etrafında oluşan örselenme.....	23
Şekil 3.3. Helisel kazık etrafındaki örselenmemiş ve varsayılan örselenmiş zemin görünümü.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Helisel kazık yenilme tipleri (Perko, 2009) a) ayrık b) silindirik.....	28
Şekil 4.2. Çekme ve basınç altındaki davranışı: Silindirik kayma yöntemi	29
Şekil 4.3. Çekme ve basınç altındaki davranışı: Ayrık taşıma gücü yöntemi.....	32
Şekil 4.4. Sakr (2015) tarafından önerilen teorik tork modeli (a) genel dayanım momentleri (b) helis seviyesinde dayanım momentleri	34
Şekil 4.5. En iyi uyum için ampirik tork korelasyon çizgisi.....	37
Şekil 4.6. Nihai kazık kapasite belirleme yöntemleri ve literatürde kullanıldıkları çalışmalar.....	38
Şekil 4.7. Davisson göçme kriteri (1972)	39
Şekil 4.8. Brinch Hansen yöntemi (1963).....	40
Şekil 4.9. L1-L2 yöntemi	41
Şekil 5.1. Dane çapı dağılımı eğrisi	45
Şekil 5.2. Yük hücresi için kalibrasyon grafiği.....	53
Şekil 5.3. 1 No'lu deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrisi.....	54
Şekil 5.4. 2 No'lu deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrisi.....	55
Şekil 5.5. Tork sistemi yük ölçer kalibrasyon eğrisi.....	57
Şekil 5.6. Tork sistemi deplasman ölçer kalibrasyon eğrisi.....	58
Şekil 5.7. Model helisel kazıkların kurulum ve yükleme sistemi gösterimi	60
Şekil 5.8. Helisel kazık kesiti.....	62
Şekil 5.9. Yük hücresi için kalibrasyon grafiği.....	73
Şekil 5.10. Büyük ölçekli deneyler için tork sistemi yük ölçer kalibrasyon eğrisi.....	75
Şekil 5.11. Büyük ölçekli deneyler için tork sistemi deplasman ölçer kalibrasyon eğrisi	75
Şekil 5.12. Büyük ölçekli arazi deney düzeneği şematik gösterimi	83
Şekil 6.1. Seri 1 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin.....	86
Şekil 6.2. Seri 2 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin.....	87

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Seri 3 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin.....	89
Şekil 6.4. Kurulum torku tespit yöntemleri	90
Şekil 6.5. Helis çapının etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	92
Şekil 6.6. Helis aralığı / helis çapı etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	93
Şekil 6.7. Helis sayısı etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	94
Şekil 6.8. Nihai yük değerlerinin farklı yöntemlerle belirlenmesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	96
Şekil 6.9. Helis çapı etkisi (%10D yöntemine göre).....	98
Şekil 6.10. Helisler arası mesafe etkisi (%10D yöntemine göre)	99
Şekil 6.11. Helis sayısı etkisi (%10D yöntemine göre) (s/D=1,5).....	99
Şekil 6.12. Nihai kapasite-maksimum kurulum torku ilişkisi.....	104
Şekil 6.13. Farklı kurulum torku tork faktörü Kt ilişkisi	106
Şekil 6.14. Tork-derinlik ilişkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	107
Şekil 6.15. Eksenel basınç deney sonuçları a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	109
Şekil 6.16. Helis çapı etkisi (%5D yöntemine göre).....	111
Şekil 6.17. Helisler arası mesafe/helis çapı oranı etkisi (s/D) (%5D ve %8D yöntemine göre)	111
Şekil 6.18. Helis sayısı etkisi (N) (%5D yöntemine göre).....	112
Şekil 6.19. Farklı göçme yöntemlerine göre tork değerleri	115
Şekil 6.20. Farklı kurulum torku-tork faktörü Kt ilişkisi.....	116
Şekil 7.1. Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması.....	119
Şekil 7.2. Global matris eşitliklerinin elde edilmesi	120
Şekil 7.3. Farklı helis sayısındaki kazık elemanlar a) Tekli helisel kazık (N=1) b) Çoklu helisel kazık (N=2) c) Çoklu helisel kazık (N=3)	121
Şekil 7.4. İdealize edilmiş elastik-tam plastik modelin tanımı.....	123
Şekil 7.5. Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb akma yüzeyi (c=0)	125

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. E50ref ve Eurref modüllerinin tanımlanması (drenajlı üç eksenli deneyden elde edilir).....	128
Şekil 7.7.Eeodref modülünün tanımlanması (ödometre deneyinden elde edilir).....	128
Şekil 7.8. Hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi (üç eksenli basınç deneyi)	128
Şekil 7.9. Asal gerilme uzayında HS modeli akma yüzeyi.....	130
Şekil 7.10. Probleme ait sayısal model görüntüsü a) Düz kazık b) Çoklu helisel kazık (N=2) c) Sonlu eleman ağı.....	131
Şekil 7.11. Kazık çevresinde örselenmiş bölgenin varlığının sonuçlara etkisi (Sıkı zemin, D=100mm, N=1)	134
Şekil 7.12. Deneylerde örselenmiş bölgenin seçimi	135
Şekil 7.13. Modele ait sınır şartları a) İki boyutlu model b) Üç boyutlu model.....	137
Şekil 7.14. K0 procedure için uygun olmayan problem tipleri.....	138
Şekil 7.15. Farklı ağ sıklıklarının aynı problem için ürettikleri sonuçlar (Sıkı zemin, D=100mm, N=1)	140
Şekil 7.16. Düz kazığın (helissiz) taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	142
Şekil 7.17. Düz kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin.....	142
Şekil 7.18. Farklı çaplı tekli helisel kazıkların taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	144
Şekil 7.18 (devam). Farklı çaplı tekli helisel kazıkların taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	145
Şekil 7.19. Tekli helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	146
Şekil 7.20. Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	148
Şekil 7.20 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	149
Şekil 7.20 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	150
Şekil 7.21. Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	150

Şekil	Sayfa
Şekil 7.21 (devam). Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	151
Şekil 7.21 (devam). Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	152
Şekil 7.22. Tekli helisel kazığın taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	154
Şekil 7.23. Tekli helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	155
Şekil 7.24. Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	156
Şekil 7.24 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	157
Şekil 7.25. Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin	158

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Özel imalat elek düzeneği.....	43
Resim 5.2. (a) Zemin ve elek seti (b) Elek sallama düzeneği.....	44
Resim 5.3. (a) Deney seti (b) Vakumlama işlemi.....	46
Resim 5.4. a) Kum zemin numunesinin kesme kutusuna yerleştirilmesi aşaması b) kesme kutusu deneyi uygulama aşaması	47
Resim 5.5. Laboratuvar deney düzeneği.....	48
Resim 5.6. Zemin aktarma düzeneği ve zemin depolama haznesi	49
Resim 5.7. Deney kasasına yerleştirilmiş eleğin a) dıştan görünümü b) içten görünümü	50
Resim 5.8. Titreşimli sıkıştırma aleti.....	50
Resim 5.9. Model helisel kazıklar.....	51
Resim 5.10. a) Yükleme motoru b) yükleme düzeneği genel görünümü	52
Resim 5.11. Yük hücresi.....	52
Resim 5.12. a) 1 No'lu Deplasman ölçer b) 2 No'lu Deplasman ölçer	54
Resim 5.13. Veri kaydetme ünitesi.....	55
Resim 5.14. Helisel kazık montaj düzeneği.....	56
Resim 5.15. Tork ölçüm sistemi	57
Resim 5.16. a) Hazneden alınan kum zeminin deney kasasına aktarılması b) Zemin düzeltme işlemi	59
Resim 5.17. a) Helisel kazık montaj düzeneği ile kazık yerleştirme işlemi b) yükleme motoru yardımıyla basınç yükleme işlemi	60
Resim 5.18. Jeofizik deneylerden görünüm.....	65
Resim 5.19. Sondaj çalışmalarından görüntüler	65
Resim 5.20. Arazi yüzey düzeltilmesi ve kazık yerlerinin işaretlenmesi	66
Resim 5.21. Reaksiyon kazıkları delgi aşaması.....	66
Resim 5.22. Reaksiyon kazıklarında donatıların delgi içerisine yerleştirilmesi.....	67

Resim	Sayfa
Resim 5.23. Reaksiyon kazıklarında betonlama işlemi	67
Resim 5.24. Reaksiyon kazıklarında başlık betonu imalatı	67
Resim 5.25. IPN240 üzerine yerleştirilen destek levhaları	68
Resim 5.26. Güçlendirilmiş IPN240 kirişi 3 boyutlu çizim görünümü	68
Resim 5.27. HEA300 kirişi iç kısımlara 20mm'lik destek levha uygulaması	69
Resim 5.28. Güçlendirilmiş HEA300 kirişi 3 boyutlu çizim görünümleri	69
Resim 5.29. Arazi yükleme düzeneği genel görünümü	69
Resim 5.30. Yükleme pistonu	71
Resim 5.31. Yükleme kabini	71
Resim 5.32. Yük hücresi	72
Resim 5.33. Yük hücresi kalibrasyonu	72
Resim 5.34. Merkezleyici	73
Resim 5.35. Büyük ölçekli arazi deneylerinde kullanılan helisel kazıklar a) Helisel plakalar b) Kazık şaftı ve helisel kazık	76
Resim 5.36. Geoteknik arazi laboratuvarı	77
Resim 5.37. Deney havuzlarının kazı aşaması	77
Resim 5.38. Deney kumunun temin edilmesi ve laboratuvar ortamına nakliyesi	78
Resim 5.39. Deney kumunun elenmesi işlemleri	78
Resim 5.40. Deney kumunun doldurma ve sıkıştırma işlemleri	79
Resim 5.41. Deneyleerde kullanılan burgu ataşmanı ve tork ölçüm düzeneği	79
Resim 5.42. Deneyleerde kullanılan helisel kazıklar	80
Resim 5.43. Helisel kazık montajı	80
Resim 5.44. Kiriş montaj elemanları	81
Resim 5.45. Yüklemenin kiriş ortasına ayarlanması	81
Resim 5.46. a) Yükleme öncesi teraziye alma işlemi b) kiriş elemanların sabitlenmesi	82

Resim**Sayfa**

Resim 5.47. Deney ekipmanlarının genel görünümü 1) Yükleme kabini 2) Bilgisayar 3) Veri toplama ünitesi 4) Yükleme pistonu 5) Orta kiriş 6) Yan kiriş 7) Raylı vinç.....	82
Resim 5.48. Deney kum nakliyesinde kullanılan taşıma helezonları	83



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

kN	Kilo newton
m	Metre
mm	Milimetre
kNm	Kilo newton metre
K_t	Ampirik tork faktörü
Nm	Newton metre
MPa	Mega pascal
T	Kurulum torku
°	Derece
%	Yüzde
ϕ	Zemin içsel sürtünme açısı
c	Kohezyon

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
İSTE	İskenderun Teknik Üniversitesi
SPT	Standart Penetrasyon Testi
SP	Poorly graded sands (kötü derecelendirilmiş kum)
TS	Türk Standartları
USCS	Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)
vd	Ve diğerleri

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, varoluşundan bu yana sürekli bir gelişim, dönüşüm ve arayış içerisinde olmuştur. Bu dinamik süreç ise hızla artan enerji, barınma, hammadde, gıda ve lojistik gibi ihtiyaçları doğurmuştur. Tüm bu ihtiyaçlar da her çeşit yapının inşasının ana unsuru olan inşaat mühendisliğinin de gelişim ve dönüşümünü beraberinde getirmiştir. İnşaat mühendisliği, kullanılan malzeme çeşidinden, uygulanan tekniklere ve hesap yöntemlerine kadar sürekli bir gelişim içerisinde olmuştur. Bu arayış, dünyayı önemli ölçüde tehdit eden çevre kirliliği ve kaynakların hızla tüketilmesi sorunlarına yönelik insanları çözüm arayışlarına yöneltmiştir. Bu durum birçok alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de daha çevreci çözümlere bulmaya ve kaynakları daha verimli kullanmaya yöneltmiştir.

Enerji yapıları (nükleer santraller, açık deniz rüzgar türbinleri, güneş tarlaları, vb.) ulaşım yapıları (limanlar, havaalanları, metro, demiryolları, karayolları vb.), konutlar (gökdelenler, oteller, alışveriş merkezleri, iş merkezleri vb.) altyapılar (köprüler, tüneller, dayanma yapıları vb.) ve arıtma tesisleri gibi birçok yapıda önemli bir yeri olan geoteknik mühendisliği alanında giderek artan yenilikçi, çevreci ve ekonomik çözümler bulmaya yönelik çalışmalar giderek artmaktadır.

Geoteknik bir uygulama yöntemi olan helisel kazıklar, geçmişi bir asırdan fazla olsa da kurulum ve galvaniz teknolojisinin son dönemlerde gelişmesiyle birlikte popülaritesi giderek artmaya başlayan, aynı zamanda geleneksel kazıklara göre birçok avantajı olan bir temel sistemi olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Helisel kazıklar birçok kullanım alanı ve farklı tip zeminlerde çekme, basınç, yanal, çevrimsel yüklemelere karşı dayanım göstermektedir. Helisel kazıkların bu kadar geniş alanda çözüm sunması ve giderek artan kullanımına karşın geleneksel kazıklara göre teorik-literatür altyapısı halen gelişme aşamasındadır.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı sıklıkta (sıkı ve gevşek) kum zemin içerisine yerleştirilmiş model boyutta ve büyük ölçekteki helisel kazıklar kullanılarak gerçekleştirilen laboratuvar ve arazi deneyleri ile helisel kazıkların basınç davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda helis çapı (D), helis sayısı (N), helis aralığı (s), zemin sıklığı (Dr) ve boyut etkisi gibi etkiler model ve büyük boyutlar için araştırılmıştır. Deneyler İskenderun Teknik

Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı ile bahsi geçen bu laboratuvarın yan tarafında oluşturulan geoteknik arazi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Farklı göçme yöntemleri ile değerlendirilen deney sonuçları, teorik yöntemler, kurulum tork ilişkisi, farklı tork faktörleri (K_t) ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıdaki sıra ile sunulmuştur:

Birinci bölümde, insanoğlunun tarihsel gelişim sürecinde inşaat mühendisliği ile olan ilişkisi ve helisel kazıkların bu süreç içerisindeki yeri ve bulunduğu nokta ile tezin genel kapsamı ve akışı sunulmuştur.

İkinci bölümde, helisel kazıklarla ilgili genel bilgiler, helisel kazıkların terminolojisi, tarihsel gelişimi, uygulama alanları ve avantajları hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, literatürde aksenal basınç altındaki helisel kazıklarla ilgili deneysel ve sayısal analiz çalışmaları hakkında bilgiler ve bu çalışmaların çıktılarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, helisel kazıkların taşıma kapasitesinin bulunmasına ilişkin yöntemlere değinilmiştir. Bu bağlamda teorik kapasite hesabı, tork-aksenal kapasite ilişkileri ve yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde, kullanılan malzeme özellikleri ve deneylerde uygulanan yöntemlerden bahsedilmiştir. Deneylerde kullanılan ekipmanlar, deneylerin yapılışı ve deney planlarına ilişkin detaylar açıklanmıştır.

Altıncı bölümde, model ve büyük ölçekli deneylere ait araştırma bulgular sunulmuştur. Tork derinlik ilişkileri, farklı yöntemlere (teorik, deneysel ve tork) göre aksenal yük kapasitelerinin değerlendirmesi yapılmıştır.

Yedinci bölümde, deney sonuçları iki ve üç boyutlu sayısal analiz programları kullanılarak modellenmiştir. Bu aşamada kullanılan yöntem, malzeme modelleri, sınır koşulları, yükün nasıl uygulandığı gibi modelleme ile ilgili detaylar ve sonuçları ortaya konmuştur.

Sekizinci bölümde ise tezin genel özeti ile model laboratuvar ve büyük ölçekli arazi deneyi sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi yer almaktadır.

Bu tez çalışması; TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından yürütülen 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında, 218M571 No ve “Arazide Farklı Yüklemelere Maruz Helisel Kazıklar için Optimum Tasarım Parametrelerinin Önerilmesi” başlıklı Araştırma Projesi desteğinde tamamlanmıştır.

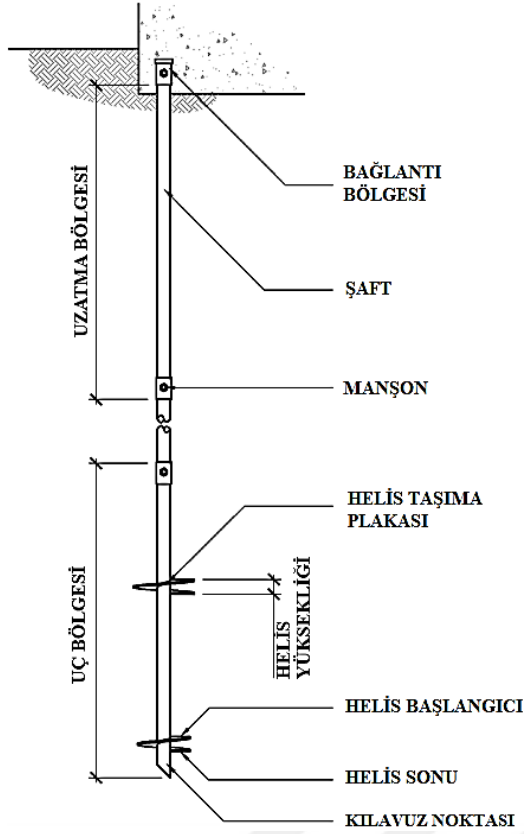


2. HELİSEL KAZIKLAR

Helisel kazıkların kullanımı yaklaşık yüzyıldan fazla olan fakat kendisini unutturan ama son yıllarda teknolojinin gelişmesine bağlı olarak popülaritesi gittikçe artan bir geoteknik bir uygulamadır. Perko (2009) tarafından helisel kazık kullanımı dört farklı bakış açısı ile değerlendirilmiştir. Bunlar; mühendis açısından problemlili zemin koşullarında farklı tip yapıları destekleyebilme; yapı sahibi açısından hızlı kurulum ve maliyet tasarrufu sağlayabilme; yüklenici açısından kurulumu kolay ve kapasitesi yüksek oranda doğrulanabilme; halkın gözünden ise, bugün belki de mevcut olan en ilginç, yenilikçi ve çevre dostu derin temel çözümlerinden biri olabilme şeklinde sıralanabilir.

Helisel kazıklar döndürülerek imal edilen çelikten meydana gelen fabrika üretimi kazıklardır. Helisel kazıkları; zemine ilk giren ve çoğunlukla bir veya daha fazla helisel taşıma plakası bulduran konik uç kısım, uç kısmı istenen derinliğe kadar ulaşması için kullanılan erkek civatalı ve dişi manşon bağlantı aparatları ile bağlanan uzatma bölümleri oluşturur. Genellikle merkezi şaft ve manşonlardan oluşan uzatma bölümleri bazı durumlarda helisel taşıma plakası da bulduranabilir. Uç kısım ve uzantıları oluşturan merkezi şaft genellikle sert bir kare çubuk veya içi boş bir boru şeklindeki yuvarlak kesittir. Uç, uzantılar, helisel taşıma plakaları ve kazık başlığı bölümlerinden oluşan helisel kazıkların detayı Şekil 2.1’de verilmiştir.

Helisel kazıkların ucunda tek bir plaka (tekil helisel) veya farklı mesafelerde birkaç plaka da (çoklu helisel) bulunabilir. Helisel kazıklar tek bir kazık şeklinde kullanıldığı gibi kazık grupları halinde de kullanılabilir. Genellikle bir helisel kazıkta en fazla 6 tane helisel taşıma plakası bulunmaktadır. Helisel kazıklarda şaft dış çapı 76 mm ile 508 mm ve et kalınlığı da 32 mm ile 117 mm arasında değişmektedir. Helisel kazık taşıma plakasının çapı ise 150 mm ile 1016 mm arasında değişmekte, aynı zamanda ihtiyaç duyulması halinde ise daha büyük çaplı helisel kazıklar da imal edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Helisel kazık temel görünüm (Perko, 2009)

2.1. Helisel Kazık Terminolojisi

Literatürde helisel temel yapısının bir kazık mı yoksa bir temel ayağı mı olduğu hakkında çeşitli yorumlar yapılmıştır. International Code Council (2006)'a göre bir kazığın uzunluğunun 12 çapa eşit veya daha büyük; temel ayağının ise kazık uzunluğunun 12 çaptan daha kısa olduğu kabul edilmektedir. Temel ayağında zemine bir kuyu açılırken kazık ise zemine çakılmaktadır. Amerika ve Avrupa gibi coğrafyalardaki farklı tanımlamalar ulusal ve uluslararası etkinliklerde büyük karışıklıkların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Helisel kazıklar ilk olarak “screw pile (vida kazık)” olarak isimlendirilmiştir. Yaklaşık 1920’den 1980’e kadar olan sürede uygulamaların birçoğunun çekme gerilmesi almasından dolayı “helisel ankraj” ifadesi daha yaygın hale gelmiştir (Perko, 2009). Sonraki yıllarda birçok ticari kuruluş ve yönetmeliklerde farklı isimlerle anılmıştır. 2005 yılında “Deep Foundation Institute” kurumunun “Helical Foundations and Tie-Backs” komitesi tarafından “helisel kazık” ifadesinin kullanılmasına karar verilmiştir. Helisel kazık ve temellerle ilgili terimler genel olarak şu şekilde tanımlanmıştır; “Helisel Kazık: Yapıları desteklemek için

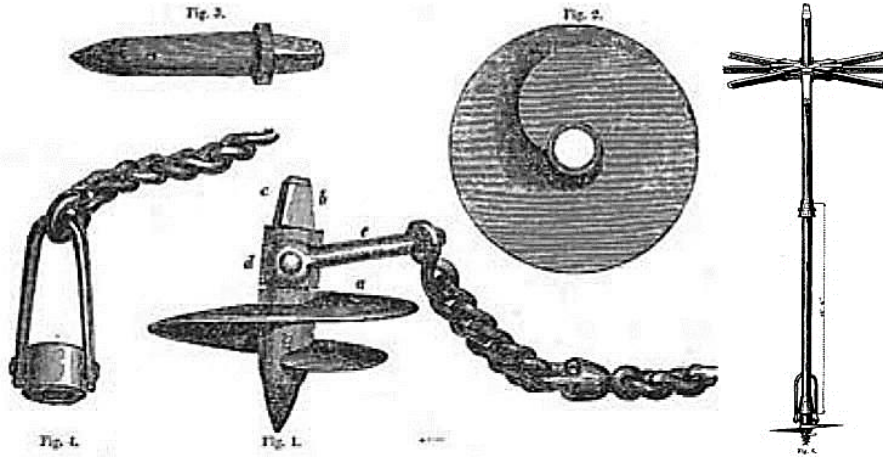
zemine döndürülmüş merkezi bir mille tutturulmuş bir veya daha fazla helisel şekilli taşıma plakasından oluşan çelikten imal edilmiş bir temeldir.” “Helisel kazık” ifadesi genellikle basınç uygulamaları için kullanılırken, “helisel ankraj” ifadesi çekme uygulamaları için kullanılmaktadır. Uygulamalar arasındaki ayırım gerekli bir açıklama olmadıkça genel durum için “helisel kazık” ifadesi kullanılmaktadır.

2.2. Helisel Kazıkların Tarihçesi

19. yüzyılın ortalarından sonlarına doğru “vida kazıklı temeller” olarak adlandırılan helisel kazıklar, o dönemde dünyanın en önemli mühendislik gelişmelerinden biri olarak görülmekteydi (Lutenegger, 2011). Bu tür kazıklar deniz fenerlerinin, köprülerin, okyanus gezinti rıhtımlarının iskelesi gibi o dönem için geleneksel inşa yöntemleri ile zor ve zaman alıcı yapıların inşasına imkân vermiştir. Büyük ölçekli inşaat yapılarında kullanıldıkları için büyük boyutlu olarak imal edilmişlerdir. O dönemde yaygın olarak 0,75-1,8m (2.5 ila 6ft) arasında değişen helisel kazık çapları kullanılmıştır. Bu ölçeklerde kurulum tork makinelerinin olmamasından ve insan veya hayvan gücü ile gerçekleştirilmesinden dolayı birçok zorluğu da beraberinde getirmiştir.

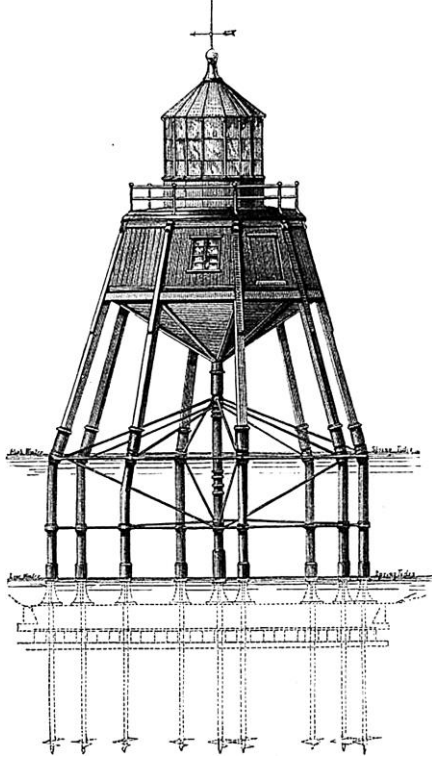
Tarihçilerin çoğu, o dönemde ilk olarak “vidalı temeller” olarak adlandırılan helisel kazıkların İrlandalı bir inşaatçı ve tuğla üreticisi olan Alexander Mitchell (1780-1868) tarafından pratik bir temel sistemi olarak icat edildiğini kabul etmektedir. Mitchell’in aldığı tek resmi eğitim Belfast Akademisi’nde olmuştur. Boş zamanlarında mekanik, matematik, bilim ve yapı inşaatı konularında kendini geliştirmiştir (Perko, 2009). Mitchell’i meraklandıran meselelerden biri; kum resifleri, çamurluklar ve nehir ağzı seddeleri gibi zayıf zeminlerde deniz yapılarının nasıl daha iyi bulunacağı olmuştur. Mitchell tarafından bu soruna helisel kazıklar tasarlanmak suretiyle bir çözüm bulunmuştur.

Mitchell’in buluşu “vida kazık” olarak adlandırılmış ve 1833’te Londra’da patentlenmiştir. İlk olarak gemileri demirleme amaçlı kullanılmıştır. Şekil 2.2’de Mitchell tarafından tasarlanan helisel kazık sisteminin çeşitli bileşenleri görülmektedir. Mitchell tarafından üretilen kazığı zemine vidalamak için çıkırık denilen büyük bir ahşap saplı çark kullanılarak insan ve hayvan gücünden faydalanılmıştır.



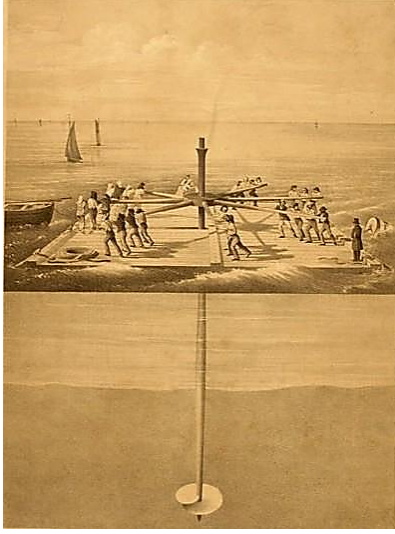
Şekil 2.2. Mitchell'in helisel kazık sistemi ve kazık demirleme parçaları (Lutenegger, 2011)

Vida kazıkların ilk uygulama yerleri olan deniz fenerleri, 1838'de İngiltere'deki Thames nehri kıyısında Maplin Sands Deniz Feneri'nin kurulması için kullanılmıştır (Şekil 2.3). Buradaki helisel kazıkların şaft çapı 127mm (5inç), helis çapı 1,2m (4ft) ve 6m uzunluğunda olup çıkırığı çevirmek için birçok insana ihtiyaç duyulmuş; bu aşamada atların ve eşeklerin bazen de su jetlerinin kullanılması tercih edilmiştir (Perko, 2009).



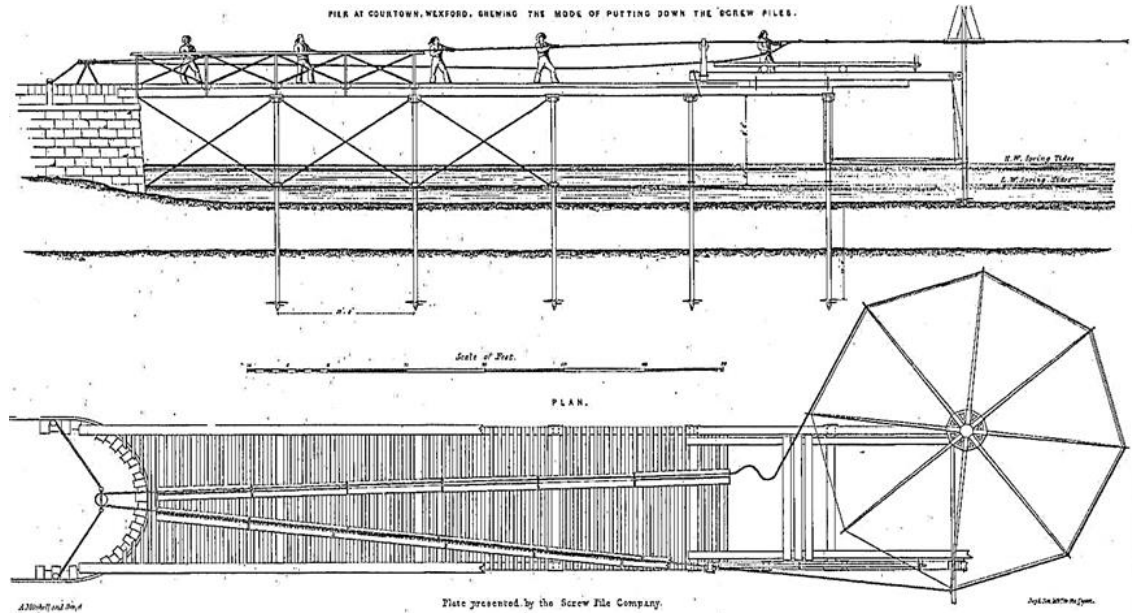
Şekil 2.3. Maplin Sands deniz feneri yapısı (Perko, 2009)

Şekil 2.4'te ise açık denizde sal üzerinde kazığı döndürmek için işçilerin çıkırığı döndürmesi ile ilgili görsel yer almaktadır.



Şekil 2.4. Açık denizde helisel kazık montajı (Lutenegger, 2011)

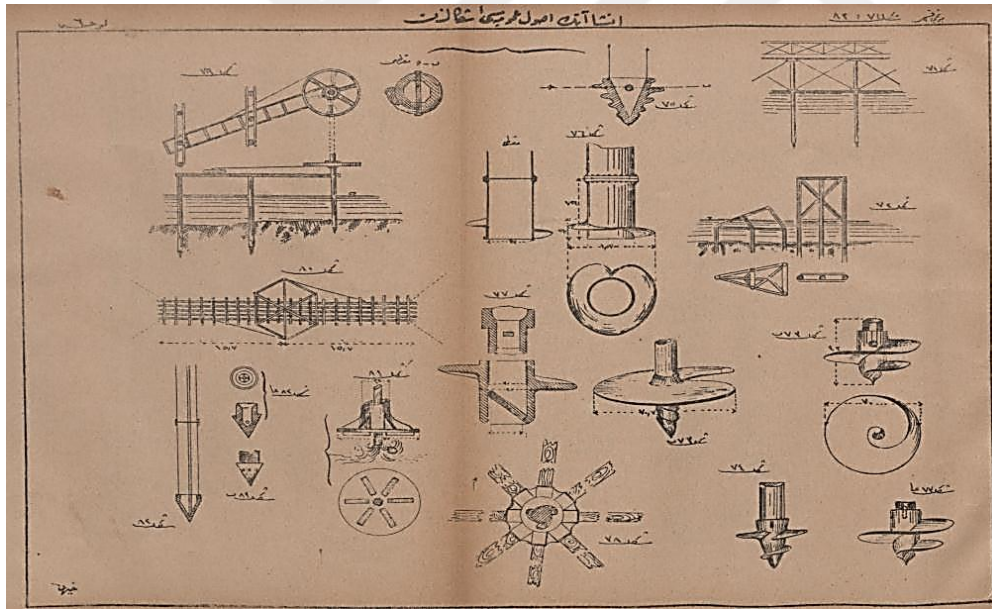
Helisel kazıkların daha çok deniz feneri temellerinin yapımında ön plana çıkması ve gösterdiği başarılı kullanımı yanında kıyılarda demirleme, iskele temelleri gibi yeni alanlarda uygulanma imkânının olması; Mitchell tarafından tasarlanan sonsuz ip yöntemi sayesinde karadan açık denize bir iskele inşa edebilmek için pratik bir çözüm sağlamıştır. Bu yöntemle örnek Courtown'da devam etmekte olan bir çalışmanın plan ve profil görüntüleri aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. İskele helisel kazık imalatında kullanılan çıkırık ve halat sistemi (Lutenegger, 2011)

Helisel kazıklar ilk olarak deniz fenerleri, iskeleler ve diğer deniz marina yapılarında kullanılmıştır (1830-1875). İkinci dönemde, patentlerin çoğunu tarımda çit direği uygulamaları içermektedir (1878-1931). Yaklaşık 1920 ile 1980 arasında kapsayan üçüncü dönem gergi teli ankrajları, enerji ve boru hatları, kule ayakları gibi yapılardaki uygulamalardan oluşmaktadır. 1985 yılından bu yana birçok gezer ev, istinat yapıları ve temel takviyesi gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır ve hala da günümüzde gelişerek kullanılmaya devam etmektedir.

20. yüzyılın başlarında, Osmanlı İmparatorluğu döneminde Mehmet Feyzi tarafından Osmanlıca yazılan “İnşaatın Genel Usulleri” kitabında helisel kazıklar ile ilgili çalışmanın olduğu ve ilk olarak İngiliz Mühendis Mitchell tarafından deniz feneri temelinde ve Avrupa'nın birçok yerinde uygulandığı ifade edilmiştir (Yılmaz, 2016). Kitapta geçen helisel kazıklara ait bir takım teknik çizimler aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Ülkemizde helisel kazıklar ile ilgili yapılan ilk çalışmanın teknik çizimleri (Kunduz, 2020)

2.3. Helisel Kazıkların Avantajları

Her inşaat projesine özgü bazı özel durumlar ve sınırlamalardan dolayı zaman, mekân, hava şartları, taşıma kapasitesi, ekonomiklik gibi temel seçimini etkileyen önemli faktörler devreye girmektedir. Herhangi bir temel türünün seçiminde avantajlı veya dezavantajlı olduğu zemin tipinden çevreye verdiği zarara kadar birçok faktör göz önünde

bulundurulmalıdır. Tüm bu olasılıklar, sınırlamalar ve en önemlisi de proje gerçeği göz önüne alınarak en uygun temel seçimi yapılmakta ve uygulamaya geçilmektedir.

Helisel kazıkların kullanımı, çok yönlü donanım ve ürün kabiliyeti, geliştirilebilir olması, teknolojik gelişmelerle sürekli yenilenmesi ve sunduğu birçok avantaj ile giderek artan bir eğilim göstermektedir. Bütün bu gelişmeler ışığında helisel kazıkların sunduğu bazı önemli avantajlar aşağıda sunulmuştur.

- ✓ İstenilen büyüklüklere kadar ulaşılan boyutları ile birçok alanda yüksek kapasiteli derin temel alternatifi sunar,
- ✓ Birçok zemin çeşidi ve inşaat uygulama alanında kullanılabilir,
- ✓ Hemen hemen tüm hava koşullarında montajlanabilir. Aşırı sıcak-soğuk ve donma sıcaklıklarının olduğu durumlarda bile kazık imalatı yapılabilir.
- ✓ Zemin göçmeleri ve yüksek yeraltı suyunun bulunduğu ortamlarda imalat yapılabilir.
- ✓ Helisel kazıklar sınırlı veya dar erişim alanlarında manevra kabiliyeti olan elle tutulan ekipmanlar, mini ekskavatörler, mini yükleyiciler ile ve daha geniş alanlarda bekolar ve daha büyük palet ekipmanları kullanılarak monte edilebilir. Proje tasarım yüklerine ve saha erişimine göre ekipman ve tahrik kafaları boyutlandırılabilir. Elektrikli motor seçeneğine sahip ekipmanlar ile iç mekanlara monte imkânı sunar. Diğer kazık türlerine göre özel makinelerden ziyade piyasada kolaylıkla erişilebilecek veya daha az maliyetli makineler ile imalat yapılabilir.
- ✓ Geleneksel çakma kazıkları ve sıkıştırma kırma taş kolonların aksine aşırı titreşim oluşturmazlar. Düşük seviyedeki titreşimleri ile komşu yapılara zarar vermediği gibi temel takviyesi, kâgir ve tarihi hassas yapılarda rahatlıkla kullanılabilir.
- ✓ Kurulumları sırasında gürültü oluşturmazlar,
- ✓ Helisel kazıklar imalatında herhangi bir foraj olmadığı için diğer derin temellere göre çevreye herhangi bir atık malzeme ve posa malzemesi oluşturmazlar. Ayrıca helisel kazıklar montajında beton veya harç içermezler ve böylece şantiyede araç ve ekipmanı daha aza indirirler. Bu yönleriyle çevreci bir temel tipidir. Ayrıca herhangi bir atık malzeme oluşmadığı için bu malzemelerin taşıma ve işleme gibi durumlarda oluşacak maliyet artışı da söz konusu olmaz.
- ✓ Geçici yapıların desteklenmesi için kullanılan helisel kazıklar, tekrar kurulum işleminin tersi yönünde çevrilerek zeminden kaldırılabilir ve sonra tekrar kullanılabilir.

- ✓ Diğer derin temel sistemlerine göre daha küçük ekipmanlar ile monte edilebilir olmaları, imalat edileceği sahaya rahat bir şekilde taşınabilmeleri ve herhangi bir hafriyat olmayacağından daha düşük mobilizasyon maliyetleri ile daha ekonomik bir çözüm ortaya koyar.
- ✓ Projede belirtilen yerden yanlışlıkla başka bir noktada imal edilen helisel kazıklar çıkartılıp projesine uygun yerde tekrar imal edilebilir. Böylece helisel kazık zayıflığı olmaz.
- ✓ Fore kazıklar, beton mikro kazıklar gibi kür süresi gerektirmediği için yük testleri kurulundan hemen sonra yapılabilir. Kurulumun yapıldığı gün veya ertesi gün test yapma imkânı sunar.
- ✓ Yeraltı suyunun olduğu bölgelerde herhangi bir özel kılıf kullanılmadan rahatlıkla imal edilebilir.
- ✓ Diğer kazık tiplerine göre imalatları daha hızlıdır ve hemen yükleme yapılabilir. Ayrıca imalattan sonra enjeksiyon yapılarak kazık dayanımı artırılabilir.
- ✓ Herhangi bir bakım ve kalıp maliyeti yoktur.
- ✓ Uygun shaft boyutu ve helisel plaka konfigürasyonu seçilerek ekler ile istenilen derinliğe inilebilir.
- ✓ Galvaniz kaplama yapıldığında korozyona karşı direnç gösterir.
- ✓ Birçok farklı temel sistemi ile birlikte uyumlu çalışabilir.
- ✓ Montaj aşamasında tork-zemin kapasitesi ilişkisi kurulabilir.
- ✓ Hem basınç hem de çekme kuvvetlerine karşı koyabilir. Dayanma yapıları veya yüksek yapı temellerinde, rüzgâr ve deprem yükü gibi yanal etkileri karşılayabilirler.
- ✓ Hassas özelliklere sahip arazi şartlarında örselenmeyi asgariye indirir.
- ✓ Helisel kazıklar çelik olduğundan dolayı sismik aktiviteler esnasında sığ temel sistemleri ve betonarme derin temellere nazaran daha esnek bir davranış gösterirler.
- ✓ Eğimli zemin yüzeylerinde imal edilebilirler.

2.4. Helisel Kazıkların Kullanım Alanları

Farklı tip yükleme durumları, zayıf zemin koşulları, ekonomiklik, hızlılık, çevresel etki, olumsuz hava koşulları gibi avantajları göz önüne alındığında helisel kazıkların çok farklı kullanım alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Helisel kazık temel uygulamasının uygun çözüm olduğu ve kullanımının yaygın olarak bulunduğu alanlara ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir:

2.4.1. Petrol ve gaz / enerji

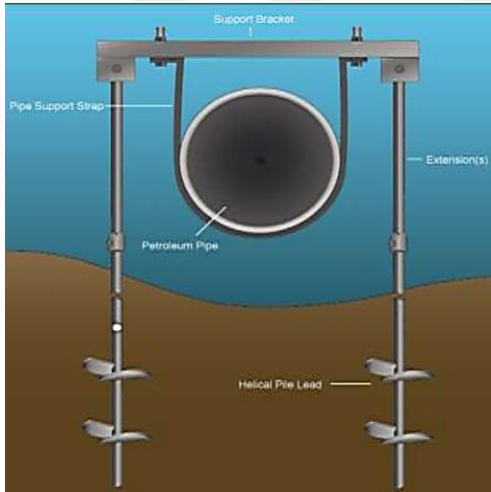
Kompresör temelleri, geçici modüler konaklama ve depolama, çalışma platformları, gelgit, kara ve offshore rüzgâr santralleri, güneş tarlaları, direkler ve kuleler, geçici çalışma sağlama, petrol pompası, trafo merkezleri temelleri, gergi kabloları gibi petrol ve enerji alanlarında helisel kazıklar çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.7-2.9). Zemine gömülü su altı boru hattı ve başlık desteklerini kontrol etmek için genellikle, geleneksel beton ağırlık veya beton kaplı borular kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldıklarında maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle deniz aşırı petrol sevkiyatı yapan gömülü boruların yeraltı suyundan dolayı yüzmesini engellemek, donma çözülme durumlarında şişme meydana gelebilecek zemin ortamlarında hareketi engellemek için kullanılmaktadır. Helisel kazıklara gaz ve petrol işletme sahaları gibi alçak mesafeler veya genişlik kısıtlaması olan titreşime duyarlı hassas yapıların olduğu alanlarda, kara ve açık deniz rüzgâr türbinlerinde, güneş tarlaları gibi yenilenebilir elektrik üretim tesislerinde sıkça başvurulmaktadır (Şekil 2.10-2.12). Bu tip yapıların özellikle tekrarlı yüklere maruz kalması, yukarı yönlü ve yanal ötelenmelere zorlanması, ulaşımı zor dağlık arazi, deniz ortası gibi alanlarda inşası helisel kazıkların sağladığı avantajlar göz önüne alındığında en uygun temel tipi olmaktadır.



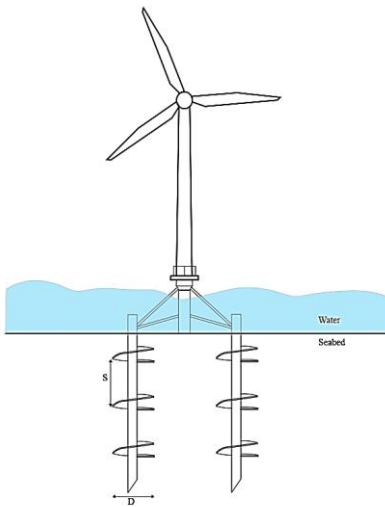
Şekil 2.7. Boru hatları helisel ankraj uygulaması (Yılmaz, 2016)



Şekil 2.8. Gergi kablosu ankrajları (Perko, 2009)



Şekil 2.9. Gömülü borularda kullanılan helisel kazıklar (Singh vd., 2017)



Şekil 2.10. Rüzgâr türbinleri için helisel kazıklı çok temelli bir sistem konsepti (Ullah vd., 2019)



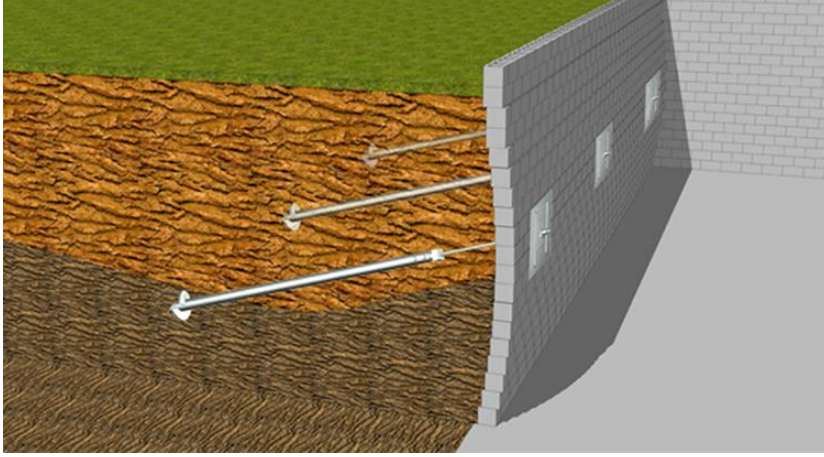
Şekil 2.11. Helisel kazıklar üzerine kurulmuş güneş paneli (Lutenegger, 2017)



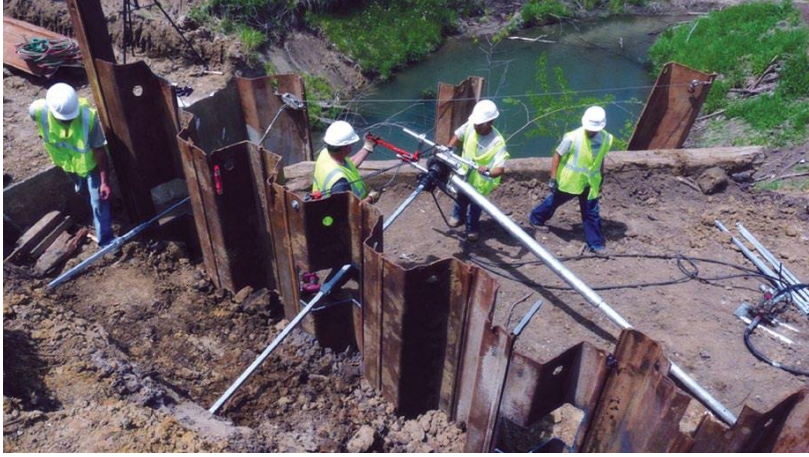
Şekil 2.12. Rüzgâr türbini helisel kazık temel uygulaması (Yılmaz, 2016)

2.4.2. Altyapı

Helisel kazıklar, demiryolu tabelaları, sığınak ve yer belirleme platformları, zemin çivilemesi, istinat yapıları, yaya köprüleri, platform uzantıları, geçici yapılar, güvenlik bariyerleri, aydınlatma direkleri, gibi ulaşım ve altyapı sistemlerinde kullanılmaktadır (Şekil 2.13-2.14).



Şekil 2.13. İstinat duvarını destekleyen helisel kazık ankrajlar (Niroumand ve Kassım, 2016)



Şekil 2.14. Helisel ankraj montajı (Blessen vd., 2019)

2.4.3. Deniz yapıları

İskeleler, demirleme, güverte, marinalar, limanlar, nehir, göl ve bataklık gibi su seviyesi altında temel inşaatı yapmak gerektiğinde kullanılmaktadır (Şekil 2.15). Bu temellerin ilk olarak kum resifleri, çamurluklar ve nehir ağzı seddeler gibi zayıf zeminlerde deniz yapılarının inşasına çözüm bulmak için geliştirilmiş olduğu tarihsel gelişimi incelendiğinde görülmektedir. Özellikle diğer geleneksel kazık tiplerine göre su altında uygulama kolaylığı açısından ve büyük çekme kapasitesi sağladıklarından helisel kazıklar açık deniz (offshore) yapılarında alternatif olarak önerilmekte ve kullanılmaktadır. (Spagnoli vd., 2016; Spagnoli ve Tsuha, 2020).



Şekil 2.15. Marina yapılarında helisel kazık uygulaması (Khazaei ve Eslami, 2017)

2.4.4. Konutlar

Helisel kazıkların hemen hemen bütün hava koşullarında imal edilmesi, hızlı kuruluma sahip ve özellikle de ekonomik olması sebebiyle düşük katlı yapıların temellerinde, kazık grupları halinde çok katlı yapılarda derin temel olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.16-2.17). Taşıma yönünden risk bulunan, hasar görmüş ve ileriye dönük risk barındıran temellerin takviyesinde küçük daha işlevsel montaj ekipmanları ile helisel kazıklar özellikle bodrum, oda içerisi gibi sınırlı erişim alanlarında kolaylıkla güçlendirme yapma imkânı sunmakta ve bu tip uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.16. Yeni yapı helisel kazık montajı (Blessen vd., 2019)



Şekil 2.17. Helisel kazıklar ile temel takviyesi uygulaması (Yılmaz, 2016)

Hassas yapılar sınıfına giren tarihi yapıların zamana bağlı olarak ihtiyaç duydukları bakım onarım çalışmaları aşamasında güçlendirme elemanı olarak özellikle daha az titreşim oluşturmaları ve kısıtlı alanlarda çalışma imkânları ile bu alanda rahatlıkla kullanılmaktadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Helisel ankrajlar ile tarihi bir evin palplanş duvar stabilizasyonu (Blessen vd., 2019)

2.4.5. Sanayi

Helisel kazıkların endüstriyel sahalardaki en önemli avantajı, kullanımdan sonra kolay ve ucuz bir şekilde çıkarılabilmesi ve geri dönüştürülebilmesidir. Mevcut sanayi yapılarında sonradan yapı içerisine kurulacak bir sistemin temeli olarak da kolay, hızlı ve sınırlı erişim alanlarda helisel kazık imal edilebilmektedir. Ayrıca modern inşaat yöntemleri için hızlı

temeller, zemin stabilizasyonu, ekolojik temeller, modüler yapılar ve kütükten evler, geçici stadyumlar (halı saha) gibi alanlarda kullanılmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Bir trafo merkezindeki sınırlı alana helisel kazıklar kurulumu yapan mini yükleyici (Blessen vd., 2019)

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Helisel kazıkların eksenel basınç yüklemesi altındaki davranışlarının konu edildiği literatürde yer alan çalışmalar deneysel ve sayısal olmak üzere iki başlık altında sunulmuştur.

3.1. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, helisel kazıkların eksenel basınç davranışını incelemek için literatürde sunulan deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu kapsamda deneysel çalışmaların kapsamı ve kısaca elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

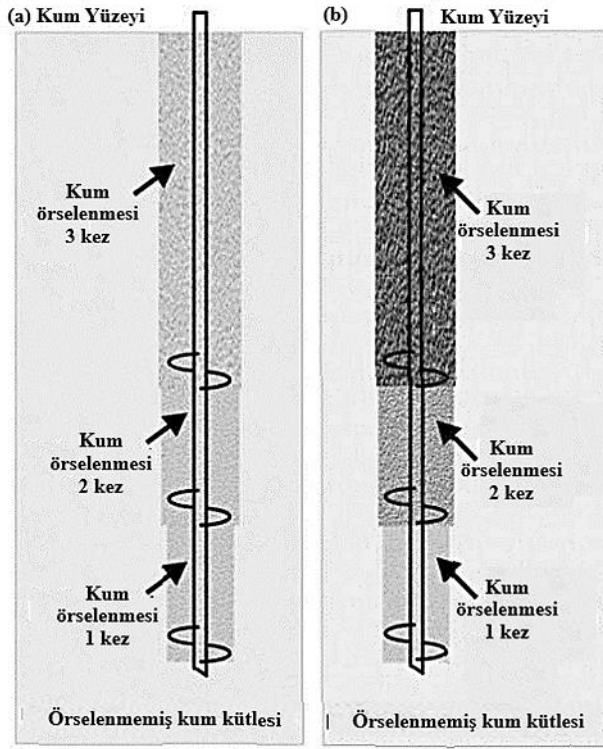
Livneh ve El Naggar (2008) tarafından yapılan çalışmada arazide 19 adet kazık yükleme deneyi yapılarak helisel kazıkların eksenel (çekme ve basınç) yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Helisel kazıkların nihai yük kriterleri ve yüklerin aktarım mekanizmaları incelenmiştir. Ayrıca yük taşıma kapasiteleri tork değeri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Deneysel üç farklı çapta helis plakası ile kare tipi şaft kullanılmıştır. Nihai yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kazık deplasmanının en büyük helis çapının %8'ine eşit olduğu ve elastik davranış gösterdiği değer, referans kabul edilmiştir. Tork korelasyon faktörü (Kt) basınç durumunda 33 m^{-1} , çekme durumunda da 24 m^{-1} olarak alınmıştır. Kazık kapasitesinden ampirik tork korelasyon katsayısı tahmin edilmiştir. Basınç altında, killi silt için Kt değerleri $35-42 \text{ m}^{-1}$ arasında değişirken kum için 60 m^{-1} değerinden daha büyük çıkmıştır. Kazık kapasitesinden Kt parametresi tahmini için son 1m'deki ortalama tork değeri kullanılmıştır.

Sakr (2009) tarafından yapılan çalışmada tek ve çift helisli kazıkların yükleme deney gözlemleri sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde çift helisli kazıkların tek helisli kazıklara göre %40 daha fazla direnç gösterdiği belirlenmiştir. Az bir maliyetle ikinci bir helisin eklenmesinin kapasitenin artırılması adına ekonomik bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur. Aynı zamanda çalışmada nispeten büyük ve önemli projelerde, kazık inşa edilecek sahada kazık yükleme deneylerinde eksenel kapasiteleri ile kurulum tork değerleri arasında ilişki kurularak tork faktörlerinin belirlenmesi önerilmiştir. Buradan hareketle, yerinde doğrulanmış tork-kazık kapasitesi ilişkisi kurularak proje sahası genelinde kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

Sakr (2011) tarafından kohezyonsuz zeminlerde büyük kapasiteli helisel kazıklar kullanılarak çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Helisel kazıkların zemine yerleşimi sırasında tork değerleri izlenmiştir. Kurulum sırasındaki zemin dayanımının niteliksel bir ölçü sayılabileceği vurgulanmıştır. Tork ve zemin arasında kurulan korelasyonun mümkün olduğu fakat kapsamlı bir araştırma yapılması gerektiği ve kurulum torkunun izlenmesinin kurulum kalitesini sağlamak ve tasarım varsayımlarını da doğrulamak adına uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, helisel kazıkların nihai kapasitelerini belirlemek için %5D, L₁-L₂ ve Davisson's göçme kriterleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kazık çaplarının büyük olmasından dolayı %10D göçme kriteri için kıyaslanacak olan deplasman değeri nispeten daha büyük olduğundan, daha makul sonuçlar veren %5D göçme yöntemi kullanılmıştır.

Sakr (2012) tarafından kohezyonlu zeminlere yerleştirilen büyük kapasiteli helisel kazıkların büyük ölçekli çekme ve basınç deneylerini kapsayan bir çalışma yapılmıştır. Helis ilavesinin kazıkların çekme ve basınç direncini önemli derecede artırdığı görülmüştür. Helisel kazıkların çekme kapasitesi, basınç kapasitesinin yaklaşık %85'i oranında elde edilmiştir.

Tsuha vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada farklı yoğunluklarda hazırlanmış kum zemine 12 farklı kazık üzerinde santrifüj model deneyleri ile helisel kazıkların çekme performansı incelenmiştir. Helisel ankrajlar kurulum sırasında zemin içerisine döndürülerek itildiği için helisel plaka veya plakaları zemin içerisinde ilerlerken adeta zemini keserek, zemin danelerini yanal ve düşey yönde hareket etmeye zorlayarak kazık etrafında çok önemli oranda örselenme oluşacağı ifade edilmiştir. Örselenme derecesinin en üstteki plakanın üzerinde kalan zeminde daha şiddetli şekilde gerçekleştiği, alttaki plakalara doğru ise örselenme derecesinin göreceli olarak azaldığı vurgulanmıştır (Şekil 3.1). Bunun nedeninin plaka sayısına bağlı olarak en üstteki plakanın üzerinde kalan zeminden daha fazla plakanın geçiş yapması, aşağıya doğru ise geçiş sayısının azalması olduğu kabul edilmiştir. Sıkı kumlarda yapılan deneysel araştırmaya dayanılarak helis sayısına ve zeminden plakaların geçiş (penetrasyon) sayısına göre kazık etrafındaki sıklık derecesinin önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. Gevşek kumlarda yapılan deneylerde ise kazığın zeminde inşasından sonra örselenmiş bölgedeki sıklığın helislerden ve penetrasyon sayısından bağımsız olarak çok etkilenmediği görülmüştür (Şekil 3.1). Bu araştırmalarda örselenme nedeniyle sıklık derecesindeki azalmaya bağlı olarak kum zeminin rijitlik modülü ve kayma mukavemeti açısının analizlerde azaltılması gerektiği vurgulanmıştır.



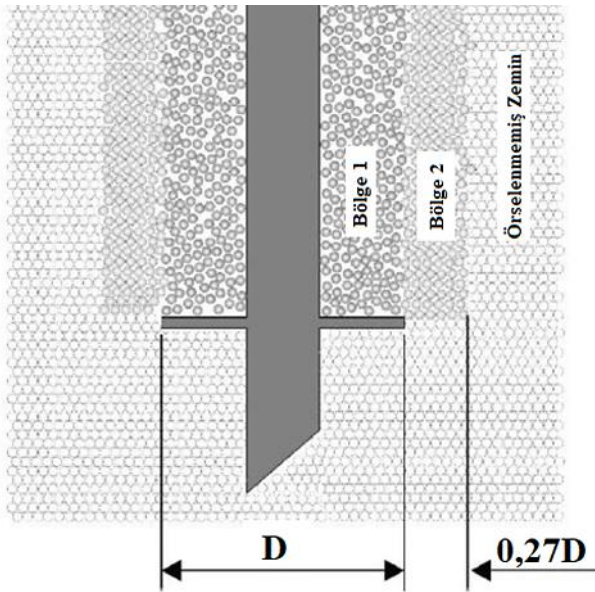
Şekil 3.1. Üç helisel plakalı bir ankrajın yerleştirilmesinden sonra kum zeminin örselenme hipotezi (a) gevşek kum (b) sıkı kum

Harnish (2015) tarafından yapılan çalışmada, 7 adedi tam donanımlı olmak üzere toplamda 17 adet helisel kazık, derinlik boyunca tork ölçümlerini de alınacak şekilde imal edilmiştir. Deneysel sonuçları tork ölçümlerinin doğru ve tekrarlanabilir olduğunu göstermiştir. Diğer 10 adet kazık üzerinde 6 tane basınç ve 4 tane de çekme deneyi yapılmıştır. Tork ve nihai taşıma kapasitesi değerlerinin tek ve çift helisel büyük çaplı kazıklarda uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Khan (2016) tarafından yapılan çalışmada 7 adet helisel kazık imal edilip tork metodu kullanılarak kazıkların nihai basınç yükleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada, yer değiştirmeler için tork yönteminin ve kesinliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Yük deplasman eğrilerinden göçme yükleri hesabı için farklı göçme kriterleri kullanılmıştır. Sonuçlar, deneysel çalışmalarda kullanılan helisel kazıkların yük deplasman eğrilerinin yorumlanmasında %10 göçme kriterinin en uygun yöntem olduğunu göstermiştir. Nihai basınç yükünü hesaplamak için farklı taşıma eşitlikleri kullanılmış ve sonuçların tork metodu ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Lanyi (2017) tarafından yapılan çalışmada tek ve grup helisel kazıkların basınç yükü altında aksel davranışı kohezyonlu zeminde arazi deneyleri yapılarak araştırılmıştır. İlk aşamada tek kazık kullanarak deneyler yapılmıştır. 6 adet deneyde tek helisli kazıklarda shaft boyunca deformasyon ölçerler yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Çoklu helis temeller için 1,5- 3 ve 5 olmak üzere üç farklı s/D (s : helis plakalar arası mesafe, D : helis plaka çapı) oranı kabul edilmiştir. Sonuç olarak s/D oranlarına göre sonuçlar ele alındığında ayırık yöntem daha baskın çıkmıştır. Ancak yük arttıkça silindirik kayma yönteminin de gelişebildiği görüşü ortaya çıkmıştır. İkinci aşamada 2x2 helisel grup kazıklar üzerinde saha çalışmaları yapılmıştır. Grup kazık oranı s_g/D 2, 3 ve 5 olarak alınmış (s_g : gruptaki kazıkların merkezden merkeze olan uzaklığı) ve s_g/D azaldıkça ve grup yükü arttıkça grup performansının arttığı görülmüştür. Helisel grup kazıkların etkileşiminin aynı aralıklı geleneksel kazıkların etkileşimine göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

Pérez vd. (2018) tarafından kum zeminlerde yapılan deneysel ve sayısal analizlerde örselenmenin sonuçlar üzerindeki etkisi detaylı şekilde araştırılmıştır. Örselenme dikkate alınmadığında analiz sonuçları ile deney arasında çok büyük farklar olduğu ve örselenme etkisi dikkate alındığında ise deney ile analiz sonuçlarının birbiri ile uyum içerisinde olduğu ifade edilmiştir. Helislerin, zemine tork kuvveti ile döndürülerek itilmesi esnasında kazık etrafındaki zeminin sıkılığının önemli ölçüde azaldığı ve bu bölgedeki zemin özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir. Pérez vd. (2018) tarafından helisel kazıkların sayısal analizlerinde örselenmiş bölgedeki zemin parametrelerinin (mukavemet ve rijitlik parametrelerinin) belli oranda azaltılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu amaçla kazık etrafında belli bir uzaklıktan sonra etkilenmeyen bölgedeki zeminin kayma mukavemeti açısı ϕ ile rijitlik modülü E değerleri belli oranda azaltılarak analizle deney sonuçları arasında uyum yakalanmaya çalışılmıştır. Ayrıca bu çalışmada laboratuvarında model santrifüj deneyleri yapılmış ve tomografik resimler çekilerek öncelikle örselenen bölgenin sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi örselenme şiddetine göre kazık etrafında iki farklı bölge tanımlanmıştır.



Şekil 3.2. Kazık etrafında oluşan örselenme (Pérez vd., 2018)

Li ve Deng (2019) tarafından kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminde basınç ve çekme yüküne maruz 26 adet tekli helisel kazığın davranışı arazi deneyleri ile araştırılmıştır. Kazıkların kurulumu boyunca her 30cm'de manuel olarak tork değerleri kaydedilmiştir. Tork direncinin zemin tipi, shaft çapı ve yükleme yönü gibi faktörlerden etkilendiği ve homojen zeminde büyük shaft çapına sahip kazıklarda daha düşük tork dirençleri elde edildiği tespit edilmiştir.

George vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada kohezyonsuz zemine oturan helisel kazıkların kurulumu (yerleştirilmesi) deplasman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Helisel kazıkların aksenal çekme ve basınç kapasitelerini etkileyen faktörleri incelemek için laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Farklı shaft çaplarının ve özellikle helis çaplarının aksenal kapasite üzerinde farklı zemin yoğunluklarında önemli bir etki yaptığı belirlenmiştir.

3.2. Sayısal Analiz Çalışmaları

Helisel kazıkların davranışını anlamak için son yıllarda sıklıkla başvurulan yöntemlerden birisi sayısal analiz çalışmalarıdır. Çalışmalar içerisinde en yaygın olarak kullanılan ise sonlu eleman yöntemi ile farklı zemin koşulları için geliştirilmiş zemin modelleri kullanılarak zeminin doğrusal olmayan davranışı incelenebilmektedir. Aksenal basınç yüklemesi etkisi altındaki helisel kazıkların davranışlarını incelemek amacıyla literatürde mevcut olan sayısal analiz çalışmalarından kısaca bahsedilmiştir.

Livneh ve El Naggat (2008) tarafından arazide 19 adet helisel kazık üzerinde yapılan çekme ve basınç yükleme deney sonucu ile sonlu elemanlar analizi kullanılarak helisel kazıkların aksenal yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Bu çalışmada sayısal analizlerde üç boyutlu Plaxis 3D programı kullanılmış olup zemin davranışı Mohr-Coulomb modeli ile temsil edilmiştir. Sonuç olarak sayısal analiz ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum sağlandığı, helisler arası etkileşimin basınç durumunda helis çapının 4 katı, çekme durumunda ise 5 katı mesafeden sonra ortadan kalktığı belirlenmiştir.

Elsherbiny ve El Naggat (2013) tarafından kil ve kum zemindeki helisel kazıkların basınç davranışı arazi deneyleri ve sayısal analiz modellemeleri ile ele alınmıştır. Sayısal modeller tam ölçek deney verileri ile doğrulanarak ve kalibre edilerek Abaqus programı ile yapılmıştır. Sağlaması yapılan sayısal modeller ile helisel kazıkların basınç kapasitesini ve yük transfer mekanizmasını değerlendirmek için farklı kazık konfigürasyonları ve zemin parametreleri kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Kum zemin için nihai yükler helis çapının %5'ine karşılık gelen oturma miktarına göre belirlenmiştir. Bu durumda teorik taşıma kapasitesi sayısal modele göre daha fazla çıkmıştır. Bu fark sıkı ile çok sıkı kumlar için daha belirgin olarak elde edilmiştir. Kil zemin için teorik nihai taşıma kapasitesi, sayısal modelden elde edilen nihai taşıma kapasitesinden genel itibariyle daha düşük çıkmıştır. Ana yük aktarım mekanizması, ayırık taşıma yoluyla gerçekleşmiştir. Helisler arası mesafenin azalmasıyla helislerin etkileşim içinde olduğu ve taşıma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Bu etkiyi hesaba katmak için %5D deplasmanda yorumlanan kapasiteye uygulanması gereken helis verimlilik faktörü önerilmiştir. Aynı zamanda yükün artmasıyla üst helis direncinin azaldığı, alt helis direncinin arttığı ve helisler arasında tam olarak bir silindir oluşacağı ve bu nedenle büyük oturmalara izin verilirse kum zemine yerleştirilen çoklu helisel kazıkların yenilme mekanizmasının silindirik kayma yenilmesi olacağı belirtilmiştir.

Salhi vd. (2013) tarafından kohezyonsuz zeminlerde inşa edilen helisel kazıkların davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir bilgisayar programı olan Plaxis kullanılarak helisel kazık geometrisinin modellenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir. Sayısal analiz sonuçları büyük ölçekli deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve taşıma kapasitesi silindirik ve tekil taşıma modellerinin her ikisi ile de hesaplanmıştır. Ayrıca, nihai taşıma kapasitesini hesaplamak için farklı göçme kriterleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kazıklara uygulanan yüklerden dolayı oluşan göçme şekilleri, helisel kazıkları modellemeye yönelik yaklaşımlar, kum zeminlerde helisel kazıklardaki yük transferi ve

göçme mekanizması ve helisler arası mesafe oranının (s/D) yük transfer göçme mekanizmalarına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından; i) Sayısal analizlerde helisel kazıkların non-poroz eleman, helisel plakaların ise dairesel disk şeklinde modellenmesi önerilmiştir. ii) Göçme anında silindirik bir kayma yüzeyi oluştuğu belirlenmiştir. Bundan dolayı toplam direnç üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; shaft direnci, silindirik kayma direnci ve helisel plakaların taşıma direncidir. Helisel plakalar arası mesafeden bağımsız olarak en alttaki heliste diğerlerine göre daha yüksek direnç geliştiği gözlenmiştir. iii) Helisel plakalar arası mesafe arttırıldığında ise en alttaki helisten ortadaki ve en üstteki helise yük transfer edildiği görülmüştür. Helisler arası mesafenin (s/D) artmasıyla taşıma kapasitesinde önemli artışlar meydana gelmiştir. iv) s/D oranı 1,5 ile 2 arasında olduğu durumlarda ortadaki ve en üstteki helislerde direnç geliştiği ve silindirik kayma yüzeyi yerine helislerin birbirinden bağımsız davrandığı görülmüştür.

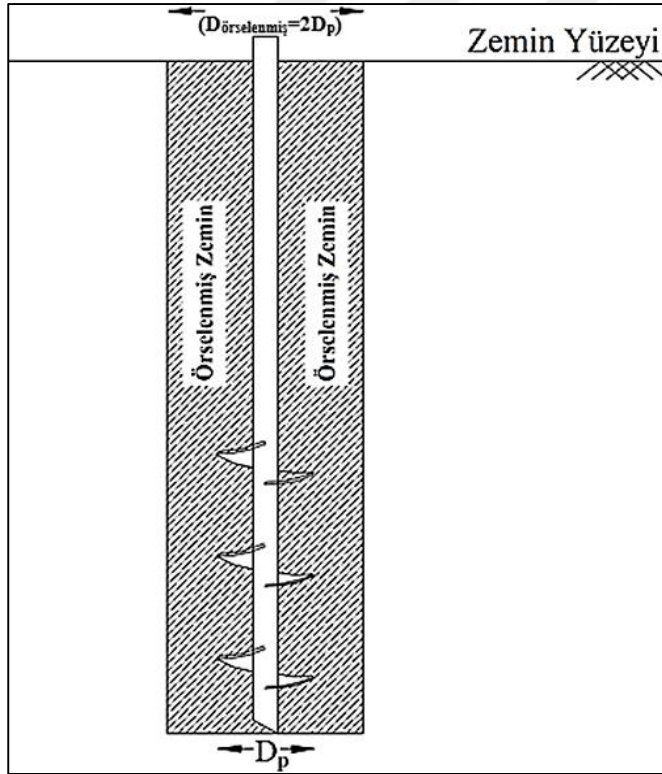
Mittal ve Mukherjee (2015) tarafından kum zemine yerleştirilen tek, çift ve üç sıra helisel kazıkların basınç yükü etkisindeki davranışı deneysel ve sayısal olarak ele alınmıştır. Sayısal analizler üç boyutlu Plaxis 3D yazılım programı kullanılarak modellenmiştir. Kum zemin davranışını modellemek için Mohr-Coulomb modeli seçilmiştir. Çalışmada gömülme oranı ve yerleşim düzenindeki değişim araştırılmıştır. Helis sayısı ve gömülme oranının artmasıyla kazık kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tek helisli kazık kapasitesi yardımıyla birden fazla helise sahip kazığın kapasitesinin hesabı için bir eşitlik önerilmiştir.

George vd. (2017) tarafından kum zemine gömülü helisel kazıkların davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar programı ile parametrik olarak araştırılmıştır. Literatürde yer alan bir arazi deneyi sonucu ve farklı bilgisayar programı ile analizi yapılmış bir sayısal model sonucu, doğrulama amaçlı kullanılmıştır. Kumun sıklığı, helisin varlığı ve konumunun kazık kapasitesini önemli oranda etkilediği görülmüştür. Ayrıca shaft çapının, helis çapına kıyasla kapasite üzerinde önemli bir rol oynamadığı belirlenmiştir.

Li ve Deng (2019) tarafından arazi ortamında kohezyonlu ve kohezyonsuz zemine yerleştirilen basınç ve çekme yüküne maruz helisel kazıkların davranışı sayısal analizlerle incelenmiştir. Sayısal modelleme iki boyutlu OpenSees platformunda BNWF yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Deneysel çalışmanın başarılı bir şekilde modellenebilmesi için etkisiz uzunluk değerinin belirlenmesi gerektiği ifade edilmiş ve yapılan parametrik çalışmada bu değer helis çapının 4 katı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, sayısal analizden

elde edilen sonuçların kazık kapasitesini %11-33 civarında daha fazla tahmin ettiği tespit edilmiştir.

Nowkandeh ve Choobbasti (2021) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar modellemesi kullanarak hem kumlu hem de killi zemin tiplerinde helisel kazıkların aksel basınç davranışı incelenmiştir. Helisel kazıklar kurulum esnasında zemini örseleyeceğinden dolayı bu etkiyi dikkate almak için bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Çalışmada sayısal modeller, ABAQUS yazılımı kullanılarak tam ölçekli basınç deney sonuçları doğrulanmıştır. Sayısal sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırılmış ve teorik sonuçların orta sıkı ve çok sıkı kumdaki helisel kazıkların nihai kapasitesini daha fazla tahmin ettiği görülmüştür. Sayısal modellerde helisel kazıkların etrafında örselenmiş bir bölgenin varsayıldığı ve helisel kazıkların yerleştirilmesinden kaynaklanan bu örselenme etkisinden dolayı kazık merkezinden helis çapının iki katı ($2D_p$) bir mesafe için zemin mukavemet parametrelerinin azaltılarak kullanılması gerektiği vurgulanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Helisel kazık etrafındaki örselenmemiş ve varsayılan örselenmiş zemin görünümü (Nowkandeh ve Choobbasti, 2021)

4. HELİSEL KAZIKLARDA TAŞIMA KAPASİTESİ YÖNTEMLERİ

Eksenel yüklü helisel kazıkların taşıma gücü kapasiteleri, çeşitli tasarım parametrelerine bağlı yöntemler vasıtasıyla tespit edilebilmekte ve birden çok yöntem kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Bunlar aşağıda sıralandığı gibidir:

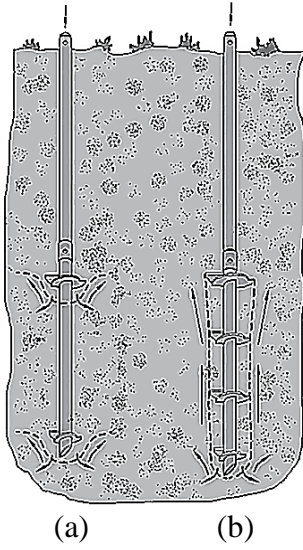
- Teorik eksenel kapasite hesabı
 - a) Silindirik kayma yöntemi
 - b) Ayrık taşıma gücü yöntemi
- Kurulum torqu-eksenel kapasite ilişkisi
- Deneysel sonuçlar-göçme kriteri ilişkisi

4.1. Teorik Eksenel Kapasite Hesabı

Zemin mekaniği prensiplerini temel alarak helisel kazıkların taşıma gücü hesabını belirleyen teorik iki yöntem mevcuttur. Bu yöntemler silindirik kayma yöntemi ve ayrık taşıma gücü yöntemidir. Kazıklarda bulunan helisel plakaların birbirine olan uzaklıklarına göre bağımsız veya beraber bir grup halinde çalışmalarına bağlı olarak bu ayırım ortaya çıkmaktadır.

Eğer helisel taşıma plakaları arasında mesafe birbirine yakın ise helis takımının beraber hareket ederek o bölgede bir silindir oluşturduğu kabul edilmektedir (Şekil 4.1). Bundan dolayı da bu yöntem silindirik kayma yöntemi denmektedir. Bu yöntem göre oluşan çeper sürtünmesinin tabanını en alttaki helisin çapı, yüksekliğini ise taşıma plakalarının arasındaki toplam mesafe oluşturmakta ve bu sürtünme yükün taşınmasını sağlamaktadır.

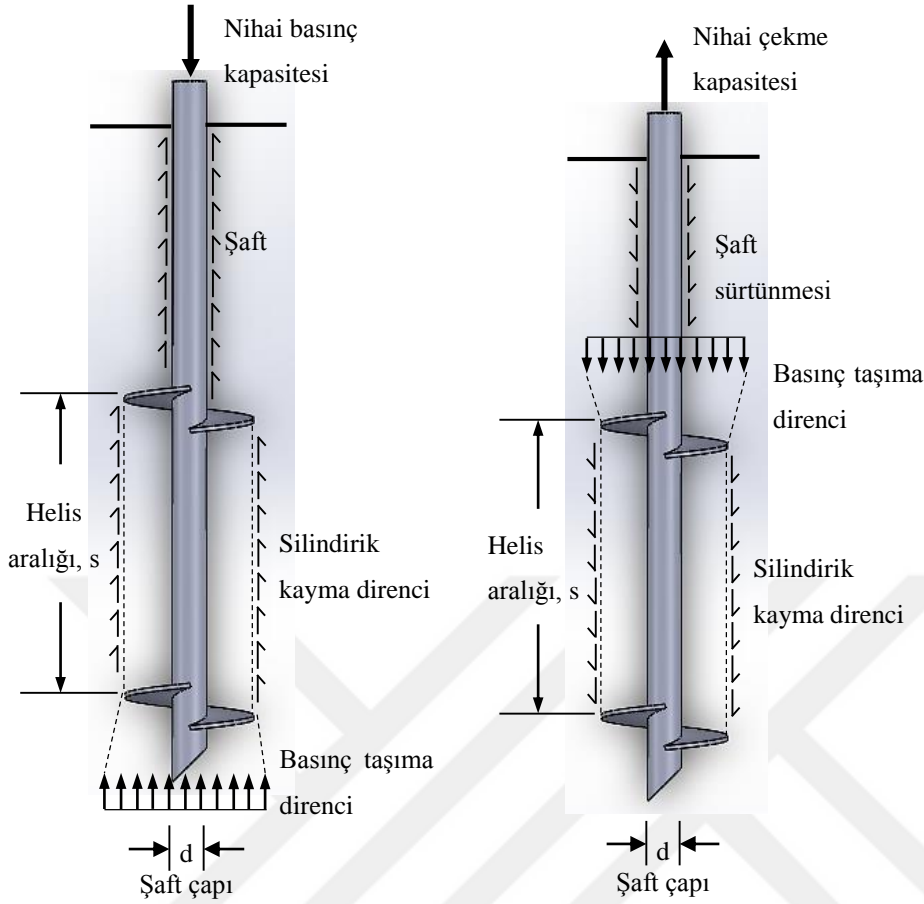
Helisel taşıma plakaları arasındaki mesafenin fazla olması plakaların birbirinden bağımsız çalışmasına neden olmaktadır (Bkz. Şekil 4.1). Toplam taşıma kapasitesinin plakaların ayrı ayrı taşıma kapasitelerinin toplamına eşit olduğu yöntem de ayrık taşıma gücü yöntemi denilmektedir (Yılmaz, 2016).



Şekil 4.1. Helisel kazık yenilme tipleri (Perko, 2009) a) ayrık b) silindirik

4.2. Silindirik Kayma Yöntemi

Şekil 4.2’de verilen silindirik kayma yüzeyi boyunca oluşan kayma direnci ve üst helisin üzerindeki shaft sürtünmesi toplamı aksenal yüklü basınç ve çekme taşıma gücünü vermektedir. Silindirik kayma yöntemi, zemin şartları, kazık geometrisi, helis sayısı ve helis aralığı gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir (Nasr, 2009). Bu yöntem, aksenal basınç ve çekme kuvvetleri altında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlere uygun olarak türetilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme ve basınç altındaki davranışı: Silindirik kayma yöntemi (Mohajerani vd., 2016)

Mitsch ve Clemence (1985) tarafından önerilen kohezyonsuz zeminler için nihai basınç kapasiteleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Eş. 4.1-4.5).

$$Q_c = Q_{\text{helis}} + Q_{\text{taşıma}} + Q_{\text{şaft}} \quad (4.1)$$

$$Q_{\text{helis}} = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi \quad (4.2)$$

$$Q_h = A_h q N_q \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{şaft}} = \frac{1}{2} P_s H_{\text{eff}}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4.4)$$

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_H N_q + \frac{1}{2} P_s H_{\text{eff}}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4.5)$$

Burada,

Q_c = nihai basınç kapasitesi

Q_t = nihai çekme kapasitesi

K_s = boyutsuz yanal zemin basıncı katsayısı

K_u = çekme için boyutsuz yanal zemin basıncı katsayısı

ϕ =içsel sürtünme açısı ($^\circ$)

γ' = efektif birim hacim ağırlık (kN/m^3)

A_H = en alttaki helisin net alanı (m^2)

D_a = ortalama helis (m)

N_q = boyutsuz taşıma kapasitesi faktörü ($N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan(45 + \frac{\phi}{2})^2$)

H = gömülü kazık derinliği (m)

H_{eff} = efektif şaft boyu (m)

P_s = şaft çevre uzunluğu (m)

H_b = en alttaki helisin derinliği (m)

H_t = en üstteki helis derinliğidir (m) olarak değerlendirilmektedir.

Nasr (2004) tarafından gömülme oranı (H/D) 5'ten az (yüzeysel durum) ise şaft sürtünmesinin ihmal edilebileceği ortaya konulmuştur. Böylece eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır (Eş. 4.6).

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_H N_q \quad (4.6)$$

Basınç yükleri altında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin analizindeki fark, kohezyonlu zeminlerde içsel sürtünme açısı yerine drenajsız kayma mukavemetinin kullanılmasıdır.

4.3. Ayrık Taşıma Gücü Yöntemi

Bu yöntem her bir helisel taşıma plakasının bağımsız davranması ile açıklanmakta, dolayısıyla toplam nihai kapasite şaft direnci ile ayrı ayrı helisel plakaların kapasitelerin toplamı ile elde edilmektedir (Livneh ve El Naggar, 2008; Sakr, 2009; Sakr, 2011). Aynı şekilde bu yöntem hem basınç hem de çekme yükleri altında kullanılmaktadır. Helisel kazıkların döndürülerek zemine yerleştirilmesi ve bunun sonucunda zemini örseleyerek ilerlemesinden dolayı, helis altındaki örselenmemiş zemin parametreleri basınç altındaki

yüklemelerde taşıma kapasitesini etkilemekte iken, örselenmiş zemin parametreleri de çekme altındaki taşıma kapasitesini etkilemektedir. Eksenel basınç ve çekme yükleri altındaki ayırık taşıma gücü metodu Şekil 4.3'te verilmiştir.

Kohezyonsuz zeminlerde ayırık taşıma gücü yöntemi ile helisel kazıkların basınç kapasitesi aşağıdaki gibi belirlenmektedir (Eş. 4.7-4.8).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q + \frac{1}{2} P_s H_{\text{eff}}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4.7)$$

$$Q_t = \sum Q_h \quad (4.8)$$

Burada;

Q_c = nihai basınç kapasitesi (kN)

Q_t = nihai çekme kapasitesi

Q_h = bireysel helis taşıma kapasitesi

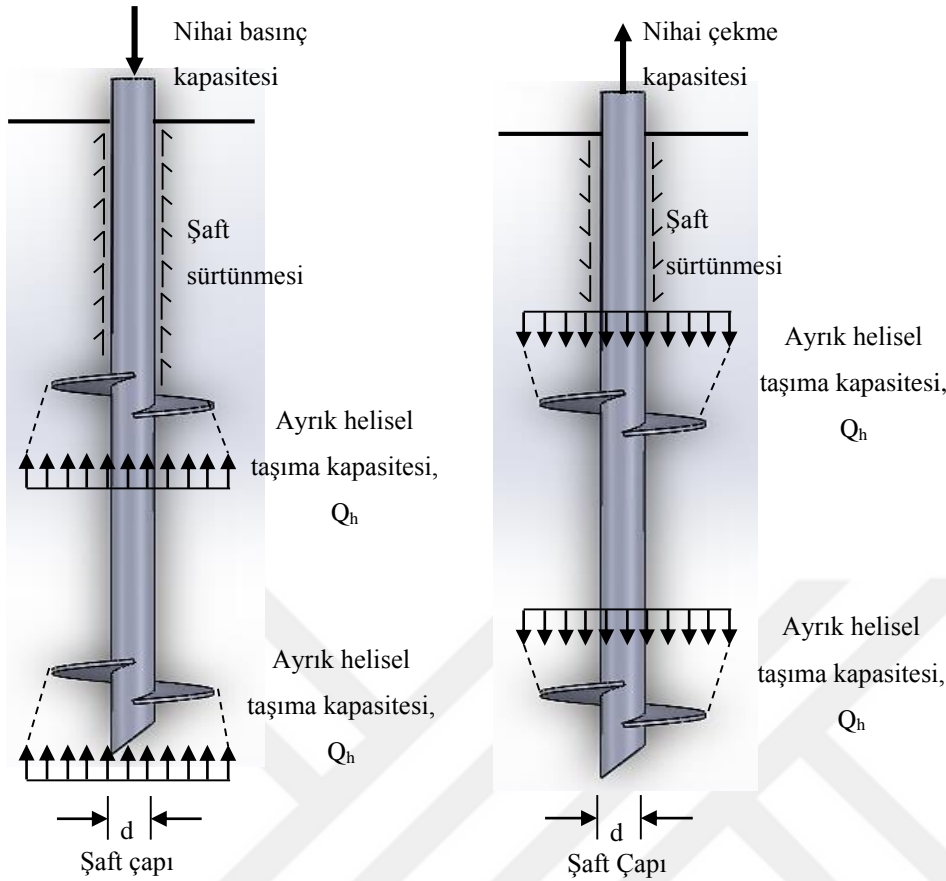
A_i = helis net yüzey alanı ($(D^2 - d^2)/4$) (D: helis çapı) (d: shaft çapı).

H_i = helis derinliği (m)

George ve vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, bir kazığın nihai kapasitesinin genel olarak zemin tipine, kazığın boyutlarına ve kazık kurulum yöntemine bağlı olduğu ifade edilmiştir. İlk iki faktörün, kalibre edilmiş model üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı sayısal incelemeye dayalı teorik ilişkiyi oluşturduğu belirlenmiş, üçüncü faktörde ise taşıma kapasitesi faktörleri (N_q ve N_γ) sırasıyla $0.7R_q$ ve $0.55R_g$ azaltma faktörleri (%30 ve %45 azalma olduğu varsayımı) ile çarpılmak suretiyle kurulum yönteminin etkisi formülasyona yansıtılmıştır.

Elsherbiny ve El Naggat (2013) tarafından benzer bir taşıma kapasitesi azaltma faktörü (R) kullanılarak kum zemindeki helisel kazıklar için ayırık yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada da teorik kıyaslama yapılırken ayırık yöntem için N_q değerleri $0.7 R_q$ azaltma faktörü ile çarpılarak hesaplamalar yapılmıştır. Azaltma faktörü eklenmiş haliyle eşitlik aşağıdaki hale gelmiştir (Eş. 4.9).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q R_q + \frac{1}{2} P_s H_{\text{eff}}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4.9)$$



Şekil 4.3. Çekme ve basınç altındaki davranışı: Ayrık taşıma gücü yöntemi (Mohajerani vd., 2016)

4.4. Kurulum Torku-Eksenel Kapasite İlişkisi

Önceki bölümde de ifade edildiği gibi helisel kazıkların nihai kapasitelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan teorik yöntemler silindirik kayma ve ayrıklı taşıma gücü yöntemleridir. Diğer bir yöntem ise, helisel kazıkların en önemli özelliklerinden biri olarak kabul edilen kurulumları sırasında uygulanan tork değerlerinin okunarak bu tork değerleri ile nihai zemin kapasitesi arasında ampirik bir ilişkinin kurulabilmesidir. Bu yöntem kazık çakma kapasitesi ile kazık kapasitesinin belirlenmesine benzer bir durumdur (Souissi, 2019).

Çoğu durumda uygulanabilen tork, bir bomlu kamyon, mini yükleyici veya modifiye edilmiş ekskavatör üzerine monte edilen ve kurulum sırasında kazık başlığına takılan bir tahrik kafası (hidrolik olarak çalıştırılan döner motor) aracılığıyla sağlanmaktadır. Helisel kazık büyüklüğü, zemin durumu gibi etkenler montaj sırasında tercih edilecek tork motorunu da

etkilemektedir. Kurulum torkunun hem çekme hem de basınç yükleri için helisel kazığın aksel kapasitesini tahmin etmek için kullanılabilceği kabul edilmektedir. Genel olarak tork değeri zemin şartlarına ve kazığın geometrik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Helisel kazıkların aksel kapasitesinin (basınç-çekme) kurulum torkuna bağlı ampirik ifadesi Eş. 4.10'daki gibidir.

$$Q = Kt T \quad (4.10)$$

Burada Q= helisel kazık kapasitesi, Kt= ampirik tork faktörü ve T= montaj torku değeridir. Helisel kazık kapasitesi ile tork arasındaki ilişki ilk olarak literatürde Hoyt ve Clemence (1989) tarafından tarif edilmiştir ve bu ilişki helisel kazık endüstrisinde bir kilometre taşı olarak kabul edilmektedir (Perko, 2009). Hoyt ve Clemence (1989) tarafından ampirik tork faktörünün (Kt) helisel taşıma plaka sayısı, çapı ve zemin koşullarından bağımsız sadece şaft çapına bağlı olan bir sabit olduğu savunulmaktadır. Hoyt ve Clemence (1989) tarafından Kt değeri şaft çapı 89mm'den küçük ise 33 m^{-1} , şaft çapı 89mm'ye eşit ise 23 m^{-1} ve şaft çapı 219mm ise $9,8 \text{ m}^{-1}$ olarak alınmıştır.

Sakr (2015) tarafından yapılan çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde helisel kazıkların kurulum torku ve aksel kapasiteleri arasındaki etkileşim incelenmiştir. Bu kapsamda kohezyonsuz zeminlerde helisel kazık kurulumunda burulma direncini tahmin etmek için teorik bir model önerilmiştir. Teorik tork modeli, farklı sahalardan elde edilen montaj kayıtları kullanılarak doğrulanmıştır. Bu teorik model sonucunda elde edilen eşitlik aşağıda yer almaktadır (Eş. 4.11).

$$T = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{i=8} T_{ij} = \sum_{j=1}^N T_{1j} + T_{2j} + T_{3j} + T_{4j} + T_{5j} + T_{6j} + T_{7j} + T_{8j} \quad (4.11)$$

Burada, N=helis sayısı, T_{1j} kazık şaftı üzerindeki burulma momenti (kNm), $T_{2j} - T_{8j}$ =bir j helisine etki eden burulma momenti bileşenleridir (kNm) (Şekil 4.4).

Kazık şaftına uygulanan pasif yanal zemin basıncı P_1 kuvvetinin iki bileşeninden, P_{1x} şafta etki eden momenti (T_1), P_{1y} helis üzerinde hareket eden momenti (T_{2j}) üretmektedir (Eş. 4.12- 4.13).

$$T_1 = \sigma'_v \cos(\delta) K_p K_f \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.12)$$

$$T_{2j} = \sigma'_{vj} \sin(\delta) K_p \tan(\delta + \psi) \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.13)$$

Burada

σ'_v = kazık şaftı boyunca ortalama efektif düşey gerilme

σ'_{vj} = helis j'nin efektif düşey gerilme

K_p = pasif zemin basıncı katsayısı [$K_p = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$]

K_f = kazık şaftı ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı ($K_f = \tan\delta$)

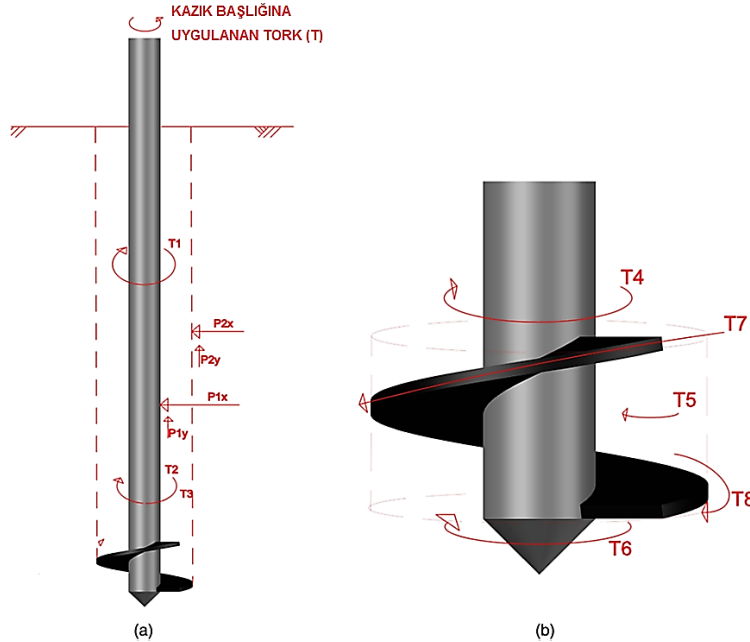
δ = kazık ile zemin arasındaki ara yüz sürtünme açısı ($\delta = 2/3\phi$)

ϕ = içsel sürtünme açısı

ψ = eğim açısı [$\psi = \tan^{-1}(p/(\pi D))$]

D = helis çapı

d = kazık şaft çapıdır.



Şekil 4.4. Sakr (2015) tarafından önerilen teorik tork modeli (a) genel dayanım momentleri (b) helis seviyesinde dayanım momentleri

Helis j çevresinin dış tarafına etki eden P_{2y} kuvveti nedeniyle helis üzerine etkiyen dayanım momentini (T_{3j}); Eş. 4.14'ten,

$$T_{3j} = \sigma'_{vj} \sin(\delta) K_p \tan(\delta + \psi) \frac{\pi D^2}{2} \quad (4.14)$$

Aktif zemin basıncı nedeniyle helislerin üst yüzeyine etki eden dayanım momenti (T_{4j}) aşağıdaki eşitlikten (Eş. 4.15),

$$T_{4j} = \sigma'_{vj} K_a \tan(\delta + \psi) \frac{\pi(D^3 - d^3)}{12} \quad (4.15)$$

Pasif zemin basıncı nedeniyle heliselin alt yüzeyine etki eden direnç momenti (T_{5j}) aşağıdaki eşitlikten (Eş. 4.16),

$$T_{5j} = \sigma'_{vj} K_p \tan(\delta + \psi) \frac{\pi(D^3 - d^3)}{12} \quad (4.16)$$

Helisin çevresi boyunca oluşan dayanım momenti (T_{6j}) aşağıdaki eşitlikten (Eş. 4.17),

$$T_{6j} = \sigma'_{vj} K_p p \tan(\varphi) \frac{\pi D^2}{2} \quad (4.17)$$

j helisinin dış çevresinin yan yüzeyine etki eden dayanım momenti (T_{7j}) aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır. Burada $t_j = j$ helisin kalınlığıdır (Eş. 4.18).

$$T_{7j} = \sigma'_{vj} K_p t_j k_f \frac{\pi D^2}{2} \quad (4.18)$$

Zemine giren uç kısmın neden olduğu moment (T_{8j}) ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır (Eş. 4.19).

$$T_{8j} = (D - d) N_q t_j \sigma'_{vj} \frac{(D+d)}{4} \quad (4.19)$$

Ampirik tork faktörlerinin (K_t), yükleme tipinden (basınç veya çekme) bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Örneğin Hoyt ve Clemence (1989) tarafından yükleme tipinden bağımsız olarak shaft çapı 89 mm helisel kazıklar için $9,8 \text{ m}^{-1}$ değerinde bir K_t tork faktörü önerilmiştir (Sakr, 2015). Literatürde K_t değerleri, temel olarak küçük çaplı kazıklar (90 mm'den az) için çekme deneylerinin sonuçlarına dayandığı ve bundan dolayı Sakr (2015) tarafından K_t

değerlerinin özellikle büyük çaplı helisel kazıkların veya basınç altındaki helisel kazıkların aksel kapasitelerinin tam olarak tahmin edilemediği ifade edilmektedir. Bu doğrultuda basınç durumu için K_c (basınç tork faktörü) ve çekme durumu için K_t (çekme tork faktörü) değerlerini içeren ayrı ayrı formülasyonlar önerilmiştir. Aksel basınç ve tork arasındaki oran olarak ifade edilen K_c değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Eş. 4.20).

$$K_c = \frac{\pi d L q_s + \sum_{j=1}^N A_{hj} (\gamma D_{hj} N_q + 0.5 \gamma D_j N_\gamma)}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^8 T_{ij}} \quad (4.20)$$

Burada;

$$Q_{hj} = A_{hj} (\gamma D_{hj} N_q + 0.5 \gamma D_j N_\gamma) \quad (4.21)$$

A_{hj} = helis alanı

γ = zemin birim hacim ağırlığı,

D_{hj} = helisel plaka derinliği,

D_j = helisel plaka çapı,

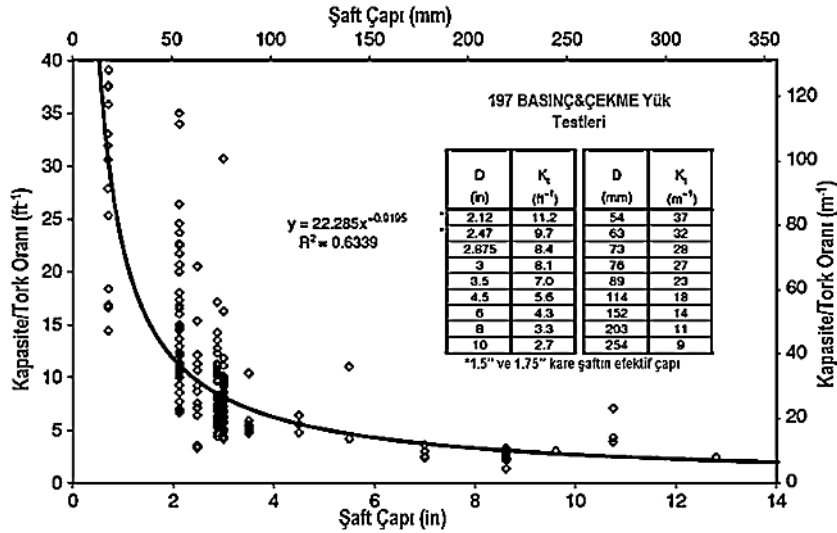
N_q ve N_γ = yerel kayma koşulları için taşıma kapasitesi faktörleridir.

Perko (2009) tarafından hem basınç hem de çekme durumları için yapılan 300'den fazla yükleme deneyinin üstel regresyon analizine dayalı olarak K_t ile etkili şaft çapı (d_{eff}) arasında bir ampirik ilişki önerilmiştir (Harnish, 2015). Veri seti, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi en uygun çizgiyi oluşturmak için grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu durumda çekme tork faktörüne ait ampirik eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır (Eş. 4.22).

$$K_t = \frac{\lambda_k}{d_{eff}^{0.92}} \quad (4.22)$$

Burada λ_k = eğri uygunluk faktörü ($1433 \text{mm}^{0.92}$), d_{eff} = etkili şaft çapıdır (mm).



Şekil 4.5. En iyi uyum için ampirik tork korelasyon çizgisi (Perko, 2009)

Ghaly ve Hanna (1991), Sakr (2015), Spagnoli (2017) gibi birçok araştırmacı tarafından kum zemine kurulumu yapılan helisel kazıkların helisel plaka çapı, helis yüksekliği, tekli-çoklu helis ve zemin durumu gibi birçok etkiyi dikkate alarak tork değerinin bulunmasına yönelik teorik modeller önerilmiştir.

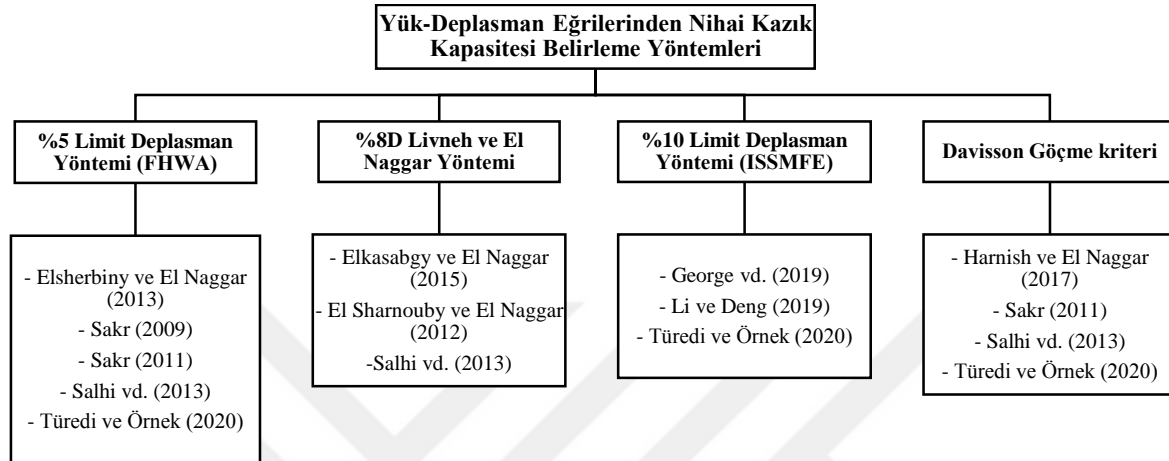
Ghaly ve Hanna (1991) tarafından montaj sırasındaki geometrik parametreleri değerlendirmek için farklı yoğunluk durumları altında kuru kumda laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, tork değerleri herhangi bir teorik yöntemle gerek kalmadan tork ölçüm sistemi vasıtasıyla derinlik boyunca kaydedilmiştir. Derinlik boyunca izlenen tork değerleri ile literatürde önerilen 3 farklı tork faktörü (Hoyt ve Clemence (1989) $K_t=33 \text{ m}^{-1}$; Sakr (2015) K_c ; Perko (2009) K_t) kullanılarak nihai yük değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, nihai yük değerleri (göçme kriterleri ile bulunan) ile tork değerleri vasıtasıyla tork faktörü (K_t) hesaplanarak yorumlanmıştır.

4.5. Deneysel Sonuçlar-Göçme Kriteri İlişkisi

Teorik yöntemlerden ve kurulum torku ilişkisinden farklı olarak, deneysel sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri ile helisel kazıklarda taşıma gücü kapasiteleri elde edilebilmektedir (International Code Council, 2009). Kazıkların aksenal basınç kapasitelerini yorumlamak için kazık yükleme deney sonuçlarından elde edilen yük-

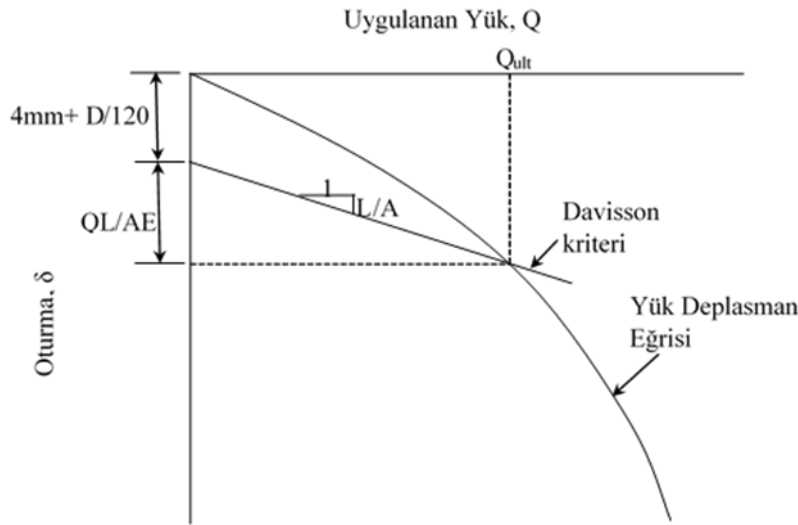
deplasman eğrileri ile Davisson göçme kriteri, Brinch Hansen yöntemi, L₁-L₂ yöntemi, FHWA (%5D) yöntemi ve ISSMFE (%10D) yöntemi gibi çok sayıda göçme kriteri (helisel kazık nihai taşıma kapasitesi) bulunmaktadır (Şekil 4.6). Bu kriterlerden bazılarını aşağıda kısaca değinilmiştir.



Şekil 4.6. Nihai kazık kapasite belirleme yöntemleri ve literatürde kullanıldıkları çalışmalar

4.5.1. Davisson göçme kriteri (1972)

Davisson göçme kriteri, esas olarak hızlı yükleme yöntemlerine göre test edilen çakma kazıklara yöneliktir. İzin verilebilir yük değerine karşılık kazık uzunluğunu ve boyutunu dikkate alan izin verilen maksimum hareketin önceden belirlmesine imkân sağlayan bir yöntemdir. Nihai yük kapasitesi doğrudan toplam yer değiştirmeye, yani kazığın elastik sapmalarına ve ötelenmenin (offset) toplamına bağlıdır (Şekil 4.7). Bu durumda nihai yük kapasitesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Eş. 4.23).



Şekil 4.7. Davisson göçme kriteri (1972)

$$Q_u = QL/AE + (D/120 + 4) \text{ (mm)} \quad (4.23)$$

Burada

D = kazık çapı

Q = uygulanan yük

δ = Oturma

L = kazık boyu

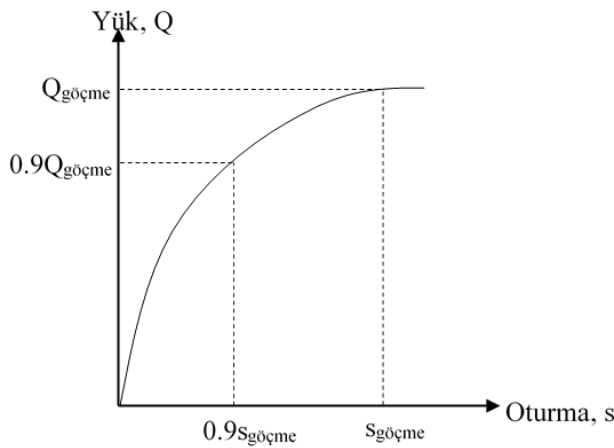
A = kazık kesit alanı

E = elastisite modülüdür (çelik = 200000MPa, beton = $4700 \sqrt{f'_c}$ ($f'_c = 28$ gün dayanım MPa)).

Davisson göçme kriteri, yük-deplasman ölçüm esnasında oluşabilecek hatalara karşı çok hassas olup, düzenli ekipman ve ölçümlerin doğruluğunu gerektiren bir yöntemdir. Buna karşın, Davisson yöntemi (Ofset Limit Yöntemi), yükleme deney sonuçlarından nihai kazık yükünü tahmin etmek için iyi bilinen ve yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

4.5.2. Brinch Hansen yöntemi (1963)

Sabit yükleme hızında yapılan kazık yükleme deneylerinde kazık nihai kapasitesinin belirlenmesinde en uygun yöntem olarak görülmektedir. Bu yöntemde ilk etapta yük-oturma eğrisi ile belirlenen göçme yükünün %90'ına karşılık gelen yük bulunmakta, sonrasında ise bu yüke ait deplasman değeri belirlenip 2 ile çarpılmaktadır. Ardından bu oturmaya neden olan yük değeri de göçme yükü olarak belirlenmektedir (Şekil 4.8).



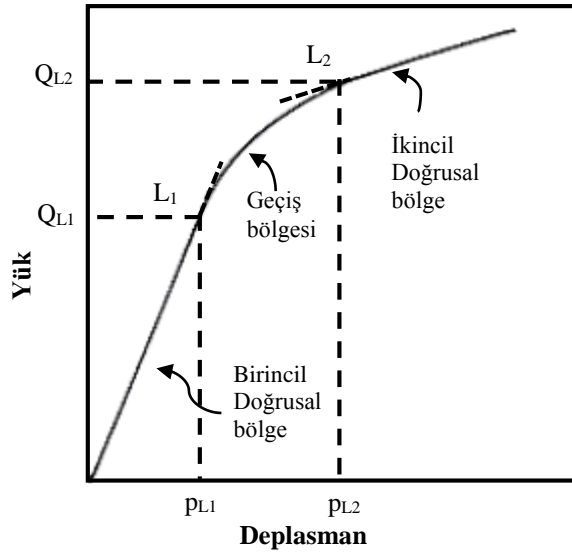
Şekil 4.8. Brinch Hansen yöntemi (1963)

4.5.3. FHWA (%5D) yöntemi

Bu yöntemde, kazık uç çapının %5'i kadar deplasmana karşılık gelen yük değeri nihai aksenal basınç kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Uç çap, helisel kazıklarda helis çapına, çakma kazıklarda ise shaft çapına eşit olarak alınmaktadır (O'Neill ve Reese, 1999).

4.5.4. L₁-L₂ yöntemi

Hirany ve Kulhaway (1989) tarafından yapılan çalışmalarda kazıkların yükleme sonuçlarına benzer üç bölgeyi (doğrusal, geçici ve nihai doğrusal bileşenler) gösteren yük deplasman eğrileri için L₁-L₂ göçme kriteri geliştirilmiştir (Şekil 4.9). Burada L₁ noktası, kazığın sürtünme direncini temsil eden ilk doğrusal bileşenin sonundaki yüke karşılık gelmektedir (Q_{L1}). L₂, ikinci doğrusal bileşenin başlangıcındaki yükü değeri olmaktadır (Q_{L2}). Nihai yük yorumlama yöntemlerinin çoğu, kazıkların doğrusal olmayan geçiş bölgesini veya nadiren nihai doğrusal bölgeye düşen kapasitesini tanımlamaktadır (Elkasabgy ve El Naggar, 2015). Sakr (2011) tarafından kohezyonsuz zeminlerde yüksek kapasiteli helisel kazıkların karakteristik kurulum ve performansının incelendiği çalışmada nihai basınç kapasitesi değerlendirilirken L₁-L₂ yöntemi, %5D yöntemi ve Davisson göçme kriteri birlikte sunulmuştur. L₁-L₂ yönteminde %5D yöntemine göre yaklaşık %13 ile %19 daha düşük değerler, Davisson göçme kriterine göre ise yaklaşık %20 ila %30 arasında daha fazla değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.9. L₁-L₂ yöntemi (Elkasabgy ve El Naggar, 2015)

4.5.5. ISSMFE (%10D) yöntemi

Bu yöntem, kazık çapının %10'una karşılık gelen deplasman değerini sağlayan yük miktarını nihai kazık kapasitesi olarak ifade eden bir yöntemdir. Bu yöntemin, büyük çaplı kazıkların ve bazı kazık türlerinin kapasitesini fazla tahmin ettiği ifade edilmektedir.

4.5.6. %8D yöntemi

Bu yöntem, küçük çaplı helisler ile ince helisel kazıklara yönelik olarak önerilmiştir (Elkasabgy ve El Naggar, 2015). Bu yöntemde nihai yük değeri, en büyük helis çapının %8'i ile kazığın elastik basıncını aşan, kazık başı hareketine karşılık gelen yük değeri olarak tanımlanmaktadır. Göçme anındaki deplasman değeri (S) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır (Eş. 4.24).

$$S = \frac{PL}{AE} + 0.08D \quad (4.24)$$

Burada

P = Göçme anındaki uygulanan yük

L = Kazık uzunluğu

A = Kazık çapı kesit alanı

E = Çelik için elastisite modülü

D = En büyük helis çapıdır.

Bu tez çalışmasında, deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman eğrilerinden nihai göçme yükünü bulmak için aksenal basınç altındaki helisel kazık çalışmalarında sıkça kullanılan FHWA (%5D) yöntemi, ISSMFE (%10D) yöntemi, %8D yöntemi (Livneh ve El Naggar, 2008) ile Davisson göçme kriteri yöntemleri kullanılmıştır.



5. MATERYAL METOD

5.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Zemin malzemesi tedariği sürecinde inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir olması ve kolay bulunabilmesi dikkate alınmıştır. Bu amaçla, karayolu uygulamalarında, yapı inşaatlarında ve dolgu uygulamalarında kullanılan ve tedarik konusunda süreklilik sağlayabilecek bir kum ocağından zemin malzemesi seçilmiştir.

Kum ocağından farklı çaplarda numuneler getirilerek deneylerde kullanılacak dane çapını belirlemek için ön çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla özel elek düzeneği imal edilerek farklı granülometriye sahip zeminler elde edilmiş ve performansları değerlendirilmiştir (Resim 5.1).

Hem laboratuvar model deneylerinde hem de büyük ölçekli arazi deneylerinde kullanılabilirlik durumu zemin seçimini önemli hale getirmiştir. Yapılan ön deneyler ve değerlendirmeler sonucunda model deneylerde helisel plakalar arasına sıkışmayacak boyutta olması, deneyler arasında bir tutarlılık sağlanabilmesi ve farklı zemin sıklıkları / farklı yüklemeler altında helisel kazık davranışının daha iyi yorumlanabilmesi adına küçük aralıkta derecelenmiş bir zemin granülometrisinin (0.18mm-2.00m) seçilmesine karar verilmiştir.

Zemin malzemesi İSTAŞ A. Ş. İskenderun kum ocağından temin edilmiştir. Zeminin endeks ve kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda bir seri deney gerçekleştirilmiştir.



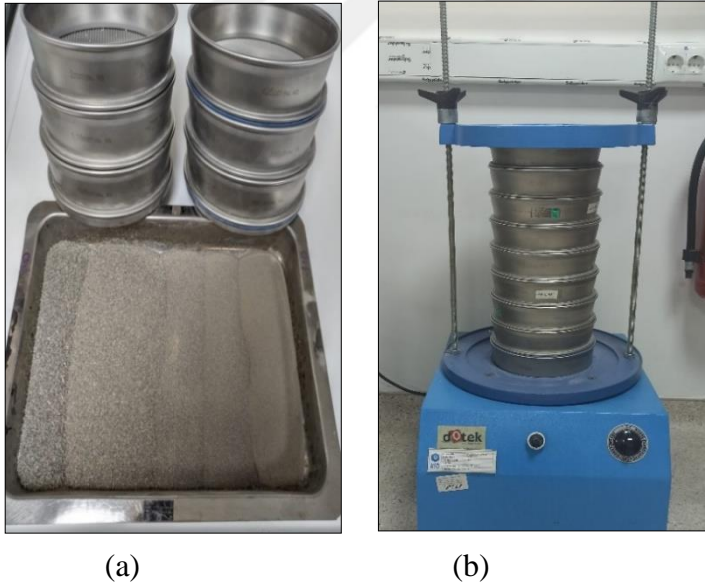
Resim 5.1. Özel imalat elek düzeneği

5.2. Endeks Deneyleri

Tedarik süreci kolay ve hem laboratuvar model hem de büyük ölçekli arazi deneylerinde kullanılabilen uygun zemin seçimi yapıldıktan sonra deneylerde kullanılacak zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla, TS (Türk Standartları) ve ASTM (American Standards of Testing Materials) standartlarında geleneksel laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

5.2.1. Elek analizi deneyi

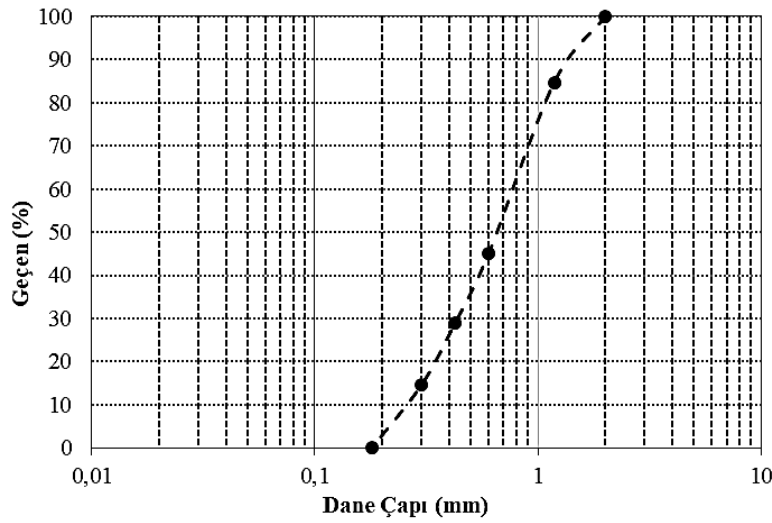
Deneysel çalışmada kullanılan numuneler, ASTM D2487 (2011) standardına göre önceden belirlenen bir seri elekten geçirilerek elek analizine tabi tutulmuştur (Resim 5.2). Elek analizi deney sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Dane çapı dağılımı eğrisinden yararlanılarak zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne (USCS) göre kötü derecelendirilmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1).



Resim 5.2. (a) Zemin ve elek seti (b) Elek sallama düzeneği

Çizelge 5.1. Elek analizi sonuçları

Parametre	Birim	Değer
Efektif dane çapı, D_{10}	mm	0,261
D_{30}	mm	0,441
D_{60}	mm	0,775
Üniformluk katsayısı, C_u	-	2,973
Süreklilik katsayısı, C_r	-	0,961
Zemin sınıfı (USCS)	-	SP



Şekil 5.1. Dane çapı dağılımı eğrisi

5.2.2. Rölatif sıkılık deneyi

Kohezyonsuz zeminlerde rölatif sıkılık “ D_r ” terimi ile zeminin sıkılık durumu ifade edilmektedir. Rölatif sıkılık Eş. 5.1 ve 5.2’den elde edilmektedir.

$$D_r = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (5.1)$$

$$D_r = \frac{\gamma_{k_{maks}}}{\gamma_k} \frac{\gamma_k - \gamma_{k_{min}}}{\gamma_{k_{maks}} - \gamma_{k_{min}}} \quad (5.2)$$

Burada; e_{maks} ve e_{min} sırasıyla zeminin en gevşek ve en sıkı durumdaki boşluk oranları, e ise zeminin rölatif sıkılığının belirlenmek istendiği durumdaki boşluk oranıdır. $\gamma_{k_{maks}}$ ve $\gamma_{k_{min}}$ sırasıyla maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_k ise zeminin rölatif sıkılığının belirlenmek istendiği durumdaki kuru birim hacim ağırlığıdır. Kohezyonsuz zeminler D_r değerlerine göre sınıflandırılmaktadır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Kohezyonsuz zeminlerde sıklık (Özaydın, 2016)

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

Deney kumunun minimum ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ASTM D4253 (2016) ve ASTM D4254 (2016)'ya göre belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlıkların belirlenmesinde en büyük dane boyutu için önerilen hacme sahip kap kullanılmıştır. γ_{kmin} değeri elde edilirken, kum numuneler kap içerisinde herhangi bir sıkıştırmaya tabi tutulmadan yerleştirilmiştir. γ_{kmaks} değeri elde edilirken ise yoğunluk kabına tokmak ile titreşim verilmek suretiyle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Deneyler gevşek ve sıkı zemin durumları için üçer kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Deneylerde sıklık derecesi D_r =%30-35 (γ_k =1,552 gr/cm³), D_r =%50-55 (γ_k =1,601 gr/cm³) ve D_r =%75-80 (γ_k =1,681 gr/cm³) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu durumda deneylerde kullanılan kumun sıklık derecesi Çizelge 5.2'ye göre %30-35 için gevşek, %50-55 için orta sıkı ve %75-80 için ise sıkı olarak belirlenmiştir.

5.2.3. Piknometre deneyi

Deney kumunun dane birim hacim ağırlığını belirlemek için yapılan piknometre deneyi sonucunda γ_s =2,722 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmaya ait görseller Resim 5.3'te verilmiştir.



Resim 5.3. (a) Deney seti (b) Vakumlama işlemi

5.2.4. Kesme kutusu deneyi

Kum numuneler 150 mm×150 mm boyutlarında kare kesitli kesme kutusuna, yüksekliği 118 mm olacak şekilde gevşek ve sıkı halde yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır (Resim 5.4). Her iki sıklık durumu için kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde numuneler, $\sigma_1=22$ kPa, 44 kPa ve 66 kPa değerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabi tutulmuşlardır. Birden fazla kez tekrarlanan deneylerde deney kumunun gevşek haldeki kayma mukavemeti açısı $\phi=30-32^\circ$ arasında ve sıkı haldeki kayma mukavemeti açısı $\phi=41-44^\circ$ arasında elde edilmiştir.



Resim 5.4. a) Kum zemin numunesinin kesme kutusuna yerleştirilmesi aşaması b) kesme kutusu deneyi uygulama aşaması

5.3. Laboratuvar Model Deneyleri

Model deneylerde zemin ortamı sıkı ve gevşek koşullarda hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, helisel kazıktaki plaka sayısı, plaka genişliği ve birden fazla plakadan oluşan helisel kazıktaki plakalar arasındaki uzunluğun aksel basınç yükü taşıma kapasitesine etkisini araştırmak amacıyla farklı tiplerde hazırlanmış kazıklar kullanılmıştır. Çalışmada aksel basınç yüküne maruz farklı çaptaki helisel plakalı kazıkların göçme mekanizmaları ve tork değişimleri de incelenmiştir. Deney düzeneği, yükleme sistemi, deneylerde kullanılan zeminin özellikleri ve deneysel çalışma aşamaları aşağıda açıklanmaktadır.

5.3.1. Model deney düzeneği

Deneysel çalışmalar, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda, iç ölçüleri 1500 mm x 1200 mm x 1000 mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) olan dikdörtgen kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir. Resim 5.5'te görüldüğü gibi deney kasası iskeleti 8 mm kalınlıktaki çelik profilden imal edilmiş olup ön ve sol yan yüzeyi 5 mm kalınlıktaki cam panelden, sağ yan ve arka yüzeyleri ile alt tabanı ise 3 mm kalınlıktaki metal sac panel malzemedен oluşturulmuştur. Ayrıca deney kasasında 3 farklı bölme oluşturmak için iki adet 3 mm kalınlığında sac malzemedен hazırlanmış paneller bulunmaktadır.

Cam yüzeyler, 5'er cm çizgilerle işaretlenmiş olup zemin yerleşimi bu çizgiler vasıtasıyla yapılmıştır. Deney kasasının rijitliğini arttırmak amacı ile kasanın kenarlarına enine ve boyuna paralel doğrultuda ikişer adet çelik profil ilave edilmiştir. Yükleme motoru deney kasasına üstte raylı sistem üzerine sabitlenmiş ve düşeyde 60°'ye kadar açı yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bu raylı sistem sayesinde kasa üzerinde her doğrultuda herhangi bir noktaya yükleme yapılabilmektedir.

Deney kasası üzerinde sağ kenardan doğrusal bir ray üzerine sabitlenmiş helisel kazık montaj düzeneği bulunmaktadır. Bu düzenek deney kasası üzerinde herhangi bir noktaya hareket ettirilerek helisel kazıklar istenilen her noktaya monte edilebilmektedir (Bkz. Resim 5.5).



Resim 5.5. Laboratuvar deney düzeneği

5.3.2. Zemin aktarma düzeneği

Zemin aktarma düzeneği, deneysel çalışmalar sırasında deney kasasına yakın yerdeki haznelerden zemin malzemesinin alınarak deney kasasına homojen biçimde aktarılması ve işgücü açısından kolaylık sağlanması için tasarlanmıştır. Resim 5.6'da görüldüğü üzere düzeneğin üst kısmında GAMAK firması tarafından üretilmiş 50 d/dak hızda dönme yapabilen ART.NR.023526 seri numaralı elektrik motoru yer almaktadır. Alt kısmı ise zemin malzemesini helezonlu sisteme iletmesi için 25° eğimli hazneden oluşmaktadır. Düzenek, 25 cm çapında 45° eğimli elik boruya sabitlenmiş ve istenilen yere hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır.



Resim 5.6. Zemin aktarma düzeneği ve zemin depolama haznesi

5.3.3. Gevşek zemin yerleştirme elek düzeneği

Zemin aktarma düzeneğinden gelen zeminin deney kasasına yağmurlama şeklinde aktarılması için 1190 mm x 1190 mm ebatlarında ahşap çerçeveden oluşturulmuş, göz açıklığı 5 mm x 5 mm boyutlarında elek hazırlanmıştır (Resim 5.7). Bu düzenek deney kasasının üst kısmına yerleştirilen caraskal yardımıyla istenilen seviyede durabilmektedir.



(a)

(b)

Resim 5.7. Deney kasasına yerleştirilmiş eleğin a) dıştan görünümü b) içten görünümü

5.3.4. Titreşimli sıkıştırma aleti

Deney çalışmaları sırasında deney kasasında sıkıştırma yapabilmek amacıyla kasa içerisine sığabilecek ebatta bir titreşimli sıkıştırma aleti tasarlanarak imal edilmiştir. Yaklaşık 18kg ağırlığa, 60cm yüksekliğe ve 30x25 cm alt tabla boyutlarına sahip bu alette farklı oranlarda titreşim verebilme özelliği bulunmaktadır (Resim 5.8).



Resim 5.8. Titreşimli sıkıştırma aleti

5.3.5. Model helisel kazıklar

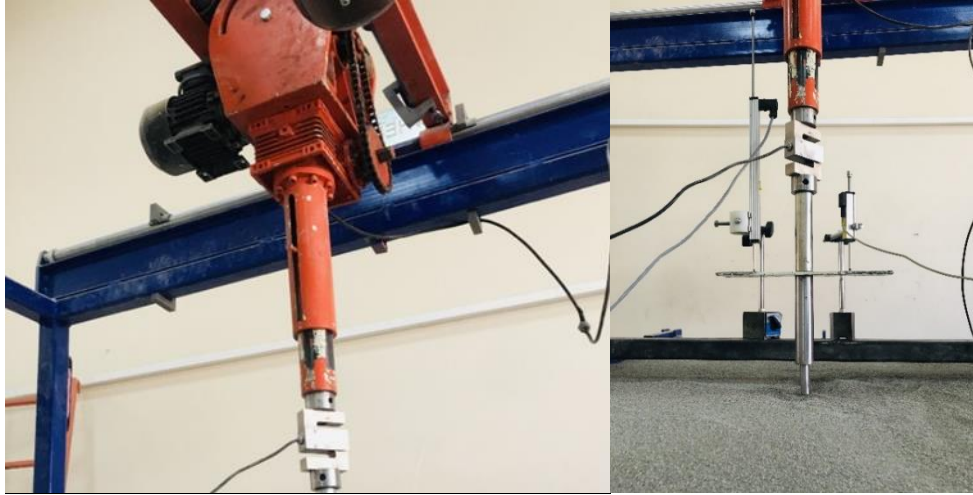
Deney çalışmaları öncesinde çelik malzemeden model boyutlarda ve farklı helis çaplarına sahip helisel kazıklar üretilmiştir. Model helisel kazıklara ait görseller Resim 5.9’da görülmektedir.



Resim 5.9. Model helisel kazıklar

5.3.6. Yükleme düzeneği

Deneylerde basınç kuvveti, deney kasasına sabitlenmiş yük motoru tarafından uygulanmıştır. Yükleme motoru 10 d/dak ile 300 d/dak arasında farklı değerdeki hızlarda yükleme yapabilme özelliğine sahiptir. Deneylerde yüklemeler kademeli olarak yapılmış ve yükleme hızı her kademedeki sabit tutulmuştur. Deney sırasında, her bir deneyde yük-deplasman değerleri kazığın iki yanına yerleştirilmiş deplasman ölçerler ve yük ölçer vasıtasıyla okunmuştur (Resim 5.10).



Resim 5.10. a) Yükleme motoru b) yükleme düzeneği genel görünümü

i) Yük hücresi

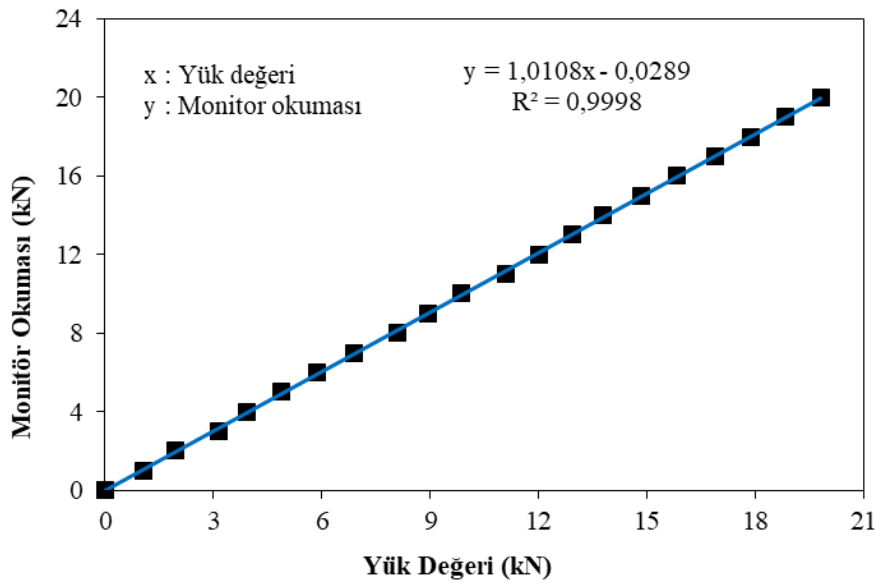
Deney çalışmaları sırasında helisel kazıklara gelen yük değerlerini okumak amacıyla ZEMIC firması tarafından üretilen S tipi H3-C3-2.0t6B, Class C-3 modelde 2000 kg kapasiteli elektronik yük hücresi kullanılmıştır. Ardından yük hücresinin topladığı yük değerleri veri kayıt ünitesinde toplanıp analiz edilmiştir. Yük hücresinin görünümü Resim 5.11’de, teknik özellikleri ise Çizelge 5.3’te verilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yük hücresinden doğru sonuçlar elde etmek amacıyla çalışmalara başlamadan önce kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Yük hücresine ait kalibrasyon eğrisi Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Resim 5.11. Yük hücresi

Çizelge 5.3. Yük hücresine ait teknik özellikler

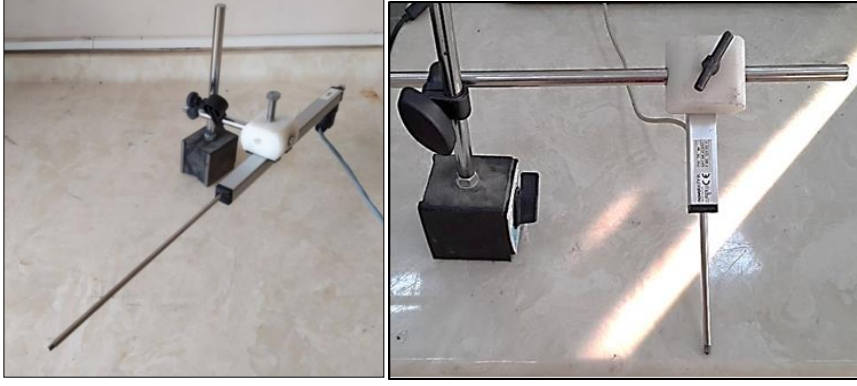
Teknik Özellikler	Birim	Açıklama
Model	---	H3-C3-2.0t6B
Kapasite	kg	2000
Aşırı yükleme kapasitesi	kg	3000
Toplam hata	%	0.02
Çalışma sıcaklığı aralığı	°C	-10...+40
Yük hücresi malzemesi	---	Çelik



Şekil 5.2. Yük hücresi için kalibrasyon grafiği

ii) Deplasman ölçer

Deneyle sırasında yükleme anında helisel kazıklarda meydana gelen hareketleri ölçmek için Resim 5.12a'da gösterilen ATEK firması tarafından üretilmiş ve 0.0-199.999mm aralığında ölçüm yapabilen deplasman ölçer ile Resim 5.12b'de gösterilen Novotechnik firması tarafından üretilen ve 0.0-9.999mm aralığında deplasman değerleri ölçebilen ART.NR.023262 seri numaralı LTR2005K tipi düşey deplasman ölçer kullanılmıştır. Düşey olarak ayarlanmış bu iki adet deplasman ölçer ile yükleme noktasının iki yanında deplasman değerleri takip edilmiştir. Yükleme deneylerine başlamadan önce, deplasman değerlerinin doğru ve tutarlı bir şekilde yapılabilmesi için deplasman ölçerlerde kalibrasyon işlemi yapılmıştır.

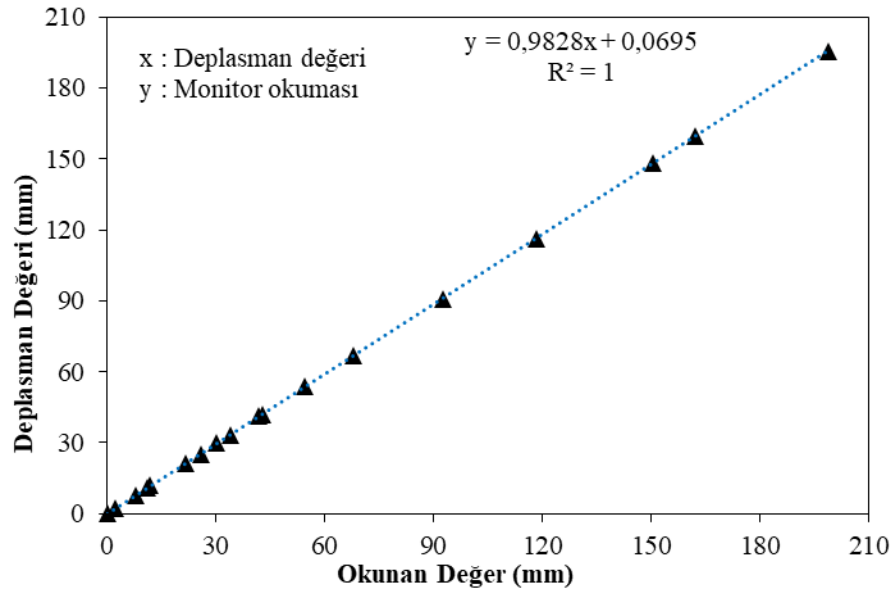


(a)

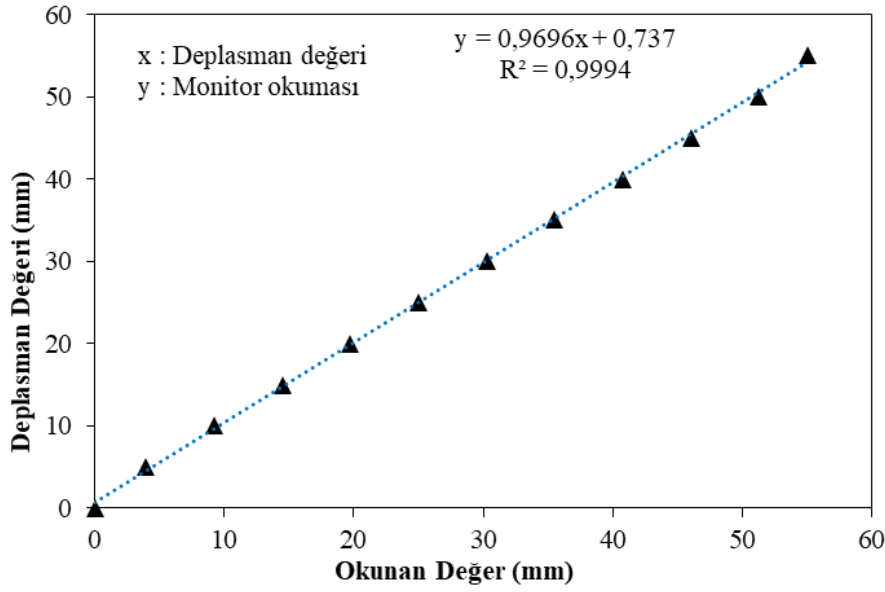
(b)

Resim 5.12. a) 1 No'lu Deplasman ölçer b) 2 No'lu Deplasman ölçer

1 No'lu ve 2 No'lu deplasman ölçerlere ait kalibrasyon eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3. 1 No'lu deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrisi



Şekil 5.4. 2 No'lu deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrisi

iii) Veri kaydetme ünitesi (ADU)

Deney çalışmaları sırasında deplasman ölçerlerden ve yük hücresinden alınan değerler, AL 816011 seri numaralı ve 8 kanal girişli ATRON veri kaydetme ünitesine (Data Logger) aktarılmıştır (Resim 5.13). Aktarılan deplasman ve yük değerleri daha sonra bilgisayar ortamında Universal Data Logger AL-8G yazılımı yardımı ile analiz edilip sayısal değerlere dönüştürülmüştür.



Resim 5.13. Veri kaydetme ünitesi

iv) Helisel kazık montaj düzeneği

Helisel kazık montaj düzeneği, deneysel çalışmalar sırasında deney kasasına sabitlenen ve helisel kazıkları zemine döndürerek sabitlemek için kullanılan elektrik motorundan

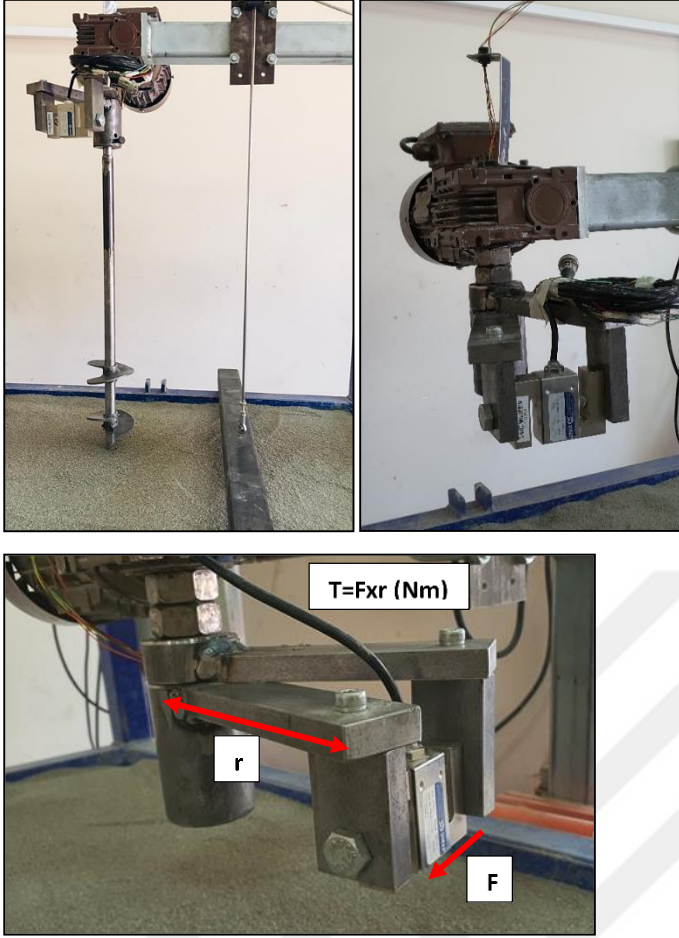
oluşmaktadır. GAMAK firması tarafından üretilmiş ART.NR.023262 seri numaralı elektrik motoru 50 d/dak hızda dönme kapasitesine sahiptir (Resim 5.14).



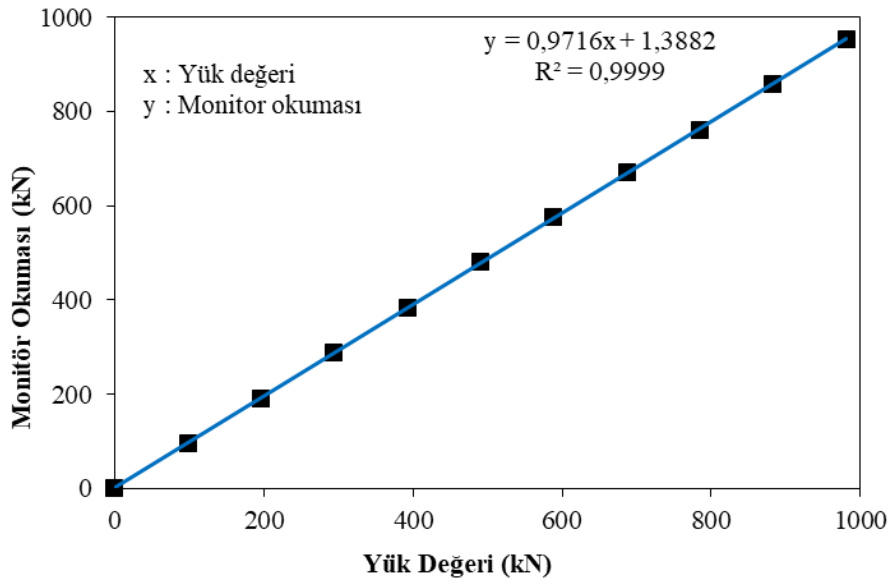
Resim 5.14. Helisel kazık montaj düzeneği

v) Tork ölçme düzeneği ve ekipmanlar

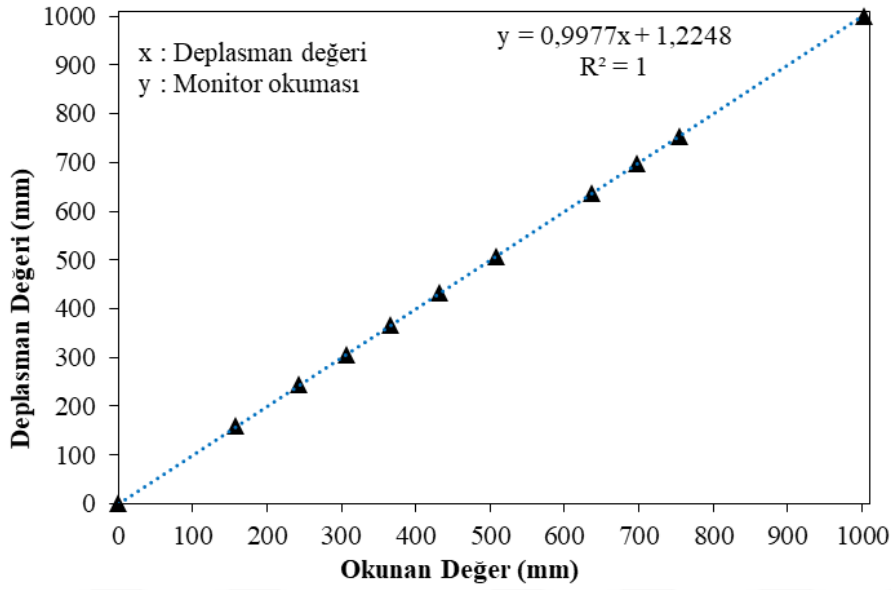
Helisel kazıkların yerleştirilmesi esnasında tork değerleri anlık olarak derinlik boyunca kaydedilmiştir. Tork sistemi kazık montaj düzeneği ile helisel kazık arasında yerleştirilmiştir. Tarafımızca tasarlanan bu sistemde, kazığı çeviren motorun ucundaki redüktöre takılan birinci kısım ile kazığın takıldığı ikinci kısımdan çıkan uzantılar arasında yük ölçer yerleştirilmiştir (Resim 5.15). Tork değerleri ise yük ölçer ile kazığın arasındaki mesafe (r) ile çarpılarak elde edilmiştir (Bkz. Resim 5.15). Kazığın zemine girdiği mesafe montaj düzeneği üzerine yerleştirilen 1000mm kapasiteli deplasman ölçer vasıtasıyla elde edilmiştir. Tork sistemine ait yük hücresi ve deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Resim 5.15. Tork ölçüm sistemi



Şekil 5.5. Tork sistemi yük ölçer kalibrasyon eğrisi



Şekil 5.6. Tork sistemi deplasman ölçer kalibrasyon eğrisi

5.3.7. Laboratuvar model deneylerinin yapılışı

Hazneden zemin aktarma düzeneği yardımı ile alınan granüler zemin malzemesi (kum zemin), deney kasası içine yerleştirilen eleğe gevşek halde dökülerek yerleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra sıkı ve gevşek zemin oluşturmak için iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk olarak gevşek kum zemin ortamı hazırlamak için; deney kasasının üzerine, kasa boyutlarında elek yerleştirilmiş ve zemin aktarma düzeneğinden gelen malzeme deney kasası içerisine yağmurlama şeklinde aktarılmıştır (Resim 5.16a). Kasa; üst kısmına yaklaşık 5 cm kalana kadar doldurulup zemin yüzeyine baskı yapmadan hafif plastik levhalar kullanarak zemin düzleme işlemi yapılmıştır (Resim 5.16b). Sıkı zemin durumunun elde edilebilmesi amacıyla belirli bir yükseklikte zemin doldurulup üzeri düzlenmiş sonrasında da titreşimli sıkıştırma aleti ile sıkıştırılmıştır. Diğer tüm tabakalar için de aynı işlemler tekrarlanmıştır.



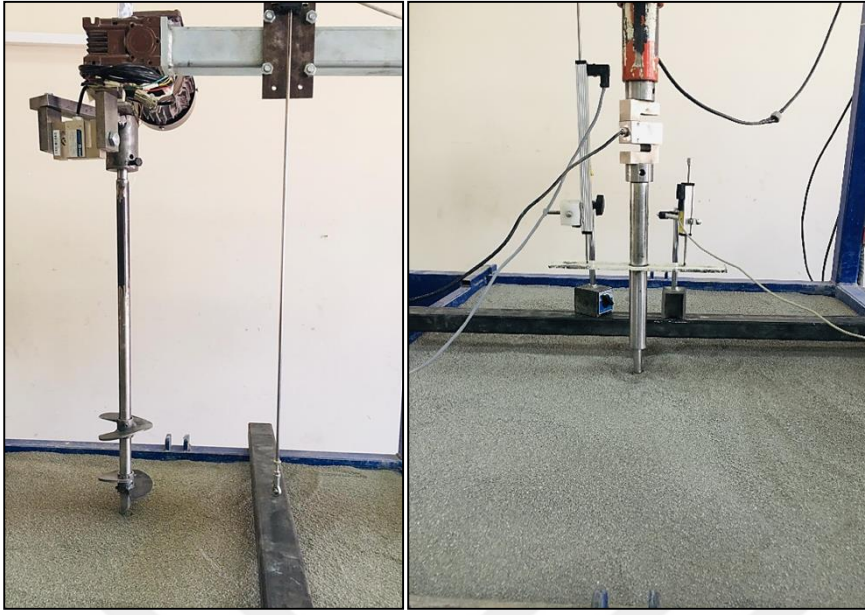
(a)

(b)

Resim 5.16. a) Hazneden alınan kum zeminin deney kasasına aktarılması b) Zemin düzeltme işlemi

Zemin düzgünlüğü her bir doğrultuda su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Sonrasında helisel kazıklar helisel kazık montaj düzeneği yardımıyla döndürülerek zemine yerleştirilmiştir. Zemine yerleştirme aşamasında da yine su terazisi ile yatayda ve düşeyde düzgünlük kontrolü yapılmıştır. Deney kasasının üst kısmında yer alan yükleme motoru düşey şekilde sabitlenmiş ve ucuna yükleme sistemi eklenmiştir (Resim 5.17). Yük hücresi; helisel kazık üzerindeki uç kısma girecek şekilde yerleştirilerek kazığın tam aksenal olarak yüklenmesi sağlanmıştır. Yükleme düzeneğinde yükün uygulandığı eksenin her iki tarafına deplasman ölçer yerleştirilerek yük-deplasman ilişkileri incelenmiştir. Model yükleme ve kurulum düzeneğinin çizimi Şekil 5.7'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce deneme deneyleri yapılarak yükleme ve ölçme sistemi kontrol edilmiştir. Deney düzeneğinde karşılaşılabilecek sorunlar ve sistemde oluşabilecek aksamalar önceden belirlenerek gerekli önlemler alınmıştır. Bazı deneme deneyleri tekrar edilmiş ve sonuçlar bilgisayar ortamında karşılaştırılarak sistemin güvenliği kontrol edilmiş ve yapılacak deneyler için fikirler yürütülmüştür. Deneylerin hassas bir şekilde yapılmasına son derece özen gösterilmiş ve sistemi olumsuz etkileyecek herhangi bir etkiye karşı gerekli önlemler alınmıştır.

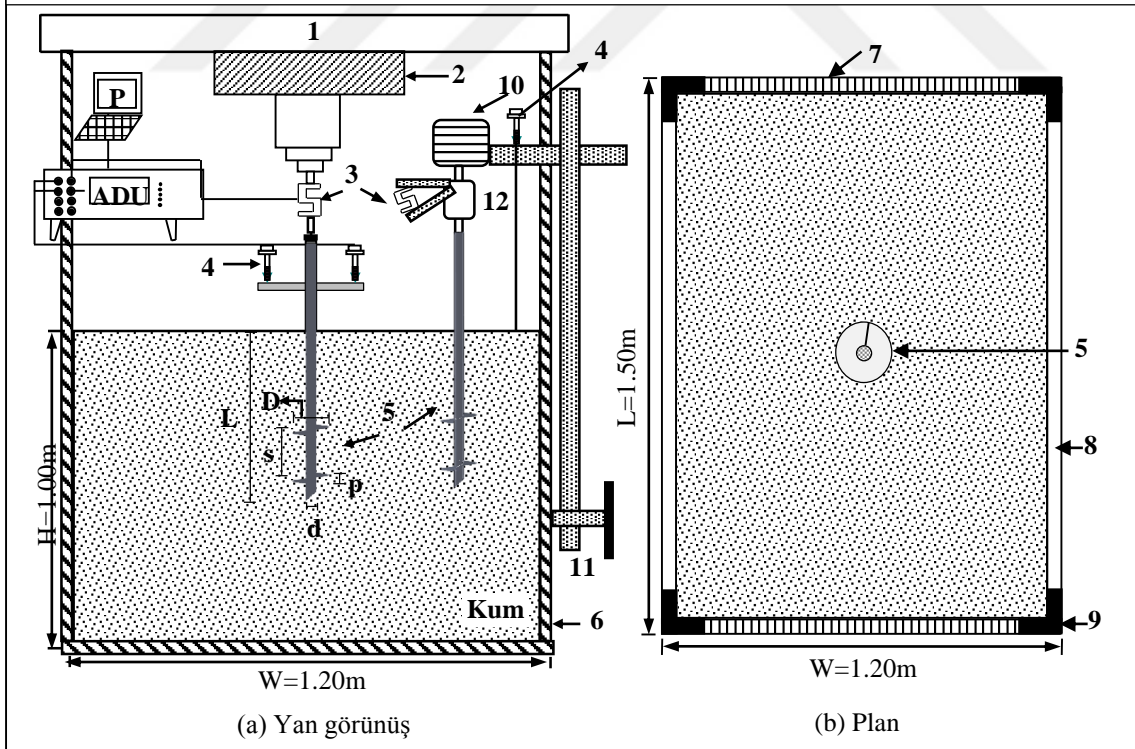


(a)

(b)

Resim 5.17. a) Helisel kazık montaj düzeneği ile kazık yerleştirme işlemi b) yükleme motoru yardımıyla basınç yükleme işlemi

1- Reaksiyon kirişi 2- Mekanik kiriş 3- Yük Ölçer 4- LVDT 5- Helisel kazık 6- Deney tankı 7- Çelik plaka 8- Cam plaka 9- Çelik profil 10-Tork motoru 11- Tork kontrol ünitesi 12- Tork okuma ünitesi



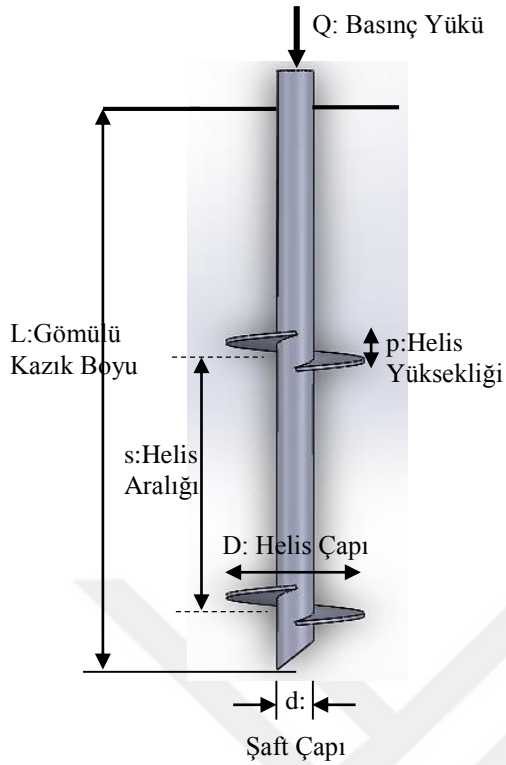
Şekil 5.7. Model helisel kazıkların kurulum ve yükleme sistemi gösterimi

5.3.8. Laboratuvar model deney planı

Gevşek ve sıkı kum zemine yerleştirilen model helisel kazıkların aksel basınç yükü etkisinde tork, deplasman ve nihai yük kapasitesini belirlemek amacıyla toplam 24 adet deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda helisel kazık boyu (L) 60 cm, kazık shaft çapı (d) 2,2 cm ve helis yüksekliği (p) 0,3D olarak sabit tutulmuş, sabit helis çapı (D), helis sayısı (N), helis aralığı (s) bağlı yük ve deplasman değişimleri model seri deneylerle araştırılmıştır. Kazık geometrisine ait bilgiler Şekil 5.8’de verilmiştir.

Uluslararası bir kodlamayı temsil edebilmesi amacıyla deney isimleri gevşek zemin için LCLT (Laboratory-Compression-Loose-Test) (Laboratuvar-Basınç-Gevşek-Deney) ve sıkı zemin için LCDT (Laboratory-Compression-Dense-Test) (Laboratuvar-Basınç-Sıkı-Deney) olarak tanımlanmıştır. İlk harf deney ortamını, ikinci harf yükleme türünü, üçüncü harf zemin durumunu ve dördüncü harf ise deneyi ifade etmektedir. Deney adında geçen sayı da deney numarası olarak adlandırılmıştır.

Model helisel kazıklarda basınç yüklemesi durumu için gevşek ve sıkı zemin ortamında üç seri halinde laboratuvar ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Seri 1 deneylerde helisel plaka çapı (D), Seri 2’de helis aralığı etkisi (s/D), Seri 3’de ise helis sayısı (N) etkisi incelenmiştir (Çizelge 5.4-5.5).



Şekil 5.8. Helisel kazık kesiti

Çizelge 5.4. Laboratuvar model deney serileri (Sıkı)

No	Deney Kodu	Zemin Durumu	Şaft Çapı, d (mm)	Gömülü Kazık Boyu, L (mm)	Helis Çapı, D (mm)	Helis Sayısı, N	s/D	Seri
1	LCDT-1				0	0	0	
2	LCDT-2				60	1	0	Sıkı
3	LCDT-3	Sıkı	22	600	80	1	0	Seri 1
4	LCDT-4				100	1	0	D
5	LCDT-5				120	1	0	Etkisi
6	LCDT-6				100	2	1	
7	LCDT-7				100	2	1,5	Sıkı
8	LCDT-8	Sıkı	22	600	100	2	2	Seri 2
9	LCDT-9				100	2	2,5	s/D
10	LCDT-10				100	2	3	Etkisi
11	LCDT-1				0	0	0	
12	LCDT-4				100	1	0	Sıkı
13	LCDT-7				100	2	1,5	Seri 3
14	LCDT-8	Sıkı	22	600	100	2	2	N
15	LCDT-11				100	3	1,5	Etkisi
16	LCDT-12				100	3	2	

Çizelge 5.5. Laboratuvar model deney serileri (Gevşek)

No	Deney Kodu	Zemin Durumu	Şaft Çapı, d (mm)	Gömülü Kazık Boyu, L (mm)	Helis Çapı, D (mm)	Helis Sayısı, N	s/D	Seri
1	LCLT-1				0	0	0	
2	LCLT-2				60	1	0	Gevşek Seri 1 D Etkisi
3	LCLT-3	Gevşek	22	600	80	1	0	
4	LCLT-4				100	1	0	
5	LCLT-5				120	1	0	
6	LCLT-6				100	2	1	
7	LCLT-7				100	2	1,5	Gevşek Seri 2 s/D Etkisi
8	LCLT-8	Gevşek	22	600	100	2	2	
9	LCLT-9				100	2	2,5	
10	LCLT-10				100	2	3	
11	LCLT-1				0	0	0	
12	LCLT-4				100	1	0	Gevşek Seri 3 N Etkisi
13	LCLT-7				100	2	1,5	
14	LCLT-8	Gevşek	22	600	100	2	2	
15	LCLT-11				100	3	1,5	
16	LCLT-12				100	3	2	

5.4. Büyük Ölçekli Arazi Deneyleri

5.4.1. Doğal zemin özelliklerinin belirlenmesi

Deneyler için İskenderun Teknik Üniversitesi Yerleşkesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Laboratuvarı arka tarafındaki boş saha, arazi deneylerinin yapılacağı alan olarak belirlenmiştir. Bu sahada önceden bir proje kapsamında zemin etüt çalışmaları yapılmıştır. Bu doğrultuda açılan 100m derinliğindeki sondaj kuyusunda SPT (Standart Penetrasyon Deneyi) deneyi yapılmış, sondaj sırasında örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınarak laboratuvar ortamında endeks ve mukavemet deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arazi ve laboratuvar deneylerine ilave olarak jeofizik deneyler de yapılarak proje sahası zeminine ait yatay ve düşey profiller elde edilmiştir. Zemin etüt çalışmalarına bağlı olarak ortaya çıkan zemin profili ve proje sahası zemininin deney sonuçlarına göre yorumlanması aşağıda özetlenmiştir. İlk 10m'lik derinliğe ait SPT deney sonuçları ve SPT deney verilerine bağlı olarak zeminin yorumu Çizelge 5.6'da, düşey doğrultudaki zemin profili Çizelge 5.7'de bulunmaktadır. Tüm bu veriler,

büyük ölçekli arazi deneylerinin sayısal modellenmesinde doğal zemine ait girdi parametreleri olarak kullanılmıştır.

Çizelge 5.6. SPT deney sonuçları ve zemin sınıflaması

SPT No	Derinlik (m)	SPT (N)	Tanımlama
1	1,50-1,95	16	Çok katı
2	3,00-3,45	12	Orta sıkı
3	4,50-4,95	R	Refü
4	9,00-9,45	15	Orta sıkı
5	10,50-10,95	43	Çok sıkı

Çizelge 5.7. Zemin profili

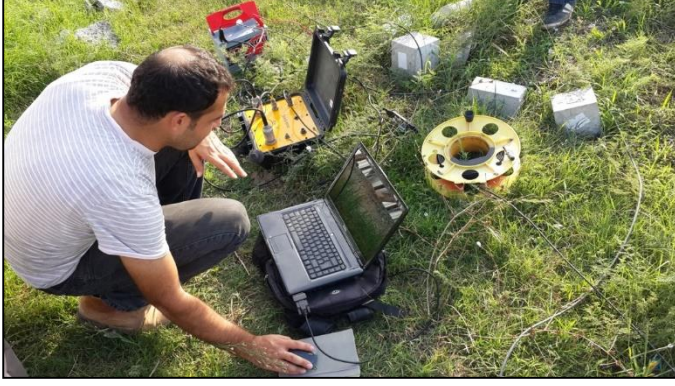
Derinlik (m)	Tanımlama
0,00 – 1,50	Bitkisel toprak
1,50 – 3,40	Kumlu kil
3,40 – 13,00	Kum

Jeofizik deneyler (Sismik kırılma, REMI, Rezistivite) sonrasında elde edilen zemin dinamik parametreleri Çizelge 5.8’de yer almaktadır.

Çizelge 5.8. Zemin dinamik parametreleri

Parametre	Birim	1. tabaka	2. tabaka
S-dalgası – $V_{s(30)}$	m/s	312	
Yoğunluk (γ)	gr/cm ³	1,41	1,96
Maksimum kayma modülü (G_{max})	kg/cm ²	579,1	2170,8
Elastisite modülü (E)	kg/cm ²	1566,2	6414,0
Poisson oranı (ν)	-	0,35	0,48
Bulk modülü (K)	kg/cm ²	1766,3	47220,5
Titreşim periyodu (T_0)	s	0,6	
Serbest basınç mukavemeti (q_u)	kg/cm ²	2,55	7,81
Zemin büyütme değeri	-	2,2	
SPT (N) – SPT (30)	-	20	R

Zemin etüt çalışmaları sırasında yapılan jeofizik deneylerden görünüm Resim 5.18’de sondaj delgi çalışmalarına ait görünüm ise Resim 5.19’da sunulmuştur.



Resim 5.18. Jeofizik deneylerden görünüm



Resim 5.19. Sondaj çalışmalarından görüntüler

5.4.2. Arazi ortamının hazırlanması

Arazi deneylerine başlamadan önce yükün alınacağı ve uygulanacağı sistemlerin imalat aşamaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda imal edilen reaksiyon kazıkları ve reaksiyon kirişlerinin imalat süreçlerinden aşağıda bahsedilmiştir.

Sayısal analiz yöntemleri kullanılarak deneylerde erişilebilecek muhtemel maksimum yük değerlerine göre reaksiyon kazıklarının geometrileri (kazık çapı ve boyu) belirlenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda her biri 30cm çapında ve 6,0m boyunda toplam 14 adet donatılı kazık (fore kazık) imal edilmiştir. Kazıklar arası mesafe 2,30mx2,80m olarak belirlenmiştir. Kazıklara ait donatılar 7,0m olarak tasarlanmış, son 1,0m'lik kısmı zemin yüzünde bırakılmıştır.

İlk olarak arazi ortamında JCB ile yüzey düzeltmesi yapılmış, ardından reaksiyon kazıklarının yerleri belirlenerek işaretlemeler yapılmıştır (Resim 5.20). Kazık yerleri tespit

edildikten sonra delgi aşamasına geçilmiştir (Resim 5.21). Delgi çukurunun göçmemesi için bentonit kili kullanılmıştır.



Resim 5.20. Arazi yüzey düzeltmesi ve kazık yerlerinin işaretlenmesi



Resim 5.21. Reaksiyon kazıkları delgi aşaması

Delgi aşamasından sonra $7\phi 16\text{mm}$ nervürlü boyuna donatı ve $\phi 10\text{mm}$ etriye kullanılarak kazık donatısı yerleştirme işlemleri yapılmıştır (Resim 5.22). Donatı yerleşimi işleminden sonra tremi borusu vasıtasıyla beton dökümü işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 5.23).



Resim 5.22. Reaksiyon kazıklarında donatıların delgi içerisine yerleştirilmesi



Resim 5.23. Reaksiyon kazıklarında betonlama işlemi

Reaksiyon kazık imalatının tamamlanmasının ardından kazıkların yüzeyde kalan kısımlarına daire kesitli başlık betonu dökülmüştür (Resim 5.24).

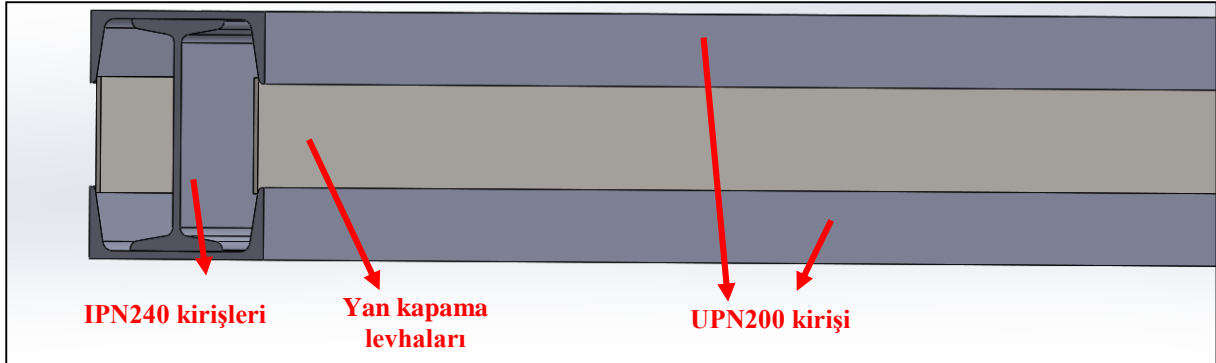


Resim 5.24. Reaksiyon kazıklarında başlık betonu imalatı

Büyük ölçekli arazi deneylerinde, yükün uygulanabilmesi amacıyla reaksiyon kazıklarına monte edilebilen reaksiyon kirişi imalatları yapılmıştır. Bu amaçla yanlarda güçlendirilmiş iki adet IPN-240 çelik profili ile ortada ise yine güçlendirilmiş şekilde HEA300 çelik profili kullanılmıştır. İç kısımlarına 10mm kalınlıkta destek levhaları, altına ve üstüne UPN200 kirişleri olmak üzere IPN-240 çelik profilleri için güçlendirme çalışmaları yapılmıştır (Resim 5.25). Ayrıca yan kısımları da eğilme momenti oluşmasını önlemek için 5mm'lik sac levhalarla kapatılmıştır. Bu çalışmalar öncesinde kirişler üç boyutlu olarak sayısal ortamda modellenmiş ve dayanım hesaplamaları yapılmıştır (Resim 5.26). Güçlendirmeler sonucunda yükleme sisteminin yaklaşık 60 ton yükü karşılayabileceği hesaplanmıştır.



Resim 5.25. IPN240 üzerine yerleştirilen destek levhaları

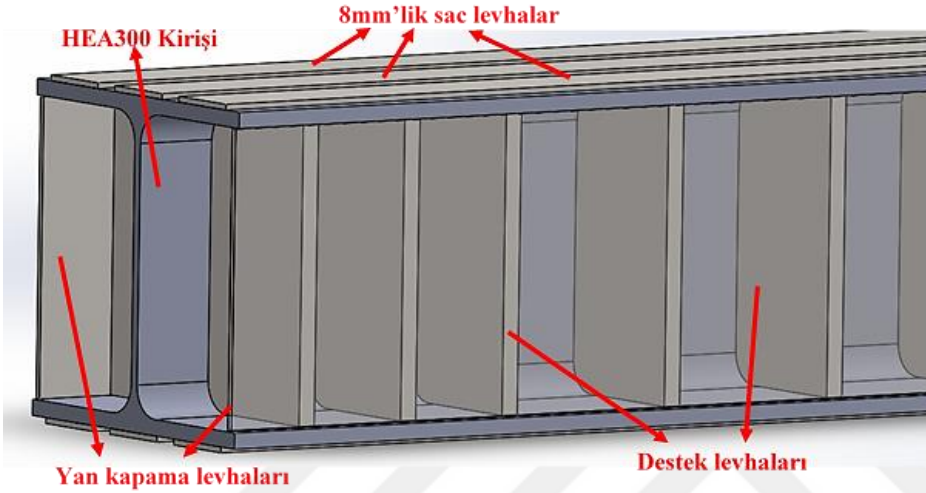


Resim 5.26. Güçlendirilmiş IPN240 kirişi 3 boyutlu çizim görünümü

Sistemin ortasına yerleştirilen pistonun yerleştirileceği kiriş olan HEA300 kirişi için yapılan güçlendirmeler, iç kısımlara 20mm kalınlıkta destek levhalarının yerleştirilmesi, alt ve üste üçer adet 70mmx8mmx2600mm ebatlarında levhaların yerleştirilmesi ve yan yüzeylere de eğilme momenti oluşmasını önlemek için 5mm'lik sac levhaların kapatılması şeklinde olmuştur (Resim 5.27). Bu çalışmalar öncesinde kirişler üç boyutlu olarak sayısal ortamda modellenmiş ve dayanım hesaplamaları yapılmıştır (Resim 5.28).



Resim 5.27. HEA300 kirişi iç kısımlara 20mm'lik destek levha uygulaması



Resim 5.28. Güçlendirilmiş HEA300 kirişi 3 boyutlu çizim görünümü

Ayrıca bu kirişlerin taşınması ve amacıyla deney sahası hattı boyunca caraskal sistemli kayar bir taşıma hattı (raylı vinç) oluşturulmuştur. Yukarıda bahsi geçen tüm imalatların ardından arazi yükleme düzeneğinin genel görünümü Resim 5.29'da verilmiştir.



Resim 5.29. Arazi yükleme düzeneği genel görünümü

5.4.3. Deney düzeneği

Bu bölümde yükleme sistemi ekipmanları (yükleme pistonu, yük hücresi, merkezleyici vb.) hakkında bilgiler verilmiştir.

i) Yükleme Pistonu

Deneyleerde basınç kuvveti, yükleme kirişine sabitlenmiş Enerpac şirketi tarafından imal edilen HCR1008 model, KE20275655 seri numaralı piston tarafından sağlanmıştır. Pistonun bir ucu yükleme kirişine diğer ucu da model kazık üzerindeki bağlantı elemanına gelecek şekilde basınç kuvvetleri piston vasıtası ile kazıklara aktarılmıştır. Pistona ait teknik özellikler Çizelge 5.9’da yer almaktadır. Yükleme pistonuna ait görünüm Resim 5.30’da hidrolik sistemi ile bağlantı ekipmanlarının yer aldığı yükleme kabineine ait görünüm ise Resim 5.31’de verilmiştir.

Çizelge 5.9. Yükleme pistonu özellikleri

Özellik	Açıklama
Marka / Tipi	Enerpac HCR1008
Maksimum çalışma basıncı (bar)	700
Kapasite sınıfı (tonaj)	100
Strok (mm)	200
İade türü	Çift Etkili, Hidrolik Dönüş
Ağırlık (kg)	59
Piston çapı (mm)	95
Silindir çapı (mm)	135
Yükseklik (mm)	379



Resim 5.30. Yükleme pistonu



Resim 5.31. Yükleme kabini

ii) Yük Hücresi

Helisel kazıklara uygulanan yükleme deneyleri sırasında kazıkların karşıladığı yük değerlerinin okunabilmesi amacıyla yükleme pistonu üzerine yük hücresi yerleştirilmiş ve okunan yük değerleri veri kaydetme cihazı (ADU) aracılığı ile bilgisayara iletilmiştir. Deneylerde Keli Sensing Technology (Ningbo) Co. Ltd. şirketi tarafından imal edilen 56A3758 seri numaralı, maksimum 60 ton yük okuyabilen yük hücresi kullanılmıştır (Resim 5.32).

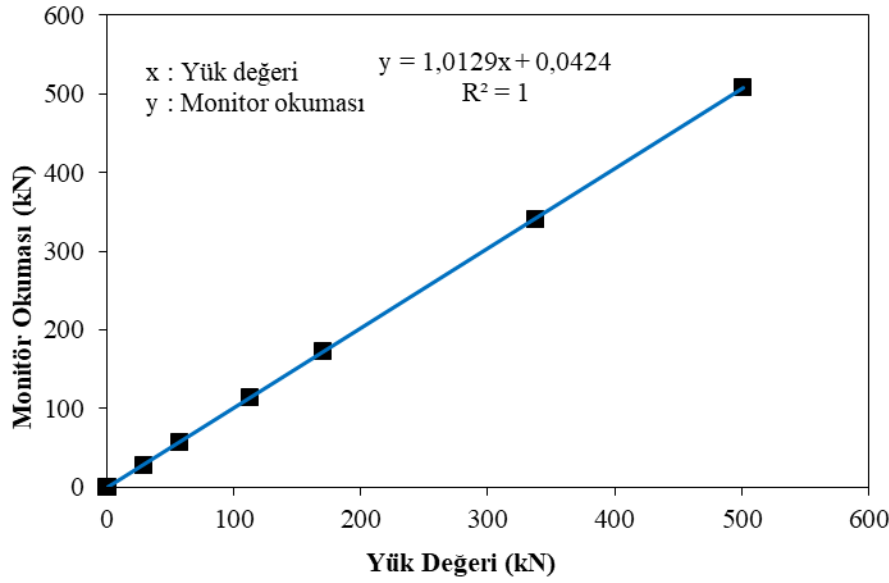


Resim 5.32. Yk hresi

Deneysel çalışmalarda kullanılan yk hresinden doğru sonuçlar elde etmek amacıyla çalışmalara başlamadan nce kalibrasyon işlemleri yapılmıştır (Resim 5.33). Yk hresine ait kalibrasyon eğrisi ise Şekil 5.9'da sunulmuştur.



Resim 5.33. Yk hresi kalibrasyonu



Şekil 5.9. Yük hücresi için kalibrasyon grafiği

iii) Merkezleyici

Deneyler sırasında dengeye alınan yükleme pistonunun yükleme kirişine herhangi bir eksantrisite olmadan basması, yükün tam aksenal olarak aktarılması ve yük hücresinin hassas bir şekilde okumasının gerçekleştirilmesi amacıyla merkezleyici bir eleman kullanılmıştır. 14cm'lik basma alanı çapı ve %2 eğim kapasitesine sahip merkezleyicinin görüntüsü Resim 5.34'te sunulmuştur.



Resim 5.34. Merkezleyici

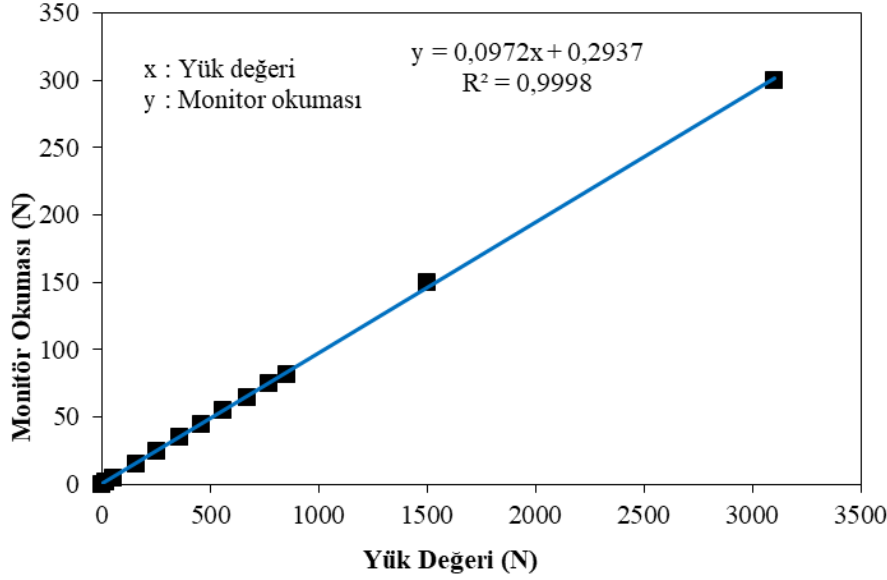
iv) Deplasman ölçer, titreşimli sıkıştırma aleti ve veri kaydetme ünitesi

Laboratuvar model deneylerde kullanılan deplasman ölçerler, titreşimli sıkıştırma aleti ve veri kaydetme ünitesi büyük ölçekli arazi deneylerinde de kullanılmıştır.

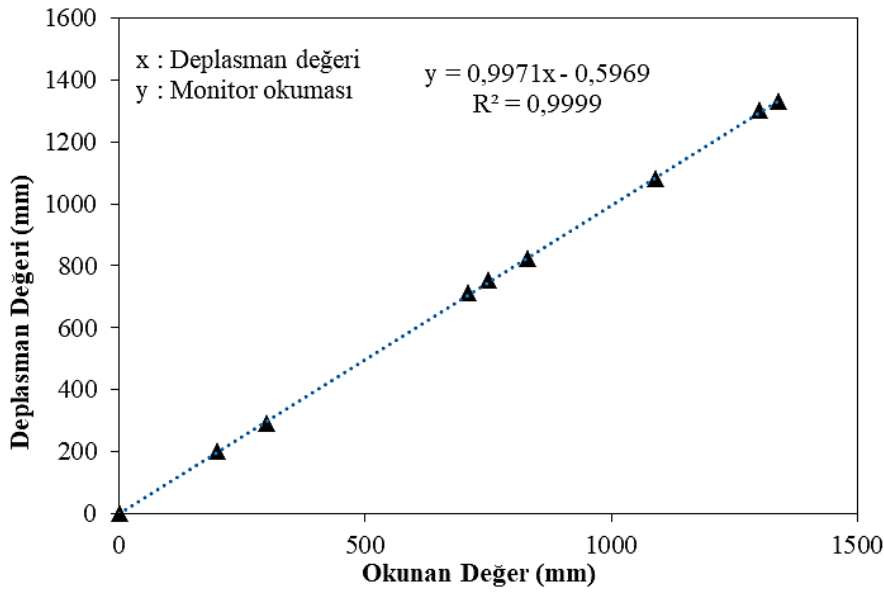
v) Tork ölçme düzeneği ve ekipmanlar

Arazide yer alan helisel kazık yükleme sistemi üzerine entegre bir biçimde uzaktan kontrollü bir tork ölçüm mekanizması yerleştirilmiştir. Bu tork ölçüm mekanizmasında tork işlevinin çalışma ilkesi, kazıklardan yük hücreğine iletilen yüklerin, mekanizma üzerindeki belirli bir döndürme noktasına olan uzaklığı tanımlayan kuvvet kolu ile çarpımına yani tork değerinin hesaplanması esasına dayanmaktadır. Buradan hareketle, tork ölçüm mekanizmasından tork değerlerinin ölçümü, kuvvet kolu sabit bir çarpan olduğu için, doğrudan yük hücreğine iletilen yükün belirlenmesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Uzaktan kontrollü tork ölçüm mekanizmasının bir diğer işlevi olarak da belirli zaman aralıklarında tork değerlerine karşılık gelen derinliğin tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, tork ölçüm mekanizması içerisinde iki farklı teknikle mesafeleri ölçebilen entegre uzaklık algılayıcılar eş deplasman kontrolcülerini göreviyle kullanılmıştır. Uzaktan kontrollü tork ölçüm mekanizmasının merkezinde, mikro kontrol ünitesi görevini yürüten bir elektronik kart devresi bileşeni bulunmaktadır. Bu mikro kontrol ünitesindeki mikrodenetleyiciler programlanarak, yük hücrelerinden gelen analog verilerin dijital dönüşürülmesi, uzaklık algılayıcılardan elde edilen mesafelerin tespit edilmesi ve elde edilen tüm verilerin kablosuz olarak bilgisayara gönderilmesi sağlanmıştır. Yükleme deneyleri esnasında kazıklardan yük hücreğine aktarılan yük, analog dijital dönüştürücü göreviyle bir ağırlık sensör kuvvetlendirici bileşeniyle okunmuştur. Kazıkların zemine gömülmesi süresince değişen mesafelerin tespitinde ise ses ötesi ve lazer uzaklık algılayıcılar deplasman kanalları olarak kullanılmıştır. Bütün bu değerler uygun çarpanlar, kalibrasyonlar ve birim dönüşümleri uygulanarak uzaktan erişimli bilgisayara nihai tork ve derinlik değerleri olarak iletilecek şekilde programlanmıştır. Uzaktan erişimli bilgisayarda kablosuz olarak gelen verilerin okunması için ayrı bir bağımsız program yazılmıştır. Bu program üzerinden helisel kazık deneyleri esnasında eş zamanlı olarak tork ve derinlik değerleri, kablosuz olarak, bilgisayar üzerinden görüntülenmiş ve kaydedilmiştir.

Tork sistemine ait yük hücresi ve deplasman ölçere ait kalibrasyon eğrileri ise sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.



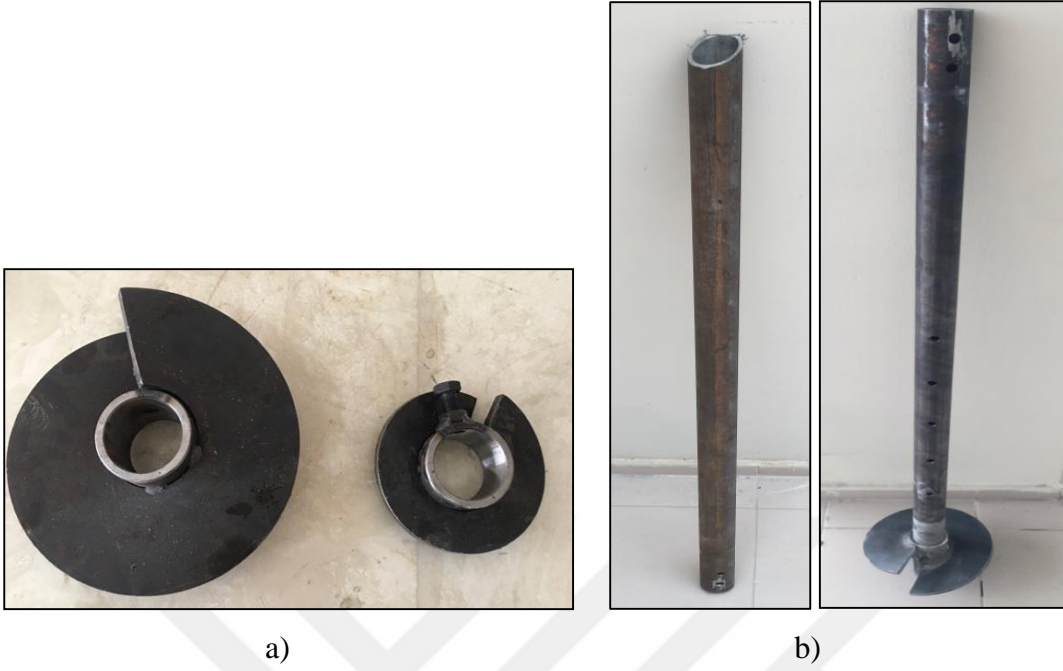
Şekil 5.10. Büyük ölçekli deneyler için tork sistemi yük ölçer kalibrasyon eğrisi



Şekil 5.11. Büyük ölçekli deneyler için tork sistemi deplasman ölçer kalibrasyon eğrisi

vi) Büyük ölçekli helisel kazıklar

Arazi deneylerinde çelik malzemeden üretilen 150 cm boyunda 15 cm ve 25 cm helisel plaka çaplarına sahip kazıklar kullanılmıştır. Helisel plakalarla model şaft ve helisel kazığa ait görseller Resim 5.35’de verilmiştir.



Resim 5.35. Büyük ölçekli arazi deneylerinde kullanılan helisel kazıklar a) Helisel plakalar
b) Kazık şaftı ve helisel kazık

vii) Deney kumu

Tez çalışmalarında yapılması planlanan tüm deneylerde (arazi / laboratuvar) aynı zeminler kullanılmıştır.

5.4.4. Büyük ölçekli arazi deneylerinin yapılışı

“5.4.2. Arazi Ortamının Hazırlanması” bölümünde verilen çalışmalar tamamlandıktan sonra hazır hale getirilen Geoteknik Arazi Laboratuvarı’nda (Resim 5.36) büyük ölçekli arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.36. Geoteknik arazi laboratuvarı

Bu amaçla ilk olarak kazı işlemleri yapılmış ve deney havuzu oluşturulmuştur (Resim 5.37). Havuzların boyutları 2,3m eninde, 2,8m boyunda ve 2,5m derinliğindedir.



Resim 5.37. Deney havuzlarının kazı aşaması

Bu işlemlerin ardından kum ocağından temin edilen kum (Resim 5.38) önce 0,18mm-2,00mm dane çapı aralığında özel olarak imal edilen elek sistemi (Resim 5.39) kullanılarak elenmiş ardından her bir deney havuzu elenmiş zeminle doldurulmuştur.



Resim 5.38. Deney kumunun temin edilmesi ve laboratuvar ortamına nakliyesi



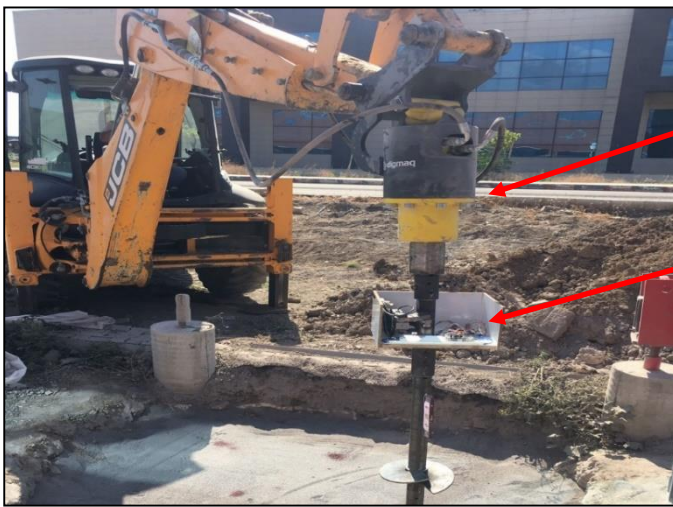
Resim 5.39. Deney kumunun elenmesi işlemleri

Gevşek zemin durumunda homojenliğin sağlanabilmesi için kum sabit bir yükseklikten (50cm) elek üzerine bırakılmış, sıkı zemin durumunda da titreşimli sıkıştırma aleti ile sıkıştırma işlemi (20cm'lik tabakalar halinde) gerçekleştirilmiştir (Resim 5.40).



Resim 5.40. Deneysel kumunun doldurma ve sıkıştırma işlemleri

Zemin ortamı hazırlanması sürecinin tamamlanmasının ardından düzenekler yerleştirilerek ortam deneysel hazır hale getirilmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak helisel kazık yerleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. JCB'ye monte edilen burgu ataşmanı (Resim 5.41) vasıtasıyla helisel kazıklar (Resim 5.42) önceden oluşturulmuş zemin ortamına sabit bir hızla döndürülerek yerleştirilmiştir (Resim 5.43). Bu esnada özel olarak imal edilen bir tork ölçüm düzeneği (Bkz. Resim 5.41) ve tork ölçümleri yapılmış ve derinlik boyunca tork ölçümleri alınmıştır.



Burgu
ataşmanı

Tork ölçüm
düzeneği

Resim 5.41. Deneysel çalışmalarda kullanılan burgu ataşmanı ve tork ölçüm düzeneği



Resim 5.42. Deneylerde kullanılan helisel kazıklar



Resim 5.43. Helisel kazık montajı

Helisel kazık yerleştirme işlemlerinin tamamlanmasının ardından önceden hazırlanan güzergâh boyunca caraskal sistemli raylı vinç hattı kullanılarak yükleme kirişleri (orta kirişi ve yan kirişler) reaksiyon kazıklarına özel olarak tasarlanan bağlantı elemanları (Resim 5.44) ile bağlanmıştır.



Resim 5.44. Kiriş montaj elemanları

Güvenliği sağlama adına orta kiriş caraskal sistemi ile devamlı askıda tutulmuştur. Orta kiriş tam olarak deney yapılacak helisel kazığın üzerine gelecek şekilde ayarlanmış (Resim 5.45) ve helisel kazık üzerine plakalar yerleştirilerek teraziye alınarak sabitlenmiştir (Resim 5.46). Daha sonra plakanın üzerine yükleme pistonu ve deplasman ölçerler yerleştirilmiş, veri toplama ünitesi, yükleme kabini ve bilgisayara gerekli bağlantılar yapılmıştır (Resim 5.47). Şekil 5.12’de büyük ölçekli arazi deneyine ait yükleme düzeneğinin şematik görünümü sunulmuştur.



Resim 5.45. Yüklemenin kiriş ortasına ayarlanması



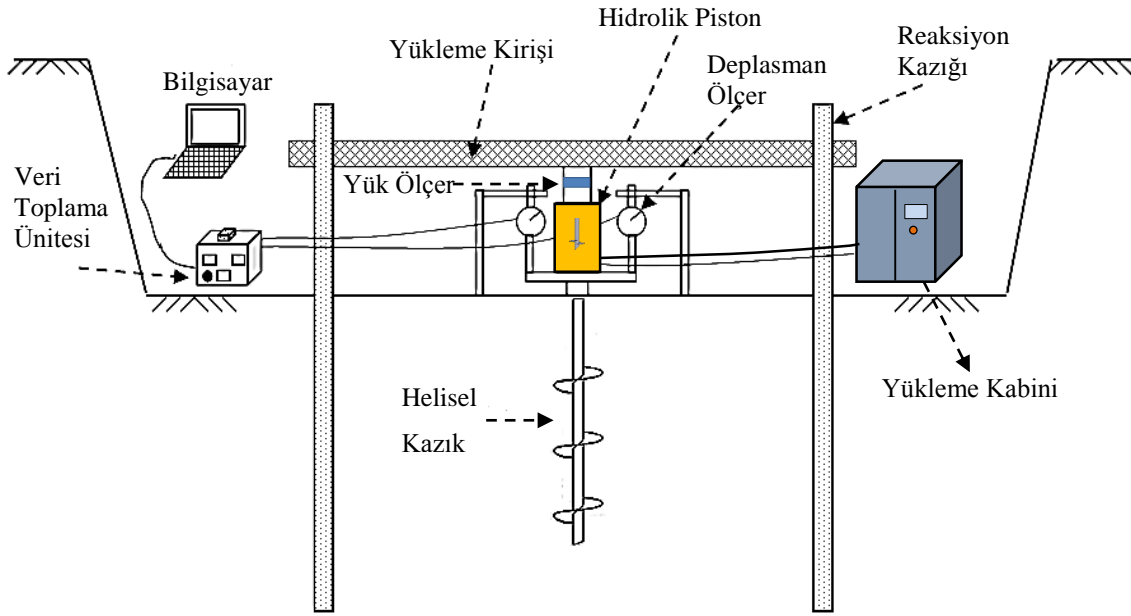
a)

b)

Resim 5.46. a) Yükleme öncesi teraziye alma işlemi b) kiriş elemanların sabitlenmesi



Resim 5.47. Deney ekipmanlarının genel görünümü 1) Yükleme kabini 2) Bilgisayar 3) Veri toplama ünitesi 4) Yükleme pistonu 5) Orta kiriş 6) Yan kiriş 7) Raylı vinç



Şekil 5.12. Büyük ölçekli arazi deney düzeneği şematik gösterimi

İki farklı boyutta taşıma helezonu (Resim 5.48) vasıtasıyla deney havuzu doldurma ve boşaltma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.48. Deney kum nakliyesinde kullanılan taşıma helezonları

Deneylerde yükleme, deplasman kontrollü olarak uygulanmış, yük-oturma eğrileri eş zamanlı olarak çizilmiştir. Yükleme literatür verilerine de dayanarak helis çapının en az %10'una karşılık gelen oturma mertebesine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Deneyler esnasında özellikle helisel kazık çevresindeki yüklemeden etkilenen zemin bölgesi izlenmiş, göçme mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde yükleme kirişlerinin sehim durumu takip edilmiş, kirişlerde herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir. Deney havuzuna helisel kazıkların etki bölgeleri de dikkate alınarak birden fazla helisel kazık yerleştirilmiştir. Arazi ortamında yağmur gibi dış etkilerden zemin koşullarının etkilenmemesi için yüklemeler aynı gün içerisinde tamamlanmıştır. Deneylerdeki tutarlılığı görebilmek

amacıyla deneylerden biri tekrarlanmış ve birbirine çok yakın sonuçların elde edildiği belirlenmiştir.

5.4.5. Büyük ölçekli arazi deney planı

Arazi ortamında gevşek ve sıkı kum zemine yerleştirilen eksenel basınç yükü etkisi altındaki büyük ölçekli helisel kazıkların tork, deplasman ve nihai yük kapasitesini belirlemek amacıyla toplam 10 adet deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda helisel kazık boyu (L) 150 cm, kazık şaft çapı (d) 60 mm ve helis yüksekliği (p) 0,3D olarak sabit tutulmuş, farklı helis çapı (D), helis sayısı (N), helis aralığı (s) bağlı yük ve deplasman değişimleri büyük boyutlu arazi deneyleri ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait deney planı ve helisel kazık parametreleri Çizelge 5.10'da verilmiştir. Arazi deneylerinde uygulamada sıklıkla kullanılan boyutlar da göz önüne alınarak laboratuvar model helisel kazık geometrilerinin 2,5 katı seçilerek deneyler yapılmıştır.

Uluslararası bir kodlamayı temsil edebilmesi amacıyla ilk harf deney ortamını, ikinci harf yükleme türünü, üçüncü harf zemin durumunu ve dördüncü harf ise deneyi ifade etmektedir. Gevşek zemin için FCLT (Field-Compression-Loose-Test) (Arazi-Basınç-Gevşek-Deney) ve sıkı zemin için FCDT (Field-Compression-Dense-Test) (Arazi-Basınç-Sıkı-Deney) olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 5.10. Arazi deney planı ve helisel kazık parametreleri

Deney Kodu	Zemin Durumu	Şaft Çapı, d (mm)	Gömülü Kazık Boyu, L (mm)	Helis Çapı, D (mm)	Helis Sayısı, N	s/D
FCDT-1	Sıkı	60	1500	150	1	0,0
FCDT-2				250	1	0,0
FCDT-3				250	2	1,5
FCDT-4				250	2	2,0
FCDT-5				250	3	1,5
FCLT-1	Gevşek	60	1500	150	1	0,0
FCLT-2				250	1	0,0
FCLT-3				250	2	1,5
FCLT-4				250	2	2,0
FCLT-5				250	3	1,5

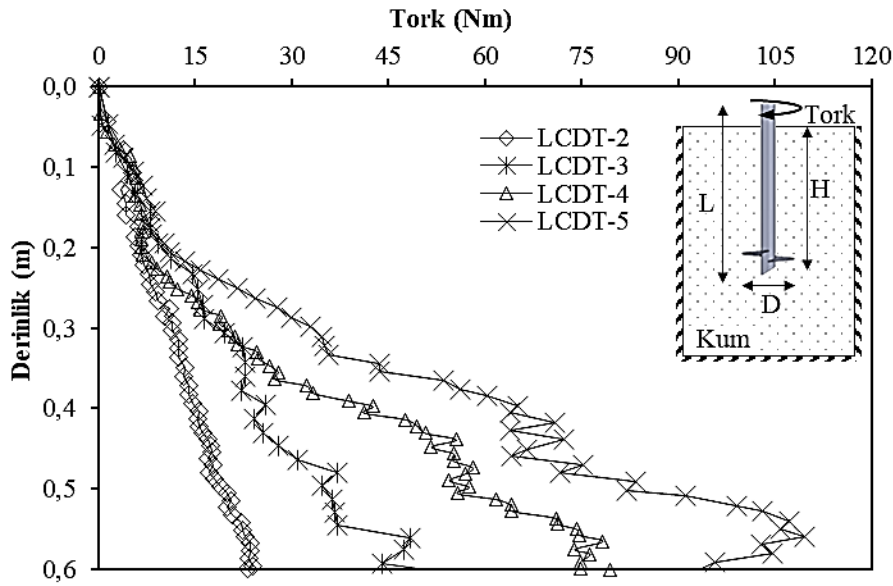
6. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu bölümde, sıkı ve gevşek zemine gömülü model ve büyük ölçek boyutundaki helisel kazıkların, aksenal basınç altındaki davranışları laboratuvar model ve büyük ölçekli arazi deneyleri ile araştırılmıştır. Deneylerde farklı helis çapı (D), helisler arası mesafe (s), helis sayısı (N) ve zemin sıkılık durumu (D_r) gibi farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, Bölüm 4 (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri)'de belirtilen ve literatürde kullanılan birçok yöntemle (Teorik, Tork ve Deneysel) karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

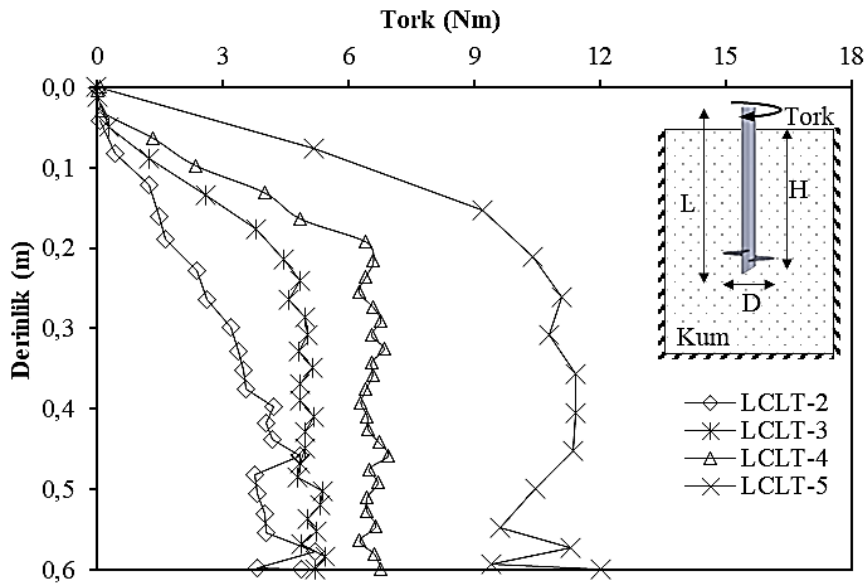
6.1. Model Deney Sonuçları

6.1.1. Model helisel kazıkların derinlik boyunca kurulum tork değerleri

Helisel kazıklar uygulamalarda hidrolik bir tork başlığı veya döner tork uygulayan bir sistem vasıtasıyla zemine döndürülerek itilmektedir. Bu esnada kazığın zemine girmesi için uygulanması gereken ve döndürme momenti olarak da ifade edilen tork, derinlik boyunca ölçülebilmektedir. Deneylerde model helisel kazıkların zemine yerleştirilmesi (kurulumu) esnasında, tasarlanan tork ölçüm sistemi vasıtasıyla derinlik boyunca ve belli aralıklarla tork değerleri okunmuştur. Seri-1 (helis çapı etkisi) deneyleri için helisel kazıkların zemin içerisine kurulumu sırasında derinlik boyunca okunan tork değerleri sıkı ve gevşek zemin için aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 6.1).



(a)



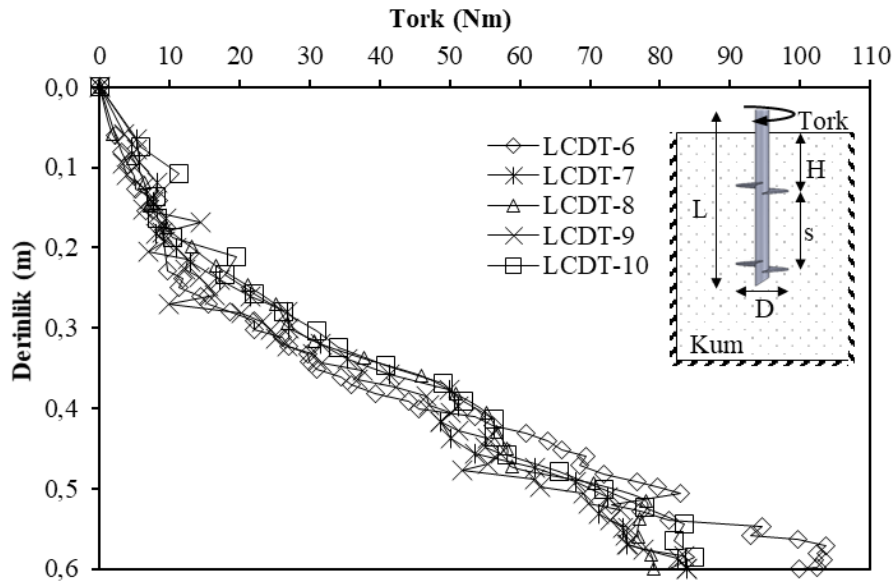
(b)

Şekil 6.1. Seri 1 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin

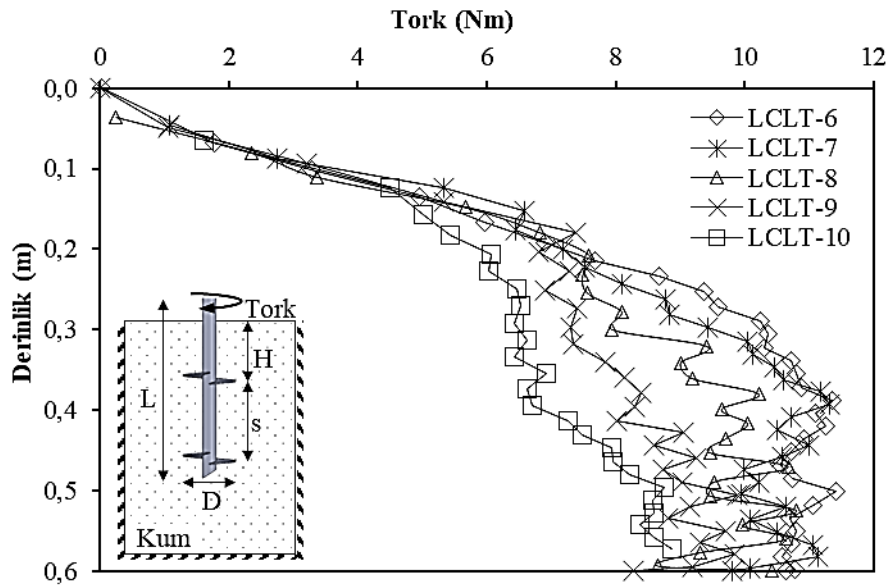
Helis çapının değişimi tork değerlerini hem sıkı ve hem de gevşek zemin için önemli ölçüde arttırmıştır. Derinliğin artmasıyla birlikte ve özellikle de 0,3m derinlikten sonra tork değerlerinin çapa bağlı olarak ayrılmaya başladığı görülmüştür. Seri 1’de tork-derinlik ilişkisi incelendiğinde gevşek zeminden sıkı zemine geçişte tork değerlerinde, helis çapının artmasına da bağlı olarak 5-10 kat arası bir artış farkı olduğu gözlenmiştir. Örneğin 6cm helis çapı için gevşek durumdan sıkı duruma geçişte kurulum torku artışı yaklaşık 5 kat olurken, 12cm helis çapı için yaklaşık 10 kata kadar bir artışın olduğu görülmüştür. Ayrıca

helis çapının iki kat artması kurulum torku değerlerini sıkı zeminde yaklaşık 5 kat ve gevşek zeminde yaklaşık 2,5 kat oranında arttırmıştır.

Sıkı ve gevşek zemin için Seri-2 (helis aralığı etkisi) deneylerindeki helisel kazıkların zemin içerisine kurulumu sırasında derinlik boyunca okunan tork değerleri Şekil 6.2'de grafik olarak verilmiştir.



(a)

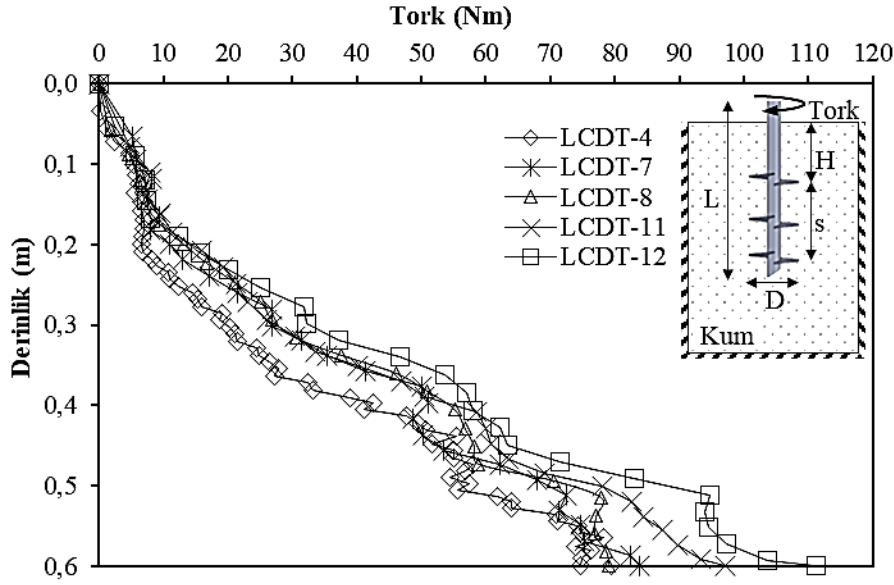


(b)

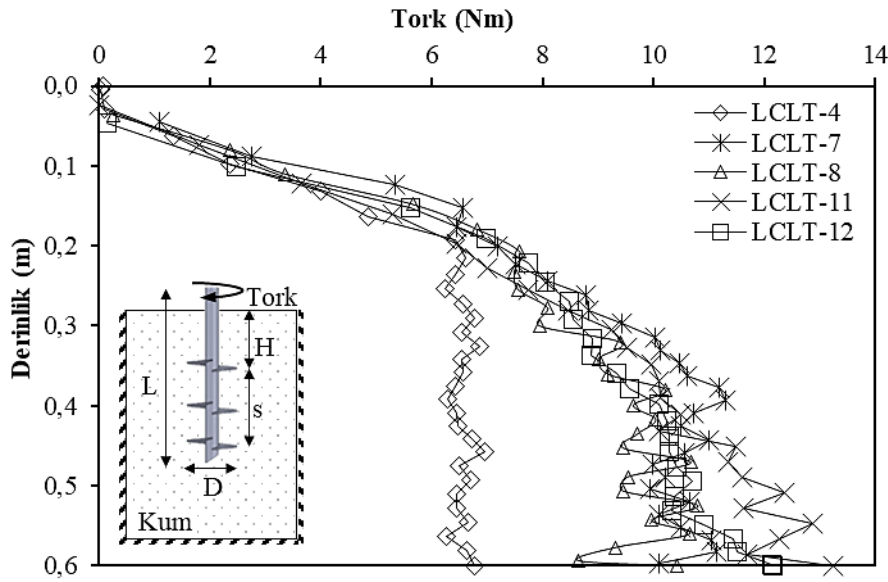
Şekil 6.2. Seri 2 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin

Helis aralığı / helis çapı (s/D) etkisinin incelendiği Seri-2 deneylerde derinliğe bağlı olarak çift helisin tork değerleri sıkı zemin için gevşek zemin durumuna göre ortalama 10 kata varan bir artış göstermiştir. Kurulum torklarının çift helis durumunda birbirine oldukça yakın değerler verdiği belirlenmiştir. $s/D=1$ (LCDT-LCLT 6) durumunda tork değerleri diğer çift helis kurulum torklarına kıyasla biraz daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin helislerin birbirine yakın olması ve zeminin helis plakaları arasında sıkışması ve bunun sonucunda meydana gelen ilave bir zemin direnci olduğu düşünülmektedir.

Farklı zemin (sıkı ve gevşek) durumu için Seri-3 (helis sayısı etkisi) deneylerindeki helisel kazıkların zemine kurulumu sırasında derinliğe bağlı olarak okunan tork değerleri aşağıdaki şekilde grafik olarak sunulmuştur (Şekil 6.3).



(a)



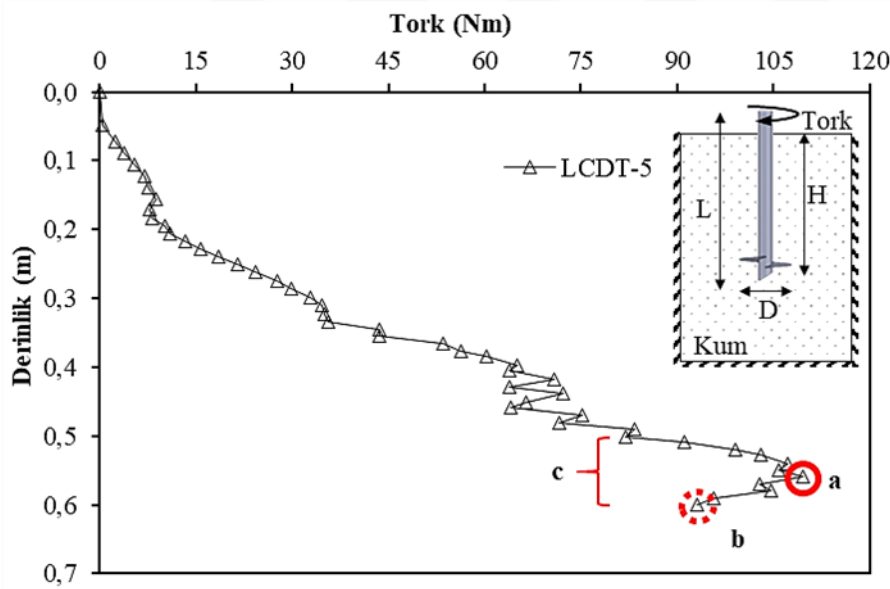
(b)

Şekil 6.3. Seri 3 tork değerlerinin derinlikle değişimi a) Sıkı Zemin b) Gevşek zemin

Şekil 6.3'te helis sayısının tork üzerindeki etkisi ele alındığında, gevşek ve sıkı zemin için helis sayısının tork değerini arttırdığı görülmektedir. Bu durumda gevşek zemine göre sıkı zemin durumunda tork değerlerinde yaklaşık 10 kata varan artışların söz konusu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.3'ten sıkı zeminde gevşek zemine göre önemli derecede tork artışının olduğu belirlenmiştir. Sıkı zeminde helis sayısının 3 kat artmasına bağlı olarak kurulum torku değerlerinde yaklaşık 1,4 kata varan artış sağlanmışken gevşek zeminde bu artış oranı 2 kat olmuştur. Bu durum, sıkı zemin içerisinde ilk ilerleyen helisin zemini örselemesi ve zemin içerisine sonrasında giren helislerin nispeten daha gevşek bir zemin

ortamında ilerlemesi şeklinde yorumlanmıştır. Gevşek duruma ilişkin yorum da zemin sıkılık koşullarının helis ilerlemesinden etkilenmeyeceği ve zemine giren her ilave helisin tork değerini arttıracacağı yönünde olmuştur.

Literatürde tork değerine bağlı kazık taşıma kapasitesi belirlenirken kullanılan tork değerleri kabullerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Örneğin, Livneh ve El Naggar (2008), Sakr (2009) ve Sakr (2011) yaptıkları çalışmalarda kurulum torku seçimleri sırasıyla son 1 m'deki ortalama tork değeri, nihai (kazık ucu) tork değeri ve derinlik boyunca maksimum tork değeri kullanılmıştır. Şekil 6.4'te farklı kurulum torku (maksimum, 0,5-0,6 m arası ortalama ve kazık ucu torku) elde etme yöntemleri bir örnek grafik (LCDT-5) üzerinde gösterilmiştir. Burada a, maksimum tork değeri; b kazık ucunda ölçülen tork değeri ve c ise 0,5-0,6m derinlik seviyelerindeki ortalama tork değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 6.4. Kurulum torku tespit yöntemleri

Literatürde yer alan ve Şekil 6.4'te de tespit yöntemleri açıklanan farklı kurulum torkları, bu çalışmada her bir deney için ayrı ayrı belirlenmiştir. Çizelge 6.1'de sıkı ve gevşek zemin durumu için maksimum, 0,5-0,6 m arası ortalama ve kazık ucu tork değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Farklı yöntemlere göre kurulum tork değerleri

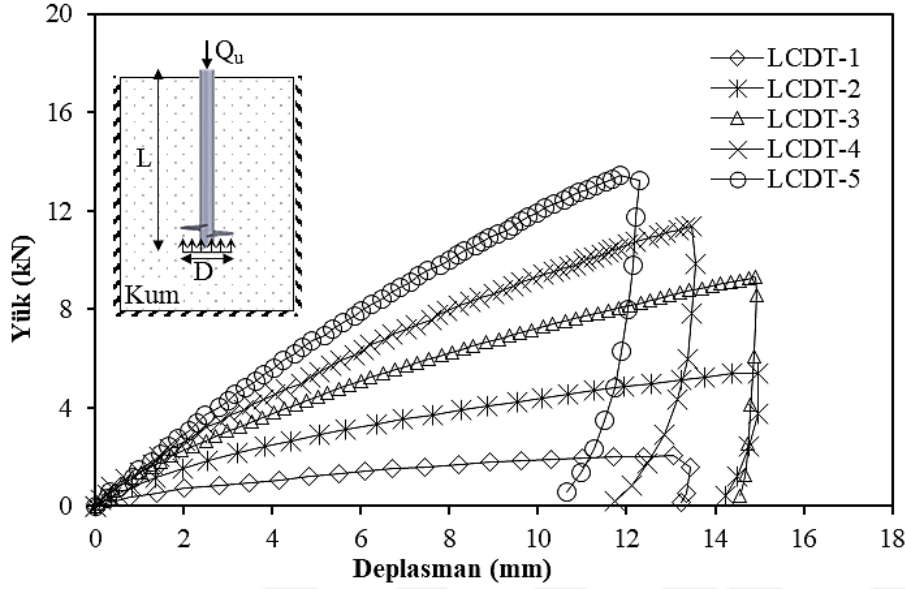
Deney No	Kurulum Torku (Nm) (0.5-0.6m arası ort.)	Kurulum Torku (Nm) (max. değer)	Kurulum Torku (Nm) (Kazık ucu)
LCDT-2	22,06	23,95	23,15
LCDT-3	40,84	51,14	51,14
LCDT-4	69,66	79,40	79,40
LCDT-5	100,93	110,95	93,11
LCDT-6	91,29	103,74	99,86
LCDT-7	76,80	85,55	83,88
LCDT-8	78,16	80,79	79,15
LCDT-9	74,86	83,90	83,90
LCDT-10	79,75	84,97	81,22
LCDT-11	86,46	97,21	97,21
LCDT-12	95,71	111,24	111,24
LCLT-2	4,11	5,21	4,88
LCLT-3	5,19	5,49	5,21
LCLT-4	6,51	6,96	6,78
LCLT-5	10,47	12,01	12,01
LCLT-6	10,84	11,46	10,65
LCLT-7	10,49	11,31	9,82
LCLT-8	10,00	11,08	10,42
LCLT-9	9,27	9,89	8,27
LCLT-10	8,49	8,96	7,56
LCLT-11	12,38	13,94	13,24
LCLT-12	11,17	12,19	12,16

Tüm serilerdeki derinliğe bağlı tork değerleri incelendiğinde zemin direncini büyük oranda en alttaki helisin karşıladığı belirlenmiştir. Bu durumun sebebi, zemine giren ilk helisin zemini örseleyerek gitmesi ve bir sonraki helisin daha az zemin direncine maruz kalması olarak açıklanabilmektedir. Örneğin tek helisli LCDT 4 deneyinde maksimum kurulum torku 79,4 Nm iken helis sayısının iki katına çıktığı LCDT 8 deneyinde maksimum kurulum torku 80,79 Nm ve üç katına çıktığı LCDT 12 deneyinde maksimum kurulum torku 111,24 Nm olarak ölçülmüştür. Sıkı zemin koşullarında tek helisli model kazıklardan çift helisli model kazıklara (LCDT 4-6) geçişteki tork artış değeri yaklaşık %30, üç helisli model kazıklara (LCDT 4-12) geçişteki tork artış değeri de %40'a varan oranlarda artmıştır. Bahsi geçen bu artış mertebeleri gevşek zemin koşulları için yaklaşık %65 ve %100 olmuştur.

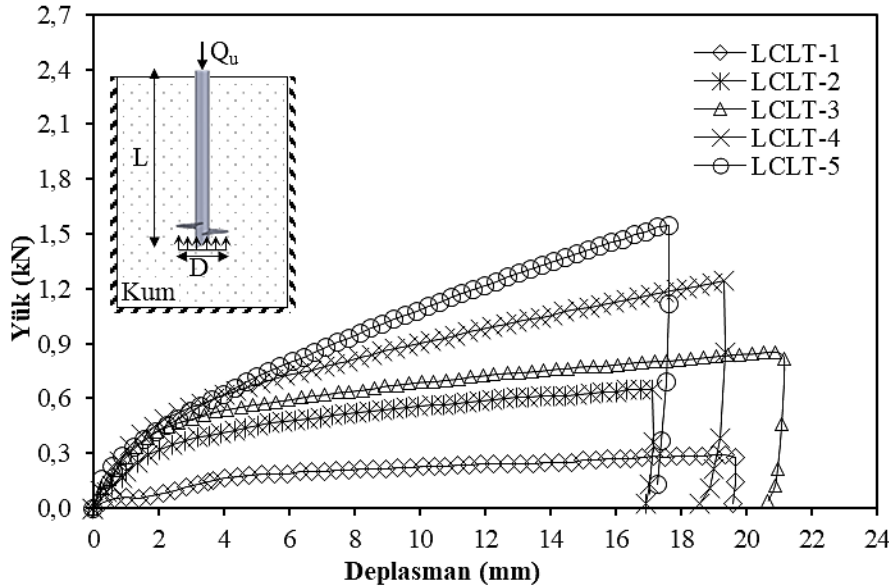
6.1.2. Model helisel kazıkların eksenel basınç yükleme deney sonuçları

Bu bölümde, laboratuvar ortamında zemine kurulumu yapılan farklı parametrelerdeki model helisel kazıkların eksenel basınç altındaki deney sonuçları sunulmuştur. Tüm deneylere ait yükleme-boşaltma eğrileri grafik olarak şekillerle verilmiştir.

Seri-1 deneylerde, sıkı ve gevşek zemin içerisinde gömülü farklı çaptaki tekli helisel kazıklar ile düz (helissiz) kazık üzerinde yapılan aksenal basınç deneyleri ve elde edilen yüklem-boşaltma eğrileri Şekil 6.5'te grafik olarak verilmiştir.



(a)

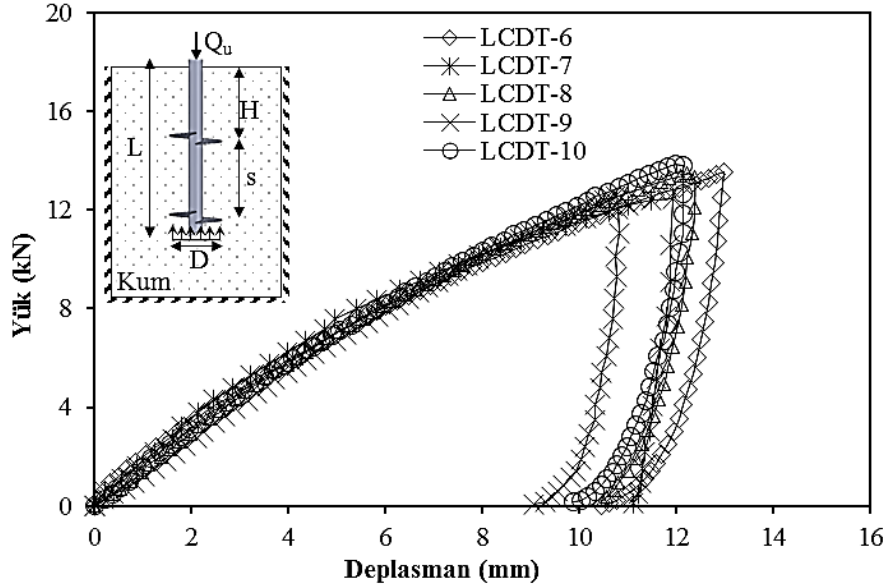


(b)

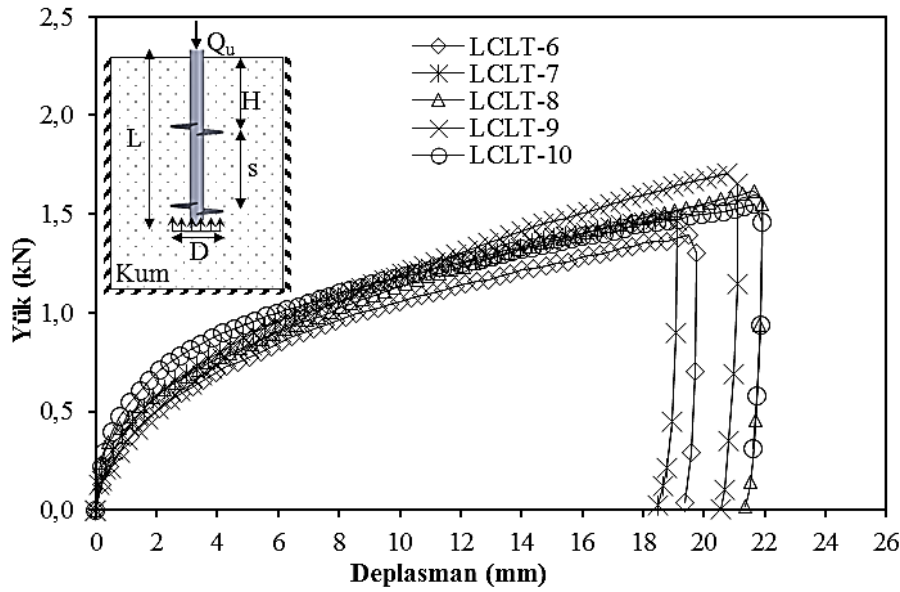
Şekil 6.5. Helis çapının etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

Şekil 6.5'teki yük-deplasman eğrileri incelendiğinde helis çapının artmasıyla birlikte hem sıkı hem de gevşek zemin için yük değerlerinde önemli ölçüde artışlar meydana geldiği görülmektedir.

Helis aralığı / helis çapı (s/D) etkisinin incelendiği Seri-2 deneylerinde, sıkı ve gevşek zemin içerisine gömülü kazıklar üzerinde yapılan aksel basınç yüklemesi için yükleme-boşaltma eğrileri Şekil 6.6'da yer almaktadır.



(a)

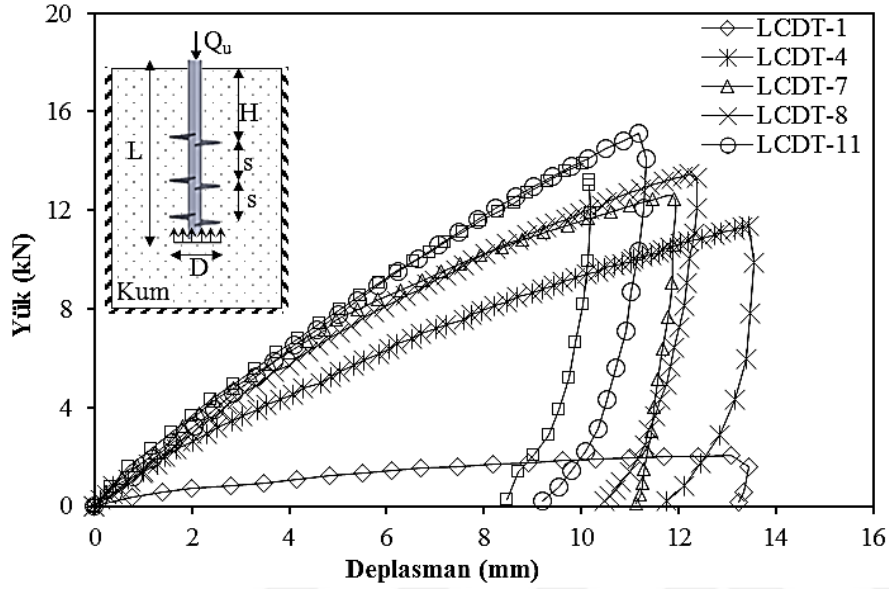


(b)

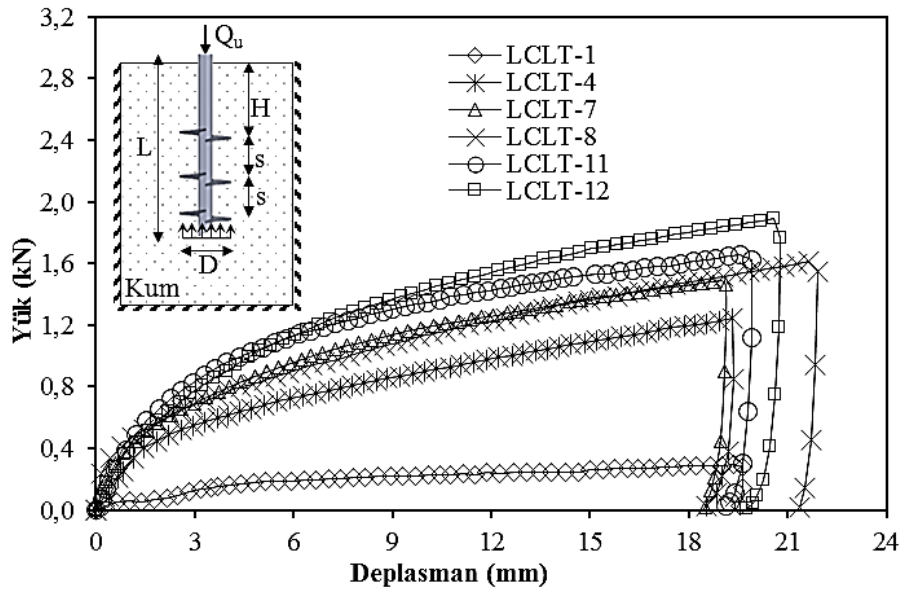
Şekil 6.6. Helis aralığı / helis çapı etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

Şekil 6.6 incelendiğinde helis aralığı (s) değişmesinin taşıma kapasitesini önemli derecede etkilemediği görülmektedir.

Sıkı ve gevşek zemin durumları için Seri-3 deneylerde (helis sayısı etkisi), zemin içerisine gömülü kazıklara uygulanan aksel basınç yüklemesi ile belirlenen yükleme-boşaltma eğrileri aşağıda verilmiştir (Şekil 6.7).



(a)



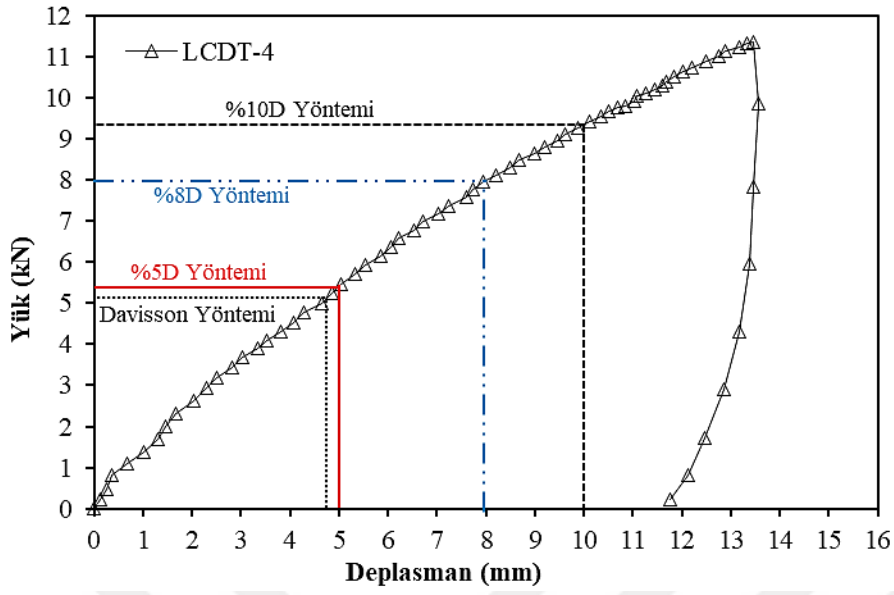
(b)

Şekil 6.7. Helis sayısı etkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

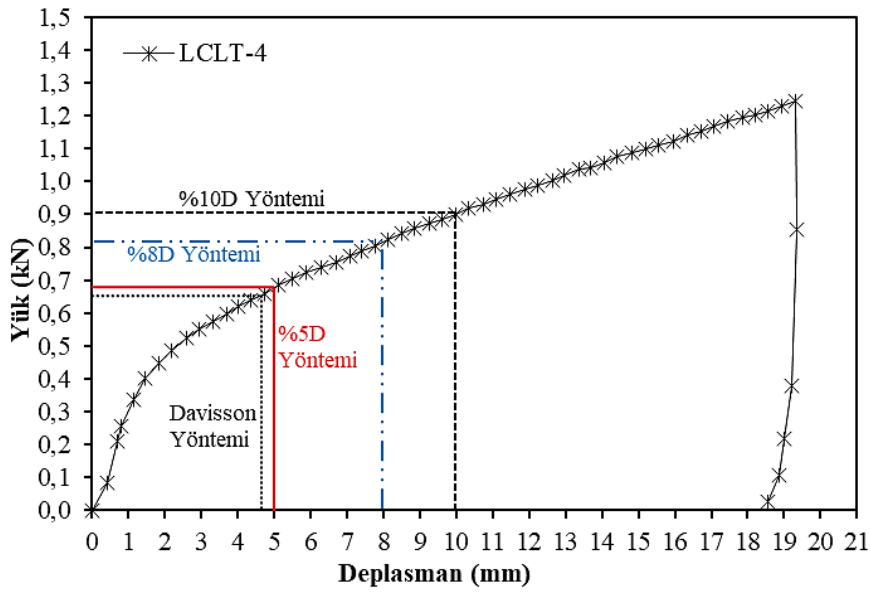
Helis sayısı etkisinin incelendiği bu seride, özellikle de düz kazığa göre artan helis sayısı ile hem sıkı hem de gevşek durumda 3 ila 6 kata varan artışların meydana geldiği tespit edilmiştir.

6.1.3. Model helisel kazıkların nihai eksenel yük kapasitesinin belirlenmesi

Deney sonuçlarından nihai yük değerlerinin belirlenmesinde yük-deplasman eğrilerinden yararlanılmış ve Bölüm 4 (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri)'te bahsi geçen ve eksenel basınç altındaki helisel kazıklarla ilgili literatürde kullanılan %5D Yöntemi, %8D Yöntemi, %10D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri esas alınmıştır. Şekil 6.8'de bir örnek olarak sıkı ve gevşek zemine oturan LCDT 4 (sıkı) ve LCLT 4 (gevşek) deneylerine (D=10cm, tek helis) ait yük-deplasman eğrilerinden 4 farklı yöntem (%5D Yöntemi, %8D Yöntemi, %10D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri) ile nihai yük değerlerinin tespiti gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.8. Nihai yük değerlerinin farklı yöntemlerle belirlenmesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

Farklı göçme yöntemleri (%5D Yöntemi, %8D Yöntemi, %10D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri) kullanılarak elde edilen nihai basınç yükü değerleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir (Çizelge 6.2-6.3).

Çizelge 6.2. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri (Sıkı durum)

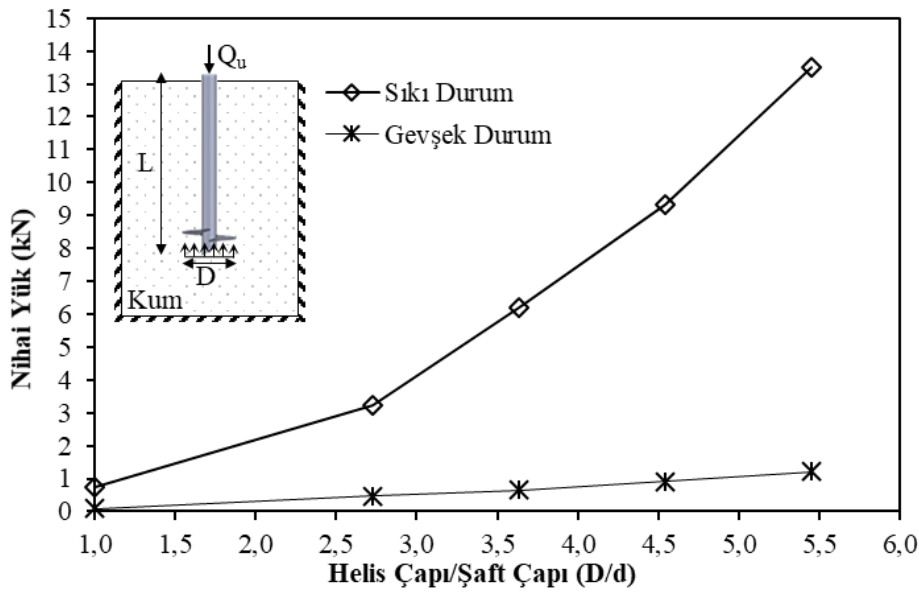
Seri	Deney No	%5D Yöntemi (kN)	%8D Yöntemi (kN)	%10D Yöntemi (kN)	Davisson Göçme Kriteri (kN)
Seri-1 (Sıkı)	LCDT-1	0,463	0,646	0,740	1,050
	LCDT-2	2,066	2,792	3,217	2,618
	LCDT-3	3,765	5,362	6,206	4,092
	LCDT-4	5,397	7,986	9,325	5,047
	LCDT-5	7,939	11,611	13,522	6,632
Seri-2 (Sıkı)	LCDT-6	7,045	9,919	11,476	6,694
	LCDT-7	7,589	10,276	11,566	7,083
	LCDT-8	7,013	10,253	11,876	6,629
	LCDT-9	6,735	10,142	12,007	6,320
	LCDT-10	7,042	10,389	12,201	6,678
Seri-3 (Sıkı)	LCDT-1	0,463	0,646	0,740	1,050
	LCDT-4	5,397	7,986	9,325	5,047
	LCDT-7	7,589	10,276	11,566	7,083
	LCDT-8	7,013	10,253	11,876	6,629
	LCDT-11	7,756	11,889	13,961	7,336
	LCDT-12	7,930	11,715	13,819	7,500

Çizelge 6.3. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri (Gevşek durum)

Seri	Deney No	%5D Yöntemi (kN)	%8D Yöntemi (kN)	%10D Yöntemi (kN)	Davisson Göçme Kriteri (kN)
Seri-1 (Gevşek)	LCLT-1	0,079	0,078	0,084	0,158
	LCLT-2	0,377	0,443	0,478	0,424
	LCLT-3	0,532	0,605	0,644	0,551
	LCLT-4	0,673	0,818	0,902	0,654
	LCLT-5	0,796	1,058	1,219	0,699
Seri-2 (Gevşek)	LCLT-6	0,772	0,964	1,059	0,747
	LCLT-7	0,878	1,084	1,185	0,847
	LCLT-8	0,838	1,023	1,136	0,808
	LCLT-9	0,828	1,058	1,192	0,793
	LCLT-10	0,946	1,096	1,182	0,922
Seri-3 (Gevşek)	LCLT-1	0,079	0,078	0,084	0,158
	LCLT-4	0,673	0,818	0,902	0,654
	LCLT-7	0,878	1,084	1,185	0,847
	LCLT-8	0,838	1,023	1,136	0,808
	LCLT-11	1,051	1,250	1,349	1,021
	LCLT-12	1,036	1,299	1,432	0,992

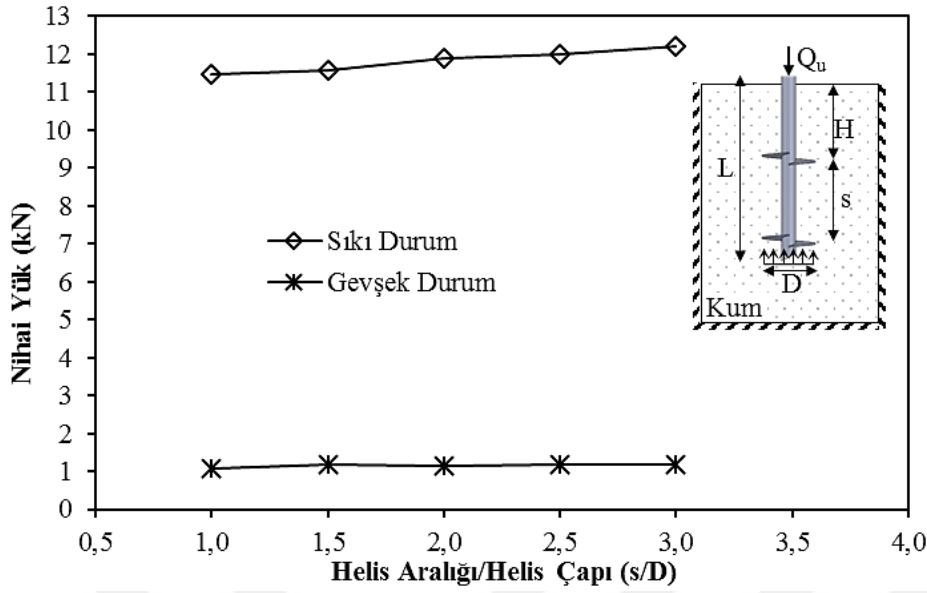
Çizelge 6.2 ve 6.3 incelendiğinde %5D ve Davisson göçme kriterinin yaklaşık olarak birbirine yakın değerler verdiği ve nihai yük kapasitelerini ise %10D yönteminin verdiği görülmektedir. Sıkı ve gevşek zemin durumlarında Seri-1 deneyleri incelendiğinde helissiz

düz kazıklara (LCDT 1 ve LCLT 1) göre en düşük helis çaplı kazıklarda (LCDT2 ve LCLT 2) yaklaşık olarak 5-6 kata varan artışların elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.9). Helisel plaka çapının 2 kat (LCDT 2-5 ve LCLT 2-5) arttığı durumda %10D yöntemi nihai yük değerleri ele alındığında yaklaşık yük miktarlarında sıkı ve gevşek zemin için sırasıyla yaklaşık olarak 4,3 ve 2,6 kata varan artışların meydana geldiği görülmektedir (Şekil 6.9). Helis çapı etkisinin incelendiği Seri-1 deneylerinde zemin sıklığı etkisi incelendiğinde, sıkı zeminde gevşek zemine göre yaklaşık 12 kata varan artışlar görülmektedir. Bu artış helis çapının artmasına bağlı olarak da artmaktadır.



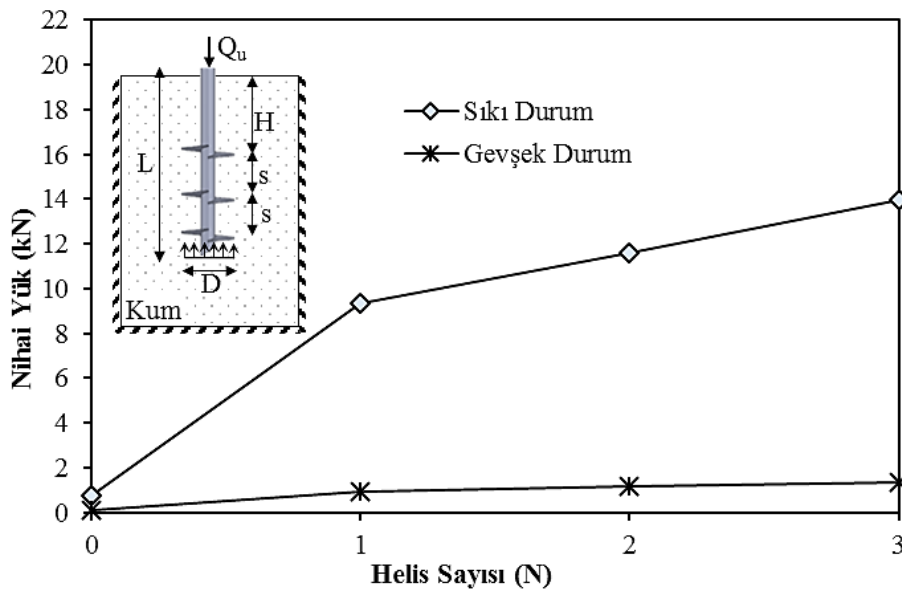
Şekil 6.9. Helis çapı etkisi (%10D yöntemine göre)

Seri-2 deneylerinde helisler arası mesafenin değişmesinin nihai yük için ciddi bir artış olmamakla birlikte sıkı zeminde s/D oranı artıkça arttığı, gevşek zeminde ise s/D oranı 1,5 ila 2,5 arasında olduğu durumda arttığı görülmektedir (Şekil 6.10). Seri-2 deneylerde, gevşek duruma göre sıkı zemin durumunda yaklaşık 11-12 kata varan bir fark görülmektedir.



Şekil 6.10. Helisler arası mesafe etkisi (%10D yöntemine göre)

Helis sayısı etkisinin incelendiği Seri-3 deneylerinde s/D oranı 1,5 olan iki ve üç helisli helisli kazıklar için incelenmiştir (Şekil 6.11). Düz kazıktan tek helisli kazığa (LCDT-LCLT 4) geçişte ortalama 11-13 kat (gevşek-sıkı), tek helisli kazıktan çift ve üç helisli kazığa geçişte ise sırasıyla yaklaşık 1,25-1,3 kat (sıkı-gevşek) ve 1,5-1,6 (sıkı-gevşek) kat seviyelerinde artışlar kaydedilmiştir. Sadece bir helisin düşük bir maliyetle eklenmesi ile yaklaşık %30'a varan bir kapasite artışı sağlaması hem ekonomiklik hem de taşıma gücü anlamında ciddi bir avantaj sağlamıştır.



Şekil 6.11. Helis sayısı etkisi (%10D yöntemine göre) ($s/D=1,5$)

Bölüm 4 (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri)'de belirtilen teorik yöntemlerle hesaplanan nihai yük değerleri ile deneysel sonuçlardan farklı göçme yöntemleri ile elde edilen nihai yük değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Farklı göçme kriterleri ve teorik hesaplamalar ile nihai kazık kapasiteleri

Deney No	Nihai Yük (Deneysel) (kN)				Nihai Yük (Teorik) (kN)	
	%5D Yöntemi	%8D Yöntemi	%10D Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri	Silindirik Yöntem	Ayrık Yöntem
LCDT-2	2,066	2,792	3,217	2,618	2,397	1,926
LCDT-3	3,765	5,362	6,206	4,092	4,550	3,321
LCDT-4	5,397	7,986	9,325	5,047	7,318	5,113
LCDT-5	7,939	11,611	13,522	6,632	10,702	7,304
LCDT-6	7,045	9,919	11,476	6,694	7,407	6,223
LCDT-7	7,589	10,276	11,566	7,083	7,446	6,094
LCDT-8	7,013	10,253	11,876	6,629	7,483	5,966
LCDT-9	6,735	10,142	12,007	6,320	7,515	5,840
LCDT-10	7,042	10,389	12,201	6,678	7,545	5,716
LCDT-11	7,756	11,889	13,961	7,336	7,545	10,450
LCDT-12	7,930	11,715	13,819	7,500	7,594	9,624
LCLT-2	0,377	0,443	0,478	0,424	0,411	0,384
LCLT-3	0,532	0,605	0,644	0,551	0,780	0,623
LCLT-4	0,673	0,818	0,902	0,654	1,255	0,930
LCLT-5	0,796	1,058	1,219	0,699	1,835	1,306
LCLT-6	0,772	0,964	1,059	0,747	1,306	1,070
LCLT-7	0,878	1,084	1,185	0,847	1,328	1,051
LCLT-8	0,838	1,023	1,136	0,808	1,349	1,032
LCLT-9	0,828	1,058	1,192	0,793	1,368	1,014
LCLT-10	0,946	1,096	1,182	0,922	1,385	0,998
LCLT-11	1,051	1,250	1,349	1,021	1,385	1,810
LCLT-12	1,036	1,299	1,432	0,992	1,413	1,680

Literatürde genel olarak teorik denklemlerin tahminlerinin taşıma kapasitesi faktörleri ve uygun göçme kriterinin seçilmesine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Örneğin teorik yöntemlerle %5D yöntemi karşılaştırmasında sıkı zeminde silindirik yöntem, gevşek zeminde ise ayrık yöntemin deneysel sonuçlara daha yakın veriler sunduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.5'te verilen maksimum tork değerleri kullanılarak literatürde önerilen üç farklı tork faktörü K_t (Hoyt ve Clemence (1989), Sakr (2015), Perko (2009)) değerleri ile farklı göçme yöntemleri (%5D Yöntemi, %10D Yöntemi, %8D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri) kullanılarak elde edilen nihai yük değerleri aşağıdaki çizelgede toplu halde verilmiştir.

Çizelge 6.5. Farklı tork faktörü (Kt) değerleri için taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Deney No	Nihai Yük (Deneysel) (kN)				Nihai Yük (Tork) (kN)		
	%5D Yöntemi	%8D Yöntemi	%10D Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri	Perko (2009)	Hoyt ve Clemence (1989)	Sakr (2015)
LCDT-2	2,066	2,792	3,217	2,618	1,997	0,790	0,883
LCDT-3	3,765	5,362	6,206	4,092	4,265	1,688	2,090
LCDT-4	5,397	7,986	9,325	5,047	6,622	2,620	3,367
LCDT-5	7,939	11,611	13,522	6,632	9,253	3,661	4,757
LCDT-6	7,045	9,919	11,476	6,694	8,652	3,423	4,467
LCDT-7	7,589	10,276	11,566	7,083	7,135	2,823	3,698
LCDT-8	7,013	10,253	11,876	6,629	6,738	2,666	3,507
LCDT-9	6,735	10,142	12,007	6,32	6,997	2,769	3,659
LCDT-10	7,042	10,389	12,201	6,678	7,086	2,804	3,725
LCDT-11	7,756	11,889	13,961	7,336	8,107	3,208	5,676
LCDT-12	7,93	11,715	13,819	7,5	9,277	3,671	6,168
LCLT-2	0,377	0,443	0,478	0,424	0,435	0,172	0,134
LCLT-3	0,532	0,605	0,644	0,551	0,458	0,181	0,147
LCLT-4	0,673	0,818	0,902	0,654	0,580	0,230	0,186
LCLT-5	0,796	1,058	1,219	0,699	1,002	0,396	0,317
LCLT-6	0,772	0,964	1,059	0,747	0,956	0,378	0,306
LCLT-7	0,878	1,084	1,185	0,847	0,943	0,373	0,302
LCLT-8	0,838	1,023	1,136	0,808	0,924	0,366	0,297
LCLT-9	0,828	1,058	1,192	0,793	0,825	0,326	0,267
LCLT-10	0,946	1,096	1,182	0,922	0,747	0,296	0,243
LCLT-11	1,051	1,25	1,349	1,021	1,163	0,460	0,495
LCLT-12	1,036	1,299	1,432	0,992	1,017	0,402	0,409

Literatürde önerilen üç farklı tork faktörü Kt değerleri ile ortalama kurulum tork değerleri çarpılarak gevşek ve sıkı zeminler için nihai yükler hesaplanmıştır. Buna göre, Perko (2009) tarafından önerilen Kt değeri kullanılarak elde edilen nihai yükün, deneysel sonuçlardan tespit edilen nihai yüklerle en yakın değerler verdiği görülmektedir (Çizelge 6.6). Çizelge 6.6'da Perko (2009) tarafından önerilen yöntem ile %5D ve Davisson göçme kriteri ile tahmin oranları verilmiştir.

Çizelge 6.6. Nihai yükün deneysel ve tork esaslı tahmin oranları

Deney No	Nihai Yük (Deneysel) (kN)		Nihai Yük (Tork) (kN)	Tahmin Oranı (%)	
	%5D Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri	Perko (2009)	%5 Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri
LCDT-2	2,066	2,618	1,997	103,43	131,07
LCDT-3	3,765	4,092	4,265	88,28	95,94
LCDT-4	5,397	5,047	6,622	81,50	76,22
LCDT-5	7,939	6,632	9,253	85,80	71,67
LCDT-6	7,045	6,694	8,652	81,43	77,37
LCDT-7	7,589	7,083	7,135	106,36	99,27
LCDT-8	7,013	6,629	6,738	104,08	98,38
LCDT-9	6,735	6,320	6,997	96,25	90,32
LCDT-10	7,042	6,678	7,086	99,37	94,24
LCDT-11	7,756	7,336	8,107	95,67	90,49
LCDT-12	7,930	7,500	9,277	85,48	80,84
LCLT-2	0,377	0,424	0,435	86,76	97,58
LCLT-3	0,532	0,551	0,458	116,19	120,34
LCLT-4	0,673	0,654	0,580	115,94	112,67
LCLT-5	0,796	0,699	1,002	79,47	69,79
LCLT-6	0,772	0,747	0,956	80,77	78,16
LCLT-7	0,878	0,847	0,943	93,08	89,80
LCLT-8	0,838	0,808	0,924	90,69	87,44
LCLT-9	0,828	0,793	0,825	100,38	96,14
LCLT-10	0,946	0,922	0,747	126,60	123,38
LCLT-11	1,051	1,021	1,163	90,40	87,82
LCLT-12	1,036	0,992	1,017	101,90	97,58

Literatürde deneysel nihai yük-kurulum torku ilişkisinden tork faktörleri (Kt) önerilmiştir. Bu bağlamda, sıkı ve gevşek zemin durumunda, farklı göçme yöntemleri için ölçülen nihai yük değerine karşı tork değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

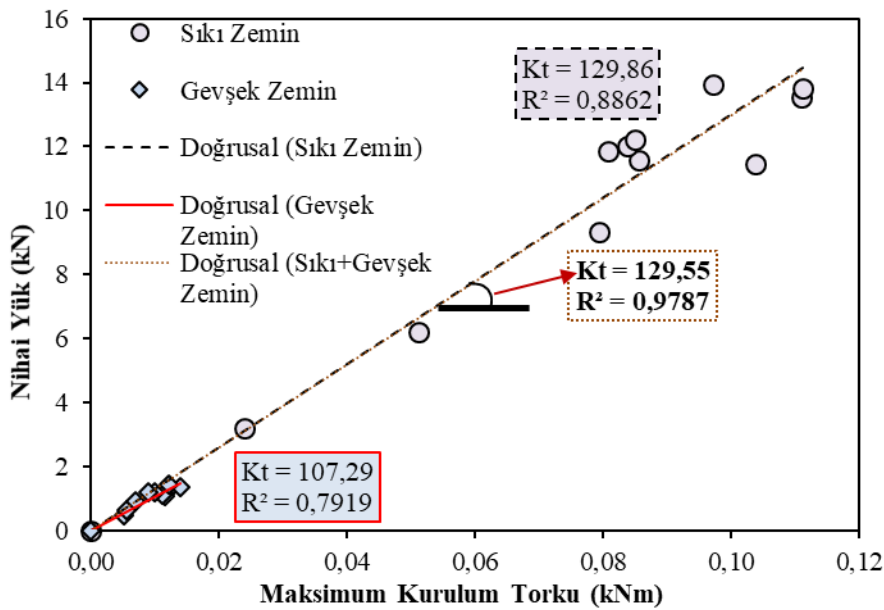
Çizelge 6.7. Farklı göçme yöntemleri için nihai yüke karşı kurulum torku ve Kt değerleri

Deney No	Kurulum Torku (kNm) (max. değer)	%5 metodu		%8 metodu		%10 metodu		Davisson's metodu	
		Kazık Kapasitesi (kN)	Kt (m^{-1})	Kazık Kapasitesi (kN)	Kt (m^{-1})	Kazık Kapasitesi (kN)	Kt (m^{-1})	Kazık Kapasitesi (kN)	Kt (m^{-1})
LCDT-2	0,024	2,066	86,26	2,792	116,58	3,217	134,34	2,618	109,31
LCDT-3	0,051	3,765	73,62	5,362	104,85	6,206	121,36	4,092	80,02
LCDT-4	0,079	5,397	67,97	7,986	100,58	9,325	117,44	5,047	63,56
LCDT-5	0,111	7,939	71,55	11,611	104,65	13,522	121,87	6,632	59,77
LCDT-6	0,104	7,045	67,91	9,919	95,61	11,476	110,62	6,694	64,53
LCDT-7	0,086	7,589	88,71	10,276	120,12	11,566	135,20	7,083	82,79
LCDT-8	0,081	7,013	86,81	10,253	126,91	11,876	146,99	6,629	82,05
LCDT-9	0,084	6,735	80,27	10,142	120,88	12,007	143,11	6,320	75,33
LCDT-10	0,085	7,042	82,88	10,389	122,27	12,201	143,59	6,678	78,59
LCDT-11	0,097	7,756	79,79	11,889	122,30	13,961	143,62	7,336	75,47
LCDT-12	0,111	7,930	71,29	11,715	105,31	13,819	124,22	7,500	67,42
LCLT-2	0,005	0,377	72,36	0,443	85,03	0,478	91,72	0,424	81,38
LCLT-3	0,005	0,532	96,90	0,605	110,20	0,644	117,33	0,551	100,36
LCLT-4	0,007	0,673	96,70	0,818	117,53	0,902	129,65	0,654	93,97
LCLT-5	0,012	0,796	66,28	1,058	88,09	1,219	101,47	0,699	58,20
LCLT-6	0,011	0,772	67,36	0,964	84,12	1,059	92,43	0,747	65,18
LCLT-7	0,011	0,878	77,63	1,084	95,84	1,185	104,75	0,847	74,92
LCLT-8	0,011	0,838	75,63	1,023	92,33	1,136	102,55	0,808	72,94
LCLT-9	0,010	0,828	83,72	1,058	106,98	1,192	120,55	0,793	80,13
LCLT-10	0,009	0,946	105,58	1,096	122,32	1,182	131,89	0,922	102,88
LCLT-11	0,014	1,051	75,39	1,250	89,67	1,349	96,77	1,021	73,24
LCLT-12	0,012	1,036	84,99	1,299	106,56	1,432	117,47	0,992	81,38

Çizelge 6.7'de görüldüğü gibi, model kazıklara ait yük deplasman eğrileri üzerinden farklı göçme yöntemleri için belirlenen nihai yükler ile bu kazıkların kurulumu sırasında okunan tork değerleri oranlanarak bu çalışmaya ait tork faktörleri (Kt) bulunmuştur. Sıkı ve gevşek zemin durumunda seçilen göçme yöntemine göre kurulum torkunun sabit kalması ve kazık kapasitesinin değişmesine bağlı olarak tork faktörünün (Kt) büyük oranlarda değiştiği görülmektedir. Literatür, önerilen Kt değerlerinin hangi göçme yönteminden elde edilecek kazık kapasitesine yakın değer vereceği veya o kapasitenin güvenli oturma değerlerini hangi oranda karşılayabileceği gibi birçok soru işaretini barındırmaktadır. Örneğin, Çizelge 6.7 incelendiğinde sıkı zeminde Kt faktörleri %5D yöntemine göre $67,91-88,71m^{-1}$ iken %10D yöntemine göre $110,62-146,99m^{-1}$ arasında değişmiştir. Harnish ve El Naggar (2017) tarafından yapılan çalışmada, Kt faktörlerini oluşturmak için kullanılacak kazık nihai kapasite değerlerini belirlemek için uygun bir yorumlanmış yenilme kriteri seçmek gerektiği

ifade edilmiştir. Bundan dolayı, yapılacak herhangi bir proje özelinde, kullanılacak göçme yönteminin ve tork faktörü seçiminin ilgili projeye uygun olarak yükleme deneyleri ile belirlenmesi daha doğru ve güvenilir bir yaklaşımdır.

Şekil 6.12’de nihai basınç kapasitesi (%10D yöntemi) ile maksimum kurulum torku arasındaki ilişki görülmektedir. Nihai yük-kurulum torku değerlerine doğrusal regresyon uygulanıp sıfırdan geçen eğilim çizgisinin eğimi tork faktörü K_t ’yi temsil etmektedir. Tasarım açısından sıfırdan geçen eğilim çizgisi önerilmiştir (Livneh ve El Naggar, 2008).



Şekil 6.12. Nihai kapasite-maksimum kurulum torku ilişkisi

Şekil 6.12’de sıkı, gevşek ve tüm (sıkı + gevşek) deneylere ait 3 farklı tork faktörü (K_t) değeri incelendiğinde zemin sıklığının tork faktörü K_t değerini etkilediği görülmektedir. Gevşek zemine ait K_t değeri $107,29m^{-1}$ iken sıkı zemin için $129,86m^{-1}$ değerini almıştır. Tüm deneylerin yer aldığı yük-maksimum kurulum torku ilişkisindeki eğilim çizgisinden determinasyon katsayısı 0,97 ve K_t değeri $129,55m^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

Farklı kurulum torku (maksimum, 0.5-0.6m arası ortalaması ve uç tork) tespitine karşı % 10D nihai yük değerlerine kurulum torkunun seçiminin K_t değeri üzerindeki etkisi aşağıdaki çizelgelerde incelenmiştir (Çizelge 6.8-6.9).

Çizelge 6.8. Sıkı zeminde farklı kurulum torkları için tork faktörleri (K_t)

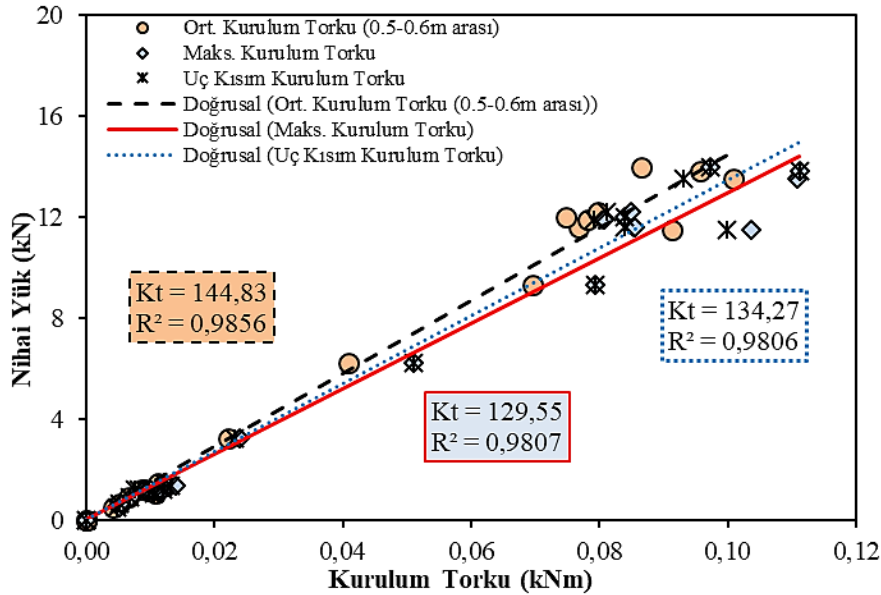
Deney No	%10D yöntemi Kazık Kapasitesi (kN)	Ortalama Kurulum Torku (0.5-0.6m arası)		Maks. Kurulum Torku		Uç Kurulum Torku	
		Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)	Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)	Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)
LCDT-2	3,217	0,022	145,84	0,024	134,32	0,023	139,01
LCDT-3	6,206	0,041	151,97	0,051	121,37	0,051	121,37
LCDT-4	9,325	0,070	133,85	0,079	117,43	0,079	117,43
LCDT-5	13,522	0,101	133,97	0,111	121,87	0,093	145,22
LCDT-6	11,476	0,091	125,71	0,104	110,62	0,100	114,92
LCDT-7	11,566	0,077	150,59	0,086	135,20	0,084	137,89
LCDT-8	11,876	0,078	151,94	0,081	146,99	0,079	150,04
LCDT-9	12,007	0,075	160,40	0,084	143,11	0,084	143,11
LCDT-10	12,201	0,080	152,99	0,085	143,60	0,081	150,21
LCDT-11	13,961	0,086	161,46	0,097	143,62	0,097	143,62
LCDT-12	13,819	0,096	144,38	0,111	124,22	0,111	124,22

Çizelge 6.9. Gevşek zeminde farklı kurulum torkları için tork faktörleri (K_t)

Deney No	%10D yöntemi Kazık Kapasitesi (kN)	Ortalama Kurulum Torku (0.5-0.6m arası)		Maks. Kurulum Torku		Uç Kurulum Torku	
		Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)	Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)	Tork (kNm)	K _t (m ⁻¹)
LCLT-2	0,478	0,004	116,14	0,005	91,70	0,005	97,88
LCLT-3	0,644	0,005	124,12	0,005	117,34	0,005	123,61
LCLT-4	0,902	0,007	138,58	0,007	129,73	0,007	133,12
LCLT-5	1,219	0,010	116,42	0,012	101,43	0,012	101,43
LCLT-6	1,059	0,011	97,67	0,011	92,43	0,011	99,47
LCLT-7	1,185	0,010	112,94	0,011	104,77	0,010	120,70
LCLT-8	1,136	0,010	113,60	0,011	102,55	0,010	109,03
LCLT-9	1,192	0,009	128,62	0,010	120,54	0,008	144,12
LCLT-10	1,182	0,008	139,18	0,009	131,96	0,008	156,24
LCLT-11	1,349	0,012	108,99	0,014	96,77	0,013	101,85
LCLT-12	1,432	0,011	128,24	0,012	117,50	0,012	117,73

Çizelge 6.8-6.9 incelendiğinde, K_t değerleri ortalama kurulum torku için 97,67-161,46 m⁻¹, maksimum kurulum için 91,70-146,99 m⁻¹ ve uç kısım torku için de 97,88-156,24 m⁻¹ arasında değiştiği belirlenmiştir. Birçok deneyde uç kısım torku ile maksimum tork değerleri aynı olduğu için K_t değerleri de yaklaşık olarak birbirine yakın çıkmıştır. Şekil 6.13'te %10D nihai kapasite ile farklı kurulum torkları seçimine bağlı olarak elde edilen tasarım K_t

değerleri görülmektedir. Elde edilen K_t değerleri incelendiğinde kurulum torku seçimine bağlı olarak yaklaşık %12'ye varan farklılıklar olduğu görülmektedir.



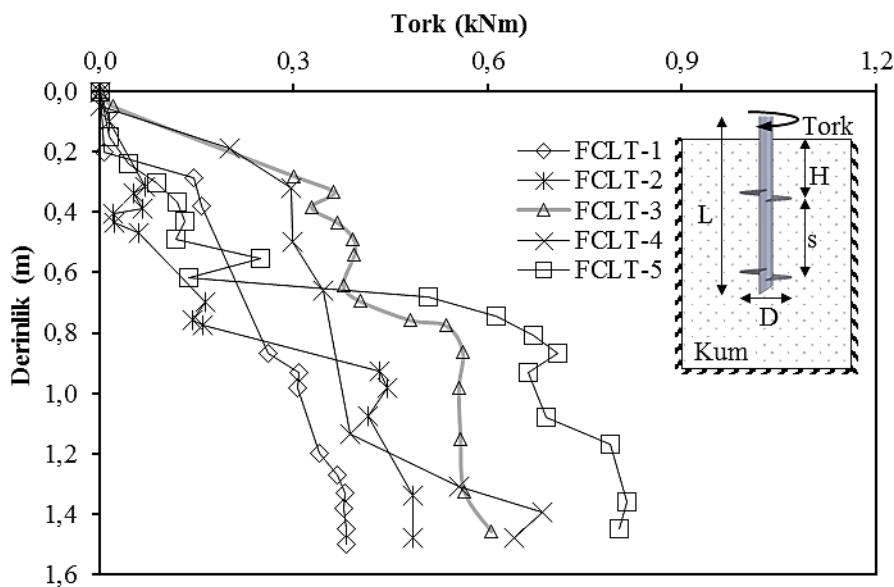
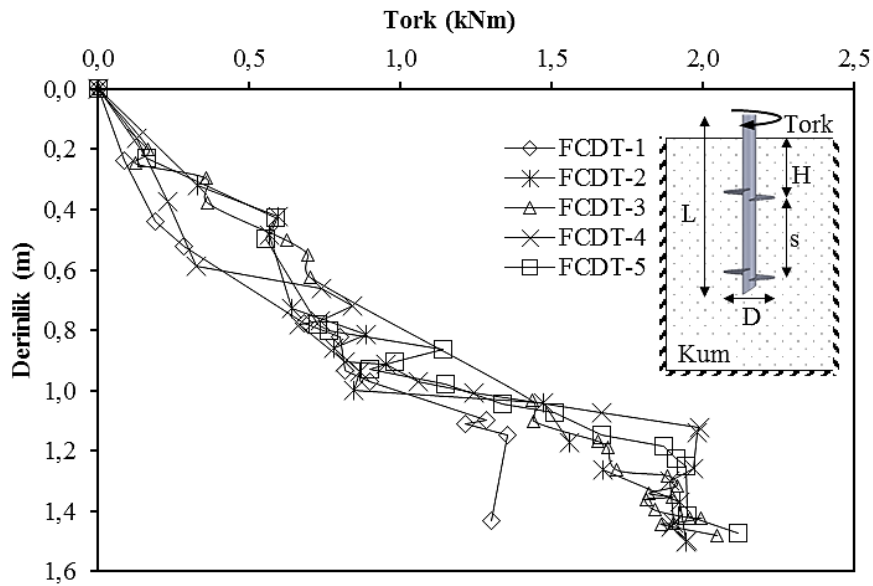
Şekil 6.13. Farklı kurulum torku tork faktörü K_t ilişkisi

6.2. Büyük Ölçekli Arazi Deneyleri

Bu bölümde, sıkı ve gevşek zemine oturan helisel kazıkların, aksenal basınç altındaki davranışlarının büyük ölçekli arazi deneyleri ile araştırıldığı deney sonuçları sunulmuştur. Deneylerde farklı helis çapı (D), helisler arası mesafe (s), helis sayısı (N) ve zemin sıklık durumu gibi farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, Bölüm 4'de (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri) belirtilen ve literatürde kullanılan yöntemler (teorik, tork ve deneysel) kullanılarak incelenmiştir. Bu bölümün akışı, i) Helisel Kazıkların Kurulum Torku-Derinlik Sonuçları, ii) Basınç Yükleme Deneyleri ve iii) Nihai Yük Kapasitelerinin Belirlenmesi şeklinde kurgulanmıştır.

6.2.1. Büyük ölçekli helisel kazıkların derinlik boyunca kurulum tork değerleri

Her bir deney için zemine yerleştirilen büyük ölçekli helisel kazıkların kurulumu esnasında okunan tork değerleri sıkı ve gevşek zemin durumları için derinliğe bağlı olarak aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Tork-derinlik ilişkisi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

Şekil 6.14 incelendiğinde özellikle aynı çaplı helisel kazıkların başlangıç tork değerlerinin birbirine yakın, zemine giren helis sayısı ve derinlik arttıkça hem gevşek hem de sıkı zemin durumları için tork değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Sıkı ve gevşek zemin durumları incelendiğinde ise gevşek duruma göre sıkı zemine yerleştirilen helisel kazıkların tork değerleri arasında yaklaşık olarak 2,5-3,5 kat arasında artış seviyelerinin gözlemlendiği belirlenmiştir. Her bir deney için elde edilen 3 farklı kurulum torku değerleri Çizelge 6.10'da sıkı ve gevşek zemin durumları için verilmiştir.

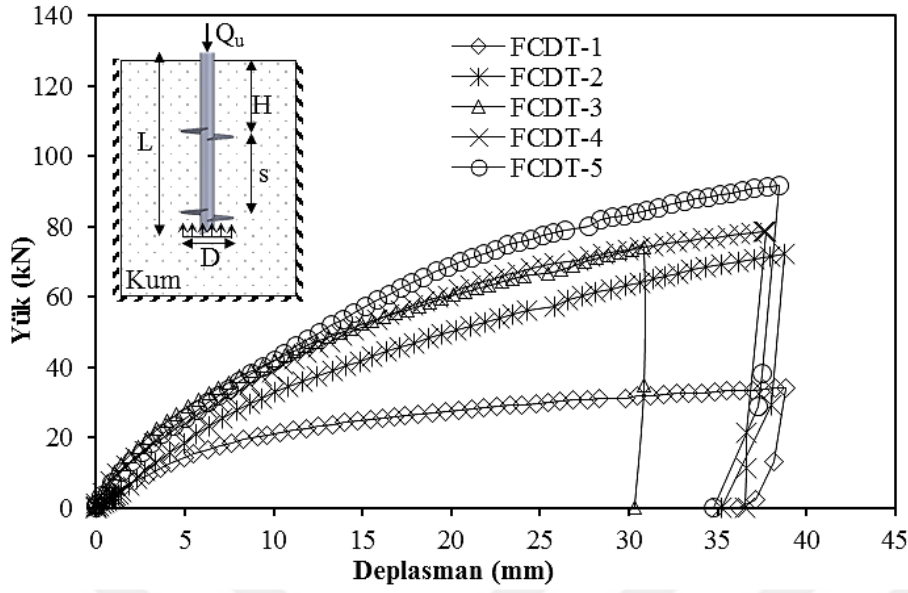
Çizelge 6.10. Farklı zemin durumu için kurulum tork değerleri

Deney Kodu	Zemin Durumu	Kurulum Torku (Max. değer) (kNm)	Kurulum Torku (Son 0.25m ort.) (kNm)	Kurulum Torku (Kazık ucu) (kNm)
FCDT-1	Sıkı	1,353	1,273	1,299
FCDT-2		1,944	1,813	1,944
FCDT-3		2,047	1,888	2,047
FCDT-4		1,989	1,921	1,947
FCDT-5		2,115	2,001	2,115
FCLT-1	Gevşek	0,381	0,377	0,381
FCLT-2		0,485	0,485	0,485
FCLT-3		0,606	0,585	0,606
FCLT-4		0,685	0,627	0,642
FCLT-5		0,816	0,810	0,803

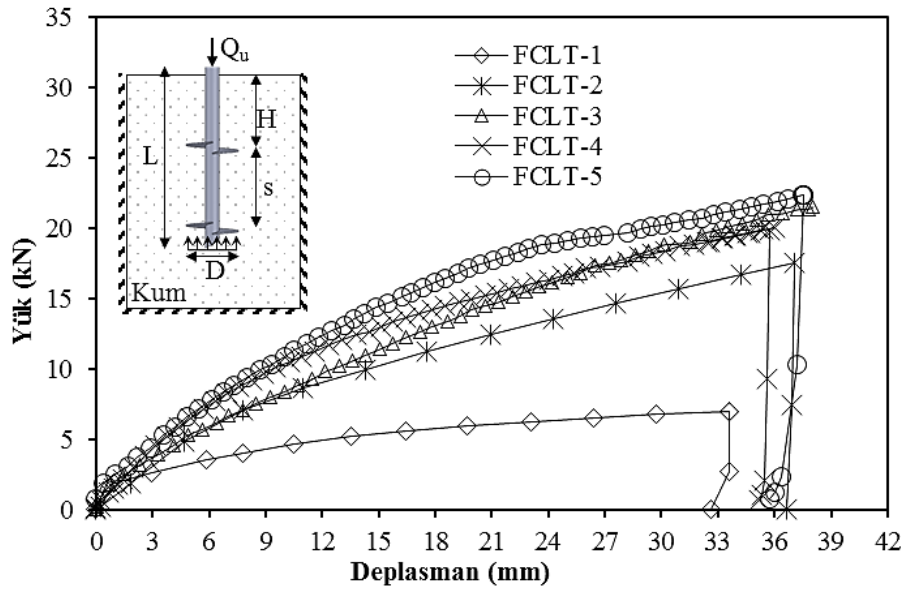
Maksimum kurulum torku değerleri incelendiğinde, helis çapı değişiminin tork değerini sıkı zeminde yaklaşık %40-45, gevşek zeminde ise yaklaşık %25-30 arasında değişen oranlarda arttırdığı görülmüştür. Çift helis durumunda maksimum kurulum tork değerleri, $s/D=1,5$ ve $2,0$ için sıkı zeminde birbirine yakınken, gevşek zemin için yaklaşık 1,13 kata varan bir fark olduğu görülmüştür. Helis sayısı etkisi incelendiğinde ise tek helise göre çift heliste sıkı zeminde artış miktarı yaklaşık 1,05 kat iken gevşek zeminde yaklaşık olarak 1,3 kat civarında bir artış gözlenmiştir. Tek helise göre üç helis olması durumunda sıkı zemin durumunda yaklaşık 1,08 kat, gevşek durumda ise 1,68 kat bir fark görülmektedir. Bu durumun sebebinin sıkı zeminde ilk helisin zemini gevşeterek ilerlemesi ve en fazla torka maruz kalması, zemine sonradan giren helislerin daha gevşek zeminde ilerlemesi olduğu düşünülmektedir.

6.2.2. Büyük ölçekli helisel kazıkların aksenal basınç yükleme deney sonuçları

Sıkı ve gevşek kum zemin durumları için farklı çap (D), helisler arası mesafe oranı (s/D) ve helis sayısı (N) gibi farklı parametreler kullanılarak helisel kazıklar üzerinde aksenal basınç yüklemesi yapılmıştır. Elde edilen yükleme-boşaltma eğrileri Şekil 6.15'te grafik olarak sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6.15. Eksenel basınç deney sonuçları a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

Şekil 6.15'te yer alan grafik sonuçları incelendiğinde, helis çapının artmasına bağlı olarak yükün önemli oranda arttığı, model helisel kazıklarda olduğu gibi helisler arası mesafe oranının (s/D) sonuçları çok etkilemediği ve helis sayısının artması ile birlikte yük kapasitesinin her iki zemin durumu içinde (sıkı ve gevşek) arttığı görülmektedir.

6.2.3. Büyük ölçekli helisel kazıkların nihai eksenel yük kapasitesinin belirlenmesi

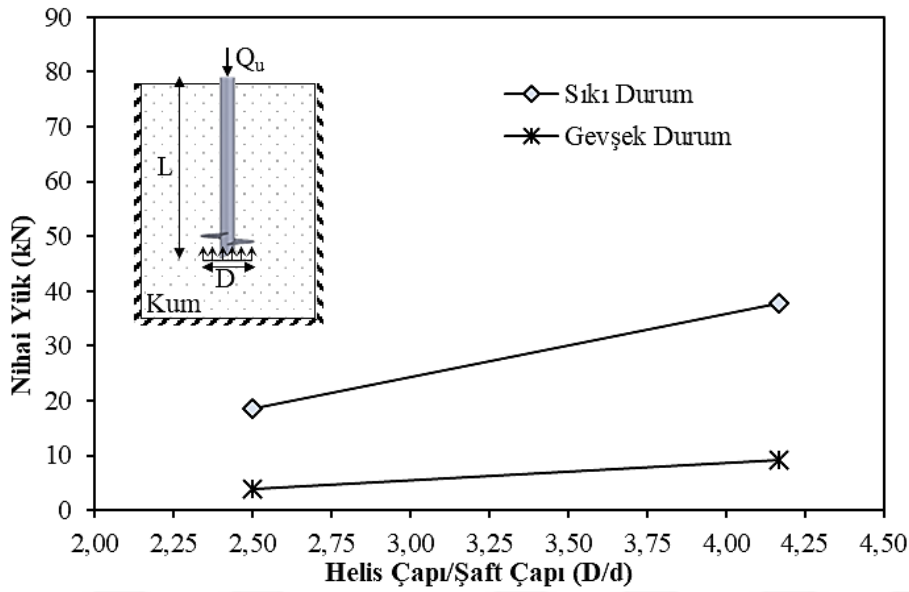
Deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında literatürde eksenel basınç altındaki helisel kazıklarda nihai kapasitelerin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden yararlanılmıştır. Bu kapsamda literatürde konu ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğunda kullanılan ve Bölüm 4'te (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri) ayrıntıları verilen %5D Yöntemi, %10D Yöntemi, %8D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriterleri esas alınarak sonuçlar yorumlanmıştır. Nihai yük değerleri Bölüm 6.1.2'de yer alan gösterime benzer şekilde tespit edilmiştir.

Farklı göçme yöntemleri (%5D Yöntemi, %10D Yöntemi, %8D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri) kullanılarak elde edilen nihai basınç yükü değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 6.11).

Çizelge 6.11. Farklı göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri

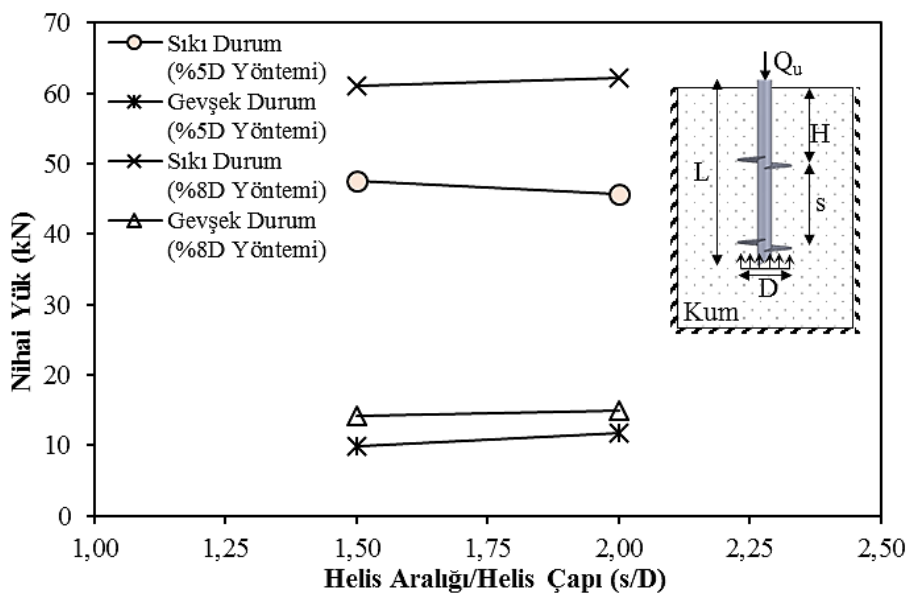
Deney Kodu	%5D Yöntemi (kN)	%8D Yöntemi (kN)	%10D Yöntemi (kN)	Davisson Göçme Kriteri (kN)
FCDT-1	18,511	22,826	24,886	14,964
FCDT-2	37,730	50,887	57,207	22,503
FCDT-3	47,616	61,143	67,051	31,791
FCDT-4	45,702	62,272	68,722	27,544
FCDT-5	49,751	69,999	77,087	29,291
FCLT-1	3,900	4,962	5,362	3,351
FCLT-2	9,258	12,125	13,813	5,895
FCLT-3	9,859	14,188	16,519	5,899
FCLT-4	11,755	14,959	16,703	7,409
FCLT-5	12,687	17,282	19,073	7,573

Sıkı ve gevşek zemin durumları için %5D yöntemi kullanılarak kıyaslama yapıldığında gevşek zemine göre sıkı zeminde nihai yüklerde 5 kata varan artışlar olduğu gözlenmektedir. Diğer yöntemlere göre de benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Helis plaka çapının 1,67 kat artması durumunda (FCDT 1-2 ve FCLT 1-2) her iki zemin koşulunda 4 farklı yöntemle göre kıyaslandığında yaklaşık 2,5 kata varan bir artış meydana geldiği görülmektedir. Örneğin, %5 yöntemine göre helis çapının 1,67 kat artması sıkı ve gevşek duruma göre nihai yükleri sırasıyla 2,03 ve 2,37 kat oranlarında arttırmıştır (Şekil 6.16).



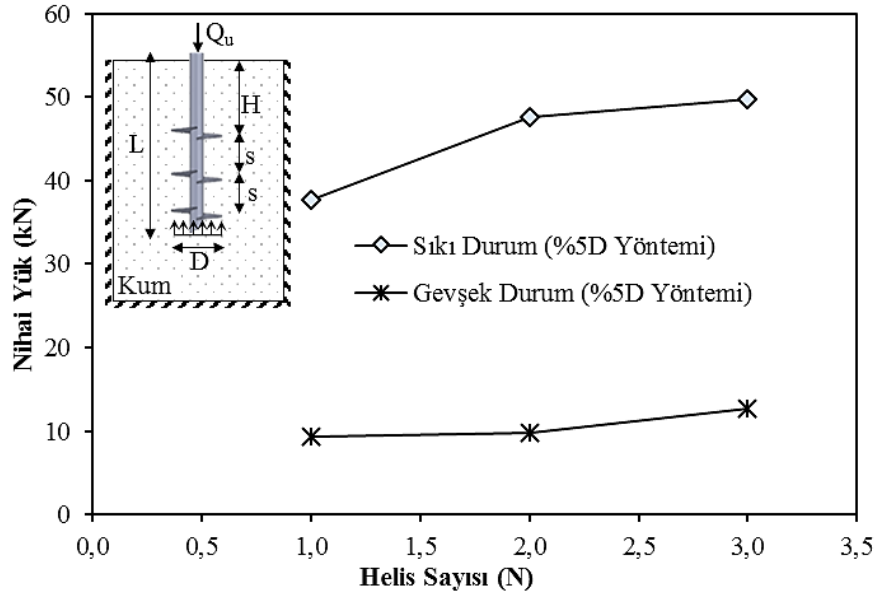
Şekil 6.16. Helis çapı etkisi (%5D yöntemine göre)

Helis aralığı etkisinin incelendiği çift helisli kazıklarda farklı s/D (1,5 ve 2,0) durumları için dört farklı göçme yöntemine göre her iki zemin durumu için birbirine yakın sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 6.17'de sunulan grafik incelendiğinde %5D ve %8D yöntemine göre helisler arası mesafe oranının (s/D) yaklaşık %33 arttırılması durumunda sıkı zeminde %5D yöntemine göre yaklaşık %4 oranında azaldığı %8D yöntemine göre ise de nihai yüklerin yaklaşık %2 oranında arttığı belirlenmiştir. Ancak genel itibariyle değerlerin birbirine yakın çıktığı görülmektedir.



Şekil 6.17. Helisler arası mesafe/helis çapı oranı etkisi (s/D) (%5D ve %8D yöntemine göre)

Helis sayısı etkisinin incelendiğinde grafikte %5D göçme yöntemine göre sıkı zemin için tek helisten çift ($s/D=1,5$) ve üç ($s/D=1,5$) helise geçişte sırasıyla yaklaşık olarak %26 ve %31 oranlarında nihai yük artışı gözlemlendiği, gevşek zeminde ise bu artış değerlerinin sırasıyla yaklaşık %7 ve %37 olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Helis sayısı etkisi (N) (%5D yöntemine göre)

Dört farklı göçme yöntemi kullanılarak deneysel sonuçlardan elde edilen yük değerleri ile Bölüm 4'te (Helisel Kazıklarda Taşıma Kapasitesi Yöntemleri) belirtilen teorik yöntemlerden elde edilen nihai yük değerleri Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Deneysel-teorik nihai kazık kapasiteleri

Deney Kodu	Nihai Yük (Deneysel) (kN)				Nihai Yük (Teorik) (kN)	
	%5D Yöntemi	%8D Yöntemi	%10D Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri	Silindirik Yöntem	Ayrık Yöntem
FCDT-1	18,511	22,826	24,886	14,964	36,365	29,954
FCDT-2	37,730	50,887	57,207	22,503	113,309	79,147
FCDT-3	47,616	61,143	67,051	31,791	115,304	93,869
FCDT-4	45,702	62,272	68,722	27,544	115,869	91,909
FCDT-5	49,751	69,999	77,087	29,291	116,848	160,655
FCLT-1	3,900	4,962	5,362	3,351	6,243	6,053
FCLT-2	9,258	12,125	13,813	5,895	19,445	14,493
FCLT-3	9,859	14,188	16,519	5,899	20,586	16,210
FCLT-4	11,755	14,959	16,703	7,409	20,909	15,931
FCLT-5	12,687	17,282	19,073	7,573	21,468	27,880

Çizelge 6.12 incelendiğinde ayırık yöntemin genel olarak deney sonuçlarına üç helisli kazık hariç daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle gevşek zeminde teorik ayırık yöntem ile %10D yöntemi tahmin oranları ele alındığında birbirine oldukça yakın değerler elde edilebildiği belirlenmiştir. Sıkı zemin için silindirik yöntemin daha uzak sonuçlar vermesinin nedeninin, yöntemin helisel kazıkların zemin içerisine girerken örselenme etkisini dikkate almaması olarak görülebilir. Bölüm 4.1.2’de ayırık yöntem açıklanırken 0.7Rq azaltması yapıldığı ve bu sayede kurulum etkisinin dikkate alınmaya çalışıldığı ifade edilmiştir.

Helisel kazıkların kurulumu esnasında okunan tork değerlerinden maksimum değerleri ile literatürde önerilen ve detayları Bölüm 4.2’de verilen üç farklı tork faktörü Kt (Hoyt ve Clemence (1989), Sakr (2015), Perko (2009)) değerleri ile farklı göçme yöntemleri (%5D Yöntemi, %10D Yöntemi, %8D Yöntemi ve Davisson Göçme Kriteri) kullanılarak elde edilen nihai yük değerleri aşağıdaki çizelgede toplu halde verilmiştir (Çizelge 6.13).

Çizelge 6.13. Farklı tork faktörleri (Kt) ile taşıma kapasite değerleri

Deney Kodu	Nihai Yük (Deneysel) (kN)				Nihai Yük (Tork) (kN)		
	%5D Yöntemi	%8D Yöntemi	%10D Yöntemi	Davisson Göçme Kriteri	Perko (2009)	Hoyt ve Clemence (1989)	Sakr (2015)
FCDT-1	18,511	22,826	24,886	14,964	44,914	44,649	39,549
FCDT-2	37,730	50,887	57,207	22,503	64,549	64,152	56,838
FCDT-3	47,616	61,143	67,051	31,791	67,992	67,551	65,806
FCDT-4	45,702	62,272	68,722	27,544	66,058	65,637	63,934
FCDT-5	49,751	69,999	77,087	29,291	70,247	69,795	92,068
FCLT-1	3,900	4,962	5,350	3,351	12,649	12,573	7,714
FCLT-2	9,258	12,125	13,813	5,895	16,119	16,005	9,831
FCLT-3	9,859	14,188	16,519	5,899	20,112	19,998	11,621
FCLT-4	11,755	14,959	16,703	7,409	22,755	22,605	13,149
FCLT-5	12,687	17,282	19,073	7,573	27,093	26,928	20,851

Perko (2009) ve Hoyt ve Clemence (1989) Kt değerlerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle bu iki faktörden elde edilen yük değerleri yaklaşık aynı çıkmaktadır. Genel olarak 3 farklı tork yönteminin FCDT-FCLT 1 deneyi dışında deneysel yöntemlere göre yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

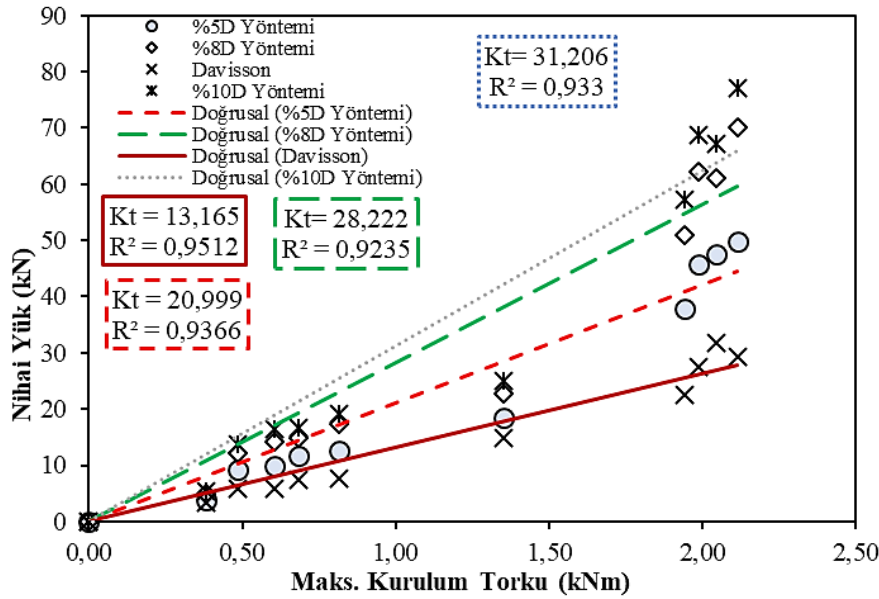
Farklı göçme yöntemleri (%5D, %8D, %10D ve Davisson) ile elde edilen Kt değerleri ile deneysel nihai yüklere karşılık elde edilen Kt değerleri hem sıkı hem de gevşek zeminler

için Çizelge 6.14’de sunulmuştur. %8D yöntemi ile elde edilen Kt değerleri ele alındığında, Kt değerlerinin FCDT 2-5 ve FCLT 2-5 (helis çapları eşit) helisel kazıklarda sıkı zeminde $26,18 \text{ m}^{-1}$ ile $33,09 \text{ m}^{-1}$ arasında, gevşek zeminde ise $24,98 \text{ m}^{-1}$ ile $21,18 \text{ m}^{-1}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Gevşek zemine göre sıkı zemin ortalama Kt değerleri yaklaşık olarak %25 daha fazla çıkmıştır.

Çizelge 6.14. Farklı göçme yöntemleri için Kt değerleri

Deney Kodu	Kurulum Torku	%5D Yöntemi		%8D Yöntemi		%10D Yöntemi		Davisson	
	(max. değer) (kNm)	Nihai Yük (kN)	Kt (m^{-1})	Nihai Yük (kN)	Kt (m^{-1})	Nihai Yük (kN)	Kt (m^{-1})	Nihai Yük (kN)	Kt (m^{-1})
FCDT-1	1,353	18,511	13,68	22,826	16,87	24,886	18,39	14,964	11,06
FCDT-2	1,944	37,730	19,41	50,887	26,18	57,207	29,43	22,503	11,58
FCDT-3	2,047	47,616	23,26	61,143	29,87	67,051	32,76	31,791	15,53
FCDT-4	1,989	45,702	22,98	62,272	31,31	68,722	34,55	27,544	13,85
FCDT-5	2,115	49,751	23,52	69,999	33,10	77,087	36,45	29,291	13,85
FCLT-1	0,381	3,900	10,24	4,962	13,02	5,350	14,04	3,351	8,80
FCLT-2	0,485	9,258	19,09	12,125	25,00	13,813	28,48	5,895	12,15
FCLT-3	0,606	9,859	16,27	14,188	23,41	16,519	27,26	5,899	9,73
FCLT-4	0,685	11,755	17,16	14,959	21,84	16,703	24,38	7,409	10,82
FCLT-5	0,816	12,687	15,55	17,282	21,18	19,073	23,37	7,573	9,28

Şekil 6.19’da farklı göçme yöntemlerine göre her bir yöntem için sıkı ve gevşek zemini içine alan Kt değerleri elde edilmiştir. Kt değerlerinde iki kata varan farklar olduğu görülmektedir.



Şekil 6.19. Farklı göçme yöntemlerine göre tork değerleri

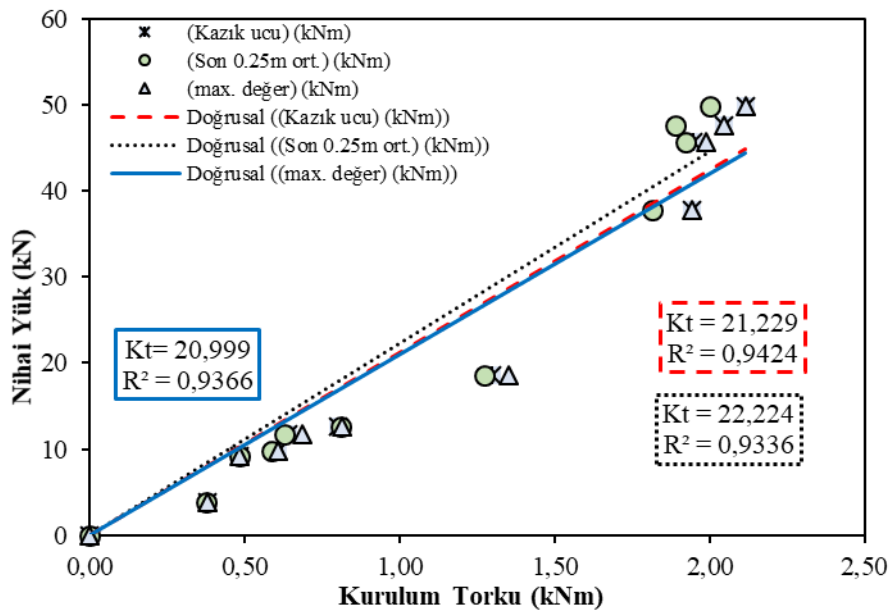
Literatür çalışmaları incelendiğinde, kurulum torku seçiminde de farklılıklar olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak tork seçiminde kullanılan farklı seçim yöntemleri (maksimum, 1,25-1,50m arası ortalaması ve uç tork) dikkate alınarak %5D için nihai yük değerleri, kurulum torkunun seçimi ile Kt değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 6.15).

Çizelge 6.15. Farklı kurulum torku seçimine karşı Kt değerleri

Deney Kodu	%5D Nihai Yük (kN)	Maksimum Tork		Ortalama Tork		Uç Tork	
		Tork (kNm)	Kt (m ⁻¹)	Tork (kNm)	Kt (m ⁻¹)	Tork (kNm)	Kt (m ⁻¹)
FCDT-1	18,511	1,353	13,68	1,273	14,54	1,299	14,25
FCDT-2	37,730	1,944	19,41	1,813	20,81	1,944	19,41
FCDT-3	47,616	2,047	23,26	1,888	25,22	2,047	23,26
FCDT-4	45,702	1,989	22,98	1,921	23,79	1,947	23,47
FCDT-5	49,751	2,115	23,52	2,001	24,86	2,115	23,52
FCLT-1	3,900	0,381	10,24	0,377	10,34	0,381	10,24
FCLT-2	9,258	0,485	19,09	0,485	19,09	0,485	19,09
FCLT-3	9,859	0,606	16,27	0,585	16,85	0,606	16,27
FCLT-4	11,755	0,685	17,16	0,627	18,75	0,642	18,31
FCLT-5	12,687	0,816	15,55	0,810	15,66	0,803	15,80

Çizelge 6.15'te verilen farklı tork değerleri ile %5D göçme yönteminden elde edilen nihai yükler arasında kurulan ilişki sonucunda elde edilen Kt değerleri Şekil 6.20'de verilmiştir. Yaklaşık olarak kurulum torku seçimine bağlı Kt değerinde %6'ya varan bir fark olduğu

görülmektedir. Kurulum torku-derinlik grafikleri incelendiğinde derinlik boyunca tork değerlerinin artma/azalma şeklinde sıçramalar yaparak ilerlediği görülmektedir. Bu durum kurulum torkundan elde edilen nihai yüklerde farklılıklar olmasına neden olmaktadır. Ayrıca ortalama tork için alınan değer aralığı ve tork değerlerini okuma sıklığının da sonuçları etkileyeceği açıktır. Böyle bir durumda güvenli tarafta kalma adına daha düşük yük değerini veren seçimi yapmak önerilmiştir.



Şekil 6.20. Farklı kurulum torku-tork faktörü Kt ilişkisi

7. SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMALARI

Sayısal yöntemler, bu çalışma özelinde sonlu elemanlar yöntemi (FEM – Finite Element Method), matematiksel çözüm yöntemi olup, bu yöntem esas alınarak yapılan problem çözümlerinde belirli kabuller yapılmaktadır. Bu açıdan ele alındığında her sayısal çözüm, deneysel verilerle doğrulanmaya ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte sayısal yöntemler sayesinde, karmaşık problemler deneysel yöntemlere oranla çok daha hızlı bir şekilde çözülebilmektedir. Ayrıca bu yöntemler önemli ölçüde iş gücü ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Fakat sayısal yöntemlerden elde edilen sonuçların doğrudan kabul edilmesi yani deneysel verilerle doğrulanmadan yorumlanması ciddi hatalara sebep olabilmektedir.

Basınç yükü altındaki helisel kazıkların model (laboratuvar) ve büyük ölçekli (arazi) deney sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenerek deneysel ve sayısal sonuçların uyumu incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında aşağıda maddeler halinde belirtilen farklı durumlar için doğrulama yapılmıştır. Bunlar; i) Zemin sıkılığı (D_r) ii) Helis çapı (D) iii) Helis sayısı (N) iv) Helisler arası mesafe oranı (s/D) olarak sıralanmıştır.

Deney-sayısal analiz doğrulama işlemi sonrasında helisel kazığın zemin içindeki davranışı bir diğer ifadeyle göçme mekanizması, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiş, helisel kazıkların göçme mekanizması tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu bölümün temel amacı deneysel verilerle doğrulanmış bir sayısal model oluşturarak ve deneysel olarak incelemenin çok zor olduğu durumları sayısal olarak ortamda koyarak problemi tüm yönüyle ele almak olarak gösterilebilir.

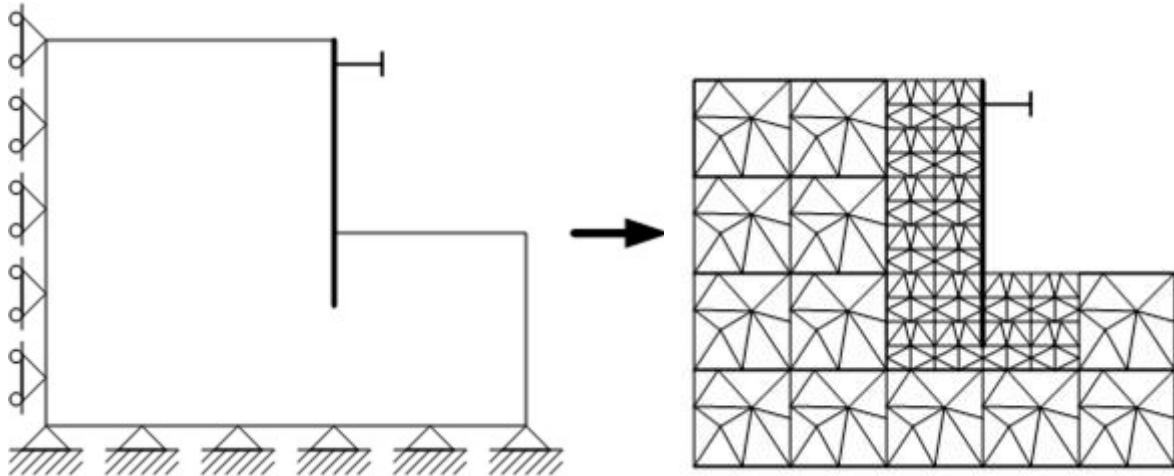
Bu bölümde, ilk olarak sonlu elemanlar modelinin (zemin ortamının ve kazık elemanın oluşturulması, sınır koşullarının tayini, yükleme tipinin ve başlangıç koşullarının seçimi gibi) nasıl kurulduğundan detaylı olarak bahsedilmiştir. Sonrasında ise modellemede dikkate alınan zemin ve kazık özelliklerine değinilmiştir. Bölümün son kısmında ise sonlu elemanlar yöntemi ile üretilen sonuçların deneysel veriler ile olan uyumu incelenerek yapılan sayısal çalışmanın literatüre olan katkısı üzerinde durulmuştur.

7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar yönteminde problemlerin değişen sınır koşulları, şekil ve yükler gibi tüm karmaşıklıkları birebir korunarak yaklaşık çözümler sunulmaktadır. Bu yöntem çeşitliliği ve esnekliği ile mühendislikte büyük ilgi görmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ilk olarak uçak tasarımında gerilme analizi yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, sadece katı mekaniğindeki analizler için değil aynı zamanda akışkan akımı, ısı transferi, manyetik alanlar, elektrik ve daha birçoklarının analizinde de kullanılmaktadır. İnşaat mühendisleri bu yöntemi kirişlerin, uzay çerçevelerinin, plakaların, kabukların, kıvrımlı plakaların, temellerin, kaya mekaniği problemlerinin analizi için yaygın olarak kullanmaktadır (Bhavikatti, 2015).

Sonlu elemanlar yöntemi, sığ veya derin temeller, istinat duvarları, şevler, dolgular ve toprak barajlar gibi geoteknik yapıların tasarımında en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biridir. Kapsamlı saha incelemeleri, laboratuvar ve yerinde testler ile zeminlerin geoteknik parametreleri doğru bir şekilde değerlendirildiğinde; bu yöntem, pratik problemlere uygulanabilecek oldukça gerçekçi sonuçlar üretebilmektedir (Özyürek, 2019).

Sonlu elemanlar yönteminin önemli özelliklerinden biri standart bir formülasyona uymayan problemleri başarılı bir şekilde çözümleyebilmesi olarak görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemin ana fikrini bir problemi çok sayıdaki küçük elemanlara (basit geometrik şekilli) ayırmak oluşturmaktır (Şekil 7.1). Sonlu elemanlar ağı (mesh), sonlu eleman olarak adlandırılan bu küçük alanların birleşimi şeklinde tarif edilmektedir. Bu ağı oluşturan elemanlar birbirlerine düğüm noktaları (node) aracılığı ile bağlıdır (Emirler, 2019).



Şekil 7.1. Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması (Emirler, 2019)

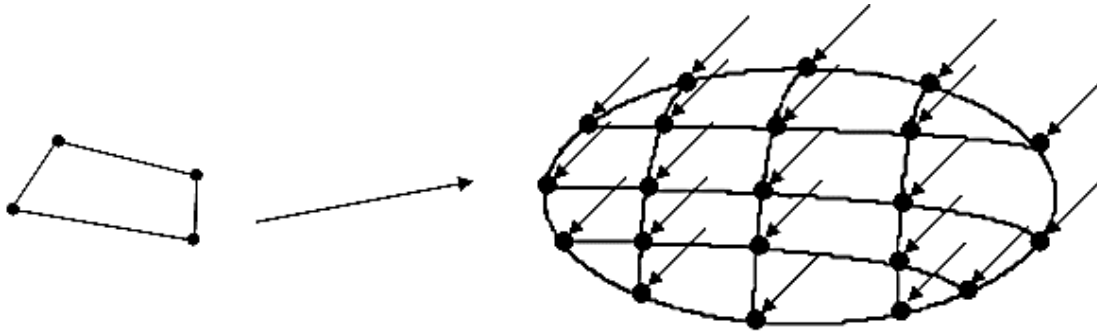
Sonlu elemanlar yöntemi ile bir problemin analizi kuvvet yöntemi, deplasman yöntemi ya da karma yöntemlerden birisi kullanılarak üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Geoteknik mühendisliğindeki birçok problem analizi ise deplasman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Deplasman yönteminde; deplasman bilinmeyen parametre, ikincil büyüklükler ise birim şekil değiştirme ve gerilmeler olup deplasmanların tanımlanmasına bağlı olarak elde edilmektedir. İnterpolasyon fonksiyonları kullanılarak bilinmeyen büyüklük olan deplasmanların bir sonlu elemandaki değişimi tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlarda genellikle polinomlar seçilmektedir. Bir sonlu eleman ile onu çevreleyen düğüm noktaları arasındaki ilişki Eş. 7.1 kullanılarak tanımlanmaktadır.

$$[k]_e \cdot \{u\}_e = \{f\}_e \quad (7.1)$$

Düğüm noktalarının uygulanan kuvvetler etkisinde nasıl hareket edeceği $\{u\}_e$ (deplasman vektörü) ile tanımlanmaktadır. Malzeme özellikleri, eleman geometrisi ve eleman özellikleri kullanılarak $[k]_e$ (eleman rijitlik matrisi) elde edilmektedir. Eleman üzerinde etkili olan yükler ise $\{f\}_e$ (eleman yük vektörü) ile tanımlanmaktadır. Her bir sonlu elemana ait $[k]_e$ ve $\{f\}_e$ bir araya getirilip toplanması ile sisteme ait global yük vektörü ve global rijitlik matrisi elde edilmekte, bu işlemin sonucunda, fiziksel problemin davranışını idare eden diferansiyel denklem Şekil 7.2'de de görüldüğü gibi doğrusal bir denklem takımına indirgenmektedir (Eş. 7.2).

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (7.2)$$

Bu eşitlikte; $[K]$, $\{F\}$ ve $\{U\}$ sırasıyla sistem rijitlik matrisi, sistem yük vektörü ve deplasman vektörüdür.



$$[k]_e \cdot \{u\}_e = \{f\}_e$$

Eleman eşitliği

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\}$$

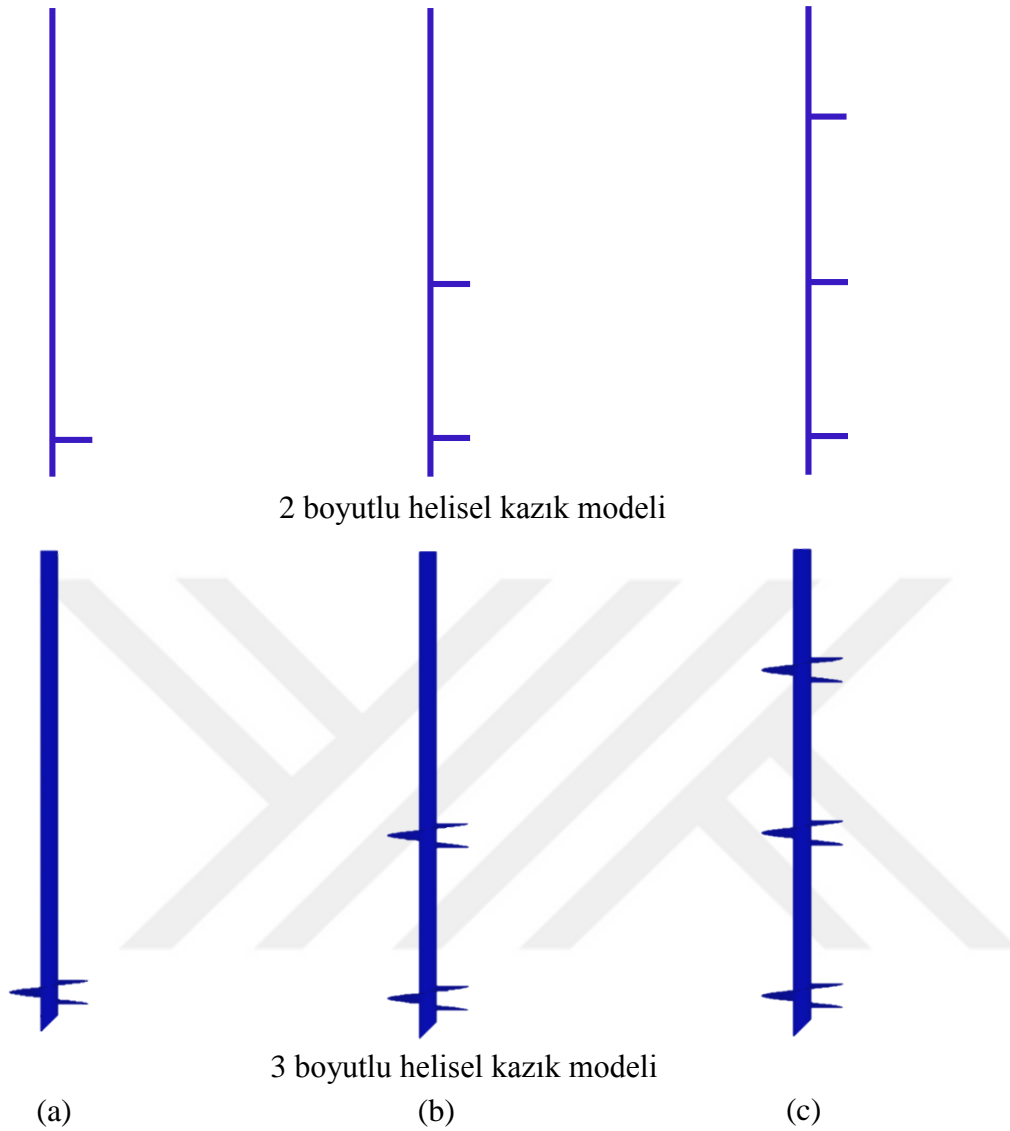
Sistem eşitliği

Şekil 7.2. Global matris eşitliklerinin elde edilmesi (Emirler, 2019)

Her bir düğüm noktasındaki deplasmanlar, analiz aşamasında global matris eşitlikleri çözümlenerek elde edilmektedir. Her bir sonlu elemandaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler ise elde edilen düğüm noktası deplasmanları kullanılarak hesaplanmaktadır. Analiz sonunda elde edilmiş olan büyük miktardaki veri değerlendirilerek tasarım amaçları için anlaşılır bir kullanıma dönüştürülmektedir.

7.2. Sonlu Eleman Modelinin Kurulması ve Model Analizi

Bu çalışma kapsamında helisel kazık problemi, PLAXIS 2D ve 3D programları ile iki ve üç boyutlu olarak incelenmiştir. İki boyutlu modellemede; model, problemin doğası gereği aksinel simetrik yaklaşım dikkate alınarak oluşturulurken, üç boyutlu modellemede ise; model, deneysel çalışma ile birebir benzer şekilde kurulmuştur (Şekil 7.3). Ayrıca, kazık elemanın helis kısmının doğru bir şekilde oluşturulabilmesi için üç boyutlu çizim programından faydalanılmış, sonrasında kazık eleman, analizlerin gerçekleştirildiği PLAXIS 3D (2020a; 2020b) programına aktarılmıştır.



Şekil 7.3. Farklı helis sayısındaki kazık elemanlar a) Tekli helisel kazık (N=1) b) Çoklu helisel kazık (N=2) c) Çoklu helisel kazık (N=3)

7.2.1. Zemin bünye modelleri

Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde zeminlerin davranışı, zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilecek geleneksel zemin mekaniği laboratuvar deneyleriyle içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi parametrelerin kolaylıkla elde edilebiliyor olması, geoteknik mühendislerinin gerekli model parametrelerine aşına olmaları ve az sayıda model parametresine ihtiyaç duyulması gibi hususlardan dolayı yaygın olarak Mohr-Coulomb (MC) bünye modeli ile araştırılabilmektedir (Emirler vd., 2019). Bu nedenle sayısal analizlere ilk olarak MC zemin bünye modeli ile başlanmıştır. Bu model ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, modelin sıkı kum zemin davranışını modellemede oldukça başarılı

olduğu gözlenmiştir. Buna karşın aynı modelin gevşek zemin davranışını modellemede yetersiz kaldığı görülmüştür. Literatür incelendiğinde benzer araştırmalarda dilatasyon içermeyen ve hacimsel azalma gösteren gevşek kumlarda MC modelinin iyi sonuç vermediği belirtilmiştir (Bahadır ve Onur, 2017). Bu nedenle gevşek kum zemin davranışı için MC modeline göre daha gelişmiş bir model olan pekleşen zemin (Hardening Soil -HS) bünye modeli kullanılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde sıkı zemin şartları için MC zemin bünye modeli, gevşek zemin şartları için ise HS zemin bünye modeli kullanılmıştır.

7.2.2. Mohr Coulomb (MC) bünye modeli

Basit bir model olmasına rağmen zeminlerin gerilme-deformasyon davranışını lineer elastik-tam plastik olarak modelleyen bu bünye modeli oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde zeminlerin lineer olmayan gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 7.4'te görüldüğü gibi idealize edilmektedir. Bu şekilde görülen idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin birinci bölgesinde zeminin elastik, ikinci bölgesinde ise tam plastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir (Bahadır ve Onur, 2017). Modelde doğrusal bölgede zeminin lineer elastik davranış gösterdiği, zeminde herhangi bir düzlemde oluşan kayma gerilmeleri (τ_m) kayma dayanımına (τ_f) eşit olursa akmanın (göçme) meydana geldiği ve zeminin tam plastik davranış gösterdiği varsayılmaktadır (Eş. 7.3).

$$\tau_m = c' + \sigma'_n \tan \phi' = \tau_f \quad (7.3)$$

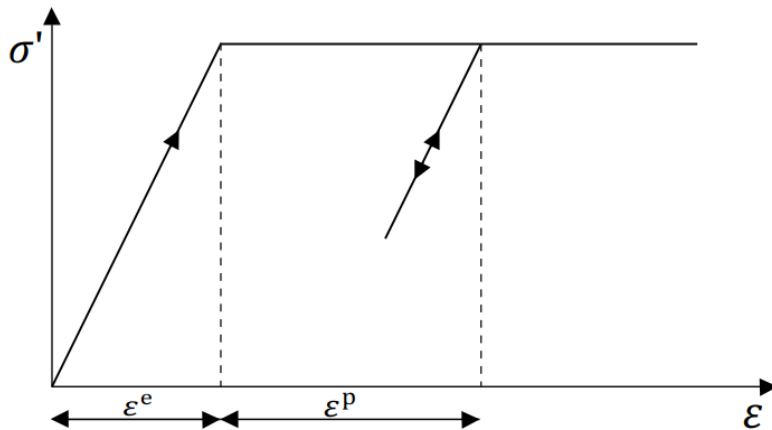
Burada c' ve ϕ' kayma dayanımı parametreleridir. MC zemin bünye modelinde hesaplamalar sırasında plastik deformasyonların meydana gelip gelmediği bir akma fonksiyonu (f) tanımlanarak belirlenmektedir (Eş. 7.4).

$$f(\sigma) = \tau - \sigma'_n \tan \phi' - c' = 0 \quad (7.4)$$

$f < 0$ ise elastik davranış,

$f = 0$ ise plastik akma gözlenmektedir.

Modelde bu koşullar için asal gerilme uzayında bir akma yüzeyi tanımlanmaktadır. MC bünye modeli tam plastik davranışı esas aldığı için akma yüzeyi sabit olup plastik deformasyonlardan etkilenmemektedir. Akma yüzeyinin içerisinde kalan gerilme durumlarında ($f < 0$) zemin elastik davranış göstermektedir (Bkz. Şekil 7.4).



Şekil 7.4. İdealize edilmiş elastik-tam plastik modelin tanımı

Elasto-plastisitenin temel prensibi, deformasyonların elastik ve plastik bir parça olarak ayrıştırılmasıdır (Eş. 7.5):

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (7.5)$$

Elastik bölgede ($f < 0$) elastik deformasyonlar Hooke kanunu esas alınarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma = D^e \times \epsilon^e = D^e(\epsilon - \epsilon^p) \quad (7.6)$$

Plastik deformasyonları hesaplamak için ise klasik plastisite teorisi kullanılmaktadır. Klasik plastisite teorisine göre, plastik deformasyon artım vektörünün akma yüzeyine dik olduğu kabul edilmektedir (birleştirilmiş plastisite). Fakat Mohr-Coulomb tipi akma fonksiyonları için bu kabul dilatasyonun daha yüksek hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu sebeple modelde, akma fonksiyonuna (f) ek olarak ilave bir plastik potansiyel fonksiyon (g) tanımlanmaktadır. Bu durum, yani $g \neq f$ olması durumu birleştirilmemiş plastisite (non-associated plasticity) olarak ifade edilmekte; dolayısıyla, plastik deformasyon hızı (plastic strain rate) aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Eş. 7.7).

$$\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (7.7)$$

Burada λ plastik çarpan olarak ifade edilmektedir. Tam elastik davranış için $\lambda=0$ olurken, plastik davranışta ise λ pozitiftir (Eş. 7.8 - 7.9).

$$\lambda = 0 \text{ için } f < 0 \text{ veya } \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \varepsilon \leq 0 \quad (\text{Elastik}) \quad (7.8)$$

$$\lambda > 0 \text{ için } f = 0 \text{ veya } \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \varepsilon > 0 \quad (\text{Plastik}) \quad (7.9)$$

Mohr-Coulomb akma koşulu, üç boyutlu asal gerilme uzayında 6 adet akma fonksiyonundan oluşmaktadır. Gerilmeler efektif gerilmeler cinsinden yazılmıştır (Eş. 7.10 - 7.14).

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.10)$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.11)$$

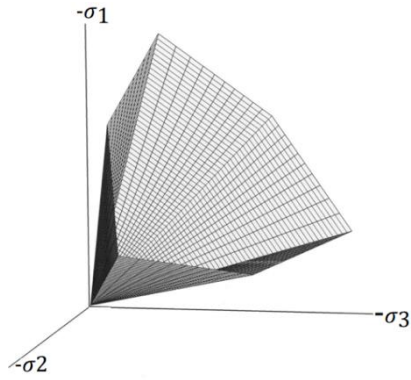
$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.12)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.12)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.13)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \quad (7.14)$$

Akma fonksiyonlarında yer alan iki plastik model parametre içsel sürtünme açısı (ϕ') ve kohezyondur (c'). Tüm akma fonksiyonları için $f_i=0$ koşulu (burada f_i her bir akma fonksiyonunu belirtmek için kullanılmıştır), aşağıda gösterildiği gibi asal gerilme uzayında sabit bir altıgen koniyi temsil etmektedir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb akma yüzeyi ($c=0$)

Bu akma fonksiyonlarına ek olarak, Mohr-Coulomb model için ayrıca 6 adet potansiyel plastik fonksiyon tanımlanmıştır (Eş. 7.15-7.20).

$$g_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.15)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.16)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.17)$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.18)$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.19)$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin(\psi) \leq 0 \quad (7.20)$$

Potansiyel plastik fonksiyonlar üçüncü bir plastisite parametresi (dilatasyon açısı, ψ) içermektedir. Bu parametre, sıkı zeminler için gözlemlenen bir parametre olup pozitif plastik hacimsel deformasyon artımlarını yani dilatasyonu modellemek için gerekmektedir.

MC zemin bünye modeli için programa girilmesi gereken parametreler aşağıda sunulmuştur (Çizelge 7.1). Modelin en önemli avantajlarından biri model parametrelerinin geleneksel laboratuvar deneyleri ile kolaylıkla belirlenebilmesidir.

Çizelge 7.1. Mohr-Coulomb (MC) bünye modeli için girdi parametreleri

Sembol	Açıklama	Birim
E	Young modülü	[kN/m ²]
ϕ	İçsel sürtünme açısı	[⁰]
ψ	Dilatasyon açısı	[⁰]
c	Kohezyon	[kN/m ²]
ν	Poisson oranı	-

Young modülü yerine alternatif rijitlik parametreleri (Kayma Modülü-G veya Sıkışma modülü-E_{oed}) de programa girilebilmektedir. Çünkü bu iki modül kullanılarak literatürde sunulan denklemler sayesinde rahatlıkla Young modülü hesaplanabilmektedir (Eş. 7.21-7.22).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (7.21)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (7.22)$$

7.2.3. Pekleşen zemin (Hardening Soil-HS) bünye modeli

Elastik – tam plastik modelin (Mohr-Coulomb bünye modeli) aksine HS modelde asal gerilme uzayında akma yüzeyi sabit olmayıp plastik deformasyonlara bağlı olarak genişleyebilmektedir. Modelde kayma ve basınç (ödometrik koşullardaki) gerilmelerinin neden olduğu pekleşmeye bağlı plastik deformasyonlar modellenebilmektedir. Dolayısıyla HS bünye modelinde, kayma ve basınç pekleşmeleri olmak üzere iki tip pekleşme dikkate alınmaktadır.

HS bünye modeli (pekleşen zemin modeli), hem yumuşak hem de sert zeminler olmak üzere farklı zemin türlerinin davranışını modellemek için kullanılabilen gelişmiş bir modeldir (Schanz, 1998). Kayma gerilmelerine maruz bir zeminde gerilmelerin artmasına paralel olarak rijitlik azalmakta ve eş zamanlı olarak da plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Drenajlı üç eksenli basınç deneyi vasıtası ile kurulan deviatörük gerilme-eksenel deformasyon ilişkisi yaklaşık olarak hiperbolik bir eğriye benzemektedir. Kondner (1963) tarafından ilk defa formüle edilen bu ilişki, Duncan ve Chang (1970) tarafından ise

hiperbolik model adıyla geliştirilmiştir. HS bünye modeli hiperbolik modele benzemekle birlikte günümüzde onun yerini alan bir modeldir. Modelin en önemli özellikleri; elastisite teorisi yerine plastisite teorisini kullanması, dilatasyon davranışını dikkate alması ve modelde bir akma yüzeyinin tanımlanması şeklinde sıralanabilmektedir. HS bünye modelinin MC zemin bünye modeline göre en önemli avantajları ise, idealize edilmiş eğri yerine zeminin hiperbolik gerilme deformasyon eğrisini esas alması ve zeminin rijitlik modülündeki gerilme seviyesine bağlı değişimi dikkate almasıdır.

Modelin bazı temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

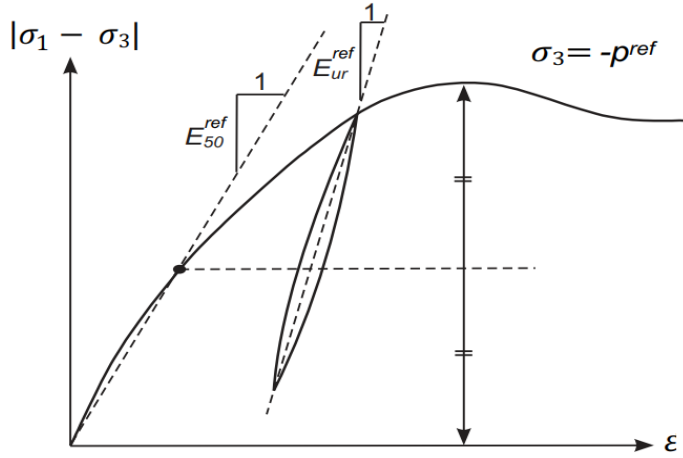
- ❖ Gerilmeye bağlı rijitlik (m parametresi)
- ❖ Deviatorik kayma gerilmeleri nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (E_{50}^{ref})
- ❖ Ödometrik koşullarda basınç nedeniyle oluşan hacimsel plastik deformasyonlar (E_{eod}^{ref})
- ❖ Boşaltma/yükleme nedeniyle oluşan elastik deformasyonlar (E_{ur}^{ref})
- ❖ Mohr Coulomb modeline göre göçme (c , ϕ ve ψ)

HS modelde kullanılan ve zemin rijitliğini temsil eden farklı parametreler Çizelge 7.2’de sunulmuştur.

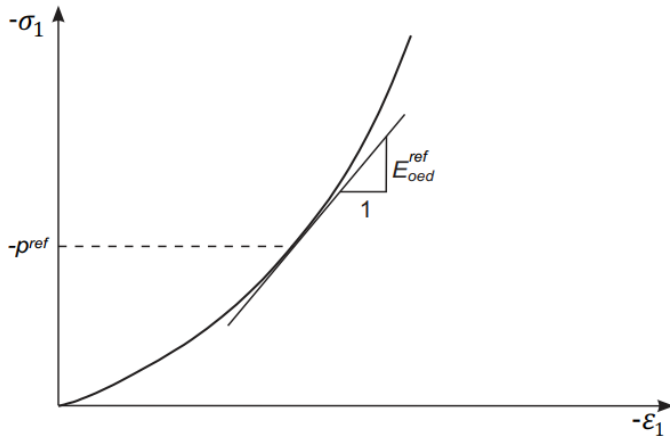
Çizelge 7.2. Hardening Soil (HS) bünye modeli için girdi parametreleri

Sembol	Açıklama	Birim
E_{50}^{ref}	Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen referans rijitlik modülü	[kN/m ²]
E_{eod}^{ref}	Referans ödometre modülü	[kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	Referans boşaltma / tekrar yükleme modülü	[kN/m ²]

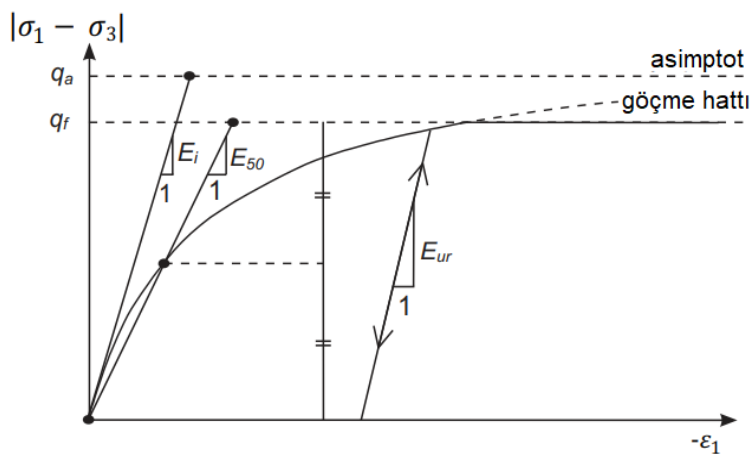
HS bünye modeline ait eşitlikler, $|\sigma_1 - \sigma_3|$ (deviatorik gerilme) ile üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen ϵ_1 (düşey deformasyon) arasındaki hiperbolik ilişkiye dayanmaktadır (Şekil 7.6). Buna karşın ödometrik koşullardaki rijitlik modülü ise ödometre deneyinden elde edilmektedir (Şekil 7.7).



Şekil 7.6. E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} modüllerinin tanımlanması (drenajlı üç eksenli deneyden elde edilir)



Şekil 7.7. E_{oed}^{ref} modülünün tanımlanması (ödometre deneyinden elde edilir)



Şekil 7.8. Hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi (üç eksenli basınç deneyi)

Drenajlı üç eksenli basınç deneyinden elde edilen hiperbolün denklemi aşağıdaki gibidir (Eş. 7.23-7.24):

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \times \frac{q}{1-(q/q_a)} \quad (q < q_f \text{ için}) \quad (7.23)$$

$$E_i = \frac{2 \times E_{50}}{2 - R_f} \quad (7.24)$$

Burada q deviatorik gerilmeyi ifade ederken, q_f ise göçme anındaki deviatorik gerilmeyi ifade etmektedir. Bunlara ek olarak q_a ise kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değerdir. E_i parametresi, başlangıç rijitlik modülü olup, ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülü E_{50} (rijitlik modülü) (Eş. 7.25) ile ilişkilidir (Bkz. Şekil 7.8).

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \times \left(\frac{c \times \cos \phi - \sigma'_3 \times \sin \phi}{c \times \cos \phi - p^{\text{ref}} \times \sin \phi} \right)^m \quad (7.25)$$

Burada;

E_{50}^{ref} ; p^{ref} (referans çevre basıncı) değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı değerine (σ'_3) bağlıdır. Üs değeri “ m ” ile gerilme seviyesi kontrol edilmektedir. Farklı araştırmacılar tarafından bu değer için $0,5 < m < 1,0$ aralığında değerler önerilmiştir. q_a (deviatorik gerilmenin asimptot kaldığı) ve q_f (göçme anındaki deviatorik gerilme) değerleri modelde Eş. 7.26-7.27 ile tanımlanmaktadır.

$$q_f = (c \times \cos \phi - \sigma'_3) \times \frac{2 \times \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (7.26)$$

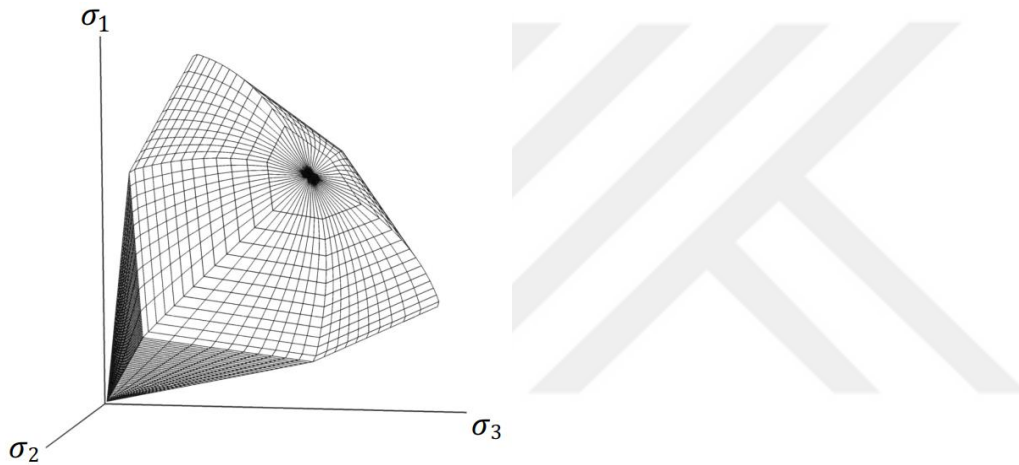
$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (7.27)$$

q_f değeri, Mohr-Coulomb göçme kriteri vasıtasıyla c ve ϕ değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, MC zemin modeline göre $q=q_f$ olduğunda göçme meydana gelmekte ve tam plastik akma oluşmaktadır. Bu iki değer arasındaki oran ise göçme oranı (R_f) olarak tanımlanmaktadır. Modelde, boşaltma/tekrar yükleme rijitliği için ise aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (Eş. 7.28).

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \times \left(\frac{c \times \cos \phi - \sigma'_3 \times \sin \phi}{c \times \cos \phi - p^{\text{ref}} \times \sin \phi} \right)^m \quad (7.28)$$

MC zemin bünye modelinde akma fonksiyonları asal gerilme uzayında sabit bir altıgen koniyi temsil ederken, buna karşın HS bünye modelinde ise akma yüzeyi asal gerilme uzayında sabit değildir ve bu yüzey plastik deformasyonlardan dolayı genişleyebilmektedir (Şekil 7.9).

Akma yüzeyindeki bu genişleme miktarı MC nihai göçme yüzeyine kadar olabilmektedir. Bir diğer ifadeyle bu genişleme miktarının da bir sınırı olduğu ve zeminin sürekli olarak genişleme gösteremediği, nihai göçme yüzeyine ulaşıldığında genişlemenin tamamlandığı kabul edilmektedir (Schanz vd., 1999).

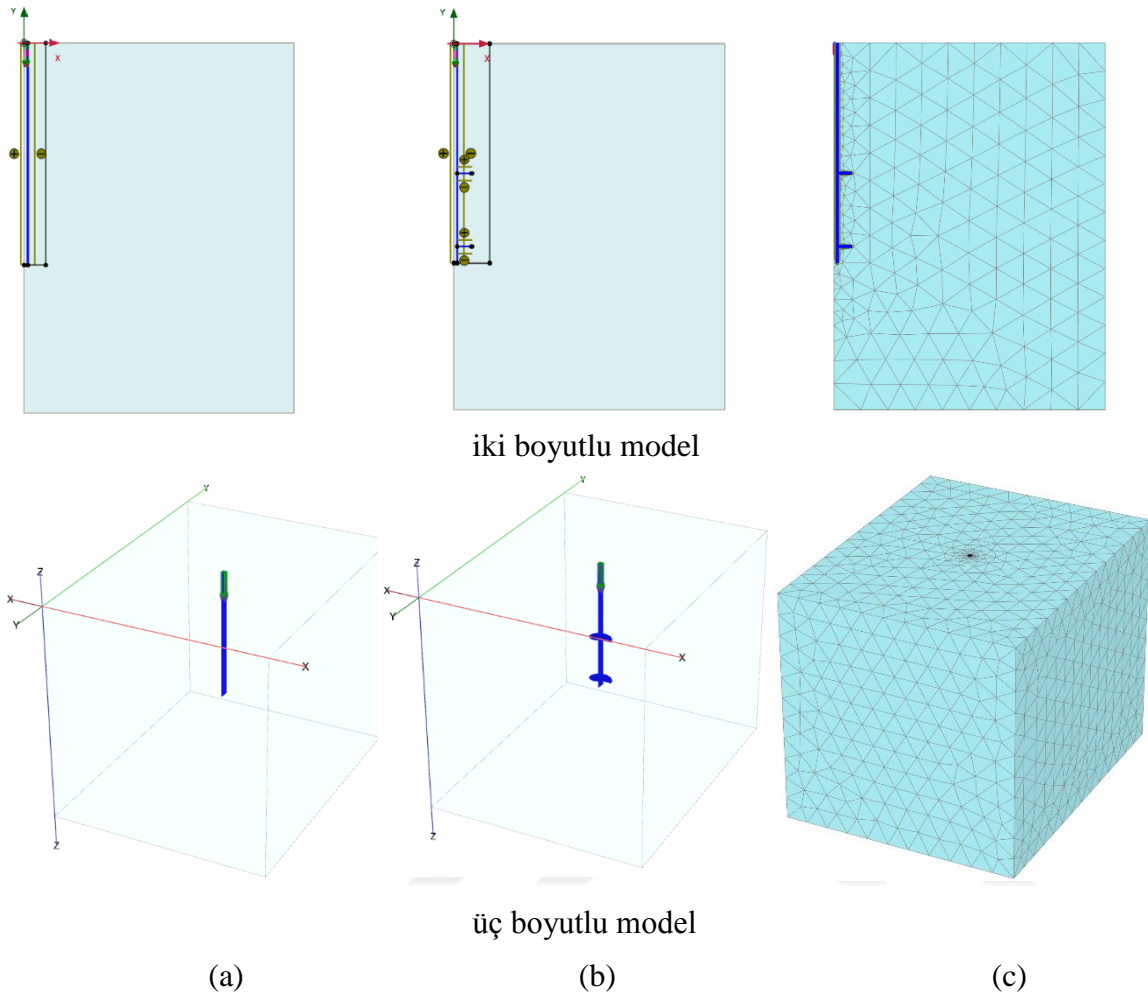


Şekil 7.9. Asal gerilme uzayında HS modeli akma yüzeyi

7.3. Laboratuvar Model ve Büyük Ölçekli Arazi Sayısal Analizleri

7.3.1. Zemin profili ve yapısal elemanın oluşturulması

Problem için oluşturulan iki boyutlu ve üç boyutlu modellemelere ait görseller Şekil 7.10'da sunulmuştur. Eksenel simetrik model kullanıldığından iki boyutlu modelleme için kasa uzunluğunun yarısı dikkate alınmış, yükseklik değerlerinin birebir tanımlanması da yeterli olmuştur. Buna karşın üç boyutlu modellemede uzunluk, genişlik ve yükseklik değerlerinin tamamı modele girilmiştir. Model deneyler için uzunluk iki boyutlu modellemede 750mm, üç boyutlu modellemede 1500mm, her iki modellemede genişlik ve yükseklik değerleri ise sırasıyla 1200mm ve 1000mm olarak alınmıştır. Tam ölçekli deneyler için uzunluk iki boyutlu modellemede 1875mm, üç boyutlu modellemede 3500mm, her iki modellemede genişlik ve yükseklik değerleri ise sırasıyla 3000mm ve 2500mm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 7.10. Probleme ait sayısal model görüntüsü a) Düz kazık b) Çoklu helisel kazık (N=2)
c) Sonlu eleman ağı

Çalışma kapsamında incelenen zemine ait özellikler programa tanıtılarak iki boyutlu modelleme için tanımlanan alana, üç boyutlu modelleme için ise tanımlanan hacme zemin ataması gerçekleştirilmiştir. Zemin özelliklerin tanımlanmasının sonrasında, kazık elemana ait özellikler programa tanıtılarak ilgili yapısal elemana ait bölgeye atama işlemi yapılmıştır. Programa tanımlanan zemin özellikleri Çizelge 7.3'te ve kazık özellikleri (sıkı ve gevşek zemin ile örselenmiş sıkı zemine ait) de Çizelge 7.4'te detaylı olarak sunulmuştur.

Poisson oranının değeri literatürde kullanılan değer aralığı dikkate alınarak seçilmiştir. Programda, kohezyon (c) değerinin analizlerde sıfır alınması durumunda formülasyondan dolayı bazı sıkıntılar oluşturabileceği belirtilmiş ve kohezyon değerinin $0,2 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ 'den büyük alınması önerilmiştir (PLAXIS Material Models Manual, 2020). Analizlerde model

kazık eleman malzemesi olarak çelik eleman kullanılmıştır. Kazık elemana ait malzeme özellikleri Çizelge 7.5’te yer almaktadır.

Çizelge 7.3. Farklı sıklıklar için belirlenen kum zemin özellikleri

Parametreler	Değerler		
	Sıkı zemin	Örselenmiş sıkı zemin	Gevşek zemin
γ_{unsat} (N/mm ³)	$16,5 \times 10^{-6}$	$15,7 \times 10^{-6}$	$15,2 \times 10^{-6}$
γ_{sat} (N/mm ³)	$19,0 \times 10^{-6}$	19×10^{-6}	18×10^{-6}
E (N/mm ²)	37,5	30	-
E ₅₀ (N/mm ²)	-	-	9
E _{oed} (N/mm ²)	-	-	9
E _{ur} (N/mm ²)	-	-	27
ν	0,3	0,3	0,3
c (N/mm ²)	$0,21 \times 10^{-3}$	$0,21 \times 10^{-3}$	$0,21 \times 10^{-3}$
ϕ (°)	43	34	30
Ψ (°)	6,5	0	0
m	-	-	0,68
R _f	-	-	0,99
R _{inter}	-	0,7	0,40

Çizelge 7.4. Model kazık elemana ait malzeme özellikleri

Parametreler	Değerler
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	2×10^8
Birim hacim ağırlık, γ (N/mm ³)	77×10^{-6}
Poisson oranı, ν	0,30
Kalınlık, d (mm)	2,5

Çizelge 7.5. Büyük ölçekli kazık elemana ait malzeme özellikleri

Parametreler	Değerler
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	2×10^8
Birim hacim ağırlık, γ (N/mm ³)	77×10^{-6}
Poisson oranı, ν	0,30
Kalınlık, d (mm)	5,0

Kazıklar, “plate” yapısal elemanı kullanılarak modellenmiştir. Büyük ölçekli modellemede düz kazık için 60mm çapında, 5mm kalınlığında ve L=1500mm uzunluğunda kazık şaftı modeli kurulmuştur. Farklı çaplardaki helis plakasına sahip helisel kazıklarda (D=150 ve

250mm) ise şafta ilave olarak helis plakaları oluşturulmuştur. Küçük ölçekli modellemede ise düz kazık için 22mm çapında, 2,5mm kalınlığında ve L=600mm uzunluğunda kazık şaftı modeli kurulmuştur. Helis plakasının çapları ise D=60, 80, 100 ve 120mm boyutlarında oluşturulmuştur. Hem büyük ölçekli arazi hem de laboratuvar model deneyleri için plakanın alt ve üst noktası arasındaki mesafe kazık çapı ile ilişkilendirilerek, 0,3D şeklinde alınmıştır. Üç boyutlu bir zemin-yapı etkileşimi problemi olan helisel kazıkların davranışı, zemin ve kazık arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık-zemin ara yüzeyi helisel kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Kazık ile zemin ara yüzeyindeki etkileşimin derecesi, kazık ve zemin arasında sürtünmenin olmadığı durum ile rölatif kayma davranışının gözlenmediği tam temas durumu arasında farklı derecelerde olabilmektedir. Ara yüzey elemanının davranışı, kazığın imal edildiği malzeme ile zemine yerleştirilme yöntemine ve zeminin sıklığına bağlıdır. Literatürde yer alan birçok çalışmada, kum zemine gömülü model çelik kazıklar modellenirken ara yüzey davranışının tanımlanmasının modellemenin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir (Uncuoğlu, 2009).

Zemin-yapı etkileşimi modellemede ara yüzey elemanlarının davranışı tanımlanırken elastik-plastik bir model kullanılmakta, elastik ve plastik davranışlar arasındaki ayırım ise Coulomb kriterine göre yapılmaktadır. Ara yüzeyde büyük kayma deformasyonlarının gözlemlendiği plastik davranış ve küçük deplasmanların meydana geldiği elastik davranış aralığında ara yüzey elemanının kayma mukavemetleri sırasıyla Eş. 7.29 ile Eş. 7.30 ile tanımlanmaktadır (Uncuoğlu, 2009).

$$|\tau| < \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (7.29)$$

$$|\tau| = \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (7.30)$$

Eş. 7.29 ve 7.30'daki c_i ve ϕ_i parametreleri ara yüzey elemanının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleridir.

İki ve üç boyutlu sayısal analiz programlarında, mukavemet azaltma faktörü R_{inter} ile kazık ve zemin arasındaki etkileşimin derecesi modellenmektedir. R_{inter} katsayısı, sırasıyla Eş.

7.31-7.33 eşitliklerinde kurallara uygun sıralanarak ara yüzey mukavemetini zeminin mukavemeti ile ilişkilendirmektedir.

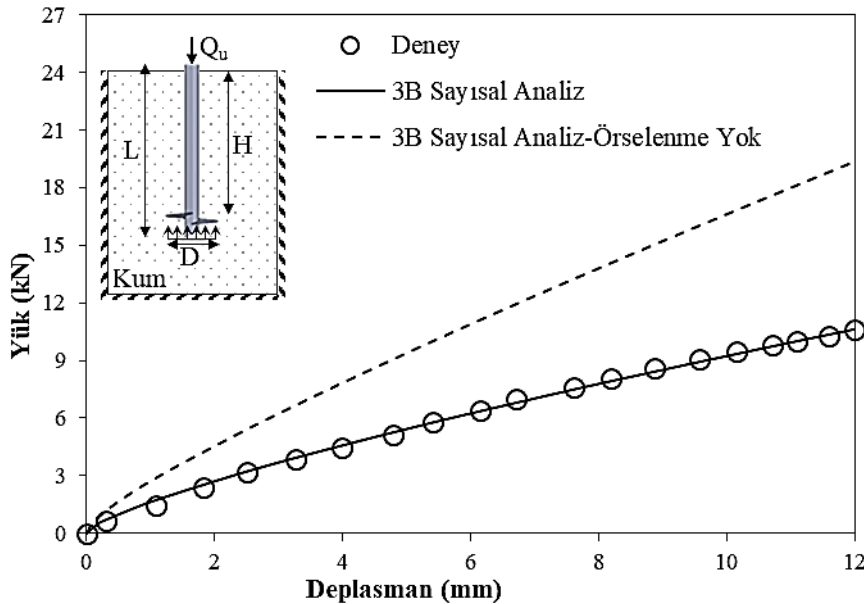
$$c_i = R_{inter} c_{zemin} \quad (7.31)$$

$$\tan\phi_i = R_{inter} \tan\phi_{zemin} \quad (7.32)$$

$$R_{inter} < 1 \text{ ise } \psi_i = 0 \text{ ve } R_{inter} = 1 \text{ ise } \psi_i = \psi_{zemin} \quad (7.33)$$

Genellikle, gerçek yapı-zemin etkileşim problemlerinde R_{inter} katsayısı 1'den küçük bir değere sahiptir. Programda kum/çelik etkileşimi için bu katsayı 2/3 olarak önerilmiştir.

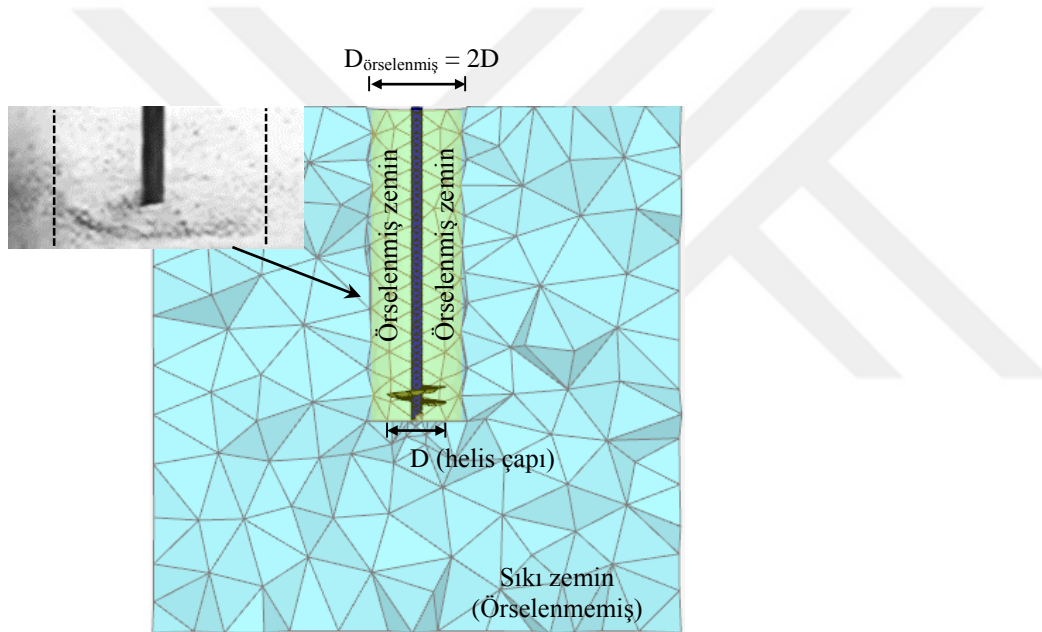
Sayısal analizler ilk olarak tek bir zemin bölgesinden oluşturulmuş model ile gerçekleştirilmiştir. Model sonuçları, deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sıkı zemine gömülü, $D=100\text{mm}$ çaplı tekli helisel kazığa ($N=1$) ait sonuçlar incelendiğinde, sayısal verilerden elde edilen kazık taşıma kapasitesinin deneysel verilerden tespit edilen taşıma kapasitesinden oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.11).



Şekil 7.11. Kazık çevresinde örselenmiş bölgenin varlığının sonuçlara etkisi (Sıkı zemin, $D=100\text{mm}$, $N=1$)

Bu durumun sebebini ortaya koymak için literatürde bu alanda gerçekleştirilmiş çalışmalar incelenmiştir. Pérez vd. (2018), Cortes Garcia (2019), Nowkandeh ve Choobbasti (2021)

tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, helisel kazığın zemin içerisine yerleştirilmesi sırasında helis çapından daha geniş bir zemin bölgesinin örselendiği ve dolayısıyla bu bölgedeki zeminde sıklık ve mukavemet kaybı ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu yüzden deneysel çalışma sırasında örselenmiş bölgenin tespit edilmesi ve sayısal analizlerde de bu örselenmiş bölgenin tanımlanması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda yapılan gözlemlere dayanarak, helisel kazığın zemin içerisine sürülmesi sırasında ortaya çıkan örselenme miktarının 2D genişlikte olduğu gözlemlenmiş, burada D helis çapını ifade etmektedir (Şekil 7.12). Şekil 7.11’de sunulan grafikte de örselenmiş bölgenin çapı 2D olarak alınmıştır. Sonuçlar örselenme etkisinin dikkate alınması gerektiğini net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7.12. Deneysel çalışmalarda örselenmiş bölgenin seçimi

Yukarıda sunulan sebeplerden dolayı, sıkı zeminde yapılan sayısal analizlerde kazık çevresinde 2D genişlikte bir zemin bölgesi örselenmiş zemin olarak tanımlanmış ve analizler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Bu durum dikkate alındığında elde edilen verilerin deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde önemli bir çıktı olan, helisel kazıkların zemin içerisine sürülürken kazık çevresinde belirli bir zemin bölgesinin örselendiği ve bu bölgedeki zeminin sıklık ve mukavemet kaybı yaşadığı doğrulanmıştır. Literatürde kazık yerleşiminin, zemin mukavemet özelliklerini azaltıcı etkisinin (örselenen zemin bölgesi için) derecesi ile ilgili kesin bir ifade bulunamamıştır. Araştırmacılar tarafından örselenmiş bölgeye ait zemin özellikleri parametrik çalışmalar yapılarak belirlenmiş ve deneyle uyumlu sonuçların elde

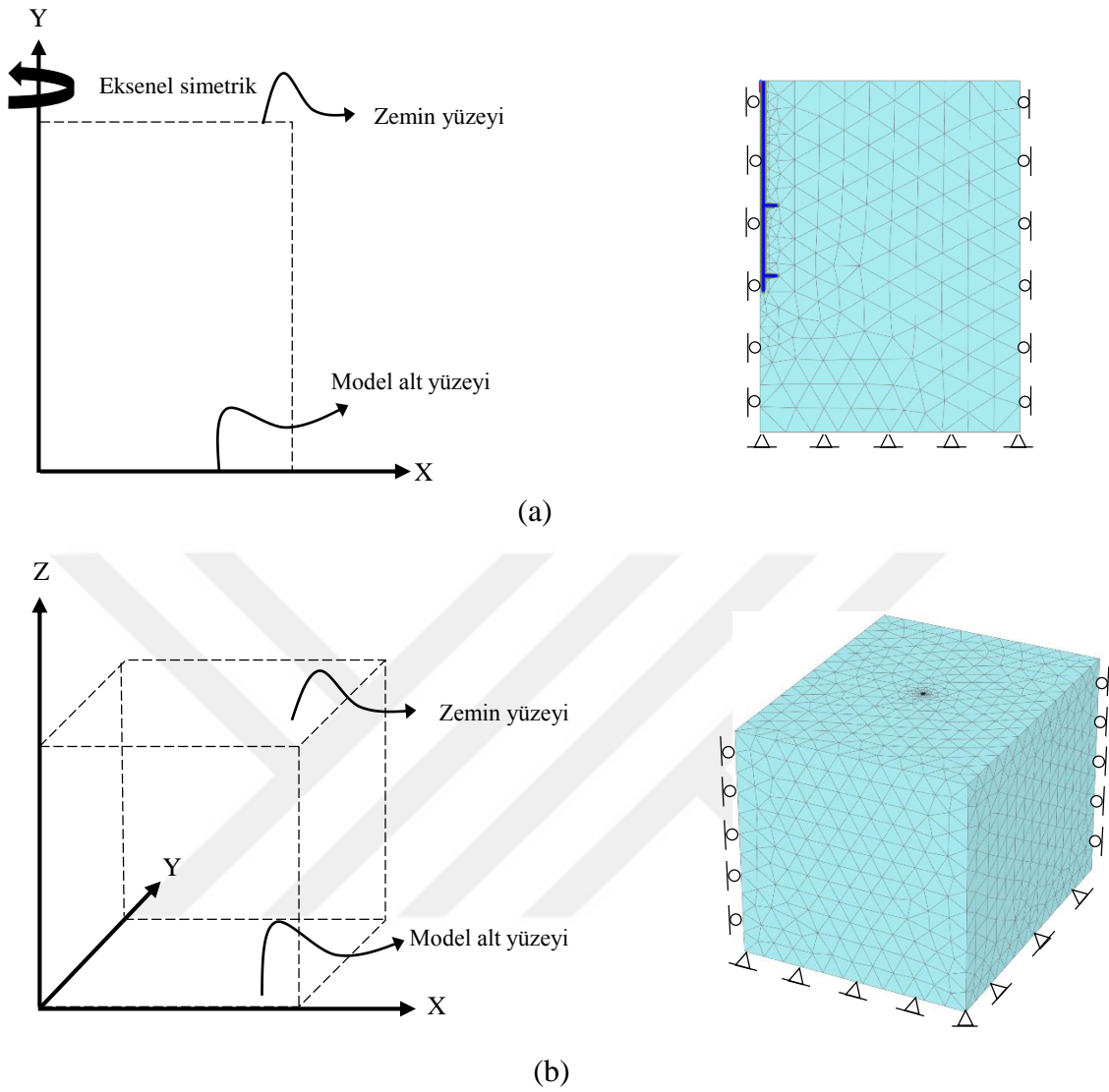
edildiği değerler kullanılmıştır (Pérez vd., 2018; Cortes Garcia, 2019; Nowkandeh ve Choobbasti, 2021).

7.3.2. Sınır koşullarının tanımlanması

İki boyutlu geometrik modelde zemin yüzeyi hareket serbestliğine sahipken model taban sınırının her iki doğrultuda da hareketi engellenmiştir ($u_x=u_y=0$). Buna karşın modelin düşey sınırlarının X doğrultusundaki hareketi engellenirken ($u_x=0$), düşey yönde hareket serbestliğine sahiptir (Şekil 7.13).

Üç boyutlu geometrik modele ait sınır koşulları deneysel çalışmadaki kasa sınırlarının durumu dikkate alınarak ve aşağıda belirtilen kurallar göz önünde tutularak oluşturulmuştur (Şekil 7.13).

- Zemin yüzeyinde bütün doğrultularda hareket serbestliği vardır.
- Y-Z düzlemine paralel olan model düşey sınırları, X doğrultusundaki hareketleri engeller ($u_x = 0$).
- X-Z düzlemine paralel olan model düşey sınırları, Y doğrultusundaki hareketleri engeller ($u_y=0$).
- X-Z ve Y-Z düzlemine paralel olan model düşey sınırları, Z doğrultusunda hareket serbestliği sağlar.
- Geometrik modelin alt yüzeyine ait tüm doğrultulardaki hareketleri engellenmiştir ($u_x = u_y = u_z = 0$).



Şekil 7.13. Modele ait sınır şartları a) İki boyutlu model b) Üç boyutlu model

7.3.3. Yükün uygulanması

PLAXIS 2D ve 3D programlarında uygulanabilecek yükleme ve deplasman çeşitleri noktasal, çizgisel ve alana yayılı yük şeklinde tanımlanabilmektedir. Analizler, bu yükleme tiplerinden herhangi biri için yük ve deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Sayısal analiz çalışmalarında kazık elemana uygulanan basınç yükü, iki boyutlu analizlerde y doğrultusunda etkiyen deplasman (prescribed displacements), üç boyutlu analizlerde ise z doğrultusunda etkiyen yüzey deplasmanı (surface displacements) olarak modellenmiştir.

7.3.4. Başlangıç gerilme durumunun tanımlanması

Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizlerinde ilk olarak zeminin başlangıç gerilme durumu tanımlanması gerekmektedir. Zemin formasyonu, oluşum tarihçesi ve malzeme birim hacim ağırlığı zemin başlangıç gerilmelerini doğrudan etkilemektedir.

Başlangıç gerilme durumu, PLAXIS 2D ve 3D bilgisayar programlarında “K₀ Procedure” ile “Gravity Loading” seçeneklerinden uygun olanı seçilerek tanımlanmaktadır.

K₀ procedure; sadece, boşluk suyu basıncını ve zemin ağırlığını dikkate almaktadır. K₀ procedure, zemin yüzeyinin yatay ve yer altı su seviyesine paralel olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu durumların dışındaki başlangıç gerilmeleri “Gravity Loading” seçeneği kullanılarak oluşturulmaktadır (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. K₀ procedure için uygun olmayan problem tipleri

Gravity Loading seçeneği kullanılan durumlarda, zemin birim hacim ağırlığına göre başlangıç gerilmeleri elde edilmektedir. Mohr-Coulomb modeli kullanılırken K₀ katsayısının değeri Poisson oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bundan dolayı, seçilen Poisson oranının gerçekçi bir K₀ tanımlaması önemli olmaktadır. Gravity Loading durumunda, tek boyutlu sıkışma probleminde tanımlanmış olan $v=K_0/(1+K_0)$ eşitliği kullanılmaktadır (Uncuoğlu, 2009).

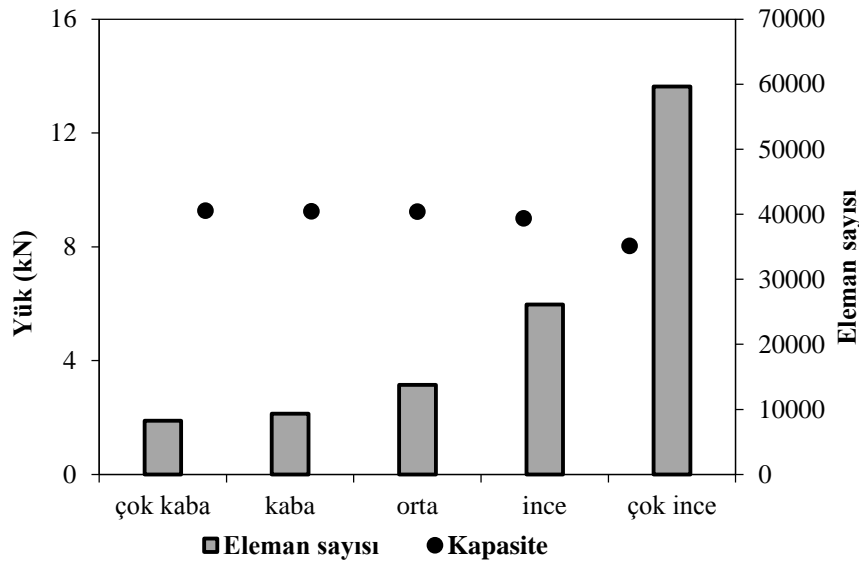
Bu çalışmada, problemin uygunluğundan dolayı (yatay ve sürekli zemin yüzeyi, zemin profilinde tabakalanma olmaması ve yer altı suyunun bulunmaması gibi), başlangıç gerilme durumu “K₀ procedure” kullanılarak tanımlanmıştır.

7.3.5. Optimum ağ sıklığının belirlenmesi

Problem geometrisi tanımlandıktan sonra zemin tabakaları ve yapısal elemanların özelliklerinin atanması ile sonlu elemanlara ayrılmaktadır. PLAXIS 2D ve 3D programlarında, “Mesh” olarak adlandırılan ağ sekmesi altında dizilime ait sıklığı ifade eden; çok ince (very fine), ince (fine), orta (medium), kaba (coarse), çok kaba (very coarse), olmak üzere beş farklı ağ sıklığı mevcuttur.

Sonlu eleman ağı oluşturulurken gerekli görülen bazı bölgelerde yerel ağ sıkılaştırması yapılabilirken tüm çalışma düzlemi boyunca bütünsel olarak da ağ sıkılaştırması yapılabilmektedir. Yapısal elemanın çapı tercih edilen sonlu eleman ağı boyutlarından büyükse sonuçların hatalı çıkacağı açıktır. Bu sebeple ağ sıklığının tayini sayısal analizlerden doğru sonuç elde edebilmek adına oldukça önemlidir. Ancak eleman sayısının fazla olması analiz süresini uzatacağından etkinin ortadan kalktığı ve maksimum başarının elde edildiği ağ sıklığı (optimum ağ sıklığı) ile analizler gerçekleştirilmelidir.

Ağ sıklığının etkisini ortaya koymak amacıyla yukarıda bahsedilen 5 farklı ağ sıklığı için bir dizi sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçların deneysel çalışma ile olan uyumu araştırılmıştır (Şekil 7.15). Sıkı zemine gömülü, helis çapının $D=100\text{mm}$ olduğu tekli helisel kazık analizlerinde çalışma ortamı, farklı ağ sıklıkları için dört yüzlü (tetrahedral) elemanlara ayrılmıştır. Çok kaba ağ sıklığında 8268 eleman, 13216 düğümden oluşan çalışma ortamı, çok ince ağ sıklığında ise 59368 eleman, 88857 düğümden oluşmuştur. Maksimum ve minimum sıklıktaki ağ geçişinde eleman ve düğüm sayıları 7 kat civarında artarken, kazık kapasitesindeki değişim bu artışa nazaran %13 civarında olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, sonlu elemanlar ağ sıklığının bu çalışma özelinde ciddi bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Dolayısıyla, çalışmanın ciddi bir sayısal analiz yükü barındırması ve başarılı sonuçlar elde edilmesinin yanında analiz süresinin mümkün olduğunca kısa tutulmasını sağlamak amacıyla orta (medium) derecedeki ağ sıklığının kabul edilmesine, ayrıca yapısal eleman çevresinde ağ sıkılaştırması yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 7.15. Farklı ağ sıklıklarının aynı problem için ürettikleri sonuçlar (Sıkı zemin, $D=100\text{mm}$, $N=1$)

7.3.6. Hesaplama aşaması

Optimum sıklıktaki sonlu elemanlar ağının oluşturulmasından sonra modelleme işlemi yapılmaktadır. Bu aşamadan sonra problemin sayısal analizinin gerçekleştirileceği hesaplama aşamasına geçilmektedir. PLAXIS 2D ve 3D bilgisayar programında sayısal analizler ardışık hesaplama aşamaları şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Her bir aşama ya belirli bir yükleme ya da yapım adımını temsil etmektedir. İlk hesaplama aşaması daima başlangıç gerilme durumunu tanımlayan “initial phase” olarak adlandırılan hesaplama aşamasıdır.

Sayısal analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar, başlangıç gerilme durumunun tanımlanması ve model kazığın imal edilip basınç yükünün uygulanmasıdır. Son hesaplama adımında ise plastik analiz uygulaması yapılmıştır.

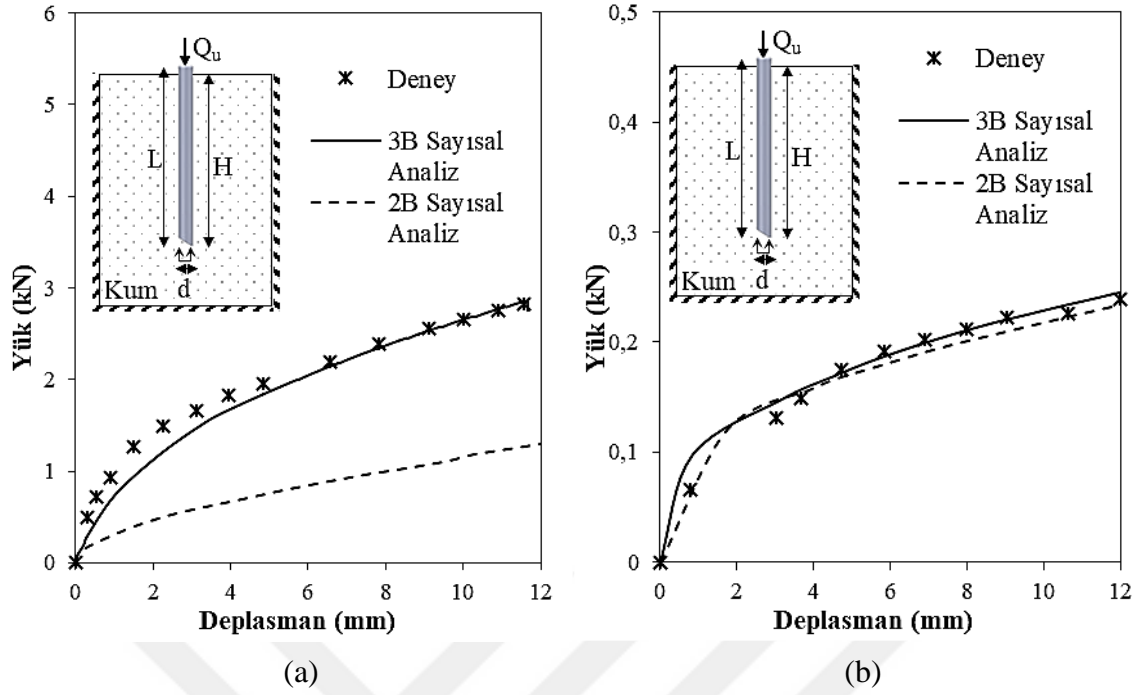
7.4. Laboratuvar Sayısal Analiz Sonuçları

Sayısal analizler; basınca maruz sıkı ve gevşek kum zemine gömülü model ölçekli helisel kazıklar için gerçekleştirilmiş ve sonuçların deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilerle uyumu araştırılmıştır. Yapılan analizlerde, shaft çapı $d=22\text{ mm}$ ve gömülme oranı $L/d=27,27$ olarak sabit tutulmuş, helis çapı ($D=60, 80, 100$ ve 120 mm), helis sayısı ($N=1$,

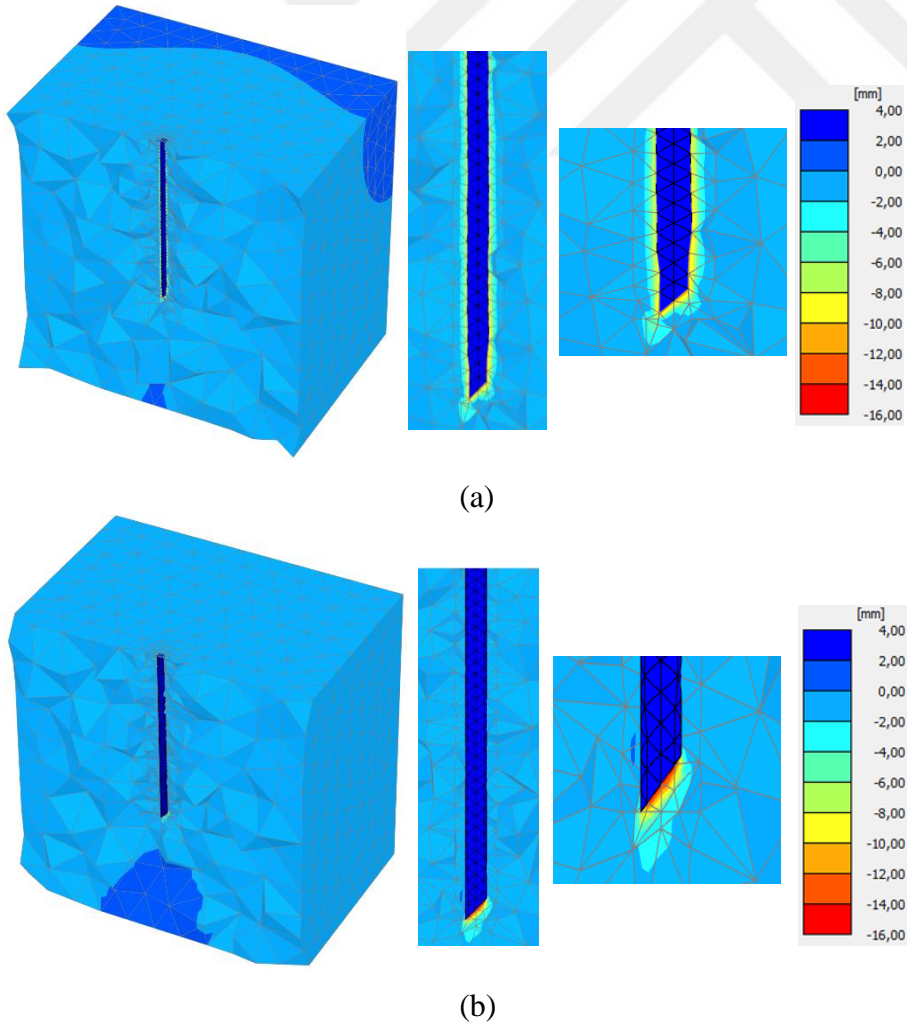
2 ve 3) ve helisler arası mesafe oranının ($s/D= 1,0, 1,5, 2,0, 2,5$ ve $2,0$) kapasite ile göçme mekanizmasına olan etkileri incelenmiştir.

7.4.1. Laboratuvar düz kazık analiz sonuçları

Bu çalışmada kum zemine gömülü helissiz düz kazığın farklı zemin sıklığı için taşıma kapasitesi ve göçme mekanizması incelenmiştir. Sıkı ve gevşek zemin olmak üzere iki farklı zemin sıklığında $d=22\text{mm}$ çapında $L/d=27,27$ gömülme oranına sahip model boru kazık için analiz edilmiştir. Üç boyutlu sayısal analizlerde deneyin, sayısal modele başarıyla yansıtıldığı ve benzer eğri davranışı elde edildiği görülmüştür. Sıkı zeminde iki boyutlu analiz sonuçlarının aşağıda kaldığı, gevşek zeminde ise sonuçların deney ve üç boyutlu analizle oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.16). Zemin sıklığının artmasıyla birlikte kapasitenin arttığı ve bu artışın gevşek zeminle sıkı zemin arasında yaklaşık olarak 10 kat olduğu görülmüştür. Kazığın gömülü olduğu derinlik boyunca geometrik model içerisine tanımlanan zeminin birim hacim ağırlığı sıklığın artmasıyla birlikte arttığından ve kazık yüzeyi boyunca direnç gösterilen zemin kütlesi daha fazla olduğundan sıkı zeminde kapasitenin fazla olması beklenen bir durumdur. Basınç yüküne maruz düz kazığın göçme mekanizması incelendiğinde, sıkı zeminde kazık yüzeyi boyunca etkileşimin devam ettiği, gevşek zeminde ise mekanizmadaki yoğunluğun kazık ucunda toplandığı görülmüştür. Zemin sıklığının artmasıyla gözlenen bu davranış, sıkı zemindeki yüzey sürtünmesinin gevşek zemine oranla daha fazla olmasıyla açıklanmaktadır (Şekil 7.17).



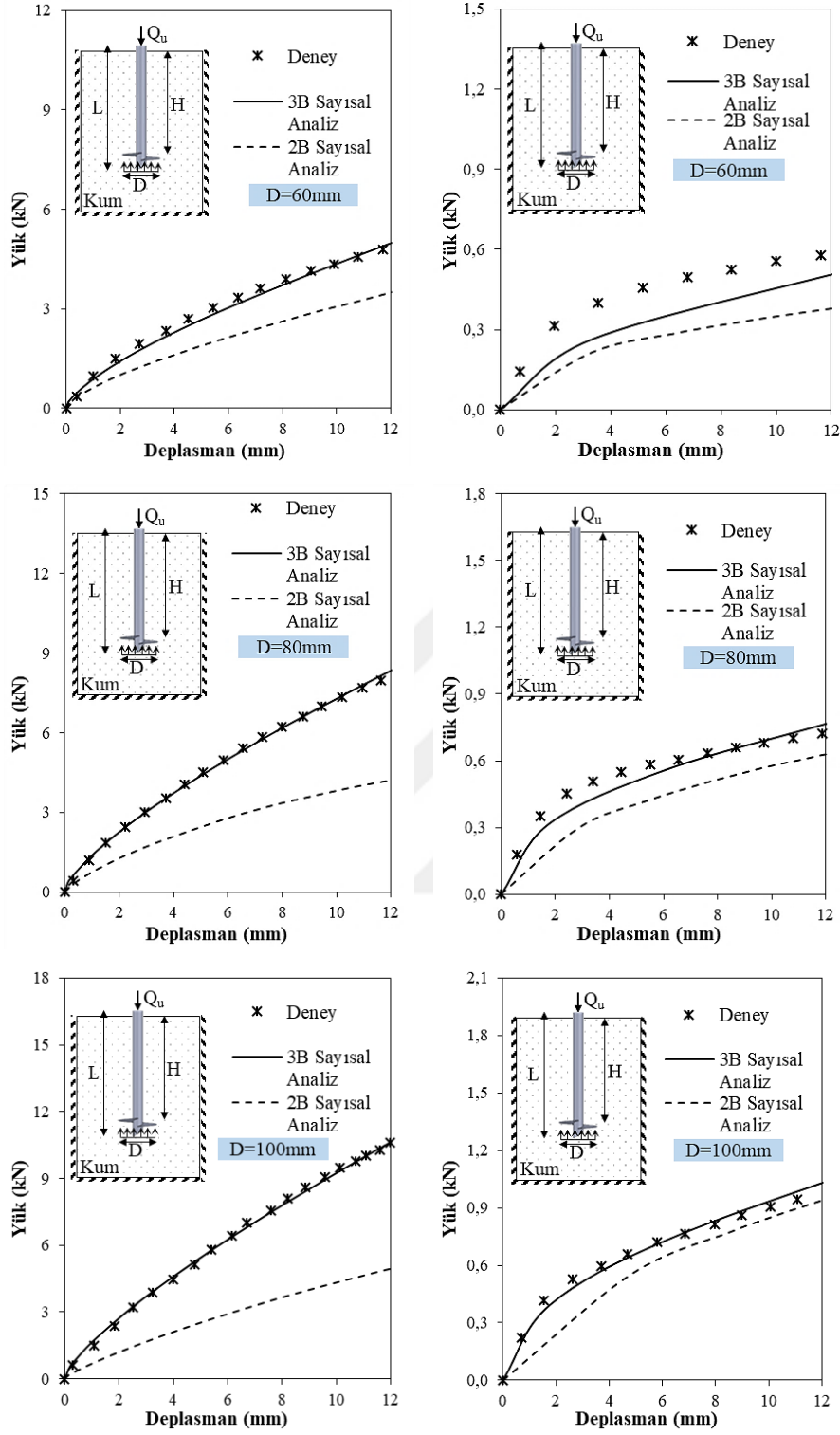
Şekil 7.16. Düz kazığın (helissiz) taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



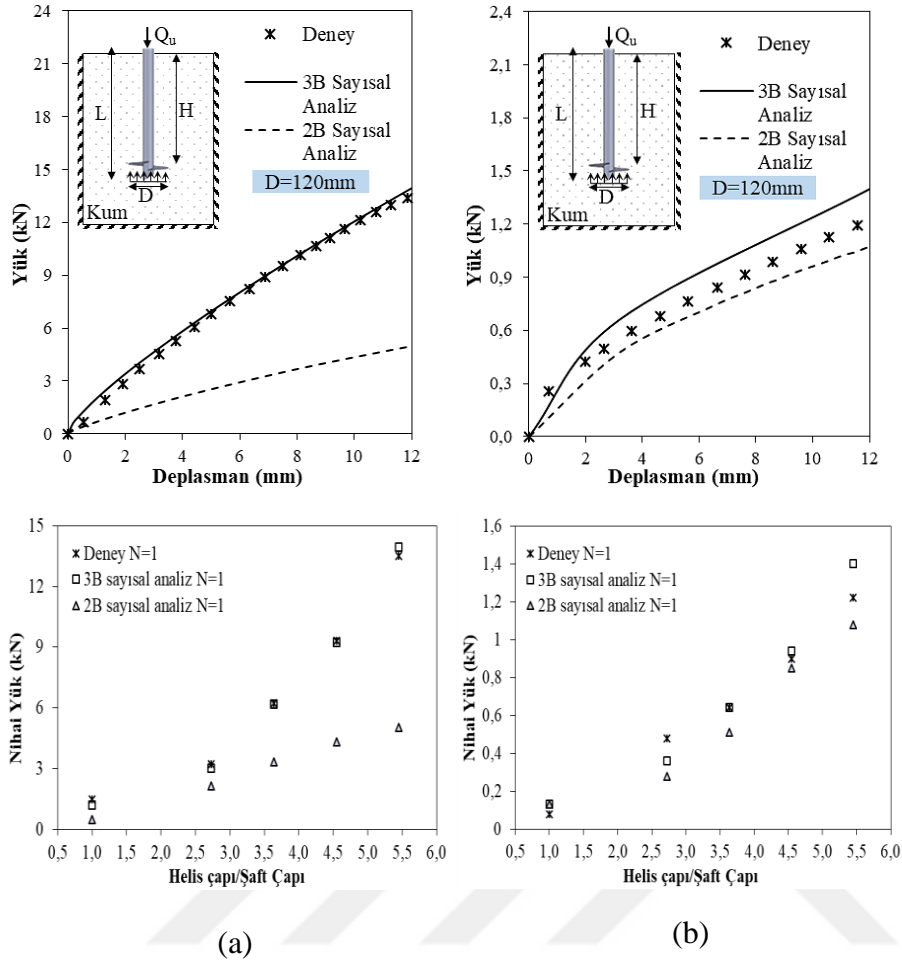
Şekil 7.17. Düz kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

7.4.2. Laboratuvar tekli helisel kazık analiz sonuçları

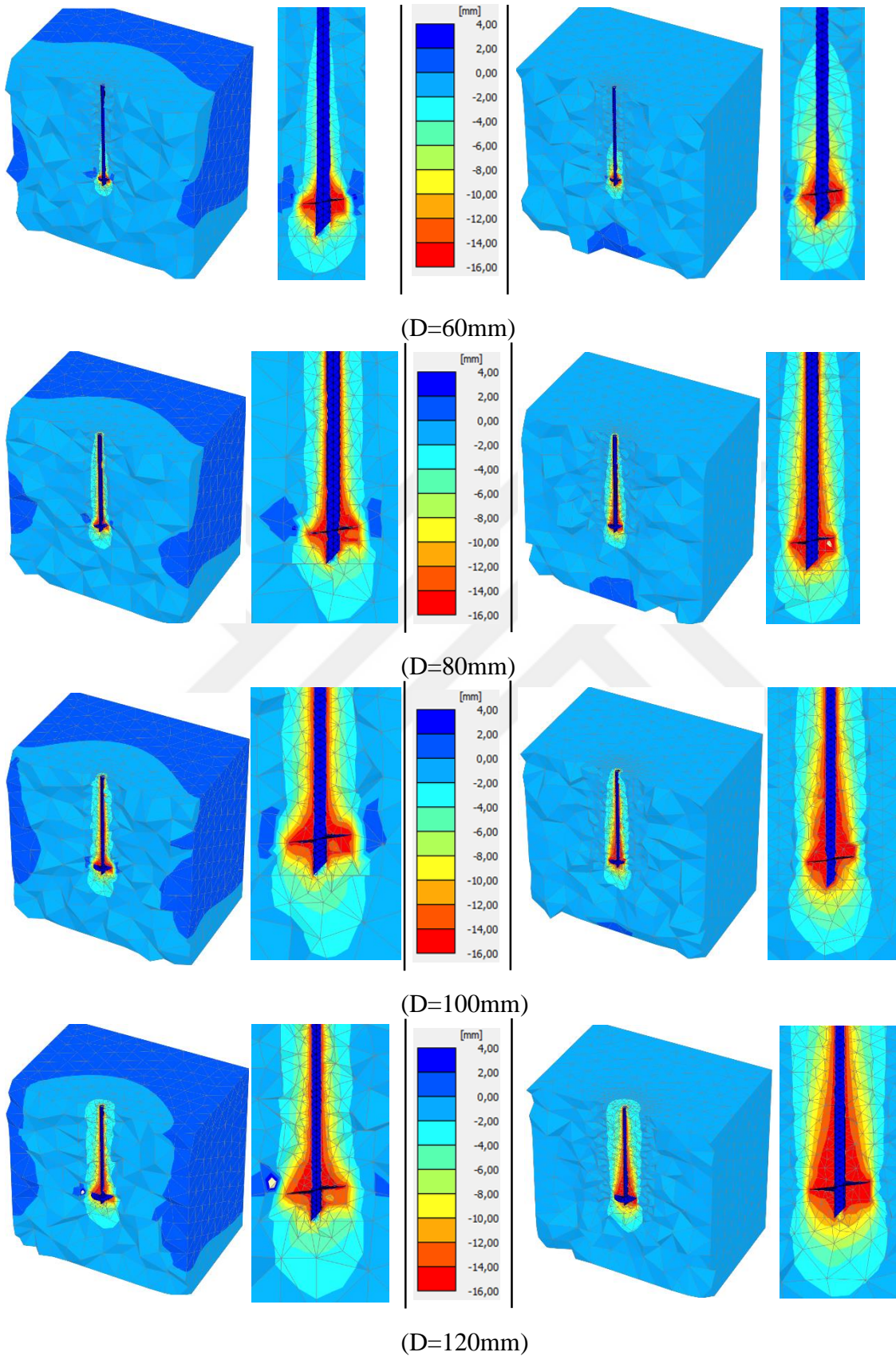
Dört farklı helis çapına ($D=60, 80, 100$ ve 120mm) sahip tekli helisel kazığın kapasitesi ve göçme mekanizması üzerinde zemin sıklığı ve helis çapının etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, yük-deplasman ve yük-parametre ilişkisini gösteren şekillerle sunulmuştur (Şekil 7.18). Sıkı zeminde deney ve üç boyutlu sayısal analizlerden elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu, ancak iki boyutlu analizlerden elde edilen taşıma kapasitelerinin deney ve üç boyutlu analize göre oldukça aşağıda kaldığı tespit edilmiştir. Sıkı zeminde üç boyutlu modellemenin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Gevşek zeminde ise hem üç boyutlu hem de iki boyutlu analiz sonuçları deneyle uyum içinde olmuştur. Zemin sıklığının artmasıyla kapasitenin arttığı ve bu artışın gevşek zeminle sıkı zemin arasında, helis çapına bağlı olarak, minimum 7 kat, maksimum 11 kat olduğu görülmüştür. Bu durum, sıkı zemindeki yüzey sürtünmesinin gevşek zemine oranla daha fazla olmasıyla açıklanabilmektedir. Helis çapının artmasıyla kazık kapasitesinin arttığı da belirlenmiştir. Sıkı zemin için helis çapının (D) 60mm 'den 120mm 'ye artması durumunda kapasite artışı yaklaşık 4,5 kat, gevşek zemin için ise yaklaşık 3 kat olmuştur. İlave olarak tekli helisel kazığın kapasitesinin düz kazığa kıyasla oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir. Düz kazık ile $D=100\text{mm}$ çaplı helisel kazık arasındaki kapasite farkı yaklaşık 7,5 kat olmuştur. Helis çapının büyümesiyle de göçme mekanizması daha geniş bir alanda etkili olmuştur. Çapın artması ile kazığın etkilediği alan ve helis üzerindeki zemin bölgesinin büyümesi mekanizmada yoğunluğa ve kapasitede artışa sebep olmuştur (Şekil 7.19).



Şekil 7.18. Farklı çaplı tekli helisel kazıkların taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



Şekil 7.18 (devam). Farklı çaplı tekli helisel kazıkların taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin
b) Gevşek zemin



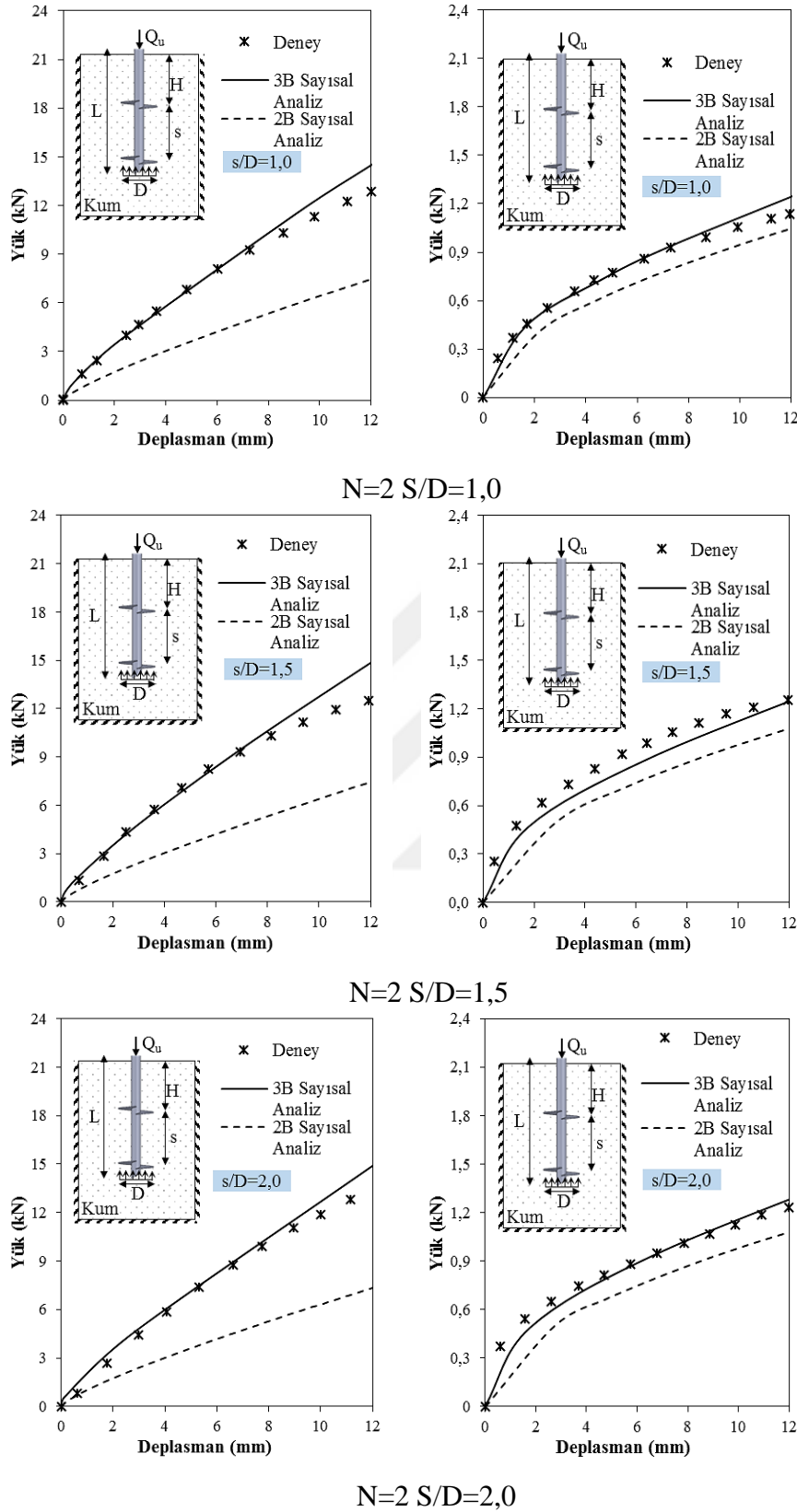
Şekil 7.19. Tekli helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

7.4.3. Laboratuvar çoklu helisel kazık analiz sonuçları

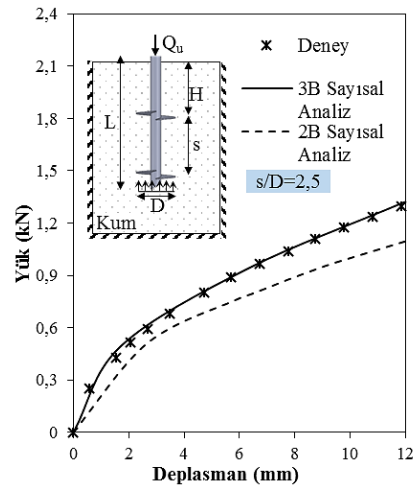
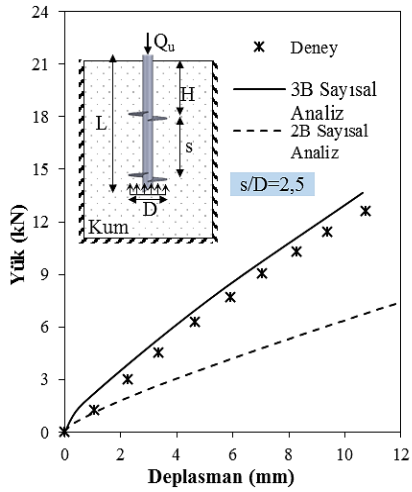
Helis çapının sabit tutulup helis sayısı arttırılarak iki farklı sıklıkta helis sayısı ve helisler arası mesafesi gibi değişken parametrelerin kazık kapasitesi ve göçme mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla helis çapı $D=100$ mm olarak sabit tutulup, helis sayısı $N=2$ ve 3 olmak üzere çoklu helisel kazıklar modellenmiştir. Helisler arası mesafe oranı, $S/D = 1,0-1,5-2,0-2,5$ ve $3,0$ şeklinde seçilerek bu oranın kapasitede meydana getirdiği değişimin incelendiği analizler, $N=2$ çoklu helisel kazık için yapılmıştır. $N=3$ çoklu helisel kazıkta mesafe oranları $S/D = 1,5$ ve $2,0$ olacak şekilde model kurulmuştur. Sonuçlar, yük-deplasman ve yük-parametre ilişkisini gösteren şekillerle sunulmuştur (Şekil 7.20). Deney ve üç boyutlu sayısal analizden elde edilen sonuçların her iki zemin sıklığı için de uyumlu olduğu belirlenmiştir. İki boyutlu analiz sonuçları ise sıkı zeminde daha düşük kalmış, ancak gevşek zeminde deney ve üç boyutlu analiz sonuçlarıyla daha yakın çıkmıştır.

Zemin sıklığının artmasıyla kapasitenin arttığı ve bu artışın gevşek zeminle sıkı zemin arasında helisler arası mesafe oranından etkilenmeksizin yaklaşık 11 kat olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle her bir helisler arası mesafe oranı için zemin sıklığının artmasının kapasitede eşdeğer artışlara sebep olduğu söylenebilmektedir. Sıkı zemin için $S/D=1,0$ ile $3,0$ arasında meydana gelen kapasite artışı yaklaşık %4,5, gevşek zemin için ise yaklaşık %8 olmuştur.

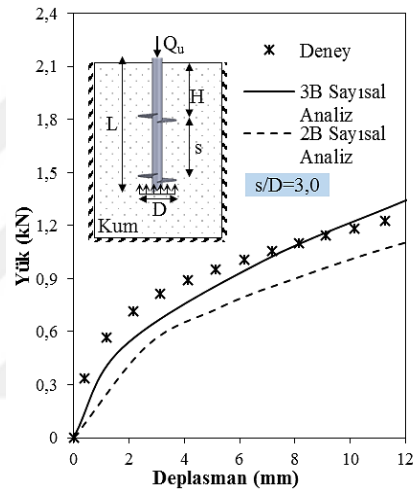
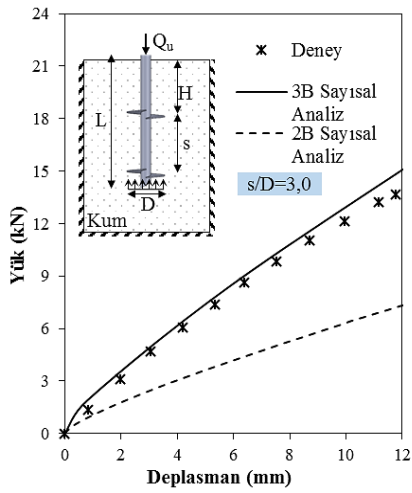
Helis sayısının 2'den 3'e çıkmasıyla kapasitede önemli miktarda artış gözlenmemiştir. Ancak tek helis plakalı kazıktan, 2 helis plakalı çoklu helisel kazığa geçişte sıkı zemin için kapasite yaklaşık 1,4 kat, gevşek zeminde ise yaklaşık 1,3 kat daha fazla elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen göçme mekanizmaları, literatürde yer alan basınca maruz çoklu helisel kazığın göçme mekanizmasını yansıtmış ve davranış, silindirik göçme mekanizmasıyla uyumlu olmuştur. Bu silindirik oluşum kazık boyunca devam etmiştir. Helisler arası mesafe oranının artmasıyla plakalar arası etkileşimin azaldığı ve plakaların tekli davranışa yaklaşmaya başladığı görülmüştür (Şekil 7.21). $N=3$ çoklu helisel kazık için $S/D=1,5$ ve $2,0$ mesafe oranlarında helislerin halâ etkileşim içinde olduğu belirlenmiştir.



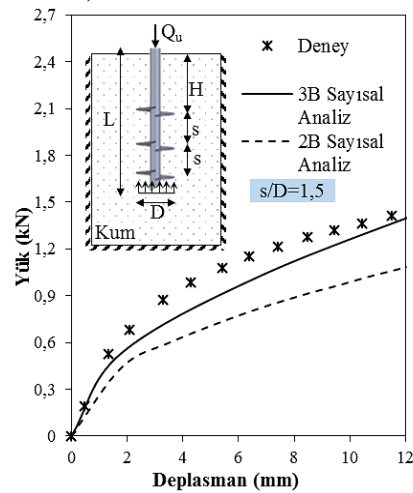
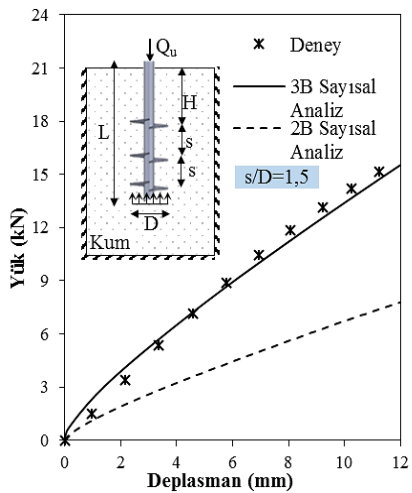
Şekil 7.20. Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



N=2 S/D=2,5

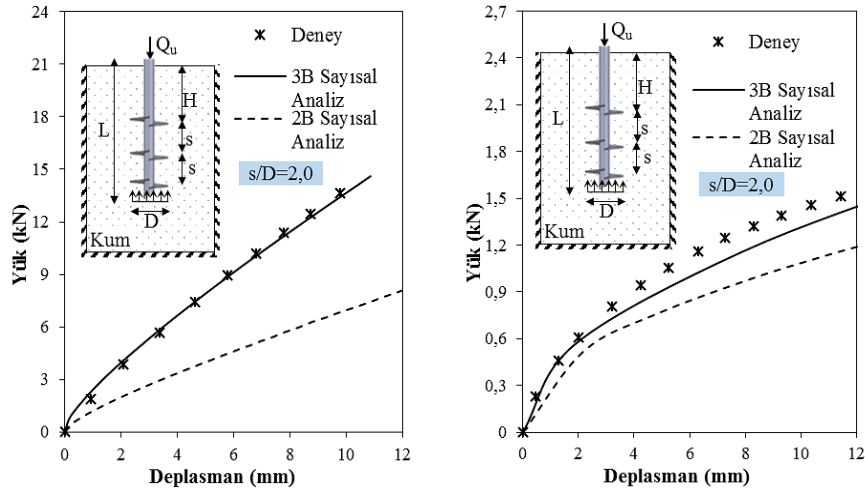


N=2 S/D=3,0

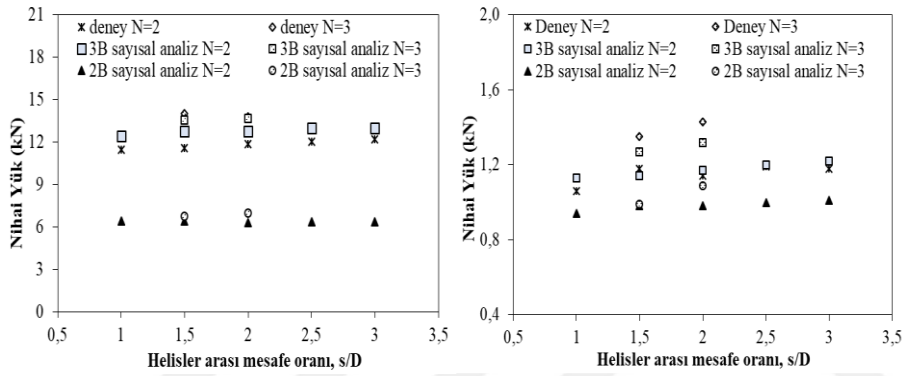


N=3 S/D=1,5

Şekil 7.20 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



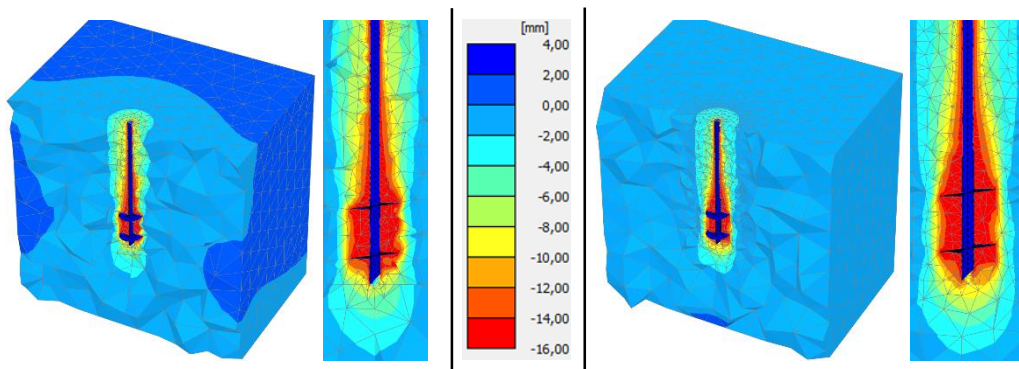
N=3 S/D=2,0



(a)

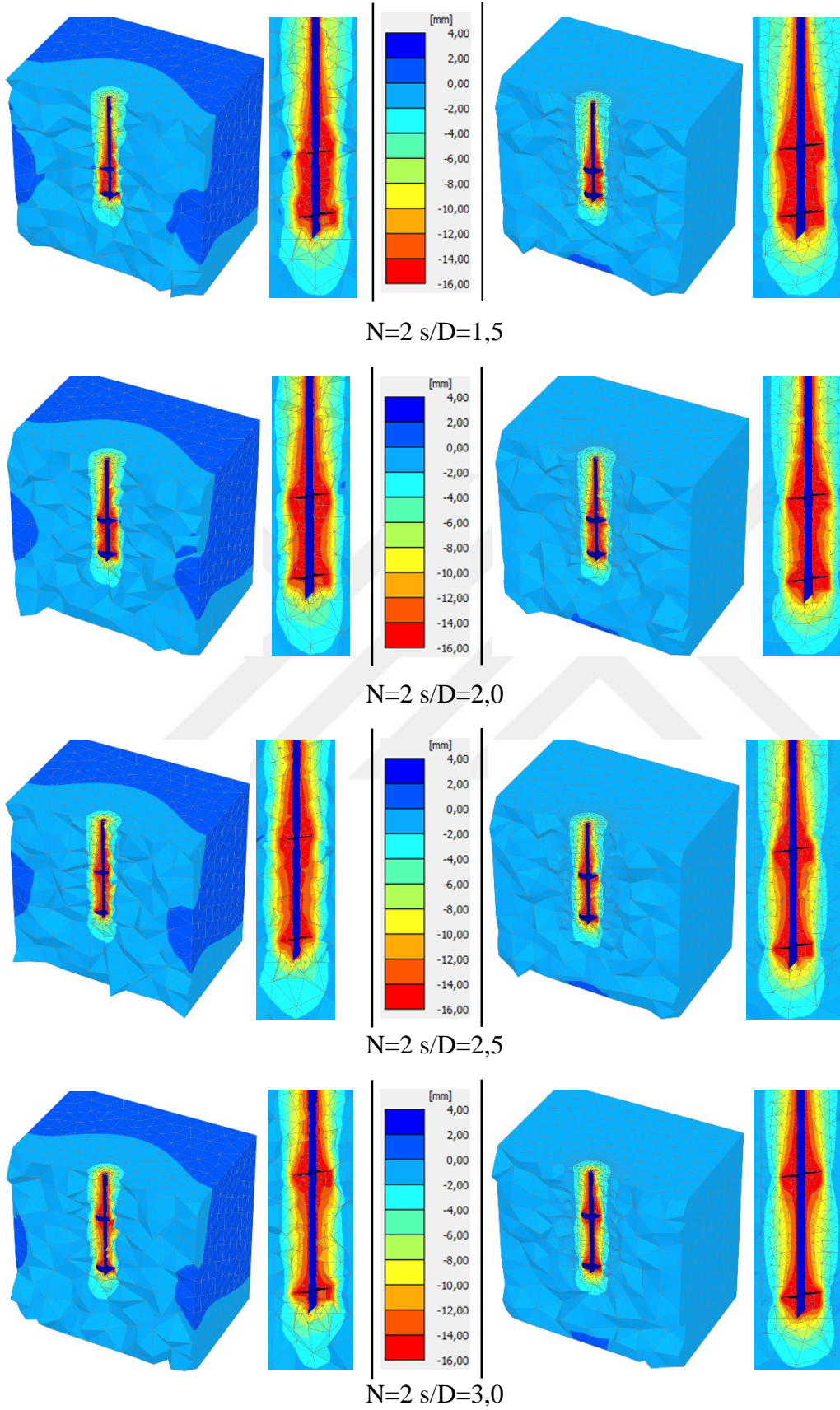
(b)

Şekil 7.20 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

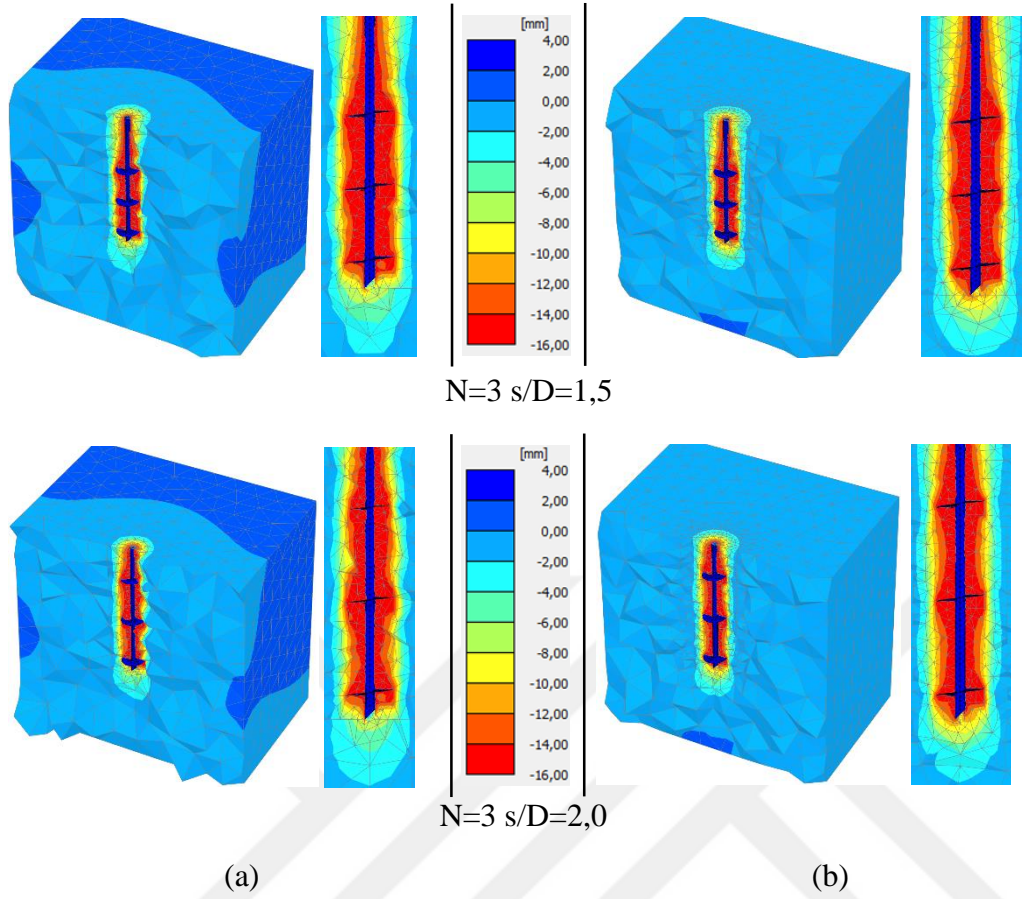


N=2 s/D=1,0

Şekil 7.21. Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



Şekil 7.21 (devam). Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



Şekil 7.21 (devam). Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

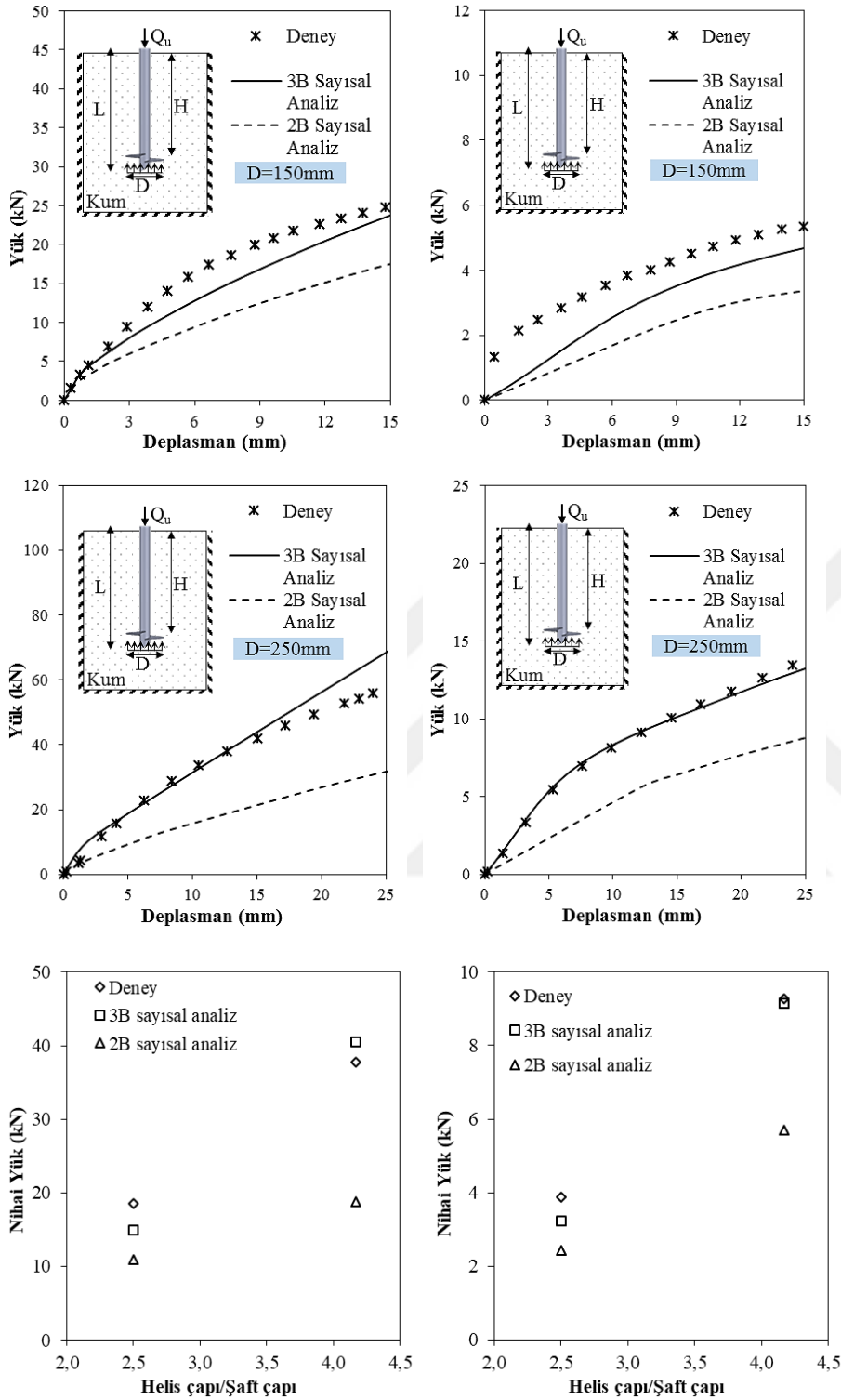
7.5. Büyük Ölçekli Arazi Sayısal Analiz Sonuçları

Sıkı ve gevşek zemine gömülü aksenal basınç yükü altındaki büyük ölçekli helisel kazıklarla yapılan deneyler modellenerek sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve birbiri ile olan uyumu araştırılmıştır. Yapılan analizlerde, shaft çapı $d=60$ mm ve gömülme oranı $L/d=25$ olarak sabit tutulup, helis çapı ($D=150$ ve 250 mm), helis sayısı ($N=1, 2$ ve 3) ve helisler arası mesafe oranının ($s/D= 1,5$ ve $2,0$) kapasite ile göçme mekanizmasına olan etkileri incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçlarından kapasite $\%5D$ göçme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

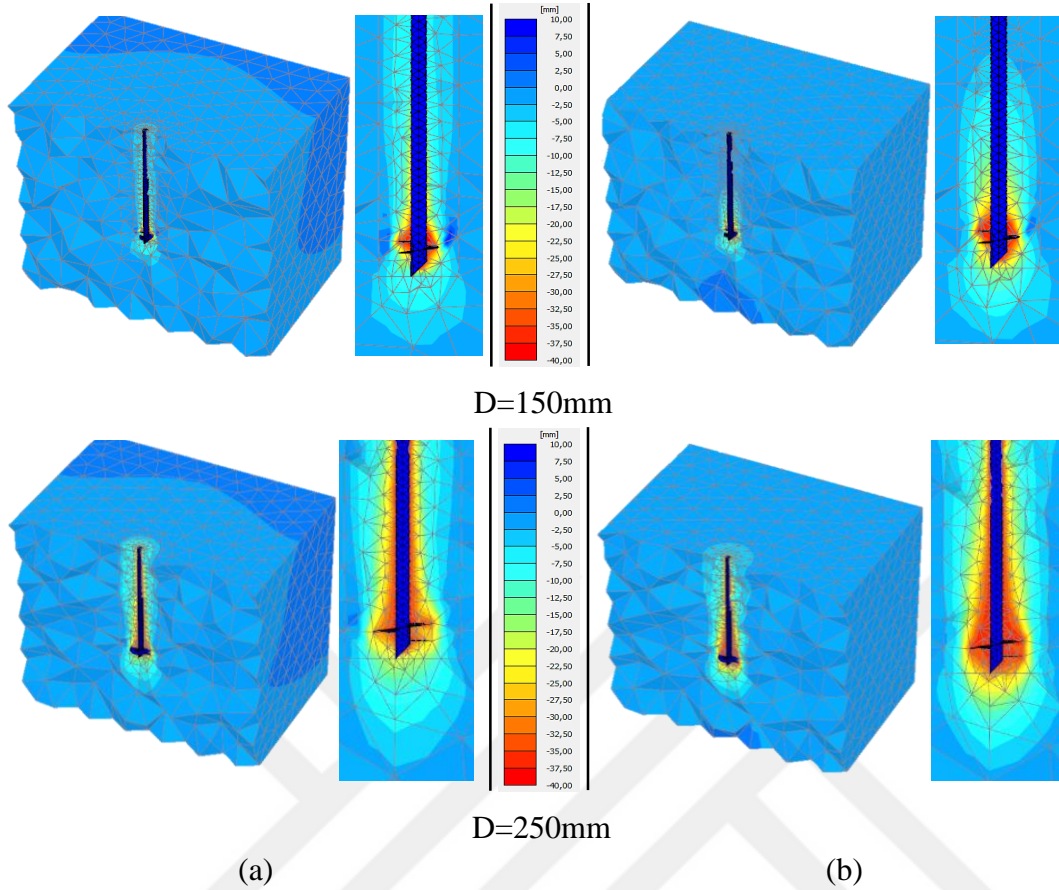
7.5.1. Büyük ölçekli tekli helisel kazık analiz sonuçları

Tekli helisel kazığın kapasitesi ve göçme mekanizması üzerinde zemin sıklığı ve helis çapının etkileri araştırılmıştır. Helis çapı, $D=150$ ve 250 mm olarak modellenmiştir. Sonuçlar, yük-deplasman ve yük-parametre ilişkisini gösteren şekillerle sunulmuştur (Şekil 7.22). Her iki zemin sıklığında da deney ve üç boyutlu sayısal analizlerden elde edilen

sonuçların oldukça uyumlu olduğu, ancak iki boyutlu analizlerden elde edilen taşıma kapasitelerinin deney ve üç boyutlu analize göre oldukça düşük kaldığı tespit edilmiştir. Zemin sıklığının artmasıyla kapasitenin arttığı ve bu artışın gevşek zeminle sıkı zemin arasında, helis çapına bağlı olarak, minimum 4,5 kat, maksimum 4,6 kat olduğu görülmüştür. Bu durum, sıkı zemindeki yüzey sürtünmesinin gevşek zemine oranla daha fazla olmasıyla açıklanabilmektedir. Helis çapının artmasıyla kazık kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Sıkı zemin için helis çapının (D) 150mm'den 250mm'ye artması durumunda kapasite artışı yaklaşık 2,7 kat, gevşek zemin için ise yaklaşık 2,8 kat olmuştur. Analizler sonucunda elde edilen göçme mekanizmaları, literatürde yer alan basınca maruz helisel kazığın göçme mekanizmasını yansıtmış ve zemin sıklığının artması daha düşük deplasmanların oluşmasına sebep olmuştur. D=150mm çaplı helisel kazıkta göçme mekanizması helis etrafında yoğunlaşmış, kazık shaftı etrafında ise minimum düzeyde kalmıştır. Aynı çaplı kazık için gevşek zeminde mekanizmadaki yoğunluk zemin yüzeyine ulaşmamıştır. Ayrıca helis çapının büyümesiyle de göçme mekanizması daha geniş bir alanda etkili olmuştur. Çapın artması ile kazığın ve helisin etkilediği zemin bölgesinin büyümesi mekanizmada yoğunluğa ve kapasitede artışa sebep olmuştur (Şekil 7.23).



Şekil 7.22. Tekli helisel kazığın taşıma kapasitesi (N=1) a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

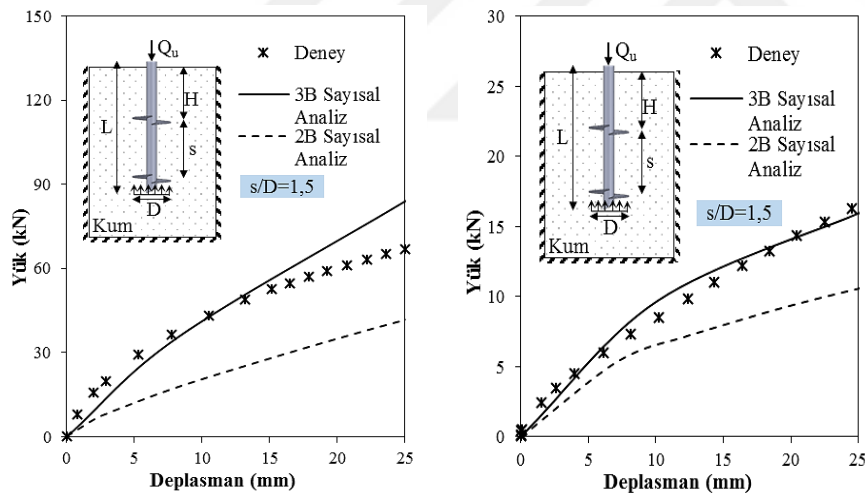


Şekil 7.23. Tekli helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

7.5.2. Büyük ölçekli çoklu helisel kazık analiz sonuçları

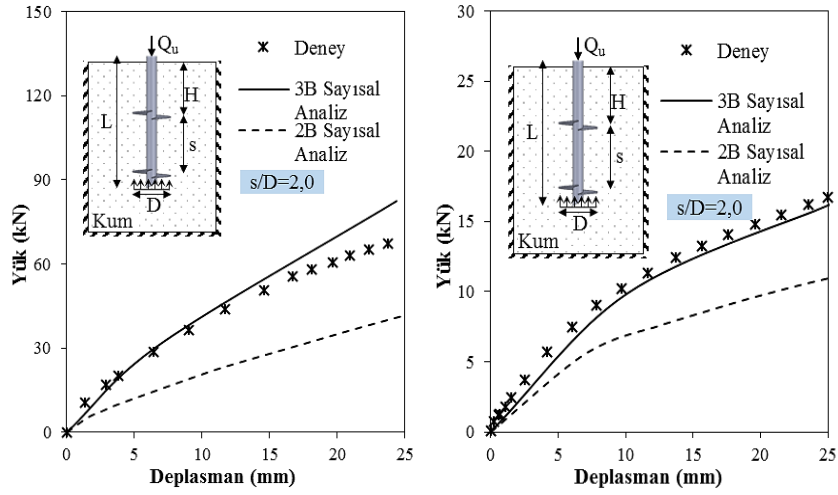
Helis çapının sabit tutulup helis sayısı artırılarak iki farklı sıklıkta helis sayısı ve helisler arası mesafe gibi değişken parametrelerin kazık kapasitesi ve göçme mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Helis çapı $D=250$ mm olarak sabit tutulmuş, helis sayısı $N=2$ ve 3 olmak üzere çoklu helisel kazıklar modellenmiştir. Helisler arası mesafe oranı, $s/D=1,5$ ve 2,0 olarak seçilerek, bu oranın kapasitede meydana getirdiği değişimin incelendiği analizler, $N=2$ çoklu helisel kazık için yapılmıştır. $N=3$ çoklu helisel kazıkta mesafe oranı $s/D=1,5$ olacak şekilde model kurulmuştur. Sonuçlar, yük-deplasman ve yük-parametre ilişkisini gösteren şekiller kullanılarak sunulmuştur (Şekil 7.24). Deney ve üç boyutlu sayısal analizden elde edilen sonuçların her iki zemin sıklığı için de uyumlu olduğu belirlenmiştir. İki boyutlu analiz sonuçları ise deney ve üç boyutlu analiz sonuçlarına kıyasla daha düşük çıkmıştır. Zemin sıklığının artmasıyla kapasitenin arttığı ve bu artışın gevşek zeminle sıkı zemin arasında helisler arası mesafe oranından etkilenmeksizin yaklaşık 4,5 kat olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle her bir helisler arası mesafe oranı için zemin sıklığının artmasının kapasitede benzer artışlara sebep olduğu söylenebilmektedir. Her iki zemin

sıklığı için de $s/D=1,5$ ve $2,0$ mesafe oranlarında benzer taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Tek helis plakalı kazıktan, iki plakalı çoklu helisel kazığa geçişte her iki zemin sıklığı için kapasite yaklaşık 1,2 kat daha fazla elde edilmiştir. Helis sayısının 2'den 3'e çıkarılmasıyla kapasitede meydana gelen artış ise sıkı ve gevşek zemin için yaklaşık %8 mertebelerinde olmuştur. Bu sonuçlara dayanılarak, tekli helisten ikili helise geçişin kapasiteye olumlu etkisinin olduğu, üç helis kullanımının ise bu kazık boyu için pek gerekli olmadığı söylenebilir. Analizler sonucunda elde edilen göçme mekanizmaları, literatürde yer alan basınca maruz çoklu helisel kazığın göçme mekanizmasını yansıtmış ve davranış, silindirik göçme mekanizmasıyla uyumlu olmuştur. Bu silindirik oluşum helisler arasında yoğun olmakla birlikte, özellikle üç plakalı helisel kazıkta kazık boyunca devam etmiştir. Çalışılan helisler arası mesafe oranlarında helislerin hala etkileşim içinde olduğu belirlenmiştir. Kazık verimini azaltıcı yönde çalışan bu etkileşimden kurtulabilmek ve maksimum verim elde edebilmek için, helislerin birbirine yakın konumlandırılmasından kaçınılması önerilebilir (Şekil 7.25).

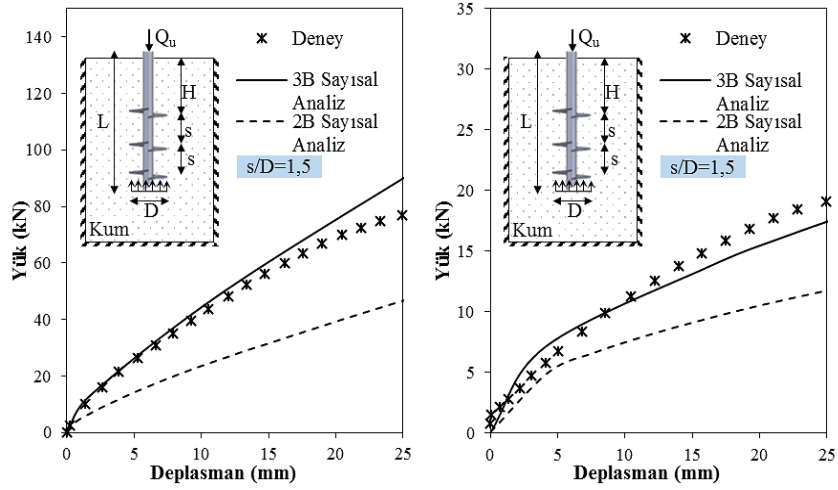


$$N=2 \quad S/D=1.5$$

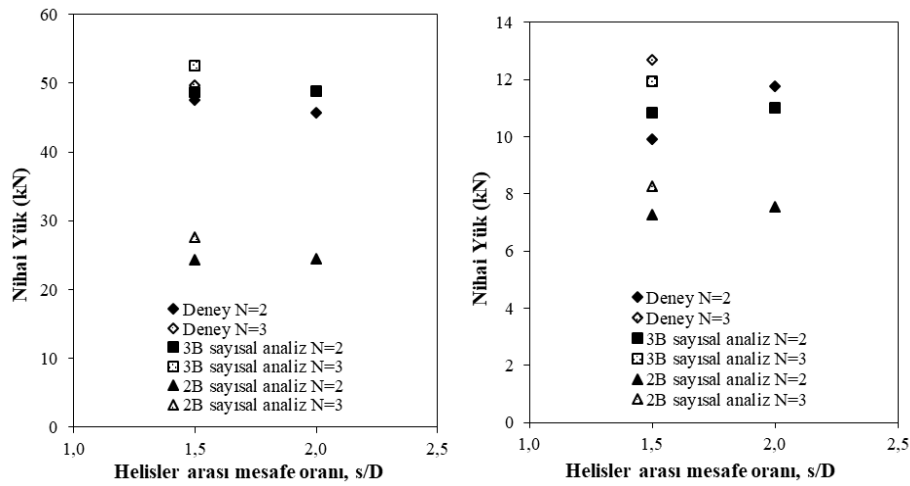
Şekil 7.24. Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



N=2 S/D=2,0



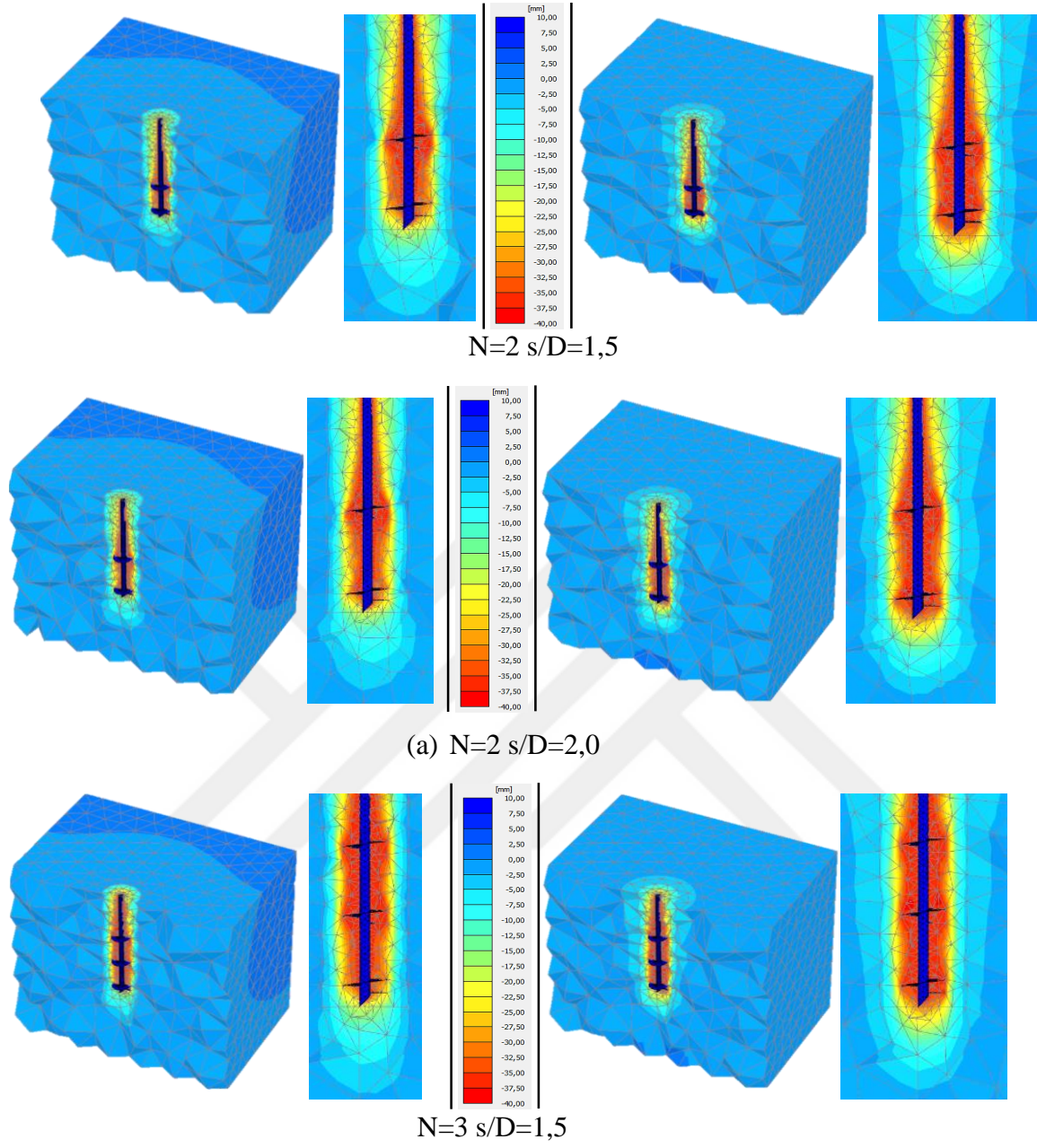
N=3 S/D=1.5



(a)

(b)

Şekil 7.24 (devam). Çoklu helisel kazığın taşıma kapasitesi a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin



(a) (b)
Şekil 7.25. Çoklu helisel kazığın göçme mekanizması a) Sıkı zemin b) Gevşek zemin

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sıkı ve gevşek kum zemine gömülü model boyutunda ve büyük ölçek boyutunda helisel kazıkların aksenel basınç kuvveti altındaki davranışı deneysel ve sayısal analiz çalışmaları ile incelenmiştir. Çalışmada helis çapı (D), helis sayısı (N), helisler arası mesafe (s) ve zemin sıklığı (D_r) gibi farklı parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Dört farklı yöntemle (%5D, %8D, %10D ve Davisson yöntemi) deney sonuçlarından elde edilen nihai yük değerleri teorik yöntemlerle (ayrık ve silindirik) kıyaslanmıştır. Ayrıca kazıkların zemine kurulumu esnasında kurulum tork değerleri okunarak tork-kapasite ilişkisi, tork faktörleri (K_t) eşliğinde incelenmiştir.

Bu tez çalışması; TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından yürütülen 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında, 218M571 No ve “Arazide Farklı Yüklemelere Maruz Helisel Kazıklar için Optimum Tasarım Parametrelerinin Önerilmesi” başlıklı Araştırma Projesi desteğinde tamamlanmıştır.

Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Sonuçlar deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilenler olmak üzere iki farklı başlık altında sunulmuştur.

8.1. Sonuçlar

8.1.1. Laboratuvar model deneyi ve büyük ölçekli arazi deneyi sonuçları

Deney bilgileri hakkında değerlendirme:

- Laboratuvar ortamında model boyutlarında, sıkı ve gevşek zemin koşullarında üç farklı seri halinde (Seri-1: helis çapı (D) etkisi; Seri-2: s/D oranı (helis aralığı/helis çapı oranı) etkisi; Seri-3: helis sayısı (N) etkisi) toplam 24 adet deney yapılmıştır.
- Büyük ölçekli arazi deneylerinde sıkı ve gevşek zeminde, iki farklı çap, iki farklı s/D oranı ve üç farklı helis sayısının incelendiği toplam 10 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Kurulum torku hakkında değerlendirme:

- Model deneylerde derinlik-kurulum tork değerlerinde Seri-1 verileri için gevşek zeminden sıkı zemine geçişte sırasıyla 5 ila 10 kat arası bir artış elde edilmiştir. Helisel kazık çapının iki kat artması gevşek ve sıkı zeminde sırasıyla yaklaşık olarak 5 ve 2,5 kata varan bir artış sağlamıştır. Helis çapı artışının sıkı zemin kurulum tork değerlerini önemli derecede arttırdığı görülmüştür. Seri-2 deneylerinde, kurulum torku değerlerinde gevşek zemine göre sıkı zeminde yaklaşık 10 kata varan bir artış tespit edilmiştir. Gevşek zeminde s/D oranı arttıkça kurulum torku değeri azalırken sıkı zeminde ise birbirine yakın değerlerin çıktığı belirlenmiştir. Seri-3 verileri incelendiğinde maksimum tork değerlerine göre sıkı zeminde tek helisli model kazıklarla kıyaslandığında çift helisli model kazıkta %30 ve üç helisli model kazıkta ise %40'a varan tork artışı tespit edilmiştir. Bu durum gevşek zemin koşulları için sırasıyla %65 ve %100 olarak hesaplanmıştır.
- Büyük ölçekli arazi deneylerinde, helis çapının 1,67 kat artması durumu için maksimum kurulum torku değerlerinde sıkı zeminde %40-45, gevşek zeminde ise %25-30 civarında artışların gözleendiği belirlenmiştir. Çift helis durumunda maksimum kurulum tork değerlerinde, s/D=1,5 ve 2,0 için sıkı zeminde yaklaşık %3 gibi bir fark gözlenmişken, gevşek zemin için bu değer yaklaşık %13 olmuştur. Helis sayısı etkisi incelendiğinde tek helise göre çift heliste maksimum tork artış miktarının %6 (sıkı zemin) ve %30 (gevşek zemin) mertebelerinde; tek helisten üç helise geçiş olması durumunda da yaklaşık %9 (sıkı zemin) ve %70 (gevşek zemin) mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir.
- Model boyutlarda helisel kazıkların kullanıldığı laboratuvar deneylerinde hem sıkı hem de gevşek durumda kurulum torku artış miktarı özellikle sıkı zemin için daha az olmuştur. Sıkı zeminde helis ilavesinin kurulum torku değerindeki artış miktarının az olmasının sebebi zemine ilk giren helisin zemini örselemesi ve ilave helislerin daha gevşek bir zeminde ilerlemesi şeklinde yorumlanmıştır. Model boyuttaki helisel kazıklar ile büyük ölçekli helisel kazıklar arasındaki tork artış miktarları arasındaki farkın tork uygulama yöntemi, tork cihazının dönüş hızı (rpm) ve boyut etkisi gibi faktörlerden kaynaklandığı öngörülmüştür.

Nihai yükler hakkında değerlendirme:

- Model boyutta helisel kazıklar için, aksenal basınç yük-deplasman eğrilerinden %10D yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre Seri-1 deneylerinde düz kazığın çapının yaklaşık 2,7 katı olan tekli helisel kazığın (LCDT-LCLT 2) taşıdığı nihai yükte sıkı ve gevşek zeminde düz kazığa (helissiz) göre ortalama 5-6 kat artışlar tespit edilmiştir. Helis çapının 2 kat artması ile birlikte sıkı zeminde 4,3 kata ve gevşek zeminde 2,6 kata varan nihai yük artışları meydana gelmiştir. Seri-2 deneylerinde s/D oranı arttıkça nihai yükler sıkı zeminde doğrusal artmakta iken gevşek zeminde bu artış, s/D oranının 1,5 ila 2,5 arasında olması hali için gerçekleşmiştir. Seri-3 deneyleri incelendiğinde (%10D yöntemine göre) helissiz düz kazıktan (d=22mm) helis çapı D=100mm olan tek helisli kazığa geçişte ortalama 11-13 kata (gevşek-sıkı), tek helisli kazıktan çift helisli kazığa geçişte 1,27 -1,3 (sıkı-gevşek) kata ve tek helisli kazıktan üç helisli kazığa geçişte de 1,5-1,6 (sıkı-gevşek) kata varan seviyelerde artışların görüldüğü belirlenmiştir. Sadece bir helis plakasının düşük bir maliyetle eklenmesi ile yaklaşık %30'a varan bir kapasite artışı elde edilebilmiş olması, maliyet ve taşıma gücü açısından ciddi bir avantaj sağlanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.
- Büyük ölçekli arazi deneylerinde, %5D yöntemine göre gevşek zeminden sıkı zemine geçişteki nihai yük değeri yaklaşık 5 kat artmıştır. Çap etkisi incelendiğinde çapın 1,67 kat artmasıyla her iki zemin sıklığında da 2.5 kata varan nihai yük kapasitesi artışları meydana geldiği tespit edilmiştir. Helis aralığı/helis çapı (s/D) etkisine ilişkin sonuçlar her iki zeminde birbirine yakın ve benzer sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Helis sayısı (N) etkisi incelendiğinde, %5D göçme yöntemi ve s/D=1,5 için elde edilen nihai yük kapasitelerinde tek helisten çift helise geçişte %26-%7 (sıkı-gevşek), çift helisten üç helise geçişte ise %31-%37 (sıkı-gevşek) aralıklarında nihai yük kapasitesi artışlarının meydana geldiği belirlenmiştir. Gevşek zeminde tek helisten çift helise geçişte, s/D=2 durumu için nihai yük değerinde yaklaşık %27 gibi bir artış gözlenmiştir.

Teorik sonuçlar hakkında değerlendirme:

- Teorik yöntemler (ayrık-silindirik yöntem) kullanılarak elde edilen verilerle deneysel sonuçlardan elde edilen veriler incelendiğinde laboratuvar model deneyleri için sıkı zeminde silindirik ve ayrık yöntemler %5D ve Davisson yöntemlerine daha yakın

değerler verirken gevşek zeminde ise ayrık yöntemden elde edilen sonuçlar genel olarak deney sonuçlarına daha yakın çıkmıştır.

- Büyük ölçekli arazi deney sonuçları ile teorik sonuçlar kıyaslandığında özellikle sıkı zeminde teorik sonuçların çok fazla değerler verdiği, üç helis durumu dışında ayrık yöntemdeki sonuçların deneysel sonuçlara ayrık yöntemdeki 0,7Rq oranındaki azaltma nedeniyle daha yakın çıktığı belirlenmiştir. Gevşek zeminde ise üç helis durumu dışında ayrık yöntem ile deney sonuçlarında birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Nihai yük – Tork faktörü (Kt) ilişkisi hakkında değerlendirme:

- Nihai yük- kurulum torku ilişkisini ifade eden tork faktörleri (Kt) maksimum kurulum tork değerlerine göre incelendiğinde, model deneyler için Perko (2009) tarafından önerilen Kt değeri kullanılarak elde edilen nihai yüklerin, %5D yöntemine ve Davisson göçme kriterine yakın sonuçlar verdiği, diğer iki tork faktörünün (Hoyt ve Clemence,1989; Sakr, 2015 tarafından önerilen) ise tüm göçme yöntemlerine kıyasla daha uzak değerler verdiği görülmüştür.
- Büyük ölçekli arazi deneylerinde üç farklı Kt yönteminin genel olarak FCDT 1-FCLT 1 deney sonuçları dışında diğer sonuçlardan çok uzak olmadığı fakat bazı tork ölçümlerinde Sakr (2015) %8D yöntemine yakinken diğer bir deney için %10D yöntemine yakın değerler verdiği belirlenmiştir.
- Nihai yük-kurulum torku değerlerine doğrusal regresyon uygulanıp sıfırdan geçen eğilim çizgisinin eğimi ile tasarım Kt değerleri belirlenmiş ve sonucunda seçilen nihai yük belirleme yönteminin Kt değerini etkilediği belirlenmiştir. Örneğin, büyük ölçekli arazi deneylerinde maksimum kurulum torku ile farklı göçme yöntemlerine göre elde edilen Kt değerleri ele alındığında %5D, %8D, %10D ve Davisson yöntemi için sırasıyla 20,99 m⁻¹, 28,22 m⁻¹, 31,20 m⁻¹, ve 13,16 m⁻¹ değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında, imal edilen helisel kazıkların izin verilebilir oturma değerlerinin farklı olması ve bu değerlerin doğrudan nihai yükü etkilemesi gibi faktörlerin tork faktörünün (Kt) seçimine doğrudan bağımlı olmasından dolayı, uygun olarak yorumlanmış bir yenilme kriterinin seçiminin helisel kazık tasarımında, doğru ve güvenilir bir yaklaşım olacağı önerilmiştir.

Farklı kurulum torku seçimi – Kurulum torku (Kt) ilişkisi hakkında değerlendirme:

- Literatür çalışmaları incelendiğinde kurulum torkunun tespitinde farklılıklar olduğu örneğin maksimum tork, kazık ucu torku ve ortalama tork değerleri gibi farklı seçimler yapıldığı görülmüştür. Laboratuvar model deneylerinden tasarım tork faktörü (Kt) değerleri %10D yöntemine göre $129,55 \text{ m}^{-1}$ (maksimum tork), $144,83 \text{ m}^{-1}$ (ortalama tork) ve $134,27 \text{ m}^{-1}$ (kazık ucu torku) olarak elde edilmiştir. Bu çalışma özelinde tork okuma sıklığı, ortalama mesafe seçimi gibi etkenler dikkate alındığında laboratuvar model deneyleri için yaklaşık %12 ve büyük ölçekli arazi deneylerinde ise yaklaşık %6 oranında tasarım tork faktörü değerinin kurulum torku seçiminden etkilendiği tespit edilmiştir. Ortalama kurulum torku için okuma sayısı ile okunan değer aralığının fazla olmasının sonuçları etkilediği öngörülmüştür. Bu doğrultuda güvenli tarafta kalmak adına daha düşük yük değerini veren kurulum torku seçiminin yapılması önerilmiştir.

8.1.2. Sayısal analiz sonuçları

- Model (laboratuvar) ve büyük ölçek (arazi) boyutunda deneysel olarak incelenen helisel kazık problemi, sonlu eleman yöntemi ile de çözümlenerek deneysel ve sayısal sonuçların birbirleri ile olan uyumu araştırılmıştır. Bu amaçla, deneysel sonuçlar sonlu elemanlar yöntemini esas alan ticari yazılımlar (Plaxis 2D ve 3D) aracılığıyla iki ve üç boyutlu ortamda sayısal olarak modellenmiştir.
- Başlangıç deneme analizlerinde; sıkı zeminde yapılan üç boyutlu analiz sonuçları, deneylerden elde edilen sonuçlara kıyasla oldukça fazla çıkmış ve bu durum, kazığın zemine yerleştirilme anında belirli genişlikteki bir zemin bölgesinin örselenmesi sonucu sıklık ve mukavemet kaybına uğraması ile açıklanmıştır. Bu örselenme etkisi literatürde bazı araştırmacılar tarafından da vurgulanmış ve sayısal analizlerde bu hususlar dikkate alınmıştır.
- Deneysel çalışmalar esnasında, örselenmiş bölgenin genişliği 2D (D=helis plakası çapı) olarak gözlenmiştir. Yerleşim etkisinin dikkate alındığı üç boyutlu analiz sonuçları deneylerle uyumlu çıkmıştır. Ancak iki boyutlu analiz sonuçları, deney ve üç boyutlu sayısal analiz sonuçlarından daha düşük olarak elde edilmiştir.
- Gevşek zemin ortamında hem iki boyutlu hem de üç boyutlu sayısal model, deneysel çalışmayı başarıyla yansıtabilmiştir. Model deneylerde, düz kazıktan tekli helisel kazığa

($N=1$) geçilmesi durumunda taşıma kapasitesi önemli oranda artmış ve bu artış helis çapının artmasıyla devam etmiştir.

- Sayısal analizler sonucunda elde edilen göçme mekanizmaları literatürle genel anlamıyla uyumlu çıkmıştır. Çoklu helisel kazıklarda, helisler arası mesafenin (s/D) az olduğu durumda, plakalar arası etkileşimin olduğu görülmüş ve silindirik bir göçme mekanizması elde edilmiştir. s/D 'nin artmasıyla birlikte plakalar arası etkileşimin azalmaya başladığı ve ayrık davranışın hakim olduğu gözlenmiştir. Laboratuvar model ve büyük ölçekli arazi deneylerindeki sayısal analizlerde yaklaşık $s/D=1,5$ 'ten sonra ayrık bir göçme mekanizmasının başladığı ve $s/D=3$ için bu ayrıklaşmanın çok daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

Bu çalışma esas alınarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar ve sunulan öneriler aşağıda yer almaktadır.

- Bu çalışmada model ve büyük ölçekli deneylerde sabit bir shaft çapı ve şekli (dairesel) kullanılmıştır. Farklı shaft çapları ve şekilleri (kare vb.) kullanarak deneyler yapılabilir.
- Bu çalışmada helis yükseliği $0,3D$ olarak sabit alınmıştır. Farklı helis yükseklikleri kullanılarak taşıma gücü, tork ve örselenme bölgesine olan etkisi incelenebilir.
- Farklı zemin türleri (kil vb.) ve yoğunluklarında deneyler yapılabilir.
- Grup helisel kazıkların eksenel basınç davranışları deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerle incelenebilir.
- Farklı yükleme (eksenel çekme, yanal vb.) durumlarında helisel kazık davranışı ele alınabilir.

KAYNAKLAR

- ASTM D2487-11 (2011). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*. <https://www.astm.org/>
- ASTM D4253-16 (2016). Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. *ASTM International*. <https://www.astm.org/>
- ASTM D4254-16 (2016). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. *ASTM International*. <https://www.astm.org/>
- Bhavikatti, S. S. (2015). Finite element analysis. *New Age International*, 347.
- Bahadır, A. A. & Onur, M. İ. (2017). Derin kazı destek sistemi tasarımında zemin modeli seçimi: Bir vaka analizi. 7. *Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, 583-590.
- Blessen J., Deardorff, D., Dikeman R., Kortan J., Malone J., Olson K. & Waltz N. (2019). *Supportworks Technical Manual*, Third Edition, 338.
- Brinch Hansen, J. (1963). Discussion, hyperbolic stress-strain response of cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics, Foundation Division ASCE*, 89 (SM4), 241-242.
- Cortes Garcia, L. D. (2019). Assessment of helical anchors bearing capacity for offshore aquaculture applications (MSc Thesis). *The University of Maine*.
- Davisson, M. T. (1972). High-capacity piles. *Proceedings of Lecture Series of Innovations in Foundation Construction, ASCE*, Illinois section, Chicago, 81–112.
- Duncan, J. M. & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *ASCE J. of the Soil Mech. And Found. Div.*, 96, 1629-1653.
- Elkasabgy, M. & El Naggar, M. H. (2015). Axial compressive response of large-capacity helical and driven steel piles in cohesive soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (2), 224-243.
- El Sharnouby, M. M., & M. H. El Naggar. (2012). Field Investigation of Axial Monotonic and Cyclic Performance of Reinforced Helical Pulldown Micropiles. *Canadian Geotechnical Journal* 49(5), 560–573. <https://doi.org/10.1139/t2012-017>
- Elsherbiny, Z. H. & El Naggar, M. H. (2013). Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 50 (12). <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0487>
- Emirler, B. (2019). Kum zemine gömülü tekil kazık ve kazık gruplarının çekme yükü etkisindeki davranışlarının incelenmesi, (Doktora Tezi), *Çukurova Üniversitesi*, Adana.

- Emirler, B., Tolun, M. & Yıldız, A. (2019). Eğik çekme yükü etkisindeki tekil kazığın üç boyutlu sayısal analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (2), 219–230.
- George, B. E., Banerjee, S. & Gandhi, S. R. (2017). Numerical analysis of helical piles in cohesionless soil. *International Journal of Geomechanics*, 14 (4). <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1419912>
- George, B. E., Banerjee, S. & Gandhi, S. R. (2019). Helical piles installed in cohesionless soil by displacement method. *International Journal of Geomechanics*, 19 (7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001457](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001457)
- Ghaly, A., Hanna, A. & Hanna, M. (1991). Installation torque of screw anchors in dry sand. *Soils and Foundations*, 31 (2), 77–92.
- Harnish, J. L. (2015). Helical pile installation torque and capacity correlations (MSc Thesis). *The University of Western Ontario London*.
- Harnish, J. & El Naggar M. H. (2017). Large diameter helical pile capacity- torque correlations. *Canadian Geotechnical Journal* 54 (7). DOI: 10.1139/cgj-2016-0156
- Hirany, A. & Kulhawy, F. H. (1989). Interpretation of load tests on drilled shafts-Pt. 1: Axial compression. *Fndn. Eng. Current Principles and Practices*, GSP 22, Ed. Fred Kulhawy, ASCE, New York, 1132-1149.
- Hoyt, R. M. & Clemence, S. P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2, 1019–1022.
- International Code Council (2006). International Building Code (IBC). *International Code Council*, Washington, DC.
- International Code Council (2009). International Building Code (IBC). *International Code Council*, Washington, DC.
- ISSMFE (1985). Axial pile loading test – Part I: Static loading, *Geotechnical Testing Journal ASTM*, 8 (2), 79–80, <https://doi.org/10.1520/GTJ10514J>.
- Khan, M. U. S. (2016). Estimation of compressive load bearing capacity of helical piles using torque method and induced settlements (MSc Thesis). *The University of British Columbia*.
- Khazaei, J. & Eslami, A. (2017) Postgrouted helical piles behavior through physical modeling by FCV. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35 (4), 528–537.
- Kondner, R. L. (1963). A hyperbolic stress strain formulation for sands. 2. *Pan. Am. ICOSFE Brazil*, 1, 289-324.

- Kunduz, S. (2020). Gevşek zeminlerde yanal yüklü helisel kazık davranışının laboratuvar deneyleriyle araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), *İskenderun Teknik Üniversitesi*, Hatay.
- Lanyi, S. A. (2017). Behaviour of helical pile groups and individual piles under compressive loading in a cohesive soil (MSc Thesis), *University of Alberta*.
- Li, W. & Deng, L. (2019). Axial load tests and numerical modeling of single-helix piles in cohesive and cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, 14 (2), 461-475.
- Livneh, B. & El Naggar, M. H. (2008). Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (8). <https://doi.org/10.1139/T08-044>
- Lutenegger, A. J. (2011). Historical development of iron screw-pile foundations: 1836–1900. *The International Journal for the History of Engineering & Technology*, 81 (1), 108-128.
- Lutenegger, A. J. (2017). Uplift behavior of round shaft single-helix screw-piles for elevated ground mount solar panel systems. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, 615-618.
- Mitsch, M. P. & Clemence, S. P. (1985). Uplift behavior of anchor foundations in soil, *ASCE*, New York, 26–47.
- Mittal, S. & Mukherjee, S. (2015). Behaviour of group of helical screw anchors under compressive loads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33 (3). <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9841-4>
- Mohajerani, A., Bosnjak, D. & Bromwich, D. (2016). Analysis and design methods of screw piles: A review. *Soils and Foundations*, 56 (1). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.01.009>
- Nasr, M. H. (2004). Large capacity screw piles. In: *Proceedings of the International Conference: Future Vision and Challenges for Urban Development*. Cairo, Egypt, 20–22 December, 1–15.
- Nasr, M. H. (2009). Performance-based design for helical piles. In: *Contemporary Topics in Deep Foundations*. American Society of Civil Engineers, USA, 496–503.
- Niroumand, H., Kassim, K.A. (2016). Design and construction of soil anchor plates. *Elsevier*, Amsterdam, 202.
- Nowkandeh, M. J. & Choobbasti, A. J. (2021). Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02158-w>.

- O'Neill, M. W. & Reese, L. C. (1999). Drilled shafts: construction procedures and design methods. Publication No. FHWA-IF-99-025, *Office of Infrastructure*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Özaydın, K. (2016). Zemin Mekaniği (Güncelleştirilmiş Baskı). *Birsen Kitabevi*.
- Özyürek, Y. E. (2019). Two dimensional finite element modeling for the multi tier pile wall with anchor shoring system (MSc Thesis), *Middle East Technical University*, Ankara.
- Pérez, Z. A., Schiavon, J. A., Tsuha, C. H. C., Dias, D. & Thorel, L. (2018). Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 55 (8), 1067-1080.
- Perko, H. A. (2009). Helical piles: A practical guide to design and installation. In *Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation*. <https://doi.org/10.1002/9780470549063>
- PLAXIS 2D (2020). PLAXIS CONNECT Edition V20.02. Plaxis – Bentley Systems.
- PLAXIS 3D (2020a). PLAXIS CONNECT Edition V20.02. Plaxis – Bentley Systems.
- PLAXIS 3D (2020b). PLAXIS CONNECT Edition V20.02 Material Models Manual (Edited by Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Ragi Manoj, N., Fonseca Arévalo, F., Zampich, L., Zalamea, N.). Plaxis – Bentley Systems.
- Sakr, M. (2009). Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 46 (9). <https://doi.org/10.1139/T09-044>
- Sakr, M. (2011). Installation and performance characteristics of high-capacity helical piles in cohesionless soils. *DFI Journal- The Journal of the Deep Foundations Institute*, 5(1). <https://doi.org/10.1179/dfi.2011.004>
- Sakr, M. (2012). Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesive soils. *DFI Journal- The Journal of the Deep Foundations Institute*, 6 (1), 41-57. <https://doi.org/10.1179/dfi.2012.004>
- Sakr, M. (2015). Relationship between installation torque and axial capacities of helical piles in cohesionless soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (6). <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0395>
- Salhi, L., Nait-Rabah, O., Deyrat, C. & Roos, C. (2013). Numerical modeling of single helical pile behavior under compressive loading in sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18 T.
- Schanz, T. (1998). Zur modellierung des mechanischen verhaltens von reibungsmaterialien. Habilitation, *Stuttgart Universität*, Deutschland.
- Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier, P. G. (1999). The hardening-soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, 281-290.

- Singh, S., Laddha, A., Hiranandani, P. & Purohit, D. G. M. (2017). A review on pull-out capacity of helical anchors in clay and sand. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 3 (6), 24-32.
- Souissi, M. (2019). Helical pile capacity to torque ratio: A functional perspective (*PhD Thesis*). Colorado State University, USA.
- Spagnoli, G., Jalilvand, S. & Gavin, K. (2016). Installation torque measurements of helical piles in dry sand for offshore foundation systems. *Geo-Chicago 2016 Geotechnics for Sustainable Energy at Chicago, Illinois*, GSP 270, 439-448. <https://doi.org/10.1061/9780784480137.042>
- Spagnoli, G. (2017). A CPT based-model to predict the installation torque of helical piles in sand. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35 (4), 578-585.
- Spagnoli, G. & Tsuha, C. H. C. (2020). A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. *Marine Georesources and Geotechnology* 38 (9), 1013-1036. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1729905>
- Tsuha, C. H. C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L. & Garnier, J. (2012). Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(9), 1102-1114. <https://doi.org/10.1139/T2012-064>
- Türedi, Y. & Örnek, M. (2020). Analysis of model helical piles subjected to axial compression. *Grđevinar- Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 72 (9), 803-813. <https://doi.org/10.14256/JCE.2660.2019>
- Ullah, S. N., Hu, Y. & O'Loughlin, C. (2019). A green foundation for offshore wind energy-helical piles. *World Engineering Convention, WEC2019*, Melbourne, Australia, 272-285.
- Uncuoğlu, E. (2009). Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıkların yatay yük ve moment etkisi altındaki davranışlarının analizi, (Doktora Tezi), *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Yılmaz, B. (2016). Helisel kazıklar, (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

DİZİN

A

arazi · iv, v, ix, xv, 20, 21, 30, 31,
41, 42, 43, 44, 45, 62, 63, 82,
85, 88, 89, 94, 96, 97, 101,
102, 103, 105, 125, 136, 152,
179, 180, 181, 182, 183, 184
Ayrık Yöntem · 118, 131

B

basınç · iv, v, ix, xiv, xv, xviii,
20, 24, 30, 37, 38, 39, 40, 41,
42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50,
51, 52, 55, 56, 57, 59, 60, 61,
67, 71, 79, 80, 84, 90, 103,
105, 111, 112, 113, 114, 115,
122, 125, 127, 128, 129, 145,
146, 147, 148, 156, 159, 171,
179, 181, 185

Ç

çap · 59, 127, 179
çelik · iv, 30, 58, 68, 69, 71, 88,
96, 151, 152, 153

D

davranış · 30, 38, 141, 142, 143,
152, 160, 166, 175
deney kasası · 68, 77
deplasman · xiv, 39, 40, 42, 57,
58, 59, 60, 61, 71, 73, 74, 76,
77, 78, 80, 94, 95, 101, 103,
112, 114, 122, 138, 139, 156,
161, 165, 172, 175, 181

E

eksenel · iv, v, ix, 20, 21, 37, 38,
41, 42, 43, 45, 46, 47, 52, 55,
57, 59, 61, 67, 78, 80, 93, 103,
105, 111, 112, 113, 114, 125,
127, 129, 139, 145, 171, 179,
181, 185

G

Geoteknik · xix, 20, 63, 67, 82,
96, 97, 138, 140, 156, 186
gevşek zemin · 77, 80, 105, 106,
107, 109, 110, 111, 112, 113,
116, 121, 122, 125, 126, 127,
129, 141, 150, 159, 161, 165,
172, 175, 179, 180

H

helisel kazık · x, xi, xiii, 22, 24,
25, 26, 27, 29, 33, 34, 35, 36,
40, 43, 44, 52, 57, 61, 62, 68,
76, 78, 80, 94, 96, 99, 101,
103, 104, 139, 150, 158, 161,
165, 166, 172, 174, 175, 183,
184, 188

İ

içsel sürtünme açısı · xviii, 49,
53, 140, 143, 152

K

kurulum torku · iv, xi, xii, xv, 52,
57, 106, 109, 110, 121, 122,

123, 124, 125, 126, 127, 134,
135, 180, 182, 183

M

model deney · v, ix, xi, 80, 81, 82

P

Piknometre · viii, 66
piston · 90

R

reaksiyon · 85, 88, 100

S

sayısal analiz · v, 20, 21, 42, 43,
136, 153, 158, 179, 184
silindirik yöntem · 119, 182

T

taşıma gücü · viii, xiv, 46, 47, 49,
50, 51, 57, 118, 181, 185
tork faktörü · xi, xv, xviii, 52, 55,
57, 119, 120, 122, 123, 125,
132, 135, 183

Y

yük hücresi · 72, 76, 90, 91, 95

Z

Zemin aktarma düzeneği · viii,
xvii, 68, 69



TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

