

T.C.
İSTANBUL NİŞANTAŞI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÇAPLARDAKİ GÖMÜLÜ BORULARIN
STATİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gizil TAK

Enstitü Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Enstitü Bilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tez Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK
Tez Yardımcı Danışman: Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU

MART 2023

T.C.
İSTANBUL NİŞANTAŞI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÇAPLARDAKİ GÖMÜLÜ BORULARIN
STATİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gizil TAK

ORCID ID: 0000-0003-0160-5266

Enstitü Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Enstitü Bilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

“Bu tez 09/03/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.”

JÜRİ ÜYESİ	KANAATİ	İMZA
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK	Başarılı	
Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU	Başarılı	
Prof. Dr. Tevfik Naci YÜCEFER	Başarılı	
Prof. Dr. Selçuk TOPRAK	Başarılı	

Enstitü Müdürü

Onay

BEYAN

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygu olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

GİZİL TAK

09/03/2023



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca yardım ve tavsiyeleri ile beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Selçuk BİLDİK ve yardımcı danışmanım Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU'na gösterdikleri ilgi ve katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen çok sevgili arkadaşlarım Peter ROGENBUKE ve Baran TULAN'a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 116R020 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansım esnasında her zaman destek olan ve varlığını hissettiren sevgili aileme teşekkür ederim.

GİZİL TAK

09/03/2023

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
BÖLÜM 1: LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
1.1 Giriş.....	2
1.2 Gömülü Borular Üzerinde Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar	3
1.3 Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği ile Yapılan Çalışmalar	11
1.4 Geoteknik Mühendisliğinde Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniğinin Kullanımı	11
BÖLÜM 2: MATERYAL VE YÖNTEM	18
2.1. Giriş.....	18
2.2. Deney Düzenegi	18
2.2.1. Yükleme Çerçevesi	19
2.2.2. Yükleme Sistemi	20
2.2.3. Yük Hücresi	21
2.2.4. Deney Kasası.....	22
2.2.5. Şerit Temel	22
2.2.6. Düşey Deplasman Transduseri.....	24
2.2.7. Model Boru	25
2.2.8. Gerinim Pulları (Strain Gauges).....	26
2.2.9. Fotoğraf Makinesi	29
2.2.10. Kum Zemin	29
2.2.11. Data Kayıt Sistemi	30
2.3. Verilerin Analizinde Kullanılan Programlar	32
2.3.1. LabView Yazılımı	32
2.3.2. Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği (PGHÖ)	33
2.4. Deney Prosedürü	34
BÖLÜM 3: SONUÇLAR.....	40
3.1 Giriş.....	40
3.2 Zemin Sıkılığının Etkisi	42

3.2.1 Zemin Sıkılığının Taşıma Kapasitesine Etkisi.....	42
3.2.2 Zemin Sıkılığının Borudaki Gerilmeye Etkisi	44
3.3. Gömülme Derinliğinin Zeminin Göçme Mekanizmasına Etkisi	47
3.4 Boru Çapının Etkisi.....	53
3.4.1 Boru Çapının Taşıma Kapasitesine Etkisi.....	53
3.4.2 Boru Çapı Etkisinin PIV Yöntemi ile Değerlendirilmesi	55
BÖLÜM 4: TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	66
4.1 Öneriler	68
KAYNAKÇA	69



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
B	: Temel Genişliği
BCR	: Taşıma Kapasitesi Oranı
D	: Boru Çapı
Dr	: Sıkılık Derecesi
FBG	: Fiber Bragg Gating
H	: Boru Gömülme Derinliği
HDPE	: High Density Polyethylene
NI	: National Instruments
PGHÖ	: Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü
PIV	: Particle Image Velocimerty
PVC	: Polivinil klorür
Q	: Yük
q_{boru}	: Borulu Deneylerdeki Temel Taşıma Kapasitesi
q_u	: Borusuz Durumdaki Temel Taşıma Kapasitesi
T	: Model Deney

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Yük Hücresi Özellikleri	21
Tablo 2 Boru Özellikleri.....	25
Tablo 3 Gerinim Pulu Özellikleri	27
Tablo 4 Çerkezköy Kumu Endeks Özellikleri.....	30
Tablo 5 Deney Programı	41



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Esnek Borularda Yük Aktarımı	2
Şekil 2: Rijit Borulardaki Yük Aktarımı	3
Şekil 3: Selig (1993) Deney Düzenegi	5
Şekil 4: Cho ve Vipulunandan (1993) Deney Düzenegi	6
Şekil 5: Won ve Diğerleri (2004) Deney Düzenegi.....	7
Şekil 6: Terzi (2007) Deney Düzenegi	8
Şekil 7: Zemin Yerleşimine Ait Şematik Görünüm	9
Şekil 8: Deney Düzeneginin Önden Görünümü	10
Şekil 9: Ghalehjough ve Diğerleri Deney Düzenegi	12
Şekil 10: Farklı Sıklık ve Dane Boyutundaki PIV Sonuçları	12
Şekil 11: Ansari ve ark. (2021) Deney Düzenegi.....	13
Şekil 12: Yer Değiştirme Vektörleri.....	14
Şekil 13: Deney Düzenegi	15
Şekil 14: PGHÖ Analizleri	16
Şekil 15: Deney Düzeneginin Görünümü.....	19
Şekil 16: Yükleme Çerçevesi.....	20
Şekil 17: Yükleme Sistemi	20
Şekil 18: Yük Hücresi.....	21
Şekil 19: Deney Kasası.....	22
Şekil 20: Şerit Temel	23
Şekil 21: Şerit Temelde Kullanılan Yaylı Sistem.....	24
Şekil 22: Düşey Deplasman Transduseri.....	25
Şekil 23: Farklı Çaplardaki Model Borular	26
Şekil 24: Model Borularda Kullanılan Yaylı Sistem.....	26
Şekil 25: Gerinim Pulları	27
Şekil 26: Gerinim Pullarını Boruya Sabitlemek İçin Kullanılan Yapıştırıcı	28
Şekil 27: Koruma Bandı	28
Şekil 28: Gerinim Pullarının Boru Üzerindeki Yerleşimi	29
Şekil 29: Fotoğraf Makinesi	29
Şekil 30: Deneylerde Kullanılan Kumun Dane Çapı Dağılım Eğrisi.....	30
Şekil 31: NI-9949 Modülü.....	31
Şekil 32: NI-9237 Köprü Modülü Takılı NI-cDAQ-9179 Şasisi	32

Şekil 33: Gerinim Pulları için Kullanılan NI-9944 Modülü.....	32
Şekil 34: LabView Programında Çalışan Örnek Algoritma.....	33
Şekil 35: Gerinim Pullarının Boruya Yerleştirilmesi	35
Şekil 36: Zeminin Hilti ile Sıkıştırılması.....	36
Şekil 37: Borunun Zemine Yerleştirilmesi	36
Şekil 38: Model Temelin Su Terazisi ile Kontrol Edilmesi	37
Şekil 39: Lineer Deplasman Transdüserinin Temelin Üzerinde Konumlandırılması	37
Şekil 40: Deney Düzenegi	38
Şekil 41: LabView Programı ile Verilerin Kaydedilmesi.....	39
Şekil 42: Deney Düzeneginin Şematik Gösterimi	41
Şekil 43: D=50 mm için BCR'ın H/D ile Değişimi.....	43
Şekil 44: D=75 mm için BCR'ın H/D ile Değişimi.....	44
Şekil 45: D=110 mm için BCR'ın H/D ile Değişimi.....	44
Şekil 46: D=50mm Boru Çapında Borudaki Gerilmeler	45
Şekil 47: D=75mm Boru Çapında Borudaki Gerilmeler	46
Şekil 48: D=110mm Boru Çapında Borudaki Gerilmeler	46
Şekil 49: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%35, D=50mm)...	48
Şekil 50: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%65, D=50mm)...	49
Şekil 51: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%35, D=75mm)...	50
Şekil 52: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%65, D=75mm)...	51
Şekil 53: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%35, D=110mm).	52
Şekil 54: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr%65, D=110mm).	53
Şekil 55: Farklı Boru Çapları için BCR'ın H/D ile Değişimi (Dr:%35)	54
Şekil 56: Farklı Boru Çapları için BCR'ın H/D ile Değişimi (Dr:%65)	55
Şekil 57: Dr=%35 için D=50mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1, 2 ve 3)	56
Şekil 58: Dr=%35 için D=75mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1, 2 ve 3)	57
Şekil 59: Dr=%35 için D=110mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1 ve 2)	58
Şekil 60: Dr=%65 için D=50mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1, 2 ve 3)	59
Şekil 61: Dr=%65 için D=75mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1, 2 ve 3)	60

Şekil 62: $Dr=0.65$ için $D=110\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1$ ve 2)	61
Şekil 63: Borusuz Durumda PIV Çıktıları.....	62
Şekil 64: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.35$, $H/D=1$)	62
Şekil 65: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.35$, $H/D=2$)	63
Şekil 66: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.35$, $H/D=3$)	63
Şekil 67: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.65$, $H/D=1$)	64
Şekil 68: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.65$, $H/D=2$)	65
Şekil 69: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=0.65$, $H/D=3$)	65



İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tez Özeti

Tezin Başlığı: Farklı Çaplardaki Gömülü Boruların Statik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi	
Tezin Yazarı: Gizil TAK	Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK
Kabul Tarihi: 09.03.2023	Sayfa Sayısı: 70
Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği	Bilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Geoteknik mühendisliği zeminlerin etkileşim içinde oldukları yapıların davranışını incelemektedir. Gömülü borularda zeminle doğrudan etkileşim içinde olan ve inşaat mühendisliği uygulamaları açısından önemli yapılar arasında yer almaktadır. Özellikle dış yükler altında boru-zemin etkileşimi probleminin doğru anlaşılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada boru-zemin-yapı etkileşimi problemi deneysel olarak araştırılmıştır. Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm (PGHÖ) yöntemi geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan problemlerin araştırılmasında önemli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan model deneylerde, zemindeki göçme mekanizmalarını belirlemek için PGHÖ yöntemi kullanılmıştır. Model deney çalışmalarında, farklı boru çapları, farklı zemin sıkılıkları ve borunun zeminin içerisindeki farklı gömülme derinlikleri gibi birçok değişkenin göçme mekanizmasına etkisi araştırılmıştır. Model deneylerden yük-deplasman eğrileri elde edilmiş olup, aynı zamanda borunun üzerine yerleştirilmiş olan gerinim ölçerler yardımıyla borudaki gerilmeler ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde boru çapı ve gömülme derinliğinin davranışı doğrudan etkilediği görülmüştür.	
Anahtar Kelimeler: PGHÖ Tekniği, gömülü boru, model deney, yüzeysel temel, taşıma kapasitesi	

The Title of Thesis: Investigation of Behaviour of Buried Pipes of Different Diameters Under Static Loads	
Author: Gizil TAK	Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk BİLDİK
Date: 09.03.2023	Nu. of Pages: 70
Department: Civil Engineering	Subfield: Civil Engineering
Geotechnical engineering studies the behaviour of structures with which soils interact. It is among the structures that are in direct interaction with the soil in buried pipes and are important in terms of civil engineering applications. It is very important to understand the pipe-soil interaction problem, especially under external loads. In this study, the pipe-soil-structure interaction problem was investigated experimentally. In recent years, with the development of technology, the Particle Image Velocity Measurement (PIV) method is as an important method in investigating the problems encountered in geotechnical engineering. In the model experiments carried out within the scope of this thesis, the PIV method was used to determine the failure mechanisms in the soil. In model experiment studies, the effects of many variables such as different pipe diameters, soil densities and different burial depths of the pipe on the failure mechanism were investigated. The load-displacement curves were obtained from the model experiments, and the stresses on the pipe were also measured with the help of strain gauges placed on the pipe. When the results were examined, it was seen that the pipe diameter and burial depth directly affected the behaviour.	
Keywords: PIV technique, buried pipe, model experiment, shallow foundation, bearing capacity	

GİRİŞ

Zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği yapılar ve yapıların etkileşim içinde olduğu zeminlerin davranışını statik ve dinamik yükler altında incelemektedir. Herhangi bir yapı, yapısal yeterlilik açısından ne kadar iyi tasarlansa da etkileşim içinde bulunduğu zeminin davranışı söz konusu yapının yapısal yeterliliğini doğrudan etkilemektedir. Geoteknik mühendisliğinin araştırdığı önemli yapılardan biri de gömülü sistemlerdir. Gömülü sistemler bazen metro hatları, bazen petrol, su ve gaz gibi maddelerin taşınmasında kullanılan boru sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Özellikle gömülü yapılar zemin içinde inşa edildikleri için, bulundukları zemin ortamıyla doğrudan etkileşim içindedirler. Bu açıdan değerlendirildiğinde gömülü yapıların davranışı doğrudan zemin davranışıyla ilişkilidir. Bazı özel koşullarda gömülü borular aynı zamanda dış yükler etkisinde de kalmaktadırlar. Dolayısıyla gömülü boruların hem zemin davranışı hem dış yükler etkisi altında incelenmesi özel bir geoteknik problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hızlanmasıyla birlikte geoteknik mühendisliğinde yeni yöntemlerle zemin davranışları incelenebilmektedir. Özellikle İnşaat Mühendisliği'nin hidrolik anabilim dalında geçmişte sıkça kullanılan Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü-PGHÖ (PIV) yöntemi günümüzde geoteknik problemlerde de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında PGHÖ (PIV) yöntemi kullanılarak dış yükler altındaki gömülü boruların davranışı model deneyler yardımıyla araştırılmıştır. Kum zeminlerde dış yükler altında borunun zemin içindeki konumunun (gömülme derinliği), boru çapının ve zemin sıkılığının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada PGHÖ yöntemi ile zemin içinde oluşan göçme yüzeyleri belirlenmiş olup ayrıca boru üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla dış yükler altında gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde zemin sıkılığı ve borunu gömülme derinliğinin davranışı önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

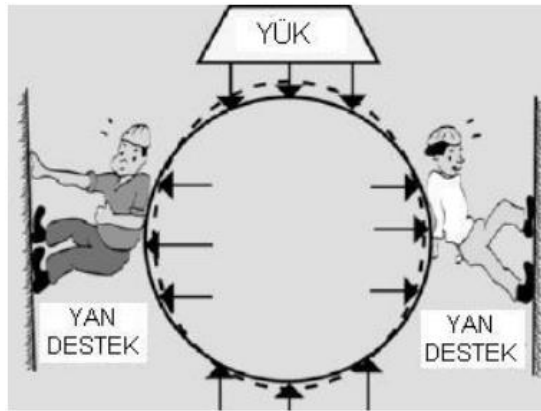
BÖLÜM 1: LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Giriş

Gömülü boru sistemleri günümüzde birçok farklı amaçla kullanılmakta olup, kullanılan boru tipi proje ihtiyacına göre belirlenmektedir. Gömülü borular zemin içinde inşa edildiği için, içinde bulundukları zeminin davranışı borunun davranışını da doğrudan etkilemektedir. Ayrıca zemine etkiyen dış yükler nedeniyle boru-zemin-yapı etkileşimin birlikte ele alınması önem arz etmektedir.

Gömülü boruların davranışını belirleyen en önemli faktörler zemin parametreleri ile borunun malzeme özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Gömülü boru sistemlerinde boru tipi projeye özel olarak projenin amaçlarına göre farklı mukavemete sahip borular kullanılabilir. Tasarımda boru tipi seçilirken servis ömrü, bağlanma kolaylığı, korozyon dayanımı, rijitlik ve esneklik gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Borular genel olarak rijit ve esnek olarak iki farklı başlık altında incelenebilmektedir.

Esnek borulara etkiyen düşey yükler borunun düşey doğrultudaki çapını kısaltırken yatay doğrultuda çapın artmasına neden olmaktadır. Gömülü boru sistemlerinde düşey yükten kaynaklı yatay doğrultudaki çap artışı yatay düzlemdeki zeminin boruyu desteklemesine neden olmaktadır. Yatay ve düşey doğrultulardaki basıncın birbirine yakın olması durumunda boru çeperindeki gerilmeler büyük derinliklerde burkulmaya neden olurlar. (Moser, 2001)

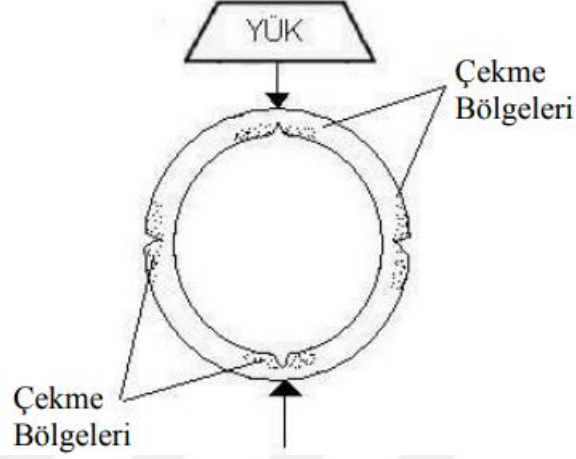


Şekil 1: Esnek Borularda Yük Aktarımı

Kaynak: Moser (2001)

Esnek borulardan farklı olarak, rijit borulara etkiyen düşey yükler sonucunda yatayda bir tepki kuvveti oluşmadığı ya da oluşan kuvvetin ihmal edilebilir olduğu kabul

edilmektedir. Bu gibi durumlarda rijit boruya etkiyen düşey yük boru tarafından taşınır, çünkü borunun, kendi etrafındaki zeminden daha rijit olduğu kabul edilmektedir. Rijit boruya etkiyen düşey yüklerin bir kısmı boru tarafından taşınırken bir kısmı boru zeminine iletilmektedir.



Şekil 2: Rijit Borulardaki Yük Aktarımı

Kaynak: Howard (1996)

Genel olarak rijit ve esnek olarak sınıflandırılan boru tiplerine etkiyen yükler altında birbirlerinden farklı davranış gösterdikleri yukarıda açıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla farklı tipteki boru malzemelerinin farklı tasarım parametrelerine sahip olması gerektiği bilinmeli ve tasarım yapılırken bu kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıdaki bölümde boru davranışı ile ilgili yapılmış teorik ve deneysel literatür çalışmaları özetlenmektedir.

1.2 Gömülü Borular Üzerinde Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar

Zemin içine gömülü boru sistemleri farklı problem türleri ile karşımıza çıkmaktadır. Gömülü borular üzerine yapılan ilk çalışmalarda, genellikle boruya etki eden yüklerin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. 1913 yılında Marston ile başlayan çalışmaları 1941’de Spangler’in yaptığı çalışma takip etmiştir. Burns ve Richard (1964), Hoeg (1966), McGrath (1998) tarafından yapılan çalışmalarda zemin-boru etkileşimi problemlerinin elastik çözümleri üzerinde durulmuştur. Teorik çalışmaların yanı sıra Selig (1993), Cho ve Vipulunandan (2003), Won ve diğerleri (2004), Terzi (2007), Tafreshi ve Khalaj (2011), Ono ve diğerleri (2018) ve Elshesheny ve diğerleri (2019), gibi birçok araştırmacı deneysel çalışmalar ile gömülü boruların davranışını deneysel

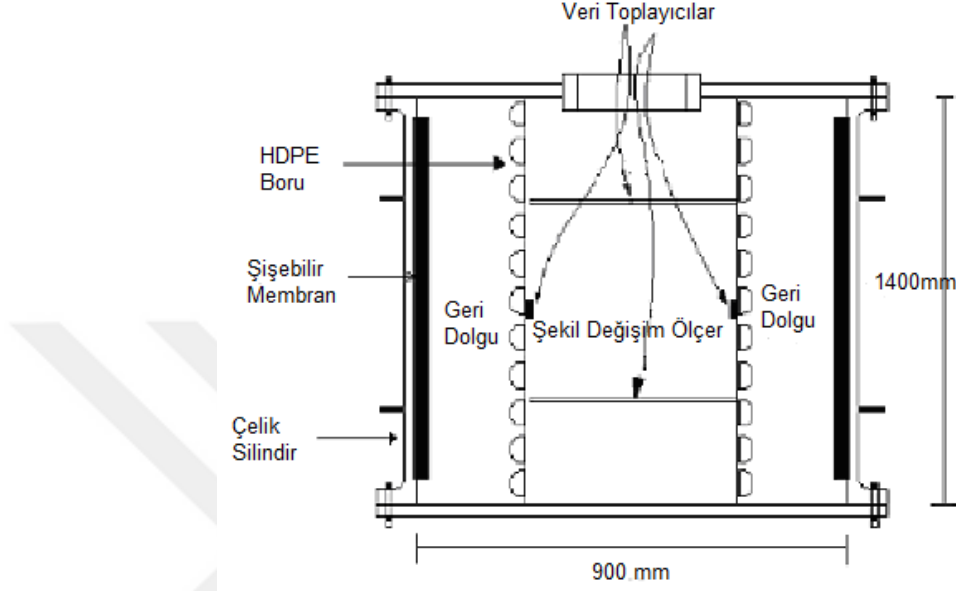
olarak incelemişlerdir. Aynı zamanda Ghalehjough ve diğerleri (2018), Ansari ve diğerleri (2021), Wu ve diğerleri (2021), Wang ve diğerleri (2021) ve Yu ve diğerleri (2021) gibi araştırmacılar gömülü boruların davranışını Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği (PGHÖ) yöntemini kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Gömülü borular üzerine bilinen ilk çalışma Marston tarafından 1913 yılında yapılmıştır. “Marston Yük Teorisi” olarak bilinen bu çalışma, hendek içerisinde yer alan boruya, zemin prizması tarafından yük aktarıldığı düşünülerek geliştirilmiştir. Bu teoride, hendek içerisindeki geri dolgu ile doğal zemin arasında oluşan oturmalar sonucu ara yüzeylerdeki oturma farklılıklarının boru tacında meydana gelecek yükleri belirlemede en etkili parametre olduğu öne sürülmüştür. Marston bu teoride kohezyonun oluşması için uzun zaman geçmesi ve kohezyonsuz durumun daha büyük yüklere neden olması sebebiyle kohezyonun ihmal edilebileceğini varsaymıştır. Ayrıca zeminin birim hacim ağırlığının ve sürtünme özelliklerinin hendek boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir (Moser, 2008; Spangler, 1966; Jeyapalan ve Hamida, 1988; Ayalp, 2006). Marston tarafından 1913 yılında geliştirilen yük teorisi, dökme türü üretilen ve tamamen rijit davranış gösteren borular için geliştirilmiştir. Bu yöntemin en büyük eksikliği deformasyon büyüklüğünün belirlenememesidir.

Marston tarafından rijit dökme türü üretilen rijit davranış gösteren borular için 1913 yılında yapılan çalışmadan sonra gömülü esnek borular ile ilgili yapılan ilk çalışma Spangler tarafından 1941 yılında yapılmıştır. Bu çalışmada Spangler yük altında şekil değiştiren bir borunun yanal deformasyon oranının zemin ve boru rijitlikleri ile birlikte belirlendiğini öne sürmüştür. “Iowa Eşitliği” olarak bilinen bu teoremden Spangler “a) boruya etki eden dış yükler Marston Yük Teorisi’ne göre belirlenir ve yükler boru kesitine üniform olarak etki eder, b) boru tabanında meydana gelen tepki boru üzerindeki yüke eşit olup yataklama düzlemi boyunca oluşan yük üniform dağılmaktadır.” kabulleri ile bu yöntemi geliştirmiştir. Zemin tarafından boruya uygulanan pasif basınç dağılımı, 100°’lik bir açı ile oluştuğu kabul edilmiştir. Bu teoride geri dolgu malzemesinin yerleştirilme koşulları ve yöntemleri göz önüne alınmamış, borunun eksenel rijitliği ihmal edilmiştir.

Selig (1993), gerçekleştirdiği laboratuvar deneyleri ile gömülü boruların davranışını incelemiştir. Deney düzeneğinde esnek bir boru merkeze sabitlenmiş olup, çevresine

farklı sıklıklardaki geri dolgu malzemesi yerleştirilmiştir ve membranlar ile çembersel yük aktarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Boru üzerine yapıştırılmış olan şekil değişim ölçerler ve deplasman ölçerler yardımıyla boruda oluşan çembersel gerilme ve şekil değiştirmeleri belirlenmiştir.



Şekil 3: Selig (1993) Deney Düzeneği

Kaynak: Selig (1993)

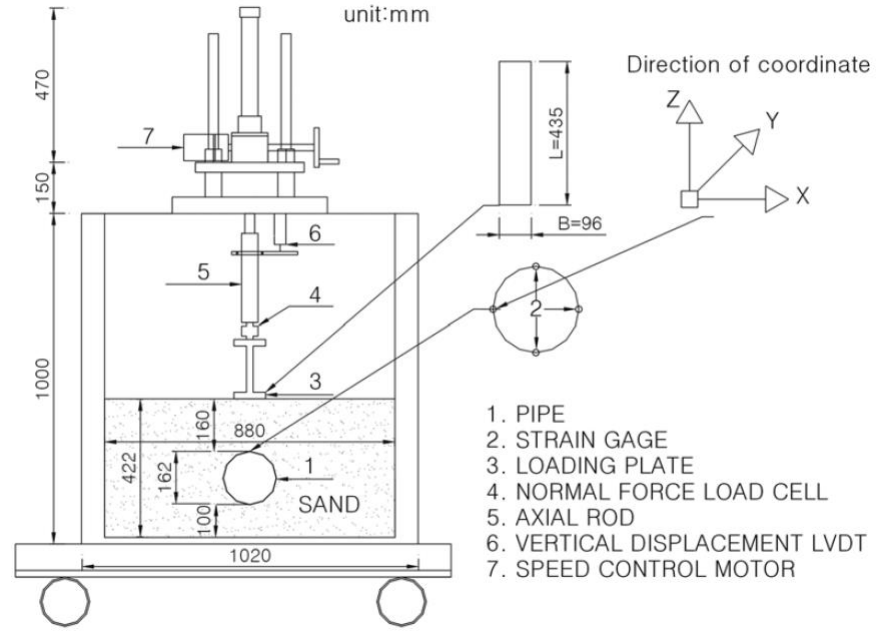
Cho ve Vipulunandan (2003), PVC boruların davranışını incelemek amacıyla model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan model deneylerde PVC boru bir hendek içerisine yerleştirilmiştir. Deneylerde 1000x400x900 mm ve 800x600x400 mm ölçülerindeki iki farklı deney kasası kullanmışlardır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmektedir. 400 kPa'lık düşey yükleme altında PVC boruların uzun süreli davranışını inceleyerek, Geliştirilmiş Iowa Eşitliği ve Watkins (1958)'in önerdiği zaman faktörünün uzun süreli davranışa ne ölçüde uyduğunu karşılaştırmışlardır.



Şekil 4: Cho ve Vipulunandan (1993) Deney Düzeneği

Kaynak: Cho ve Vipulunandan (2003)

Won ve ark., (2004:379) güçlendirilmiş zeminde PVC boruların deformasyonlarını incelemek amacıyla model deneyler yapmışlardır. Deneyleri 880x450x980 mm ölçülerindeki deney kasasında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 5’te sunulmaktadır. Deneylerde zeminin güçlendirmesi amacıyla iki farklı tip geogrid kullanmışlardır. Deney esnasında borudaki gerilmeleri ölçebilmek için boru üzerine dört adet gerinim pulu yerleştirmişlerdir. Deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre, tek geogrid kullanılması durumunun taşıma gücünün önemli derecede artmakta ve borudaki deformasyonlar önemli ölçüde azalmaktadır. İki sıradan daha fazla geogrid kullanılması durumunda taşıma kapasitesinde daha fazla artış gözlenmemiştir. Borunun gömülme derinliğinin azalması durumunda borunun deformasyonuna karşı geogrid etkisinin, gömülme derinliğinin arttığı durumdan daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 5: Won ve Diğerleri (2004) Deney Düzeneği

Kaynak: Won ve diğerleri, (2004. s.379)

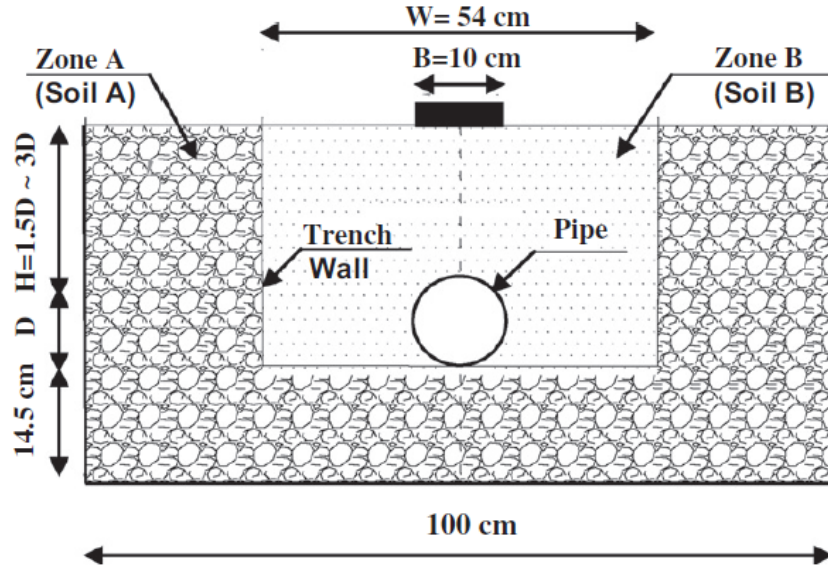
Terzi, (2007:2) kasa boyutları 700 x 500 x 700 mm olan deney kasasında 200, 242 ve 312 mm çapındaki boruların düşey yükler altındaki davranışını araştırmıştır. Çalışma kapsamında model deneylerle geri dolgu malzemesinin sıkılığının davranışa etkisi incelenmiştir. Ayrıca fotogrametrik analizler yardımıyla deformasyon biçimleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda yapılan model deneylerin sonlu elemanlar analizleri ve Iowa eşitliği ile örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 6: Terzi (2007) Deney Düzeneği

Kaynak: Terzi (2007. s.55)

Tafreshi ve Khalaj (2011:1) araç yükleri altındaki HDPE boruların davranışını laboratuvar deneyleri yardımıyla araştırmışlardır. Deneylerde 110 mm çapında borular farklı gömülme derinliklerinde tekrarlı yükler altında kullanılmıştır. Deneylerde Şekil 7’de görüleceği üzere iki tip zemin kullanmışlardır. Burada A zemini (tabii zemin) kompaksiyon metoduyla yerleştirilirken, B zemini (hendek dolgusu), yağmurlama yöntemi ile rölatif sıkılığı %42, %57 ve %72 olacak şekilde deney kasasına yerleştirilmiştir. Tekrarlı yükleme sonucunda zemindeki oturmaların ve boru deformasyonlarının önemli bir kısmının ilk yükleme sonucunda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca rölatif sıkılığın artması durumunda borudaki gerilme değeri ve zemin yüzeyindeki oturma azalırken, borunun gömülme derinliğinin artması durumunda yüzey gerilmesini arttığı ve borudaki gerilme değerinin azaldığı sonucuna varmışlardır.



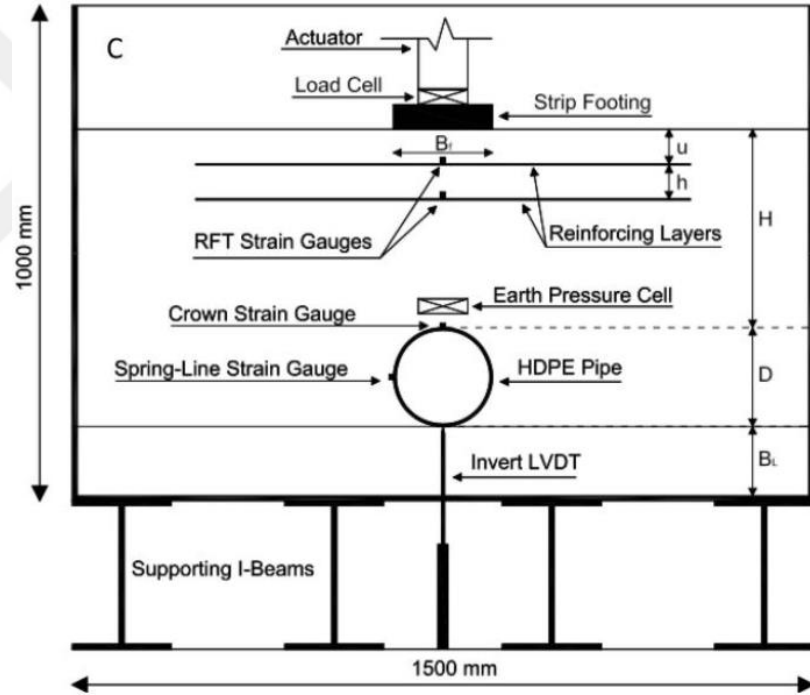
Şekil 7: Zemin Yerleşimine Ait Şematik Görünüm

Kaynak: Tafreshi ve Khalaj (2011. s.3)

Ono ve ark. (2018:1-8), farklı efektif gerilmelerde doymuş kum zeminde zemin-boru etkileşimini araştırmak için model deneyler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, taşıma gücü faktörlerinin, zemin birim hacim ağırlık-boşluk suyu basınç oranının, boru çapının ve uzunluğunun etkileri araştırılmıştır. Deneylerde, boşluk suyu basıncı oranı 0,8'i aştığında borudaki deplasman değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Model deneylerinde boruya uygulanan yanal yükleme sonuçlarına göre efektif gerilme etkisi dikkate alınarak bir kuvvet-yer değiştirme eğrisi formüle edilmiştir.

Elsesheny ve ark., (2019:9-32) artan çevrimsel yükleme altında, donatılı ve donatısız zeminlerde, polietilen (HDPE) boruların davranışını araştırmak amacıyla laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Deneyler 1500x1000x1000 mm boyutlarında bir kasada gerçekleştirilmiştir. Deneylerde zemin güçlendirme amacıyla 300 MPa elastisite modülüne sahip bir geogrid kullanmışlardır. Deneyler farklı fazlardaki çevrimsel yüklemeler ile gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel yükleme genliğini, monotonik yüklemenin %20-30'u aralığında olacak şekilde seçmişlerdir. Yapılan deneylerde borunun gömülme derinliği ve kullanılan donatı sayısının sisteme etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1- Maksimum oturma ve gerinim ilk yükleme aşamasında gerçekleşmiş, daha sonraki yükleme aşamalarında oturma ve şekil değiştirme değerleri önemli ölçüde azalmıştır.
- 2- Borunun gömülme derinliğinin artması gerilme ve deformasyonun azalmasına katkı sağlamıştır.
- 3- Donatılı durum, gerilme ve deformasyonları önemli ölçüde azaltırken, sistemin ek yükleme aşamalarına devam edebilmesine olanak sağlamıştır.
- 4- Tek donatılı durumda temeldeki oturma %30 ila %50 oranında azalırken, borunun deformasyonu ve borudaki gerilme değerleri de benzer şekilde azalmıştır.
- 5- Gerilme ölçümünün, gömülme derinliği ve yük değerinden bağımsız olarak, alt donatı tabakasında her zaman üst donatı tabakasında kaydedilenden daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 8: Deney Düzenekinin Önden Görünümü

Kaynak: Elshesheny ve diğerleri, (2019. s.47)

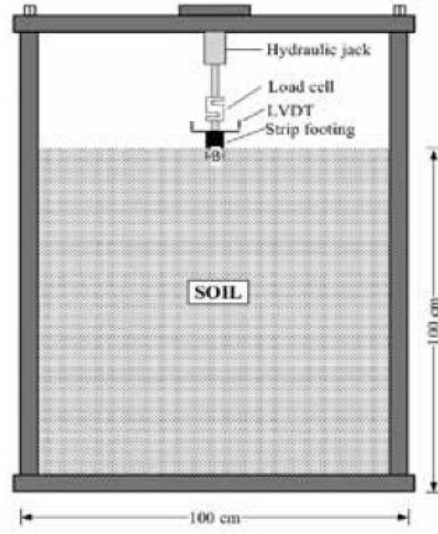
1.3 Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği ile Yapılan Çalışmalar

Parçacık görüntülü hız ölçüm tekniği ilk olarak Grant (1997) tarafından iki boyutlu bir ışık levhası ile aydınlatılmış bir bölge boyunca bir sıvının hızının eş zamanlı olarak ölçülmesi olarak tanımlanır. White ve ark. (2003) ince daneli zeminlerin hareketini Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği ile ölçmek amacıyla çalışmalar yapmıştır. Staniner ve ark. (2015) PGHÖ tekniğini geliştirilerek elde ettikleri sonuçlarda ölçümlerin on kata yakın iyileştirme sağladığını belirtmişlerdir. Duan ve ark. (2019) parçacık görüntülü hız ölçümü ölçüm tekniğinin şev problemleri, kazıklı sistemler gibi zemin deformasyonlarının ölçümü problemlerinde kullanılabileceğini belirtmektedirler.

Staniner ve ark. (2015), MATLAB tabanlı bir analiz yöntemi olan GeoPIV RG programını geliştirmişlerdir. Bu program deney başlangıcında çekilen bir referans fotoğrafı ağlara bölmektedir. Program referans fotoğraf ve bir sonraki fotoğrafa ait her ağın arasındaki mesafeleri hesaplayarak çalışmaktadır. Ağ boyutları kullanıcı tarafından belirlenerek, GeoPIV RG analizi başlatılmadan önce referans fotoğraf kullanılarak bir ilgi bölgesi oluşturulmaktadır. Analiz bu ilgi bölgesinde yapılmakta olup, ağ boyutu arttıkça çözünürlük düşerken, hesaplama süresi azalmaktadır. Bu durumda uygun ağ boyutu seçimine dikkat edilmelidir. Aşağıdaki bölümde literatürde geoteknik mühendisliğinde parçacık görüntülü hız ölçüm tekniğinin kullanımı ile ilgili çalışmalar açıklanmaktadır.

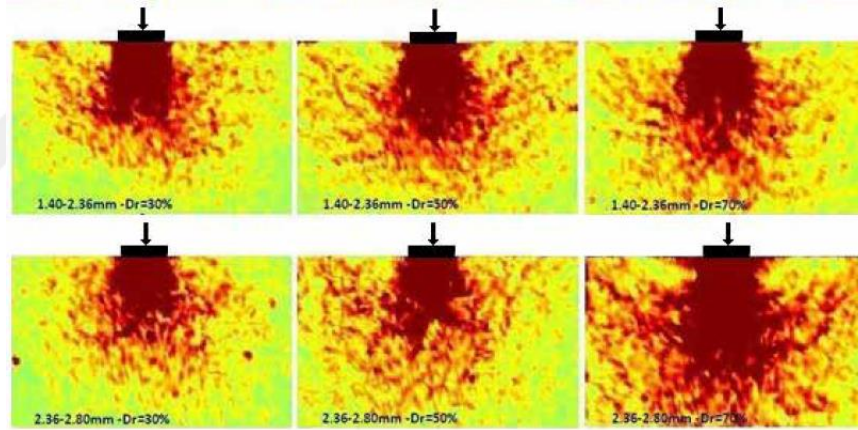
1.4 Geoteknik Mühendisliğinde Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniğinin Kullanımı

Ghalehjough ve ark., (2018:43) zemin danelerinin yuvarlaklığının ve morfolojisinin kayma mekanizmasına etkisini görmek amacıyla köşeli, yuvarlak ve çok yuvarlak daneli zeminlerde, %30, %50 ve %70 rölatif sıklıkta model deneyler yapmışlardır. Deneyler esnasında çekilen fotoğrafları zemindeki deformasyonu görselleştirmek adına PGHÖ yöntemi ile analiz etmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda dane boyutunun ve rölatif sıklığın artması durumunda zemindeki deformasyon alanının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9: Ghalehjough ve Diğerleri Deney Düzenegi

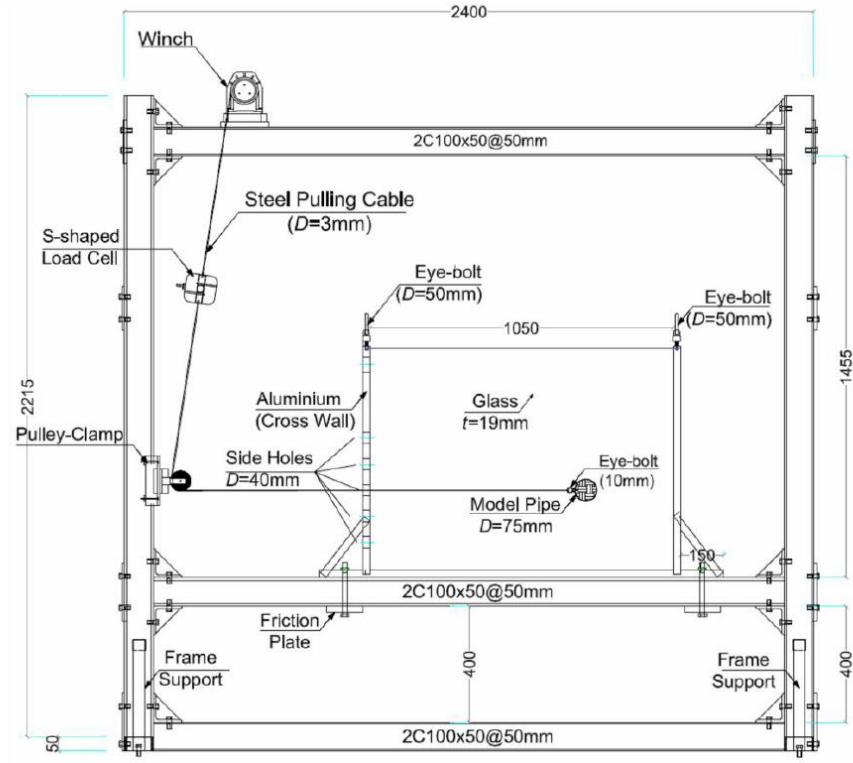
Kaynak: Ghalehjough ve diğerleri, (2018. s.46)



Şekil 10: Farklı Sıkılık ve Dane Boyutundaki PIV Sonuçları

Kaynak: Ghalehjough ve diğerleri, (2018. s.48)

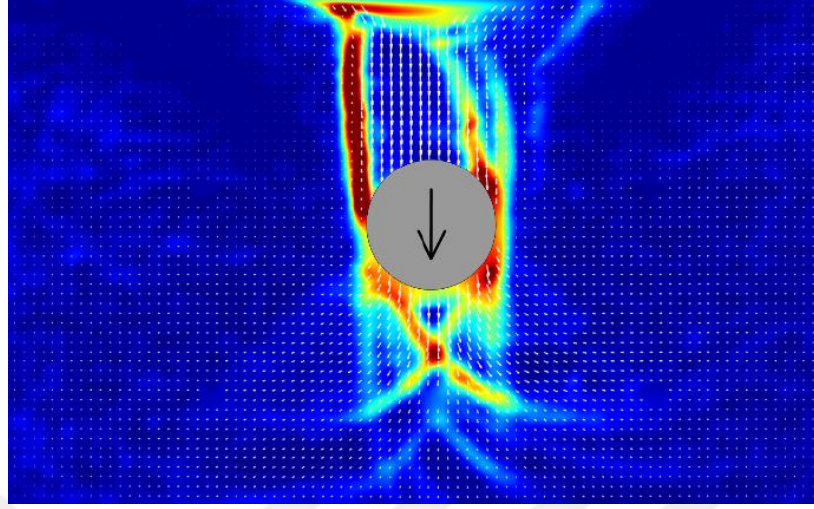
Ansari ve ark. (2021:1), yanal zemin-boru etkileşimini gözlemlemek için farklı yoğunluktaki kum zeminler üzerinde model deneyler gerçekleştirmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 11’de sunulmaktadır. Zeminde oluşan yenilme yüzeylerini belirlemek için PGHÖ analizleri yapılmıştır. Boru gömülme derinliğinin sıg olduğu deneylerde, kum yoğunluğu arttıkça reaksiyon kuvvetinin arttığını, borunun tepesindeki yer değiştirmenin azaldığı görülmüştür.



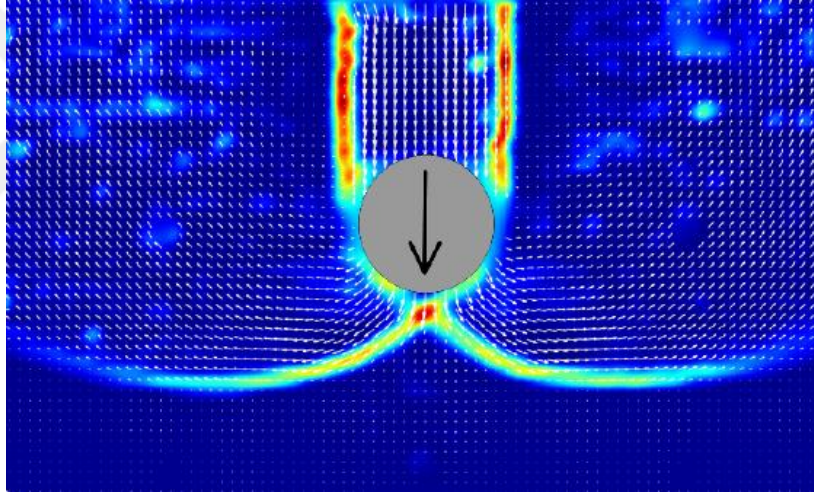
Şekil 11: Ansari ve ark. (2021) Deney Düzeneği

Kaynak: Ansari ve ark. (2021. s.24)

Wu ve ark., (2021:1) kuma gömülü rijit bir borunun dikey yönde harekete maruz kaldığı durumdaki tepkisini ölçmek adına farklı gömülme derinliklerinde ($H/D=1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$) model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Gevşek, orta sıkı ve çok sıkı kumda yapılan model deneyleri PGHÖ tekniği yardımıyla analiz etmişlerdir. PGHÖ analiz sonuçları Şekil 12’de verilmektedir. PGHÖ sonuçları incelendiğinde sıkı kumda yapılan deneylerde daha büyük yer değiştirmelerin olduğu görülmektedir.



a) Orta Sıkı Kumda Yerdeğiştirme Vektörleri



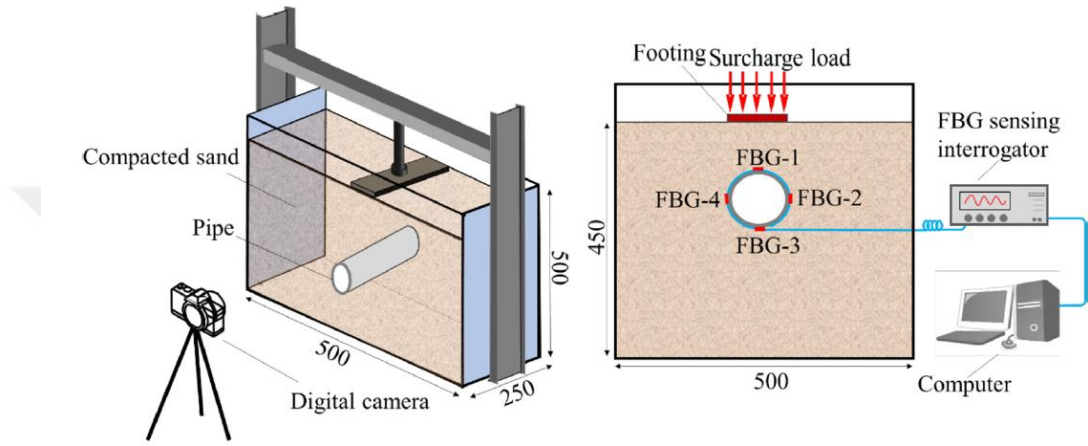
b) Sıkı Kumda Yerdeğiştirme Vektörleri

Şekil 12: Yer Değiştirme Vektörleri

Kaynak: Wu ve diğerleri, (2021. s.12)

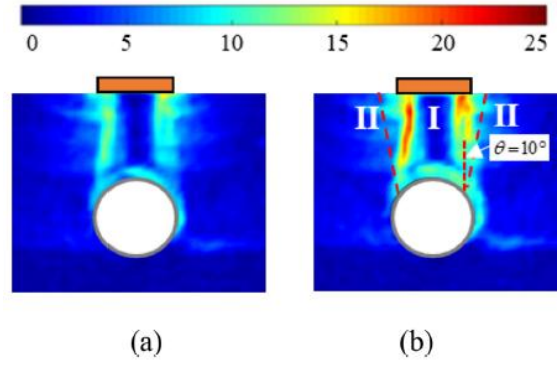
Wang ve ark. (2021:1), gömülü boruların dış yükler altındaki davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan çalışmada borunun yük altındaki davranışını belirlemek amacıyla FBG (fiber bragg gating) sensörleri kullanmışlardır. Aynı zamanda deney esnasında zeminde oluşacak kayma-şekil değiştirme davranışlarını gözlemlemek için parçacık görüntülü hız ölçüm tekniği analizleri yapmışlardır. Wang ve ark. (2021:4)'nın çalıştığı deney düzeneği Şekil 13'te verilmiştir. FBG sensörleri ile yapılan ölçümler borunun yük

altındaki deformasyon davranışının gömülme derinliğine bağlı olduğunu görmüşlerdir. Çalışmaları sonucunda oluşan yenilme yüzeylerinin logaritmik spiral, lineer ve logaritmik olmak üzere üç şekilde oluşabileceğini belirlemişlerdir. Oluşacak kırılma şeklinin boru gömme derinliği ve yük genişliği ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, borunun gömme derinliğinin artmasıyla borunun kırılma yüzeyinin logaritmik bir spiralden lineer veya logaritmik bir şekle dönüştüğünü göstermiştir.

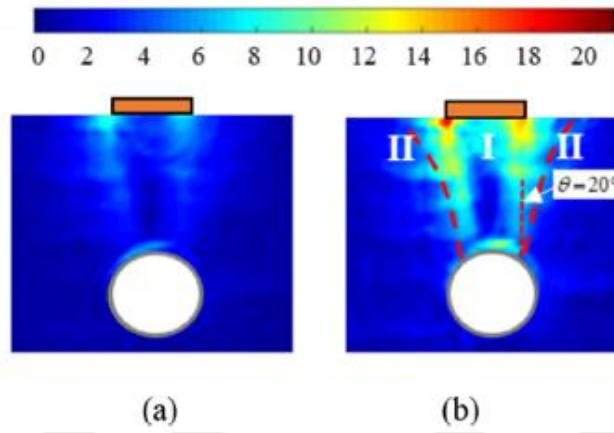


Şekil 13: Deney Düzenegi

Kaynak: Wang ve ark. (2021. s.4)



a) $H/D=1.5$ Durumunda Farklı Oturmalarla Kesme Gerilmeleri (a:5mm, b:10mm)



b) $H/D=2.0$ Durumunda Farklı Oturmalarla Kesme Gerilmeleri (a:5mm, b:10mm)

Şekil 14: PGHÖ Analizleri

Kaynak: Wang ve ark. (2021. s.5)

Yu ve ark. (2021:1-14), boru yüzey pürüzlülüğü, yük eğim açısı ve gömme derinliğinin gömülü boruların davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla PGHÖ tekniği kullanılarak 24 model deney yapılmıştır. Borunun kapasitesinin bir ölçüsü olan kopma faktörünün, boruya etkiyen yükün ve boru gömme derinliğinin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Yüzeysel derinliklerde gömülü borularda genel yenilme mekanizması gözlenirken, daha derinlere gömülü borularda yenilme örüntüsünün lokal olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda boru davranışı incelenirken genellikle borunun konumu ve zeminin güçlendirilmesi durumu göz önüne alınmış, değişken çaptaki boruların yüzeysel bir temel altında yüklenmesi durumunda boru davranışı ve zemin davranışı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca boru çapı ve gömülme derinliğinin boru-

zemin-temel ilişkisini Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm analizi ile inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada üç farklı çaptaki gömülü borunun davranışı ve boru-zemin-temel ilişkisi farklı zemin sıklıklarında deneysel olarak incelenerek boru çapındaki değişimin temelin taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Farklı boru çapları, farklı gömülme derinlikleri kombinasyonları yapılarak çap etkisi araştırılırken bir yandan da borunun gömülme derinliğinin taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Yapılan kombinasyonlar iki farklı zemin sıklığında (Dr: %35 ve Dr: %65) incelenerek zeminin sıklığının değiştiği durumda boru davranışları incelenmiştir. Boru üzerindeki gerilmeler, temelde oluşan deplasmanlar ve temele aktarılan düşey yük ölçülerek analizler yapılmıştır. Ayrıca düşey yükleme esnasında fotoğraf makinesi yardımı ile çekilen ardışık fotoğraflar Matlab tabanlı GeoPIV RG kodu kullanılarak analiz edilmiş, bu sayede zeminde oluşan deplasmanlar incelenmiştir.

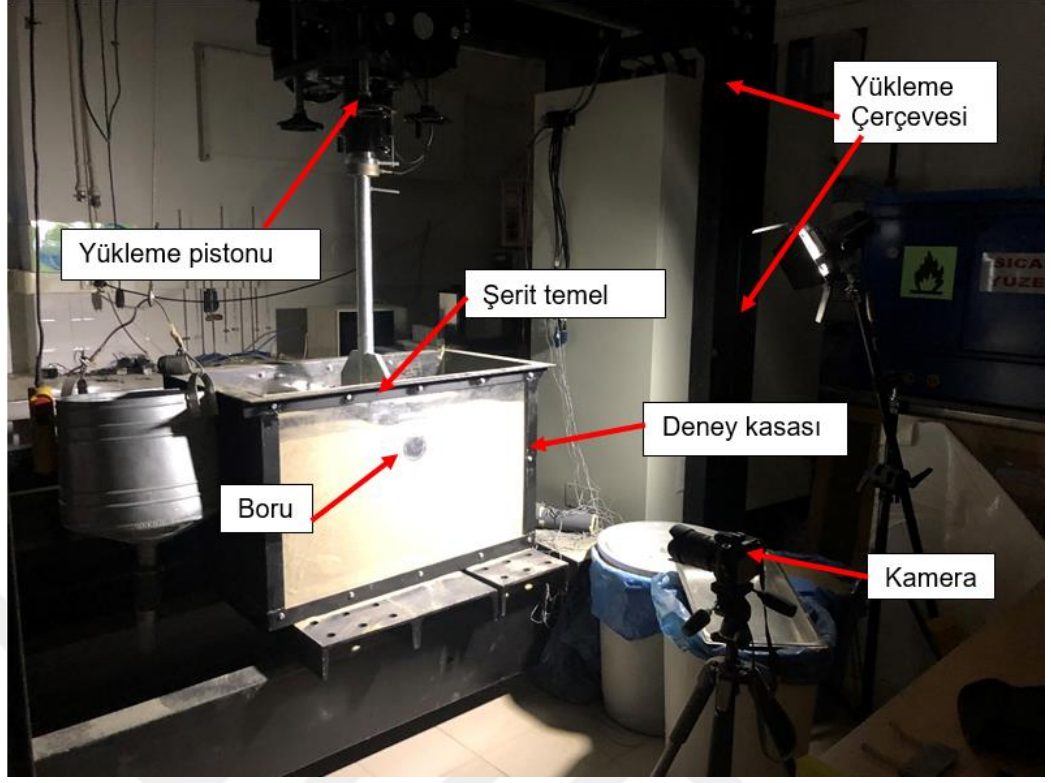
BÖLÜM 2: MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Giriş

Bu araştırmada gömülü boruların davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar TÜBİTAK 116R020 numaralı proje kapsamında Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında kurulan özel yükleme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde boru çapının boru-zemin-yapı etkileşimi problemine etkisi ve borunun gömülme derinliğinin değişmesi durumunda zeminde oluşacak göçme mekanizmalarının değişimi farklı zemin sıklıklarında araştırılmıştır. Deneyler esnasında çekilen fotoğraflar ile Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği (PGHÖ) analizleri yapılarak zeminde meydana gelen yer değiştirmeler belirlenmiştir. Yapılan araştırma, deneylerin gerçekleştirilmesi ve deney esnasında elde edilen verilerin analiz edilmesi olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde deney düzeneği, kullanılan ölçüm aletleri, deney verilerini gözlemleyebilmek ve kaydedebilmek amacıyla kullanılan program ve sistemler açıklanmış olup, ardından araştırmanın ikinci aşamasında Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği ile verilerin nasıl analiz edildiği açıklanmıştır. Bölüm sonunda ise deney düzeneğinin hazır hale getirilmesi, deney esnasında ve sonrasında yapılan işlemlerin aşamaları anlatılmaktadır.

2.2. Deney Düzeneği

Deneysel çalışmalar için oluşturulan deney düzeneği düşey yönde yükleme yapabilmektedir. Deney düzeneği yükleme çerçevesi, yükleme sistemi, deney kasası, veri kayıt sistemi ve kameradan oluşmaktadır. Deney düzeneğine ait görünüm Şekil 15'te verilmekte olup kullanılan bütün materyaller sırasıyla açıklanmaktadır.



Şekil 15: Deney Düzenəğinin Görünümü

2.2.1. Yüklem Çerçevesi

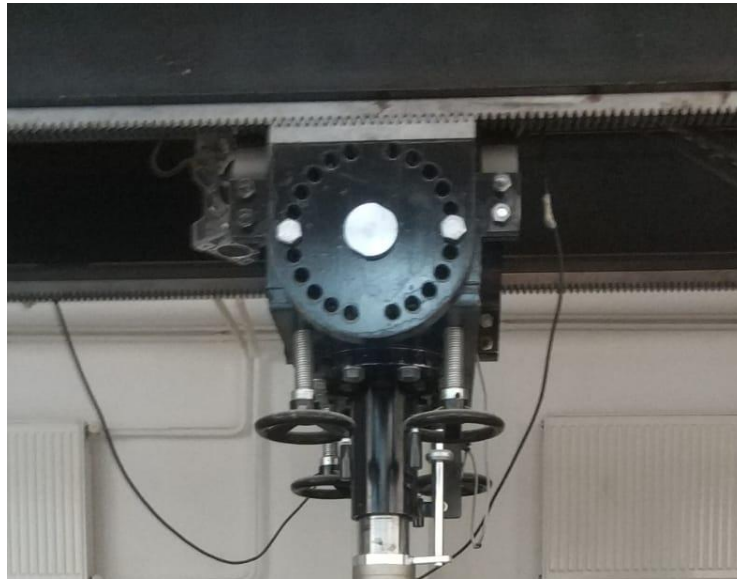
Yüklem çerçevesi deney düzenəğı için çelik malzemeden özel olarak imal edilmiştir. Üzerinde düşey yönde yüklem yapabilen bir yüklem sistemi bulunduran çerçevenin ölçüleri 200x300x70 cm olmakla birlikte, çerçeve 20 ton kapasiteye sahiptir ve tam kapasite durumunda 5 mm sehim yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Yüklem çerçevesine ait görünüm Şekil 16’da verilmektedir.



Şekil 16: Yüklem Çerçevesi

2.2.2. Yüklem Sistemi

Deneyler esnasında model deneyin düşeyde çekme ve basınç yönünde hareket ederek yük aktarımını sağlayan, 20 ton kapasiteli, basma ve çekmede 100 mm stroklu piston kullanılmıştır. Yükün aktarılmasında yüklem çerçevesinden reaksiyon alması sağlanmış ve çerçeveye monte edilmiştir. Yüklem sistemi Şekil 17’de gösterilmektedir.



Şekil 17: Yüklem Sistemi

2.2.3. Yük Hücresi

Deneyler esnasında, yükleme sisteminden Şerit temele aktarılan yükü ölçmek amacıyla CAS firması tarafından üretilen 2 ton kapasiteli S Tipi bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi kalibrasyonu yükleme sisteminin üzerine farklı yükler uygulanarak yapılmış ve LabView programı üzerindeki yük hücresi arayüzünden kontrolü sağlanmıştır. Kullanılan S tipi yük hücresi Şekil 18’de, yk hücresine ait zellikler Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1
Yük Hücresi zellikleri

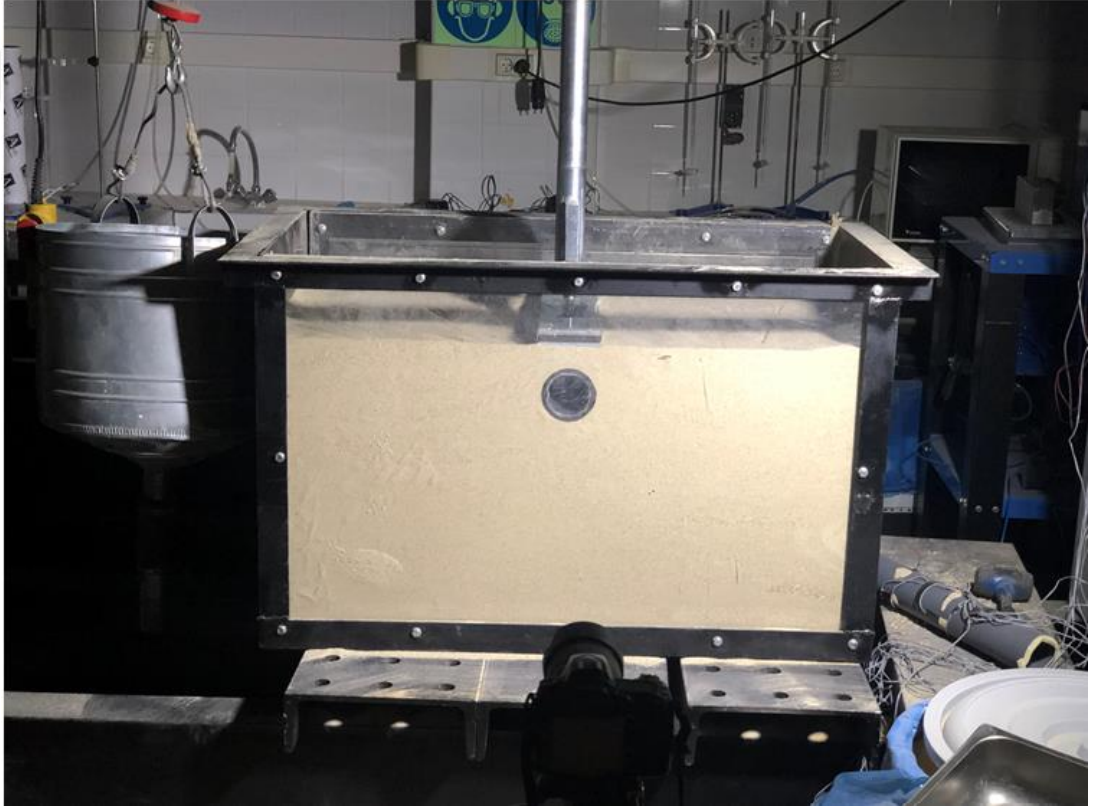
Özellik	Değer
Hassasiyet Sınıfı	C3
Kapasite (kg)	2000
Giriş Direnci (Ω)	400 ± 3.5
ıkıŐ Direnci (Ω)	350 ± 3.5
İsolasyon Direnci ($M\Omega$)	≥ 2000
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	$-30\sim +80$
Önerilen Eksitasyon (V (DC))	10
Maksimum Eksitasyon (V (DC))	15
AŐırı Yük Kapasitesi (%)	150



Şekil 18: Yük Hücresi

2.2.4. Deney Kasası

Deneyler, ölçüleri 100cm x 50cm x 65cm (uzunluk x genişlik x yükseklik) olan rijit bir kasada gerçekleştirilmiştir. Deney kasasının alt ve yan yüzeyleri çelikten yapılmıştır. Ön ve arka yüzeyine kasasının içerisini görüntüleyebilmek ve deney sırasında oluşacak deplasmanları izlemek amacıyla 10mm kalınlığında plexiglasslar yerleştirilip sabitlenmiştir. Arka yüzdeki plexiglass deneyin hazırlanması esnasında yardımcı olması adına 5cm yüksekliğinde katmanlara bölünmüştür. Bu sayede 5cm yüksekliğe konulması gereken kum miktarı kilogram-hacim ilişkisi ile hesaplanmıştır. Deney kasasına ait görüntü Şekil 19'da verilmektedir.



Şekil 19: Deney Kasası

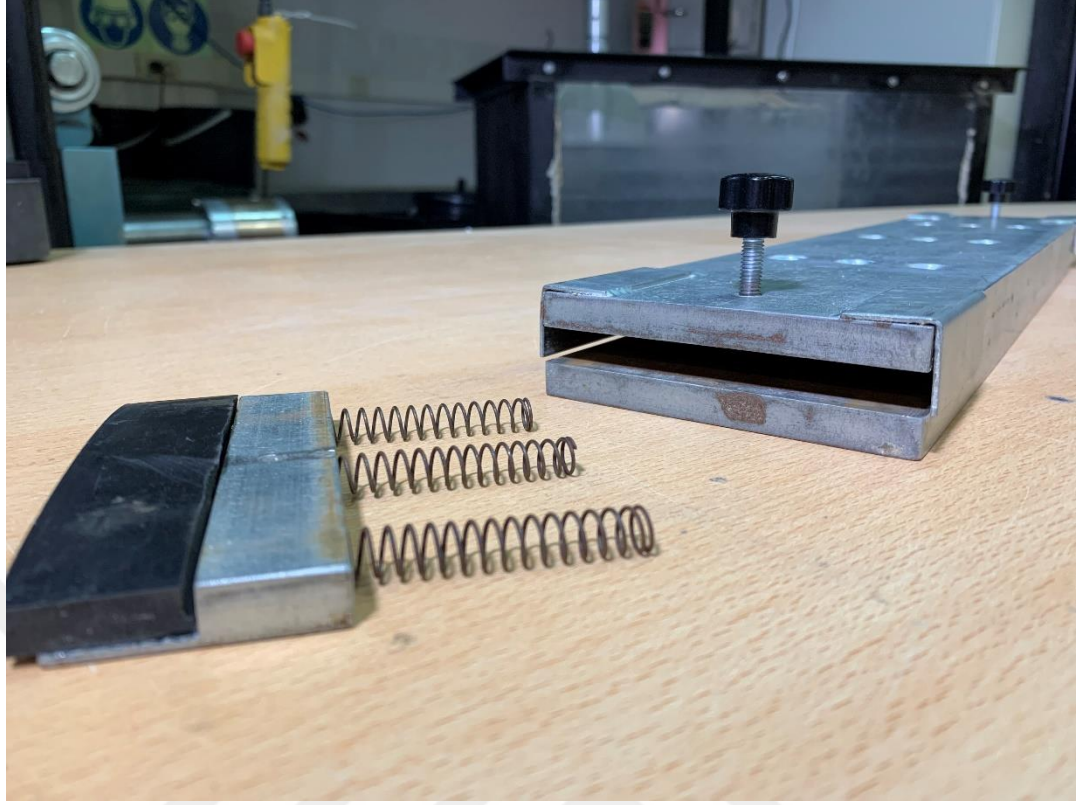
2.2.5. Şerit Temel

Deneyler gerçekleştirilirken 50cm x 10cm x 3cm (uzunluk x genişlik x yükseklik) ölçülerinde rijit çelik plakadan yapılmış bir şerit temel kullanılmıştır. Şerit temelin her iki tarafında açılıp kapanabilen yaylı bir sistem oluşturulmuştur. Kullanılan yaylı sistem temelin ön ve arka yüzünün plexiglassa temas etmesini sağlamıştır. Bu sayede deney esnasında temelin yaptığı deplasmandan dolayı zeminin temelin yüzeyine çıkması

engellenmiş ve parçacık görüntülü hız ölçüm tekniği ile yapılacak analizlerde oluşacak olumsuz durumun önüne geçilmiştir. Deneylerde kullanılan model şerit temel ve temele ait yaylı sistem sırasıyla şekil 20 ve şekil 21’de verilmektedir.



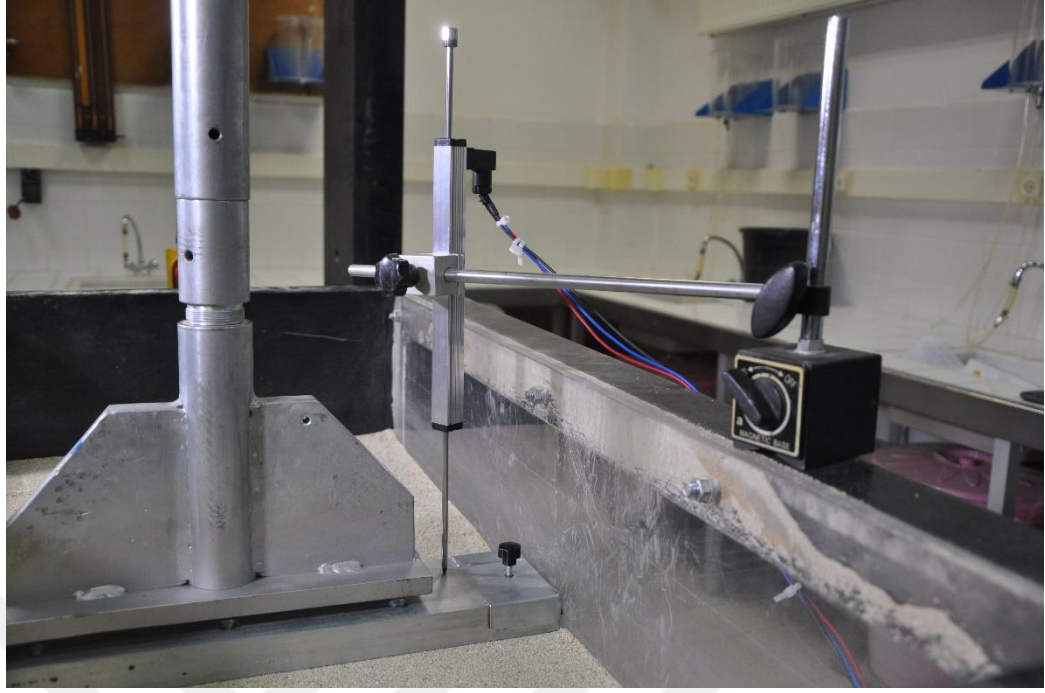
şekil 20: şerit Temel



Şekil 21: Şerit Temelde Kullanılan Yaylı Sistem

2.2.6. Düşey Deplasman Transduseri

Şerit temele yükleme sisteminden aktarılan düşey yükten dolayı temel tabanında oluşacak deplasmanları ölçmek amacıyla Yordam Test and Measurement firması tarafından üretilen düşey deplasman transduseri kullanılmıştır. Kullanılan deplasman transduseri 0.00-150.00 mm arasında ölçüm yapabilmektedir. Düşey deplasman transduseri tarafından yapılan ölçümler LabView programının deplasman arayüzünden görüntülenmiş ve bu sayede deneylerin taban basıncı-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 22’de düşey deplasman transduserine ait fotoğraf verilmektedir.



Şekil 22: Düşey Deplasman Transduseri

2.2.7. Model Boru

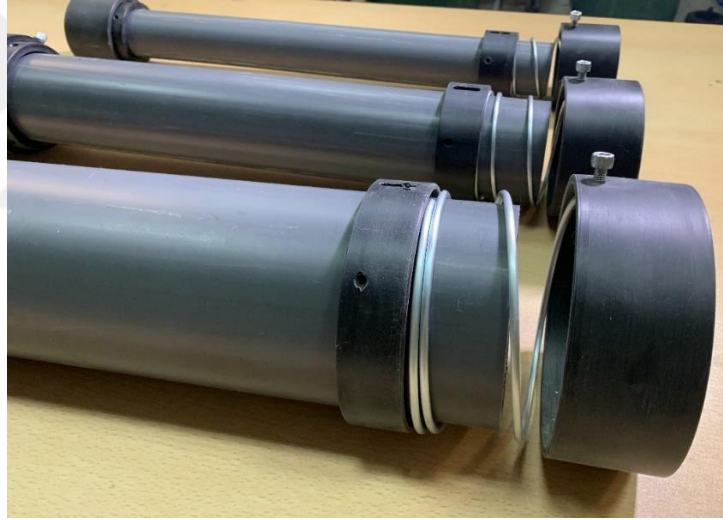
Deneylerde, gömülü boruların gömülme derinliği ve boru çapının sisteme etkisi araştırılmıştır. Bu sebeple üç farklı çapta (50mm, 75mm ve 110mm) PVC borular kullanılmıştır. Her bir boru için borunun iki ucuna sabitlenecek şekilde yaylı başlık sistemleri imal edilmiştir. Yükleme esnasında oluşacak deplasmanla birlikte kum zeminin borunun içerisine akmaması deneyden sonra yapılacak Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği (PGHÖ) analizinde sağlıklı sonuçlar alabilmek adına önemli bir etkindir. Yaylı sistemler yükleme esnasında boruların içerisine girecek kumu engellemek adına borunun her iki tarafına sabitlenmiş ve boru zeminin içerisine yerleştirildikten sonra açılarak plexiglass ile temas etmesini sağlamıştır. Deneylerde kullanılan boru özellikleri Tablo 2’de, boru ve yaylı sistemler sırasıyla Şekil 23 ve Şekil 24’te sunulmaktadır.

Tablo 2
Boru Özellikleri

Özellik	Değer
Boru Çapı (mm)	50
	75
	110
Et Kalınlığı (mm)	2.2
Elastisite Modülü (Mpa)	3000



Şekil 23: Farklı Çaplardaki Model Borular



Şekil 24: Model Borularda Kullanılan Yaylı Sistem

2.2.8. Gerinim Pulları (Strain Gauges)

Deneyler esnasında boruda oluşacak deformasyonları ölçmek amacıyla Tokyo Measuring Instruments firması tarafından üretilen GFLAB-6-50-3LJC-F tipi gerinim pulları kullanılmıştır (Şekil 25). Gerinim pulları her bir borunun bir üst noktasında, bir de yan yüzünde olacak şekilde yerleştirilmiştir, Şekil 26’da gösterilen yapıştırıcı ile boruya sabitlenmiş ve Şekil 27’de gösterilen koruma bandı ile kapatılıp kum zemin ile teması kesilmiştir. Gerinim pullarının boru üzerindeki yerleşimi Şekil 28’de, gerinim pullarının özellikleri Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3
Gerinim Pulu Özellikleri

Özellik	Değer
Pul Faktörü	$2.09 \pm \%1$
Direnç (Ω)	120.8 ± 0.5
Uzunluk (m)	6
Giriş Kablosu	10/0.12 4m
Enine Hassasiyet	$\%1.00$
Isı Dengelemesi $^{\circ}\text{C}^1$	50×10^{-6}



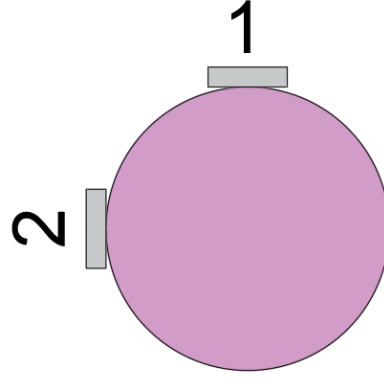
Şekil 25: Gerinim Pulları



Şekil 26: Gerinim Pullarını Boruya Sabitlemek İçin Kullanılan Yapıştırıcı



Şekil 27: Koruma Bandı



Şekil 28: Gerinim Pullarının Boru Üzerindeki Yerleşimi

2.2.9. Fotoğraf Makinesi

Deneyselerde temel zemininde oluşan deformasyonların analizi için yüksek çözünürlüklü fotoğraflar çekilmiştir. Nikon D90 tipi profesyonel fotoğraf makinesi kullanılmıştır (Şekil 29). Analizlerin doğru yapılabilmesi için fotoğraf makinesi deney düzeneğine uygun bir uzaklıkta sabitlenmiştir.

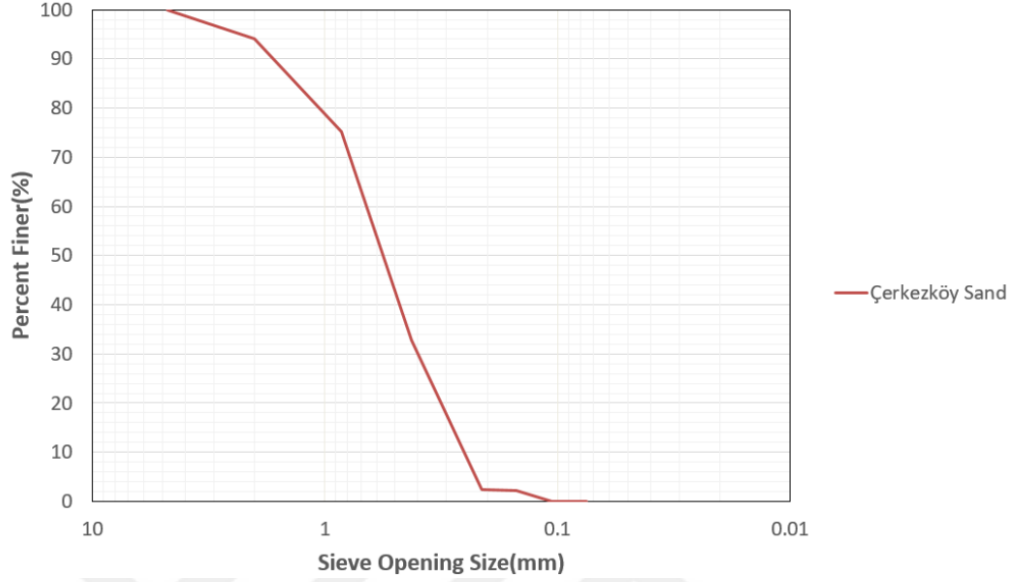


Şekil 29: Fotoğraf Makinesi

2.2.10. Kum Zemin

Deneysel çalışmada, Marmara Bölgesi, Tekirdağ ili, Çerkezköy ilçesinden getirilen kum numuneler kullanılmıştır. Çerkezköy kumu endeks özellikleri ve laboratuvar deneyleri Öner, (2020:68-70) tarafından gerçekleştirilmiştir. Öner, (2020:68-70) ASTM standartlarına göre elek analizi, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranı

deneyleri ve küresellik yuvarlaklık deneylerini gerçekleştirmiştir. Elek analizi Şekil 30’da endeks özellikleri Tablo 4’te verilmektedir.



Şekil 30: Deneylerde Kullanılan Kumun Dane Çapı Dağılım Eğrisi

Kaynak: Öner, (2020. s.48)

Tablo 4

Çerkezköy Kumunun Endeks Özellikleri

Özellik	Değer
Sınıflandırma	SP
Ortalama Dane Boyutu (D50)	0.64
Uniformluk Katsayısı (Cu)	2.37
Eğrilik Katsayısı (Cc)	0.93
Özgül Ağırlık (Gs)	2.62
Maksimum Boşluk Oranı (emax)	0.83
Minimum Boşluk Oranı (emin)	0.5
Ortalama Küresellik (Save)	0.56
Ortalama Yuvarlaklık (Rave)	0.749

2.2.11. Data Kayıt Sistemi

Deneylerde, zemin ve boruda oluşan deformasyonları kaydetmek amacıyla National Instruments firması tarafından üretilen data kayıt şasisi, data logger modülü ve veri transfer modülleri kullanılmıştır. Uygulanan yük, yük hücresi tarafından, deplasman, lineer deplasman transduseri aracılığıyla ve borudaki deformasyonlar gerinim pulları

aracılığıyla ölçölüp deneyler sırasında meydana gelen direnç değışimleri ölçölerek bilgisayar yazılımı yardımıyla kaydedilmiştir.

Yük hücresi tam köprüleme (full-bridge) konfigürasyonu kullanılarak NI-9949 modölüne bağlanmıştır. Daha sonra NI-9237 modölüne bir RJ-50 kablosu bağlanmıştır, ardından modöl NI-cDAQ-9179 şasisine bağlanmıştır. Son olarak LabView programına gerekli konfigürasyonlar girilerek yük hücresinin kalibrasyonu sağlanmıştır.

Lineer deplasman transdüseri konfigürasyonu yük hücresi konfigürasyonu ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir, ancak ana şasi bağlantısı NI-9949 modölü kullanılmadan NI-9472 köprü modölü ile gerçekleştirilmiştir.

Gerinim pullarının konfigürasyonu için de yük hücresi konfigürasyonu ile aynı yol izlenmiştir fakat tam köprüleme konfigürasyonu yerine National Instruments tarafından önerilen çeyrek köprüleme (quarter-bridge) konfigürasyonu kullanılmıştır.



Şekil 31: NI-9949 Modölü



Şekil 32: NI-9237 Köprü Modülü Takılı NI-cDAQ-9179 Şasisi



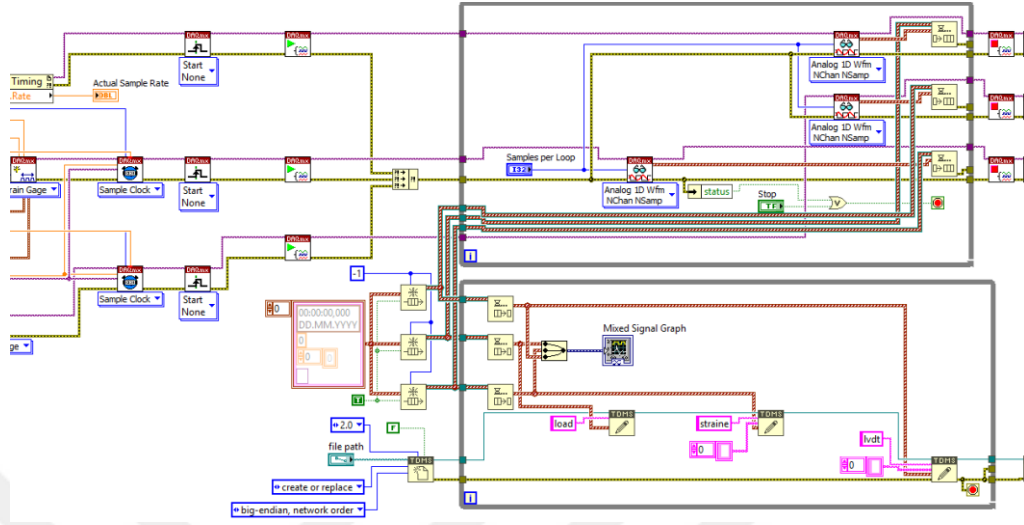
Şekil 33: Gerinim Pulları için Kullanılan NI-9944 Modülü

2.3. Verilerin Analizinde Kullanılan Programlar

2.3.1. LabView Yazılımı

LabView deney verilerini kaydetmek amacıyla National Instruments tarafından geliştirilmiş bir programdır. Deneyler esnasında ölçülen yük, yer değiştirme ve gerinim değerlerini kaydetmek amacıyla National Instruments tarafından üç farklı arayüz oluşturulmuştur. Bu programlar aracılığıyla deneyler esnasında grafikler gözlemlenebilmiştir. Deneylerden sonra bu veriler dışarıya aktarılıp Excel üzerinde

alınan sonuçlar analiz edilmiştir. LabView programı içerisinde çalışan örnek algoritma Şekil 34’te verilmektedir.



Şekil 34: LabView Programında Çalışan Örnek Algoritma

2.3.2. Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Tekniği (PGHÖ)

Deneyler esnasında zeminde meydana gelen yenilme yüzeyleri PGHÖ (Particle Image Velocimetry-PIV) tekniği ile analiz edilmiştir. Deney sırasında 12 saniyede bir fotoğraf (12 saniyedeki temel deplasmanı 2 mm’ye eşit olmaktadır) çekilmiştir. PGHÖ tekniği bir referans fotoğraf ile ardışık fotoğraflar arasındaki mesafeyi hesaplayarak ilgili bölgedeki deformasyon ve yer değiştirmeyi analiz etmek için kullanılmaktadır.

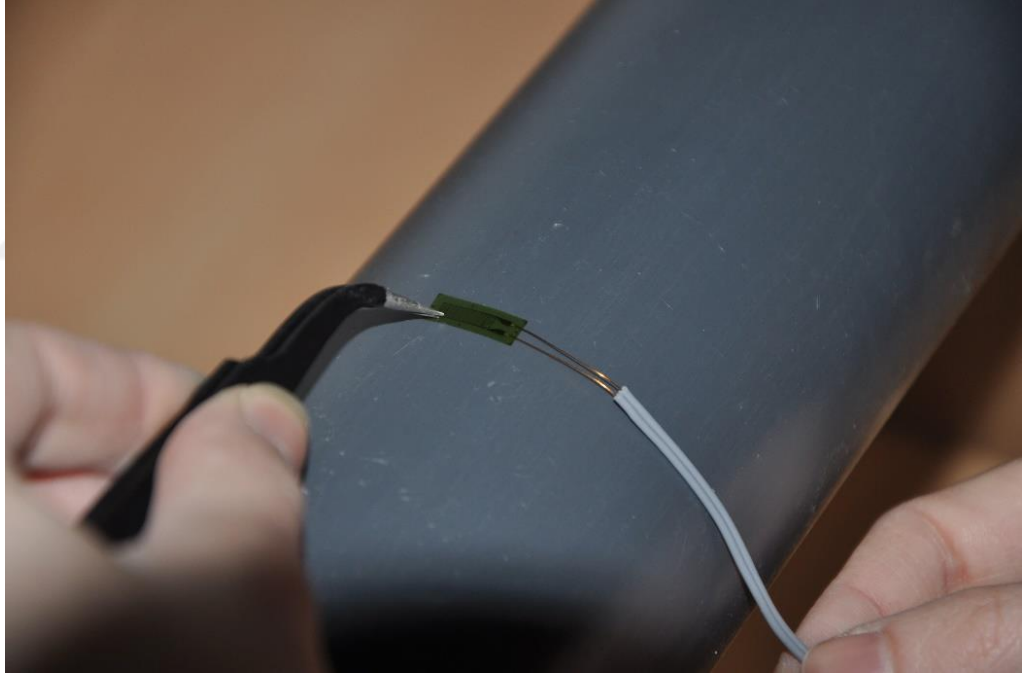
Bu çalışmada Stainer ve ark. (2015), tarafından geliştirilmiş olan GeoPIV RG Matlab yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, gömülü borunun çevresi yer değiştirme alanlarının gözlemlenmesini engellediği için ilgili bölgeden (plexiglass ile görüntülenen alan) çıkarılmıştır. Program aynı zamanda boru içindeki alanı boş olarak algılamaktadır bu sayede boru içerisinde kalan hareketsiz ağı analiz etmemektedir. Analiz yöntemi olarak leap-frog yöntemi kullanılmıştır, bu yöntemde sonuçlar piksel cinsinden verilmektedir. Piksel cinsinden verilen sonuçları milimetre cinsine çevirebilmek amacıyla araştırmacılar tarafından özel bir Matlab işlevi yazılmıştır. Bu sayede plexiglass alan ölçeklendirilmekte ve buna göre yer değiştirme hesabı yapılmıştır.

GeoPIV RG yazılımından elde edilen vektörel yer değiştirme sonuçlarını daha belirgin hale getirebilmek için araştırmacılar tarafından bir Matlab işlevi yazılmıştır. Bu işlevdeki optimum ağ boyutu 50 x 50 piksel olarak belirlenmiştir.

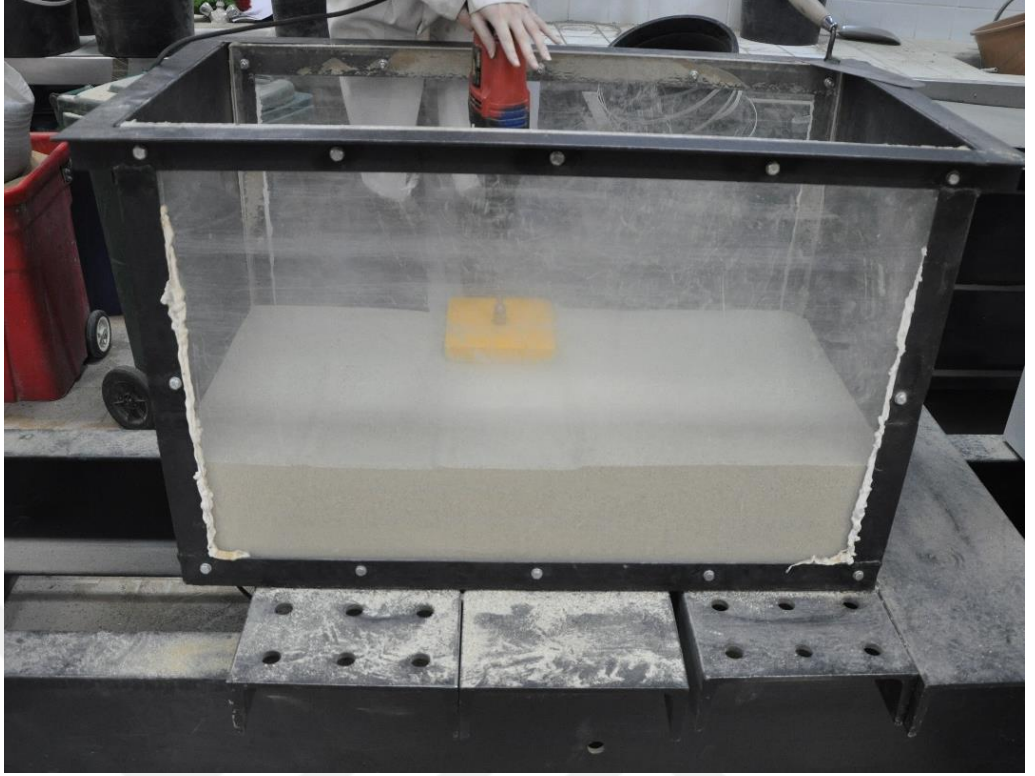
2.4. Deney Prosedürü

1. İlk olarak deneylerde kullanılacak boru deneye hazır hale getirilmiştir. Borunun hazırlanması için gerekli aşamalar aşağıda verilmektedir.
 - 1.1. Boru gerinim pullarının yerleştirilebilmesi için temizlenmiştir.
 - 1.2. Temizlenen borunun orta noktası ölçülüp belirlenmiştir. Gerinim pullarının aralarında 90 derecelik açı olacak şekilde yerleştirilebilmesi için bu bölgeler işaretlenmiştir.
 - 1.3. Gerinim pulları belirlenen bölgelere boruya dik olacak şekilde Şekil 26'da gösterilmiş olan yapıştırıcı ile sabitlenmiştir ve numaralandırılmıştır.
 - 1.4. Sabitlenen gerinim pullarının üzerine zeminden hasar görmemesi için Şekil 27'de gösterilen koruma bandı yapıştırılmıştır.
 - 1.5. Gerinim pullarının kabloları Şekil 33'te gösterildiği gibi köprüleme yöntemi ile NI-9944 modülüne bağlanmıştır.
 - 1.6. Son olarak borunun her iki tarafına Şekil 24'te sunulduğu gibi yaylı sistem sabitlenip, boru deneye hazır hale getirilmiştir.
2. Borunun hazırlanmasından sonraki aşama kum zeminin ve borunun deney kasasına yerleştirilmesidir. Deneyler iki farklı rölatif sıklıkta gerçekleştirilmiştir (Dr: %35 ve Dr: %65). Kum zeminin hazırlanmasına ait aşamalar aşağıda verilmektedir.
 - 2.1. Deneylerde kullanılacak her iki rölatif sıklık için zeminin endeks özelliklerinden faydalanılarak kütle hesabı yapılmıştır.
 - 2.2. Deney kasasının arka kısmında yer alan plexsiglass 5 cm yüksekliğinde 9 katmana bölünmüştür. Rölatif sıklık değerinin %35 olduğu deney setlerinde her katman için gerekli kum miktarı yukarıdan kasaya dökülüp mala yardımıyla düzeltilmiştir.
 - 2.3. Rölatif sıklık değerinin %65'e eşit olduğu deney setlerinde her katman için gerekli miktardaki kum deney kasasına aktarılıp bir hilti yardımı ile zeminin sıkışması sağlanmıştır. Hilti ile zeminin sıkıştırılmasına ait görsel Şekil 36'da verilmektedir.
 - 2.4. Borunun gömülme derinliğine denk gelecek yüksekliğe kadar gereken kum miktarı deney kasasına aktarıldıktan sonra hazırlanan boru deney kasasına yerleştirilip boruya sabitlenen yay sistemi açılmıştır.
 - 2.5. Borunun sisteme yerleştirilmesine ait görsel Şekil 37'de verilmektedir.

- 2.6. Borunun deney kasasına yerleştirilmesinden sonra kalan kum miktarı 5 cm yüksekliğindeki katmanlara sırasıyla aktarılıp %65 rölatif sıkılıktaki deney setleri için her katmanda hilti ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır.
3. Kum zeminin hazır hale getirilmesinden sonra model şerit temel zemine yerleştirilmiştir ardından temel yayları açılmıştır ve su terazisi ile temelin düzlüğü kontrol edilmiştir (Şekil 38).
4. Lineer deplasman transdüseri temelin üzerine sabitlenmiştir (Şekil 39).
5. Deney esnasında kullanılacak spot ışıklar deney kasasının her iki tarafında konumlandırılmıştır.
6. Son olarak fotoğraf makinesi bir tripod yardımı ile kasanın önüne yerleştirilerek deney düzeneği hazır hale getirilmiştir (Şekil 40).



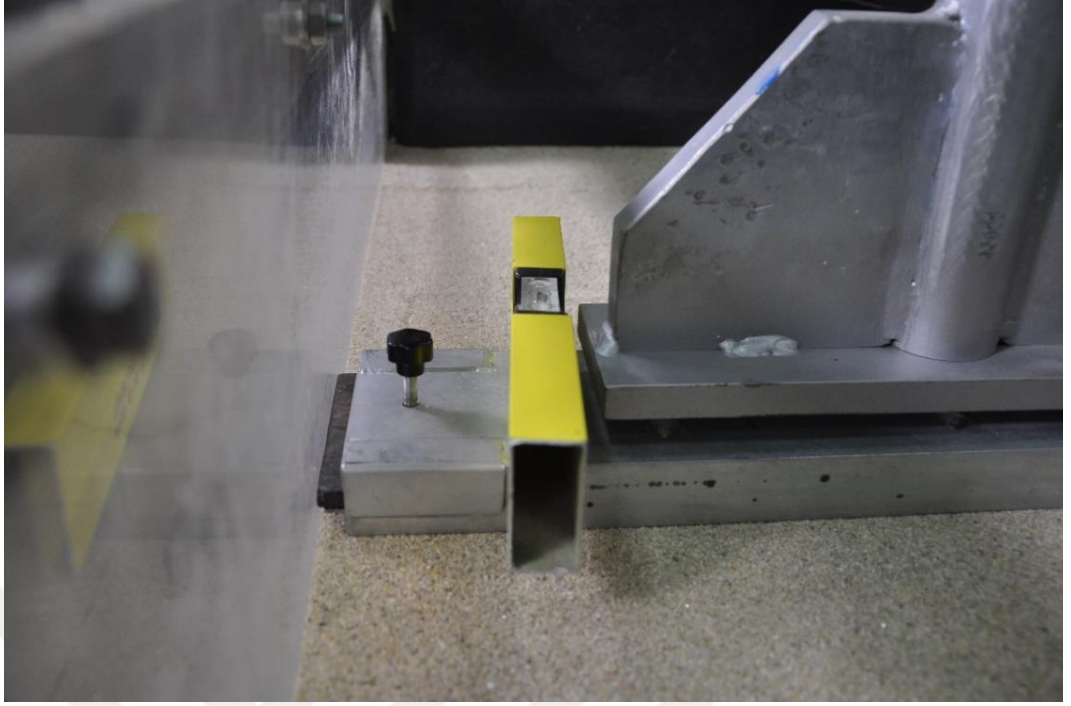
Şekil 35: Gerinim Pullarının Boruya Yerleştirilmesi



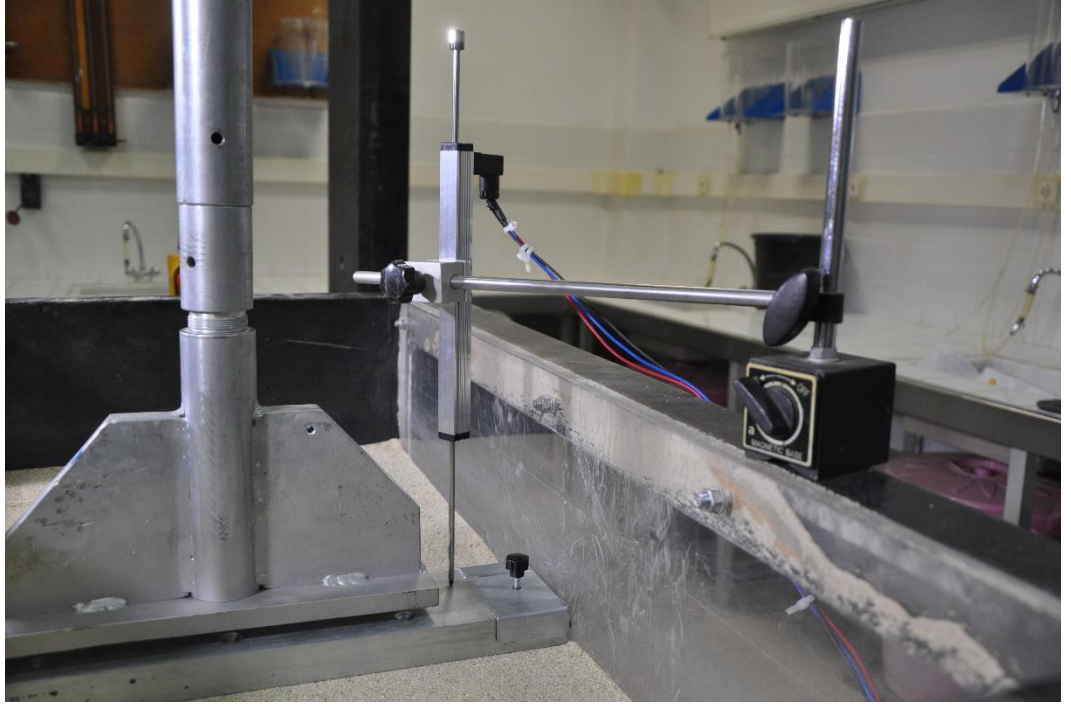
Şekil 36: Zeminin Hilti ile Sıkıştırılması



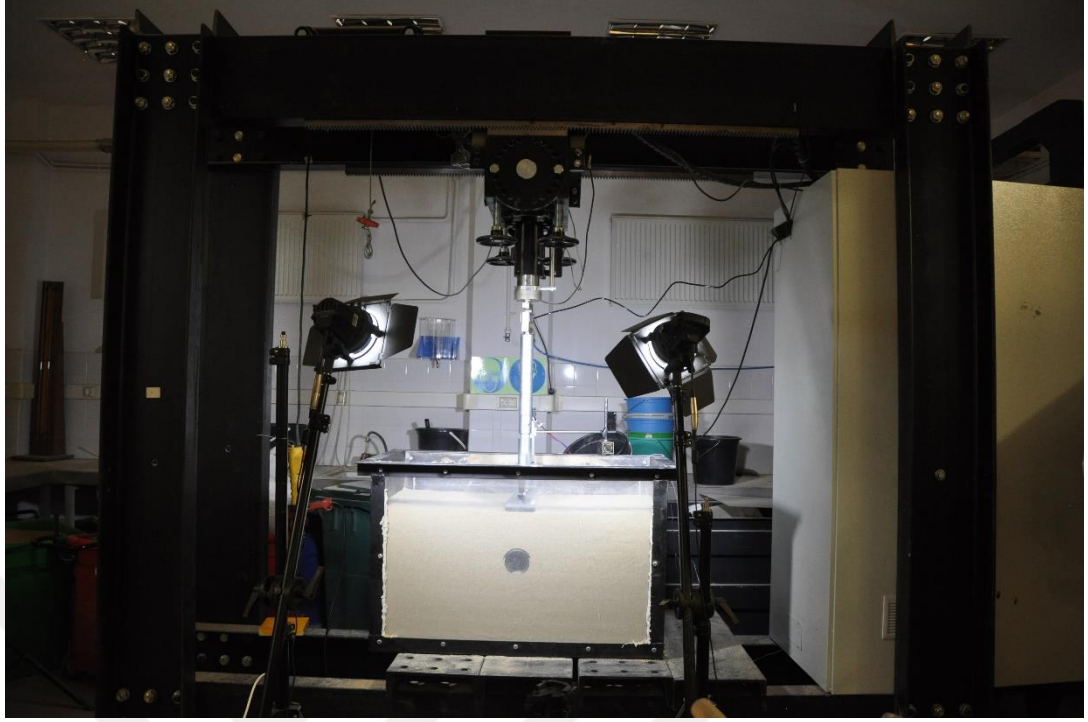
Şekil 37: Borunun Zemine Yerleştirilmesi



Şekil 38: Model Temelin Su Terazisi ile Kontrol Edilmesi

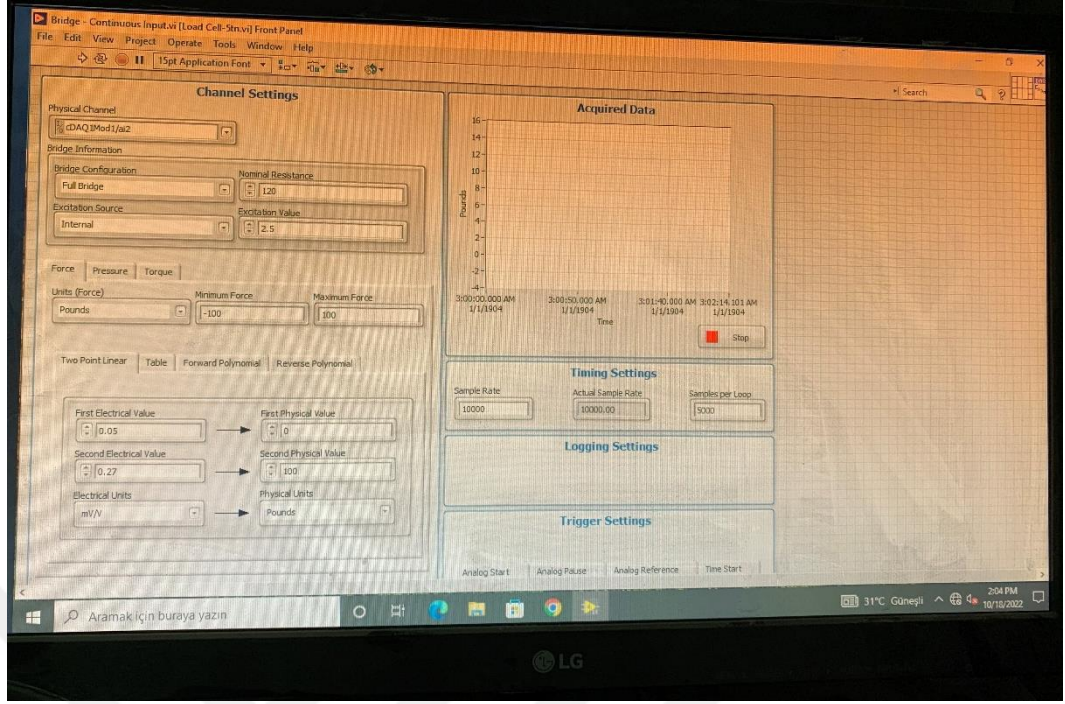


Şekil 39: Lineer Deplasman Transdüserinin Temelin Üzerinde Konumlandırılması



Şekil 40: Deney Düzeneği

7. Deney düzeneği hazır hale geldikten sonra referans fotoğrafı çekilmiştir.
8. Her 12 saniyede bir, 2 mm'lik deplasmana karşılık gelen fotoğraflar çekilmiştir. Yükleme 100 mm/dk'lık sabit hızla yapılmaktadır.
9. Yük-deplasman eğrileri ve gerinim değerleri LabView programı aracılığıyla kaydedilmiştir (Şekil 41).
10. Kaydedilen veriler Excel aracılığıyla grafikler haline getirilmiştir.
11. Deney esnasında çekilen fotoğraflar ile GeoPIV RG analizi yapılmıştır.



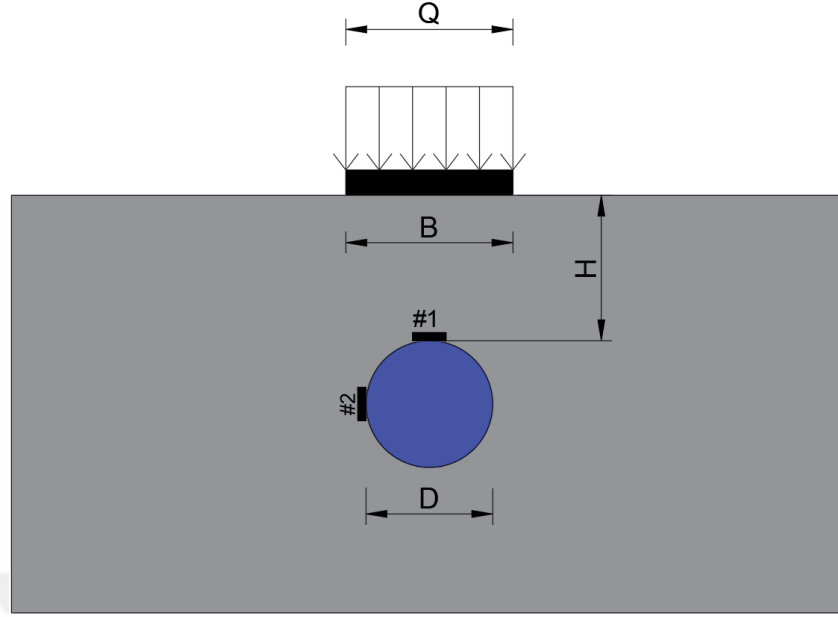
Şekil 41: LabView Programı ile Verilerin Kaydedilmesi

BÖLÜM 3: SONUÇLAR

3.1 Giriş

Bu bölümde boru-zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi amacıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Deneyler farklı zemin sıklıklarında, farklı gömülme derinliklerinde ve üç farklı çaptaki ($D= 50, 75$ ve 100 mm) boru üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar fiziksel deneylerin yapılması ve deneylerden elde edilen verilerin analiz edilmesi olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Model deneyler aşamasında deney düzeneği fiziksel olarak hazırlanmış ve ölçüm aletleri deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deneylerde boru çapının taşıma gücüne etkisi ve şerit temel altında bulunan zeminin göçme mekanizması incelenmiştir. Yapılan araştırmalar %35 ve %65 olacak şekilde iki ayrı zemin sıklığında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda düşey yükleme esnasında boruya etki eden gerilmeler gerinim pulları yardımı ile ölçülmüştür. Şekil 42’de deney düzeneğine ait şematik görünüm verilmektedir. Şematik görünümde belirtilmiş kısaltmalar aşağıda açıklanmaktadır.

1. H: boru tacından temelin altına olan mesafe
2. D: boru çapı
3. B: temel genişliği
4. Q: uygulanan yük
5. #1: gerinim pulu
6. #2: gerinim pulu



Şekil 42: Deney Düzenekinin Şematik Gösterimi

Deneyler farklı zemin sıkılıklarında ve gömülme derinliklerinde gerçekleştirilmiş olup, deney programı Tablo 5’te sunulmaktadır.

Tablo 5
Deney Programı

Deney No	Dr (%)	Boru Çapı (mm)	H/D
T1	35	-	-
T2	35	50	1
T3	35	50	2
T4	35	50	3
T5	35	75	1
T6	35	75	2
T7	35	75	3
T8	35	110	1
T9	35	110	2
T10	65	-	-
T11	65	50	1
T12	65	50	2
T13	65	50	3
T14	65	75	1
T15	65	75	2
T16	65	75	3
T17	65	110	1
T18	65	110	2

Deney esnasında ölçüm cihazlarından okunan veriler LabView programı ile kaydedilmiştir. Elde edilen ham verilerden yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Yük-deplasman eğrilerinde %10 deformasyona karşılık gelen yük nihai taşıma gücü olarak tanımlanmaktadır. Temelin taşıma kapasitesi, taşıma kapasitesi oranı (BCR) olarak tanımlanan boyutsuz bir faktör ile temsil edilmektedir. Bu faktör, borulu deneylerdeki temel taşıma kapasitesinin (q_{boru}), borusuz deneylerdeki temel taşıma kapasitesine (q_u) oranı olarak tanımlanmaktadır (Denk. 1). Bu amaçla %35 ve %65 kum zemin sıklıklarında iki adet borusuz model deney gerçekleştirilmiştir ve sonuçları kullanılmıştır.

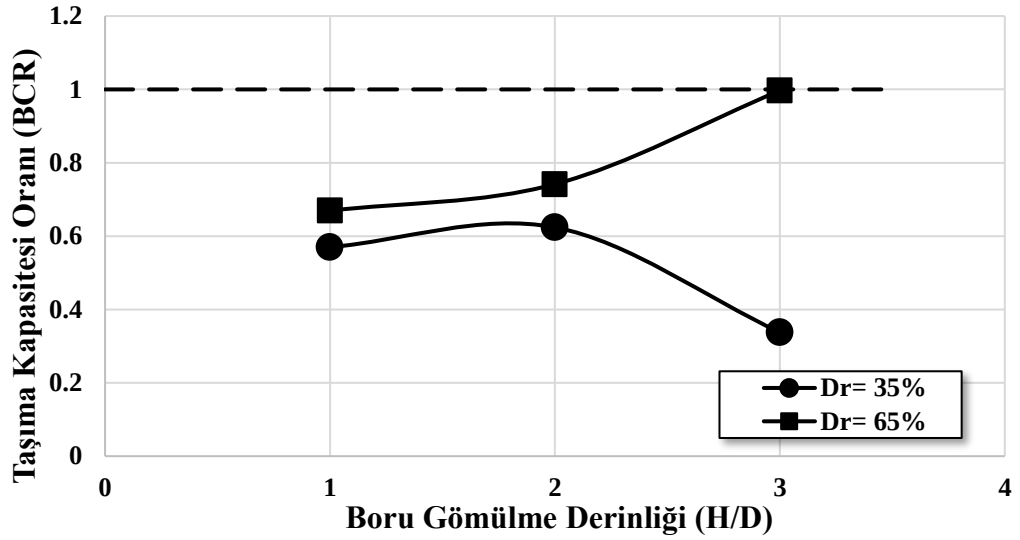
$$BCR = \frac{q_{boru}}{q_u} \quad (1)$$

3.2 Zemin Sıklığının Etkisi

3.2.1 Zemin Sıklığının Taşıma Kapasitesine Etkisi

Bu seride %35 ve %65 zemin sıklıklarının taşıma kapasitesine etkisini araştırmak amacıyla model deneyler yapılmıştır. Seride 50 mm, 75 mm ve 100 mm'lik borular temelin tam ortasına gelecek şekilde zemine yerleştirilmiştir. Her boru çapı için $H/D = 1$, 2 ve 3 olacak şekilde boru gömülme derinlikleri değiştirilmiştir. Borulu durumda elde edilen taşıma kapasitesinin (q_{boru}) borusuz durumda elde edilen taşıma kapasitesine (q_u) oranı ile elde edilen BCR katsayısı borusuz durum ile karşılaştırılmıştır. Şekil 43, Şekil 44 ve Şekil 45'te sırasıyla 50mm, 75mm ve 100mm'lik borular için taşıma kapasitesi oranları iki farklı zemin sıklığı için sunulmaktadır.

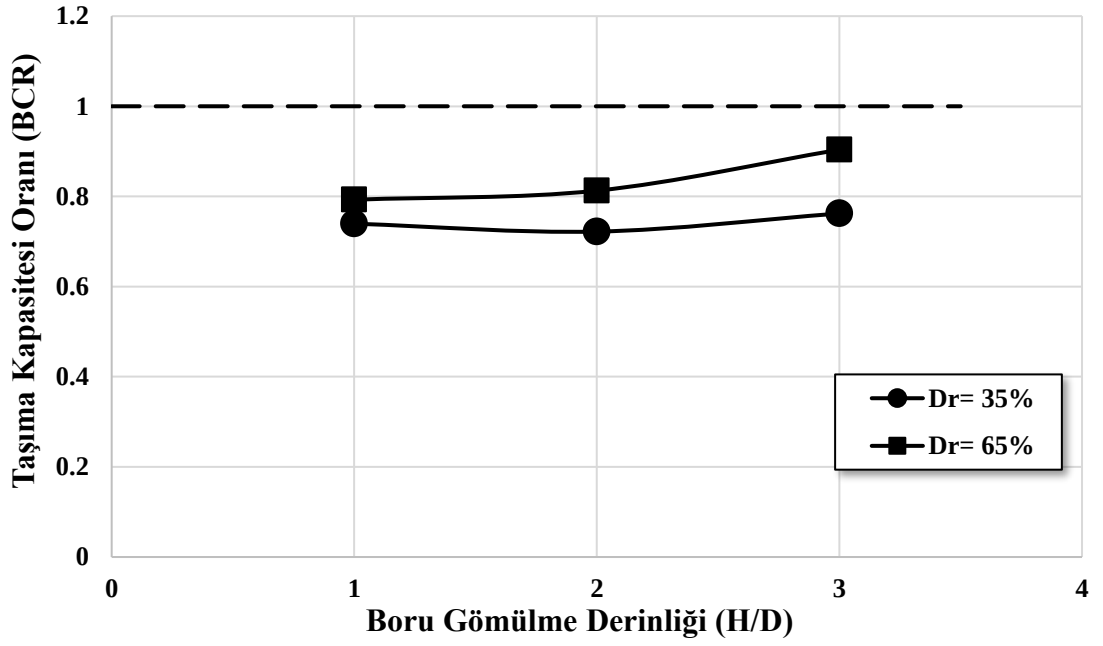
Şekil 43'te 50 mm çapındaki boru için üç farklı gömülme derinliği %35 ve %65 zemin sıklıklarında incelenmiştir. $Dr = \%35$ zemin sıklığında BCR değeri $H/D = 2$ değerine kadar yükselirken gömülme derinliğinin daha da artmasıyla BCR değerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Fakat $Dr = \%65$ zemin sıklığında yapılan deneylere bakıldığında gömülme derinliğinin artmasıyla birlikte BCR değerinin arttığı ve $H/D = 3$ durumunda taşıma kapasitesinin borusuz durumdaki değere ulaştığı görülmektedir. %35 kum sıklığında BCR değerindeki ani düşüş, temel ile boru arasındaki zeminin taşıma gücüne doğrudan etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda $D = 50$ mm çapındaki borularda gömme derinliğinin artması ile zemin yoğunluğu davranışı etkilemektedir.



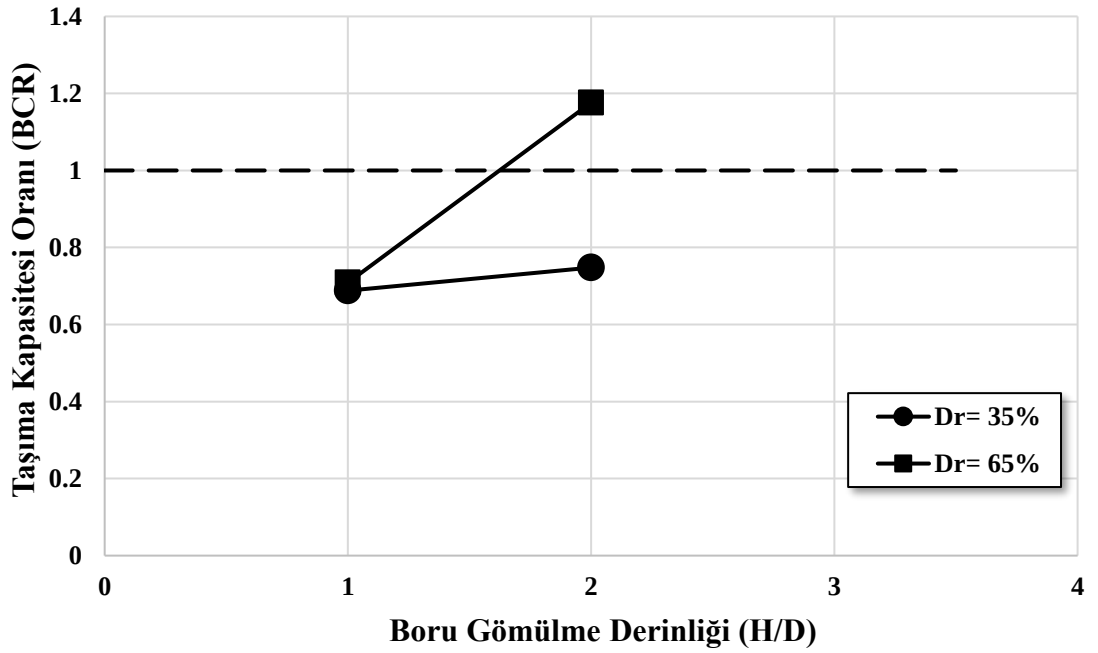
Şekil 43: D=50 mm için BCR'ın H/D ile Değişimi

Şekil 44'te 75 mm çapındaki boru için üç farklı gömülme derinliğinde, %35 ve %65 zemin sıkılıklarında deneyler yapılmıştır. D=75 mm durumunda her iki sıkılıkta gömülme derinliği arttıkça BCR değerinin arttığı görülmektedir. Bu değer artışı her iki sıkılıkta benzer davranış göstermiştir.

Boru çapının D=110mm olması durumunda gömülme derinliğinin artmasıyla beraber BCR değeri artmaktadır (Şekil 45). %65 zemin sıkılığında H/D=2 durumu incelendiğinde BCR değerinin borusuz durumdaki değerin üzerine çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni, düşey yüklemede boru çapının temel genişliğinden büyük olması nedeniyle düşey yöndeki yüklerin bir kısmının boru tarafından karşılanmasıdır. Ayrıca BCR değerinin 1'in üzerine çıkması, borunun kasa tabanına çok yakın mesafede olması nedeniyle boru gelen gerilmeleri doğrudan rijit tabana aktarmakta bu durum da borunun rijit zemine oturmasıyla benzer davranış göstermektedir.



Şekil 44: D=75 mm için BCR'nın H/D ile Değişimi



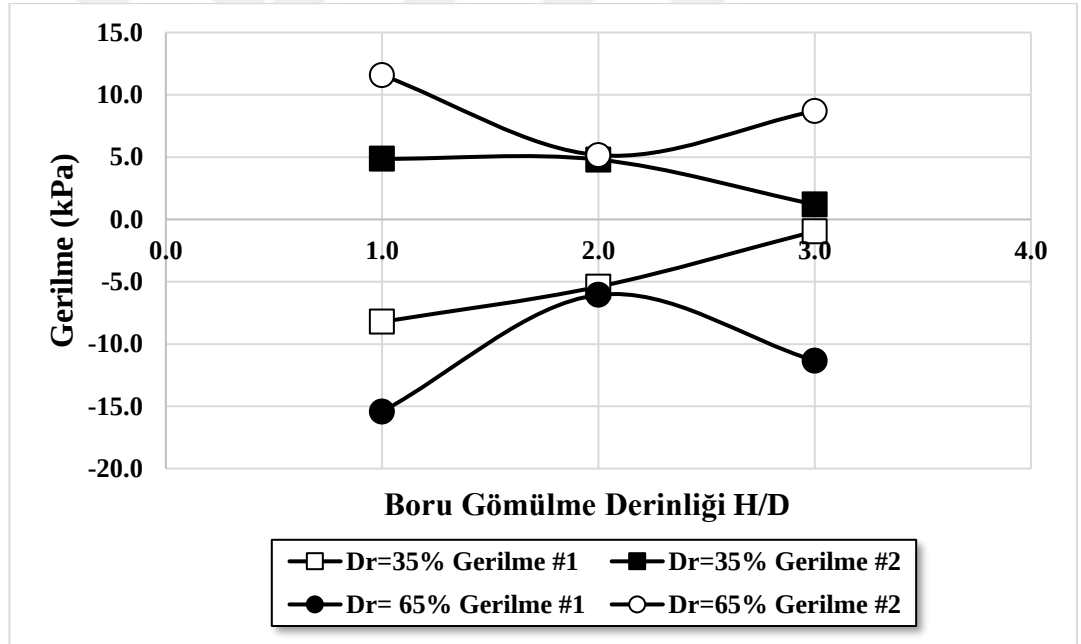
Şekil 45: D=110 mm için BCR'nın H/D ile Değişimi

3.2.2 Zemin Sıkılığının Borudaki Gerilmeye Etkisi

Düşey yükleme durumu altında boruya etki eden gerilmeleri ölçmek adına boru üzerine iki adet gerinim pulu yerleştirilmiştir (Şekil 28). %35 ve %65 zemin sıkılıklarında ölçülen gerilme değerleri sırasıyla D=50mm, D=75mm ve D=110mm çapındaki borular için Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48'de verilmektedir. Bu şekillerde 1 numaralı gerilme borunun üst

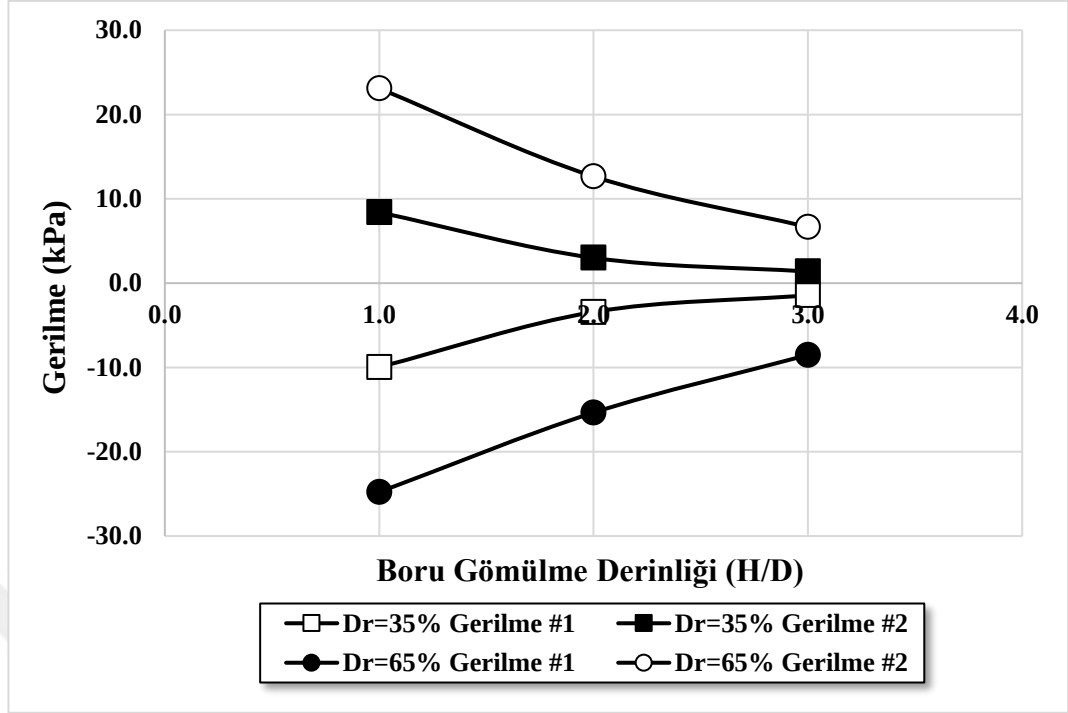
kısımındaki gerilme değeri temsil ederken, 2 numaralı gerilme borunun yan yüzeyindeki gerilme değeri temsil etmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında her boru çapı için 1 ve 2 numaralı gerilme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. 1 numaralı gerilme değerleri, borunun üst kısmı yükleme esnasında basınca maruz kaldığı için negatif değer alırken, borunun yan yüzeyindeki 2 numaralı gerilme değerleri pozitif değer almaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde zemin sıkılığının artması ile zeminin taşıma kapasitesi arttığından borudaki gerilmelerin arttığı görülmektedir.

Şekil 46'da $D=50\text{mm}$ çapındaki boruda oluşan gerilmeler karşılaştırılmıştır. Gevşek kumda gömülme derinliği arttıkça borudaki gerilme azalmakta, boru $H/D=3$ konumuna geldiğinde gerilmenin sıfıra yaklaştığı görülmektedir. %65 zemin sıkılığında borudaki gerilme $H/D=2$ gömülme derinliğinde azalırken, $H/D=3$ gömülme derinliğinde artmaktadır.



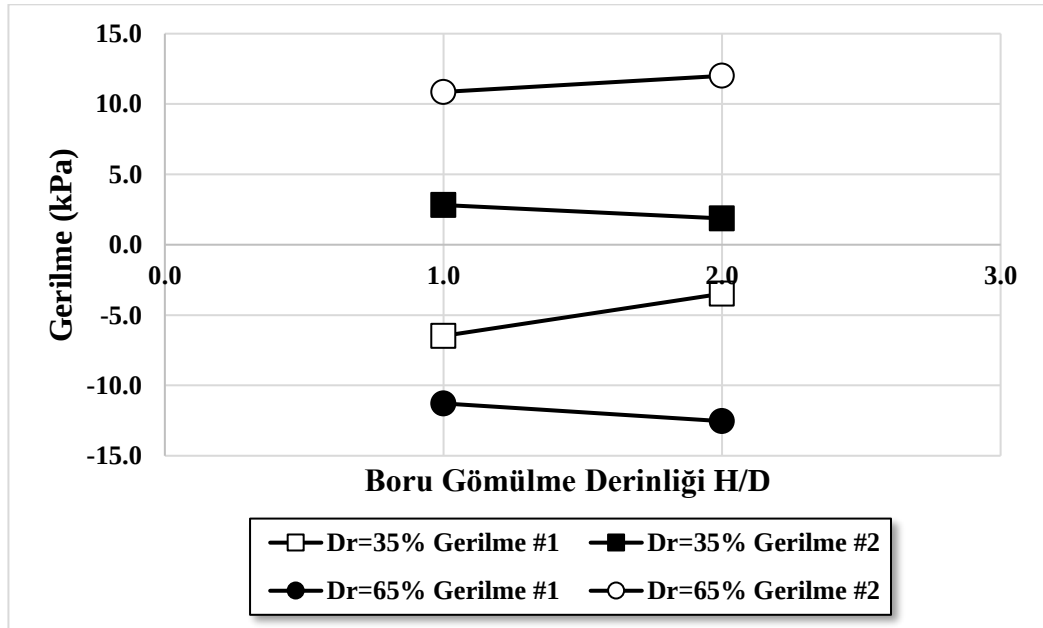
Şekil 46: $D=50\text{mm}$ Boru Çapında Borudaki Gerilmeler

Sıkı kumda kum daneleri arasındaki temas yüzeyi daha fazla olduğundan, zemin yüzey gerilmelerini daha fazla iletebilmektedir. 75 mm çapındaki boru incelendiğinde sıkı kumda yapılan deneylerde borudaki gerilmelerin gevşek kumda yapılan deneylerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla beraber gevşek ve sıkı kumlarda yapılan model deneylerde gömülme derinliğinin artmasıyla beraber borudaki gerilmelerin azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 47).



Şekil 47: D=75mm Boru Çapında Borudaki Gerilmeler

D=110mm çapındaki boruda yapılan model deneylerde gevşek kumda gömülme derinliğinin artmasıyla beraber gerilmelerin azaldığı görülmüştür (Şekil 48). Sıkı kumda yapılan deneylerde H/D oranı arttıkça boru gerilmesinin arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi BCR-H/D eğrisinde de görüldüğü üzere boru çapının belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla birlikte borunun da bir miktar yük taşımasıdır.

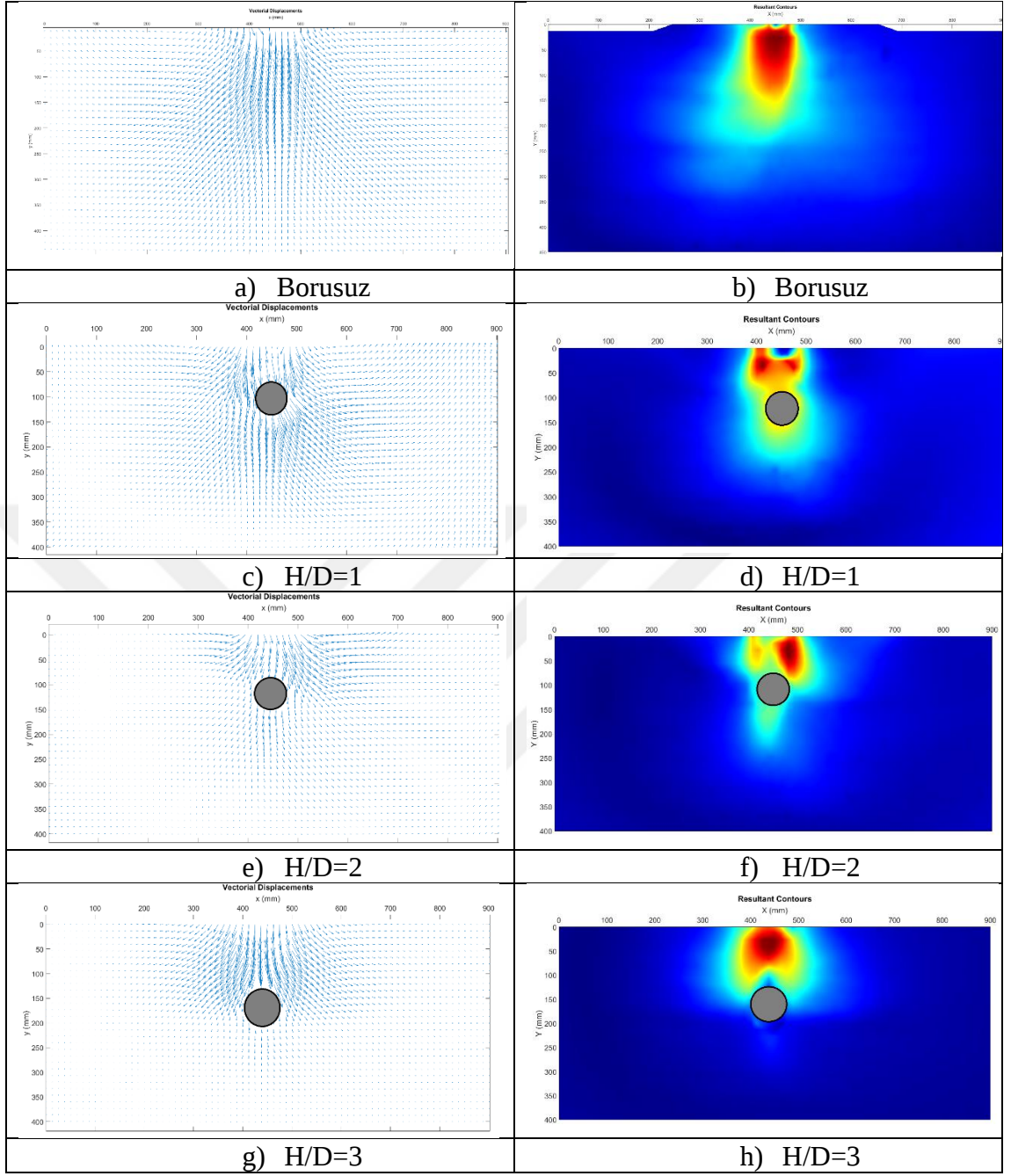


Şekil 48: D=110mm Boru Çapında Borudaki Gerilmeler

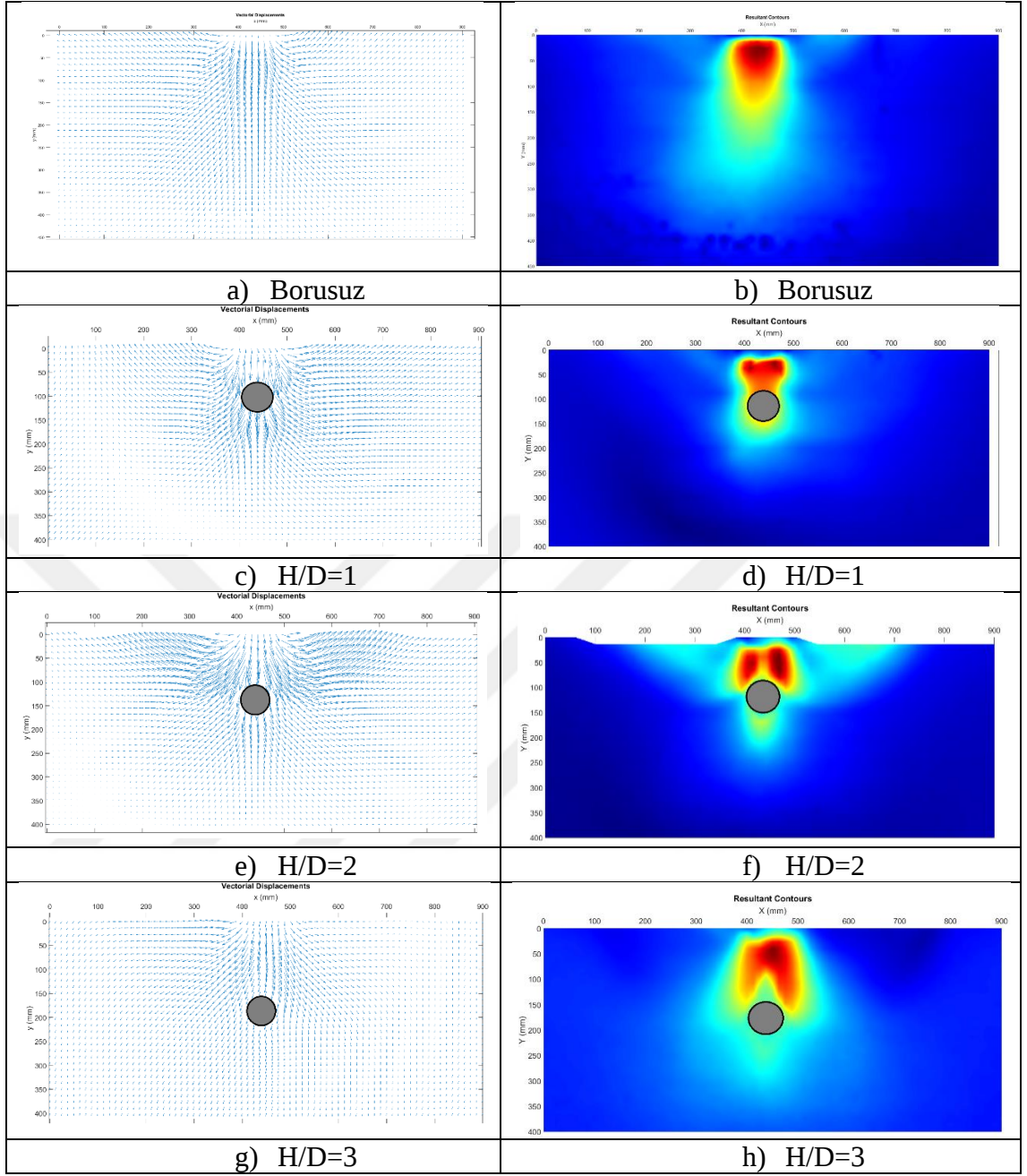
3.3. Gömülme Derinliğinin Zeminin Göçme Mekanizmasına Etkisi

Bu bölümde borunun gömülme derinliğinin değişmesiyle birlikte zeminin göçme yüzeylerinde oluşan değişiklikler model deneyler sonrasında yapılan parçacık görüntülü hız ölçüm analizleri (PIV) ile incelenmiştir. PIV analizleri taşıma kapasitesi hesabında olduğu gibi zeminin 10mm'lik deformasyonuna denk gelecek şekilde yapılmıştır. Borusuz durumda zeminde oluşacak yenilme yüzeylerini gözlemlemek amacıyla iki farklı sıklıkta ($Dr=35\%$ ve $Dr=65\%$) model deney için PIV analizleri yapılmıştır. Sıkı ve gevşek kumlarda, 50mm, 75mm ve 110mm çapındaki borular farklı H/D oranlarındaki derinliklere yerleştirilmiş ve PIV analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sıkı ve gevşek kumda yapılan borusuz deneylerin PIV analizleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde solda vektörel yer değiştirme, sağda yer değiştirme dağılımı olacak şekilde verilmiştir (şekil 49, şekil 50, şekil 51, şekil 52, şekil 53 ve şekil 54).

$Dr=35\%$ zemin sıklılığında, $D=50\text{mm}$ çapındaki boru için zeminin göçme mekanizmalarının PIV analiz sonuçları şekil 49'da verilmektedir. PIV sonuçları borusuz durumda zeminde oluşan göçme mekanizması ile kıyaslandığında H/D oranı arttıkka zemindeki boru etkisinin azaldığı görülmüştür. şekil 50'de verilen $Dr=65\%$ zemin sıklılığı için $D=50\text{mm}$ çapındaki boruda yapılan deneyler de benzer sonuçlar vermektedir. Sıkı kumda zemin yoğunluğunun artmasıyla birlikte yenilme yüzeyleri daha belirgin hale gelmiştir.

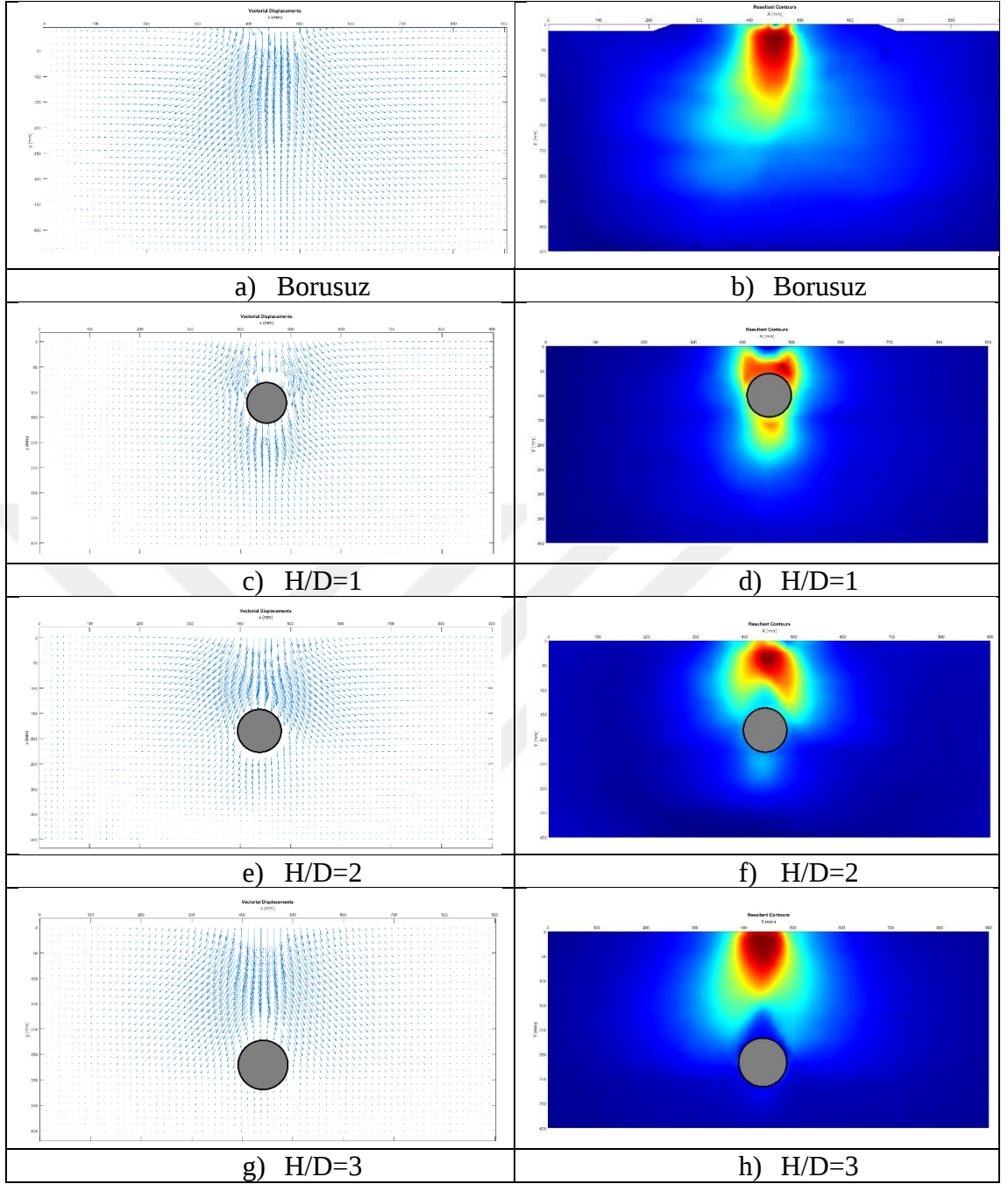


Şekil 49: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %35, D=50mm)

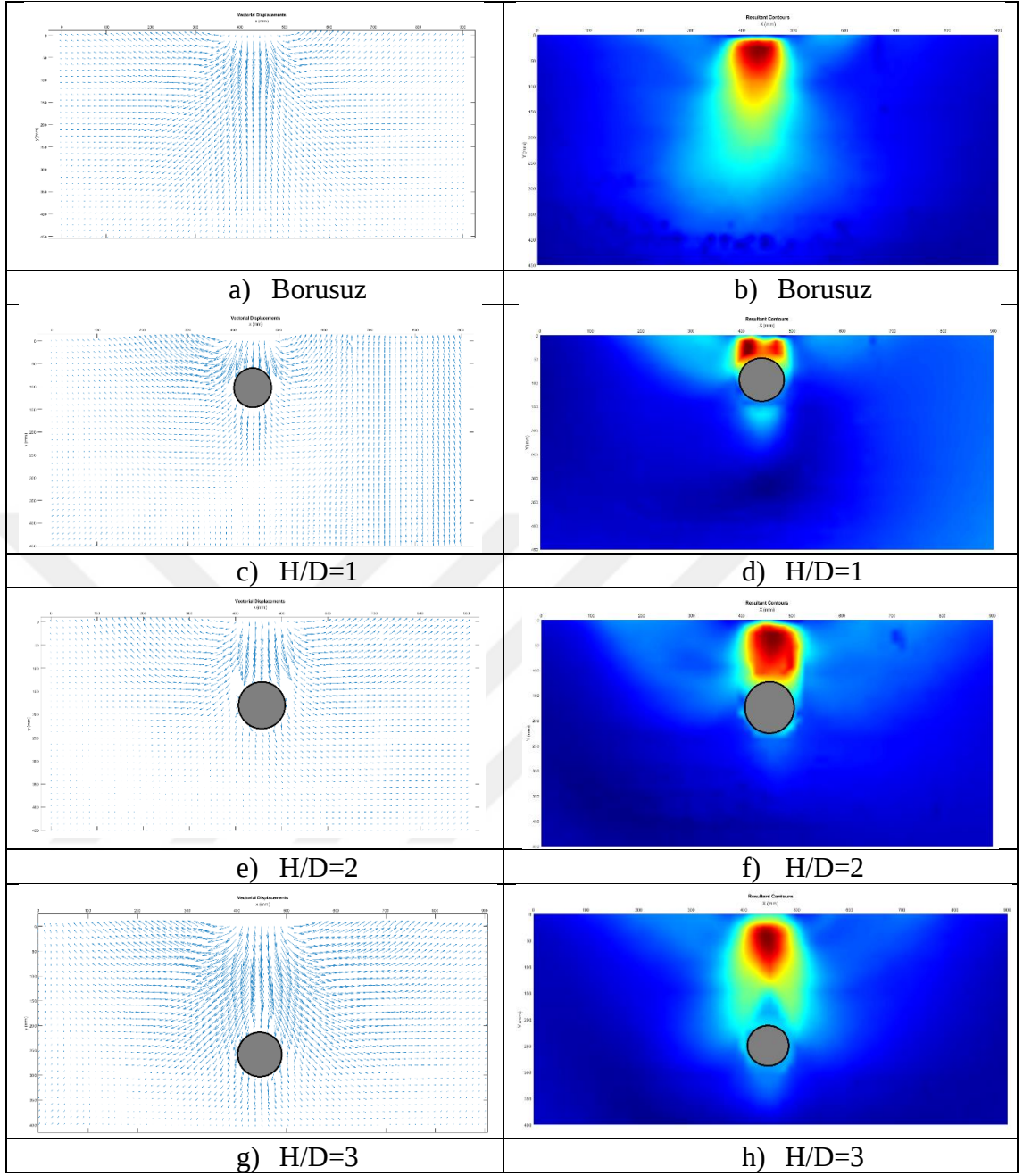


Şekil 50: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %65, D=50mm)

Şekil 51’de $D=75\text{mm}$ çaplı borularda %35 sıklıkta yapılan deneylerin PIV sonuçları, Şekil 52’de ise $D=75\text{mm}$ çaplı borularda %65 sıklıkta gerçekleştirilen deneyler sunulmaktadır. Her iki deney setinde de gömülme derinliğinin artmasıyla borunun zemindeki yenilme yüzeyine etkisi azalırken, sıklığın artmasıyla birlikte yenilme yüzeyleri belirginleşmektedir.

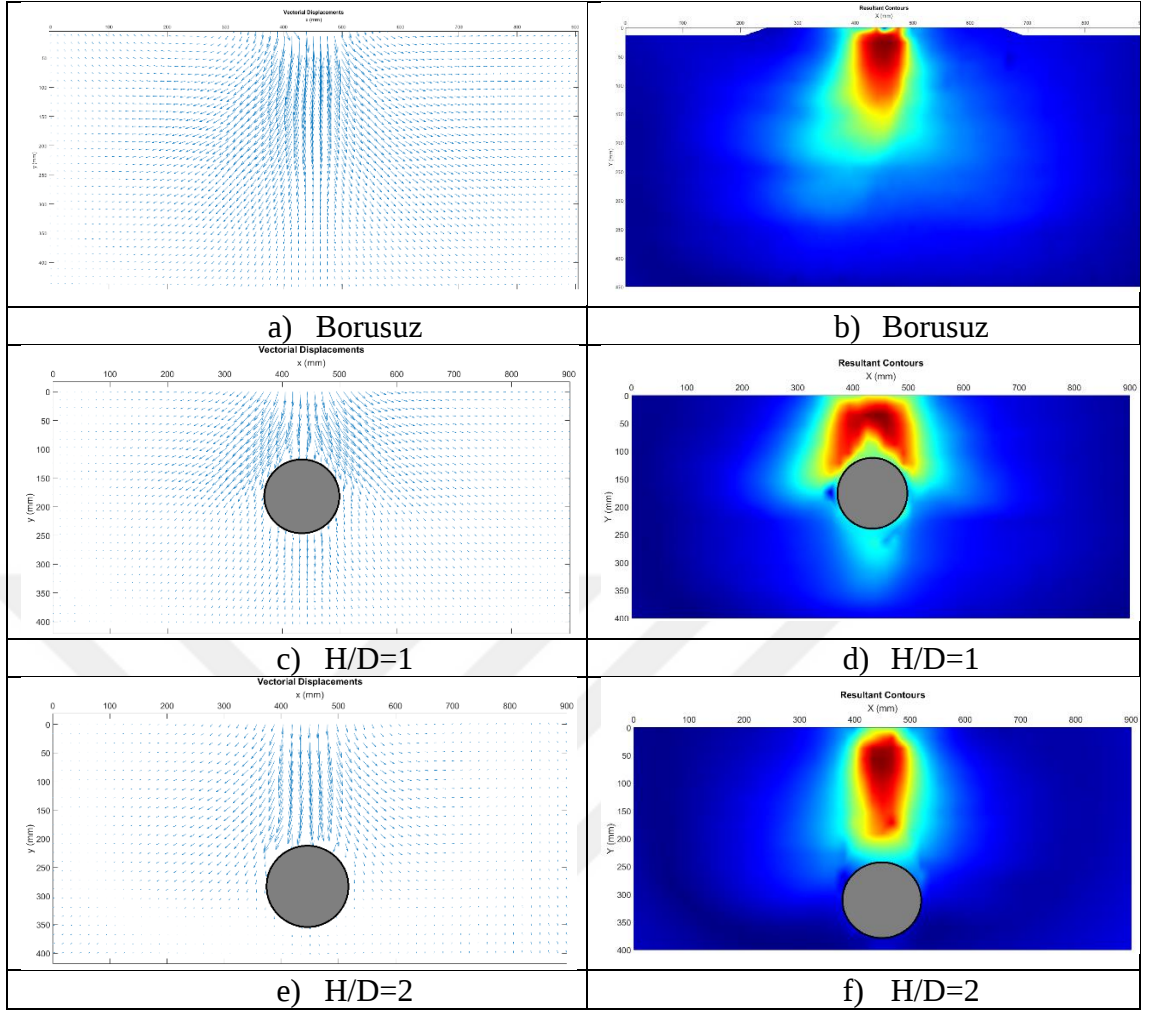


Şekil 51: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %35, D=75mm)

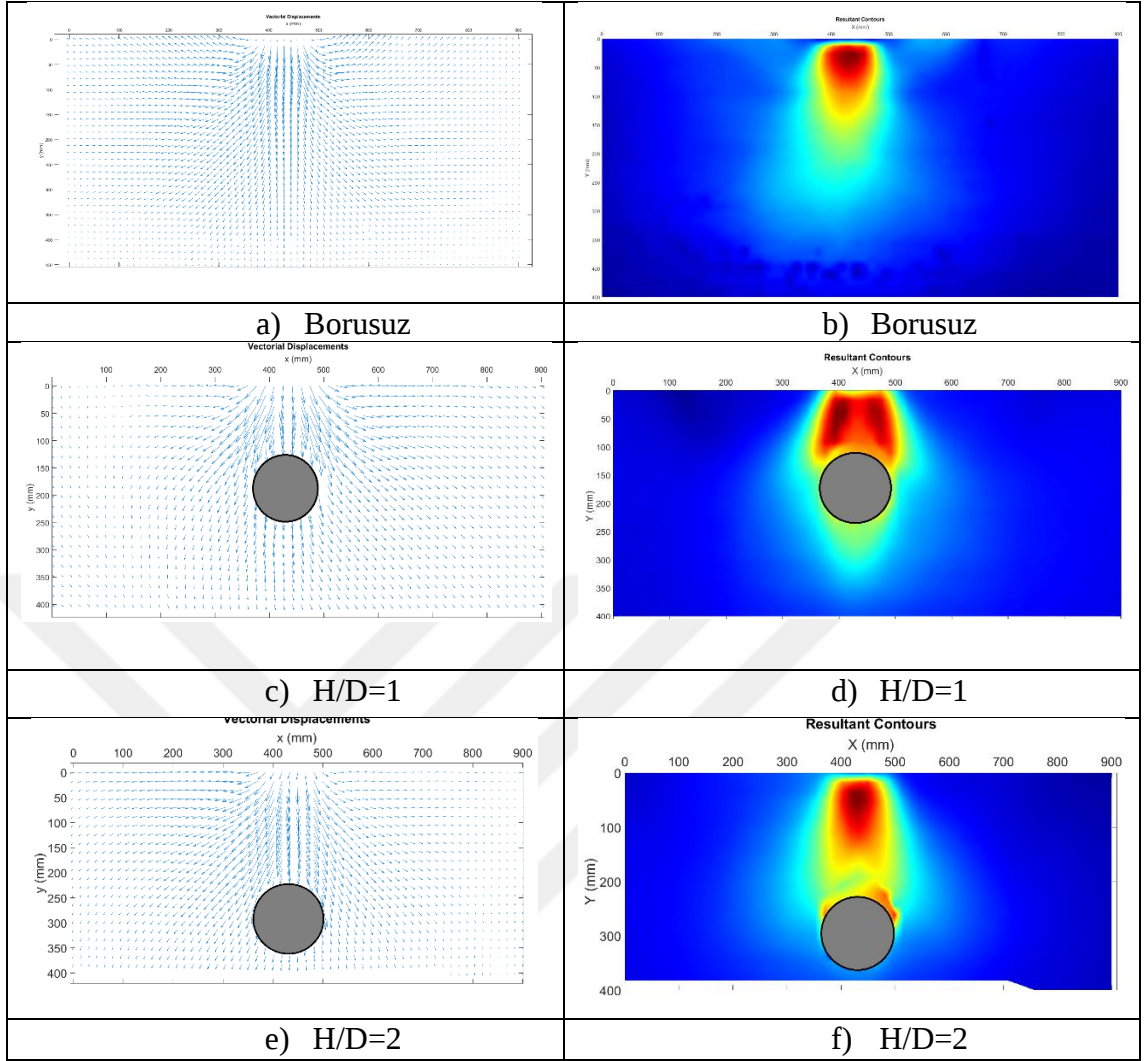


Şekil 52: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (D_r : %65, $D=75\text{mm}$)

D_r =%35 ve D_r =%65 kum sıkılıklarında $D=110\text{mm}$ çapındaki borularda yapılan deneylerden elde edilen göçme yüzeyleri Şekil 53 ve Şekil 54’te verilmektedir. Diğer çaptaki borularda yapılan deneylerde olduğu gibi 110mm’lik borularda da gömülme derinliğinin artmasıyla beraber boru zeminin göçme yüzeyinden uzaklaşmış ve zemindeki göçme mekanizmasına etkisi azalmıştır. H/D oranı arttıkça PIV analiz sonuçları borusuz durumdaki PIV sonuçlarına yaklaşmaktadır.



Şekil 53: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %35, D=110mm)



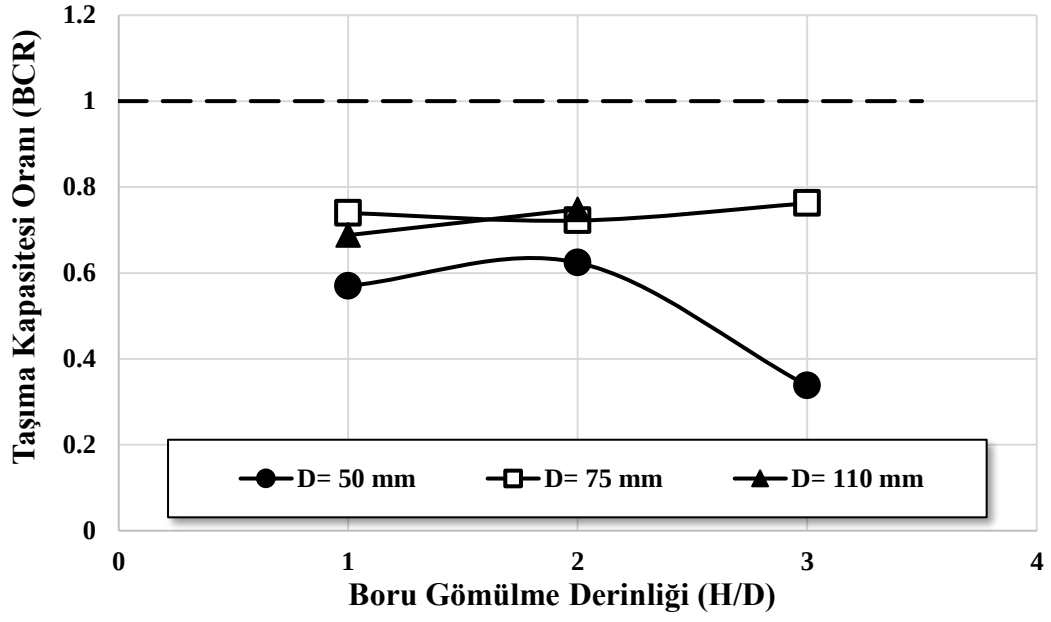
Şekil 54: Gömülme Derinliğinin Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %65, D=110mm)

3.4 Boru Çapının Etkisi

3.4.1 Boru Çapının Taşıma Kapasitesine Etkisi

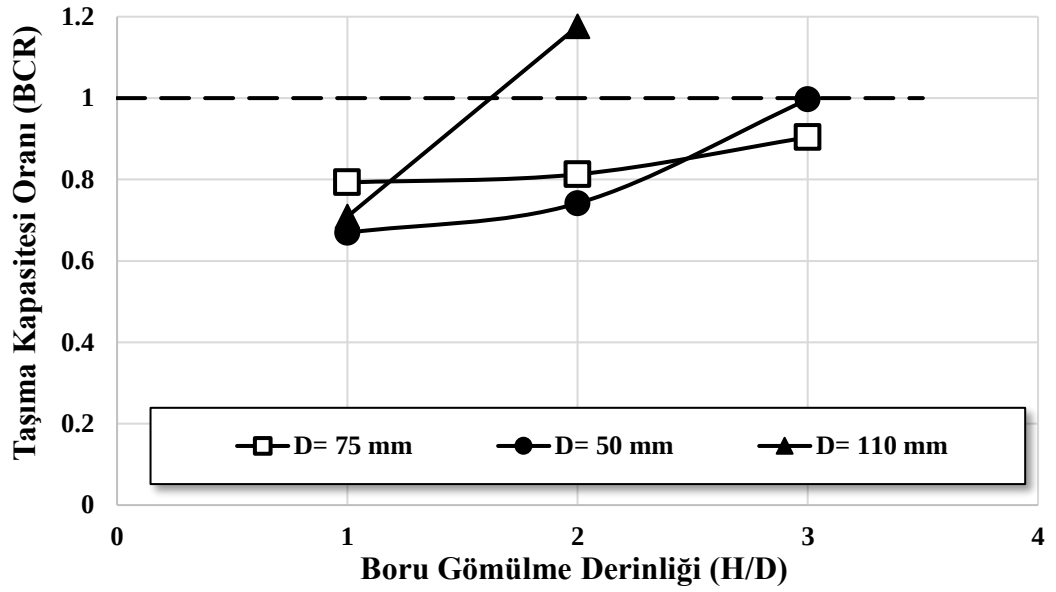
Model deneylerde boru çapının etkisini araştırmak amacıyla üç farklı çapta boru kullanılmıştır. Deney verilerinden elde edilen sonuçlarla taşıma kapasitesi oranları (BCR) hesaplanmıştır. Dr=%35 ve Dr=%65 zemin sıkılıkları için hesaplanan BCR eğrileri sırasıyla Şekil 55 ve Şekil 56’da verilmektedir.

Gevşek kumda yapılan deneylerde D=75mm ve D=110mm boru çaplarında elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. D=50mm durumunda daha düşük BCR değerleri elde edilmiştir. Boru çapının temel genişliğinden oldukça küçük olduğu durumlarda daha düşük yük değerlerinde göçme meydana gelmektedir.



Şekil 55: Farklı Boru Çapları için BCR'ın H/D ile Değişimi (Dr: %35)

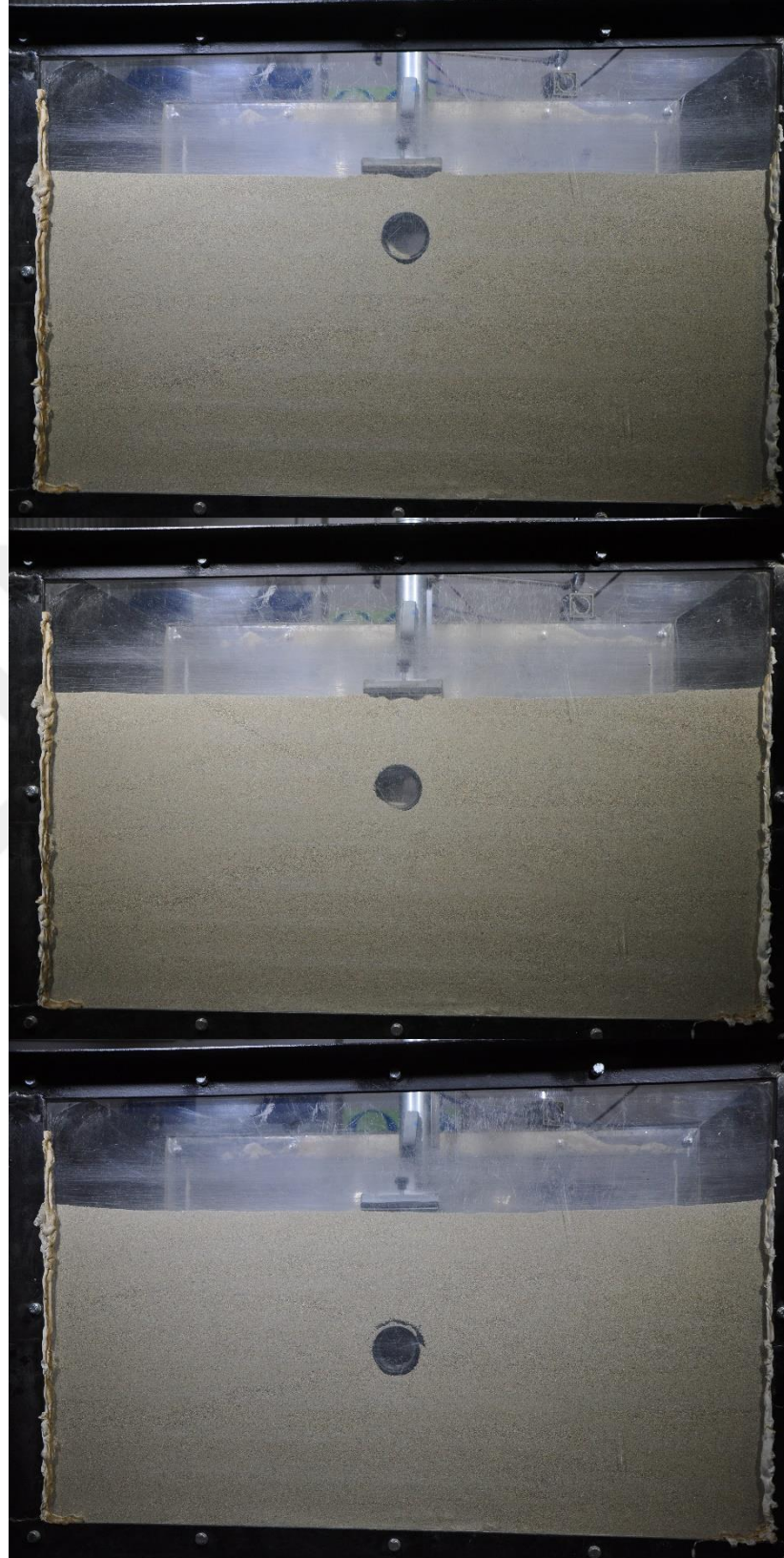
Sıkı kumda yapılan deneylerde D=50mm ve D=75mm çapındaki borulardan elde edilen BCR değerlerinin birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. H/D=3 oranındaki gömülme derinliğinde bu iki çaptaki boru, borusuz durumdaki taşıma kapasitesine ulaşırken, D=110mm çapındaki boru H/D=2 oranındaki gömülme derinliğinde borusuz durumdaki taşıma kapasitesini aşmıştır. Bu durum, boru çapının temel genişliğinden büyük olduğu deneylerde temele etki eden düşey yükün bir kısmının boru tarafından karşılandığını göstermektedir.



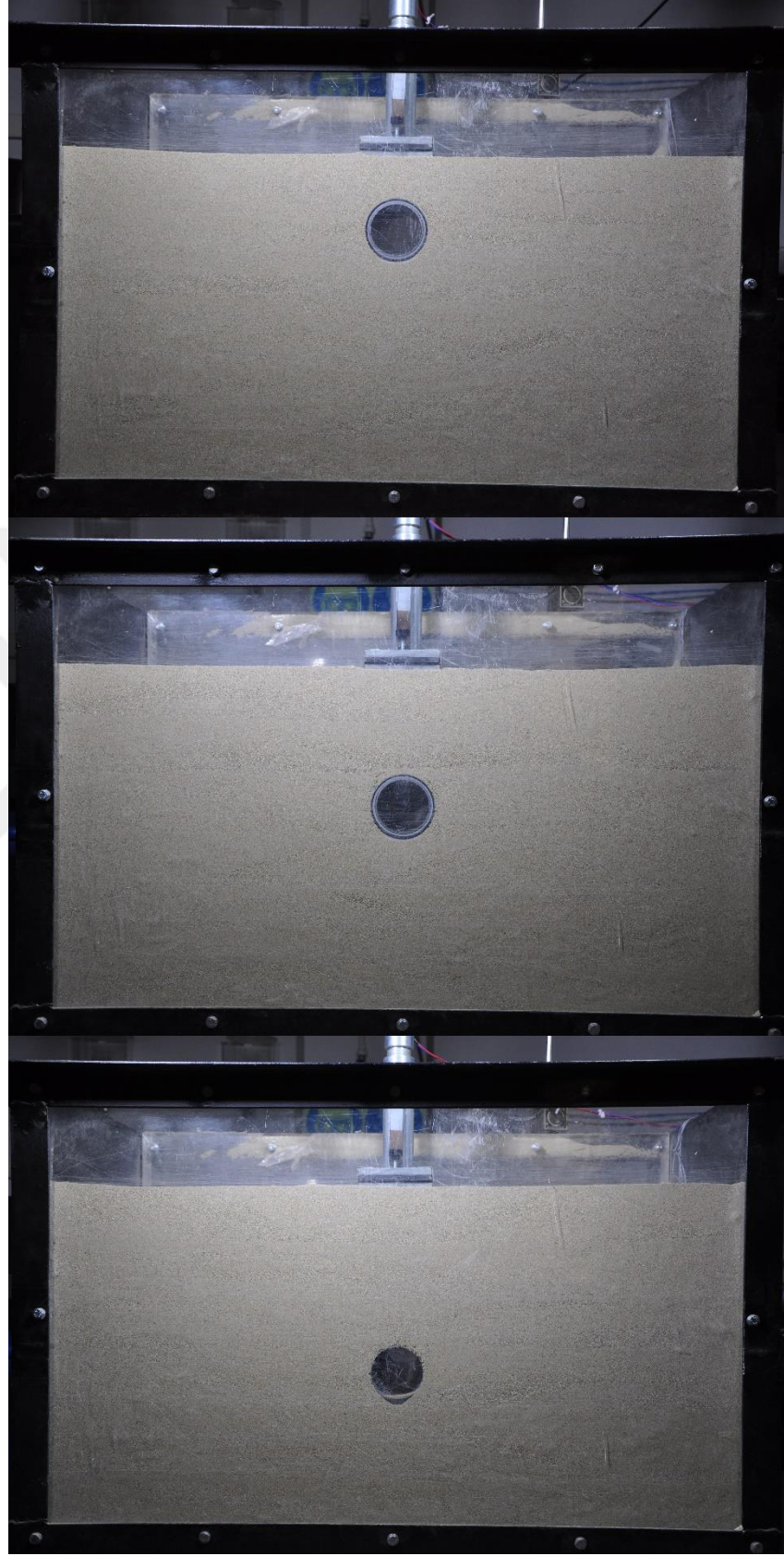
Şekil 56: Farklı Boru Çapları için BCR'ın H/D ile Değişimi (Dr: %65)

3.4.2 Boru Çapı Etkisinin PIV Yöntemi ile Değerlendirilmesi

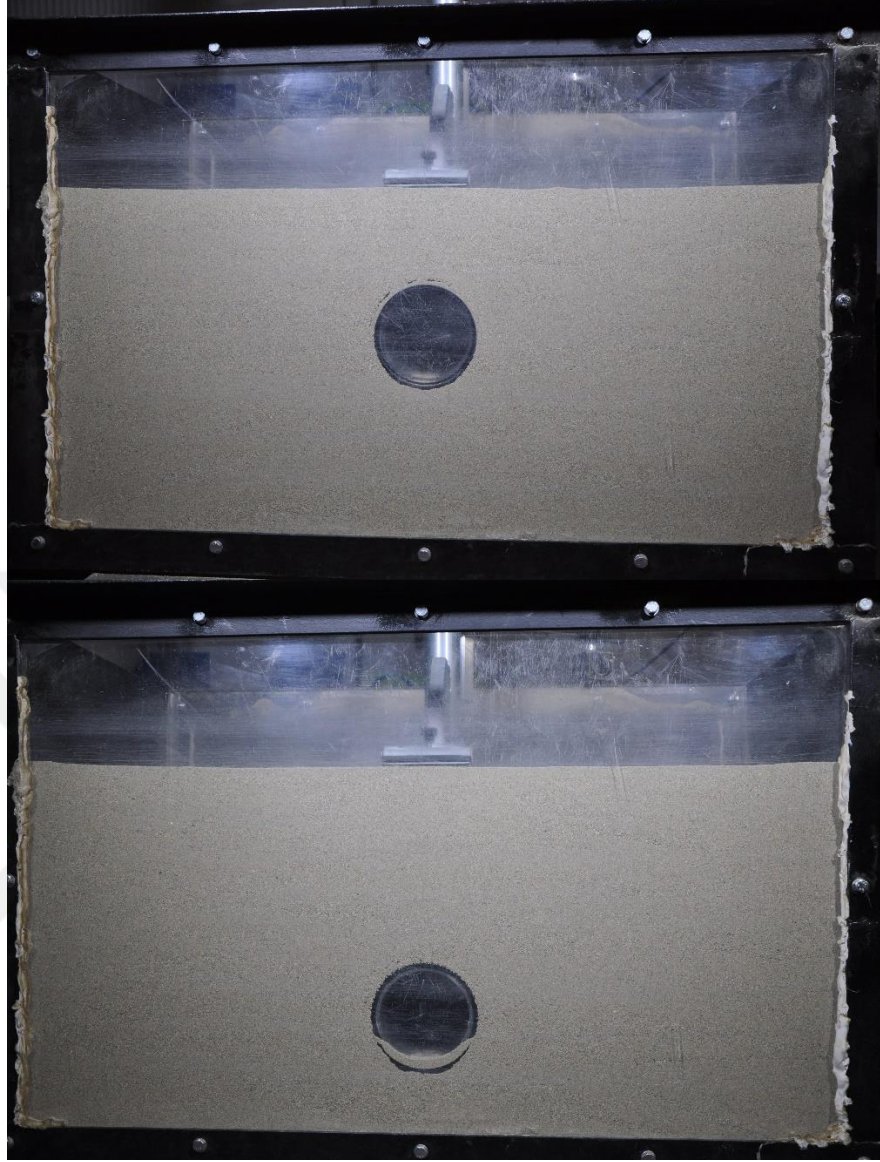
Bu bölümde çap etkisi, model deneyler esnasında çekilmiş fotoğraflar yardımıyla yapılan PIV analizleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 57- Şekil 62 arasında yapılan model deneylere ait deney düzenekleri fotoğrafları sunulmaktadır. Şekil 64, Şekil 65 ve Şekil 66'da $Dr=35\%$ kum sıkılığında, Şekil 67, Şekil 68 ve Şekil 69'da $Dr=65\%$ kum sıkılığında sırasıyla $H/D=1$, $H/D=2$ ve $H/D=3$ gömülme oranları için yapılan PIV analiz sonuçları verilmiştir. Verilen analiz sonuçlarında üç farklı boru çapının zeminin yenilme yüzeyine etkisi değerlendirilmiştir. Çap etkisini borusuz durumla karşılaştırmak amacıyla Şekil 63'te borusuz durumda yapılan PIV analiz çıktıları verilmektedir.



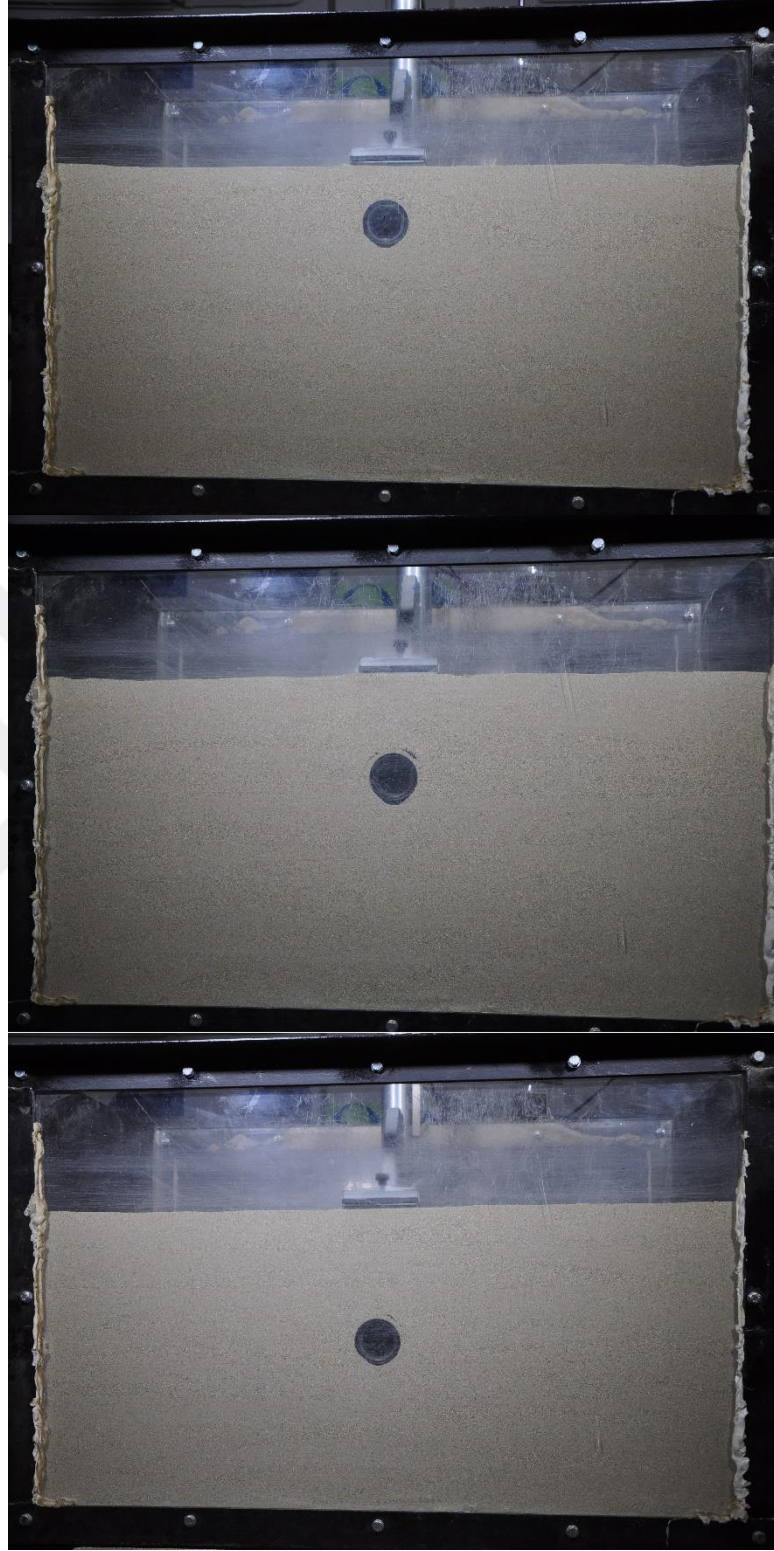
Şekil 57:Dr: %35 için D=50mm Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri (H/D=1, 2 ve 3)



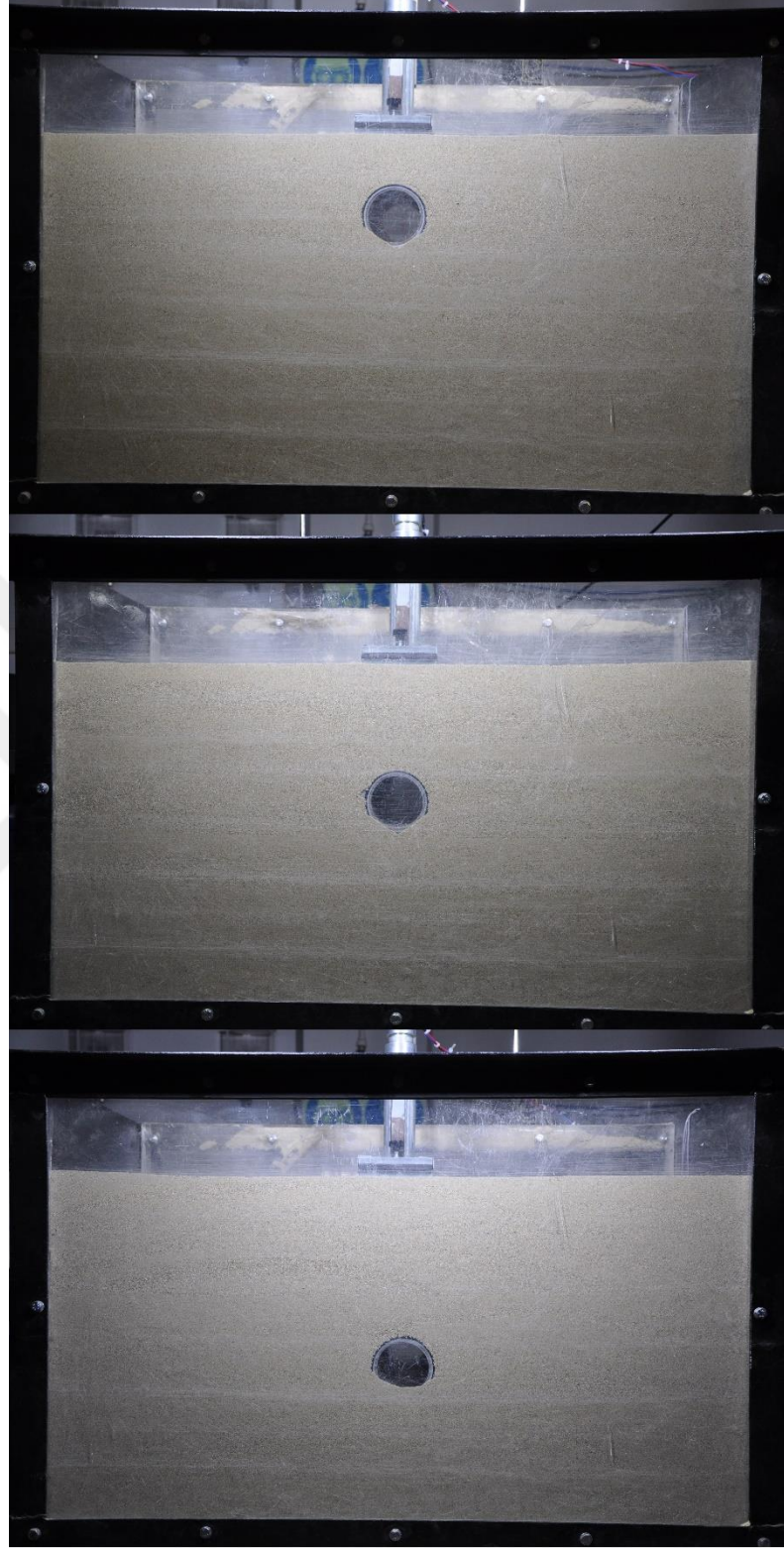
Şekil 58:Dr: %35 için $D=75\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1, 2$ ve 3)



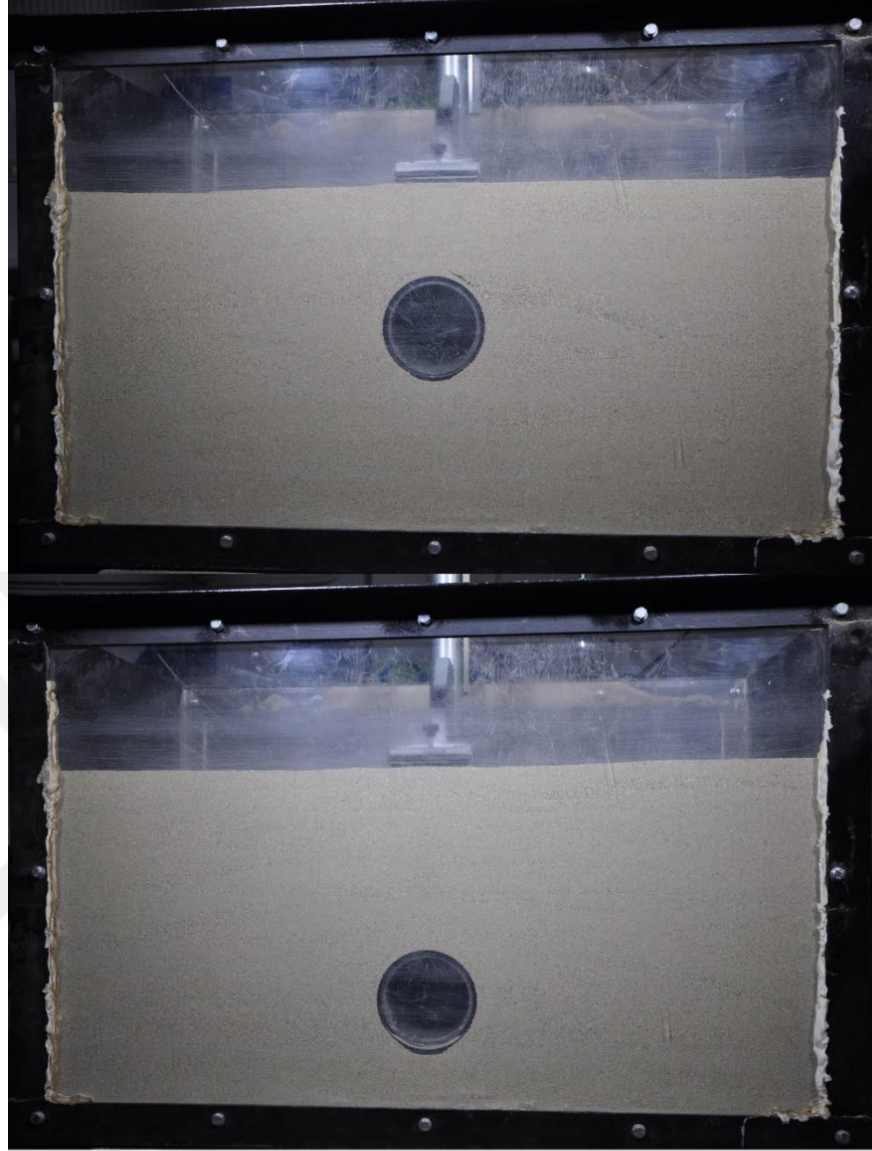
Şekil 59: Dr: %35 için $D=110\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1$ ve 2)



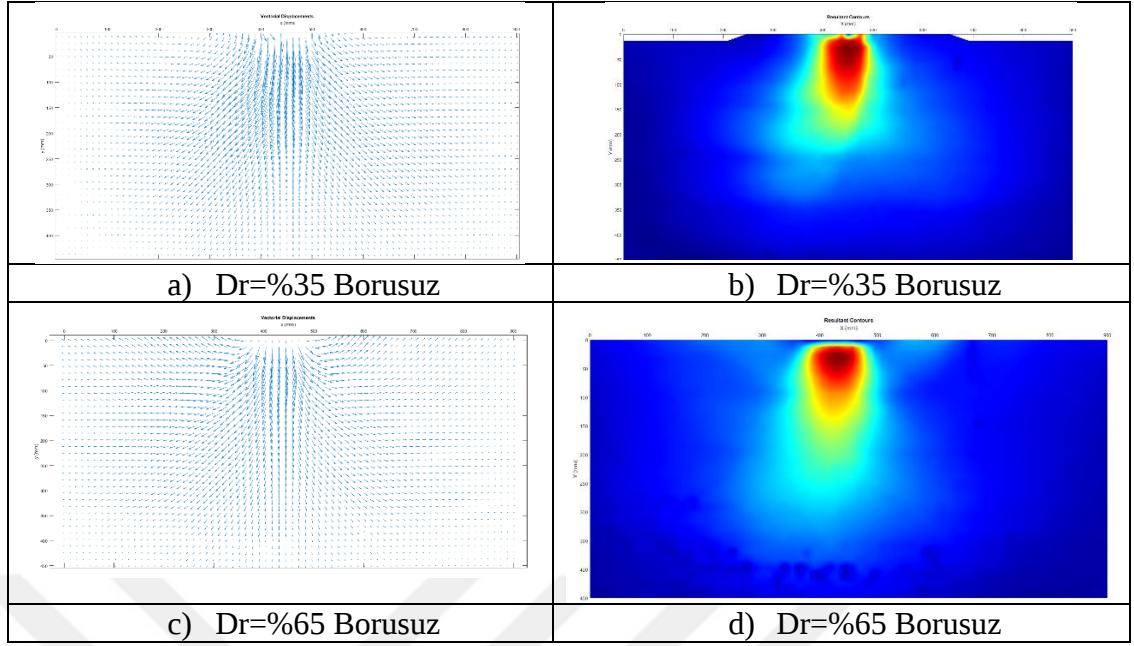
Şekil 60:Dr: %65 için $D=50\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1, 2$ ve 3)



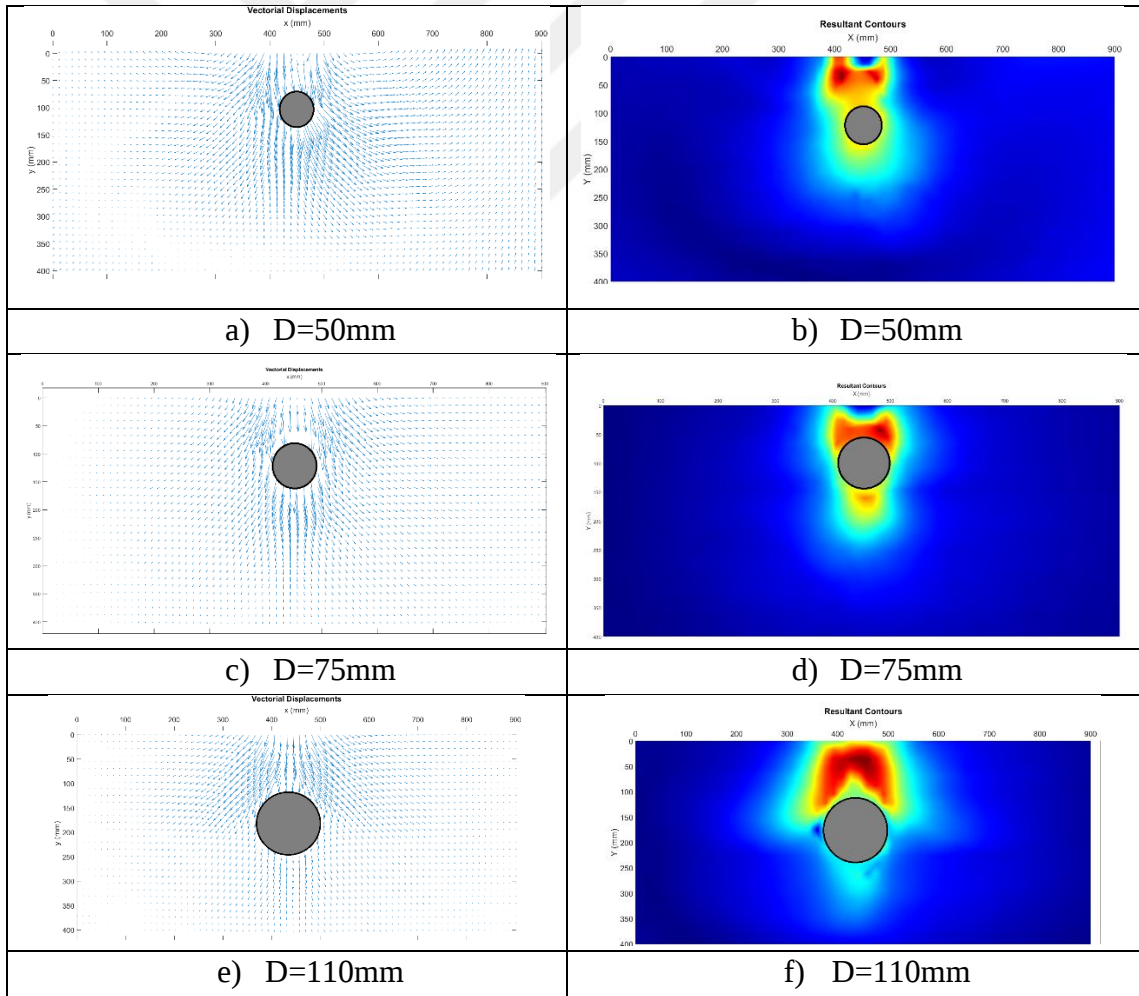
Şekil 61:Dr: %65 için $D=75\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1, 2$ ve 3)



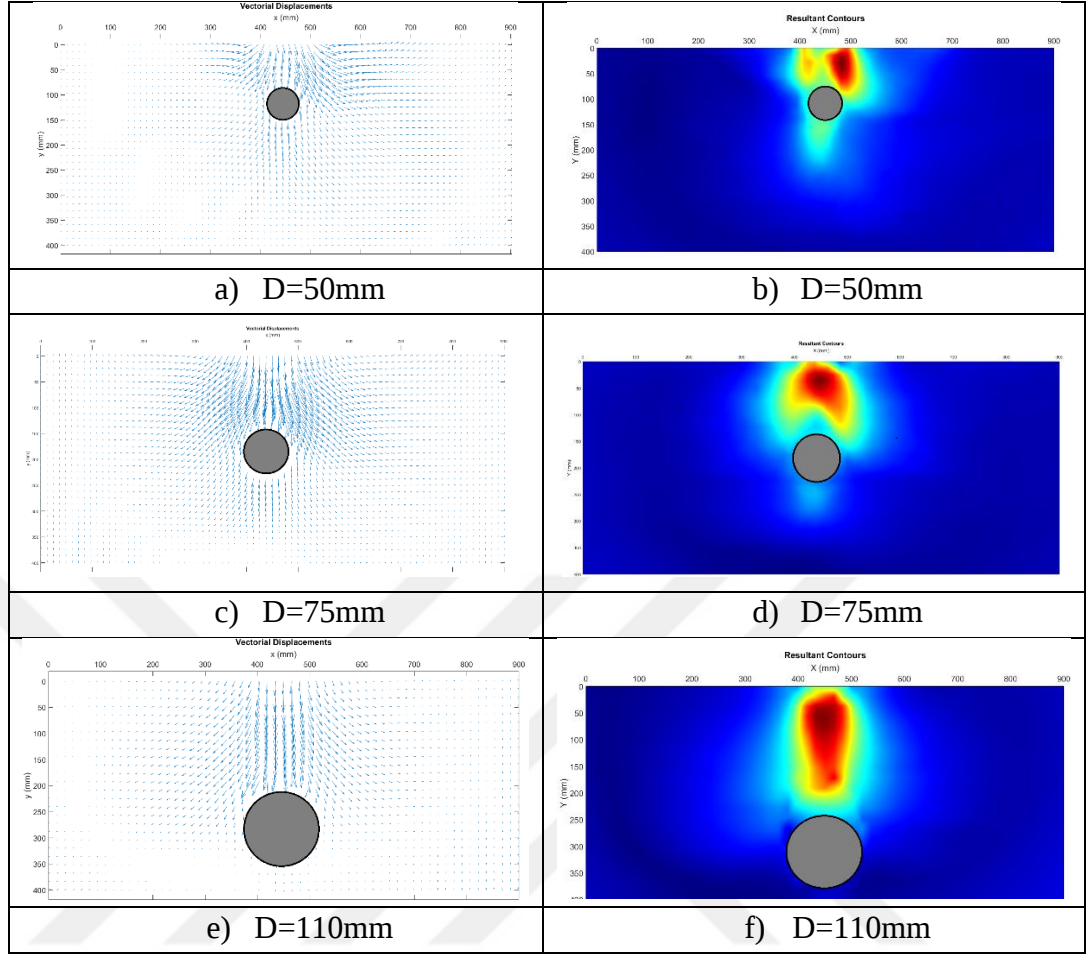
Şekil 62: Dr: %65 için $D=110\text{mm}$ Çapındaki Boruda Deney Düzenekleri ($H/D=1$ ve 2)



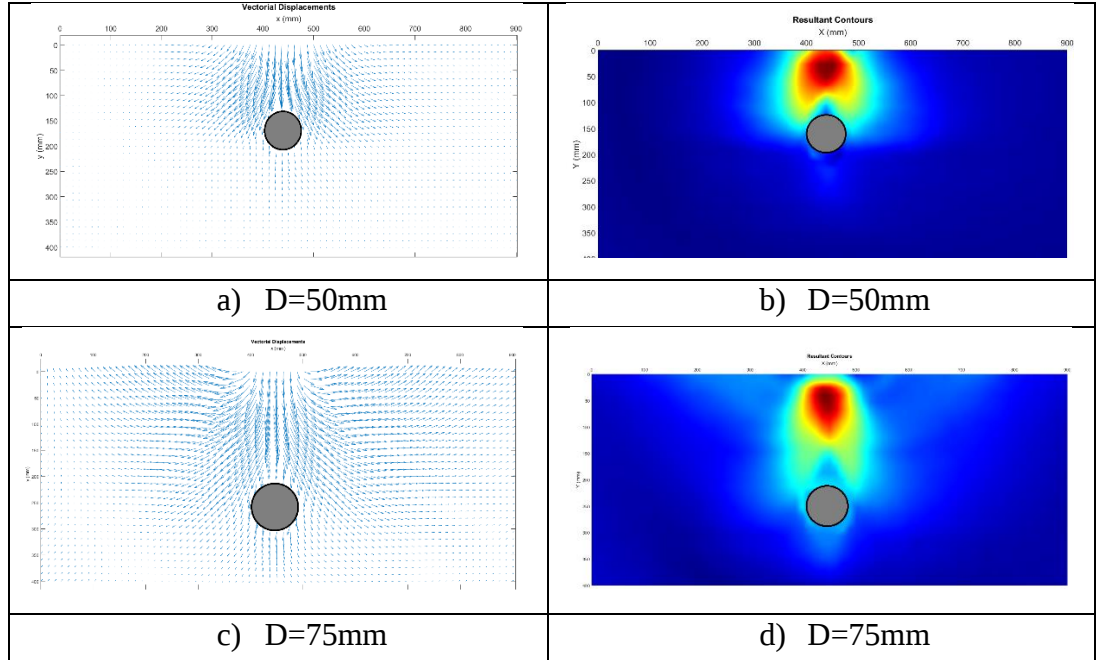
Şekil 63: Borusuz Durumda PIV Çıktıları



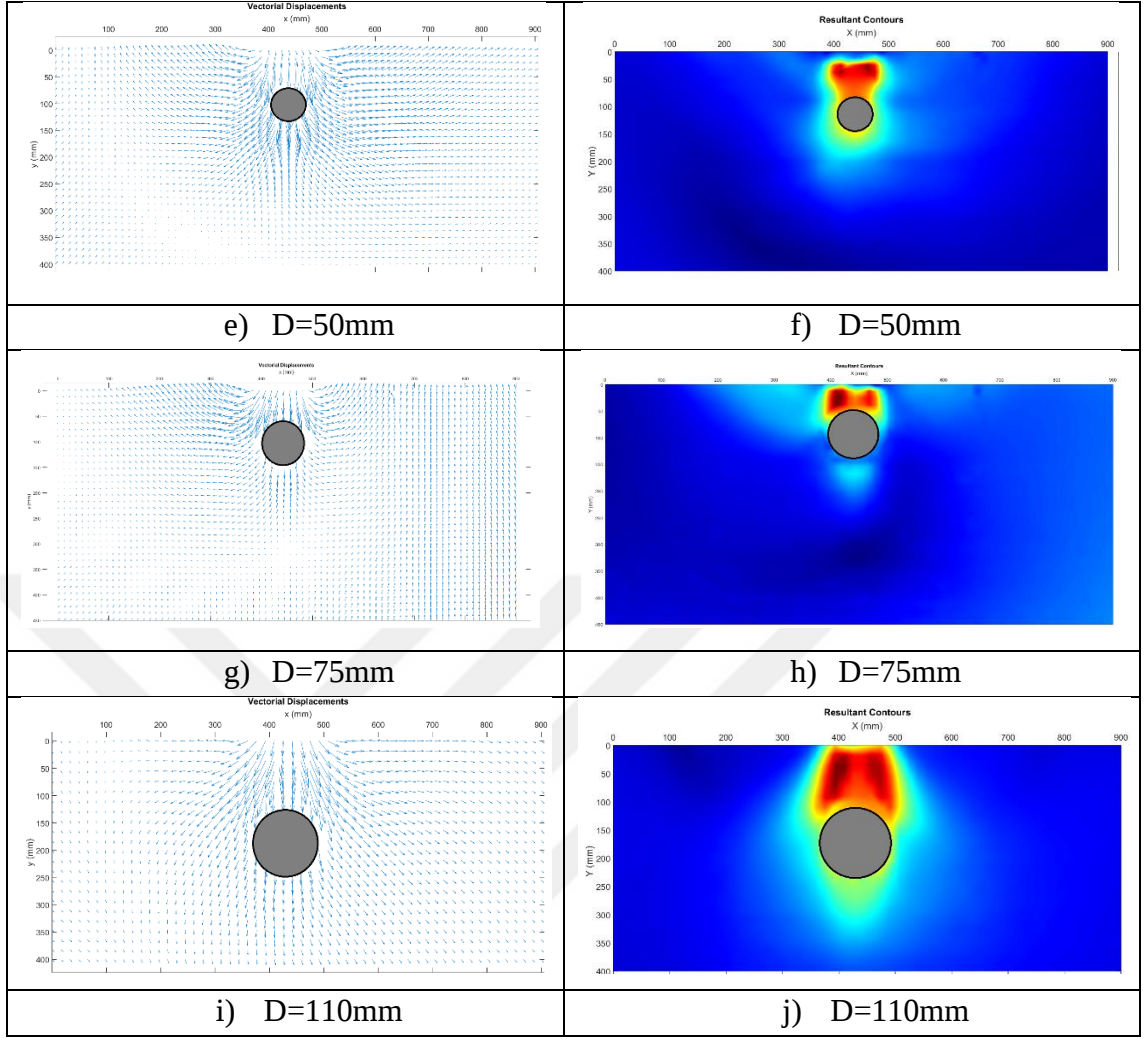
Şekil 64: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi ($Dr=35\%$, $H/D=1$)



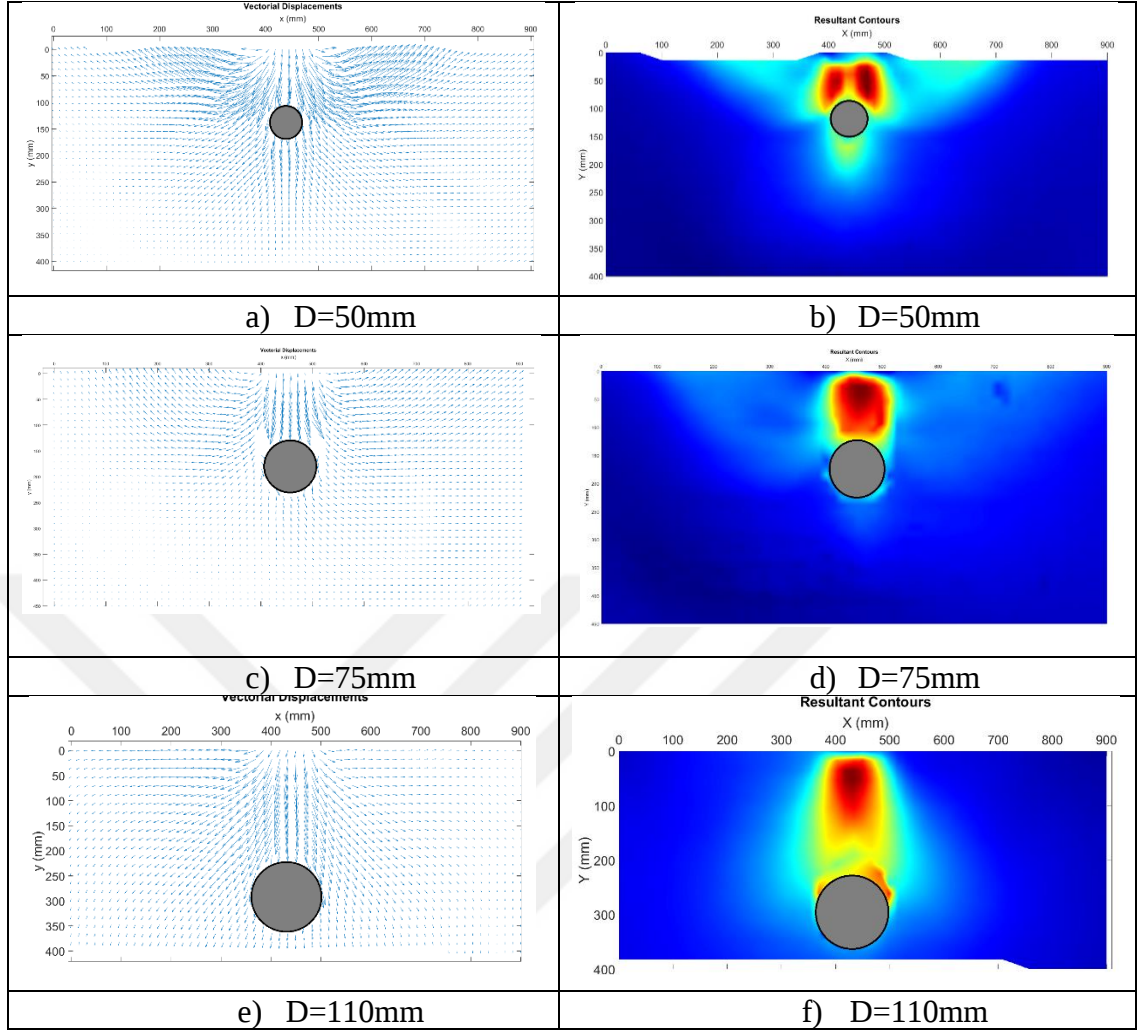
Şekil 65: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %35, H/D=2)



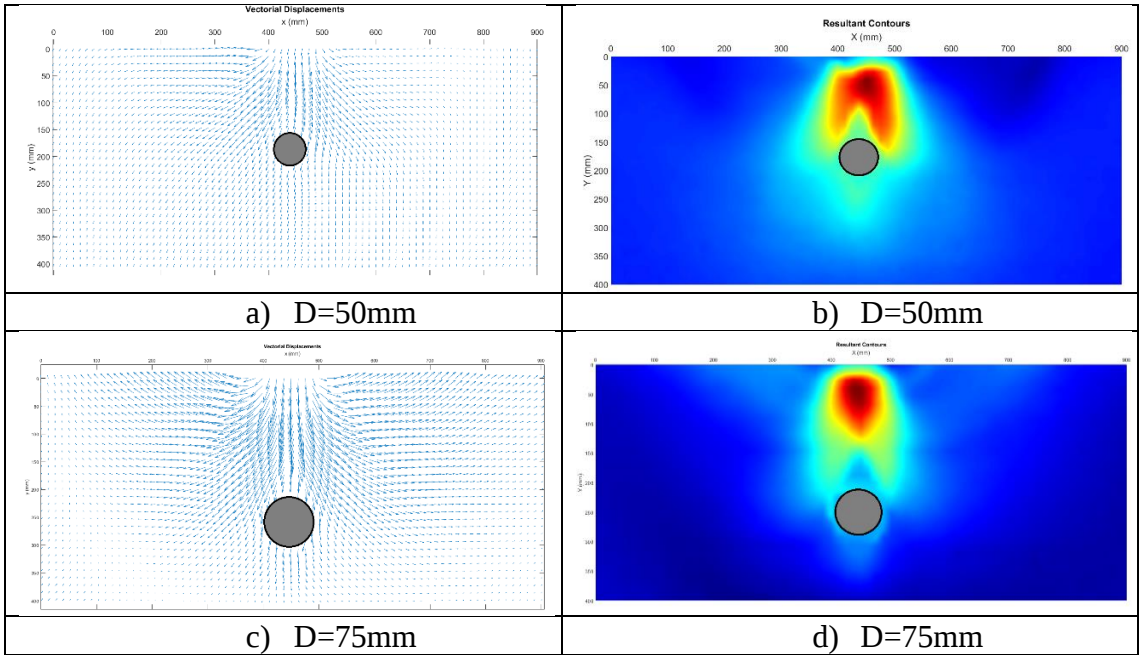
Şekil 66: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %35, H/D=3)



Şekil 67: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %65, H/D=1)



Şekil 68: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %65, H/D=2)



Şekil 69: Boru Çapının Göçme Mekanizmasına Etkisi (Dr: %65, H/D=3)

BÖLÜM 4: TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kum zemine gömülü boruların statik yükler altındaki davranışını araştırmak amacıyla model deneyler yapılmıştır. Deneylerde borunun kum zemin içerisindeki gömülme derinliği, boru çapı ve kumun sıklık parametrelerinin zeminin taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Yapılan model deneylerden yük-deplasman eğrileri ve borudaki gerilme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca model deneyler esnasında çekilen fotoğraflar ile PGHÖ analizleri yapılarak zemindeki göçme yüzeyleri belirlenmiştir. Model deneyler ve PGHÖ yöntemi analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

1. $D_r=35\%$ zemin sıklığında BCR değeri $H/D=2$ değerine kadar yükselirken gömülme derinliğinin daha da artmasıyla BCR değerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Fakat $D_r=65\%$ zemin sıklığında yapılan deneylere bakıldığında gömülme derinliğinin artmasıyla birlikte BCR değerinin arttığı ve $H/D=3$ durumunda taşıma kapasitesinin borusuz durumdaki değere ulaştığı görülmektedir. 35% kum sıklığında BCR değerindeki ani düşüş, temel ile boru arasındaki zeminin taşıma gücüne doğrudan etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda $D=50$ mm çapındaki borularda gömme derinliğinin artması ile zemin yoğunluğu davranışı etkilemektedir.
2. $D=75$ mm çapındaki boru için üç farklı gömülme derinliği 35% ve 65% zemin sıklıklarında incelenmiştir. $D=75$ mm durumunda her iki sıklıkta gömülme derinliği arttıkça BCR değerinin arttığı görülmektedir. Bu değer artışı her iki sıklıkta benzer davranış göstermiştir.
3. Boru çapının $D=110$ mm olması durumunda gömülme derinliğinin artmasıyla beraber BCR değeri artmaktadır. 65% zemin sıklığında $H/D=2$ durumu incelendiğinde BCR değerinin borusuz durumdaki değerin üzerine çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni, düşey yüklemde boru çapının temel genişliğinden büyük olması nedeniyle düşey yöndeki yüklerin bir kısmının boru tarafından taşınmasıdır. Ayrıca BCR değerinin 1'in üzerine çıkması, borunun kasa tabanına çok yakın mesafede olması nedeniyle boru gelen gerilmeleri doğrudan rijit tabana aktarmakta bu durum da borunun rijit zemine oturmasıyla benzer davranış göstermektedir.

4. Borudaki gerilme değerleri kum sıklılığı açısından değerlendirildiğinde; kum sıklılığının artması ile zeminin taşıma kapasitesi arttığından borudaki gerilmelerin arttığı görülmüştür.
5. $D=50\text{mm}$ çapındaki boruda, gevsek kumda gömülme derinliği arttıa borudaki gerilmenin azaldığı, boru $H/D=3$ konumuna geldiğinde gerilmenin sıfıra yaklaştığı görülmektedir bununla birlikte $Dr=\%65$ zemin sıklılığında borudaki gerilme $H/D=2$ gömülme derinliğinde azalırken, $H/D=3$ gömülme derinliğinde artmıştır.
6. Sıkı kumda kum daneleri arasındaki temas yüzeyi daha fazla olduğundan, zemin yüzey gerilmelerini daha fazla iletebilmektedir. $D=75\text{ mm}$ çapındaki boru incelendiğinde sıkı kumda yapılan deneylerde borudaki gerilmelerin gevsek kumda yapılan deneylerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla beraber gevsek ve sıkı kumlarda yapılan model deneylerde gömülme derinliğinin artmasıyla beraber borudaki gerilmelerin azaldığı sonucuna varılmıştır.
7. $D=110\text{mm}$ çapındaki boruda yapılan model deneylerde gevsek kumda gömülme derinliğinin artmasıyla beraber gerilmelerin azaldığı gözlenmektedir. Sıkı kumda yapılan deneylerde H/D oranı arttıa boru gerilmesinin arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi boru çapının belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla birlikte borunun da bir miktar yk taşımasıdır.
8. Gömülme derinliğinin etkisi PIV sonuçları ile değerlendirildiğinde $Dr=\%35$ kum sıklılığında, $D=50\text{mm}$ çapındaki boruda H/D oranı arttıa zemindeki boru etkisinin azaldığı görülmüştür. $Dr=\%65$ zemin sıklılığı için $D=50\text{mm}$ çapındaki boruda yapılan deneyler de benzer sonuçlar vermektedir. Sıkı kumda zemin yoğunluğunun artmasıyla birlikte yenilme yüzeyleri daha belirgin hale gelmiştir.
9. $D=75\text{mm}$ çaplı borularda $Dr=\%35$ ve $Dr=\%65$ kum sıklılığında yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde her iki deney setinde gömülme derinliğinin artmasıyla borunun zemindeki yenilme yüzeyine etkisi azalırken, bir önceki deney setinde olduğu gibi sıklılık etkisi ile yenilme yüzeyleri belirginleştiği görülmüştür.
10. $Dr=\%35$ ve $Dr=\%65$ kum sıklılıklarında $D=110\text{mm}$ çapındaki borularda yapılan deney setlerinden elde edilen göçme yüzeyleri karşılaştırıldığında diğer deney

setlerinde olduğu gibi 110mm'lik borularda da gömülme derinliğinin artmasıyla beraber boru zeminin göçme yüzeyinden uzaklaşmış ve zemindeki göçme mekanizmasına etkisi azalmıştır. H/D oranı arttıkça PIV analiz sonuçları borusuz durumdaki PIV sonuçlarına yaklaşmaktadır.

11. Gevşek kumda yapılan deneylerde $D=75\text{mm}$ ve $D=110\text{mm}$ boru çaplarında elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. $D=50\text{mm}$ durumunda daha düşük BCR değerleri elde edilmiştir. Boru çapının temel genişliğinden oldukça küçük olduğu durumlarda daha düşük yük değerlerinde göçme meydana gelmektedir.
12. Sıkı kumda yapılan deneylerde $D=50\text{mm}$ ve $D=75\text{mm}$ çapındaki borulardan elde edilen BCR değerlerinin birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. $H/D=3$ oranındaki gömülme derinliğinde bu iki çaptaki boru, borusuz durumdaki taşıma kapasitesine ulaşırken, $D=110\text{mm}$ çapındaki boru $H/D=2$ oranındaki gömülme derinliğinde borusuz durumdaki taşıma kapasitesini aşmıştır. Bu durum, boru çapının temel genişliğinden büyük olduğu deneylerde temele etki eden düşey yükün bir kısmının boru tarafından karşılandığını göstermektedir.

4.1 Öneriler

1. Yapılan model deneyler 3 boyutlu bilgisayar programları kullanılarak kapsamlı şekilde araştırılabilir.
2. Deneyler kum zeminde yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı zeminlerdeki davranışı belirlemek için kil zeminde deneyler yapılabilir.
3. Daha büyük ölçekte deneyler yapıp boyut etkisi araştırılabilir.
4. Farklı malzemedeki borular kullanılarak malzeme parametrelerinin etkisi araştırılabilir.
5. Model deneyler statik yükler altında yapılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda dinamik yükler kullanılarak depremlı durumdaki boru davranışı incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Ansari, Y., Kouretzis, G. & Sloan, S. W. (2021). Physical Modelling of Lateral Sand–Pipe Interaction. *Géotechnique*, 71(1), 60-75.
- Ayalp, Ö.G. (2006). *Gömülü Borulara Etkiyen Zemin Yüklerinin Bulunması*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Anabilim Dalı.
- Burns, J. Q. & Richard, R. M. (1964). Attenuation of Stresses Forburied Cylinders. *Proceedings of the Symposium on Soil-Structure Interaction, Arizona Üniversitesi*, 379-392.
- Cho S. (2003). *Behaviour of Flexible Plastic Pipes with Flowable Backfill in Trench Conditions*. Houston/USA: Phd Thesis. University of Houston.
- Duan, X. F., Wang, Y. Z., & Yuan, X. M. (2019). State of the Art Review of Particle Image Velocimetry (PIV) in Geotechnical Engineering. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering (AMMMS)*. doi, 10.
- Elshesheny, A., Mohamed, M., & Sheehan, T. (2019). Buried Flexible Pipes Behaviour in Unreinforced and Reinforced Soils Under Cyclic Loading. *Geosynthetics International*, 26(2), 184-205.
- Ghalehjough, B.K., S. Akbulut and S. Celik, (2018). Effect of Particle Roundness and Morphology on the Shear Failure Mechanism of Granular Soil under Strip Footing. *Acta Geotechnica Slovenica*, 15(1), 43-53.
- Grant, I. (1997). Particle Image Velocimetry: A review. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 211(1), 55–76.
- Hoeg, K., (1966). Pressure Distribution on Underground Structural Cylinders. *Technical Report No. AFWL TR 65-98, Kirtland Air Force Base /ABD*.
- Howard, A., (1996). Pipeline Installation: A Manual for Construction of Buried Pipe. *Relativity Pub., Lakewood*.

Jeyapalan, J.K. & Hamida, H.B., (1988). Comparison of German to Marston Design Method. *Journal of Transportation Engineering*, 114, 420-435.

Marston, A. and Anderson, A.O., (1913). The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe. *Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, Bulletin* 31, Volume XI.

Mcgrath. T., (1998). *Pipe Soil Interaction During Backfill Placement*. Ph.D. Thesis. Amherst/USA: University of Massachusetts.

Moser, A. P., (2001). *Buried Pipe Design*, McGraw-Hill, New York, 2nd Edition.

Moser, A.P. & Folkman, S., (2008). *Buried Pipe Design*. 3rd Edition. Mc GrawHill Press, USA.

Ono, K., Yokota, Y., Sawada, Y., & Kawabata, T. (2018). Lateral Force–Displacement Prediction for Buried Pipe Under Different Effective Stress Condition. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(4), 420-428.

Selig, E.T., DiFrancesco, L.C, and McGrath T.J (1993). Laboratory Tests of Buried Pipe in Hoop Compression. *Buried Plastic Pipe Technology* ASTM STP 1222 Philadelphia/ABD. 119-132.

Spangler, M.G. (1941). Structural Design of Flexible Pipe Culverts Bulletin No 153. *Iowa Engineering Experiment Station, Ames Iowa/ABD*.

Spangler, M.G. (1966). *Soil Engineering*. Scranton/USA: International Textbook Company.

Stanier, S. A., Blaber, J., Take, W. A. & White, D. J. (2016). Improved Image-Based Deformation Measurement for Geotechnical Applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(5), 727-739.

Tafreshi, S. M. & Khalaj, O. (2011). Analysis of Repeated-Load Laboratory Tests on Buried Plastic Pipes in Sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(1), 1-15.

Terzi, N.U. (2007). *Gömülü Borulara Etkiyen Düşey ve Yatay Yüklerin Boru Stabilitesine Olan Etkilerinin Araştırılması*. Doktora Tezi. İstanbul: YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 260.

Wang, D. Y., Zhu, H. H., Wang, B. J., & Shi, B. (2021). Performance Evaluation of Buried Pipe Under Loading Using Fiber Bragg Grating and Particle Image Velocimetry Techniques. *Measurement*, 186, 110086.

Watkins, R.K. and Spangler, M.G. (1958). Some Characteristics of the Modulus of Passive Resistance of Soil: A Study of Similitude. *Highway Research Board Proceedings*, 37, 576-583.

White, D., Take, W. and Bolton, M. (2003). Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry. *Geotechnique*, 53, 619–631.

Won, M.S., Ling H.I. and Kim H.I. (2004). A Study of the Deformation of Flexible Pipes Buried under Model Reinforced Sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 8, 377-385.

Wu, J., Kouretzis, G. & Suwal, L. (2021). Bearing Capacity Mechanisms for Pipes Buried in Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(6), 834-847.

Zhuang, P. Z., Yue, H. Y., Song, X. G., Yang, H. & Yu, H. S. (2021). Uplift Behavior of Pipes and Strip Plate Anchors in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 04021126.