

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU ZEMİNLERE OTURAN KIYI YAPISI TEMELLERİNİN
TASARIMINDA YENİ YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Rıza Evren KILCI

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

MAYIS 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU ZEMİNLERE OTURAN KIYI YAPISI TEMELLERİNİN
TASARIMINDA YENİ YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Rıza Evren KILCI
(517102003)**

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA

MAYIS 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 517102003 numaralı Doktora Öğrencisi Rıza Evren KILCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DOLGU ZEMİNLERE OTURAN KIYI YAPISI TEMELLERİNİN TASARIMINDA YENİ YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hayrullah AĞAÇCIOĞLU**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar BEJİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Cihan ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 19 Nisan 2019
Savunma Tarihi : 28 Mayıs 2019





Eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

Doktora programının her aşamasında her daim sonsuz desteklerini yanımda hissettiğim sevgili eşime, biricik oğluma, değerli anne ve babama tüm kalbi duygularıyla teşekkür ederim. Bu süreçte bilgisiyle bana ışık tutan, emektar, çok değerli hocam Sn. Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA'ya özel olarak teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmak isterim. Jüri üyesi değerli hocalarıma, Dr. Öğr. Üyesi Taylan BAGCI'ya, bu tez çalışmasında emeği geçen herkese yine teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Nisan 2017

Rıza Evren KILCI
(İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
DOLGU ZEMİNLERE OTURAN KIYI YAPISI TEMELLERİNİN TASARIMINDA YENİ YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ	xxvii
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY.....	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Tezin Konusu ve Kapsamı	2
1.3 Literatür Araştırması	3
2. DENİZ VE KIYI YAPILARI	15
2.1 Açık Deniz Rüzgar Enerjisinin Türkiye ve Dünyada Yeri	16
2.2 Açık Deniz Rüzgâr Türbini Bileşenleri	21
2.3 Açık Deniz Rüzgâr Türbini Temellerinin Genel Tasarımı ve Türbin Üzerine Etkileyen Yükler	22
2.4 Açık deniz rüzgar türbini temel çeşitleri	24
2.4.1 Tekil kazık temeller (Monopiles)	25
2.4.2 Üç ayaklı kazık temeller (Tripods).....	26
2.4.3 Makas kule (Jacket)	26
2.4.4 Ağırlık temelleri (Gravity – based structures).....	26
2.4.5 Kova temeller (Bucket).....	26
2.4.6 Yüzer temeller (Floaters)	26
3. TÜRBİN TEMELLERİNİN TASARIMINDA OYULMA VE SIVILAŞMA OLGULARININ TANIMI İLE KIYI YAPILARI AÇISINDAN ÖNEMİ	29
4. BORULANMA OLGUSUNUN TANIMI VE KORUMA TABAKASI STABİLİTESİ AÇISINDAN İNCELENMESİ.....	41
4.1 Borulanmanın Mekanizması ve Deniz Yapılarının Stabilesine Etkileri	42
4.2 Boşluklu Ortamda Permanan Olmayan Tek Boyutlu Akımların İncelenmesi..	55
4.3 Dışa doğru basınç gradyanı etkisindeki eğimli yüzeyde kuvvet dengesi ve su ile tane karışımının bir bütün olarak borulanma başlangıç kriterinin türetilmesi ...	64
4.3.1 Filtre Tabakasız Eğimli Yüzeydeki Zemin Parçası Üzerinde Kuvvet – Denge Denklemleri	64
4.3.2 Filtre Tabakasıyla Korunan Eğimli Yüzeydeki Zemin Parçası Üzerinde Kuvvet – Denge Denklemi	69

4.3.3 Mevcut Sonuçlar ile Permanan Durumdaki Borulanma Kriterlerinin Karşılaştırılması.....	72
4.3.4 Minimum Boyutsuz Filtre Tabaka Kalınlığının Türetilmesi Ve Parametrik Çalışma Sonuçları.....	74
4.5 Zemin Elemanı İçindeki Boşluk Suyunun Hareket Denklemi	82
4.6 Zemin Elemanı İçindeki Katı Tane Topluluğunun Hareket Denklemi	83
4.7 Zemin Elemanının bir Bütün Halinde Hareket Etmesi Durumu için Denklemlerin Kontrolü	84
4.8 Permanan Olmayan Basınç Gradyanı Altında Borulanma Modelinin Uygulanması.....	85
5. SALINIMLI BASINÇ GRADYANI ALTINDA BORULANMA MEKANİZMASI DENEYLERİ	87
5.1 Borulanma Mekanizması Deney Düzenegi	87
5.2 Borulanma Deneylerinde Kullanılan Zeminin Özellikleri	91
5.3 Salımlı Basınç Gradyanı Altında Borulanma Deneyi Prosedürü	91
5.4 Kararsız Borulanma Üzerinde Deney Sonuçları.....	92
5.4.1 Orta kalınlıktaki kum numuneleri deneyleri.....	93
5.4.2 Çakıl numunesi deneyleri	98
5.4.3 Siltli ince kum numunesi deneyleri.....	101
5.5 Kararsız Borulanma Üzerinde Deneyisel Bulguların Karşılaştırılması	105
6. SONUÇ VE PRATİK UYGULAMALARA YÖNELİK GÖRÜŞLER.....	111
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	191

KISALTMALAR

RES	: Deniz Üstü Rüzgar Elektrik Santralleri
REPA	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
LVDT	: Lineer Değişken Diferansiyel Dönüştürücü
SSS	: Sakın Su Seviyesi





SEMBOLLER

MW	: Megawatt
GW	: Gigawatt
TWh	: Terrawatt
Hz	: Frekans
Ω	: Mobilite katsayısı
d	: Tane boyutu
D	: Taş boyutu
N	: Koruma tabakasındaki sıra sayısı
KC	: Keulegan-Carpenter sayısı
Ω_0	: Tabaka etkisi olmadan mobilite katsayısı
U_∞	: Taban üzerinde bileşke akım ve dalga hızı
D_r	: Sıkılık indisi
T	: Dalga periyodu
g	: Yerçekimi ivmesi
s	: Bağıl yoğunluk
W	: Batık ağırlık
D_p	: Kazık çapı
D_n	: Kübik nominal çap
γ_s	: Koruma tabakası taş özgül ağırlığı
σ_0'	: Zeminin ortalama efektif gerilemesi
$D_{\text{kazık}}$	: Tekil kazığı benzeştiren silindirin çapı
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
x	: Borunun memba ile mansap noktaları arasındaki sızma uzunluğu
P	: Kum ve su karşımının birim alanı üzerindeki sızmakuvveti
γ	: Suyun özgül ağırlığı
n	: Zeminin porozitesi

Ω_{cr}	: Mobilite parametresinin kritik değeri
D_c	: Anroşman taş çapı
D_f	: Filtre taş çapı
D_{fp}	: Filtre tabakası arasındaki boşluk ebadı
D_{ap}	: Anroşman tabakası arasındaki boşluk ebadı
Re_g	: Taban sedimentine ait tane Reynolds sayısı
n_f	: Filtre tabakası boşluk oranı
N_f	: Tabaka sıra sayısı
t_f	: Temel civarı oyulma koruması filtre kalınlığı
t_c	: Temel civarı oyulma koruması kaplama kalınlığı (anroşman)
N_c	: Anroşman tabaka sıra sayısı
V^n	: Debi hızı
Q	: Zeminden geçen su miktarı
q	: Birim zamanda geçen su miktarı
k	: Zeminin permeabilite katsayısı
v	: Hız
I	: Hidrolik Eğim
ν	: Kinematik viskozite
K_s	: Spesifik permeabilite
t	: Zaman aralığı - Bağımsız zaman
p	: Basınç
ϑ	: Yoğunluk
U	: Karakteristik hız
τ_s	: Zemin elemanı etrafındaki sürtünme gerilmesi
φ'	: Zeminin içsel sürtünme açısı
σ'_h	: Yatay efektif gerilme
σ'_v	: Düşey efektif gerilme
s_f	: Filtre tabakası dane yoğunluğu
γ'	: Zemin elamanının batmış özgül ağırlığı
q_0	: Sürşarj yükü
B_a	: Anroşman kalınlığı
s_a	: Bağlı yoğunluk
K_a	: Aktif toprak basınç katsayısı

V	: Boşluk suyunun zemin içindeki tanelere göre ortalama akış hızı
u	: Zemin içindeki tane grubunun hızı
V + u	: Boşluk suyunun toplam ortalama hızı
C_m	: Hidrodinamik kütle (eklenik ağırlık) katsayısı
K₀	: Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Fleshman ve Rice ile Tao ve Tao'dan alınmış kararlı durum altında ki borulanmada kritik hidrolik gradyanlar için mevcut verilerin özetleri. .70	
Çizelge 4.2 : Parametrik çalışma için tasarlanılan değişkenlerin değerleri75	
Çizelge 5.1 : Borulanma deneylerinde kullanılan zeminlerin karakteristik özellikleri87	
Çizelge 5.2 : Orta kalınlıkta kum kullanılarak yapılan borulanma deneyleri.89	
Çizelge 5.3 : Çakıl malzemenin borulanma deneyleri.....93	
Çizelge 5.4 : İnce kum malzemenin borulanma deneyleri.....97	
Çizelge A.1 : Orta kalınlıkta kum kullanılarak yapılan borulanma deneyleri120	
Çizelge B.1 : Çakıl malzemenin borulanma deneyleri.135	
Çizelge C.1 : İnce kum malzemelerinin borulanma deneyleri.....155	



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Türkiye geneli 50 m yükseklikteki ortalama kapasite faktörü dağılımı (Caliskan, 2011).	17
Şekil 2.2 : 2008-2018 yılları arası Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği İstatistik Raporu, Ocak 2019). ..	18
Şekil 2.3 : 2008-2018 yılları arası rüzgar enerji santralleri kümülatif kurulum kapasitesi (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği İstatistik Raporu, Ocak 2019).	18
Şekil 2.4 : Dünya çapında rüzgâr enerjisi toplam kurulu kapasite (World Wind Energy Association, 2017).	19
Şekil 2.5 : 2000-2017 yılları arası kurulu güç değişimi (Wind in Power European Statistics, 2017).	19
Şekil 2.6 : Avrupa Birliği toplam kara üstü ve deniz üstü rüzgar santrali kurulumları (Wind in Power European Statistics, 2018).	20
Şekil 2.7 : Açık deniz rüzgâr türbini genel yapısı (Malhotra, 2007c).	21
Şekil 2.8 : Rüzgâr türbinlerine gelen rüzgar, dalga, akıntı, taban kum dalga ve diğer yükler (Malhotra, 2007c).	23
Şekil 2.9 : Açık deniz rüzgâr türbinleri temel çeşitleri soldan sağa, tekil kazık, üç ayaklı kazık temeller, makas kule, ağırlık yapılı temel, yüzer temel (Tempel ve diğ, 2010).	25
Şekil 3.1 : Tekil kazık etrafında oluşan bölgesel oyulma (sol), makas kule yapısı etrafında oluşan bölgesel ve global oyulma (sağ) (Malhotra, 2007).	30
Şekil 3.2 : Tekil kazık civarındaki akım şekilleri (Sumer ve Nielsen, 2013).	30
Şekil 3.3 : Yerel ve genel oyulma sonucu oluşan kazık temel kesit değişikliği (Tempel ve diğ, 2010).	31
Şekil 3.4 : Üç tabakadan oluşan örnek bir oyulma koruma kütlesi (Tempel ve diğ, 2010).	33
Şekil 3.5 : Dalga kaynaklı ani sıvılaşma (Groot ve diğ, 2006).	36
Şekil 3.6 : Kalıcı sıvılaşma için z derinliğinde periyot ortalama boşluk suyu basıncı p’nin tipik zaman serisi (Sumer, 2014).	36
Şekil 3.7 : Deniz hidromekanik problemleri a) Serbest alan, b) Kıyı koruma yapısı, c) Gömülü boru hattı, d) Rüzgar türbininde deniz tabanı tekli kazık etkileşimi (Kırca ve Ülker ,2014).	39
Şekil 4.1 : Deniz tabanındaki boru için basınç dağılımları (Sumer ve Fredsoe, 2002).	43
Şekil 4.2 : Boru altındaki sızma akımı (Sumer ve Fredsoe, 2002).	43
Şekil 4.3 : Boru altındaki basınç değişiminin zaman serileri Sumer ve Fredsoe (2002).	45

Şekil 4.4 : Açık deniz rüzgar türbin temeli civarı oyulma koruması tabakası (Sumer ve Nielsen, 2013).	45
Şekil 4.5 : Oluşan akımların şematik gösterimi (Nielsen ve diğ, 2011).....	46
Şekil 4.6 : Koruma tabakası içerisindeki akımın şematik gösterimi (Nielsen ve diğ, 2011).....	46
Şekil 4.7 : Koruma tabakasında maksimum batma (Nielsen ve diğ, 2011).	48
Şekil 4.8 : Dalga kanalı boy kesiti.	49
Şekil 4.9 : Boşluk suyu basınçları için ölçüm noktaları.	49
Şekil 4.10 : Dalga periyodu $T = 1.0$ s. için 8. kesitte meydana gelen maksimum dış yönlü basınç gradyanı zamanındaki su yüzeyi değişimi.	50
Şekil 4.11 : Dalga periyodu $T = 3.0$ s. için 6. kesitte meydana gelen maksimum dış yönlü basınç gradyanı zamanındaki su yüzeyi değişimi.	50
Şekil 4.12 : 8. Kesitte, $T = 1.0$ s. periyotlu dalga özelliğindeki ortalama boşluk suyu basınç profilleri.	51
Şekil 4.13 : Sabit taban deneyleri için test düzeneği. Boyuna Kesit. Birimler cm mertebesindedir.	51
Şekil 4.14 : Sabit taban deneyleri için test düzeneği. Boyuna Kesit. Birimler cm mertebesindedir.	52
Şekil 4.15 : Kesitler için 3 farklı zaman için taban zemini derinliği boyunca boşluk suyu basınç dağılımları. 1. $t = 2.4$ s'de ki basınç dağılımı (aşağı yönlü basınç gradyan kuvveti üretmektedir). 2. $t = 4.9$ s ve 7.5 s'de ki basınç dağılımları (yukarı yönlü basınç gradyan kuvveti üretmektedir).	52
Şekil 4.16 : Kesit 1 için farklı derinliklerdeki yüzey yüksekliği ve boşluk suyu basınç için zaman serileri.	53
Şekil 4.17 : Ajos Rüzgar Çiftliği Saha Planı.	54
Şekil 4.18 : Rüzgar Türbininin Önden Görünüşü.	55
Şekil 4.19 : Bir dalgakıran şevi üzerinde borulanmanın meydana gelişi.	60
Şekil 4.20 : Şev üzerinde basınç gradyanına maruz kalan çekirdek parçasına etki eden kuvvetler a) Korumasız şev, b) Korumalı şev.	65
Şekil 4.21 : Yüzey eğimlerinin farklı değerleri için $\Delta z/D$ oranının fonksiyonu olarak kritik hidrolik borulanma (i_{cr}), kritik hidrolik gradyanı değişimleridir. Zemin parametreleri, $\phi' = 40^\circ$, $s = 2.65$, porozite $n = 0.4$ alınmıştır.	69
Şekil 4.22 : $\phi' = 40^\circ$, $s = 3.3$, $n = 0.4$, $\chi = 0$, $sf = 2.65$, $nf = 0.4$ ve $\tan\alpha = 12$ için borulanmaya yol açacak kritik hidrolik eğimin Bf/Dfp parametresinin değerine göre değişimi.	71
Şekil 5.1 : Salınlımlı basınç gradyanı oluşturabilen borulanma deney düzeneği.	87
Şekil 5.2 : Borulanma deney düzeneği çalışma şeması.	88
Şekil 5.3 : Temin edilen basınç ölçer.	89
Şekil 5.4 : Veri toplama cihazları.	89
Şekil 5.5 : Pnömatik tahrik sistemi kontrol mekanizması (solda) ve hava kompresörü (sağda)	90
Şekil 5.6 : Deney no. 101, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 15$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.38$, borulanma yok.	94
Şekil 5.7 : Deney no. 105, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.75$, borulanma sınırında.	94
Şekil 5.8 : (a) Ani hidrolik yükleme altında 103 no'lu kayıt edilen basınç zaman serileri. (b) $t = 26.3$ sn'de ölçülen anlık maksimum basınç gradyanındaki $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)$ derinlik - basınç profili.	95

Şekil 5.9 : Deney no. 103, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 50$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 1.53$, borulanma var.(103'nolu testte kayıt edilen hidrolik gradyan zaman serileri maksimum basınç gradyanına $t= 26.3$ sn'de ulaşmıştır).	96
Şekil 5.10 : Deney no. 207, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $T = 8$ s, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.90$, borulanma yok.....	97
Şekil 5.11 : Deney no. 209, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 50$ cm, $T = 12$ s, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.90$, borulanma var.	97
Şekil 5.12 : Deney no. 307, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 2$ m, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.2$, borulanma yok a) basınç zaman serileri b) hidrolik gradyan zaman serileri.	99
Şekil 5.13 : Deney no. 403, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 65$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.2$, borulanma yok.....	100
Şekil 5.14 : Deney no. 701, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 34^\circ$, $\Delta H = 2$ m, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.42$, borulanma yok.....	100
Şekil 5.15 : Deney no. 801, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 34^\circ$, $\Delta H = 65$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.17$, borulanma yok.....	101
Şekil 5.16 : Deney no. 902, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 30$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.95$, borulanma yok.....	103
Şekil 5.17 : Deney no. 903, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 1.25$, borulanma var.	103
Şekil 5.18 : (a) Salınımlı hidrolik yükleme ile yapılan 1003 no'lu testte kayıt edilen basınç-zaman serileri. (b) $t=33.0$ sn. ve 130.4 sn. de anlık ölçülen maksimum ve minimum basınç gradyanlarındaki $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)$ derinlikle basınç profil değişimi.	104
Şekil 5.19 : 1003 no'lu testte kayıt edilen hidrolik gradyan zaman serileri. Maksimum (en büyük) basınç gradyanına $t= 33.0$ sn. ulaşılmıştır.	105
Şekil 5.20 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının $\left(i_{\max} = \frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)$ karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). (a) $\alpha = 0^\circ$ 'de orta kumda yapılan test (b) $\alpha = 0^\circ$ 'de siltli ince kumda yapılan test.	106
Şekil 5.21 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). (a) $\alpha = 18.5^\circ$ 'siltli ince kum (b) $\alpha = 34^\circ$ 'de siltli ince kum.	108
Şekil 5.22 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). (a) $\alpha = 18.5^\circ$ 'de çakıl malzemesi , (b) $\alpha =$ 34° 'de çakıl malzemesi.	109
Şekil A.1 : Deney No: 101, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	125

Şekil A.2 : Deney No: 102, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	126
Şekil A.3 : Deney No: 103, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	127
Şekil A.4 : Deney No: 104, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	128
Şekil A.5 : Deney No: 105, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	129
Şekil A.6 : Deney No: 201, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	130
Şekil A.7 : Deney No: 202, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	131
Şekil A.8 : Deney No: 203, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	132
Şekil A.9 : Deney No: 204, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	133
Şekil A.10 : Deney No: 205, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	134
Şekil A.11 : Deney No: 206, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	135
Şekil A.12 : Deney No: 207, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	136
Şekil A.13 : Deney No: 208, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	137
Şekil A.14 : Deney No: 208, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	138
Şekil B.1 : Deney No: 301, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	140
Şekil B.2 : Deney No: 302, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	141
Şekil B.3 : Deney No: 303, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	142
Şekil B.4 : Deney No: 304, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	143
Şekil B.5 : Deney No: 305, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	144
Şekil B.6 : Deney No: 306, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	145
Şekil B.7 : Deney No: 307, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	146
Şekil B.8 : Deney No: 401, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	147
Şekil B.9 : Deney No: 402, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	148
Şekil B.10 : Deney No: 403, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	149
Şekil B.11 : Deney No: 501, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	150
Şekil B.12 : Deney No: 502, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	151
Şekil B.13 : Deney No: 503, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	152
Şekil B.14 : Deney No: 504, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	153
Şekil B.15 : Deney No: 505, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	154
Şekil B.16 : Deney No: 506, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	155
Şekil B.17 : Deney No: 601, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	156
Şekil B.18 : Deney No: 701, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	157
Şekil B.19 : Deney No: 801, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı.....	158
Şekil C.1 : Deney No: 901, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	160

Şekil C.2 : Deney No: 902, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	161
Şekil C.3 : Deney No: 903, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	162
Şekil C.4 : Deney No: 904, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç.....	163
Şekil C.5 : Deney No: 905, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.....	164
Şekil C.6 : Deney No: 1001, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	165
Şekil C.7 : Deney No: 1002, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	166
Şekil C.8 : Deney No: 1003, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	167
Şekil C.9 : Deney No: 1004, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	168
Şekil C.10 : Deney No: 1005, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	169
Şekil C.11 : Deney No: 1006, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.....	170
Şekil C.12 : Deney No: 1101, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	171
Şekil C.13 : Deney No: 1102, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	172
Şekil C.14 : Deney No: 1103, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	173
Şekil C.15 : Deney No: 1104, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	174
Şekil C.16 : Deney No: 1201, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.. ..	175
Şekil C.17 : Deney No: 1202, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.. ..	176
Şekil C.18 : Deney No: 1203, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.. ..	177
Şekil C.19 : Deney No: 1204, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.. ..	178
Şekil C.20 : Deney No: 1205, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı.. ..	179
Şekil C.21 : Deney No: 1301, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	180
Şekil C.22 : Deney No: 1302, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	181
Şekil C.23 : Deney No: 1303, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	182
Şekil C.24 : Deney No: 1304, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	183
Şekil C.25 : Deney No: 1305, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	184
Şekil C.26 : Deney No: 1306, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı.. ..	185

Şekil C.27 : Deney No: 1401, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı..	186
Şekil C.28 : Deney No: 1402, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı..	187
Şekil C.29 : Deney No: 1403, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı..	188
Şekil C.30 : Deney No: 1404, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı..	189
Şekil C.31 : Deney No: 1405, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı..	190



DOLGU ZEMİNLERE OTURAN KIYI YAPISI TEMELLERİNİN TASARIMINDA YENİ YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Dolgu zeminlerde koruma tabakasının oturması yalnızca sismik yüklerden kaynaklanmayıp sismik yüke ek olarak akıntı etkisi, dalga etkisi, rüzgar yükleri kaynaklı yapısal salınım ve bunun benzeri titreşim etkileriyle deniz tabanında ve filtre tabakasında oluşabilen yukarı yönlü basınç gradyanları (hidrolik eğim) nedeniyle de oturmaların olabileceği anlaşılmaktadır. Ortaya çıkan bu yüksek basınç gradyanlarıyla, taban (çekirdek) malzemesi sökülebilmekte, hatta borulanma hadisesiyle tüm dolgu yapısında göçme yaşanabilmektedir.

"Dolgu Zeminlere Oturan Kıyı Yapısı Temellerinin Tasarımında Yeni Yöntemlerin İncelenmesi" başlıklı bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen olguları ölçek etkilerini minimize ederek prototip ölçeğinde modelleyebilmek amacıyla yeni bir fiziksel model sistemi kurulmuştur. Oluşturulan bu fiziksel modelde ince kum, orta kum ve ince çakıl olmak üzere 3 çeşit zemin kullanılmış ve bu üç tip zemin için sonuçlar mukayese edilmiştir. Bu deney sisteminde "düşen basınç gradyanı" ve "salınımlı basınç gradyanı" altında iki farklı deney tipinde 65 adet deney yapılmıştır. Bu deney düzeneği, zemin içinden dışarıya doğru meydana gelen kararsız (zamanla değişen) basınç gradyanları nedeniyle yukarı yönlü sızma akımı ve borulanmanın hangi koşullarda meydana geldiğini daha derinlemesine inceleme fırsatı sunmuş ve böylece gerekli önlemlerin (filtre ve koruma tabakası) alınması yönünde olanak sağlamıştır.

Tez çalışması 6 ana başlıktan oluşmaktadır. Bu başlıkları kısaca özetlemek gerekirse 1. başlık olan giriş bölümünde tezin amacı, konusu ve kapsamı ile yapılan tüm literatür çalışmaların kısa özeti sunulmuştur. 2. Bölümde, rüzgâr enerjisi ve açık deniz rüzgâr türbinleri başlıklı kısımda ilk olarak açık deniz rüzgâr enerjisinin Türkiye ve Dünyadaki yeri istatistiki şekiller aracılığıyla bakılmış, genel olarak açık deniz rüzgâr türbin tasarımı ve çeşitliliği özetlenmiştir. 3. Bölümde, türbin temellerinin tasarımında oyulma koruması ve deniz tabanının davranışının incelenmesi kısmında oyulma ve sıvılaşma kavramları kısaca anlatılmış, önemi üzerinde durulmuş ve yapılan literatür çalışmaları kısaca özetlenmiştir. 4. Bölümde, borulanma olgusunun tanımı ve koruma tabakası stabilitesi açısından incelenmesi başlıklı kısımda borulanma hadisesi anlatılmış ve geniş literatür araştırmasına yer verilmiştir. Yine bu bölümde dışa doğru basınç gradyanı etkisindeki filtre tabakalı ve tabakasız eğimli yüzeyde kuvvet dengesi ve su ile tane karışımının bir bütün olarak borulanma başlangıç kriterinin türetilmesi yapılmıştır. Elde edilen mevcut sonuçlar ile kararlı borulanma kriterlerinin karşılaştırılması yapılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca şevin filtre ile korunması durumunda

borulanma kriteri olan formülasyon üzerinde değişik parametrelerin bir fonksiyonu olarak filtre tabaka kalınlığı (B_f) ile filtre taş kalınlığı (D_f) arasında oranlamalar yapılarak grafikler üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Bu bölümün son çalışmasında ise filtre tabakası altındaki bir zemin elemanını oluşturan su ve tane karışımının bir bütün olarak hareket edebilme ilkesinden farklı biçimde, zemin içerisindeki su ve zemin tanelerinin hareket denklemleri ayrı ayrı türetilmiştir. 5. bölümde salınlı basınç gradyanı altında borulanma mekanizması deneyleri başlığı altında borulanma mekanizması deney düzeneği, kullanılan ölçüm aletleri ve deneyde kullanılan zeminlerin karakteristik özellikleri anlatılmıştır. 3 çeşit zemin ve iki farklı deney sistemiyle elde edilen deney sonuçları çizelgelerde gösterilmiş, yapılan deneylerde borulanma hadisesi görülmüş ise çizelgeye borulanma var, yok ya da limit durum (var) olarak yazılmıştır. Tüm deney sonuçları için basınç, basınç profili ve basınç gradyanı profili eğrileri tezin ekler bölümünde sunulmuştur. Tezin son bölümü olan 6. bölümde ise pratik uygulamalar için görüşler sunulmuş, tezin sonuç bölümü yazılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında “*Use of Steel Slag in Rubble – Mound Marine Structures*”, in proc. of 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS’17), Karabuk, Turkey, 3-5 April 2017; Karabuk University, 2017,307-313. ve “*A Modified Piping Criterion for Determination of Effective Filter Thickness under Revetment Slopes*” 13th International Congress on Advances in Civil Engineering 12-14 September 2018, İzmir/Turkey 2 adet uluslararası bildiri ile *Mechanism of Steady and Unsteady Piping in Coastal and Hydraulic Structures with a Sloped Face*’ Water, 2018, 10, 1757, 1 adet makale çalışması yapılmıştır. Ayrıca tez kapsamındaki çalışmalardan üretilen “*Determination of Minimum Filter Thickness for Protection of Slopes against Piping*” isimli bir makale de hazırlanma aşamasındadır.

INVESTIGATION OF NEW METHODS IN THE FOUNDATION DESIGN OF COASTAL STRUCTURES PLACED ON EMBANKMENTS

SUMMARY

In the case of embankment soil, the settlement is not only caused by the seismic loading. In addition to the seismic loading, the effects of currents and waves, as well as structural oscillation due to wind loading or similar vibration sources can be seen in the seabed, and particularly in the filter/armour layers placed to protect the structure foundation. Currents and waves cause high hydraulic gradients in both horizontal and vertical alignments. The particular interest of this study is the upward (or outward) directed pressure gradients effecting the subsoil and filters layers. With these potentially high pressure gradients, failure processes such the loss of fines from the base material (or subsoil), even the case of piping, can be experienced. For coastal and hydraulic structures, one of the most critical types of failure mechanisms to be experienced is undoubtedly piping. Piping is defined as the transport of the granular material through the cavities as a result of the flow or leakage of water driven by an outward directed hydraulic gradient (pressure gradient). The purpose of the current study is to investigate the mechanism of piping under steady and unsteady (i.e. oscillatory) hydraulic gradients. In this context, a physically consistent criterion for granular soils with inclined surfaces is formulated in order to determine the critical hydraulic gradient against piping. The advantage of this criterion is the inclusion of the friction forces as a resisting effect. For this purpose, force-balance is derived for an infinitesimal soil element which accounts for the driving forces (pressure gradient force) and resisting forces (self-weight of soil and friction forces). In this analysis, inertial terms were not taken into account. Once the analysis was performed for an infinitesimal soil element resting on a sloping surface without a filter layer, the obtained results were compared with the available data in the literature. The comparison yielded a general agreement showing that the obtained criterion can successfully represent the resisting friction forces. Subsequently, the approach was developed for sloping surfaces protected by a granular filter layer. The functionality of the formulation was demonstrated by means of a parametric study, and it was shown that this criterion is a viable method to obtain a minimum filter layer thickness. From this sense, this study is one of the rare studies in the literature which presents a tangible method for determination of the filter layer thickness for revetments.

In the second part of the study, a group of experiments were performed to study the piping mechanism under unsteady hydraulic gradients. These experiments were designed for representing the effects that coastal structures are exposed as far as piping under wave action is concerned. Two types of unsteady hydraulic loads are

considered for the experiments; (1) sudden loading, and (2) oscillatory loading. The originality of the designed setup stems from its capacity to simulate the driving forces in one-to-one scale in terms of magnitude and period. With this novel experimental setup, 65 experiments were conducted with the aforementioned two types of hydraulic loading. This experimental setup provided the opportunity to examine in more detail the upstream infiltration flow and the conditions under which the piping potentially occurs due to unsteady outward-directed pressure gradients. Three types of soils were used, each of which represents a different base soil condition. This way, a basis for comparison of different soil types was obtained.

In the third, and the last, part of the study, one dimensional unsteady momentum equations are derived for the two phases of the soil, pore water and the grain group. The former equation has yielded a similar final formulation to the ones in the literature, whereas the latter equation is the first in the literature. The equation derived for the grain group provides a basis for calculation of dislocation of the soil grains in case piping occurs.

The thesis consists of six main chapters. These chapters can briefly be summarized as follows.

In the first chapter a brief summary of the purpose, subject matter and scope of the study are presented.

In the second chapter, the structures of concern are presented with a special focus on offshore wind energy structures. In this context, onshore/offshore wind energy as well as offshore wind potential both in Turkey and in the world is discussed through statistical figures. In general, the design and diversity of offshore wind turbines are summarized.

In the third chapter, the concept of seabed-structure-interaction, including the processes of scour and wave-induced seabed liquefaction, is discussed along with the perspective of scour protection for the seabed in the design of turbine foundations in the light of pertinent literature.

In the fourth chapter, the description of piping phenomenon and the investigation of piping including cover layer stability are described, and a large literature survey is included. In this part of the thesis, the sloped face and the force balance of the mixture of water and grain as a whole are derived from the initial piping criterion. The comparison of the obtained results with the stable piping criteria was performed, and the results were seen to be in agreement. In addition, as a function of different parameters on the formulation with the sloped face filter, the ratio of the filter layer thickness to the filter layer stone size was derived as a parametric study, the results of which are presented as plots. In the last part of this chapter, the equations of motion of water and soil grains (as a group) are derived separately, unlike the principle of moving the mixture of water and grain forming a soil parcel under the filter layer as a whole.

In the fifth chapter, under the heading of oscillatory pressure gradient, the mechanism of the piping under the heading of piping experiments, the measurement instruments used and the characteristics of the floors used in the experiment are described. The test results obtained with three different types of soil and two different types of hydraulic loading are presented in the tables. Pressure values, pressure profiles as well as pressure gradient profiles for all conducted tests are presented in the appendix of the thesis.

In the sixth chapter, the last chapter of the thesis, concluding remarks along with remarks on practical applications are presented.

When the findings of the study are evaluated, it can be seen that the behavior of the subsoil under steady hydraulic gradient and unsteady hydraulic gradient is very different from each other. In case of unsteady loading, inertia terms will be effective, rendering the piping mechanism under steady and unsteady loadings different from each other. Hydraulic conductivity of the soil under unsteady hydraulic gradients becomes very important from piping point of view. Soils with low hydraulic conductivity are more susceptible to piping, a conclusion drawn from the current study which is also expressed in the literature. When the experimental findings were examined, it was seen that the periods of oscillating pressure gradients did not have a significant effect on the results. In practical applications, the proper design of the filter layer as a precaution against piping is of great importance.

In the design of coastal and marine structures, global climate change should be taken into account since the frequency and magnitude of the storms and other metocean events increase, also increasing the magnitude of pressure gradients in parallel. But there are still many vague points that further need to be clarified. In future studies, it is of great importance to make experimental studies and / or numerical modeling to determine the behavior of the filter layer under unsteady hydraulic loading situations. In these studies, more accurate approaches and design methods can be obtained by considering the factors such as inertia terms and soil elasticity.

Within the scope of this thesis, three scientific papers have been published: (1) A conference paper titled “Use of Steel Slag in Rubble – Mound Marine Structures”, in proc. of 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS’17), Karabuk, Turkey, 3-5 April 2017; Karabuk University, 2017,307-313, (2) another conference paper titled “A Modified Piping Criterion for Analysis” presented in 13th International Congress on Advance in Civil Engineering 12-14 September 2018, Izmir / Turkey, and (3) an article titled “Mechanism of Steady and Unsteady Piping in Coastal and Hydraulic Structures with a Sloped Face” published in *Water* (2018, 10, 1757). In addition to these publications, an article entitled “Determination of Minimum Filter against Slopes against Piping” is underway.



1. GİRİŞ

Kıyı ve hidrolik yapılar için göçme türünde yaşanacak en kritik hadiselerden biri şüphesiz borulanmadır. Borulanma, hidrolik eğim (basınç gradyanı) kaynaklı boşluk suyu akışı ya da sızma nedeniyle ince malzemenin boşluklar arasından taşınması olarak tanımlanmıştır. Bu mevcut çalışmanın amacı kararlı ve kararsız hidrolik gradyan altında borulanma mekanizmasının incelenmesidir. Bu kapsamda ilk olarak kararlı akım altında borulanmaya karşı kritik hidrolik gradyanın belirlenebilmesi amacıyla eğimli yüzeyde bulunan granüler zeminler için tutarlı bir fiziksel kriter üzerinde durulmuştur. Bu amaçla itici kuvvetler (hidrolik gradyan/sızma kuvveti) ve direnç kuvvetleri (ağırlık ve sürtünme) formüle edilerek zemin üzerinde kuvvet dengesi türetilmiştir. Analiz ilk olarak filtre tabakası olmayan bir alanda eğimli yüzeydeki zemin parçası için yapılmıştır ve literatürdeki mevcut formülasyonlarla mukayese edilmiştir. Daha sonra çalışma, granüler bir filtre tabakası tarafından korunan eğik yüzeyli zeminler için geliştirilmiştir. Formülasyonun işlerliği (tutarlılığı) literatürdeki mevcut verilerle test edilmiştir. İkinci olarak kararsız hidrolik gradyan altındaki borulanma mekanizmasını çalışmak için bir grup deney gerçekleştirilmiştir. Bu amaca yönelik yapılan deneyler özellikle kıyı yapılarının maruz kalacağı etkileri temsil etmeyi amaçlamaktadır. Deneyler için iki çeşit kararsız hidrolik yük ele alınmıştır. Bunlar, ani etkiyen ve salınımlı basınç gradyanlarıdır. Sonuçlar, kararsız hidrolik gradyan altındaki borulanma mekanizmasını anlamak için yorumlanmış, kararlı ve kararsız durumlar arasındaki benzerlik ve farklılıklar bakımından irdelenmiş, ve mevcut bulgular ışığında pratik uygulamalara yönelik olarak tartışılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bir deniz yapısının temelini oturacağı kaplamayla korunmuş tabii zeminlerde (veya yapay dolgularda) bulunan malzemelerin genel olarak fırtına dalgaları altında maruz kalacağı en kritik hidrolik etki, bu zeminin içinden dışına doğru tekrarlı olarak ortaya çıkan yüksek basınç gradyanlarıdır. Eğer doğru tasarlanıp inşa edilmezse söz konusu

çekirdek malzeme bu basınç gradyanları altında dışarıya doğru bölgesel olarak sökülebilir ve hatta borulanma sonucu tamamen göçebilir. Koruma tabakalarının altındaki ince malzemede dalga etkisi altında cereyan eden bu mekanizmaların fiziksel model deneyleriyle benzeştirilebilmesi, ölçeklendirilmiş (örneğin 1/30-1/50 oranında küçültülmüş) dalga kanalı modellerinde mümkün olmamakta, ancak ve ancak gerçek ölçeğe yaklaşırsa bu etkiler layıkıyla modellenenilmektedir.

Bu tez çalışmasının iki ana amacı bulunmaktadır. Bu amaçlardan ilki, yukarıda bahsedilen mekanizmaları bire bir prototip ölçeğinde modelleyebilmek amacıyla yeni bir fiziksel model sistemi kurulması, bu sistem kullanılarak farklı granülometrilerdeki taneli malzemelerin salınımlı basınç gradyanı altında davranışı ve borulanma koşullarının deneysel olarak araştırılmasıdır. İkinci amaç ise borulanmanın gerçekleşmesi durumu için kuvvet dengesi denklemlerine dayalı bir yaklaşım geliştirilerek, bir filtre tabakası ile korunan ve korunmayan şevler için borulanmaya neden olabilecek kritik hidrolik eğimin ayrı ayrı tespit edilmesidir.

1.2 Tezin Konusu ve Kapsamı

Fırtına dalgaları altında tabii zeminde ya da dolgu çekirdeğinde oluşacak ve zeminin içinden dışına doğru tekrarlı olarak çıkan yüksek basınç gradyanları, çekirdek malzemesini sökebilir hatta borulanma yoluyla tümüyle malzemede göçme yaşanabilir. Bu mekanizmaların bire bir prototip ölçeğinde modelleyebilmek amacıyla yeni bir fiziksel model sistemi kurulmuştur. Bu fiziksel model ile borulanma olgusunun anlaşılması amacıyla ince kum, orta kum ve ince çakıl malzemeleri ile düşen basınç gradyanı ve salınımlı basınç gradyanı şeklinde iki farklı deney sisteminde yeteri sayıda deney yapılmış, çekirdek malzemesi üzerinde ortaya çıkan hidrolik kuvvetler türetilmiş, stabilite durumu teorik olarak ele alınarak denklemler türetilmiştir. Türetilen bu denklemler sonucunda literatürden elde edilen kritik basınç gradyanı ile denklem sonucu elde edilen kritik basınç gradyanları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Tüm bunlarla beraber ortaya konulan filtre tabakası altındaki bir zemin elemanını oluşturan su ve tane karışımının bir bütün olarak hareket edebilme ilkesinden farklı olarak zemin içerisindeki su ve zemin tanelerinin hareket denklemleri ayrı ayrı türetilmiştir.

Borulanma kriteri olan formülasyon üzerinde basınç gradyanı, içsel sürtünme açısı, çekirdek malzemesinin tane bağıl yoğunluğu, filtre tabakası malzemesinin bağıl yoğunluğu, çekirdek malzemesinin porozitesi, filtre malzemesinin porozitesi ve belirli şev eğim değerleri için filtre tabaka kalınlığı (B_f) ile filtre taş kalınlığı (D_f) arasında oranlamalar ve analiz yapılmış, bu oranlar grafikler üzerinde gösterilmiş, sonuçlar karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Yapılan tüm deneyler için hidrolik gradyan-zaman serisi, basınç-zaman serisi ve derinlik-basınç profil değişim şekilleri çıkartılmıştır. Tüm deney sonuçları değerlendirilerek maruz kalınan basınç gradyan değerleri, uygulanan basınç gradyan değerleriyle sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak türetilen stabilite denklemlerini de kapsayacak şekilde karşılaştırılması yapılmıştır.

1.3 Literatür Araştırması

Tez çalışmasına ilk olarak “Deniz Üstü (Açık Deniz) Rüzgar Türbinleri Temellerinin Tasarımında Yeni Yöntemlerin Fiziksel Modelleme ile İncelenmesi” başlığı adı altında başlanılmıştır. Özellikle açık deniz yapıları temellerinde dalga ve deprem kaynaklı stabilite kayıpları ve sıvılaşma üzerinde durulmuştur.

Deniz üstü RES uygulamaları bugüne kadar daha ziyade Kuzey Avrupa’da (Kuzey Denizi ve Baltık Denizi’nde) ve Kuzey Amerika’da yapılmıştır. Ancak bu bölgelere göre farklı bir hidrodinamiğe sahip ve farklı tasarım yüklerinin belirgin olduğu Avrupa’nın Güney denizlerinde (Akdeniz, Marmara, Karadeniz) deniz üstü RES uygulamaları ancak kıyıya çok yakın ve pilot ölçekte yapılmış, “rüzgar tarlası” olarak adlandırılan ölçekte bir uygulama henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu bakımdan deniz üstü RES’lerde sismik yükler altında diğer deniz yapılarından ayrılan manada özel bir tasarım prosedürü bulunmamaktadır. Özellikle ülkemizin içinde bulunduğu kuşakta, açık denize inşa edilecek bu tip bir yapıda hem dalga-akıntı hem de deprem yüklerine göre tasarımda kullanılacak yük kombinasyonu uygulaması mevcut değildir. Daha da önemlisi, yapı temeli etrafında oyulmaya karşı koruma amacıyla yerleştirilen taş tahkimatın deprem esnasındaki davranışı bilinmemektedir. İlk olarak bu tez çalışması kapsamında, literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi ve ülkemiz denizlerinde inşa edilecek bu tip yapıların temel tasarımı için ihtiyaç duyulabilecek yeni yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmişti. Çalışma sonuçları benzer özellikteki diğer kıyı ve deniz yapıları için de kullanılabilir olması planlanmıştır. Çalışma için

fiziksel modellemeden de faydalanılacak ve elde edilen bulgular rüzgar türbini temellerinin mevcut tasarım yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınarak bunların hangi yönde geliştirilmesi gerektiği araştırılacaktır.

"Açık Deniz Rüzgar Türbinleri Temellerinin Tasarımında Yeni Yöntemlerin Fiziksel Modelleme ile İncelenmesi" başlıklı bu tezin ilk amacı; türbin temelleri etrafında akıntı ve dalga etkisiyle oluşabilecek oyulmaların önlenmesi için uygulanan taş tahkimatın deprem etkisi altında da türbin gövdesi ve etrafındaki zemin ile etkileşiminin incelenmesi; deniz tabanı sıvılaşması, borulanma ve benzeri mekanizmalarla ortaya çıkabilecek taşıma gücü kayıplarının nedenleri ve sonuçları kapsamında araştırılması planlanmıştır. Başka bir deyişle; (1) türbin temeli, (2) oyulma koruması ve (3) deniz tabanı/zemini arasında deprem ve dalga/akıntı etkisi altında ne gibi bir etkileşim olacağı ve bu etkileşimin stabilite açısından ne gibi sonuçlar ortaya çıkaracağı bu tez çalışmasının konusunu oluşturmaktaydı. Bu sayede tez çalışmasının sonunda, ülkemiz gibi sismik açıdan aktif bölgelerde tasarlanacak/inşa edilecek deniz üstü rüzgar türbinleri temelleri için dalga, akıntı, rüzgar yüklerinin yanı sıra deprem yüklerini de dâhil edecek uygulanabilir ve emniyetli bir yük kombinasyonu elde edilmesi hedeflenmekteydi.

Açık deniz ve kıyı yapılarındaki gelişmelere olan ilgi günbegün artmakta ve çok değerli çalışmalar ortaya çıkarılmaktadır. Bu bölümde çalışma konumuzla ilgili araştırmacıların yaptığı çalışmaların özeti hazırlanmıştır.

Tezde ilk olarak Türkiye, Avrupa ve Dünya ölçeğinde rüzgar enerji kapasitesiyle ilgili istatistik çalışmalara bakılmış (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, 2018; World Wind Energy Association, 2017), ve önemine dikkat verilmiştir (Wind in Power European Statistics, 2017, European Wind Energy Association, 2016).

Açık deniz rüzgar türbinlerinin genel yapısını anlamak için Atlantic Renewable Energy Corporation, 2004'ten faydalanılmıştır.

Tempel ve diğ, (2010), temiz enerji talebinin gitgide arttığını, birçok ülke gereken rüzgarı açık denizde aramaya başladığını belirtmiştir.

Zaaijer, (2003), Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarımında mekanik, dinamik, aerodinamik, elektromekanik, hidrodinamik, geoteknik, malzeme bilim, üretim ve kurulum teknolojisi ile tasarım yöntem bilimi gibi birçok farklı disiplinler mevcut olduğunu anlatmıştır.

Malhotra, (2007), Açık denizlere kurulacak rüzgâr türbinleri sismik yüklere, akıntı yüklerine, deniz tabanındaki büyük ölçekli kum hareketlerinin yarattığı yüklere ve dalga yüklerine, gemi ve buz darbelerine, kendi ağırlığından dolayı batmaya ve suyun kaldırma kuvveti gibi yüklere maruz kalacağından bahsetmiştir.

Bhattacharya, (2014), türbin temellerinin tasarımını tam bir disiplinler arası kıyı mühendisliği problemi olup, bu problemin çok iyi incelenmesi ve yapı temelinin etrafındaki zeminin bu kuvvetler altındaki davranışının iyi belirlenmesi son derece önemli olduğunu vurgulamıştır.

Tempel ve diğ, (2010), açık deniz rüzgar türbinleri temel çeşitlerini şekille göstermiş ve her temel çeşidinin özelliklerini anlatmıştır.

Malhotra, 2007, oyulmanın tanımını yaparak şekillendirmek suretiyle bölgesel ve genel oyulmayı anlatmıştır.

Sumer ve Fredsoe, (2002), dalga ve/veya akıntının etkili olduğu bir deniz tabanına, bir yapı yerleştirilmesiyle beraber görülecek olan akım şekillerini göstermişlerdir.

Sumer, (2014), rüzgar türbinlerinin tasarımındaki üç önemli faktör (yapıya gelen maksimum yük, yorulma yükü, yapının titreşim modları) için oyulma derinliğinin belirleyici en önemli faktör olduğunu bu nedenle oyulmanın engellenmesi veya minimuma indirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Sumer, (2008), oyulmaya meyilli tanelerin bulunduğu bölgeye taş tahkimatın yapılması, örtüsel kaplama yapılması, geotekstil kum konteyner ile kaplama yapılması gerektiğini belirtmiştir.

Tempel ve diğ, (2010), yerel ve genel oyulma sonucu oluşan kazık temel kesit değişikliğini anlatmıştır.

Sumer ve Fredsoe, (2002), Oyulma koruma tabakasının dalga ve akıntı etkisi altında temel olarak 6 farklı göçme mekanizması bulunduğunu belirtmişlerdir.

Sumer ve diğ. (2001) ve Nielsen ve diğ. (2015), deniz tabanını oluşturan tanelerin koruma tabakasındaki taşların arasından akıntı ve/veya dalga etkisi altında emme (negatif basınç) kuvvetiyle taşınmaları üzerine çalışmışlardır.

Özellikle deniz yapıları etrafındaki sıvılaşma problem ile ilgili literatürdeki bilgi birikiminin neredeyse tamamını içeren çok kapsamlı ve detaylı çalışması olan B. Mutlu Sumer'e ait "Liquefaction Around Marine Structures" kitapta gerekli bölümler

bulunmaktadır. Söz konusu çalışma 11 bölüm ve 453 sayfadan oluşan bir kitaptır. Ayrıca kitabın ekinde deniz tabanı sıvılaşması ve kıyı yapılarının sıvılaşmış zemin ile etkileşimlerini konu alan, laboratuvar deneyleri sırasında çekilmiş 5 adet video bulunmaktadır. Bu videolar incelenen olgunun anlaşılabilmesi açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Kitapta sıvılaşmanın fiziki, anlık ve kalıcı sıvılaşma, dalga kaynaklı sıvılaşmanın modellenmesi, deprem kaynaklı deniz tabanı sıvılaşması, yansıyan (duran) dalga durumu, killi zemin durumu ve sıvılaşmaya karşı alınabilecek önlemler gibi konular ele alınmakta; uygulamacıların yararlanmaları için abak ve denklemler sunulmaktadır. Burada kıyı mühendisliği ve deniz geotekniği terminolojisinde sıvılaşma; suya doymun gevşek zeminlerde zemin yatağındaki taneler arasındaki efektif gerilmelerin kaybolması ve dolayısıyla su-tane karışımının birlikte bir akışkan gibi davranması durumu için kullanıldığını anlatılmıştır.

Ozaydın, (2007), zeminin deprem etkisi altında sıvılaşabilirliği tane boyutu ve dağılımı yanında, jeolojik yaşı ve çökelme koşulları, başlangıç sıklık derecesine bağlı hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği gibi özellikleri yanında depremin büyüklüğü, süresi, uzaklığı gibi sismik faktörlere bağlı olduğunu belirtmiştir.

Groot ve diğ, (2006), dalga kaynaklı ani sıvılaşma üzerine çalışmışlardır.

Sumer ve Fredsoe, (2002), ilk olarak deniz tabanında dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini belirlemek için analitik bir model geliştirmiş ve Sumer ve diğ, (2012) tarafından yapılan deneysel çalışma ile bu model doğrulanmıştır.

Sumer ve diğ, (2006a), tarafından ilk kez dalga kaynaklı sıvılaşma sürecinin deniz tabanındaki tüm aşamaları açıklanmıştır.

Sıvılaşan zeminler ile yapı etkileşimi konusunda Sumer ve diğ, (1999), dalga altında sıvılaşan zeminlerde, zemine gömülü boru hatlarının yüzmesinin ya da batmasının hangi parametrelere bağlı olduğunu ve nasıl belirlenebileceğini çalışmışlardır. Daha sonra Kirca (2013), düzgün olmayan blokların sıvılaşmış zeminde hangi derinliğe kadar ve hangi hızla batacaklarını çalışmış, batma derinliği ve hızının blok şeklinde bağımsız olduğunu ortaya koymuştur.

Kirca ve diğ. (2013a), kıyı yapıları etrafında dalga yansıması sonucu oluşan duran dalga etkisi ile deniz tabanının nasıl sıvılaştığını; duran dalga altında sıvılaşmanın ilerleyen dalga etkisiyle sıvılaşmadan ne gibi farkları ve benzerlikleri olduğunu

deneysel çalışmaları ile ortaya koymuşlardır. Dalga kaynaklı sıvılaşmada zeminde kil içeriğinin sıvılaşmaya olan etkisi ise Kirca ve diğ. (2013b), tarafından çalışılmıştır.

Sumer ve diğ. (2010), dalga etkisi altında sıvılaşabilen zeminler üzerinde bulunan taş kaplamaların davranışlarını ve sıvılaşmaya etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki zemin sıvılaşması başlıca iki ana parametreden etkilenmektedir. Bunlar taş kaplamanın yoğunluğu ve kaplamadaki tabaka sayısıdır.

Sumer ve diğ. (2006b), dalga etkisi altında boru hattı etrafındaki sıvılaşmayı deneysel olarak araştırmıştır. Boşluk suyu basıncı, biri boru üzerinde biri de borudan uzak bir bölgede olmak üzere zemin içinde aynı derinlikteki iki noktada ölçülmüştür. Sonuçlar boşluk suyu artışının ve sıvılaşmanın borunun mevcudiyetinden etkilendiğini göstermektedir. Aynı konuyu inceledikleri çalışmalarında Teh ve diğ. (2006), sıvılaşabilen deniz tabanında bulunan gömülü boru hatlarının stabilitesi üzerine eğilmişlerdir. Bu çalışmada boru hattı stabilite tasarımı gözden geçirilmiş deneylerle karşılaştırma yapılmıştır. Sıvılaşan zeminde boru hatlarının göçme mekanizması incelenmiş, boru hatlarının batma derinliklerini tahmin edebilmek için analitik bir model önerilmiştir.

Sumer ve diğ. (2011), dalga etkisiyle sıvılaşan zeminin deplasmanlarına maruz kalan gömülü koruma tabakalarının stabilitesini incelemiştir. Bu çalışmada deneyler göstermiştir ki, taş kaplama gömülü halde değilken büyük dalgalar altında stabil kalmasına rağmen, üzeri gevşek zeminle örtülürse sıvılaşan zemin hareketiyle stabilitesini kaybedebilmektedir.

Kirca ve Ulker (2014), dalga kaynaklı tekrarlı yükler ve darbe (impact) yükü altında deniz tabanı ile yapı sistemlerinin stabilitesini kaybetmesinin deniz yapıları için en önemli tehditlerden biri olduğunu belirtmişler, ayrıca küresel iklim değişikliği sebebiyle fırtınalarda görülecek sıklık ve büyüklük artışının kıyı ve liman yapılarının tasarımında göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu stabilite kayıplarının ortaya çıkmasını sadece geoteknik yönünden değil, kıyı ve deniz hidrodinamiği yönünden de incelemek gerektiğini belirtmişlerdir. Bu iki disiplinin ortak çizgisi ile kıyı ve deniz mühendisliğinde deniz hidro-geomekaniği ismi verilebilecek yeni bir alt dal ortaya çıkmaktadır.

Selcuk ve diğ. (2012), sıvılaşabilen zeminler üzerine inşa edilmiş taş dolgu dalgakıranların deprem etkileri altındaki davranışı incelemiştir. Yapılan çalışma

sonucunda, (a) deniz tabanında yer alan gevşek – orta sıkı kum çökellerinde kuvvetli yer sarsıntısı etkisinde sıvılaşma durumunun ortaya çıkabileceği; (b) gevşek – orta sıkı kum çökelleri üzerinde inşa edilen taş dolgu dalgakıranların özellikle topuk bölgelerinde sıvılaşmadan kaynaklanan hasarlar oluşabileceği; (c) kum çökelleri üzerinde inşa edilen taş dolgu dalgakıranların birçok defa tekrarlı yüklere maruz kalması durumunda, deprem performansının iyileşebileceği ve hasarların daha sınırlı kalabileceği, sonuçlarına ulaşmışlardır.

Mao (1986), Chiew (1990), Sumer ve Fredsoe (1991), Klomp ve Tonda (1995) ve Sumer ve diğ. (2001a), boru hatlarında oyulma başlangıcı için kritik durum üzerinde çalışmışlardır.

Fredsoe ve Sumer (1991), deneysel çalışmalarla dalga durumunda oyulmanın başlayacağı kritik koşulu belirlemişlerdir. Bunu KC sayısı ve gömülme derinliğinin boru çapına oranı (e/D_{boru}) gibi şekilde iki boyutsuz parametreyle açıklamışlardır.

Koruma tabakasının oturması yalnızca sismik yüklerden kaynaklanmayıp sismik yük ek olarak akıntı etkisi, dalga etkisi, rüzgar yüklerinden kaynaklanacak yapısal salınım ve bunun benzeri titreşim etkilerinden kaynaklanacak deniz tabanında ve filtre tabakasında oluşacak yukarı yönlü basınç gradyanları (hidrolik eğim) nedeniyle de oturmaların olabileceği anlaşılmaktadır. Çünkü tekil kazıklar inşa edilirken çoğunlukla uygun ekipmanlar yardımıyla zemine çakılması (sürülmesi) yöntemi kullanılmakta, bu yöntem sayesinde kazık civarında bulunan zeminde bir sıkılaşma yaşanmaktadır. Bu sıkılaşmayla rölatif sıkılığı artmış zeminde sismik sarsıntı sonucunda oluşacak boşluk suyu basınç artımı sıvılaşmayı oluşturulabilecek bir düzeye gelmeyebilir. Yalnız her halükarda titreşimler sebebiyle zemin içerisinde boşluk suyu basıncında bir miktar artış yaşanacaktır. Zemin dışında basıncın farklılığından dolayı yukarı yönlü (dışarıya doğru) bir basınç gradyanı (hidrolik eğim) oluşacak ve ince tabakaların kalın tabakalar arasından emilmesine yol açabilecektir. Nitekim borulama benzeri bu mekanizma daha önce yapılan birçok çalışmada görülmüş ve tasvir edilmiştir. Bu düşünceden yola çıkarak, konu ile ilgili literatür çalışması genişletilmiştir. “Deniz üstü (açık deniz) rüzgar türbinleri temellerinin tasarımıda yeni yöntemlerin fiziksel modelleme ile incelenmesi” olan tez başlığının çalışma konusunun sadece rüzgar türbinleri için değil dolgu zeminlere oturan tüm kıyı ve deniz yapılarını kapsadığı için başlığın “dolgu zeminlere oturan

kıyı yapısı temellerinin tasarımında yeni yöntemlerin incelenmesi” olarak güncellenmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

CIRIA (2007), borulanmayı hidrolik eğim kaynaklı boşluk suyu akışı ya da sızma nedeniyle çok küçük kanallar arasından ince malzemelerin taşınma biçimi olarak tanımlamıştır.

Borulanmayla zeminde malzeme kaybı yaşanmakta ve sonuçta yapıda göçme boyutunda hasar meydana gelebilmektedir. Literatürde böylecesine hidrolik yapılarda birçok göçmelerin olduğu belirtilmektedir. Richards ve Reddy (2007), 250’den fazla borulanma türü göçme vakasını derlemiştir.

Tomlinson ve Vaid (2000), borulanmayı tabandaki zemin tanelerinin granüler malzemelerin arasından serbest olarak hareket etmesi olarak tanımlamıştır.

Sumer ve diğ. (1991), dalga ve akıntı kombinasyonu üzerinde çalışmış, basınç gradyanlarının yüksek sızma akımlarını oluşturarak borulanmaya sebep olduğu ortaya konmuşlardır.

Sumer ve Nielsen (2013), rüzgar türbini temellerindeki koruma tabakalarının batma mekanizmalarına değinmişlerdir. Tekil kazıkların oyulma koruma tabakasının batmasının önlenmesi ve sınırlandırılması amacıyla gerekli filtre tabakası kalınlığının belirlenmesi için çalışmışlardır. Yaklaşımları genellikle filtre tabakası altındaki taban malzemelerinin yatay taşınımını kapsamaktadır. Bununla birlikte dikey basınç gradyanlarının dalga durumunda etkili olduğu görülmüştür. Geçtiğimiz on yıl boyunca birçok rüzgâr türbininin denizde inşa edildiğini, bu türbinlerin inşa maliyetini azaltmak için tesisin servis ömrü boyunca karşılaşıacağı yükler sonucunda yapılacak tasarımların doğru olabilmesi için türbinin üst yapısını, temelini, temel civarındaki oyulmaların ve temel civarındaki oyulma korumalarının davranışlarının çok iyi bilinmesi gerektiğinin önemini vurgulamışlardır.

Nielsen ve diğ. (2011), araştırmalarında akıntı ve dalgaya maruz kalan koruma tabakasında üç ana hidrolik yapının meydana geleceğini belirtmiştir. Akım hızı artıp hız belirli bir noktaya ulaştığında filtre tabakasının altındaki deniz tabakasındaki kum taneciklerinin sediment hareketi gibi filtre ve anroşman tabakasına doğru hareket etmeye başlayacağını belirtmişler, boyutsuz parametrelerle taban kumlarının hareketlerini tanımlamışlardır. Burada hareketlilik sayısı kritik değeri aştığı zaman,

$\Omega > \Omega_{cr}$, taban malzemesi akım bileşenleri tarafından harekete geçirildiği görülmektedir.

Jensen ve diğ. (2014), boşluklu dalgakıran yapısındaki koruma tabakası altında bulunan çekirdek tabakasında oluşan basınç kaynaklı kuvvetlerin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Sonuç olarak eğimli ve boşluk dalgakıranlarda koruma tabakası altındaki malzemede yapılan tüm deneylerde dalga çekilme aşamasında dışa doğru basınç gradyanının oluştuğu ve bu basınç gradyanlarından dolayı oluşan kaldırma kuvvetinin çekirdek malzemesinin batık ağırlığının %60'ı mertebesine kadar ulaşabildiğini, bununda yapının tüm durağanlığını etkileyecek büyüklükte olduğunu göstermiştir.

Sumer ve diğ. (2011), kırılan tekil dalga (solitary wave) sebepli sediment hareketi ve akım üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda yukarı yönlü basınç gradyanının dalga çekilmesi ve hidrolik sıçrama sırasında oluştuğu, oluşan bu kuvvetin büyüklüğünün ise sedimentin batık ağırlığının %30 mertebesine ulaştığını belirtmişlerdir.

Sumer ve diğ. (2013), Sumer ve diğ. (2011)'de yapılan çalışmaya benzer bir çalışma yaparak bu sefer kırılan düzenli dalgalar sebepli sediment hareketi ve akım üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada sonuç olarak dalga kırılma anlarında yukarı yönlü basınç gradyan kuvvetlerinin oluştuğunu ve bu kuvvetin en büyük olduğu değerin tabanda olduğunu yine oluşan bu kuvvetlerin değerlerinin sedimentin batık ağırlığının %30 mertebesine kadar ulaşabildiğini belirtmişlerdir.

Sumer ve diğ. (2013) ile Sumer ve diğ. (2011)'de her iki çalışmada kum eğimleri üzerinde kuvvetli dış yönlü boşluk suyu basınç gradyanı (hidrolik eğimler) oluştuğu görülmüştür. Bu gradyanların büyüklüklerinin kumun batık ağırlığının belirli yüzde değerlerine ulaştığı görülmüş ki böylece kumların taşınabilir pozisyona gelebileceğini hatta borulanmanın mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Güncel açık deniz rüzgar türbin inşaat metotlarının incelemesinde uygulamanın alışagelmiş yöntemler dışında türbinlerin yapay adalar üzerinde uygulanmış olduğu görülmüştür.

Burchart ve Andersen (1995), çalışması özetlenmiş, boşluklu ortamda akım rejimleri kısaca anlatılmıştır.

CIRIA (2007)'de, taş dolgu deniz yapılarında filtreleme kriterleri alt ve üst tabakaların dane dağılımlarının birbirleriyle ilişkilendirilmesi gösterilmektedir. Bu kriterler filtre tabakasının tasarımına çok yararlı olsa da filtre tasarımı için literatür araştırmaları genişletilmiştir.

De Graauw ve diğ. (1984), filtre malzemesi ve taban malzemesi arayüzüne paralel ve dik yönlü farklı filtre tabaka oluşumlarının performansını parametrik ve deneysel olarak detaylı bir şekilde çalışmışlardır. Kararlı ve salınımlı boşluk suyu basınç gradyanları (hidrolik eğimler) altında yatay konumlandırılmış, filtreler için deneyler yapmışlardır. Filtre porozitesi, tane boyutu ve gradasyon için bir takım ek kriterler oluşturmuşlardır. Bu kriterler taş dolgu dalgakıran, kaplama, rip-rap koruma ya da tekil kazık temelin oyulma koruması için yapılan filtre tabakası tasarımı için çok aydınlatıcı olmuştur (Sumer ve Nielsen, 2013).

Bununla birlikte Graauw ve diğ. (1984), minimum gerekli filtre tabakası kalınlığı için herhangi bir spesifik kriteri ortaya koymadığı görülmüştür.

Hidrolik yapılarda borulanmayla ilgili ilk çalışma 1910 yılına dayanmakla beraber Richards ve Reddy (2007), buna rağmen borulanma hadisesinin yaşanmaması için filtre ya da kaplama tabakasında minimum kalınlığının belirlenmesi için çok az çalışma yapılmış olduğu görülmüştür.

Tomlinson ve Vaid (2000), sabit yanal basınç altında filtre tabakasının etkisini araştırarak öncü bir çalışma yapmıştır ve bu araştırma sonucunda ince filtre tabakası halinde çok düşük kritik hidrolik eğim (basınç gradyanı) altında borulanmanın yaşandığını bulmuşlardır.

Ojha ve diğ. (2003), granüler filtre tabakası olmaksızın tane boyutu, porozite ve hidrolik iletkenliği de dahil ederek borulanma kriteri için teoriksel çözümler yapmışlardır.

Shamy ve Aydin (2008), nehir bent altında borulanma kavramını nümerik olarak modellemiştir.

Abdelhamid ve Shamy (2015), bu nümerik modellemeyi daha geliştirerek granüler malzeme arasından taban malzemesinin kaybını temsilini sağlamıştır.

Son zamanlarda Ko and Kank (2018), borulanmaya karşı zemin güçlendirilmesi için biyopolimer kullanımını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir.

Hidrolik yapılar için çoğunlukla en kritik hadise yerçekimine karşı (yukarı yönlü borulanma) olan borulanmadır. Çünkü sızma kuvveti efektif gerilmeyi azaltıcı yönde rol oynar. Sterpi (2008), Jacobse (2013) ve Flesman and Rice (2014), yanal basınçsız ve herhangi bir filtre tabakası olmaksızın yukarı yönlü basınç gradasyonu altında borulanma deneyleri yapmışlardır.

Aynı şekilde Tao ve Tao (2017), yanal basınçsız, granüler filtresiz nümerik model kullanılarak yukarı yönlü borulanmayı modellemişlerdir.

Son zamanlarda Kirca ve diğ. (2017), çelik cürufunun mekanik karakterlerinin salınımlı basınç gradasyonu ve dalga hareketi altında dalgakıran çekirdeğinin borulanmaya karşı dayanımındaki olan etkisini deneysel araştırmayla çalışmışlardır. Filtre tabakasız eğimli yüzeydeki zemin parçası üzerinde kuvvet-denge denklemi üzerinde çalışmışlar, kaldırma kuvvetinin ağırlık kuvveti ve sürtünme kuvvetini yenerek zemin elemanının yerinden sökmesi yani borulanma durumu için sağlanacak şartı türetmişlerdir. Bu çalışmada zemin taneleri sadece serbestçe yukarı yönlü hareket edebilmekte olup, borulanma için kritik hidrolik eğimin 0.6 – 3.0 aralığında olduğu bulunmuştur.

Wang ve diğ. (2017a) (2017b), çakıl ve siltli kil karışımı zemin çeşidinin borulanma davranışını detaylı deneylerle çalışmışlardır. Kurulan deney tertibatında numuneler aşağı yönlü basınç gradasyonu altında borulanmaya maruz bırakılmıştır. Hiçbir yanal basınç olmamasına rağmen borulanma için kritik hidrolik eğitimin 60 ile 140 arasında olduğunu göstermişlerdir.

Tomlinson ve Vaid (2000), yaptıkları çalışmayla iyi filtrelenmiş malzemede aşağı yönlü borulanma için kritik gradyanın 10 ile 70 arasında olduğu sunucunu çıkartmışlardır.

Son günlerde Alcerreca-Huerta ve Oumeraci (2018), kırılan dalga hareketi altındaki kaplama tabakasıyla korunulmuş eğim altındaki zemin stabilite analizini yapmışlardır. Filtre ve koruma tabakasıyla birlikte zeminin toplam olarak yer değiştirmesini (tüm zemin kolonunun toptan göçmesi) değerlendirmiş ve bu olguya anlık sıvılaşma denilmiştir.

Kilci ve diğ. (2018), türetilmiş olan kuvvet-denge denklemi üzerinde boyutsuz filtre tabakası kalınlığı üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki minimum filtre

tabaka kalınlığına birçok girdinin etkisi (eğim, içsel sürtünme açısı, porozite vb.) bulunmaktadır.

Kirca ve diğ. (2018), kuvvet-denge denklemi üzerinde çalışmaya devam etmişler ve sürtünme kuvvetindeki yanal toprak basınç hesabı yapılırken sükunetteki toprak basınç katsayısı yerine aktif toprak basınç katsayısının dikkate alınmasının daha doğru olacağını belirtip borulanma için yeni bir kriter türetmişlerdir.

Borulanma için kritik kararlı hidrolik gradyan kriterinin performansını görmek için literatürle karşılaştırmak üzere iki veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki Fleshman ve Rice'ın deneysel bulgularıdır. İkincisi ise Tao ve Tao'nun nümerik modelleme sonuçlarıdır.





2. DENİZ VE KIYI YAPILARI

Deniz ve Kıyı yapıları genel anlamıyla üçe ayırabiliriz. Bunlar;

- Kıyı Koruma Yapıları (Kıyı duvarları, kaplamalar, bölme perdeleri, mahmuzlar, kum aktarma ve tarama tesisleri)
- Liman Yapıları (Yanaşma yapıları, rıhtımlar, iskeleler, dalgakıranlar, terminaller)
- Açık Deniz Yapıları (Denizaltı boru hatları, deniz deşarjı sistemleri, petrol platformları, yapay adalar, açık deniz rüzgar türbinleri) dır.

Günümüzde enerji ihtiyacının artmasıyla bu talebi karşılamak için deniz üstü yapılar inşa edilmeye başlanılmıştır. Bu yapıların en çok inşa edileni olarak açık deniz rüzgar türbinleri denilebilir. Bu türbinlerin maliyeti, yapılabiliirliği ve uygulanabilirliği ile işletilebilirliğine göre birçok çeşiti bulunmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılayabilmek için mevcut temel türleri günümüzde çeşitlenmeye başlamıştır. Güncel kıyı ve deniz yapıları olarak da adlandırabileceğimiz bu yapı türlerinden biride enerji adalarıdır. Yapılan araştırmalarda enerji adaları üzerindeki çalışmaların hızla gelişmekte olduğu görülmektedir. Enerji üretebilmek amacıyla tesis edilen bu türbinler hem yapay ada üzerine hemde deniz tarafına uygulanabilecektir. Yenilenebilir enerji türlerinden olan rüzgar enerjisine olan yatırım ülkemizde ve tüm dünyada artmış, kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle dünyada kıyısı olan ülkeler açık deniz rüzgar türbinlerinin avantajlarını ele alarak ve tüm yönlü değerlendirmeler yaparak deniz üstü türbin kurulumunda kayda değer bir biçimde artırmıştır. Ülkemizde de günbe gün artan enerji ihtiyacını karşılamak için dünyada yaygınlaşan bu uygulamanın (açık denizlere türbin tesis edilmesi) ülkemizde de başlaması yüksek olasılıklı olduğu aşıkardır. Tüm bu değerlendirmeler ışığında bu bölümde kısaca ülkemizde ve dünyada rüzgar enerjisinin yeri, değişimi, tasarım yüklerini ve çeşitleri kısaca anlatılacaktır.

2.1 Açık Deniz Rüzgar Enerjisinin Türkiye ve Dünyada Yeri

Rüzgar, güneşin yeryüzünü eşit olarak ısıtmaması sonucu ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkından dolayı yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır. Rüzgarın şekillenmesini sağlayan başlıca unsurlar dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucunda oluşan ve birim kütleye etki eden saptırıcı güç olarak da tanımlanan Coriolis kuvveti, yüzey sürtünmeleri, arazinin topografik yapısı olarak sayılabilir.

Rüzgar, yukarıdaki etkilere bağlı olarak şekillenir. Rüzgarı ifade ederken hız ve yön kavramları kullanılır. Rüzgar hızı, yükseklikle artar ve teorik olarak gücü de hızının küpüyle orantılı olarak değişir. Rüzgar enerjisi kaynağının bol ve ucuz olması, aynı zamanda çevreye verdiği zararın az olması nedeniyle avantajlı bir yenilenebilir enerji çeşididir.

Deniz üstü rüzgar üretimi potansiyeli kara üstüne göre daha yüksektir. Rüzgar kapasitesinin yüksek ve rüzgar hızındaki değişkenliğin düşük olması gelecekte deniz üstü rüzgar enerjisi kullanımının daha da artacağını bir göstergesidir.

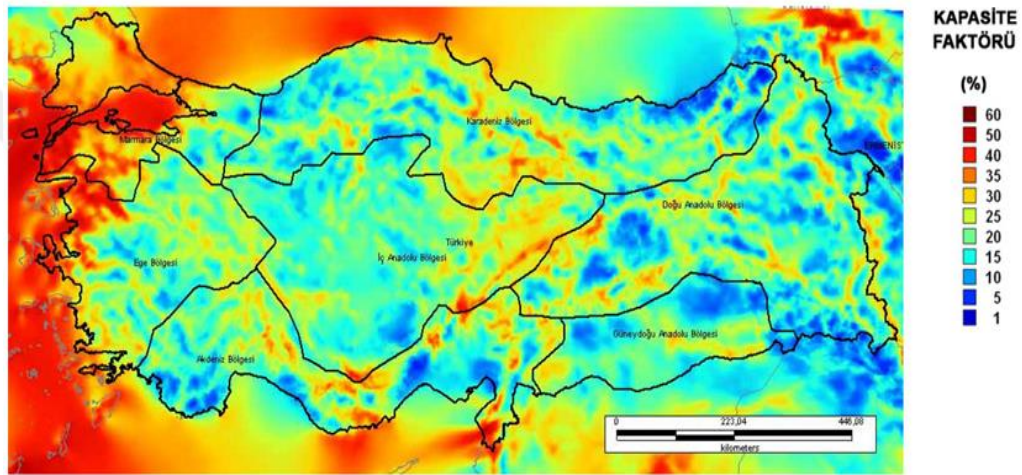
Rüzgar enerji sistemleri rüzgarın düzensiz doğası gereği, termik santraller ve nükleer enerji santralleri gibi diğer konvansiyonel üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında yıl boyunca devamlı olarak enerji üretemezler. Kurulması planlanan bir rüzgar enerjisi sisteminin verimliliğini belirleme ve diğer üretim sistemleri ile karşılaştırma yapabilmeye ihtiyaç vardır. Bu konuda “kapasite faktörü” belirleyici bir etkidir.

Kapasite faktörü; bir enerji üretim sisteminin bir yıl içinde toplam kaç saat tam güçte enerji verdiğini anlatır. Bir başka deyişle santralin bir yıl boyunca nominal güçte çalışarak üretebileceği enerjiye oranı kapasite faktörü olarak adlandırılır. Yani bir santralin ürettiği enerjinin üretebileceği maksimum enerjiye oranıdır.

Türkiye’nin rüzgar yönünden sahip olduğu potansiyelin ve kapasite faktörünün belirlenmesi için Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası hazırlanmıştır. Kısa adı REPA olan bu atlas sayesinde Türkiye’de Rüzgar enerjisi konusunda yatırım yapmak isteyen girişimciler Türkiye’nin her 200 metrelik noktasındaki rüzgar kaynak bilgilerini elde edebilmektedirler.

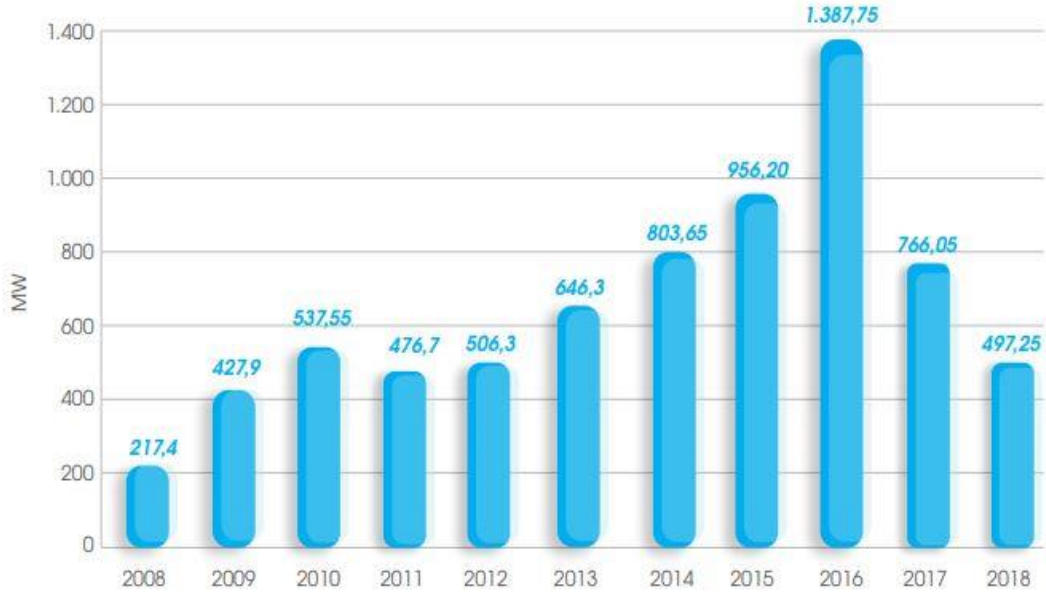
REPA, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgar Enerjisi Potansiyel

Atlasıdır. Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde 200 m x 200 m çözünürlüğünde; 30, 50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hız ortalamaları, 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları, referans bir rüzgar türbini için 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü, 50 m yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları, 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri, deniz seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri öğrenilebilmektedir. Şekil 2.1’de görüleceği üzere güneyde Mersin ve Hatay civarlarında, Ege, Marmara ve Karadeniz’de rüzgâr çiftliği kurulabilecek yüksek kapasite faktörlü alanlar mevcuttur.

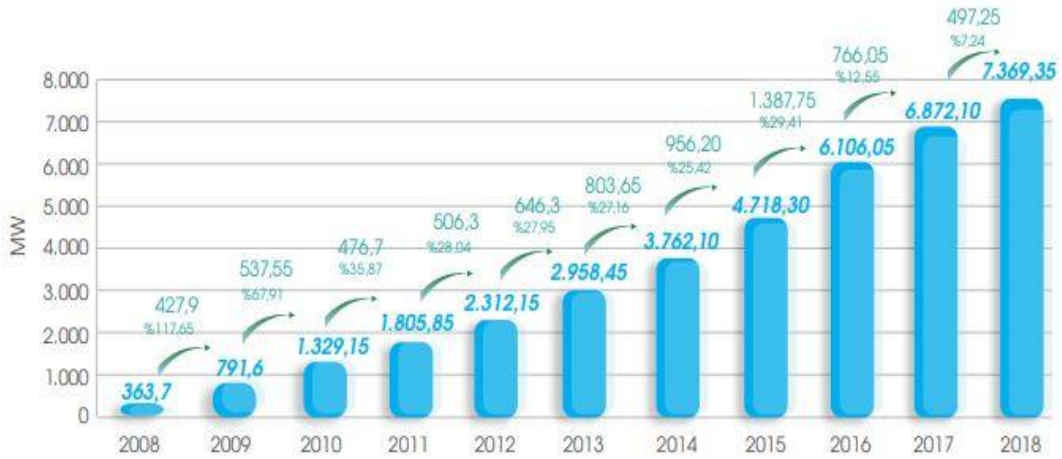


Şekil 2.1 : Türkiye geneli 50 m yükseklikteki ortalama kapasite faktörü dağılımı (Caliskan, 2011).

Rüzgâr ile ilgili istatistiklere bakılacak olursa, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin Ocak 2019 Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistikleri (özet) raporuna göre, Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için yıllık kurulum 2008 yılında 217,4 MW iken 2018 yılı itibarıyla 497,25 MW düzeyindedir (şekil 2.2). Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum 2008 yılında 363,7 MW iken 2018 yılı itibarıyla 7.369,35 MW düzeyine ulaşmıştır (Şekil 2.3). (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin Ocak, 2019 Raporu).



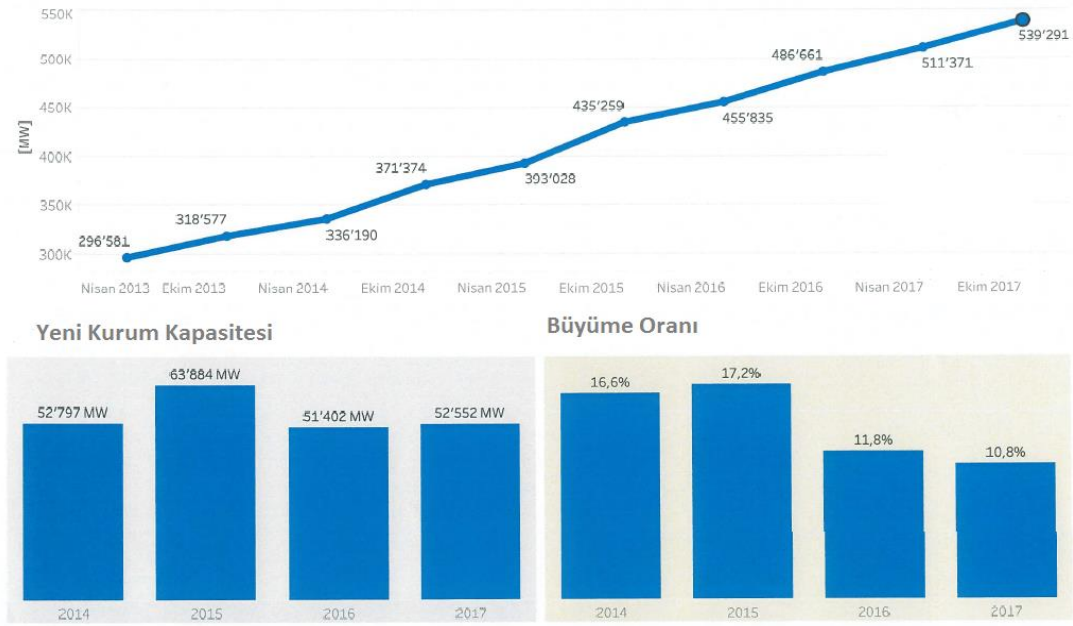
Şekil 2.2 : 2008-2018 yılları arası Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği İstatistik Raporu, Ocak 2019).



Şekil 2.3 : 2008-2018 yılları arası rüzgar enerji santralleri kümülatif kurulum kapasitesi (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği İstatistik Raporu, Ocak 2019).

Dünya’da ve Avrupa’da rüzgâr enerjisi kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu artışı zorlayan iki sebep bulunmaktadır. Biri, dünyayı tehdit eden küresel ısınma, diğeri de fosil yakıtların kullanımının kirlilik oluşturmaları ve ömürlerinin sınırlı olmasıdır.

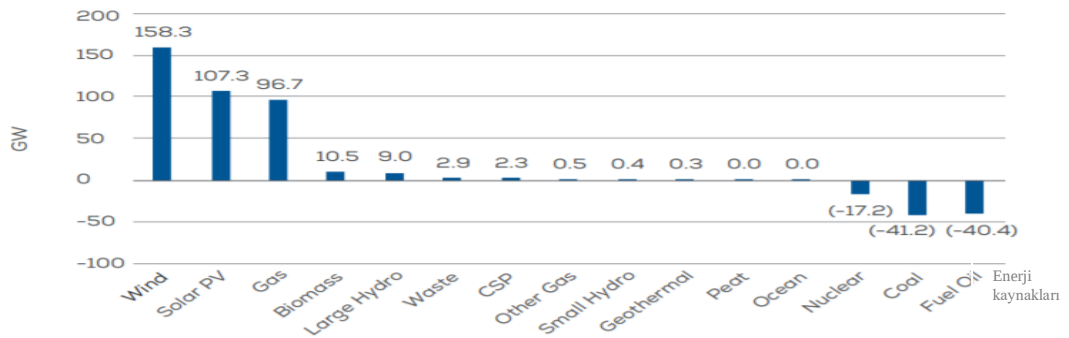
Dünya çapında rüzgar enerjisi kapasitesi 2013 Nisan ayı itibarıyla 296.581 MW iken 242.72 MW yükselerek 2017 yılı ekim ayı sonu itibarıyla 539.291 MW’e yükselmiştir (Şekil 2.4) (WWEA Half-year Report, 2018).



Şekil 2.4 : Dünya çapında rüzgâr enerjisi toplam kurulu kapasite (World Wind Energy Association, 2017).

Dünya ölçeğinde rüzgâr enerjisi kapasitesi sıralamasında 187.730 MW ile Çin 1. sıradayken onu 88.927 MW ile Amerika Birleşik Devletleri 56.164 MW ile Almanya takip etmektedir. Türkiye 6981 MW kapasiteyle 12. Sırada yer almaktadır (Şekil 2.4) (WWEA Half-year Report, 2018).

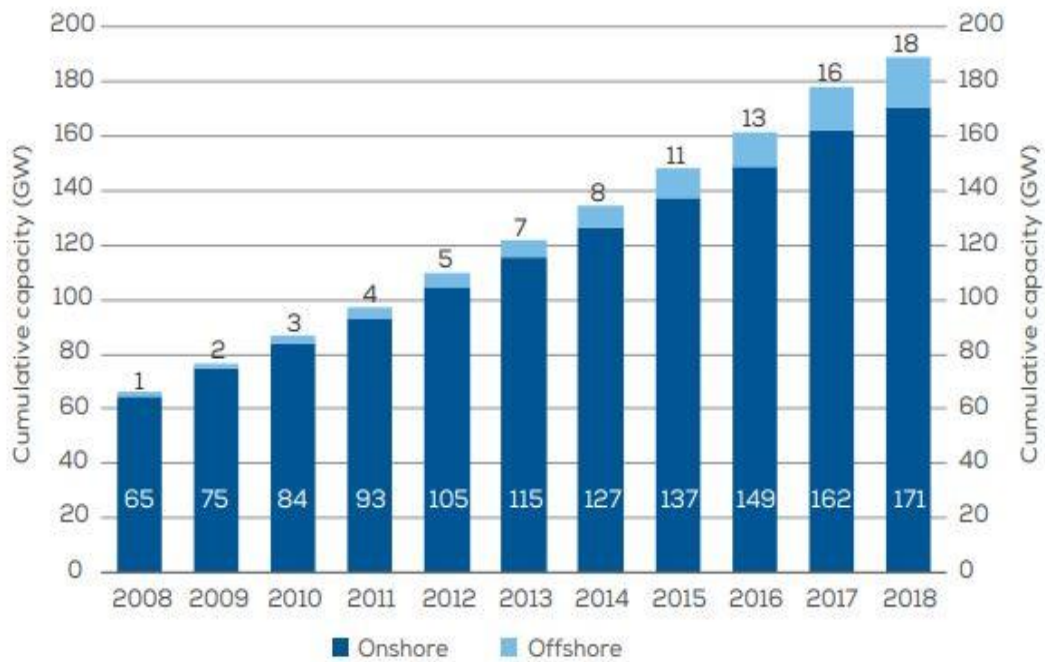
Avrupa’da 2000 ile 2017 yılları arasına bakılacak olursa şekil 2.5’te de görüleceği üzere yenilenebilir enerji sistemlerinin kurulu gücünde yüksek oranda artış olduğu en yüksek değişimin rüzgarda olduğu görülecektir. Yine aynı şekilde konvansiyonel enerji kaynaklarından olan nükleer, kömür ve petrol santrallerinin devre dışı kalması ve kapanmasından ötürü kullanımının da azaldığı görülecektir.



Şekil 2.5 : 2000-2017 yılları arası kurulu güç değişimi (Wind in Power European Statistics, 2017).

Wind Europe 2018 yılı istatistik raporuna göre (Şekil 2.6) Avrupa Birliği kapsamında deniz üstü ve kara üstü rüzgâr santrali kurulumunda 2008 yılında kara üstü 65 GW, deniz üstü 1 GW iken 2018 yılı sonu itibariyle kara üstü 171 GW, deniz üstü 18 GW olmak üzere toplam kurulu güç 189 GW seviyesine yükselmiştir.

Açık deniz kurulu rüzgâr gücü 2018 yılı için 2,649 MW olarak kayıt altına alınmıştır. 2016 yılı için açık deniz rüzgâr çiftliklerinin temel tipi ise %81,9'u tekil kazık (monopile), %7,1'i ağırlık yapısı temel (GBS), %6,6'sı makas kule (jacket), %2,8'i üç ayaklı kazık temel (tripod pile), %1,8'i ise üç ayaklı makas (tripod jacket) kuledir (The European Offshore Wind Industry Key Trends and Statistics, 2018).



Şekil 2.6 : Avrupa Birliği toplam kara üstü ve deniz üstü rüzgar santrali kurulumları (Wind in Power European Statistics, 2018).

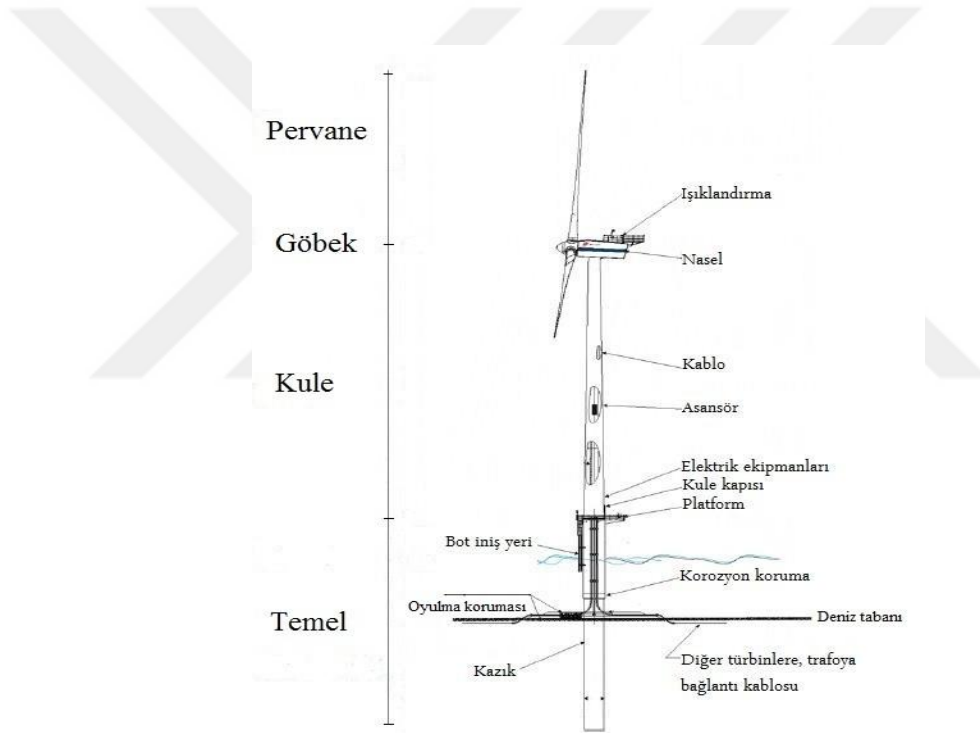
Avrupa Birliği toplam elektrik tüketimi 2,645 TWh (Terra Watt saat) olup bu tüketimin 309 TWh'i kara üstü, 53 TWh'i deniz üstü rüzgâr enerji üretiminden karşılanmaktadır. Avrupa Birliği elektrik tüketiminin 14%'ü rüzgâr enerjisinden karşılanmaktadır. Avrupa Birliği Üyesi ülkelerden Danimarka rüzgâr üretiminde en yüksek karşılama oranına (%44,4) sahiptir, bu ülkeyi Portekiz %24,2, İrlanda %24 ile takip etmektedir (European Wind Energy Association, 2018).

2.2 Açık Deniz Rüzgâr Türbini Bileşenleri

Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir (Kocaturk ve Unsan, 2015).

Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır. (Elibuyuk ve Ucgul, 2014).

Tüm rüzgar türbinleri temel olarak üç kısımdan oluşur: nasel, göbek ve pervane kanatları. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi deniz üstüne kurulacağına türbin, kule ve temel ile desteklenir.



Şekil 2.7 : Açık deniz rüzgâr türbini genel yapısı (Malhotra, 2007c).

Açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri ilk yıllarda kıyıdaki versiyonları (onshore) üzerinde ufak değişiklikler yapılarak tasarlanmış olsa da, günümüzde açık deniz (offshore) için özel tasarımlar yapılmaktadır. Hatta üretici firmalar rüzgâr enerji santralleri tasarımlarını artık daha çok açık denize yerleştirme amaçlı yapmaktadır. Yeni nesil rüzgâr enerji santrallerinin kanat çapları 80-154 metre, kule yükseklikleri ise 60-105 metre civarındadır ki, bu da tek bir türbinden 5 MW’a kadar bir kurulu güç elde edilebilmesini sağlamaktadır. Açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri ile

karadaki rüzgar enerjisi sistemleri arasındaki en önemli farklardan biri korozyon korumasıdır. İklim şartlarının deniz üstünde karadakinden oldukça farklı olması, tasarımda bazı değişikliklere sebep olmaktadır. Deniz ortamında bulunan tuz ve sudan ötürü açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinde etkin bir koruma zorunludur. Dolayısıyla rüzgâr enerji santrallerinin yüzeyleri uygun boyalar kullanılarak ve aktif katotlar ile korunmalıdır (Kocaturk ve Unsan, 2015).

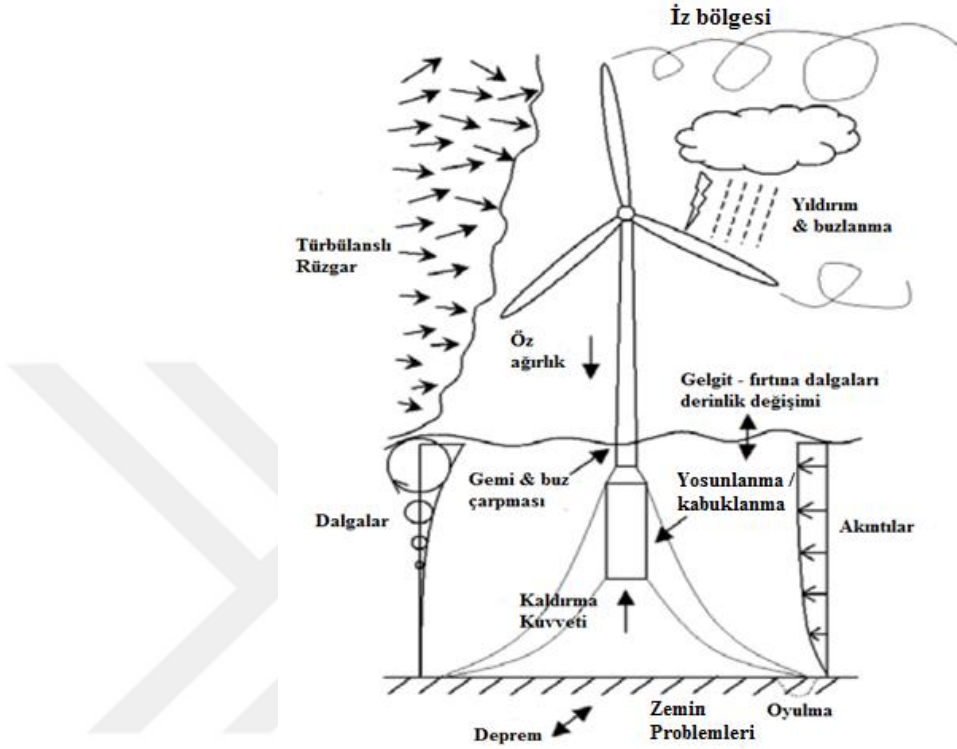
Avrupa ülkelerinin açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerine geçmelerinde, karadaki rüzgâr için verimli yerlerin azlığı, rüzgârın verimli olduğu yerlerde ise bu bölgelere ulaşım, bakım ve onarım zorlukları gibi sebepler etkili olmuştur. Bunların yanı sıra, deniz üstünde rüzgâr hızının karaya oranla daha yüksek olmasından ötürü açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri de daha fazla enerji elde ediliyor olması da açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin tercih edilmesinde çok büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca karadaki rüzgar türbinlerinin yol açtığı gürültü ve görüntü kirliliği de açık deniz rüzgar türbinlerinin tercih edilmesinde etkili olabilmektedir. Son yıllarda Çin ve ABD gibi ülkeler de bu projelere başlamış hatta Çin’de 102 MW kurulu gücünde açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri çiftliği kurulmuştur (Kocaturk ve Unsan, 2015). Açık deniz rüzgâr enerjisi santrallerinin inşa sahası seçiminde etkili olan parametreler ise rüzgâr potansiyeli, kıyıya olan mesafe, deniz derinliği, deniz trafiği, askeri kullanım, balıkçılık, doğal kullanım, boru hatları ve kablolarıdır (Kocaturk ve Unsan, 2015).

2.3 Açık Deniz Rüzgâr Türbini Temellerinin Genel Tasarımı ve Türbin Üzerine Etkileyen Yükler

Rüzgâr enerjisi karada gelişmekle birlikte uygun rüzgâr iklimi ne yazık ki sınırlıdır. Dünya etrafında nüfusun yoğun olduğu alanlar kıyılar olduğundan ve bununla birlikte temiz enerji talebi gün be gün arttığından, birçok ülke gereken rüzgârı açık denizde aramaya başlamıştır (Tempel ve diğ., 2010).

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarımında mekanik, dinamik, aerodinamik, elektromekanik, hidrodinamik, geoteknik, malzeme bilim, üretim ve kurulum teknolojisi ile tasarım yöntem bilimi gibi birçok farklı disiplinler mevcuttur (Zaaijer, 2003).

Açık denizlere kurulacak rüzgâr türbinleri sismik yüklere, akıntı yüklerine, deniz tabanındaki büyük ölçekli kum hareketlerinin yarattığı yüklere ve dalga yüklerine, gemi ve buz darbelerine, kendi ağırlığından dolayı batmaya ve suyun kaldırma kuvveti gibi yüklere maruz kalacaktır (Şekil 2.8) (Malhotra, 2007).



Şekil 2.8 : Rüzgâr türbinlerine gelen rüzgâr, dalga, akıntı, taban kum dalga ve diğer yükler (Malhotra, 2007c).

Bunlara ek olarak türbin kulesine etkiyen bazı dinamik (çevrimsel) yükler de bulunmaktadır. Bu yükler kısaca tanımlanacak olursa:

- türbin bıçaklarına etkiyen rüzgâr türbülansı nedeniyle türbinin en üst noktasında oluşacak yatay yük,
- dalga yüksekliği, dalga periyodu, su derinliği ve dalganın kırılıp kırılmamasına bağlı olarak değişecek dalga yükü,
- rotorun kitle ve dinamik ayarsızlığından (eksantrikliğinden) kaynaklanan kulenin en üst seviyesindeki titreşimler,
- türbin bıçakları arkasındaki iz rüzgarlarından dolayı kulede oluşan titreşimlerdir.

Türbin tasarımında işte tüm bu çevresel yükler dönüş periyotları da göz önünde tutularak kombinasyon halinde değerlendirilmeye alınırlar. (Örneğin, 50 yıl dönüş

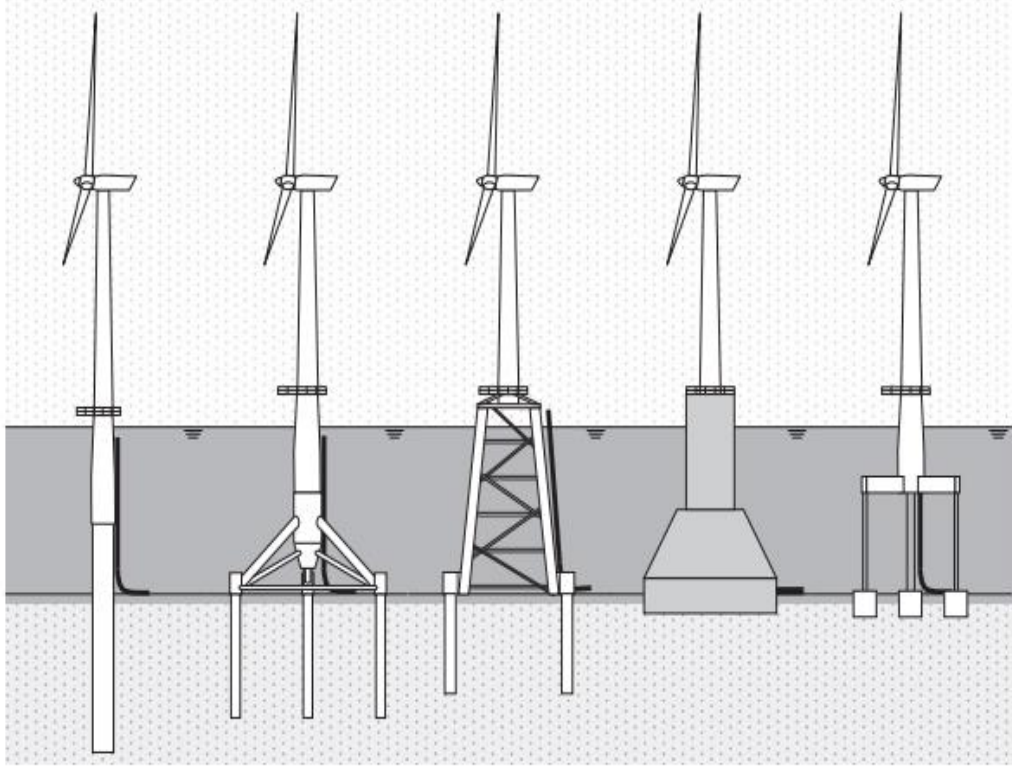
aralıklı rüzgâr, 5 yıl dönüş aralıklı dalga, 5 yıl dönüş aralıklı akıntı ya da 50 yıl dönüş aralıklı rüzgâr, 5 yıl dönüş aralıklı akıntı, 50 yıl dönüş aralıklı buz kütlesinin çarpması vb.)

Bununla beraber açık deniz rüzgâr türbinleri temelleri, tasarımları esnasında dinamik açıdan çok hassas yapılar olarak ele alınırlar. Bu tür yapıların doğal salınım frekansı rüzgâr ve dalga gibi yüklerin frekansına çok yakındır (örneğin 0.02 Hz ilâ 2 Hz). Bu nedenle, farklı yüklerin oluşturabileceği rezonans değerlendirilmeli ve bundan kaçınılmalıdır. Bu bağlamda ilgili yüklerden dolayı türbin temellerinde meydana gelebilecek tesir kuvvetleri ve bu tesir kuvvetlerine reaksiyon gösterecek yapı temeli ve temel etrafındaki zeminlerin davranışı, tam bir disiplinler arası kıyı mühendisliği problemi olup, bu problemin çok iyi incelenmesi ve yapı temelinin etrafındaki zeminin bu kuvvetler altındaki davranışının iyi belirlenmesi son derece önemlidir (Bhattacharya, 2014).

2.4 Açık deniz rüzgar türbini temel çeşitleri

Yukarıda değinildiği üzere, rüzgâr enerjisi bakımından deniz alanları karalara göre daha büyük zenginlik gösterdiği için denizlerde de rüzgâr santralleri kurulmasına başlanmıştır. Kara üstü ve deniz üstü rüzgâr enerji santralleri arasında belirgin bazı farklar bulunmaktadır. Deniz üstü bölgelerde daha kararlı ve yüksek rüzgâr hızlarının bulunması sebebiyle daha fazla ve daha istikrarlı enerji üretimi yapılabilmeyle beraber, deniz üstü rüzgâr enerji santrallerinin inşa maliyeti kara üstü sistemlere göre daha yüksektir. Bu inşa bedelinin ise neredeyse üçte birini açık deniz rüzgâr türbinlerinin temel sistemi oluşturmaktadır. Temel sistemlerinin çeşitliliği, tesis edileceği alandaki su derinliğinin ve yapıya gelecek olan yüklerin (rüzgâr yükü, dalga ve akıntıların oluşturacağı sürüklenme, kaldırma ve atalet gibi hidrodinamik yükler, deprem yükü, midyelenme/yosunlanma, kar ve buz yükleri, gemi darbesi, vb.) bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Şekil 2.9’da yapıya gelecek olan bu yüklere, maliyete ve yapılabilirliğine, uygulanabilirliği ile işletebilirliğine göre genel olarak oluşturulmuş açık deniz rüzgar türbin temel çeşitliliği görülmektedir.

Tipik olarak rüzgâr türbinleri iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar: Türbin kulesi ve temeldir. Temel, türbinin kule haricindeki kalan bölümü olup asli görevi diğer yapılarda da olduğu gibi her türlü yükleri zemine emniyetle aktarmaktır.



Şekil 2.9 : Açık deniz rüzgâr türbinleri temel çeşitleri soldan sağa, tekil kazık, üç ayaklı kazık temeller, makas kule, ağırlık yapıli temel, yüzer temel (Tempel ve diğ, 2010).

2.4.1 Tekil kazık temeller (Monopiles)

En çok kullanılan temel çeşididir. Genel özelliğı hadde ve kaynaklanmış, silindirik formunda ve çelik malzemeden üretilmiş olmasıdır (Tempel ve diğ, 2010).

Rüzgâr türbinleri tekil kazıkları yaygın olarak 30m – 40m arası uzunluk ve 3.5m – 6m arası çapa sahiptirler. Tekrarlı yükler sonucu zeminde yaşanacak hasar, grup kazıklar üzerine oturan açık deniz yapılarında kazık üstü başlık kirişleri nedeniyle az olacakken, tekil kazıklarda serbest başlı olduğundan çok daha fazla olabilecektir. Tekil rüzgâr türbinlerinin servis ömürleri 20 – 25 yıl olup, en fazla 10^7 ilâ 10^8 kere tekrarlı yük ile karşılaşmaları beklenmektedir. Bu da tekrarlı yüklerin kabaca 5 s ilâ 100 s periyot ile etkiyecekleri anlamına gelmektedir (Malhotra, 2010). Zemin tabakasının yapısına göre titreşimli çekiçlerle büyük darbelerle ya da oyulan kayalara çimento enjeksiyonu yapılması sonucu kurulumu yapılır. Ağırlık yapılarıyla karşılaştırıldıklarında çevresel etkisi çok daha az ve nispeten bölgeseldir. Maliyeti de göz önüne alındığında sayılan nedenlerle tekil kazık açık deniz rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan temel çeşididir (Bhattacharya, 2014).

2.4.2 Üç ayaklı kazık temeller (Tripods)

Daha derin denizlerde rüzgâr kulesinin sapması (kulenin yatay deplasmanını) sınırlandırmak amacıyla kullanılır. Plan görünümü üçgen olan ön dökümlü, çelik boru elemanlardan oluşan ve deniz tabanına çakılan üç kazık üzerine oturtulan çerçeve bir sistemdir. Tekil kazık sisteminin ekonomik olmadığı durumlarda tercih edilir (Malhotra, 2010).

2.4.3 Makas kule (Jacket)

Tekil kazık sisteminin ekonomik olmadığı ve daha fazla stabilitenin sağlanması gerektiği durumlarda tercih edilir (Tempel ve diğ, 2010). Sistemin kurulumu deniz tabanına monte edilen üç adet vida ile başla ve makas kule çoğu zaman tek parça olarak getirilip bu üç vida üzerine monte edilir.

2.4.4 Ağırlık temelleri (Gravity – based structures)

Adında da anlaşılabacağı üzere gelen kuvvetlere karşı stabilite ağırlık yapısı vasıtasıyla karşılanır (Tempel ve diğ, 2010). Genellikle silindirik yapılar olup çapları 10 m ilâ 30 m mertebesinde. Ön dökümlü bir beton bir kabuğun yüzdürülerek getirilip, tesviye edilmiş deniz tabanına yerleştirilmesi ve ardından içinin taş veya beton ile doldurulması sonucu ortaya çıkan “keson” tipi ağırlık temelleri ne çok kullanılan çeşiddir.

2.4.5 Kova temeller (Bucket)

Bu temel tipi tek tarafı kapalı silindirik bir kılıfın, açık ucu deniz tabanına gelecek şekilde batırılıp, iç tarafında kalan suyun yüksek kapasiteli pompaj ile kontrollü biçimde tahliyesi sayesinde tabana istenilen derinlikte penetre edilmesiyle inşa edilmektedir. Daha sonra kule, kılavuzun deniz tabanında kalan kapalı ucuna monte edilmektedir. Zemini nispeten düşük hidrolik iletkenliğe sahip lokasyonlarda ekonomik ve verimli bir çözüm alternatifi olabilmektedir.

2.4.6 Yüzer temeller (Floaters)

Su derinliğinin çok yüksek (genelde 50 m veya daha fazla) olması durumunda, türbine gelen yüklerin klasik yöntemlerle sabit temele aktarılamaması durumunda yüzer temel sistemleri kullanılmaktadır (Tempel ve diğ, 2010). Bu temeller

genellikle sıkı kablo veya halatlarla zemine ankre edilir veya kontrollü zincir ve çapalarla bağlanır. Hem tasarımı, hem de inşası zor ve maliyetli bir temel sistemidir.

Açık deniz rüzgar türbinlerinin temel tasarımlarında bunlarla beraber: Zemin şartları, inşa edilebilirliği, kurulum lojistiği, yüklenicinin deneyimi, ekipman ile çelik ve diğer malzemelerin mevcudiyeti, imalat maliyeti, çevresel etkilerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Malhotra, 2010).

Türbinlerin gitgide daha derin denizlerde kurulması ve artan rüzgâr kulesi ve türbin boyutları sebebiyle temel tasarımlarının daha yenilikçi ve uygun maliyetli yapılması gerektiği çok açıktır. Tasarımın yenilikçi kompozit malzeme kullanımı, temeller ve üst yapıları, yapım aşamaları, kazı teknikleri, kurulumu ve nakliyesi gibi tüm parametrelerin düşünülerek yapılması gerekmektedir (Malhotra, 2010).

Ayrıca temel seçimi, finansal göstergelere doğrudan etki yaptığından önem arz etmektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, genel olarak temel maliyeti tüm maliyetinin %25 ile %34'ü arasında değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yapı temeli sadece yapının stabilitesi açısından değil, projelerin finansal geçerliliği açısından da önem arz etmektedir (Bhattacharya, 2014).



3. TÜRBİN TEMELLERİNİN TASARIMINDA OYULMA VE SIVILAŞMA OLGULARININ TANIMI İLE KIYI YAPILARI AÇISINDAN ÖNEMİ

Açık deniz rüzgar türbin tasarımı esnasında temel seçimi (maliyeti, uygulanabilirliği, bakım ve işletmeni vb. gibi konuları da göz önüne alınarak) önemli bir rol oynamaktadır.

Söz konusu temel sistemlerinin oynadığı bu önemli rol sebebiyle karşılaşacakları tesirlerden dolayı davranışlarının çok iyi incelenmesi ve güvenli tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Açık deniz rüzgar türbinlerinin taşıma güç kabiliyeti temel yapısı ve zemin marifetiyle oluştuğu için temel yapısının civarında bulunan zeminin (örneğin, oyulma koruma malzemesi, temelin penetre olduğu zemin veya zeminler gibi) karşılaşacağı kuvvetlerle etkileşiminin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Ülkemiz gibi sismik alanlar içerisinde açık deniz rüzgar türbinlerinin uygulanabilmesi amacıyla koruma tabakasının davranışının belirlenmesi, anlaşılması büyük bir önem arz etmektedir.

3.1 Oyulmanın Tanımı ve Önemi

Akıntılar, gelgit dalgaları ya da fırtına dalgaları altında su, temel civarındaki katı maddeleri harekete geçirir. Bu hareketle Yerel (lokal) veya genel (global) olmak üzere temel civarında bir erozyon yaşanabilmektedir (Şekil 3.1). Bu süreç deniz tabanından başlar ve temelin üst seviyesinden alt seviyesine doğru devam eder. Bu erozyona mühendislik literatüründe oyulma (*scour*) adı verilir (Malhotra, 2007).

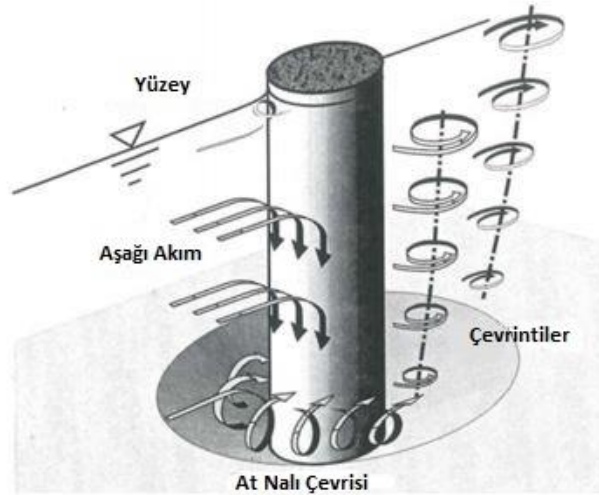
Dalga ve/veya akıntının etkili olduğu bir deniz tabanına bir yapı yerleştirilmesiyle beraber aşağıda görülecek olan akım şekilleri oluşmaya başlayacaktır (Sumer ve Fredsoe, 2002).

- a) Akım büzülmesi
- b) At-nalı  evrilerinin oluşumu
- c)  z  evrilerinin oluşumu
- d) Akım t rb lansında belirgin artış
- e) Dalgaların yansıması ve dönmesi
- f) Dalga kırılması



Şekil 3.1 : Tekil kazık etrafında oluşan bölgesel oyulma (sol), makas kule yapısı etrafında oluşan bölgesel ve global oyulma (sağ) (Malhotra, 2007).

Tüm bu akım şekillerinin oluşması oyulma sürecini etkileyecektir. Tekil kazık temel için ya anılabilecek süreç şematik olarak  ekil 3.2’de verilmektedir.

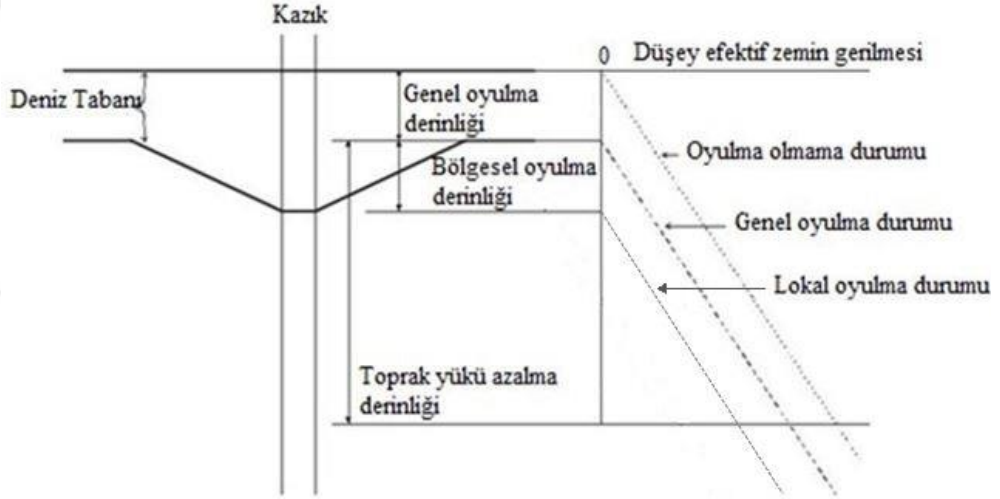


Şekil 3.2 : Tekil kazık civarındaki akım  ekilleri (Sumer ve Nielsen, 2013).

Deniz  st  rüzgâr t rb nlerinin tasarımı t krarlı yükler ve yorulma eksenli olarak belirleyen    ana faktör vardır. Bunlardan birincisi yapıya gelen maksimum yüktür ve bu y k temel tipini ve temel ebatlarını belirlemede kullanılır.  ikinci faktör

yorulma yüküdür ki bu yük yapı ebatlarını belirlemede kullanılır. Üçüncü faktör ise yapının titreşim modları ve her bir mod için belirlenmesi gereken özgül frekanstır ki, bu veriler özellikle türbinin işletmesinin belirlenmesinde kullanılır. Oyulma derinliği, bu üç önemli faktörü doğrudan belirleyen en önemli parametredir. Bu nedenle oyulmanın engellenmesi veya minimuma indirilmesi elzemdir (Sumer, 2014).

Oyulma, deniz yapılarını stabilize ve bütünlük açısından tehdit etmektedir. Şekil 3.3'te görüleceği gibi oyulmalar neticesinde kazık serbest boyu artacak, kazık uç taşıma gücü ve zemin yan taşıma gücü azalacaktır. Bu sebeple yapıları korumak amacıyla bazı önlemlerin alınması şarttır. Bu önlemlerden bazıları, oyulmaya meyilli tanelerin bulunduğu bölgeye taş tahkimatın yapılması, örtüsel kaplama yapılması, geotekstil kum konteynerler ile kaplama yapılmasıdır (Sumer, 2008).



Şekil 3.3 : Yerel ve genel oyulma sonucu oluşan kazık temel kesit değişikliği (Tempel ve diğ, 2010).

Yapı temellerini oyulmaya karşı taş kaplama ile korumak en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu sebeple oyulma tabakası ve altındaki deniz tabanının dalga ve akıntı etkisi altında nasıl davranacağı geniş ölçüde bilinmektedir. Bu konuyla ilgili Hoffmans ve Verheij (1997), Whitehouse (1998), Melville ve Coleman (2000) ve Sumer ve Fredsoe'nun (1994, 2002) yaptığı birçok çalışma mevcuttur.

Oyulma koruma tabakasının dalga ve akıntı etkisi altında temel olarak 6 farklı göçme mekanizması bulunmaktadır (Sumer ve Fredsoe, 2002). Bunlar:

- 1) Şiddetli akım koşulları altında oyulma koruması taşlarının hareket etmesi,
- 2) Deniz taban malzemelerinin taşların arasından emilmesi,

- 3) Koruma tabakasının kenar oyulmasına (edge scour) maruz kalması,
- 4) Büyük ölçekli taban şekillerinin hareketleri veya geçişi sırasında koruma tabakasının zarar görmesi,
- 5) Genel (global) oyulmalardan dolayı koruma tabakasının çökmesi,
- 6) Filtre malzemesi kullanılmamasından dolayı tabakanın çökmesidir.

Sumer ve diğ. (2001) ve Nielsen ve diğ. (2015) deniz tabanını oluşturan tanelerin koruma tabakasındaki taşların arasından akıntı ve/veya dalga etkisi altında emme (negatif basınç) kuvvetiyle taşınmaları üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarda tanelerin emme vasıtasıyla harekete geçmesini dört parametrenin kontrol ettiği ortaya konulmuştur. Bunlar, mobilite katsayısı Ω , tane boyutunun (d) taş boyutuna (D) olan oranı (d/D), koruma tabakasındaki sıra sayısı N ve temel etrafındaki Keulegan – Carpenter (KC) sayısıdır. Mobilite katsayısı (Ω) ve KC sayısı

$$\Omega = \frac{U_{\infty}^2}{g(s-1)d} \quad (3.1)$$

$$KC = \frac{U_{\infty} T}{D_p} \quad (3.2)$$

olarak belirlenmiştir.

Burada U_{∞} taban üzerinde bileşke akım ve dalga hızı, T dalga periyodu, g yerçekimi ivmesi, $s = \gamma_s/\gamma$ koruma tabakası taşlarının suya göre yoğunluğu ve D_p ise temel (kazık) çapıdır.

Sumer ve diğerleri sıkı silt (sıkılık indisi $D_r = 0.74$), orta sıkı silt ($D_r = 0.38$) ve gevşek kum ($D_r = 0.23$) gibi 3 farklı zeminde dairesel kazık etrafında dalga kaynaklı oyulma için deneysel çalışma yaparak, sıkılığın oyulmaya etkisini incelemişlerdir.

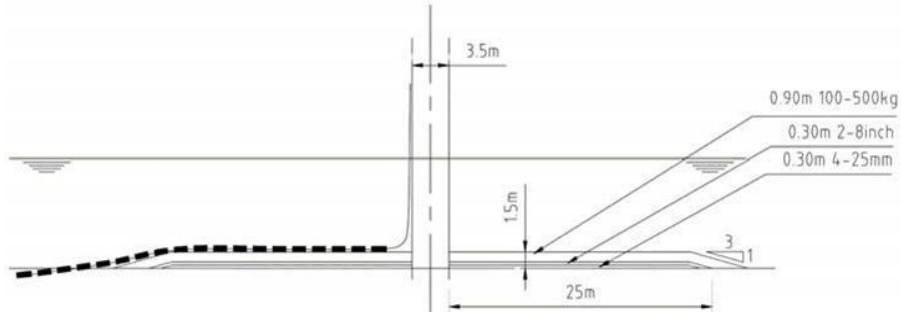
3.1.1 Oyulmanın malzeme yorulmasına etkisi

Yorulma, metal parçaların yinelenen gerilmeler altında giderek dayanımını yitirmesidir. İşte bu tekrarlanan gerilmeler neticesinde, malzeme aslında dayanabileceğinden çok daha zayıf son bir gerilimin etkisiyle çatlayabilecek ya da kırılacak duruma gelebilmektedir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin tasarım

ömürlerince zamanla değişken olan rüzgar ve dalga yüklerine maruz kalacağı açıktır. Böylece altyapı üzerinde oluşacak gerilmeler malzemeyi yorulmaya yatkın hale getirecektir. Silindirik çelik yapılar, örneğin tekil kazık gibi, dalga yüklerinden dolayı yorulmaya meyillidirler. Temelin rijitliğindeki herhangi bir değişiklik yorulma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Oyulmada küçük değişiklikler temel rijitliğinde ve çevrimsel gerilmelerde küçük değişikliklere sebep olacaktır. Yalnız bu küçük değişiklikler büyük yorulmalara neden olabilmektedir. Tipik tekil kazıklar için temellerin doğal frekansının küçük miktarlarda (%5-%8) düşmesinin yorulma üzerinde %100 gibi çok etkili bir artışa sebep olabildiğini göstermektedir (Malhotra, 2007). Sonuç olarak, kazığın doğal frekansının düşmesi yorulmayı arttıracaktır.

3.1.2 Oyulma koruma tabakasının filtre tabakası ile kullanılması

Filtre tabakasının iki temel fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan ilki ani oluşacak basınç gradyanları altında çekirdek tabakasının yıkanmasının böylece malzeme kaybının yaşanmasının önlenmesidir. İkinci fonksiyonu ise çekirdek tabakasının içerisinde boşluk suyu basıncının artmaması, birikmemesi için su akışına izin vermesidir. Şekil 3.4'te örnek katmanlardan oluşan tipik bir oyulma koruma tabakası görülmektedir.



Şekil 3.4 : Üç tabakadan oluşan örnek bir oyulma koruma kütlesi (Tempel ve diğ, 2010).

Yukarıda anlatılan bu fonksiyonların yerine gelebilmesi için bir filtre kriteri uygulanması gerekmektedir (CIRIA, 2007).

3.2 Tekrarlı Yükler Altında Oyulma Koruma Tabakasının ve Deniz Tabanının Davranışı

Rüzgâr türbini temellerinin etrafında dalga ve akıntı etkilerine karşı oyulma koruması (anroşman/taş tahkimat) büyük sıklıkla uygulansa da bunların sismik açıdan aktif bölgelerde (deprem yükü altında) türbin temeli ve deniz tabanı ile nasıl bir etkileşime girecekleri ve bunun stabilite açısından sonuçları henüz yeterince çalışılmamıştır. Bunun önemli bir nedeni deniz üstü rüzgâr türbinlerinin günümüze kadar daha ziyade sismik açıdan aktif olmayan (Kuzey Avrupa gibi) yerlerde inşa edilegelmiş olmasıdır. Ülkemiz gibi sismik alanlar içerisinde açık deniz rüzgar türbinlerinin uygulanabilmesi amacıyla koruma tabakasının davranışının belirlenmesi, anlaşılması büyük bir önem arz etmektedir.

3.2.1 Deniz tabanı sıvılaşmasının tanımı ve mekanizması

Kıyı mühendisliği ve deniz geotekniği terminolojisinde sıvılaşma; suya doymuş gevşek zeminlerde zemin yatağındaki taneler arasındaki efektif gerilmelerin kaybolması ve dolayısıyla su-tane karışımının birlikte bir akışkan gibi davranması durumu için kullanılır (Sumer, 2014).

Zeminin deprem etkisi altında sıvılaşabilirliği tane boyutu ve dağılımı yanında, jeolojik yaşı ve çökelme koşulları, başlangıç sıklık derecesine bağlı hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği gibi özellikleri yanında depremin büyüklüğü, süresi, uzaklığı gibi sismik faktörlere bağlıdır (Ozaydin, 2007).

Deniz tabanı için dalga ve deprem durumunda da sıvılaşma olgusu aynı mekanizmayla işler. Taze yerleşmiş, gevşek, granüler, önceden sıvılaşma geçirmemiş ve hidrolik iletkenliği (geçirimsizliği) düşük zeminler, ilerleyen dalga ya da deprem gibi tekrarlı yüklere maruz kalınca zeminde sıvılaşma veya boşluk suyu artışı kaynaklı birçok problemler meydana gelebilmektedir.

Kıyı ve deniz zeminlerinin sıvılaşması, dalga kaynaklı olabileceği gibi (Seed ve Rahman, 1978; Sassa ve Sekiguchi, 1999; Sumer ve Fredsøe, 2002; Sumer ve diğ., 2006a, 2012) sismik hareketlerden de kaynaklanabilir (Kramer, 1996; Jeng, 2013; Sumer, 2014).

Bu koşulda zemin göçer ve dolayısı ile bu zemin üzerine ve içine oturan tüm yapılar (dalgakıranlar, rıhtım duvarları, kazıklı yapılar, deniz istinat duvarları, boru hatları ve

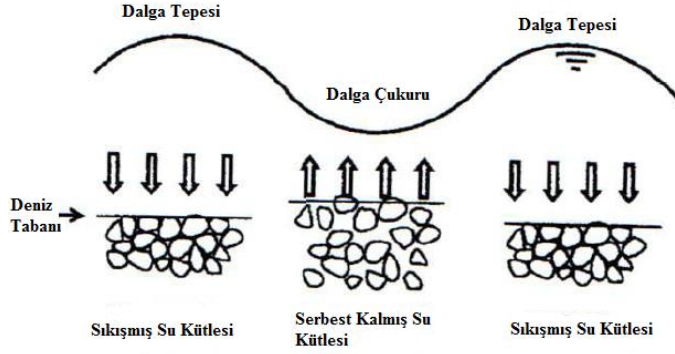
taş dolgu vb.) stabilitelerini kaybederler. Sıvılaşmış zeminle birlikte, dalgaların sebep olduğu taban oyulmasına karşı koruma için kullanılan büyük tekil bloklar da deniz tabanına batabilir (Kırca, 2013).

Tekrarlı yüklerden oluşacak artık boşluk suyu basıncı nedeniyle yalnızca sıvılaşma ortaya çıkmakla kalmaz, bunun yanı sıra temelin yukarı yönde hareket etmesi, temel çeperlerindeki sürtünme kuvvetlerinin değişmesi ve temelin ötelenmesine bağlı yanıl dayanımında değişiklikler de meydana gelebilecektir (Whitehouse ve diğ., 2004). Ayrıca boşluk suyu basıncın artıp, efektif gerilmenin azalmasıyla düşey yük taşıma kapasitesini kaybetmeye başlayan zemin, oyulmaya çok daha yatkın olacaktır (Whitehouse, 1998).

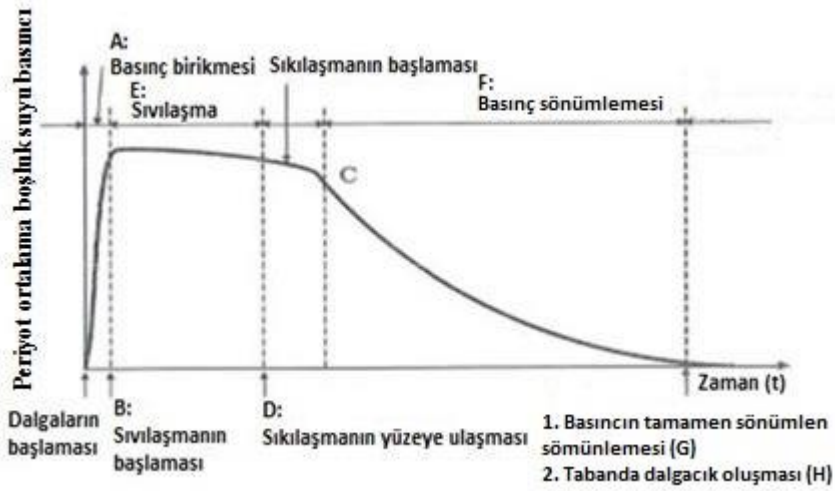
Deniz tabanı zeminlerinde sıvılaşma, iki ayrı mekanizmaya dayanmaktadır. Bunlardan ilki yukarı yönlü basınç gradyanının neden olduğu anlık (momentary) sıvılaşmadır (Şekil 3.5). İkincisi ise boşluk suyu basıncı artışıyla oluşan kalıcı (residual) sıvılaşmadır (Şekil 3.6). Kalıcı sıvılaşmada tekrarlı yükler zemin üzerinde kayma deformasyonları oluşturmaktadır. Eğer taneler gevşekse tekrarlı kayma deformasyonları zemindeki tanecikleri tekrar düzenlemek ve yerleştirmek ister. Bu da taneler arası boşluğu azaltarak boşluk suyu basıncını artırmaktadır. Tekrarlı yük devam ettikçe boşluk suyu basıncı birikmeye başlayacaktır. Boşluk suyu basıncı zeminin ilk normal ortalama efektif gerilmesine (σ_0') ulaşırsa zemin sıvılaşacaktır. Dalga etkisi altında sıvılaşma ilk olarak deniz tabanında başlar ve aşağıya doğru ilerler. Bu aşamayı geçirimsiz tabakadan deniz tabanına, yukarıya doğru ilerleyecek şekilde sıkılaşıma (compaction) aşaması izlemektedir. Bu arada boşluk suyu geçirimsiz zeminden yukarı yönde ilerler ve zeminden drene olurken, artık boşluk suyu basıncı da düşerek sıfırlanır. Deprem etkisi altında sıvılaşma ise önce kayma deformasyonlarının yüksek olduğu daha alt tabakalarda başlar ve yukarı doğru yayılır.

Anlık sıvılaşma ise yalnızca tam doymun olmayan zeminlerde, dalga kaynaklı oluşur ve yalnızca deniz tabanı civarında etkili olur. Dalga çukurunun geçişi sırasında zemindeki boşluk suyu basıncının taneler arasındaki hava bölgeleri tarafından ani olarak sönümlenmesi sonucu yukarı yönlü oluşan geçici basınç gradyanının düşey efektif gerilmeyi yenmesi sonucu meydana gelir. Anlık sıvılaşmanın meydana geleceği kohezyonsuz zeminin permeabilitesi kalıcı sıvılaşma yaşanacak zeminin permeabilitesine nispetle daha yüksektir (Groot ve diğ., 2006).

Kalıcı sıvılaşma hem dalga hem de deprem etkisi ile oluşabilir ve çok daha derinlere kadar sirayet edebilir. Bu itibarla kıyı ve deniz yapıları açısından daha kritik olan türü, kalıcı sıvılaşmadır.



Şekil 3.5 : Dalga kaynaklı ani sıvılaşma (Groot ve diğ, 2006).



Şekil 3.6 : Kalıcı sıvılaşma için z derinliğinde periyot ortalama boşluk suyu basıncı $\bar{p}$ 'nin tipik zaman serisi (Sumer, 2014).

Zeminin maruz kaldığı sarsıntı sonucunda sıvılaşmadan dolayı zemin taşıma gücünü kaybederse, üzerindeki yapı stabilite ve bütünlük açısından bir risk altında bulunacaktır. Bu tür zemin göçmeleri Japonya ve Türkiye'de son yıllardaki depremlerde olduğu gibi çok yıkıcı olabilmektedir. Sıvılaşma nedeni ile deniz yapılarının uğradığı zararlarla ilgili literatürde oldukça fazla kayıt bulunmaktadır (Şili Wyllie ve diğ., 1986; Japonya Iai ve Kameoka, 1993 ve Iai ve diğ., 1994; ABD Hall, 1995; Tayvan Sugoro ve diğ., 1999; Türkiye Boulanger ve diğ., 2000 ve Sumer ve diğ., 2002; Yunanistan Katopodi ve Iosifidov, 2004).

Deprem kaynaklı deniz tabanı sıvılaşmasının yanında, birçok araştırmacı deniz yapılarında dalga kaynaklı sıvılaşmanın yapı üzerindeki tesirlerini incelemiştir. Deniz tabanında dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek için ilk olarak Sumer ve Fredsoe'nun (2002), ortaya koymuş olduğu analitik bir model, Sumer ve diğ. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışması ile doğrulanmıştır. Bu model basitliği, kolay uygulanabilirliği ve güvenilirliği ile pratikte en çok kullanılan modellerden biridir.

Dalga kaynaklı sıvılaşma sürecinin deniz tabanındaki tüm aşamaları ayrıntılı olarak ilk kez Sumer ve diğ. (2006a), tarafından açıklanmıştır. Bu çalışmada, dalgaların zemin üzerinde yarattığı tekrarlı kayma deformasyonları ile zemindeki boşluk suyunun nasıl arttığı, zeminin nasıl sıvılaştığı, sıvılaşmayı müteakip boşluk suyu basıncının yukarı yönde oluşan zayıf sızma akımı ile nasıl boşaldığı ve sıvılaşmanın ardından zeminin nasıl kompakte olduğu (sıkıştığı) farklı dalga koşulları için açıklanmıştır.

Sıvılaşan zeminler ile yapı etkileşimi konusunda Sumer ve diğ. (1999), dalgalar altında sıvılaşan zeminlerde, zemine gömülü boru hatlarının yüzmesinin ya da batmasının hangi parametrelere bağlı olduğunu ve nasıl belirlenebileceğini çalışmışlardır. Daha sonra Kirca (2013), düzgün olmayan blokların sıvılaşmış zeminde hangi derinliğe kadar ve hangi hızla batacaklarını çalışmış, batma derinliği ve hızının blok şeklinden bağımsız olduğunu ortaya koymuştur.

Kirca ve diğ. (2013a) kıyı yapıları etrafında dalga yansıması sonucu oluşan duran dalga etkisi ile deniz tabanının nasıl sıvılaştığını; duran dalga altında sıvılaşmanın ilerleyen dalga etkisiyle sıvılaşmadan ne gibi farkları ve benzerlikleri olduğunu deneysel çalışmaları ile ortaya koymuşlardır. Dalga kaynaklı sıvılaşmada zeminde kil içeriğinin sıvılaşmaya olan etkisi ise Kirca ve diğ. (2013b), tarafından çalışılmıştır. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlara göre silt-kil karışımı içerisindeki kil muhtevası %30 civarında anahtar bir değere kadar arttırıldığında zeminin sıvılaşmaya olan yatkınlığının artarken, kil muhtevası %30'un ötesinde artırılan zeminlerde boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma gözlenmemiştir. İlk mekanizma karışımın permeabilitesiyle açıklanmakta, zemin permeabilitenin azalması ile boşluk suyu drene edilemediği için sıvılaşmaya daha yatkın olmaktadır. Karışımın bu anahtar değerden fazla kil içermesiyle silt taneleri kil matrisleriyle sarmalanacak ve tekrarlı kayma gerilmeleri altında tekrar yeniden düzenlenemeyeceklerdir.

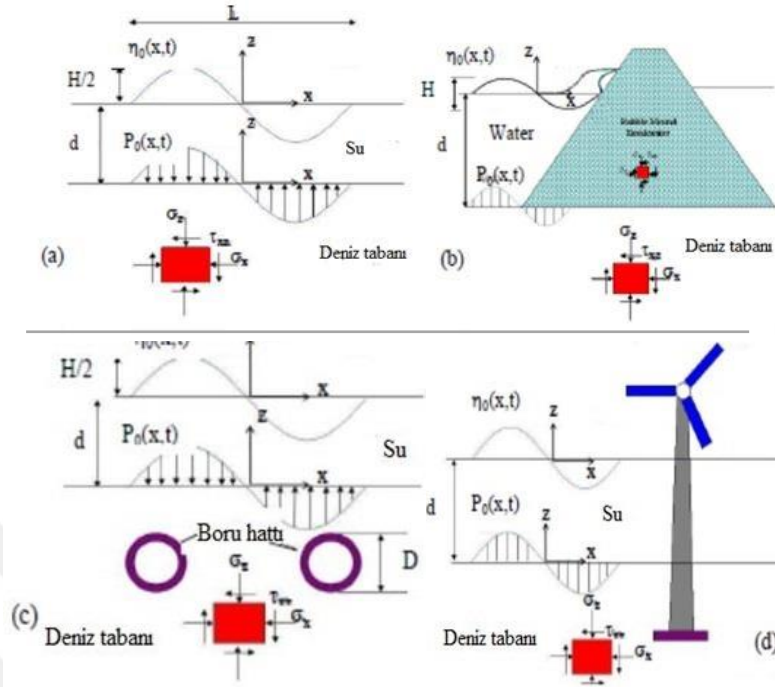
Sumer ve diğ. (2010), dalga etkisi altında sıvılaşabilen zeminler üzerinde bulunan taş kaplamaların davranışlarını ve sıvılaşmaya etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki zemin sıvılaşması başlıca iki ana parametreden etkilenmektedir. Bunlar taş kaplamanın yoğunluğu ve kaplamadaki tabaka sayısıdır. Buna mukabil Kirca (2013), deniz tabanında gömülü düzgün olmayan blokların dalga kaynaklı sıvılaşma etkisiyle batmalarını deneysel olarak incelemiştir. Zemindeki boşluk suyu basıncı, su yüzeyi zaman serileri ve blok yer değiştirmeleri ölçülmüştür. Sonuçlar, blok çevresindeki zeminde birikmiş artık boşluk suyu basınçlarının ilk ortalama efektif normal gerilme seviyesine ulaştığı anda blokların batmaya başladığını göstermiştir. Bu çalışma, tekil blokların batmasının kinematik ve dinamiğini incelemesi bakımından mevcut tez çalışması açısından önem arz etmektedir.

Sumer ve diğ. (2006b), dalga etkisi altında boru hattı etrafındaki sıvılaşmayı deneysel olarak araştırmıştır. Boşluk suyu basıncı, biri boru üzerinde biri de borudan uzak bir bölgede olmak üzere zemin içinde aynı derinlikteki iki noktada ölçülmüştür. Sonuçlar boşluk suyu artışının ve sıvılaşmanın borunun mevcudiyetinden etkilendiğini göstermektedir. Aynı konuyu inceledikleri çalışmalarında Teh ve diğ. (2006), sıvılaşabilen deniz tabanında bulunan gömülü boru hatlarının stabilitesi üzerine eğilmişlerdir. Bu çalışmada boru hattı stabilite tasarımı gözden geçirilmiş deneylerle karşılaştırma yapılmıştır. Sıvılaşan zeminde boru hatlarının göçme mekanizması incelenmiş, boru hatlarının batma derinliklerini tahmin edebilmek için analitik bir model önerilmiştir.

Sumer ve diğ. (2011), dalga etkisiyle sıvılaşan zeminin deplasmanlarına maruz kalan gömülü koruma tabakalarının stabilitesini incelemiştir. Bu çalışmada deneyler göstermiştir ki, taş kaplama gömülü halde değilken büyük dalgalar altında stabil kalmasına rağmen, üzeri gevşek zeminle örtülürse sıvılaşan zemin hareketiyle stabilitesini kaybedebilmektedir (Sumer ve diğ, 2011).

Kirca ve Ülker (2014), dalga kaynaklı tekrarlı yükler ve darbe (impact) yükü altında deniz tabanı ile yapı sistemlerinin stabilitesini kaybetmesinin deniz yapıları için en önemli tehditlerden biri olduğunu belirtmişler, ayrıca küresel iklim değişikliği sebebiyle fırtınalarda görülecek sıklık ve büyüklük artışının kıyı ve liman yapılarının tasarımında göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır (Şekil 3.7). Bu stabilite kayıplarının ortaya çıkmasını sadece geoteknik yönünden değil, kıyı ve deniz hidrodinamiği yönünden de incelemek gerektiğini belirtmişlerdir. Bu iki disiplinin

ortak çizgisi ile kıyı ve deniz mühendisliğinde deniz hidro-geomekaniği ismi verilebilecek yeni bir alt dal ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.7 : Deniz hidromekanik problemleri a) Serbest alan, b) Kıyı koruma yapısı, c) Gömülü boru hattı, d) Rüzgar türbininde deniz tabanı tekli kazık etkileşimi (Kirca ve Ülker ,2014).

Sıvılaşma konusunda, özellikle analitik ve sayısal modelleme üzerine yaptığı çalışmaları ile tanınan Griffith University (Avustralya) profesörlerinden J-S Jeng'in son yıllarda deniz yapıları etrafında sıvılaşma ile ilgili önemli çalışmaları olmuştur. Bu bağlamda Zhao ve diğ. (2014) ile Zhou ve diğ. (2014) deniz tabanına gömülü boru hatları etrafındaki sıvılaşmayı ve boru hattına etkilerini sayısal olarak modellemişlerdir. Ye ve diğ. (2014) bir kompozit dalgakıranın dalga etkisi altında hem anlık hem de kalıcı sıvılaşmaya maruz kalmasını incelemiş, Chang ve Jeng (2014) ise Şangay'da bulunan Donghai Açık Deniz Rüzgâr Çiftliği türbin temelleri etrafında dalgaların zeminde yarattığı boşluk suyu basıncı değişimlerini araştırmıştır. Jeng ve Zhao (2014) ise Sumer ve diğ. (2012) modelini kullanarak iki boyutlu bir kalıcı sıvılaşma modeli türetmişlerdir.

Selcuk ve diğ. (2012), sıvılaşabilen zeminler üzerine inşa edilmiş taş dolgu dalgakıranların deprem etkileri altındaki davranışı incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, (a) deniz tabanında yer alan gevşek – orta sıkı kum çökellerinde kuvvetli yer sarsıntısı etkisinde sıvılaşma durumunun ortaya çıkabileceği; (b) gevşek – orta sıkı kum çökelleri üzerinde inşa edilen taş dolgu dalgakıranların özellikle topuk

bölgelerinde sivilaşmadan kaynaklanan hasarlar oluşabileceği; (c) kum çökelleri üzerinde inşa edilen taş dolgu dalgakıranların birçok defa tekrarlı yüklere maruz kalması durumunda, deprem performansının iyileşebileceği ve hasarların daha sınırlı kalabileceği, sonuçlarına ulaşmışlardır.

Sumer (2014) tarafından yazılan kitap, deniz yapıları etrafındaki sivilaşma problemi ile ilgili literatürdeki bilgi birikiminin neredeyse tamamını içeren çok kapsamlı ve detaylı çalışmadır. Kitabın ekinde deniz tabanı sivilaşması ve kıyı yapılarının sivilaşmış zemin ile etkileşimlerini konu alan, laboratuvar deneyleri sırasında çekilmiş 5 adet video bulunmaktadır. Bu videolar incelenen olgunun anlaşılabilmesi açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Kitapta sivilaşmanın fiziği, anlık ve kalıcı sivilaşma, dalga kaynaklı sivilaşmanın modellenmesi, deprem kaynaklı deniz tabanı sivilaşması, yansıyan (duran) dalga durumu, killi zemin durumu ve sivilaşmaya karşı alınabilecek önlemler gibi konular ele alınmakta; uygulamacıların yararlanmaları için abak ve denklemler sunulmaktadır.

Deprem (sismik) yükleri altında temel tasarımı üzerine literatürde birçok çalışma mevcut iken, sismik açıdan aktif alanlarda deniz üstü rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve uygulaması ile ilgili literatür oldukça sınırlıdır. Özellikle oyulma önleyici anroşman kaplamaların, üzerine oturduğu zeminle beraber deprem yükleri altında nasıl davranış göstereceği ile ilgili çalışmalar çok çok azdır. Sumer ve diğ. (2010) bir anroşman tabakasının altında dalga kaynaklı sivilaşmanın nasıl gelişeceğini çalışmışlardır. Bu çalışmada, anroşman tabakasının zemin içine batabileceği, ancak belli bir taş blok yoğunluğu ile yerleştirildiğinde bu batmanın sınırlandırılabilceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu noktadan hareketle, oyulma koruma tabakalarının sismik yükler etkisinde de altındaki ve etrafındaki zeminlerle birlikte batma eğiliminde olacağı sonucu çıkarılabilir. Ancak bu batmanın ne kadar olacağı, kaplamanın hangi kısmında etkili olacağı, türbin temelinin varlığının bir etkisi olup olmayacağı, oyulma tabakasının işlevini kaybedip etmeyeceği ve yapının genel stabilitesini etkilenip etkilenmeyeceği konuları cevap beklemektedir.

4. BORULANMA OLGUSUNUN TANIMI VE KORUMA TABAKASI STABİLİTESİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

Yapılan incelemeler göstermiştir ki, koruma tabakası altındaki zeminin dışarıya taşınması (emilmesi) ve koruma tabakasının hasarı (oturması vb.), esasen yukarı yönlü basınç gradyanları (hidrolik eğim) oluşması nedeniyle gerçekleşmektedir. Dışarı yönlü bu basınç gradyanlarının oluşması ise akıntı ve dalga gibi hidrodinamik etkiler sebebiyle olduğu kadar, sismik yüklerden veya rüzgâr yüklerinden kaynaklanacak salınım ve benzeri titreşimlerden kaynaklanan boşluk suyu basıncı birikmesi nedeniyle de gerçekleşebilmektedir. Zemin dışında basıncın hidrostatik değerinde olduğu (artık boşluk suyu basıncının sıfır olduğu) düşünüldüğünde, bu iki ortam arasındaki basınç farklılığından dolayı yukarı yönlü (dışarıya doğru) bir basınç gradyanı (hidrolik eğim) oluşacak ve ince tabakaların kalın tabakalar arasından emilmesine yol açabilecektir. Bu olguya hidrolik literatüründe borulanma denilmektedir. Nitekim borulanma benzeri bu mekanizma daha önce yapılan birçok çalışmada görülmüş ve tasvir edilmiştir (Nielsen ve diğ., 2015). Borulanmayla zeminde malzeme kaybı yaşanır ve sonuçta yapıda göçme boyutunda hasar meydana gelebilir. Literatürde böylecesine hidrolik yapılarda birçok göçmelerin olduğu belirtilmektedir. Richards ve Reddy (2007), 250’den fazla borulanma türü göçme vakasını derlemiştir. Borulanma, hidrolik eğim kaynaklı boşluk suyu akışı ya da sızma nedeniyle çok küçük kanallar arasından ince malzemelerin taşınma biçimi olarak tanımlanabilir (CIRIA, 2007).

Tomlinson ve Vaid (2000), borulanmayı tabandaki zemin tanelerinin granüler malzemelerin arasından serbest olarak hareket etmesi olarak tanımlamıştır. Hidrolik ve kıyı yapıları sadece kararlı hidrolik eğimlere (batardo, bent ya da baraj gibi su yapıları) maruz kalmazlar ayrıca dalga ve gel-git hareketlerinden dolayı kararsız basınç gradyanına (salınımlı, ani, aniden hızlanma vb.) maruz kalırlar. Bu durumlarda da yine standartlara uygun filtre önlemleri alınmamışsa her iki durumda da borulanma hadisesi gerçekleşebilir.

Bu düşünceden yola çıkarak hem borulanma olgusunun mekanizması derinlemesine incelenmiş; hem de mevcut teoriyi şev eğimi, filtre/koruma tabakaları ve dalga kaynaklı etkileri de kapsayacak şekilde genişletilmeye yönelik tek boyutlu analitik bir model üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca salınlı basınç gradyanları altında borulanma olgusunun deneysel olarak incelenmesi de gerekli görüldüğünden ek bir deney düzeneği oluşturulmuştur.

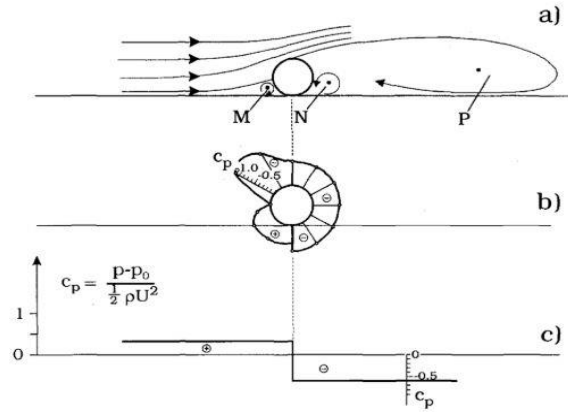
4.1 Borulanmanın Mekanizması ve Deniz Yapılarının Stabilitesine Etkileri

Basınç gradyanı etkisi altında, yapıların etrafındaki deniz tabanının borulanma sonucu göçmesi mekanizması, Sumer ve Fredsoe (2002) çalışmasının 2. Bölümünde boru hatları örneği üzerinden net bir tasvir ve deneysel veri ile örneklenmektedir. Burada boru hatları üzerinden açıklanan mekanizmanın ve ortaya konulan ilkelerin birçok farklı durum için de geçerli olacağı gösterilecektir.

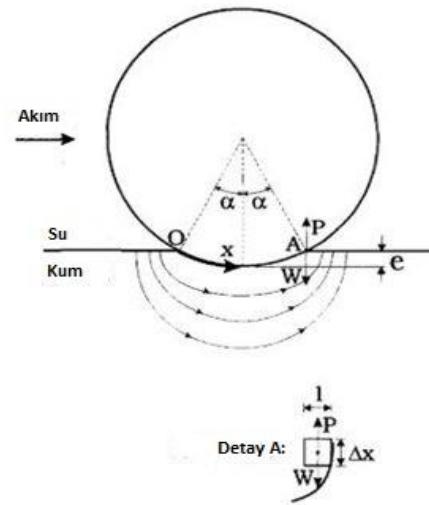
Deniz tabanı üzerine oturan boru hatları akıntı ve/veya dalga etkisine maruz kaldıkları anda boru altındaki zemin içinde mambadan mansaba (önden arkaya) doğru bir basınç gradyanı meydana gelmektedir (Şekil 4.1). Bu basınç gradyanı etkisi ile boşluk suyu akımı tetiklenmekte, ancak direnç kuvvetlerinin çok yüksek olması nedeniyle boşluk suyu zemin taneleri arasından akamayıp su-tane karışımından oluşan zemin toptan hareket etmektedir (Şekil 4.2). Bu mekanizma yukarıda da belirtildiği gibi borulanma olarak da adlandırılmaktadır ve boru hatlarında oyulmanın başlamasının temel nedeni olarak ortaya konmuştur.

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere akıntının etkisiyle boru hattının menbasında hidrostatik duruma göre pozitif ve mansabında hidrostatik duruma göre negatif basınçlar oluşmaktadır (Sumer ve Fredsoe, 2002). Bu basınç farkı borunun batıklık oranına göre değişecek bir mesafe üzerinden bir basınç gradyanı (hidrolik eğim) ortaya çıkarmaktadır. Bu hidrolik eğimin etkisiyle boru altındaki kum tabakasında bir sızma akımı olacaktır (Şekil 4.2). Akım hızı yavaş yavaş arttırıldığı zaman basınç gradyanı kritik bir noktaya ulaşır. Bu noktadan sonra basınç gradyanının ortaya çıkardığı kaldırma kuvveti zeminin batmış ağırlığını yener ve eş zamanlı olarak mansap tarafındaki zemin yüzeyi yükselmeye başlar. Böylece tane-su karışımı boru altındaki boşluktan dışarı çıkacak ve borulanma meydana gelecektir. Kıyı yapılarından başka baraj, batardo gibi hidrolik yapıların göçme nedenleri olarak zemin mekaniğinde de borulanma iyi bilinmektedir (Terzaghi, 1948).

Boru hatlarında oyulma başlangıcı için kritik durum Mao (1986), Chiew (1990), Sumer ve Fredsoe (1991), Klomp ve Tonda (1995) ve Sumer ve diğ. (2001a) gibi birçok çalışmada ele alınmıştır. Mao (1986) boru önündeki ve arkasındaki çevrintilerin rolü üzerinde çalışmış, ayrıca boru altındaki oyulmanın başlangıç mekanizmasını ele almıştır. Fredsoe ve Sumer (1991) deneysel çalışmalarla dalga durumunda oyulmanın başlayacağı kritik koşulu belirlemişlerdir. Bunu KC sayısı ve gömülme derinliğinin boru çapına oranı (e/D_{boru}) gibi şekilde iki boyutsuz parametreyle açıklamışlardır. Daha sonra Sumer ve diğ. (1991) dalga ve akıntı kombinasyonu üzerinde çalışmış, boru altındaki basınç gradyanlarını (hidrolik eğimleri) ölçmüşlerdir. Bu basınç gradyanlarının yüksek sızma akımlarını oluşturarak borulanmaya sebep olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 4.1 : Deniz tabanındaki boru için basınç dağılımları (Sumer ve Fredsoe, 2002).



Şekil 4.2 : Boru altındaki sızma akımı (Sumer ve Fredsoe, 2002).

Kohezyonsuz granüler zeminde borulanma için kritik durum belirlenecek olursa, burada göz önüne alınması gereken iki tane kuvvet vardır. Bunlardan birincisi harekete geçiren kuvvet (örneğin sızma kuvveti) ve diğeri ise direnen kuvvettir (zeminin batık ağırlığı gibi).

Buradan şekil 4.2'ye referansla;

$$P = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \text{ yazılabilir.} \quad (4.1)$$

p basınç, x ise borunun memba ile mansap noktaları arasındaki sızma uzunluğudur. $\partial p / \partial x$ ise sızma kuvvetini oluşturan basınç gradyanı, P ise kum ve su karışımının birim alanı üzerindeki kuvvettir ($\Delta x \times 1 \times 1$ boyutlarında). Kumun batık ağırlığı;

$$W = (\gamma_s - \gamma) \Delta x (1 - n) = \gamma (s - 1) (1 - n) \Delta x \text{ yazılabilir.} \quad (4.2)$$

Burada $s = \gamma_s / \gamma$ kum tanelerinin suya göre yoğunluğudur (bağıl yoğunluğu). γ , suyun özgül ağırlığı, n ise zeminin porozitesidir. Sızma kuvveti (P), batık ağırlıktan (W) büyük olduğu anda kritik durum meydana gelmektedir. (Sürtünme kuvvetleri anlık göçmelerde pratikte ihmal edilebilmektedir.)

$$P \geq W \quad (4.3)$$

Buradan eşitlik (4.1) ve (4.2)'den kritik durum bulunacak olursa,

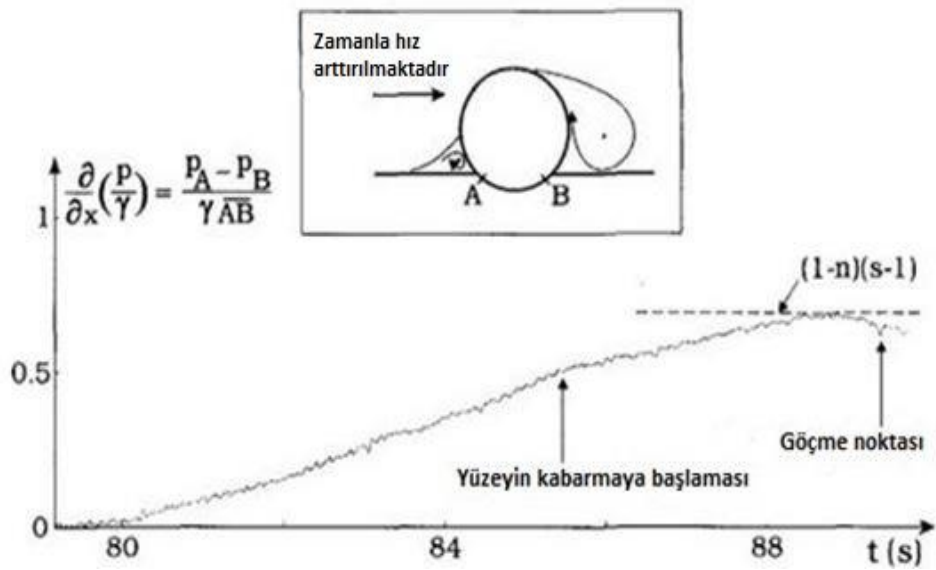
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right) \geq (s - 1) (1 - n) \text{ bulunur.} \quad (4.4)$$

Yani basınç gradyanı $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right)$, batmış ağırlığı $(s - 1) (1 - n)$ geçtiği anda kritik durum meydana gelmektedir.

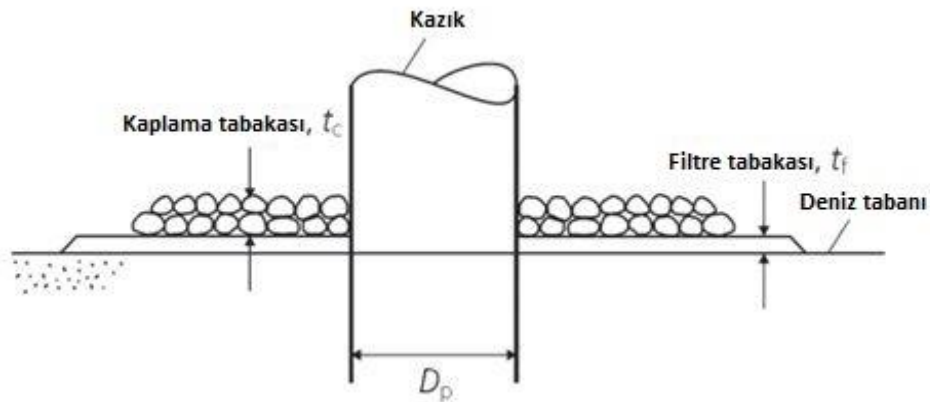
Sumer, kitabında yine bu bölümünde (2001a) yaptığı çalışmadan bahsetmiştir. Bu çalışmada, Şekil 4.3'te de görüleceği gibi akım hızı kritik noktaya ulaşınca kadar aşamalı olarak arttırılmıştır. Yapılan ölçümlerle de basınç gradyanı ve zaman serileri arasındaki ilişki incelenmiştir.

Sumer ve Nielsen (2013), tekil kazıkların oyulma koruma tabakasının batmasının önlenmesi ve sınırlandırılması amacıyla gerekli filtre tabakası kalınlığının belirlenmesi için çalışmışlardır. Yaklaşımları genellikle filtre tabakası altındaki taban malzemelerinin yatay taşınımını kapsamaktadır. Bununla birlikte dikey basınç

gradyanlarının dalga durumunda etkili olduğu görülmüştür. Geçtiğimiz on yıl boyunca birçok rüzgâr türbininin denizde inşa edildiğini, bu türbinlerin inşa maliyetini azaltmak için tesisin servis ömrü boyunca karşılaştacağı yükler sonucunda yapılacak tasarımların doğru olabilmesi için türbinin üst yapısını, temelini, temel civarındaki oyulmaların ve temel civarındaki oyulma korumalarının davranışlarının çok iyi bilinmesi gerektiğinin önemini vurgulamışlardır. Ayrıca inşa edilen türbinlerin büyük çoğunluğunda oyulma korumasının mevcut olduğunu, bunu da kazık çapının üç ya da dört katı çapa kadar filtre tabakalı ya da tabakasız taş kaplama olarak yapıldığını belirtilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.3 : Boru altındaki basınç değişiminin zaman serileri Sumer ve Fredsoe (2002).

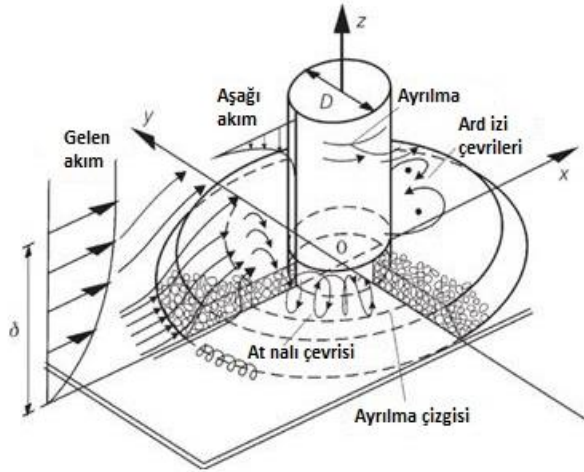


Şekil 4.4 : Açık deniz rüzgar türbin temeli civarı oyulma koruması tabakası (Sumer ve Nielsen, 2013).

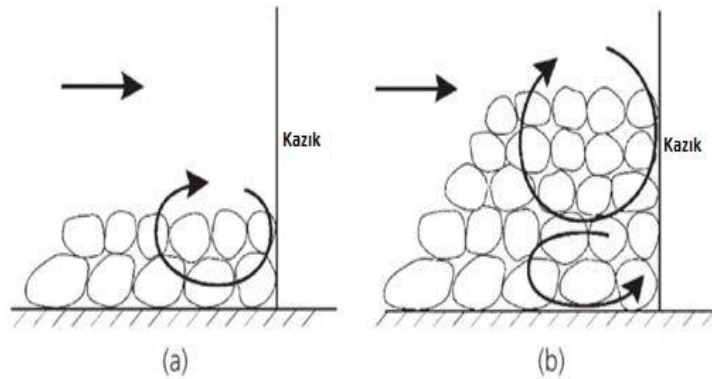
Yazarlar, bu çalışmada Danimarka'da kurulan ilk büyük rüzgar çiftliklerinden biri olan Horns Rev I üzerinde yoğunlaşmışlardır. Proje alanı kıyıdan 14 km ötede olup su derinliği 6,5 ile 13 km arasında değişmektedir. Bu alan akıntılara ve büyük dalga yüklerine maruz kalmaktadır. 2002 yılında kurulumu tamamlanan proje için, 2005 yılında kontrol amaçlı ölçüm yapılmış ve sonuçta tekil kazığın bitişiğinde bulunan koruma bloklarının 1,5 m battığı görülmüştür.

Nielsen (2011) ve Nielsen ve diğ. (2011) araştırmalarında akıntı ve dalgaya maruz kalan koruma tabakasında üç ana hidrolik yapının meydana geleceğini belirtmiştir (Şekil 4.5.). Bunlar;

- Tekil kazığın önünde meydana gelecek ve şekil 4.6'da da görülebileceği gibi koruma tabakalarına nüfuz edecek at-nalı çevrintileri (Horseshoe vortex).
- Tekil kazığın arkasında şekillenecek olan art çevriler (Lee – Wake vortex)
- Kazığın çevresinde oluşan akımlar.



Şekil 4.5 : Oluşan akımların şematik gösterimi (Nielsen ve diğ, 2011).



Şekil 4.6 : Koruma tabakası içerisindeki akımın şematik gösterimi (Nielsen ve diğ, 2011).

Yazarların yine bu çalışmasında akım hızı artıp hız belirli bir noktaya ulaştığında filtre tabakanın altındaki deniz tabanındaki kum taneciklerinin sediment hareketi gibi filtre ve anroşman tabakasına doğru hareket etmeye başlayacağını belirtmişler, boyutsuz parametrelerle taban kumlarının hareketlerini tanımlamışlardır.

$$\Omega_{cr} = f\left(Re_g, N_c, N_f, \frac{D_c}{D_p}, \frac{D_f}{D_p}\right) \quad (4.5)$$

Burada D_c anroşman taş çapı , D_f filtre taş çapı , D_p kazık çapı, Re_g taban sedimentine ait tane Reynolds sayısı ve Ω_{cr} mobilite (hareketlilik) parametresinin kritik değeridir. Sedimentin hareketliyle ilgili Ω tanımlanacak olunursa;

$$\Omega = \frac{U_\infty^2}{g(s-1)d} \frac{1}{D_p} D_f \frac{n_f}{1-n_f} \quad (4.6)$$

şeklinde. Bu denklem, denklem (3.1)'in kazık çapı (D_p), filtre tabakası taşlarının tane çapı (D_f) ve filtre tabakası boşluk oranı (n_f) ile modifiye edilmiş halidir.

$$Re_g = \frac{U_\infty d}{\nu} \quad (4.7)$$

ile ifade edilir. Tabaka sıra sayısı (N_f)

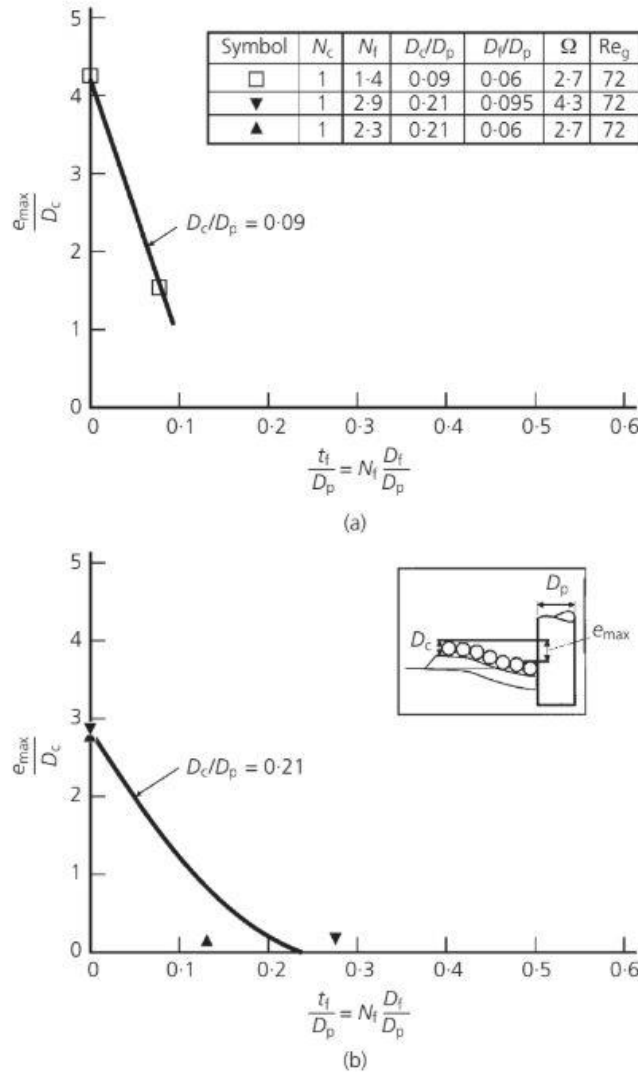
$$N_f = \frac{t_f}{D_f} \quad (4.8)$$

ile ifade edilir. Burada t_f filtre tabaka kalınlığı olup, t_c anroşman tabaka kalınlığı kullanılarak anroşman tabakası sıra sayısı (N_c) da elde edilebilir. Hareketlilik sayısı kritik değeri aştığı zaman, $\Omega > \Omega_{cr}$, taban malzemesi akım bileşenleri tarafından harekete geçirilir. Koruma tabakası içerisindeki akım sedimenti dışarıya taşıyacak ve sonuçta koruma tabakası batacaktır Maksimum batma miktarı e_{max} , anroşman tabakası tane çapı ile normalize edildiğinde aşağıdaki boyutsuz parametrelerin bir fonksiyonu olacaktır.

$$\frac{e_{max}}{D_c} = f\left(\Omega, Re_g, N_c, N_f, \frac{D_c}{D_p}, \frac{D_f}{D_p}\right) \quad (4.9)$$

Yine Nielsen (2011), filtre tabakası kullanarak ve kullanmayarak koruma tabakasının batması ile ilgili çok sayıda deney yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan filtre tabakalarının rolü şekil 4.7’de açıkça görülmektedir.

Anroşman tabakası , D_c/D_p filtre taşlarının $t_f/D_p \cong 0,1$ uygulanması ile e_{max}/D_c oranı 4,5’den 1,5’e düşmüştür. Aynı şekilde $D_c/D_p = 0,21$ durumunda $t_f/D_p \cong 0,2$ ile batma, filtre taşlarının uygulanması ile e_{max}/D_c 3’den yaklaşık 0,2’ye düşmüştür.



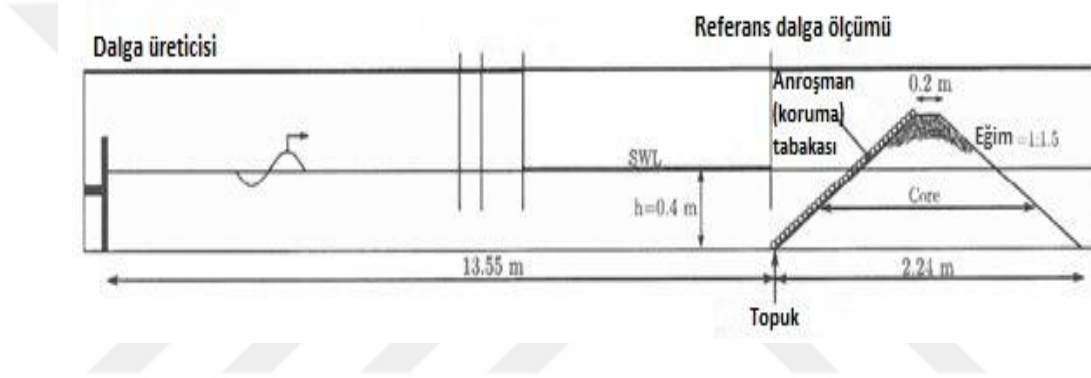
Şekil 4.7 : Koruma tabakasında maksimum batma (Nielsen ve diğ, 2011).

Yapılan bu çalışma ile sonuç olarak en şiddetli fırtına koşullarında bile anroşman tabakasının herhangi bir hareket halinde olmadığı görülmüştür. Var olan hareketin ise tekil kazığın bitişiğinde bulunan filtre tabakasının batmasından ya da filtre

içerisinde bulunan kumdan ya da filtre ile kaplama taşları arasında bulunan kumların hareketinden kaynaklandığı görülmüştür.

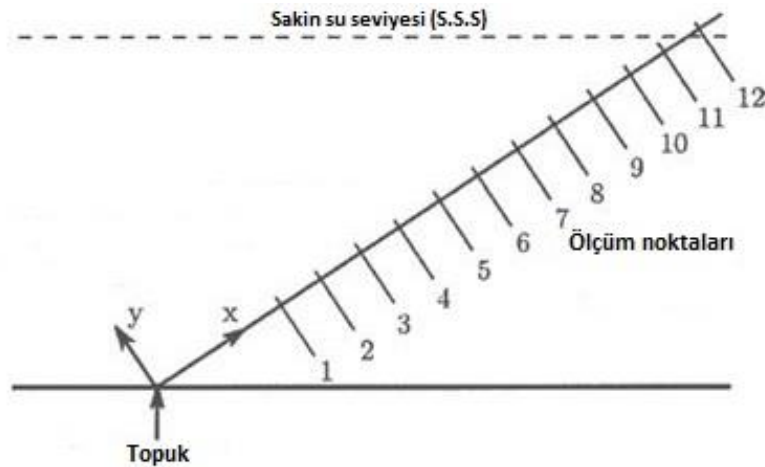
Jensen ve diğ. (2014), düzenli dalgalara maruz kalmış boşluklu taş dalgakıran yapısındaki koruma tabakası altında bulunan çekirdek tabakasında oluşan basınç kaynaklı kuvvetlerin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalarda bulunmuşlar ve ölçümleri gerçekleştirmiştir. Dalga çekilme aşaması esnasında çekirdek tabakası içerisinde oluşan basınç gradyanlarını incelemiştir ve bu basınç gradyanlarının yapının tüm durağanlığını etkileyecek büyüklüğe ulaşabildiğini göstermiştir.

Deneyler boyu 25 m, genişliği 0,6 m ve derinliği 0,80 m olan dalga kanalında yapılmıştır. Su derinliği 0,40 m’de sabitlenmiştir (Şekil 4.8).



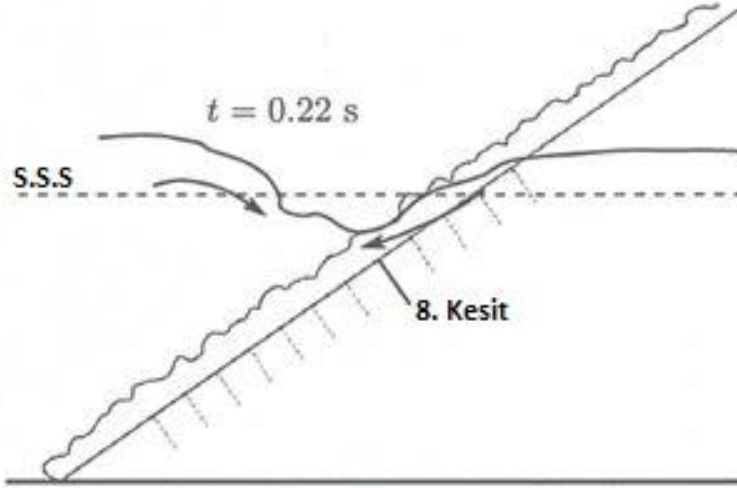
Şekil 4.8 : Dalga kanalı boy kesiti.

Dalgakıranın ön ve arka eğimi 1:1,5 olarak, çekirdek malzemenin porozitesi 0,4 olarak belirlenmiştir. Deneylerde 3 çeşit ölçüm yapılmıştır. Bunlar basınç ölçümü, hız ölçümü ve yüzel yükselti ölçümüdür. Ölçüm noktaları ilki topuktan 0,16 m yukarıda başlamak üzere 5 cm aralıklarla 12 nokta olarak belirlenmiştir. (Şekil 4.9)

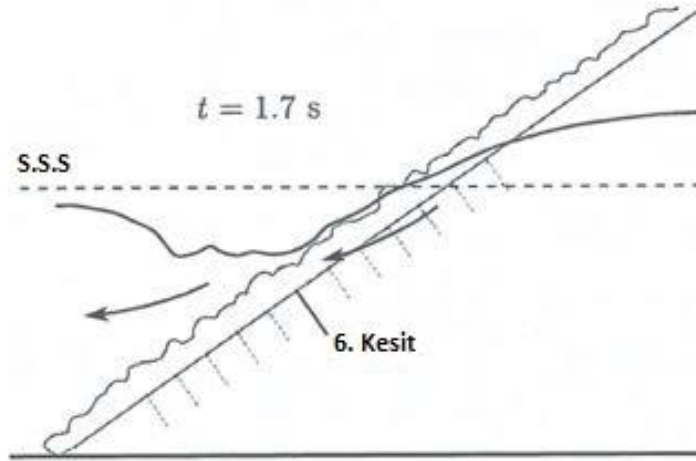


Şekil 4.9 : Boşluk suyu basınçları için ölçüm noktaları.

Boşluk suyu basınçlarını belirlemek için ise her 12 noktadan derinliği, $y = \{0; -2,0; -3,0; -5,0; -7,0; -10,0\}$ cm olarak şeklinde ölçümler yapılmıştır. (Şekil 4.10, 4.11.)



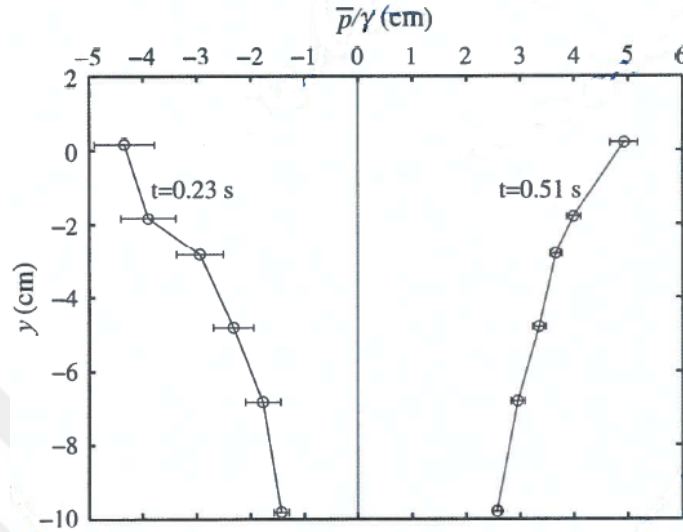
Şekil 4.10 : Dalga periyodu $T= 1.0$ s. için 8. kesitte meydana gelen maksimum dış yönlü basınç gradyanı zamanındaki su yüzeyi değişimi.



Şekil 4.11 : Dalga periyodu $T= 3.0$ s. için 6. kesitte meydana gelen maksimum dış yönlü basınç gradyanı zamanındaki su yüzeyi değişimi.

Boşluk suyu basınç profilleri dalga durumlarına göre belirlenmiştir. Şekil 4.12’de görüleceği gibi $t = 0,23$ s’de dalga çekilmesi yaşanması sebebiyle dışa doğru oluşan basınç gradyanı, $t = 0,51$ s.’de dalga tırmanması nedeniyle de içe doğru basınç gradyanı görülmektedir.

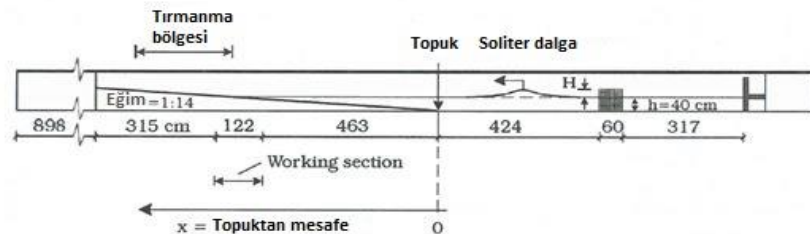
Sonuç olarak, eğimli ve boşluklu dalgakıranlarda koruma tabakası altındaki malzemede yapılan tüm deneylerde dışa doğru basınç gradyanlarının oluşturduğu ve bu basınç gradyanlarından dolayı oluşan kaldırma kuvvetinin çekirdek malzemesinin batık ağırlığının %60'ı mertebesine kadar ulaştığı görülmüştür.



Şekil 4.12 : 8. Kesitte, $T = 1.0$ s. periyotlu dalga özelliğindeki ortalama boşluk suyu basınç profilleri.

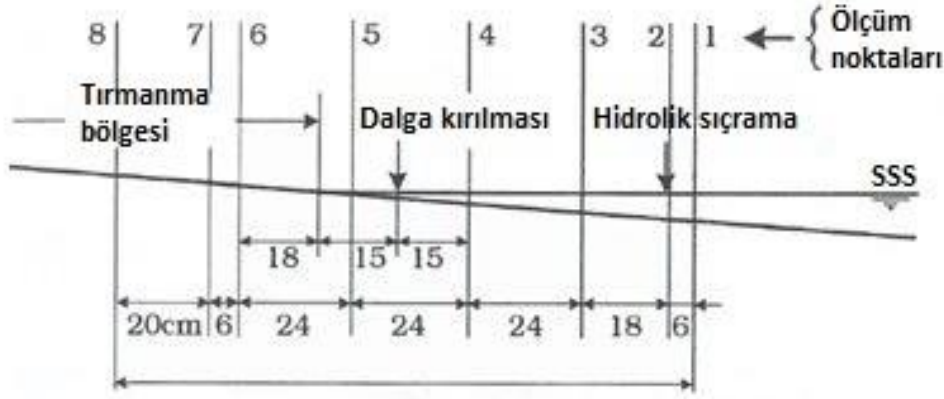
Sumer ve diğ. (2011), kırılan tekil dalga (solitary wave) sebepli sediment hareketi ve akım üzerine çalışma yapmışlardır. Kıyı çizgi profilinin değişmesinde en büyük sebep olan dalga kırılma ve tırmanma bölgesindeki sediment hareketleriyle ilgili araştırmaların tekrar yenilenmiş olduğunu, bu çalışmaların yapılma sebeplerindeki motivasyonun dalga kırılma anındaki süreçlerin tam olarak anlaşılmasının sağlanması amacıyla yapıldığı belirtilmiştir.

Deneyler 28 m uzunluğa, 0,80 m derinliğe ve 0,60 m genişliğe sahip dalga kanalında yapılmış olup kıyı eğimi 1: 14 olarak belirlenmiştir. (Şekil 4.13)



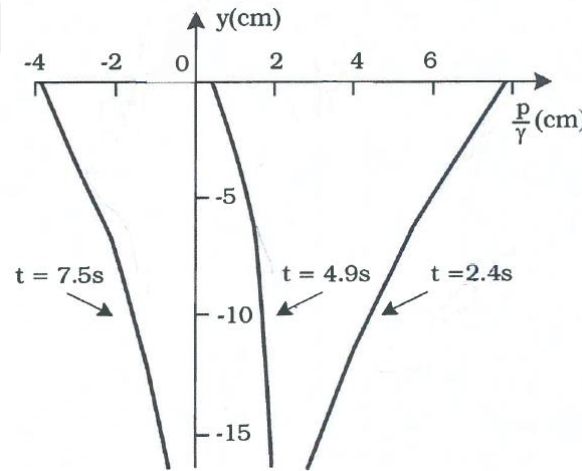
Şekil 4.13 : Sabit taban deneyleri için test düzeneği. Boyuna Kesit. Birimler cm mertebesindedir.

Boşluk suyu basınçları ölçümü için 8 nokta belirlenmiş ve her bir nokta için 5 derinlikte ($y = 0, -3.5, -6.5, -11.5$ ve -16.5 cm) ölçüm yapılmıştır. (Şekil 4.14)



Şekil 4.14 : Sabit taban deneyleri için test düzeneği. Boyuna Kesit. Birimler cm mertebesindedir.

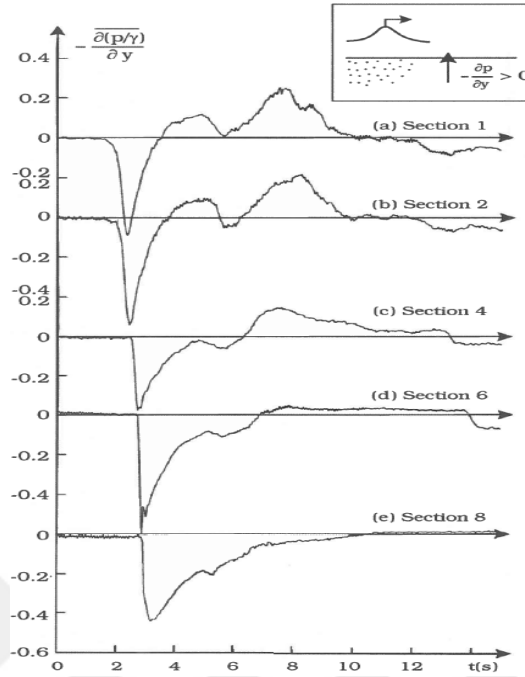
Her nokta için boşluk suyu basınçları ölçülmüş ve zaman serisi çıkarılmıştır. (Şekil 4.15)



Şekil 4.15 : Kesitler için 3 farklı zaman için taban zemini derinliği boyunca boşluk suyu basınç dağılımları. 1. $t = 2.4s$ 'de ki basınç dağılımı (aşağı yönlü basınç gradyan kuvveti üretmektedir). 2. $t = 4.9s$ ve $7.5s$ 'de ki basınç dağılımları (yukarı yönlü basınç gradyan kuvveti üretmektedir).

Şekil 4.16'da kıyı yüzeyinde bulunan 5 farklı noktada yapılan ölçümlerde bulunan ortalama basınç gradyanlarının zamansal değişimi görülecektir. Şekilde de görüleceği üzere $(-\frac{\partial p}{\partial y}) > 0$ olduğunda basınç gradyanı yukarı yönde olacaktır. Çalışma sonucunda yukarı yönlü basınçlı gradyanının dalga çekilmesi ve hidrolik

sıçrama arasında olduğu, oluşan bu kuvvetin büyüklüğünün ise sedimentin batık ağırlığının %30 mertebesine ulaştığı belirtilmiştir.



Şekil 4.16 : Kesit 1 için farklı derinliklerdeki yüzey yüksekliği ve boşluk suyu basınç için zaman serileri.

Sumer ve diğ. (2013), Sumer ve diğ. (2011)'de yapılan çalışmaya benzer bir çalışma yaparak bu sefer kırılan düzenli dalgalar sebepli sediment hareketi ve akım üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada sonuç olarak dalga kırılma anlarında yukarı yönlü basınç gradyan kuvvetlerinin oluştuğunu ve bu kuvvetin en büyük olduğu değer tabanda olduğunu yine oluşan bu kuvvetlerin değerlerinin sedimentin batık ağırlığının %30 mertebesine kadar ulaşabildiğini belirtmişlerdir. Dalga kırılması anında oluşan çevirinin oluşturacağı yukarı yönlü kuvvetin sedimentin batık ağırlığının 1.7 katı kadar büyük olacağını da önemle vurgulamışlardır.

Sumer ve diğ. (2013) ile Sumer ve diğ. (2011)'de her iki çalışmada kum eğimleri üzerinde kuvvetli dış yönlü boşluk suyu basınç gradyanı (hidrolik eğimler) oluştuğu görülmüştür. Bu gradyanların büyüklüklerinin kumun batık ağırlığının belirli yüzde değerlerine ulaştığı görülmüş ki böylece kumların taşınabilir pozisyona gelebileceğini hatta borulanmanın mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

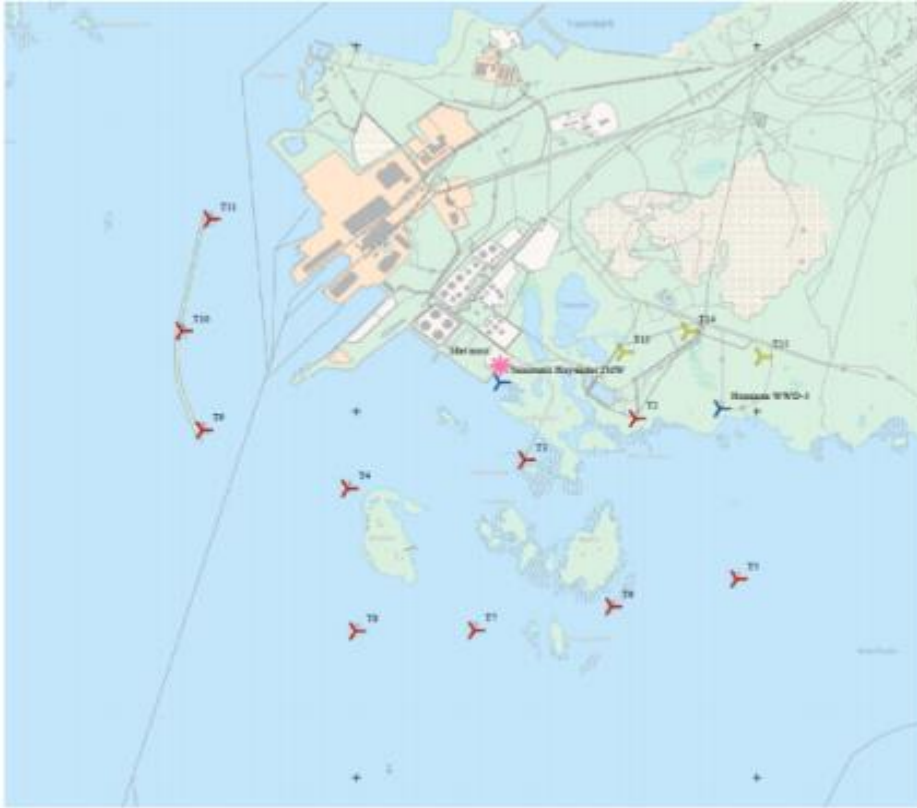
Yapılmış olan bu çalışmalar ışığında bizim araştırmalarımızda da bu çalışmadaki gibi basınç gradyanı sonucu ince malzemenin kaçması sonucu oluşabilecek olan göçmeler

incelenmiş, bu göçme türünün önlenebilmesi için gerekli minimum filtre tabaka kalınlığının belirlenmesine çalışılmıştır.

Güncel açık deniz rüzgar türbin inşaat metotlarının incelemesinde uygulamanın alışagelmış yöntemler dışında türbinlerin yapay adalar üzerinde uygulanmış olduğu görülmüştür.

Bunlardan bir tanesi olan ve işletmeye açılan Ajos Rüzgar Çiftliği, Finlandiya Kemi limanında bulunmaktadır. 10 rüzgar türbininin günlük üretim kapasitesi 3 megawatt olup bunlardan 8'i yapay ada üzerine, 2'si ise kıyı alanı üzerine inşa edilmiştir (Şekil 4.17). Yapay adalar yaklaşık 30x50 m ebatlarında olup su derinliği 3m ile 8m arasında değişmektedir (Şekil 4.18). Yapay adada kullanılan malzeme miktarı kaya dolgu 23.000 m³, kaya kaplama 3.000 m³, geotekstil 6.000 m², beton 700 m³'tür. Yapay adalar üzerine kurulan türbinlerin ise rotor çapları 130m'dir (<http://www.ox2.com>).

Yapılan bu uygulamada görüleceği üzere yapının stabilitesi için yapay adalar üzerine inşa edilen rüzgar türbinlerin tasarımında borulanma olgusunun ne kadar önem taşıyacağı aşikardır.



Şekil 4.17 : Ajos Rüzgar Çiftliği Saha Planı.



Şekil 4.18 : Rüzgar Türbininin Önden Görünüşü.

4.2 Boşluklu Ortamda Permanan Olmayan Tek Boyutlu Akımların İncelenmesi

Borulanmanın tabakalar içerisindeki boşluklu ortam akımlarından kaynaklanması sebebiyle, tabakalar içerisindeki akımların incelenmesi yerinde olacaktır. Burchart ve Andersen (1995) çalışmasında özetlendiği üzere, boşluklu ortamda akım rejimi hidrolik eğim ile akım hızı arasındaki ilişkiye göre üçe ayrılabilir. Bu ilişkiye genel olarak direnç denklemi de denir. Direnç denkleminin genel hali şu şekildedir:

$$V^n = K \quad (4.10)$$

Buradaki n üssünün alacağı değere göre; eğer $n = 1$ ise Darcy Rejimi (tipik yeraltı suyu rejimi), $1 < n < 2$ ise Forchheimer Rejimi, ve $n = 2$ ise Türbülanslı Rejim (klasik açık kanal veya boru akımı gibi) olacaktır. Bu akımlar aşağıda daha detaylı olarak incelenecektir.

Zeminlerin su geçirgenliği özelliğini deneysel olarak ilk Darcy (1856) incelemiştir. Darcy deney düzeneğinde temiz kum kullanarak akım hızı ile hidrolik eğim arasında lineer bir bağlantı olduğunu göstermiştir. Bu deney sonuçlarından, $q=Q/A=kiA$, Darcy kanunu adı verilen bağıntıyı bulmuştur. Burada Q =zeminden geçen su miktarı, t zaman aralığı, q = birim zamanda geçen su miktarı, $i=\Delta h/t$ hidrolik eğim ve A akım yönüne dik kesit alanı olmaktadır. k sabiti ise zeminin permeabilite katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Yine bu kanunu, $v=q/A=ki$ şeklinde de ifade edilebilir. Burada v deşarj hızı olarak tanımlanırken zeminin toplam kesitinden geçen suyun ortalama hızı olarak düşünülebilir. Daha sonra Forchheimer 1901’de deneysel çalışmalarla I hidrolik eğimi ikinci derece denklemle açıklamıştır. Buradan,

$$I = aV + b|V| V \quad (4.11)$$

Burada a ve b katsayılarıdır. Forchheimer denklemi, iletimli atalet kuvvetleri ve türbülansın ikincil oranını içeren laminar akımlar için uygulanır. a ve b katsayılarını tanımlamak için çeşitli benzetimler uygulamıştır. Hogen – Poiseville denklemlerinde ise,

$$I = 32 \frac{\nu}{gd_c^2} V \quad I = aV + b|V| V \quad (4.12)$$

ν =kinematik viskozitedir.

Darcy kanunu buradan tekrar yazılmak istenirse,

$$I = \frac{\nu}{gK_s} V \text{ bulunur.} \quad (4.13)$$

Buradaki K_s = Spesifik permeabilitedir.(m²)

Kozeny (1927), Carman ve Ergun (1952), Engelund (1953) gibi araştırmacıların yaptığı çalışmalar ile 4 akış rejimi belirlendi. Bunlar;

- 1) Darcy ya da sürüklenen akım. Burada akım viskoz kuvvetler tarafından belirlenir. Hız dağılımı ise lokal geometriye göre belirlenir. Burada $Re < 1$ ’dir.
- 2) Atalet akım rejimi Re 1 ile 10 arasındayken ortaya çıkar.
- 3) Kararsız akım rejimi Re 150 ile 300 arasındayken ortaya çıkar.

4) Oldukça kararsız ve kaotik akım rejimi $Re > 300$ durumunda görülür.

Bunlara dayandırarak akım rejimleri tekrar konunun başında belirtildiği gibi isimlendirilmiştir. Bunlar,

Darcy akış rejimi, Forchheimer akış rejimi ve türbülans akış rejimidir.

Kaba malzeme ortamında kararsız akım durumu atalet terimiyle, Forchheimer bağıntısıyla açıklanabilir. Buradan,

$$I = aV + b|V|V + c \frac{\partial V}{\partial t} \text{ bulunur.} \quad (4.14)$$

Bir boyutlu kararlı akım denklemi Navier Stokes denkleminde dayanılarak açıklanırsa Laminer, gözenekli akıştaki akışkan parçası kinematik ve dinamik durumlar için Navier-Stokes denklemi ile tanımlanabilecektir.

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4.15)$$

t = bağımsız zaman, x = aralık değişkeni, v = hız, p = basınç, ρ = yoğunluk, g = yerçekimi ivmesidir.

Hidrolik eğim,

$$I_i = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4.16)$$

yalnız kapalı kanal akımı düşünülürse,

$$I_i = -\frac{\nu}{g} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{g} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} v_j + \frac{1}{g} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (4.17)$$

Bir boyutlu kararlı durum için denklem (4.17) sadeleştirilse;

$$I = \frac{\nu}{g} \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2} - \frac{\nu}{g} \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_3^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} v_1 \text{ elde edilir.} \quad (4.18)$$

U ve D sırasıyla karakteristik hız ve uzunluktur. (4.18) denklemi boyutsal düzeltme formuyla tekrar yazılırsa,

$$I = \alpha \frac{v}{g} \frac{U}{D^2} + \beta \frac{1}{g} \frac{U^2}{D} \text{ ya da,} \quad (4.19)$$

$$I = AU + BU^2 \text{ elde edilir.} \quad (4.20)$$

Denklem (4.10) denklem (4.20) ile benzerdir.(Forchheimer denklemi)

A ve B katsayıları (ya da α ve β) çoğunlukla verilen akışkan viskozitesi ve verilen gözenekli malzemenin geometrisine göre olur.

Çeşitli akış alanları Reynold sayısına (Re) göre karakterize edilir. Sürüklenen akımda hız çok düşüktür. Burada iletimli atalet terimi ihmal edilebilir. Denklemi tekrar yazacak olursa,

$$I = \alpha'' \frac{v}{gD^2} U = A''U \quad (4.21)$$

ki bu iyi bilinen Darcy Denklemidir.

Daha büyük hızlarda türbülans meydana gelecektir. Atalet terimleri tam türbülans akımlarında viskoz terimleri üzerinde baskın olacaktır. Buradan,

$$I = \beta' \frac{1}{g} \frac{U^2}{D} = B'U^2 \quad (4.22)$$

denklemi elde edilir.

Görüldüğü üzere tabakalar arası akımlarda basınç gradyanları oluşmaktadır. Eğer zeminin hidrolik iletkenliği küçükse borulanma basıncı yüksek, hidrolik iletkenlik büyükse borulanma basıncı küçük olacaktır.

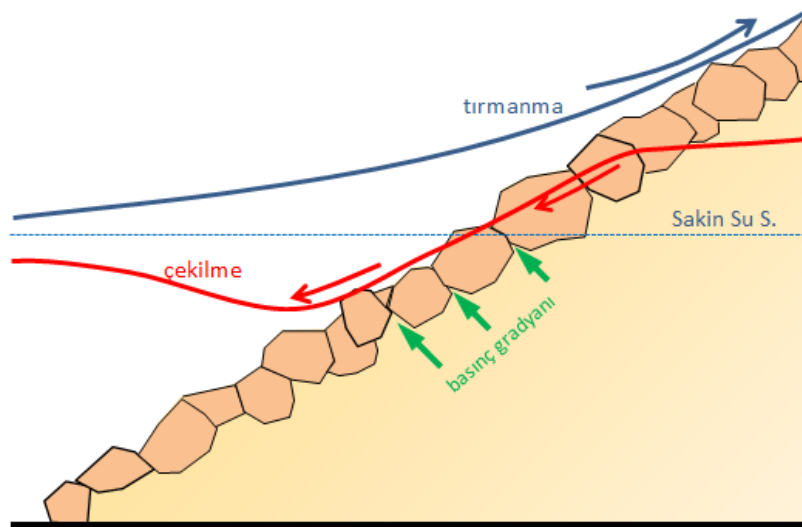
Sonraki bölümde, zemin içerisinden dışarıya doğru meydana gelen basınç gradyanları nedeniyle yukarı yönlü sızma akımını ve borulanmanın hangi koşullarda meydana geldiğini daha derinlemesine incelemek ve gerekli önlemleri (filtre ve koruma tabakaları) araştırmak amacıyla bir deney düzeneği planlanmış ve kurulmuştur. Yine bu bölümde, konunun analitik incelemesi, tek boyutlu akım ve hareket denklemleri ile “su” ve “taneler” için ayrı ayrı yapılacaktır. Ayrıca filtre tabakası ile elde edilen sürtünme kuvvetleri de bu denklemlerde ele alınmaktadır.

Anroşman ile korunan bir şevde filtre tabakasının çekirdek malzemesi stabilitesine etkisine bakılacak olursa, çekirdek tabakası, isminden de anlaşılacağı üzere en içte bulunan, birincil amacı bir dolgu hacmi işgal etmek olan ve diğer tabakalara nazaran

genellikle çok daha az geçirimli olarak teşkil edilen tabakadır (Cria, 2007). Başta dalgakıranlar olmak üzere dolgu tipi deniz yapılarında çekirdek tabakası kaynaklı hasar veya göçmeler aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

1. Çekirdeğin gereğinden fazla oturması: Bu göçme modu çekirdeğin kompozisyonuna ve dane dağılımına bağlı olduğu kadar, çekirdeğin imalat biçimine de bağlıdır. Bu göçme tipinin önüne geçilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar genel olarak;
 - deniz dolgularına uygun bir tane kompozisyonu kullanılması,
 - çok ince tanelerin kullanılmaması,
 - çekirdeği oluşturan tanelerin yapının ölü yükü altında ufalanmamaları,
 - dalgakıranda topuk tabakası teşkil edilmesi
 - ve imalatın tabakalar halinde yapılması olarak sıralanabilir.
2. Şevin toptan göçmesi (şev stabilitesi): Bu göçme modu çekirdeği oluşturan malzemenin kayma mukavemetine (esasen içsel sürtünme açısına) ve şev eğimlerine bağlıdır. Genellikle çekirdek malzemesinin 42° veya üzerinde bir içsel sürtünme açısına sahip olması istenir. Çekirdek dolgusu üzerindeki filtre ve koruma tabakaları hem ağırlıkları ile, hem de genellikle daha yüksek içsel sürtünmeye sahip olmaları dolayısıyla çekirdek dolgusunun şev stabilitesini önemli ölçüde artırırlar.
3. Sıvılaşma: Bir deniz dolgusunda deprem veya dalga etkisi altında ortaya çıkabilen tekrarlı yüksek kayma deformasyonları sebebiyle tanelerin aralarındaki boşluk suyunun basınçlanması ve tahliye olamayarak efektif gerilmeleri azaltması sonucu dolgunun kısmen veya tamamen sıvı gibi davranması durumuna sıvılaşma denilmektedir (Sumer, 2014). Sıvılaşma daha ziyade yüksek ince tane oranına sahip kalitesiz dolgularda gözlenmektedir. Kayma deformasyonuna karşı stabil olan ve ince tane fraksiyonu limitli olan dolgularda sıvılaşma olması beklenmez.
4. Borulanma: Korumasız veya korumalı deniz dolgularının (kıyı duvarları, dalgakıranlar vb.) dalga etkisi altındaki ön şevlerinde tekrarlı olarak dalga tırmanması ve dalga çekilmesi gözlenir. Bu esnada dolgunun içindeki su seviyesi de şevin hemen dışındaki seviyeye uyarak sırasıyla yükselmek ve

alçalmak eğilimindedir. Ancak dalganın tırmanma ve çekilme hareketinin boşluklu ortamdaki alçalma ve yükselme hareketine nispetle daha hızlı gerçekleşmesi nedeniyle, dolgu içindeki su seviyesi daha dar bir düşey bantta hareket eder. Dalga tırmanması esnasında dolgunun dışındaki su seviyesinin içindeki seviyeden yüksek olması nedeniyle dıştan içe doğru bir basınç gradyanı (hidrolik eğim), dalga çekilmesi sırasında ise dolgu içindeki su seviyesinin dışarıdaki seviyeden yüksek olması sebebiyle içten dışa doğru bir basınç gradyanı oluşacaktır. İçten dışa doğru oluşan bu basınç gradyanının şiddetine bağlı olarak dolguyu oluşturan tanelerden şeve yakın olanlarının koruma tabakasını oluşturan blokların arasından toplu halde dışarıya doğru yikanması olayı borulanma olarak adlandırılmaktadır. Bir dalgakıran şevi üzerinde meydana gelen borulanma olayı şekil 4.19’de şematik olarak tasvir edilmektedir. Borulanma yalnızca dalgakıranlar ve kıyı duvarları gibi salınımlı basınç gradyanı etkisindeki deniz dolgularında değil, statik basınç gradyanları altındaki suya doymun dolgularında da (örneğin barajlarda, bağlamalarda, dolgu istinat duvarlarında, vb.) görülebilmektedir. Borulanma meydana geldiği takdirde yapı hızlı biçimde yüksek hasar görerek göçebilmektedir. Borulanmanın önlenmesi için çekirdek tabakasında kaliteli ve çok ince taneler içermeyen bir malzeme kompozisyonu kullanılmalı, koruma tabakasının kategorisine ve çekirdeğin özelliklerine göre uygun filtre tabakası (veya tabakaları) teşkil edilerek malzemenin tutulması sağlanmalıdır.



Şekil 4.19 : Bir dalgakıran şevi üzerinde borulanmanın meydana gelişini.

Yukarıda sayılan hasar/göçme türleri değerlendirildiğinde, bunların arasında sivilaşmanın yanında borulanmanın da dalga hidroliği açısından önemli bir hasar nedeni olduğu görülmektedir. Zira yapının koruma tabakası ve hatta filtresi lokal olarak hasar görse dahi, oturma veya toptan göçme gerçekleşmeyecektir. Çünkü oturma ve toptan göçmenin gerçekleşmesi doğrudan malzemenin zemin mekaniği parametrelerine (içsel sürtünme açısı, boşluk oranı, sıkılık, vb.) bağlıdır. Ancak koruma blokları ve/veya filtrenin lokal olarak hasar gördüğü durumlarda çekirdek malzemesi kendini tutamaz ise borulanma gerçekleşebilir.

Deniz dolgularını, kıyı duvarlarını, deniz yapılarında oyulma koruması altındaki zemini ve özellikle de dalgakıranları borulanmaya karşı korumak için, yukarıda bahsedildiği üzere içten dışa doğru tane boyutu tedrici olarak irileşen ardışık tabakalar kullanılır. Bu sayede dışa doğru basınç gradyanları etkili olduğunda su dışarıya rahatlıkla çıkabilirken, üst tabakanın yaratmış olduğu sürtünme sayesinde alt tabakadaki tanelerin aralardaki boşluklardan emilmesi (borulanması) engellenebilmektedir. Bu sistem genel olarak *filtreleme* şeklinde anılmaktadır.

Filtre tabakasının amacı bir alt tabakada bulunan malzemenin kaybının önlenmesidir. Ayrıca alt tabakada ki malzemenin gradasyonuylada uyumlu olmak zorundadır. Tasarım yapılırken ve uygulama esnasında filtre kriteri, iki hadiseyi sağlamak zorundadır. 1. olarak filtre tabakası boşlukları arasındaki boşluk suyu drenajının kolay bir şekilde yapabilmesi gerekir ki, böylece basınç dağılımı kolay bir şekilde sağlanmalıdır. 2. olarak filtre tabakasının gradasyonu alt tabakanın gradasyonu ile uyumlu olmalıdır ki yeterli sürtünme oluşabilsin. 3. olarak filtre tabakasının boşluk ebatı bir alt tabakanın ince malzemelerin arasından geçemeyecek boyutlarda olmalıdır.

Taş dolgu deniz yapılarında filtreleme kriterleri alt ve üst tabakaların dane dağılımlarını aşağıdaki şekilde birbirleriyle ilişkilendirmektedir (Ciria, 2007).

$$4 < \frac{d_{15 \text{ üst}}}{d_{15 \text{ alt}}} < 20 \sim 25 \quad (4.23)$$

$$\frac{d_{15 \text{ üst}}}{d_{85 \text{ alt}}} < 4 \sim 5 \quad (4.24)$$

$$\frac{d_{50 \text{ üst}}}{d_{50 \text{ alt}}} < 25 \quad (4.25)$$

Burada d_{15} , d_{50} ve d_{85} sırasıyla %15, %50 ve %85'den ince kısmın maksimum tane çapıdır. Denklem (4.23), (4.24) ve (4.25) birlikte “Terzaghi filtreleme kriterleri” olarak anılmaktadır. Alt ve üst tabakalar arasında bu kriterlere riayet edildiği takdirde, dışa doğru basınç gradyanı oluştuğunda suyun verimli biçimde tahliyesi sağlanabilirken borulanmaya mahal verilmediği kabul edilmektedir.

Bu kriterler filtre tabakasının tasarımına çok yararlı olsa da daima tam anlamıyla yeterli bulunmayabilmektedir. De Graauw ve diğ. (1984), filtre malzemesi ve taban malzemesi arayüzüne paralel ve dik yönlü farklı filtre tabaka oluşumlarının performansını parametrik ve deneysel olarak detaylı bir şekilde çalışmışlardır. Kararlı ve salınımlı boşluk suyu basınç gradyanları (hidrolik eğimler) altında yatay konumlandırılmış, filtreler için deneyler yapmışlardır. Filtre porozitesi, tane boyutu ve gradasyon için bir takım ek kriterler oluşturmuşlardır. Bu kriterler taş dolgu dalgakıran, kaplama, rip-rap koruma ya da tekil kazık temelin oyulma koruması için yapılan filtre tabakası tasarımı için çok aydınlatıcı olmuştur (Sumer ve Nielsen, 2013)

Bununla birlikte Graauw ve diğ. (1984), minimum gerekli filtre tabakası kalınlığı için herhangi bir spesifik kriter ya ortaya koymamıştır. Hidrolik yapılarda borulanmayla ilgili ilk çalışma 1910 yılına dayanmaktadır (Richards ve Reddy, 2007).

Buna rağmen borulanma hadisesinin yaşanmaması için filtre ya da kaplama tabakasında minimum kalınlığının belirlenmesi için çok az çalışma yapılmıştır. Tomlinson ve Vaid (2000), sabit yanıl basınç altında filtre tabakasının etkisini araştırarak öncü bir çalışma yapmıştır ve bu araştırma sonucunda ince filtre tabakası halinde çok düşük kritik hidrolik eğim (basınç gradyanı) altında borulanmanın yaşandığını bulmuşlardır. Ojha ve diğ. (2003), granüler filtre tabakası olmaksızın tane boyutu, porozite ve hidrolik iletkenliği de dahil ederek borulanma kriteri için teoriksel çözümlemeler yapmışlardır. Shamy ve Aydın (2008), nehir bent altında borulanma kavramını nümerik olarak modellemiştir. Abdelhamid ve Shamy (2015), bu nümerik modellemeyi daha geliştirerek granüler malzeme arasından taban malzemesinin kaybını temsilini sağlamıştır. Son zamanlarda Ko and Kank (2018), borulanmaya karşı zemin güçlendirilmesi için biyopolimer kullanımını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir.

Hidrolik yapılar için çoğunlukla en kritik hadise yerçekimine karşı (yukarı yönlü borulanma) olan borulanmadır. Çünkü sızma kuvveti efektif gerilmeyi azaltıcı yönde rol oynar. Sterpi (2008), Jacobsen (2013) ve Flesman and Rice (2014), yanal basınçsız ve herhangi bir filtre tabakası olmaksızın yukarı yönlü basınç gradasyonu altında borulanma deneyleri yapmışlardır. Aynı şekilde Tao ve Tao (2017), yanal basınçsız, granüler filtresiz nümerik model kullanılarak yukarı yönlü borulanmayı modellemişlerdir. Son zamanlarda Kirca ve diğ. (2017), çelik cürufunun mekanik karakterlerinin salınımlı basınç gradasyonu ve dalga hareketi altında dalgakıran çekirdeğinin borulanmaya karşı dayanımındaki olan etkisini deneysel araştırmayla çalışmışlardır. Bu çalışmada zemin taneleri sadece serbestçe yukarı yönlü hareket edebilmekte olup, borulanma için kritik hidrolik eğimin 0.6 – 3.0 aralığında olduğu bulunmuştur. Wang ve diğ. (2017a) (2017b), çakıl ve siltli kil karışımı zemin çeşidinin borulanma davranışını detaylı deneylerle çalışmışlardır. Kurulan deney tertibatında numuneler aşağı yönlü basınç gradasyonu altında borulanmaya maruz bırakılmıştır. Hiçbir yanal basınç olmamasına rağmen borulanma için kritik hidrolik eğitimin 60 ile 140 arasında olduğunu göstermişlerdir. Tomlinson ve Vaid (2000), yaptıkları çalışmayla iyi filtrelenmiş malzemede aşağı yönlü borulanma için kritik gradyanın 10 ile 70 arasında olduğu sonucunu çıkartmışlardır.

Taban malzemesinin borulanmaya karşı dayanıklılığının aşağı yönlü hidrolik eğimde yukarı yönlü hidrolik eğime nazaran fazla olduğu görülebilmektedir. Bu direncin daha büyük olmasının sebeplerini söyleyecek olursak;

- 1- Sızma kuvvetinin yanında zemin kolonunun öz ağırlığı efektif gerilmeyi ve kayma dayanımını arttırmıştır ve böylece kenetlenmede (köprüleme, kemerleşme) Graauw ve diğ. (1984), artmaktadır.
- 2- Belirli miktarda taban malzemesi filtre tabakasının içine sızar Honjo ve Veneziano (1989), Okita ve Nikigaki (1992), Tomlinson ve Vaid (2000). Bu da borulanma göçmesine karşı ikincil dayanım süreci olarak adlandırılır.

Kıyı yapılarına gelince, dalgalar genellikle en öncelikli tasarım yüklerini oluştururlar. Bunlar özellikle anroşman tabakasıyla korunan eğimli yapılardır (dökme taş dalgakıran, kaplama tabakaları gibi). Dalga tırmanması ve dalga çekilmesi gibi süreklilik içeren dalga hareketleri bir çok yapı dengesindeki kararsızlıkları başlatma potansiyeline sahiptir. Bunlardan biri de borulanmadır CIRIA (2007).

Son günlerde Alcerreca-Huerta ve Oumeraci (2018), kırılan dalga hareketi altındaki kaplama tabakasının korunulmuş eğim altındaki zemin stabilite analizini yapmışlardır. Filtre ve koruma tabakasıyla birlikte zeminin toplam olarak yer değiştirmesini (tüm zemin kolonunun toptan göçmesi) değerlendirmiş ve bu olguya anlık sıvılaşma denilmiştir.

Yapı tasarımları bu filtreleme kriterlerine uyularak yapılsa bile, üst tabakanın ekstrem dalgaların etkisi altında hasar görebileceği düşünülerek, alt tabakanın filtre olmaksızın dışa doğru basınç gradyanları altında belli ölçüde stabil kalabilmesi yapının genel stabilitesi açısından önemli olmaktadır. Aşağıdaki bölümde herhangi bir eğimde teşkil edilen bir deniz dolgusunun filtre tabakası olmaksızın veya filtre ile korunduğu durumda stabil kalma kriterleri türetilenmiştir.

4.3 Dışa doğru basınç gradyanı etkisindeki eğimli yüzeyde kuvvet dengesi ve su ile tane karışımının bir bütün olarak borulanma başlangıç kriterinin türetilmesi

Bu bölümde zemin parçası için kuvvet – denge denklemi zemin parçasının bileşenleri olan sediment taneleri ve sudan oluşmaktadır. Kuvvet-denge denklemi dış yönlü basınç gradyanı etkisi altında formüle edilmiştir. Eğimli yüzeylerde formülasyonu genellemek için eğimin yatayla yaptığı açıya α açısı denilmiştir. Şekil 4.20’de gösterildiği gibi formülasyon iki durum için üretilmiştir. 1. durum, filtre tabakasıyla korunmamış eğimli yüzey 2. durum, B_f kalınlığında ki filtre tabakasıyla korunan eğimli yüzey 1. durum Kirca ve diğ. (2017), tarafından önceden çalışılmış olup daha sonra Kilci ve Kirca (2018), tarafından tekrar ele alınmıştır.

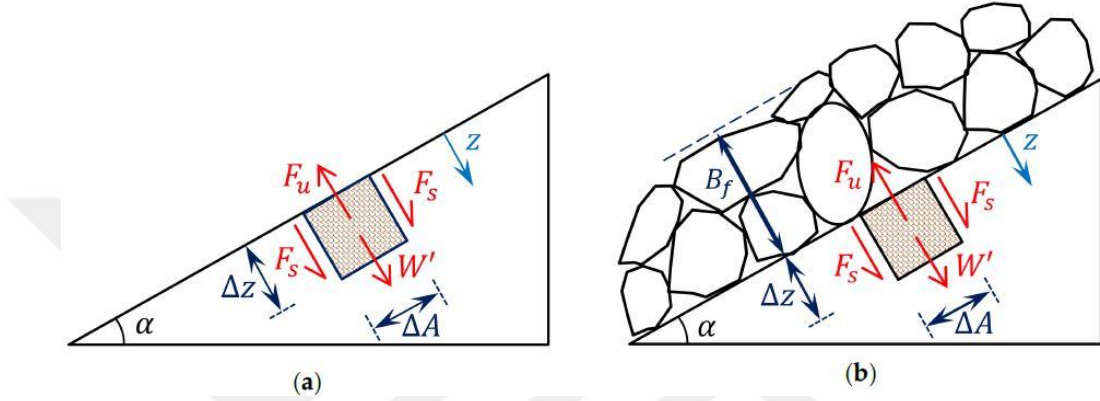
4.3.1 Filtre Tabakasız Eğimli Yüzeydeki Zemin Parçası Üzerinde Kuvvet – Denge Denklemi

Şekil 4.20’de gösterildiği gibi bir şev düşünölsün. Şevin üzerinde hiçbir filtre koruması olmaması durumu şekil 4.20a’da, şevin filtre ile korunması durumu ise şekil 4.20b’de gösterilmiştir. Şekilde verilen z ekseni doğrultusunda içeriden dışarıya yönlü bir basınç gradyanı yatayla α açılı şev üzerine etki etsin. Bu durumda (Δz) kalınlığında (ΔA) kesit alanına ve (ΔC) kesit çevresine sahip prizmatik bir zemin elemanının (zemini oluşturan taneler ve aralarındaki suyun bütünü) üzerine F_u kadar bir kaldırma kuvveti etkiyecektir. Bu zemin elemanını oluşturan tanecikler grubuna

etki eden direnç kuvvetleri ise zemin elemanının ağırlığının şev yüzeyine dik bileşeni W' ile zemin elemanının yanal alanına etki edecek sürtünme kuvveti F_s olacaktır. Bu kuvvetler şu şekilde türetilir:

$$W' = \Delta A \cdot \Delta z \cdot \gamma \cdot (s - 1) \cdot (1 - n) \cdot \cos \alpha \quad (4.26)$$

$$F_u = \Delta A \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.27)$$



Şekil 4.20 : Şev üzerinde basınç gradyanına maruz kalan çekirdek parçasına etki eden kuvvetler a) Korumasız şev, b) Korumalı şev.

$$F_s = \Delta \zeta \cdot \int_0^{\Delta z} \tau_s dz \quad (4.28)$$

Burada γ suyun birim hacim ağırlığı, $(s = \gamma_{dane}/\gamma)$ tanelerin suya göre yoğunluğu (bağıl yoğunluğu), n zeminin porozitesi, $(\partial p/\partial z)$ basınç gradyanı ve (τ_s) zemin elemanı etrafındaki sürtünme gerilmesidir. $\gamma' = \gamma(s - 1)(1 - n)$ zemin elemanının (taneler ve su karışımının) batmış özgül ağırlığıdır. Burada basınç gradyanının pozitif olması dışarıya doğru basıncın azaldığını ve dolayısıyla gradyanın yönünün içten dışarı doğru olduğunu göstermektedir. O halde, kaldırma kuvvetinin ağırlık kuvveti ve sürtünme kuvvetini yenerek zemin elemanını yerinden sökmesi, yani borulanma durumu için sağlanacak şart:

$$F_u \geq W' + F_s \quad (4.29)$$

şeklinde gösterilebilir. Denklem (4.26), (4.27) ve (4.28) denklem (4.29)'de yerine yazılırsa, borulanma kriteri:

$$i_{cr} = \left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)_{cr} \geq (s - 1) (1 - n) \cos \alpha + \frac{F_s}{\Delta A \Delta z \gamma} \quad (4.30)$$

şeklinde yazılabilir. Burada eşitliğin solundaki terim hidrolik eğimi, sağdaki ilk terim zemin elemanının boyutsuz (birimsiz) batmış ağırlığını, ikinci terim ise etrafındaki boyutsuz sürtünmeyi göstermektedir. Özellikle şev eğimi arttıkça ağırlık teriminin şeve dik bileşeni azalacağından, sürtünme kuvvetleri stabilite açısından kritik olmaya başlamaktadır.

Denklem (4.30) önceden Kirca ve diğ.(2017)'de verilmiştir. Sürtünme kuvveti sıfır ise denklem (4.30), denklem (4.31)'e dönüşmektedir.

$$i_{cr} = \left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)_{cr} \geq (s - 1) (1 - n) \cos \alpha \quad (4.31)$$

Bu denklem yatay yüzeyler için ilk olarak Terzhagi ve Peck (1948) tarafından ortaya konulan ve iyi bilinen borulanma kriterine, $[i_{cr} = (s - 1)(1 - n)]$ dönüşür.

Sürtünme teriminin hesaplanabilmesi için, denklem (4.32)'de yer alan (τ_s) terimi (zemin elemanı etrafında şev yüzeyine dik sürtünme gerilmesi), Mohr dairesi ve kohezyonsuz zeminlerin kayma mukavemeti ilkesi kullanılarak şu şekilde türetilir:

$$\tau_s = \tan \varphi' (\sigma'_h \cos^2 \alpha + \sigma'_v \sin^2 \alpha) \quad (4.32)$$

Burada (φ') zeminin içsel sürtünme açısı, (σ'_h) yatay efektif gerilme ve (σ'_v) ise düşey efektif gerilmedir. Homojen bir zemin tabakası içerisindeki bir zemin elemanı üzerine etkiyen, yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranı (σ'_h/σ'_v) sukunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0) olarak ifade edilir. K_0 durumunda bulunan bir zemin kütleinde yanal yönde deformasyon görülmez. Denklem (4.32), düşey efektif gerilmenin yatay efektif gerilmeye oranına göre tekrar düzenlenirse,

$$\tau_s = \tan \varphi' [(K_0 - 1)\cos^2 \alpha + 1] \sigma'_v \quad (4.33)$$

denklem 4.33 elde edilir. Tasarımda kullanılan zemin parçası (Şekil 4.20a’da gösterilen) dışında kalan z derinliğindeki düşey efektif gerilme (σ'_v) denklem (4.34a)’da ki gibi hesaplanır.

$$(\sigma'_v)_{out} = z \left(\frac{\gamma(s-1)(1-n)}{\cos \alpha} \right) \quad (4.34a)$$

Oysa tasarımda kullanılan zemin parçası içerisindeki aynı z derinliğindeki düşey efektif gerilmesi denklem (4.34b)’de görüleceği üzere zemin ağırlığından basınç gradyanının eksiltilmesiyle hesaplanması gerektiği göz önüne alınmalıdır.

$$(\sigma'_v)_{in} = z \left(\frac{\gamma(s-1)(1-n)}{\cos \alpha} - \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (4.34b)$$

Borulanma anına kadar basınç gradyanı artacağı için borulanma esnasında zemin içerisindeki efektif gerilmenin ortadan kalkacağı beklenilir. Bu sebeple sürtünme kuvvetindeki yanal toprak basınç hesabı yapılırken sükunetteki toprak basınç katsayısı yerine aktif toprak basınç katsayısını dikkate almak daha doğru olacaktır ($K \rightarrow K_a$) (Kirca ve Kilci, 2018). Denklem (4.33) ve denklem (4.34a), denklem (4.28)’e konulursa denklem 4.35 bulunur.

$$F_s = \Delta C \frac{\Delta z^2}{2} \tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1] \left(\frac{\gamma(s-1)(1-n)}{\cos \alpha} \right) \quad (4.35)$$

Sonuç olarak denklem (4.35) denklem (4.30)’a konulursa denklem (4.36) elde edilir.

$$i_{cr} = (s-1)(1-n) \left[\cos \alpha + \frac{\Delta C \Delta z \tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{2 \Delta A \cos \alpha} \right] \quad (4.36)$$

Denklem (4.36)’da ki sürtünme teriminin başındaki çarpan olan $\chi = \frac{\Delta C \Delta z}{2 \Delta A}$ parametresi, şekil 4.20a’da gösterilen zemin elemanın yanal alanının kesit alanına oranını ifade etmektedir. Bu zemin elemanının şekli; zeminin tane mimarisi, iç kilitlenme vb. özelliklerine ve ayrıca basınç gradyanının alansal dağılımı ve sızma akımı gibi hidrolik karakteristiklere bağlı olarak ortaya çıkacaktır.

Silindirik zemin elemanı için yükseklik Δz , çap D alınırsa denklem (4.36)’da ki $\frac{\Delta C \Delta z}{2 \Delta A}$ terimi $\frac{2 \Delta z}{D}$ ‘ye dönüşür. Bu düzenlemeyle denklem (4.36), denklem (4.37)’ye dönüşür.

$$i_{cr} = (s - 1)(1 - n) \left[\cos \alpha + 2\Delta z/D \frac{\tan \varphi' [(K_a - 1)\cos^2 \alpha + 1]}{\cos \alpha} \right] \quad (4.37)$$

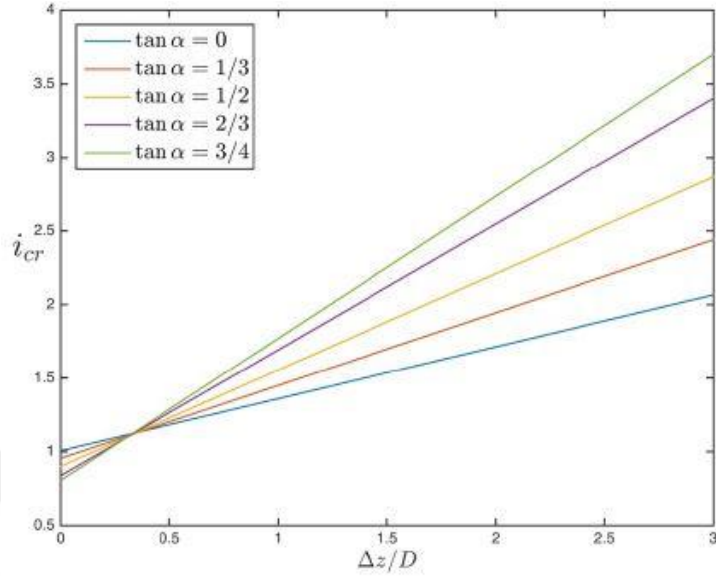
Tao ve Tao (2017), düz zeminler için ve $\alpha=0$ olmak üzere denklem (4.37)'ye benzer denklem üretmiştir. Mevcut türetilen denklemimizle karşılaştırınca Tao ve Tao (2017) denklemiyle üç belirgin farkın olduğu görülmüştür. Tao ve Tao (2017) denkleminde sürtünme kuvvetinde $\tan \varphi'$ 'nin bir çarpanı olarak fazladan $(1-n)$ terimi mevcuttur. Yalnız içsel sürtünme açısı değerleri porozite etkisini kapsadığından dolayı bu yaklaşım zemin mekaniği yaklaşımı ile uyumsuzluk içermektedir. İkinci olarak, denklemin içerisinde yanal toprak basınç katsayısının aktif durum yerine sükûnetteki durumunu ($K=1-\sin \varphi'$) almışlardır. Üçüncü fark ise yine fazladan terim olan eşitlik denklem (4.37)'nin sağ tarafında bulunan ve Fair ve diğ.(1933)'den aldıkları şekil faktörü çarpanıdır. Yalnız Fair ve diğ. (1933) yaklaşımı zemin taneleri arasındaki sızma yolu boyunca formüle edilmiş olan hidrodinamik denklemin oluşturulmasına dayanmaktadır. Çalışmaları, filtre hızı ve hidrolik gradyan (yük kaybı) arasındaki ilişkiyi formüle etmeyi amaçlamaktadır. Bu sebepten şekil faktörü mevcut durumumuzdaki gibi kuvvet-denge denklemi için direkt olarak kullanılamaz. Tanelerin şekilleri ve porozitesi, içsel sürtünme açısının hesabının içerisinde bulunmaktadır.

Coulomb teorisi kullanılarak aktif yanal toprak basınç katsayısı mevcut durum için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K_a = \frac{\cos \varphi'}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(2\varphi') \sin \varphi'}{\cos \varphi'}} \right)^2} \quad (4.38)$$

Bu noktada borulanmaya maruz kalan silindirik zemin parçasının boyutları $\Delta z/D$ ele alınmalıdır. Kritik hidrolik gradyan üzerindeki $\Delta z/D$ etkisi aşağıdaki nümerik (sayısal) örnekte gösterilmektedir. Zeminde $\varphi' = 40^\circ$, bağıl yoğunluğu (s) = 2.65, porozite (n) = 0.4 değerinde olduğu varsayılmıştır. Böyle bir zeminde $\Delta z/D$ oranının bir fonksiyonu olarak kritik hidrolik gradyan değişimi şekil 4.21'de gösterilmiştir. $\Delta z/D = 0$ olduğunda sürtünme kuvveti sıfır olmaktadır. Şekil 4.21'de görüleceği üzere yüzey eğimi (sapma) arttığında sürtünme kuvvetleri daha etkili bir hal almaktadır. Şekil 4.20a'daki zemin parçasının yanal yüzeyini etkileyen toprak

basıncı, eğimle birlikte artmaktadır. Bu denklem (4.37)'nin bir çarpanı olan $\frac{[(K_a-1)\cos^2 \alpha + 1]}{\cos \alpha}$ denkleminden kolaylıkla görüleceği gibi α ile artmaktadır.



Şekil 4.21 : Yüzey eğimlerinin farklı değerleri için $\Delta z/D$ oranının fonksiyonu olarak kritik hidrolik borulanma (i_{cr}), kritik hidrolik gradyanı değişimleridir. Zemin parametreleri, $\varphi' = 40^\circ$, $s = 2.65$, porozite $n = 0.4$ alınmıştır.

4.3.2 Filtre Tabakasıyla Korunan Eğimli Yüzeydeki Zemin Parçası Üzerinde Kuvvet – Denge Denklemi

Şekil 4.20b'deki gibi zemin parçası filtre tabakasıyla korunduğu zaman filtre tabakası $q_0 = B_f \frac{\gamma}{\cos \alpha} (s_f - 1)(1 - n_f)$ mertebesi kadar zemin yüzeyi üzerinde örtü katman gerilmesi (sürşarj) üretecektir. Burada $s_f = \frac{\gamma_f}{\gamma}$ filtre tabakası bağıl yoğunluk, n_f filtre tabakası porozitesi ve B_f filtre tabakası kalınlığıdır. Bununla beraber zemin parçasının ebatı (D), filtre tabakası parçalar arasındaki boşluk ebatlarına (D_{fp}) göre ayarlanabilir. Bölüm 4.3'te açıklanan terzaghi filtre kuramı bu yaklaşımı esas almaktadır. Çekirdek ile filtre arasındaki ara yüz görünümü şekil 4.20b'de görülmektedir. Çekirdek malzemesi, filtre tabakasındaki boşluklarından dışarıya akabileceği için görünürde borulanma için en kritik durum budur. Bu itibarla filtre tabakasından oluşan örtü katmanı, incelenen zemin parçası üzerinde rol oynamaz fakat zemin parçasını çevreleyen zemine etki yapmaktadır. Bu nedenle efektif düşey

gerilme doğrudan doğruya zemin parçasını çevreleyen zemin üzerinde denklem 4.39 görüleceği gibi etkileyecektir.

$$(\sigma'_v)_{out} = \frac{\gamma}{\cos \alpha} [z(s-1)(1-n) + B_f(s_f-1)(1-n_f)] \quad (4.39)$$

Korumasız şev durumundan farklı olarak, filtreyle korunan şevlerde ΔA ve $\Delta \zeta$ ölçüleri filtre tabakası tarafından dikte edilecektir. Zira şekil 4.20b incelendiğinde, borulanmanın gerçekleşebileceği en büyük ΔA alanı filtre tabakasını oluşturan danelerin arasındaki boşluklarla (D_{fp}) oluşan alan olacaktır.

Denklem (4.29), filtre tabakalı durumda efektif gerilme için denklem 4.34a yerine denklem 4.39 kullanılmak üzere yeniden düzenlenirse sonuç olarak kritik hidrolik gradyan aşağıdaki gibi bulunacaktır.

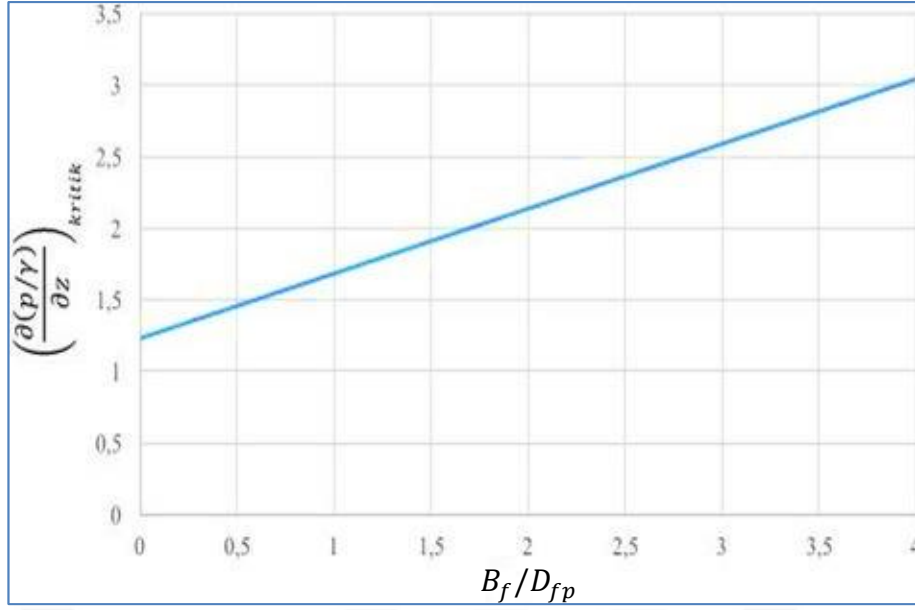
$$i_{cr} = (s-1)(1-n) \left[\cos \alpha + \frac{2\Delta z \tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D \cos \alpha} \right] + 4B_f(s_f-1)(1-n_f) \frac{\tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D_{fp} \cos \alpha} \quad (4.40)$$

Şevin üzerindeki ilk filtre tabakasının üzerinde başka tabakalar varsa, o tabakaların ortaya çıkaracağı sürşarj da q_0 terimine eklenmelidir. Bununla beraber eğer filtre tabakası ve anroşman tabakası eklenilecek olursa, B_a anroşman kalınlığı, s_a anroşman tabakası bağıl yoğunluğu, n_a anroşman tabakası porozitesi olarak tanımlanırsa denklem,

$$i_{cr} = (s-1)(1-n) \left[\cos \alpha + \frac{2\Delta z \tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D \cos \alpha} \right] + 4B_f(s_f-1)(1-n_f) \frac{\tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D_{fp} \cos \alpha} + 4B_a(s_a-1)(1-n_a) \frac{\tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D_{ap} \cos \alpha} \quad (4.41)$$

olarak değiştirilir.

Şevin üzerindeki filtre tabakasının borulanma kriteri üzerindeki etkisini göstermek amacıyla şekil 4.22 sunulmaktadır. Bu şekil için çekirdek tabakasının şekil 4.21'de olduğu gibi aynı parametrelere sahip olduğu ve $\chi \frac{\Delta \zeta \Delta z}{\Delta A} = 0$ olduğu, ayrıca filtre tabakasının $s_f = 2.65$, $n_f = 0.4$ değerinde olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.22 : $\varphi' = 40^\circ$, $s = 3.3$, $n = 0.4$, $\chi = 0$, $s_f = 2.65$, $n_f = 0.4$ ve $\tan \alpha = \frac{1}{2}$ için borulanmaya yol açacak kritik hidrolik eğimin B_f/D_{fp} parametresinin değerine göre değişimi.

Görüldüğü üzere filtreyle korunduğunda şevin borulanma emniyeti belirgin biçimde artmaktadır.

Tezin bu bölümüne kadar ortaya konulan geliştirilmiş borulanma kriteri, filtre tabakası altındaki bir zemin elemanını oluşturan su ve tane karışımının bir bütün olarak hareket edip etmeyeceği ilkesine dayanıyordu. Nitekim bu ilke daha önce birçok araştırmacı tarafından da kullanılmış idi. Buna göre; eğer basınç gradyanı su-tane karışımının batmış ağırlığını ve sürtünme kuvvetini yenebilirse, borulanma meydana geliyordu. Tezin bu bölümünde sürtünme kuvveti kısmında zemin mekaniği ilkesinden faydalananarak sürtünme gerilmesi türetilmiştir. Burada, sürtünme gerilmesi hesaplanırken göçme durumundaki hal göz önünde bulundurularak sükunetteki toprak basınç katsayısı olan K_o yerine Coulomb teorisindeki aktif toprak basınç katsayısı K_a kullanılmış ve i_{cr} değeri bulunurken K_a parametresi kullanarak türetilmiştir.

Tezin ilerleyen dönemlerinde eldeki borulanma deneyi verilerinin işlenmesine devam edilmiş, borulanmanın fiziğini ve zamanla gelişimini daha kapsamlı temsil edebilecek tek boyutlu bir model üzerinde çalışılmıştır.

Bölüm (4.5), (4.6), (4.7) ve (4.8)'de yapılacak analizde yukarıdakinden farklı olarak zemin içerisindeki su ve zemini oluşturan tanelerin hareket denklemleri ayrı ayrı

türetilmiştir. Tek boyutlu bu denklemleri birlikte çözecek bir sayısal hesaplama ile salınımlı basınç gradyanı altında borulanma mekanizması çok daha sağlıklı biçimde ifade edilebilecektir.

4.3.3 Mevcut Sonuçlar ile Permanan Durumdaki Borulanma Kriterlerinin

Karşılaştırılması

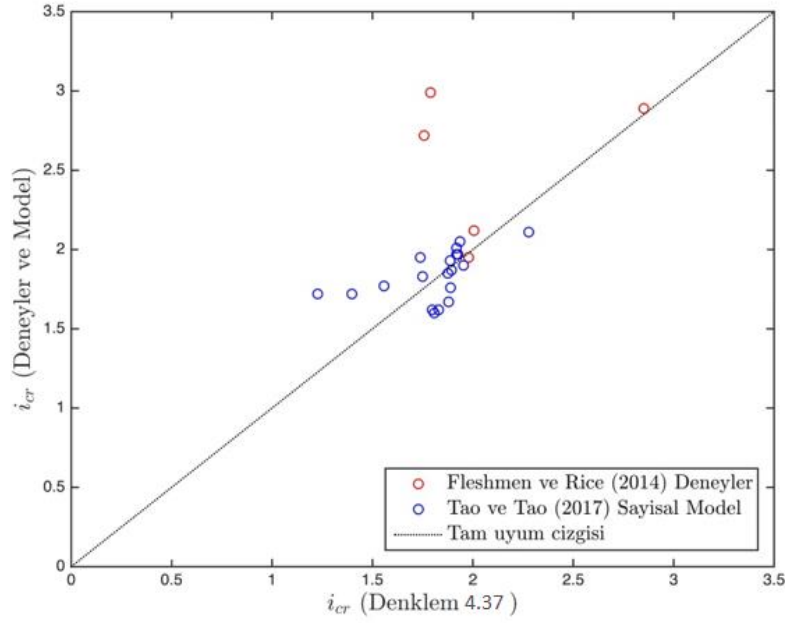
Bu bölümde permanan durumdaki hidrolik gradyan için türetilen filtre tabakasız kriter (denklem 4.37) literatürdeki değerler ile karşılaştırılacaktır. Borulanma için, kritik permanan durumdaki hidrolik gradyan kriterinin performansını görmek amacıyla, literatürle karşılaştırmak üzere iki veri kümesi kullanılmıştır. İlk veri kümesi Fleshman ve Rice (2014)'ın deneysel bulgularıdır. İkinci veri kümesi ise Tao ve Tao (2017)'nin numerik modelleme sonuçlarıdır. Fleshman ve Rice (2014), $D=5.1$ cm çapında ve $\Delta z=12.7$ cm uzunluğunda silindirik konteyner tank kullanılmıştır. Zemin tanka kademe kademe konulmuş ve her bir kademe sıkıştırıldıktan sonra diğer kademenin yerleştirilmesine geçilmiştir. Zemin örnekleri suya doyurulur doyurulmaz permanan durumdaki durumun hakim olması için hidrolik gradyan aşamalı olarak arttırılmıştır. Borulanma işlemini ardışık dört aşamayla tanımlamışlardır. 1. görünür hareket, 2. kabarma gelişimi, 3. köpürme oluşumu, 4. toplam kabarma. Fleshman ve Rice (2014)'ın, deneysel verileri çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Tao ve Tao (2017), Fleshman ve Rice (2014)'ın düzeneğine benzer bir şekilde silindirik tanelerle numerik modeller yapmışlardır. Zeminin özelliklerine göre parametrik değişiklikler uygulayarak borulanma için kritik hidrolik gradyanın hassasiyetini incelemişlerdir. Ayrık eleman metoduyla (CFD-DEM) her bir tanenin davranışını modellemişlerdir. Böylece algoritmalarının sürecin fiziğe uygun olduğunu göstermişlerdir. Tao ve Tao (2017), Fleshman ve Rice (2014) gibi benzer bir şekilde 4 aşama tasarlamış ve 4. aşamayı (toplam kabarmayı) borulanma olarak hesaba katmıştır. Verileri yine aynı şekilde çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1. Fleshman ve Rice (2014) ile Tao ve Tao (2017)'dan alınmış kararlı durum altında ki borulanmada kritik hidrolik gradyanlar için mevcut verilerin özetleri.

Referans	Veri No	Zemin Cinsi	Özgöl Ağırlık, s	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ'	Porozite, n	$\Delta z/D$	Borulanma İçin Kritik Hidrolik Gradyan (İcr)
Fleshman ve Rice	1	Ottawa 20-30 sand	2,64	35	0,35	2,49	1,95
Fleshman ve Rice	2	Otoowa graded sand	2,64	35	0,35	2,49	2,12
Fleshman ve Rice	3	Angular 20-30 sand	2,64	37	0,43	2,49	2,72
Fleshman ve Rice	4	Angular graded sand	2,64	38	0,42	2,49	2,99
Fleshman ve Rice	5	No. 100 garnet sand	3,87	39	0,47	2,49	2,89
Tao ve Tao	1	Küresel	2,65	26,57	0,36	2,47	2,05
Tao ve Tao	2	Küresel	2,65	26,57	0,38	2,47	1,93
Tao ve Tao	3	Küresel	2,65	26,57	0,38	2,47	1,85
Tao ve Tao	4	Küresel	2,65	26,57	0,4	2,47	1,60
Tao ve Tao	5	Küresel	2,65	26,57	0,4	2,47	1,62
Tao ve Tao	6	Küresel	2,65	26,57	0,39	2,47	1,62
Tao ve Tao	7	Küresel	2,65	26,57	0,38	0,59	1,72
Tao ve Tao	8	Küresel	2,65	26,57	0,38	1,11	1,72
Tao ve Tao	9	Küresel	2,65	26,57	0,38	1,55	1,77
Tao ve Tao	10	Küresel	2,65	26,57	0,37	2,53	1,97
Tao ve Tao	11	Küresel	2,65	26,57	0,37	3,52	2,11
Tao ve Tao	12	Küresel	2,65	0	0,35	2,4	1,74
Tao ve Tao	13	Küresel	2,65	14,04	0,37	2,51	1,83
Tao ve Tao	14	Küresel	2,65	26,57	0,37	2,55	1,97
Tao ve Tao	15	Küresel	2,65	36,87	0,38	2,58	1,90
Tao ve Tao	16	Küresel	2,65	0	0,36	2,47	1,69
Tao ve Tao	17	Küresel	2,65	14,04	0,37	2,51	1,95
Tao ve Tao	18	Küresel	2,65	26,57	0,37	2,53	1,97
Tao ve Tao	19	Küresel	2,65	26,57	0,37	2,55	1,97
Tao ve Tao	20	Küresel	2,65	26,57	0,37	2,53	2,01
Tao ve Tao	21	Küresel	2,65	26,57	0,38	2,56	1,87
Tao ve Tao	22	Küresel	2,65	26,57	0,39	2,58	1,76
Tao ve Tao	23	Küresel	2,65	26,57	0,39	2,62	1,67

Şekil 4.23'de, denklem 4.37'de bulunan sonuçlarla mevcut verilerin karşılaştırılması yapılmaktadır. Çizelge 4.1'de ki 12. ve 16. numarada bulunan veriler şekil 4.23'e dahil edilmemiştir. Çünkü bu noktadaki sürtünme açısı görüleceği üzere sıfır değerindedir.

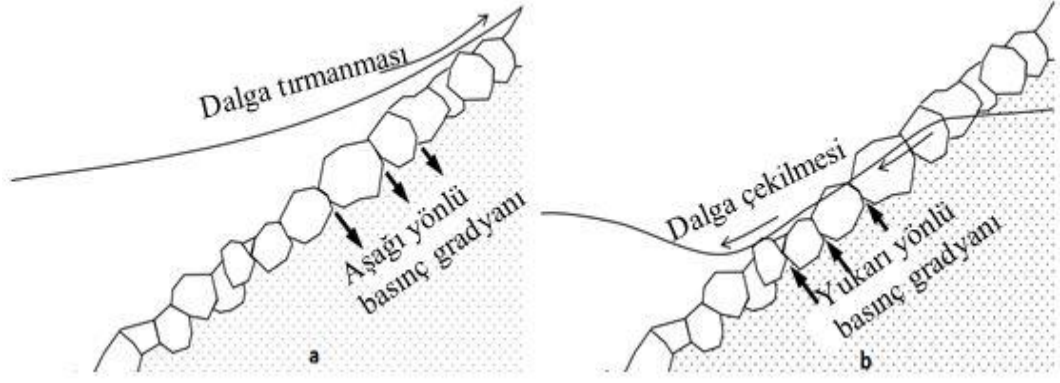


Şekil 4.23 : Kritik hidrolik gradyanların karşılaştırılması (kararlı akım için kritik hidrolik gradyan değerleri çizelge 4.1’de görüleceği üzere Fleshman ve Rice (2014)’ın verileri ve Tao ve Tao (2017)’nin numerik model verileri ile denklem (4.37)’nin karşılaştırılmasıyla oluşturulmuştur).

Şekil 4.23’de görüleceği üzere veri noktaları ile denklem 4.37 ile hesaplanan kritik gradyanlar arasında uyum olduğu görülmektedir. Uyumsuzluğun sadece Tao ve Tao (2017)’dan elde edilen verilerle hesaplanmış olan içsel sürtünme açısının küçük değerleri için olduğu görülmektedir. Formülasyonla üretilen değerlerin Fleshman ve Rice (2014) ile Tao ve Tao (2017)’yla üretilen değerlerden çok az daha küçük olacağı görülmektedir. Sebebi tam açık olmamakla beraber ikincil dayanım aşaması (kemerleşme vb.) bu farklılığın sorumlusu olabilir. Bu uyum çizgisine en uzak olan 3 ve 4 no’lu verilerin, ikisi de köşeli tanelerdir. Bu özelliği ile ikincil dayanım aşamasının daha etkili olabileceği düşünülmektedir.

4.3.4 Minimum Boyutsuz Filtre Tabaka Kalınlığının Türetilmesi Ve Parametrik Çalışma Sonuçları

Şekil 4.24’deki çizim taslağı şekil 4.20’ye benzer olarak dalga hareketlerine karşı şevli taş kaplama bir kıyı yapısını tasvir etmektedir. Şekli sadeleştirmek için yalnızca tek taş tabakası gösterilmiştir. Dalga, tırmanma aşamasında sakin su seviyesinden daha yüksekte olacağı için çekirdek tabakası içerisindeki boşluk suyu basıncı dıştaki hidrodinamik basınçtan düşük olacaktır (Şekil 4.24a).



Şekil 4.24 : Eğimli kaplamada dalga hareket aşamaları **a)** Dalga tırmanma **b)** Dalga çekilme (bu aşamada taban malzemesinde yukarı yönlü basınç gradyanı meydana gelir).

Bununla birlikte, dalga çekilme aşamasında çekirdek içerisindeki boşluk suyu basıncı şevin dış tarafındaki hidrodinamik basınçtan önemli seviyede yüksek olacaktır. Böylece kuvvetli emme (dış yönlü basınç gradyanı) oluşacaktır. İşte bu emme kuvveti çekirdek içerisindeki boşluk suyunu dışa doğru hareket ettirecektir. Eğer bu basınç gradyanı hareketiyle oluşan boşluk suyu hareketi yeteri büyüklükte oluşursa çekirdek malzemeleri dış kaplamada bulunan taşlar arasından taşınacak, yani borulanma hadisesi meydana gelecektir.

Bu ardışık dalga tırmanması ve çekilme serisi iç ve dış yöne doğru salınımlı basınç gradyanı üretecektir. Şekil (4.20)'den hareket edilirse, şekilde görülen kaplama filtre gibi davranacaktır. İşlemleri sadeleştirme amacıyla koruma tabakası ilk aşamada olmadan çalışmalara devam edilmiştir. Daha sonra koruma tabakası da hesaba dahil edilmiştir. Z koordinatı çekirdek – filtre ara yüzünden aşağıya doğru tanımlanmıştır. Kuvvet – denge denkleminin z ekseninde türetilmesi tezde 4.4 başlığında, şekil 4.20'de gösterildiği üzere çekirdek malzeme ile filtre kaplama ara yüzünde bulunan sonsuz küçük zemin parçası üzerinde anlatılmıştı. Görüleceği üzere burada sırasıyla denklem (4.26) – (4.37) denklemleri türetilmiş, daha sonra bölüm 4.4.2 için (4.40), (4.41) denklemleri türetilmiştir.

Bu başlıkta belirtilen boyutsuz filtre tabaka kalınlığının bulunması için taneleri uniform kabul edelim ve birim hacimdeki tane sayısı N olsun. Tane sayısı takribi olarak aynı hacimdeki boşluk sayısı ile eşit olmalıdır. O zaman filtre tabakasındaki birim hacimdeki tane sayısı (N),

$$N = \frac{(1 - n_f)}{\left(\frac{\pi}{6}\right)D_f^3} = \frac{n_f}{\left(\frac{\pi}{6}\right)D_{fp}^3} \quad (4.42)$$

olarak bulunabilir.

Burada D_f , filtre tabakasındaki tanelerin küresel çapıdır. D_{fp} ise filtre tabakasındaki boşluk çapıdır. İki çap arasındaki eşitlik ise,

$$D_{fp} = D_f \sqrt[3]{\frac{n_f}{(1 - n_f)}} \quad (4.43)$$

olarak tarif edilebilir.

Karakteristik boşluk boyutu tamamen tane boyu dağılımına bağlı olduğundan tek çeşit tane dağılım yaklaşımı yanıltıcı olabilecektir. Alternatif yaklaşım olarak Uno ve diğ. (1996) granüler malzeme içerisindeki boşlukların ortalama çapını deneysel olarak belirlemişlerdir.

$$D_{fp} = \frac{1}{2} D_f \frac{n_f}{(1 - n_f)} \quad (4.44)$$

Bu bölümde sunulan analiz için filtre tabakası altındaki zemin parçası, filtre malzemesinin boşluğuyla aynı ya da daha büyük alan kapsıyorsa ($D \geq D_f$) o zaman kuvvet dengesi sadece taban malzemesini değil filtre tabakasını da kapsayacak toptan bir göçme şeklinde tüm zemin kolonu için formüle edilmelidir. Böylesine yenilme türü tüm zemin kolonunu basınç gradyanı tarafından emileceği anlamına gelir. Sürtünme kuvvetinin ihmal ile tüm zemin kolonunun göçmesi için kritik hidrolik gradyan aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$(i_{cr})_{col} = (s - 1)(1 - n) \cos \alpha + \frac{B_f}{\Delta z} (s_f - 1)(1 - n_f) \cos \alpha \quad (4.45)$$

Denklem 4.45’de verilen bu kriter Alcerreca-Huerta ve Oumeraci (2018) tarafından tanımlanmıştır. Karşılaştırma yapılacak olunursa denklem 4.40’da tanımlanan kriter, denklem 4.45’de verilen kritere göre göçme mekanizması açısından çok daha kritiktir ($i_{cr} < (i_{cr})_{col}$).

Bu bölümde vurgulanması gereken önemli konulardan biride filtre malzemesinin tane dağılım oranının taban malzemesine göre denklem (4.23) ve (4.24)’te belirtilen oranlardan daha küçük olmasıyla filtre malzemesindeki boşluklardaki tıkanma

bölgelerinin şekillerinden ve kemerleşme kavramından dolayı borulanmaya karşı dayanım keskin bir şekilde artacaktır. Bu etkiler burada göz önüne alınmamış olsa bile, tane dağılım oranına bağlı olan filtre kriteri kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Denklem 4.40'da eşitliğin sağ tarafının ikinci kısmında bulunan D_{fp} terimi yerine denklem 4.43'deki eşitlikte bulunan D_f konulursa denklem 4.46 oluşacaktır.

$$i_{cr} = (s - 1)(1 - n) \left[(\cos \alpha + \frac{2\Delta z \tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D \cos \alpha} \right] + 4B_f(s_f - 1)(1 - n_f) \frac{\tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]}{D_f \sqrt[3]{\frac{n_f}{(1 - n_f)}} \cos \alpha} \quad (4.46)$$

Burada ki $\frac{B_f}{D_f}$ oranı, **boyutsuz filtre tabakası kalınlığı** anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle filtre içerisindeki taş tabaka sayısıdır. Dalgakıranda genellikle $\frac{B_f}{D_f} = 2$ alınır.

Filtre ve anroşman tabakasız yatay yüzölçü zeminin yukarı yönlü dikey basınç gradyanına maruz kalması halinde borulanma kriteri Sumer ve Fredsoe (2002, s.19); tarafından,

$$\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)_{cr} = (s - 1) (1 - n) \quad (4.47)$$

olarak verilmiştir.

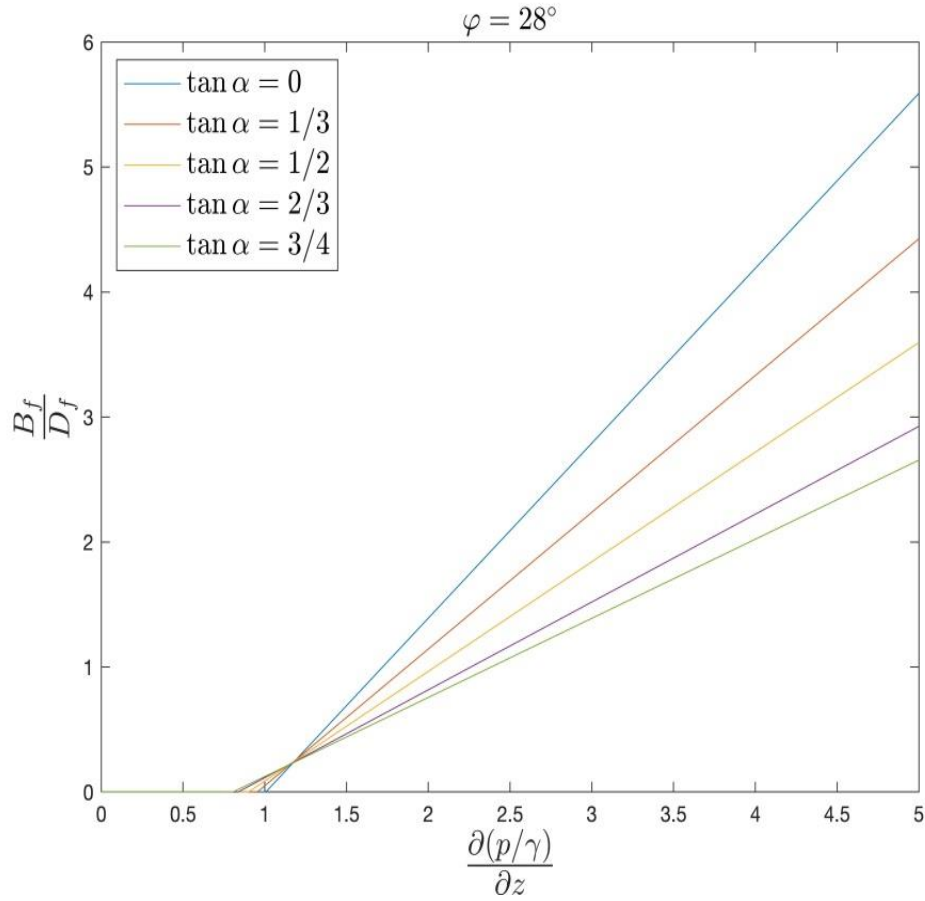
Denklem 4.46 kullanılarak borulanmaya karşı filtre tabakasıyla korunmuş çekirdek tabakasının stabilitesi üzerinde farklı parametrelerin etkisi parametrik çalışmayla görülmüştür. Denklemde kullanılan değerler ya da değer oranları aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir (Çizelge 4.2). Çizelgede görüleceği üzere kaplamanın eğimi ($\tan \alpha$),

çekirdek malzemenin içsel sürtünme açısı (φ') ve dış yönlü basınç gradyanı $\frac{\partial(\frac{p}{\gamma})}{\partial z}$ değişken iken, diğer parametreler sabit tutulmuştur.

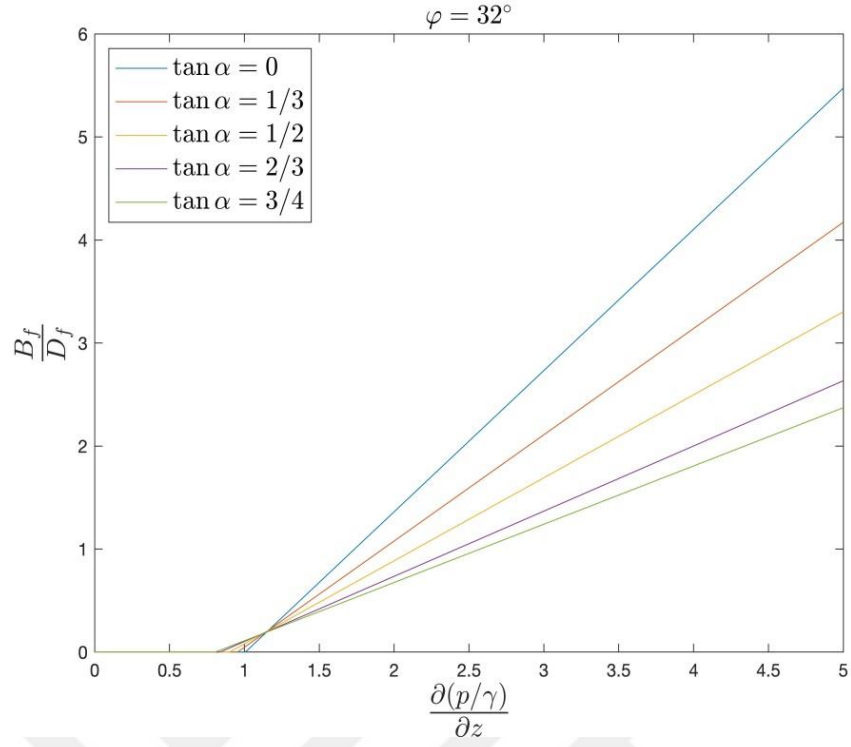
$\varphi' = 28^\circ, 32^\circ, 36^\circ$ ve 40° için önerilen matematiksel modelin parametrik sonuçları şekil (4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29)'da sırasıyla gösterilmiştir. Her şekilde yüzey eğimi 0, 1/3, 1/2, 2/3 ve 3/4 olacak şekilde 5 eğri bulunmaktadır. Bu eğimler kıyı yapıları için yaygın olarak kullanılan eğimlerdir.

Çizelge 4.2. Parametrik çalışma için tasarlanılan değişkenlerin değerleri.

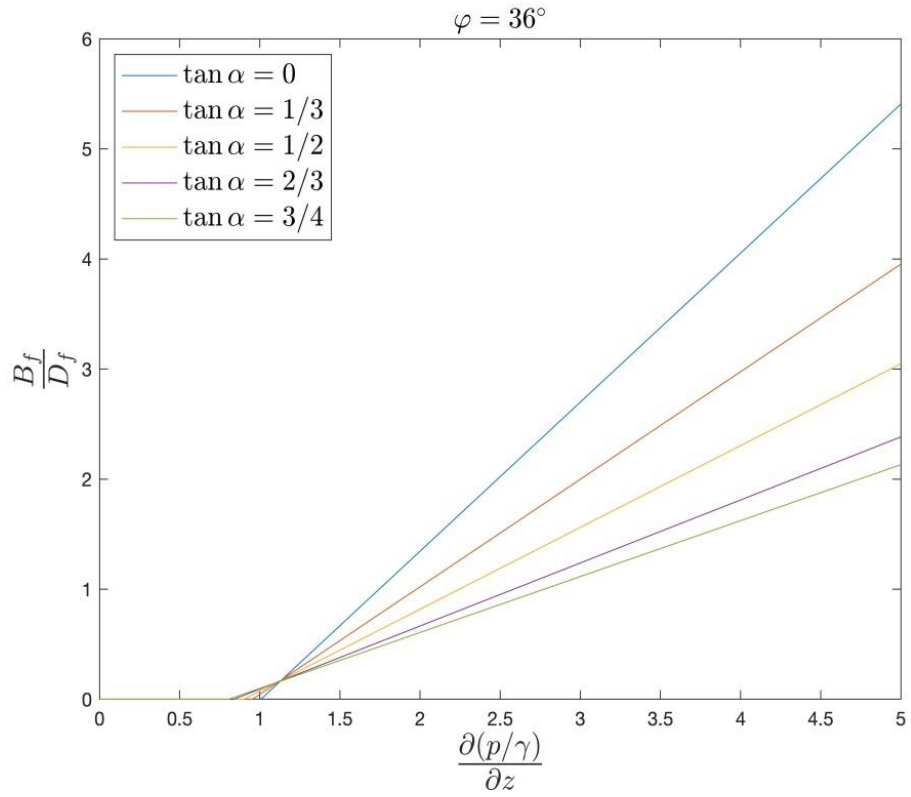
Değişken	Birim	Değer (ya da tasarlanılan oran)
s	(-)	2.65
n	(-)	0.40
s_f	(-)	2.65
n_f	(-)	0.45
$\tan \alpha$	(-)	0~3/4
φ'	(°)	28~42
$\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}$	(-)	0~5



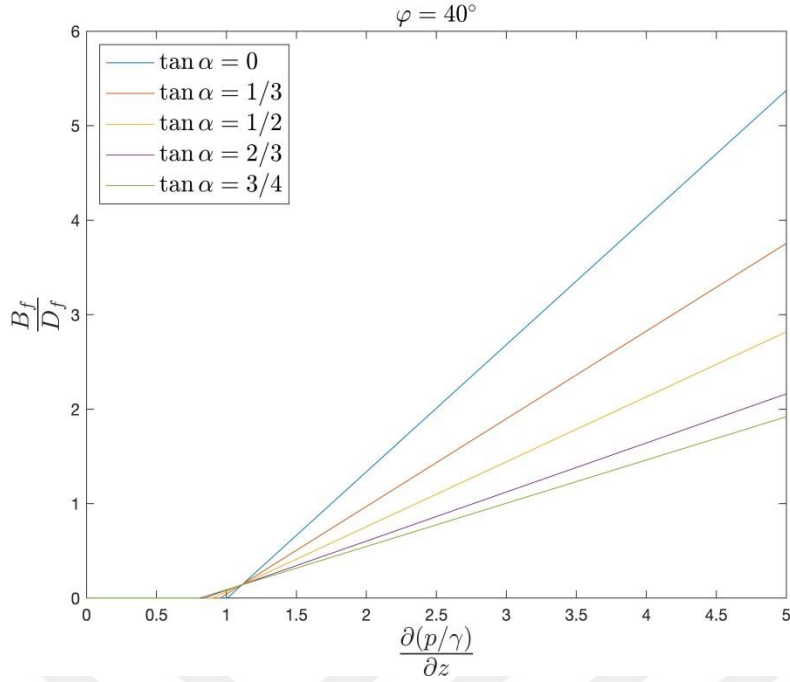
Şekil 4.25 : $\varphi' = 28^\circ$ için B_f/D_f oranının değişimi.



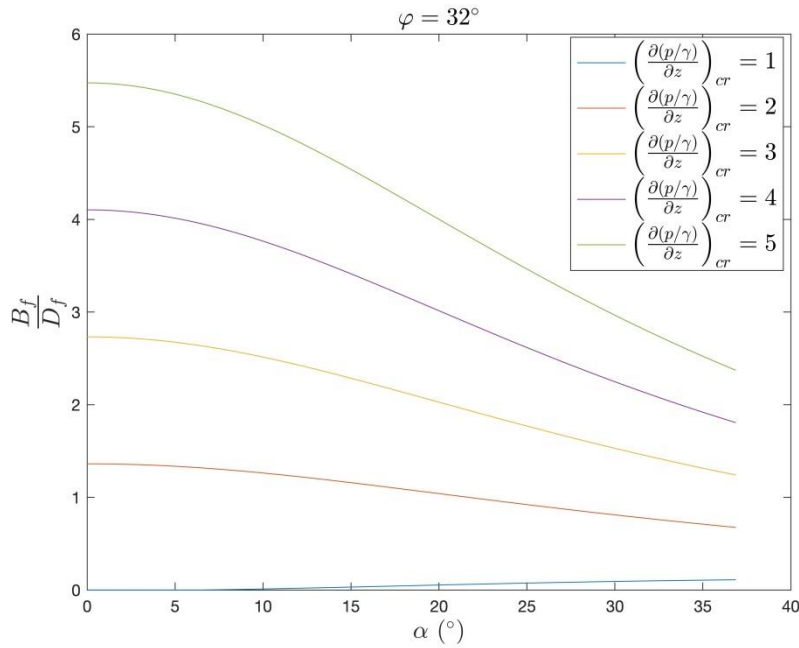
Şekil 4.26 : $\varphi' = 32^\circ$ için B_f/D_f oranının değişimi.



Şekil 4.27 : $\varphi' = 36^\circ$ için B_f/D_f oranının değişimi.



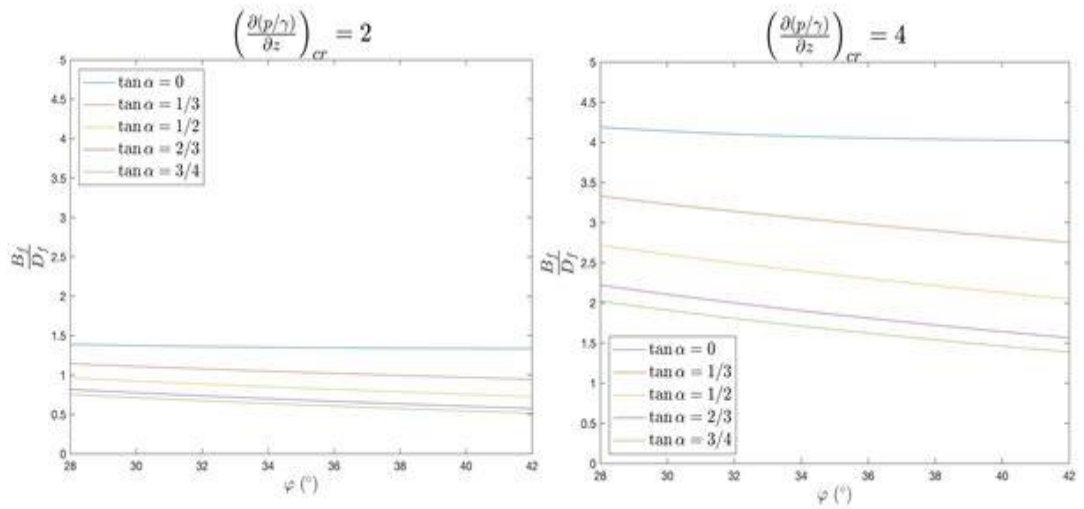
Şekil 4.28 : $\varphi' = 40^\circ$ için B_f/D_f oranının değişimi.



Şekil 4.29 : Farklı basınç gradyanları için eğim açısına göre B_f/D_f oranının değişimi.

Şekillerde (4.25, 4.26, 4.27, 4.28) görüleceği üzere basınç gradyanının artmasıyla borulanmaya karşı yeterli korumanın sağlanabilmesi için filtre kalınlığı da artmaktadır. Şekil 4.29 da ise görüleceği üzere göreceli olarak daha küçük olan basınç gradyanları haricinde eğim açısının artmasıyla tabaka kalınlığının basınç

gradyanıyla ters orantılı olarak değerler aldığı görülmektedir. Burada ilginç olan, verilen kritik basınç gradyanları için yapının eğiminin artmasıyla filtre tabaka kalınlığı azalmaktadır. İlk bakışta bu olay uyumsuz görünebilir. Çünkü eğim azaldıkça daha büyük yer çekim kuvvet bileşenlerine (örneğin $\cos \alpha$) sahip olunacaktır fakat konu tam böyle değildir. Dik eğimler taneler arasında daha fazla sürtünmeler meydana getirir. Denklem (4.40)'da görüleceği üzere sürtünme kısmı $\tan \varphi' [(K_a - 1) \cos^2 \alpha + 1]$ terimi olarak ifade edilmektedir ve boyutsuz filtre tabaka kalınlığıyla da $\frac{B_f}{D_f}$ görüleceği gibi ters orantılıdır. Dik eğimlerde dayanma ağırlık kuvvetleri azalıyor olmasına rağmen Core-LocTM ya da AccropodeTM gibi anroşman tabakasındaki birimlerin kilitlenmesi artmaktadır (CEM,2006). Şekil 4.30a ve şekil 4.30b gerekli minimum filtre tabaka kalınlığı $\frac{B_f}{D_f}$ 'nin, içsel sürtünme açısı (φ') ve kritik dış doğru basınç gradyanlarının bir fonksiyonu olarak değiştiğini görebiliriz. Bu grafiklerde borulanmaya karşı daha dik eğimlerde içsel sürtünme açısının daha kritik bir önem kazandığı görülmektedir. Çarpıcı fark ise basınç gradyanının $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right) = 2$ 'den 4'e çıktığı zaman ortaya çıkmaktadır. Dış yönlü basınç gradyanının büyüklüğü sadece kırılan dalgaların kontrolünde olmadığı Alcérrec-Huerta, ve Oumeraci (2018), ayrıca çekirdek malzemesinin hidrolik iletkenliğinde bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınmalıdır (Graauw ve diğ. 1984).



Şekil 4.30 : (a) $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right) = 2$ için (b) $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right) = 4$ için φ' 'nin fonksiyon olarak B_f/D_f oranının değişimi.

Bu bölümde minimum gerekli filtre tabaka kalınlığı belirlenmesi sağlanmıştır. Bu da anroşman ve filtre tabakası altında bulunan zemin üzerinde bir denge denklemi türetilerek sağlanmıştır. Filtre tabakası altındaki zemin numunesi için tahrip edici ve dayanma kuvvetleri formüle edilmiş, parametrik olarak borulanmaya karşı koyabilecek minimum filtre tabaka kalınlığı çıkartılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki minimum filtre tabaka kalınlığına birçok girdinin etkisi (eğim, içsel sürtünme açısı, porozite vb.) bulunmaktadır. Buradaki ilginç sonuç ise dik eğimin çekirdek malzemede kilitlenmeyi arttırmasından dolayı daha yumuşak eğimli yapılarda filtre tabaka kalınlığının fazla olmasıdır. Kıyı yapıları için granüler filtre tasarımı esnasında tasarımların sadece gradasyona yönelik değil filtre ve anroşman tabaka kalınlıklarının da göz önünde alınması büyük öneme sahiptir. Sonuç olarak uygulamacı kıyı mühendislerinin filtre tabakası tasarımı yaparken sadece malzeme gradasyonuna değil bununla beraber birçok parametrenin de hesaba katılması gerektiği görülmüştür.

4.5 Zemin Elemanı İçindeki Boşluk Suyunun Hareket Denklemi

Şekil 4.20’de verilen zemin elemanı (su-tane karışımı) içerisinde yer alan boşluk suyunun hareket denklemi şu şekildedir:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Basınç Gradyanı} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Akım Direnci} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Taneler Kaynaklı} \\ \text{Hidrodinamik Kütle} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Akışkanın} \\ \text{Kütlesi} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{Akışkanın} \\ \text{İvmesi} \end{array} \right\} \quad (4.48)$$

Bu terimlerin karşılıkları ise şu şekildedir:

$$\left\{ -\frac{\partial p}{\partial z} n \Delta A \Delta z \right\} - \left\{ n \Delta A \Delta z \gamma (aV + b|V|V) \right\} - \left\{ C_m (1 - n) \rho \Delta A \Delta z \frac{\partial V}{\partial t} \right\} = \left\{ n \rho \Delta A \Delta z \right\} \times \left\{ \frac{\partial (V + u)}{\partial t} \right\} \quad (4.49)$$

Burada V boşluk suyunun zemin içindeki tanelere göre ortalama akış hızı, u zemin içindeki tane grubunun hızı, dolayısıyla $V + u$ boşluk suyunun toplam ortalama hızı ve C_m hidrodinamik kütle (eklenik ağırlık) katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Hem C_m , hem de direnç terimindeki a ve b katsayıları yeraltı suyu akımının rejimine göre belirlenmekte olup genellikle ampirik değerler kullanılmaktadır. Yukarıdaki

denklemden yer alan basınç gradyanı kuvveti hidrolik eğim cinsinden ifade etmek istenirse:

$$I = \frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \quad (4.50)$$

denklem aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$I - (aV + b|V|V) - \frac{[C_m(1-n) + n]}{g n} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (4.51)$$

4.6 Zemin Elemanı İçindeki Katı Tane Topluluğunun Hareket Denklemi

Şekil 4.20’de verilen zemin elemanı (su-tane karışımı) içerisinde yer alan katı tane topluluğunun hareket denklemi şu şekildedir:

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{c} \text{Basınç Gradyanı} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Akım Direnci} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Taneler Kaynaklı} \\ \text{Hidrodinamik Kütle} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right\} \\ & - \left\{ \begin{array}{c} \text{Tane Grubunun} \\ \text{Etraftaki Taneler} \\ \text{ile Sürtünmesi} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Tane Grubunun} \\ \text{Batmış Ağırlığı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Tanelerin} \\ \text{Kütlesi} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{Tanelerin} \\ \text{İvmesi} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4.52)$$

Bu denklem borulanma açısından önem taşımaktadır, zira tane grubunun ivmesi dışarı yönde sıfırdan büyük olur ise borulanma meydana gelecektir. Bu denklemde tane grubunun herhangi bir elastik veya plastik deformasyona uğramayacakları, rijit bir davranış sergileyecekleri kabul edilmektedir. Aksi halde sürekli ortam içinde poro-elastik bir zemin kabulü ile Biot (1941) denklemleri kullanılması icap ederdi. Terimler yerine yazılırsa denklem şu hali almaktadır.

$$\begin{aligned} & \left\{ -\frac{\partial p}{\partial z} (1-n) \Delta A \Delta z \right\} + \{ n \Delta A \Delta z \gamma (aV + b|V|V) \} \\ & + \left\{ C_m(1-n) \rho \Delta A \Delta z \frac{\partial V}{\partial t} \right\} \\ & - F_s - \cos \alpha (s-1)(1-n) \gamma \Delta A \Delta z = \{ (1-n) s \rho \Delta A \Delta z \} \times \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Aynı biçimde hidrolik eğim cinsinden ifade edilirse, denklem aşağıdaki biçime dönüşmektedir:

$$I + \frac{n}{(1-n)}(aV + b|V|V) - \frac{F_s}{(1-n)\gamma \Delta A \Delta z} - \cos \alpha (s-1) + \frac{C_m}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{s}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (4.54)$$

Buradaki önemli bir nokta, alttaki zemin tabakası nedeniyle tane grubunun aşağı yönlü ivmelenemeyeceğidir. Yani borulanma yalnızca yukarı yönlü olabilir.

4.7 Zemin Elemanının bir Bütün Halinde Hareket Etmesi Durumu için

Denklemlerin Kontrolü

Zemin elemanını oluşturan hem boşluk suyu hem de tane grubu için ayrı ayrı hareket denklemleri yazılmıştır. Ancak bu denklemlerin yukarıda verilen “zeminin bir bütün halinde hareket etmesi” durumu için ortaya konulan kriter ile kıyaslanarak kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

Permanan akım durumu için zemin stabil ise, denklem (4.11)’de verilen boşluk suyu hareket denkleminde:

$$(aV + b|V|V) = I \quad (4.55)$$

olduğu görülür. Bu denklem yine permanan akım ve stabil zemin için tane grubu hareket denklemindeki yerine yazılırsa:

$$I + \frac{n}{(1-n)}I - \frac{F_s}{(1-n)\gamma \Delta A \Delta z} - \cos \alpha (s-1) = 0 \quad (4.56)$$

yeniden düzenlenirse:

$$\frac{1}{(1-n)}I = \cos \alpha (s-1) + \frac{F_s}{(1-n)\gamma \Delta A \Delta z} \quad (4.57)$$

olduğu görülür. Denklemin her iki tarafı $(1-n)$ ile çarpılırsa, denklem (4.30)’da verilen borulanma kriteriyle özdeş sonuç çıktığı görülecektir:

$$I = (s-1)(1-n) \cos \alpha + \frac{F_s}{\gamma \Delta A \Delta z} \quad (4.58)$$

4.8 Permanan Olmayan Basınç Gradyanı Altında Borulanma Modelinin Uygulanması

Yukarıda verilen denklemler ışığında permanan olmayan basınç gradyanı için boşluk suyu ve katı tane grubunun hareketi için iki bilinmeyen ve iki denklemlili bir non-lineer sistem ortaya çıkmaktadır. Bilinmeyenler (1) boşluk suyunun tanelere göre hızı V ve (2) tane grubunun hızı u 'dur. Denklemler ise (4.51) ve (4.54)'tür. Sistemin sayısal çözümü şu şekilde gerçekleşecektir:

1. Başlangıç durumunda u ve V sıfırdır. Hidrolik eğimin zamana göre değişimi bilinmektedir.
2. Küçük bir Δt basamağı ile zaman ilerletilerek (4.51) denklemi $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ değeri ile çözülerek $\frac{\partial V}{\partial t}$ elde edilir.
3. Daha sonra yeni V değeri hesaplanır: $V(t + \Delta t) \cong \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + V(t)$.
4. Yeni V değeri ile (4.54) denklemi $\frac{\partial u}{\partial t}$ için çözülerek tanelerin dışarı yönlü ivmelenip ivmelenmediğine bakılır.
5. Eğer $\frac{\partial u}{\partial t} > 0$ ise borulanma gerçekleşmiştir. Eğer değilse 2. basamağa dönülerek sayısal hesaba devam edilir.
6. Hidrolik eğim zaman serisinin tamamı boyunca model çalıştırılarak borulanma olup olmadığına karar verilir.

Aşağıda açıklanacak olan deneysel çalışma bölümünde, farklı açılarda teşkil edilen ve filtre ile korunmayan şevlerde, çekirdek malzemesinin (taban malzemesinin) borulanmaya karşı ne derece emniyetle durabildiği tartışılacaktır.



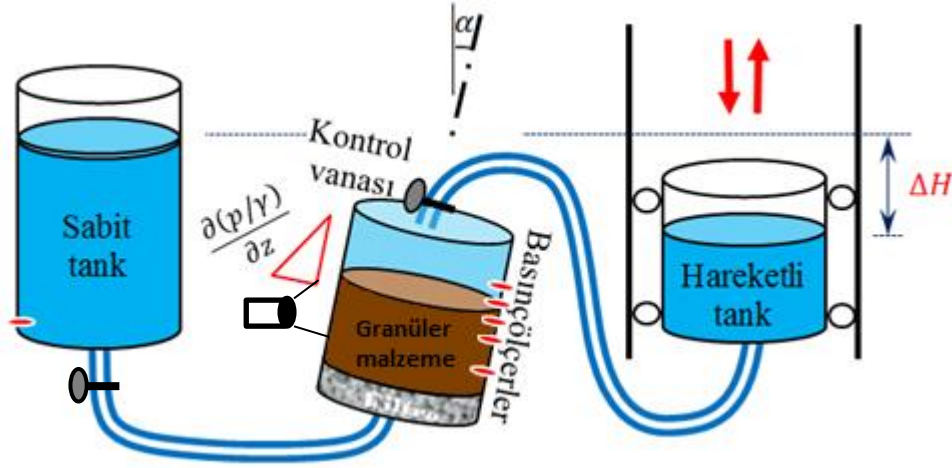
5. SALINIMLI BASINÇ GRADYANI ALTINDA BORULANMA MEKANİZMASI DENEYLERİ

5.1 Borulanma Mekanizması Deney Düzeneği

Borulanma deneyleri için, İTÜ Hidrolik Laboratuvarı'nda salınımlı basınç gradyanı üretebilmek amacıyla kurulan pnömatik tahrikli ve kararsız borulanma testleri için büyük ölçekli bir deney sistemi kullanılmıştır (Şekil 5.1). Çalışmada esas olarak fiziksel modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu sistemin çalışmasının şematik gösterimi şekil 5.2'de verilmektedir. Şekil 5.1 ve 5.2'de de görüldüğü üzere deney sistemi toplamda üç adet pleksicam silindirik yapıda ki sabit tank, hareketli tank ve muhafaza tankı haznesinden oluşmaktadır. Zemin numunesi 30 cm çapında ve 1 m yüksekliğinde bir hazneye yerleştirilmektedir. Bu haznenin sol tarafında sabit bir seviyede hazırlanan bir su kolonu, sağ tarafında ise pnömatik bir piston ile kontrol edilebilen hareketli bir su kolonu bulunmaktadır.



Şekil 5.1 : Salınımlı basınç gradyanı oluşturabilen borulanma deney düzeneği.



Şekil 5.2 : Borulanma deney düzeneği çalışma şeması..

İki su tankı arasında ΔH seviye farkı pistonun aşağı ve yukarı hareket ettirilmesi ile ayarlanarak, istenen basınç gradyanı salınımlı veya sabit olarak elde edilebilmektedir (Şekil 5.2). Şekillerde de görüleceği gibi bu sisteme iki adet vana yerleştirilmiştir.

Borulanma deneyi gerçekleştirilecek malzeme örneğinin (çekirdek malzemesinin) altında malzemenin kaçmasını engellemek için 40 mikron (0.04 mm) gözenekli ve 1 mm kalınlığında çelik ağdan yapılmış iki kat süzgeç katmanı bulunmaktadır. Bu çelik filtrenin altında ise akım çizgilerinin tüm kesite düzgün yayılmasını sağlamak amacıyla 1~2 cm çaplı çakıldan oluşan 10 cm kalınlığında bir filtre tabakası yerleştirilmiştir. Filtrenin altında da 100 mikron gözenekli ikinci bir çelik tel süzgeç bulunmaktadır. Malzeme örneği yüksekliği 30 cm olacak şekilde örselenmeden yerleştirilmektedir. Malzeme yerleştirildikten sonra yapılan ölçümlerde, tüm malzemeler için porozite $n = 0.38 \sim 0.41$ bandında olduğu gözlenmiştir. Malzeme örneğinin bulunduğu tanka 5 adet basınçölçer (Keller 0~0.2 Bar piezoelektrik sensörler) yerleştirilmiştir (Şekil 5.3). Bunlar sırasıyla $z = -2, 0, 2, 5$ ve 25 cm olacak şekilde malzeme tankına yerleştirilmişlerdir. Her basınç tapası su ile dolu piezometre tüpleri vasıtasıyla basınç ölçerlere bağlanmıştır. Bu tür yapılan basınç ölçüm sistemi (basınç ölçer + piyezometre tüpü + basınç tapası) son yirmi yıl içerisinde bir çok araştırmalarda da kullanılmıştır (Sumer ve diğ, 2006a), (Sumer ve diğ, 2012), (Kirca, 2013), (Sumer ve diğ, 1999), (Kirca ve diğ, 2013a), (Sumer ve diğ, 2010), (Sumer ve diğ, 2006b). Kablo çıkışlı olan ürünlerin koruma sınıfları IP68'dir. Su geçirgenliğini engellemek içinse yalıtım bandı kullanılmıştır. Elektriksel olarak veri kayıt sisteminde voltaj okunabildiğinden akım çıkışlı olan ürünler için

içerisinde beslemesi ve kartı olan bir kutu yapılarak çıkış sinyali 1 – 5 volta dönüştürülmüştür (Şekil 5.4). z koordinatı, malzemenin üst yüzünden aşağı doğru ölçülmektedir. Malzeme tankı istenildiğinde düşeyle bir α açısı yapacak şekilde döndürülebilmekte ve bu sayede tankın içindeki malzemenin üst yüzeyinde yatayla α açısı yapan bir şeve benzeştirilebilmektedir.



Şekil 5.3 : Temin edilen basınç ölçer.

Gerektiğinde sistemin debisinin ve malzemenin içinden geçen sızma akımının hızının ölçülebilmesi için, sabit su tankının tabanına altıncı bir basınçölçer yerleştirilmiştir. Bu sayede tankın içindeki suyun seviyesi anlık olarak ölçülebilmektedir. Tüm ölçümler eşzamanlı olarak bir NI-6210 veri toplayıcı kart marifeti ile 100 Hz örnekleme sıklığında kaydedilmiştir. Ölçüm cihazlarından gelen veriler Teknik Destek Grubu tarafından imal edilen 16 kanallı “testbox” tipi veri kaydedici ile ve ayrıca National Instruments tarafından imal edilen 8 analog ve 8 dijital kanallı USB ara yüzü A/D dönüştürücü veri toplama kartı ile kaydedilmiştir. (Şekil 5.5) Bu iki cihaz ile toplam 22 analog kanaldan veri toplanabilecek, veriler 250 Hz ile eşzamanlı (senkronize) biçimde PC ortamına aktarılmıştır.



Şekil 5.4 : Veri toplama cihazları.

Ayrıca deneylerin tamamında örnekleme tankı video kamera ile gözlemlenmiş ve tüm deneylerde görüntü kaydı yapılmıştır. Video görüntüleri ile basınç ölçümlerinin hassas biçimde senkronize edilebilmesi için akım-çakar bir LED ışığı kullanılmıştır. Bir bataryaya bağlı olan LED ışığı veri toplama cihazına bağlı olarak çalışmakta, görüntülerle deney verileri 0,01s hassasiyetinde eşleştirilmektedir.

İstenilen basınç gradyanının elde edilebilme mekanizması ise şöyledir;

Sistem için gerekli olan basınçlı hava (pnömatik sistemde) sıkıştırıcı (kompresör) tarafından üretilmektedir (Şekil 5.5). Sisteme ise bir hortum aracılığıyla iletilmektedir. FR (Y) 1/4 hava hazırlayıcı (şartlandırıcı) bir kontrol mekanizması olup, basınçlı hava sisteme girmeden buradan geçirilmektedir. Buradaki şartlandırıcı (hava hazırlayıcı) birleşik filtre regülatör (FR) ve yağlayıcıdan (Y) oluşmaktadır. Sıkıştırılmış olan hava pnömatik sistemde yağ atıkları, çapaklar, pas parçacıkları, toz, su damlacıkları gibi maddeler içerebilmektedir. Sıkıştırılmış olan hava, sistem içerisindeki bütün elemanlar ile temas içerisinde olabildiğinden potansiyel arızaların oluşmasını engellemek ve elemanların işletme sürelerini uzatmak amacıyla sıkıştırılmış hava filtreden geçirilerek yabancı maddeden arındırılmaktadır. Filtrenin çalışma basıncı 0-10 bar aralığındadır. Mevcut olan regülatör kompresörden gelen havanın istenilen değerde kalmasını sağlar. Regülatör giriş basıncı 0-16 bar, çıkış basıncı ise 0,5-10 bar aralığındadır. Sürtünmelerden dolayı oluşan kayıpları minimuma çekilmesi ve korozyona karşı bir korumanın yapılabilmesi için sisteme giren hava yağlayıcı aracılığıyla yağlamaktadır. Yağlayıcının çalışma basıncı 0-10 bar aralığındadır. Yağlayıcıda özel hava hazırlayıcı yağ kullanılmaktadır (Gedik, 2004).



Şekil 5.5 : Pnömatik tahrik sistemi kontrol mekanizması (solda) ve hava kompresörü (sağda).

5.2 Borulanma Deneylerinde Kullanılan Zeminin Özellikleri

Çalışma kapsamında üç tip malzeme kullanılmıştır. Bunlar geniş granülometride siltli ince kum (iyi dağılımlı), dar granülometride orta kaba kum ve çakıl boyutlarındadırlar. Bu şekilde farklı özellikteki malzemelerin birbirleriyle karşılaştırılmasına imkan sağlamaktadır. Borulanma deneylerinde kullanılan zeminlerin karakteristik özellikleri çizelge 5.1’de verilmektedir. Zeminlerin hidrolik iletkenlik değerleri düşen seviyeli permeabilite deneyleriyle belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan zeminlerden olan siltli kum ve orta kaba kum için içsel sürtünme açısı kesme kutusu testleriyle belirlenmiş, çakıl için ise sürtünme açısı tabi şev açısı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 5.1. Borulanma deneylerinde kullanılan zeminlerin karakteristik özellikleri.

Zemin Cinsi	Tane Özgül Ağırlığı, s	Medyan Tane Boyutu, d_{50} (mm)	Standart Geometrik	Hidrolik İletkenlik, k (m/s)	Porozite, n	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)
			Sapma $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$			
Siltli İnce Kum	3.00	0.2	3,10	1.2×10^{-5}	0.37	40
Orta Kum	2,65	0.7	2,50	2.8×10^{-4}	0.39	38
Çakıl	3,40	12	1,80	6.6×10^{-2}	0.40	44

5.3 Salınlı Basınç Gradyanı Altında Borulanma Deneyi Prosedürü

Konteyner tanka (ortadaki) zemin, asgari örselenmeyle ilk olarak 30 cm kalınlığında yerleştirilmiştir. İlk yerleştirilen zemin, testten önce ve testten sonra oluşacak porozitesinin belirlenebilmesi ve ölçülebilmesi için tartılmıştır. Zemin yerleştirilir yerleştirilmez sabit tankın çıkışında bulunan vana aşamalı olarak açılarak dipten tepeye doğru yavaş bir şekilde zemin suya doyurulmuştur. En ince zemin için suya doyurulma işlemi yaklaşık üç saat sürmüştür. Test sonrası ya da suya doygunluktan sonra yerleştirilen zeminin porozitesinin ± 0.015 değerinden fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Zemin tamamen doygun hale getirilince sabit tankın çıkışında ki vana kapatılır. Daha sonra konteyner tankta bulunan kontrol vanası sayesinde tepeden su doldurulmaya devam edilir. Yaklaşık olarak hareketli tanktaki su seviyesi sabit tanktaki su seviyesine getirildiği zaman vana zemin numunesini örseleyerek erken borulanmaya sebep olmaması için seviyeli olarak yavaş yavaş açılır. Sabit ve hareketli tanktaki su seviyelerinin tam olarak eşit olabilmesi için yeterli miktarda

beklenilir. Su seviyelerinin eşit olduklarına emin olunduğunda konteyner tankın çıkışında bulunan vana kapatılır.

Çizelgelerden de görüleceği üzere iki çeşit test yapılmıştır. Bunlar: düşen (ani) hidrolik yükleme testi ile salınımlı hidrolik yükleme testidir. Ani hidrolik yükleme testinin yapılması için ilk olarak ön tasarıma göre konteyner tankın eğimi belirlenir ve belirlenen eğime getirilir. Hareketli tank ve sabit tanktaki su seviyesi farkı olan ΔH , hareketli tanktaki su yükseklik seviyesini düşürerek ayarlanır. Kamera ve veri toplama işlemi başlatılır. Konteyner tankın çıkışındaki vana aniden açılır. Bu ani hareket zemin numunesi üzerinde keskin yukarı yönlü basınç gradyanı meydana getirir ki bu da eğimde dalganın çekilme fazındaki ani hidrolik yüklemeyi temsil edebilir. Borulanmanın meydana gelip gelmemesiyle ilgili gözlemler ve basınç ölçümleri video kayıtlarıyla birlikte eşzamanlı olarak yapılmıştır.

Salınımlı hidrolik yükleme testini yapmak için sabit ve hareketli tanktaki su seviyeleri eşit olduğunda önce konteyner tankın çıkışındaki vana açılır. Salınımlı hidrolik testten önce ΔH mesafesi ön tasarım ile belirlenir. Pnömatik piston vasıtasıyla kılavuz yaylar üzerinde sabit tankın seviyesi referans alınarak $-\Delta H/2$ ve $+\Delta H/2$ arasında hareketli tank sinüzoidal olarak yer değiştirilir. Sinüzoidal hareketin periyodu (T) önceden belirlenir. Eğimli yüzey üzerindeki fırtına dalgalarını temsil etmek için dalga periyodu $T= 8,10$ ve 12 sn. olarak seçilmiştir. Kanalda yapılan standart ölçekli testlerde Froude modeli ile boşluklu ortam hidroliğini ölçeklendirmek mümkün değildir. Mevcut deney düzeneğinin dalga-kanal deneyleriyle karşılaştırılınca büyük bir avantajı olduğu görülmektedir.

5.4 Kararsız Borulanma Üzerinde Deney Sonuçları

Borulanma deneylerinde şev eğiminin etkisini görebilmek için malzeme tankı farklı α açılarında eğilmiş ve bu açılar için deneyler yapılmıştır. Toplam 64 deney yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde listelenmiştir.

Orta kaba kum numunesi, çakıl ve siltli ince kum ile yapılan deneylerin sonuçları sırasıyla Bölüm 5.4.1, 5.4.2 ve 5.4.3'te aktarılmaktadır.

5.4.1 Orta kalınlıktaki kum numuneleri deneyleri

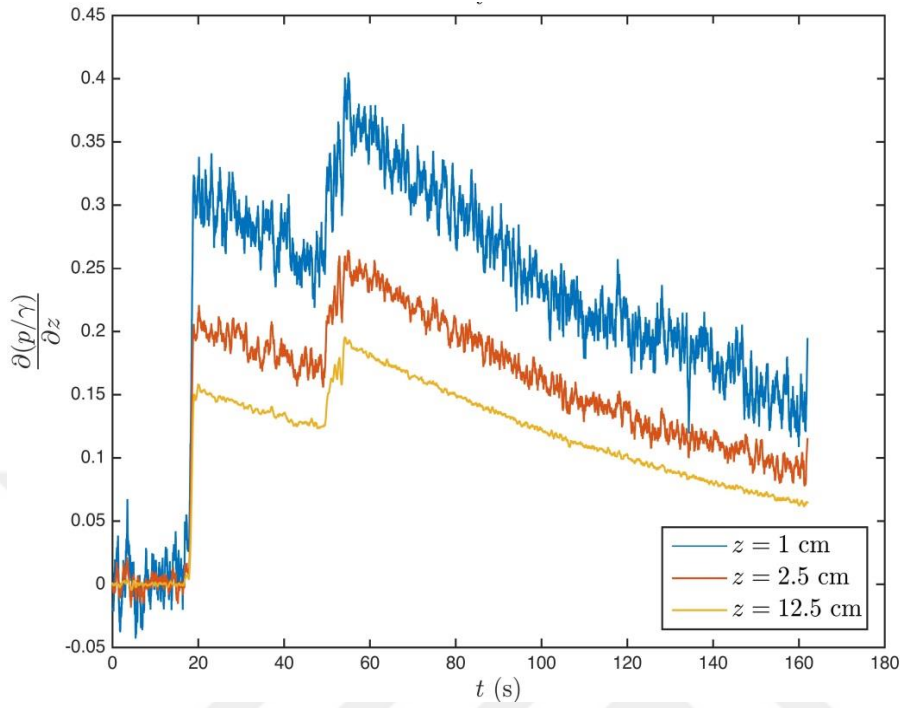
Orta kalınlıkta ki kum numunesi ile yapılan deneylerin tamamı çizelge 5.2’de sunulmaktadır. Görüldüğü gibi kum numunesi kullanılarak 5’i “düşen (ani) basınç gradyanı” ve 9’u da “salınımlı basınç gradyanı” altında olmak üzere toplam 14 deney gerçekleştirilmiştir. “Düşen basınç gradyanı” deneylerinde, deney haznesindeki orta kalınlıkta ki kum numunesinin hidrolik iletkenliği $k_{\text{orta kum}} = 2.8 \times 10^{-4}$ m/s olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2. Orta kalınlıkta kum kullanılarak yapılan borulanma deneyleri.

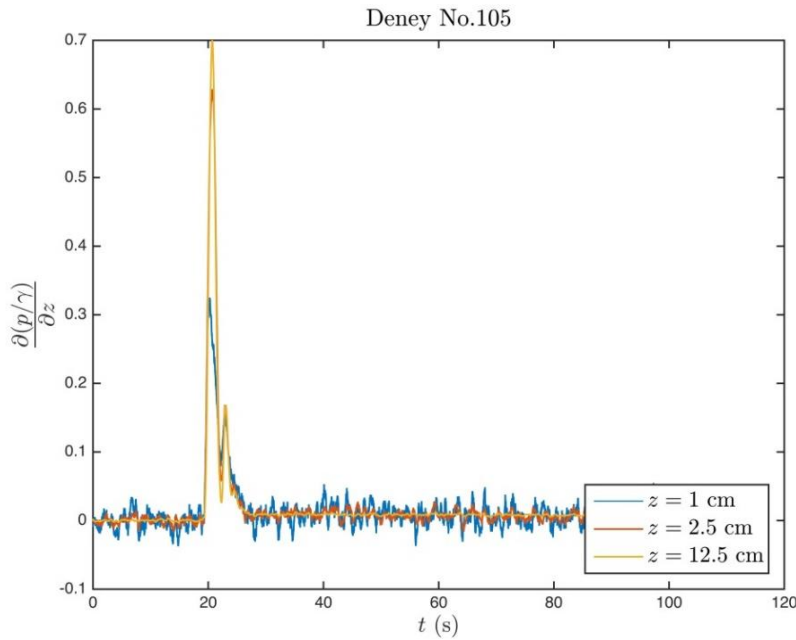
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)	Borulanma?
101	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.15	----	Yok
102	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----	Yok
103	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----	Var
104	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----	Var
105	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----	Limit (Var)
201	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.10	8	Yok
202	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.15	8	Yok
203	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.20	8	Yok
204	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.25	8	Yok
205	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.30	8	Yok
206	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.35	8	Yok
207	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	8	Yok
208	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	12	Limit (Var)
209	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	12	Var

Düşen basınç gradyanı deneylerinde iki tank arasındaki düşey mesafe $\Delta H = 75$ cm oluncaya kadar arttırılmış ve $\Delta H \geq 40$ cm olduğu durumda borulanma görülmüştür.

Deney No. 101, 105 ve 103 için elde edilen basınç gradyanı zaman serileri sırasıyla şekil 5.6, şekil 5.7, şekil 5.8 ve şekil 5.9’da verilmektedir.



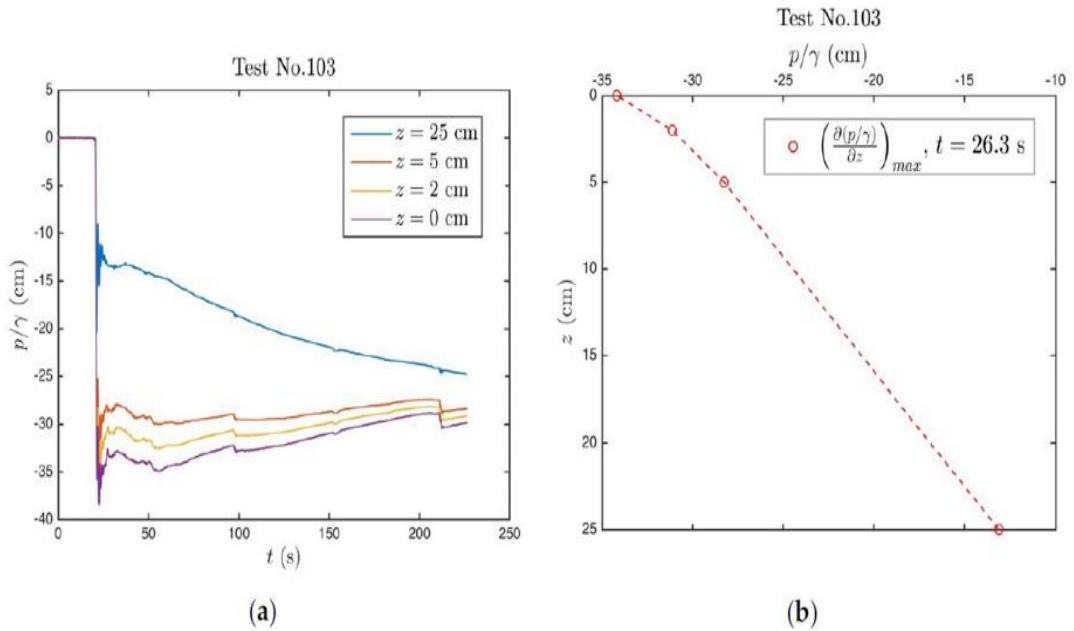
Şekil 5.6 : Deney no. 101, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 15$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.38$, borulanma yok.



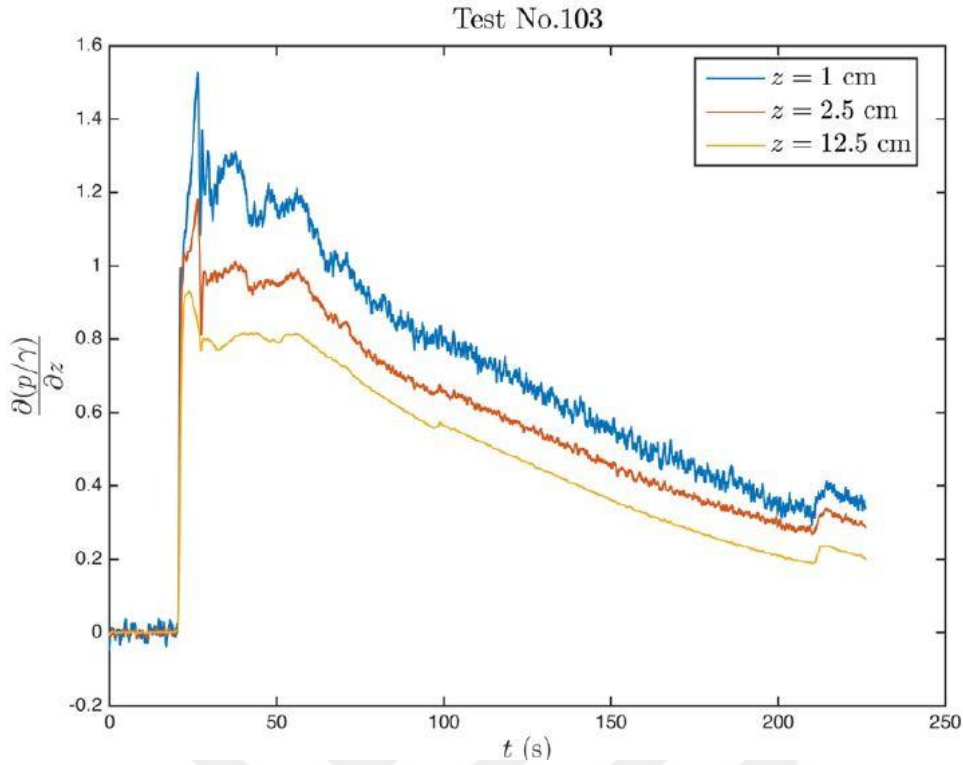
Şekil 5.7 : Deney no. 105, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.75$, borulanma sınırında.

Şekil 5.8a, 103 no'lu test süresince kaydedilmiş basınç-zaman serilerini göstermektedir. Buradaki zemine (orta kum) ani hidrolik yükleme altında borulanma deneyi yapılmıştır. Bunu tipik ani yükleme testi olarak görülebilir. Şekil 5.8b, maksimum hidrolik gradyana ulaşıldığı andaki derinliğe bağlı basınç profilini göstermektedir. Hidrolik gradyan $\frac{(p_2/\gamma - p_0/\gamma)}{z_2 - 0}$ gibi basınç ölçümleriyle hesaplanır. Bu itibarla basınç gradyan zaman serileri 0-2 cm derinlik, 0-5 cm derinlik ve 0-25 cm derinlik arasında hesaplanmıştır.

103 no'lu testin hidrolik gradyan zaman serileri şekil 5.9'de gösterilmiştir. Görüleceği üzere en dik hidrolik gradyan zemin yüzeyine en yakın bölgede olmaktadır ve değeri $i_{max}=1.53$ 'tür. Denklem 4.37'ye göre hesaplanmış kritik hidrolik gradyan değeri 1.26'dır. Bu durumda borulanma beklenilmektedir. Burada konteyner tankın Pleksicam malzeme cidarı ile zemin arasındaki sürtünme açısı $\delta = \varphi' / 3$ olarak alınmıştır. Öte yandan ani hidrolik yüklemeyle uygulanan basınç gradyanı (itici) $\Delta H/L=1.67$ 'dir. Burada L, zemin tabakasının kalınlığıdır. Bu değer ölçülen maksimum hidrolik gradyandan daha büyük olduğu görülmektedir ve bu noktaya daha sonra değinilecektir.



Şekil 5.8 : (a) Ani hidrolik yükleme altında 103 no'lu kayıt edilen basınç zaman serileri. (b) $t=26.3$ sn'de ölçülen anlık maksimum basınç gradyanındaki $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)$ derinlik - basınç profili.

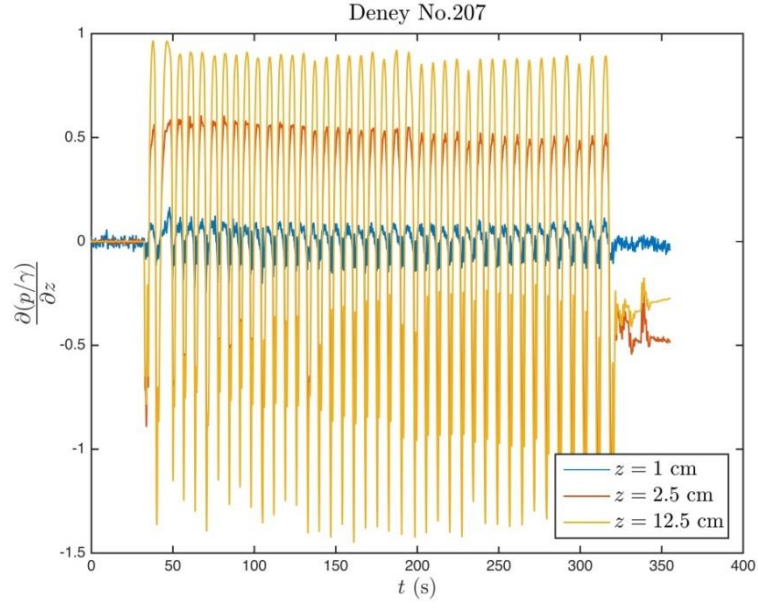


Şekil 5.9 : Deney no. 103, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 50$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 1.53$, borulanma var.(103’nolu testte kayıt edilen hidrolik gradyan zaman serileri maksimum basınç gradyanına $t = 26.3$ sn’de ulaşılmıştır).

Hareketli (salınımlı) basınç gradyanı altında yapılan deneylerde ise $\Delta H = 40$ cm ve hareketin periyodu $T = 8$ s iken (Deney No. 207) borulanma olmadığı, ancak aynı seviye farkı (hidrolik yük) için $T = 12$ s olacak şekilde ayarlandığında (Deney No. 208) numunenin borulandığı gözlemlenmiştir. Bu da uzun dalgalar altında borulanma riskinin kısa dalgalara nispetle daha yüksek olduğu yargısıyla uyumludur. Deney No. 207 ve 209 için elde edilen basınç gradyanları sırasıyla şekil 5.10 ve 5.11’de sunulmaktadır. Buradan görülebileceği gibi, salınımlı basınç gradyanı durumunda aktif olan atalet terimleri, borulanmanın fizliğini etkilemektedir.

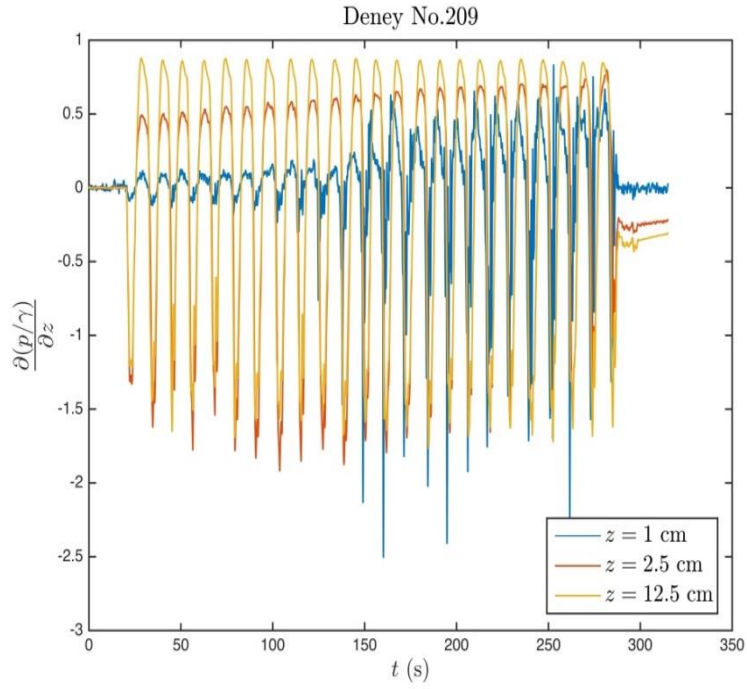
Orta kalınlıktaki kum numunesi ile yapılan değerlendirmelerde ortaya çıkan sonuç, bölüm 4.4.1’de açıklanan ve korumasız şev durumunda sürtünme terimlerinden sorumlu olan χ teriminin siltli ince kum değerinden küçük olduğu ve eğer emniyetli tarafta kalınmak istenirse pratikte sürtünme etkisi ihmal edilerek;

$$\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\text{kritik}} = (s - 1) (1 - n) \cos \alpha \text{ formülü alınabilecektir.}$$



Şekil 5.10 : Deney no. 207, salınlımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $T = 8$

$$s, \left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)_{\max} = 0,90, \text{ borulanma yok.}$$



Şekil 5.11 : Deney no. 209, salınlımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 50$ cm, $T =$

$$12 \text{ s, } \left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z} \right)_{\max} = 0,90, \text{ borulanma var.}$$

5.4.2 Çakıl numunesi deneyleri

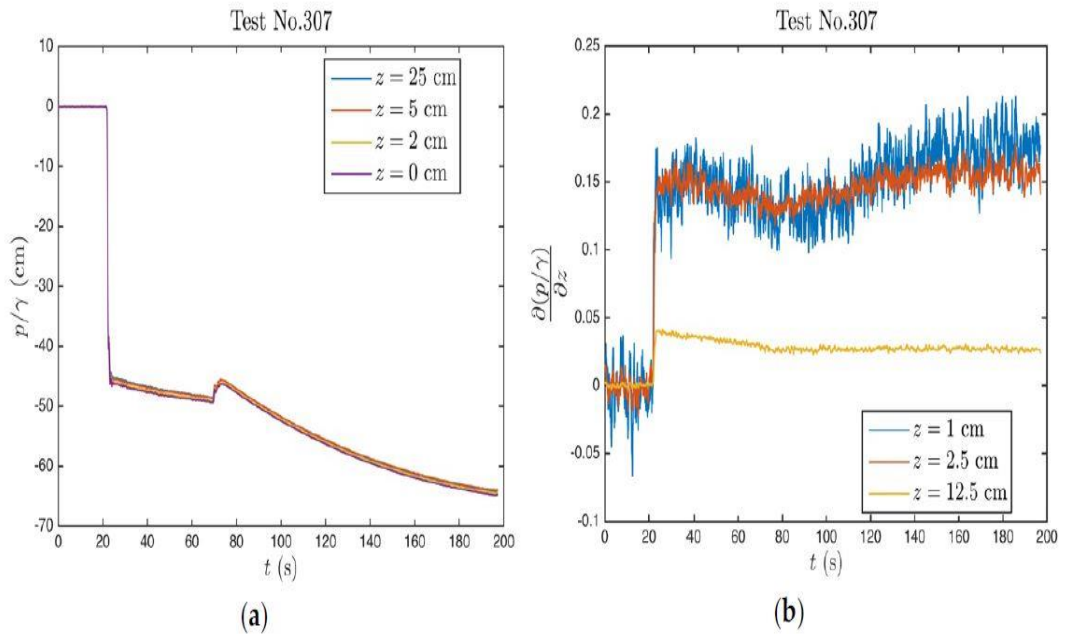
Çakıl numesi kullanılarak yapılan deneylerin tamamı çizelge 5.3’de sunulmaktadır. Bunlardan 15’i “düşen basınç gradyanı” ve 5’i de “salınımlı basınç gradyanı” altında olmak üzere toplam 20 deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerin bir yarısı yatay, yarısı ise eğimli (şev açılı) durum için gerçekleştirilmiştir. “Düşen basınç gradyanı” deneylerinde, deney haznesindeki çakıl numunesi için elde edilen hidrolik iletkenlik değeri $k_{\text{çakıl}} = 6.6 \times 10^{-2}$ m/s mertebesinde dir. Bu yüksek iletkenlik değeri göstermektedir ki, bu iri malzeme ile oluşan boşluklu ortamdaki akım yüksek basınç gradyanlarında Darcy rejiminden türbülanslı rejime kayabilmektedir.

Çizelge 5.3. Çakıl malzemenin borulanma deneyleri.

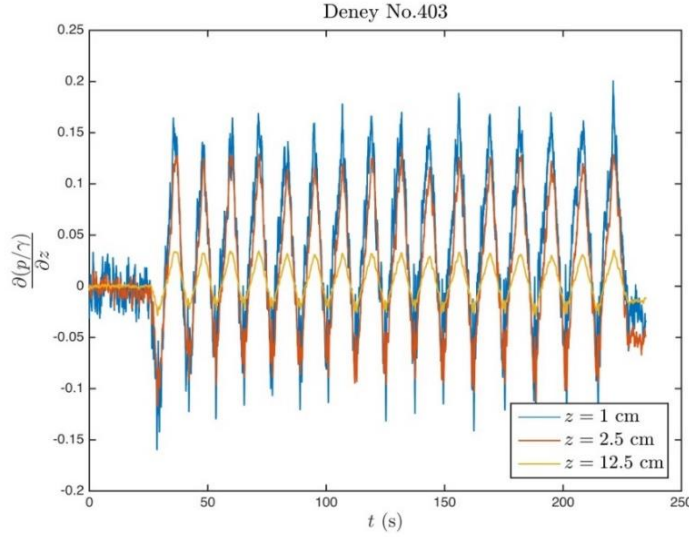
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)	Borulanma?
301	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.20	----	Yok
302	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----	Yok
303	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----	Yok
304	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----	Yok
305	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----	Yok
306	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	1.00	----	Yok
307	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	2.00	----	Yok
401	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.25	8	Yok
402	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	10	Yok
403	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.65	12	Yok
501	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.20	----	Yok
502	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.30	----	Yok
503	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.40	----	Yok
504	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.75	----	Yok
505	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	1.00	----	Yok
506	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	2.00	----	Yok
507	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.50	----	Yok
601	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.65	12	Yok
701	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	34.0	2.00	----	Yok
801	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.65	12	Yok

Görüldüğü gibi hem “düşen basınç gradyanı” deneylerinde iki tank arasındaki mesafe $\Delta H = 2$ m’ye, hem de “salınımlı basınç gradyanı” deneylerinde ise $\Delta H = \pm 0.65$ m mertebesine kadar arttırılmış olmasına ve şev açısının $\alpha = 34^\circ$ ’ye kadar dikleştirilmesine karşın hiçbir surette borulanma emaresi gözlemlenmemiştir. Örnek olarak verilen deney No. 307, 403, 701 ve 801 sonunda elde edilen sonuçlar sırasıyla şekil 5.12, şekil 5.13, şekil 5.14 ve şekil 5.15’de sunulmaktadır.

Şekil 5.12’de, çakıl malzemesinin üzerine hidrolik yükleme yapılmak suretiyle test no 307’den elde edilen basınç ve hidrolik gradyan zaman serileri görülmektedir. Bu testte çakıl malzemesine ani hidrolik yükleme yapılmıştır. Görüleceği üzere uygulanan basınç gradyanı $\Delta H/L = 6.67$ olmasına rağmen buradaki maksimum hidrolik gradyan $i_{max} = 0.2$ civarında olduğu görülmektedir. İki gradyan arasındaki büyük farklılık çakıl malzemesinin yüksek hidrolik iletkenliğine bağlıdır. Yüksek hidrolik iletkenlik sayesinde uygulanan (itici) basınç gradyanı çok hızlı bir şekilde dağılmaktadır. Böylece borulanmanın başlaması için zemin yeterli yüksek basınç gradyanına maruz kalmamaktadır. Çizelge 5.3’de görüleceği üzere çakıl malzemede borulanma olayının başlaması ne ani yüklemede ne de salınımlı yükleme durumlarında mümkün olmamaktadır.

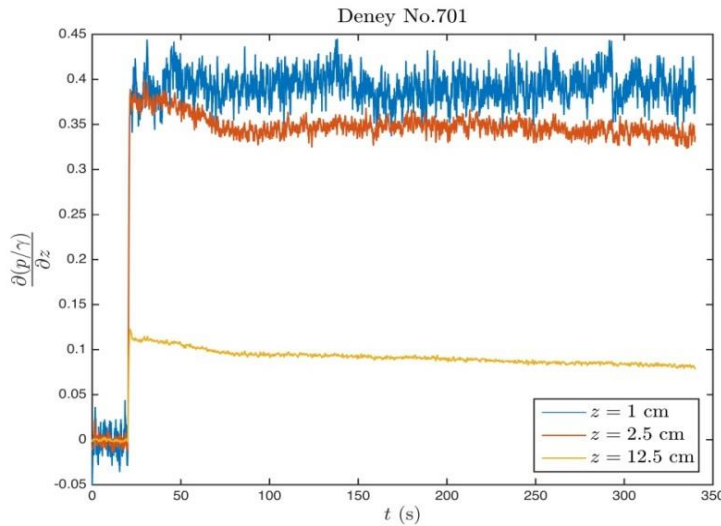


Şekil 5.12 : Deney no. 307, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 2$ m, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{max} = 0.2$, borulanma yok a) basınç zaman serileri b) hidrolik gradyan zaman serileri.

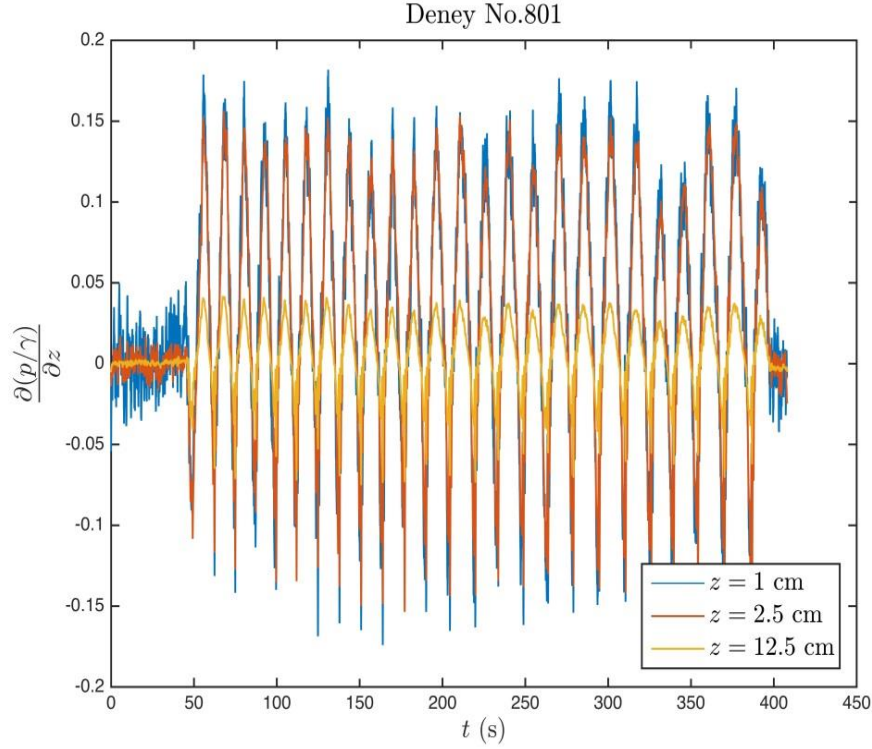


Şekil 5.13 : Deney no. 403, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 65$ cm,
 $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.2$, borulanma yok.

Numunelerin yatay konumlandırıldığı deneylerde, borulanma kriterinin beşte birine dahi yaklaşılamamıştır. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te görüleceği üzere numune tankının döndürülerek şev açısının $\alpha = 34^\circ$ 'ye (1/1.5 eğime) kadar dikleştirildiği deneylerde borulanma oluşturabilecek kritik basınç gradyanı değeri de bir miktar düştüğünden, ölçülen en yüksek basınç gradyanı kritik değerin üçte birini yakalayabilmiştir. Yapılan gözlemler de, elde edilen veriler de çakıl malzemesinin en olumsuz koşulda dahi borulanma açısından oldukça emniyetli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.14 : Deney no. 701, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 34^\circ$, $\Delta H = 2$ m,
 $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.42$, borulanma yok.



Şekil 5.15 : Deney no. 801, salınımlı basınç gradyanı, $\alpha = 34^\circ$, $\Delta H = 65$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.17$, borulanma yok.

5.4.3 Siltli ince kum numunesi deneyleri

İçerisinde 0.07 mm mertebesine kadar (silt boyutunda) daneler bulunmakla birlikte medyan tane çapı 0.2 mm olan geniş dağılımlı ince kum numunesi ile 31 adet deney yapılmış olup, bunlardan 15'i “düşen basınç gradyanı”, 16’sı ise “salınımlı basınç gradyanı” etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında şev açısı $\alpha = 34^\circ$ ’ye kadar dikleştirilmiştir. Bu malzeme ile yapılan deneylerin tümü çizelge 5.4’de gösterilmektedir. Düşen basınç gradyanı ile yapılan deneylerde ince kum için hidrolik iletkenliğin $k_{\text{siltli ince kum}} = 1.2 \times 10^{-5}$ m/s mertebesinde olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.4’de de görüldüğü üzere, malzemenin hidrolik iletkenliğinin düşürülmesi, basınç gradyanı ile tahrik edilen suyun malzemenin içinden geçememesine, dolayısıyla basınç gradyanının sönümlenemeyerek yüksek değerlere çıkıp borulanma oluşturmaya yol açmaktadır. Yapılan gözlemlerden, borulanma olmasına rağmen yalnızca küçük tanelerin ($d < 0.1$ mm) hareket ettiği, daha büyük tanelerin ancak çok daha yüksek basınç gradyanlarına tepki verdiği anlaşılmaktadır. Yerleşmiş

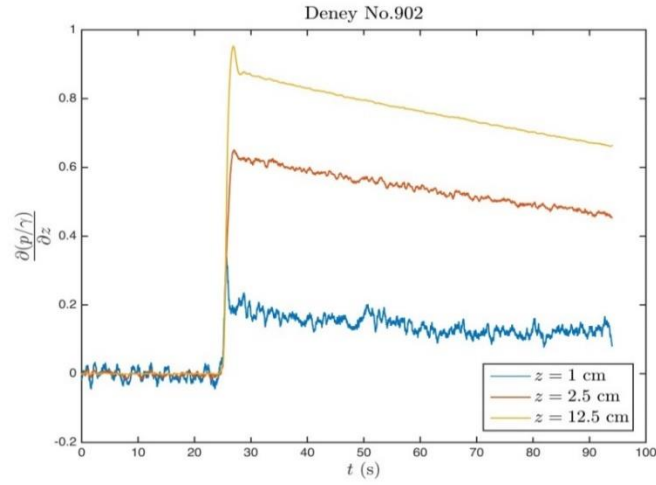
malzemenin kritik basınç gradyanı değeri deneysel veriler kullanılarak tespit edildiğinde, denklem (4.37)'te verilen ve malzemenin borulanmaya karşı iç kilitlenmesini niceleyen χ parametresinin sıfır olmadığı, değerinin 0.2 ilâ 0.3 mertebesine kadar artabildiği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.4. İnce kum malzemenin borulanma deneyleri.

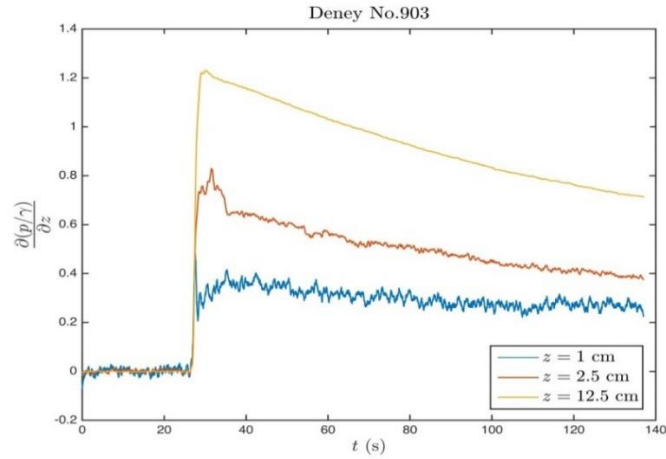
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)	Borulanma?
901	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.20	----	Yok
902	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----	Yok
903	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----	Var
904	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----	Var
905	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----	Var
1001	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.15	8	Yok
1002	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.20	8	Var
1003	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.30	10	Var
1004	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	10	Var
1005	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	10	Var
1006	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.65	12	Var
1101	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.20	----	Yok
1102	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.30	----	Var
1103	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.40	----	Var
1104	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.50	----	Var
1201	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.15	8	Yok
1202	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.20	8	Var
1203	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.30	8	Var
1204	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.40	8	Var
1205	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.65	12	Var
1301	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.20	----	Var
1302	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.30	----	Var
1303	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.40	----	Var
1304	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.50	----	Var
1305	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.75	----	Var
1306	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	1.00	----	Var
1401	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.15	8	Var
1402	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.20	8	Var
1403	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.30	8	Var
1404	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.40	8	Var
1405	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.65	12	Var

Örnek teşkil etmesi amacıyla 902, 903, 1003 no.'lu deneylerin sonuçları sırasıyla şekil 5.16, şekil 5.17, şekil 5.18, şekil 5.19'de verilmiştir. Düşen basınç gradyanı testlerinde tam borulanmaya yol açan kritik yükseklik farkının $\Delta H \approx 20$ cm – 35 cm arasında ki mertebede, salınımlı basınç gradyanı testlerinde ise yine α 'nın

değişmesiyle bu fark $\Delta H \approx \pm 15$ cm ile ± 20 cm arasındaki mertebesinde gerçekleşmektedir.



Şekil 5.16 : Deney no. 902, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 30$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 0.95$, borulanma yok.



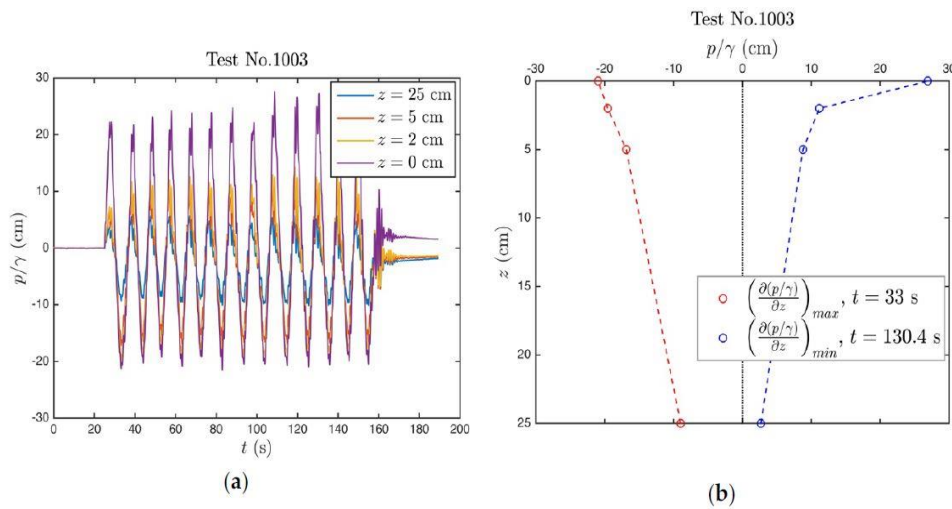
Şekil 5.17 : Deney no. 903, düşen basınç gradyanı, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta H = 40$ cm, $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)_{\max} = 1.25$, borulanma var.

İnce kum (düşük geçirgenlikli) malzemesi salınımlı basınç gradyanına maruz bırakıldığında, basınç gradyanı aşağı yönlü iken suyun malzeme içinden geçememesi nedeniyle basınç gradyanında çok yüksek mertebelerde artışlar meydana gelmekte, daha sonra basınç gradyanının ani şekilde tersine dönmesi ile malzeme önemli miktarda borulanma kuvvetine maruz bırakılmaktadır. Bu itibarla, düşük hidrolik iletkenliğe sahip malzemelerin borulanması açısından salınımlı basınç gradyanı

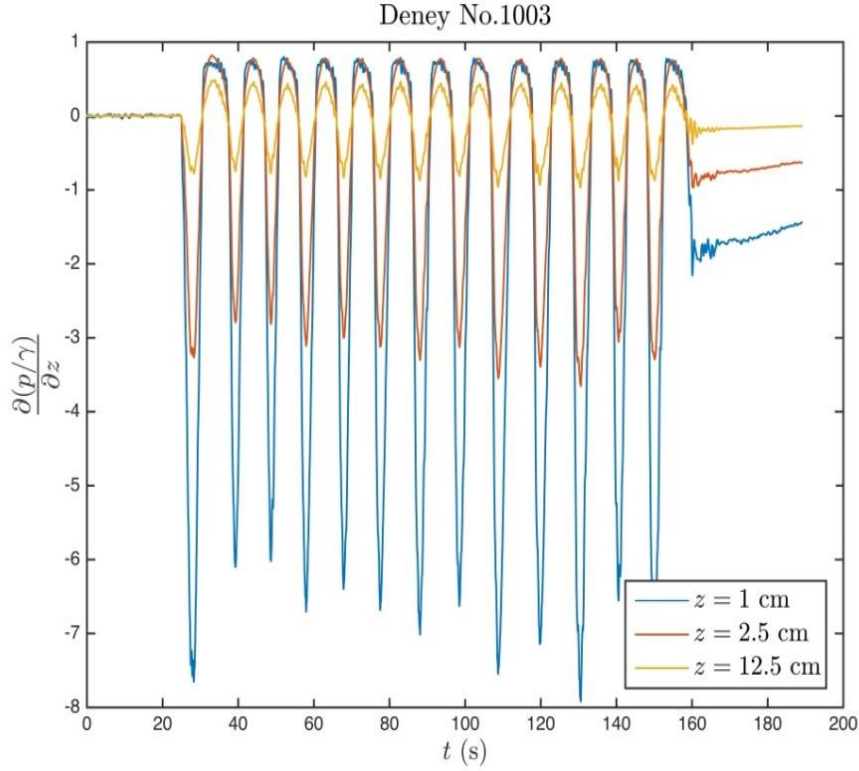
koşulunun sabit basınç gradyanına göre daha kritik olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 5.18a, 1003 no'lu testin basınç-zaman serisini göstermektedir. Burada zeminin borulanmaya maruz kaldığı görülmektedir. Görüleceği üzere salınımlı yükleme periyodu $t=10$ sn'dir ki bu değer fırtına dalgasının periyoduna uygundur. Hidrolik gradyanın maksimum olduğu (yukarı yönü zirve), minimum olduğu (aşağı yönlü zirve) durumundaki iki farklı zaman için şekil 5.18b'de basınç profili verilmektedir. Görüleceği üzere, özellikle zemin yüzeyine yakın yerlerde, salınımlı yüklemeye maruz bırakılan zeminde hidrolik gradyanın aşağı yönlü zirve değerleri dikkat çekici bir şekilde keskindir (sivridir).

Şekil 5.19, 1003 no'lu test esnasında ölçülen hidrolik gradyanın zaman serilerini göstermektedir. Bu şekil üzerinde aşağı ve yukarı yönlü zirve basınç gradyanları arasındaki farklılıklar rahatça görülebilmektedir. Salınımlı hareketin uygulanan (itici) hidrolik gradyanı $\Delta H/L = 1.00$ iken yukarı yönlü hidrolik gradyanın en büyük değeri $i_{max}=0.82$ 'dir. Denklem 4.37'ye göre hesaplanan kritik hidrolik gradyan $i_{cr}= 1.26$ hesaplanır. Uygulanan basınç gradyanı kritik kararlı durum değerinden önemli ölçüde düşük olmasına rağmen zeminin borulanmaya maruz kaldığı görülmektedir. Deney uygulanan zemin siltli ince kum olup, üzerinde test uygulanan zeminler arasındaki en düşük hidrolik iletkenlik değerine sahiptir.



Şekil 5.18 : (a) Salınımlı hidrolik yükleme ile yapılan 1003 no'lu testte kayıt edilen basınç-zaman serileri. (b) $t=33.0$ sn. ve 130.4 sn. de anlık ölçülen maksimum ve minimum basınç gradyanlarındaki $\left(\frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}\right)$ derinlikle basınç profil değişimi.

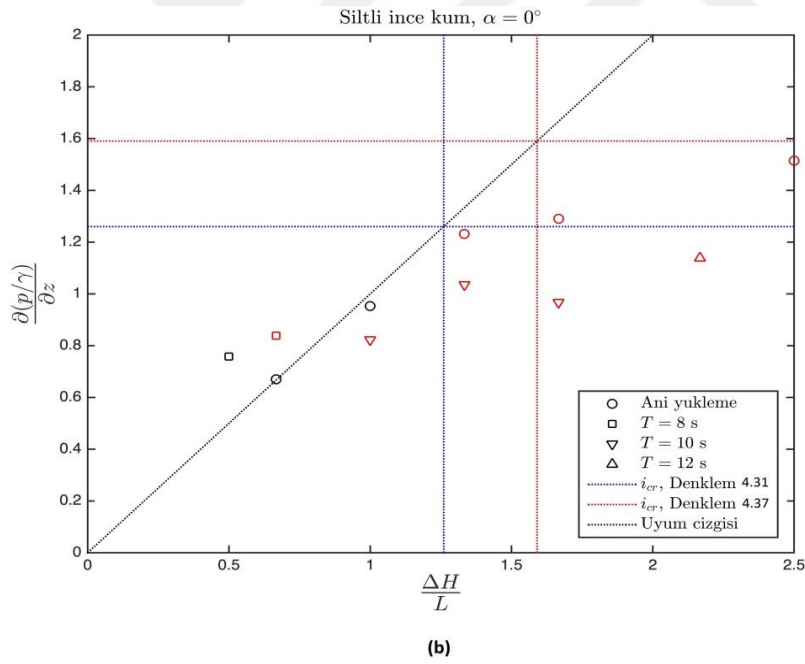
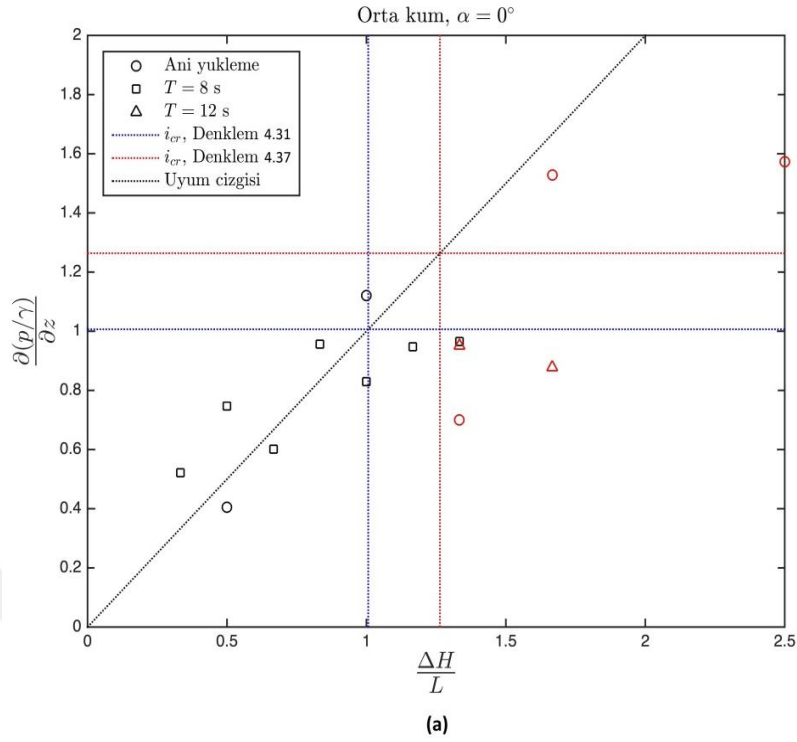


Şekil 5.19 : 1003 no’lu testte kayıt edilen hidrolik gradyan zaman serileri. Maksimum (en büyük) basınç gradyanına $t= 33.0$ sn. ulaşılmıştır.

Bu sonuçlardan görülebileceği üzere, malzemenin borulanma dayanımını belirleyen etmen **önemli ölçüde dane dağılımıdır**. Malzeme çakıl olarak kullanıldığında, hidrolik iletkenliği sayesinde yüksek basınç gradyanlarında dahi borulanma gerçekleşmemektedir. Ancak silt mertebesinde ince tanelerin yer aldığı geniş granülometreli ince kum malzeme kompozisyonu borulanmaya çok yatkın olduğundan deniz yapıları kullanımına uygun olmamaktadır. Yapılan deneylerde çakıl malzemesinin borulanmaya karşı direncinin orta kalınlıktaki kum malzemesine göre daha yüksek olduğu, ancak çok ince malzemelerin dane kompozisyonunda bulunması halinde bunun borulanma açısından olumsuz etkiler ortaya çıkaracağı görülmüştür.

5.5 Kararsız Borulanma Üzerinde Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

Uygulanan hidrolik gradyan ve zemin üzerinde yapılan deneylerle elde edilecek maruz kalınan hidrolik gradyanlar arasındaki ilişkiyi gözlemleyebilmek için her bir veri kümesi için değerler grafik üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.20, $\alpha=0^\circ$ ’li orta kum için ve $\alpha=0^\circ$ ’li siltli ince kumun değerlerini göstermektedir.



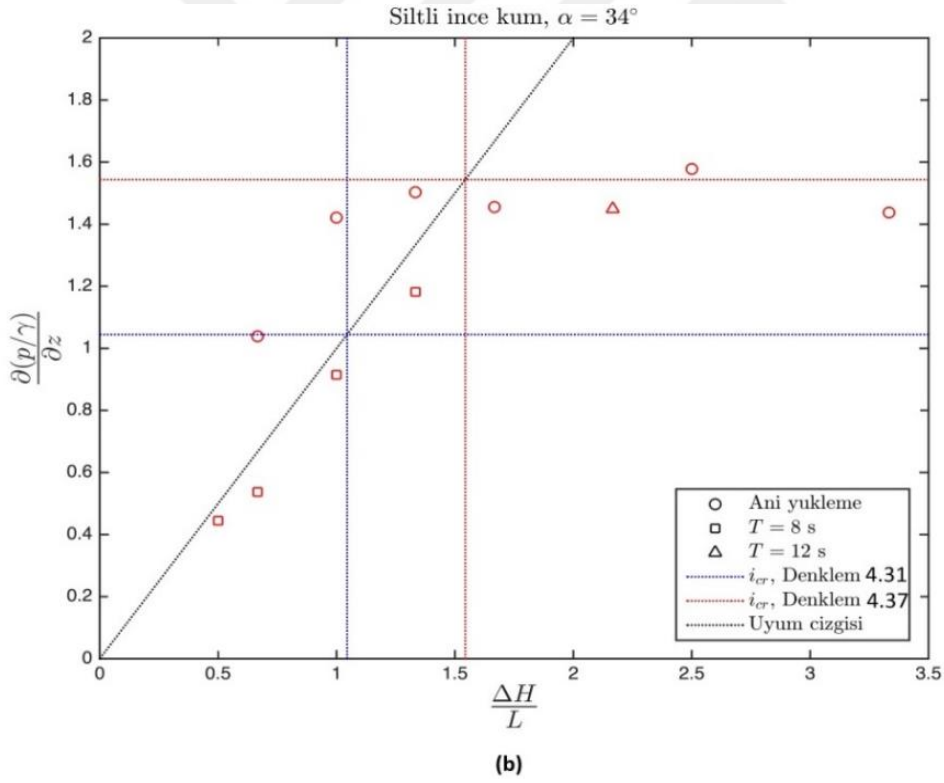
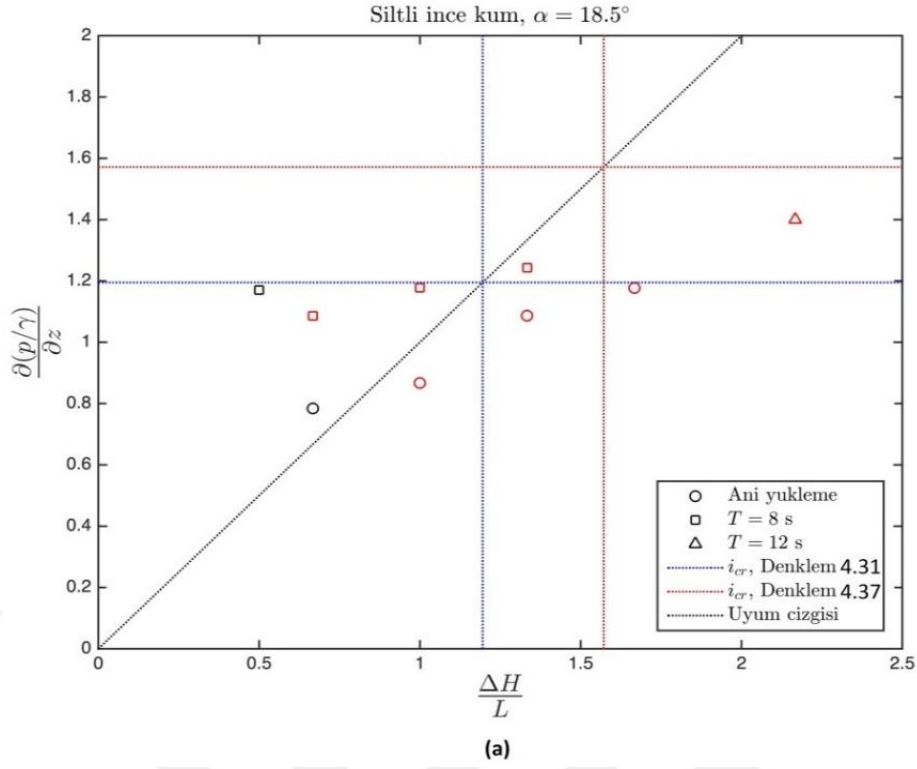
Şekil 5.20 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının ($i_{\max} = \frac{\partial(p/\gamma)}{\partial z}$) karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). **(a)** $\alpha = 0^\circ$ 'de orta kumda yapılan test **(b)** $\alpha = 0^\circ$ 'de siltli ince kumda yapılan test.

Bu şekiller üzerinde denklem 4.31 ve denklem 4.37'yle hesaplanmış (permanan) kararlı borulanma için kritik hidrolik gradyan değerleri her iki eksen de gösterilmiştir. Borulanma yaşanan veri noktaları kırmızı renkle gösterilmiştir. Şekil

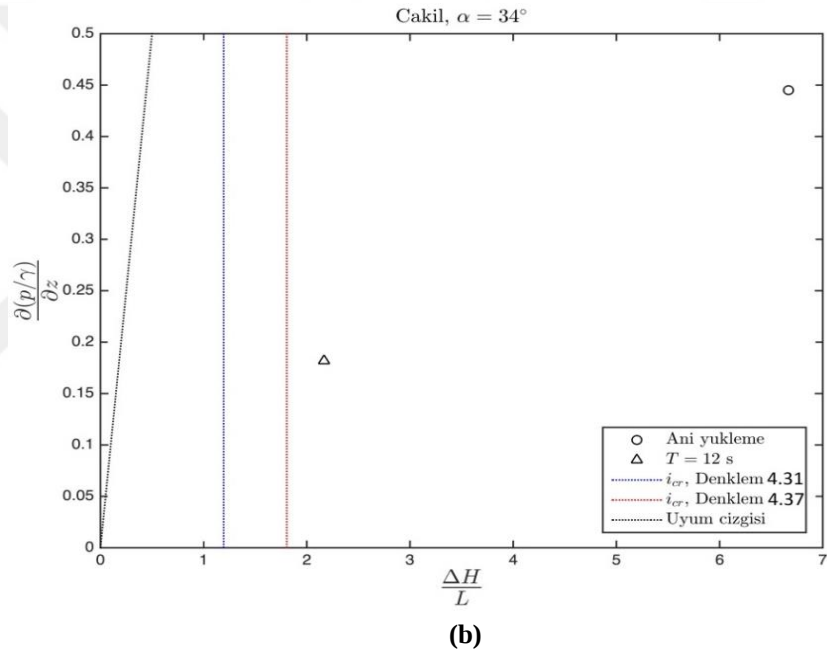
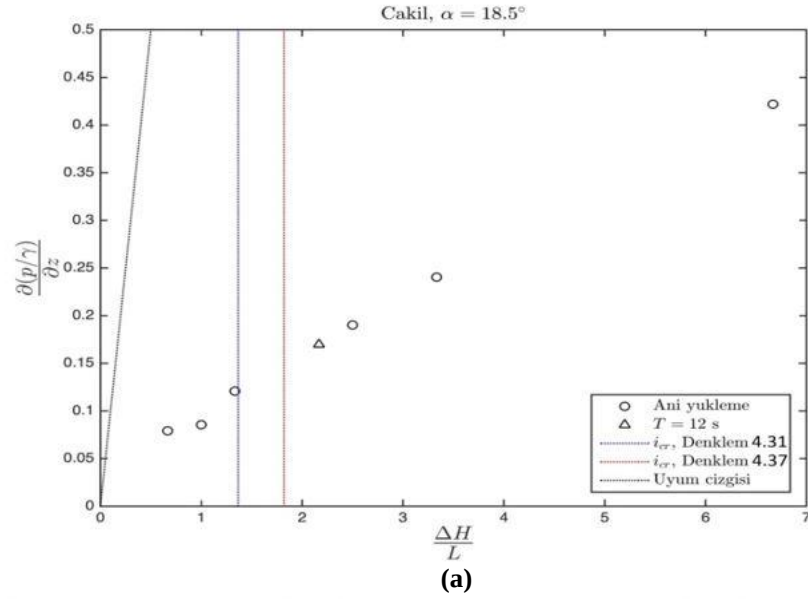
5.20a'da borulanma gözlemlenen deney numaraların denklem 4.37'yle hesaplanmış borulanma kriterlerine uygun olduğu görülmektedir. Yalnız şekil 5.20b'deki siltli ince kum için bu geçerli değildir. Genel davranış olarak, şekil 5.20'de görülen uyum çizgisine küçük değerlerin yakın olarak sıralandığı görülmektedir. Bir başka deyişle düşük hidrolik yüklerde maruz kalınan basınç gradyan değerlerinin uygulanan basınç gradyan değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Genel anlamıyla beklenildiği üzere teste tabi tutulmuş olan ince taneli zeminlerin kararsız borulanmaya daha yatkın olduğu ortaya çıkmıştır. Çünkü şekil 5.20b'deki zeminin hidrolik iletkenliği çok düşük olduğundan dolayı boşluk suyu, zemin taneleri arasından akımlanamadığından uygulanan basınç gradyanına kolay bir şekilde tepki veremiyor. Sonuç olarak, boşluk suyunun ataleti borulanmayı tetikliyor. Bu kararlı ve kararsız borulanma arasındaki ana farklardan biridir. Öyle ki kararsız durumlar altında atalet terimleri etkili olmaya başlıyor. Şekil 5.20a ve 5.20b'nin her ikisini de gözlemlediğimiz de ilginçtir ki ani (düşen) hidrolik yükleme ve salınımlı hidrolik yükleme arasında zeminlere olan etkisi bakımından çokta farklı görünmemektedir.

Şekil 5.21'de siltli ince kumda eğim açısı $\alpha = 18.5$ ve 34° üzerinde yapılan kararsız borulanma testi görülmektedir. Görüleceği üzere yatay zemin üzerinde ($\alpha=0$) davranış ile genel olarak şekil 5.20'nin benzer olduğu görülebilir. Şekil 5.20b, 5.21a ve 5.21b karşılaştırılınca yüzey eğimi arttıkça zeminin borulanmaya karşı daha yatkın olduğu görülebilir. Zemin yüzeyinin eğimi arttırıldığında borulanmaya karşı direnç gösteren zeminin ağırlığı azalmaktadır. Şekil 5.21'de verilen $\alpha=34^\circ$ durumunda hidrolik gradyan değeri 0.5'den bile küçük olduğunda zeminin borulanmaya maruz kaldığı görülmektedir.

Sırayla eğim açıları $\alpha = 0$ ve $\alpha = 18.5$ için şekil 5.22a ve şekil 5.22b'de çakıl malzeme için elde edilen veriler görülmektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere çok yüksek hidrolik iletkenliğe sahip çakıl malzemede borulanmanın mümkün olmayacağı görülmektedir. Şekil 5.22b'de görüleceği üzere ani hidrolik yüklemelerin ve salınımlı yüklemelerin zemin üzerinde aynı etkiyi yaptığını bir kez daha söylenebilir.



Şekil 5.21 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). (a) $\alpha = 18.5^\circ$ 'siltli ince kum (b) $\alpha = 34^\circ$ 'de siltli ince kum.



Şekil 5.22 : Uygulanan basınç gradyanı ($\Delta H/L$) ile maruz kalınan en büyük basınç gradyanının karşılaştırılması. (Borulanmaya karşı gelen veri noktaları kırmızı ile işaretlenmiştir). (a) $\alpha = 18.5^\circ$ 'de çakıl malzemesi , (b) $\alpha = 34^\circ$ 'de çakıl malzemesi.

Şekil 5.22b'de zemin yüzeyine eğim kazandırılınca zeminde ulaşılan en büyük hidrolik gradyan değeri şekil 5.22a'yla karşılaştırılınca neredeyse iki kat büyüklüğündedir. $\alpha = 34^\circ$ için çakıl zemini için iki veri noktası bulunmaktadır. $\alpha = 34^\circ$ için zeminde maruz kalınan basınç gradyanı incelendiğinde yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı $\alpha = 18.5^\circ$ 'ye göre az bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür.



6. SONUÇ VE PRATİK UYGULAMALARA YÖNELİK GÖRÜŞLER

Kararlı ve kararsız hidrolik gradyan altında borulanma mekanizmasının incelendiği bu tez çalışmasında, ilk olarak kararlı akım altında borulanmaya karşı kritik hidrolik gradyanın belirlenebilmesi amacıyla eğimli yüzeye sahip granüler zeminler için sürtünme etkilerini de içerecek şekilde kuvvet dengesi denkleminde dayalı bir fiziksel kriter türetilmiştir. Bu kriter hem filtre tabakası olmayan, hem granüler bir filtre tabakası tarafından korunan eğik yüzeyli zeminler için ayrı ayrı formüle edilmiş, ve işlerliği literatürdeki mevcut verilerle doğrulanmıştır. İkinci olarak, özellikle kıyı ve deniz yapıları açısından önem arz eden kararsız hidrolik gradyan altındaki borulanma mekanizmasının anlaşılabilmesi için bir grup deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kararsız hidrolik gradyan iki farklı şekilde (ani etkiyen ve salınımlı basınç gradyanı olarak) incelenmiştir. Bu bölümde elde edilen başlıca sonuçlar özetlenmekte ve pratik uygulamalarda ne şekilde kullanılabileceği yorumlanmaktadır.

Çalışmanın bulguları değerlendirildiğinde, kararlı (permanan) hidrolik gradyan ve kararsız (permanan olmayan) hidrolik gradyan altındaki zeminin borulanma davranışının birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Kararlı hidrolik gradyan olması halinde (uygulanan hidrolik gradyan zamanla değişmez ya da çok yavaş değişir) atalet terimleri mevcut değildir. Kararsız hidrolik yüklemde boşluk suyu ivmelenmeye maruz kalır. Bundan dolayı zeminin hidrolik iletkenliği (drenaj durumu), boşluk sularının basınç gradyanına ne kadar hızlı sürede tepki verebileceği hususundan dolayı çok önem arz etmektedir. Kararsız hidrolik gradyan durumunda basit kuvvet-denge yaklaşımı doğru borulanma kriterinin ortaya çıkması için yeterli olmayabilir. Boşluklu ortam akış denklemlerinin genel çözümünde atalet terimlerinin dahil edilmesi gerekmektedir. Bunun yanında kararsız hidrolik gradyan altında zemini kararlı duruma göre borulanmaya daha yatkın hale getirecek mekanizmalardan biri de kemerleşme ve tıkanma bölgeleri gibi zemindeki ikincil dayanım etkilerinin eksikliğidir. Borulanmaya karşı zemini koruyan granüler filtre tabakası olması durumunda ve filtre tabakası içine taban zemininin belirli

miktarlarda sızması halinde bu ikincil dayanım mekanizma etkili hale gelir. Diğer taraftan kararsız hidrolik gradyan (aniden artış) uygulanırsa, zeminin yerleşmesine fırsat vermeyeceği için borulanma meydana gelmeden önce bu şekildeki ikincil dayanım mekanizmasının gelişimi mümkün olmayabilir.

Pratik uygulamalarda borulanmaya karşı önlem olarak filtre tabakasının doğru biçimde tasarlanması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre filtre tabakası için tasarım gereklilikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Filtre malzemesinin tane dağılım oranının taban malzemesine göre oranlarının denklem 4.23, denklem 4.24 ve denklem 4.25'te verilen Terzaghi filtre kriterlerine uyumlu olması şarttır. Bu kriterler uygulandığında ince malzemeler, filtre malzemesinin arasındaki boşluklardan kaçamayacağı gibi boşluk suyu filtredeki tanelerin arasından kolayca boşalacağından basınç kolayca dağılabilecektir.
- Özellikle kararsız hidrolik gradyan durumunda hidrolik iletkenliğin çok önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Özellikle kıyı yapıları için, tabanda düşük hidrolik iletkenliğe sahip zeminlerin seçiminden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.
- Filtre tabakası kalınlığının seçiminin arz ettiği öneme binaen, bölüm 4'te borulanmanın meydana gelmemesi için gerekli sürtünme kuvvetini oluşturabilecek minimum boyutsuz filtre tabaka kalınlığının türetilmesi için bir yöntem formüle edilmiş ve bu yöntem kullanılarak yapılan parametrik çalışmanın bulguları incelenmiştir. Bu amaçla itici kuvvetler (hidrolik gradyan kuvveti) ve direnç kuvvetleri (öz ağırlık ve sürtünme) filtre tabakası altındaki zemin parçası üzerinde formüle edilmiş ve denklem 4.46'da verilen borulanma açısından kritik hidrolik eğim kriterine ulaşılmıştır. Bu kriter kullanılarak minimum filtre tabakası kalınlığı (B_f) belirlenebilmektedir. Minimum filtre tabaka kalınlığına birçok parametrenin etkisi (eğim, içsel sürtünme açısı, porozite vb.) olduğu görülmektedir. Geliştirilen formülasyondaki diğer bir parametre olan "borulanmaya maruz zemin parçasının kalınlığı" (Δz), belirsizlikleri bertaraf etmek ve güvenli tarafta kalmak için sıfır alınabilir. Çözüm için gerekli olan aktif yanal toprak basınç

kat sayısı (K_a) ve filtre boşluk boyutu (D_p) da sırasıyla denklem 4.38 ve 4.43 kullanılarak bulunabilir.

- Denklem 4.40'ta sunulan Alcerreca-Huerta ve Oumeraci (2018)'nin verdiği tüm zemin kolonunun toptan sökülmesi için kriter, denklem 4.45'te verilen botrulanma kriteri ile karşılaştırıldığında denklem 4.45'in göçme açısında daha kritik olacağı ortaya çıkmaktadır ($i_{cr} < (i_{cr})_{col}$).
- Filtre tabakası ile korunmayan zeminler için geliştirilen kuvvet-denge denklemi (Denklem 4.37), kararlı durumda borulanma için literatürde verilen kritik hidrolik eğim değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Bulgular, sürtünme kuvvetinin borulanmaya karşı dayanımı arttırdığını işaret etmektedir. Bununla beraber filtre tabakası ile korunmayan zeminlerde sürtünme kuvvetinin hesaplanmasında birçok belirsizlikler mevcuttur. Tasarım yapılırken sürtünme kuvvetlerinin hesaba katılmaması ile güvenli tarafta kalınacağı anlaşılmaktadır. Filtre tabakası kalınlığının sürtünmeye olan etkisi Denklem 4.39'da ifade edilmektedir.
- Kararsız yükleme durumunda atalet terimleri etkili olacağından, kararlı ve kararsız yüklemeler altındaki borulanma mekanizması birbirinden farklıdır. Genel ifadeyle kararsız hidrolik yükleme durumunda zeminin borulanmaya daha yatkın olduğu görülmüştür. Bu durum Tomlinson ve Vaid (2000) tarafından da gösterilmiştir.
- Deneysel bulgular incelendiğinde, salınlı hidrolik yüklerin periyotlarının sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ek olarak ani hidrolik yükleme durumu salınlı yükleme durumu ile karıştırıldığında, zeminin borulanması açısından önemli bir fark ortaya çıkmadığı görülmüştür.
- Kararsız hidrolik yükleme altında zeminlerin hidrolik iletkenliği borulanma hassasiyeti için çok önemlidir. Hidrolik iletkenliği düşük zeminlerin borulanmaya çok daha yatkın olduğu görülmektedir. Hidrolik iletkenlik daha yüksek değer almaya başladığında kararsız hidrolik yükleme altında borulanmaya karşı zemin daha dirençli bir hal almaktadır. Bu nedenle CIRIA'da (2006) da tavsiye edildiği gibi kıyı yapılarında düşük hidrolik iletkenliğe sahip zeminlerin kullanımından kesinlikle kaçınılmalıdır.

- Kıyı ve deniz yapılarının tasarımında, küresel iklim değışikliğı ile fırtınalarda görölecek sıklık ve büyüklük artışı ve paralelinde ortaya çıkacak basınç gradyanları göz önüne alınmalıdır. Fakat hala aydınlatılması gereken birçok belirsiz nokta bulunmaktadır. İlerideki çalışmalarda özellikle kararsız hidrolik yükleme durumları altında filtre tabakasının davranışının doğru belirlenebilmesi için deneysel çalışmalara ve/veya sayısal modellemelerin yapılması önem arz etmektedir. Bu çalışmalarda atalet terimleri ve zeminin elastisitesi gibi faktörler de göz önünde bulundurularak daha doğru yaklaşımlar ve tasarım yöntemleri elde edilebilecektir.



KAYNAKLAR

- Abdelhamid, Y., El Shamy, U.** (2015). Pore-scale modeling of fine-particle migration in granular filters. *Int. J. of Geomech.* 16(3), 04015086.
- Alcerreca-Huerta, J. C., Qumeraci, H.** (2018). Soil stability analysis for wave-induced momentary liquefaction beneath porous bonded revetments. *Coast. Eng.*, 138, 22-35.
- Bhattacharya, S.** (2014). *Challenges in Design of Foundations for Offshore Wind Turbines.*
- Burcharth, H.F. and Anderson, O.H.** (1995). On the one-dimensional steady and unsteady prous flow equations. *Coastal Engineering*, vol. 24.
- Carman, P.C.** (1937). Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Eng*, 15.
- Chang, K.T. Jeng, D.S.** (2014). Numerical study for wave-induced seabed response around offshore wind türbine foundation in donghai offshore wind farm. *Shanghai, China. Ocean Engineering.*
- Chiew, Y.-M.** (1990). Mechanics of local scour around submarine pipeline J. *Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 116.
- Chiew, Y.M. and Lim, F.-H.** (2000). Failure behaviour of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions. *Journal of Hyd. Eng. ASCE*, vol. 126, No. 1.
- Ciria, Cur, Cetmef.** (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd edition) C683, CIRIA, London
- Darcy, H.** (1856). *Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris.*
- de Graauw, A.F., van der Meulen, T., van der Does de Bye, M.R.** (1984). Granular filters: Design criteria. *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocean Eng. ASCE* 1984, 110(1),80-96.
- El Shamy, U., Aydin, F.** (2008). Multiscale modeling of flood-induced piping in river levees. *J. of Geotech. and Geoenv. Eng.* 134(9), 1385-1398.
- Elibuyuk U. ve Ucgul, İ.** (2014). Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Yekarum e-Dergi*,

- Engelund, F.A.** (1953). On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. *Danish Academy of Technical Sciences*.
- Fair, G., Hatch, L. P., Hudson, H.E.** (1933). Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand [with discussion]. *American Water Works Assoc.* 25(11), 1551-1565.
- Fleshmasn, M., Rice, J.** (2014). Laboratory modeling of the mechanisms of piping erosion initiation. *J. Geotech, Geoenviron. Eng.* 2014, 04014017, 10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0001106.
- Gedik, N.** (2004). *Uzun dalgaların tırmanma yüksekliğinin deneysel incelenmesi* (Doktora Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir
- Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Swicki, A., and Teh, T.C.** (2006). Physics of liquefaction phenomena around marine structures. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*.
- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J.** (1997). *Scour Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Honjo, Y., Veneziano, D.** (1989). Improved filter criterion for cohesionless soils. *J. of Geotech. Eng. ASCE* 1989, 115(1), 75-94.
- Jacobson, T.** (2013). An Analysis of Soil Properties on Predicting Critical Hydraulic Gradients for Piping Progression in Sandy Soils. *MSc Thesis, Utah State University, USA*, 12/12/2013.
- Jeng, D-S.** (2013). *Porous models for wave-seabed interactions*. Springer.
- Jensen, B., Christensen, E.D., Sumer, B.M.** (2014). *Pressure-induced forces and shear stresses on rubble mound breakwater armour layers in regular waves*. Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark.
- Kirca, V.S.O., Caglar, B., Bagci, T., Kilci, E., Kabdasli, M.S.** (2017). Use of steel slag in rubble-mound marina structures, in *proc. of 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17)*, Karabuk, Turkey, 3-5 April 2017; Karabuk University, 2017, 307-313.
- Kirca, V.S.O.** (2013). Sinking of irregular shape blocks into marine seabed under wave-induced liquefaction. *Coastal Engineering*, 75.
- Kirca, V.S.O., Sumer, B.M., Fredsoe, J.** (2013a). Residual liquefaction of seabed under standing waves. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*

- Kirca, V.S.O., Sumer, B.M., Fredsoe, J.** (2013b). Influence of clay content on wave-induced liquefaction. *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Kirca, V.S.O., Ulker, M.B.C.** (2014). Recent developments on wave-induced liquefaction of marine seabed. *Ace 2014 International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul*.
- Kirca, V.S.O., Kilci, E.** (2018). Mechanism of steady unsteady piping in coastal and hydraulic structures with a sloped face. *Water*, 2018, 10, 1757.
- Kilci, E., Kirca, V.S.O.** (2018). A Modified Piping Criterion for Determination of Effective Filter Thickness under Revetment Slopes *13th International Congress on Advances in Civil Engineering 12-14 September 2018, İzmir/Turkey*
- Klomp, W.H.G., Tonda, P.L.** (1995). Pipeline cover stability. In: *Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. II, The Hague, The Netherlands 11-16 June 1995*.
- Ko, D., Kang, J.** (2018). Experimental Studies on the Stability Assessment of a Levee Using Reinforced Soil Based on a Biopolymer. *Water* 2018, 10(8), 1059.
- Kocaturk, S. A. ve Unsan, Y.** (2015). Rüzgar Enerji Santrallerinin Tarihsel Gelişimi ve Açık Deniz Rüzgar Enerji Santrallerinin Tarihsel Gelişimi. *GIBD-Dergi*
- Kramer, S.L.** (1996). Geotechnical earthquake engineering. *Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey*.
- Malhotra S.** (2007). Selection, Design and Construction Guidelines for Offshore Wind Turbine Foundations.
- Malhotra S.** (2007c). Design And Construction Considerations For Offshore Wind Turbine Foundations In North America.
- Mao, Y.** (1986). The interaction between a pipeline and an erodible bed. *Series Paper 39, Tech. Univ. Of Denmark, ISVA*, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Ph.D.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E.** (2000). Bridge Scour. *Water Resources Publications, LLC, CO, USA*.
- Nielsen, A.W.** (2011). Scour protection of offshore wind farms. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Section of Coastal, Maritime and Structural Engineering.

- Nielsen, A. W., Probst, T., Petersen, T. U., and Sumer, B. M.** (2015). Sinking of armour layer around a vertical cylinder exposed to waves and current. *Coastal Engineering*, 100, 58-66.
- Nielsen, A.W., Sumer, B.M., Fredsoe, J. and Christensen, E.D.** (2011). Sinking of armour layer around a cylinder exposed to a current. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Maritime Engineering, vol. 1.
- Ojha, C.S.P., Singh, V.P., Adrian, D.H.** (2003). Determination of Critical Head in Soil Piping. *J. Hydraul. Eng.* 2003, 129,511-518.
- Okita, Y., Nikigaki, M.** (1992). Filtration processes observed with g-ray density meter, In Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Ed. J. Brauns, M. Heibaum, and U. Schuler, Karlsruhe, Germany, October 1992, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Ozaydin, K.** (2007). Zeminlerde sıvılaşma. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul*,231–255, 16-20 Ekim.
- Richards, K.S., Reddy, K.R.** (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bullet. of Eng. Geo. and the Env.* 2007, 66(4), 381-402.
- Sassa, S., and Sekiguchi, H.** (1999). Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*.
- Sawicki, A., Kulczykowski, M.** (2013). An effect of shaking frequency on Dynamics of a sandy layer. *Archieves of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*.
- Sawicki, A., Kulczykowski, M., Jankowski, M.** (2012). Estimation of stresses in a sandy layertested on shaking table. *Archieves of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*.
- Sawicki, A., Swidzinski, W., Kulczykowski, M.,** (2012). Shaking table Dynamics of a dry sand layer. 2. *International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, May 28-30 2012, Taormina, Italy.
- Seed, HB., and Rahman, MS.** (1978). Wave-induced pore pressure in relation to ocean floor stability of cohesionless soil, *Mar Geotech*, Vol 3 , No 2.
- Selcuk, M.E., Ozaydin, K., Berilgen, M.** (2012). Sıvılaşabilen tabakalar üzerine inşa edilen dalgakıranların depremler sonrasındaki davranışı. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 30.
- Sumer, B. M.** (2008). Coastal And Offshore Scour / Erosion Issues – Recent Advances. *Fourth International Conference on Scour and Erosion*.
- Sumer, B.M. and Fredsoe, J.** (1994). Self-burial of pipelines at span shoulders. *International J. Offshore and Polar Engineering*, vol. 4, No.1.

- Sumer, B.M.** (2014). *Liquefaction Around Marine Structures*. World Scientific, London
- Sumer, B.M., Sen, B.M., Karagali, I., Ceren, B., Fredsoe, J., Sottile, M., Zillioli, L. AND Fuhrman, D.R.** (2011). Flow and sediment transport induced by a plunging solitary wave. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, 2011.
- Sumer, B.M., Guner, H. A. A., Hansen, N. M., Fuhrman, D.R. and Fredsoe, J. K.** (2013). Laboratory observations of flow and sediment transport induced by plunging regular waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 118, 1-22, 2013.
- Sumer, B.M., and Nielsen, A.W.** (2013). Sinking failure of scour protection at wind turbine foundation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 166.
- Sumer, B.M., Cokgor, S., Fredsoe, J.** (2001). Suction Removal of Sediment from Between Armor Blocks. *Journal of Hydr. Eng. ASCE*, vol. 127, No 4.
- Sumer, B.M., Diken, F.H., Fredsoe, J.** (2010). Cover Stones on liquefiable soil bed under waves. *Coastal Engineering* 57.
- Sumer, B.M., Diken, F.H., Fredsoe, J.** (2011). Stability of submerged rock berms exposed to motion of liquefied soil in waves. *Ocean Engineering* 38.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J.** (1991). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. *International J. Offshore and Polar Engineering*, vol. 1, No. 3.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J., Christensen, S., Lind, M.T.** (1999). Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves. *Coastal Engineering* 38.
- Sumer, B.M., Hatioğlu, F., Fredsoe, J.** (2006a). The sequence of sediment behaviour during wave-induced liquefaction. *Sedimentology* 53.
- Sumer, B.M., Hatipoğlu, F.H., Fredsoe, J., Hansen, N.-E.O.** (2006b). "Critical floatation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Sumer, B.M., Jensen, B.L. and Fredsoe, J.** (1991). Effect of a plane boundary on oscillatory flow around a circular cylinder. *J.Fluid Mechanics*, vol. 225.
- Sumer, B.M., Kirca, V.S.O., Fredsoe, J.** (2012). Experimental validation of a mathematical model for seabed liquefaction under waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*.

- Sumer, B.M., Truelsen, C., Sichmann, T. and Fredsoe, J.** (2001a). Onset of scour below pipelines and selfburial. *Coastal Engineering*, vol. 42.
- Sumer, B.M., ve Fredsoe, J.** (2002). The mechanics of scour in the marine environment. Advanced Series on Ocean Engineering *volume 17*.
- Sterpi, D.,** (2008). Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow. *Int. J. of Geomech.* 2008, 3(1), 111-122.
- Tao, J., Tao, H.** (2017). Factors affecting piping erosion resistance: Revisited with a numerical modeling approach, *Int. J. of Geomech.* 2017,17(11),04017097.
- Teh, T.C., Palmer, A.C., Bolton, M.D., Damgaard, J.S.** (2006). Stability of submarine pipelines on liquefied seabeds. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Tempel ve diğ.** (2010). Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines.
- Terzaghi, K. ve Peck, R.B.** (1948). *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons: New York, USA.
- Theodore, T. L.** (1972). Design Of Filter System For Rubble-Mound Structures, *13th International Conference on Coastal Engineering July 10-14 Vancouver, British Columbia, Canada*.
- Tomlinson, S.S., Vaid, Y.P.** (2000). Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion. *Can. Geotech. J.* 2000, 37, 1-13.
- Uno, T., Kamiya, K., Matsushima, T.** (1996). The relationship between particle size and void diameter. *In Proceedings of the Geofilters '96 Conference; Montreal, Canada, May 1996.* J. Lafleur, A.L. Rolling, Eds.; pp.67-74.
- Url-1** <[http:// wwindea.org](http://wwindea.org)>, date retrieved 01.12.2018.
- Url-2** <<http://www.windeurope.org>>, date retrieved 01.12.2018.
- Url-3** <<http://ewea.org> >, date retrieved 01.12.2018.
- Url-4** <[http:// www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr) >, date retrieved 01.12.2018.
- Wang, Y., Li, C., Zhou, X., Wei, X.** (2017a). Seepage Piping Evolution Characteristics in Bimsoils-An Experimental Study. *Water* 2017, 9(7), 458.
- Wang, Y., Li, C., Hu, Y., Xiao, Y.** (2017b). Optimization of Multiple Seepage Piping Parameters to Maximize the Critical Hydraulic Gradient in Bimsoils. *Water* 2017, 9(10), 787, 10.3390/w9100787.

Whitehouse R.J.S. (1998) *Scour at Marine Structures*, London: Thomas Telford.

Whitehouse, R.J.S. Dunn, S.I., Alderson, J.S., and Vun, P.L. (2004). Testing of the interaction of coastal windfarm foundations with the seabed: scour and liquefaction. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisbon, Portugal.

Ye, J., Jeng, D., Ren, W., Changqi, Z. (2014). Numerical simulation of wave-induced dynamic response of poro-elasto-plastic seabed foundation and composite breakwater. *Applied Mathematical Modelling*.

Zaaijer B.M. (2003). Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine.

Zhao, H.Y., Jeng, D.S. (2014). Two-dimensional model for accumulation of pore pressure in marine sediments. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.

Zhao, H.Y., Jeng, D.S., Guo, Z., Zhang, J.S. (2014). Two-dimensional model for pore pressure accumulations in the vicinity of a buried pipeline. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.

Zhou, X.L., Wang, J.H., Zhang, J., Jeng, D.S. (2014). Wave and current induced seabed response around a submarine pipeline in an anisotropic seabed. *Ocean Engineering*.



EKLER

EK A: Orta kalınlıkta kum kullanılarak yapılan borulanma deneyleri.

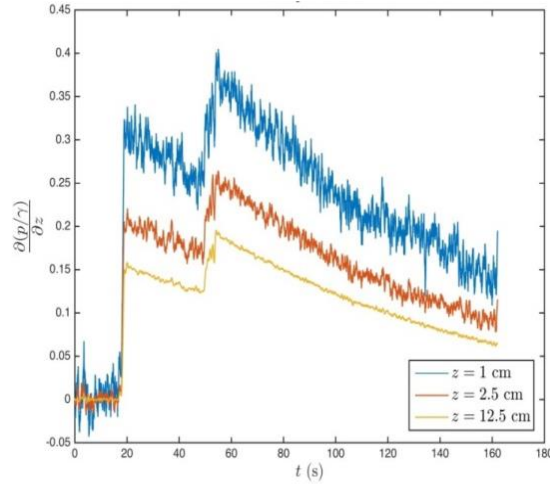
EK B: akıl malzemenin borulanma deneyleri.

EK C: İnce kum malzemelerinin borulanma deneyleri.

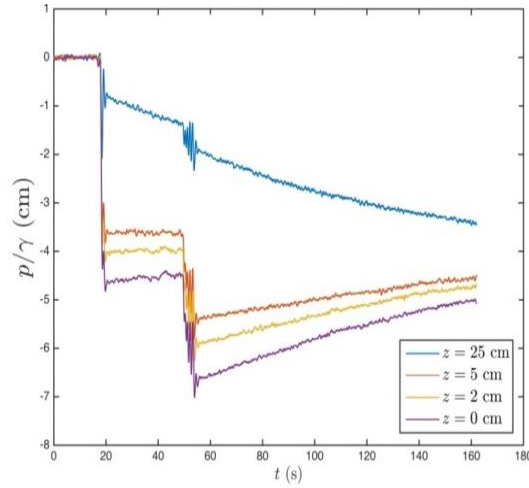


EK A**Çizelge A.1 : Orta kalınlıkta kum kullanılarak yapılan borulanma deneyleri.**

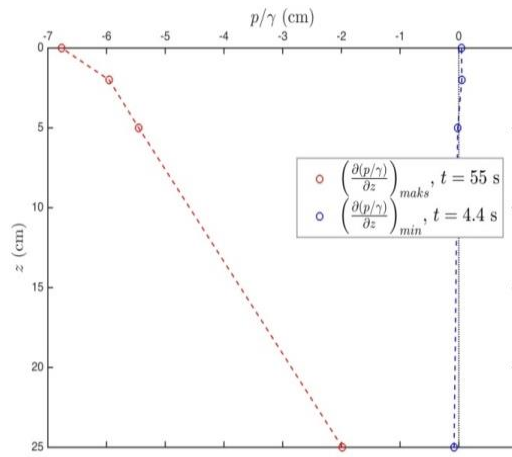
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)
101	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.15	----
102	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----
103	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----
104	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----
105	Orta Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----
201	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.10	8
202	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.15	8
203	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.20	8
204	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.25	8
205	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.30	8
206	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.35	8
207	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	8
208	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	12
209	Orta Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	12



(a)



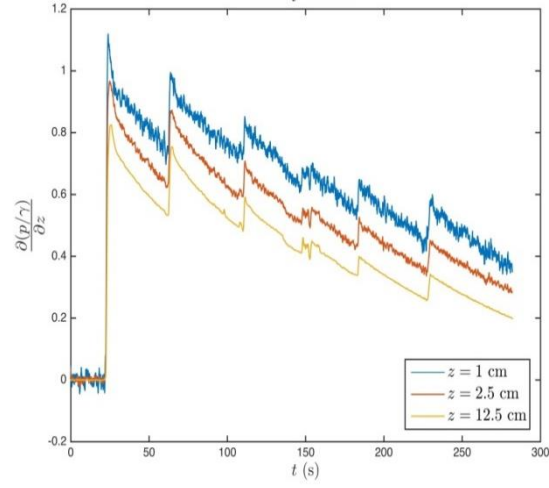
(b)



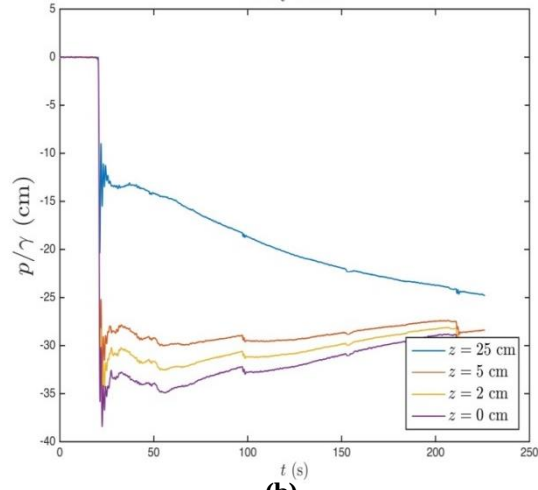
(c)

Şekil A.1 : Deney No: 101, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,15, borulanma yok.

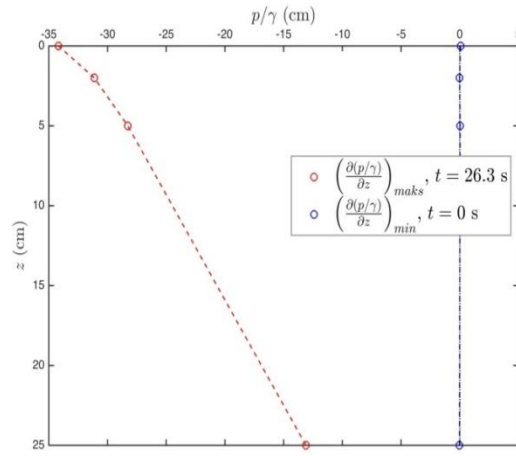
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



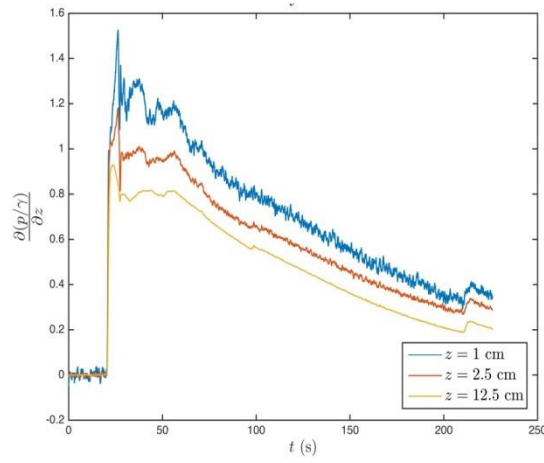
(b)



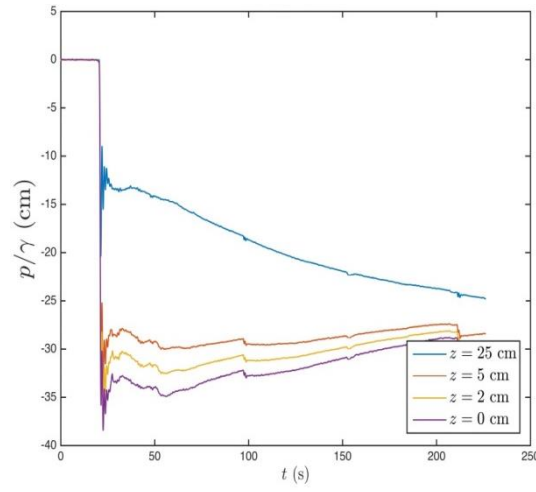
(c)

Şekil A.2 : Deney No: 102, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,30, borulanma yok.

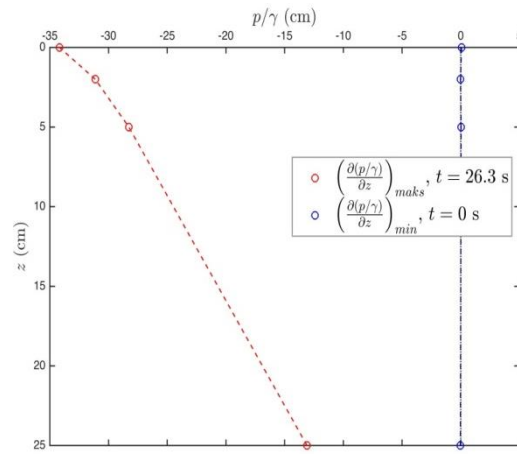
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



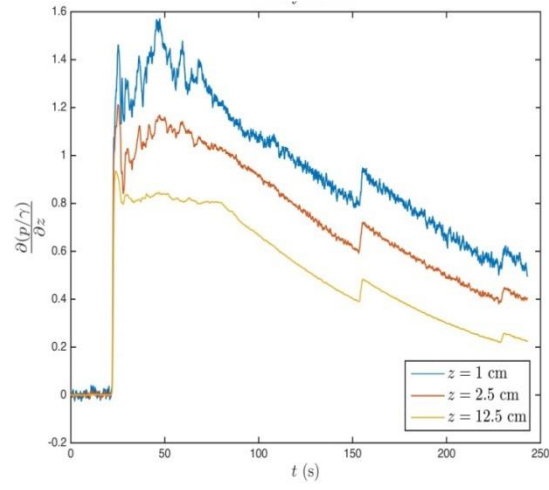
(b)



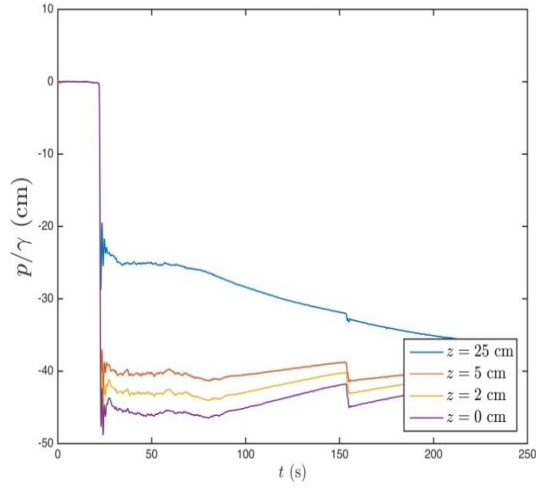
(c)

Şekil A.3 : Deney No: 103, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,50, **borulanma var.**

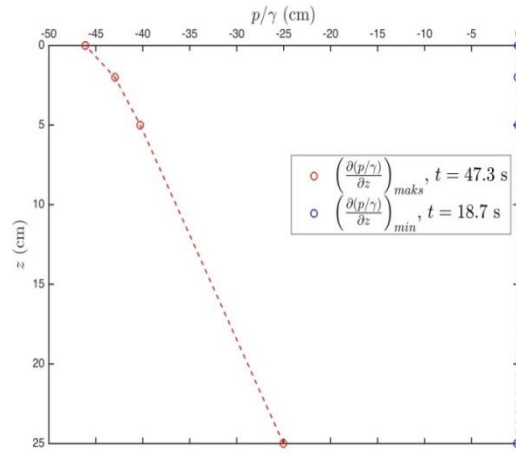
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

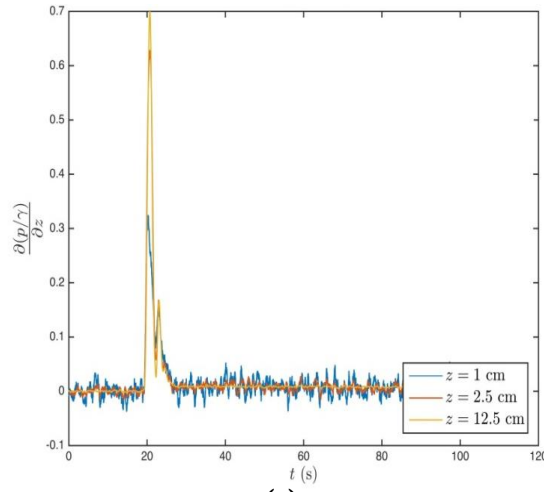


(c)

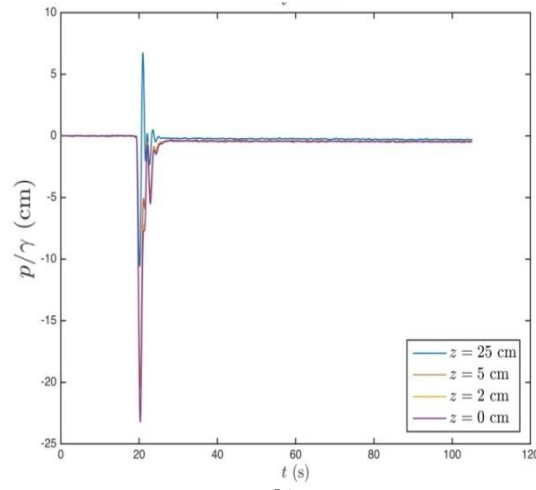
Şekil A.4 : Deney No: 104, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,75, **borulanma var.**

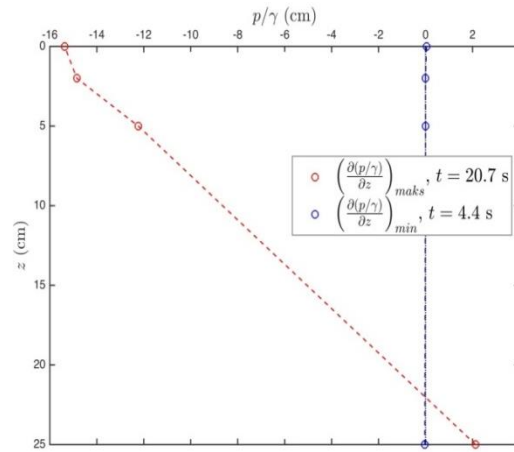
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



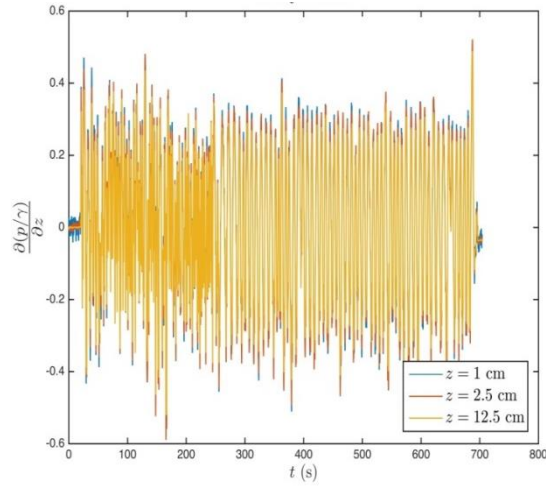
(b)



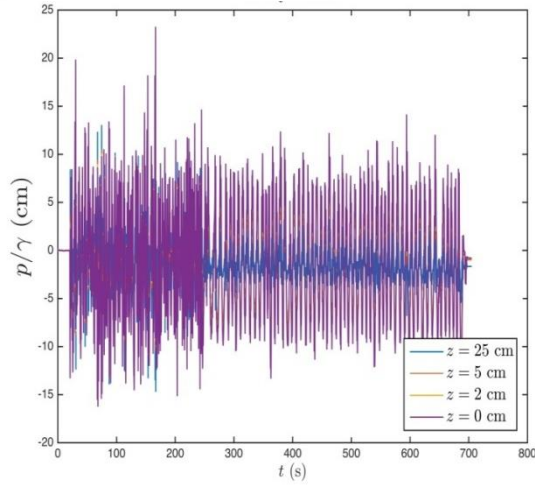
(c)

Şekil A.5 : Deney No: 105, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,40, **borulanma var**.

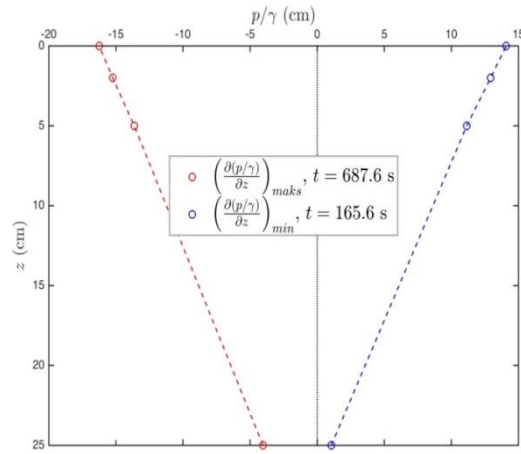
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

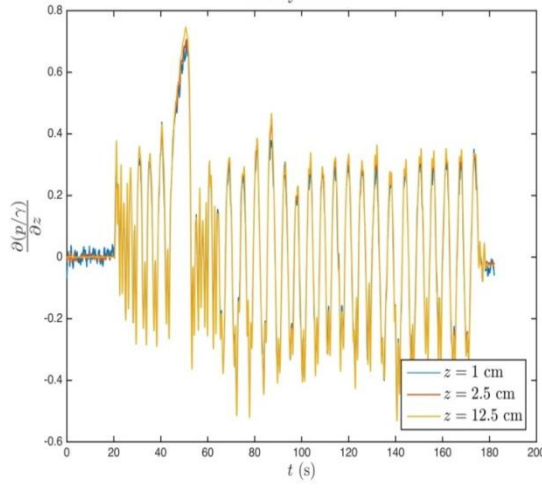


(c)

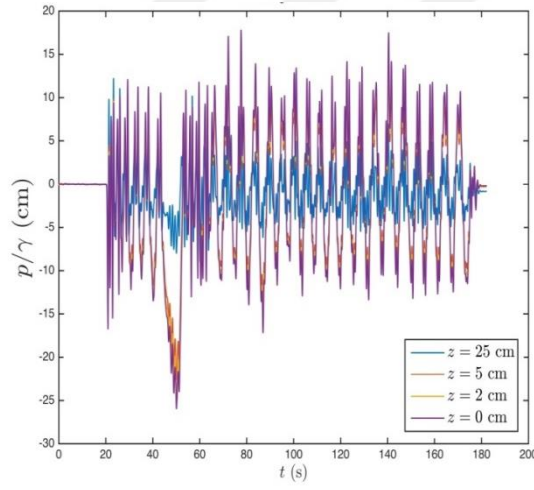
Şekil A.6 : Deney No: 201, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,10, $T(s) = 8$, borulanma yok.

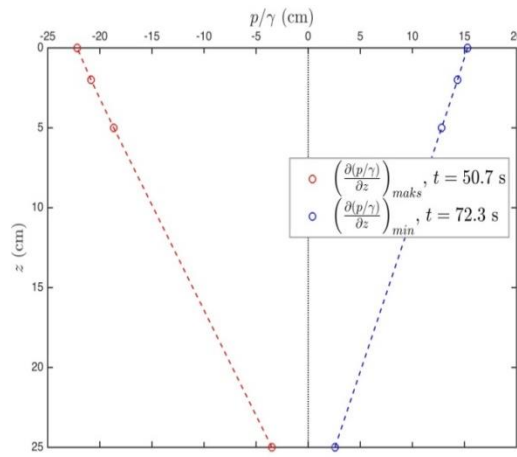
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

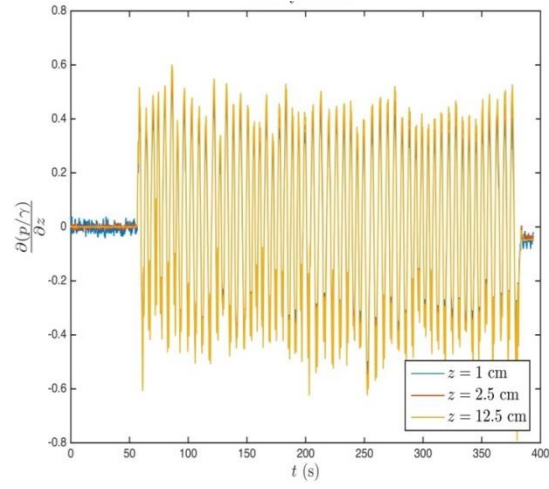


(c)

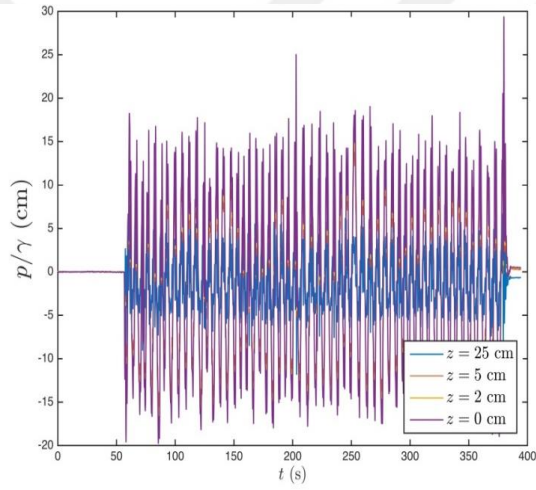
Şekil A.7 : Deney No: 202, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,15, $T(s) = 8$, borulanma yok.

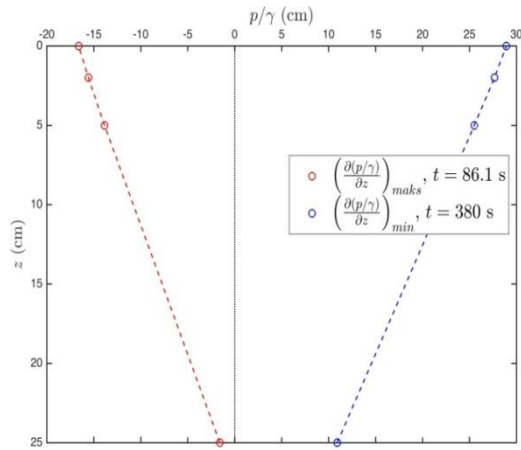
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

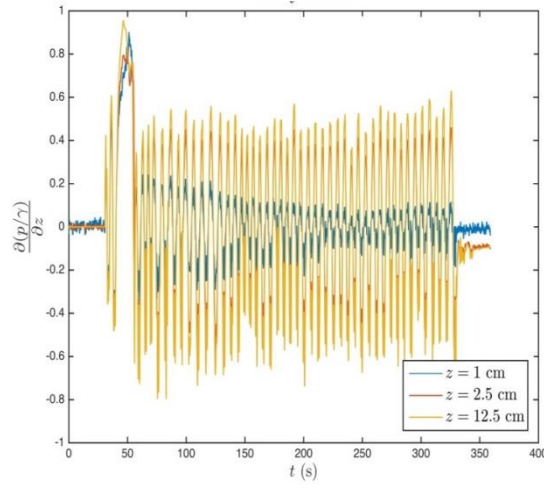


(c)

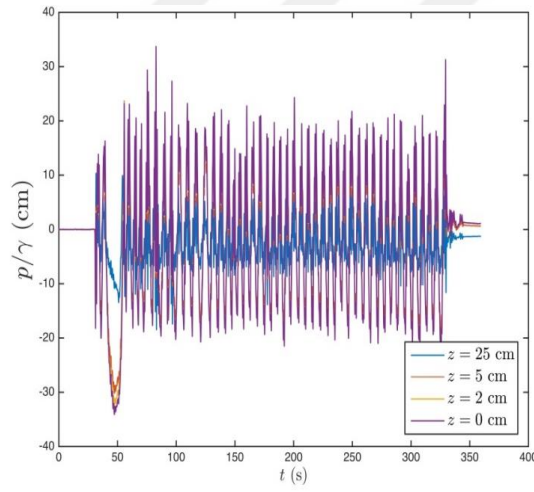
Şekil A.8 : Deney No: 203, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,20, $T(s) = 8$, borulanma yok.

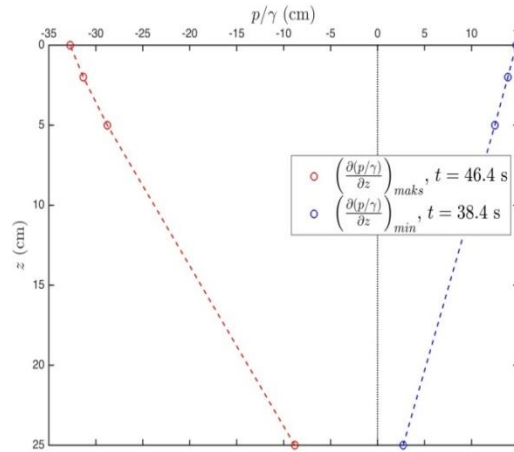
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

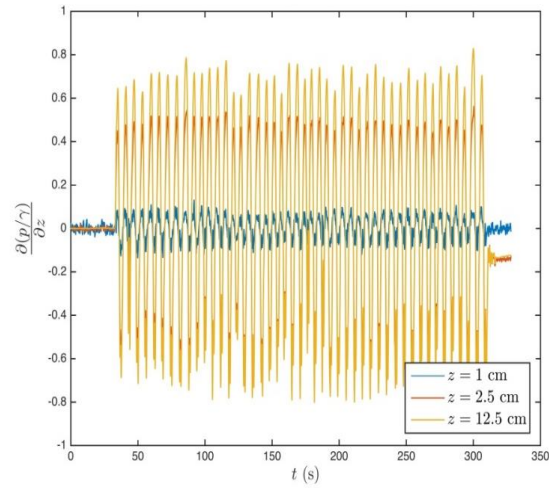


(c)

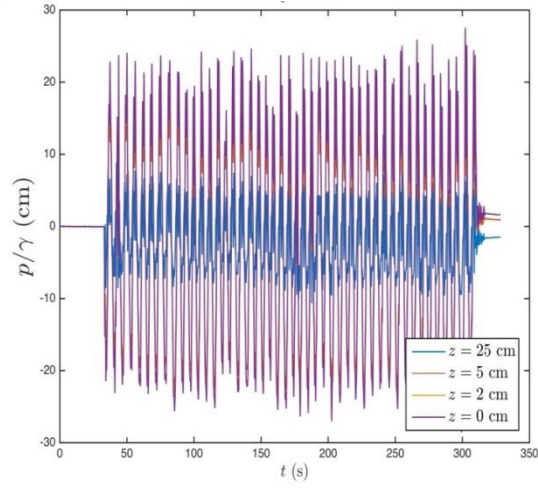
Şekil A.9 : Deney No: 204, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,25, $T(s) = 8$, borulanma yok.

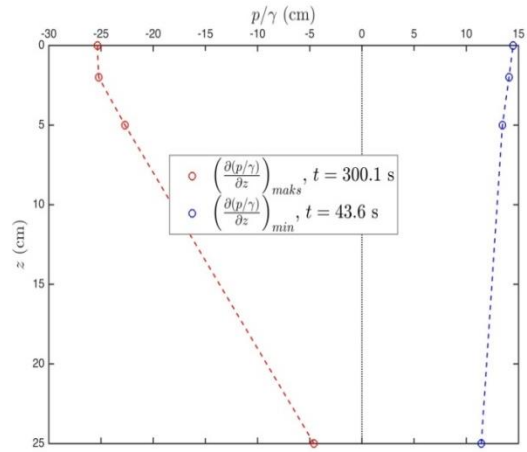
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

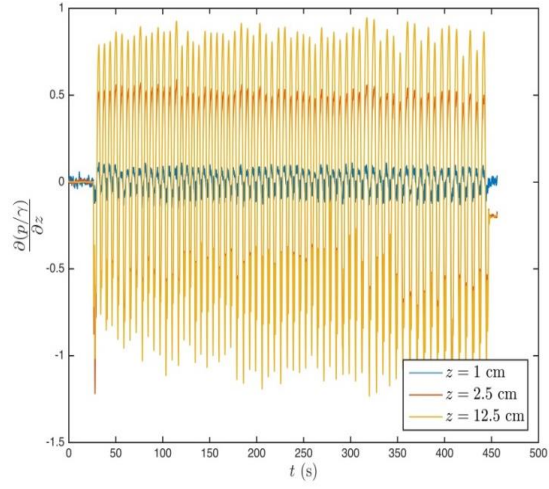


(c)

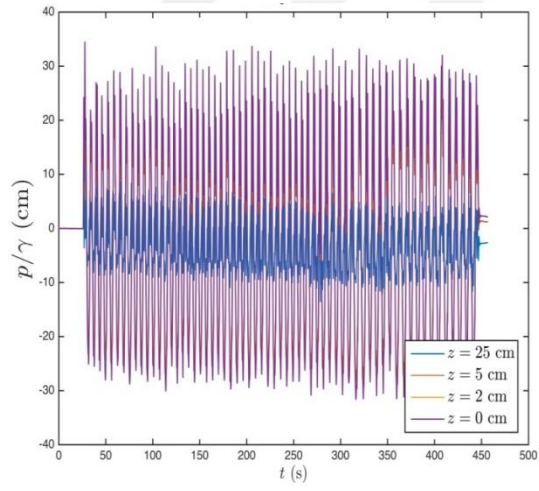
Şekil A.10 : Deney No: 205, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,30, $T(s) = 8$, borulanma yok.

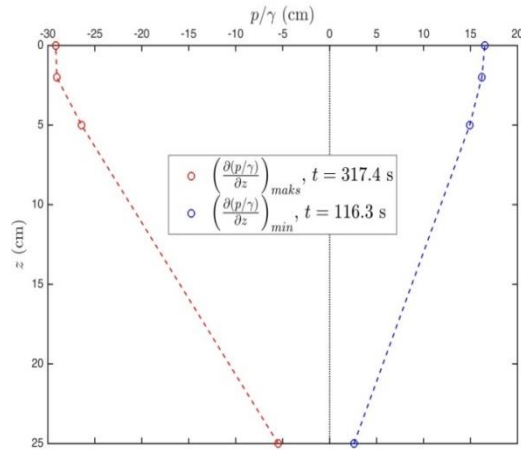
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

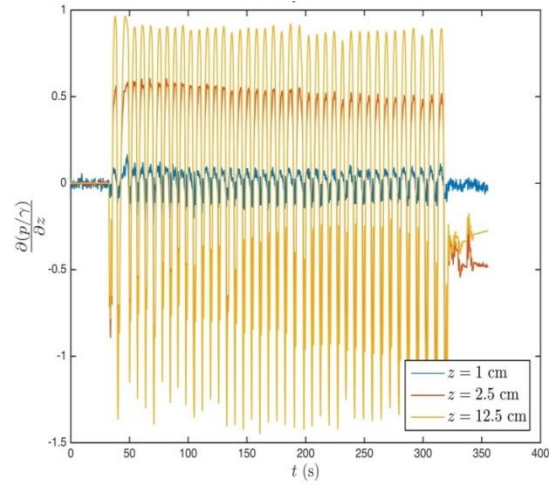


(c)

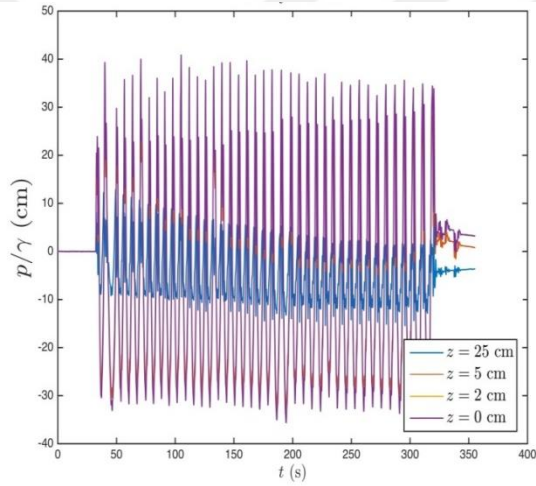
Şekil A.11 : Deney No: 206, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,35, $T(s) = 8$, borulanma yok.

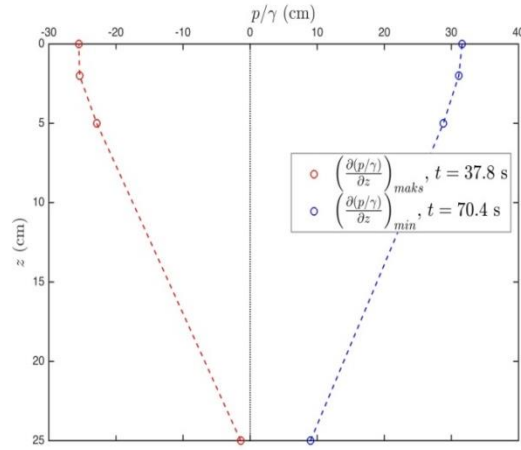
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

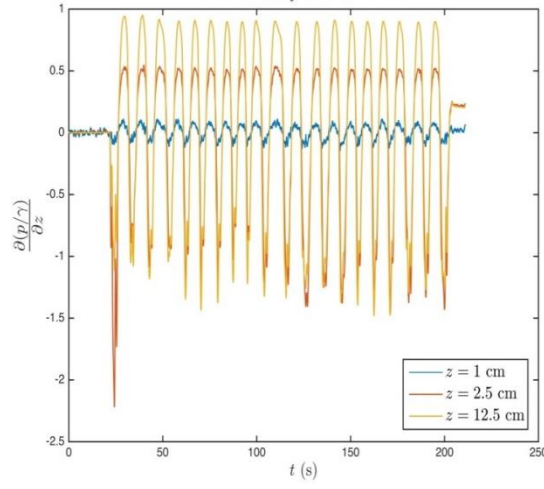


(c)

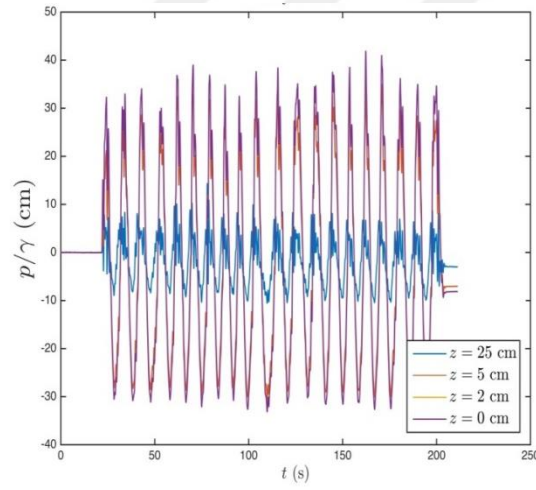
Şekil A.12 : Deney No: 207, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,40, $T(s) = 8$, borulanma yok.

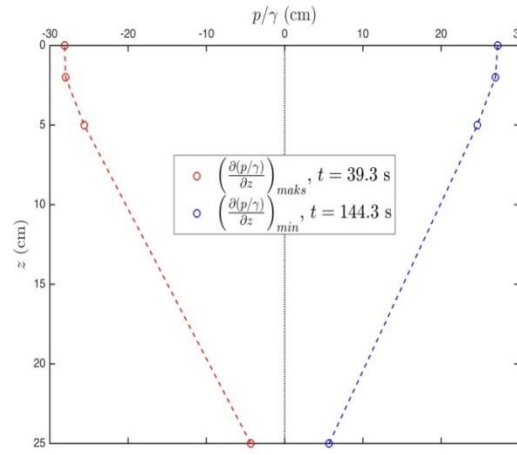
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

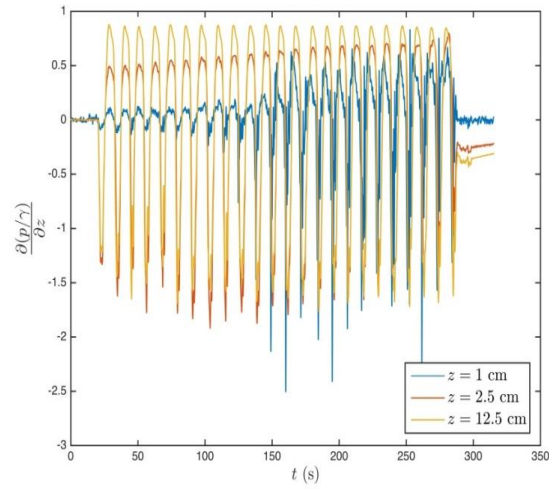


(c)

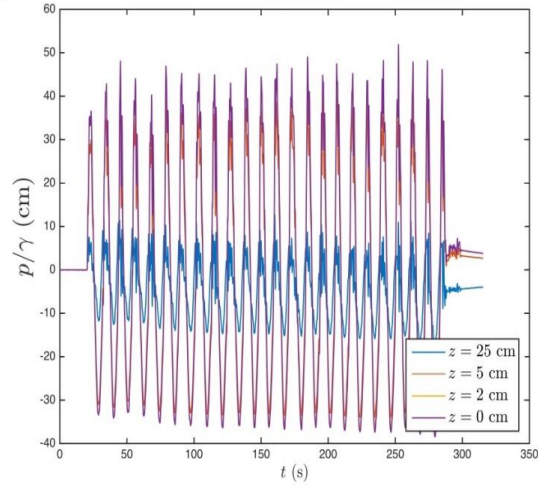
Şekil A.13 : Deney No: 208, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,40, $T(s) = 12$, borulanma yok.

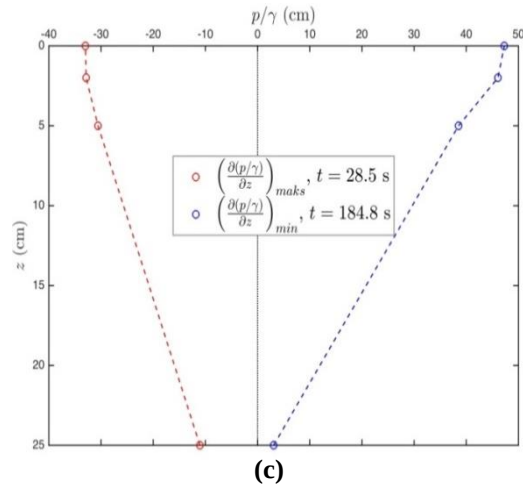
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)



(c)

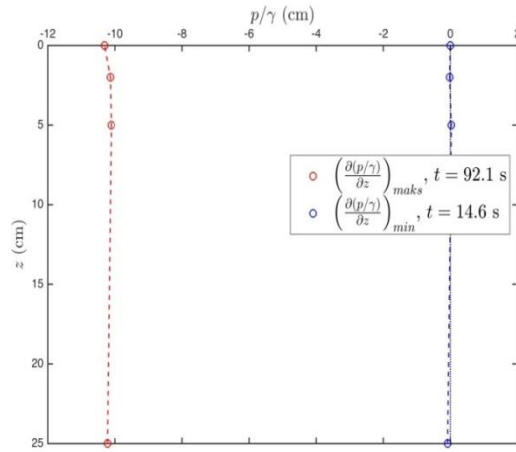
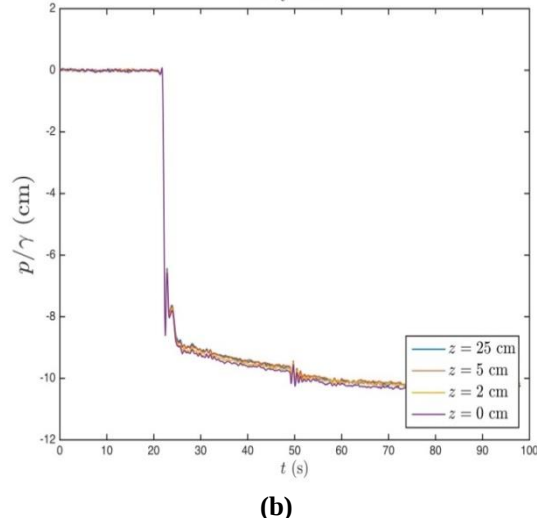
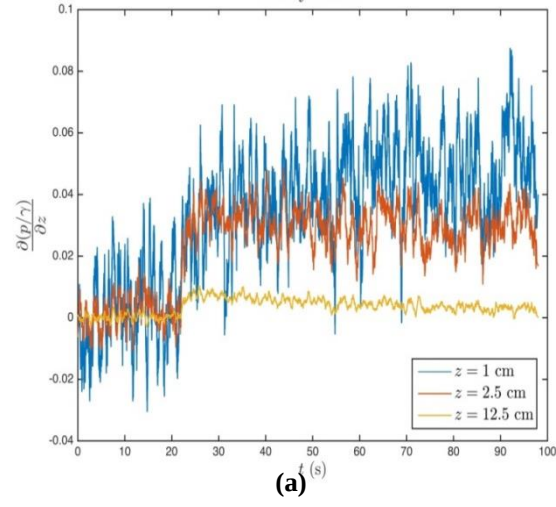
Şekil A.14 : Deney No: 208, malzeme: orta kalınlıkta kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,50, $T(s) = 12$, borulanma yok.

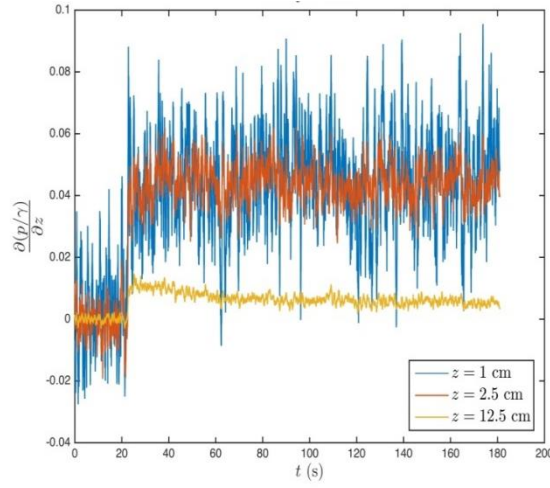
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.

EK B**Çizelge B.1 : Çakıl malzemenin borulanma deneyleri.**

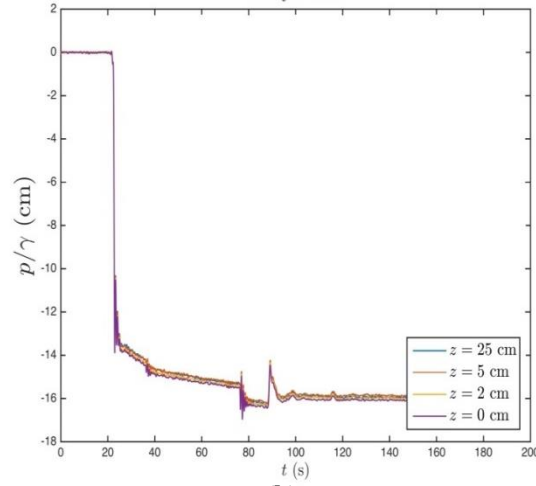
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)
301	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.20	----
302	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----
303	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----
304	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----
305	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----
306	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	1.00	----
307	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	0	2.00	----
401	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.25	8
402	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	10
403	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.65	12
501	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.20	----
502	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.30	----
503	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.40	----
504	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.75	----
505	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	1.00	----
506	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	2.00	----
507	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.50	----
601	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.65	12
701	Çakıl	Düşen basınç gradyanı	34.0	2.00	----
801	Çakıl	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.65	12



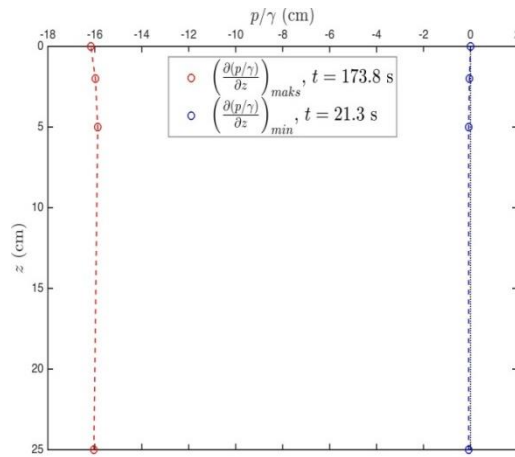
Şekil B.1 : Deney No: 301, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, borulanma yok.
 (a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

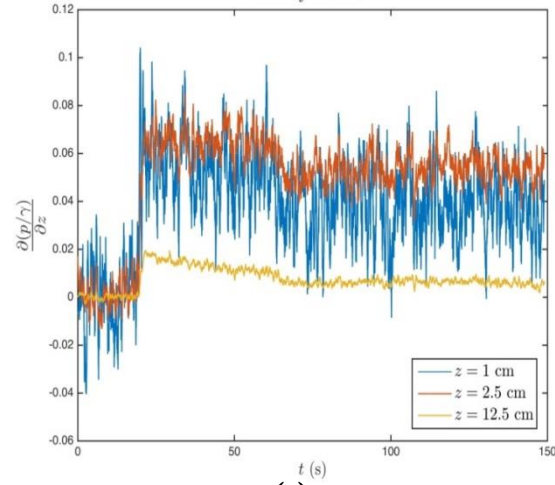


(b)

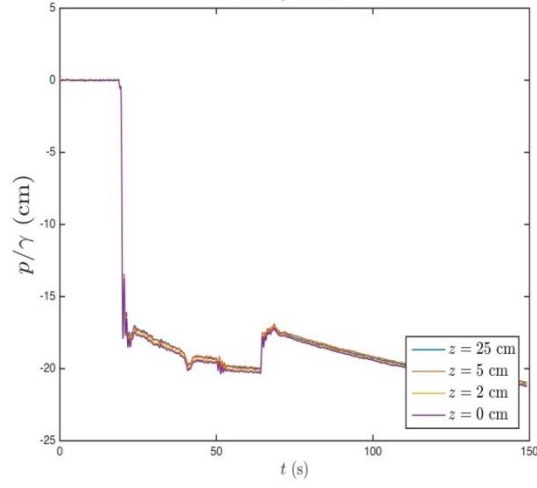


(c)

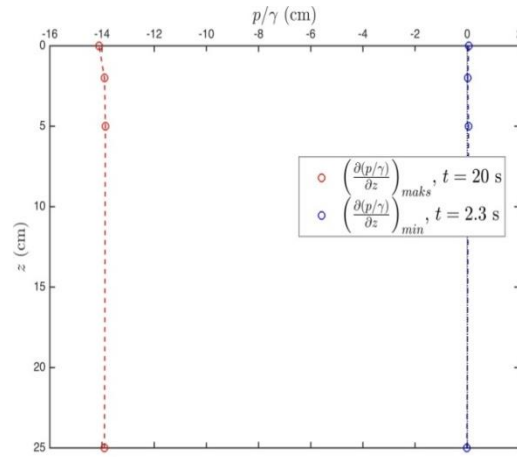
Şekil B.2 : Deney No: 302, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, borulanma yok.
 (a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

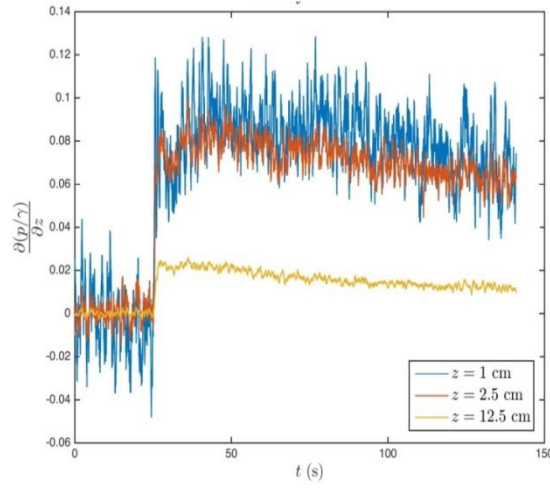


(c)

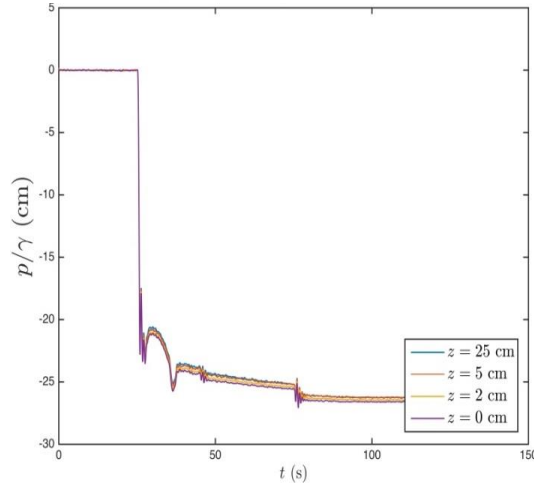
Şekil B.3 : Deney No: 303, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,40, borulanma yok.

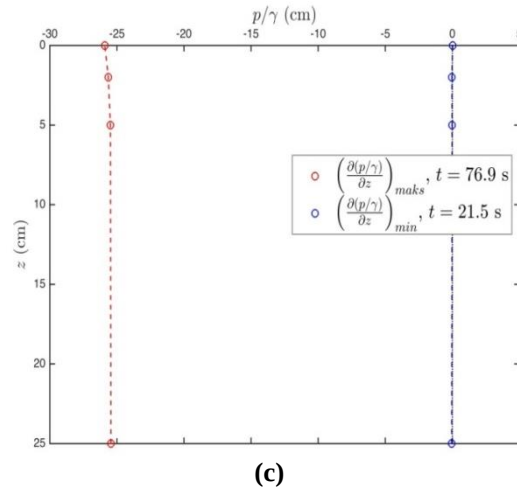
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

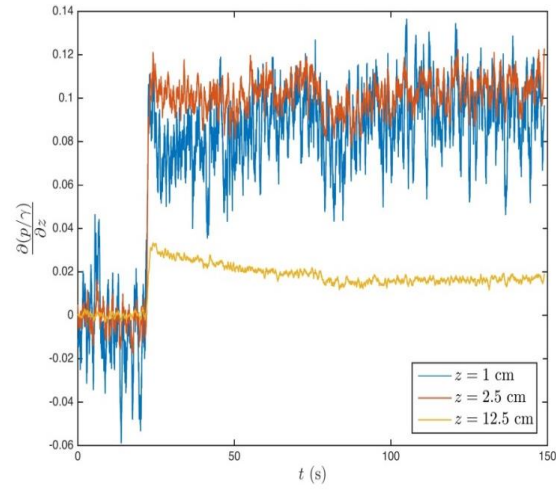


(b)

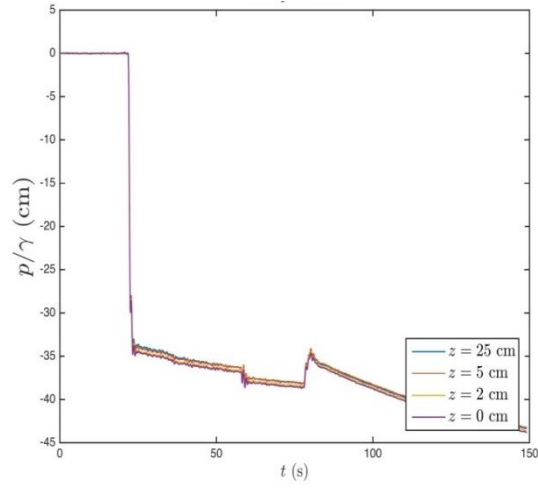


(c)

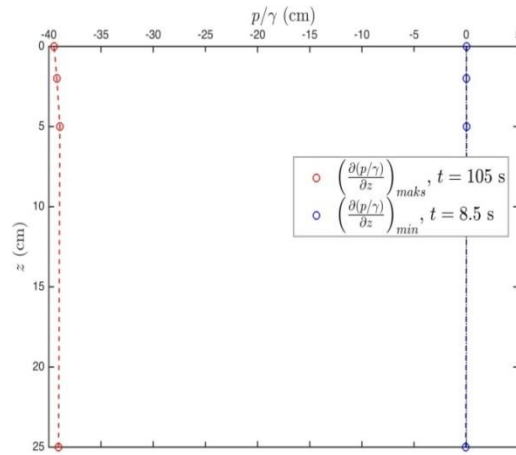
Şekil B.4 : Deney No: 304, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



(b)

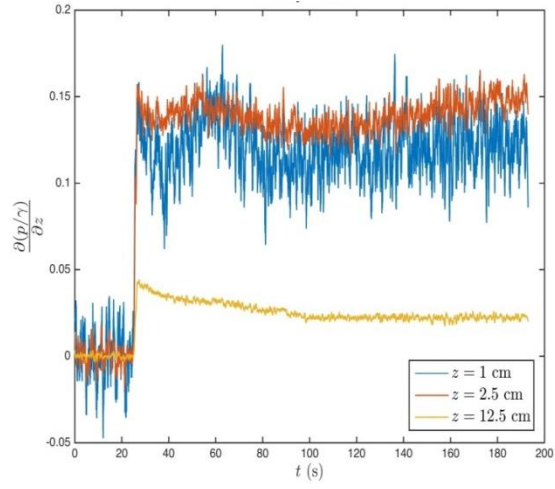


(c)

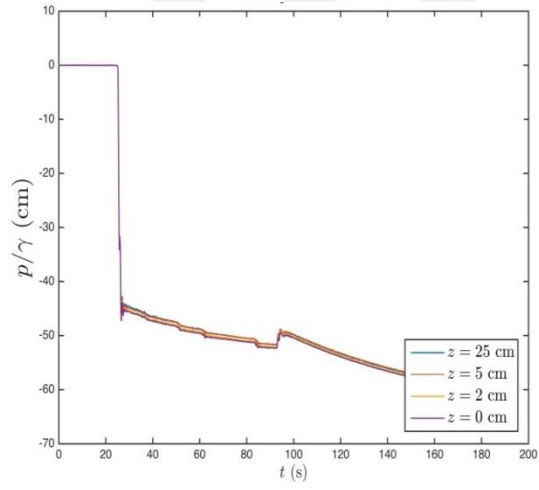
Şekil B.5 : Deney No: 305, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 0,75, borulanma yok.

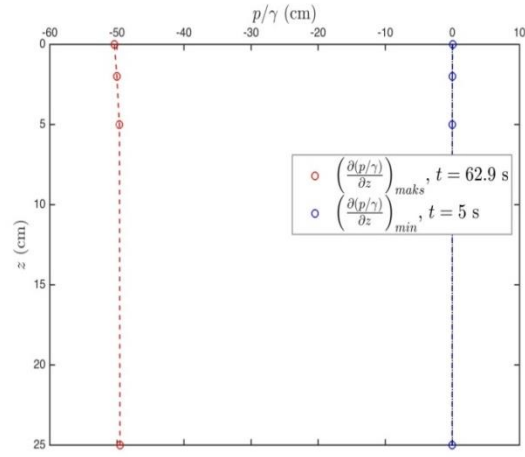
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

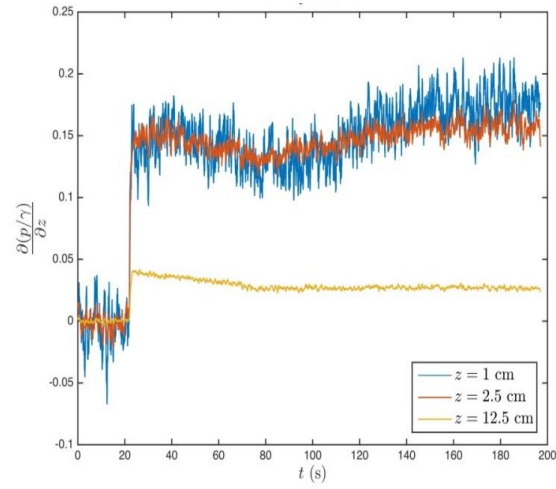


(b)

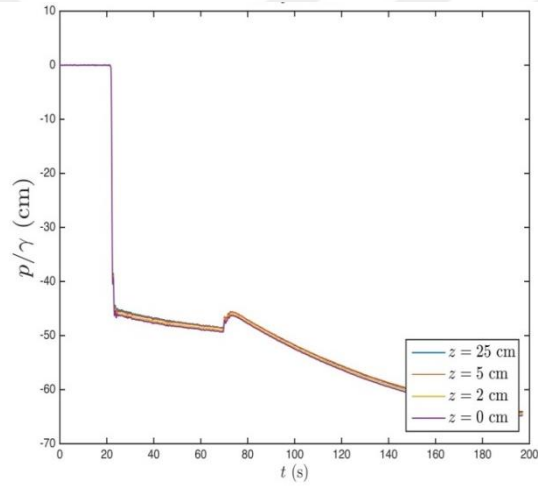


(c)

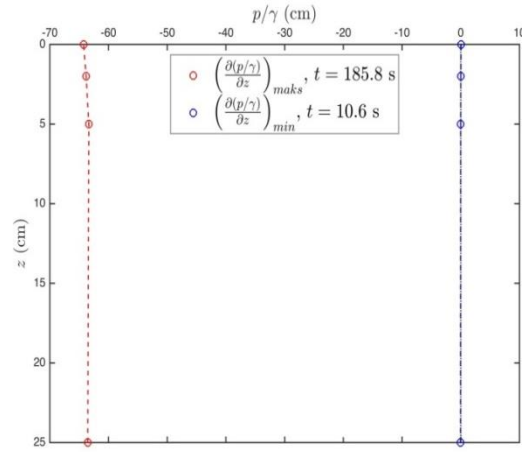
Şekil B.6 : Deney No: 306, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 1,00$, borulanma yok.
 (a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

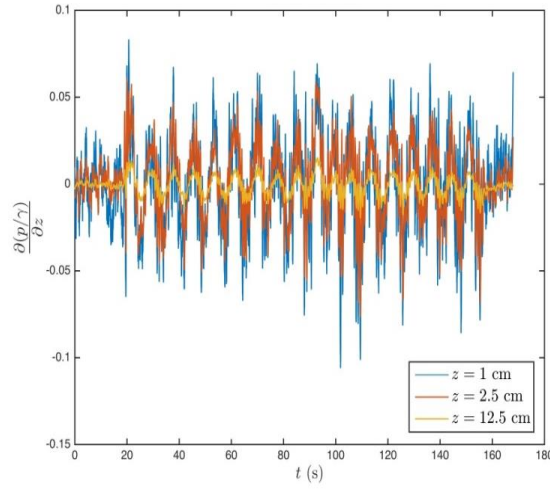


(b)

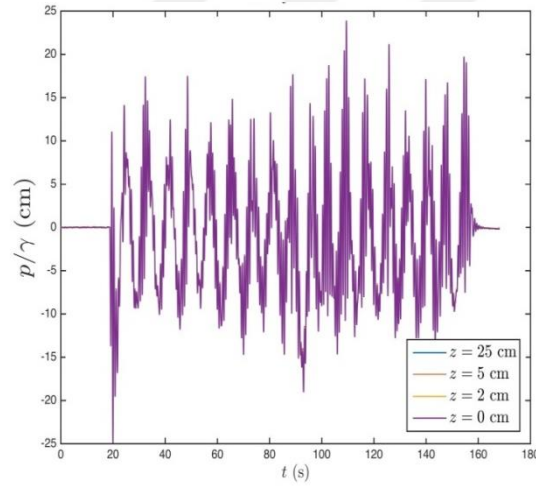


(c)

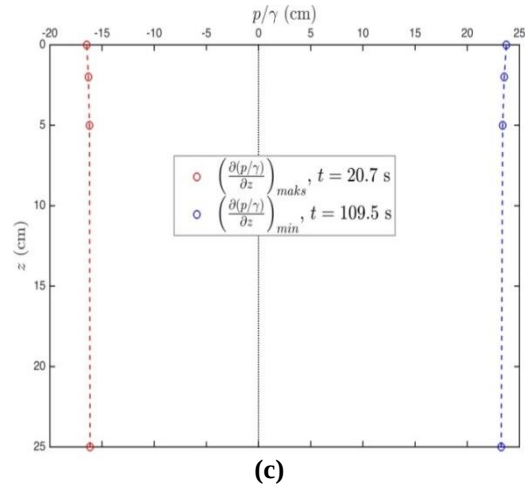
Şekil B.7 : Deney No: 307, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, ΔH_{maks} (m)= 2,00, borulanma yok.
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



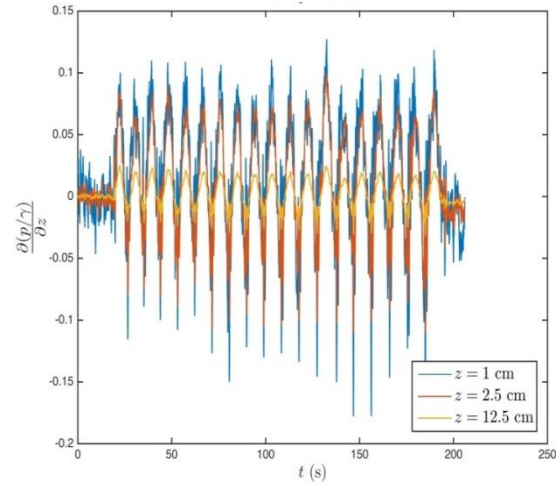
(b)



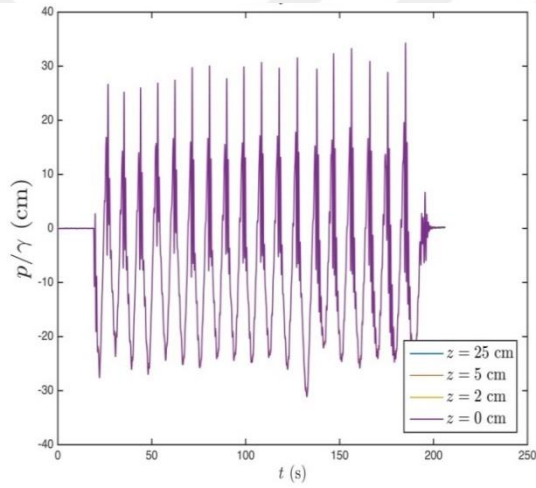
(c)

Şekil B.8 : Deney No: 401, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,25$, $T(s) = 8$, **borulanma yok.**

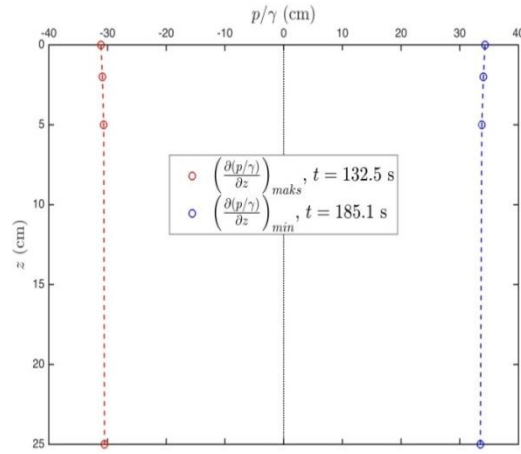
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

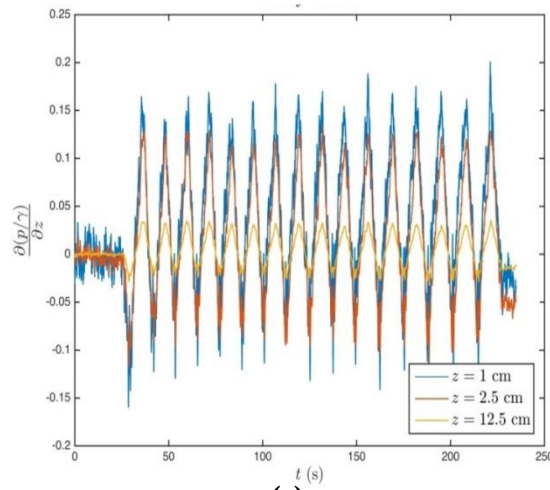


(b)

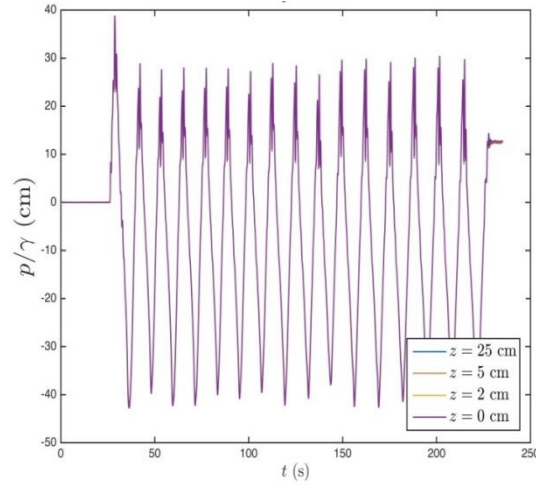


(c)

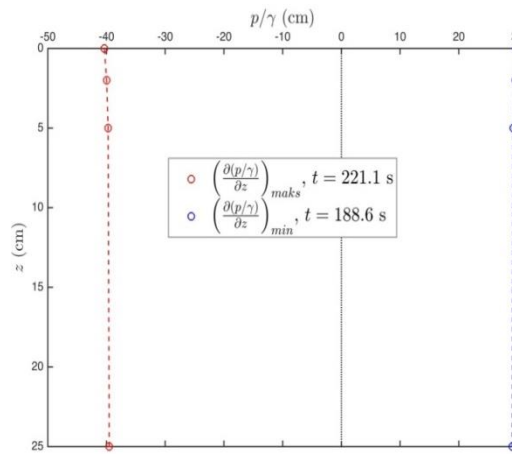
Şekil B.9 : Deney No: 402, malzeme: çakıl, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, $T(s) = 10$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



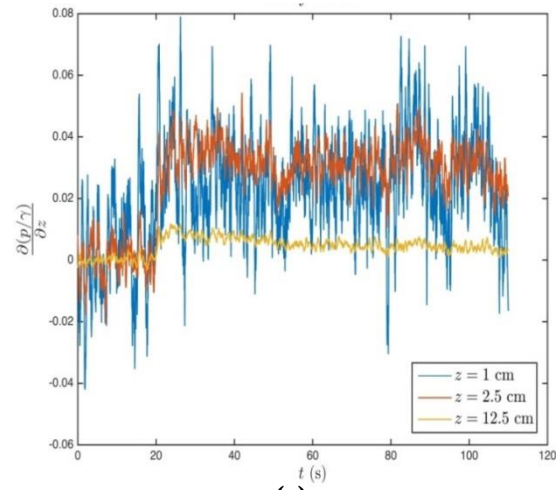
(b)



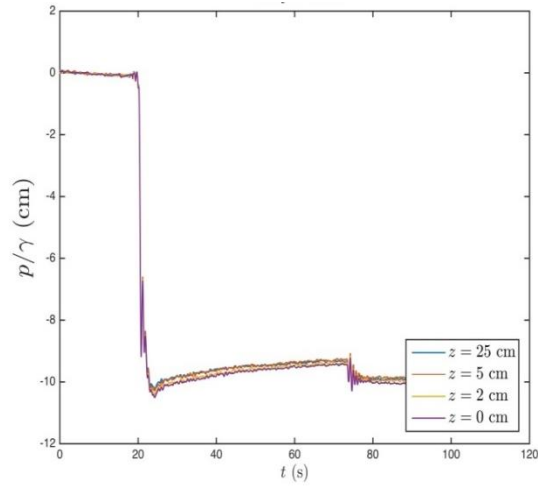
(c)

Şekil B.10 : Deney No: 403, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$, $T(s) = 12$, **borulanma yok.**

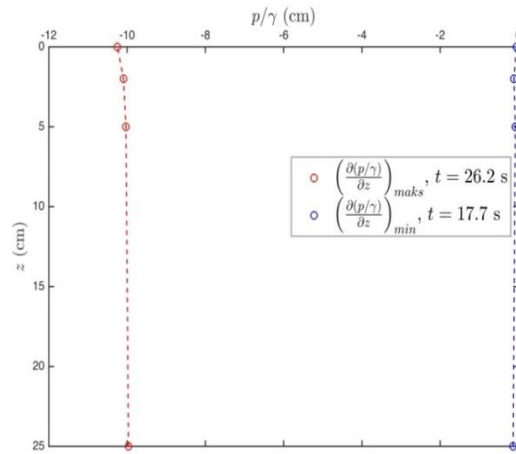
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)

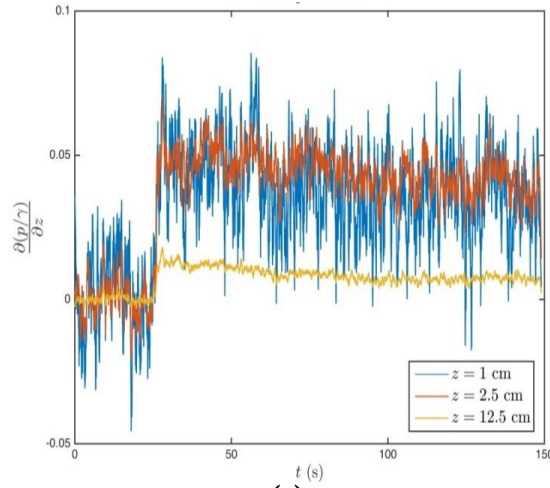


(b)

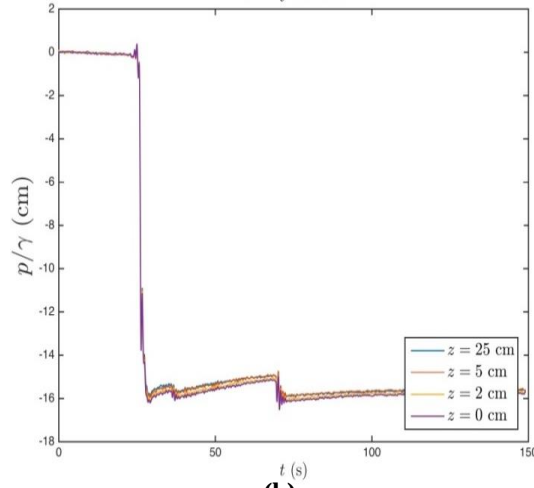


(c)

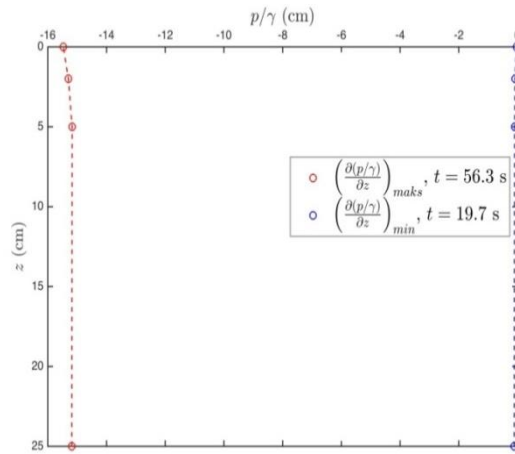
Şekil B.11 : Deney No: 501, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, borulanma yok.
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

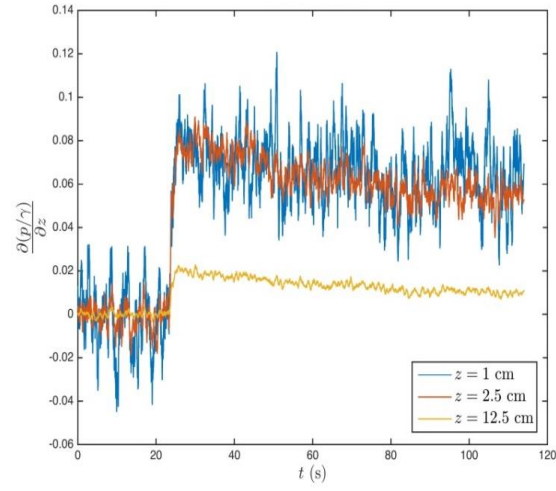


(b)

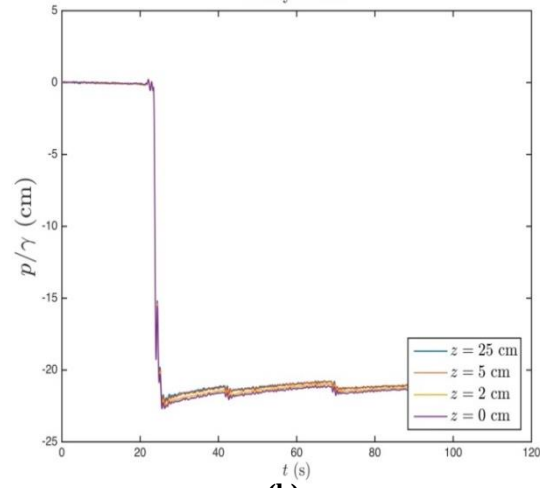


(c)

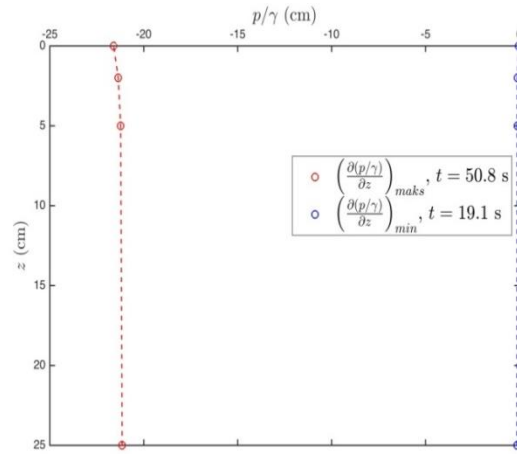
Şekil B.12 : Deney No: 502, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, borulanma yok.
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

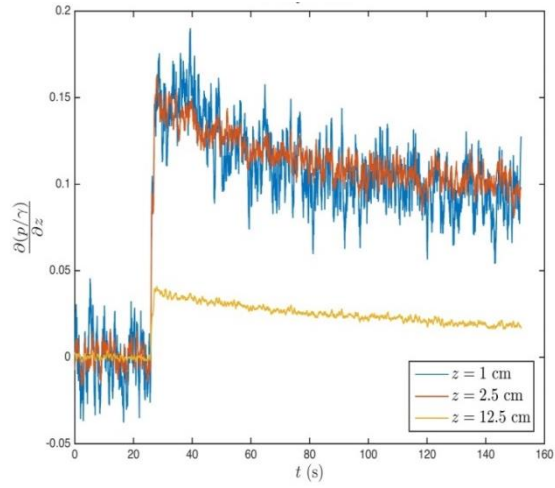


(b)

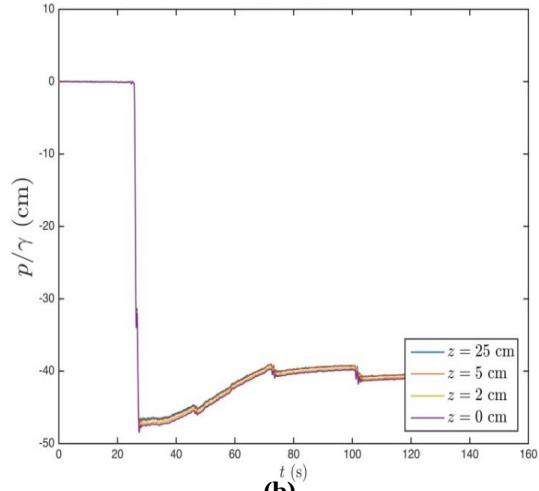


(c)

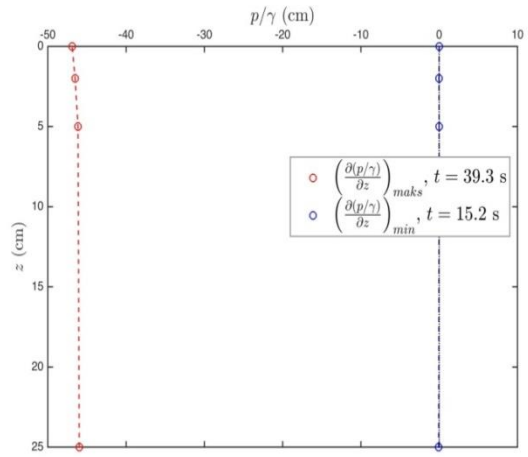
Şekil B.13 : Deney No: 503, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)

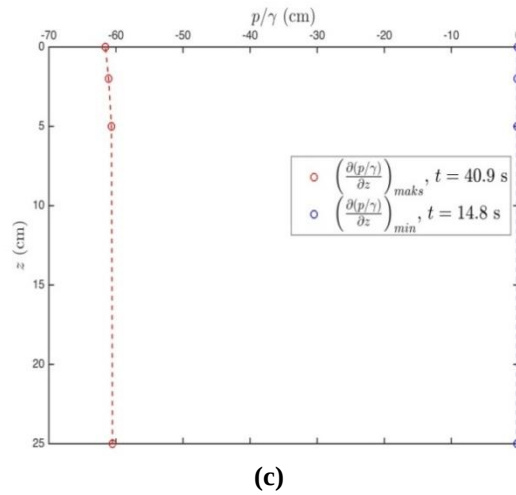
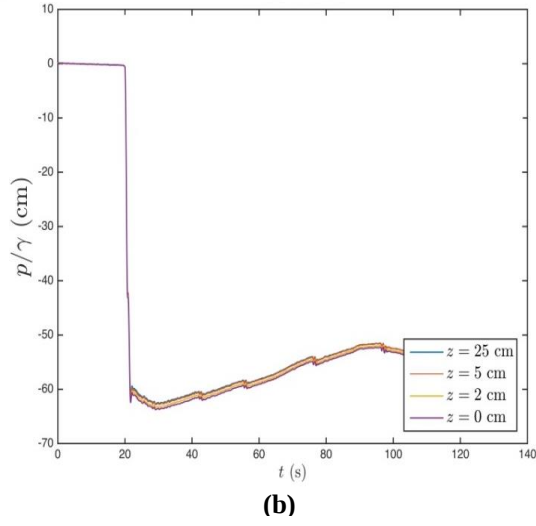
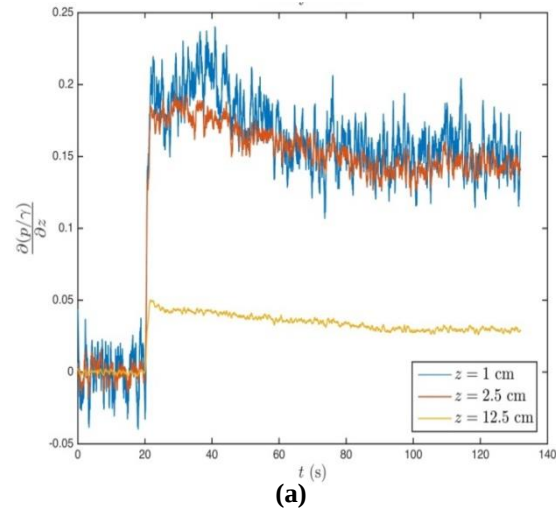


(b)

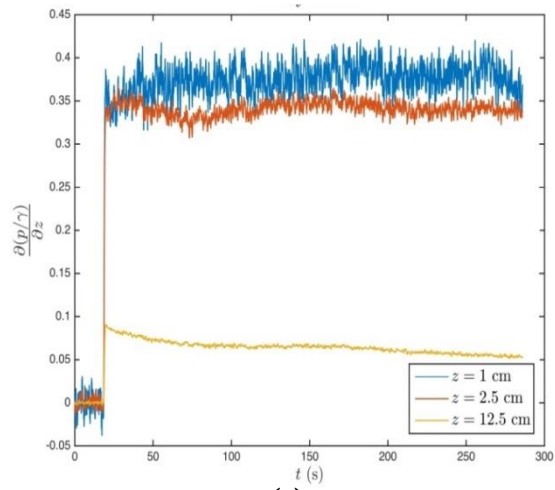


(c)

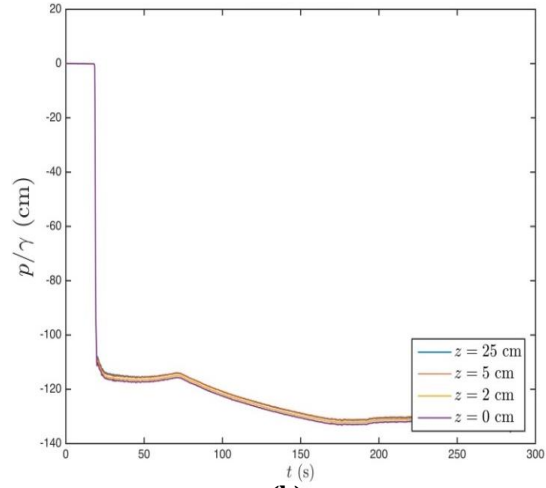
Şekil B.14 : Deney No: 504, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,75$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



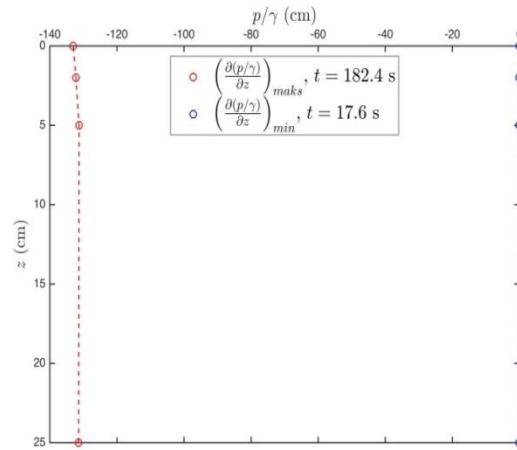
Şekil B.15 : Deney No: 505, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 1,00$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

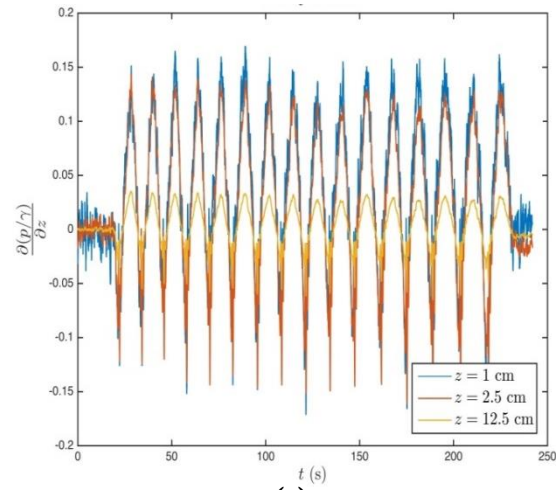


(b)

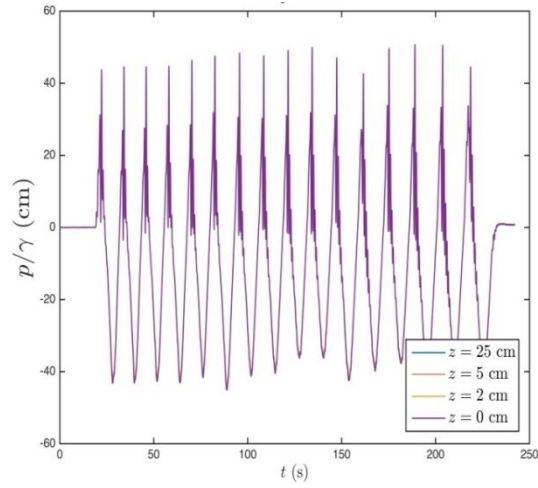


(c)

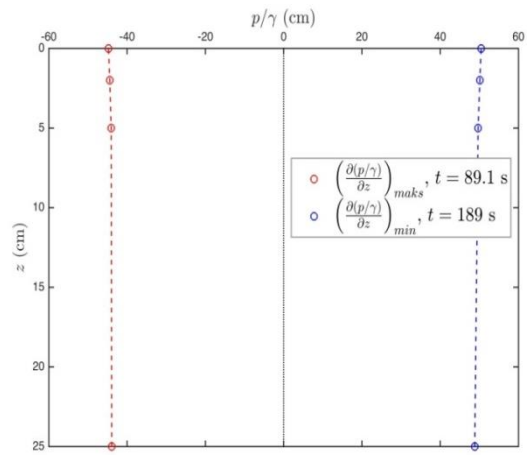
Şekil B.16 : Deney No: 506, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 2,00$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



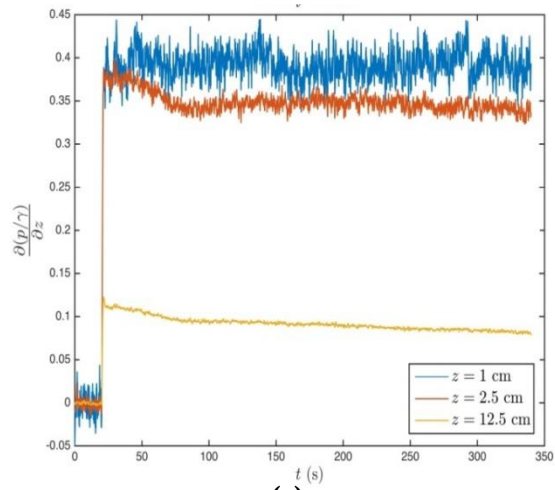
(b)



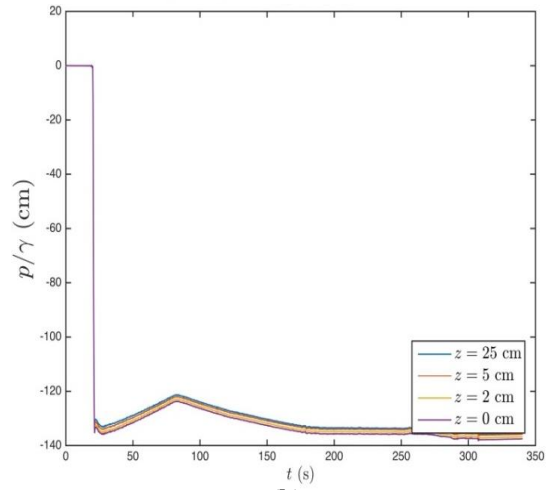
(c)

Şekil B.17 : Deney No: 601, malzeme: çakıl, deney tipi: salınlımlı basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$, $T(s) = 12$, borulanma yok.

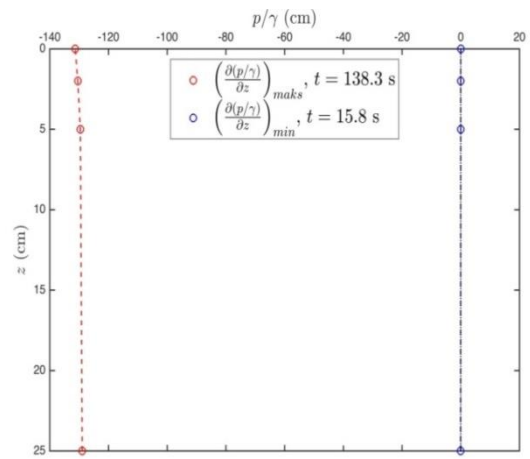
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)

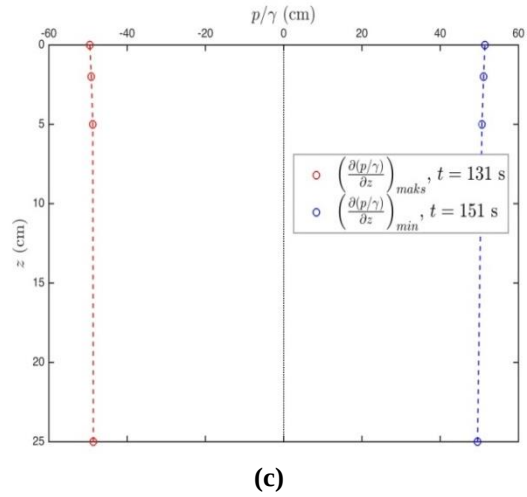
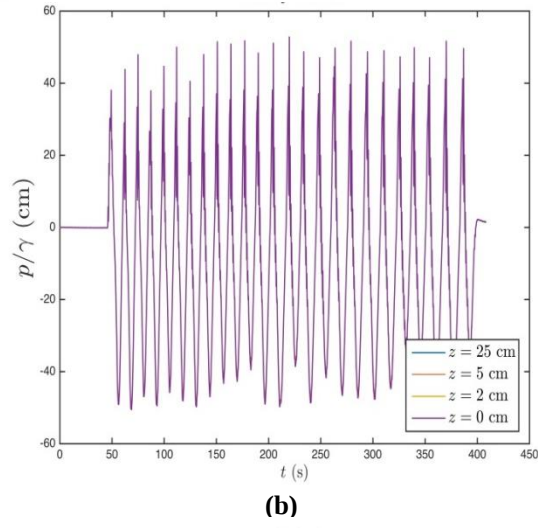
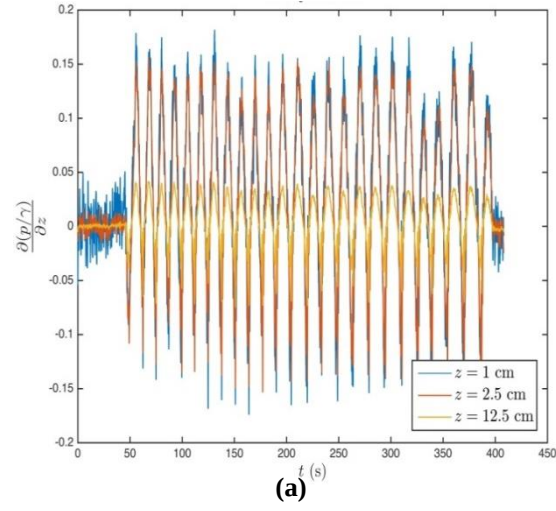


(b)



(c)

Şekil B.18 : Deney No: 701, malzeme: çakıl, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 2,00$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.

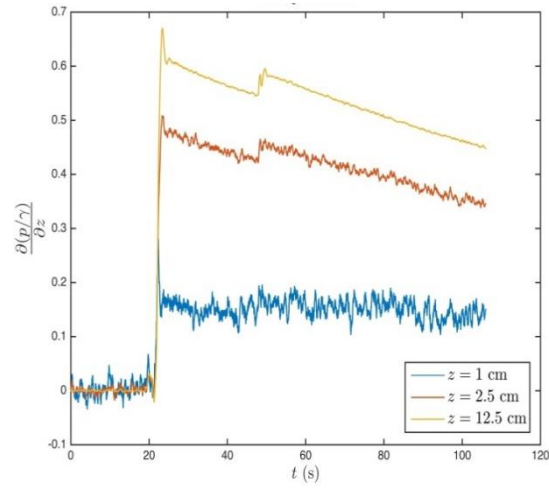


Şekil B.19 : Deney No: 801, malzeme: çakıl, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 34, 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$, $T(s) = 12$, **borulanma yok.**
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.

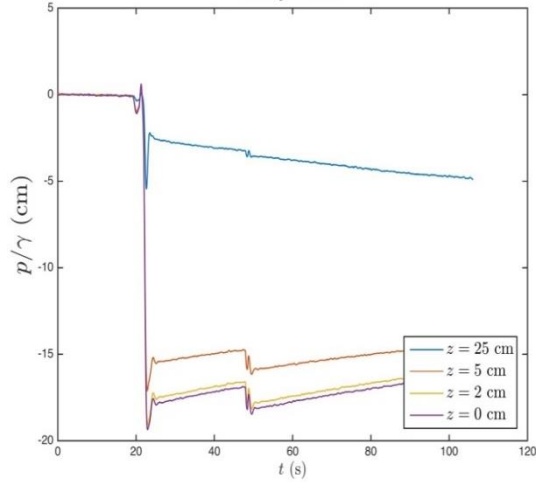
EK C

Çizelge C.1 : İnce kum malzemelerinin borulanma deneyleri.

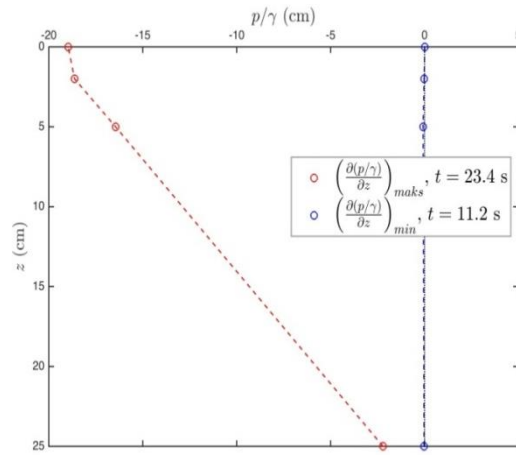
Deney No.	Malzeme	Deney Tipi	$\alpha(^{\circ})$	ΔH_{maks} (m)	T (s)
901	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.20	----
902	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.30	----
903	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.40	----
904	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.50	----
905	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	0	0.75	----
1001	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.15	8
1002	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.20	8
1003	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.30	10
1004	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.40	10
1005	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.50	10
1006	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	0	0.65	12
1101	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.20	----
1102	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.30	----
1103	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.40	----
1104	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	18.5	0.50	----
1201	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.15	8
1202	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.20	8
1203	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.30	8
1204	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.40	8
1205	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	18.5	0.65	12
1301	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.20	----
1302	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.30	----
1303	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.40	----
1304	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.50	----
1305	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	0.75	----
1306	İnce Kum	Düşen basınç gradyanı	34.0	1.00	----
1401	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.15	8
1402	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.20	8
1403	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.30	8
1404	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.40	8
1405	İnce Kum	Salınımlı basınç gradyanı	34.0	0.65	12



(a)



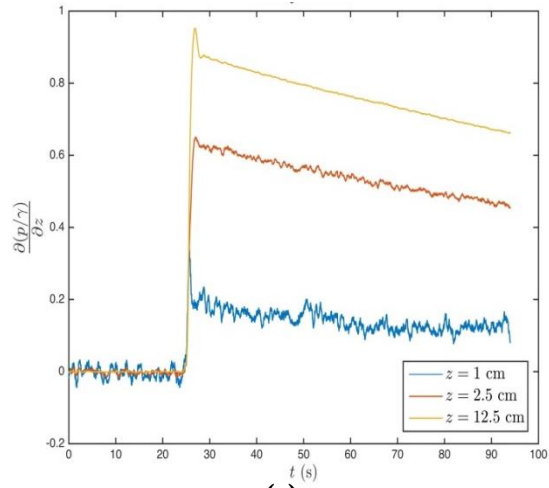
(b)



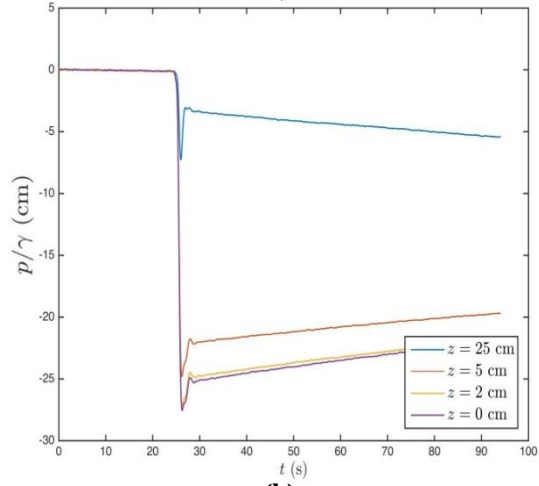
(c)

Şekil C.1 : Deney No: 901, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, borulanma yok.

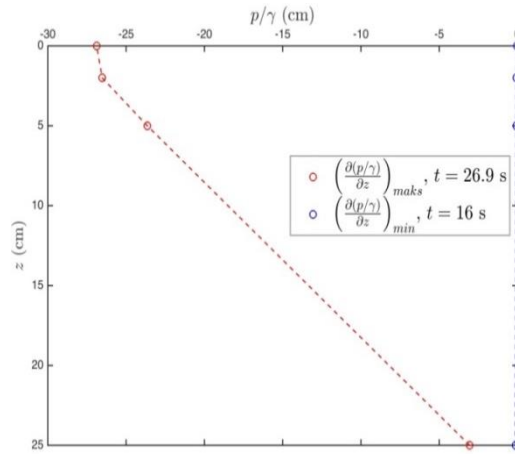
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



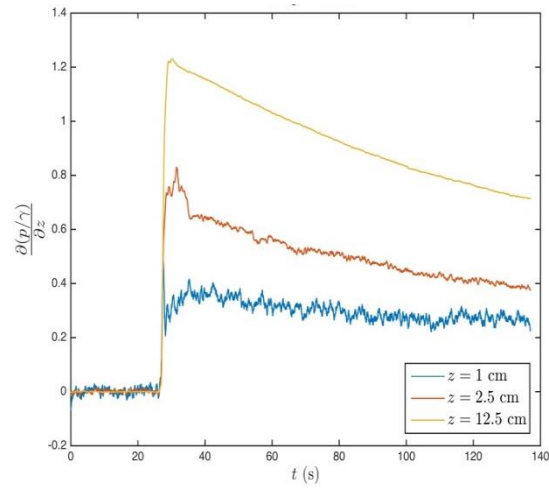
(b)



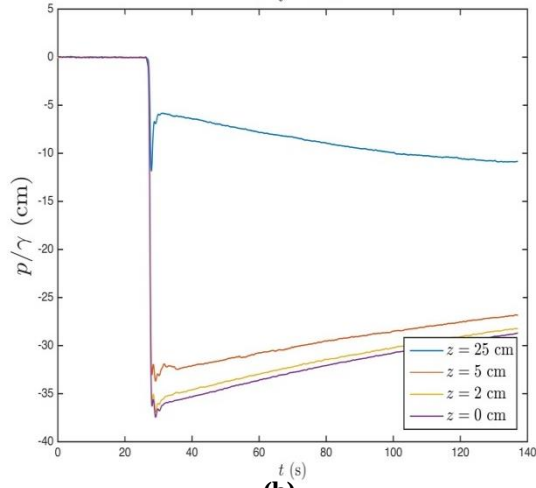
(c)

Şekil C.2 : Deney No: 902, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, borulanma yok.

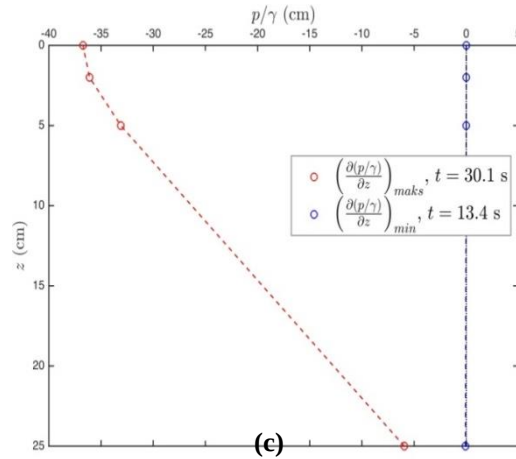
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



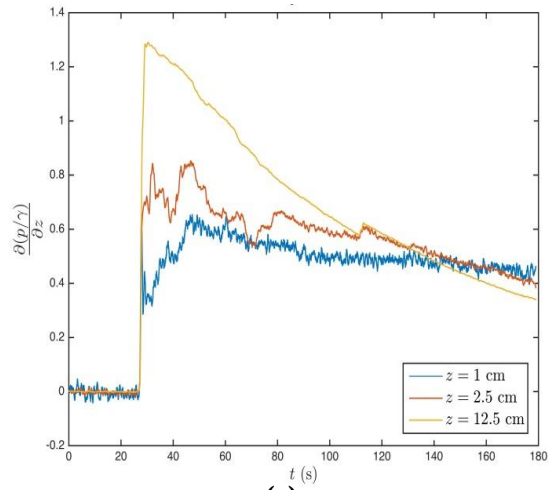
(b)



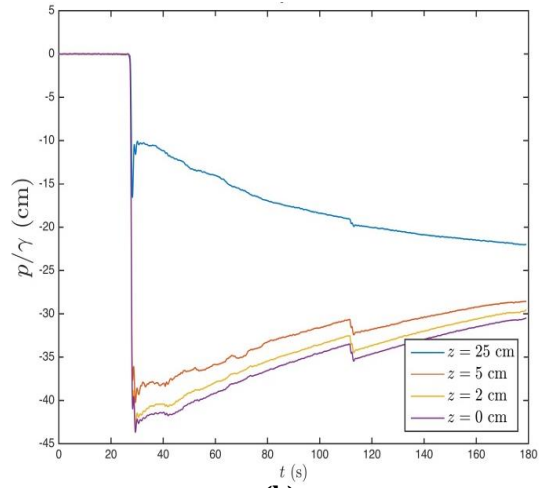
(c)

Şekil C.3 : Deney No: 903, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, borulanma var.

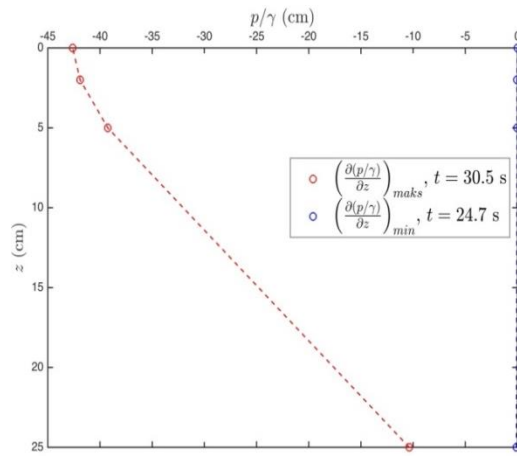
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



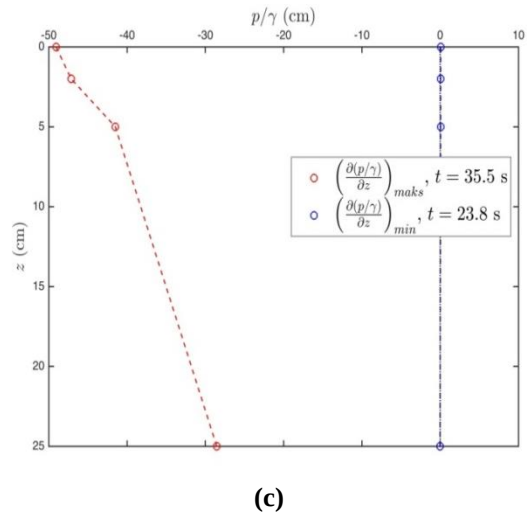
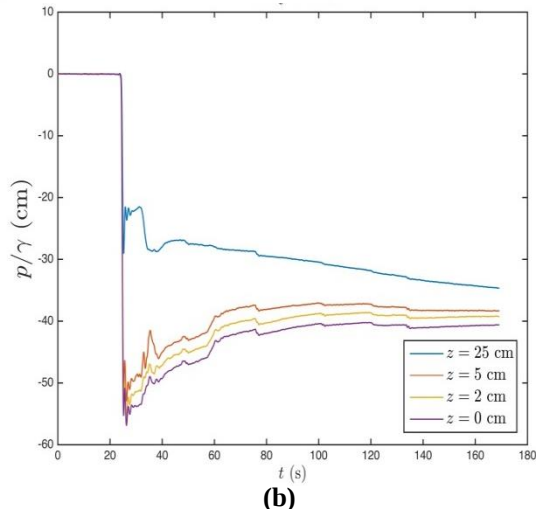
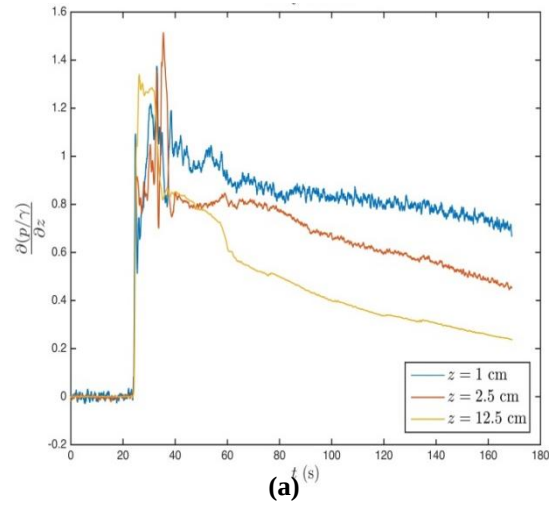
(b)



(c)

Şekil C.4 : Deney No: 904, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, borulanma var.

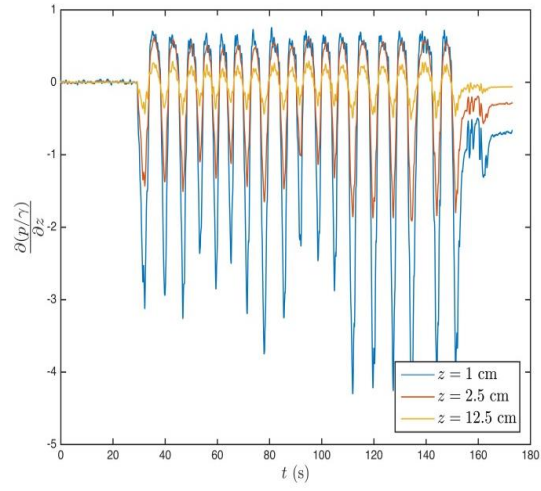
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



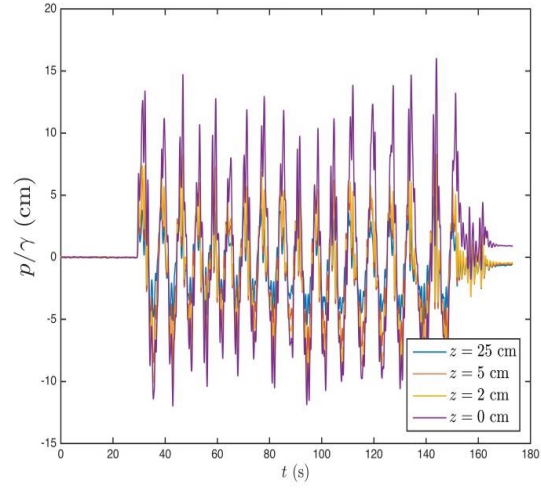
Şekil C.5 : Deney No: 905, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı

$\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,75$, borulanma var.

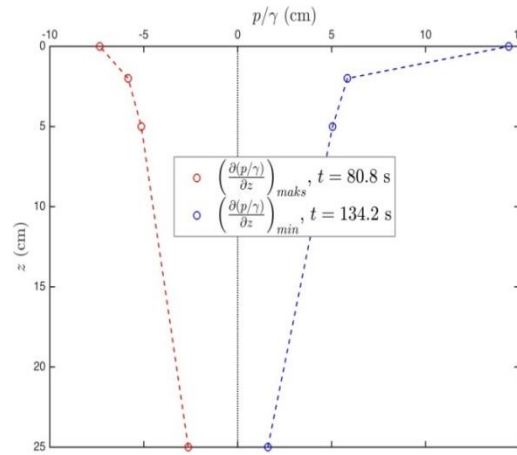
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



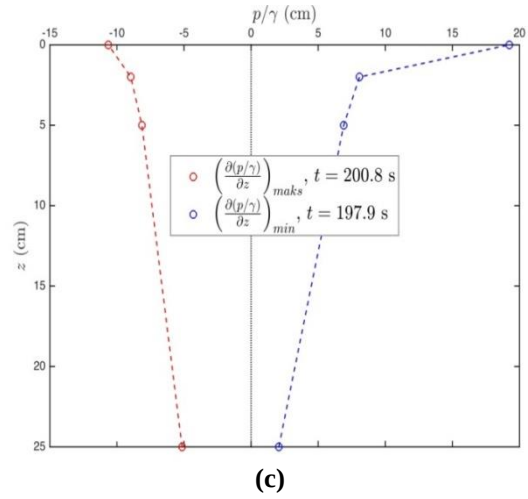
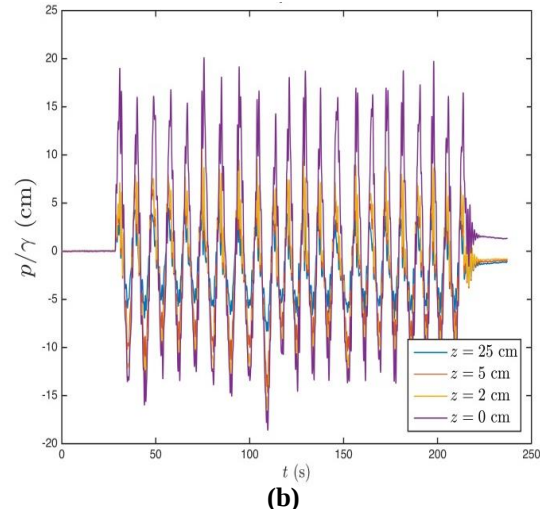
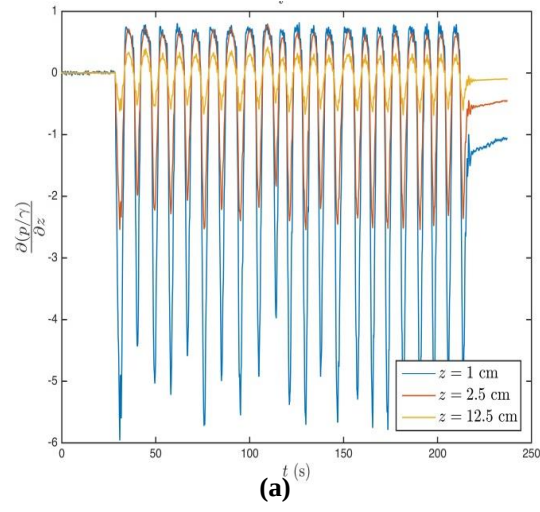
(b)



(c)

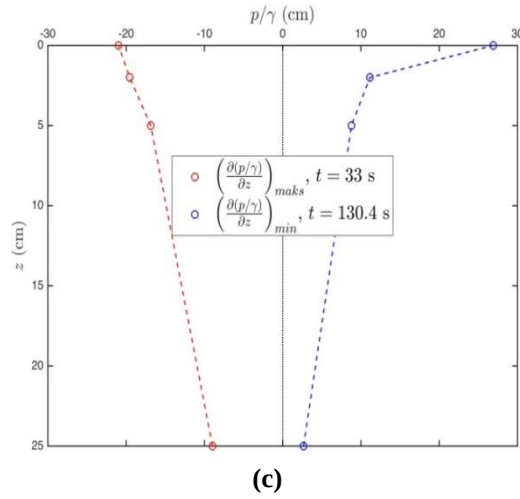
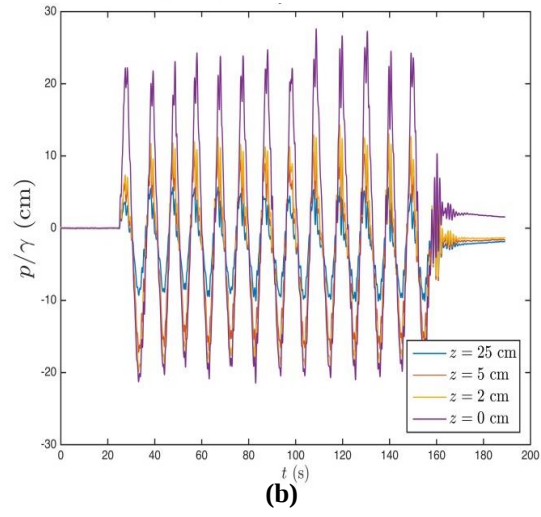
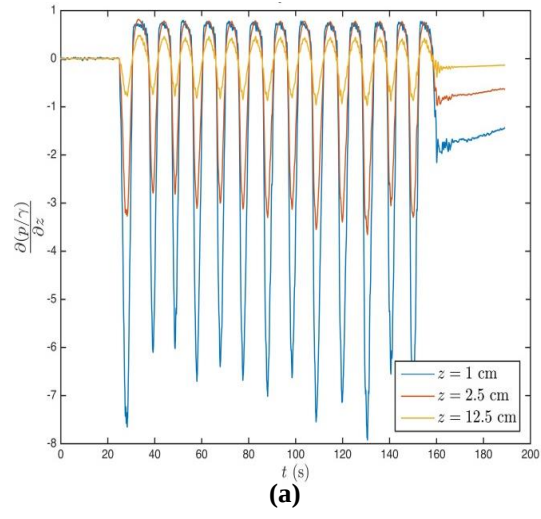
Şekil C.6 : Deney No: 1001, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,15$, borulanma yok.

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



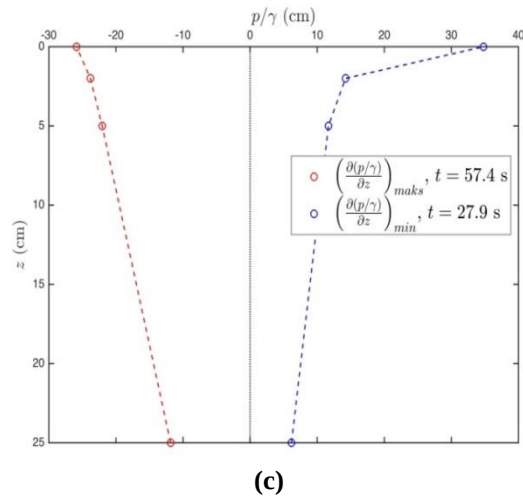
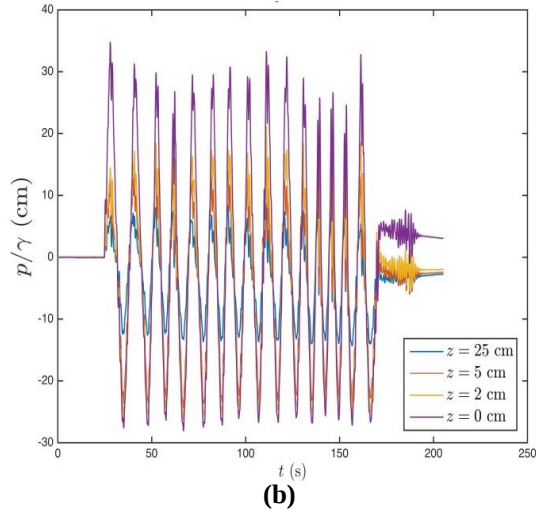
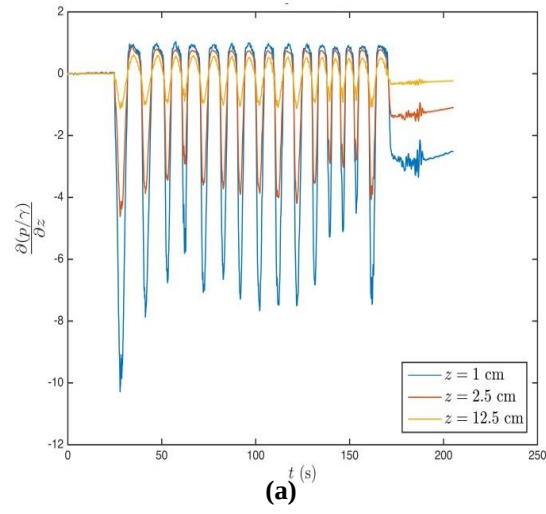
Şekil C.7 : Deney No: 1002, malzeme: ince kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, $T (s) = 8$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



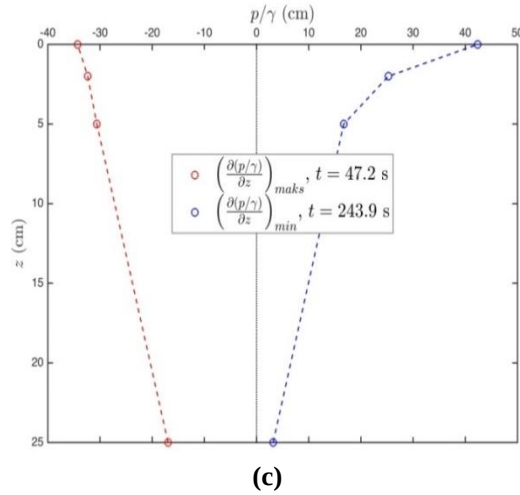
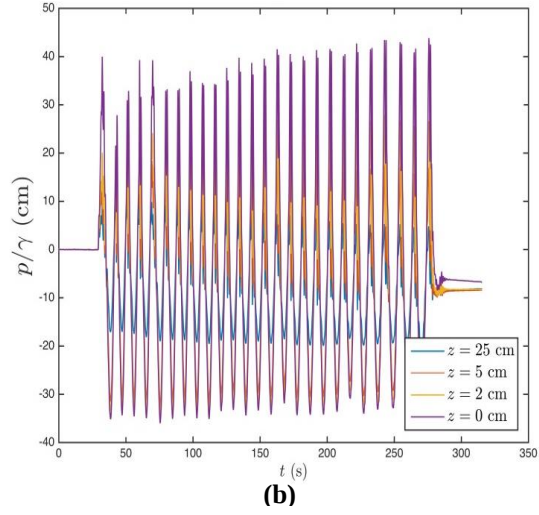
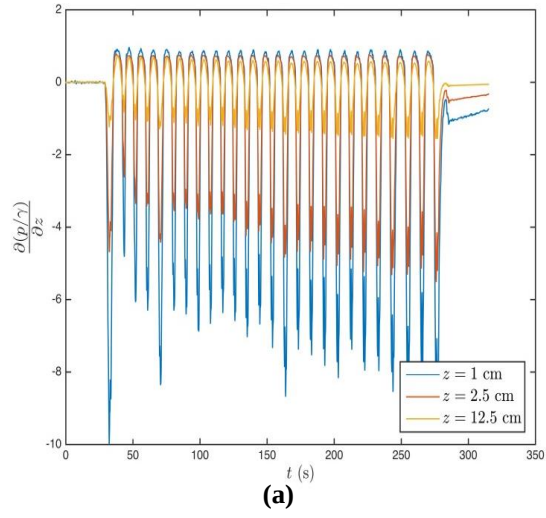
Şekil C.8 : Deney No: 1003, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, $T (s) = 10$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



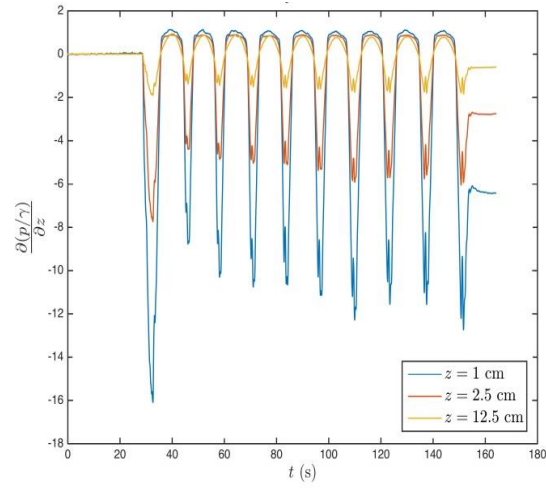
Şekil C.9 : Deney No: 1004, malzeme: ince kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, $T (s) = 10$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profili değişimi.

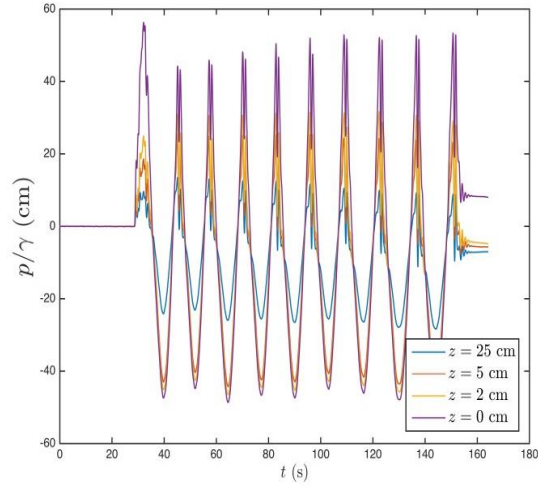


Şekil C.10 : Deney No: 1005, malzeme: ince kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, $T (s) = 10$, borulanma var.

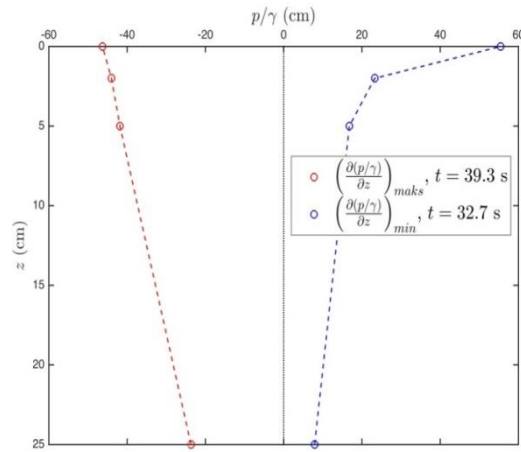
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



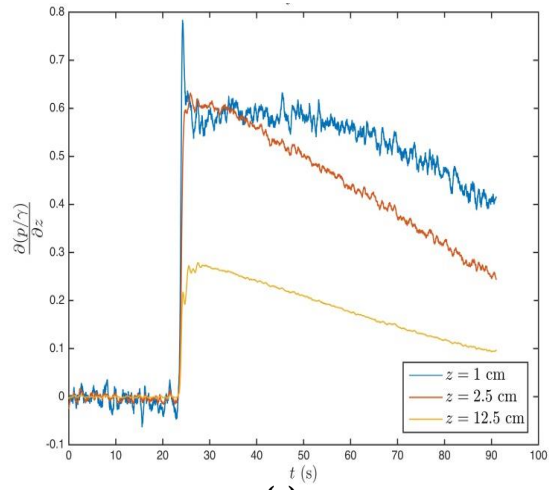
(b)



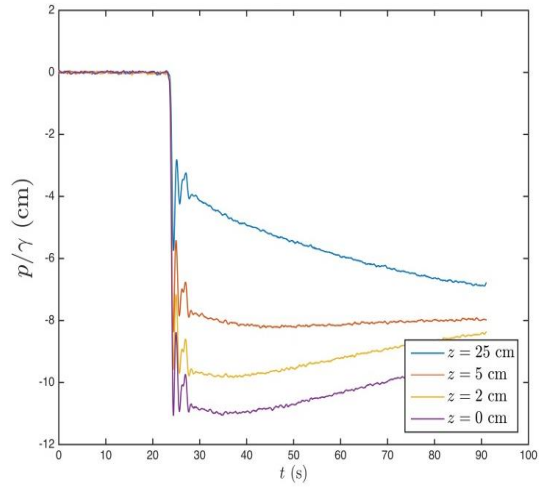
(c)

Şekil C.11 : Deney No: 1006, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$, $T (s) = 12$, borulanma var.

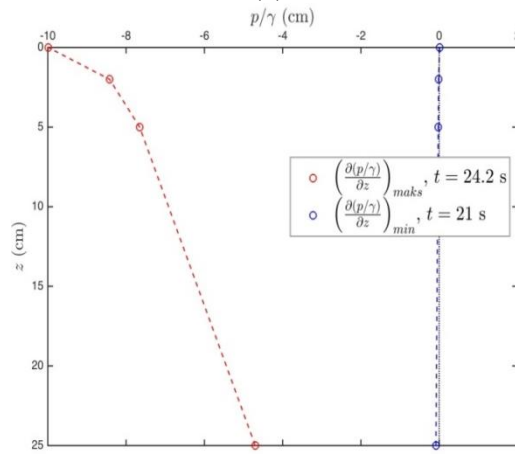
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)



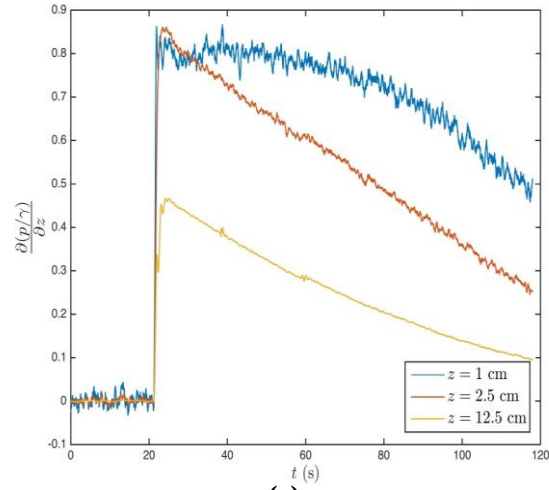
(b)



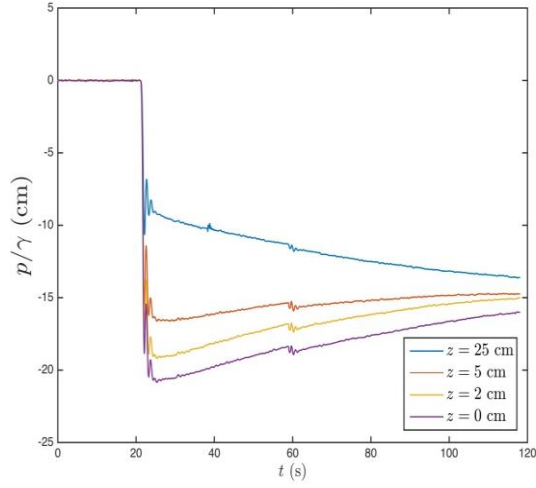
(c)

Şekil C.12 : Deney No: 1101, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, borulanma yok.

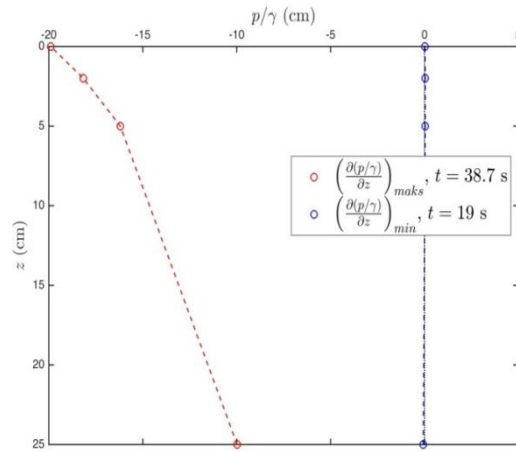
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



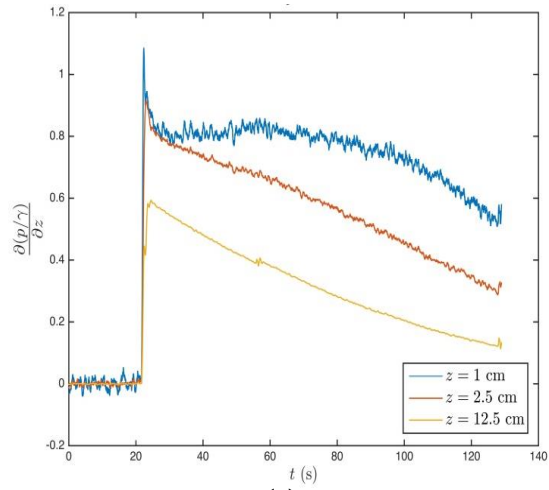
(b)



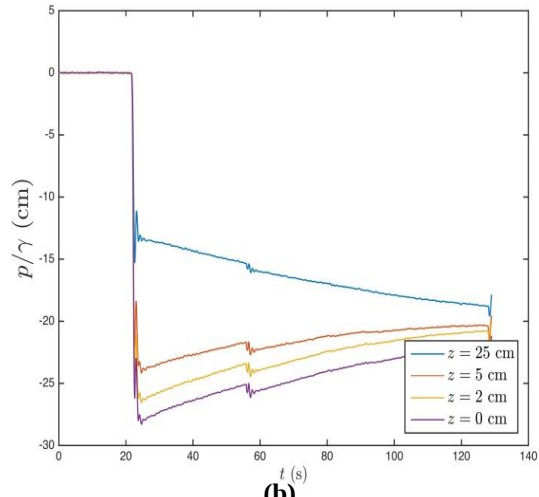
(c)

Şekil C.13 : Deney No: 1102, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, borulanma var.

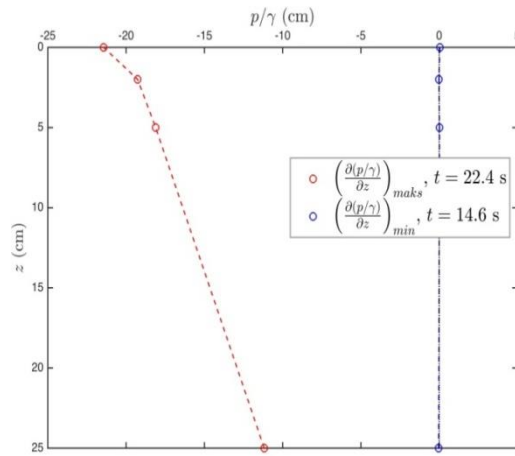
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



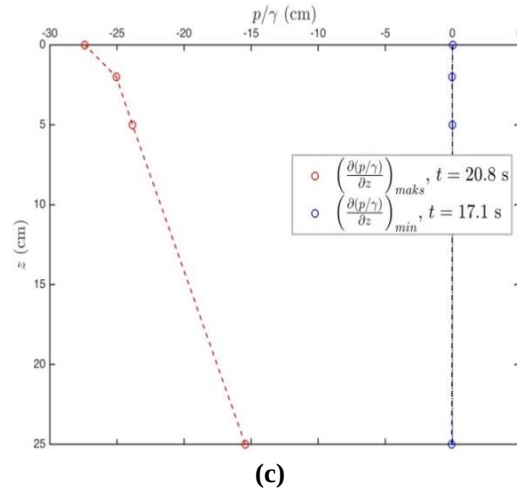
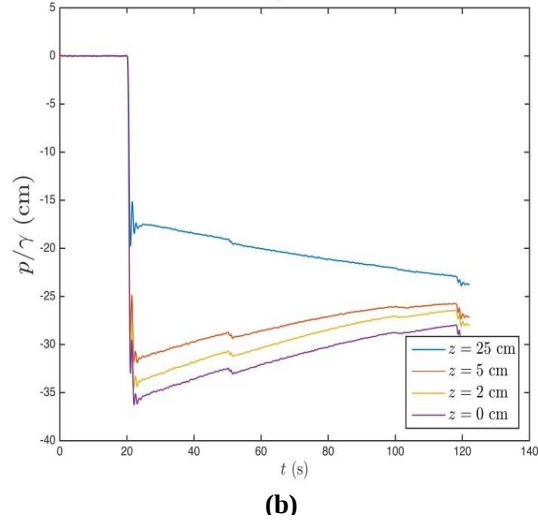
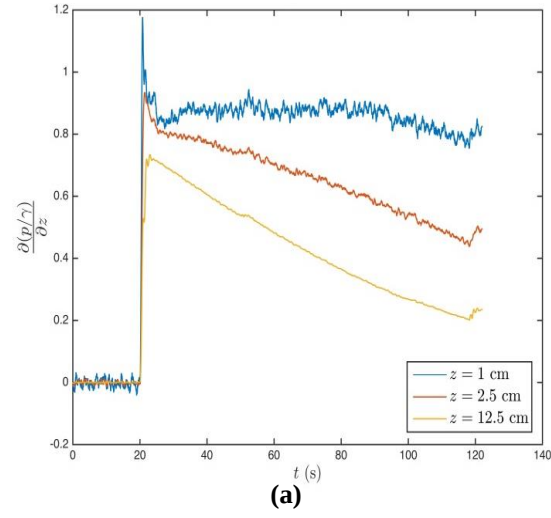
(b)



(c)

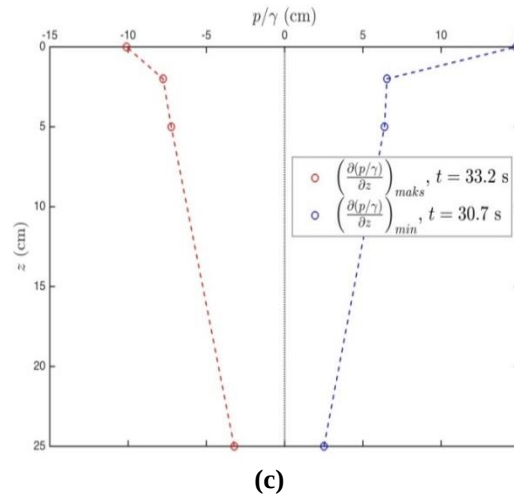
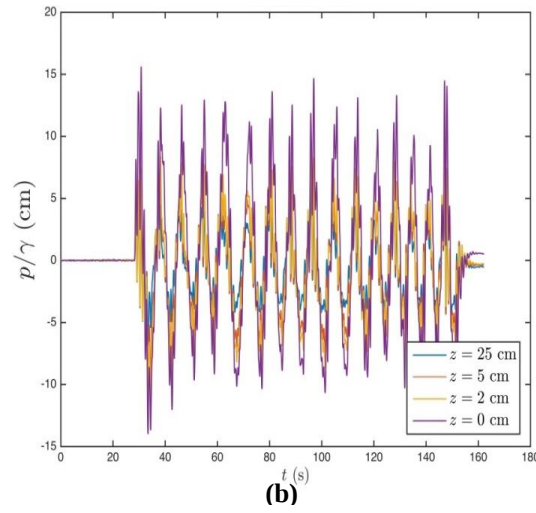
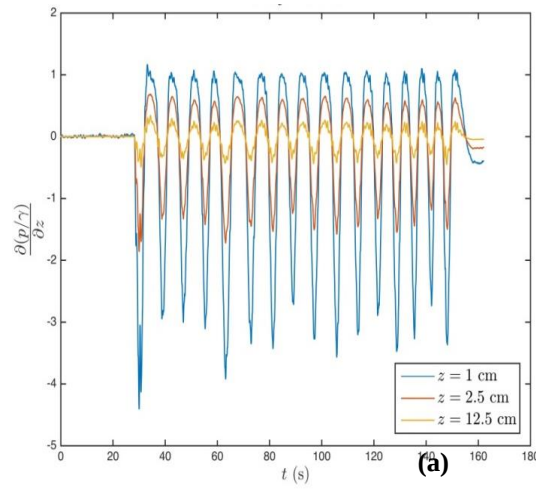
Şekil C.14 : Deney No: 1103, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, borulanma var.

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



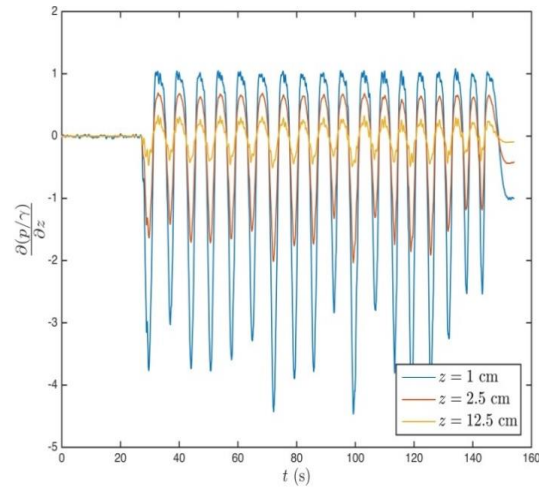
Şekil C.15 : Deney No: 1104, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.

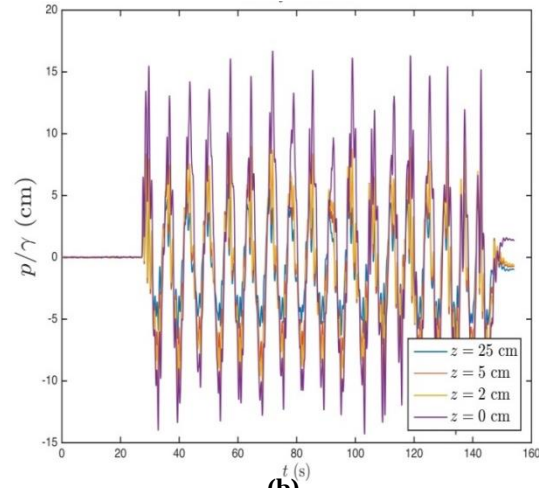


Şekil C.16 : Deney No: 1201, malzeme: ince kum, deney tipi: salınlı basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,15$, borulanma yok.

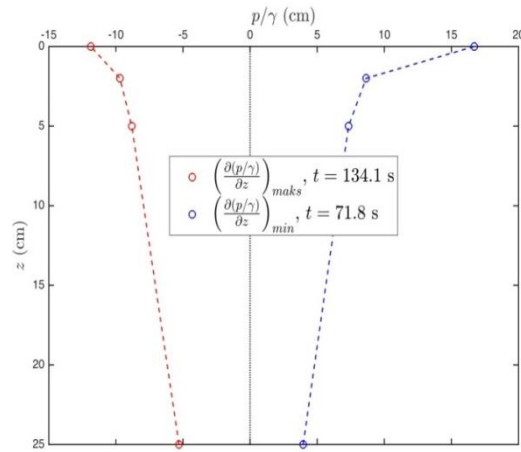
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



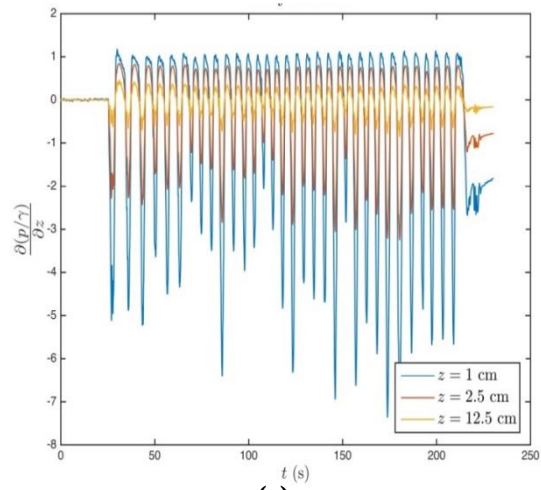
(b)



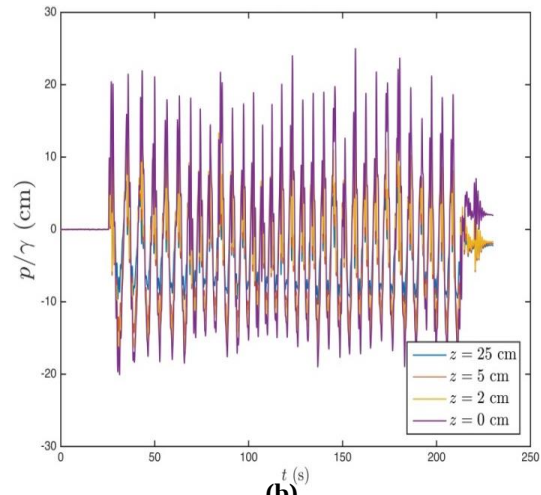
(c)

Şekil C.17 : Deney No: 1202, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, $T (s) = 8$, **borulanma var.**

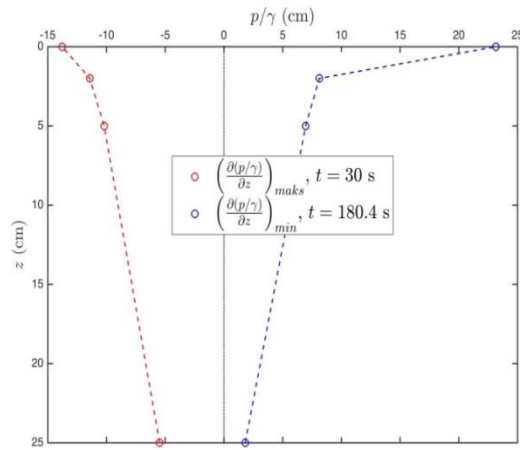
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



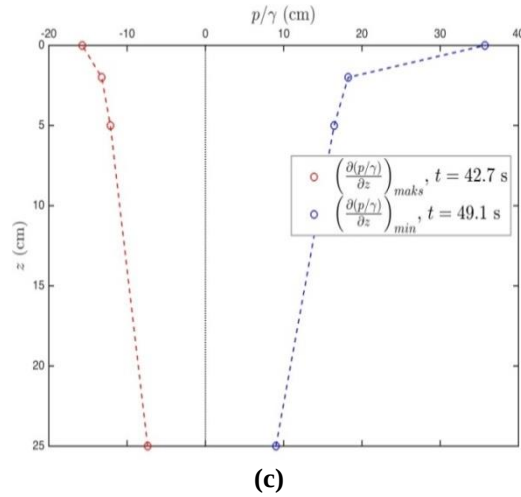
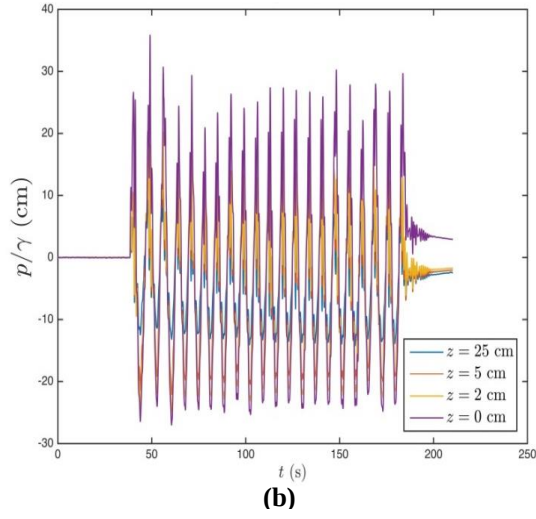
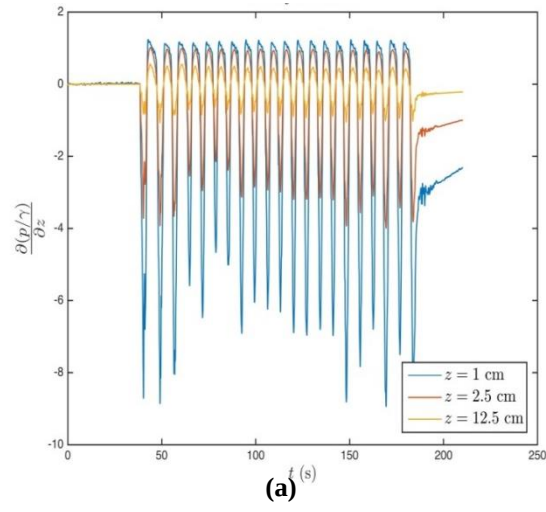
(b)



(c)

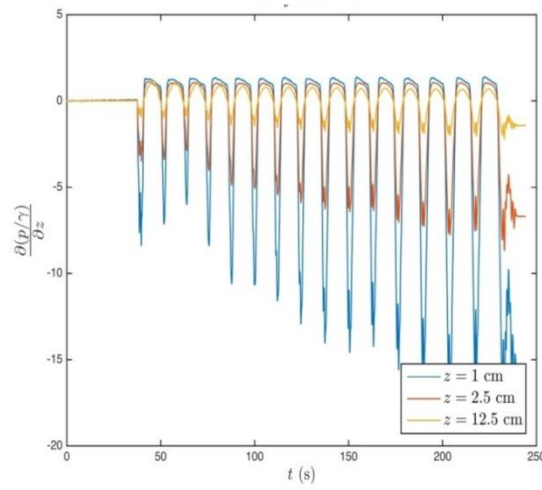
Şekil C.18 : Deney No: 1203, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, $T (s) = 8$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.

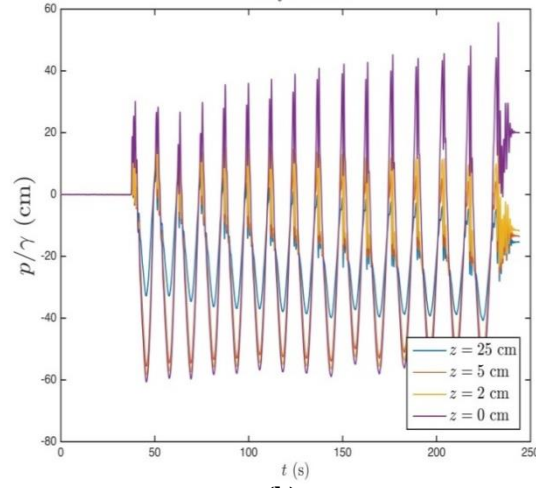


Şekil C.19 : Deney No: 1204, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, $T (s) = 8$, borulanma var.

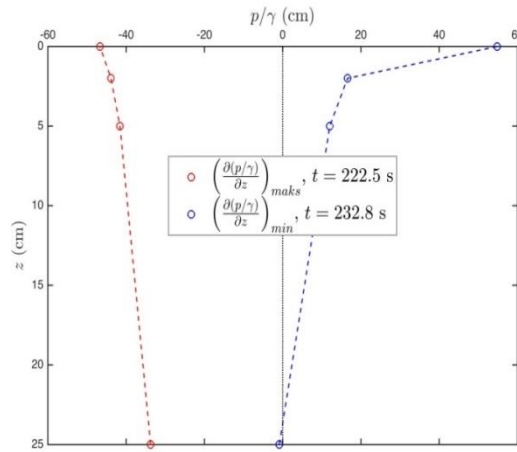
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)



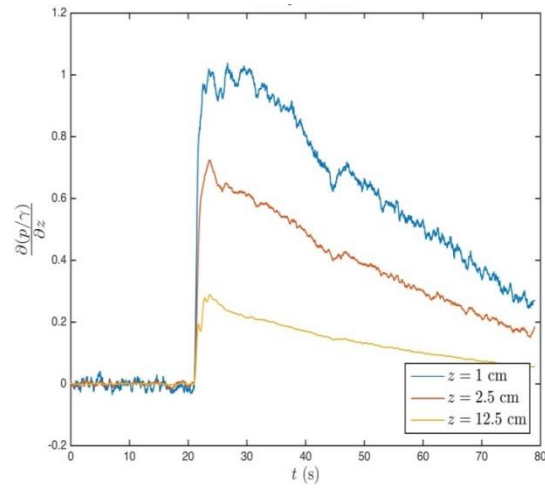
(b)



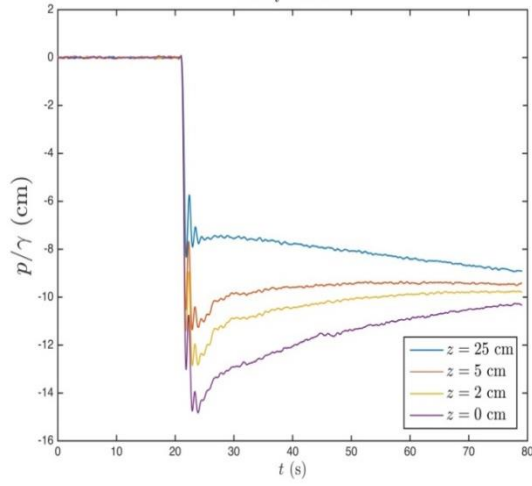
(c)

Şekil C.20 : Deney No: 1205, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 18,5$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$ $T (s) = 12$, **borulanma var.**

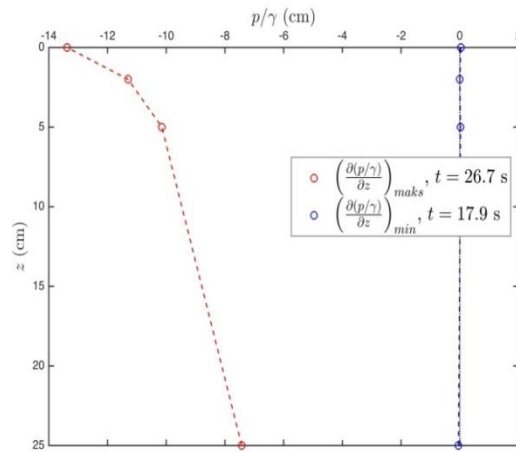
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)



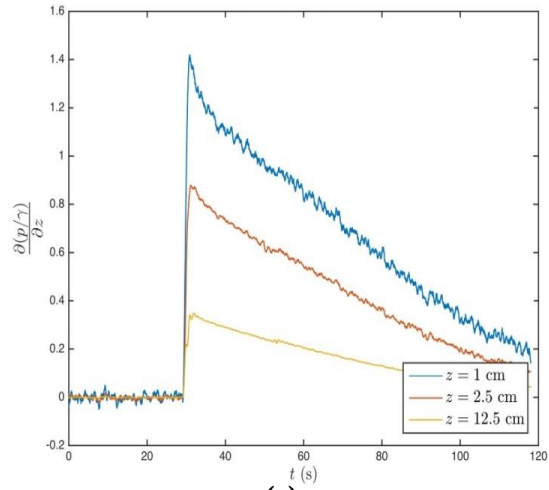
(b)



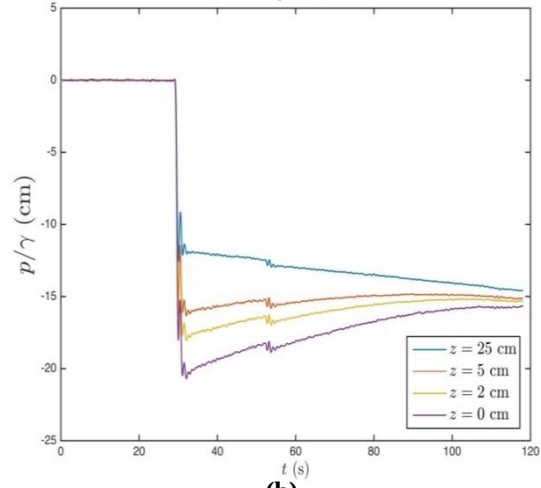
(c)

Şekil C.21 : Deney No: 1301, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı
 $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, **borulanma var.**

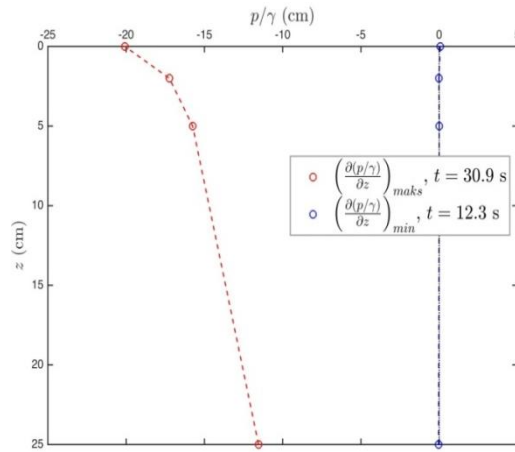
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



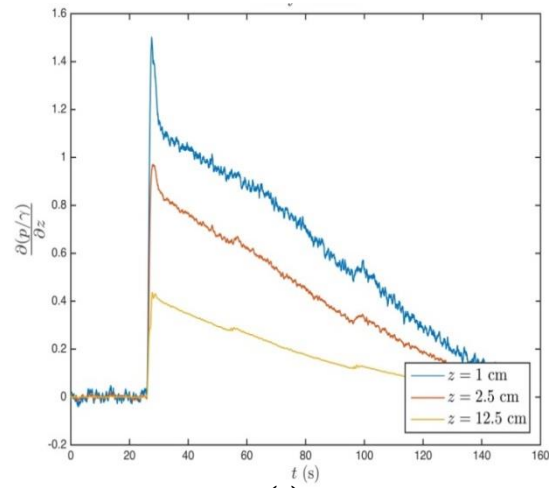
(b)



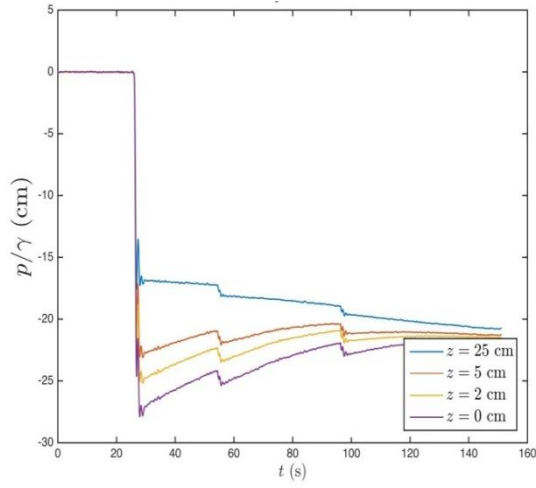
(c)

Şekil C.22 : Deney No: 1302, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, borulanma var.

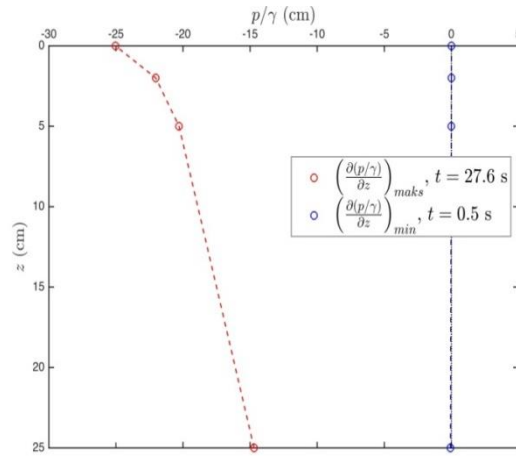
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



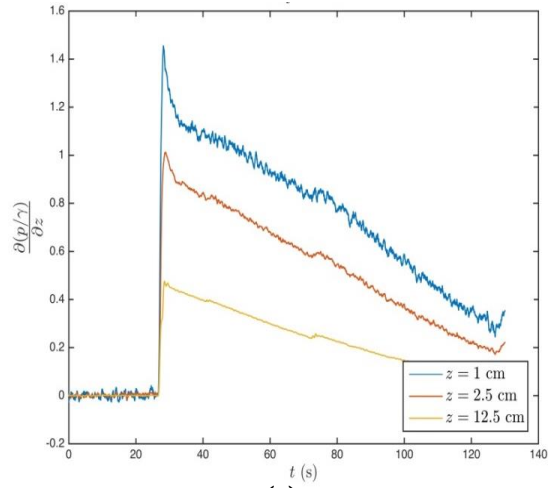
(b)



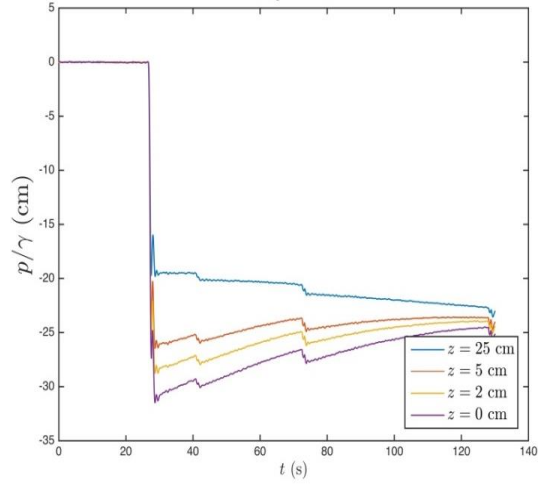
(c)

Şekil C.23 : Deney No: 1303, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, **borulanma var.**

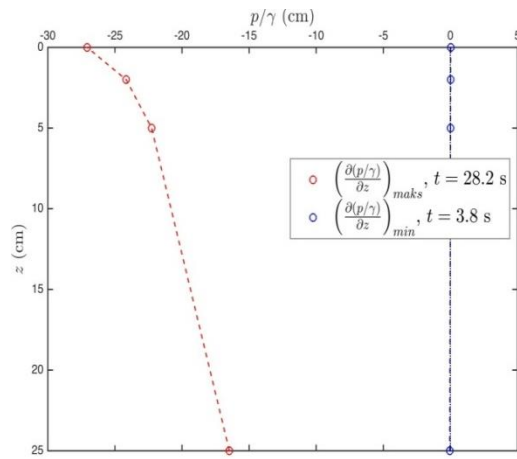
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



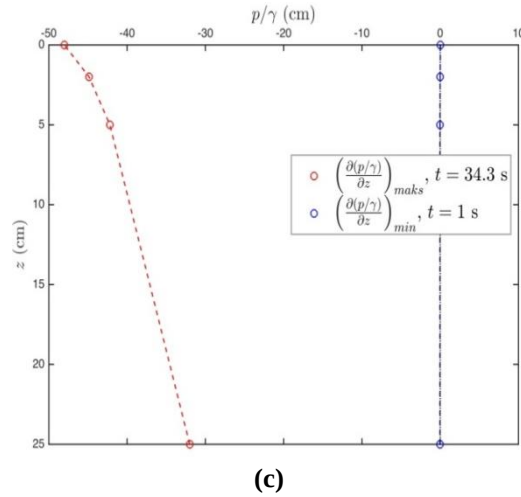
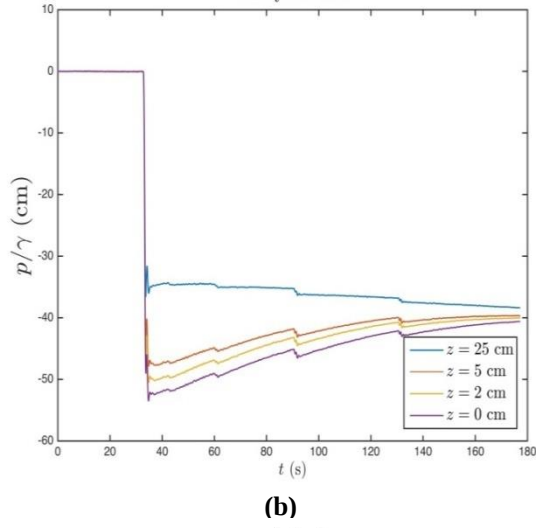
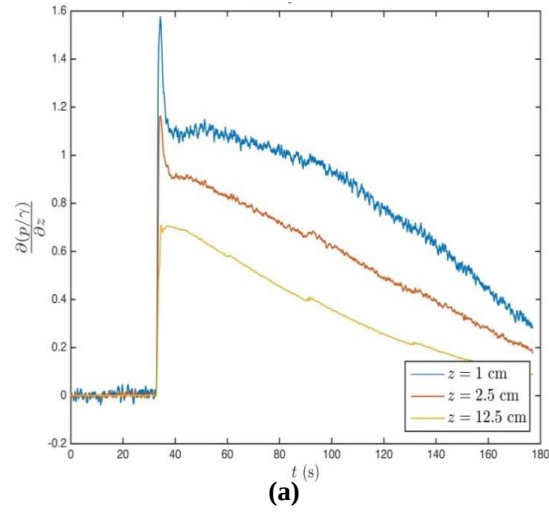
(b)



(c)

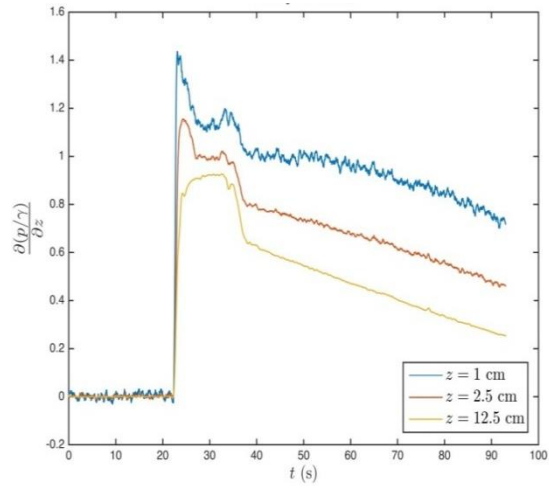
Şekil C.24 : Deney No: 1304, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,50$, borulanma var.

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.

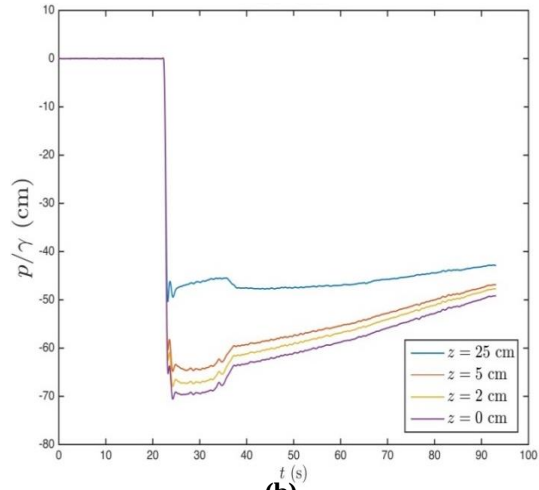


Şekil C.25 : Deney No: 1305, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,75$, **borulanma var.**

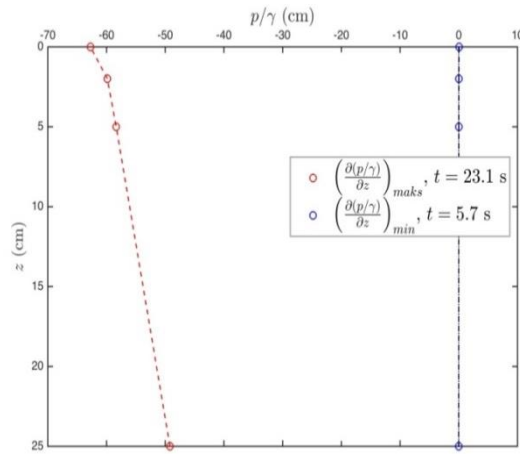
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



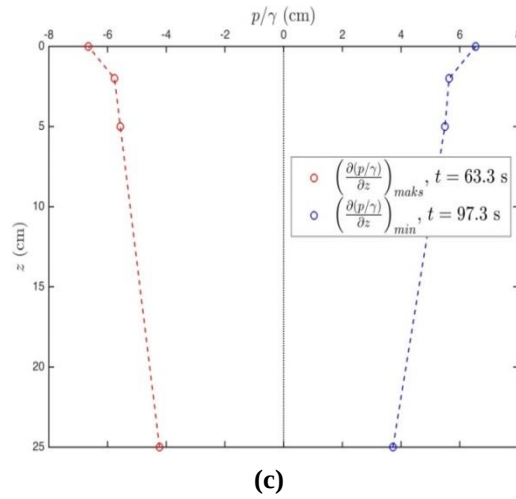
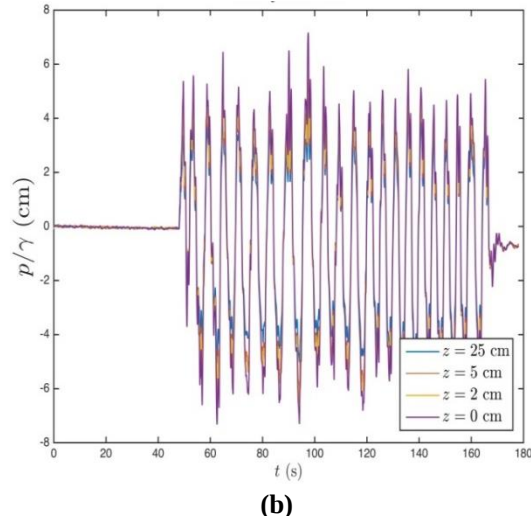
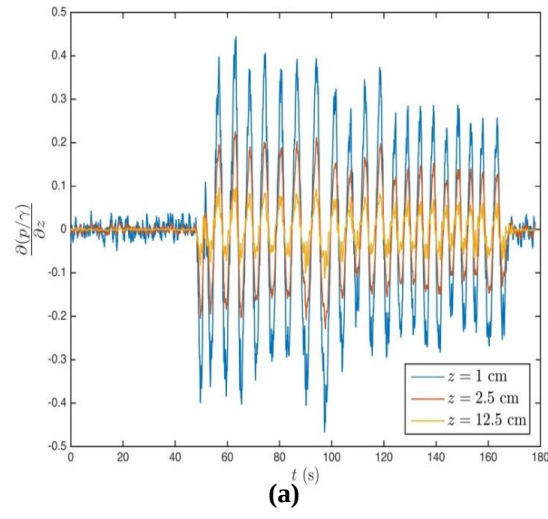
(b)



(c)

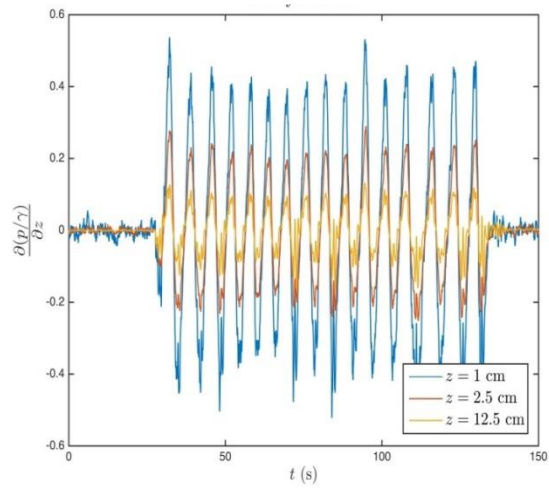
Şekil C.26 : Deney No: 1306, malzeme: ince kum, deney tipi: düşen basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 1,00$, borulanma var.

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.

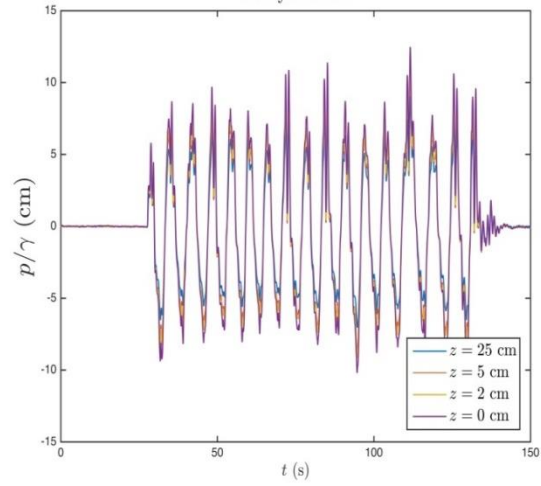


Şekil C.27 : Deney No: 1401, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,15$, $T (s) = 8$, **borulanma var.**

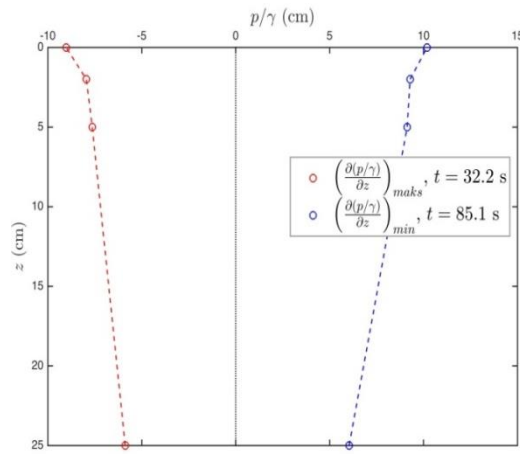
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi **(b)** Basınç-zaman serisi **(c)** Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



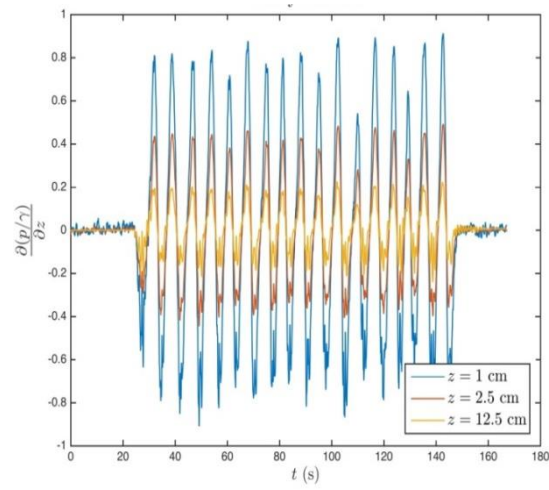
(b)



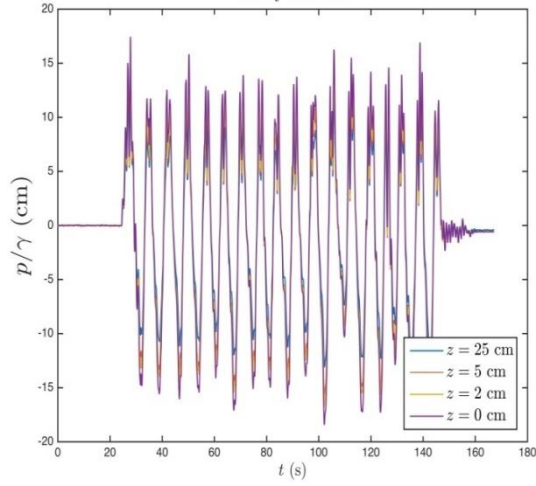
(c)

Şekil C.28 : Deney No: 1402, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,20$, $T (s) = 8$, **borulanma var.**

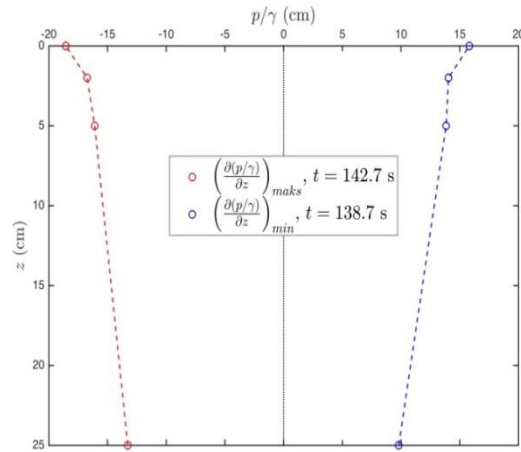
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



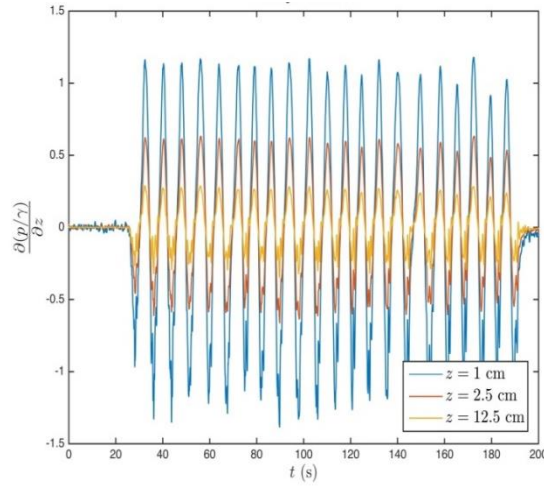
(b)



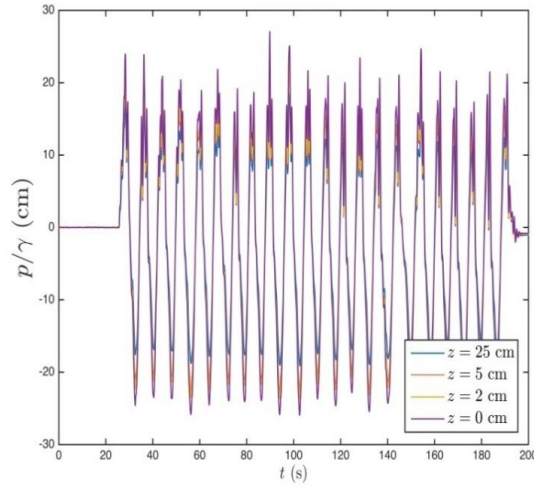
(c)

Şekil C.29 : Deney No: 1403, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,30$, $T (s) = 8$, borulanma var.

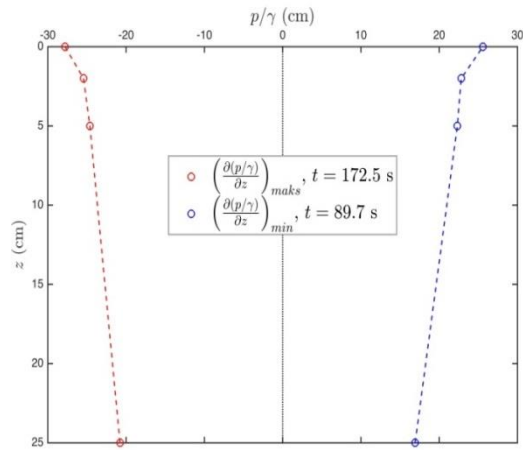
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.



(a)



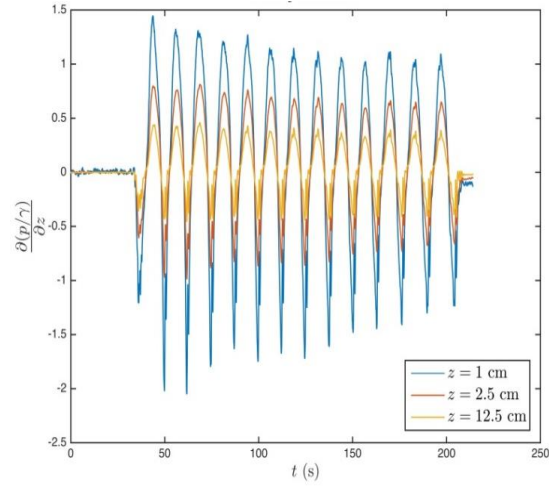
(b)



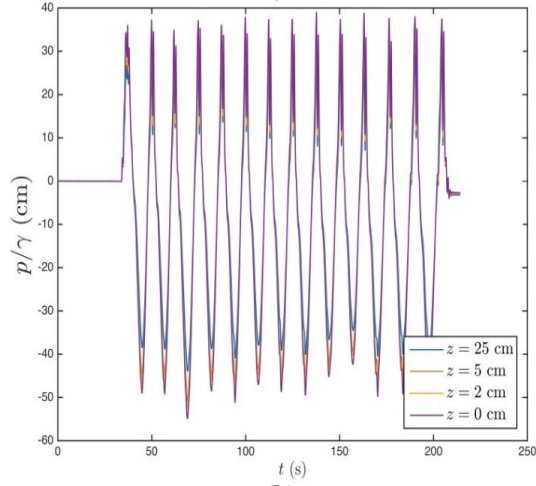
(c)

Şekil C.30 : Deney No: 1404, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,40$, $T (s) = 8$, borulanma var.

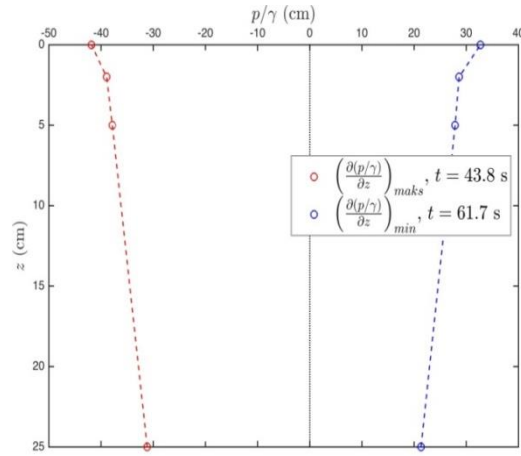
(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profili değişimi.



(a)



(b)



(c)

Şekil C.31 : Deney No: 1405, malzeme: ince kum, deney tipi: salınımlı basınç gradyanı $\alpha(^{\circ}) = 34,0$, $\Delta H_{maks} (m) = 0,65$, $T (s) = 12$, **borulanma var.**

(a) Hidrolik gradyan zaman serisi (b) Basınç-zaman serisi (c) Derinlik-basınç profil değişimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Rıza Evren KILCI
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1979
E-posta : kilcievren@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2005, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Kirca, V.S.O., **Kilci, E.**, (2018). “*Mechanism of steady unsteady piping in coastal and hydraulic structures with a sloped face.*” Water, 2018, 10, 1757.
- **Kilci, E.**, Kirca, V.S.O., (2018). “*A Modified Piping Criterion for Determination of Effective Filter Thickness under Revetment Slopes*” 13th International Congress on Advances in Civil Engineering 12-14 September 2018, İzmir/Turkey
- Kirca, V.S.O., Caglar, B., Bagci, T., **Kilci, E.**, Kabdasli, M.S., (2017). “*Use of steel slag in rubble-mound marina structures*”, in proc. of 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS’17), Karabuk, Turkey, 3-5 April 2017; Karabuk University, 2017,307-313

