

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PREFABRİK DÜŞEY DRENLER (PDD) İLE ZEMİN
İYİLEŞTİRME YÖNTEMİNDE PREFABRİK DÜŞEY
DRENİN PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN
BELİRLENMESİ**

İnşaat Yük. Müh. Tayfun ŞENGÜL

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 23 Aralık 2010
Tez Danışmanı : Prof.Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı : Doç.Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İÜ)
Prof.Dr. Tuncer EDİL (Wisconsin-Madison U.,USA)
Prof.Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)
Prof.Dr. Erol GÜLER (BÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1 Model Deney Çalışmaları	7
2.2 Arazi Uygulamaları	18
2.3 Nümerik Çalışmalar.....	21
3. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	27
3.1 Kullanılan Zemin Türlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi	27
3.1.1 İndeks Özellikleri Deneyleri.....	27
3.1.2 Mukavemet Deneyleri	28
3.1.3 Konsolidasyon Deneyleri.....	29
3.1.4 Permeabilite Deneyleri	30
3.2 Kullanılan PDD Türlerinin Özellikleri	32
4. ÖRSELENME BÖLGESİ OLUŞUMU VE ETKİSİ.....	34
4.1 Model Deney Sistemi	34
4.2 Deney Yöntemi	36
4.3 Deneysel Bulgular ve Değerlendirme.....	38
4.3.1 PDD'nin Yerleştirilmesi Sırasında Zemindeki Boşluk Suyu Basıncının Değişimi.....	41
5. PREFABRİK DÜŞEY DRENLERİN BOŞALTMA KAPASİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ	51
5.1 Model Deney Sistemi	53
5.2 Deney Numunesinin Hazırlanması	56
5.3 Deney Yöntemi	57
5.4 Boşaltma Kapasitesini Etkileyen Faktörler	59
5.4.1 Hidrolik Eğim	59
5.4.2 Eksenel Şekil Değiştirme Yüzdesi	62
5.4.3 Yanal Gerilme ve PDD'nin Çekirdek Bölgesinin Kirlenmesi Etkisi	66

5.4.4	Zemin Türü	68
5.4.5	Prefabrik Düşey Drenin Yapısı ve Bükülmeye Karşı Direnci.....	71
5.4.6	PDD'lerin Deformasyonu	73
5.5	Drenajsız Kayma Dayanımı ve Su Muhtevasının, Derinlikle ve PDD'den Uzaklıkla Değişiminin Belirlenmesi.....	75
6.	ARAZİ UYGULAMALARI BENZEŞİMLİ MODEL DENEYLERİ.....	77
6.1	Model Deney Sistemi	77
6.2	Deney Numunesinin Hazırlanması	77
6.3	Deney Yöntemi	78
6.4	Arazi Model Deney Sonuçları ve Değerlendirme	80
6.4.1	Arazi model deneylerinde drenajsız kayma dayanımı ve su muhtevasının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişiminin belirlenmesi.....	86
7.	MODEL DENEY DAVRANIŞININ ANALİTİK ÇÖZÜMLER VE SONLU ELEMANLAR MODELİ İLE ANALİZİ.....	89
7.1	Analitik Çözümler Ve Nümerik Analizlerde Kullanılacak Eşdeğer PDD Çapının Belirlenmesi	89
7.2	Model Deney Davranışının Analitik Çözümler İle Analizi.....	91
7.2.1	Sadece Yanal Drenaj Durumunda Ortalama Konsolidasyon Derecesi.....	91
7.2.2	Sadece Düşey Drenaj Durumunda Ortalama Konsolidasyon Derecesi	94
7.2.3	Analitik Çözüm Ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	95
7.3	Model Deney Davranışının Sonlu Elemanlar Modeli İle Analizi	98
7.3.1	Soft Soil Bünye Modeli	98
7.3.2	Nümerik Analizlerde Kullanılacak Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi	101
7.3.3	Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	103
7.3.4	Sonlu Elemanlar Hesap Aşamaları	103
7.3.5	Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	104
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
8.1	Örselenme Bölgesi Oluşumu ve Etkisi	109
8.2	PDD'nin Deformasyonunun Boşaltma Kapasitesine Etkisi	112
8.3	Arazi Model Deneyi Sonuçları	115
8.4	Analitik Çözüm ve Sonlu Eleman Analizleri Sonuçları	115
	KAYNAKLAR.....	118
	ÖZGEÇMİŞ.....	123

SİMGE LİSTESİ

a_v	Sıkışma Katsayısı
c	Kohezyon
c_u	Drenajsız Kayma Dayanımı
C_c	Sıkışma İndisi
C_s	Şişme İndisi
c_v	Konsolidasyon Katsayısı
$d_{eş}$	Eşdeğer Mandrel Çapı
$d_{örselenme}$	Örselenmiş Zeminin Çapı
e_0	Başlangıç Boşluk Oranı
G_s	Özgül Yoğunluk
i	Hidrolik Eğim
k	Permeabilite Katsayısı
k_v	Düşey Permeabilite
$k_{doğal}$	Zeminin Doğal Permeabilitesi
$k_{örselenme}$	Örselenmiş Zeminin Permeabilitesi
K_0^{NC}	Normal Konsolide Durum İçin Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
LL	Likit Limit
M	K_0^{NC} Parametresi
m_v	Hacimsel Sıkışma Katsayısı
n	Porozite
O_{95}	PDD Gözenek Açıklığı
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite İndisi
$\%R_q$	Boşaltma Kapasitesindeki Azalma Yüzdesi
S	Suya Doygunluk Derecesi
$Q_{çıkan}$	Birim Zamanda Çıkan Su Hacmi
q_w	Boşaltma Kapasitesi
ν_{ur}	Yükleme/Boşaltma İçin Poisson Oranı
w	Su Muhtevası
$w_{doğal}$	Doğal Su Muhtevası
$\%\epsilon_v$	Eksenel Şekil Değiştirme Yüzdesi
γ	Zeminin Birim Hacim Ağırlığı
γ_k	Zeminin Kuru Birim Hacim Ağırlığı
γ_d	Zeminin Suya Doygun Birim Hacim Ağırlığı
\emptyset	İçsel Sürtünme Açısı
\emptyset'	Efektif İçsel Sürtünme Açısı
λ^*	Modifiye Sıkışma İndisi
κ^*	Modifiye Şişme İndisi
ψ	Dilatansi Açısı

KISALTMA LİSTESİ

AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı
ASTM	American Society For Testing and Materials
CAÇ	Craney Adası Çökelleri
CPT	Cone Penetration Test
CU	Consolidated Undrained
PDD	Prefabrik Düşey Dren
CEE	Civil and Environmental Engineering
UWM	University of Wisconsin-Madison

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Büyük boyutlu model deney sisteminin şematik görünümü (Sharma ve Xiao, 2000).....	7
Şekil 2.2	Rowe hücresi deney düzeneği ve donanım detayı (Bo vd., 2003).....	8
Şekil 2.3	Aşırı yumuşak zemin içeren çamur yatağı (Chu vd., 2006).....	11
Şekil 2.4	Çamur havuzundaki zemine ait dane boyutu dağılım eğrisi (Chu vd., 2006).....	12
Şekil 2.5	Büyük boyutlu konsolidasyon tankı (ölçekler mm'dir) (Chu vd., 2006).....	14
Şekil 2.6	Model deneyde 110 kPa gerilme altında ölçülen oturma-zaman ilişkisi (Chu vd., 2006).....	14
Şekil 2.7	100 kPa düşey gerilme altında PWP1 ile ölçülen boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Chu vd., 2006).....	15
Şekil 2.8	Bükülmüş drenin profili ve zemindeki su muhtevası dağılımı a) Drene dik yükseklik boyunca b) Dren yüzeyi yüksekliği boyunca (Chu vd., 2006).....	16
Şekil 2.9	Konsolidasyon öncesi ve sonrasında belirlenen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması (Chu vd., 2006).....	17
Şekil 2.10	(a) İdealize edilmiş alan: Geçiş ve sıvanma bölgelerini içeren bir birim hücre (b) Farklı durumlar için hidrolik iletkenliğin dren merkezinden uzaklık ile değişimi (Basu vd., 2006).....	24
Şekil 3.1	Craney Adası çökelleri ve kaolin kili için belirlenen elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçları.....	28
Şekil 3.2	Craney Adası çökellerinin farklı deney yöntemleriyle belirlenen hidrolik iletkenlik değerinin boşluk oranıyla değişimi.....	31
Şekil 3.3	Kaolin kilinin farklı deney yöntemleriyle belirlenen hidrolik iletkenlik değerinin boşluk oranıyla değişimi.....	32
Şekil 3.4	Kullanılan farklı Prefabrik Düşey Dren (PDD) tipleri.....	33
Şekil 4.1	Örselenme bölgesi model deney sisteminin şematik görünümü (Geo. Lab. CEE UWM).....	35
Şekil 4.2	Örselenme bölgesi model deney sistemi (Geo. Lab. CEE UWM).....	35
Şekil 4.3	Örselenme bölgesi model deney sisteminde PDD'nin zemine yerleştirilmesinde kullanılan mandrel.....	37
Şekil 4.4	Örselenme bölgesi model deney sisteminde PDD'nin sabit hızla zemine yerleştirilmesi yöntemi.....	38
Şekil 4.5	Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan deneylerde örselenmemiş zeminde PDD seviyesinden değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	40
Şekil 4.6	Kaolin kili kullanılarak yapılan deneyde örselenmemiş zeminde PDD seviyesinden değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	40
Şekil 4.7	PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında PDD'den değişen uzaklıklarda artık boşluk suyu basıncı değişimi a) Craney Adası çökelleri Deney I b) Kaolin.....	42
Şekil 4.8	Örselenmiş zeminde 25kPa'lık sabit gerilme altında zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi.....	43
Şekil 4.9	Craney Adası çökelleri Deney I de örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	44
Şekil 4.10	Craney Adası çökelleri Deney II de örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	45
Şekil 4.11	Kaolin kili kullanılan deneyde örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	45
Şekil 4.12	Değişik yük kademeleri için zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi.....	47
Şekil 4.13	Örselenmiş zemine uygulanan değişik konsolidasyon gerilmelerinde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri.....	47
Şekil 5.1	Büyük boyutlu model deney sisteminin şematik görünümü (Geo. Lab. CEE.....	

	UWM).....	54
Şekil 5.2	Büyük boyutlu model deney sistemi (Geo. Lab. CEE. UWM)	55
Şekil 5.3	Büyük boyutlu model deney sisteminde boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarının şematik görünümü	56
Şekil 5.4	Silindirik büyük boyutlu model deneyde PDD'nin zemine yerleştirilmesi yöntemi	58
Şekil 5.5	PDD'den yatay ve düşey doğrultuda değişik uzaklıklarda drenajsız kayma dayanımının belirlendiği noktalar.....	59
Şekil 5.6	Farklı PDD türleri için, drenedeki deformasyona ve hidrolik eğime bağlı olarak PDD'nin boşaltma kapasitesinin değişimi.....	61
Şekil 5.7	Farklı PDD türleri için, zeminin konsolidasyonu sırasında PDD'de meydana gelen eksenel şekil değiştirme yüzdesine bağlı olarak boşaltma kapasitesinin değişimi	63
Şekil 5.8	Farklı PDD türleri için, $\% \varepsilon_v$ bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi	65
Şekil 5.9	Deformasyondan bağımsız dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla ve PDD'ye etki eden yanıl gerilme etkisiyle boşaltma kapasitesindeki değişim.....	67
Şekil 5.10	PDD'nin çekirdek bölgesindeki kirlenme veya tıkanma etkisi	68
Şekil 5.11	Farklı zemin türlerinde kullanılan Amerdrain 407'nin drenedeki deformasyona bağlı olarak boşaltma kapasitesinin değişimi	69
Şekil 5.12	Farklı zemin türlerinde kullanılan Amerdrain 407'nin drenedeki deformasyona bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi.....	69
Şekil 5.13	Alidrain'de yanıl gerilme etkisiyle çekirdek bölgesindeki çivilerin etrafını saran geotekstil filtre malzemesinde oluşan zımbalama etkisi.....	73
Şekil 5.14	Farklı zeminlerde kullanılan farklı PDD türleri için deformasyon biçimleri	74
Şekil 5.15	Kullanılan PDD türlerine bağlı olarak farklı zeminlerde su muhtevasının ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi	76
Şekil 6.1	Arazi uygulamalarında PDD'nin zemine yerleştirilme yöntemi	79
Şekil 6.2	Arazi model deneyinde PDD'nin zemine yerleştirilmesi yöntemi	80
Şekil 6.3	Zemine uygulanan değişik yük kademelerinin zamanla ilişkisi	81
Şekil 6.4	Değişik yük kademelerinde zeminde meydana gelen deplasman-zaman ilişkisi ..	82
Şekil 6.5	Değişik yük kademelerinde zeminde meydana gelen eksenel şekil değiştirme yüzdesi-zaman ilişkisi	83
Şekil 6.6	Değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında, deplasmana bağlı olarak hesaplanan hacim değişimi ve zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi	84
Şekil 6.7	Amerdrain 407 kullanılan deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi	84
Şekil 6.8	Mebra dren 7407 kullanılan deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi	85
Şekil 6.9	Her iki model deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde aynı boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarında ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi.....	86
Şekil 6.10	Amerdrain 407'nin kullanıldığı model deney sonunda zeminin su muhtevası ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi.....	87
Şekil 6.11	Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı model deney sonunda zeminin su muhtevası ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi.....	88

Şekil 7.1	Tipik bir PDD'nin şematik görünümü	90
Şekil 7.2	Kum drenin şematik görünümü	92
Şekil 7.3	Sürşarj yükünün uygulanma şekilleri	93
Şekil 7.4	Uv 'nin Tv ve Tc ile değişimi (Olson, 1977)	95
Şekil 7.5	Analitik çözümlerde farklı sıvanma etkisi durumları için hesaplanan deplasman-zaman ilişkisi.....	97
Şekil 7.6	Konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla sıvanma etkisinin değişken olduğu durum için hesaplanan deplasman-zaman ilişkisi	98
Şekil 7.7	$p':q$ düzleminde Soft-Soil Modelin akma yüzeyi (Brinkgereve, 1994).....	100
Şekil 7.8	Asal gerilme uzayında akma konturları (Brinkgereve,1994)	101
Şekil 7.9	CAÇ için farklı deney yöntemlerinde e-k ilişkisi	102
Şekil 7.10	CAÇ ile gerçekleştirilen model deneyde e-k ilişkisi	102
Şekil 7.11	Sonlu elemanlar modelinin geometrisi	103
Şekil 7.12	Model deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre değişik konsolidasyon adımlarında zeminde meydana gelen deplasmanların zamanla değişimi	105
Şekil 7.13	Model deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre PDD'den belirli bir uzaklıkta boşluk suyu basıncının zamanla değişimi.....	105
Şekil 7.14	Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre analiz adımları sonunda aktif boşluk suyu basıncının derinlikle ve drenden uzaklıkla değişimi.....	106
Şekil 7.15	Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre analiz adımları sonunda aktif boşluk suyu basıncının 20 cm yükseklikte PDD'den uzaklıkla değişimi	107

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Çamur yatağındaki zemine ait diğer fiziksel özellikler (Chu vd., 2006)	12
Çizelge 3.1	İndeks Özellikleri Deneyleri Sonuçları ve Zemin Sınıflandırılması.....	27
Çizelge 3.2	Konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç ve veyn deneyleri sonuçları	29
Çizelge 3.3	Konsolidasyon (ödometre) deneyleri sonuçları.....	29
Çizelge 3.4	Esnek duvarlı permeametre deneyleri sonucunda belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerinin boşluk oranıyla değişimi.....	31
Çizelge 3.5	PDD türlerinin üreticileri tarafından belirtilen özellikleri.....	32
Çizelge 4.1	Craney Adası çökelleri ve kaolin'in fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 4.2	PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen örselenme etkisinin genişliği ve bu örselenme bölgelerindeki hidrolik iletkenlik değerlerinin değişimi.....	46
Çizelge 4.3	Değişik konsolidasyon gerilmelerinde hidrolik iletkenliğin örselenme bölgesi ve örselenmemiş bölge için değişimi.....	48
Çizelge 5.1	Deneylerde kullanılan PDD'lerin ASTM D1388 deney yöntemine göre belirlenmiş bükülmeye karşı direnç değerleri	71
Çizelge 6.1	Deneylerde kullanılan Craney Adası Çökellerinin fiziksel özellikleri.....	81
Çizelge 7.1	PDD'lerin eşdeğer çapının belirlenmesinde kullanılan eşitlikler.....	89
Çizelge 7.2	Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak zemin parametreleri	101

ÖNSÖZ

Prefabrik Düşey Dren'li (PDD) ön yükleme ile zemin iyileştirme yönteminde PDD'lerin performansını etkileyen önemli faktörlerden PDD'nin bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen örselenme bölgesinin oluşumu, bu örselenmiş bölgedeki zeminin özelliklerinin değişimi, Hidrolik eğim, PDD'nin deformasyonu, PDD'ye etkiyen yanal gerilme ve PDD'nin çekirdek bölgesinin kirlenmesi, PDD'nin uygulandığı zemin türü, PDD'nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörlerin PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerine etkileri Wisconsin-Madison Üniversitesi'nde tasarlanmış olan iki ayrı model deney sistemi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca iki farklı PDD türü kullanılarak arazi benzeşimli model deneyi yapılmış farklı PDD türlerinin zeminin konsolidasyon davranışına etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra bu model deney sonuçları analitik çözüm ve Plaxis V9.2 sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Doktora çalışmam süresince sabırla tecrübelerini ve bilgisini aktaran, yardımlarını esirgemeyen ve desteğini her zaman hissettiğim çok kıymetli hocam Prof.Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Doktora tez konumun belirlenmesinde ve bu süreçte yol gösteren çok değerli hocam Doç.Dr. Mehmet BERİLGİN'e, kıymetli hocalarımla tavsiyesiyle Wisconsin Üniversitesi-Madison'da araştırma yapma fırsatını veren, çalışmalarım süresince her türlü imkanı sağlayan, değerli fikirleriyle yol gösteren çok değerli hocam Prof.Dr. Tuncer B. EDİL'e, moral ve desteklerini her zaman üzerimde hissettiğim çok kıymetli hocalarımla Prof.Dr. Sönmez YILDIRIM ve Prof.Dr. Mustafa YILDIRIM'a, göstermiş olduğu yakın ilgi, destek ve nezaketi için çok kıymetli hocam Prof.Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Doktora çalışmam süresince yardıma ihtiyacım olduğu her dönemde yanımda olan çalışma arkadaşlarımla ve dostlarımla Sayın Yrd.Doç.Dr. Pelin T. ÖZENER, Arş.Gör.Dr. Murat TONAROĞLU, Öğr.Gör.Dr. Cem AKGÜNER, Arş.Gör. Murat E. SELÇUK, Yrd.Doç.Dr. Niyazi Uğur TERZİ, Dr.İnş.Müh. Doğan ÇETİN'e ve Arş.Gör. Çiğdem ÖZÇELİK'e, Wisconsin Üniversitesi-Madison'da deneysel çalışmalarım süresince yardımları ve deney sistemleriyle ilgili olarak teknik konulardaki tavsiyeleri için laboratuvar sorumlusu Sayın Xiaodong WANG'a, yine aynı dönemde çalışmalarımı yakından takip eden, deneylerde kullanılmak üzere malzeme temin eden ve PDD'lerle zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı Indiana projesinde bulunma fırsatı veren Nilex İnşaat'a ve yetkilisi Sayın Jimmy FOSTER'a çok teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca sonsuz sevgi ve desteklerini hep arkamda hissettiğim fedakar aileme varlıkları için teşekkürlerimi bildirmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

PREFABRİK DÜŞEY DRENLER (PDD) İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMİNDE PREFABRİK DÜŞEY DRENİN PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ

Prefabrik Düşey Dren’li (PDD) ön yükleme ile zemin iyileştirme yönteminde proje süresi boyunca PDD’lerin performansını sürdürebilmesi, uygulanan zemin iyileştirme yönteminin hedeflenen sonuçlara ulaşması için çok önemlidir. Bu nedenle PDD’nin performansını etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve PDD’ler kullanılarak önyükleme ile zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı projelerin tasarımında bu belirlenen faktörlerin göz önünde bulundurulmasının, tasarımın ileriye dönük başarısını etkileyeceğine inanılmaktadır.

Bu tez kapsamında ön yükleme ile zemin iyileştirme yönteminde PDD’nin performansını etkileyen faktörlerden, PDD’nin bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen örselenme bölgesinin oluşumu ve bu örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğindeki değişim Wisconsin-Madison Üniversitesi’nde tasarlanmış olan, büyük boyutlu “örselenme bölgesi model deney sistemi” kullanılarak araştırılmıştır. İki farklı zemin türünde (Craney Adası çökelleri ve Kaolin) elde edilen sonuçlara göre, örselenme bölgesinin sıvanma ve geçiş bölgesi olarak iki farklı bölgeden oluştuğu, ayrıca bu bölgelerdeki zeminin hidrolik iletkenliğinin PDD’ye yaklaştıkça lineer olarak azaldığı belirlenmiştir. Örselenmiş bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zemine oranı olarak tanımlanan zemindeki örselenme derecesinin, farklı zemin türlerinde sıvanma bölgesi için 0.32-0.50 arasında, geçiş bölgesi için ise 0.57-0.82 arasında değiştiği belirlenmiştir. Sıvanma bölgesinin genişliğinin, zemin türlerine bağlı olarak eşdeğer mandrel çapının 2.3-3.3 katı arasında, geçiş bölgesinin genişliğinin ise bu değer 5.2-7.3 katı arasında değiştiği belirlenmiştir.

PDD’lerin performansını etkileyen önemli faktörlerden bir diğeri de PDD’nin boşaltma kapasitesidir. Bu nedenle dört farklı özellikteki PDD türü için, uygulanan hidrolik eğim, PDD’ye etkiyen yanıl gerilme, PDD’nin uygulandığı zemin cinsi, PDD’nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörler dikkate alınarak, zeminin konsolidasyonu sırasında oluşan PDD’nin deformasyonu ve çekirdek bölgesinin kirlenmesinin PDD’nin boşaltma kapasitesi üzerine etkileri Wisconsin-Madison Üniversitesi’nde tasarlanmış olan büyük boyutlu “boşaltma kapasitesi model deney sistemi” kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, genel olarak başlangıçta düşük deformasyon seviyelerinde yüksek boşaltma kapasitesine sahip PDD’lerin boşaltma kapasitesi, bu çalışmada uygulanan en düşük ve en yüksek hidrolik eğim seviyeleri aralığında (0.10-1.00) hidrolik eğimin artmasıyla önemli bir miktarda (%57’ye kadar) azalırken, yüksek deformasyon seviyelerinde oldukça düşük boşaltma kapasitesine sahip olan PDD’lerde boşaltma kapasitesi üzerinde hidrolik eğimin etkisi ihmal edilebilir mertebelere düşmektedir. Zeminin konsolidasyonu sırasında farklı PDD türlerinde meydana gelen deformasyonunun boşaltma kapasitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde, PDD’lerde %41.5 mertebesinde deformasyon meydana geldiğinde boşaltma kapasitesinin %68-%100 arasında azalabileceği, etkiyen yanıl gerilmeye bağlı olarak ise, yanıl gerilmenin 25 kPa değerinden 200 kPa’ya yükseltilmesi durumunda boşaltma kapasitesinde yaklaşık %40 azalma olduğu belirlenmiştir. PDD’nin çekirdek bölgesinin kirlenmesi, PDD’de meydana gelen deformasyon biçimleri, PDD’nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörlerin de PDD’nin uygulandığı zemin cinsine göre boşaltma kapasitesi üzerinde değişik derecelerde etkileri olduğu gözlenmiştir.

Deneyisel araştırmalar kapsamında ayrıca iki farklı PDD türünün zeminin konsolidasyon

davranışına olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla, boşaltma kapasitesi model deney sistemi kullanılarak “arazi uygulamaları benzeşimli model yükleme deneyleri” yapılmıştır. Bu model deneyler ile PDD kullanılan aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyon davranışı, aşırı yumuşak zeminlerde kullanılacak PDD’lerin konsolidasyonu hızlandırma verimliliği, PDD’nin zemine yerleştirilmesi sırasında ve daha sonraki aşamalarda zemindeki artık boşluk suyu basıncının değişimi incelenmiştir. Bu model deneyde gözlenen davranışının analizi, Plaxis V9.2 sonlu elemanlar programıyla ve klasik analitik çözümlerle gerçekleştirilmiş, her iki yöntemle elde edilen analiz sonuçlarının model deney davranışı ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların, yumuşak zeminlerde düşey drenler kullanılarak yapılan ön yükleme ile zemin iyileştirilmesi yöntemine ilişkin literatürde bulunan dolaylı tahminlerle veya ölçüme dayalı deneysel araştırma sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Prefabrik düşey dren, sıvanma bölgesi, geçiş bölgesi, örselenmiş bölge, sıvanma etkisi model deneyi, boşaltma kapasitesi model deney sistemi, PDD’nin boşaltma kapasitesi, arazi model deneyi, sonlu elemanlar analizleri, Craney Adası çökelleri, kaolin.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF THE FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF PREFABRICATED VERTICAL DRAINS IN GROUND IMPROVEMENT WITH PREFABRICATED VERTICAL DRAINS

It is crucial that the prefabricated vertical drains (PVDs) maintain their performance within the duration of a project in order to provide their expected goal as a soil improvement technique. It is believed that the success of designs based on soil improvement techniques involving PVDs is based on determining the relevant factors affecting the performance of PVDs and considering these factors in the design.

Within this dissertation, the development of the disturbed zone in the soil during the insertion of the PVDs with a mandrel and the variation of the hydraulic conductivity within this zone is investigated with a large scale “smear zone model testing device” designed and built at the University of Wisconsin-Madison. It is determined that the disturbed zone consists of smear and transition zones, and that the hydraulic conductivity decreases linearly towards the PVD, based on results obtained from tests conducted on two different soils (Craney Island dredgings and kaolinite). The degree of disturbance for different soil types, which is defined as the ratio of the hydraulic conductivities in the disturbed and undisturbed zones, is found to vary between 0.32 and 0.50 in the smear zone, and between 0.57 and 0.82 in the transition zone. The width of the smear and transition zones for the two tested soils varied from 2.3 to 3.3 times and 5.2 to 7.3 times the equivalent mandrel diameter, respectively.

Another important factor affecting the performance of PVDs is their discharge capacity. “Discharge capacity model testing system” designed at the University of Wisconsin-Madison is used in the experimental investigations. The effect of factors such as, the hydraulic gradient, lateral stresses on a PVD, the type of soil in which PVDs are placed, the structure of PVDs and their flexural stiffness are investigated. Four different types of PVDs are used to investigate the effects of PVD deformation during the consolidation of soil and clogging of the core area on the discharge capacity of PVDs. The discharge capacity of PVDs, which is generally large at low deformations, decrease significantly (up to 57%) within the range of hydraulic gradients applied in this study (0.10 to 1.00). At large deformations, PVDs have a lower discharge capacity and the change in hydraulic gradient has a negligible effect on the discharge capacity. On the other hand experimental observations have shown that the deformations occurring during consolidation of soils have an important effect on the discharge capacity of PVDs. For the type of PVDs used, it is found that the discharge capacity decreases by 68% to 100% when PVDs deform by 41.5%. Furthermore, a 40% decrease in discharge capacity is observed when lateral stress is increased from 25 kPa to 200 kPa. Clogging of the core zone, deformed shapes that develop, the structure and resistance against buckling have varying effects on the discharge capacity of PVDs depending on the soil type.

The effect PVD type on soil consolidation behavior is investigated through “laboratory model loading tests simulating field conditions” using two different PVD’s utilizing the discharge capacity model testing system. The consolidation behavior of very soft soils with PVD applications, and efficiency of PVDs in increasing rate of consolidation, the excess pore pressure changes during and after PVD application are investigated with these model tests. The behavior observed during the model testing are analyzed both analytically and numerically with Plaxis V9.2 which is a software based on the finite element method. The results of these analyses are observed to be compatible with the model test behavior.

The results obtained from this research are also observed to be similar to results from indirect

estimations methods used for the soft soil improvement applications utilizing preloading/vertical drains or findings of other experimental research.

Keywords: Prefabricated vertical drains, smear zone, transition zone, disturbed zone, smear zone effect model testing, discharge capacity model testing system, discharge capacity of PVD, in-situ model testing, finite element analyses, Craney Island dredgings, kaolinite.

1. GİRİŞ

Prefabrik düşey drenler (PDD) kullanılarak uygulanan ön yükleme yöntemi, derin zemin tabakalarının iyileştirilmesinin gerekli olduğu projeler için zaman ve bütçe bakımından çok elverişli bir iyileştirme yöntemidir. Önyükleme tekniğinde düşey drenlerin kullanılmasındaki amaç konsolidasyon hızını arttırarak iyileşmenin gerçekleşme süresini kısaltmak, ileriye dönük olarak meydana gelecek muhtemel oturmaları azaltmak ve kayma mukavemetini arttırmaktır. Böylece, yüksek sıkışabilirliğe sahip killi zeminlerin konsolide edilmesi ve sıkışabilirliğinin azaltılmasıyla taşıma gücünün arttırılması sağlanabilmektedir.

Önyükleme tekniğinde düşey dren kullanımı yumuşak zeminlerin mukavemet kazanma hızını arttırmasının yanısıra belirli bir zaman içerisinde, istenilen oturma miktarına ulaşmak için gerekli olan ön yükleme malzemesini veya sürşarj miktarını da azaltmaktadırlar. Düşey drenlerin kullanılmaması durumunda dolgu malzemesinin yerleştirilmesi esnasında göçmeler olabilir ve yumuşak zeminlerin oturması uzun yıllar alabilir. Bu nedenlerle düşey drenli ön yükleme tekniğiyle derin yumuşak zemin tabakalarının iyileştirilmesi diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre oldukça ekonomik ve uygulanabilir bir yöntem olarak bilinmektedir.

Singapur'daki Doğu Changi ıslah projesinin bir parçası olarak 180 ha'lık bir çamur yatağının iyileştirilmesi (Chu vd. 2006), 1989 yılında Malezya Otoyol Kurumu tarafından Malezya Kuzey-Güney yolunun hafif kuzeyinde Muar kıyısında bir bölgenin iyileştirilmesi (Indraratna vd. 1994), Abraham Kuyperlaan Otoyolu, Amsterdam (Jansen ve Den Hoedt 1983), Bangkok Havaalanı, Tayland (Bergado vd. 2002), Changi Havaalanı, Singapur (Bo vd. 2003), Interstate 15 binası, Utah (Saye 2003), ve Haneda Havaalanı, Tokyo, Japonya (Morohoshi vd. 2007) gibi birçok projede yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi için PDD'ler kullanılmıştır.

Genelde, yumuşak kohezyonlu zeminler çok yüksek su muhtevasına sahip olmalarından dolayı yüksek boşluk oranına ($e > 1.5$), düşük hidrolik iletkenliğe ($k \leq 10^{-6} m/s$) ve düşük drenajsız kayma dayanımına sahiptirler. PDD'lerin kullanılması zemin içerisindeki drenaj yollarının yönünü düşeyden yanal (radyal) yöne doğru kısaltarak ve değiştirerek yumuşak zeminlerin birincil konsolidasyonunu hızlandırır. Herhangi bir iyileştirme yönteminin uygulanmadığı derin yumuşak killi zeminlerin ($\geq 10 m$) konsolidasyonu uzun yıllar sürebilirki bu inşa/yapı amaçları için uygulanamaz derecede uzun bir zamandır.

PDD'ler üçgen veya dörtgen yerleşim düzeninde kalın yumuşak zemin tabakaları içine yerleştirildiğinde, zemin içinde radyal yönde su akımı oluşturmak için drenaj sınırları gibi çalışırlar. Yatay hidrolik iletkenliğin düşey hidrolik iletkenliğine göre yüksek olduğu doğal

yumuşak kil tabakalarında PDD'lerin kullanılması zeminin konsolidasyonu sırasında zeminde düşey akıştan çok ağırlıklı olarak yatay akış oluşmasını ve zeminlere göre çok büyük drenaj kapasitesine sahip ($10 - 10^4 kat$) PDD'lerde suyun çekirdek bölgesinde serbest bir şekilde akmasını sağlarlar.

PDD'lerin performansı genellikle arazi uygulamaları ve tasarım kriterlerine dayanan yumuşak killerdeki konsolidasyon davranışına göre değerlendirilir. Arazi uygulamalarında PDD'lerin zemine yerleştirilmesinden başka boşluk suyu basıncı ve arazi oturma ölçümleri yapılmaktadır. Boşluk suyu basıncı ölçümleri, PDD'lerin kullanılmasıyla ulaşılan konsolidasyon oranını doğrulamak için en etkili yoldur (Hansbo 2004). Bununla birlikte boşluk suyu basıncı ölçüm verileri PDD'lerle ilişkili piezometrelerin yerlerinin belirsizliği gibi bazı nedenlerden dolayı yanıltıcı olabilmektedir (Erikson vd. 2000).

PDD'ler arazide zemine çelik bir mandrel kullanılarak yerleştirilebilmektedir. Bu nedenle çelik mandrelin zemine itilmesi ve daha sonra zeminden çıkarılması sırasında etrafındaki zeminde bir örselenmeye (smear zone) sebep olduğu, bu örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğine göre önemli bir miktarda düşük olduğu, bu nedenle zeminin konsolidasyon sürecini yavaşlattığı (smear effect) bilinmesine rağmen örselenmiş bölgedeki zeminin özellikleri ve genişliği hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

PDD'lerle zemin iyileştirme yönteminin tasarım kalitesi, iyileştirilmesi yapılacak zemine ait geoteknik bilgiye, kullanılacak PDD tipinin seçimine, seçilen PDD türünün boşaltma kapasitesine, PDD'nin konsolidasyon süresince meydana gelecek deformasyonlara karşı direncine, konsolidasyon süresince uzun dönemde PDD'nin performans özelliklerine ve PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında oluşan örselenme bölgesinde zemin özelliklerinin ne şekilde değiştiğinin bilinmesine bağlıdır.

Geoteknik özellikler ve PDD'nin tasarımı için gerekli olan PDD performans verileri ana belirsizliklerdir (Holtz vd. 1991, Bo vd. 2003). Yumuşak zeminlerin konsolidasyon katsayısı zemin özellikleri yanında gerilme durumu ve aşırı konsolidasyon oranı gibi birkaç faktörden etkilenir (Bo vd. 2003).

Konsolidasyon süresi boyunca özellikle de büyük konsolidasyon oturmalarının meydana geleceği yerlerde PDD'nin boşaltma kapasitesinde meydana gelecek değişimin tahmin edilmesi güçtür (Rixner vd. 1986; Aboshi vd. 2001; Bo vd. 2003). Dayanıklı bir PDD'nin birincil konsolidasyon süresince tasarım performansını koruması gerekir. Bununla birlikte

fiziksel zorlamalar, kimyasal ve biyolojik etmenler tarafından etkilenen PDD'nin uzun süreli performansı hakkında çok az bilgi vardır (Holtz vd. 1991; Chai vd. 2004).

PDD'nin boşaltma kapasitesi, PDD'nin deformasyonuna, yanal gerilmelere, siltlenme etkisine, hidrolik eğime ve PDD'nin kriplene deformasyonuna bağlı olarak azalabilmektedir. Büyük konsolidasyon oturumlarının olduğu aşırı yumuşak zeminlerde eksenel şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak PDD'de meydana gelen deformasyonlar sonucu PDD boşaltma kapasitesini tamamen yitirebilir.

Ali (1991), Holtz vd. (1991), Bergado vd. (1996), Bo vd. (2003), PDD'nin boşaltma kapasitesinin değişimi üzerinde PDD'nin deformasyonu ve yanal gerilmelerin en önemli faktörler olduğunu belirtmişlerdir. PDD'nin kesit daralmasına neden olan yanal gerilmeler düşey gerilmelerden kaynaklanır ve boşaltma kapasitesinde önemli bir azalma meydana getirirler. PDD'lerin boşaltma kapasitesi üzerinde yanal gerilmelerin etkileri üzerindeki yapılan araştırmalar yanal gerilmelerin artmasıyla boşaltma kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Kremer (1983), Rixner vd. (1986), Holtz vd. (1991), Bergado vd. (1996), Miura ve Chai (2000), ve Cline ve Burns (2003) boşaltma kapasitesi üzerinde yanal gerilmelerin etkilerini belirledikleri araştırmalarında, 300-350 kPa yanal gerilme altında PDD'nin boşaltma kapasitesinin 100-150 $m^3/yıl$ olmasını kabul edilebilir performans olarak önermektedirler.

Büyük konsolidasyon oturumlarından dolayı meydana gelen PDD deformasyonu, PDD'nin boşaltma kapasitesini gözle görülür bir şekilde etkiler. PDD ile onu çevreleyen zemin arasındaki etkileşim, yumuşak zeminin oturması sırasında PDD'nin katlanmasına, kıvrılmasına, eğrilmesine veya bükülmesine neden olabilir. Birçok araştırmacı düşey şekil değiştirmenin %15'den daha büyük olduğunda boşaltma kapasitesinin oldukça azaldığını belirtmişlerdir (Lawrence ve Koerner 1988; Holtz vd., 1989; Ali 1991; Bergado vd., 1996; Aboshi vd., 2001; Cline ve Burns 2003; Chu vd., 2006). Buna rağmen PDD'nin deformasyonundan kaynaklanan boşaltma kapasitesindeki azalma miktarı tutarlı değildir. Ali (1991) belirli PDD tiplerine bağlı olarak, %30 düşey şekil değiştirme altında boşaltma kapasitesinin %47 ile %99 oranında azaldığını belirtmiştir.

Boşaltma kapasitesi üzerinde PDD deformasyonunun etkilerinin PDD'nin yapısıyla ilgili olduğu düşünülebilir. Bu nedenle boşaltma kapasitesindeki azalma ile konsolidasyon oturumlarından dolayı PDD'nin deformasyonu arasındaki ilişkinin daha titizlikle araştırılması gerekir. Bu ilişki konsolidasyon oturumları, PDD'nin bükülmeye karşı direnci ve zeminin rijitliği gibi birçok etmen tarafından belirlenir. Kremer (1983), Bergado vd., (1996), ile Chu

vd., (2006) büyük oranda bükülme etkisine maruz kalan PDD'lerin boşaltma kapasitesinin hemen hemen kaybolabileceği sonucuna varmışlardır. Buna karşın Hansbo (1983) ve Miura vd. (1998) ise PDD deformasyonunun PDD'lerin boşaltma kapasitelerini o kadar fazla etkilemediğini bildirmişlerdir.

Örselenme bölgesi yumuşak zeminin radyal konsolidasyon oranını önemli miktarda azaltır, çünkü örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmiş bölgenin dışındaki örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinden daha az olacağı düşünülür. Sonuç olarak örselenme bölgesi, örselenme bölgesinin etrafını çevreleyen yumuşak zeminin konsolidasyon sürecini önemli bir ölçüde geciktirir.

Birçok araştırmacı örselenme bölgesi etkisini araştırmışlardır, fakat örselenme mekanizması açıkça bilinmesine rağmen örselenme bölgesinin karakteristikleri, (çapı ($d_{\text{örselenme}}$) ve hidrolik iletkenliği ($k_{\text{örselenme}}$)) hakkında bilgiler sınırlıdır. (Barron 1948; Hansbo 1979, 1981; Rixner vd., 1986; Onoue vd., 1991; Bergado vd., 1991, 1993; Madhav vd., 1993; Indraratna ve Redana 1998, 2000; Chai ve Miura 1999; Hird ve Moseley 2000, 2002; Sharma ve Xiao 2000; Bo vd., 2003; Basu ve Prezzi 2007; Sathananthan vd., 2008; Shin vd., 2009). Örselenme bölgesinin genişliği konusunda araştırmacılar arasında bir mutabakata varılamamıştır ve örselenme bölgesinin genişliğinin, eşdeğer mandrel çapının ($d_{e\text{s}}$) 2-7 katına kadar bir aralıkta değiştiği kabul edilmektedir. Örselenmemiş zeminin yatay hidrolik iletkenliğinin (k_h) örselenmiş bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_s) olarak tanımlanan geçirgenlik oranı, 1-11 aralığında değişebilmektedir. Mevcut çalışmalarda yumuşak zeminin radyal konsolidasyonunu kontrol eden örselenme bölgesinin hidrolik iletkenliği arazi veya doğrudan laboratuvar ölçümlerinden ziyade geri analizlerle belirlenmektedir.

PDD davranışının bazı yönlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayan mevcut çalışmalar baz olmasına rağmen, birçok araştırma ve arazi uygulamalarını gösteren kapsamlı bir literatür araştırması, daha fazla araştırılması gereken birçok problem olduğunu göstermektedir. PDD'li zeminin konsolidasyon teorisi ile geotekstil filtre malzemesinin PDD'lerin performansı üzerindeki etkileri, yanal gerilmelerin PDD'lerin boşaltma kapasitesi üzerinde etkileri ve PDD'lerin uygulanabilirliği açıkça tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte, PDD'nin aşırı deformasyonunun boşaltma kapasitesi üzerindeki etkileri, örselenme bölgesi oluşumu ve örselenme bölgesinin özellikleri, biyolojik ve kimyasal etkiler gibi PDD'nin performansını etkileyen birçok faktör hakkında bilgilerimiz sınırlıdır.

Bu doktora çalışması kapsamında, temel zemininin yüksek sıkışabilirliğe ve düşük kayma mukavemetine sahip zemin tabakalarından oluştuğu sahalarda duraylılık sorunlarının giderilmesi ve oturmaların izin verilebilir sınırlar içinde kalmasının sağlanması için prefabrik düşey drenler (PDD) kullanarak kademeli dolgu ile önyükleme yapılması ve böylece daha kısa bir sürede gerçekleştirilecek zemin iyileştirme yönteminin uygulanabilirliği araştırılacaktır. Aşırı yumuşak zeminlerde PDD'lerin uygulanabilirliği, arazi uygulaması esnasında düşey drenlerin performansını etkileyen faktörlere bağlıdır ve detaylı olarak incelenmesi gerekir.

PDD'ler kullanılarak yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi yöntemine dair arazi uygulama çalışmaları, büyük boyutlu laboratuvar model deney çalışmaları ve nümerik çalışmaları kapsayan literatür araştırması Bölüm 2'de anlatılmaktadır.

PDD'lerin performansını etkileyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla model deneylerde kullanılan zeminlerin ve PDD türlerinin özelliklerinin yeterli seviyede bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan zemin türlerinin özellikleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmeye çalışılmıştır. Laboratuvar deneyleriyle belirlenen sonuçlar ve PDD türlerinin üreticileri tarafından belirtilen özellikleri Bölüm 3'de anlatılmaktadır.

PDD'lerin arazide zemine çelik bir mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında etrafındaki zeminde örselenmeye sebep olduğu, bu örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğine göre önemli bir miktarda düşük olduğu, bu nedenle zeminin konsolidasyon sürecini yavaşlattığı bilinmesine rağmen örselenmiş bölgedeki zeminin özellikleri ve genişliği hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. PDD kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin performansını etkileyen faktörlerden biri olan, PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen, örselenme bölgesi oluşumu, bu örselenme bölgesinin genişliği ve örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğindeki değişim deneysel olarak araştırıldığı çalışmalar Bölüm 4'de sunulmaktadır.

PDD'lerin performansını etkileyen önemli faktörlerden bir diğeri de PDD'nin boşaltma kapasitesidir. Hidrolik eğim, PDD'nin deformasyonu, PDD'ye etkiyen yanal gerilme ve PDD'nin çekirdek bölgesinin kirlenmesi, PDD'nin uygulandığı zemin türü, PDD'nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörlerin PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerine etkileri Bölüm 5'de detaylı olarak incelenmiştir.

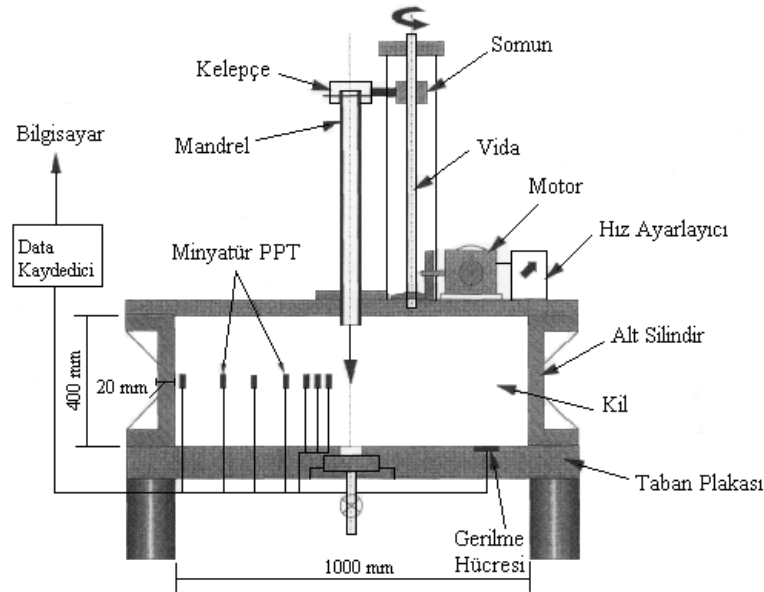
İki farklı PDD türünün zeminin konsolidasyon davranışına olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla arazi benzeşimli model deneyleri yapılmıştır. Bu model deneyler ile PDD kullanılan aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyon davranışı, aşırı yumuşak zeminlerde kullanılacak PDD'nin uygunluğu ve konsolidasyondaki verimliliği, PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zemindeki artık boşluk suyu basıncının değişimi incelenerek Bölüm 6'da sunulmaktadır.

Ayrıca Bölüm 6'da sonuçları sunulan arazi benzeşimli model deneylerinde gözlenen davranışın analizi için çözümler yapılmıştır. Analizlerde sıvanma etkisinin oluşmadığı, sıvanma etkisinin olduğu durumlar ve sıvanma durumunda örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının farklı değerleri ($k_d/k_s = 1.30, 1.47, 2.00$) ile sıvanma etkisinin farklı konsolidasyon gerilmeleri altında değişken olduğu durumlar için beş farklı analitik çözüm yapılarak model deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu model deney, Plaxis V9.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik olarak modellenmiş elde edilen sonuçların model deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Analitik çözüm sonuçları ve sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sonuçların arazi benzeşimli model deney sonuçlarıyla karşılaştırılması Bölüm 7'de sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Model Deney Çalışmaları

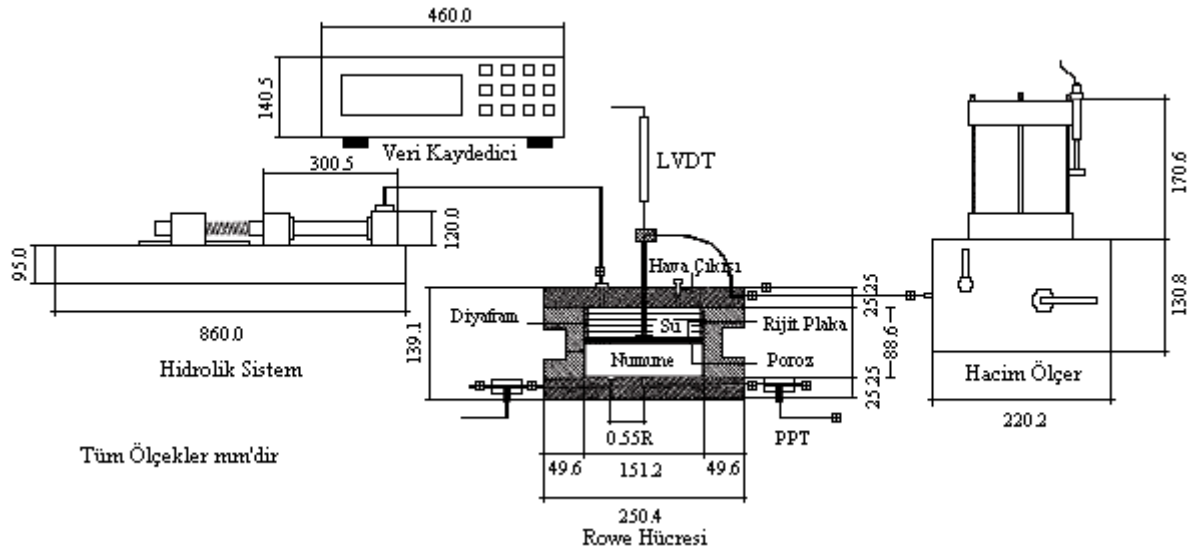
Sharma ve Xiao (2000) prefabrik düşey drenlerin (PDD) etrafını saran sıvanmış bölgenin nitelikleri ve kapsamını, yeni geliştirilen büyük boyutlu deney sistemiyle iki farklı (sıvanmış bölge ve sıvanmış bölgesiz) karşılaştırma deneyleri yaparak incelemişlerdir. Büyük boyutlu bu model deney sisteminin şematik görünümü Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Mandrel kullanımının düşey dren etrafında sıvanmış bölgeye sebep olduğunu ayrıca bu sıvanmış bölgedeki zemin özelliklerinin, bozulmamış bölgedeki zemin özelliklerinden önemli derecede farklı olduğunu belirtmişlerdir. Sıvanmış bölgenin yanal genişliği düşey drenin yarıçapının dört katı kadar, sıvanmış bölgedeki kil zeminin ortalama permeabilitesinin ise bozulmamış bölgedekinden 1.3 kat küçük olduğu bu model deney çalışmasıyla bulunmuştur. Mandrel dış yüzeyinin kil tabakasına uyguladığı kayma gerilmelerinden dolayı kil zeminin örselenmesi ve artık boşluk suyu basıncının sönmülmesinden dolayı yeniden konsolide olması gibi nedenler kil tabakalarının özelliklerinde değişimler meydana getirmektedir. Kil tabakasının özellikleri üzerinde yeniden konsolidasyon etkisinin, örselenme etkisinden çok daha fazla önemli olduğu belirtilmiştir. Sıvanmış bölge iki farklı bölgeye ayrılmıştır. Bunlardan birincisi drene yakın bölgede bulunan genişliği sınırlı örselenme bölgesidir. İkincisi ise sıvanmamış zeminle örselenmiş bölgenin arasında bulunan ve genişliği çok daha fazla olan yeniden konsolidasyon bölgesidir.



Şekil 2.1 Büyük boyutlu model deney sisteminin şematik görünümü (Sharma ve Xiao, 2000)

Bo vd. (2003) aşırı yumuşak zeminlerin ıslahının, kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamlamış olan doğal zeminlerden çok daha zor ve şekil değiştirme davranışlarının doğal zeminlerden farklı olduğunu belirtmişlerdir. Aşırı yumuşak zeminler deformasyonlarının erken safhalarında küçük boşluk suyu basıncı sönümlenmesiyle büyük şekil değiştirmelere maruz kalmaktadırlar (Bo vd., 1997; 1999; 2002a). Bu safhada, Terzaghi'nin küçük şekil değiştirme teorisi oturmaların hız-zaman davranışı ve büyüklüğünü tahmin etmek için kullanılamaz. Terzaghi teorisinin uygun olduğu aşırı yumuşak zeminlerin çamur kıvamından normal kıvama geçtiği bir geçiş noktası mevcuttur. Geçiş noktasında sıkışmaya bağlı ortalama boşluk oranı, permeabilite değişimleri ve boşluk suyu basıncının belirlenmesi için birçok yöntem önerilmiştir (Bo vd., 2002b).

Bu deneysel çalışmada (Bo vd., 2003) Rowe hücresi kullanılmıştır. Rowe hücresinin iç çapı 150.5 mm ve başlangıç numune kalınlığı yaklaşık olarak 40 mm'dir. Buna bağlı olarak çap-başlangıç numune kalınlığı oranı yaklaşık olarak 3.8'dir. Bu çalışmada kullanılan numuneler çamur kıvamındadır. Çamur kıvamında sıkışma sırasında duvar sürtünmesi ihmal edilebilir düzeydedir. Eşit şekil değiştirme elde etmek için rijit yükleme plakası yükleme diyaframının üstüne yerleştirilmiştir. Deney sırasında deplasmanlar, boşluk suyu basıncı ve hacim değişimi ölçülerek kaydedilmiştir. Boşluk suyu basıncı, merkezden drenaja izin verilen deneylerde taban orta noktasından 41.4 mm mesafede, merkezden drenaja izin verilmeyen deneylerde ise taban merkezinden ölçülmüştür. Deney düzeneği ve donanım detayı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Rowe hücresi deney düzeneği ve donanım detayı (Bo vd., 2003)

Konsolide olmamış zeminlerde oturmaların büyüklüğünü tahmin etmede kullanılan sıkışma indisi ve ön konsolidasyon basıncı önemli parametrelerdir. Aynı şekilde aşırı yumuşak zeminlerdeki oturmaların büyüklüğünü tahmin etmek için gerekli olan parametreler ise çamur kıvamındaki sıkışma indisi ve çamur kıvamındaki yumuşak zeminlerin Terzaghi zeminine geçtiği geçiş noktası olarak belirtilmiştir. Monte ve Krizek (1976) geçiş noktasının kritik gerilme aralığı içerisinde düştüğünü ileri sürmüştür. Geçiş noktası boşluk suyu basıncı sönümlenmesi, sıkışma oranı, permeabilitedeki değişim oranı ve $e - \log \sigma'_v$ eğrilerinden grafiksel yaklaşım kullanılarak belirlenebilir. Geçiş noktası $e - \log \sigma'_v$ eğrisinden bu eğrinin iki farklı kısmına teğet doğru parçalarının kesiştirilmesi ile elde edilebilir. Ayrıca geçiş noktası boşluk oranları likit limit boşluk oranlarına neredeyse eşittir. Geçiş noktası boşluk oranı uygulanan yükün artışı ile azalmakta ve başlangıç su muhtevasındaki artış ile artmaktadır. Likit limit boşluk oranı 3 olan zeminlerin geçiş noktasındaki boşluk oranlarının da 3 olduğu, zeminin likit limitinin %116 ve özgül yoğunluğunun ise 2.604 olduğu rapor edilmiştir (Kim vd., 1995).

Aşırı yumuşak zeminlerdeki oturmaların 100 kPa'dan büyük basınçlar için (2.1) numaralı eşitlik, 10 ila 100 kPa arasındaki basınç değişim aralığında ise (2.2) numaralı eşitlik yardımıyla belirlenebileceği belirtilmektedir.

$$S = \left(C_{c1}^* + C_{c2}^* + C_{c3}^* \log \frac{\sigma_f}{100} \right) \frac{H_0}{1 + e_0} \quad (2.1)$$

$$S = \left(C_{c1}^* + C_{c2}^* \log \frac{\sigma_f}{10} \right) \frac{H_0}{1 + e_0} \quad (2.2)$$

Burada; H_0 : başlangıç zemin kalınlığını,

e_0 : başlangıç boşluk oranını,

C_{c1}^* : çamur kıvamındaki sıkışma indisini

C_{c2}^*, C_{c3}^* : içsel sıkışma indisini temsil etmektedir.

Bu eşitlikler SI birim sistemine bağlı olarak geliştirilmiştir ve diğer birim sistemleri için uygulanabilir değildir. Eğer diğer birim sistemleri kullanılırsa nihai oturma, geçiş basıncı (σ'_i) kullanılarak belirlenebilir. (2.3) numaralı eşitlik uygulanan basıncın 100 kPa'dan büyük olması durumu için ve (2.4) numaralı eşitlikte uygulanan basıncın geçiş basıncı ile 100 kPa arasında olduğu durumlar için geçerlidir (Bo vd., 2003).

$$S = \left(C_{c1}^* \log \sigma'_0 + C_{c2}^* \log \frac{100}{\sigma'_t} + C_{c3}^* \log \frac{\sigma'_f}{100} \right) \frac{H_0}{1 + e_0} \quad (2.3)$$

$$S = \left(C_{c1}^* \log \sigma'_t + C_{c2}^* \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_t} \right) \frac{H_0}{1 + e_0} \quad (2.4)$$

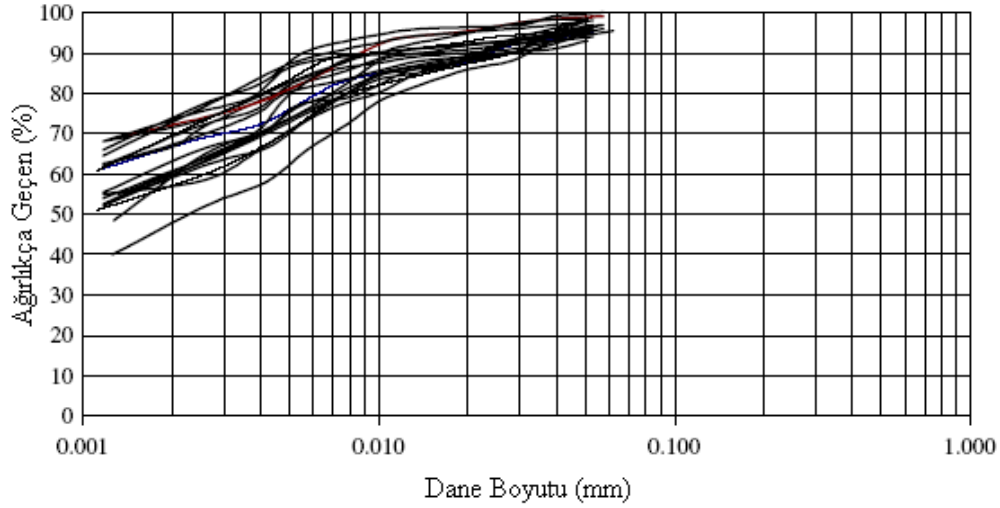
Hidrolik konsolidasyon hücresinde aşırı yumuşak zeminlere kademeli yükleme ile sıkışma deneyi yapılarak $e - \log \sigma'$ ilişkisi elde edilebilir. $e - \log \sigma'$ eğrisinden üç farklı gerilme aralığı için (1-10, 10-100 ve 100-1000 kPa) sıkışma indisleri ($C_{c1}^*, C_{c2}^*, C_{c3}^*$) belirlenebilir. Ayrıca bu indisler e_0, e_{10}^* ve e_{100}^* kullanılarak da bulunabilir. e_{10}^* 'un değeri likit limit boşluk oranına eşit alınarak ya da önerilen $e_{10}^* = 0.9641 e_L$ bağıntısı yardımıyla belirlenebilir. e_{100}^* ve içsel sıkışma indisi (C_{c3}^*) değeri Burland (1990) tarafından önerilen eşitlik ($C_{c3}^* = 0.256e_L - 0.04$), ($e_{100}^* = 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3$) yardımıyla belirlenebilir. Bu eşitliklerde kullanılan e_L değeri likit kıvamdaki boşluk oranı değeridir. Bu çalışmada sıkışma indisi kullanılarak tahmin edilen oturmaların, ölçülmüş değerlerle büyük oranda örtüştüğü belirtilmektedir.

Chu vd., (2006) çalışmalarında Singapur'daki Doğu Changi ıslah projesinin bir parçası olarak 180 ha'lık bir çamur yatağı ıslah edilmiştir. Bu çamur yatağı Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi havuz trapez şeklinde ve kabaca 2000 m uzunluğunda ve 750-1050 genişliğindedir. Bu çamur yatağı 1975-1978 yılları arasında gerçekleşen kum çıkarılması sürecinde ortaya çıkmış ve deniz yüzeyi seviyesinden 22 m aşağıdadır. Bu çamur yatağına Singapur'un Doğu kesiminde bulunan diğer kum çıkarma aktivitelerinden elde edilen yıkanmış silt ve kil, boru hatları vasıtasıyla, suyla birlikte taşınarak boşaltılmıştır.



Şekil 2.3 Aşırı yumuşak zemin içeren çamur yatağı (Chu vd., 2006)

Bu yüzden havuzdaki çamur çoğunlukla kil ve siltten oluşmaktadır. Çamur tepe yüksekliği -3 ile -4m arasında değişirken havuzdaki su seviyesi başlangıç yüzeyine göre +3m kotundadır. Ortalama deniz seviyesi başlangıç yüzeyine göre +1.6m'dir. Çamur havuzundaki zemine ait dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi D_{50} 'nin üst sınırı 0.024 mm iken çoğunlukla 0.001 mm'den küçük değerler almaktadır. D_{85} ise 0.004-0.02 mm aralığında değişmektedir. İnce dane yüzdesi %70-93 aralığındadır. Çamura ait su muhtevası çoğunlukla %140-180 değerleri arasında, birim hacim ağırlığı ise çoğunlukla 11-13 kN/m^3 arasında değişmektedir. Çamur yatağındaki zemine ait diğer fiziksel özellikler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Aşırı yumuşak çamurun kalınlığı 1-20 m arasında değişmekte ve ortalama 15 m değerini almaktadır. Çamurun küçük bir yükleme ile aşırı miktarda çökmesinin sebebi, çok yumuşak ve yüksek sıkışabilirlikte olmasıdır. Çamur çok düşük bir mukavemete sahip olmasına rağmen, mukavemet derinlikle birlikte az da olsa artmaktadır. Çamur havuzunun ıslahı için izlenen yöntem, en üst katmana yani çamurun yüzeyine PDD'ler yerleştirilmeden önce kum serilmesidir. Çamurun herhangi bir mukavemeti olmaması sebebiyle arazi ıslah çalışması ince kum tabakalarının yerleştirilmesi şeklinde uygulanmıştır.



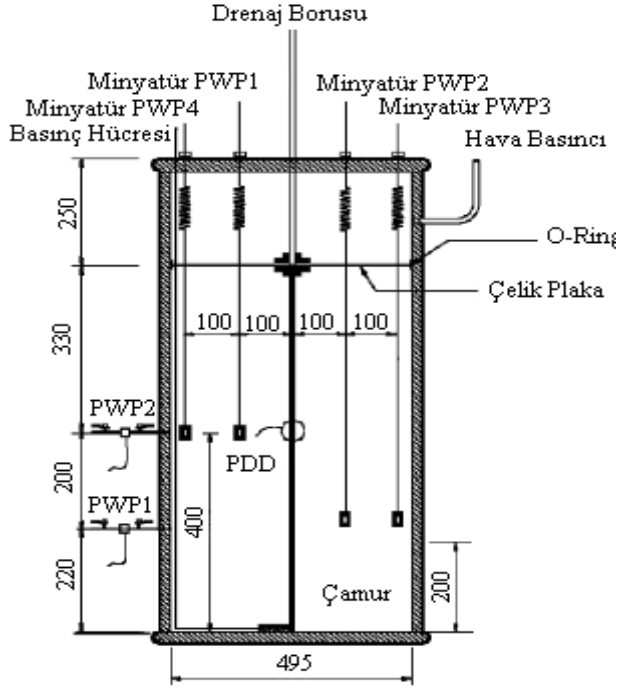
Şekil 2.4 Çamur havuzundaki zemine ait dane boyutu dağılım eğrisi (Chu vd., 2006)

Çizelge 2.1 Çamur yatağındaki zemine ait diğer fiziksel özellikler (Chu vd., 2006)

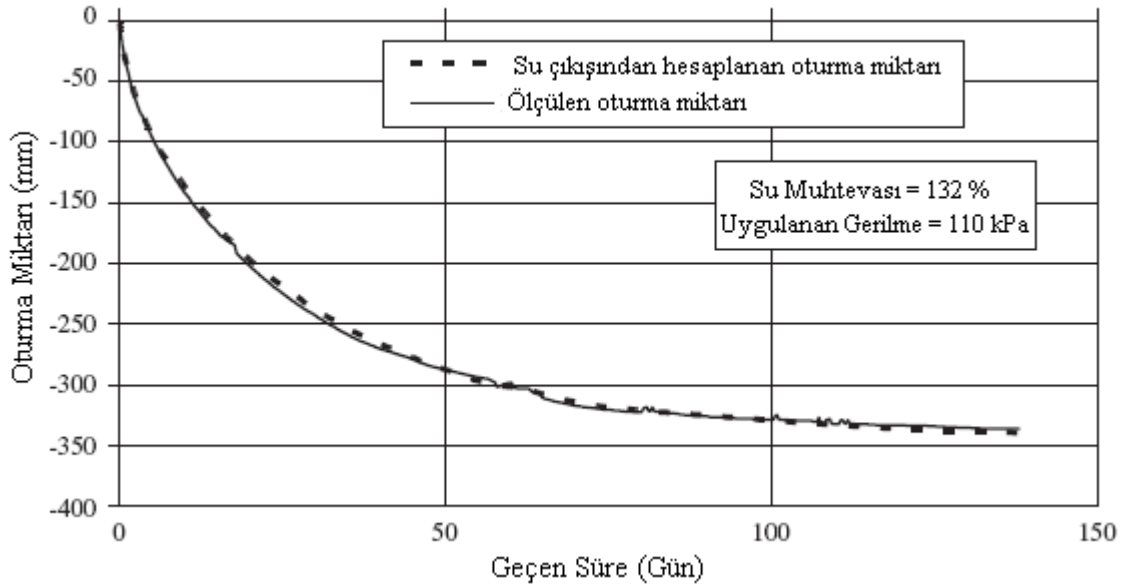
LL (%)	PL (%)	w (%)	γ (kN/m^3)	GS	e	İnce Dane (%)
65-115	22-45	75-180	11.0-16.0	2.67	2.0-4.5	70-90

Çamur katmanı kalınlığının bölgeden bölgeye oldukça değişmesinden dolayı, uygulanan yük aynı olmasına rağmen çamur tabakasındaki oturmaların büyüklüğü değişmektedir. Ayrıca kum tabakası serilmesi beklendiği gibi olmamıştır. Çözüm olarak, bu projede iki farklı tipte geotekstil ile çöken bölgelerin çevresi kaplanmıştır. $2m \times 2m$ aralıklarla PDD'ler yerleştirildikten sonra +6 m kotuna kadar sürşarj dolgusu yapılmıştır. Dolgunun oturması gözlemlenerek yaklaşık 1.5 m oturma gerçekleştiğinden sonra, ikinci aşama PDD'ler ilk aşamadakilerin aralarına aynı aralıklarla yerleştirilmiştir. PDD'lerin iki aşamada yerleştirilmesinin sebebi, drenlerin büyük deformasyonlara maruz kalmaları durumunda dren boşaltma kapasitesinin oldukça azalmasıdır ve projeyi yeni kılan en önemli unsurdur. Aşırı yumuşak zemin için seçilen PDD'nin uygunluğunun ve konsolidasyondaki verimliliğinin belirlenmesi büyük boyutlu bir laboratuvar model deneyi ile araştırılmıştır. Model deneyin yürütülmesindeki ikinci hedef PDD'nin zamanla performansının nasıl azalacağını saptamaktır. Şekil değiştirmiş PDD'nin boşaltma kapasitesi düşmektedir. Filtre ile zemin ara yüzünde biyolojik ve kimyasal reaksiyonlar sonucu filtrenin permeabilitesinin azalması ya da PDD malzemesinde kayma deformasyonlarının gerçekleşmesi nedeniyle PDD'nin kesit alanında kademeli olarak bir azalma ve buna bağlı boşaltma kapasitesinde zamanla düşüşler

meydana gelmektedir. Buna ek olarak, PDD kullanılan aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyon davranışı hakkında bilinenler oldukça sınırlıdır. Bu yüzden model testin yürütülmesindeki üçüncü hedef PDD kullanılarak aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyon sürecinin belirlenmesidir. Bu çalışmada kullanılan model deney tankı Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Tankın iç çapı 495 mm ve yüksekliği 1000 mm’dir. Hücre, içi cilalanmış ve sürtünme etkisi azaltılmış paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Bu tank kullanılarak gerçekleştirilen konsolidasyon deneyinde, çamur yerleştirilmeden önce tankın merkezine PDD önceden yerleştirilmiştir. Çamur, çamur havuzundan temin edilmiş örselenmiş örneklerle ve arazi koşullarındaki su muhtevasına yakın bir değerinde hazırlanmıştır. Dört minyatür boşluk suyu basıncı ölçer ile iki farklı normal boşluk suyu basıncı ölçer Şekil 2.5’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Ayrıca tankın taban plakasının üzerine zeminde oluşacak gerilmeleri ölçmek için basınç hücresi yerleştirilmiştir. Model deney kurulduktan sonra, hava kompresörü kullanılarak zemini konsolide etmek için 110 kPa’lık düşey basınç uygulanmıştır. LVDT ile ölçülen ve drene olan su hacminden hesaplanan oturma-zaman eğrisi Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Test sırasında yaklaşık 350 mm’lik oturmanın gerçekleştiği görülmektedir. Zemin tabakasını başlangıç kalınlığı 750 mm’dir. Bundan dolayı oluşan düşey deformasyon %46 civarındadır. Şekil 2.5’de görülen minyatür boşluk suyu basıncı ölçer PWP1 ile ölçülen boşluk suyu basıncı değişimi Şekil 2.7’de görülmektedir. İlk 10 günde hızlı oturmalar gerçekleşse de, bu zaman diliminde çok küçük ya da sıfır boşluk suyu basıncı sönümlenmesi gözlenmiştir. Bu aşırı yumuşak zeminlerin tipik bir konsolidasyon davranışındadır. Bununla beraber boşluk suyu basınç dağılımı 100 mm oturma gerçekleştikten sonra artmaya başlamıştır. Oturma verilerine göre konsolidasyon yüzdesi deney sonunda %80’e kadar ulaşmıştır. Zemindeki su muhtevası dağılımı ve bükülmüş drenin profili Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Su muhtevası başlangıç değeri olan %132’den azalarak %45.6 ile %59.2 aralığına gerilemiştir. Fakat zeminin su muhtevasında farklı bölgeler için oldukça büyük farklılıklar gözlenmiştir. Bu deney sonucundan aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyonlarında PDD kullanımının etkili olduğu anlaşılmıştır. PDD filtresinin, kil danelerinin dren içine girmesini önlemede etkili olup olmadığının belirlenmesi için model deneyden sonra drenin içi açılmıştır. Drenin içi temiz olarak bulunmuştur. Bu dren filtresinin yeterli olduğunu ispat etmektedir.



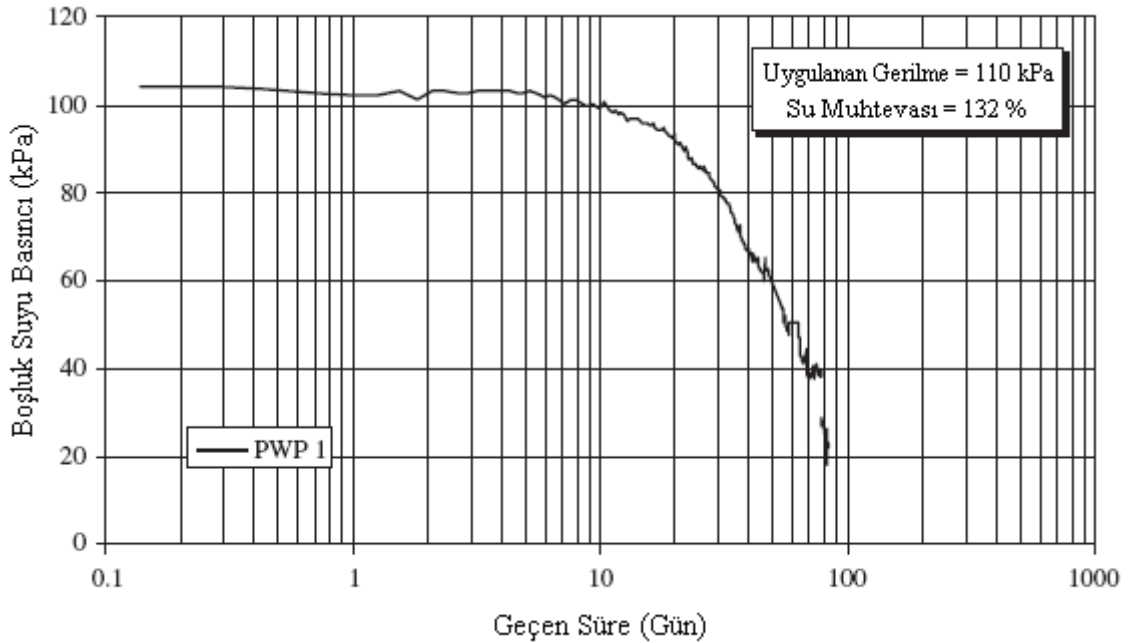
Şekil 2.5 Büyük boyutlu konsolidasyon tankı (ölçekler mm'dir) (Chu vd., 2006)



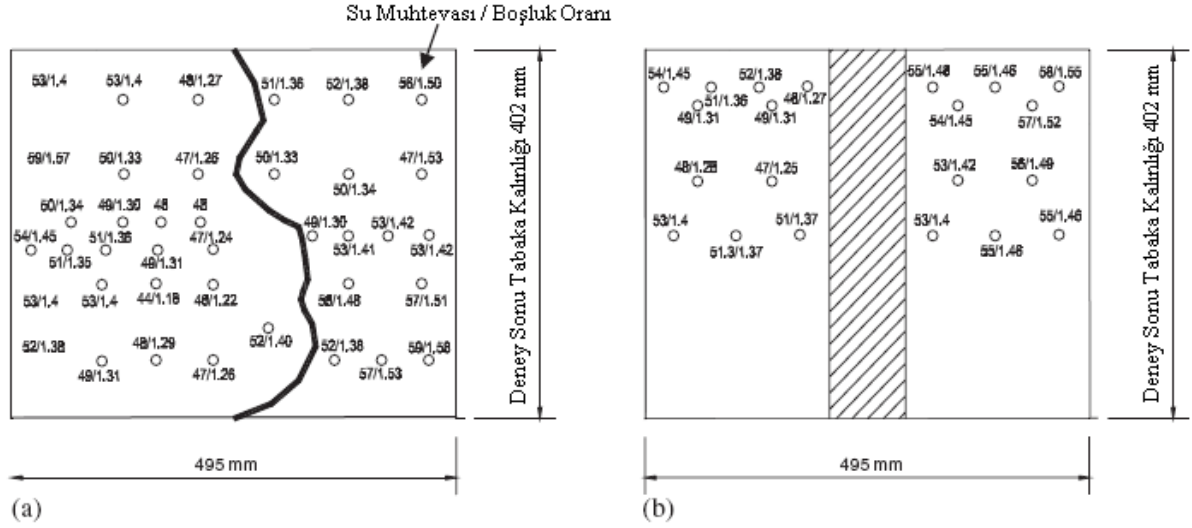
Şekil 2.6 Model deneyde 110 kPa gerilme altında ölçülen oturma-zaman ilişkisi (Chu vd., 2006)

Konsolidasyon aşamasından sonra, konsolide edilmiş zemin içinde bulunan bükülmüş PDD üzerinde boşaltma kapasitesi deneyi yapılmıştır. Boşaltma kapasitesi $11 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer drenin ölçülen boşaltma kapasitesinde %84'lük bir düşüğe işaret

etmektedir. Çamurun permeabilite değerinin 10^{-10} – 10^{-9} m/s mertebelerinde ve drenin boşaltma kapasitesinin 11×10^{-6} m³/s olması nedeniyle, yapılan hesaplarda permeabilitesi 10^{-9} m/s olan zeminler için yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle iki aşamalı PDD kullanım metodu önerilmektedir. Birinci aşamada sürşarj uygulanmadan önce 2.0 m aralıklarla PDD yerleştirilmiştir. %50 konsolidasyon gerçekleştikten sonra aynı aralıklarla ikinci aşama PDD yerleştirilmiştir. İki aşamalı drenin 1.4 m aralıklı tek aşamalı drene eşdeğer olduğu belirtilmektedir. Fakat ikinci aşamada yerleştirilen PDD'ler çok daha az deformasyona ve buna bağlı çok daha az boşaltma kapasitesi düşüşüne maruz kalmıştır. Bu yüzden iki aşamalı ve 2.0 m aralıklı PDD yerleşimi buna eşdeğer olan ve 1.4 m aralıklı tek aşamalı PDD yerleşiminden çok daha verimli olmaktadır. İki sınırlama nedeniyle bu model deneyin tam anlamıyla arazi koşullarını sağlamadığı belirtilmiştir. Bunlardan birincisi tank çapının sınırlı ve sonuçların ancak arazide 0.5 m aralıklı yerleştirilen drenler için gerçekçi olması, diğeri ise bu model deneydeki PDD'lerin zeminden önce yerleştirilmiş olması nedeniyle sıvanma etkisine maruz kalmamasıdır. Zeminin çamur kıvamında olmasından dolayı, arazi şartlarındaki sıvanma etkisi zeminin permeabilitesinin çok fazla azalmasına sebep olmayabilir. Buna karşın sıvanma etkisi, filtre yüzeyi zeminle kaplandığından filtrenin permeabilite değerini etkilemektedir.



Şekil 2.7 100 kPa düşey gerilme altında PWP1 ile ölçülen boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Chu vd., 2006)



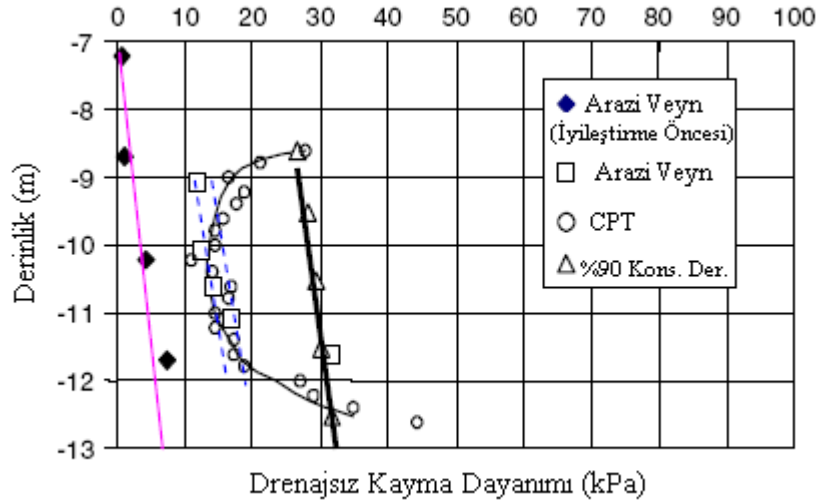
Şekil 2.8 Bükülmüş drenin profili ve zemindeki su muhtevası dağılımı a) Drene dik yükseklik boyunca b) Dren yüzeyi yüksekliği boyunca (Chu vd., 2006)

Aşırı yumuşak zeminlerin PDD kullanılmasıyla konsolide edilerek iyileştirilmesine yönelik arazi çalışmaları ve aşırı yumuşak zeminlerin konsolidasyonlarında PDD'nin uygunluğu ve verimliliğini belirlemek için büyük çaplı konsolidasyon tankı kullanılarak laboratuvar model deneyi yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

- PDD filtresinin gözenek açıklığının ($O95$), (zemine ait $D85$ 'in 10-12 katı büyüklüğünde) filtre gereksinimlerini karşılamamasına rağmen model testten sonra drenin iç kısmı temiz çıkmıştır. Bu durum görünür açıklık boyutu (AOS) değerinin PDD'nin basınç altında sıkışması durumunda küçük olması ile açıklanabilir (Palmeira ve Gordoni, 2002). Bu olaya dayanarak filtre kriterleri $O95 \leq (10-12)D85$ şeklinde değiştirilebilir. Fakat bu kriter yalnızca birim alan kütlesi 160g/m^2 ve kalınlığı 0.6mm olan CX1000 (Colbond Drain) dreni için kullanılan filtrelerde kabul edilebilir.
- Model deneyde PDD'lerin %46 düşey yer değiştirmeye maruz kalmaları halinde boşaltma kapasitesinde %84'lük bir azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı aşırı yumuşak zeminlerde konsolidasyon sürecini hızlandırmak için PDD kullanımı verimli olmasına karşı PDD'nin performansı konsolidasyonun ilerlemesiyle kötüleşebilir. PDD performansının kötüleşmesi ile ilgili problemin aşılması için bu projede iki aşamalı PDD yerleştirme metodu uygulanmıştır. Bu metotta PDD ilk önce 2.0 m 'lik bir kare ızgara şeklinde yerleştirilmiştir. Yaklaşık 1.5 m 'lik oturmadan sonra ikinci aşama PDD'ler ilk aşamada yerleştirilen PDD'lere ait kare ızgaranın tam ortasına aynı alanı kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında çamurun mandrel ringinden dışarı

çıkmasından anlaşılacağı gibi PDD yerleştirilmesi boşluk suyu basıncının sönmülmesine yardımcı olmaktadır. Bu iki aşamalı PDD yerleştirilmesinin diğer bir avantajıdır. Çamurdaki boşluk suyu basıncının sönmülmesinin büyük miktarda gerçekleşen oturmalara kıyasla çok daha geç gerçekleştiği arazi ölçümleri ile gözlenmiştir. Çamurun zemine dönüşmeden önce çökmesi ve kendi ağırlığı altında konsolide olması, aşırı yumuşak zeminlerin tipik konsolidasyon davranışıdır. PDD'nin çevresinde bulunan zeminin üniform olmayan konsolidasyonu ve Mandel-Cryer etkisi başka nedenlerle de olabilmektedir. Yaklaşık 1.5 senelik konsolidasyondan sonra çamurun üst seviyesinde yaklaşık 3.0 m oturma ve önemli miktarda boşluk suyu basıncı sönmülmesi gözlemlenmiştir.

- Sürşarj yükü uygulanmasından 14 ay sonra Arazi Veyn (Burulmalı Kesme) ve CPT deneyleriyle drenajsız kayma mukavemeti profili belirlenmiştir. Konsolidasyon öncesi ve sonrasında belirlenen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması Şekil 2.9'de gösterilmektedir. Drenajsız kayma mukavemetinde önemli ölçüde bir artış gözlemlenmesi, aşırı yumuşak zeminlerin önyükleme ile iyileştirilmesinde PDD kullanımının yararlı ve başarılı olduğunu ispatıdır.



Şekil 2.9 Konsolidasyon öncesi ve sonrasında belirlenen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması (Chu vd., 2006)

2.2 Arazi Uygulamaları

Indraratna vd. (1994), 1989 yılında Malezya Otoyol Kurumu tarafından Malezya Kuzey-Güney yolunun hafif kuzeyinde Muar kıyısında düşey bant drenler ile iyileştirilen yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen, büyük ölçekli toprak dolguların performansını analiz etmişlerdir. Düşey bant drenlerin etkinliği ile yumuşak killerin konsolidasyon davranışı ilişkisi, artık boşluk suyu basıncı, düşey ve yanal yer değiştirmeler ve yüzey oturması göz önünde tutularak değerlendirilmiştir. Düşey drenin verimliliği için, genellikle ihmal edilen, dayanıklılık ve sıvanma etkisini bu vaka çalışması ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Kısa dönemde, dren ve zemin ara yüzeyinde artık boşluk suyu basıncının sönümlenme oranı, drenin verimliliğini ve buna bağlı olarak oturmaları kontrol etmektedir. Uzun dönemde (400 gün'den daha fazla) ideal dren kabulünün gerçekçi olduğu söylenebilmektedir. Kısa dönemde, dren sınırlarında artık boşluk suyu basıncının sıfır olduğu varsayımıyla düşey oturmalar olduğundan fazla, yanal yer değiştirmeleri ise olduğundan daha az tahmin edilebilmektedir. Uygun drenler için, başlangıç veya kısa dönem düşey oturmaların tahmininin tutucu olmasına rağmen yanal hareketin önemli derecede tahmin edilenin altında olması üzerinde düşünülmesi gereken bir durumdur. Göçme yüzeyinin yayılmasının nedeni, yumuşak killerde artan yanal yer değiştirmelerin başlıca bir fonksiyonu olmasındandır. Bununla birlikte, yumuşak kil üzerinde hızlı bir şekilde inşa edilen bir dolgunun duraylılığını hesaplamak için, dren sınırlarındaki artık boşluk suyu basıncı koşulları, verilen herhangi bir zaman için sonlu elemanlar analizinde doğru bir şekilde dahil edilmelidir. Bu çalışma gösteriyor ki, dren sınırları boyunca sönümlenmemiş artık boşluk suyu basıncı doğru bir şekilde hesaba katılmadıkça, düşey oturmalar ve yanal yer değiştirmeler kabul edilebilir bir derecede hatasız tahmin edilemez. Bu bakımdan zemin-dren ara yüzeyi boyunca yer alan elemanların boşluk suyu basıncı şekil fonksiyonlarının değiştirilmesi ya da arttırılması arzu edilir. Yanal yer değiştirmeleri doğru tahmin etmek için, dolgu yapımı sırasında sahada, gerçek gerilme izi tepkisinin yerini tutan zemin parametrelerinin dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Düşey bant drenlerin yerleştirilmesi, yanal yer değiştirmeleri oldukça azaltmaktadır ve böylece kayma göçmesi riskini minimize etmektedir. Toprak dolgunun altında rijit tabakanın varlığı yanal yer değiştirmelere karşı koyabilir. Bundan dolayı yüksek dolguların inşaatını kolaylaştırır. Düzlem şekil değiştirmeye dayanan sonlu elemanlar analizi (CRISP) düşey drene akışın üç boyutlu analizinden daha üstün kabul edilemez. Bununla birlikte, modifiye edilmiş Cam-Clay kuramının göreceli basitliği ve kullanımı kolay CRISP yazılımı göz önünde tutulursa, tahminlerinin hassasiyeti yeterli kabul edilebilir.

Berilgen vd. (2004) tarafından, Konya Atık Su Tesisleri sahasında inşa olunacak havuz tipi yapılar altında, düşük mukavemete sahip alüvyonal zemin tabakalarının iyileştirilmesi için planlanan önyükeme uygulamasının öngörülerinin yerinde sınanması için bir deneme dolgusu yapılarak gerçek arazi davranışının gözlemlenmesi ve gerekirse önyükeme tasarımının buna göre değiştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada deneme dolgusu altında gözlenen ve tahmin edilen oturmalar incelenmiş ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile arazi zemin davranışı karşılaştırılmıştır.

Arazide yerinde yapılan oturma okumaları ve gerçekleştirilen nümerik benzeştirmeler (simülasyon) ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Zemin tabakalarının çok değişken olduğu sahalarda arazi zemin davranışını yerinde gözlemek için ölçme sistemi yerleştirilmiş bir deneme dolgusu düzenlenmesi, gerektiğinde yüklem programının değiştirilmesi açısından yararlı ve gerekli görülmektedir.
- Uygun şekilde prefabrik düşey drenlerin yerleştirilmesi konsolidasyonu dolayısı ile önyükeme ile zemin iyileştirilmesi işlemini hızlandırmakta ve yöntemin uygulanabilirliğini artırmaktadır.
- Yeterli ve güvenilir zemin araştırmaları ile belirlenen zemin parametreleri kullanılarak yapılan elasto-plastik bütünleşik analizler ile arazi zemin davranışı dolgu yüklem programına göre benzeştirilebilmekte ve güvenilir ölçüde tahmin edilebilmektedir.

Chu vd. (2004), Singapur'da, Doğu Changi bölgesi ıslah projesi kapsamında uygulanan zemin iyileştirme projesinde, 140 milyon metreden daha fazla prefabrik düşey drenin (PDD) zemine yerleştirildiği belirtilmiştir. Yıllarca süren bu projeden oldukça faydalı tasarım ve pratik deneyimler kazanılmıştır. Changi deneyimlerine dayanarak mandrel tipi, sıvanmış bölge, seçilen zemin parametreleri ve drenin kalitesi gibi düşey dren performansını etkileyen faktörler değerlendirilmektedir. PDD'nin kalitesini test etmek için kullanılacak yöntemler sunulmaktadır. Konsolidasyon süresini kısaltmak için daha yüksek sürşarj yükü kullanımı yaklaşımı detaylandırılmaktadır. Sonuç olarak, PDD kullanılan zemin iyileştirme projelerinin başarısının, sadece dizayn hesaplarına değil aynı zamanda dren kalitesinin kontrolüne, zemin parametrelerinin seçimine ve yerleştirme yöntemine bağlı olduğu belirtilmektedir.

Bo (2004) tarafından, Doğu Changi ıslah projesi kapsamında prefabrik düşey drenlerle yapılan birçok deneme dolgusu incelenmiştir. Bu deneme dolguları bölgesinde iki farklı tipte prefabrik düşey dren (Colbond CX1000 ve Mebra MD7007) kullanılmıştır. Prefabrik düşey drenler çeşitli yükleme büyüklüğü ve çeşitli tabaka kalınlıklarında birçok farklı aralıklarla yerleştirilmiştir.

Boşaltma kapasitesi PDD'lerin performansı için en önemli parametre olmasına karşın belirsizdir. Bu çalışmada gerekli boşaltma kapasitesini elde etmek için basit bir denklem tanımlanmaktadır. Farklı dren yerleştirme aralıkları, farklı dren uzunlukları ve sıkışabilir tabakaların farklı kalınlıklarında boşaltma kapasitesi için arazi ölçümleri yapılarak, denklemlerle tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Gerekli boşaltma kapasitesi genellikle 6.3×10^{-6} ile $32.5 \times 10^{-6} m^3 / s$ arasında belirlenmiştir.
- Ortalama gerekli boşaltma kapasitesi matematiksel olarak hesaplanabilmektedir. Buna karşın arazide mobilize olmuş boşaltma kapasitesi, konsolidasyon başlarında oturma hızı çok daha fazla olduğundan, gerekli boşaltma kapasitesi ortalama değerinden 10 veya 100 kat daha yüksek olabilmektedir.
- Arazide mobilize olmuş boşaltma kapasitesi piezometre ve oturma ölçümleri yardımıyla ölçülmüştür. 1.5×1.5 m ve 2.0×2.0 m dren aralıkları için arazide mobilize olmuş boşaltma kapasitesinin dren aralığının azalması ile arttığı bulunmuştur. Drenler arası mesafenin aynı olması durumunda boşaltma kapasitesi sıkışabilir tabaka kalınlığının artmasıyla yükselmektedir.
- Arazide mobilize olmuş boşaltma kapasitesinin en büyük değeri $8.5 \times 10^{-7} - 13.0 \times 10^{-6} m^3 / s$ arasında değişmektedir. Bu değerler belirlenen boşaltma kapasitesine ($25 \times 10^{-6} m^3 / s$) oldukça yakındır.
- Bununla birlikte ölçülen boşaltma kapasitesinin en küçük değeri belirlenen bükülmüş boşaltma kapasitesi ($10 \times 10^{-6} m^3 / s$) değerinden çok daha düşüktür.

2.3 Nümerik Çalışmalar

Indraratna ve Redana (1997) tarafından düşey drenlerin mandrelle yerleştirilmesiyle ilişkili sıvanma etkisini dahil edilerek, mevcut aksel simetrik koşulları eşdeğer iki boyutlu düzlem şekil değiştirme modeline dönüştürmek için matematiksel bir formülasyon geliştirilmiştir. Sıvanma bölgesinin genişliği ve sıvanmış zeminin permeabilitesi eşdeğer düzlem şekil değiştirme parametreleri içinde kuramsal olarak değiştirilmesine karşın, bu yöntemde hücrenin genişliği drenler arası mesafe ile aynı alınmıştır. Bu metodun geçerliliği, düşey drenler ile iyileştirilen yumuşak zeminler üzerinde bir toprak dolgu inşaatı analiz edilerek incelenmiştir. Eşdeğer düzlem şekil değiştirme analizlerine dayanan oturma tahminlerinin hassasiyeti geliştirilmiştir. Bununla birlikte, inşaat sonrasında arazide ölçülen boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesinin sonlu elemanlar tahminleriyle karşılaştırıldığında daha yavaş olduğu belirlenmiştir.

Sharma ve Bolton (2001) prefabrik düşey drenler yerleştirilen yumuşak kil üzerindeki geotekstil donatılı toprak dolgunun davranışını, sonlu elemanlar analizleri ve santrifüj modeli kullanılarak incelemiştirlerdir. Ölçülen ve hesaplanan sonuçlar arasındaki oldukça yakın ilişki kil temelindeki gerilme kaynaklı anizotropiyi dikkate almanın önemini vurgulamaktadır. Hird (1992) tarafından önerilen eşleştirme yöntemine dayanan yatay permeabilitenin eşdeğer değerinin kullanılması görüşü, düşey dren yerleştirilen temel zemininin modellenmesinde başarılı olmaktadır. Düşey dren yerleştirilen yumuşak zeminler üzerindeki geotekstil donatılı toprak dolgularda, düşey dren kullanılması durumunda geotekstil donatıda oluşan maksimum çekme gerilmesinin büyüklüğü, kullanılmaması durumuna göre biraz daha fazla bulunmuştur. Aynı zamanda düşey dren kullanılması durumu kullanılmaması durumuyla karşılaştırıldığında, toprak dolgunun üst kısmının altında çekme gerilme dağılımı çok daha fazla yoğunlaşmaktadır.

Yumuşak killer üzerine oturan toprak dolgularda stabilite kaygılarının ana sebeplerinden biri yanal yayılmadır. Santrifüj deneyleri ve sonlu eleman geri analizleri sonuçları göstermiştir ki düşey drenin kullanılması geotekstil donatıda oldukça yüksek çekme gerilmesi ve toprak dolgunun üst kısmı altında oldukça büyük oturmalar oluşturmalarına karşı, kil temel zemininin yatay yayılmasının artmasını sınırlamaktadır.

Geosentetik temel güçlendirilmesiyle birlikte düşey drenler uygulandığı zaman avantajların iki kat arttığı belirtilmiştir. Toprak dolgu inşaatı sırasında kil temel zemininin daha yüksek bir

konsolidasyon derecesine ulaşması, temel zemininin kayma dayanımının daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu durum daha güçlü kil-geotekstil ara yüzeyi sebebiyle geotekstil donatıda çekme gerilmesinin daha iyi mobilize olmasını sağlamaktadır.

Hawlder vd. (2002) killerin konsolidasyonunda drenaj uzunluğu ve kilin yapısal viskozite (akışkanlığının) etkisini göz önüne alan bir temel model geliştirmiştir. Göçme öncesi ve sonrası konsolidasyonu ayırmak için boşluk oranına bağlı göçme gerilmesini hesaba katan bu model, düşey drenler kullanılan killerin konsolidasyonundaki temel denklemlerin nümerik çözümünde kullanılmıştır. Bu modelde konsolidasyon katsayısı kullanmak yerine ayrı ayrı olarak permeabilite ve sıkışabilirlik kullanılmış ve konsolidasyon sırasında sıvanmış bölge etkisi araştırılmıştır. Nümerik çözüm, analitik çözüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Düşey drenler kullanılan killerin konsolidasyonunda, değişkenlerin etkisini belirlemek için yapılan bu parametrik çalışmaya dayanarak şu sonuçlar elde edilmiştir.

- Killerin viskozitesi (akışkanlığı), yakın aralıklı drenler için konsolidasyon üzerinde sadece küçük bir etkiye sahipken, viskozite etkisinin geniş aralıklı drenler için önemli olduğu belirtilmiştir.
- Konsolidasyonun tüm gidişatı başlıca dren etrafında merkeze en yakın sıvanmış bölge tarafından kontrol edilmekte, daha dıştaki sıvanmış bölgenin çok az bir etkiye sahip olduğu belirtilmektedir. Merkeze en yakın sıvanmış bölgenin boyutu dıştaki bölgeden daha küçük olmasına rağmen, konsolidasyonun gidişatını önemli bir derecede yavaşlatmasının sebebi, merkeze yakın bölgenin permeabilitesinin dıştaki bölgenin permeabilitesine göre konsolidasyon üzerinde daha önemli etki yapması olarak açıklanmaktadır.
- Ortalama permeabilite değeri alınması sıvanmış bölgenin etkisini daha düşük tahmin edilmesine yol açacaktır. Örselenmemiş zemin ve yoğrulmuş zeminlerin permeabilite katsayılarını kullanarak bulunan sıvanmış bölgedeki permeabilitenin lineer değişimi, sıvanmanın konsolidasyon üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Borges (2004), düşey drenler kullanılan yumuşak zeminlerin üzerindeki dolgunun yapısal davranışını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemine dayanan nümerik bir model kullanmıştır. $p-q-\theta$ kritik durum modelini benimseyen temel bağıntılar ile Biot'un konsolidasyon teorisini birleştiren bu model, düşey drenler kullanılan (üç boyutlu analiz) ve

kullanılmayan (iki boyutlu analiz) toprak dolgular üzerinde uygulanmıştır. Yumuşak zeminler üzerindeki toprak dolgu içerisinde düşey dren kullanılmasının etkisi, analiz sonuçlarıyla (artık boşluk suyu basıncı, oturmalar, yatay yer değiştirme ve gerilme seviyeleri) belirlenmiştir.

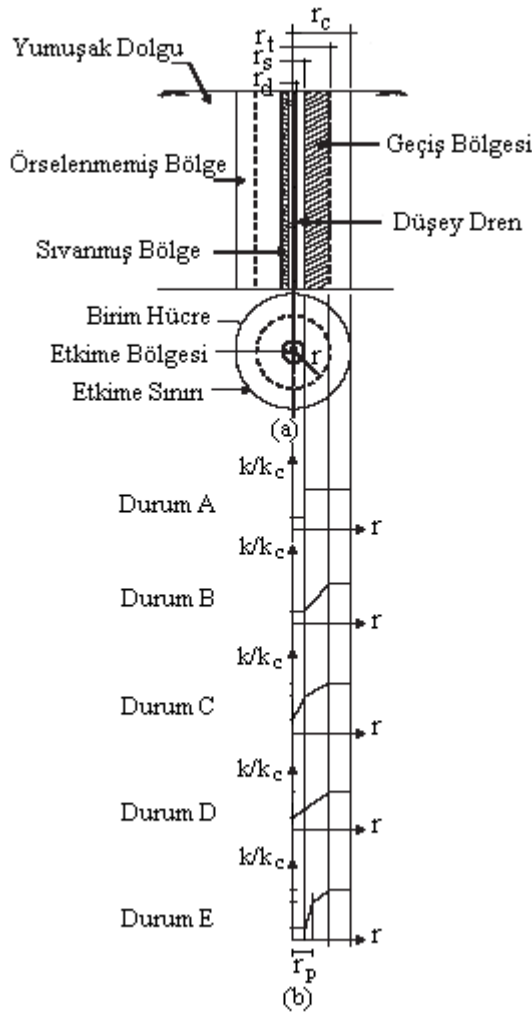
- Toplam konsolidasyon zamanı üzerinde düşey drenlerin çok etkili olduğu, konsolidasyon süresini yaklaşık olarak 5000 günden 500 güne indirdiği belirlenmiştir.
- Toplam konsolidasyon süresindeki bu azalma problemin tüm aşamalarında (inşaat sırasında ve sonrasında) artık boşluk suyu basınçlarının daha hızlı sönümlenmesiyle ilişkili olduğunu göstermektedir.
- Yapılan nümerik analizlerde, toprak dolgu inşa süresi sonunda maksimum oturma değerinin, PDD kullanılmaması durumunda 8.4 cm iken PDD kullanılması durumunda 13.8 cm olduğu belirlenmiştir. Bu da PDD kullanılmasının, inşaat süresi sonunda meydana gelen oturma değerinde yaklaşık %64'lük bir artışa neden olduğuna ve inşaat süresince oluşan konsolidasyon sonucunda (boşluk oranının azalması) temel zemininin özelliklerini iyileştirdiğine işaret etmektedir.
- Zeminde bir çeşit pekleşme etkisi olan bu iyileşme uzun dönem oturmaların azalmasını sağlamanın yanında uzun dönem yatay yer değiştirmelerin düşmesini de sağlamaktadır.
- Düşey drenli dolgunun oturmaları, su akışı ve gerilme bakımından üç boyutlu davranmasına rağmen, boyuna doğrultuda yaklaşık olarak üniformdur. Bu dolgu içerisindeki “kemerlenme etkisinin” varlığı tarafından doğrulanmaktadır. Bu kemerlenme etkisi temel yüzeyi üzerinde üniform olmayan düşey yük uygulanmasıyla ifade edilir.

Basu vd. (2006) düşey dren yerleştirilmesi sırasında çevresindeki zeminde örselenmeye yol açıldığını belirtmektedir. Örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliği orijinal zeminden daha az olmaktadır. Buna rağmen drenin varlığı, olmaması durumuna göre daha kısa sürede konsolidasyonun tamamlanmasını sağlamaktadır. Birçok araştırmacı drenler arasındaki örselenmemiş zemin için çeşitli hidrolik iletkenlik değişim değerleri önermektedir.

Bozulmuş bölge içindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin (k) PDD'den uzaklığı ile değişimi tam olarak bilinmemektedir. Sıvanmış bölgenin hidrolik iletkenliğinin bozulmamış zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_s/k_c) olarak tanımlanan bozulma derecesi ve sıvanma bölgesinin genişliği, araziden alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri, model deneyler, pratik düşünce ve deneyim üzerine temellendirilen birçok araştırmaya konu olmuştur.

Bergado vd. (1993a,b), Hansbo (1986,1997), Hird ve Moseley (2000) (k_s/k_c) bozulma derecesi değerinin 0.1-0.33 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte Bergado vd. (1991) (k_s/k_c) oranı için 0.5-0.66 arasında değerler önerirken, Casagrande ve Poulos (1969) tarafından 0.001 kadar düşük bir değer önerilmiştir.

Basu vd. (2006) ise olası beş farklı durum için hidrolik iletkenlik profilleri dikkate almışlardır. Bu çalışmada, idealize edilmiş geçiş ve sıvanma bölgelerini içeren bir birim hücre ve farklı durumlar için hidrolik iletkenliğin dren merkezinden uzaklık ile değişimi Şekil 2.10 (a) ve (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 2.10 (a) İdealize edilmiş alan: Geçiş ve sıvanma bölgelerini içeren bir birim hücre
 (b) Farklı durumlar için hidrolik iletkenliğin dren merkezinden uzaklık ile değişimi
 (Basu vd., 2006)

Durum A: Örselenmiş bölgede (sıvanma ve geçiş bölgesinde) hidrolik iletkenliğin sabit olduğu varsayılan durum.

Durum B: Sıvanma bölgesindeki hidrolik iletkenliğin sabit olduğu, geçiş bölgesinde ise hidrolik iletkenliğin sıvanma bölgesine eşit değerden doğrusal olarak arttığı varsayılan durum.

Durum C: Dren zemin ara yüzündeki hidrolik iletkenlik değeri (k_s) sıvanma bölgesi sınırına kadar doğrusal artarak k_t değerine ulaşmaktadır. Sıvanma bölgesi sınırındaki (k_t) hidrolik iletkenlik değeri geçiş bölgesi boyunca doğrusal arttığı ve geçiş bölgesi ile bozulmamış bölge arasındaki sınırda hidrolik iletkenliğin (k_s) olduğunu varsayan durum.

Durum D: Sıvanma ve geçiş bölgesi ayrımının yapılmadığı, drenen uzaklaştıkça hidrolik iletkenlik değerinin doğrusal arttığını kabul eden durum.

Durum E: Sıvanma bölgesi boyunca hidrolik iletkenlik değerinin (k_s) sabit olduğunu, geçiş bölgesinin ortasına kadar hidrolik iletkenlik değerinin (k_p) doğrusal arttığını, bu orta noktadan sonra yine hidrolik iletkenlik değerinin geçiş bölgesi sınırına kadar doğrusal arttığını (k_c) kabul eden durum.

A durumuna benzer durumlar için, konsolidasyon hızının analitik bir çözümü zaten literatürde mevcuttur (Hansbo 1981). Basu vd. (2006) çalışmasında geriye kalan durumlar için analitik çözümler geliştirilmiştir.

Bu analizler, geçiş bölgesinin konsolidasyon sürecinde belirgin bir yavaşlatma etkisine sahip olduğu ve bu nedenden dolayı tasarımda mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Üstelik geçiş bölgesi içinde hidrolik iletkenliğin nasıl değiştiğine bağlı olarak konsolidasyon hızı fazlasıyla değişebilir. Bundan dolayı bir düşey dren etrafında hidrolik iletkenlik profilinin tam olarak belirlenmesi, konsolidasyon hızının doğru tahmin edilmesi için gereklidir.

Basu ve Prezzi (2007) prefabrik düşey drenlerle inşa edilen toprak dolguların konsolidasyon hızı üzerinde zemin örselenme etkisini incelemişlerdir. $100mm \times 4mm$ enine kesitli prefabrik düşey dren ve üçgen yerleştirme düzeni gözönüne alınmıştır.

Bu analizlerde Terzaghi-Rendulic konsolidasyon teorisini gözönüne alan sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. PDD yerleşiminde iki ayrı örselenme bölgesi gözönüne alınmıştır. Bunlardan birincisi tamamen örselenmiş sıvanmış bölge ve ikincisi de daha az örselenmiş geçiş bölgesidir. Hidrolik iletkenliğin geçiş bölgesinde (sıvanmış bölgenin düşük değerinden

örselenmemiş bölgenin başlangıç değerine kadar olan bölge) lineer bir şekilde arttığı kabul edilmektedir.

Birim hücrenin altıgen şekli, drenin şerit biçimi, sıvanmış ve geçiş bölgelerinin dikdörtgen biçimi analizlerde dikkate alınmıştır. Analiz sonuçlarından örselenmiş zeminin konsolidasyon hızını belirgin bir biçimde azalttığı ve geçiş bölgesinin konsolidasyon süresince belirgin bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Sıvanmış ve geçiş bölgeleri genişliğinin artması konsolidasyon hızının yavaşlamasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, hidrolik iletkenliğin azalmasıyla belirlenen bozukluğun derecesi konsolidasyon süresini en çok etkileyen etkidir.

PDD'nin aralığı, mandrel boyutu ve şekli PDD'nin performansını etkilemektedir. Varolan basit analitik çözümlerin kullanılabilir olması için, geçiş bölgesinin eşdeğer genişletilmiş sıvanmış bölgeyle değiştirilmesi yöntemi önerilmektedir. Bunun yanında, dikdörtgen sıvanmış bölgenin eşdeğer daireye dönüştürülmesi yöntemi önerilmektedir ki bu yöntem daima güvenli yönde bir tasarım ortaya çıkarmaktadır.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Kullanılan Zemin Türlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu deneysel çalışma için, daha önce arazide PDD'ler kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin de uygulandığı, Craney Adası çökelleri (CAÇ) Craney Adası, Virjinya'dan temin edilmiş olup, doğal su muhtevası korunarak model deney sisteminde kullanılmıştır. Craney Adası çökelleri çok geniş bir alana yayılmış bulunmaktadır. Bu nedenle literatürde Craney Adası zemini kullanılarak yapılan araştırmalarda belirlenen zeminin fiziksel özellikleri arasında farklılıklar görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan zemin güney Craney Adası çökelleri bölgesinin güney batısından yüzeye yakın bölgeden temin edilmiştir.

Ayrıca prefabrik düşey drenler (PDD) kullanılarak ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı projelerde PDD'nin performansını etkileyen faktörlerden, örselenme bölgesi oluşumu ve PDD'nin boşaltma kapasitesindeki değişimin farklı zemin türleri için belirlenmesi amacıyla kaolin kili temin edilmiştir. Bu kaolin kilinin, örselenme bölgesi oluşumunun belirlendiği deneylerde yaklaşık olarak likit limit değerinin 1.5 katı, boşaltma kapasitesinin belirlendiği deneylerde ise yaklaşık 2.0 katı olacak şekilde saf suyla karıştırılarak elde edilen zeminler deneylerde kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen zemin türleri üzerinde mukavemet, konsolidasyon ve permeabilite deneyleri uygulanmış ayrıca zemin indeks özellikleri belirlenerek zemin sınıflandırılması yapılmıştır.

3.1.1 İndeks Özellikleri Deneyleri

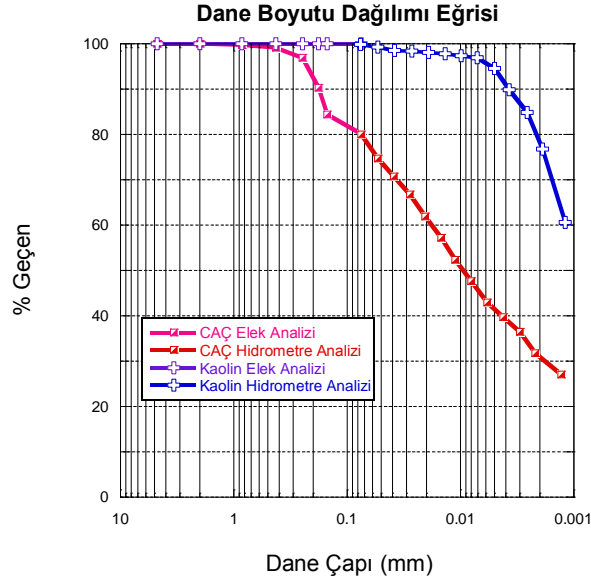
Kullanılan zemin türlerinin cinsini belirleyebilmek ve standart zemin sınıflandırma sistemlerine göre sınıflandırabilmek amacı ile ıslak elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Belirlenen zemin indeks özellikleri Çizelge 3.1'de, elek analizi ve hidrometre deney sonuçları Şekil 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 İndeks Özellikleri Deneyleri Sonuçları ve Zemin Sınıflandırılması

Zemin Türü	200 Nolu Elekten Geçen %	4 Nolu Elekten Geçen %	Kil Yüzdesi %	$w_{doğal}$	LL	PL	PI	G_s	Zemin Sınıfı
CAÇ	80	100	32	100	81	30	51	2.70	CH
Kaolin	100	100	78	-	51	26	25	2.60	CH

Elde edilen bu sonuçlara göre Craney Adası çökellerinin yaklaşık %20 oranında kum, %32 oranında kil'den oluştuğu ayrıca %0.5 civarında organik madde içerdiği, birleştirilmiş zemin

sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıflandırıldığında yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler grubunda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Craney Adası çökelleri ve kaolin kili için belirlenen elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçları

Kaolin kilinin ise %78 oranında kil içerdiği, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıflandırıldığında yüksek plastisiteli inorganik killer ve siltli killer grubunda olduğu belirlenmiştir.

3.1.2 Mukavemet Deneyleri

Kullanılan zeminlerin mukavemet özelliklerini belirlemek amacı ile PDD'lerin boşaltma kapasitesinin ölçüldüğü model deneylerin sonunda 500 kPa gerilme altında konsolide edilen zeminden alınan örselenmemiş örnekler üzerinde üç eksenli basınç ve laboratuvar veyn deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyonlu drenajsız gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde uygulanan konsolidasyon basınçları ve belirlenen kayma mukavemeti parametreleriyle laboratuvar veyn deney sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Ayrıca doğal su muhtevası yaklaşık olarak %100 olan Craney adası çökellerinin doğal haliyle konsolide edilmeden önce veyn testi ile belirlenen drenajsız kayma dayanımı (c_u) 5.30 kPa olarak belirlenirken bu değer kaolin kili kullanılarak hazırlanan zemin bulamacında sıfırdır.

Çizelge 3.2 Konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç ve veyn deneyleri sonuçları

Zemin Türü	Hücre Basıncı (kPa)	c (kPa)	ϕ_{cu} (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c_u (kPa)
Craney Adası Çökelleri	125	74.4	13	71.8	23	103
	250					
	500					
Craney Adası Çökelleri	125	67.1	12	51.1	25	94
	250					
	500					
Kaolin	125	18.5	12.5	8.3	26	30
	250					

3.1.3 Konsolidasyon Deneyleri

Kullanılan zemin türlerinin konsolidasyon davranışının belirlenmesi amacıyla model deneylerdeki su muhtevasıyla hazırlanmış örselenmiş örnekler üzerinde konsolidasyon (ödometre) deneyleri yapılmıştır. Yapılan konsolidasyon (ödometre) deneyleri sonuçları Çizelge 3.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3 Konsolidasyon (ödometre) deneyleri sonuçları

Zemin Türü	Gerilme Aralığı (kPa)	m_v (kPa^{-1})	a_v (kPa^{-1})	c_v (m^2/s)	k (m/s)	e	C_c	C_s
Craney Adası Çökelleri	0.00-25.0	0.00496	0.01783	1.18E-08	5.75E-10	2.369	0.675	0.179
	25.0-50.0	0.00395	0.01267	1.36E-08	5.25E-10	2.053		
	50.0-100	0.00196	0.00570	1.70E-08	3.28E-10	1.767		
	100-200	0.00095	0.00251	1.65E-08	1.53E-10	1.516		
	200-400	0.00049	0.00117	1.72E-08	8.23E-11	1.282		
	400-800	0.00024	0.00053	1.73E-08	4.13E-11	1.071		
	800-1600	0.00013	0.00025	1.81E-08	2.30E-11	0.868		
Craney Adası Çökelleri	0.00-12.5	0.01349	0.04332	6.99E-09	9.26E-10	1.941	0.610	0.134
	12.5-25.0	0.00316	0.00910	8.12E-09	2.51E-10	1.827		
	25.0-50.0	0.00246	0.00675	9.08E-09	2.19E-10	1.658		
	50.0-100	0.00148	0.00378	1.06E-08	1.54E-10	1.469		
	100-200	0.00089	0.00211	1.31E-08	1.15E-10	1.258		
	200-400	0.00042	0.00091	1.34E-08	5.55E-11	1.076		
Kaolin	0.00-12.5	0.01020	0.02465	1.17E-08	1.17E-09	1.262	0.246	0.053
	12.5-25.0	0.00227	0.00506	2.58E-08	5.75E-10	1.199		
	25.0-50.0	0.00127	0.00275	3.46E-08	4.32E-10	1.130		
	50.0-100	0.00070	0.00148	5.84E-08	4.04E-10	1.056		
	100-200	0.00037	0.00075	9.84E-08	3.57E-10	0.982		
	200-500	0.00017	0.00033	1.90E-07	3.14E-10	0.884		

3.1.4 Permeabilite Deneyleri

Zeminin konsolidasyon hızı ve önyükleme ile iyileştirilebilirliği üzerinde zemin permeabilitesinin çok önemli etkisi olduğu gözönüne alınarak, kullanılan zemin türlerinin permeabilitesi esnek duvarlı permeametre deneyleri ile ASTM D 5084-03'de belirtildiği gibi belirlenmeye çalışılmıştır. Esnek duvarlı permeametre deneyinde hidrolik iletkenlik belirlenirken zemine su girişinin gerçekleştiği zemin numunesinin üst seviyesinde hidrolik yük zamanla azalırken, zeminden su çıkışının gerçekleştiği zemin numunesinin alt seviyesindeki hidrolik yük zamanla artmaktadır. Bu nedenle ASTM D 5084-03'de belirtilen Metot C için zeminin hidrolik iletkenliği,

$$k = \frac{a_{giren} \times a_{çıkan} \times L}{(a_{giren} + a_{çıkan}) \times A \times \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Bu bağıntı, zemine giren suyu içeren rezervuar alanının zeminden çıkan suyu içeren rezervuar alanıyla eşit olması durumunda,

$$a_{giren} = a_{çıkan} = a$$

$$k = \frac{a \times L}{2 \times A \times \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.2)$$

şeklinde düzenlenebilir.

Bu bağıntıda;

L = Numune boyu

A = Numune alanı

Δt = İki ölçüm zamanı arasındaki süre farkı

h_1 = Zemine su girişinin gerçekleştiği noktadaki hidrolik yük

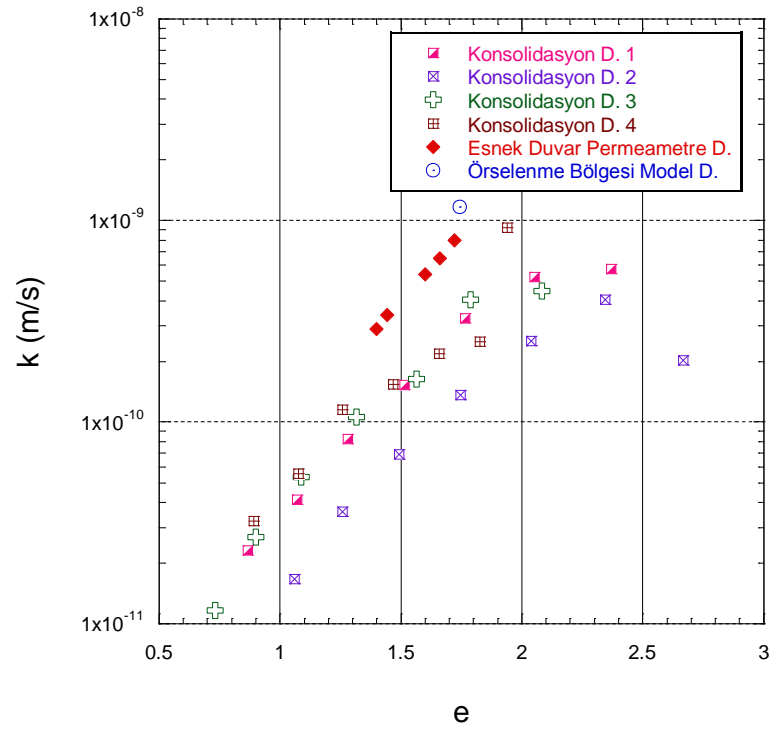
h_2 = Zeminden su çıkışının gerçekleştiği noktadaki hidrolik yük'tür.

Esnek duvarlı permeametre deneyleri yapılarak kullanılan farklı zemin türleri için hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiş sonuçlar Çizelge 3.4'de özetlenmiştir.

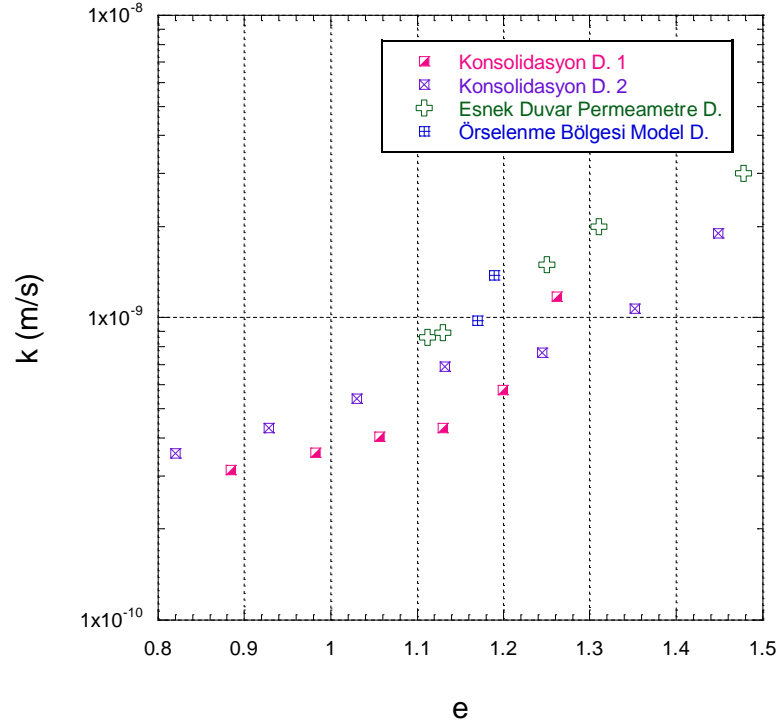
Çizelge 3.4 Esnek duvarlı permeametre deneyleri sonucunda belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerinin boşluk oranıyla değişimi

Zemin Türü	Boşluk Oranı e	k_v (m/s)
Craney Adası Çökelleri	1.72	8.0E-10
	1.66	6.5E-10
	1.60	5.4E-10
	1.44	3.40E-10
	1.40	2.90E-10
Kaolin	1.48	3.00E-9
	1.31	2.00E-9
	1.25	1.50E-9
	1.13	8.93E-10
	1.11	8.61E-10

Ayrıca Craney adası çökelleri ve kaolin kili kullanılarak hazırlanan zemin için konsolidasyon (ödometre) deneyleri sonucunda hesaplanan, esnek duvarlı permeametre deneyi ve örselenme etkisi model deneyi sonucunda belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerinin boşluk oranlarıyla değişimleri sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Craney Adası çökellerinin farklı deney yöntemleriyle belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerinin boşluk oranıyla değişimi



Şekil 3.3 Kaolin kilinin farklı deney yöntemleriyle belirlenen hidrolik iletkenlik değerinin boşluk oranıyla değişimi

3.2 Kullanılan PDD Türlerinin Özellikleri

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan PDD'lerin üreticileri tarafından belirtilen bazı özellikleri Çizelge 3.5'de, kullanılan PDD'lerin fotoğrafları ise Şekil 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.5 PDD türlerinin üreticileri tarafından belirtilen özellikleri

PDD									
PDD Türü	Boyut		Filtre Geotekstil Özellikleri			Çekirdek		Boşaltma Kapasitesi	
	Kalınlık	Genişlik	Gözenek Açıklığı (O_{95})	Dielektrik Sabiti (Permittivity)	k	Malzeme	Şekil	Düz ASTM D-4716	Bükülmüş ASTM D-4716
	mm	mm	μm	s^{-1}	m/s	-	-	$10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$	
Alidrain	5.5	96	<75	-	15×10^{-4}	Polietilen	Çivili	>2.4	>2.4
Colbond CX 1000	5.0	100	<75	1.7	15×10^{-4}	Polipropilen	Lifli	90	80
Amerdrain 407	3.2	102	210	0.8	3×10^{-4}	Polipropilen	Oluklu	100	-
Mebradren 7407	3.6	100	140	0.5	-	Polipropilen	Sürekli Kanallı	134	111



Şekil 3.4 Kullanılan farklı Prefabrik Düşey Dren (PDD) tipleri

Şekil 3.4' de gösterilen dren modellerinden Mebra Dren 7407 ve Amerdrain 407 hem PDD'nin dış kısmını oluşturan geotekstil malzeme bakımından, hem de PDD'nin çekirdek bölgesinde bulunan kanalların şekli bakımından yakın benzerlik göstermektedir.

4. ÖRSELENME BÖLGESİ OLUŞUMU VE ETKİSİ

PDD kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminde, PDD'lerin arazide zemine mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında etrafını saran zeminde PDD boyunca örselenme oluştuğu, ayrıca bu örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgedeki zemine göre önemli bir derecede farklı olduğu ileri sürülmektedir (Bo vd., 1997; Sharma ve Xiao, 2000). Buna rağmen örselenme bölgesinin genişliği ve örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgedeki zemine göre değişiminin mertebesi tam olarak bilinmemekle birlikte dolaylı tahminler yürütülmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada ABD'de Wisconsin Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı Laboratuvarında geliştirilen örselenme bölgesi model deney sistemi (Tran-Nguyen., 2010) kullanılarak bu konuda ihtiyaç duyulan bilinmeyenlerin belirlenmesi planlanmıştır.

4.1 Model Deney Sistemi

Örselenme bölgesi model deney sisteminin şematik görünümü Şekil 4.1'de ve bu model deney sisteminin fotoğrafı da Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Örselenme bölgesi model deney sisteminin öncelikli amacı sabit bir konsolidasyon gerilmesi altında zemin konsolide edildikten sonra hidrolik iletkenlik değerinin belirlenmesi ve daha sonra aynı konsolidasyon gerilmesi altında prefabrik düşey drenin, arazide zemine mandrel kullanılarak yerleştirilmesi yöntemine benzer bir şekilde, zemine yerleştirilmesi sonucu zeminde meydana gelecek sıvanma bölgesinin genişliğini ve ayrıca sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenlik değerindeki azalma miktarını tayin etmeye yöneliktir.

Örselenme bölgesi model deney sisteminde prefabrik düşey dren zemine yanal olarak yerleştirilmesi sebebiyle arazideki prefabrik düşey dren davranışından farklılık göstermektedir. Arazide konsolidasyon sırasında prefabrik düşey dren zeminle birlikte düşey doğrultuda büyük deformasyonlara uğramaktayken, örselenme bölgesi model deney sisteminde prefabrik düşey dren zemin konsolide olduktan sonra yatay doğrultuda zemine yerleştirilmesi sebebiyle yatay ve düşey doğrultuda herhangi bir deformasyona uğramamaktadır. Bu özelliği sebebiyle hidrolik iletkenlik deneyinin yapıldığı sırada boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarının PDD'ye olan uzaklığı sabit kalmaktadır ve ayrıca örselenme bölgesi deney sistemi, deformasyondan bağımsız sadece dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla, prefabrik düşey drenin boşaltma kapasitesindeki azalmayı da belirleme olanağı sağlamaktadır.

Şekillerde gösterilen örselenme bölgesi model deney sisteminin iç yüksekliği 530 mm olup iç alan boyutu 130x350 mm'dir, paslanmaz çelik ve plastik malzemedir üretilmiştir. Deney hücresinin üst kısmında konsolidasyon sırasında yükün uygulandığı, düşey doğrultuda hareket edebilen ve drenaja izin veren rijit çelik bir plaka (130x350x26 mm) bulunmaktadır. Deney hücresinin ön şeffaf yüzeyinde ve arka yüzeyde, prefabrik düşey drenaj drenajları toplam 11 adet, boşluk suyu basıncı ölçerlerin (piezometre) bağlandığı boşluk suyu basıncı ölçüm kanalları bulunmaktadır. Deney hücresinin iki yan yüzeyinde alt tabandan 170 mm yukarıda karşılıklı olarak 18 mm genişliğinde bir kanal bulunmaktadır. Prefabrik düşey drenaj bir mandrel (120x915x15 mm) kullanılarak zemine bu kanaldan yatay olarak yerleştirilmektedir. Bu kanalların hemen dışında iki adet (40x130x35 mm) su toplama hücresi bulunmaktadır. İstenildiği takdirde boşaltma kapasitesi deney ekipmanı bu su toplama hücrelerine bağlanarak değişik hidrolik eğimlerde PDD'nin boşaltma kapasitesi de ölçülebilmektedir.

Deney sırasında zemin üzerine uygulanan yük, yükleme kontrollü pnömatik yükleme silindiri vasıtasıyla sağlanmaktadır. Pnömatik silindirle üst hareketli rijit plakaya yük aktaran çelik çubuk arasına yerleştirilen bir adet kuvvet ölçer (Load Cell) kullanılarak da pnömatik silindirden zemine aktarılan toplam yük kontrol edilebilmektedir. Deney sırasında zemindeki aksel şekil değiştirmeleri ölçmeye yarayan bir adet deplasman ölçer (LVDT) de pnömatik silindirden hareketli rijit plakaya yük aktaran çelik çubuğa bağlı bulunmaktadır. Ayrıca bu deney sisteminde yukarıda bahsedilen tüm data ölçerlerden alınan veriyi bilgisayara aktarmak için Labview isimli bir bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır.

4.2 Deney Yöntemi

Bu deneysel çalışma için, daha önce arazide PDD'ler kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı, Craney Adası çökelleri temin edilmiş olup, doğal su muhtevası korunarak bu model deney sisteminde kullanılmıştır. Ayrıca PDD'lerle zemin iyileştirilme yönteminin farklı zemin türlerinde uygulanması durumunda, örselenme ve geçiş bölgelerinin genişliğinin ve bu bölgelerdeki hidrolik iletkenliğin örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğine göre değişiminin farklı zemin türlerine göre belirlenmesi amacıyla kaolin kili, likit limit değerinin yaklaşık 1.5 katı olacak şekilde suyla karıştırılarak hazırlanan zemin bulamacı kullanılarak model deney tekrarlanmıştır. Craney Adası çökelleri ve kaolin kili bulamacı deney hücresini 5-6 eşit parçaya dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Her eşit yükseklikte zemin deney hücresine yerleştirildikten sonra küçük boyutlu bir vibrasyon makinası kullanılarak zemin içerisinde mümkün olduğunca az miktarda hava kalması

sağlanmış ve her bir zemin seviyesinde su muhtevası örneği alınmıştır. Daha sonra bu zeminin üzeri geçirimli bir geotekstille (filtre) kaplanarak hareketli üst plaka yerleştirilmiştir.

Zeminin arazideki durumuna göre belirlenen 25 kPa'lık yanal bir gerilme hareketli üst plakaya yük olarak uygulanmıştır. Zeminin bu gerilme altındaki konsolidasyonu tamamlandıktan sonra deney hücresinin arka yüzünde bulunan boşluk suyu basıncı ölçüm kanallarına 8 adet piezometre yerleştirilmiştir. Zemine prefabrik düşey dren yerleştirilmeden önce zeminin örselenmemiş permeabilitesini belirlemek amacıyla hareketli üst plakayla hücrenin üst kapağı arasındaki hazne suyla doldurularak belirli sabit bir su basıncı uygulanmıştır. Zemin içerisindeki su akışının kararlı hale geldiği anlaşıldıktan sonra hücrenin tabanıyla hareketli plaka arasındaki bölgede yani numune yüksekliği boyunca hidrolik yük ölçümü ve hidrolik iletkenlik hesabı yapılmıştır.

Hidrolik iletkenlik deneyi sonlandırılarak hücreye uygulanan su basıncı kaldırıldıktan sonra, ölçülen boşluk suyu basıncı sönümleninceye veya kararlı bir hale gelinceye kadar beklenmiştir. Gözlemlenen boşluk suyu basıncı sönümlendikten sonra boyutları daha önce belirtilen bir mandrel içerisindeki PDD deney hücresinin iki yan yüzünde bulunan kanaldan zemin içerisine sabit hızla yerleştirilmiştir. Örselenme bölgesi model deney sisteminde PDD'nin zemine yerleştirilmesinde kullanılan mandrel Şekil 4.3'de, PDD'nin sabit hızla zemine yerleştirilme yöntemi de Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Örselenme bölgesi model deney sisteminde PDD'nin zemine yerleştirilmesinde kullanılan mandrel



Şekil 4.4 Örselenme bölgesi model deney sisteminde PDD'nin sabit hızla zemine yerleştirilmesi yöntemi

PDD zemine yerleştirildiği sırada ve daha sonra mandrelin geri çekildiği dönemde zemin içerisindeki boşluk suyu basıncının mandrelle olan uzaklıkla değişimi belirlenmiştir. Boşluk suyu basıncının tekrar sönümlenmesi ve ayrıca mandrelin zemin içerisinde oluşturduğu boşluğun konsolidasyonla kapanması için belirli bir süre beklenerek, tekrar hidrolik iletkenlik deneyi yapmak amacıyla üst hazneye su basıncı uygulanmıştır. Zemin içerisindeki su akışının kararlı hale geldiği belirlendikten sonra mandrel kullanılarak PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında PDD'nin etrafını saran zemindeki hidrolik iletkenlik değerinin değişimi, örselenme bölgesinin genişliği ve bu örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zemine göre değişimi piezometrelerden ölçülen boşluk suyu basınçlarından yararlanarak belirlenmiştir. Ayrıca hareketli üst plakaya bağlanan bir adet deformasyon ölçer (LVDT) yardımıyla da konsolidasyon sırasında zeminde meydana gelen düşey şekil değiştirmeler belirlenmiştir.

4.3 Deneysel Bulgular ve Değerlendirme

Örselenme bölgesi model deneyinde iki farklı zemin türü kullanılarak üç farklı deney yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan Craney Adası çökellerinin ve kaolin kilinden hazırlanan zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Craney Adası çökelleri ve kaolin'in fiziksel özellikleri

Zemin Türü	Aşama	G_s	w (%)	e	S (%)	n	γ_k (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)
Craney Adası Çökelleri Deney I	Deney Başlangıcında	2.70	95.9	2.59	99.8	0.72	7.36	14.42
	Deney Sonunda		55.1	1.75	99.0	0.64	9.61	15.89
Craney Adası Çökelleri Deney II	Deney Başlangıcında	2.70	97.8	2.65	99.8	0.73	7.26	14.42
	Deney Sonunda		59.2	1.59	99.9	0.61	10.20	16.28
Kaolin	Deney Başlangıcında	2.60	54.1	1.51	93.1	0.60	10.20	16.09
	Deney Sonunda		42.0	1.09	99.9	0.52	12.16	17.27

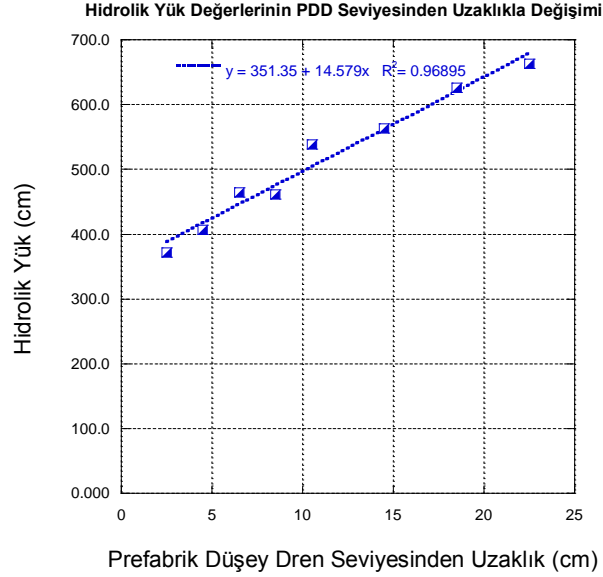
PDD kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin performansını etkileyen faktörlerden biri olan, PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen, örselenme bölgesi oluşumu ve örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğindeki değişim deneysel olarak belirlenmiştir.

Bu değişimin belirlenmesi amacıyla örselenme bölgesi model deneyinde 25 kPa'lık bir sabit gerilme altında zeminin konsolidasyonu tamamlandıktan sonra üst plakayla hücrenin üst kapağı arasındaki hazne suyla doldurularak 50 kPa'lık sabit bir su basıncı uygulanmıştır. PDD zemine yerleştirilmeden önce örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliği, su basıncının uygulandığı zeminin üst seviyesiyle hücre tabanında bulunan ve istenildiğinde drenaja izin verilebilen bölge arasında belirlenmiştir.

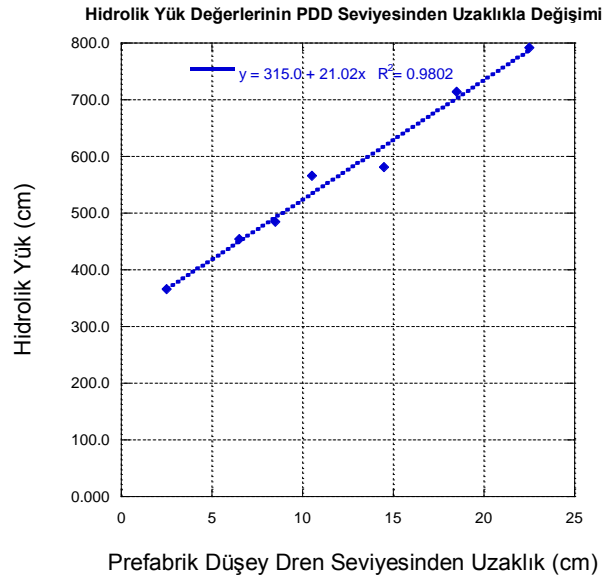
Hidrolik iletkenlik deneyi yapılırken belirlenen hidrolik eğim, ASTM D 5856-95'de belirtildiği gibi hidrolik iletkenliği 1×10^{-9} m/sn den küçük zeminler için tavsiye edilen uygulanabilir en büyük hidrolik eğim değeri olan 30 dan küçük olarak seçilmiştir. Yine aynı standart da hidrolik iletkenliğin belirlenmesinden önce zemin içerisindeki su akışının kararlı olduğunu belirleyebilmek için birim zamanda zeminden çıkan su hacminin zemine giren su hacmine oranının 0.75 – 1.25 arasında olması gerektiği belirtilmiştir.

Su akışının kararlı hale geldiği belirlendikten sonra hidrolik iletkenlik deneyi sırasında zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi ve aynı zamanda PDD'den değişen uzaklıklarda zemin içerisindeki boşluk suyu basıncı değişimi belirlenmiştir. Belirlenen boşluk suyu basıncı değerlerinden zemin içerisindeki bu noktalar için hidrolik yük seviyeleri hesaplanmıştır. Craney Adası çökelleri ve kaolin kullanılarak yapılan deneylerde 25 kPa'lık sabit basınç altında konsolide edilen örselenmemiş zemin içinde değişik noktalarda ölçülen boşluk suyu basıncı değerlerinden hesaplanan hidrolik yük seviyeleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

Örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliği belirlendikten sonra zemin içerisindeki boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi veya kararlı bir hale gelmesi için belirli bir süre beklendikten sonra PDD mandrel kullanılarak sabit bir hızla zemine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan deneylerde örselenmemiş zeminde PDD seviyesinden değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri



Şekil 4.6 Kaolin kili kullanılarak yapılan deneyde örselenmemiş zeminde PDD seviyesinden değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri

Bölüm 4.2’de belirtilen deney yöntemi uygulanırken PDD’nin zemine yerleştirilmesi sırasında deplasmanın sabit kalması için deney sisteminde zemin üzerindeki rijit çelik plakaya yük aktaran çelik çubuk sabitlenerek bu işlem süresince zemindeki gerilme artışı nedeniyle yukarıya doğru hareket etmesi engellenmiştir.

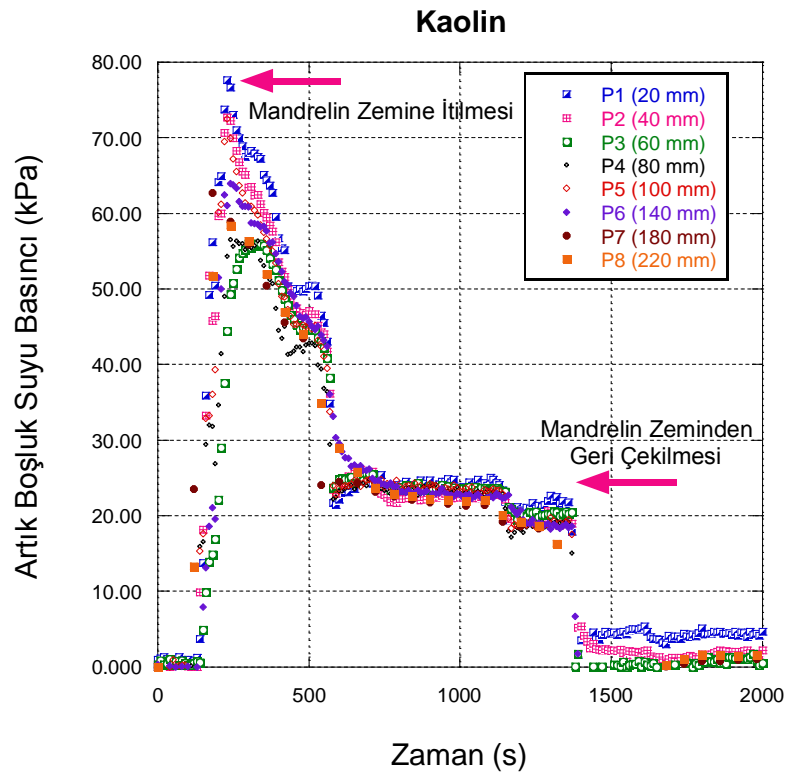
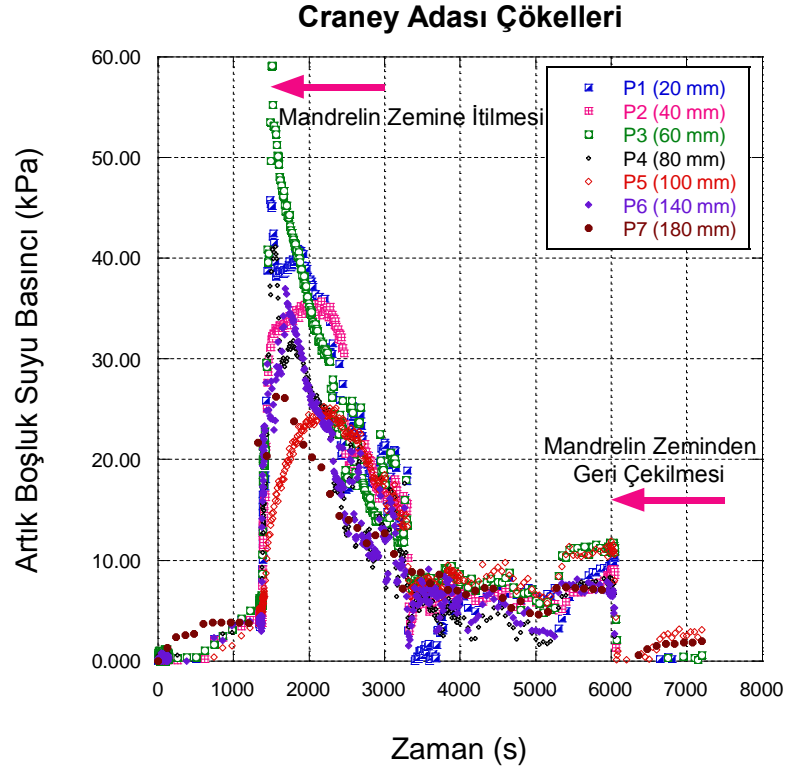
4.3.1 PDD'nin Yerleştirilmesi Sırasında Zemindeki Boşluk Suyu Basıncının Değişimi

Craney Adası çökelleri ve kaolin kullanılarak yapılan deneylerde, PDD'nin zemine mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında zemin içerisinde PDD'den değişen uzaklıklarda ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimi sırasıyla Şekil 4.7 (a) ve (b) de gösterilmektedir.

PDD'nin bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmesi sırasında, mandrel'in PDD'den değişen uzaklıklarda boşluk suyu basıncının ölçüldüğü piezometre düzleminden geçtiği anda ölçülen artık boşluk suyu basıncı maksimum değerine ulaşmaktadır. Ayrıca ölçülen artık boşluk suyu basıncı değeri PDD seviyesine yaklaştıkça artmaktadır. Daha sonra mandrel'in boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarından uzaklaşmaya başlamasıyla ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının belirli bir seviyeye kadar sönümlendiği, PDD'nin zemine yerleştirilmesinden sonra mandrel'in zeminden çıkarıldığı anda ise artık boşluk suyu basınçlarının çok hızlı bir şekilde sönümlendiği görülmektedir.

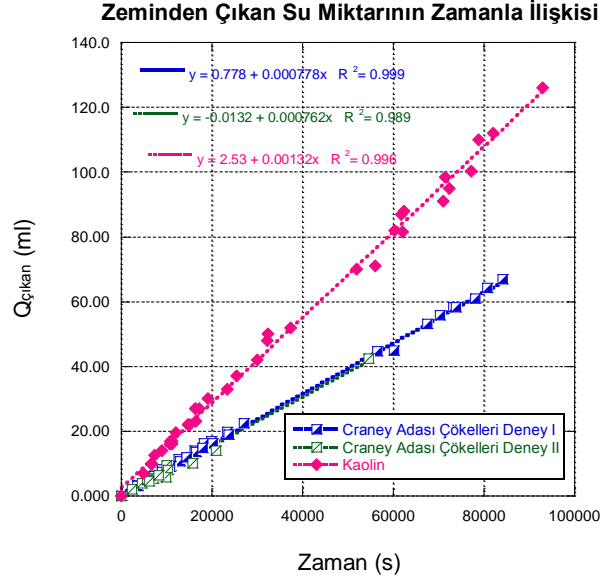
Şekil 4.7'de görüldüğü gibi iki farklı zemin türünde mandrel'in zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimi yakın benzerlik göstermektedir. Buna rağmen kaolin kili kullanılan deneyde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerinin Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan deneye göre daha yüksek olduğu, ayrıca kaolin kili kullanılan deneyde zemindeki artık boşluk suyu basıncının sönümlenme süresinin Craney Adası çökellerinin kullanıldığı deneye göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebinin kaolin kilinin hidrolik iletkenliğinin Craney Adası çökellerine göre daha yüksek ve her iki deneyde mandrel'in zemine yerleştirme hızının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

PDD'nin bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmesi sırasında görülen artık boşluk suyu basıncı oluşumu davranışı, literatürde birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Bergado vd., 1991; Onoue vd., 1991; Hird ve Moseley, 2000; Sharma ve Xiao, 2000; Sathananthan ve Indraratna, 2006). Bu deneysel çalışmada belirlenen artık boşluk suyu basıncı değişimi literatürdeki yapılmış çalışmalarla yakın benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.7 PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında PDD'den değişen uzaklıklarda artık boşluk suyu basıncı değişimi a) Craney Adası çökelleri Deney I b) Kaolin

PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zemin içerisindeki örselenme etkisinin belirlenmesi için tekrar hidrolik iletkenlik deneyi yapılmıştır. Su akışının kararlı hale geldiği belirlendikten sonra örselenmiş zeminde hidrolik iletkenlik deneyi yapılırken ölçülen zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi her üç deney için Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Örselenmiş zeminde 25kPa'lık sabit gerilme altında zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi

İki farklı zemin türü için yapılan üç farklı deneyde örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliği belirlenirken değişik piezometre noktalarında ölçülen boşluk suyu basıncından hesaplanan hidrolik yük değerleri Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

Şekillerde görüldüğü gibi hidrolik yük değerlerinin dağılımına göre zemin içerisindeki örselenme bölgesini, sıvanma bölgesi ve geçiş bölgesi olarak iki farklı bölgeye ayırmak gerekmektedir. Craney Adası çökelleriyle yapılan birinci deney için sıvanma bölgesinin genişliği 77 mm olarak bulunurken, geçiş bölgesinin örselenmemiş bölgeyle olan dış sınırı ise 197 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.8 de Deney I için birim zamanda zeminden çıkan su miktarını gösteren doğrunun eğiminin hücre alanına bölünmesiyle de;

$$v = \frac{q}{A} = 1.71 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

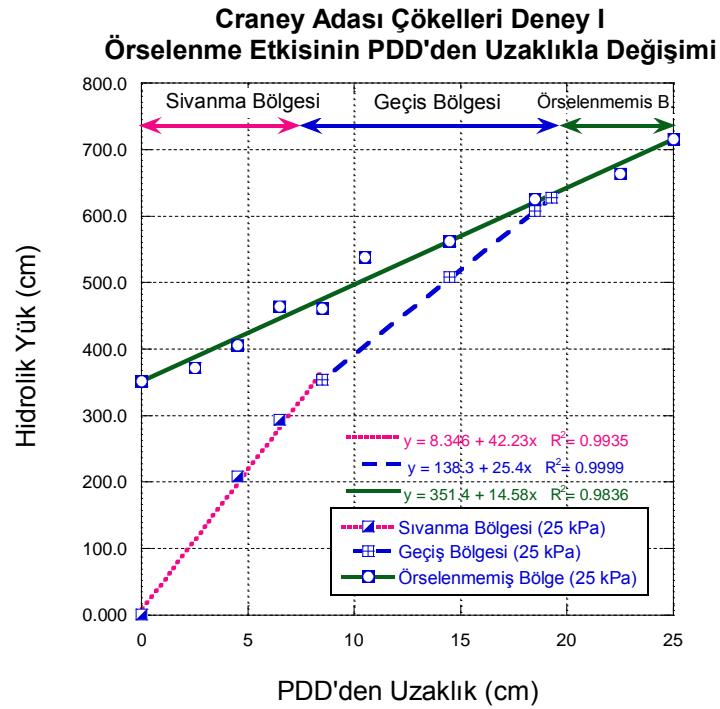
olarak bulunmuştur. Şekil 4.9'da sıvanma, geçiş ve örselenmemiş bölgedeki lineer doğruların eğiminden bu bölgelerdeki hidrolik eğimler hesaplanmıştır. Yukarıda belirlenen q/A değeri sıvanma bölgesi, geçiş bölgesi ve örselenmemiş bölge için belirlenen hidrolik eğime bölündüğünde bu bölgeler için hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Deney I için

yukarıda bahsedilen hesaplama yöntemi diğer deneyler için de uygulanarak, PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen örselenme etkisinin genişliği ve ayrıca bu örselenme bölgelerindeki hidrolik iletkenlik değerlerinin değişimi belirlenerek Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

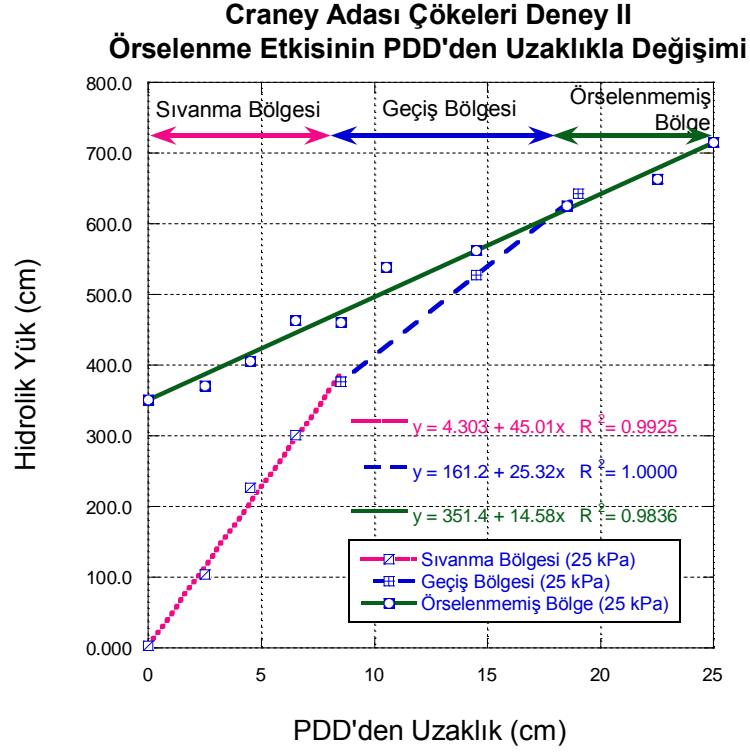
Zemindeki örselenmiş bölge çapının eşdeğer mandrel çapına oranı olarak tanımlanan örselenme oranının belirlenmesi için, kullanılan mandrel boyutlarına göre eşdeğer mandrel çapı Rixner vd., (1986) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak belirlenmiştir. Bu eşitlik;

$$d_{eş} = \frac{(w + t)}{2} \quad (4.1)$$

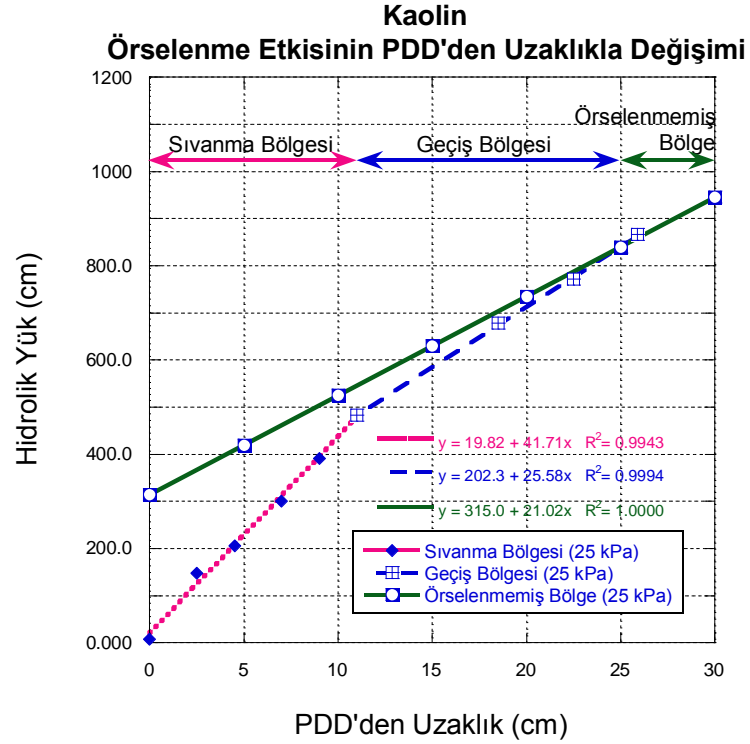
şeklindedir. Eşitlikte tanımlanan w ve t , sırasıyla kullanılan mandrel genişliği ve kalınlığı, $d_{eş}$ ise eşdeğer mandrel çapı'dır. Bu eşitliğe göre eşdeğer mandrel çapı 67.5 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.9 Craney Adası çökelleri Deney I de örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri



Şekil 4.10 Craney Adası çökelleri Deney II de örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri



Şekil 4.11 Kaolin kili kullanılan deneyde örselenmiş zeminde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri

Çizelge 4.2 PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zeminde meydana gelen örselenme etkisinin genişliği ve bu örselenme bölgelerindeki hidrolik iletkenlik değerlerinin değişimi

Deney Numarası	Bölgenin Tanımı		Genişlik	Çap	Örselenme Oranı	q/A	Hidrolik Eğim i	Hidrolik İletkenlik k	Örselenme Derecesi
			mm	mm	$d_{\text{örselenme}}/d_{\text{eş}}$	cm/s	-	cm/s	$k_{\text{örselenme}}/k_{\text{doğal}}$
Deney I CAÇ	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	77	154	2.3	1.71×10^{-6}	42.23	4.05×10^{-8}	0.35
		Geçiş	120	394	5.8	1.71×10^{-6}	25.41	6.73×10^{-8}	0.57
	Örselenmemiş Bölge		**	≥ 394	-	1.71×10^{-6}	14.58	1.17×10^{-7}	1.00
Deney II CAÇ	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	80	160	2.4	1.67×10^{-6}	45.01	3.71×10^{-8}	0.32
		Geçiş	97	354	5.2	1.67×10^{-6}	25.32	6.60×10^{-8}	0.57
	Örselenmemiş Bölge		**	≥ 354	-	1.67×10^{-6}	14.58	1.15×10^{-7}	1.00
Deney III Kaolin	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	113	226	3.3	2.90×10^{-6}	41.71	6.96×10^{-8}	0.50
		Geçiş	134	494	7.3	2.90×10^{-6}	25.58	1.13×10^{-7}	0.82
	Örselenmemiş Bölge		**	≥ 494	-	2.90×10^{-6}	21.02	1.38×10^{-7}	1.00

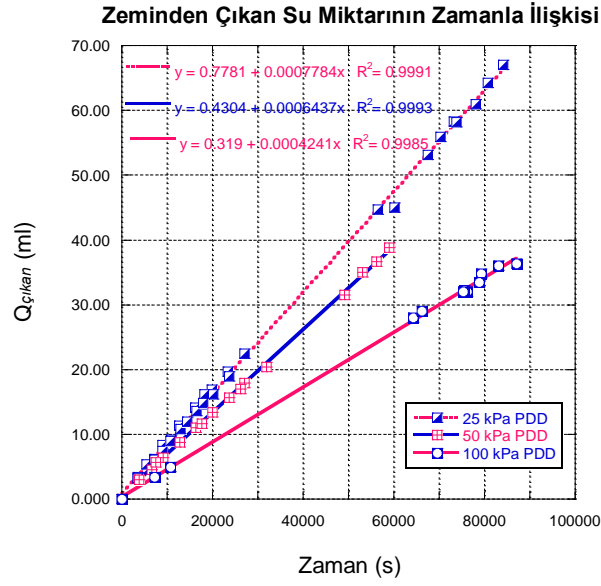
**Örselenmemiş bölge genişliği belirlenmemiş olup, sıvanma ve geçiş bölgelerinin toplam genişliğinden sonraki bölge olduğu bilinmektedir.

Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi, bu deney koşulları için, sıvanma bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgeye göre Craney Adası çökelleriyle yapılan deneylerde 2.90-3.13 kaolin kili kullanılarak yapılan deneyde ise 2.00 kat daha küçük olduğu belirlenmiştir. Yine aynı şekilde geçiş bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgeye göre Craney Adası çökelleri ve kaolin kili kullanılarak yapılan deneylerde sırasıyla 1.74-1.22 kat daha küçük olduğu belirlenmiştir.

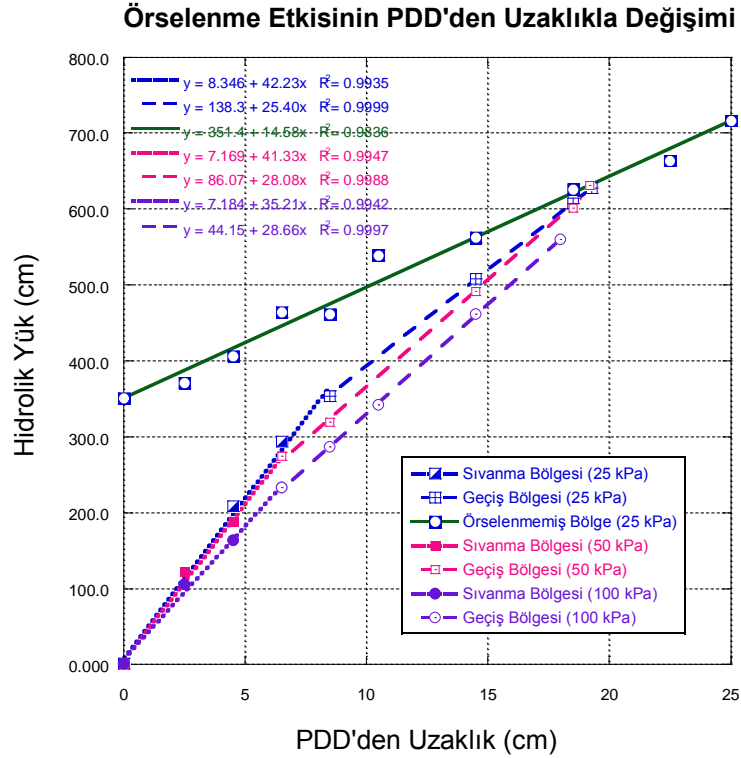
PDD'lerin zemine mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında PDD'nin etrafını saran zeminde PDD boyunca örselenme oluştuğu, ayrıca bu örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgedeki zemine göre önemli bir derecede farklı olduğu belirlenmiştir. Arazi uygulamalarında PDD zemine yerleştirildikten sonra değişik sürşarj yükleri altında zeminin konsolidasyonu sağlanmaktadır. Bu nedenle konsolidasyonu devam etmekte olan bir zeminde örselenme bölgesinin genişliği ve ayrıca bu bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliği dolayısıyla örselenme derecesi değişecektir. Bu düşünceyle örselenme bölgesi model deneyinde Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan I. Deney'de değişik konsolidasyon gerilmeleri (50-100 kPa) kademeli olarak uygulanarak örselenme etkisinin değişimi incelenmiştir.

Herbir konsolidasyon gerilmesi altında zeminin konsolidasyonu tamamlandıktan sonra hidrolik iletkenlik deneyleri tekrarlanmıştır. PDD yerleştirildikten sonra değişik yük kademeleri için zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi Şekil 4.12'de, örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliği belirlenirken değişik piezometre noktaları için ölçülen boşluk

suyu basıncından hesaplanan hidrolik yük değerleri ise Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Değişik yük kademeleri için zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi



Şekil 4.13 Örselenmiş zemine uygulanan değişik konsolidasyon gerilmelerinde PDD'den değişen uzaklıklardaki hidrolik yük değerleri

Şekil 4.13’de gösterilen değişik konsolidasyon gerilmeleri altında PDD’den değişen uzaklıklardaki ölçülen hidrolik yük değerlerinden hesaplanan hidrolik iletkenlik değerleri, örselenme bölgesinin genişliği ve örselenme derecesinin değişimi Çizelge 4.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 Değişik konsolidasyon gerilmelerinde hidrolik iletkenliğin örselenme bölgesi ve örselenmemiş bölge için değişimi

Gerilme kPa	Bölgenin Tanımı		Genişlik	q/A	Hidrolik Eğim i	Hidrolik İletkenlik k	Örselenme Derecesi
			mm	cm/s	-	cm/s	$k_{\text{örselenme}}/k_{\text{doğal}}$
25	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	77	1.71×10^{-6}	42.23	4.05×10^{-8}	0.35
		Geçiş	120	1.71×10^{-6}	25.41	6.73×10^{-8}	0.57
	Örselenmemiş Bölge		**	1.71×10^{-6}	14.58	1.17×10^{-7}	1.00
50	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	60	1.41×10^{-6}	41.33	3.42×10^{-8}	0.65
		Geçiş	130	1.41×10^{-6}	28.10	5.03×10^{-8}	0.96
	Örselenmemiş Bölge		**	1.41×10^{-6}	-	$5.25 \times 10^{-8} *$	1.00
100	Örselenmiş Bölge	Sıvanma	57	9.32×10^{-7}	35.21	2.65×10^{-8}	0.81
		Geçiş	-	9.32×10^{-7}	28.66	3.25×10^{-8}	0.99
	Örselenmemiş Bölge		**	9.32×10^{-7}	-	$3.28 \times 10^{-8} *$	1.00

*Belirtilen yük kademesi için ödometre deneyi sonuçlarına göre belirlenen örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliği.

**Örselenmemiş bölge genişliği belirlenememiş olup, sıvanma ve geçiş bölgelerinin toplam genişliğinden sonraki bölge olduğu bilinmektedir.

Örselenmiş bölgenin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğine oranı k_s/k_c ile belirlenen bozulma derecesi ve örselenme bölgesinin genişliği araziden toplanan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri, model deneyler, pratik düşünce ve deneyim üzerine temellendirilen bir çok araştırmaya konu olmuştur.

Bergado vd. (1993a,b), Hansbo (1986,1997), Hird ve Moseley (2000) k_s/k_c bozulma derecesinin 0.10-0.33 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte Bergado vd. (1991) ve Onoue vd. (1991) k_s/k_c oranı için 0.50-0.66 arasında değerler önerirken, Casagrande ve Poulos (1969) tarafından 0.001 kadar düşük bir değer önerilmiştir. Sharma ve Xiao (2000) yaptıkları model deney çalışmalarında sıvanmış bölgedeki kil tabakalarının ortalama permeabilitesinin bozulmamış bölgedekinden 1.3 kat küçük olduğunu belirlemişlerdir ki bu değer örselenme derecesinin 0.77 olduğu anlamına gelmektedir.

Örselenme bölgesinin genişliğini belirlemeye yönelik yapılan araştırmalarda da, Onoue vd. (1991) geçiş bölgesinin dış sınırının PDD’nin merkezinden olan uzaklığı eş değer mandrel yarı çapının 6-7 katı olduğunu ayrıca geçiş bölgesinde hidrolik iletkenliğin PDD’den

uzaklaştıkça yaklaşık lineer olarak arttığını belirlemişlerdir. Indraratna ve Redana (1998), Sharma ve Xiao (2000) da bu lineer değişimi laboratuvar deneyleriyle gözlemlemişlerdir. Ancak Indraratna ve Redana (1998) geçiş bölgesi genişliğinin, eş değer mandrel yarı çapının 7 katından büyük olduğunu, Sharma ve Xiao (2000) ise bu değer 10-15 kat büyük olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca sıvanma bölgesinin genişliğini belirlemeye yönelik yapılan araştırmalardan, Hansbo (1986, 1987, 1997), Bergado vd., (1991, 1993b), Onoue vd., (1991), Holtz vd., (1991), Mesri vd., (1994), Chai ve Miura (1999) tarafından yapılan çalışmalarda sıvanma bölgesinin genişliği, eşdeğer mandrel yarıçapının 1-4 katı arasında değiştiği, Hansbo (1987), Chai ve Miura (1999), Hird ve Moseley (2000) tarafından yapılan diğer araştırmalarda ise sıvanma bölgesinin genişliği eş değer mandrel yarı çapının 2-3 katı arasında değiştiği önerilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada PDD'lerin yerleştirilmesinde kullanılan mandrel'in zemine yerleştirme sırasında düşey dren etrafındaki zeminde örselenmeye sebep olduğu, ayrıca bu örselenmiş bölgedeki zemin özelliklerinin örselenmemiş bölgedeki zemin özelliklerinden önemli derecede farklı olduğu doğrudan ölçümlerle belirlenmiştir.

Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan deneylerde 25 kPa'lık jeolojik yanal efektif gerilme altında PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında zemindeki örselenme derecesi sıvanma bölgesi için 0.35-0.32 bulunurken geçiş bölgesi için bu değer 0.57 olarak bulunmuştur. Yine aynı çalışmada örselenme bölgesinin sıvanma ve geçiş bölgelerinden oluştuğu bu bölgelerdeki hidrolik iletkenliğin PDD'den uzaklaştıkça lineer olarak arttığı belirlenirken, sıvanma bölgesinin genişliği Rixner vd. (1986) tarafından önerilen eşitliğe göre bulunan eşdeğer mandrel çapının 2.3-2.4 katı olduğu ve geçiş bölgesiyle birlikte bu değer 5.8-5.2 katı olduğu deneysel olarak belirlenmiştir.

Farklı zemin türleri için, aynı jeolojik yanal efektif gerilme (25 kPa) altında PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında kullanılan mandrel boyutu sabit tutularak zemindeki örselenme derecesinin sıvanma ve geçiş bölgeleri için ne şekilde değişeceğini belirlemek amacıyla kaolin kili kullanılarak III. Deney yapılmıştır. Bu deneyde yine örselenme bölgesinin sıvanma ve geçiş bölgelerinden oluştuğu bu bölgelerdeki hidrolik iletkenliğin PDD'den uzaklaştıkça lineer olarak arttığı belirlenmiş, zemindeki örselenme derecesi sıvanma bölgesi için 0.50 bulunurken geçiş bölgesi için bu değer 0.82 olarak bulunmuştur. Ayrıca sıvanma bölgesinin genişliği, eşdeğer mandrel çapının 3.3 katı olduğu ve geçiş bölgesiyle birlikte bu değer 7.3 katı olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler literatürde bulunan diğer araştırmacıların bulunduğu sonuçlarla yakın benzerlik göstermektedir.

Önyüklemeye ile zemin iyileştirme yönteminde arazide uygulanan değişik sürşarj yükleri altında bozulma derecesinin ne şekilde değişeceğini belirlemek için sadece Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan I. Deneyde uygulanan farklı gerilmeler (50-100 kPa) altında ikinci grup deneyler yapılmıştır. Bu ikinci grup deneylerde, örselenme bölgesi model deney sisteminin yatay olarak tasarlanmasından ve zeminin düşey doğrultuda konsolide edilmesinden dolayı, arazi uygulamalarındaki değişik sürşarj yükleri altında sıvanma ve geçiş bölgelerinin genişliğinin değişiminden farklılık göstereceği bilinmekle birlikte, bu ikinci grup deneyler sadece değişik sürşarj yükleri altında bozulma derecesinin ne şekilde değişeceğini belirlemeye yöneliktir. Bu deneylerde 50-100 kPa'lık gerilme altında bozulma derecesinin sırasıyla sıvanma bölgesi için 0.65-0.81, geçiş bölgesi için 0.96-0.99 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında kullanılan mandrel boyutlarına bağlı olarak belirli bir bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğinde önemli bir miktarda azalmaya sebep olduğu, daha sonra uygulanan değişik sürşarj yükleri altında zeminin konsolidasyonu sırasında bu örselenme etkisinin giderek azaldığı belirlenmiştir.

PDD'ler kullanılarak yapılacak zemin iyileştirme projelerinde hedeflenen konsolidasyon süresi ve iyileştirme derecesine ulaşmak için bu örselenme etkisininin gözetilmesi ve ayrıca bu çalışmada belirlenen örselenme bölgesi genişliğinin kullanılacak mandrel boyutu ve şekline bağlı olarak değişeceğini bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın bir devamı olarak mandrel boyutunun ve şeklinin örselenme bölgesi genişliğine ve örselenme derecesine etkisi araştırılabilir.

5. PREFABRİK DÜŞEY DRENLERİN BOŞALTMA KAPASİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN BELİRLENMESİ

Boşaltma kapasitesi, Prefabrik Düşey Drenler'in (PDD) performansı için en önemli parametredir. Büyük konsolidasyon oturmalarından dolayı PDD'de meydana gelen (bükülme, sıkışma, eğilme, burkulma) deformasyonlar sonucunda PDD'nin boşaltma kapasitesi önemli bir miktarda veya tamamen azalabilir (Kremer vd., 1983; Ali 1991; Aboshi vd., 2001; Bo vd., 2003; Chu vd., 2006). PDD'de meydana gelen deformasyon miktarı, PDD'nin deformasyona karşı direncinin, PDD tipinin, zeminin sıkışabilirliğinin, zemine uygulanan düşey gerilmenin bir fonksiyonu olduğu düşünülmektedir. Birçok araştırmacının PDD'lerin deformasyonu üzerine çalışmalarına rağmen, deformasyonun boşaltma kapasitesi üzerindeki etkisi halen belirsizdir (Holtz vd., 1991; Aboshi vd., 2001; Chu vd., 2006).

PDD'nin deformasyonunun boşaltma kapasitesi üzerine etkisinin belirlendiği araştırmalarda iki yöntem benimsenmiştir. Birinci yöntemde PDD bükülerek tahmin edilen PDD'de meydana gelecek deformasyon biçimi oluşturulmaktadır. Daha sonra deforme edilmiş PDD'yi yanal olarak sınırlandırmak için membran veya zemin içerisine yerleştirilerek boşaltma kapasitesi deneyi yapılmaktadır. İkinci yöntemde, PDD zemin içerisine yerleştirilerek konsolidasyon oturmalarıyla doğal bir şekilde deformasyon yapması sağlanarak, zemin içerisinde bulunan deforme edilmiş PDD'nin boşaltma kapasitesi ölçülmektedir.

Birinci yöntemde PDD üzerinde yapay bir deformasyon etkilidir. Bu nedenle genel arazi şartlarına benzemediğinden boşaltma kapasitesi yüksek veya düşük belirlenilebilir. Fakat bu yöntemle daha hızlı bir şekilde deney sonuçlarına ulaşılabilir. İkinci yöntemde boşaltma kapasitesinin belirlenmesi uzun zaman almasına rağmen arazi şartlarına daha çok benzemektedir ve arazi şartları daha iyi temsil edilebilir.

Elle deforme edilmiş PDD'nin boşaltma kapasitesi, PDD'nin türü ve deformasyon şekliyle önemli bir miktarda değişmektedir. Lawrence ve Koerner (1988), hidrolik eğimin 1.00 olması durumu için birçok PDD türünün boşaltma kapasitesini basit bükme cihazı kullanarak araştırmışlardır. Bu araştırmaya göre PDD'lerin boşaltma kapasitesi 90°'lik bir kıvrımla %9-72 arasında azalmaktadır. Holtz vd., (1989), hidrolik eğimin 1.00 olması durumu için sinüs eğrisi şeklinde deformasyona zorlanmış PDD'nin boşaltma kapasitesinin, zeminin %20 oranında oturması durumunda önemli bir miktarda azaldığını bildirmektedir. Chang vd. (1994), maksimum 294 kPa'la sınırlandırılmış bir gerilme altında U ve V harfleri şeklinde deformasyona zorlanmış PDD'lerin boşaltma kapasitesini ölçmek için üç eksenli deney cihazına benzer bir deney aleti kullanmışlardır. Hidrolik eğimin 0.46, 0.87, 1.31 ve 1.74

olması durumlarında test edilen 6 PDD'nin boşaltma kapasitesindeki azalmanın %20-92 civarında olduğunu bildirmişlerdir. Bergado vd. (1996), modifiye edilmiş üç eksenli deney cihazını kullanarak birçok başlangıç deformasyon biçimleri için değişik PDD'lerin boşaltma kapasitesini yoğun bir şekilde araştırmışlardır. Hidrolik eğimin 0.25, 0.50 ve 1.00 olması durumlarında iki noktadan sıkıştırılmış ve %30 eğilmiş PDD'nin türüne bağlı olarak %34-99 oranında boşaltma kapasitesinin azaldığını belirlenmiştir. Cline ve Burns (2003), 90°'lik bir kıvrım oluşturabilen basit bir cihaz kullanarak, hidrolik eğimin 1.00 olması durumu için plastik membranla sarılı PDD'nin boşaltma kapasitesindeki azalmanın %17-34 arasında değiştiğini rapor etmişlerdir.

Birçok araştırmacının, düşey şekil değiştirme yüzdesinin 15'den büyük olması durumunda boşaltma kapasitesinin önemli bir miktarda azaldığını kabul etmesine rağmen, PDD'nin doğal deforme edilmesinin boşaltma kapasitesi üzerine etkisi hakkında literatürde tutarsız açıklamalar bulunmaktadır. Sasaki (1981) ve Hansbo (1983), büyük boyutlu laboratuvar deneylerinde %15 oranında düşey şekil değiştirmeye PDD'nin katlanmasının boşaltma kapasitesi üzerinde etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Benzer bir şekilde Miura vd. (1998), %20 düşey şekil değiştirmeye kadar PDD'nin katlanmasının boşaltma kapasitesini etkilemediğini rapor etmişlerdir. Buna karşın Kremer vd. (1982), Kremer (1983), büyük şekil değiştirmelerden dolayı PDD'nin katlanmasının boşaltma kapasitesini tamamen azaltabileceğini ve %15'den daha büyük düşey şekil değiştirme olduğunda boşaltma kapasitesindeki azalmanın dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Ali (1991), 0.5 m genişliğinde ve yüksekliğinde bir konsolidasyon hücresinde kaolin zemini kullanarak konsolidasyon oturmalarından dolayı doğal bir şekilde deformasyona uğramış PDD'nin boşaltma kapasitesini araştırmıştır. Bu çalışmada hidrolik eğimin 0.50, düşey gerilmenin 120 kPa, göreceli sıkışmanın %30'un altında olması durumunda PDD'nin rijitliğine bağlı olarak boşaltma kapasitesinin %47-99 aralığında önemli bir miktarda azaldığı belirlenmiştir. Kim vd. (2003), konsolidasyon oturmaları altında PDD'nin boşaltma kapasitesini incelemek için 0.5 m çaplı bir konsolidasyon hücresi kullanmışlardır. Bu çalışmada 245 kPa'lık düşey gerilme altında konsolidasyonun sonlanmasından sonra hidrolik eğimin 0.50 olması durumunda PDD'nin başlangıç boşaltma kapasitesine göre yaklaşık %89 civarında bir azalma olduğu belirlenmiştir. Fakat bu çalışmada konsolidasyon sırasında meydana gelen oturma yüzdesinin ne kadar olduğu belirsizdir. Chu vd. (2006), 495 mm çapında bir konsolidasyon hücresi kullanarak, 110 kPa düşey gerilme altında çok yumuşak bir zemin içerisindeki PDD'nin boşaltma kapasitesini araştırmışlardır. Konsolidasyon aşamasının

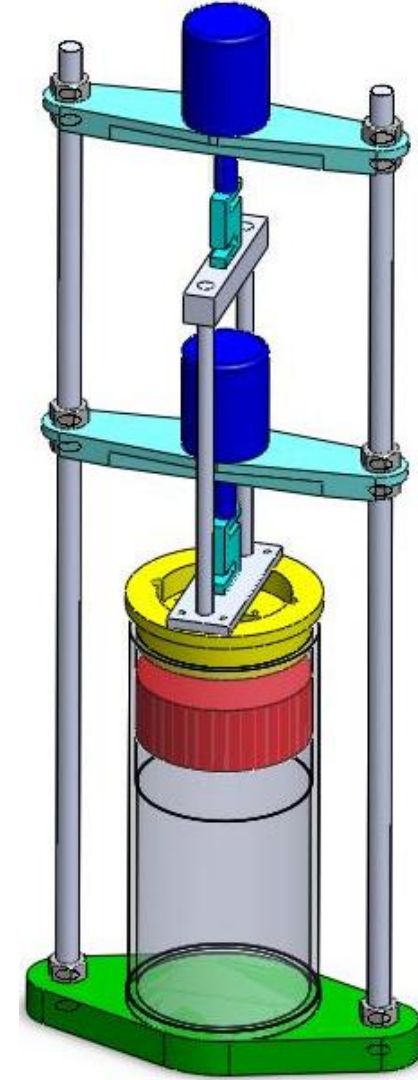
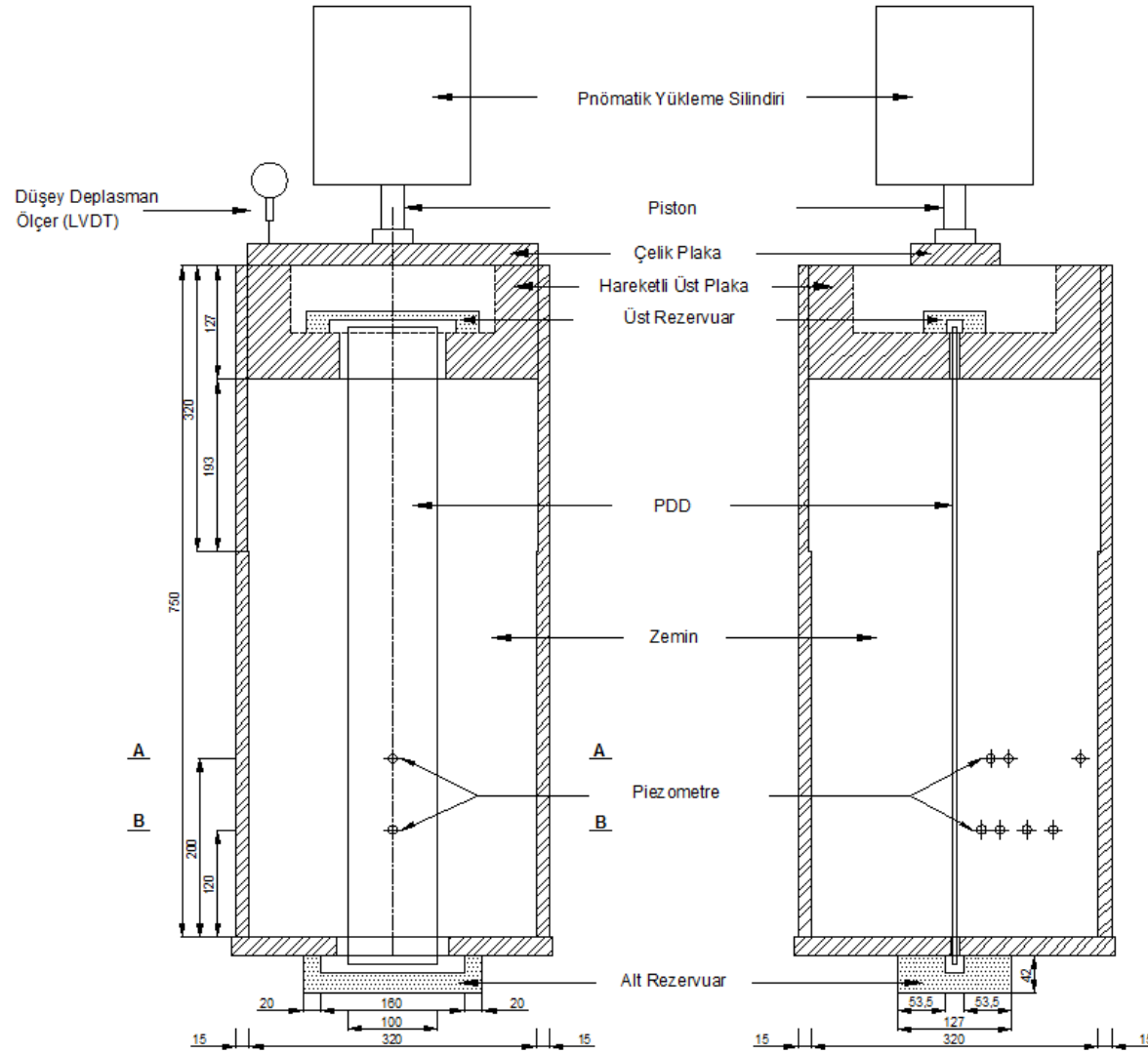
sonunda %46 oranında düşey şekil değiştirme meydana geldiğinde, PDD'nin boşaltma kapasitesinde %84 oranında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada boşaltma kapasitesi sabit seviyeli metotla, hidrolik eğimin 0.50 olması durumu için ölçülmüştür.

Literatürde bulunan bu çalışmalara ilave olarak bu doktora tezi kapsamında, PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerinde etkili olduğu düşünülen birçok faktörün etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle dört farklı özellikteki PDD türü için, uygulanan hidrolik eğim, PDD'ye etkiyen yanal gerilme, PDD'nin uygulandığı zemin cinsi, PDD'nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörler dikkate alınarak, zeminin konsolidasyonu sırasında oluşan PDD'nin deformasyonu ve çekirdek bölgesinin kirlenmesinin PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerine etkileri Wisconsin-Madison Üniversitesi'nde tasarlanmış (Tran-Nguyen., 2010) olan büyük boyutlu “boşaltma kapasitesi model deney sistemi” kullanılarak araştırılmıştır.

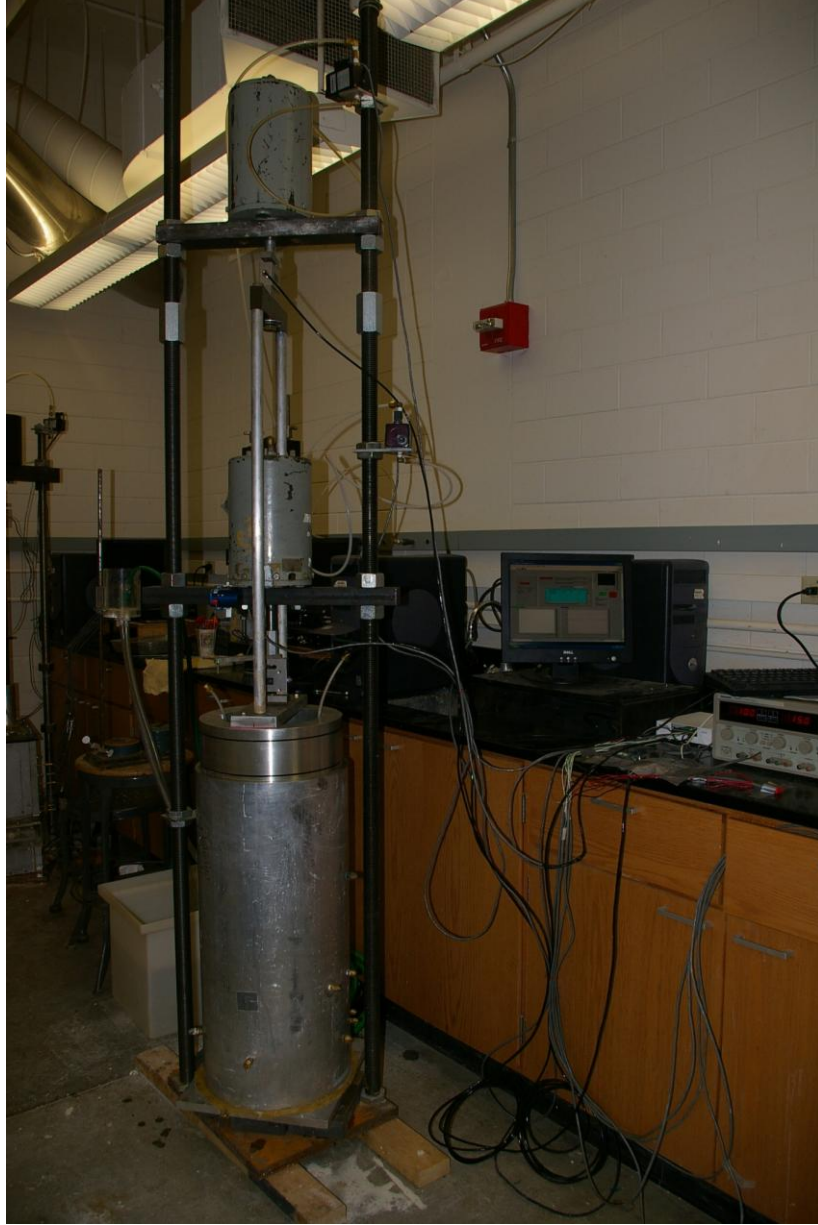
5.1 Model Deney Sistemi

Silindirik olarak tasarlanan büyük boyutlu konsolidasyon deney sisteminin şematik görünümü Şekil 5.1'de ve bu model deney sisteminin fotoğrafı da Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Bu model deney sisteminin öncelikli amacı değişik konsolidasyon gerilmeleri altında prefabrik düşey drende meydana gelecek deformasyonlar sonucu, boşaltma kapasitesindeki azalmayı bulmaya yöneliktir.

Şekillerde gösterilen büyük boyutlu bu deney sisteminin yüksekliği 750 mm ve iç çapı 320 mm'dir. Deney sistemindeki tüm parçalar paslanmaz çelikten sadece üst ve alt su toplama kanalları sert plastik malzemeden imal edilmiştir. Silindirin üst kısmında konsolidasyon sırasında yükün uygulandığı, 320 mm hareket edebilen rijit bir plaka bulunmaktadır. Bu rijit plaka kalınlığı 127 mm olarak tasarlanarak konsolidasyon sırasında plakanın silindir hücre içerisinde dönmesi engellenmiştir. Deney sırasında zemin üzerine uygulanan yük, eş zamanlı çalışabilen yükleme kontrollü iki farklı pnömatik yükleme silindiri vasıtasıyla sağlanmaktadır. Pnömatik silindirlerle üst hareketli rijit plaka arasına yerleştirilen iki farklı Load Cell kullanılarak da pnömatik silindirlerden zemine aktarılan toplam yük kontrol edilebilmektedir. Deney sırasında zemindeki eksenel şekil değiştirmeleri ölçmeye yarayan bir adet deplasman ölçer (LVDT) de pnömatik silindirin bağlı olduğu rijit çelik plaka ile hareketli rijit plakaya yük aktaran çelik bar arasında bağlı bulunmaktadır.



Şekil 5.1 Büyük boyutlu model deney sisteminin şematik görünümü (Geo. Lab. CEE. UWM)



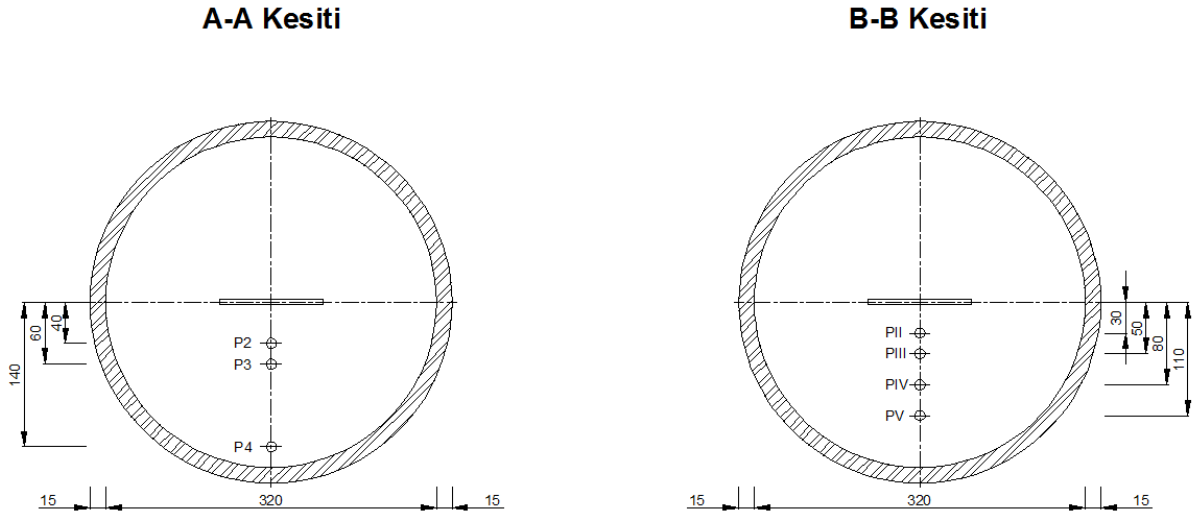
Şekil 5.2 Büyük boyutlu model deney sistemi (Geo. Lab. CEE. UWM)

Hareketli rijit plakanın merkezinde, istenildiği takdirde zemin belirli bir gerilme altında konsolide edildikten sonra PDD'nin zemin içerisine yerleştirilmesinde kullanılan mandrelin geçebileceği boyutlarda (138 x 10.7mm) boşluk bulunmaktadır.

Konsolidasyon sırasında zemin suyunun sadece yanal doğrultuda olmak üzere prefabrik düşey drenen geçerek hareket etmesini sağlamak amacıyla zeminle alt ve üst rijit plaka arasına geçirimsiz bir membran yerleştirilmektedir. Prefabrik düşey dren içerisinde hareket eden zemin suyu, alt ve üst rijit plakalara monte edilebilen plastik iki su toplama hücrelerinde toplanmaktadır. Bu şekilde istenildiği takdirde silindir deney hücresinin alt kısmında bulunan rijit plakaya bağlı su toplama kanalında drenaja izin verilmemekte böylece zemin içerisindeki

su sadece radyal doğrultuda hareket edip PDD'den geçerek üst su toplama hücreinde toplanmaktadır.

Silindir deney hücresinin çeperinde değişik noktalarda ve yüksekliklerde ($h=12-20$ cm) zemin içerisinde boşluk suyu basıncı ölçmek için açılmış kanallar bulunmaktadır. Bu kanallara boşluk suyu basıncı ölçerler yerleştirilerek deney süresince boşluk suyu basıncı değişimi yatay ve düşey doğrultuda belirlenebilmektedir. Silindir deney hücresinin çeperinde bulunan boşluk suyu basıncı ölçme kanallarından zemin içerisinde boşluk suyu basıncı ölçümünün yapıldığı noktaların konumları şematik olarak Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Ayrıca yukarıda bahsedilen tüm data ölçerlerden alınan veriyi bilgisayara aktarmak için Labview isimli bir bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır.



Şekil 5.3 Büyük boyutlu model deney sisteminde boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarının şematik görünümü

5.2 Deney Numunesinin Hazırlanması

Bu deneysel çalışma için, kaolin kilinden hazırlanan zemin su muhtevası likit limit değerinin yaklaşık 2 katı olacak şekilde saf havası alınmış su ile karıştırılarak, bulamaç haline getirilmiştir. Hazırlanan numune, yaklaşık olarak 1 hafta süreyle su muhtevası kaybolmayacak şekilde bir kapta bekletilerek ve zaman zaman mikserle karıştırılarak danelerin segregasyonu önlenerek, homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bulamaç halindeki numuneler, deney sistemine yerleştirilmeden önce yaklaşık 30 dakika karıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir.

Silindirik model deney sisteminde bu çok yumuşak zeminin konsolidasyonu sırasında hacim değişiminin çok fazla olacağı ve aynı zamanda üst rijit plakanın hareket bölgesinin de sınırlı

olduğu göz önünde bulundurularak su muhtevasının likit limit değerinin yaklaşık iki katı seçilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca farklı zemin türlerinde kullanılan PDD'lerin aynı konsolidasyon gerilmelerine maruz kalmasına rağmen boşaltma kapasitelerinin değişimini belirlemek için daha önce arazide PDD'ler kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin de uygulandığı, Craney Adası çökelleri temin edilmiş olup, doğal su muhtevası korunarak model deney sisteminde kullanılmıştır.

5.3 Deney Yöntemi

Prefabrik düşey dren zeminle temas etmeyecek bir şekilde mandrel içerisine yerleştirildikten sonra, prefabrik düşey drenin alt ucu silindirik hücrenin taban plakasındaki açıklıktan bu plakanın altında bulunan alt su toplama kanalına yerleştirilmiştir. Daha sonra mandrel silindirik büyük boyutlu model deney sisteminin merkezine yerleştirilerek sabitlenmiştir. Hazırlanan deney numunesi deney hücresini 5-6 eşit parçada dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Her eşit yükseklikte zemin deney hücresine yerleştirildikten sonra bir vibrasyon makinası kullanılarak zemin içerisinde mümkün olduğunca az miktarda hava kalması sağlanmıştır. Ayrıca her bir zemin seviyesi için su muhtevası örneği alınmıştır. Zemin hücre içerisine yerleştirilmeden önce hücrenin alt kısmı, tamamen yerleştirildikten sonra da bu zemin numunesinin üzeri geçirimsiz bir geomembranla kapatılmıştır. Geomembran'ın kullanılmasındaki amaç, zemin suyunun düşey doğrultuda hareket etmesi engellenerek zemin suyu hareketinin prefabrik düşey drene doğru olmasını sağlamak içindir. Prefabrik düşey drenin, geomembran'ın merkezinden geçtiği noktada sızıntı olması durumunda silindirik hücrenin alt ve üstünde bulunan su toplama kanallarının zeminle dolmasını engellemek amacıyla da geomembran'ın üzeri geçirimli bir geotekstil ile kapatılmıştır.

Daha sonra mandrel silindirik hücrenin merkezinden uzaklaşmayacak bir şekilde sabit hızla yukarıya doğru çekilerek mandrel içerisindeki prefabrik düşey drenin deformasyon yapmadan zeminin merkezinde kalması sağlanmıştır. Silindirik model deneyde prefabrik düşey drenin zemine yerleştirilmesi yöntemi Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Bu işlemden sonra hareketli üst plaka kapatılarak prefabrik düşey drenin üst ucu hareketli üst plakanın üstünde bulunan üst su toplama kanalına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.4 Silindirik büyük boyutlu model deneyde PDD'nin zemine yerleştirilmesi yöntemi

Deney sistemi konsolidasyon için hazır hale getirildikten sonra 25, 50, 100, 200, 400 veya 500 kPa gerilme altında zemin kademeli olarak konsolide edilmiştir. Her yük kademesinde konsolidasyonun tamamlandığı belirlendikten sonra diğer bir yük kademesine geçmeden önce değişik hidrolik eğimlerde (0.1-0.25-0.50-0.75-1.0) boşaltma kapasitesi deneyi yapılarak, her yük kademesinde zeminde dolayısıyla prefabrik düşey drende meydana gelen deformasyona karşılık prefabrik düşey drenin boşaltma kapasitesindeki azalma miktarı belirlenmiştir.

Ayrıca her yük kademesi için konsolidasyon aşamasında deney hücresinin yan çeperinden zemin içerisine yerleştirilen boşluk suyu basıncı ölçerler yardımıyla boşluk suyu basıncının değişimi, hareketli üst plakaya bağlanan bir adet deformasyon ölçer (LVDT) yardımıyla da konsolidasyon sırasında zeminde meydana gelen düşey şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Deney sırasında bu verilerin kaydedilmesinde Labview isimli bir bilgisayar programı kullanılmıştır.

Deney sonunda zemin deney hücrelerinden çıkarılmadan önce değişik numune derinliklerinde, prefabrik düşey drenen yatay ve düşey doğrultuda değişik uzaklıklarda su muhtevası ve veyn deney aleti kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmiştir. PDD'den yatay ve düşey doğrultuda değişik uzaklıklarda drenajsız kayma dayanımının belirlendiği noktalar Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Ayrıca deney sonunda üç farklı noktadan örselenmemiş üç eksenli deney numuneleri alınarak konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.5 PDD'den yatay ve düşey doğrultuda değişik uzaklıklarda drenajsız kayma dayanımının belirlendiği noktalar

Yukarıda bahsedilen deney prosedürü sıvanma etkisi olmayan deneyler için düzenlenmiştir. Ayrıca bu deneylerde iki farklı zemin türü (Kaolin ve Craney Adası Zemini) ve dört farklı prefabrik düşey dren (Colbond CX1000, Mebra Dren 7407, Alidrain, Amerdrain 407) kullanılmıştır. Böylece değişik prefabrik düşey drenlerin maruz kaldıkları düşey deformasyona karşılık boşaltma kapasitelerindeki azalma miktarları belirlenmiştir.

5.4 Boşaltma Kapasitesini Etkileyen Faktörler

5.4.1 Hidrolik Eğim

Belirli bir hidrolik eğim etkisiyle PDD'nin çekirdek bölgesi boyunca aksenal yönde taşınabilen birim zamandaki suyun hacmi boşaltma kapasitesi (q_w) olarak adlandırılmaktadır (Hansbo 1983).

$$q_w = \frac{Q}{i} \quad (5.1)$$

Q = Birim zamanda PDD'den çıkan su hacmi, (m^3/s)

i = Hidrolik Eğim

Bo vd. (2003), yapılan birçok çalışmayı gözönünde bulundurarak hidrolik eğimin boşaltma kapasitesi ölçümlerini etkileyebileceğini bu nedenle boşaltma kapasitesi belirlenirken PDD'nin arazideki hidrolik eğiminin göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir. Buna rağmen arazide PDD içinde hidrolik eğimin belirlenmesi veya tahmin edilmesi oldukça

zordur. Bu nedenle boşaltma kapasitesinin belirlenmesinde hidrolik eğim değerinin 0.50 alınması gerektiğini tavsiye etmişlerdir.

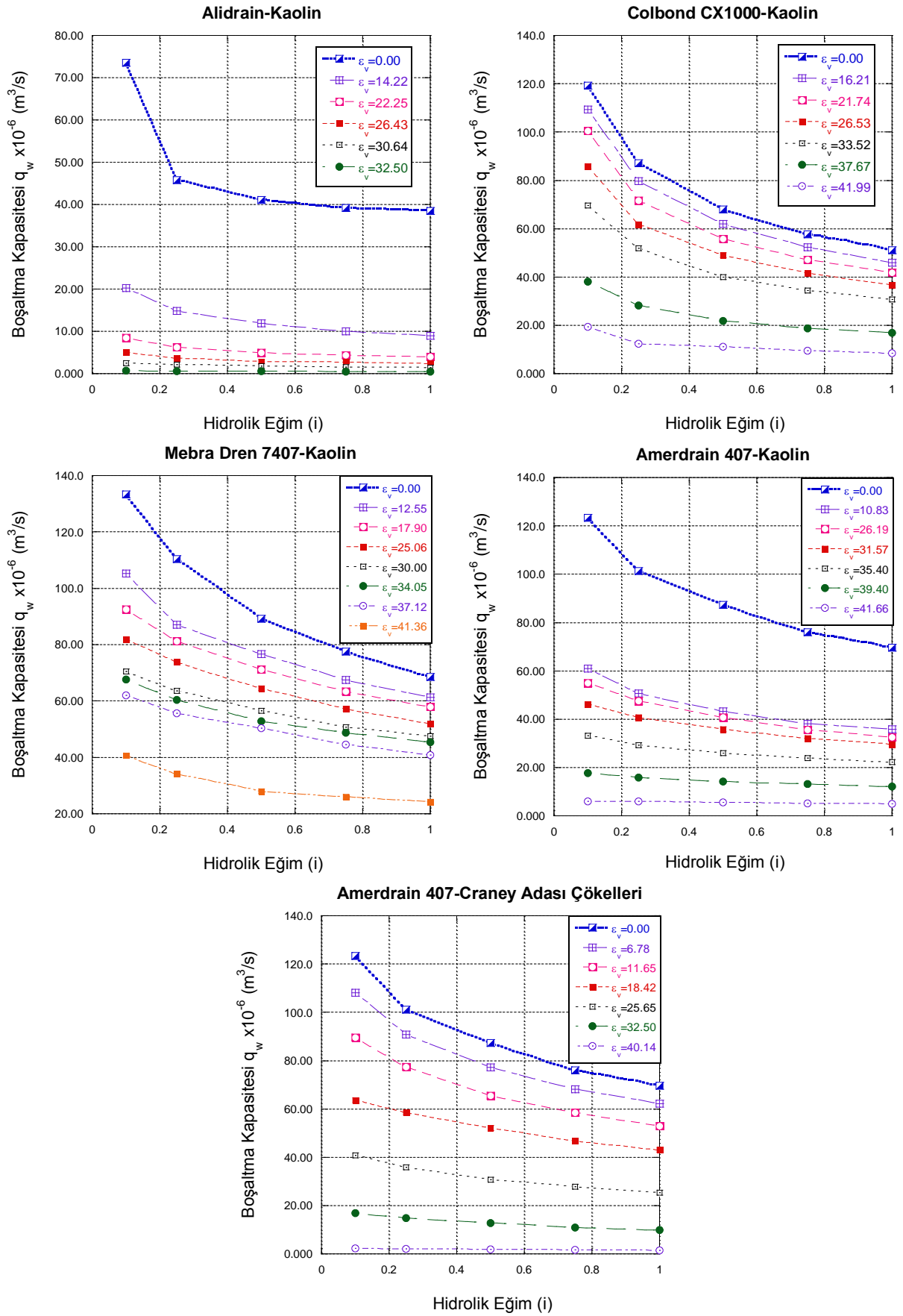
Buna karşın Holtz vd. (1991) hidrolik eğimin boşaltma kapasitesini önemli bir derecede etkilemediği sonucuna varmışlardır.

Literatürde bulunan birbiriyle çelişen açıklamalardan dolayı bu deneysel çalışmada zemin içerisinde bulunan farklı deformasyonlara maruz kalmış PDD'nin boşaltma kapasitesi farklı hidrolik eğimler altında (0.10-0.25-0.50-0.75-1.00) belirlenmiştir. Farklı PDD türleri için farklı hidrolik eğimlerde boşaltma kapasitesinin değişimi Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi farklı zemin türlerinde kullanılan ve farklı deformasyonlara maruz kalmış PDD türlerinin boşaltma kapasitesi, hidrolik eğimin artmasıyla azalmaktadır. Bu nedenle düşük deformasyon seviyelerinde PDD içerisindeki su akımının laminer olmadığı belirlenmiştir. Bu laminer olmayan su akımı ve yüksek hidrolik eğimlerde PDD içerisinde oluşan hava kabarcıkları PDD'nin boşaltma kapasitesini etkilemektedir (Tran-Nguyen., 2010).

Farklı PDD türlerinin farklı zemin türlerinde kullanılması durumunda, PDD'nin boşaltma kapasitesinin $10 \times 10^{-6} (m^3/s)$ 'den büyük olduğu deformasyon seviyelerinde boşaltma kapasitesi, bu deneysel çalışmada kullanılan en büyük hidrolik eğim olan bir değerine ulaştığında yaklaşık %50 oranında azalmaktadır. Buna karşın boşaltma kapasitesinin $10 \times 10^{-6} (m^3/s)$ 'den küçük olduğu yüksek deformasyon seviyelerinde, PDD'nin boşaltma kapasitesi hidrolik eğimin değişiminden etkilenmemektedir.

Genel olarak düşük deformasyon seviyelerinde yüksek boşaltma kapasitesine sahip PDD'nin boşaltma kapasitesi hidrolik eğimin artmasıyla azalırken, yüksek deformasyon seviyelerinde düşük boşaltma kapasitesine sahip PDD de boşaltma kapasitesi hidrolik eğimin etkisinden uzaklaşmaktadır.



Şekil 5.6 Farklı PDD türleri için, drenedeki deformasyona ve hidrolik eğime bağlı olarak PDD'nin boşaltma kapasitesinin değişimi

5.4.2 Eksenel Şekil Değişirme Yüzdesi

Farklı konsolidasyon gerilmelerinde konsolide edilen zeminde meydana gelen eksenel şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak PDD’de meydana gelen deformasyonlar sonucu PDD’nin boşaltma kapasitesindeki değişim belirlenmiştir.

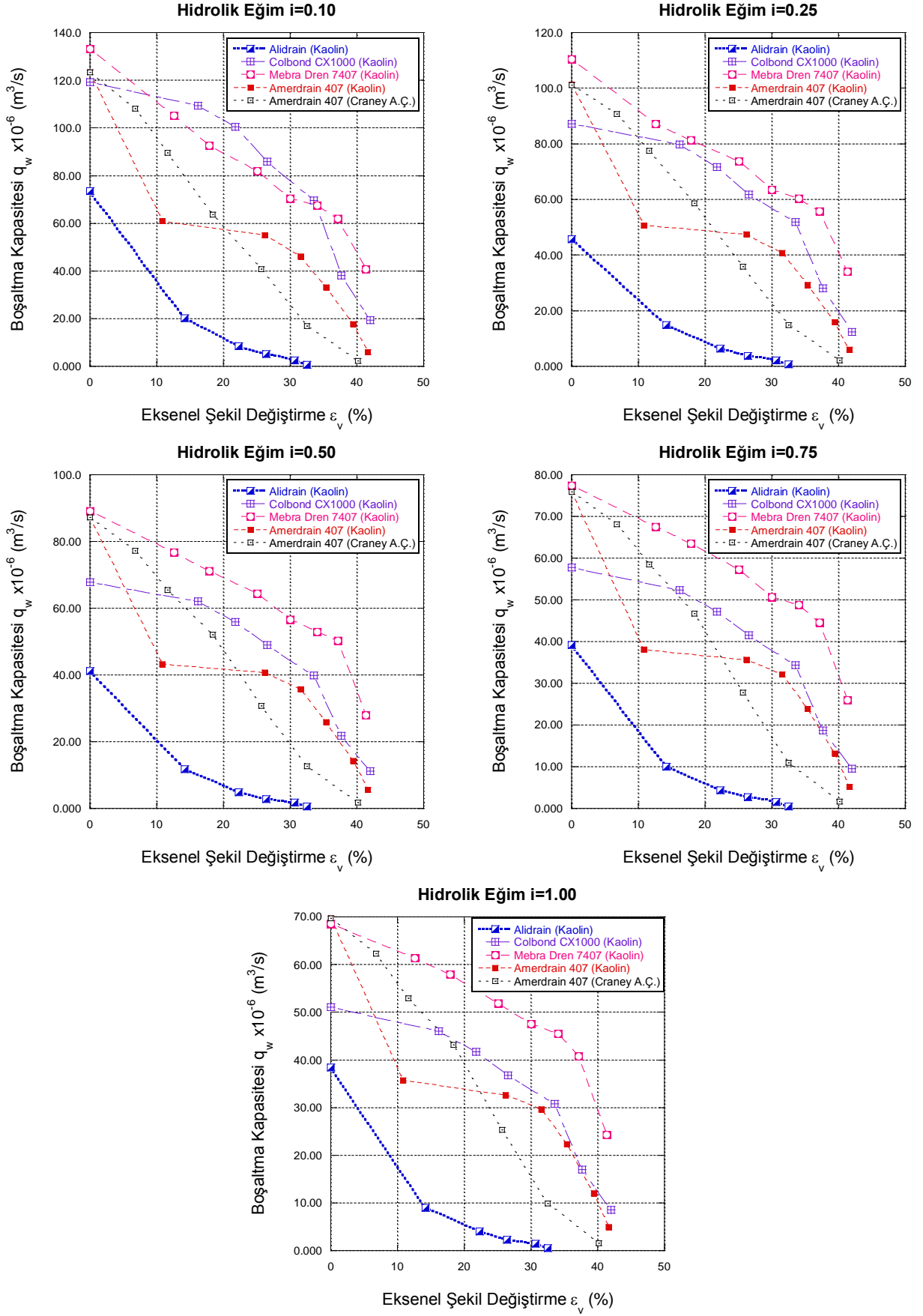
Değişik yük kademelerinde zeminde meydana gelen eksenel şekil değiştirmeler aşağıda belirtilen bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$\% \varepsilon_v = \frac{\text{Düşey Deplasman}}{\text{Başlangıç Zemin Yüksekliği}} \times 100 \quad (5.2)$$

Kaolin kilinden likit limit değerinin yaklaşık iki katı su muhtevasında hazırlanan zemin bulamacına yerleştirilen dört farklı PDD türü için, zeminin farklı konsolidasyon gerilmelerinde (25-50-100-200-500 kPa) konsolide edilmesinden sonra meydana gelen eksenel şekil değiştirmelere bağlı olarak PDD oluşan deformasyonlarda, boşaltma kapasitesi farklı hidrolik eğimlerde belirlenmiştir. Ayrıca farklı zemin tiplerinde kullanılan PDD’lerin aynı deformasyon seviyelerinde olmasına rağmen boşaltma kapasitesinin ne şekilde değişeceğinin belirlenmesi amacıyla Craney Adası çökellerinde uygulanan Amerdrain 407 için farklı hidrolik eğimlerde boşaltma kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçları Şekil 5.7’de gösterilmektedir.

Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere daha önceki bölümde de belirtildiği gibi hidrolik eğimin artmasıyla PDD’lerin boşaltma kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca PDD’lerin boşaltma kapasitesinin düşey deformasyon seviyesi arttıkça önemli oranda azaldığı gözlenmektedir. Hidrolik eğim etkisini göz ardı etmek için Şekil 5.7’de hidrolik eğimin 0.50 olduğu deney sonuçları dikkate alınır, aynı zemin türünde kullanılan dört farklı PDD türünden Mebra Dren 7407’nin boşaltma kapasitesinin tüm deformasyon seviyelerinde diğer dren çeşitlerine göre önemli bir miktarda yüksek olduğu, Mebra Dren 7407’nin %41.5 oranında deformasyona uğraması durumunda %69 oranında azalmasına rağmen boşaltma kapasitesinin $28 \times 10^{-6} (m^3/s)$ olduğu belirlenmiştir.

Yine aynı şekilde Alidrain için sonuçlar incelenirse, drenin başlangıçta hiçbir deformasyona uğramamasına rağmen boşaltma kapasitesinin diğer drenler göre önemli oranda düşük olduğu görülebilir. Yine bu drenin %15 oranında deformasyona maruz kalması durumunda %75 oranında, %33 oranında deformasyona maruz kalması durumunda ise yaklaşık olarak %100 oranında boşaltma kapasitesini yitirdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.7 Farklı PDD türleri için, zeminin konsolidasyonu sırasında PDD’de meydana gelen aksel şekil değişimine bağlı olarak boşaltma kapasitesinin değişimi

Colbond CX 1000 türü PDD'nin başlangıç boşaltma kapasitesinin bir miktar düşük olmasına rağmen bu dren modelinde diğerlerinden farklı olarak dren çekirdek bölgesini oluşturan lifli yapı sayesinde konsolidasyon aşamasında meydana gelen deformasyonlara daha iyi uyum sağladığı bu nedenle boşaltma kapasitesindeki azalma miktarının daha az olduğu, buna karşın yaklaşık % 33 den büyük deformasyon seviyelerinde boşaltma kapasitesinin hızlı bir şekilde düştüğü belirlenmiştir.

Farklı zemin türlerinde kullanılan PDD'lerin boşaltma kapasitesinin değişiminin belirlenmesi amacıyla Amerdrain 407 iki farklı zemin tipinde kullanılarak boşaltma kapasitesinin değişimi belirlenmiştir. Bu deney sonuçlarından Craney Adası çökellerinde kullanılan Amerdrain 407 için boşaltma kapasitesinin değişimi, zemin türünün etkisi bölümünde detaylı olarak incelenecektir. Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407 için sonuçlar değerlendirildiğinde ise başlangıç boşaltma kapasitesinin Mebra Dren 7407'le yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen konsolidasyon aşamasının başlangıcında boşaltma kapasitesinin önemli bir miktarda azaldığı görülmektedir. Bu boşaltma kapasitesindeki azalmanın deformasyondan bağımsız dren çekirdek bölgesinin ani şekilde kirlenmesi veya tıkanması etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle Amerdrain 407'de dren çekirdek bölgesinin etrafını saran geotekstil malzemenin kaolin kili gibi ince daneli ve çok yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde kullanılması durumunda kirlenme veya tıkanma etkisine karşı yeterli olmadığı düşünülmektedir. Bu boşaltma kapasitesindeki ani azalmanın deformasyondan kaynaklanmadığının bir göstergesi olarak yüksek deformasyon seviyelerinde PDD'nin boşaltma kapasitesindeki azalmanın küçük olması gösterilebilir. Nitekim Bölüm 3.2'de belirtildiği gibi Amerdrain 407 ve Mebra dren 7407'nin dren çekirdek bölgesinin malzemesi ve dren kanallarının şekli bakımından yakın benzerlik göstermesi, bu iki drenin deformasyonlara karşı aynı davranışı göstermesi sonucunu doğurmaktadır.

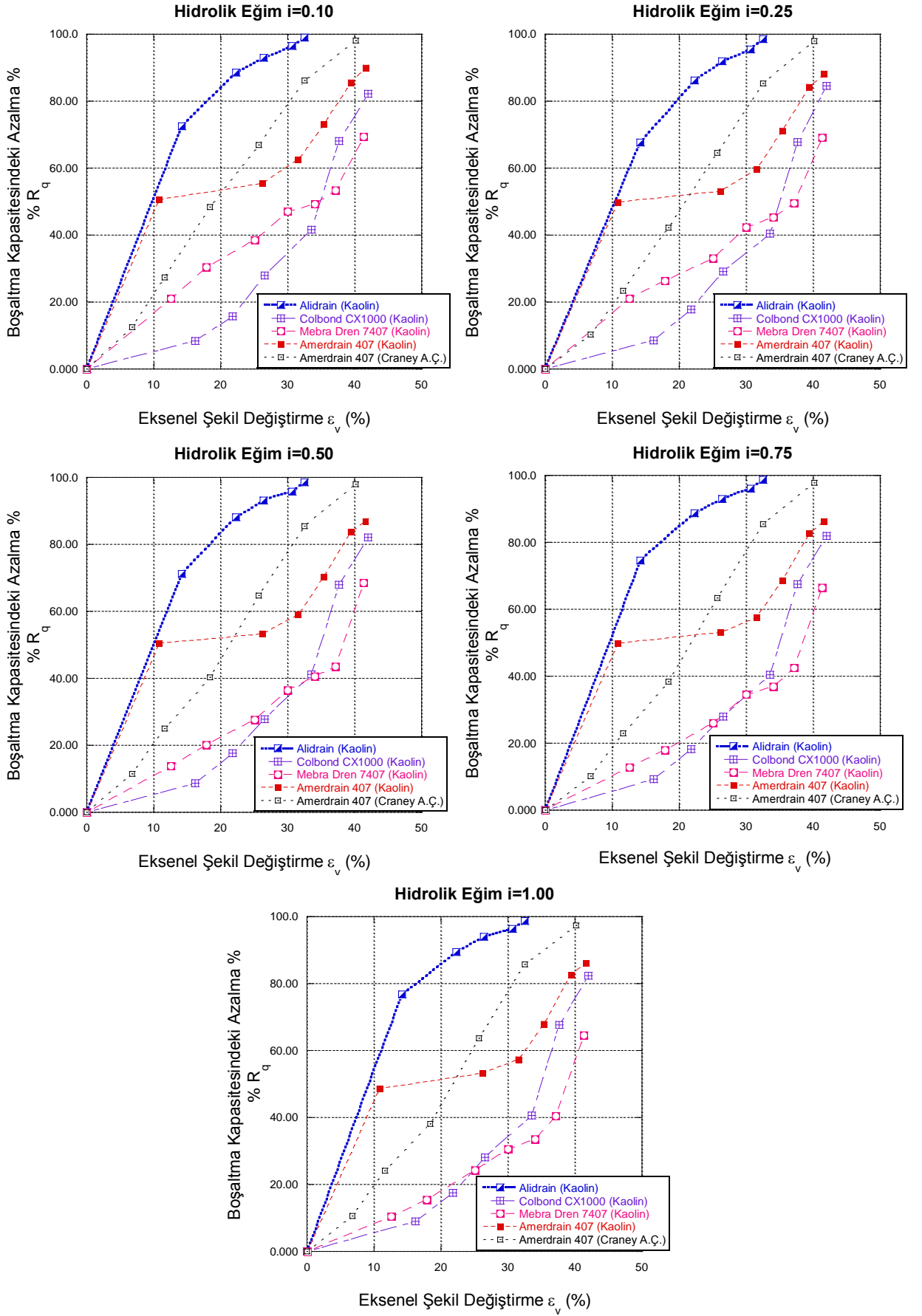
Yukarıda belirtilen PDD türleri için zemindeki eksenel şekil değiştirmelere bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma miktarı (5.3)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar eksenel şekil değiştirmelere ve hidrolik eğime bağlı olarak Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

$$\%R_q = \left(1 - \frac{q_{w,\varepsilon_v \geq 0}}{q_{w,\varepsilon_v = 0}} \right) \times 100 \quad (5.3)$$

$\%R_q$ = Boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi

$q_{w,\varepsilon_v \geq 0}$ = Eksenel şekil değiştirme ≥ 0 olduğu zamandaki boşaltma kapasitesi

$q_{w,\varepsilon_v = 0}$ = Eksenel şekil değiştirmenin sıfır olduğu zamandaki boşaltma kapasitesi



Şekil 5.8 Farklı PDD türleri için, % ϵ_v bağı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilen sonuçlara göre arazi uygulamaları bakımından bu çalışmada kullanılan PDD türlerinin deformasyona karşı boşaltma kapasitesindeki değişim incelendiği takdirde, ön yükleme tekniğiyle zemin iyileştirme projelerinde genellikle kullanılacak PDD'nin boşaltma kapasitesinin proje süresi boyunca $15 \times 10^{-6} (m^3/s)$ 'den büyük olması istenmektedir.

Chu vd. (2006) çalışmalarında, kullanılan çamurun permeabilite değerinin $10^{-10} - 10^{-9} (m/s)$ mertebelerinde ve boşaltma kapasitesinin $11 \times 10^{-6} m^3/s$ olması nedeniyle, yaptıkları hesaplarda permeabilitesi $10^{-9} m/s$ olan zeminler için bu boşaltma kapasitesinin yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle iki aşamalı PDD kullanım metodu önerilmektedir. Bu yöntemde ikinci aşamada yerleştirilen PDD'ler çok daha az deformasyona ve buna bağlı olarak çok daha az boşaltma kapasitesi düşüşüne maruz kalmıştır.

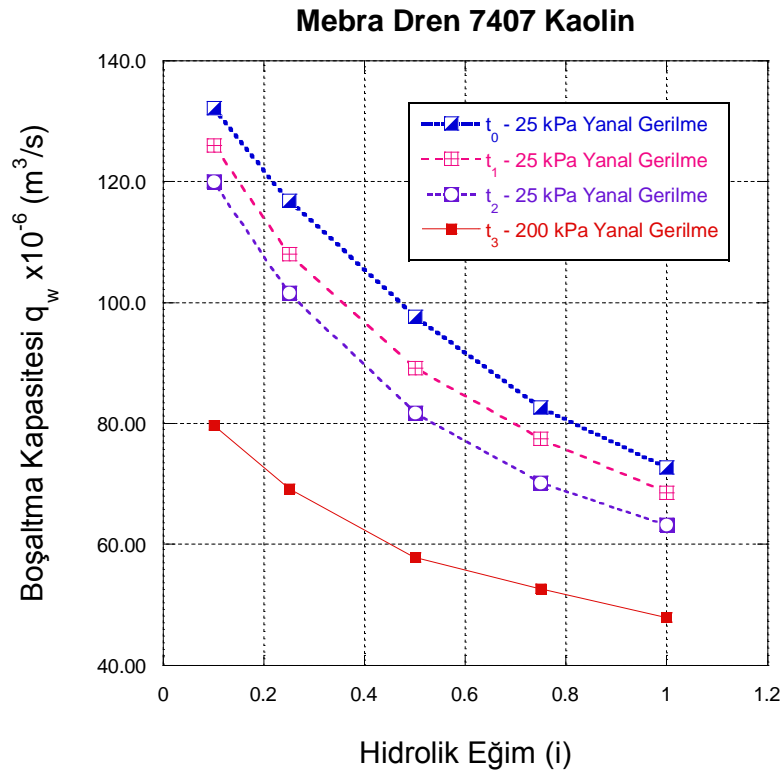
Dört farklı PDD kullanılarak yapılan bu deneysel çalışmada PDD'lerde meydana gelen deformasyonlar ve kirlenme etkisi sonucu PDD'lerin boşaltma kapasitesinin değişimi belirlenmiştir. Bu tip projelerde Alidrain kullanılması durumunda PDD'de %14, Colbond CX 1000 ve Amerdrain 407 kullanıldığında ise PDD'de %40 oranında eksenel şekil değiştirme meydana geldiğinde drenin boşaltma kapasitesi yetersiz olmaktadır.

Mebra Dren 7407 kullanılarak yapılan model deneyde ise diğer PDD'lere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiş olup PDD'de %41.5 oranında eksenel şekil değiştirme meydana geldiğinde PDD'nin boşaltma kapasitesi %69 oranında azalmasına rağmen boşaltma kapasitesinin $28 \times 10^{-6} (m^3/s)$ olduğu ve bu boşaltma kapasitesinin yeterli olduğu belirlenmiştir.

5.4.3 Yanal Gerilme ve PDD'nin Çekirdek Bölgesinin Kirlenmesi Etkisi

Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi örselenme bölgesi model deney sisteminde prefabrik düşey dren zemine yanal olarak yerleştirilmesi sebebiyle arazideki prefabrik düşey dren davranışından farklılık göstermektedir. Arazide konsolidasyon sırasında prefabrik düşey dren zeminle birlikte düşey doğrultuda büyük deformasyonlara uğramaktayken, örselenme bölgesi model deney sisteminde prefabrik düşey dren zemin konsolide olduktan sonra yatay doğrultuda zemine yerleştirilmesi sebebiyle yatay ve düşey doğrultuda herhangi bir deformasyona uğramamaktadır. Bu özelliği sebebiyle örselenme bölgesi deney sistemi, deformasyondan bağımsız sadece dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla ve PDD'ye etki eden yanal gerilme etkisiyle, prefabrik düşey drenin boşaltma kapasitesindeki azalmayı belirleme olanağı sağlamaktadır.

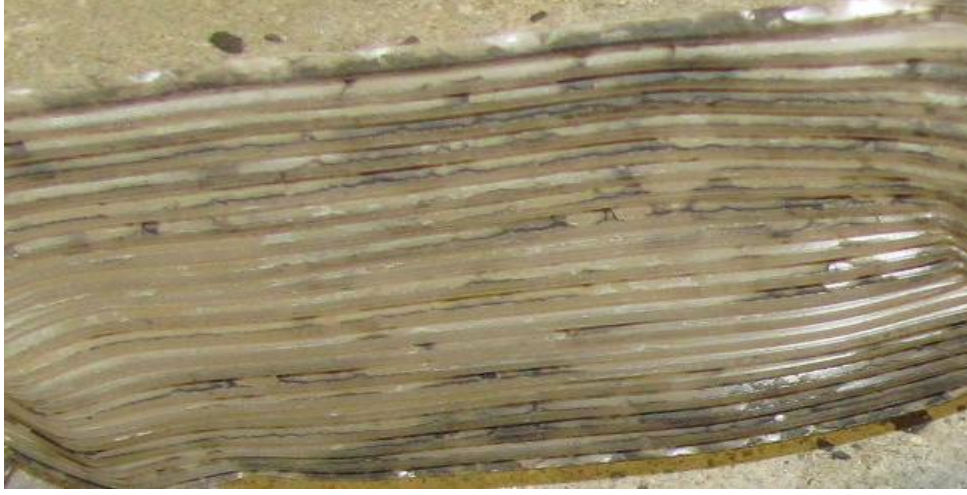
Örselenme etkisi model deney sisteminde 25 kPa'lık yanal gerilme sabit tutularak farklı zamanlarda ($t_0 \sim t_1 \sim t_2$) zemin içerisinde bulunan Mebra Dren 7407 için boşaltma kapasitesi deneyleri yapılmış, sabit yanal gerilme altında deformasyondan bağımsız sadece dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanması etkisiyle dren boşaltma kapasitesindeki değişim belirlenmiştir. Ayrıca aynı deney sisteminde yine benzer şekilde deformasyon etkisinden bağımsız sadece drene etki eden yanal gerilme artırılarak boşaltma kapasitesindeki değişim belirlenmiştir. Deformasyondan bağımsız dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla ve PDD'ye etki eden yanal gerilme etkisiyle boşaltma kapasitesindeki değişim Şekil 5.9'da, PDD'nin çekirdek bölgesindeki bu kirlenme Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Deformasyondan bağımsız dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla ve PDD'ye etki eden yanal gerilme etkisiyle boşaltma kapasitesindeki değişim

Şekil 5.9'daki sonuçlar incelendiğinde deformasyondan ve yanal gerilme etkisinden bağımsız sadece drendeki kirlenme veya tıkanma etkisiyle, PDD'nin boşaltma kapasitesinin hidrolik eğime bağlı olarak %10-16 oranında azaldığı belirlenmiştir. Örselenme etkisi model deneyinde PDD, zemin belirli bir konsolidasyon gerilmesinde konsolide edildikten sonra zemine yerleştirilmesi sebebiyle arazi uygulamalarında PDD'nin zemine yerleştirilme yöntemine benzemektedir. Buna rağmen dren çekirdek bölgesinin kirlenmesiyle veya tıkanmasıyla boşaltma kapasitesindeki azalma oranının, arazide uygulama yapılan zeminin

içerdiği ince dane oranına, özellikle PDD'nin zemine yerleştirildiği andaki zeminin su muhtevasına ve arazi uygulamaları tasarımında PDD'nin uzun süreler boyunca işlevini yitirmemesi düşünüldüğünden zaman etkisine bağlı olarak değişebileceği gözönünde bulundurulması gerekmektedir.

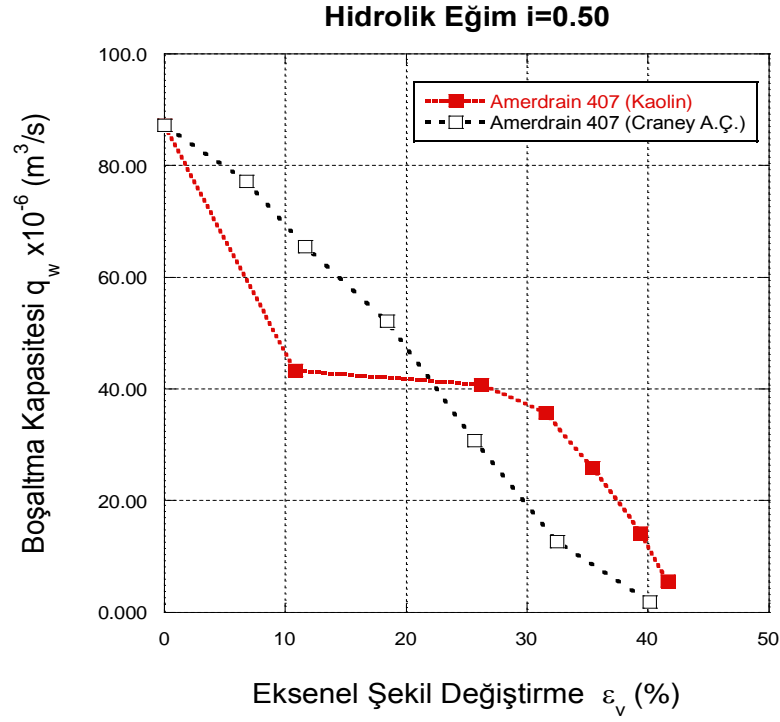


Şekil 5.10 PDD'nin çekirdek bölgesindeki kirlenme veya tıkanma etkisi

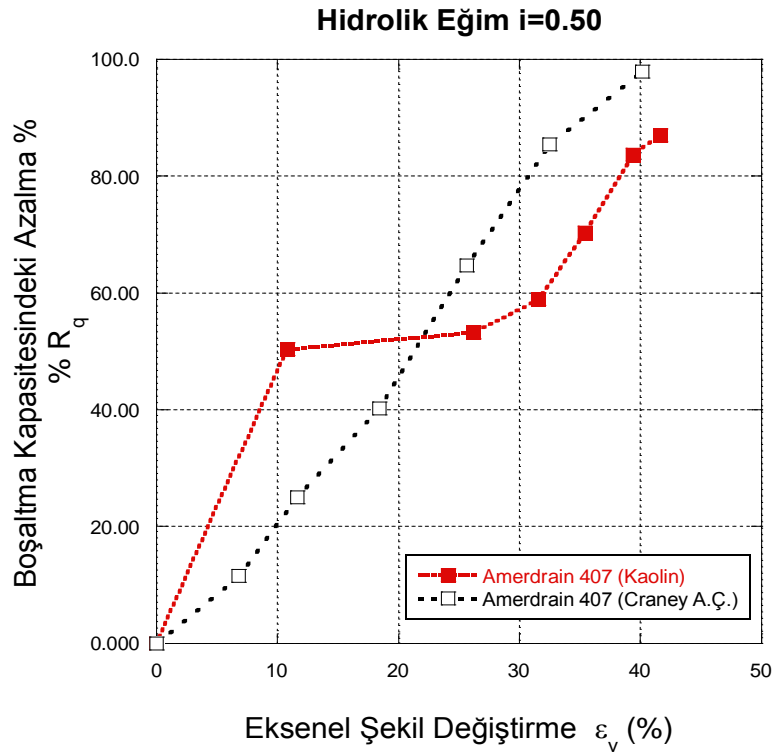
Örselenme bölgesi model deneyinde 25 kPa'lık yanal gerilme altında dren boşaltma kapasitesi belirlendikten sonra, yanal gerilme 200 kPa'ya kadar arttırılarak zemin konsolide edildikten sonra yanal gerilme artışı etkisiyle dren boşaltma kapasitesindeki değişim deformasyondan ve dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanması etkisinden bağımsız olarak belirlendiğinde, hemen hemen tüm hidrolik eğim seviyelerinde %40 oranında boşaltma kapasitesinde azalma olduğu anlaşılmıştır. Bu orandan da anlaşılacağı üzere yanal gerilmelerin dren boşaltma kapasitesinin değişimini önemli bir miktarda etkilediği belirlenmiştir.

5.4.4 Zemin Türü

Farklı zemin türlerinde kullanılan PDD'lerin boşaltma kapasitesinin değişiminin belirlenmesi amacıyla Amerdrain 407 iki farklı zemin tipinde kullanılarak boşaltma kapasitesinin değişimi incelenmiştir. Farklı zeminlerde konsolidasyon sırasında meydana gelen eksenel şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak drende meydana gelen deformasyon sonucu Amerdrain 407'nin boşaltma kapasitesinin değişimi Şekil 5.11'de, boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi ise Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Farklı zemin türlerinde kullanılan Amerdrain 407'nin drenedeki deformasyona bağlı olarak boşaltma kapasitesinin değişimi



Şekil 5.12 Farklı zemin türlerinde kullanılan Amerdrain 407'nin drenedeki deformasyona bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi

Yukardaki şekillerde Amerdrain 407'nin farklı zemin türlerinde kullanılması durumunda hidrolik eğiminin 0.50 olması durumu için eksenel şekil değiştirmelere bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki değişim ve boşaltma kapasitesindeki azalma yüzdesi gösterilmektedir. Farklı hidrolik eğim değerlerindeki değişim daha önce Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterildiği ve sonuçlar benzer olduğu için bu bölümde belirli bir hidrolik eğim seviyesinde farklı zemin türleri için değişimin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Craney Adası çökellerinde kullanılan Amerdrain 407 için sonuçlar değerlendirildiğinde, drenin boşaltma kapasitesinin drendeki deformasyonla yaklaşık olarak lineer azaldığı, drende %40 oranında deformasyon meydana geldiğinde dren boşaltma kapasitesinin 1.8×10^{-6} (m^3/s) seviyesine düştüğü bunun da boşaltma kapasitesinde %98 oranında azalmaya karşılık geldiği görülmektedir.

Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'de 12.5 kPa'lık konsolidasyon gerilmesi altında meydana gelen eksenel şekil değiştirme, CAÇ'da kullanılan Amerdrain 407'de 25 kPa'lık konsolidasyon gerilmesi altında meydana gelen eksenel şekil değiştirmeden bir miktar küçük olmasının yanında PDD'ye etki eden yanal gerilmenin de küçük olmasına rağmen boşaltma kapasitesinde önemli bir miktarda azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu boşaltma kapasitesindeki azalmanın deformasyon etkisinden çok dren çekirdek bölgesinin ani şekilde kirlenmesi veya tıkanması etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuç ince daneli ve çok yüksek oranda su muhtevasına sahip zeminlerde, dren filtre malzemesinin gözenek açıklığının zemindeki ince dane boyutuna göre yeterli olmaması durumunda PDD'nin çekirdek bölgesinde oluşan kirlenme veya tıkanma etkisinin PDD'nin deformasyonundan daha çok boşaltma kapasitesinin değişimi üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir.

Yukardaki şekillerde, her iki zemin türü için konsolidasyon gerilmesinin 200 kPa olması durumunda kaolin kilinde %39.4 Craney Adası çökellerinde %32.5 oranında eksenel şekil değiştirme meydana gelmesine rağmen kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'nin boşaltma kapasitesinin bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'nin düşük deformasyon seviyelerinde kirlenme veya tıkanma etkisiyle boşaltma kapasitesinde %50 oranında azalma olmasının yanında daha fazla deformasyona uğramasına rağmen boşaltma kapasitesinin daha yüksek olması, zemin türünün PDD'de meydana gelen deformasyon biçimini etkilemesiyle açıklanabilir. Zeminin PDD'nin yanal deformasyonuna karşı gösterdiği direncin yüksek olması PDD'nin yaptığı deformasyon biçimini etkilemektedir. Amerdrain 407'nin kaolin kili ve Craney Adası çökellerinde kullanılması durumunda konsolidasyon sonunda drende meydana gelen deformasyon

biçimleri Şekil 5.14’de görülmektedir. Bu şekillerde zemin PDD sürtünme direncinin ve zeminin PDD’nin yanal deformasyonuna karşı gösterdiği direncin büyük olduğu Craney Adası çökellerindeki PDD’de keskin kıvrımlar şeklinde birçok bükülme meydana geldiği bu nedenle de boşaltma kapasitesinin daha fazla düştüğü düşünülmektedir.

5.4.5 Prefabrik Düşey Drenin Yapısı ve Bükülmeye Karşı Direnci

Aynı konsolidasyon şartlarında PDD’lerin çekirdek bölgesinin yapısı ve bükülmeye karşı direnci PDD’lerin boşaltma kapasitesi davranışını belirlemektedir. Geosentetiklerin bükülmeye karşı direncinin belirlenmesi için kullanılan ASTM D1388 standardı kullanılarak PDD’lerin bükülmeye karşı direnci belirlenebilmektedir. ASTM D1388 birim hücredeki kütlede ve kendi ağırlığı altında meydana gelen bükülmenin miktarıyla ilgili ölçümleri içerir. Bu deneysel çalışmada kullanılan PDD türlerinin üreticileri tarafından belirtilen bükülmeye karşı direnç değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Deneylerde kullanılan PDD’lerin ASTM D1388 deney yöntemine göre belirlenmiş bükülmeye karşı direnç değerleri

<i>Bükülmeye Karşı Direnç</i>	<i>Deney Yöntemi</i>	<i>Birim</i>	<i>PDD Türleri</i>			
			<i>Alidrain</i>	<i>Colbond CX 1000</i>	<i>Amerdrain 407</i>	<i>Mebra Dren 7407</i>
	<i>ASTM D1388</i>	μ Joule/m	5	34	40	74

Çizelge 5.1’deki değerler incelendiğinde Alidrain’in bükülmeye karşı direnç değerinin en küçük olduğu, daha sonra Colbond CX1000 ve Amerdrain 407’nin yaklaşık olarak aynı bükülmeye karşı direnç değerine sahip olduğu, son olarak Mebra dren 7407’nin bükülmeye karşı direnç değerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerler daha önceki bölümlerdeki aynı deformasyon seviyeleri için farklı PDD’lerin boşaltma kapasitesindeki değişimi gösteren deney sonuçlarıyla yakın benzerlik göstermektedir. Bu deney sonuçlarından aynı deformasyon seviyelerinde Mebra Dren 7407’nin en yüksek, Alidrain’in en düşük boşaltma kapasitesi değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara paralel olarak, Ali (1991), Bergado vd. (1996), Miura ve Chai (2000) ve Chai vd. (2004) çalışmalarında PDD’nin merkezindeki çekirdek bölgedeki esnekliğin artmasıyla, deformasyonlar etkisiyle dren boşaltma kapasitesindeki azalma miktarının artacağını belirtmişlerdir. Yüksek dirence sahip PDD’ler etrafındaki zeminde meydana gelen yüksek deformasyonların etkisini tolere edebilirken, aynı zamanda PDD’nin çekirdek bölgesindeki kanallarda yeterli derecede su akışının devamlılığını sürdürebilmektedir.

Ayrıca PDD'nin çekirdek bölgesindeki kanalların su akışı için daha fazla alana sahip olması, PDD'nin daha yüksek boşaltma kapasitesine sahip olmasını sağlayacaktır. Mebra Dren 7407'nin sahip olduğu sürekli kanallı yapı ve Amerdrain 407'deki oluklu yapı PDD'nin etrafını saran geotekstil filtre malzemenin yanıl gerilme etkisiyle kolay bir şekilde çekirdek bölgesindeki su akış kanallarına girmesini engelleyerek, konsolidasyon sırasında su akışı için kullanılabilir boşluğun devamlılığını sağlamaktadır. Birbirinden ayrı kanallar oluşturan üç boyutlu yerleşimde lifli çekirdek bölgesine sahip Colbond CX100'nin bu özel yapısının su akışı için geniş alan sağladığı görülmektedir. Oluklu ya da sürekli kanallara nazaran bu üç boyutlu yerleşimde su kanallar arasında da akışını sürdürebilir. Ancak bu lifli yapı geotekstil filtre malzemesinin yanıl gerilme etkisiyle çekirdek bölgesindeki su akış kanallarını sıkıştırmasına karşı koyacak dirence, Mebra Dren 7407'nin sahip olduğu sürekli kanallı yapı ve Amerdrain 407'deki oluklu yapının sahip olduğu kadar, sahip değildir. Çivili çekirdek yapısına sahip Alidrain de ise yanıl gerilme etkisiyle çiviler üzerinde oluşan yüksek gerilme nedeniyle çivilerin etrafını saran geotekstil filtre malzemesinde zımbalama etkisi oluşmakta bu etki nedeniyle geotekstil filtre malzeme çekirdek bölgesindeki kanallara girerek su akış kanallarındaki boşluğu azaltmaktadır (Ali,1991). Bu tez kapsamında Alidrain'in boşaltma kapasitesinde deformasyona bağlı değişiminin belirlendiği deneylerden sonra, deformasyon biçimlerini incelemek için PDD'nin çekirdek bölgesi açıldığında, PDD'nin etrafını saran geotekstil filtre malzemede olduğu gözlenen bu zımbalama etkisi Şekil 5.13'de gösterilmektedir.

Miura ve Chai (2000) ve Chai vd. (2004), zeminle sınırlandırılmış PDD'lerin uzun dönem boşaltma kapasitelerini belirledikten sonra test ettikleri PDD'nin kesitindeki bağımsız drenaj kanallarının hidrolük özelliklerini ölçmüşlerdir. Bunun sonucunda geniş drenaj kanalları ve daha büyük hidrolük çapa sahip PDD'lerin boşaltma kapasitesindeki azalmanın daha düşük değerlerde olduğu sonucuna varmışlardır. Bu sonuçlar bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada gözlemlenen sonuçlarla uyum göstermektedir.



Şekil 5.13 Alidrain’de yanıl gerilme etkisiyle çekirdek bölgesindeki çivilerin etrafını saran geotekstil filtre malzemesinde oluşan zımbalama etkisi

5.4.6 PDD’lerin Deformasyonu

Farklı PDD türleri için boşaltma kapasitesinin değişiminin belirlendiği deneylerde PDD’lerde farklı deformasyon biçimlerinin meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 5.14’de farklı PDD türlerinde meydana gelen farklı deformasyon biçimleri gösterilmektedir. Farklı PDD türleri için boşaltma kapasitelerinin belirlendiği deneylerde, zeminde %32-42 arasında meydana gelen eksenel şekil değiştirmelerin sonucunda bütün PDD’lerde yüksek derecede deformasyon gözlemlense de, bu deformasyonların biçimi PDD’ler arasında değişiklik göstermektedir.

Kaolin kilinde kullanılan drenlerde zemin/dren sürtünme direncinin düşük olmasına rağmen Alidrain ve Colbond CX1000’in bükülmeye karşı dirençlerinin düşük olmasının PDD’de keskin kıvrımlar şeklinde birçok bükülmeye sebep olduğu, Mebra Dren 7407 ve Amerdrain 407’nin ise bükülmeye karşı dirençlerinin daha yüksek olmasının PDD’de daha geniş kıvrımlar şeklinde deformasyonlar meydana gelmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde Craney Adası çökellerinde, zemin/PDD sürtünme direncinin Mebra Dren 7407 ve Amerdrain 407’nin bükülmeye karşı direncinden büyük olduğu, bu nedenle de keskin kıvrımlar şeklinde deformasyon biçimleri meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca keskin kıvrımlar şeklinde oluşan deformasyonların PDD’nin boşaltma kapasitesi üzerinde daha fazla olumsuz etki yaptığı deney sonuçlarıyla belirlenmiştir.



Alidrain-Kaolin



Colbond CX1000-Kaolin



Mebra Dren 7407-Kaolin-Craney Adası Çökelleri



Amerdrain 407-Kaolin-Craney Adası Çökelleri

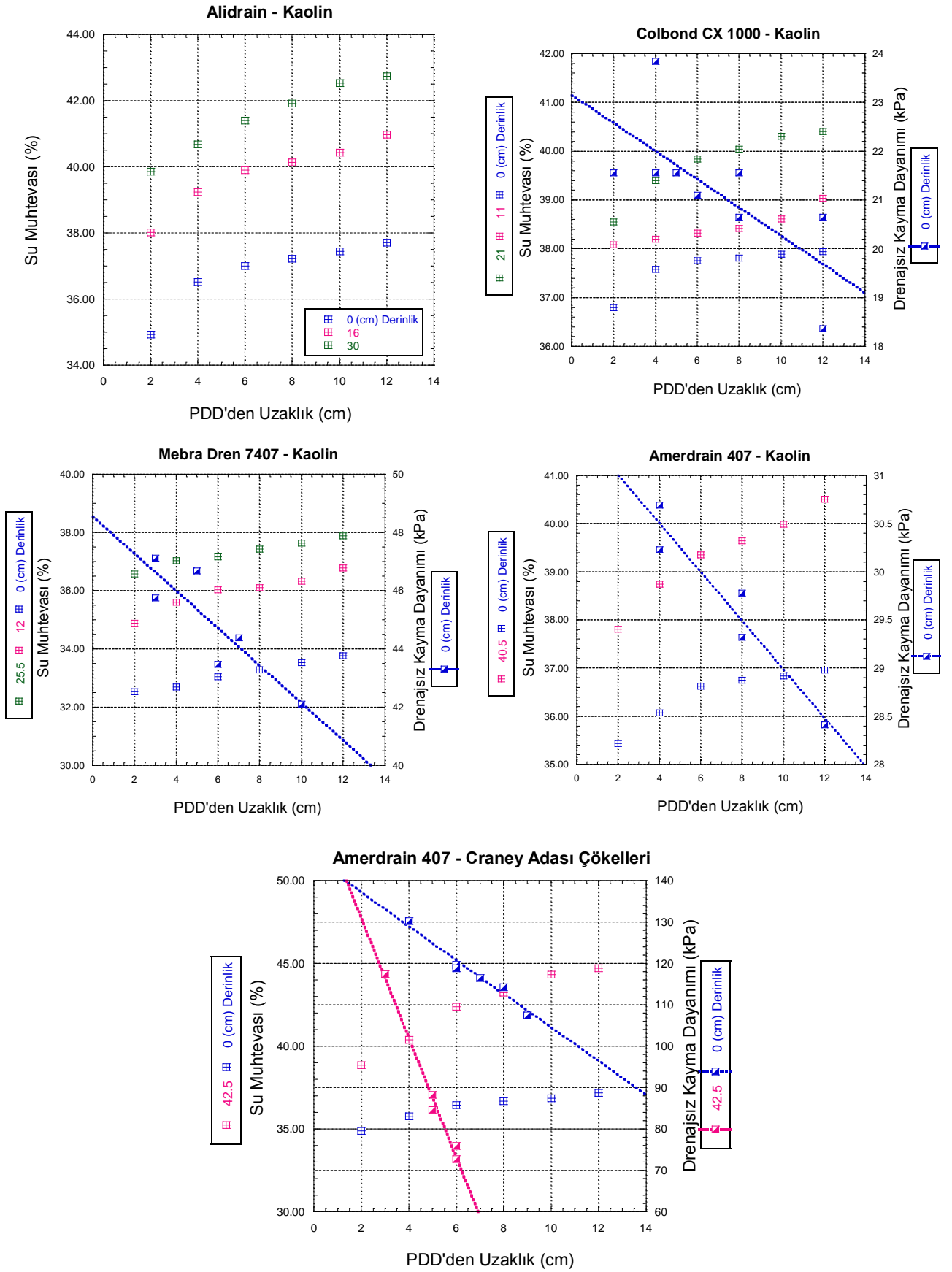
Şekil 5.14 Farklı zeminlerde kullanılan farklı PDD türleri için deformasyon biçimleri

5.5 Drenajsız Kayma Dayanımı ve Su Muhtevasının, Derinlikle ve PDD'den Uzaklıkla Değişiminin Belirlenmesi

Kaolin kili ve Craney Adası çökelleri kullanılarak farklı PDD türlerinin boşaltma kapasitesinin belirlendiği deneylerin sonunda zemin deney hücresinden çıkarılmadan önce değişik numune derinliklerinde, prefabrik düşey drenen yatay doğrultuda değişik uzaklıklarda su muhtevası ve veyn deney aleti kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmiştir. Kullanılan PDD türlerine bağlı olarak farklı zeminlerde su muhtevasının ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi Şekil 5.15'de gösterilmektedir.

Genel olarak bu sonuçlar değerlendirilirse, aynı derinlikte PDD'ye olan uzaklığın, farklı zemin derinliklerinde ise derinliğin artmasıyla su muhtevası değerinin arttığı ve buna bağlı olarak drenajsız kayma dayanımının azaldığı görülmektedir.

Sabit gerilmeler altında konsolidasyon aşamalarının sonunda zeminin su muhtevası değerinin ve drenajsız kayma dayanımının kullanılan farklı PDD türlerine göre değişimi değerlendirildiğinde, diğer dren türlerine göre boşaltma kapasitesi en yüksek olan Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı deneyde zemin yüzeyinde belirlenen su muhtevasının diğer dren türlerinin kullanıldığı deneylerde belirlenen değerlere kıyasla daha düşük olduğu, drenajsız kayma dayanımının su muhtevasıyla ilişkili olarak daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Belirlenen bu sonuçların, kullanılan PDD türünün boşaltma kapasitesi değerinin büyüklüğüyle doğrudan ilişkili olduğu düşünülmemekle birlikte uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.15 Kullanılan PDD türlerine bağlı olarak farklı zeminlerde su muhtevasının ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi

6. ARAZİ UYGULAMALARI BENZEŞİMLİ MODEL DENEYLERİ

Craney Adası çökelleri kullanılarak, arazide PDD'lerle zemin iyileştirme uygulamalarına benzer şekilde, Amerdrain 407 ve Mebra dren 7407 kullanılarak iki farklı model deney yapılmıştır. Bu model deneylerde yüksek su muhtevasına sahip zemin arazideki iyileştirme öncesi konumuna getirilmesi için 25-40 kPa'lık bir gerilme altında konsolide edilmiştir. Zeminin bu gerilme altında konsolidasyonu tamamlandıktan sonra PDD arazi uygulamalarında olduğu gibi bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmiştir. Bu şekilde PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında PDD'nin etrafını saran zeminde arazi uygulamalarında meydana geldiği gibi sıvanma bölgesinin oluşumu sağlanmıştır. Bu arazi benzeşimli model deneyinde PDD'lerin yerleştirilmesinden sonra, uygulanan değişik gerilmeler altında zeminin konsolidasyon davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu model deneylerde konsolidasyon süresi aynı tutularak, kullanılan iki farklı PDD türünün konsolidasyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

6.1 Model Deney Sistemi

Bu deneysel çalışmada PDD'lerin arazi uygulamalarındaki performansını araştırmak amacıyla, Bölüm 5.1'de detaylı olarak anlatılan silindirik büyük boyutlu konsolidasyon deney sistemi kullanılmıştır.

6.2 Deney Numunesinin Hazırlanması

Arazi uygulamalarını modellemek için yapılan bu deneysel çalışmada, daha önce arazide PDD'ler kullanılarak yapılan ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı, Craney Adası çökelleri temin edilmiş olup, doğal su muhtevası korunarak model deney sisteminde kullanılmıştır. Craney Adası çökelleri çok geniş bir alana yayılmış bulunmaktadır. Bu nedenle literatürde Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan araştırmalarda zemin fiziksel özellikleri arasında farklılıklar görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan zemin güney Craney Adası çökelleri bölgesinin güney batısından yüzeye yakın bölgeden temin edilmiştir. Ayrı ayrı kovalarda temin edilen zeminin fiziksel özellikleri arasında önemsenmeyecek kadar ufak farklılıklar bulunmasına rağmen bu farklılıkların yapılan deneysel araştırma sonuçlarını etkilememesi için, temin edilen tüm kovalardaki zemin doğal su muhtevası değişmeyecek şekilde homojen olarak karıştırılıp, hava geçirilmeyecek şekilde vakumlu kovalarda saklanarak yapılacak deneyler için hazır hale getirilmiştir.

6.3 Deney Yöntemi

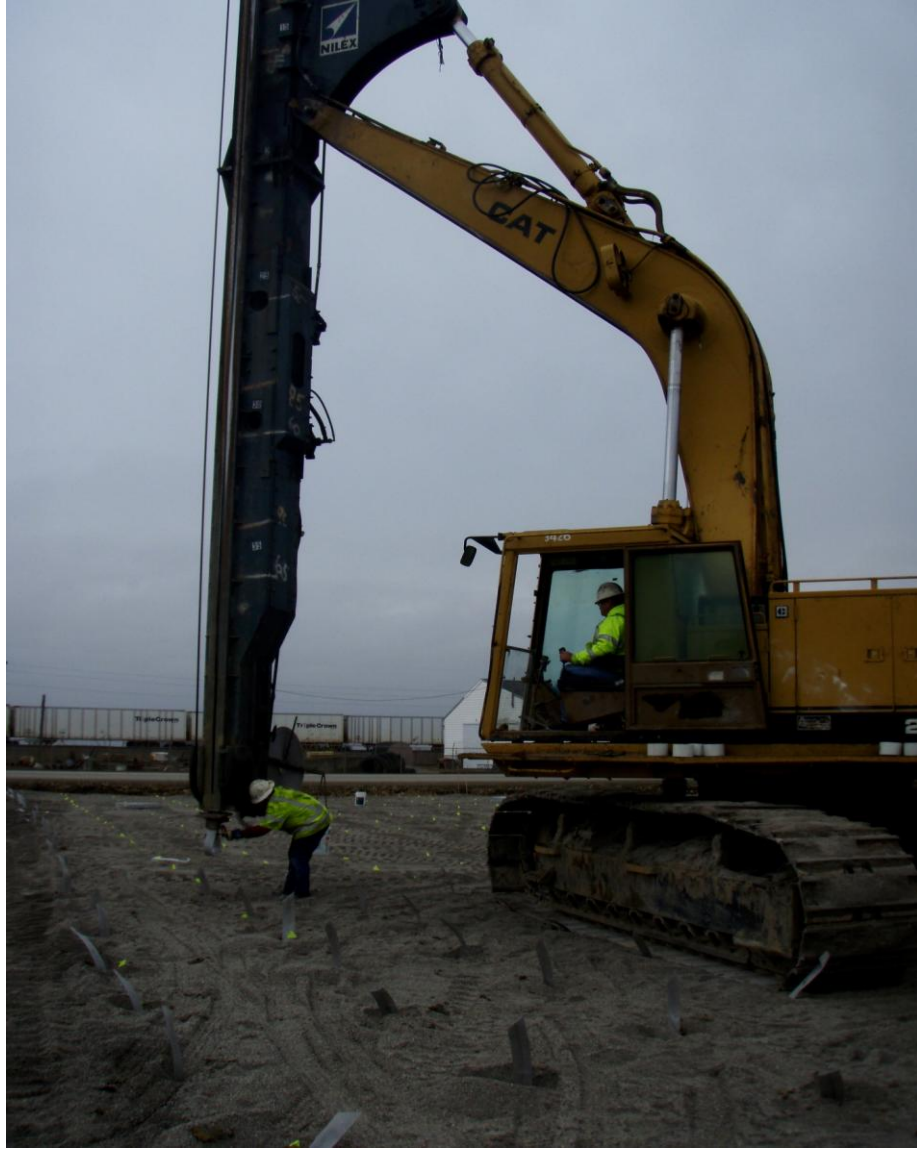
Hazırlanan deney numunesi deney hücresini 5-6 eşit seviyede dolduracak şekilde deney hücresine yerleştirilmiştir. Her eşit yükseklikte zemin deney hücresine yerleştirildikten sonra bir vibrasyon makinası kullanılarak zemin içerisinde mümkün olduğunca az miktarda hava kalması sağlanmıştır. Ayrıca her bir zemin seviyesi için su muhtevası örneği alınmıştır. Deney numunesi hücre içerisine yerleştirilmeden önce hücrenin alt kısmı geçirimsiz bir membranla kapatılmıştır. Deney numunesinin tamamen yerleştirilmesinden sonra üzeri geçirimli bir geotekstil malzemeyle kapatılarak, PDD yerleştirilmeden önce deney numunesinin arazide etkiyen düşey efektif gerilme altında (40 kPa) tek yönlü drenaja izin verilerek konsolide edilip arazideki konumuna getirilmesi amaçlanmıştır.

PDD zemine her iki deneyde, zeminin aynı konsolidasyon gerilmesi altında (40kPa) konsolide edilmesinden sonra çelik bir mandrel içerisinde sabit hızla yerleştirilmiştir. Böylece arazi uygulamalarında PDD'nin zemine bir mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında olduğu gibi zeminde örselenme bölgesi oluşumu sağlanmıştır.

Model deneyde deney hücresinin üzerine mandrel'in sabitlenmesi için geçici olarak monte edilen çelik bir kapak kullanılarak PDD'nin deney hücresinin merkezine yerleştirilmesi sağlanmıştır. Arazi uygulamalarında PDD'nin zemine dik olarak yerleştirilmesi bu model deneyde kullanılan çelik kapak yerine, mandrel'in içinde bulunduğu çelik kılavuz boruyla sağlanmaktadır. PDD'nin, arazi uygulamalarında zemine yerleştirilmesi yöntemi Şekil 6.1'de, silindirik model deneyde zemine yerleştirilmesi yöntemi ise Şekil 6.2'de gösterilmektedir.

PDD'nin zemine yerleştirilme işlemi tamamlandıktan sonra, daha önceki aşamada zeminin arazideki konumuna getirilmesi için konsolidasyonu sırasında deney numunesinin üzerine yerleştirilen geotekstil çıkarılarak, zeminin üzeri geçirimsiz geomembranla kapatılmıştır. PDD'nin zemine yerleştirilmesinden sonra geomembran'ın kullanılmasındaki amaç, daha sonraki yük kademelerinde konsolidasyon sırasında zemin suyunun düşey doğrultuda hareket etmesi engellenerek su hareketinin prefabrik düşey drene doğru olmasını sağlamak içindir.

Daha sonra bu arazi model deneyinde arazide yapılacak ilk iki kademe dolgu yüksekliğinin 4 m daha sonraki aşamalarda da dolgu yüksekliğinin 5 m olduğu kabul edilerek ilk iki aşama için konsolidasyon gerilmesi 80 kPa daha sonraki aşamalarda ise 100 kPa arttırılmıştır. Bu şekilde Craney adası zemininde Amerdrain 407 ve Mebra dren 7407 kullanılarak zemin iyileştirme yönteminin uygulanması durumunda sıvanma bölgesinin ve kullanılan PDD türünün zeminin konsolidasyon hızına olan etkisi araştırılmıştır.



Şekil 6.1 Arazi uygulamalarında PDD'nin zemine yerleştirilme yöntemi

(Amerika Birleşik Devletlerinde Nilex inşaat tarafından PDD'lerle zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı Indiana projesinden bir görünüm)



Şekil 6.2 Arazi model deneyinde PDD'nin zemine yerleştirilmesi yöntemi

Ayrıca her yük kademesi için konsolidasyon aşamasında deney hücresinin yan çeperinde bulunan boşluk suyu basıncı ölçerler yardımıyla zemin içerisinde PDD'den değişen uzaklıklarda boşluk suyu basıncının değişimi, hareketli üst plakaya bağlanan bir adet deformasyon ölçer (LVDT) yardımıyla da konsolidasyon sırasında zeminde meydana gelen düşey şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Deney sırasında bu verilerin kaydedilmesinde Labview isimli bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Deney sonunda zemin deney hücresinden çıkarılmadan önce değişik derinliklerde, prefabrik düşey drenaj yatay ve düşey doğrultuda değişik uzaklıklarda su muhtevası ve veyn deney aleti kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmiştir.

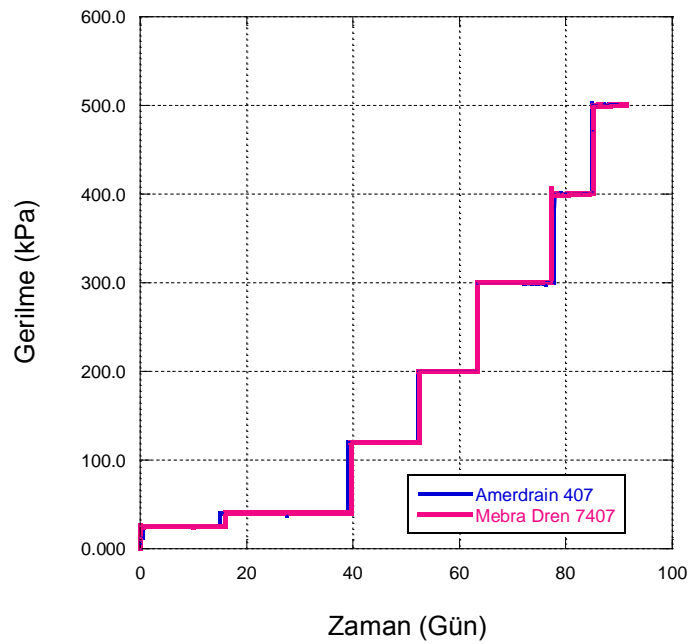
6.4 Arazi Model Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Deneylerde kullanılan Craney Adası çökellerine (CAÇ) ait kütle özellikleri deney başlangıcı ve deney sonu için Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Deneylerde kullanılan Craney Adası Çökellerinin fiziksel özellikleri

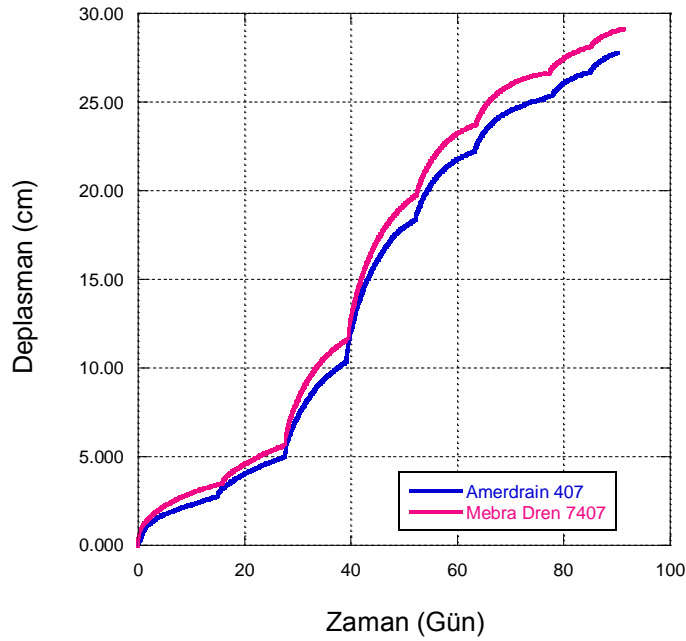
Kullanılan PDD Türü	Aşama	G_s	w (%)	e	S (%)	n	γ_k (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)
Amerdrain 407	Deney Başlangıcında	2.70	94.6	2.58	98.9	0.72	7.36	14.42
	Deney Sonunda		43.3	1.20	97.7	0.54	12.07	17.36
Mebra Dren 7407	Deney Başlangıcında	2.70	95.5	2.63	98.1	0.72	7.26	14.42
	Deney Sonunda		41.8	1.20	94.1	0.55	12.07	17.36

Bölüm 5’de sunulan model deneylerle prefabrik düşey drenlerin boşaltma kapasitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesi kapsamında, farklı PDD türlerinin boşaltma kapasitesinin deformasyonla ve dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla değişimi incelenmiştir. Bu deney sonuçlarına göre aynı deformasyon seviyelerinde boşaltma kapasitesi en yüksek bulunan Mebra Dren 7407 ve Amerdrain 407 kullanılarak iki farklı arazi model deneyi yapılmıştır. Bu model deneylerde aynı zemin için farklı PDD türlerinin zemin iyileştirme yönteminde uygulanması durumunda zeminin konsolidasyon davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle her iki model deneyde uygulanan konsolidasyon gerilmeleri ve her yük aşaması için belirlenen konsolidasyon süreleri sabit tutulmuştur. Deneylerde zemine uygulanan değişik konsolidasyon gerilmelerinin zamanla olan ilişkisi Şekil 6.3’de, değişik yük kademelerinde meydana gelen düşey deplasman-zaman ilişkisi Şekil 6.4’de gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Zemine uygulanan değişik yük kademelerinin zamanla ilişkisi

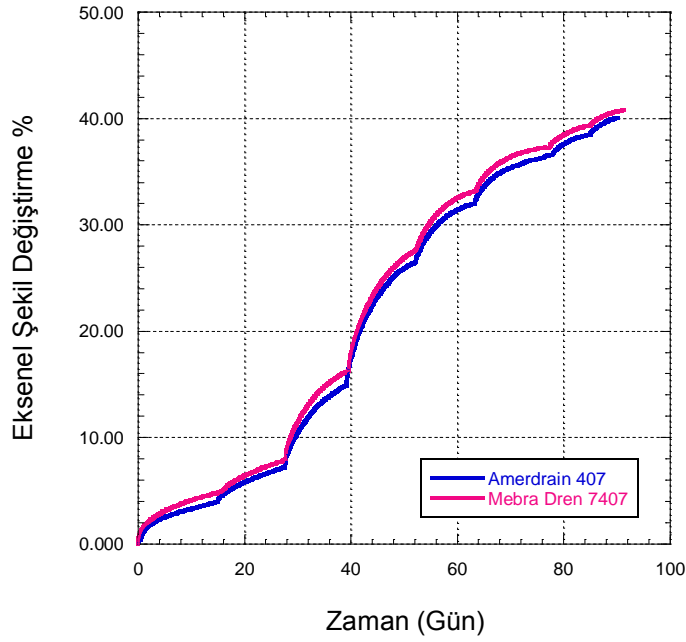
Her iki model deneyde kullanılan Craney Adası çökelleri, zeminin arazideki tabii su muhtevası korunarak deney hücresine yerleştirilmiştir. Daha sonra zemine arazide etkiyen düşey efektif gerilme uygulanarak bu gerilme altında zemin konsolide edilmiştir. Zemin örneklerinin yüksek su muhtevasına sahip olmasından dolayı arazide zemine etkiyen düşey efektif gerilme model deneyde iki aşamada uygulanmıştır. Birinci aşamada 25 kPa gerilme altında zemin yaklaşık 15 gün süreyle, ikinci aşamada 40 kPa gerilme altında yaklaşık 13 gün süreyle konsolide edilerek arazideki konumuna getirilmiştir. Bu aşamadan sonra her iki model deneyde kullanılan PDD türü (Amerdrain 407, Mebra dren 7407) arazi uygulamalarında PDD'nin zemine yerleştirme yöntemine benzer şekilde küçük boyutlu bir mandrel kullanılarak zemine yerleştirilmiştir. PDD zemine yerleştirildikten sonra daha önce uygulanan konsolidasyon gerilmesi aynı kalacak şekilde zeminin konsolidasyonunun tamamlanması için belirli bir süre beklenmiştir. Bu aşamada PDD'nin zemine yerleştirilmesi zemindeki drenaj koşullarını değiştirdiği için aynı konsolidasyon gerilmesi altında zemin konsolidasyonunun hızlanmasına ve devam etmesine sebep olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.4 Değişik yük kademelerinde zeminde meydana gelen deplasman-zaman ilişkisi

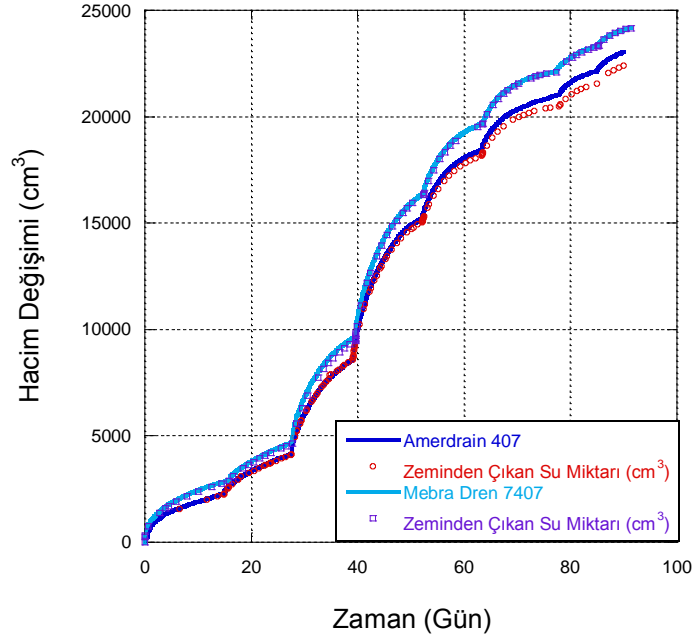
Şekil 6.4 gösterilen farklı konsolidasyon gerilmeleri altında zeminde meydana gelen Deplasman-Zaman ilişkisinde, Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı model deneyde zeminde meydana gelen deplasmanın Amerdrain 407'nin kullanıldığı model deneye göre bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. Model deneylerde başlangıç numune yüksekliği yaklaşık olarak benzer olmasına rağmen, numune yüksekliği farklılığından dolayı deney süresince

belirlenen deplasman farklılığını elimine etmek için model deneylerde belirlenen Deplasman-Zaman ilişkisinin Eksenel Şekil Değiştirme Yüzdesi-Zaman ilişkisi olarak incelenmesinin daha uygun olduğu düşünülmektedir. İki farklı dren türünün kullanıldığı model deneylerde zeminde meydana gelen Eksenel Şekil Değiştirme Yüzdesi-Zaman ilişkisi Şekil 6.5’de gösterilmektedir.

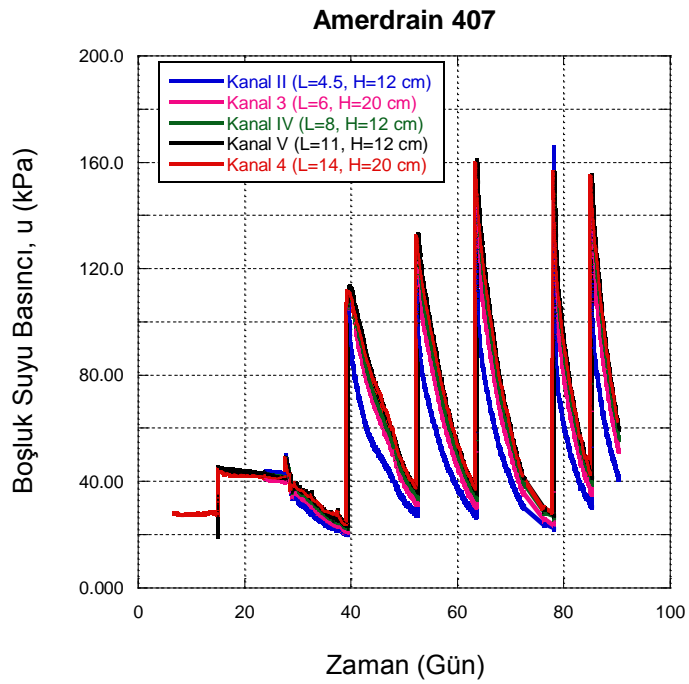


Şekil 6.5 Değişik yük kademelerinde zeminde meydana gelen eksenel şekil değiştirme yüzdesi-zaman ilişkisi

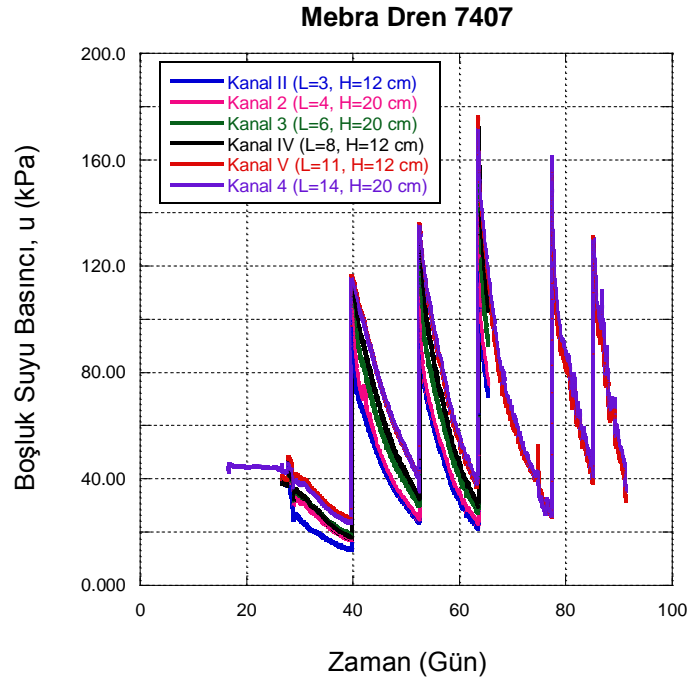
Konsolidasyon süresince deney hücresindeki zeminde meydana gelen hacim değişimi ve PDD'den geçerek zeminden çıkan su miktarı belirlenmiştir. Bu hacim değişimi ile zeminden çıkan su miktarının zamanla değişimi Şekil 6.6'da, her yük kademesi için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde PDD'den farklı uzaklıklarda ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.6 Değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında, deplasmana bağlı olarak hesaplanan hacim değişimi ve zeminden çıkan su miktarının zamanla ilişkisi



Şekil 6.7 Amerdrain 407 kullanılan deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi

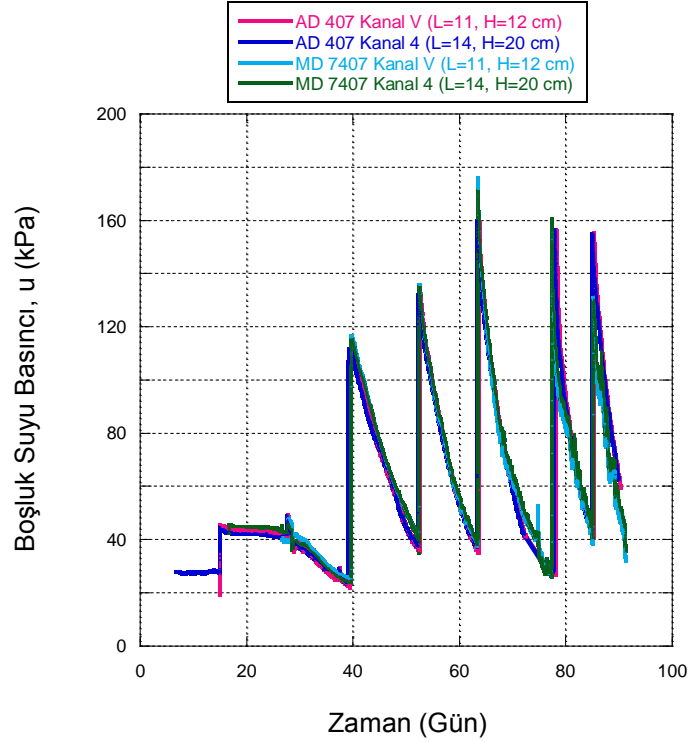


Şekil 6.8 Mebra dren 7407 kullanılan deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi

Amerdrain 407 ve Mebra Dren 7407 kullanılarak yapılan bu model deneylerde, hücre içerisinde aynı yüksekliklerde ($H=12-20\text{cm}$) ve PDD'ye göre eşit uzaklıklarda ($L=11-14\text{cm}$) ölçülen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması Şekil 6.9'da gösterilmektedir.

Her iki arazi model deneyinde ölçülen boşluk suyu basıncı değişimlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir. Mebra Dren 7407'nin boşaltma kapasitesinin tüm deformasyon seviyelerinde belirgin bir şekilde Amerdrain 407'ye göre yüksek olmasına rağmen, zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde belirgin bir fark yaratmamış her iki PDD türünün yüksek deformasyona (%40) uğramalarına rağmen işlevlerini sürdürdüğü gözlemlenmiştir.

Bu durumun kullanılan model deney hücresi çapının, her ikisinin de boşaltma kapasitesi yüksek iki PDD'nin zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde etkisini belirlemek için yeterli olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna rağmen elde edilen sonuçların her iki PDD'nin Craney Adası çökelleri üzerinde arazi uygulamalarında kullanılması durumunda arazideki zemin davranışının modellenmesi bakımından faydalı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.9 Her iki model deneyde değişik yük kademeleri için konsolidasyon aşamasında zemin içerisinde aynı boşluk suyu basıncı ölçüm noktalarında ölçülen boşluk suyu basıncı değişiminin zamanla ilişkisi

6.4.1 Arazi model deneylerinde drenajsız kayma dayanımı ve su muhtevasının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişiminin belirlenmesi

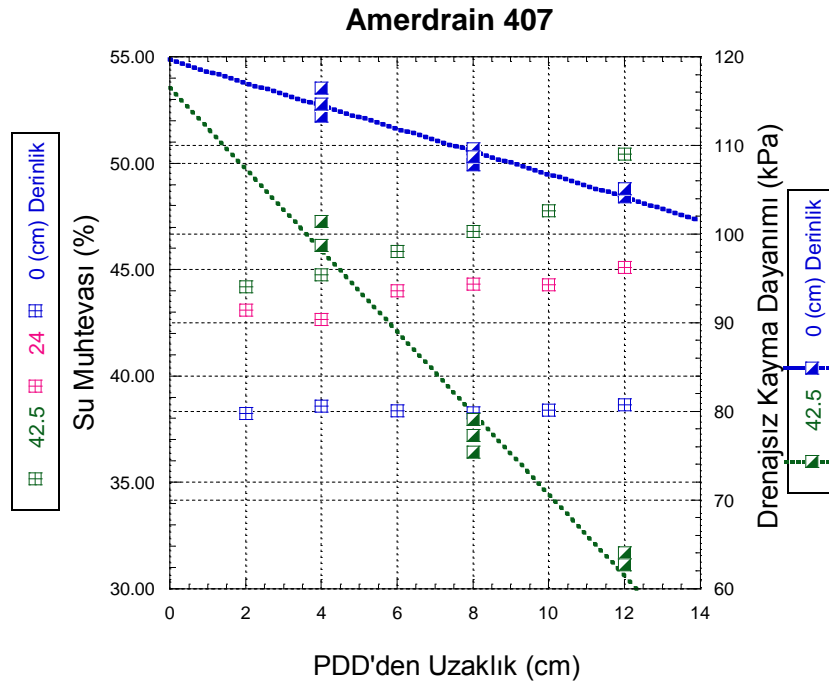
Craney Adası çökelleri kullanılarak farklı PDD türlerinin zeminin konsolidasyon davranışına olan etkisinin belirlenmesinin amaçlandığı arazi benzeşimli model deneylerin sonunda zemin deney hücresinden çıkarılmadan önce değişik numune derinliklerinde, prefabrik düşey drenajdan yatay doğrultuda değişik uzaklıklarda su muhtevası ve veyn deney aleti kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmiştir. Amerdrain 407 ve Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı model deneylerde zeminin su muhtevasının ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi sırasıyla Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterilmektedir.

Her iki PDD türünün kullanıldığı model deneylerde aynı derinlikte PDD'ye olan uzaklığın, farklı zemin derinliklerinde ise derinliğin artmasıyla su muhtevasının arttığı ve buna bağlı olarak drenajsız kayma dayanımının azaldığı görülmektedir.

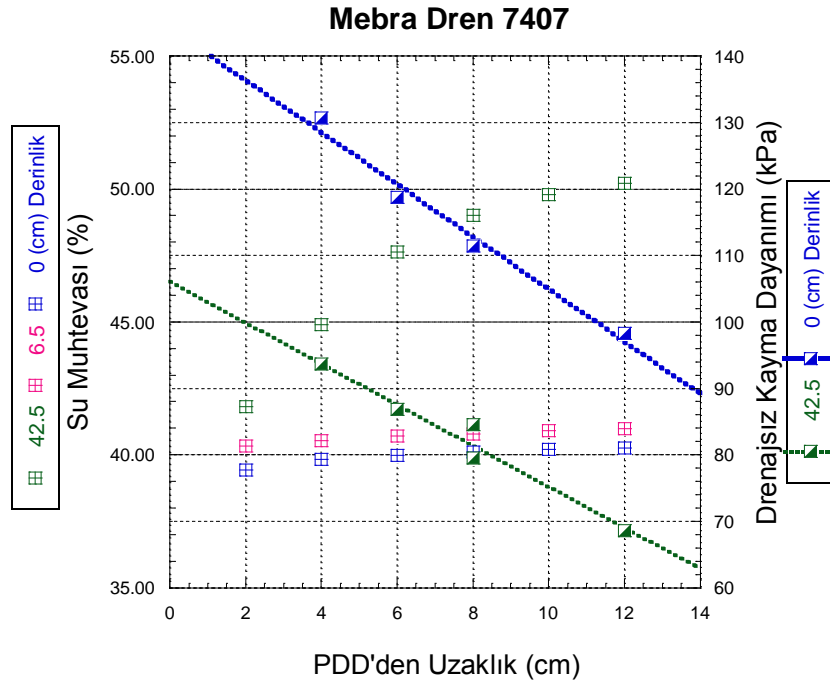
Amerdrain 407'nin kullanıldığı model deneyde zemin yüzeyinde PDD'den değişen uzaklıklarda (2-12 cm) su muhtevasının (w) yaklaşık olarak %38.5 civarında olduğu, bu su muhtevasındaki zeminin drenajsız kayma dayanımının (C_u) yaklaşık olarak 105-116 kPa aralığında değiştiği, 42.5 cm derinlikte su muhtevasının (w) %44.0-50.5 aralığında, bu su

muhtevastaki zeminin drenajsız kayma dayanımının (C_u) yaklaşık olarak 63-108 kPa aralığında değiştiği belirlenmiştir. Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı model deneyde ise zemin yüzeyinde PDD'den değişen uzaklıklarda (2-12 cm) su muhtevasının (w) yaklaşık olarak %40 civarında olduğu, bu su muhtevastaki zeminin drenajsız kayma dayanımının (C_u) yaklaşık olarak 98-136 kPa aralığında değiştiği, 42.5 cm derinlikte su muhtevastaki zeminin drenajsız kayma dayanımının (C_u) yaklaşık olarak 70-100 kPa aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Zeminde meydana gelen aksel şekil değiştirmelerin sonucunda PDD'nin boşaltma kapasitesini tamamen kaybetmemesi koşuluyla kullanılan PDD türünün boşaltma kapasitesi değerinin, konsolidasyon aşamasının sonunda zeminin su muhtevası ve drenajsız kayma dayanımının büyüklüğüyle doğrudan ilişkili olduğu düşünülmemekle birlikte her iki PDD türünün kullanıldığı model deneylerde zeminin su muhtevası değerinin ve drenajsız kayma dayanımının yaklaşık olarak benzer olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu sonuçlar Craney Adası çökellerinde PDD'ler kullanılarak ön yüklemeli zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı projeler için iyileştirme sonrası zeminin drenajsız kayma dayanımı hakkında fikir vermektedir.



Şekil 6.10 Amerdrain 407'nin kullanıldığı model deney sonunda zeminin su muhtevası ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi



Şekil 6.11 Mebra Dren 7407'nin kullanıldığı model deney sonunda zeminin su muhtevası ve drenajsız kayma dayanımının, derinlikle ve PDD'den uzaklıkla değişimi

7. MODEL DENEY DAVRANIŞININ ANALİTİK ÇÖZÜMLER VE SONLU ELEMANLAR MODELİ İLE ANALİZİ

Bu bölümde, Bölüm 6'da sonuçları sunulan arazi benzeşimli model deneylerinde gözlenen davranışın analizi için yapılan çözümler sunulmaktadır. Analizlerde sıvanma etkisinin oluşmadığı, sıvanma etkisinin olduğu durumlar ve sıvanma durumunda örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının farklı değerleri ($k_a/k_s = 1.30, 1.47, 2.00$) ile sıvanma etkisinin farklı konsolidasyon gerilmeleri altında değişken olduğu durumlar için beş farklı analitik çözüm yapılarak model deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu model deney, Plaxis V9.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir.

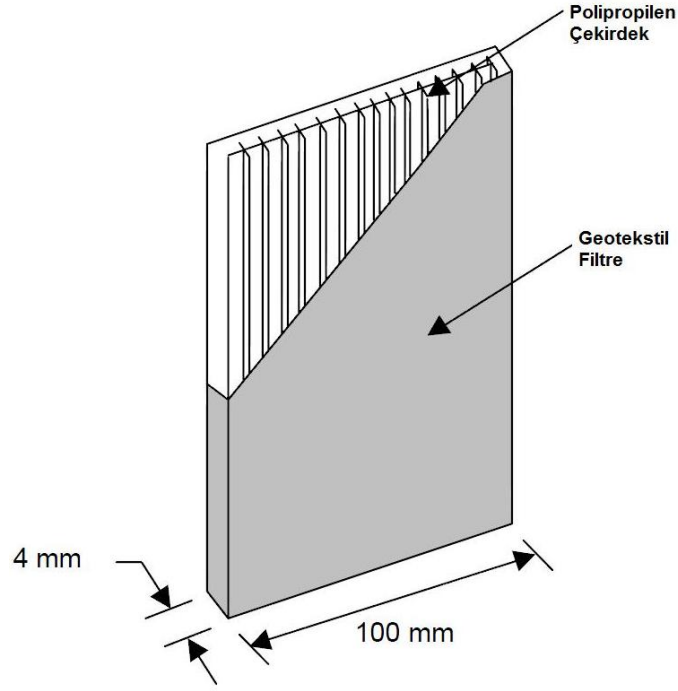
7.1 Analitik Çözümler Ve Nümerik Analizlerde Kullanılacak Eşdeğer PDD Çapının Belirlenmesi

Prefabrik düşey drenlerin (PDD) dikdörtgen en kesiti genellikle tasarım kolaylığı açısından eşdeğer dairesel kesite dönüştürülmektedir. Eşdeğer çapın belirlenmesinde en yaygın şekilde kullanılan dört farklı eşitlik Çizelge 7.1'de, tipik bir PDD'nin şematik görünümü Şekil 7.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 PDD'lerin eşdeğer çapının belirlenmesinde kullanılan eşitlikler

<i>Eşitlik</i>	<i>Referans</i>	<i>Eşitlik Numarası</i>
$d_{eş} = \frac{2(w + t)}{\pi}$	Hansbo 1979	1
$d_{eş} = 0.5w + 0.7t$	Long ve Covo 1994	2
$d_{eş} = \frac{w + t}{2}$	Atkinson ve Eldred 1981 Rixner vd. 1986	3
$d_{eş} = \left[\frac{4(wt)}{\pi} \right]^{0.5}$	Fellenius ve Castonguay 1985	4

$d_{eş}$: PDD'nin eşdeğer çapı, w : PDD'nin genişliği, t : PDD'nin kalınlığı



Şekil 7.1 Tipik bir PDD'nin şematik görünümü

Çizelge 7.1'deki eşitliklerde, genişliği 100 mm, kalınlığı 3-4 mm olan tipik bir PDD için eşdeğer çap yaklaşık olarak 25-60 mm arasında değişmektedir. Birinci eşitlik PDD'nin yüzey alanına ve verimliliğine dayanılarak geliştirilmiştir ve PDD'nin eşdeğer çapı yaklaşık olarak 60 mm'dir. Davies ve Humpheson (1981) ve Hansbo (1979), tipik bir PDD için kabul edilebilir eşdeğer çapın 50 mm olduğunu belirtmişlerdir. Bu değer ikinci ve üçüncü eşitliklerden elde edilen değerlere oldukça yakındır. İkinci eşitlik arazi verileri ile birleştirilen elektriksel ölçümler kullanılarak, üçüncü eşitlik ise drende meydana gelen daralmayı hesaba katmak için geliştirilmiştir. Fellenius ve Castonguay (1985), tarafından sunulan dördüncü eşitlik tipik bir PDD için yaklaşık olarak 25 mm'den daha küçük bir eşdeğer çapı ortaya çıkarmaktadır. Bu eşitlik PDD alanını daire alanına eşitlenilerek geliştirilmiştir.

Mevcut araştırmalar bu eşitliklerden birinin diğerlerine üstünlüğünü açık bir şekilde göstermemekle birlikte değişik araştırmacılar yukarıda belirtilen eşitliklerden birini desteklemektedirler. Örneğin, Rixner vd. (1986) tarafından sunulan araştırma üçüncü eşitliği desteklerken, Long ve Covo (1994)'nun araştırmaları açık bir şekilde ikinci eşitliği desteklemektedir.

Bu eşdeğer çap eşitlikleri arasındaki farkın önemli olup olmadığı tartışılmaktadır. Atkinson ve Eldred (1981), eşdeğer çap için seçilen değer konsolidasyon derecesini hesaplamada önemli bir etkiye sahip olmadığını bildirmektedir. Tahmin edilen dren eşdeğer çapında büyük

değişim olsa bile belirlenecek konsolidasyon derecesindeki değişimin %2'den az olacağı rapor edilmiştir.

Birçok araştırmacı PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında meydana gelen örselenme bölgesi oluşumuyla ilgilenmektedirler. Fakat bu örselenme etkisinin belirlenmesi oldukça zordur ve yıllardan beri araştırılmaktadır. Gabr vd. (1997), birinci eşitlik kullanılarak elde edilen eşdeğer dren çapının ya da varsayılan örselenme bölgesi civarındaki hidrolik iletkenliğin azaltılmasıyla örselenme bölgesi oluşumu etkisinin tasarımda hesaba katılabileceğini belirtmişlerdir. Birinci eşitlik eşdeğer çap için en büyük değeri vermektedir. Birinci eşitlikle elde edilenden daha küçük herhangi bir değer, bu çalışmada azaltılmış eşdeğer çap olarak anılmaktadır. Örselenme etkisinin hesaba katılıp katılmadığını gözetmeksizin geliştirilen ikinci, üçüncü ve dördüncü eşitlikler eşdeğer çapların azaltılmasını sağlamayı formüle etmektedir.

Örselenme bölgesindeki hidrolik iletkenliğin azalma miktarının ve örselenme bölgesi genişliğinin tahmin edilmesinin oldukça zor olmasından dolayı, Gabr vd. (1997) ve Hansbo (1979), dahil birçok araştırmacı hesap aşamasında azaltılmış eşdeğer çapın kullanımını savunmaktadırlar ve günümüzde bu yöntem yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

7.2 Model Deney Davranışının Analitik Çözümler İle Analizi

Arazi benzeşimli model deneyinde kullanılan PDD boyutları için eş değer PDD çapı Atkinson ve Eldred 1981 tarafından sunulan eşitlik kullanılarak belirlenmiş, belirlenen eş değer PDD çapında kum drenlerin kullanılması durumu için analitik çözümler yapılmıştır. Bu analitik çözümlerde, model deneyde PDD'nin zemine yerleştirilmesinden önce zemine arazide etkiyen düşey efektif gerilme altında zeminin konsolide edilmesi aşamalarında sadece düşey drenaj durumu, PDD'nin zemine yerleştirilmesi aşamasından sonra zemin yüzeyi geçirimsiz bir membranla kapatıldığından dolayı bu aşamadan sonra sadece yanal drenaj durumu gözetilerek konsolidasyon hesabı yapılmıştır.

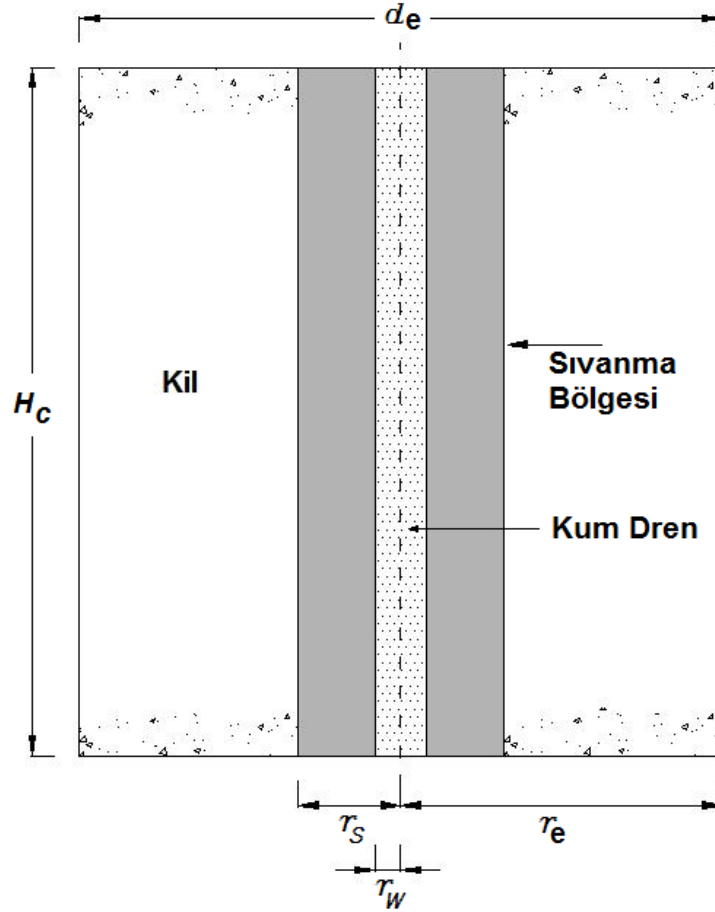
7.2.1 Sadece Yanal Drenaj Durumunda Ortalama Konsolidasyon Derecesi

Kum drenlerin şematik görünümü Şekil 7.2'de gösterilmektedir. Bu şekilde;

r_w : Kum drenin çapı,

$r_e = \frac{d_e}{2}$: Etkin drenaj bölgesinin yarıçapı,

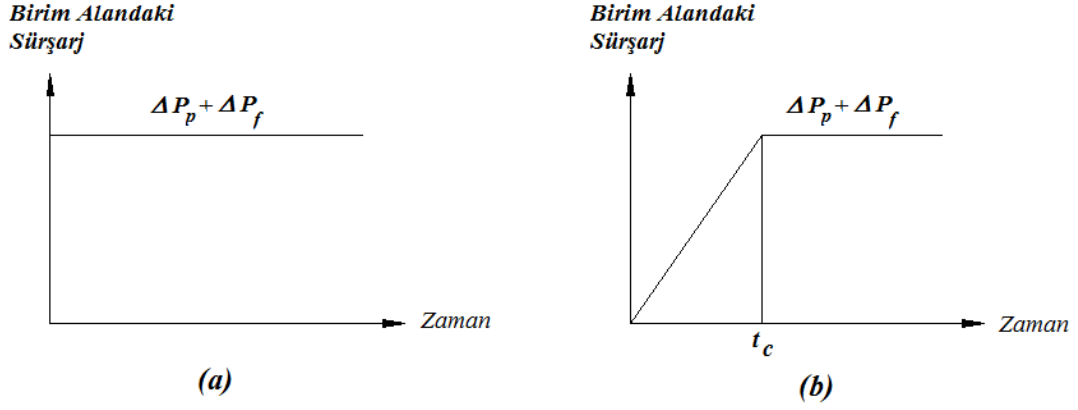
r_s : Kum drenin merkezinden sıvanma bölgesinin en dış noktası arasındaki yanal uzaklıktır.



Şekil 7.2 Kum drenin şematik görünümü

Kum drenler veya PDD'lerin zemine yerleştirilmesi sırasında, drenin etrafındaki zeminde belirli bir bölgede sıvanma etkisinin oluştuğu, ayrıca bu sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zemine göre önemli bir miktarda değiştiği bilinmektedir.

Ortalama konsolidasyon derecesi ilişkisi için eşdeğer şekil değiştirme teorisi kullanılmıştır. Sürşarj yükünün uygulanma şekline bağlı olarak iki farklı analitik çözüm bulunmaktadır. Şekil 7.3 a'da tüm sürşarj yükünün ani bir şekilde uygulandığı, Şekil 7.3 b'de sürşarj yükünün kademeli yükleme şeklinde uygulandığı durumlar gösterilmektedir.



Şekil 7.3 Sürşarj yükünün uygulanma şekilleri

Tüm sürşarj yükünün ani bir şekilde uygulandığı durum için Barron (1948), tarafından önerilen eşitlik,

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 T_r}{m}\right) \quad (7.1)$$

şeklindedir. Yukarıdaki eşitlikte;

U_r : Sadece radyal drenaj durumu için ortalama konsolidasyon derecesi

$$m = \frac{n^2}{n^2 - S^2} \ln\left(\frac{n}{S}\right) - \frac{3}{4} + \frac{S^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \left(\frac{n^2 - S^2}{n^2}\right) \ln S \quad (7.2)$$

$$n = \frac{d_e}{2r_w} = \frac{r_e}{r_w} \quad (7.3)$$

$$S = \frac{r_s}{r_w} \quad (7.4)$$

k_h : Örselenmemiş zeminin yatay yöndeki hidrolik iletkenliği

k_s : Sıvanma bölgesindeki yatay hidrolik iletkenlik

$$T_r = \frac{C_{vr} t}{d_e^2} \quad (7.5)$$

T_r : Sadece yanal drenaj için boyutsuz zaman faktörü

$$C_{vr} = \frac{k_h}{\left[\frac{\Delta e}{\Delta \sigma' (1 + e_{av})}\right] \gamma_w} \quad (7.6)$$

C_{vr} : Yanal drenaj için konsolidasyon katsayısı

Sıvanma etkisinin olmaması durumunda,

$r_s = r_w$ ve $k_h = k_s$ olduğundan $S = 1$ olacağı için, (7.2)'deki eşitlik

$$m = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (7.7)$$

şeklinde düzenlenebilir.

Sürşarj yükünün kademeli yükleme şeklinde uygulanması ve sıvanma etkisinin olmaması durumunda Olson (1977), tarafından önerilen eşitlik;

$T_r \leq T_{rc}$ için,

$$U_r = \frac{T_r - \frac{1}{A} [1 - \exp(-AT_r)]}{T_{rc}} \quad (7.8)$$

$T_r \geq T_{rc}$ için,

$$U_r = 1 - \frac{1}{AT_{rc}} [\exp(AT_{rc}) - 1] \exp(-AT_{rc}) \quad (7.9)$$

$$T_{rc} = \frac{C_{vr} t_c}{d_e^2} \quad (7.10)$$

$$A = \frac{2}{m} \quad (7.11)$$

7.2.2 Sadece Düşey Drenaj Durumunda Ortalama Konsolidasyon Derecesi

Şekil 7.3a'da sürşarj yükünün ani bir şekilde uygulanması durumunda aşağıdaki eşitlik kullanılarak sadece düşey drenaj durumunda ortalama konsolidasyon derecesi hesaplanabilir.

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left[\frac{U_v(\%)}{100} \right]^2 \quad (U_v = 0 - 60\%) \quad (7.12)$$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U_v(\%)) \quad (U_v > 60\%) \quad (7.13)$$

U_v : Sadece düşey drenaj durumu için ortalama konsolidasyon derecesi

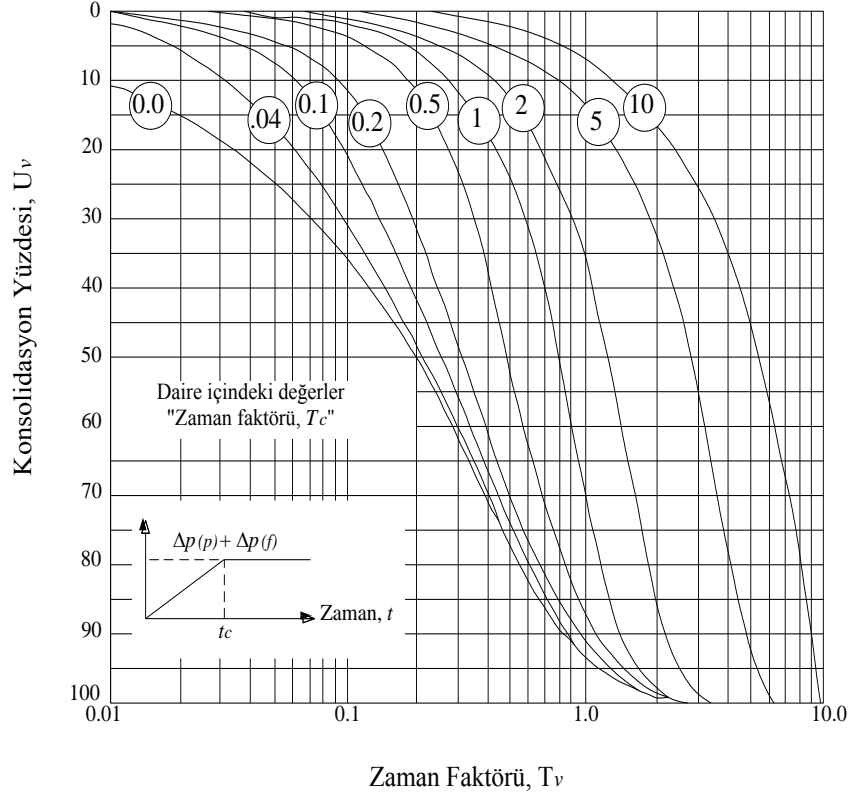
C_v : Düşey drenaj durumu için konsolidasyon katsayısı

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (7.14)$$

Şekil 7.3 b'de gösterilen kademeli yükleme durumu için Olson (1977), tarafından önerilen $U_v\%$ 'nin T_v ve T_c ile değişimi Şekil 7.4'de gösterilmektedir.

$$T_c = \frac{C_v t_c}{H^2} \quad (7.15)$$

H : Maksimum düşey drenaj yolu uzunluğudur.



Şekil 7.4 U_v 'nin T_v ve T_c ile değişimi (Olson, 1977)

7.2.3 Analitik Çözüm Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Kademeli yükleme altında oturma hesapları yapılırken, bir önceki yük kademesi altında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışlarının derinlik boyunca sönümlenmesi ve her noktadaki sönümlenmemiş (kalan) boşluk suyu basıncının bir sonraki kademe sönümlenmeye devam edeceği dikkate alınmıştır. Herhangi bir (i) yük kademesindeki nihai konsolidasyon oturması,

$$S_{ci} = H \left(\frac{C_c}{1 + e_i} \right) \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_{vi}}{\sigma'_{vo} + (\Delta\sigma_{vi-1} - u_{i-1})} \right) \quad (7.16)$$

Herhangi bir yük kademesindeki oturma-zaman davranışı ise,

$$S = S_c U_t \quad (7.17)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

U_t : t zamanında ortalama konsolidasyon yüzdesi

Düşey ve radyal konsolidasyonun birlikte gerçekleşmesi durumu için ortalama konsolidasyon yüzdesi,

$$U_{v,r} = 1 - (1 - U_r)(1 - U_v) \quad (7.18)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda,

U_r : Radyal konsolidasyon için ortalama konsolidasyon yüzdesi

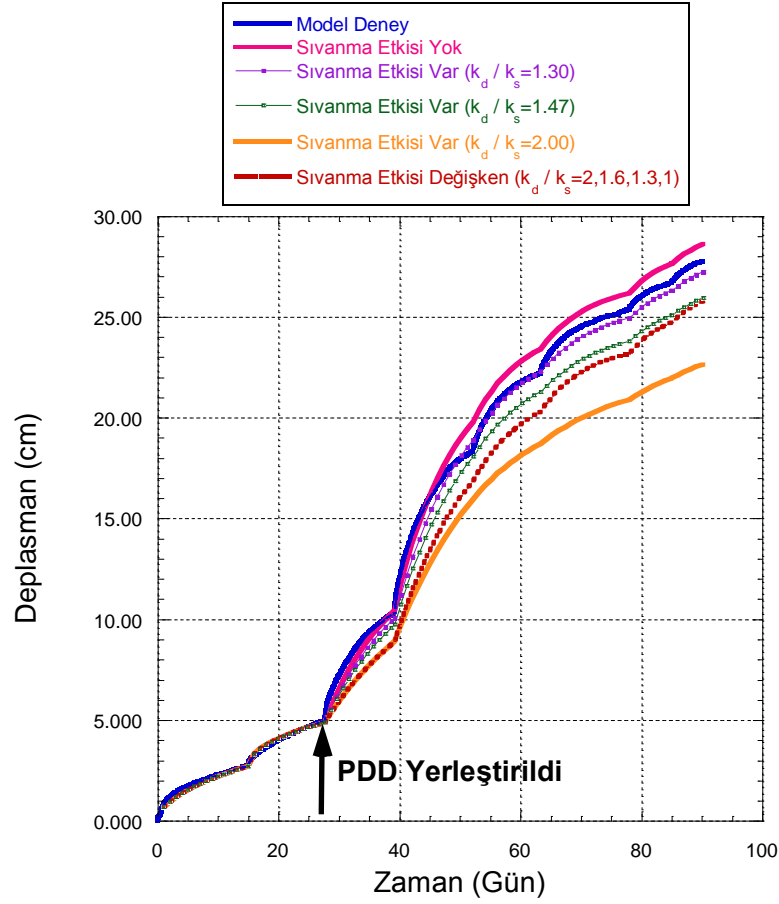
U_v : Düşey konsolidasyon için ortalama konsolidasyon yüzdesi'dir.

Arazi benzeşimli model deneyi için sıvanma etkisinin oluşmadığı ve sıvanma etkisinin oluştuğu durumlar için analitik çözümler yapılmıştır. Örselenme bölgesi oluşumu ve etkisinin detaylı olarak incelendiği Bölüm 4'de Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan sıvanma etkisi model deneylerinde sıvanma bölgesinin genişliğinin yaklaşık olarak 78 mm olduğu, sıvanma bölgesiyle birlikte geçiş bölgesinin çapının 354-394 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Deneylerde belirlenen bu çap değerinin arazi benzeşimli model deney çapından (325 mm) daha büyük olması nedeniyle model deney hücresindeki zeminin sadece sıvanma ve geçiş bölgesinden oluştuğu düşünülmektedir. Bu nedenle sıvanma etkisinin oluştuğu durumlar için analitik çözüm yapılırken, örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranı yerine geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranı kullanılmıştır. Sıvanma etkisinin oluşmadığı durum ile sıvanma etkisinin olduğu durumda geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının farklı değerleri ($k_d/k_s = 1.30, 1.47, 2.00$) için ve sıvanma etkisinin farklı konsolidasyon gerilmeleri altında değişken olduğu ($k_d/k_s = 2.0 - 1.6 - 1.3 - 1.0$) durumlar için hesaplanan deplasman-zaman ilişkisi Şekil 7.5'de gösterilmektedir.

Elde edilen analitik çözüm sonuçlarına göre, sıvanma etkisinin olmaması durumunda toplam 90 gün konsolidasyon süresi sonunda zeminde meydana gelmesi beklenen düşey deplasmanın 28.63 cm olduğu görülmektedir. Sıvanma etkisi oluştuğu gözönüne alınan farklı durumlarda aynı süre içinde zeminde meydana gelecek deplasman değerinin daha küçük olduğu, dolayısı ile örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_d/k_s), yani sıvanma etkisinin büyüklüğünün zeminin konsolidasyon davranışını önemli bir miktarda etkilediği görülmektedir.

Analitik çözümlerde geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının 1.25 alındığı durumda arazi benzeşimli model deneyinde zeminde meydana gelen deplasman - zaman ilişkisine en yakın sonucun elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmiş

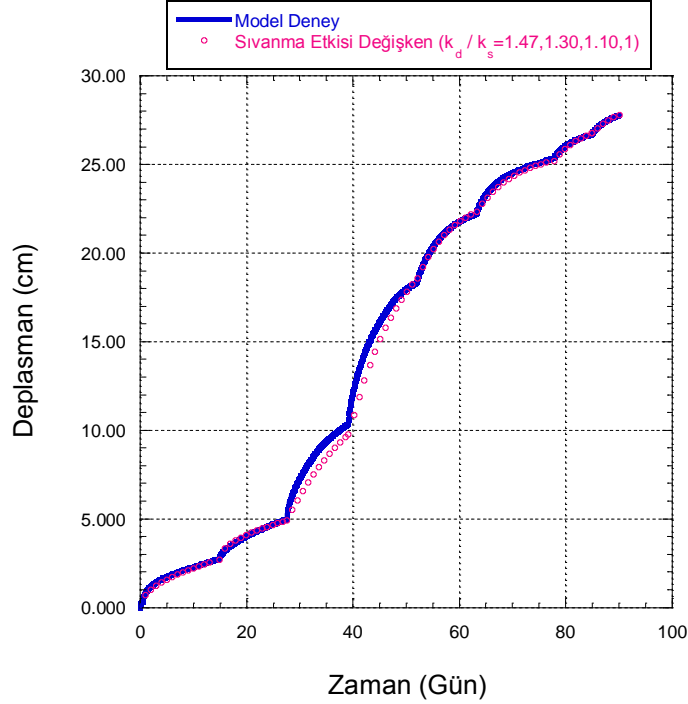
zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_d/k_s) olan sıvanma etkisinin bu orandan daha büyük olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 7.5 Analitik çözümlerde farklı sıvanma etkisi durumları için hesaplanan deplasman-zaman ilişkisi

Bölüm 4’de sunulan Craney Adası çökelleri kullanılarak yapılan sıvanma etkisi model deneylerinde PDD’nin zemine yerleştirilmesi aşamasında oluşan sıvanma etkisinin uygulanan konsolidasyon gerilmelerinin artmasıyla azaldığı belirlenmişti. Bu deney sonuçlarına göre 25kPa konsolidasyon gerilmesi altında geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_g/k_s) 1.66 bulunurken, konsolidasyon gerilmesinin 50 ve 100 kPa’ya çıkarılması durumunda bu oranın sırasıyla 1.47 ve 1.22 seviyelerine düştüğü belirlenmişti. Bu nedenle Şekil 7.5 gösterildiği gibi, tüm konsolidasyon aşamaları boyunca sıvanma etkisinin ($k_d/k_s = 1.47$) sabit kabul edildiği analizler yerine, konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla bu oranın azaltılarak analitik çözümlerde kullanılmasının daha yaklaşık sonuçlar elde edilmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Model deneyde 40 kPa’lık gerilme altında PDD’nin zemine yerleştirildiği aşamada k_d/k_s oranı 1.47 kabul edilip, daha sonra konsolidasyon gerilmelerinin arttırıldığı

aşamalarda bu oranı giderek azaltılarak elde edilen analitik çözüm sonuçları Şekil 7.6'da gösterilmektedir.



Şekil 7.6 Konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla sıvanma etkisinin değişken olduğu durum için hesaplanan deplasman-zaman ilişkisi

7.3 Model Deney Davranışının Sonlu Elemanlar Modeli İle Analizi

Fiziksel model deney davranışının sayısal analizi amacı ile arazi benzeşimli model deneyleri PLAXIS V9.2 sonlu elemanlar yazılımından yararlanılarak modellenmiştir. Bu analizlerde, farklı gerilmeler altında konsolidasyon davranışını analiz etmek için laboratuvar ve arazi benzeşimli model deneylerinden elde edilen zemin parametreleri kullanılarak bütünleşik (coupled) sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde yükleme adımları zamana bağlı olarak dikkate alınabilmekte ve zemin elasto-plastik olarak modellenebilmektedir. Nümerik analizlerde, “Soft Soil Model” malzeme bünye modelinden faydalanarak yumuşak zeminlerin davranışı modellenmiştir.

7.3.1 Soft Soil Bünye Modeli

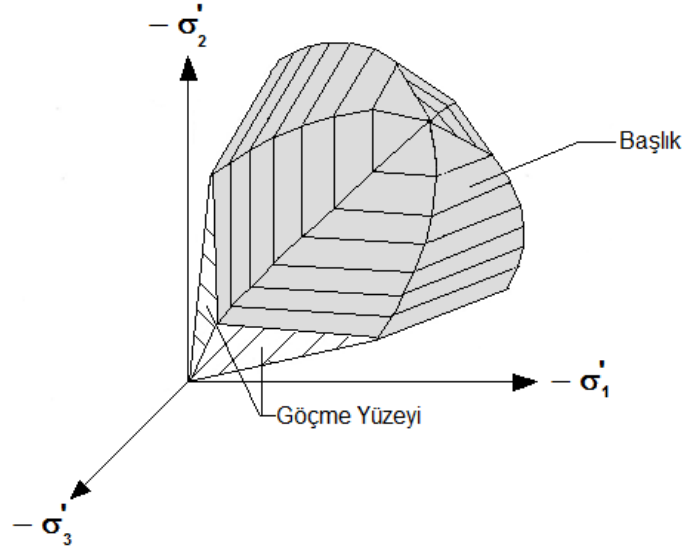
Bu model yumuşak zeminlerin davranışını modellemek için geliştirilmiş izotropik, elastoplastik şekil değiştirme pekleşmeli bir modeldir (Brinkgereve,1994). Herhangi bir düzlemde akma fonksiyonu izotropik gerilmelere göre elips şeklindedir. Modelin bazı özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

- Gerilme bağımlı rijitlik
- Birincil yükleme ve boşaltma-tekrar yükleme arasındaki ayırım
- Ön konsolidasyon gerilmesini hatırlama
- Mohr-Coulomb kriterine göre göçme davranışı

Modeli tanımlamak için toplam 7 zemin parametresine gerek vardır. Bunlar Mohr-Coulomb modelinde olduğu gibi göçme parametreleri c' , ϕ' , ψ ve modifiye izotropik sıkışma indisi λ^* , modifiye şişme indisi κ^* , M parametresi ve ν_{ur} boşaltma-tekrar yükleme Poisson oranıdır. Bu parametreler, sıkışma indeksi (C_c), şişme indeksi (C_s), Cam-Clay parametreleri λ ve κ boşluk oranı (e) değerleri kullanılarak bulunabilir.

Soft-Soil Model (Modifiye Cam-Clay Modelinde) başlangıç ön konsolidasyon gerilmesine gereksinim vardır. Eğer malzeme normal konsolide ise ön konsolidasyon gerilmesi başlangıç gerilme durumu ile eşdeğerdir. Eğer malzeme aşırı konsolide ise aşırı konsolidasyon oranına (AKO) gereksinim vardır. Normal konsolide durumda yanıl ve düşey gerilmeler normal konsolide durumdaki yanıl zemin basıncı katsayısı K_0 'a göre belirlenecektir. Aşırı konsolide zeminlerde ise yanıl zemin basıncı katsayısı K_0^{nc} normal konsolide zeminlerden büyüktür. Schmidt, (1996)'da yanıl zemin basıncı katsayısı ile AKO arasındaki ilişki efektif içsel sürtünme açısına göre tanımlanmıştır.

Şekil 7.7'de gösterildiği gibi akma fonksiyonu ($p':q$) düzleminde elips şeklindedir. M parametresi elipsin tepe noktasını tanımlamaktadır, ($p':q$) düzleminde bütün elipslerin tepe noktaları birleştirildiğinde elde edilen çizginin eğimi M'dir. Modifiye Cam-Clay Modelinde M çizgisi kritik durum çizgisini temsil etmekte ve göçme anındaki pik durumu göstermektedir. Soft-Soil Model de göçme kritik durumla ilişkili değildir. Göçme Mohr-Coulomb mukavemet parametrelerine (c' , ϕ') göre tariflenmektedir.



Şekil 7.8 Asal gerilme uzayında akma konturları (Brinkgereve,1994)

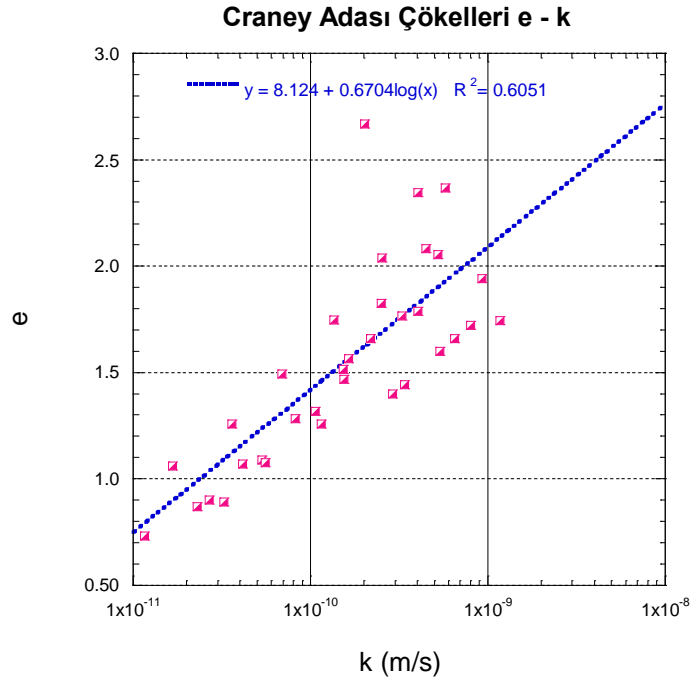
7.3.2 Nümerik Analizlerde Kullanılacak Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak zemin parametreleri ödometre ve üç eksenli basınç (CU) deneyleri ile örselenme bölgesi ve arazi benzeşimli model deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanılarak belirlenmiştir. Belirlenen zemin parametreleri Çizelge 7.2’de özetlenmektedir.

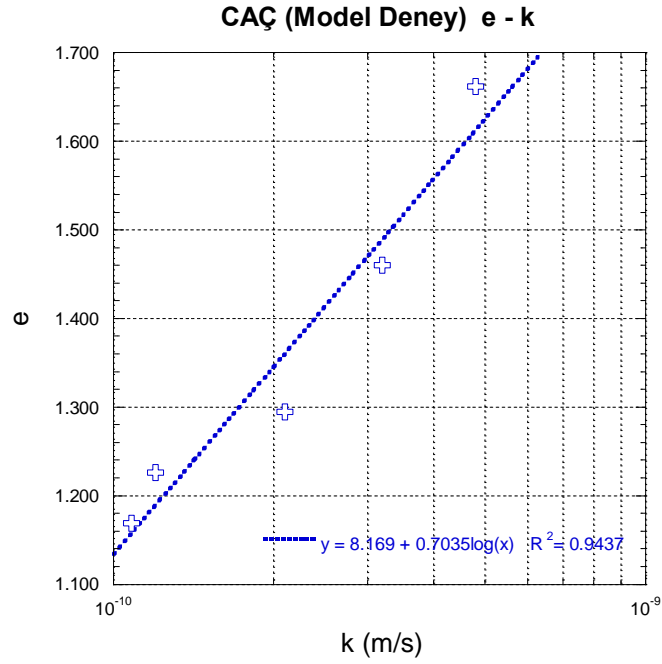
Çizelge 7.2 Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak zemin parametreleri

AKO	K_0	e_0	λ^*	κ^*	ν_{ur}	c' (kPa)	ϕ'	γ (kN/m ³)	ψ	M	$k_{x,y}$ (m/gün)
1.0	0.61	2.583	0.075	0.035	0.15	1.0	23°	14.7	0°	0.51	7.3×10^{-4} 4.0×10^{-4}

Ayrıca Craney Adası Çökelleri (CAÇ) üzerinde gerçekleştirilen farklı deney yöntemlerinde zeminin hidrolik iletkenliğinin boşluk oranıyla değişimi incelenmiştir. Ödometre, esnek duvarlı permeabilite, örselenme bölgesi model deneyleri ve arazi benzeşimli model deneyi ile belirlenen Craney Adası çökellerinin hidrolik iletkenliğinin boşluk oranıyla değişimi sırasıyla Şekil 7.9’da ve Şekil 7.10’da gösterilmektedir.



Şekil 7.9 CAÇ için farklı deney yöntemlerinde e-k ilişkisi



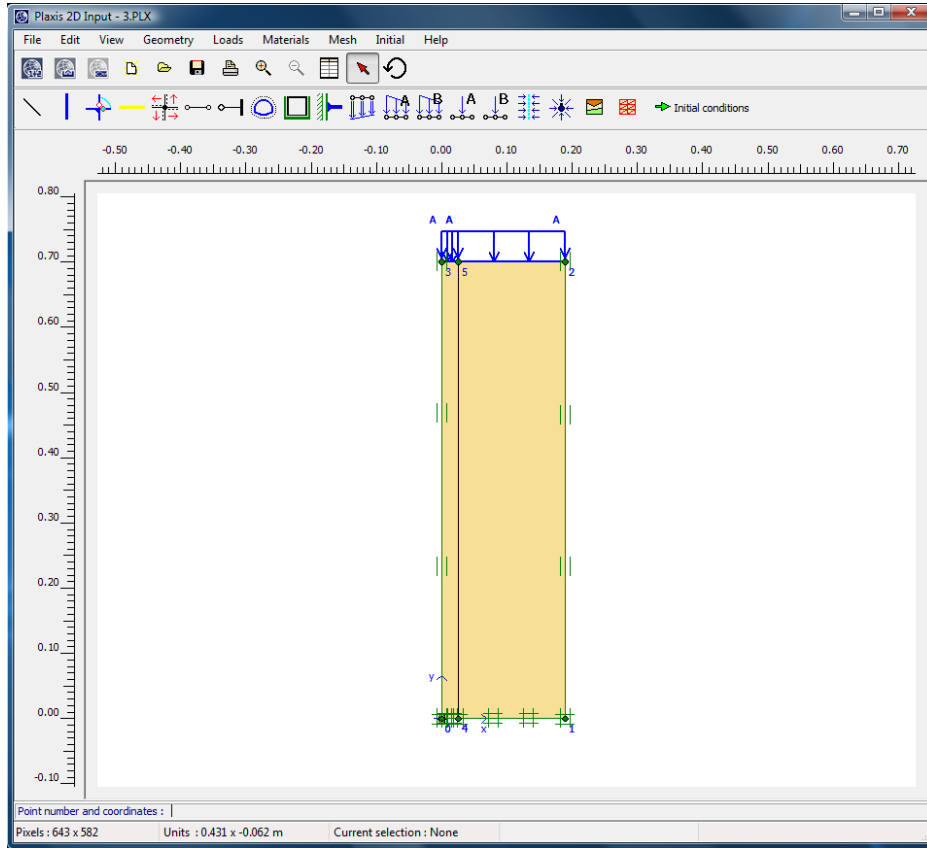
Şekil 7.10 CAÇ ile gerçekleştirilen model deneyde e-k ilişkisi

Bu sonuçlara göre Taylor (1948), tarafından önerilen 7.19'daki eşitlikle Craney Adası çökelleri için permeabilite değişim indeksi $C_k = 0.704$ olarak bulunmuş ve sonlu elemanlar analiz yönteminde bu değer kullanılmıştır.

$$\log k = \log k_0 - \frac{(e_0 - e)}{C_k} \quad (7.19)$$

7.3.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar ağı 15 düğüm noktalı elemanlar ve aksi simetrik model ile tanımlanmıştır. PDD'nin boyutlarına göre eşdeğer PDD çapı Rixner vd. (1986) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak belirlenmiş, model deney sisteminin geometrisi oluşturulurken, PDD bu boyutta bir kum dren olarak tanımlanmıştır. Bu modelde zemin parametreleri tanımlanırken drenajsız, Soft Soil Bünye Modeli, kum dren olarak tanımlanan PDD için ise drenajlı, Mohr Coulomb Bünye Modeli seçilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin geometrisi Şekil 7.11'de gösterilmektedir.



Şekil 7.11 Sonlu elemanlar modelinin geometrisi

7.3.4 Sonlu Elemanlar Hesap Aşamaları

Model deneyde, zemine PDD yerleştirilmeden arazide etkiyen düşey efektif gerilme uygulanarak zemin konsolide edilmiştir. Zeminin yüksek su muhtevasına sahip olmasından dolayı arazide zemine etkiyen düşey efektif gerilme iki aşamada uygulanmıştır. Birinci aşamada 25 kPa gerilme altında zemin yaklaşık 15 gün süreyle, ikinci aşamada 40 kPa

gerilme altında yaklaşık 13 gün süreyle konsolide edilerek arazideki konumuna getirilmiştir. Zeminin konsolidasyonu sırasında deney sisteminde sadece zeminin üst yüzeyinden drenaja izin verilmiştir. Bu aşamadan sonra PDD zemine bir mandrel kullanılarak sabit hızla itilmiştir. PDD zemine yerleştirildikten sonra daha önce uygulanan konsolidasyon gerilmesi aynı kalacak şekilde zeminin konsolidasyonunun tamamlanması için belirli bir süre beklenmiştir. PDD'nin zemine yerleştirilmesi zemindeki drenaj koşullarını değiştirdiği için aynı konsolidasyon gerilmesi altında zeminin konsolidasyonun hızlanarak devam ettiği gözlenmiştir. Daha sonra değişen yük kademelerinde zeminin konsolidasyonu tamamlanmıştır.

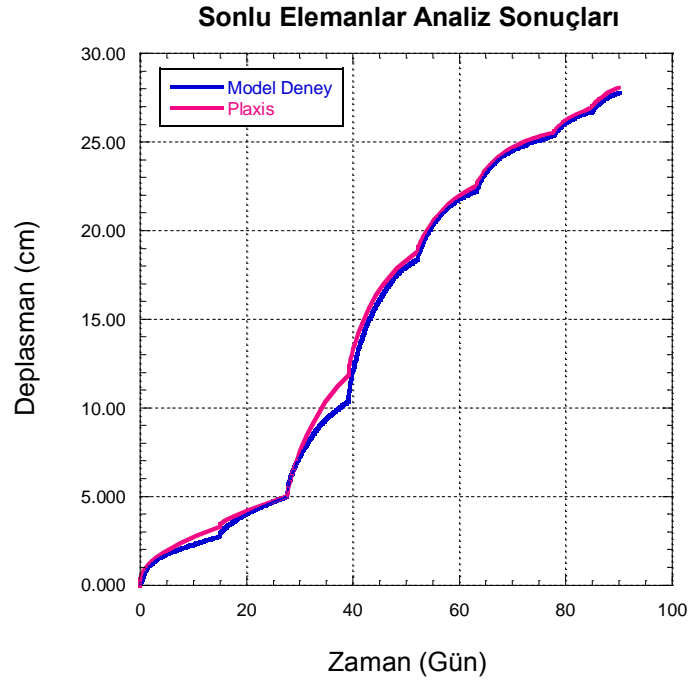
Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra hesap adımları tanımlanmıştır. Bu hesap adımlarında model deney sisteminde uygulanan işlem sırası dikkate alınmıştır. Model deneyde zeminin arazideki konumuna getirilmesi için uygulanan 25 ve 40 kPa konsolidasyon gerilmelerinin uygulandığı hesap adımlarında örselenmemiş zemin parametreleri kullanılarak sadece zeminin üst yüzeyinden drenaja izin verilmiş, deney hücresinin diğer sınırları drenaja kapatılmıştır. Analizlerde her yük kademesinde konsolidasyon süresi model deneyde zeminin konsolidasyonu için geçen süre olarak tanımlanmıştır.

PDD'nin zemine yerleştirilmesi aşamasında, daha önce eş değer PDD çapına göre geometrisi belirlenen bölgedeki zemin kum dren ile değiştirilmiş, bu aşamadan sonra zeminin üst yüzeyi drenaja kapatılarak zemin içerisinde su akımının sadece radyal doğrultuda hareket edip dren'den geçişi sağlanmıştır.

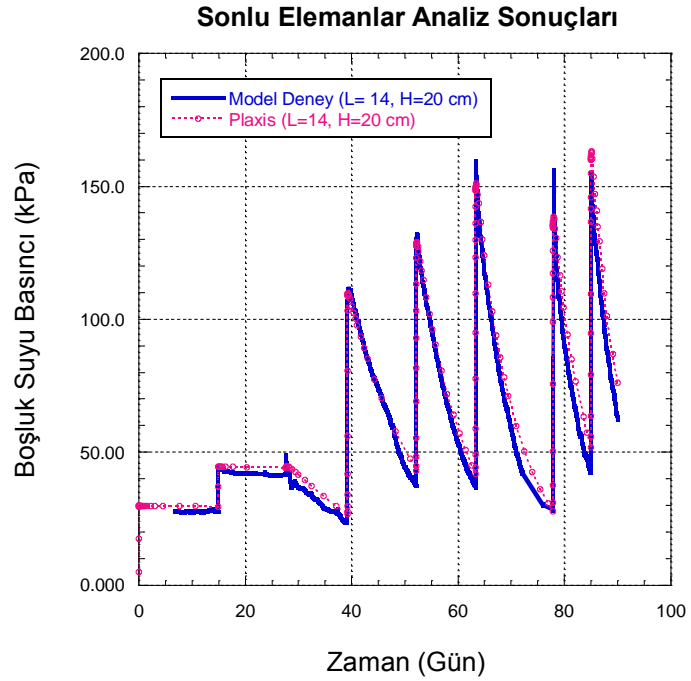
Daha sonra model deneyde kademeli olarak zemine uygulanan konsolidasyon gerilmeleri ve süreleri dikkate alınarak diğer hesap aşamaları tamamlanmıştır.

7.3.5 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

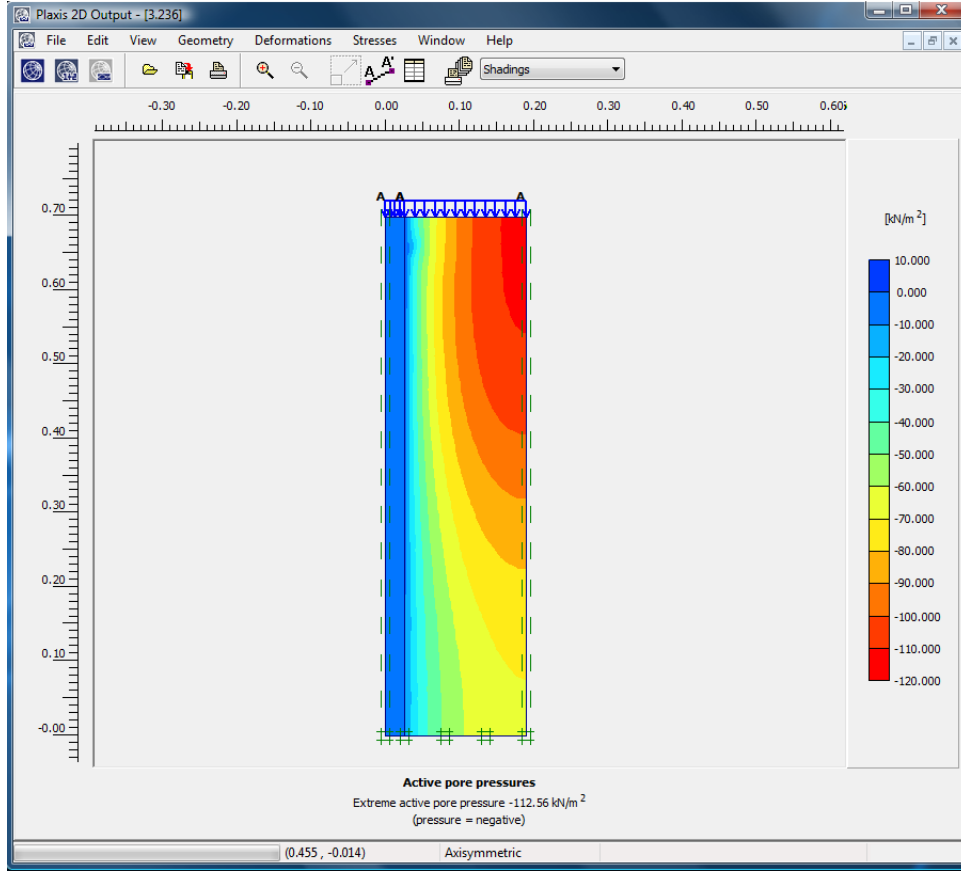
Sonlu elemanlar analizinde elde edilen sonuçlarla model deney sisteminde bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Model deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre değişik konsolidasyon adımlarında, zeminde meydana gelen deplasmanların zamanla değişimi Şekil 7.12'de, PDD'den belirli bir uzaklıkta boşluk suyu basıncının zamanla değişimi ise Şekil 7.13'de gösterilmektedir.



Şekil 7.12 Model deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre değişik konsolidasyon adımlarında zeminde meydana gelen deplasmanların zamanla değişimi

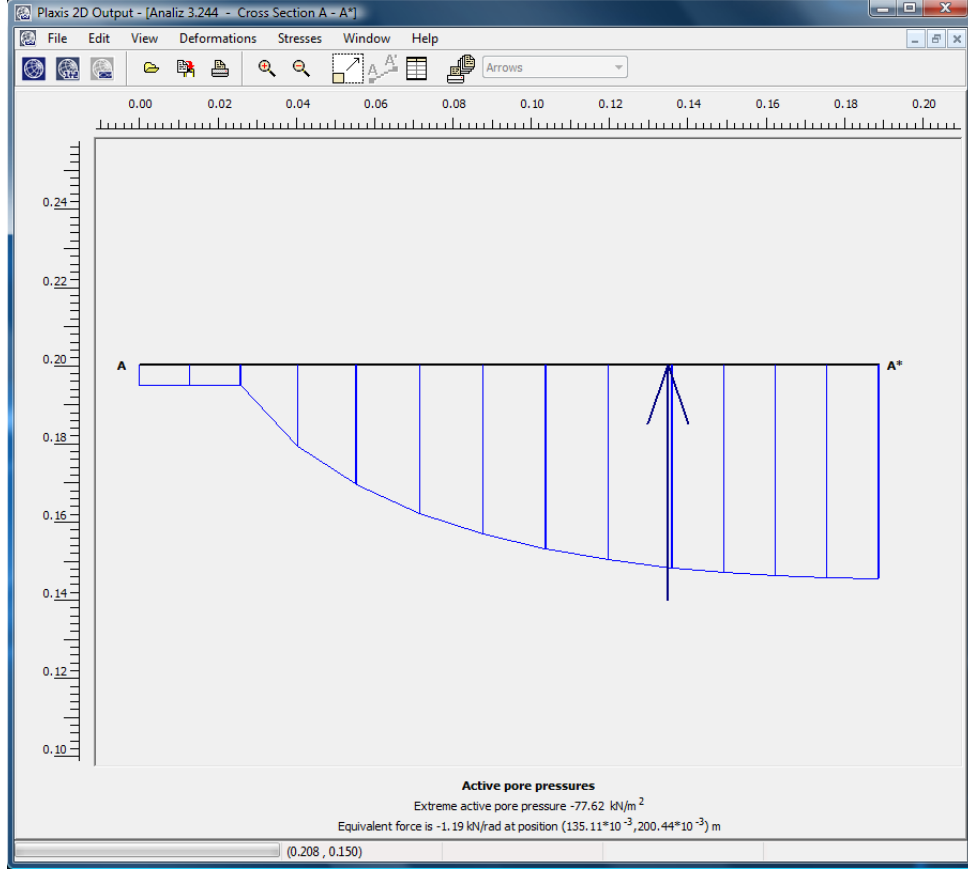


Şekil 7.13 Model deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre PDD'den belirli bir uzaklıkta boşluk suyu basıncının zamanla değişimi



Şekil 7.14 Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre analiz adımları sonunda aktif boşluk suyu basıncının derinlikle ve drenden uzaklıkla değişimi

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre analiz adımları sonunda aktif boşluk suyu basıncının derinlikle ve drenden uzaklıkla değişimi Şekil 7.14’de, 20 cm yükseklikte bir kesit boyunca drenden uzaklıkla değişimi Şekil 7.15’de gösterilmektedir.



Şekil 7.15 Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre analiz adımları sonunda aktif boşluk suyu basıncının 20 cm yükseklikte PDD'den uzaklıkla değişimi

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla model deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında;

- 25-40 kPa'lık ilk iki konsolidasyon aşaması için Plaxis sonlu elemanlar analiz sonuçları, arazi model deney sonuçlarıyla bire bir örtüşmektedir. Bu sonuç bu iki konsolidasyon aşamasında kullanılan, ödometre ve üç eksenli basınç (CU) deneyleri ve arazi model deneylerinden elde edilen, örselenmemiş zemin parametrelerinin gerçekçi olduğunu göstermektedir.
- Plaxis sonlu elemanlar analiz programında PDD malzemesinin modellenmesindeki güçlükler rağmen, bu çalışmada olduğu gibi PDD boyutlarına göre hesaplanan eşdeğer PDD çapında kum dren kullanılmasıyla başarılı analiz sonuçlarına ulaşılabileceği gözlenmiştir.
- PDD'nin zemine yerleştirilme aşamasından sonraki ilk konsolidasyon (40 kPa) aşamasında model deney sonuçlarıyla, sonlu elemanlar analiz sonuçları arasındaki farkın model deneyde örselenme bölgesi oluşumundan, ve bu örselenme etkisinin

konsolidasyon sürecini yavaşlatmasından kaynaklandığı, daha sonra bu örselenme etkisinin uygulanan konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla (120 kPa) azaldığı bu nedenle analiz sonuçlarının model deney sonuçlarıyla benzer olduğu düşünülmektedir. Hem örselenme bölgesi model deney sonuçlarında hem de analitik çözüm sonuçlarında görülen, örselenme etkisinin uygulanan konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla azalması durumu sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla da doğrulanmıştır.

- Tüm konsolidasyon aşamalarında sonlu elemanlar analizi ile belirlenen boşluk suyu basınçları ve deformasyonların zamanla değişiminin model deney sonuçlarıyla uyumlu olması, zeminin hidrolik iletkenliğinin boşluk oranıyla değişimi olan permeabilite değişim indeksinin (C_k) sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmasıyla, örselenme etkisinin dolaylı olarak gözönüne alınabileceği düşünülmektedir.
- Bu çalışmada olduğu gibi, PDD'ler kullanılarak önyükleme ile zemin iyileştirme yönteminin uygulanacağı projelerde büyük boyutlu model deney yapılması ve tasarımda bu model deneyden belirlenen zemin parametrelerinin kullanılmasının, zemin iyileştirme projesinin hedeflerine ulaşması bakımından yararlı olacağı düşünülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Örselenme Bölgesi Oluşumu ve Etkisi

Prefabrik düşey drenler (PDD) kullanılarak önyükleme ile zemin iyileştirme yönteminde, farklı zemin türlerinde PDD'lerin zemine bir mandrel kullanılarak yerleştirilmesi sırasında zemine oluşan örselenme etkisi ve bu örselenme bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinde meydana gelen değişim Wisconsin Üniversitesi Geoteknik laboratuvarlarında geliştirilen örselenme bölgesi model deney sistemi kullanılarak incelenmiştir. Bu model deney çalışmalarının sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Zemin içerisindeki örselenme bölgesinin sıvanma ve geçiş bölgelerinden oluştuğu bu bölgelerdeki hidrolik iletkenliğin PDD'den uzaklaştıkça lineer olarak arttığı ve örselenmemiş zemindeki değerine ulaştığı,
- Craney Adası çökellerinde 25 kPa'lık jeolojik efektif gerilme altında PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında, örselenmiş bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmemiş zemine oranı olarak tanımlanan örselenme derecesi sıvanma bölgesi için 0.32-0.35 bulunurken, geçiş bölgesi için bu değer 0.57 olarak bulunmuştur. Başka bir deyişle sıvanma bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgeye göre 2.86-3.13, geçiş bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin ise 1.75 kat daha küçük olduğu,
- Farklı zemin türlerinde örselenme bölgesinin değişiminin belirlenmesi amacıyla yapılan model deneyde ise kaolin kilinde 25 kPa'lık jeolojik efektif gerilme altında PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında, zemindeki örselenme derecesi sıvanma bölgesi için 0.50 bulunurken geçiş bölgesi için bu değer 0.82 olarak bulunmuştur. Bu nedenle kaolin kilinde oluşan sıvanma bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin örselenmemiş bölgeye göre 2.00, geçiş bölgesindeki hidrolik iletkenlik değerinin ise 1.22 kat daha küçük olduğu,
- Farklı zemin türlerinde sıvanma bölgesinin genişliğinin Rixner vd. (1986) tarafından önerilen eşitliğe göre bulunan eşdeğer mandrel çapının 2.3-3.3 katı olduğu, sıvanma ve geçiş bölgesiyle birlikte örselenme bölgesinin genişliğinin bu değer 5.2-7.3 katı olduğu,
- PDD'nin zemine yerleştirilmesinden sonra arazide uygulanan değişik sürşarj yükleri altında örselenme derecesinin ne şekilde değişeceğini belirlemek için uygulanan 50-

100 kPa gerilme altında ikinci grup deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde 50-100 kPa'lık gerilme altında örselenme derecesinin sırasıyla sıvanma bölgesi için 0.65-0.81, geçiş bölgesi için 0.96-0.99 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre PDD'nin zemine yerleştirilmesi sırasında kullanılan mandrel boyutlarına bağlı olarak belirli bir bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğinde önemli bir miktarda azalmaya sebep olduğu, daha sonra uygulanan değişik sürşarj yükleri altında zeminin konsolidasyonu sırasında bu örselenme etkisinin giderek azaldığı,

deneysel olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu deneysel değerler literatürde bulunan diğer araştırmacılar tarafından genellikle dolaylı olarak belirlenen sonuçlarla yakın benzerlik göstermektedir.

Sonuç olarak PDD'ler kullanılarak yapılacak zemin iyileştirme projelerinde hedeflenen konsolidasyon süresi ve iyileştirme derecesine ulaşmak için bu örselenme etkisinin gözetilmesi ve ayrıca bu çalışmada belirlenen örselenme bölgesi genişliğinin kullanılacak mandrel boyutu ve şekline bağlı olarak değişeceğinin bilinmesi gerekmektedir.

Bu deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen tecrübelerle dayanarak bu araştırma konusunda çalışacak araştırmacılara aşağıda belirtilen konu başlıklarının yol göstereceği düşünülmektedir.

- ❖ Farklı boyut veya şekle sahip mandreller kullanılarak aynı zeminde mandrel boyutunun veya şeklinin, sıvanma bölgesinin genişliğine ve bu bölgedeki zeminin hidrolik iletkenliğine etkisi belirlenebilir. Bu tür bir çalışmada kullanılacak mandrel boyutuna bağlı olarak örselenme bölgesi model deney sisteminin boyutlarının büyütülmesi gerektiği gözden kaçırılmamalıdır.
- ❖ Bu tez kapsamında yapılmış olan sıvanma bölgesi oluşumu model deneylerinde sabit bir konsolidasyon gerilmesi altında zemin konsolide edildikten sonra prefabrik düşey dren zemine, arazi koşullarında PDD'nin zemine yerleştirilmesinde kullanılan yöntemde olduğu gibi, bir mandrel kullanılarak yerleştirilmiştir. Bu deneylerde sabit konsolidasyon gerilmesi ve sabit uzunluktaki bir mandrel kullanılması nedeniyle arazi koşullarındaki örselenme bölgesi oluşumunu ve örselenme bölgesinin özelliklerinin derinlikle değişiminin tam olarak belirlenmesini kısıtladığı düşünülmektedir.

Örselenme bölgesi oluşumunda iki farklı etkenin (sıkışma ve sıvanma) önemli olabileceği düşünülmektedir. Farklı derinliklerde zemine etkiyen düşey efektif gerilmenin farklı olması nedeniyle zemin farklı konsolidasyon gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu sebeple farklı konsolidasyon gerilmelerinde konsolide olmuş zemine PDD'nin mandrelle yerleştirilmesi sırasında mandrel'in zeminde oluşturacağı sıkışma etkisinin farklı olabileceği düşünülmektedir.

Sıvanma etkisi oluşumunda etkili olduğu düşünülen ikinci faktör ise mandrel'in zemine yerleştirilmesi sırasında mandrelle zemin arasında oluşacak sürtünme veya sıvanma etkisidir ve farklı zemin derinliklerinde oluşacak sıvanma etkisi de farklı olacaktır.

Örselenme bölgesi oluşumu etkileyen faktörlerden sıkışma etkisinin düşey efektif gerilmeye bağlı olarak derinlikle artacağı düşünülürken, diğer etkili faktör olduğu düşünülen sıvanma etkisinin zemin üst yüzeyinde maksimuma ulaşacağı, zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı maksimum derinlikte ise sıvanma etkisi oluşmayacağı düşünülmektedir.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı arazi koşullarında farklı derinliklerde örselenme bölgesi oluşumunun farklı olduğu düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili literatürde örselenme bölgesinin derinlikle değişimini inceleyen laboratuvar araştırmaları bulunmamaktadır.

Örselenme bölgesinin derinlikle değişimini belirlemek için yapılması düşünülebilecek laboratuvar deneylerinde örneğin arazide 10 m derinlikte bir zemin bölgesinin iyileştirileceği gözönüne alınır, belirlenecek üç farklı derinlikte zemine etkiyen düşey efektif gerilme hesap edilerek üç farklı deneyde farklı konsolidasyon gerilmeleri uygulanabilir. Ayrıca örselenme bölgesi oluşumunu etkileyen farklı sıvanma etkisini de bu deneylerde oluşturmak için her aşamada belirlenen derinlikle PDD'li zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı maksimum derinlik arasındaki fark kadar uzunlukta bir mandrel kullanılması gerekmektedir.

Sabit konsolidasyon gerilmesinde konsolide edilen zeminde farklı mandrel boylarının uygulanmasıyla zemindeki sıvanma etkisinin, farklı konsolidasyon gerilmelerinde konsolide edilen zeminde sabit mandrel boyunun uygulanmasıyla da zeminde oluşacak sıkışma etkisinin belirlenebileceği düşünülmektedir.

Yukarıda bahsedilen deneysel araştırmanın yapılması durumunda örselenme bölgesi

etkisinin derinlikle değişimi ve örselenme bölgesini oluşturan sıkışma ve sıvanma etkilerinden hangisinin örselenme bölgesi oluşumunda daha etkili olduğu belirlenebilir.

8.2 PDD'nin Deformasyonunun Boşaltma Kapasitesine Etkisi

PDD kullanılarak önyüklemeye ile zemin iyileştirme yönteminde proje süresi boyunca PDD'lerin performansını sürdürebilmesi, uygulanan zemin iyileştirme yönteminin hedeflenen sonuçlara ulaşması için çok önemlidir. PDD'lerin performansını etkileyen önemli faktörlerden bir diğeri de PDD'nin boşaltma kapasitesidir. Bu nedenle dört farklı özellikteki PDD türü için, uygulanan hidrolik eğim, PDD'ye etkiyen yanal gerilme, PDD'nin uygulandığı zemin türü, PDD'nin yapısı ve bükülmeye karşı direnci gibi faktörler dikkate alınarak PDD'nin deformasyonu ve çekirdek bölgesinin kirlenmesinin PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerine etkileri büyük boyutlu boşaltma kapasitesi model deney sistemi kullanılarak araştırılmıştır.

- Sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı zemin türlerinde kullanılan ve farklı deformasyonlara maruz kalmış PDD türlerinin boşaltma kapasitesinin, genel olarak hidrolik eğiminin artmasıyla azaldığı gözlenmektedir.

Genel olarak başlangıçta düşük deformasyon seviyelerinde yüksek boşaltma kapasitesine sahip PDD'lerin boşaltma kapasitesi bu çalışmada uygulanan en düşük ve en yüksek hidrolik eğim seviyeleri aralığında (0.10-1.00) hidrolik eğimin artmasıyla önemli bir miktarda (%57'ye kadar) azalırken, yüksek deformasyon seviyelerinde oldukça düşük boşaltma kapasitesine sahip olan PDD'lerde boşaltma kapasitesi üzerinde hidrolik eğimin etkisi ihmal edilebilir mertebelere düşmektedir.

- Aynı zemin türünde kullanılan dört farklı PDD türünden Mebra Dren 7407'nin boşaltma kapasitesinin tüm deformasyon seviyelerinde diğer dren çeşitlerine göre önemli bir miktarda yüksek olduğu, Mebra Dren 7407'nin boşaltma kapasitesinin %41.5 oranında deformasyona uğraması durumunda %69 oranında azalmasına rağmen 28×10^{-6} (m^3/s) olduğu belirlenmiştir. Alidrain için sonuçlar incelendiğinde ise, başlangıçta hiçbir deformasyona uğramadan önce dahi boşaltma kapasitesinin diğer drenler göre önemli oranda düşük olduğu görülmektedir. Yine bu drenin %15 oranında deformasyona maruz kalması durumunda %75 oranında, %33 oranında deformasyona maruz kalması durumunda ise yaklaşık olarak %100 oranında boşaltma kapasitesini yitirdiği belirlenmiştir. Colbond CX 1000 türü PDD'nin başlangıç boşaltma kapasitesinin bir miktar düşük olmasına rağmen bu drenin diğerlerinden farklı olarak

dren çekirdek bölgesini oluşturan lifli yapı sayesinde konsolidasyon aşamasında meydana gelen deformasyonlara daha iyi uyum sağladığı ve bu nedenle oldukça büyük deformasyonlara kadar boşaltma kapasitesindeki azalma miktarının daha az olduğu, buna karşın yaklaşık % 33 den büyük deformasyon seviyelerinde boşaltma kapasitesinin hızlı bir şekilde düştüğü belirlenmiştir. Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407 için sonuçlar değerlendirildiğinde ise, başlangıç boşaltma kapasitesinin Mebra Dren 7407'le yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen konsolidasyon aşamasının başlangıcında boşaltma kapasitesinin önemli bir miktarda azaldığı görülmektedir. Bu boşaltma kapasitesindeki azalmanın deformasyondan bağımsız dren çekirdek bölgesinin ani şekilde kirlenmesi etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle Amerdrain 407'de dren çekirdek bölgesinin etrafını saran geotekstil malzemenin kaolin kili gibi ince daneli ve yüksek oranda su muhtevasına sahip zeminlerde kullanılması durumunda kirlenme veya tıkanma etkisine karşı yeterli olmadığı düşünülmektedir.

Arazi uygulamaları bakımından bu çalışmada kullanılan PDD türlerinin deformasyona karşı boşaltma kapasitesindeki değişim değerlendirilirken, ön yükleme tekniğiyle zemin iyileştirme projelerinde genellikle kullanılacak PDD'nin boşaltma kapasitesinin proje süresi boyunca $15 \times 10^{-6} (m^3/s)$ 'den büyük olmasının istenildiği gözönüne alınmalıdır. Bu deneysel çalışmada PDD'lerde meydana gelen deformasyonlar ve kirlenme veya tıkanma etkisi sonucu PDD'lerin boşaltma kapasitesinin değişimi belirlenmiştir. Bu tip projelerde Alidrain kullanılması durumunda PDD'de %14, Colbond CX 1000 ve American Drain 407 kullanıldığında ise PDD'de %40 oranında eksenel şekil değiştirme meydana geldiğinde, drenin boşaltma kapasitesi yetersiz seviyeye düşmektedir. Mebra Dren 7407 kullanılarak yapılan model deneyde ise %41.5 oranında eksenel şekil değiştirme meydana geldiği, %69 oranında azalmasına rağmen boşaltma kapasitesinin $28 \times 10^{-6} (m^3/s)$ olduğu ve bu boşaltma kapasitesinin yeterli olduğu belirlenmiştir.

- Deformasyondan ve yanal gerilme etkisinden bağımsız sadece drendeki kirlenme veya tıkanma etkisiyle, PDD'nin boşaltma kapasitesinin hidrolik eğime bağlı olarak %10-16 oranında azalabileceği belirlenmiştir. Buna rağmen dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi veya tıkanmasıyla boşaltma kapasitesindeki azalma oranının, arazide uygulama yapılan zeminin içerdiği ince dane oranı ve PDD'nin yerleştirildiği zeminin su muhtevasından etkilenebileceği bilinmektedir. Arazi uygulamaları tasarımında

PDD'nin uzun süreler boyunca işlevini yitirmemesi düşünüldüğünden, zaman etkisine bağlı olarak değişimler meydana gelebileceğinin gözönünde bulundurulması gerekmektedir.

- Örselenme bölgesi model deneyinde 25 kPa'lık yanal gerilme altında dren boşaltma kapasitesi belirlendikten sonra yanal gerilme 200 kPa'a kadar arttırılarak yanal gerilme artışı etkisiyle dren boşaltma kapasitesindeki değişim, eksenel deformasyondan ve dren çekirdek bölgesinin kirlenmesi etkisinden bağımsız olarak belirlendiğinde, hemen hemen tüm hidrolik eğim seviyelerinde boşaltma kapasitesinde %40 oranında azalma olduğu gözlenmiştir. Bu orandan da anlaşılacağı üzere yanal gerilmelerin dren boşaltma kapasitesini önemli bir miktarda etkilediği anlaşılmaktadır.
- Amerdrain 407 için farklı zemin türlerinde (Craney Adası çökelleri ve kaolin) PDD'nin boşaltma kapasitesi belirlenerek zemin türünün boşaltma kapasitesine olan etkisi araştırılmıştır. Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'de 12.5 kPa'lık konsolidasyon gerilmesi altında meydana gelen eksenel şekil değiştirme, CAÇ'da kullanılan Amerdrain 407'de 25 kPa'lık konsolidasyon gerilmesi altında meydana gelen eksenel şekil değiştirmeden bir miktar küçük olması yanında PDD'ye etki eden yanal gerilmenin de küçük olmasına rağmen boşaltma kapasitesinde önemli bir miktarda azalma meydana geldiği görülmektedir. Boşaltma kapasitesindeki bu azalmanın deformasyon etkisinden çok dren çekirdek bölgesinin ani şekilde kirlenmesi veya tıkanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuç ince daneli ve yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde, dren filtre malzemesinin gözenek açıklığının zemindeki ince dane boyutuna göre yeterli olmaması durumunda PDD'nin çekirdek bölgesinde oluşan kirlenme veya tıkanma etkisinin PDD'nin deformasyonundan daha çok boşaltma kapasitesinin değişimi üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir.

Diğer taraftan her iki zemin türü için konsolidasyon gerilmesinin 200 kPa olması durumunda kaolin kilinde %39.4 Craney Adası çökellerinde %32.5 oranında eksenel şekil değiştirme meydana gelmesine rağmen, kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'nin boşaltma kapasitesinin bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaolin kilinde kullanılan Amerdrain 407'nin düşük deformasyon seviyelerinde kirlenme veya tıkanma etkisiyle boşaltma kapasitesinde %50 oranında azalma meydana gelmesine karşın daha yüksek deformasyon seviyelerinde boşaltma kapasitesinin Craney Adası çökellerinde kullanılan drene göre daha yüksek olması, zemin türünün PDD'de meydana gelen deformasyon biçimini etkilemesiyle açıklanabileceği düşünülmektedir.

- PDD'lerin bükülmeye karşı direnç değerinin artması, zeminde meydana gelen yüksek deformasyonların etkisini azaltarak deformasyonlara bağlı olarak boşaltma kapasitesindeki azalma miktarını düşürmektedir.
- Farklı PDD türleri için boşaltma kapasitelerinin belirlendiği deneylerde, zeminde %32-42 arasında meydana gelen eksenel şekil değiştirmelerin sonucunda bütün PDD'lerde yüksek derecede deformasyon gözlemlense de, bu deformasyonların biçimi PDD'ler arasında değişiklik göstermektedir. PDD'lerde meydana gelen deformasyon biçimlerinin PDD'nin kullanıldığı zemin türüyle ilişkili olduğu, zeminin PDD'nin yanal deformasyonuna karşı gösterdiği direncin yüksek olmasının PDD'de keskin kıvrımlar şeklinde bir çok katlanma tipi deformasyon oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca keskin kıvrımlar şeklinde deformasyon biçiminin, geniş kıvrımlar şeklinde deformasyon meydana gelmesine göre PDD'nin boşaltma kapasitesi üzerinde daha fazla azaltıcı etki yaptığı deney sonuçlarından anlaşılmaktadır.

8.3 Arazi Model Deneyi Sonuçları

Craney Adası çökellerinde Mebra Dren 7407 ve Amerdrain 407 kullanılarak iki farklı arazi model deneyi yapılmıştır. Bu model deneylerde aynı zemin için farklı PDD türleri kullanılarak önyüklemeye ile zemin iyileştirme yöntemi uygulanması durumunda zeminin konsolidasyon davranışı üzerindeki etkilerin araştırılması amaçlanmıştır.

Mebra Dren 7407'nin boşaltma kapasitesinin tüm deformasyon seviyelerinde belirgin bir şekilde Amerdrain 407'ye göre yüksek olmasına rağmen, zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bu nedenle her iki PDD türünün yüksek deformasyona (%40) uğramalarına rağmen işlevlerini sürdürdüğü, zeminin konsolidasyonu için gerekli boşaltma kapasitesini sağladığı belirlenmiştir.

Ayrıca kullanılan model deney hücresi çapının, boşaltma kapasitesi yüksek bu iki PDD ile zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde etkileri belirlemek için yeterli olmadığı düşünülmektedir.

8.4 Analitik Çözüm ve Sonlu Eleman Analizleri Sonuçları

Sıvanma etkisinin oluşmadığı, sıvanma etkisinin olduğu durumlarda geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının farklı değerleri ($k_d/k_s = 1.30, 1.47, 2.00$) için ve sıvanma etkisinin farklı konsolidasyon

gerilmeleri altında değişken olduğu durumlar için analitik çözümler yapılmıştır.

Elde edilen analitik çözüm sonuçlarına göre, sıvanma etkisinin olmadığı durumda tüm konsolidasyon aşamalarının sonunda zeminde meydana gelen deplasmanın 28.63 cm olduğu ve bu deplasman değerinin sıvanma etkisinin olduğu farklı durumlarda zeminde meydana gelecek deplasman değerinden daha büyük olduğu, dolayısı ile örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_d/k_s), yani sıvanma etkisinin büyüklüğünün artmasının zeminin konsolidasyon davranışını önemli bir miktarda etkilediği belirlenmiştir.

Analitik çözümlerde geçiş bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğinin sıvanma bölgesindeki zeminin hidrolik iletkenliğine oranının 1.25 alındığı durumda arazi benzeşimli model deneyinde zeminde meydana gelen deplasman zaman ilişkisine en yakın sonucun elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç örselenmemiş zeminin hidrolik iletkenliğinin örselenmiş zeminin hidrolik iletkenliğine oranı (k_d/k_s) olan sıvanma etkisinin bu orandan daha büyük olduğu anlamına gelmektedir.

Farklı gerilmeler altında konsolidasyon aşamaları boyunca sıvanma etkisinin sabit kabul edildiği analizler yerine konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla sıvanma etkisinin azaltılarak analitik çözümlerde kullanılmasının daha yaklaşık sonuçlar elde edilmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Fiziksel model deney davranışının sayısal analizi amacı ile arazi model deneyleri PLAXIS V9.2 sonlu elemanlar yazılımından yararlanılarak modellenmiştir.

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla model deneyde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında;

- 25-40 kPa'lık ilk iki konsolidasyon aşaması için Plaxis sonlu elemanlar analiz sonuçları, arazi model deney sonuçlarıyla birebir örtüşmektedir. Bu sonuç bu iki konsolidasyon aşamasında kullanılan, ödometre ve üç eksenli basınç (CU) deneyleri ve arazi model deneylerinden elde edilen, örselenmemiş zemin parametrelerinin gerçekçi olduğunu göstermektedir.
- Plaxis sonlu elemanlar analiz programında PDD malzemesinin modellenmesindeki güçlülere rağmen, bu çalışmada olduğu gibi PDD boyutlarına göre hesaplanan eşdeğer PDD çapında kum dren kullanılmasıyla başarılı analiz sonuçlarına ulaşılabileceği gözlenmiştir.

- Örselenme bölgesi model deneyi ve analitik çözüm sonuçlarında görülen, örselenme etkisinin uygulanan konsolidasyon gerilmesinin artmasıyla azalması sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla da doğrulanmıştır.
- Tüm konsolidasyon aşamalarında sonlu elemanlar analizi ile belirlenen boşluk suyu basınçları ve deformasyonların zamanla değişiminin model deney sonuçlarıyla uyumlu olması, zeminin hidrolik iletkenliğinin boşluk oranıyla değişimi olan permeabilite değişim indeksinin (C_k) sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmasıyla, örselenme etkisinin dolaylı olarak gözönüne alınabileceği düşünülmektedir.
- Bu çalışmada olduğu gibi, PDD'ler kullanılarak önyükleme ile zemin iyileştirme yönteminin uygulanacağı projelerde büyük boyutlu model deney yapılması ve tasarımda bu model deneyden belirlenen zemin parametrelerinin kullanılmasının, zemin iyileştirme projesinin hedeflerine ulaşması bakımından yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aboshi, H., Sutoh, Y., Inoue, T. ve Shimizu, Y., (2001), "Kinking Deformation of PVD Under Consolidation Settlement of Surrounding Clay", *Soil and Foundation*, 41(5): 25-32.
- Ali, F.H., (1991), "The Flow Behavior of Deformed Prefabricated Vertical Drains", *Geotextiles and Geomembrane*, Vol.10, pp.235-248.
- ASTM D 5084-03, (2003), *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Material Using a Flexible Wall Permeameter*".
- ASTM D 5856-95, (2007), "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter".
- Atkinson, M.S. ve Eldred, P.J.L., (1981), "Consolidation of Soil Using Vertical Drains", *Geotechnique*, 31(1): 33-43.
- Barron, R.A., (1948), "Consolidation of Fine-Drained Soils by Drain Wells", *Transactions, ASCE*, 113: 718-754.
- Basu, D., Basu, P., ve Prezzi, M., (2006), "Analytical Solutions for Consolidation Aided by Vertical Drains", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1(1): 63-71.
- Basu, D. ve Prezzi, M., (2007), "Effect of The Smear And Transition Zones Around Prefabricated Vertical Drains Installed in a Triangular Pattern on The Rate of Soil Consolidation", *International Journal of Geomechanics*, 7(1): 34-43.
- Bergado, D.T., Asakami, H., Alfaro, M.C. ve Balasubramaniam, A.S., (1991), "Smear Effects on Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", *Journal Geotechnical Engineering-ASCE*, 117: 1509-1530.
- Bergado, D.T., Alfaro, M.C. ve Balasubramaniam, A.S., (1993a), "Improvement of Soft Bangkok Clay Using Vertical Drains", *Geotextiles and Geomembranes*, 12: 615-663.
- Bergado, D.T., Mukherjee, K., Alfaro, M.C. ve Balasubramaniam, A.S., (1993b), "Prediction of Vertical Band Drain Performance by The Finite Element Method", *Geotextiles and Geomembranes*, 12: 567-586.
- Bergado, D.T., Manivannan, R. ve Balasubramaniam, A.S., (1996), "Proposed Criteria for Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drains", *Geotextile and Geomembranes*, 14: 481-505.
- Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Fannin, R.J. ve Holtz, R.D., (2002), "Prefabricated Vertical Drains (PVD) in Soft Bangkok Clay: A Case Study of the New Bangkok International Airport Project", *Canadian Geotechnical*, 39: 305-315.
- Berilgen, M., Özyaydın, K. ve Yıldırım, S., (2004), "Temel Zemini Prefabrik Düşey Drenli Bir Deneme Dolgusu Altında Gözlenen Oturmalar", *G2 2. Ulusal Geosentetik Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul*, 155-163.
- Bo, M.W., Arulrajah, A. ve Choa, V., (1997), "Large Deformation of Slurry-Like Soil", *The International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, Nagoya, Japan*, 437-442.
- Bo, M.W., Chu, J., Low, B.K. ve Choa., V. (1997), "Soil İmprovement Prefabricated Vertical Drain Techniques", *Singapore: Stallion Press*.

- Bo, M.W., Arulrajah, A., Choa, V., ve Na, Y.M., (1999), "One-Dimensional Compression of Slurry with Radial Drainage", *Soil and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 39(4): 9-17.
- Bo, M.W., Choa, V., Wong, K.S. ve Teh, C.I., (2002a), "Investigation on Deformation Behavior of High Moisture Content Soil", *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 42(2): 35-46.
- Bo, M.W., Choa, V. ve Wong, K.S., (2002b), "Compression Test on Slurry with Small Scale Consolidometer", *Canadian Geotechnical Journal*, April, 39: 388-398.
- Bo, M.W., Chu, J. ve Choa, V., (2003), "Soil Improvement: Prefabricated Vertical Drain Techniques", Thompson, Singapore, 341.
- Bo, M.W., Sin, W.K., Choa, V. ve Ing, T.C., (2003), "Compression Tests of Ultra-Soft Soil Using an Hydraulic Consolidation Cell", *Geotechnical Testing Journal*, 26(3).
- Bo, M.W., (2004), "Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drain and Their Field Measurements", *Geotextiles and Geomembranes*, 22: 37-48.
- Borges, J.L., (2004), "Three-Dimensional Analysis of Embankments on Soft Soils Incorporating Vertical Drains by Finite Element Method", *Computers and Geotechnics*, 31: 665-676.
- Brinkgereve, R.B.J. (1994), "Geomaterial Models and Numerical Analysis of Softening", Delft University, Doktora, Hollanda.
- Burland, J.B., (1990), "On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays", *Geotechnique*, 40(3): 329-378.
- Casagrande, L. ve Poulos, S., (1969), "On the Effectiveness of Sand Drain", *Canadian Geotechnical Journal*, 6: 287-326.
- Chai, J.C. ve Miura, N. (1999), "Investigation of Factors Affecting Vertical Drain Behavior", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 125(3): 216-226.
- Chai, J.C., Miura, N. ve Nomura, T., (2004), "Effect of Hydraulic Radius on Long-Term Drainage Capacity of Geosynthetic Drains", *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1-2): 3-16.
- Chang, D.T.T., Liao, J.C. ve Lai, S.P., (1994), "Laboratory Study of Vertical Drains for a Ground Improvement Project in Teipei", *Proceeding of the 5th International Conference on Geotextiles-Geomembranes and Related Products*, Singapore.
- Chu, J., Bo, M.W. ve Choa, V., (2004), "Practical Considerations for Using Vertical Drains in Soil Improvement Projects", *Geotextiles and Geomembranes*, 22: 101-117.
- Chu, J., Bo, M.W. ve Choa, V., (2006), "Improvement of Ultra-Soft Soil Using Prefabricated Vertical Drains", *Geotextiles and Geomembranes*, 24: 339-348.
- Cline, M.J. ve Burns, S.E. (2003), "Evaluation of Wick Drain Performance in Virginia Soils", *Virginia D.O.T., F.H.W.A., USA.*, pp.45.
- Davies, J.A. ve Humpheson, C., (1981), "A Comparison Between the Performance of Two Types of Vertical Drain Beneath a Trial Embankment in Belfast", *Geotechnique*, 31(1): 19-31.
- Eriksson, U., Hansbo, S. ve Torstensson, B.A., (2000), "Soil Improvement at Stockholm-

Arlanda Airport, Ground Improvement, 4: 73-80.

Fellenius, B.H. ve Castonguay, N.G., (1985), "The Efficiency of Band Shaped Drains – A Full Scale Laboratory Study", Report to the National Research Council of Canada and the Industrial Research Assistance Programme, pp.54.

Gabr, M.A., Quaranta, J.D. ve Cook, E.E., (1997), "Vertical Drains in Geotechnical Engineering: State of the Art Review", Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Chung, J.S. et al., Editors, International Society of Offshore and Polar Engineering, Honolulu, Hawaii, 1: 714-719.

Hansbo, S., (1979), "Consolidation by Band Shaped Prefabricated Drains", Ground Engineering, 12(5): 16-25.

Hansbo, S., (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 677-682.

Hansbo, S., (1983), "How to evaluate the properties of prefabricated drains", Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Improvement of Ground. Vol.2, Soil Reinforcement, Speeding Up of Consolidation, Improvement of Special Soils, Soil Improvement Under Water and Soil Stabilization., 6(13): 621-626.

Hansbo, S., (1986), "Preconsolidation of Soft Compressible Subsoil by The Use of Prefabricated Vertical Drains", Annales des Travaux Publics de Belgique, 6: 553-563.

Hansbo, S. (1987), "Design Aspects of Vertical Drains and Lime Column Installations", Proc., 9th Southeast Asian Geotech. Conf., Bangkok, Thailand, 1-12.

Hansbo, S., (1997), "Practical Aspects of Vertical Drain Design", In Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, 3: 1749-1752.

Hansbo, S., (2004), "Band Drains", Ground Improvement, Moseley M.P. and Kirsch, K. Spon Press, London & New York.

Hawlder, B.C., Imai, G. ve Muhunthan, B., (2002), "Numerical Study of The Factors Affecting The Consolidation of Clay with Vertical Drains", Geotextiles and Geomembranes, 20: 213-239.

Hird, C.C., Pyrah, I.C. ve Russell, D., (1992), "Finite Element Modelling of Vertical Drains Beneath Embankments on Soft Ground", Geotechnique, 42(3): 499-511.

Hird, C.C. ve Moseley, V.J., (2000) "Model Study of Seepage in Smear Zones Around Vertical Drains in Layered Soil", Geotechnique, 50: 89-97.

Hird, C.C. ve Sangtian, N., (2002) "Model Study of Seepage in Smear Zones Around Vertical Drains in Layered Soil: Further Results", Geotechnique, 52(5): 375-378.

Holtz, R. D., (1989), "Behavior of Bent Prefabricated Vertical Drains", Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3: 1657-1660.

Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B., Lancellotta, R. ve Pedroni, R., (1991), "Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance", Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.

Indraratna, B., Balasubramaniam, A.S. ve Ratnayake, P., (1994), "Performance of

Embankment Stabilized with Vertical Drains on Soft Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2): 257-273.

Indraratna, B. ve Redana I.W., (1997), “Plane-Strain Modeling of Smear Effects Associated with Vertical Drains”, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 123(5): 474-478.

Indraratna, B. ve Redana, I. W., (1998), “Laboratory Determination of Smear Zone Due to Vertical Drain Installation”, *ASCE, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2): 180-184.

Indraratna, B. ve Redana, I. W., (2000), “Numerical Modeling of Vertical Drains With Smear Zone and Well Resistance Installed in Soft Clay”, *Canadian Geotechnical J.*, 37(1): 133-145.

Jansen, H.L. ve Den Hoedt, G., (1983), “Vertical Drains: In situ and Laboratory Performance and Design Considerations”, *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, 2: 647-651.

Kim, H., Hirokane, S., Yoshikuni, H., Mosiwaki, T. ve Kusakabe, O., (1995), “Consolidation Behavior of Dredged Clay Ground Improved by Horizontal Drain Method”, *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Yoshikuni and Kusakabe, Balkema, Rotterdam, 99-104.

Kim, S.S., Shin, H.Y., Han, S.J. ve Kim, B.I., (2003), “The Estimation of Discharge Capacity for Vertical Drain Materials Using Composite Discharge Capacity Apparatus”, *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, 568-572.

Kremer, R., De Jager, W., Maagdenberg, A., Meyvogel, I. ve Oostveen, J., (1982), “Quality Standards for Vertical Drains”, *Proceedings 2nd International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, 2: 319-324.

Kremer, R. (1983), “Discussion to Specialty Session 6”, *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, 3: 1235-1237.

Lawrence, C.A. ve Koerner, R.M., (1988), “Flow Behavior of Kinked Strip Drains”, *Proceedings of The Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, ASCE Geotechnical Special Publication, 18: 22-35.

Long, R. ve Covo, A., (1994), “Equivalent Diameter of Vertical Drains with an Oblong Cross Section”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9): 1625-1630.

Madhav, M.R., Park, Y.M. ve Miura, N., (1993), “Modeling and Study of Smear Zones Around Band Shape Drains”, *Soil Foundation*, 33(4): 135-147.

Mesri, G., Lo, D.O.K. ve Feng, T.W., (1994), “Settlement of Embankments on Soft Clays”, *Geotech. Spec. Publ.*, (40): 8-56.

Miura, N., Chai, J.C. ve Toyota, K. (1998), “Investigation on Some Factors Affecting Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drain”, *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, IFAI, Atlanta, Georgia, 2: 845-850.

Miura, N. ve Chai, J.C., (2000), “Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drains Confined in Clay”, *Geosynthetics International*, 7(2): 119-135.

Monte, L. J. ve Krizek, R.J., (1976), “One-Dimensional Mathematical Model for Large Strain Consolidation”, *Geotechnique*, 16(2): 162.

- Morohoshi, K., Yoshinaga, K., Miyata, M., Sasaki, I., Saito, H. ve Tokoro, M., (2007), "Design and Long-Term Monitoring of Tokyo International Airport Extension Project Constructed on Super-Soft Ground", A Manuscript for Geotechnical and Geological Engineering, pp. 13.
- Olson, R.E., (1977), "Consolidation under Time-Dependent Loading", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT1): 55-60.
- Onoue, A., Ting, N.H., Germaine, J. T. ve Whitman, R. V., (1991), "Permeability of Disturbed Zone Around Vertical Drains", Geotechnical Special Publication, ASCE, (27): 879-890.
- Palmeira, E.M. ve Gardoni, M.G., (2002), "Drainage and Filtration Properties of Non-Woven Geotextiles Under Confinement Using Different Experimental Techniques", Geotextiles and Geomembranes, 20: 97-115.
- Rixner, J.J., Kraemer, S.R. ve Smith, A.D., (1986), "Prefabricated Vertical Drains, Technical Report", Vol. I: Engineering Guidelines, Federal Highway Administration Report FHWA/RD-86/168.
- Rixner, J.J., Kraemer, S.R. ve Smith, A.D., (1986), "Prefabricated Vertical Drains, Technical Report", Vol. II: Summary Research Efforts, Federal Highway Administration Report FHWA/RD-86/169, Washington, DC, USA, pp.171.
- Sasaki, S., (1981), "Report of Experimental Test for the Prefabricated Drain Geodrain", Tokyo Construction Co., Tokyo.
- Sathanathan, I. ve Indraratna, B., (2006), "Laboratory Evaluation of Smear Zone and Correlation Between Permeability and Moisture Content", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(7): 942-945.
- Sathanathan, I., Indraratna, B. ve Rujikiatkamjorn, C., (2008), "Evaluation of Smear Zone Extent Surrounding Mandrel Driven Vertical Drain Using The Cavity Expansion Theory", Geomechanics, ASCE, 8(6): 255-365.
- Saye, S.R., (2003), "Assessment of Soil Disturbance by the Installation of Displacement Sand Drains and Prefabricated Vertical Drains", Soil Behavior and Soft Ground Construction, (119): 325-362.
- Sharma, J.S. ve Xiao, D., (2000), "Characterization of a Smear Zone Around Vertical Drains by Large-Scale Laboratory Tests", Canadian Geotechnical Journal, 37: 1265-1271.
- Sharma, J.S. ve Bolton, M.D., (2001), "Centrifugal and Numerical Modelling of Reinforced Embankments on Soft Clay Installed with Wick Drains", Geotextiles and Geomembranes, 19: 23-44.
- Shin, D.H., Lee, C., Lee, J.S. ve Lee, W., (2009), "Detection of Smear Zone Using Micro-Cone and Electrical Resistance Probe", Canadian Geotechnical, 46(6): 719-726.
- Taylor, D.W., (1948), "Fundamentals of Soil Mechanics", Wiley, New York.
- Tran-Nguyen, H.H. (2010), "Effect of Deformation of Prefabricated Vertical Drain on Discharge Capacity and The Characteristics of PVD Smear Zone", University of Wisconsin-Madison P.H.D. Thesis.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	10.01.1978	
Doğum yeri	Bakırköy/İstanbul	
Lise	1992-1995	Ataköy Lisesi
Lisans	1995-2000	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2003	Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Geoteknik Anabilim Dalı
Doktora	2004-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Geoteknik Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurumlar

2000 - 2005	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ABD. Araştırma Görevlisi
2005 -	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Geoteknik ABD. Araştırma Görevlisi
2008 - 2010	Wisconsin Üniversitesi-Madison/ABD Ziyaretçi Araştırmacı