Zeminlerin Permeabilite Özelliklerinin Konsolidasyon ve Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleriyle Belirlenmesi

Çağrı Önder Özdemir

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2018

Determination of Permeability Properties of Soils using Consolidation and Falling Head Permeability Tests

Çağrı Önder Özdemir

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

July 2018

Zeminlerin Permeabilite Özelliklerinin Konsolidasyon ve Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleriyle Belirlenmesi

Çağrı Önder Özdemir

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan

"Bu Tez ESOGÜ-BAP tarafından "20171642" no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir"

Temmuz 2018

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Çağrı Önder Özdemir'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Zeminlerin Permeabilite Özelliklerinin Konsolidasyon ve Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleriyle Belirlenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan

İkinci Danışman **: -**

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Kamil Bekir Afacan

Üye : Doç.Dr.D.Volkan Okur

Üye : Doç.Dr.Murat Türköz

Üye : Doç.Dr.Hasan Savaş

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Evren Seyrek

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan danışmanlığında hazırlamış olduğum "Zeminlerin Permeabilite Özelliklerinin Konsolidasyon ve Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleriyle Belirlenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 11/07/2018

Çağrı Önder Özdemir

İmza

ÖZET

Hidrolik iletkenlik veya farklı bir ifadesiyle permeabilite katsayısı ince daneli zeminler olmak üzere çoğu zeminlerin mühendislik davranışını etkileyen suyun etkilerinin görülmesi açısından önemli bir büyüklüktür. Bu sebeple suyun hareketinin zemin ve kaya özelliklerinin mühendislik davranışları üzerindeki etkileri sebebiyle bilinmesi önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında farklı yerlerden alınmış 10 adet ince daneli numunenin permeabilite katsayıları, zemin özellikleri belirlendikten sonra düşen seviyeli permeabilite deneyleri ve konsolidasyon deneyleriyle araştırılmıştır. Elde edilen değerler birbirleriyle karşılaştırılıp aralarında bir ilişki araştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda en uygun ilişki düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ile 1600 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayıları arasında olduğu görülmüştür. Daha sonra düşen seviyeli permeabilite ve konsolidasyon deneyleriyle elde edilen permeabilite katsayıları numunelerin plasitisite indisleri (PI) ile de karşılaştırılmış fakat iyi bir ilişki saptanamamıştır. Son olarak düşen seviyeli permeabilite deneyinden elde edilen permeabilite katsayıları D_{50} dane çapları ve D_e efektif dane çaplarıyla da karşılaştırılmış fakat bir ilişki kurulması için data sayılarının yeterli olmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Permeabilite, Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi, Konsolidasyon, Plastisite İndisi

SUMMARY

The hydraulic conductivity or permeability coefficient is an important parameter in terms of the water influences affecting the engineering behavior of most soils, including fine-grained soils. For this reason, it is important to know the water movement due to the effects on engineering behaviors of ground and rock characteristics. In this study, the permeability coefficients of 10 fine-grained soil samples taken from different places were investigated using the falling head permeability tests and consolidation tests after the soil properties were determined. The obtained values were compared with each other and a relationship between them, if possible, was searched. As a result of the comparison, the most suitable relation was found between the permeability coefficients obtained from the falling head permeability test and the permeability coefficients obtained from the consolidation load of 1600 kPa. Later, permeability coefficients obtained from falling head permeability tests and consolidation tests were also compared with plasticity index (PI) of samples but no good correlation was found. Finally, the permeability coefficients obtained from the falling level permeability test were also compared with the D_{50} diameters and the D_e effective diameters, but data numbers were not found sufficient for establishing a relationship.

Keywords: Permeability, Falling Head Permeability Test, Consolidation, Plasticity Index

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimi ve tez çalışması boyunca bana her türlü desteği sağlayan, danışmanlık eden değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN'a; kıymetli zamanlarını, bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan değerli hocalarım Doç. Dr. Hasan SAVAŞ, Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Doç. Dr. Derviş Volkan OKUR'a sonsuz saygımı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi tüm destekleri sağlayan, her an yanımda olduklarını hissettiren babam Nurullah ÖZDEMİR, annem Ayşegül ÖZDEMİR ve arkadaşım Tuğçe AR'a saygı ve sevgilerimle…

Bu tez ESOGÜ-BAP tarafından "20171642" no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ……...vi
SUMMARY ……vii
TEŞEKKÜR ……..viii
İÇİNDEKİLER ……...ix
ŞEKİLLER DİZİNİ ……xi
ÇİZELGELER DİZİNİ ……xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ……...xiii
1.GİRİŞ VE AMAÇ ……1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ……..5
3. PERMEABİLİTE KATSAYISININ BULUNMASI ……..…….8
3.1. Darcy Yasası 8
3.2. Laboratuvar ve Arazi Deneyleriyle Permeabilite Katsayısının Bulunması 9
3.3. Konsolidasyon Deneylerinden Permeabilite Katsayısının Bulunması 12
3.4. Ampirik Bağıntılar ile Permeabilite Katsayısının Bulunması 16
4. MATERYAL VE YÖNTEM ……21
4.1. Elek Analizi 21
4.2. Kıvam Limitleri 25
4.2.1. Likit limit 25
4.2.2. Plastik limit 25
4.3. Özgül Gravite..... 27
4.4. Kompaksiyon 28
4.5. Permeabilite 32
4.6. Konsolidasyon 35
5.BULGULAR VE TARTIŞMA ……...41
5.1. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının Konsolidasyon Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarıyla Karşılaştırılması 41
5.1.1. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 100 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{100}) karşılaştırılması 42

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.1.2. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 200 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{200}) karşılaştırılması 44
5.1.3. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 400 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{400}) karşılaştırılması 45
5.1.4. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 800 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{800}) karşılaştırılması 47
5.1.5. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 1600 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{1600}) karşılaştırılması 49
5.1.6. %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayısının düşen seviyeli permeabilite deneyi sonunda bulunan boşluk oranlarına göre karşılığı..……...51
5.2. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının ve Konsolidasyon Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının Numunelerin Plastisite İndisleri (PI) ile Karşılaştırılması 53
5.2.1. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{ort}) plastisite indisleri (PI) ile karşılaştırılması 53
5.2.2. Farklı konsolidasyon yüklemelerinden bulunan permeabilite katsayılarının (k) plastisite indisleri (PI) ile karşılaştırılması 54
5.3. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının ve D_{50} Çapı ve D_e Efektif Dane Çapı ile Karşılaştırılması 57
6.SONUÇ VE ÖNERİLER ……..60
KAYNAKLAR DİZİNİ ……62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Darcy'nin kumdan su geçişine yönelik yaptığı deney ……..8
3.2. Sabit seviyeli permeabilite deneyi deney düzeneği …….10
3.3 Düşen seviyeli permeabilite deneyi deney düzeneği ……...11
3.4 Konsolidasyon deney sonuçlarının analizinde logaritma-zaman yönteminin uygulanması .15
4.1. Numune 3'ün Elek Analizi Deney Föyü …….22
4.2. Numunelerin Dane Çapı Dağılımı Eğrileri ……..24
4.3. Numune 1'in likit limit ve plastik limit deney föyü …….26
4.4. Numune 3'ün Özgül Gravite Deney Föyü ..…….27
4.5. Numune 3'ün Kompaksiyon Deney Föyü ……...……30
4.6. Numunelerin Maksimum Kuru Yoğunluk-Optimum Su Muhtevası Eğrileri …….31
4.7. Düşen seviyeli permeabilite deneyi ……..……...…33
4.8. Su seviyesi ve okuma cetveli ……..……33
4.9. Numune 3'ün düşen seviyeli permeabilite deneyi okumaları ve permeabilite katsayısının hesabı ……..…….……..34
4.10. Konsolidasyon deney düzeneği ……..…37
4.11. Numune 3'ün basınç-boşluk oranı grafiği ……..…38
4.12. Numune 3'ün konsolidasyon katsayısı-ortalama boşluk oranı grafiği ……..…….38
5.1. 100 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği ……..……..43
5.2. 200 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği ……...45
5.3. 400 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği ……..…….…46
5.4. 800 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği ……..…..48
5.5. 1600 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği …….…50
5.6. Aynı boşluk oranlarında k_{ort}-$k_{(w\%15)}$ grafiği ……..…….……..……..52
5.7. PI-k_{ort} grafiği ..……..……..……53
5.8. PI-k_{100} grafiği …….……..…54
5.9. PI-k_{200} grafiği ……...….55
5.10. PI-k_{400} grafiği …...……..…….56
5.11. PI-k_{800} grafiği ……..…….56
5.12. PI-k_{1600} grafiği ……...……..……..…57
5.13. D_{50}-k_{ort} grafiği ……..……59
5.14. D_e-k_{ort} grafiği ……..…….59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

1.1. Zeminlerin dane büyüklüğüne göre geçirgenlik katsayısı büyüklükleri ……....2
4.1. Zeminlerin ince dane içeriği ……..……23
4.2. Zemin Tanımlama Deney Sonuçları ……28
4.3. Numunelerin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Yoğunlukları …….32
4.4. Numunelerin düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları ……35
4.5. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları …….……...…39
4.6. %15 su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları ….……..……40
5.1. Şekil 5.1.'in hesap tablosu ……..……42
5.2. Şekil 5.2.'nin hesap tablosu ……44
5.3. Şekil 5.3.'ün hesap tablosu …….……46
5.4. Şekil 5.4.'ün hesap tablosu …….……47
5.5. Şekil 5.5.'in hesap tablosu ……..……49
5.6. Farklı yüklemeler için oluşturulan eğilim eğrisi denklemleri ve R^2 değerleri……51
5.7. Boşluk oranları oranlanarak elde edilen permeabilite katsayıları ve k_{ort}'lar …….52
5.8. Numunelerin D_{50} çapları ve permeabilite katsayıları …….……58
5.9. Numunelerin D_e efektif çapları ve permeabilite katsayıları …….……..…58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
k	Permeabilite katsayısı
k_{ort}	Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayısı
°C	Santigrat derece
w	Su muhtevası
w_{opt}	Optimum su muhtevası
ρ_{dmax}	Maksimum kuru yoğunluk
C_c	Eğrilik katsayısı
C_u	Üniformluk katsayısı
C_v	Konsolidasyon katsayısı
D_{10}	Ağırlıkça %10'dan daha ince için çap
D_{20}	Ağırlıkça %20'den daha ince için çap
D_{30}	Ağırlıkça %30'dan daha ince için çap
D_{50}	Ağırlıkça %50'den daha ince için çap
D_{60}	Ağırlıkça %60'dan daha ince için çap
D_e	Efektif dane çapı
e	Boşluk oranı
e_0	Başlangıç boşluk oranı
n	Porozite
S	Doygunluk
G_s	Özgül ağırlık
LL	Likit limit
PL	Plastik limit
PI	Plastisite indisi
kPa	Kilo paskal
Mg	Mega gram
G	Gram
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
sn	Saniye

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Standartları Birliği
TS	Türk Standardı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USCS	Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi
USBR	Amerika Birleşik Devletleri İyileştirme Bürosu

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Geçirgenlik, gözenekli bir kütlenin içinden yapının su geçişine izin verme yeteneği olarak tanımlanabilir. Bir malzeme suyun akışına yol açabilecek sürekli boşluklar içeriyorsa geçirgenlik özelliğine sahiptir. Kayalar, kayaçlar, betonlar, zemin vb. gibi mühendislik malzemeleri birbirlerine göre göreceli olsa da geçirgendir. Zeminlerin geçirgenliği, en özellikle geoteknik mühendisliği olmak üzere inşaat mühendisleri için önemli parametrelerden biridir. Bu kadar önemli bir parametre olmasına rağmen, belirlenmesi en zor parametrelerden biridir. Geçirgenlik özelliği, çoğunlukla ilave düşey yük sebebiyle zeminde beklenen konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesinde, barajların az geçirgen kil çekirdeklerinin veya toprak dolgu barajlarının stabilize analizlerinde, şevlerin ve dayanma yapılarının stabilite ve sızma hesaplarına kullanılan önemli bir büyüklüktür.

Hidrolik iletkenlik veya farklı bir ifadesiyle permeabilite katsayısı ince daneli zeminler olmak üzere çoğu zeminlerin mühendislik davranışını etkileyen, suyun etkilerinin görülmesi açısından önemli bir büyüklüktür. Birçok geoteknik mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan problemlerin merkezinde, suyun ya zemin kütlesi içerisindeki boşluk ya da gözeneklerdeki akışı ya da suyun gözeneklerde oluşturduğu basınç veya gerilme durumundan kaynaklandığı görülmüştür. Bu sebeple suyun hareketinin zemin ve kaya özelliklerinin mühendislik davranışları üzerindeki etkileri sebebiyle bilinmesi önemlidir.

İnşaat Mühendisliğinde suyun zemin içindeki akımı ile birçok durumda karşılaşılır. Toprak yapılar (toprak baraj, toprak set(sedde) vb.) içinden suların sızması, yapıların (baraj, regülatör vb.) altından suların sızması, açılan veya su çekilen kuyu veya çukura suyun sızması yeraltında oluşan su akımlarına örnek olarak verilebilir. Bunların yanında yapılar için açılan destekli kazılarda su seviyesinin düşürülmesi, sistemden uzaklaştırılması, inşa süresi boyunca takibinin projelendirmesinde permeabilite katsayısı önemli bir yer edinmektedir.

Zemin, boşluklu bir ortam olup boşlukları birbirine bağlıdır. Su zemin ortamının boşluklarında hareketsiz bulunabildiği gibi aynı zamanda birbirine bağlı boşluklardan geçip

akabilir. Akım bir, iki ya da üç boyutlu olabilirken, uygulamalarda üçüncü boyut genelde ihmal edilir.

Günümüz problemlerinin başında gelen kirlenmiş zeminler ve yeraltı sularının arındırılması gibi çevre geotekniği problemlerinin çözümüne ulaşabilmek için hidrolik geçirgenliğin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Bu paremetre çoğu projenin dizaynını etkileyebilecek veya tamamen değiştirecek büyüklükte olabilir. Bu yüzden doğru bir şekilde belirlenebilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Permeabilite katsayısına etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörlerin başına boşluk oranı ve yoğunluk, sıcaklık ve viskozite bunların başında gelmektedir.

Geçirgenlik zemin tipinin bir işlevidir. Geçirgenliğin değeri, gözeneklerin ortalama büyüklüğüne bağlıdır ve dane boyutlarının, dane şeklinin ve zemin yapısının dağılımı ile ilgilidir. Tipik kumların ve çakılların geçirgenliklerinin tipik killere oranı çok büyük mertebeler ile ifade edilebilir (örneğin; $\%10^6$ veya 10^8 mertebeleri). Kaba daneli bir zeminde yer alan ince bir malzemenin küçük bir yüzdesi bile, geçirgenlikte önemli bir azalmaya yol açabilir. Dane büyüklüğüne göre farklı zemin tipleri için, geçirgenlik için büyüklük sıraları Çizelge 1.1 de sunulmuştur. Görüldüğü üzere dane boyutu küçüldükçe permeabilite katsayısı küçülmektedir, en geçirgen malzeme çakıl olarak ortaya çıkarken en geçirimsiz malzeme baraj çekirdeklerinde de kullanılan kildir.

Çizelge 1.1. Zeminlerin dane büyüklüğüne göre geçirgenlik katsayısı büyüklükleri

Zemin	Çakıl	İri daneli kum	Orta sıkı kum	İnce kum	Siltli kum	Silt	Kil
k (cm/sn)	10^0	10^0-10^{-1}	10^{-1}-10^{-2}	10^{-2}-10^{-3}	10^{-3}-10^{-4}	$1x10^{-5}$	10^{-7}-10^{-8}

Geçirgenlik katsayısı direk metotla yani yerinde veya laboratuvar ölçümleriyle veya dane büyüklüğü dağılımına dayalı olarak ampirik korelasyonlardan dolaylı olarak belirlenebilir. İngiliz standartlarına göre (British-EUROCODE 7) geçirgenlik katsayısını (hidrolik iletkenlik) belirlemek için yaygın olarak kullanılan dört yöntem vardır:

- pompalama ve sondaj deliği geçirgenlik deneyleri gibi arazi deneyleri;
- dane büyüklüğü dağılımı ile ampirik korelasyonlar;
- bir odeometre deneyinden değerlendirme;
- laboratuvardaki zemin örneklerinde geçirgenlik deneyleri

Bu çalışma kapsamında farklı yerlerden alınmış ve farklı indeks özellikleri(dane dağılımı, plastisite indisi, özgül gravite vb.) sahip 10 adet numune için deney programı hazırlanmıştır. Deney programı numuneler üzerinde öncelikle tanımlama deneylerinin yapılmasıyla başlamıştır. Elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve özgül gravite deneyleri yapılarak numuneler tanımlanmıştır. Literatürde bu numuneler için önerilen permeabilite katsayıları bulunup tüm deneyler sonrası elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Tanımlama deneylerinin bitiminden sonra kompaksiyon karakteristikleri belirlenmiş ve tüm numuneler düşen seviyeli permeabilite deneyleri ve konsolidasyon deneyleri için hazırlanacak numunelerin optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon numunelerinin yanında daha az enerji altında, boşluk oranı daha yüksek numunelerde ikinci set deneyler için deney programına dahil edilmiştir. Daha sonra belirlenen değerlerde hem konsolidasyon (10 adet optimum su muhtevasında ve 10 adet de daha düşük enerjiyle hazırlanmak koşuluyla toplam 20 adet numune) hem de düşen seviyeli permeabilite deneyleri (10 farklı numune) için numuneler hazırlanmıştır.

Deney aşaması sırasında, düşen seviyeli permeabilite deneyi için numune ekipmana yerleştirildikten sonra kontrol amacıyla doygunluk için beklenmiştir. Doygunluk süresi numuneden numuneye değişeceği için standart bir gün belirlenmemiştir. Okumalar düzenli takip edilmiş ve doygunluğa ulaşıldıktan sonra alınan okuma/saat değerlerin birbirine yakın olduğu andan itibaren okumalar bir müddet alınmış ve permeabilite katsayısıları hesaplanmıştır. Deney sonu numunelerden örnekler alınıp, su muhtevası ölçülmüş ve geri hesapla doygunluğu ne derecede olduğu bulunarak doygunluğun gerçekte ne derecede gerçekleştiği belirlenmiştir.

Aynı şartlarda altında yukarıda bahsedildiği gibi iki farklı set numune konsolidasyon deneyi için hazırlanmıştır. Konsolidasyon deneyi için standart olarak takip edilen farklı

yükleme aşamaları deneylerde tüm numunelere uygulanmıştır. Yüklemeler sırasıyla 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa ve 1600 kPa olarak belirlenmiştir. Bu yükler altında konsolidasyon katsayısı hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak geri hesapla her numune için permeabilite katsayıları bulunmuştur.

Deneyler sonucu değerler bulunduktan sonra birbirleriyle karşılaştırılmış ve deneylerin birbirlerine geçişlerinin hangi koşul ve yükleme seviyelerinde olması gerektiği yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Permeabilite katsayısının farklı yönlerden araştırılması veya farklı metotlarla elde edilmesi uzun yıllardır bilim adamlarının çokça ilgilendiği bir konu olmuştur. Biot'un 1950'lerin ortalarında yaptığı doygun zeminlerin geçirgenliği ile elastik dalganın karakteristik frekansı arasındaki ilişkiyi ele alan çalışması bu çalışmaların başında yer almaktadır. Bu çalışma en önemli referans kaynaklardan biri olmakla birlikte zemin-su ilişkisinin modellenmesinde geoteknik ve su mühendisliği uygulamalarında bir kilometre taşı olarak ortaya çıkmaktadır.

1984'te Daniel, kil kaplamaların hidrolik iletkenliği üzerinde örselenmemiş ve tekrar yoğrulmuş numuneler üzerinde permeabilite deneyleri yapmış ve örselenmenin zeminin geçirgenliği üzerinde etkisini araştırmıştır. Deneyler sonucu örselenmiş ve örselenmemiş numuneler için permeabilite katsayılarının 10 ile 1000 kat daha farklı olacağı sonucuna ulaşmıştır.

Yine aynı dönemlerde Day vd. (1985) Austion, Teksas yakınlarındaki bir bölgede kullanılan düşük ve yüksek plastisiteli kil kaplamaların hidrolik geçirgenlik özelliklerini belirleyebilmek ve bu malzemenin kullanabilirliğini sorgulamak için ayrı ayrı arazi deneyleri ile laboratuvarda aynı sahadan alınan örselenmemiş numuneler için permeabilite deneyleri yapmış ve arasındaki farklılıklar üzerinde çalışmıştır.

1985 yılında Boynton vd. sıkıştırılmış kil üzerinde iletkenlik deneyleri yapmış; zeminin homojen olmayan anizotropik yapısının, deney numune için seçilen çapın ve zeminin yaşının veya başka bir deyişle depolama süresinin geçirgenlik üzerinde etkilerini araştırmıştır.

Finno vd. 1996 yılında permeabilite katsayının bulunmasından standart metotların dışında ortaya çıkan elektroosmoz deneyleri kullanmıştır ve bulunan değerleri düşen seviyeli permeabilite deneyinden çıkan sonuçlarla kıyaslamıştır.

Permeabilitenin belirlenmesi üzerine çalışmalar hız kesmemiş ve 2002 yılında Chu vd. Singapur deniz killerinin konsolidasyon ve geçirgenlik özellikleri üzerine çalışmış, konsolidasyon katsayısı ile hidrolik geçirgenlik arasında düşey ve yatay doğrultularda ilişkiler önermiştir.

2003 yılında Morris, ince daneli malzemeler için hidrolik geçirgenlik ve kıvam limitleri plastisite indisi arasında ilişkiler kurmaya çalışmış ve bazı korelasyonlar önermiştir.

2010 yılında Pedescoll vd. arazide büyük ölçekli düşen seviyeli permeabilite deneyi yapmıştır. Aynı yıl Chapuis sızdıran bir yüzme havuzunu örnek bir çalışma kapsamında değerlendirerek tam ölçekli düşen seviyeli permeabilite deneyi yapmıştır ve deneyde koruma denklemini temsil eden hız grafiği sayesinde kaçakların yerlerini belirlemiştir.

2011 yılında Tiwari vd. zeminin sıkışabilirliğini ve geçirgenliğini, zeminin içindeki kil minerallerinin oranı (ince dane oranı), zeminin aktivitesi, dane büyüklüğü ve sıkışma indisine bağlı olup olmadığını araştırmak için bir çalışma yapmışlardır.

2012 yılında Paul Chiasson düşen seviyeli permabilite deneyine farklı yorumlar getirmiş ve ölçüm alım sırasında veya deneylerin yorumlanmasında olası hatalar hakkında deneyler sonucunda tavsiyelerde bulunmuşlardır.

2013 yılında Assaad vd. katkılı zeminlerin permeabilitesinin nasıl değiştiğini yine düşen seviyeli permeabilite deneyleri yaparak göstermiştir. Yine aynı yıl Ma vd. kilin yapısına bağlı olarak konsolidasyon davranışını incelemiş ve hidrolik iletkenlik ile ilgili lineer olmayan bir davranış tespit etmiştir.

2014 yılında Zhai ve Rahardjo doymamış zeminin geçirgenlik fonksiyonunun zemin-su karakteristik eğrisinin uyum parametreleri ile ilişkilendirerek geçirgenlik fonksiyonunun hesaplanması için yeni bir eşitlik önermişlerdir.

2016 yılında ise Ranaivomanana vd. sıkışma derecesi ve mikro yapıya bağlı olarak sıkıştırılmış zeminlerin permeabilite özelliklerini araştırmıştır. Aynı yıl Elhakim permeabilite katsayısını arazi düşen seviye permeabilite, pompalama deneyleri ve koni

penetrasyon deneylerinden ölçerek karşılaştırmıştır. Yine aynı yıl Lei vd. yeni tasarlanan bir cihaz ile yapılan üç eksenli basınç deneyleriyle kaymanın kil zeminlerinin geçirgenliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve büyük kayma deformasyonu koşulları altında kil zeminlerinin hidrolik iletkenliği için matematiksel bir model önermişlerdir.

Ülkemizde ise Kocaeli Üniversitesi'nde Sami Arsoy vd. tarafından konsolidasyon ve permeabilite ilişkisini inceleyen TÜBİTAK destekli bir çalışma yapılmıştır. Bir numune için yapılan permeabilite ve konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları karşılaştırılmış arada farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Görüldüğü üzere yıllardır zeminin permeabilite özellikleri farklı yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Fakat standart olarak günümüzde çokça kullanılan yöntemler çoğu kez karşılaştırılmamıştır. Çalışmanın amacı yaygın laboratuvar deneyleri olan konsolidasyon ve permeabilite deneyleri sonuçları elde edilen hidrolik geçirgenliği kıyaslayarak pratikte mühendislerinin kullanımına yarayacak yorumlar ve olası korelasyonların varlığının araştırması olarak hedeflenmiştir.

3. PERMEABİLİTE KATSAYISININ BULUNMASI

3.1. Darcy Yasası

Su, doygun bir zemin kütlesi boyunca aktığında; zemin, içeriğindeki katı madde varlığı nedeniyle akış için belirli bir direnç gösterir. Akışkanlar mekaniğinin kanunları ve boru vasıtasıyla akışlar için geçerli olan kanunlar, suyun zeminler boyunca akışı için de geçerlidir.

Darcy yasası, gözenekli bir ortamın içinden sıvı akışını tanımlar. Fransız mühendis Henry Darcy tarafından 1856'da kumdan su geçişine yönelik deneyler temelinde formüle edilmiştir. Darcy yasası, laminer akış koşulları altında herhangi bir doygun zemin için akış hızı (V) ve hidrolik eğim (i) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirtmektedir. Akış oranı, zemin kütlesinin kesit alanı (A) boyunca Q (debi=hacim/zaman) ise, Darcy Yasası şöyle ifade edilebilir:

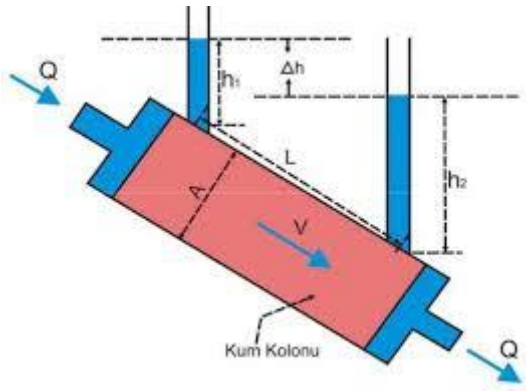
$$V = \frac{Q}{A} = k \cdot i \tag{3.1}$$

k: Zeminin geçirgenliği (hidrolik iletkenlik)

i: Hidrolik eğim (Δh / L)

Δh: Su seviyesi farkı

L: Zemin kütlesinin uzunluğu



Şekil 3.1 Darcy'nin kumdan su geçişine yönelik yaptığı deney

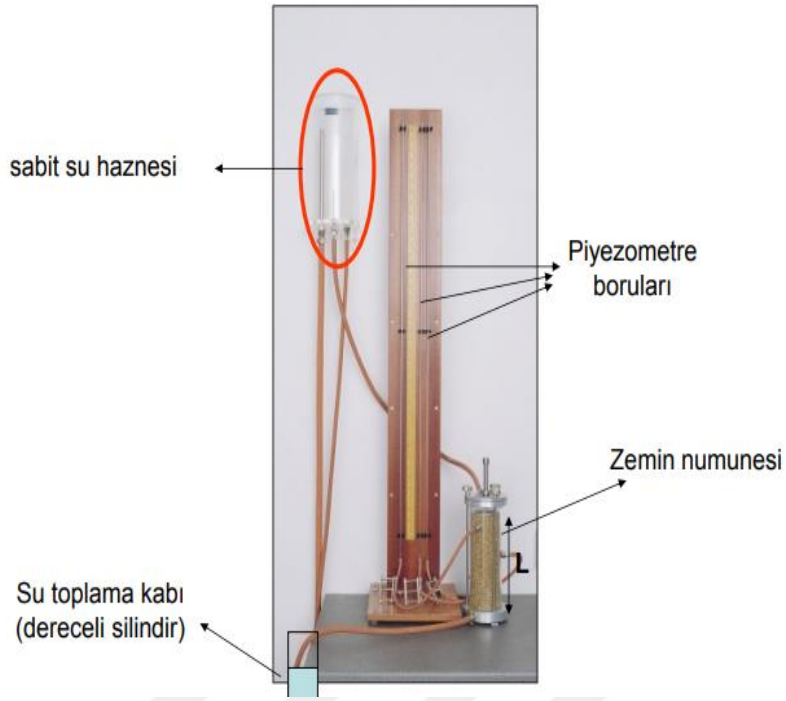
Geçirgenliği düşük zeminler üzerinde yapılan deneylerde akış hızı ve hidrolik eğim arasındaki ilişkide lineerlikten sapmalar görülmüştür. Bu lineer olmayan ilişki, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde unutulmaması gereken önemli bir gerçektir ama çoğu kez ihmal edilir. Darcy'nin kumdan su geçişine yönelik yaptığı deney Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

3.2. Laboratuvar ve Arazi Permeabilite Deneyleri ile Permeabilite Katsayısının Bulunması

İngiliz (British) standartlarına göre birçok laboratuvar ve arazi yöntemlerinin yanı sıra konsolidasyon deneyleri ve dane büyüklüğü dağılımı ile ampirik korelasyonlar ile de geçirgenlik katsayısı elde edilir. Ancak evrensel olarak uygulanabilir bir yöntem yoktur; her bir yöntem, hedefleri ve planlamayı kolay bir şekilde incelemek için tanımlamamız gereken belirli sınırlar içinde geçerlidir. Fakat geçirgenlik katsayısını belirlemek için ortak kullanımda olan yöntemler laboratuvar ve arazi yöntemleridir. Laboratuvar yöntemleri Sabit Seviyeli Geçirgenlik Deneyi ve Düşen Seviyeli Geçirgenlik Deneyi olmak üzere ikiye ayrılırken arazi yöntemleri için ise Sondaj Deliği Deneyi ve Pompalama Deneyleri yaygın olarak kullanılan deneylerin başında gelir.

Sabit seviyeli geçirgenlik deneyi, çok az silt içeren veya hiç silt içermeyen kumlar ve çakıllar gibi granüler zeminlerin geçirgenliğini belirlemek için kullanılan yaygın bir laboratuvar deney yöntemidir. Bu deney yöntemi, sulandırılmış veya örselenmiş granüler zemin numunelerinin test edilmesi için yapılır. Sabit seviyeli geçirgenlik deneyi, sabit basınç farkı altında bir silindirik zemin numunesi kolonu boyunca suyun akışını içerir. Deney, geçirgenlik hücresinde veya test edilen malzemenin dane büyüklüğüne bağlı olarak boyut olarak değişebilen permeametrede gerçekleştirilir. Bununla birlikte, akış ölçümlerine başlamadan önce, zemin numunesi doygun olmalıdır. İri daneli granüler zeminlerin doyurulması kolay ve çok zaman almayan bir işlemdir. Deney sırasında, zemin kolonundan akan su miktarı belirli zaman aralıklarında ölçülür. Zemin numune kolonunun yüksekliğini (L), numune kesitini (A) ve sabit basınç farkını (Δh), geçen suyun (Q) hacmini ve zaman aralığını (Δt) bilmek, numunenin hidrolik iletkenliğini hesaplamamıza yardımcı olur. Bu deney için standartlar Amerikan Standartları Enstitüsü (American Society of Testing and Materials) tarafından ASTM D2434-68 kodlu standardında sunulmuştur. Sabit seviyeli

permeabilite deneyi deney düzeneği Şekil 3.2.'de gösterilmiştir ve deney sonuçlarına dayanılarak numunenin geçirgenliğini hesaplamak için kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

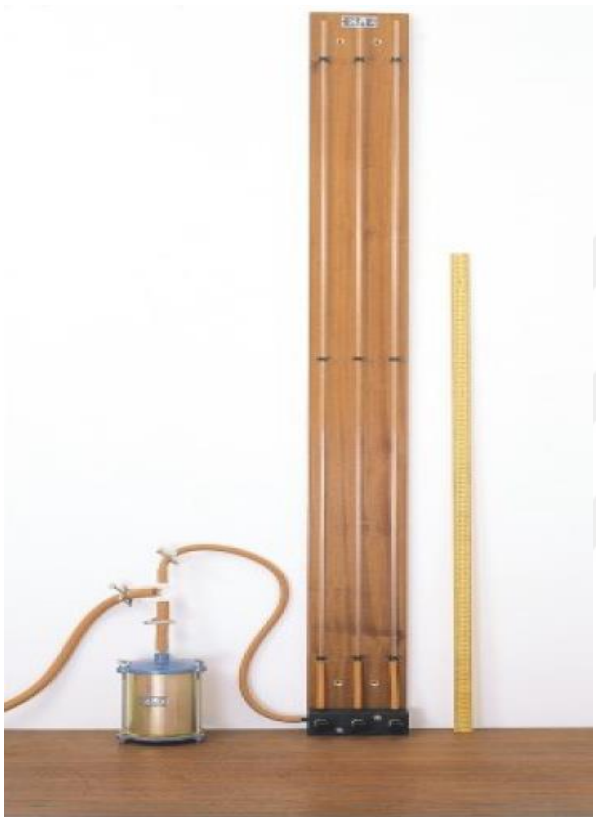


Şekil 3.2 Sabit seviyeli permeabilite deneyi deney düzeneği

$$k = Q \cdot L \,/\, (A \cdot \Delta h \cdot \Delta t) \qquad (3.2)$$

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi ise, silt ve kil gibi orta ve düşük geçirgenliğe sahip ince daneli zeminlerin geçirgenliğini belirlemek için kullanılan yaygın bir laboratuvar deney yöntemidir. Bu deney yöntemi, örselenmemiş bir numuneye uygulanabilir. Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi, su seviyesini gösteren ve aynı zamanda numune içinden geçen su hacminin ölçülmesini sağlayan bir boru hattına bağlanan nispeten kısa bir zemin numunesi içinden suyun akışını içerir. Dikey ve sabit borunun çapı test edilen zeminin geçirgenliğine bağlıdır. Bu deney için standartlar Amerikan Standartları Enstitüsü (American Society of Testing and Materials) tarafından ASTM D5084-03 kodlu standardında sunulmuştur. Deney, bir düşen seviyeli geçirgenlik hücresinde veya bir odeometre hücresinde gerçekleştirilebilir. Akış ölçümlerine başlamadan önce, zemin numunesi doygun duruma getirilir ve dikey boru belirli bir seviyeye kadar sabit sıcaklıktaki saf su ile doldurulur. Deney daha sonra numunenin içinden akan suyun belirli bir alt limite ulaşana kadar akmasına izin vererek

başlar. Dikey borudaki suyun üst seviyeden alt seviyeye düşmesi için gereken süre kaydedilir. Çoğu zaman, boru yeniden doldurulur ve deney birkaç kez tekrarlanır. Kaydedilen süre, her deney için yaklaşık %10'luk izin verilen bir varyasyonda aynı olmalıdır, aksi takdirde deney başarısız olur. Düşen seviyeli deney düzeneği Şekil 3.3.'de gösterilmiştir ve deney sonuçlarına dayanılarak numunenin geçirgenliğini hesaplamak için kullanılan formül aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.3 Düşen seviyeli permeabilite deneyi deney düzeneği

$$k = \left[\frac{2{,}3\,.\,a\,.\,L}{(A.\Delta T)}\right].\log(\frac{h_0}{h_1}) \tag{3.3}$$

L: zemin numune kolonunun yüksekliği

A: numunenin kesit alanı

a: sabit ve düşey borunun enkesiti

Δt: suyun numune kolonunun içinden akması için kaydedilen süre

h_0 ve h_1 : aynı su seviye referansı kullanılarak ölçülen borudaki suyun üst ve alt seviyesi

Geçirgenliğin yerinde ölçümü, bir permeametrede bozulmamış numunelerin elde edilmesinde ve ayarlanmasında karşılaşılan zorlukları önler. Aynı zamanda küçük bir numunenin geçirgenliği yerine, toplu geçirgenlik hakkında bilgi sağlar. Geçirgenliği yerinde belirlemek için kullanılan pompalama deneyleri iki önemli arazi deneyidir. Bunlar; sınırsız akışlı pompalama deneyi ve sınırlı akışlı pompalama deneyidir. Bu arazi geçirgenlik deneyleri, bir ana kuyunun suyunu dışarı pompalamaktan ve en az iki gözlem kuyusundan orijinal yatay yeraltı su seviyesinin ortaya çıkan küçülme yüzeyini gözlemlemekten ibarettir. Sabit bir akış durumuna ulaşıldığında, gözlem kuyularındaki akış miktarı ve seviyeleri not edilir.

Sondaj deliği deneyi yöntemi, bir delikli kuyu tekniği kullanılarak gözenekli malzemelerin geçirgenlik katsayısının yerinde ölçümünü kapsar. Bu deney yöntemi, su tablasının üstünde veya altında, $1x10^{-5}$ m/sn'den küçük veya ona eşit bir ortalama geçirgenlik katsayısına sahip sıkıştırılmış dolgular veya doğal tortular için kullanılabilir. $1x10^{-5}$ m/sn'den büyük geçirgenlik katsayıları, sıradan sondaj deneyleri ile belirlenebilir

3.3. Konsolidasyon Deneylerinden Permeabilite Katsayısının Bulunması

Laboratuvar deneylerinden dolaylı bir geçirgenlik katsayısı belirleme yöntemi de konsolidasyon deneyidir. Terzaghi'nin teorisine (1925) ve Biot'un teorisine (1941) göre, geçirgenlik faktörü konsolidasyon için bir itici faktördür. Terzaghi (1925) tarafından önerilen çözüm, Schiffman'ın (1958) çalışmasıyla başlayarak kademeli olarak düzeltilen önemli basitleştirmelere dayanmaktadır.

Terzaghi'nin teorisinin iyi anlaşılıp kullanılabilmesi için teori ile ilgili varsayımların ve sınır şartlarının iyi anlaşılması gerekmektedir. Sıkışabilir zemin tabakasının; homojen, suya doygun, zemin danelerinin ve boşluklardaki suyun sıkışamaz olduğu kabul edilmektedir. Boşluklardaki suyun çıkışı Darcy Yasası'na bağlanmakta ve drenaj ile sıkışmanın tek boyutta meydana geldiği kabul edilmektedir. Drenaj, sıkışabilir zemin tabakasının hem alt hem üst bölümlerinde gerçekleşmekte fakat kolaylık olması açısından sadece üst bölümde olduğu düşünülebilir. Terzaghi teorisinde, zeminde meydana gelen yük artışı sonucunda küçük birim deformasyonlar oluştuğu için sıkışabilirlik katsayısı (a_v) ve permeabilite katsayısı (k), konsolidasyon süreci sırasında sabit kalmaktadır. Uygulanan

gerilme artışlarına rağmen a_v sabit kalıyorsa, boşluk oranındaki değişim (Δe) ile efektif gerilmedeki değişim (Δσ') arasında özgün bir ilişki vardır. Ayrıca buradan ikincil sıkışmanın gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. (Holtz vd.,2015)

Terzaghi denkleminin türetilmesinde sıkışabilir bir zeminden dışarı çıkan su hacmi göz önüne alınır. Darcy yasasında akış miktarı, hidrolik eğim ve zemin permeabilitesine bağlıdır. Akışa neden olan hidrolik eğim, zemindeki ek boşluk suyu basıncı ile ($u / \rho_w.g$) oranı şeklinde ilişkilendirilebilir. Su sıkışmaz kabul edildiğinden, süreklilik prensibinden dolayı zemindeki hacim değişimi, diferansiyel zamanda (dt), zemine giren su ile dışarı çıkan suyun farkına eşit olacaktır. Eşitliğin bu bölümü şu şekildedir: (Holtz vd.,2015)

$$\frac{-k}{\rho_w \cdot g}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz\ dt \tag{3.4}$$

z: zemindeki derinlik değişkeni
u: boşluk suyu basıncı
k: zemin permeabilitesi
ρ_w : suyun yoğunluğu
g: yerçekimi ivmesi

Burada; u, hem derinliğin (z) hem de zamanın (t) bir fonksiyonu olduğundan kısmi türevler kullanılmalıdır.

Eşitliğin diğer tarafı, hacim değişimi veya zemin boşluk oranı değişimi ile sıkışabilirlik katsayısı a_v'den elde edilen, efektif gerilmedeki değişim ile ilişkilendirilerek bulunur. Efektif gerilme prensibinden, efektif gerilme değişimini boşluk suyu basıncı değişimine eşitleyebiliriz. Yani toplam gerilme sabit kaldığı sürece, ek boşluk suyu basıncı zamanla sönümlenirken, efektif gerilmede buna bağlı olarak bir artış meydana gelecektir ($\Delta\sigma' = -\Delta u$). Eşitliğin bu kısmı şöyledir: (Holtz vd.,2015)

$$\frac{-a_v}{1 + e_0}\frac{\partial u}{\partial t} dt\ dz \tag{3.5}$$

Her iki denklem eşitlendiğinde ve terimler yeniden düzenlendiğinde şu form elde edilir:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial^2 z} = \frac{\partial u}{\partial t} \tag{3.6}$$

$$c_v = \frac{k}{\rho_w . g} \frac{1 + e_0}{a_v} \tag{3.7}$$

Konsolidasyon oluşumunu kontrol eden malzeme özelliklerini içermesinden dolayı c_v, konsolidasyon katsayısı olarak tanımlanır. Konsolidasyon katsayısı için birim analizi yapılacak olursa biriminin m^2/sn olduğu görülecektir. Görüldüğü gibi zeminin permeabilitesi zemin numunesinin konsolidasyonundan da elde edilebilir. Yukarıdaki eşitliği permeabiliteyi bulmak için çözersek şu denklemi elde ederiz: (Holtz vd.,2015)

$$k = \frac{c_v . \rho_w . g . a_v}{1 + e_0} \tag{3.8}$$

Denklemde kullanılan e'nin gerçek veya yerinde ölçüm boşluk oranından ziyade yük artışının başlangıcındaki boşluk oranı olduğuna dikkat etmemiz gerekir. (Holtz vd.,2015)

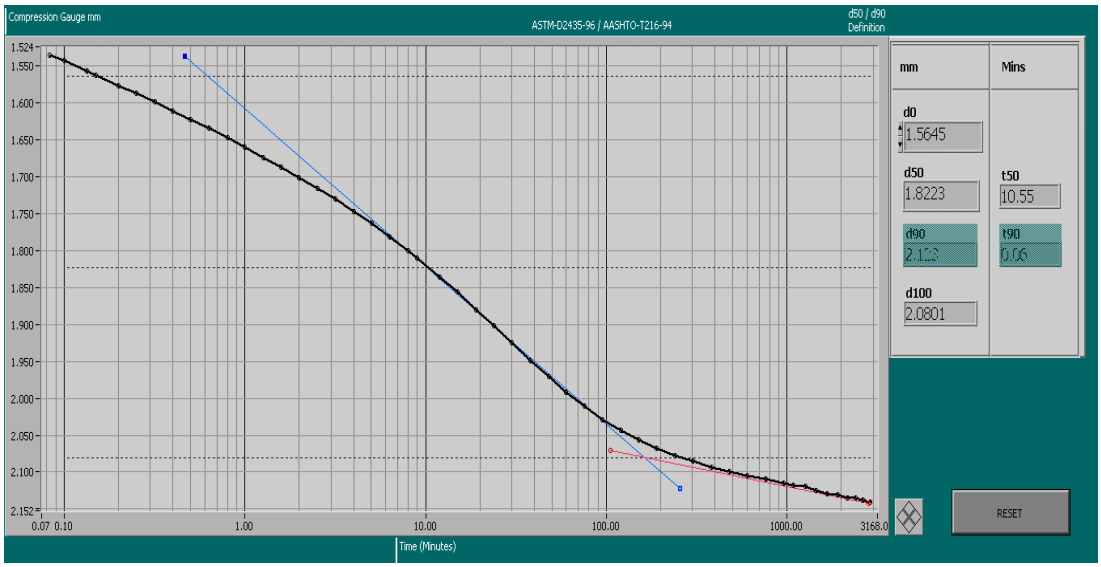
Konsolidasyon denklemindeki konsolidasyon katsayısı, konsolidasyon oranını belirleyen zemin özelliklerini dikkate alan tek parametredir. Artan yüklemeli konsolidasyon deneylerinde deformasyon ölçer veya transdüser okumaları alınır ve konsolidasyon katsayısı deformasyon verisinin zamana bağlı değişiminden elde edilir. Belirli bir yükleme altında zamana bağlı oluşan gerçek deformasyon okumalarından U-T (konsolidasyon oranı-zaman) eğrileri çizilir. Konsolidasyon katsayısını Casagrande ve Taylor tarafından geliştirilen uygun eğri oluşturma yöntemleri kullanarak belirlenebilir. Bu ampirik yöntemler, gözlemlenen laboratuvar sonuçlarının Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine uygunluğunu sağlamak için geliştirilmiştir. (Holtz vd.,2015)

Casagrande'nin Logaritma-Zaman Yöntemi'nde deformasyon ölçer okumalarının zamanın logaritması ile değişimi çizilir. Amaç; %50 birincil konsolidasyona karşılık gelen zamana ait deformasyon okumasını (R_{50}) ve %50 konsolidasyon için gerekli süreyi (t_{50})

bulmak için %100 birincil konsolidasyona karşılık gelen zamana ait deformasyon okuması R_{100}'ü tahmin etmektir. U-T eğrisinin teğetlerinin kesim noktasının asimptotu U_{ort} = %100'ü tanımlar. Konsolidasyonun %100'ünün oluşumu t = ∞'da gerçekleşir. Kısaca Casagrande (1938), %100 birincil konsolidasyona karşılık gelen zamana ait deformasyon okuması olan R_{100}'e laboratuvar konsolidasyon eğrisine çizilen iki teğetin kesişimi yardımıyla yakınsanabileceğini önermiştir. (Holtz vd.,2015)

Taylor (1948) ise zamanın karekökünü kullanarak konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Taylor'un yöntemi de, Casagrande'nin uygun eğri oluşturma yöntemi gibi teorik ve deneysel eğrilerin T (zaman faktörü) ve t'nin kareköküne göre çizildiğinde oluşturduğu şekilsel benzerliğine dayanır. Taylor, %90 konsolidasyon oranında eğrinin yatay eksen mesafesinin eğrinin doğrusal olarak devam eden kısmının yatay eksen mesafesinden 1,15 kat daha uzun olduğunu gözlemlemiştir. (Holtz vd.,2015)

Konsolidasyon deney sonuçlarını analiz ederken C_v katsayısını bulmak için kullanılan Logaritma-Zaman Yöntemi uygulaması için laboratuvarda yapılan bir deney için alınan ekran görüntüsü Şekil 3.4.'deki gibi belirtilmiştir. Grafiğe detaylı bakıldığında yerleştirilen iki lineer doğrunun kesiştiği yani birincil oturmanın sonlandığını zamanın yaklaşık 130-150 dakikaları arası olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Konsolidasyon deney sonuçlarının analizinde logaritma-zaman yönteminin uygulanması

3.4. Ampirik Bağıntılar ile Permeabilite Katsayısının Bulunması

Permeabilite katsayısının laboratuvarda veya arazide doğrudan belirlenmesi ve konsolidasyon deneylerinden belirlenmesinin yanı sıra çeşitli zemin türleri için kullanılabilecek yararlı ampirik formüller ve tablo halinde değerler mevcuttur. Sayısız araştırmacı bu ilişki üzerinde çalışmış ve çeşitli formülleri deneysel çalışmaya dayalı olarak sonuçlanmıştır.

Vukovic ve Soro (1992) eski çalışmalardan bazı ampirik yöntemleri özetlemiş ve genel bir formül sunmuşlardır:

$$k = \frac{g}{v}.C.f(n).D_e^2 \tag{3.9}$$

k: permeabilite katsayısı
g: yerçekimi ivmesi
v: kinematik viskozite
C: sınıflandırma katsayısı
f(n): porozite fonksiyonu
D_e: efektif dane çapı

Kinematik viskozite (v), aşağıdaki gibi dinamik viskozite (μ) ve sıvı (su) yoğunluğu (ρ) ile ilgilidir:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{3.10}$$

C, f(n) ve D_e değerleri, dane büyüklüğü analizinde kullanılan farklı yöntemlere bağlıdır. Vukoviç ve Soro'ya (1992) göre porozite (n), aşağıdaki gibi üniformluk katsayısı (U) ile ampirik ilişkiden türetilebilir:

$$n = 0{,}255.(1 + 0{,}83^U) \tag{3.11}$$

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{3.12}$$

Formülde yer alan efektif dane çapı (D_e) şu şekilde Kruger tarafından şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\frac{1}{D_e} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\Delta g_i}{D_i} \tag{3.13}$$

Burada g_i; elek analizinde her bir eleğin üzerinde kalan malzemenin yüzde ağırlığıdır. D_i ise eleklerin mm cinsinden çapıdır.

Vukovic ve Soro'dan önce ve sonra yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir ve bu çalışmaların kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

$$\boldsymbol{Hazen}:\ k = C \cdot D_{10}^2 = \frac{g}{v} . 6 . 10^{-4} . [1 + 10(n - 0.26)] D_{10}^2 \tag{3.14}$$

A.Hazen (1911) tarafından bulunan bu çok popüler bir ampirik denklem permeabilite katsayısı ile efektif dane çapı D_{10}'u ilişkilendirmektedir. Bu denklem temiz kumlar ve 0.1-3.0 mm arasında değişen D_{10} değerleri için önerilmiştir. Denklemde C sabitinin değeri 0.4-1.2 arasında değiştiği için çoğu zaman ortalama olarak 1'e eşit olarak kabul edilir. Denklem k≥10-3 cm/s için geçerlidir. Denklemde; k cm/s, efektif dane çapı ise mm değerlerine sahiptir.

$$\boldsymbol{Kozeny - Carman}: k = \frac{g}{v} . 8{,}3 . 10^{-3} . [\frac{n^3}{(1 - n^2)}] D_{10}^2 \tag{3.15}$$

Kozeny-Carman denklemi, zemin ortamının özelliklerinin bir fonksiyonu olarak en yaygın kabul gören ve kullanılan geçirgenlik türevlerinden biridir. Bu denklem başlangıçta Kozeny (1927) tarafından önerilmiş ve daha sonra Carman (1937, 1956) tarafından Kozeny-Carman denklemi haline getirilmiştir. Bu denklem 3 mm'nin üzerinde dane büyüklüğüne sahip zeminler veya killi zeminler için uygun değildir (Carrier 2003).

$$\boldsymbol{Breyer}: k = \frac{g}{v}.6.10^{-4}.log\frac{500}{U}D_{10}^{2} \quad (3.16)$$

Breyer formülü genellikle heterojen dağılımları olan malzemeler ile 1 ile 20 arasında üniformluk katsayısına ve 0,06 mm ile 0,6 mm arasında etkili dane boyutuna sahip kötü şekilde sınıflandırılmış daneler için en kullanışlı formül olarak kabul edilir. Bu yöntem gözenekliliği dikkate almaz ve bu nedenle gözeneklilik fonksiyonunu 1 kabul eder.

$$\boldsymbol{Slitcher}: k = \frac{g}{v}.1.10^{-2}.n^{3,287}.D_{10}^{2} \quad (3.17)$$

Bu formül en fazla 0,01 mm ile 5 mm arasında dane boyutuna sahip zeminler için geçerlidir.

$$\boldsymbol{Terzaghi}: k = \frac{g}{v}.C_t.(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}})^2 D_{10}^{2} \quad (3.18)$$

Terzaghi formülü, büyük daneli kumlar için en uygun olanıdır. Çalışmada ortalama sınıflandırma katsayısı (C_t) değeri kullanılmıştır ($6,1x10^{-3}<C_t<10,7x10^{-3}$).

$$\boldsymbol{USBR}: k = \frac{g}{v}.4,8.10^{-4}.D_{20}^{0,3}.D_{20}^{2} \quad (3.19)$$

ABD İyileştirme Bürosu (USBR) formülü, hidrolik iletkenliği etkili dane büyüklüğünden (D_{20}) hesaplamış ve gözenekliliğe bağlı olmadığını söylemiştir. Bu formül, 5'ten küçük üniformluk katsayısına sahip orta daneli kum için en uygun olanıdır (Cheng ve Chen 2007).

$$\boldsymbol{Alyamani}\ \&\ \boldsymbol{Sen}: k = 1300.[I_O + 0,025(D_{50} - D_{10})]^2 \quad (3.20)$$

Yukarıdaki formülde bulunan terimlerin tutarlılık için belirtilen birimleri taşıdığına dikkat edilmelidir. Bu formül bu nedenle, yukarıdaki Vukovic ve Soro'nun genel denklem formunu alanlardan istisna olarak farklıdır. Bununla birlikte, dane boyutu analizine de bağlı olan iyi bilinen denklemlerden biridir. Bu yöntem, D_{10} ve D_{50} efektif dane yarıçaplarını ve

ayırma özelliklerini dikkate alır. Bu denklemdeki I_o, dane boyutu dağılımı ekseniyle D_{10} ve D_{50} tarafından oluşturulan çizginin kesişme noktasıdır (mm cinsinden).

$$\textbf{Sauerbrei}: k = \frac{g}{v} \,.\, (3{,}75x10^{-3}) \,.\, (\frac{n^3}{(1-n)^2})^2 \,.\, \tau \,.\, D_{17}^2 \tag{3.21}$$

Sauerbrei bu formülü kum ve kumlu killer için önermiştir. Formüldeki "τ" sıcaklık düzeltmesidir (τ ~ [1,05 x 10^{-6}]/v).

$$\textbf{Kruger}: k = \frac{g}{v} \,.\, (4{,}35x10^{-3}) \,\frac{n}{(1-n)^2} \,.\, D_e^2 \tag{3.22}$$

Kruger, bu formülü orta büyüklükteki danelere sahip kumlar için önermiştir.

$$\textbf{Zunker}: k = \frac{g}{v} \,.\, C_Z \,.\, (\frac{n}{(1-n)}) \,.\, D_e^2 \tag{3.23}$$

Zunker, bu formülü ince ve orta daneli kumlar için önermiştir (C_Z = 0,7 x 10^{-3} – 2,4 x 10^{-3})

$$\textbf{Zamarin}: k = \frac{g}{v} \,.\, (8{,}2x10^{-3}) \,\frac{n^3}{(1-n)^2} \,.\, D_e^2 \tag{3.24}$$

Zamarin, bu formülü büyük taneli kumlar için önermiştir.

$$\textbf{Shepherd}: k = cd^{1{,}65-1{,}85} \tag{3.25}$$

Shepherd (1989) yaptığı istatistiksel güç regresyon analizleri sonucunda bu formülü önermiştir. Shepherd bu formülü kumlar için önermiştir (d = d_{50}, c = 3500, üs = 1,65).

$$\textbf{Loudon}: k = \frac{10^{(1{,}365+5{,}15n)}}{S^2} \tag{3.26}$$

Loudon (1952), granüler malzemenin k değerini tahmin etmek için Kozeny'nin daha önceki çalışmalarına dayanan ampirik bir formül önermiştir. Bu formül kumlar için geçerlidir (S: tanelerin özgül yüzeyi (cm^2/cm^3)).

$$\boldsymbol{Taylor}: k_1 : k_2 = \frac{C_1 {e_1}^3}{1+e_1} : \frac{C_2 {e_2}^3}{1+e_2} \tag{3.27}$$

Taylor (1948), deney boşluk oranından farklı boşluk oranları için permeabilite katsayısı değerini belirlemek amacıyla yukarıdaki ilişkinin kullanılmasını önermiştir. Burada zemin yapısına bağlı olan katsayılar C_1 ve C_2'nin ampirik olarak belirlenmesi gerekmektedir. Kumlar için, çok tahmini olarak $C_1 = C_2$'dir. Bu, belirli bir kum için C değeri belirlenmemiş ise, benzer başka bir kum için de aynı değerin kabul edilebileceği anlamına gelmektedir. (Holtz vd.,2015)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırmada kullanılan numunelerin zemin özelliklerini belirlemek için tanımlama deneyleri yani elek analizi, kıvam limitleri ve özgül gravite deneyleri yapılmıştır. Daha sonra zemin numunelerinin kompaksiyon karakteristiklerini (maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri) belirlemek için kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zemin numunelerinin özellikleri ve kompaksiyon karakteristikleri belirlendikten sonra her numuneye laboratuvarda konsolidasyon ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri uygulanmıştır. Numunelerin deneye hazırlanmasında ve deneye uygun ekipmanlar ile deneyin uygulanmasında standart yöntemlere uyulmuştur. Bu yöntemler Amerikan Standartları Enstitüsü tarafında ASTM-1994 ile standartlaştırılmıştır.

Bu çalışmada yapılan tüm deneyler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uygulamalı Geoteknik Laboratuvarları'nda yapılmış olup, deneyde kullanılan ekipmanların hepsi standartlara uygundur. Yapılan tüm deneyler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmış ve sonuçları verilmiştir.

4.1. Elek Analizi

Bu deney yöntemi, ince ve kaba agregaların eleme yoluyla danecik büyüklüğü dağılımının belirlenmesini kapsamaktadır. Elek analizi için, etüvde ortalama 105^0C'de zemin malzemesi gerektiğinden tüm malzemeler etüvde 24 saat kurutulmuştur. Elek analizine başlanılmadan önce numunelerin ağırlığı tartılmıştır. Numunelere, sadece kil ve silt danelerinin geçebildiği 0.075 mm. açıklıklı 200 no'lu eleğe yerleştirilerek, eleğin altından akan su berraklaşana yıkama işlemi yapılmıştır. Eleğin üstünde kalan numune tekrar etüvde kurutularak tartılmıştır ve ince danelerin ağırlığı ve yüzdesi hesaplanmıştır. Kuruttuğumuz numuneye en büyük açıklıklı elek en üstte olacak şekilde üst üste yerleştirilmiş eleklerden eleme işlemi yapılmıştır (3/8#, 4#, 8#, 16#, 30#, 50#, 100# ve 200#). Eleme işlemi sonrasında elekler sıra ile çıkartılarak elekler üzerinde kalan numuneler tartılmıştır ve deney föyüne işlenmiştir. Bu deney için standartlar Amerikan Standartları Enstitüsü (American Society of Testing and Materials) tarafından ASTM D422 kodlu standardında sunulmuştur. Deney yapılırken bu standarda uyulmuştur.

Şekil 4.1'de Numune 3 olarak adlandırılan numune için elek analizi değerleri yer almaktadır. Görüldüğü üzere 200 no'lu elek üstü kalan numune yüzdesi sadece %28,65 olarak ortaya çıkmış ve bunun %15,36'sının çakıl geri kalanının ise kum olduğu görülmüştür.

							500
Elek no	**D(mm)**	**Elek üstü (g)**	**Elekten geçen (g)**	**Geçen yüzdesi (%P)**			
3"	75	0	500	100,00	*Çakıl Yüzdesi (%)=*	***15,36***	
11/2"	37,5	0	500	100,00	*Kum Yüzdes, (%)=*	***13,29***	
3/4"	19	25,51	474,49	94,90	*Silt-Kil Yüzdesi (%)=*	***71,35***	
3/8"	9,51	28,06	446,43	89,29			
4	4,75	23,22	423,21	84,64			
8	2,36	20,4	402,81	80,56			
16	1,18	13,7	389,11	77,82			
30	0,6	11,09	378,02	75,60			
50	0,3	6,72	371,3	74,26			
100	0,15	8,85	362,45	72,49			
200	0,075	5,71	356,74	71,35			
	0,053			67,55			
	0,038			65,30	**<200 toplam geçen:**	**71,35**	
	0,027			64,18	**Kil (%)=**	**36,03**	
	0,017			63,05	**Silt (%)=**	**35,32**	
	0,012			59,67	**Toplam=**	**71,35**	
	0,009			57,42			
	0,006			54,04			
	0,005			51,79			
	0,004			49,54			
	0,002			36,03			
	0,001			27,02			

Şekil 4.1. Numune 3'ün Elek Analizi Deney Föyü

Permeabilite deneyleri yorumlanırken ince dane oranı önemli bir etken olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple elek analizi sonucunda numuneler için ortaya çıkan ince dane oranları Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Numuneler için bulunan değerlerin en az %71,35 ve en çok %96,17 olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4.1. Zeminlerin ince dane içeriği

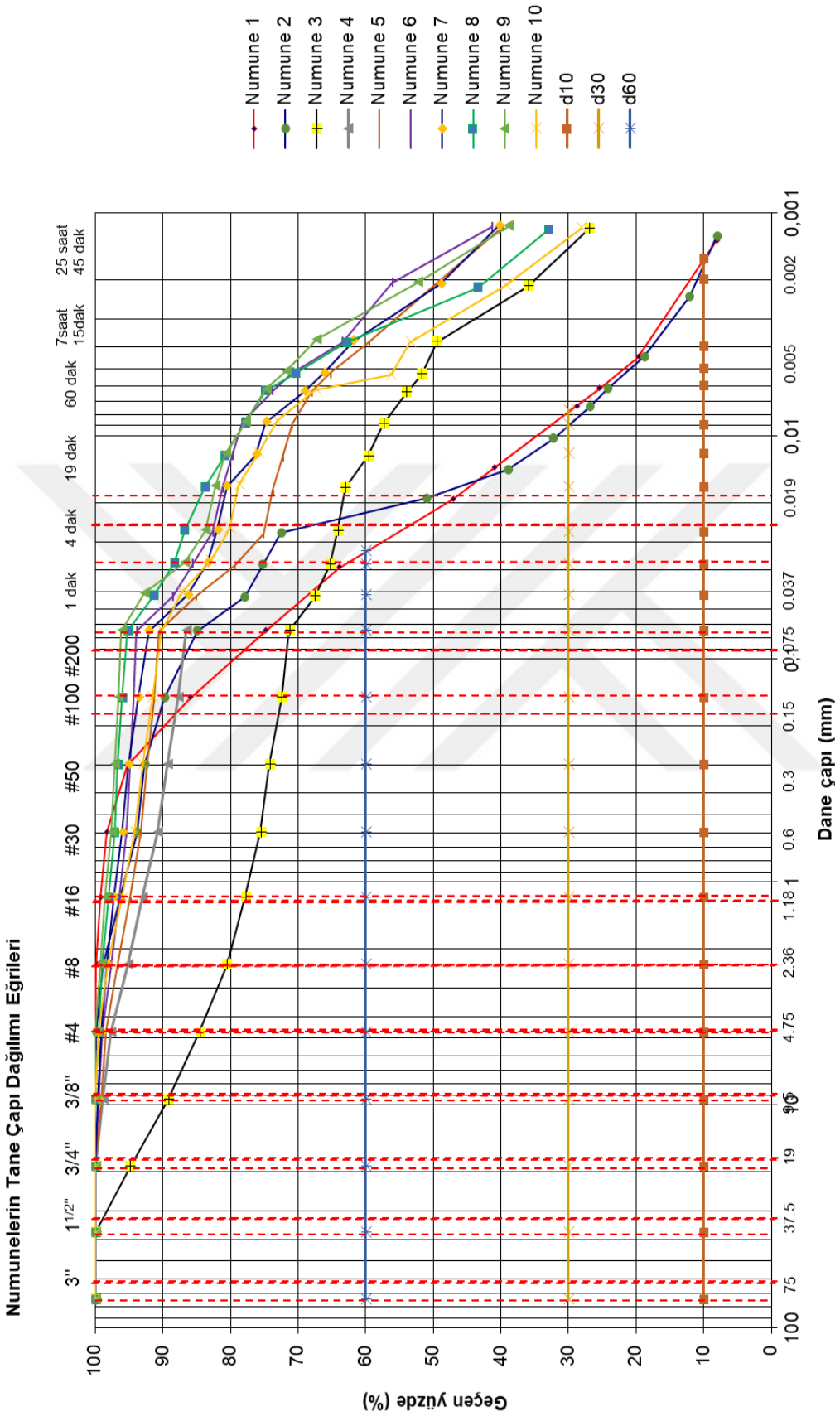
Numune No.	İnce Dane Oranı (%)
1	74,87
2	84,95
3	71,35
4	86,52
5	90,58
6	93,92
7	92,1
8	95,25
9	96,17
10	90,24

Elek analizi sonucunda zeminin 200 no'lu eleğe kadar olan granülometri eğrisi elde edilir. Granülometri eğrisinin geri kalanı hidrometre deneyi sonucunda elde edilir. Eğrinin genel eğilimi zemin bileşimdeki dane çaplarını kapsar. İyi derecelenmiş zemin, kötü derecelenmiş bir zemine göre daha kuvvetli ve sağlamdır. Zeminlerin granülometri özelliklerinden en önemli danelerin %10'nun geçtiği efektif çap D_{10} ve %30 ile %60 geçtiği D_{30} ve D_{60} çaplarıdır. D_{10}, D_{30} ve D_{60} değerlerine göre üniformluk katsayısı C_u ve derecelenme katsayısı C_c değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{4.1}$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \tag{4.2}$$

Numunelerin granülometre eğrileri Şekil 4.2.'de görülmektedir. Sadece 2 numune için D_{10} ve sadece 4 numune için D_{30} değerleri hesaplanabilmiştir.



Şekil 4.2. Numunelerin Dane Çapı Dağılımı Eğrileri

4.2. Kıvam Limitleri

Bu deney yöntemleri, zeminlerin ince daneli fraksiyonlarını karakterize etmek için çeşitli mühendislik sınıflandırma sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olarak kullanılır. Zeminlerin likit limiti, plastik limiti ve plastisite indisi, tek tek ya da birlikte, mühendislik davranışları ile ilişkilendirilecek sıkıştırılabilirlik, hidrolik iletkenlik (geçirgenlik), büzülme-şişme ve kesme dayanımı gibi diğer zemin özellikleri ile birlikte yaygın olarak kullanılır. Bir zeminin likit limiti, plastik limiti ve su içeriği, bağıl yoğunluğunu veya likidite endeksini ifade etmek için kullanılabilir. Bu deney için standartlar Amerikan Standartları Enstitüsü (American Society of Testing and Materials) tarafından ASTM D4318 kodlu standardında sunulmuştur. Deneyler yapılırken bu standarda uyulmuştur.

4.2.1. Likit limit

Likit limit, zeminin likit safha ile plastik safha arasındaki sınır su muhtevası değeri olarak tanımlanmaktadır. Casagrande aleti kullanılarak yapılan likit limit deneyinde kullanacağımız zemin numuneleri önce etüvde kurutulmuş ve sonrasında 40 no'lu elekten geçirilmiştir. Zemin macun kıvamına gelene kadar saf su ile karıştırıp Casagrande aletine yerleştirilmiştir. Casagrande aletinin özel bıçağı ile numunenin tam ortasından, zemin tabanından göz kararı ile 2 cm oyuk açılmıştır. Yaklaşık 2 devir/sn hızla çalışan Casagrande aleti mekanizması sayesinde 1 cm yükseğe çıkıp düşmektedir. Bu işleme oyuk yaklaşık olarak 13 mm birleşene kadar edilmiş ve bu miktar gözlendiği anda deney durdurulmuş ve vuruş sayıları deney föyüne kaydedilmiştir. Örnek numune alınarak su muhtevası hesabı için gerekli ölçümler alınmıştır. Her numune için artan su muhtevalarıyla en az 3 defa tekrarlanmıştır. Deney sonu numunelerden alınan örnekler bir gün etüvde bekletilerek ertesi günü su muhtevası değerleri hesaplanmıştır. Vuruş sayılarına karşılık gelen su muhtevası-vuruş sayısı grafiği çizilmiştir. Grafikte 25 vuruş sayısına karşılık gelen değer likit limit değeridir.

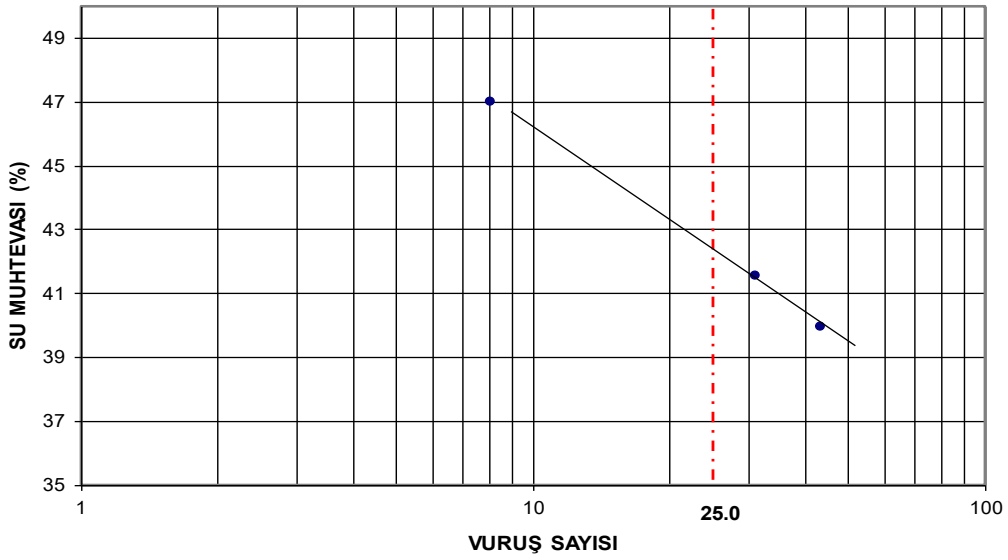
4.2.2. Plastik limit

Plastik limit, plastik safha ile yarı-katı safha arasındaki sınır su muhtevası değeridir. Etüvde kurutulan zemin numuneleri 40 no'lu elekten geçirilerek deneye başlanmıştır.

Numuneler plastik kıvama gelene kadar saf su ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra cam levha üzerinde avuç içi ile göz kararı 3 mm çaplı silindirler oluşturulmuştur. Oluşturulan silindirlerde çatlak görüldüğünde deney sonlandırılmış ve su muhtevaları alınmıştır. Bu su muhtevası değerleri zeminin plastik limit değeridir. Numune 1'e ait kıvam limitleri deney föyü Şekil 4.3.'de gösterilmiştir.

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ		**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**		İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI	
Proje:				Detay:	
Numune no:	**1**	Sondaj/Kuyu no:		Derinlik(m):	
Havada kurutulan		Deneyi yapan:		Tarih:	
Etüvde kurutulan		Hesaplayan:		Tarih:	
Doğal		Kontrol:		Tarih:	

	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	
Kap no	12	24	26	21	15	
Vuruş sayısı			**43**	**31**	**8**	
Kap+yaş zemin (g)	21,5	21,4	24,33	25,73	31,39	
Kap+kuru zemin (g)	20,0	19,9	21,51	22,44	25,70	
Kap ağırlığı (g)	14,1	14,3	14,46	14,53	13,60	
Su kütlesi (g)	1,6	1,5	2,82	3,29	5,69	
Kuru zemin kütlesi (g)	5,9	5,6	7,05	7,91	12,10	
Su muhtevası (%)	26,3	26,2	**40**	**42**	**47**	
Ortalama plastik limit	**26**		**43,4**			



Likit Limit (LL)	**43**	Plastik Limit (PL)	**26**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**17**

Şekil 4.3. Numune 1'in likit limit ve plastik limit deney föyü

4.3. Özgül Gravite

Özgül ağırlık, zeminin dane birim hacim ağırlığının 20°C sıcaklığındaki suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Diğer bir tanım olarak; danelerin kuru ağırlığının, daneler ile aynı hacimdeki ve 20°C sıcaklığındaki suyun ağırlığına oranıdır. G_S (Specific Gravity) sembolü ile gösterilir. Birimi yoktur, boyutsuzdur. Özgül ağırlık değerine genellikle; konsolidasyon deneyinde boşluk oranlarının hesaplanması için ve hidrometre veya pipet deneylerinde dane çaplarının ve toplam geçen yüzdelerin hesaplanması için gerek duyulmaktadır. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D422-63 standartlarına uyulmuş ve uygulanmıştır.

Numunelerin özgül ağırlığı (G_S) bir piknometre ve vakum cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Piknometre şişesi yıkandıktan sonra kapağı ile beraber etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır (W_1). Etüvde kurutulmuş bir miktar zemin numunesi piknometre şişesine doldurup ve tartılmıştır (W_2). Piknometre şişesi üç aşamada doldurulacak şekilde havası alınmış saf su ilave edilerek içerideki hava vakum uygulanarak dışarıya atılmış ve tekrar tartım yapılmıştır (W_3). Daha önceden piknometre içerisine sadece su doldurularak tartım yapılmıştır (W_4).

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{W_4 + (W_2 - W_1) - W_3} \tag{4.3}$$

Özgül Gravite Deneyi	
Deney no	3
Piknometre no	2
W_1 (Piknometre ağ.(gr))	124,21
W_2 (Kuru zemin ağ. (gr))	75
W_3 (Su+zemin+pik. ağ. (gr))	705,27
W_4 (Su+pikno. ağ. (gr))	657,75
Özgül Ağırlık	2,73

Şekil 4.4. Numune 3'ün Özgül Gravite Deney Föyü

Tüm numuneler için tanımlama deneyleri için özet sonuçlar Çizelge 4.2.'de yer almaktadır. Numunelerin 6 tanesi yüksek plastisiteli kil, 1 tanesi düşük plastisiteli kil, 1 tanesi yüksek plastisiteli silt ve 2 tanesi yüksek plastisiteli kil-silt olarak tanımlanmıştır. Likit

limit değerleri en düşük %43 en yüksek ise %68,8 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde plastisite indisleri için minimum değer 17 maksimum değer ise 35,90 olarak hesaplanmıştır. Özgül gravite değerleri ise 2,65 ile 2,80 bandında yer almıştır. Zemin grup sembolleri USCS standartlarına göre belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Zemin Tanımlama Deney Sonuçları

Numune No	Dane Dağılımı		Kıvam Limitleri			Özgül Gravite	Zemin Grup Sembolü
	<0.075 mm	<4.75 mm	LL %	PL %	PI %		
1	74,9	100	43	26	17	2,65	CL
2	80,71	93,32	60,2	31	29,2	2,77	MH
3	71,35	84,65	52,5	27,3	25,2	2,73	CH
4	86,53	97,72	54,3	26	28,3	2,76	CH
5	90,58	98,47	68,8	31,8	37	2,77	CH
6	93,92	98,98	60,50	30,70	29,80	2,75	CH-MH
7	92,10	99,06	64,00	28,10	35,90	2,78	CH
8	95,25	99,48	60,00	29,20	30,80	2,75	CH
9	96,17	100,00	56,50	25,10	31,40	2,80	CH
10	90,24	99,53	62,30	31,00	31,30	2,79	CH-MH

4.4. Kompaksiyon

Kompaksiyon, mekanik enerji uygulamak suretiyle zemin yoğunluğunun arttırılması işlemidir. Diğer bir ifade ile zemin içindeki hava hacminin azaltılması suretiyle danelerin daha yakın hale getirilmesi işlemidir. Kompaksiyon derecesi, kuru yoğunluk veya birim ağırlık esasında dikkate alınır. Sıkışma sonrası zeminin en büyük kuru yoğunluğu; su muhtevası, kompaksiyon enerjisi ve zemin tipine bağlıdır.

Kompaksiyon karakteristikleri iki parametre ile tanımlanır. Bunlar en büyük kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasıdır. Bu iki parametre zemin için değişmez bir özellik değildir. Uygulanan enerjiye göre değişiklik gösterir. Optimum su muhtevası değişik

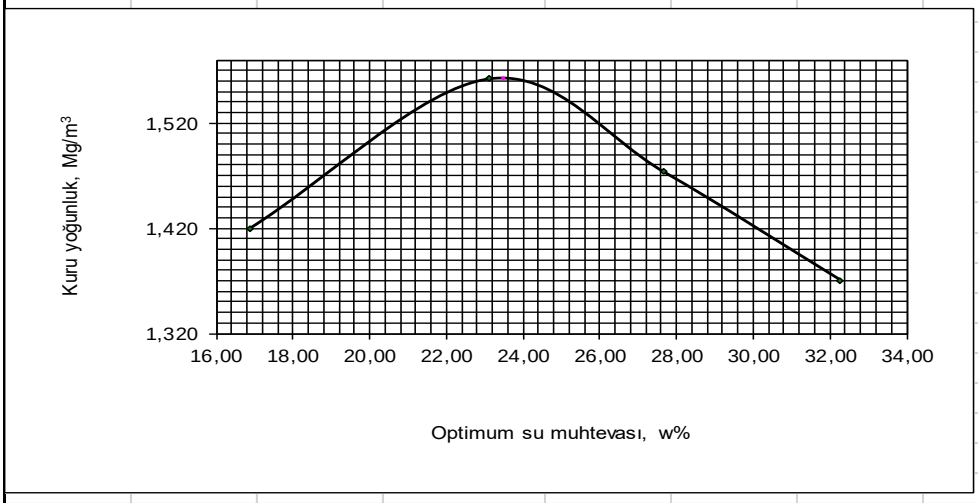
zeminler için birbirinden farklı olduğu gibi, aynı zemin içinde kompaksiyon yöntemine ve uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Proctor kompaksiyon deneyi olarak bilinen deneylerde değişik su muhtevalarındaki zemin standart boyutlardaki kalıp içerisinde belirli sayıda tabakalar halinde ve her tabaka üzerine standart enerji uygulanarak sıkıştırılır. Standart Proctor Deneyi ve Modifiye Proctor Deneyi olmak üzere iki ayrı deney bulunmaktadır. Numunelerin hepsine Standart Proctor deneyi uygulanmıştır ve deneylerde ASTM-D1557 ve ASTM-D698 standartlarına uyulmuştur.

Zemin numuneleri kurutulduktan sonra 4 no'lu elekten elenen numunelerden yeterli miktarlar alınmıştır. Kuru ve ağırlığı bilinen zemin numunelerine belirli su muhtevası değerlerine getirilecek şekilde su eklenmiştir. Deneyde kullanacağımız moldun ağırlığı deneye föyüne kaydedilmiştir. Zemin numuneleri, molda 3 tabaka halinde dökülerek her tabaka tokmak ile 25 kere 305 mm yükseklikten serbest düşürülerek sıkıştırılmıştır. İçi dolu moldun ağırlığı da ölçülüp ve deney föyüne not edilmiştir (Mold + ıslak numune). Molddaki zeminler örselenmeden çıkarılıp ve 20-30 gr'lık alttan ve üstten iki zemin örneği alınarak darası bilinen numune kaplarına konularak ağırlığı not edilmiştir (kap + ıslak numune). Sıkıştırılmış zeminler leğene boşaltılır ve bir miktar su eklenerek tekrar karıştırılmıştır. Deneyler, mold + ıslak numune ağırlığı maksimum değere ulaşıncaya kadar, en az 3-4 kere tekrarlanmıştır. İçi zemin dolu numune kapları etüvde 24 saat boyunca bekletilip ve kuru ağırlıkları not edilmiştir (kap + kuru numune). Şekil 4.5.'te kompaksiyon deneyi için örnek deney föyü yer almaktadır. Numune 3 için deney sonucu bulunun maksimum kuru yoğunluk 1,563 Mg/m^3 ve optimum su muhtevası %23,50 olarak hesaplanmıştır.

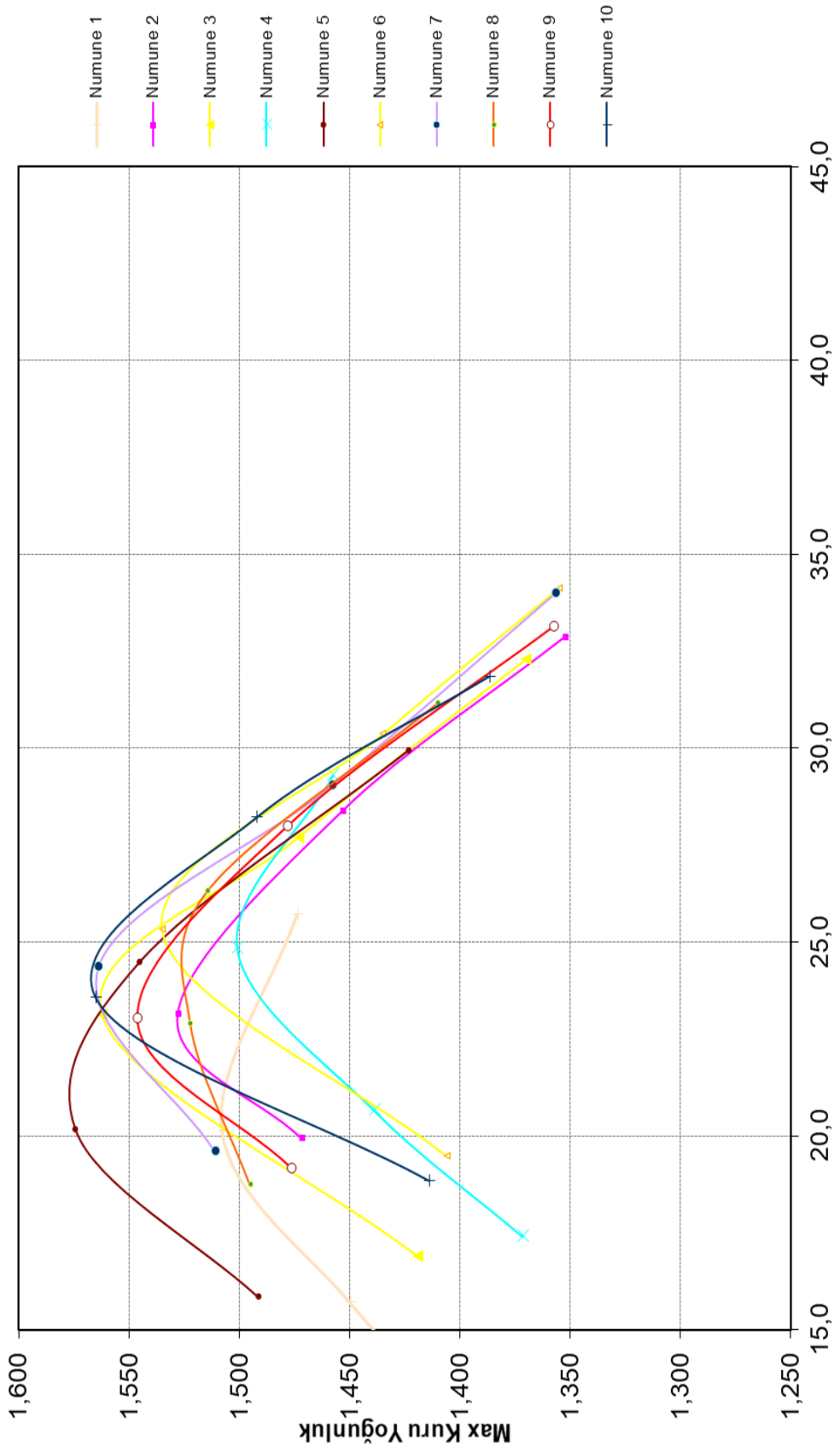
Tüm numuneler için kompaksiyon deneyleri sonucu Şekil 4.6.'da gösterilmektedir. 2 numune hariç optimum su muhtevası değerleri yaklaşık %22-23 olarak ortaya çıkmış diğer 2 numune için ise bu değer %21 civarındadır. Maksimum kuru yoğunluk değerleri ise en az yaklaşık 1.50 Mg/m^3 olarak ortaya çıkarken en çok 1.57 Mg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Kompaksiyon karakteristikleri bakımından numuneler benzerlik göstermektedir. Bütün numuneler için gerçek değerler ise Çizelge 4.3.'te sunulmuştur.

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ				Dizayn USBR	5500
NUMUNE NO.	3	PROJE			AMAÇ		
TEST	TARİH	HESAP	TARİH		KONTROL	TARİH	
Vuruş Sayısı :		Tabaka Sayısı :			Düşme Yüksekliği :		
Tokmak Ağırlığı :				Mold Hacmi :	944 cm^3		
Numune No.		1	2	3	4	5	6
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	3500	3750	3710	3645		
Mold	(g)	1934	1934	1934	1934		
Islak numune	(g)	1566	1816	1776	1711		
Islak yoğunluk	(g)	1,659	1,92	1,88	1,81		
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1		2		3	
Kap + ıslak numune	(g)	213,43		297,14		264,67	
Kap + kuru numune	(g)	183,97		243,19		209,30	
Kap	(g)	9,43		9,83		9,26	
Su	(g)	29,46		53,95		55,37	
Kuru numune	(g)	174,54		233,36		200,04	
Su muhtevası	(%)	16,88		23,12		27,68	
	ort	***16,88***		***23,12***		***27,68***	
Kap No.		4		5	5		
Kap + ıslak numune	(g)	218,41					
Kap + kuru numune	(g)	166,74					
Kap	(g)	6,64					
Su	(g)	51,67					
Kuru numune	(g)	160,10					
Su muhtevası	(%)	32,27					
	ort	***32,27***					
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,419***	***1,562***	***1,473***	***1,370***		
Su muhtevası	(%)	***16,88***	***23,12***	***27,68***	***32,27***		



Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,563** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **23,50**

Şekil 4.5. Numune 3'ün Kompaksiyon Deney Föyü



Şekil 4.6. Numunelerin Maksimum Kuru Yoğunluk-Optimum Su Muhtevası Eğrileri

Çizelge 4.3. Numunelerin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Yoğunlukları

Numune No.	w_{opt} (%)	ρ_{dmax}(g/cm^3)
1	20,1	1,508
2	23,1	1,528
3	23,5	1,563
4	25	1,501
5	21,2	1,578
6	25,6	1,535
7	24	1,565
8	24,8	1,526
9	23,2	1,546
10	24	1,568

4.5. Permeabilite

Zeminlerin permeabilitesinin yani geçirgenliğinin tanımı ve laboratuvarda permeabilite katsayısının nasıl bulunduğu çalışmanın önceki bölümlerinde anlatılmıştı. Laboratuvarda yapılan ve tüm numunelere uygulanan Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi'nde ASTM D-5084 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyleri numuneler doygunluğa getirildikten sonra yaklaşık 2-3 hafta sürmüştür. Numuneler doygunluk süresi ise çok farklılıklar göstermektedir. Bu süreçte düzenli olarak kayıt alınmıştır.

Deneylerde kullanılan ekipman Şekil 4.7. ve 4.8.'de yer almaktadır. Örnek bir deney föyü de takip edene şekilde sunulmuştur. Föyde dikkat çekilmesi gereken bir nokta belli bir süre geçtikçe su ilavesi yapıldığıdır. Bu günler için permeabilite katsayısı hesaplanmamıştır. Buna örnek 10.11.2017 okuma gösterilebilir.



Şekil 4.7. Düşen seviyeli permeabilite deneyi



Şekil 4.8. Su seviyesi ve okuma cetveli

$$k = [2{,}3 \,.\, a \,.\, L/(A.\Delta T)].\log(\frac{h0}{h1}) \quad (4.4)$$

a = 0,19634954 cm^2		A = 78,5398163 cm^2		
Tarih	Saat	Okuma (cm)	t (dk)	k (cm/sn)
3.11.2017	15:50	100		
6.11.2017	11:06	62,2	4036	1,55001E-08
7.11.2017	13:33	53,4	1587	4,80066E-08
7.11.2017	16:15	52,7	162	4,06805E-08
9.11.2017	10:23	42,9	2528	4,06473E-08
10.11.2017	15:15	38,5	1732	3,12044E-08
10.11.2017	15:15	102		
13.11.2017	10:34	68,4	4039	4,94122E-08
13.11.2017	14:50	67,4	256	2,87330E-08
14.11.2017	13:22	60,3	1352	4,11198E-08
14.11.2017	16:27	59,4	185	4,05973E-08
15.11.2017	08:02	55	935	4,11094E-08
15.11.2017	10:57	54,3	175	3,65559E-08
15.11.2017	13:08	53,8	131	3,52686E-08
15.11.2017	16:35	53,1	207	3,15986E-08
16.11.2017	09:56	48,9	1041	3,95327E-08
16.11.2017	13:05	48,5	189	2,17047E-08
16.11.2017	16:50	47,9	225	2,76318E-08
17.11.2017	09:50	44,6	1020	3,49517E-08
17.11.2017	13:05	44,3	195	1,72862E-08
17.11.2017	16:30	43,9	205	2,20980E-08
20.11.2017	10:57	35	3987	2,83812E-08
20.11.2017	15:42	34,8	285	1,00425E-08
21.11.2017	10:42	31,8	1140	3,94956E-08
			k(ort)	**3,27981E-08**

Şekil 4.9. Numune 3'ün düşen seviyeli permeabilite deneyi okumaları ve permeabilite katsayısının hesabı

Permeabilite deney sonuçları Çizelge 4.4.'te yer almaktadır. Numune 3'ün permeabilite deney okumaları ve permeabilite katsayısının hesabı Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Günler süren okumalar sonrası hesaplanan k değerlerinin ortalaması alınarak tek bir değer hesaplanmıştır. Deney sonu numuneler alınarak su muhtevası değerleri hesaplanarak doygunluk kontrolü yapılmıştır. Çizelgede de görüldüğü üzere doygunluk değerleri %100 olarak ortaya çıkmıştır. Bir numune hariç tüm numunelerin permeabilite katsayıları 10^{-8} cm/s mertebelerindeyken tek bir numune 10^{-7} cm/s mertelerinde olduğu görülmüştür. Bunun dışında her numune için boşluk oranı da çizelgede sunulmuştur.

Bulunan ortalama permeabilite katsayılarının literatürde belirtildiği gibi Çizelge 1.1 ile uyumlu olduğu görülmüş ve deneylerin başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.4. Numunelerin düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları

Numune No.	k (cm/sn)	$w_{deneysonu}$ (%)	e (boşluk oranı)	S (Doygunluk,%)
1	3,39490E-08	25,1	0,67	100
2	4,54323E-08	28,2	0,78	100
3	3,56967E-08	24,9	0,68	100
4	1,68044E-08	28,3	0,78	100
5	8,96065E-08	27,9	0,77	100
6	5,12549E-08	28,7	0,79	100
7	3,47182E-08	26,8	0,75	100
8	2,99589E-08	27,7	0,76	100
9	8,59276E-08	30,7	0,86	100
10	2,70188E-07	30,1	0,84	100

4.6. Konsolidasyon

Killi zeminler yapı yükleri sebebiyle ortaya çıkan ilave gerilmeler altında, zamana bağlı olarak, bünyelerindeki suyu dışarı atarak boşlukların oluşması ve yük altında zemin danelerinin yer değişmesi veya sıkışmaları sonucunda oturmaya neden olması beklenmektedir. Bu olay, konsolidasyon olarak ifade edilir. Bir zeminin tek yönlü konsolidasyon sırasındaki davranışını belirleyen özellikleri, laboratuvarda odeometre deneyi olarak adlandırılan konsolidasyon deneyi ile belirlenir. Bu deney, yanal deformasyonu önlenmiş olan suya doygun disk biçiminde örselenmemiş bir zemin numunesinin, alt ve üst yüzeyinden drenaj sağlanarak, düşey ve eksenel bir basınç altında konsolidasyon miktarı ve hızının ölçümü ile ilgili bir deneydir. Deneyin değerlendirmesi Terzaghi'nin Tek Boyutlu Konsolidasyon Teorisi kabulleri esasında yapılmıştır.

Geniş alanlar kaplayan zemin katmanları düşey olarak yüklendiğinde sıkışma bir boyutlu olarak kabul edilebilir. Laboratuvarda bir boyutlu sıkışmayı temsil etmek için zemin ödometre veya konsolidometre adı verilen özel bir cihaz içerisinde sıkıştırılır. Halka, yatay deformasyonlara izin vermeyecek ölçüde rijittir. Numunenin altında ve üstünde konsolidasyon işlemi sırasında drenaja izin veren poroz taşlar bulunmaktadır. Bir boyutlu ödometre (konsolidasyon) deneyi ilk olarak Terzaghi tarafından sunulmuştur.

Arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak, laboratuvardaki doygun zemin numunelerinin yatay genişlemesini engellemek için numuneler çelik halkaların içine yerleştirilmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzlerine konan poröz taşlar, zemin içindeki suyun düşey doğrultuda hareketle dışarı çıkmasını sağlamaktadır. Uygulanan sabit yük altında meydana gelen düşey şekil değiştirmeler deformasyon okuma saatinden, zamana bağlı olarak sürekli ölçülmüştür. Bu deney için standartlar Amerikan Standartları Enstitüsü (American Society of Testing and Materials) tarafından ASTM D2435 kodlu standardında sunulmuştur. Yapılan konsolidasyon deneylerinde bu standarda uyulmuştur.

Her numuneye optimum su muhtevasında ve %15 su muhtevasında olmak üzere iki adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. %15 su muhtevasında numune hazırlanması gereksinimi şu yüzden ortaya çıkmıştır:

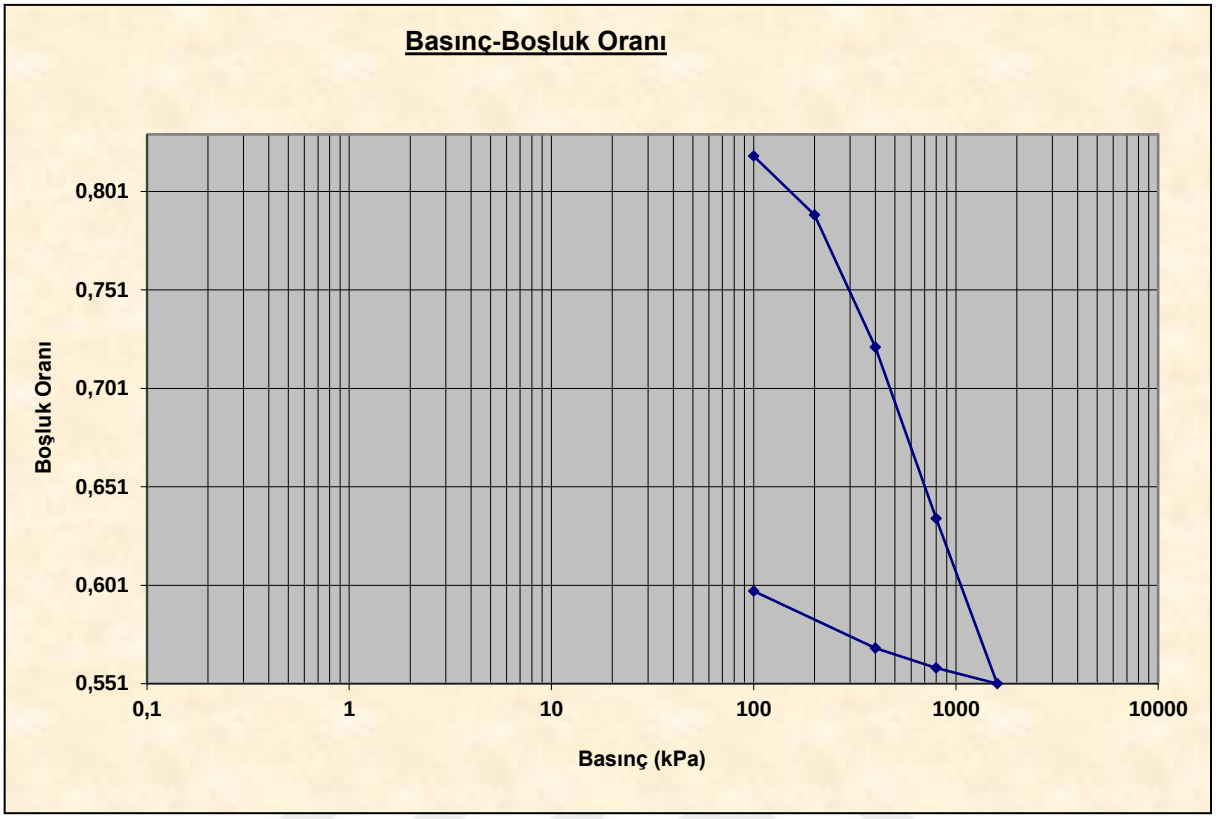
1. Optimum su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon numunesi için boşluk oranı e deney başlangıcı hariç hiçbir zaman permeabilite deney numunesinin boşluk oranına sahip olmayacaktır. Çünkü her yük seviyesinde numune sıkışacak ve daha düşük bir boşluk oranı elde edilecektir.

2. Deney sonuçlarının birebir kıyasının yapılabilmesi için aynı boşluk oranlarında iki deneyden gelen k katsayılarının elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için optimum su muhtevasından daha düşük bir değerde numuneyi hazırlamak veya daha az bir enerji uygulamak gerekmektedir.

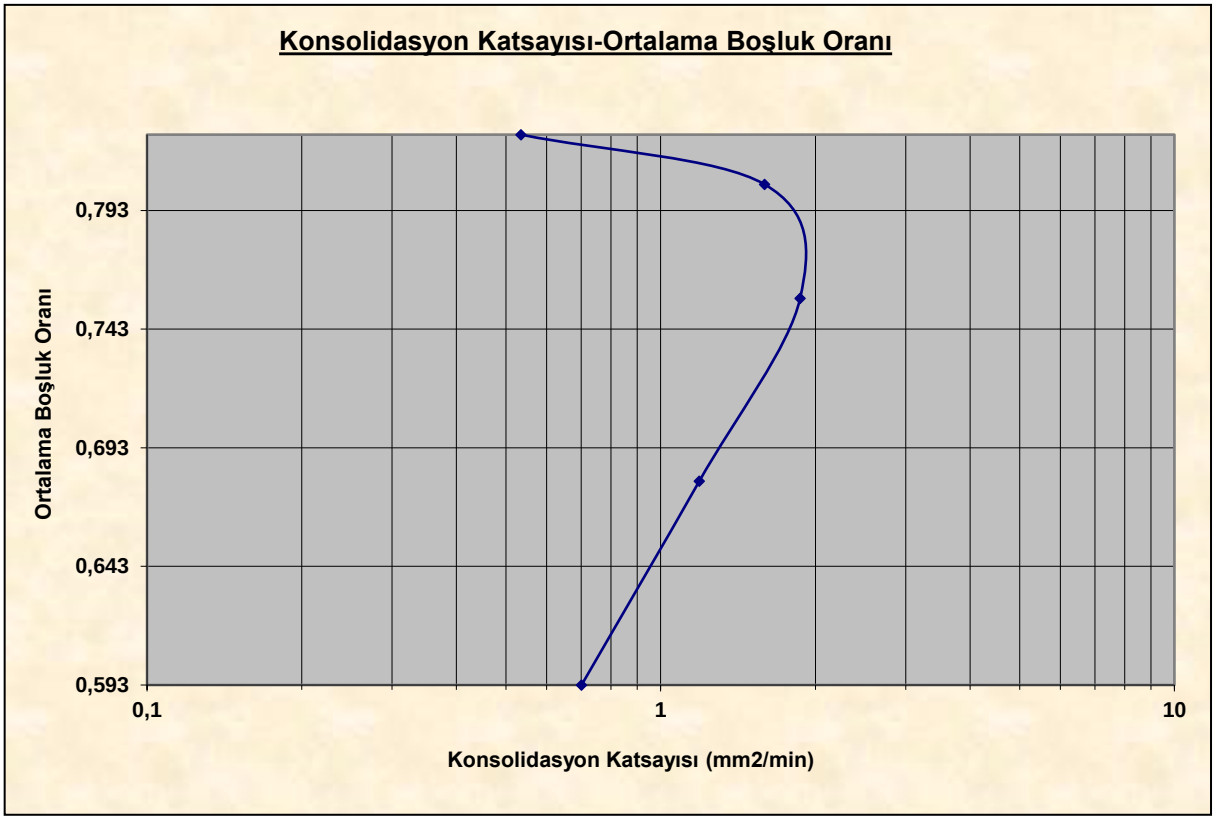
Bu sebeple numuneler için optimum su muhtevalarının %20-23 değerleri arasında değiştiğini göz önünde bulundurarak %15 su muhtevasında numunelerin hazırlanması uygun görülmüştür. Laboratuvarda kullanılan deney seti Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen veriler ve bu verilerden elde edilen konsolidasyon katsayıları Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de sunulmuştur. Bu grafikler otomatik olarak kullanılan yazılım tarafından oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. Konsolidasyon deney düzeneği



Şekil 4.11. Numune 3'ün basınç-boşluk oranı grafiği



Şekil 4.12. Numune 3'ün konsolidasyon katsayısı-ortalama boşluk oranı grafiği

İki set konsolidasyon deneyleri için sonuçlar Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.'da gösterilmektedir. Her çizelgede 5 farklı yükleme değeri için k değerleri yer almaktadır. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler göz önünde bulundurulduğunda 100 kPa yükleme altında k katsayıları 10^{-7}-10^{-9} cm/s mertebelerinde, 200 kPa yükleme altında k katsayıları 10^{-6}-10^{-7} cm/s mertebelerinde, 400 kPa yükleme altında 10^{-6}-10^{-8} cm/s mertebelerinde, 800 kPa yükleme altında 10^{-7}-10^{-8} cm/s mertebelerinde ve nihayetinde 1600 kPa yükleme altında 10^{-7}-10^{-8} cm/s olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4.5. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları

	Uygulanan Yüklere Göre Permeabilite Katsayısı (k) (cm/sn)				
Numune No.	**100 kPa**	**200 kPa**	**400 kPa**	**800 kPa**	**1600 kPa**
1	9,5038E-09	1,2574E-07	8,4200E-08	2,3567E-07	9,3833E-08
2	5,7460E-09	6,1516E-07	1,2581E-06	4,5803E-07	1,0620E-07
3	3,3190E-07	3,3178E-06	2,8897E-06	2,1747E-06	3,7857E-07
4	1,1463E-07	3,7811E-06	4,8638E-06	2,8885E-07	6,1313E-08
5	6,4260E-08	3,8422E-06	1,2128E-06	4,0860E-07	7,0671E-08
6	3,0967E-06	1,0774E-07	9,0102E-07	2,1664E-07	7,5210E-08
7	3,3153E-08	4,9864E-07	2,4972E-06	3,9771E-07	8,1081E-08
8	1,5154E-07	9,9720E-06	3,5196E-06	6,0589E-06	2,9756E-07
9	3,4837E-09	8,2373E-06	3,8091E-06	7,4727E-07	1,4853E-07
10	5,0202E-08	1,6244E-05	3,6326E-06	1,0108E-06	1,5428E-07

%15 su muhtevasında sıkıştırılan numuneler ile optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin k değerleriyle karşılaştırıldığında farklı sonuçların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bazı yükleme seviyelerinde mertebeler aynı olsa da aynı numune için değerlerde farklılıklar gözlenmiştir. Bu durum beklenen bir durumdu. Fakat farklı su muhtevalarında sıkıştırmanın temel amacı deneylerden hangisinin permeabilite katsayısının permeabilite deneyinden çıkan k katsayısı ile daha iyi korele olduğuydu bu da sonuç ve tartışma kısmında yorumlanmıştır.

Çizelge 4.6.'ya bakıldığında 100 kPa yükleme altında k katsayıları 10^{-7}-10^{-9} cm/sn mertebelerinde, 200 kPa yükleme altında k katsayıları 10^{-5}-10^{-7} cm/s mertebelerinde, 400 kPa yükleme altında 10^{-6}-10^{-8} cm/s mertebelerinde, 800 kPa yükleme altında 10^{-6}-10^{-7} cm/s mertebelerinde ve nihayetinde 1600 kPa yükleme altında 10^{-7}-10^{-8} cm/s olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4.6. %15 su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları

	Uygulanan Yüklere Göre Permeabilite Katsayısı (k) (cm/sn)				
Numune No.	**100 kPa**	**200 kPa**	**400 kPa**	**800 kPa**	**1600 kPa**
1	9,5038E-09	1,2574E-07	8,4200E-08	2,3567E-07	9,3833E-08
2	5,7460E-09	6,1516E-07	1,2581E-06	4,5803E-07	1,0620E-07
3	3,3190E-07	3,3178E-06	2,8897E-06	2,1747E-06	3,7857E-07
4	1,1463E-07	3,7811E-06	4,8638E-06	2,8885E-07	6,1313E-08
5	6,4260E-08	3,8422E-06	1,2128E-06	4,0860E-07	7,0671E-08
6	1,4454E-08	1,0774E-07	9,0102E-07	2,1664E-07	7,5210E-08
7	3,3153E-08	4,9864E-07	2,4972E-06	3,9771E-07	8,1081E-08
8	1,5154E-07	9,9720E-06	3,5196E-06	6,0589E-06	2,9756E-07
9	3,4837E-09	8,2373E-06	3,8091E-06	7,4727E-07	1,4853E-07
10	5,0202E-08	1,6244E-05	3,6326E-06	1,0108E-06	1,5428E-07

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde; hedeflenen konuların başında düşen seviyeli permeabilite deneyleri ile konsolidasyon deneyi sonuçlarının kıyaslanıp, birbirleriyle ilişkilerinin olup olmadığı, düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayısının konsolidasyon deneyinden bulunan permeabilite katsayılarnın hangi yükleme aşamasında bulunan değer ile eşleştiği tartışılmıştır. İki deney sonucu bulunan değerlerin arasında bir bağlantı bulunsun ya da bulunmasın diğer parametrelere göre nasıl değiştiği yorumlanmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda bulunan korelasyonlar genellikle D_{10} ile tanımlanmıştır. Bunun yanında ince daneli zeminler için plastisite indisleri (PI) de tanımlamada önemli bir faktördür. Bu sebeple laboratuvar da bulunan permeabilite katsayılarının plastisite indisi (PI) ile ilişkisi de bu araştırmanın diğer bir amacı olacaktır. Aynı zamanda düşen seviyeli permeabilite deneyleriyle bulunan permeabilite katsayıları D_{10} çap değerlerinin bütün numuneler için elde edilememesi sebebiyle literatürde korelasyonlar için tanımlanan D_e efektif dane çapı ile karşılaştırılıp yorumlanacaktır.

5.1. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının konsolidasyon deneyinden bulunan permeabilite katsayılarıyla karşılaştırılması

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere her numuneye biri optimum su muhtevasında diğeri %15 su muhtevasında olmak üzere 2 set konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon yüklemeleri sırasıyla 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa ve 1600 kPa'dır. Her yüklemeden bir permeabilite katsayısı hesaplanmış böylelikle toplam 20 adet k değeri konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilmiştir.

İki farklı deney sonuçları kıyaslandığında, farklı deneylerden elde edilen permeabilite katsayılarının farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Yorum yaparken kolaylık olması açısından bir N katsayısı tanımlanmıştır. N katsayısı konsolidasyondan elde edilen permeabilite katsayısının düşen seviyeli permeabilite deneyinden elde edilen permeabilite katsayısına oranı olarak tanımlanmıştır. Grafiğin kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, k_{ort} sayısı 10^8 ile çarpılarak farklı yüklemeler için hesaplanan N değerleri ile k_{ort} değerleri için tüm grafikler hazırlanmıştır.

$$N = \frac{k_{konsolidasyon}}{k_{ort}} \tag{5.1}$$

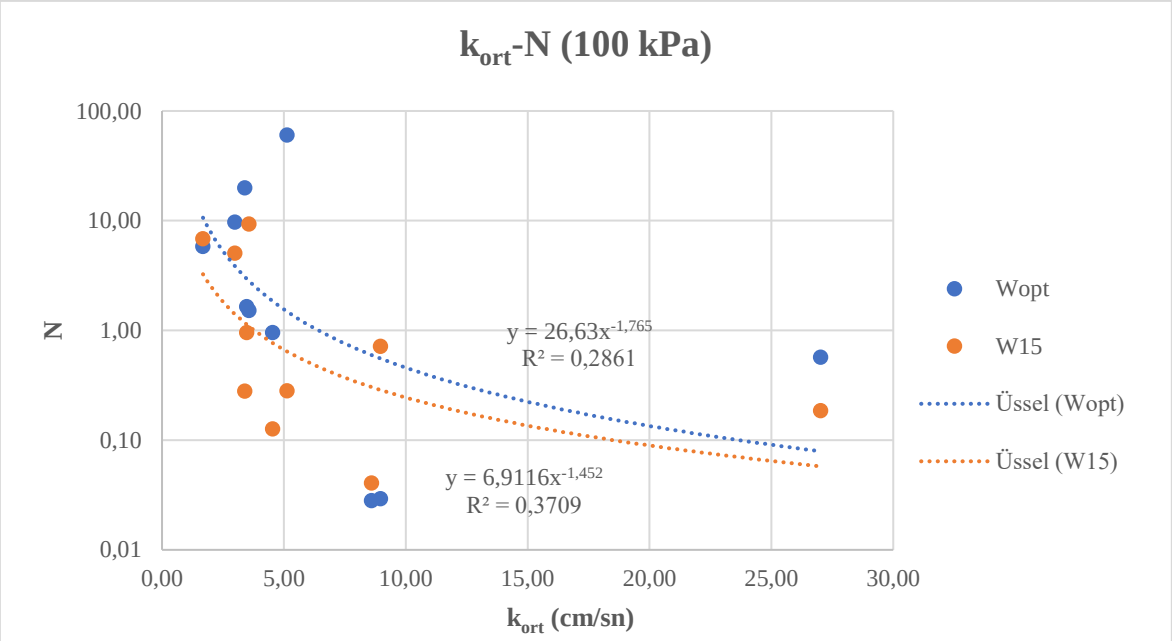
5.1.1. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 100 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{100}) karşılaştırılması

Çizelge 5.1.'de 100 kPa lık yükleme altında iki set konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerleri ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden bulunun k_{ort} değerleri sunulmuş ve N_1 ve N_2 değerlerinin nasıl hesaplandığı tablonun son iki kolonunda gösterilmiştir. N_1 değeri optimum su muhtevasında (w=opt) hazırlanan konsolidasyon numunesinden hesaplanan k değeri ile permeabilite deneyi sonucunda bulunan k katsayısının oranı olarak hesaplanırken, N_2 de kullanılan k değeri w=%15 su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon deneyi sonucunda bulunan k değerinin permeabilite deneyi sonucunda bulunan k değeri oranı olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.1. Şekil 5.1.'in hesap tablosu

Numune No.	k_{ort} (cm/sn)	k_{100} (cm/sn) (w=opt)	k_{100} (cm/sn) (w=%15)	k_{ort} x 10^8	$N_1 = k_{100}$ (w=opt) / k_{ort}	$N_2 = k_{100}$ (w=%15) / k_{ort}
1	3,39E-08	6,74E-07	9,50E-09	3,39	19,86	0,28
2	4,54E-08	4,34E-08	5,75E-09	4,54	0,96	0,13
3	3,57E-08	5,43E-08	3,32E-07	3,57	1,52	9,30
4	1,68E-08	9,75E-08	1,15E-07	1,68	5,80	6,82
5	8,96E-08	2,61E-09	6,43E-08	8,96	0,03	0,72
6	5,13E-08	3,10E-06	1,45E-08	5,13	60,42	0,28
7	3,47E-08	5,72E-08	3,32E-08	3,47	1,65	0,95
8	3,00E-08	2,90E-07	1,52E-07	3,00	9,69	5,06
9	8,59E-08	2,41E-09	3,48E-09	8,59	0,03	0,04
10	2,70E-07	1,54E-07	5,02E-08	27,02	0,57	0,19

Şekil 5.1.'de ise Çizelge 5.1.'de elde edilen k_{ort} değerleri ile N_1 ve N_2 değerleri çizdirilmiş ve her iki grafik için belli bir trendin olup olmadığını görebilmek amacıyla datayı en iyi şekilde ifade edebilmek amacıyla üstel fonksiyonlarla eğilim grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. 100 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği

Grafiğe bakıldığında; eğilimleri birbirine benzeyen iki eğri görmekteyiz. Eğriler arasında başlangıçtaki farkın büyük olmasına rağmen son bölümde eğrilerin arasındaki mesafenin azaldığı görülmektedir. Eğilim eğrileri birbirine yakın görünse de optimum su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayılarıyla %15 su muhtevasıyla yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayıları arasında farklardan dolayı N_1 ve N_2 katsayıların da farklılıklar vardır.

Her numune için N_1 ve N_2 katsayılarını detaylı bir şekilde incelenirse; 5 ve 9 numaralı numunelerin N_1 katsayısı aynı olmasına rağmen diğer numunelerde bu görülmemekle birlikte 1,4,6 ve 8 numaralı numunelerin N_1 katsayısı diğerlerine göre çok fazladır. N_2 katsayılarında ise; 3,4 ve 8 numaralı numunelerde katsayı farkı yine aynı şekilde çok fazla olmasına rağmen diğer numunelerin katsayıları birbirine yakın çıkmıştır. N_1 katsayısındaki farklılıklar ile N_2 katsayısındaki değişimler farklı numunelerde görüldüğü için bir ilişki kurmak mümkün değildir.

İki farklı data kümesi için çizilen iki eğilim eğrisi de başlangıçta fazlaca dağılmış datayı ortalama olarak iyi ifade etse de son iki nokta iki eğilim eğrisi için de iyi tahmin edilememiştir. İstatistikte çokça kullanılan R^2 değerleri de aslında bu yorumu desteklemektedir. İki R^2 değeri sırasıyla 0,312 ve 0,379 olarak hesaplanmış ve bu yükleme

aşamasında permeabilite deneyi sonucunda bulunan k değerleri ile konsolidasyon deneyleri sonucunda bulunan k değerleri arasında çok iyi bir korelasyonun olmadığı görülmüştür.

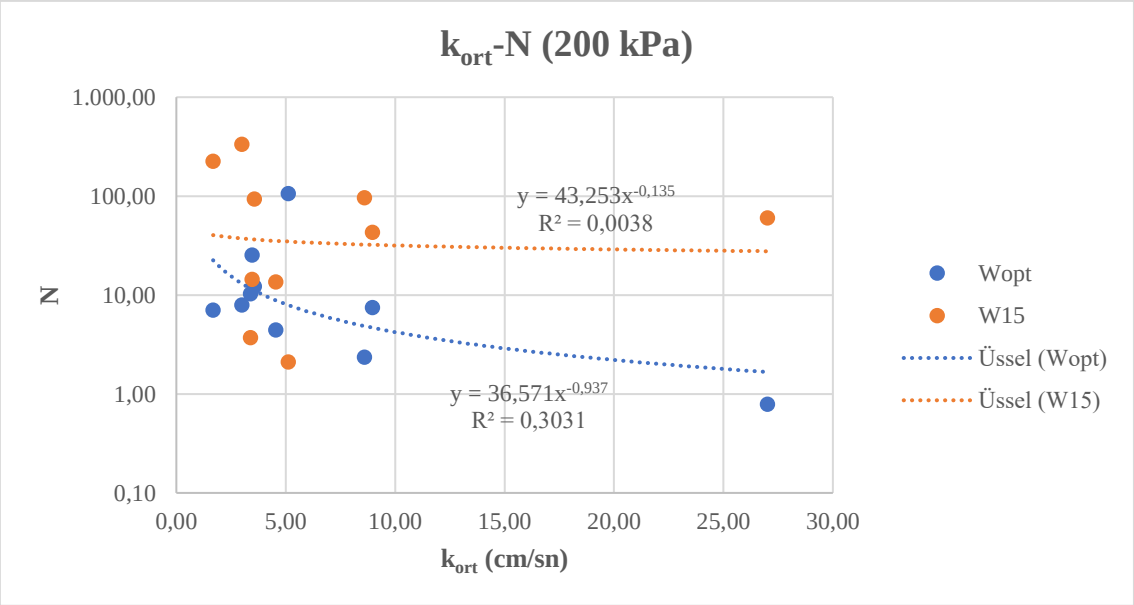
5.1.2. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile 200 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{200}) karşılaştırılması

Çizelge 5.2.'de ise 200 kPa'lık yükleme altında konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerleri ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden bulunun k_{ort} değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Şekil 5.2.'nin hesap tablosu

Numune No.	k_{ort} (cm/sn)	k_{200} (cm/sn) (w=opt)	k_{200} (cm/sn) (w=%15)	k_{ort} x 10^8	$N_1 = k_{200}$ (w=opt) / k_{ort}	$N_2 = k_{200}$ (w=%15) / k_{ort}
1	3,39E-08	3,48E-07	1,26E-07	3,39	10,26	3,70
2	4,54E-08	2,01E-07	6,15E-07	4,54	4,43	13,54
3	3,57E-08	4,36E-07	3,32E-06	3,57	12,21	92,94
4	1,68E-08	1,18E-07	3,78E-06	1,68	7,01	225,01
5	8,96E-08	6,70E-07	3,84E-06	8,96	7,47	42,88
6	5,13E-08	5,42E-06	1,08E-07	5,13	105,67	2,10
7	3,47E-08	8,81E-07	4,99E-07	3,47	25,37	14,36
8	3,00E-08	2,37E-07	9,97E-06	3,00	7,92	332,86
9	8,59E-08	2,02E-07	8,24E-06	8,59	2,35	95,86
10	2,70E-07	2,13E-07	1,62E-05	27,02	0,79	60,12

Bir önceki yükleme aşamasındaki metodoloji takip edilerek k_{ort} değerleri ile 200 kPa'lık yükleme için hesaplanan N_1 ve N_2 değerleri çizdirilmiş ve eğilim grafikleri oluşturularak genel görünüm Şekil 5.2.'de sunulmuştur.



Şekil 5.2. 200 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği

İki eğilim grafiği incelendiğinde; birbirinden farklı davranışlar görülmektedir.. Numunelerin N_1 katsayıları tutarlı gözükse de 6 ve 7 numaralı numunelerin N_1 katsayıları diğerlerine göre çok farklı derecede büyük olduğu görülmektedir. Bu iki numune dışında bu yükleme seviyesinde görülen trend ile bir önceki yükleme seviyesindeki trend birbirine benzemektedir. Fakat N_2 katsayılarına bakıldığında ise; katsayılar arasında çok büyük farklar görülmektedir. Bir numune de fark yaklaşık 2 kat iken diğer numune de yaklaşık 333 kat fark görülmektedir. Bu da datayı daha geniş alana yayarak, modellenen eğilim grafiğini çok düşük bir R^2 ile karşıladığını bu sebeple permeabilite deneyinden hesaplanan k katsayıları ile %15 su muhtevasıyla hazırlanan konsolidasyon deneyi sonuçlarının arasında bu yükleme seviyesinde iyi bir korelasyonun olmadığı görülmüştür. 100 kPa'lık yükleme altında bu yükleme seviyesine göre daha iyi bir ilişki olduğu saptanmıştır.

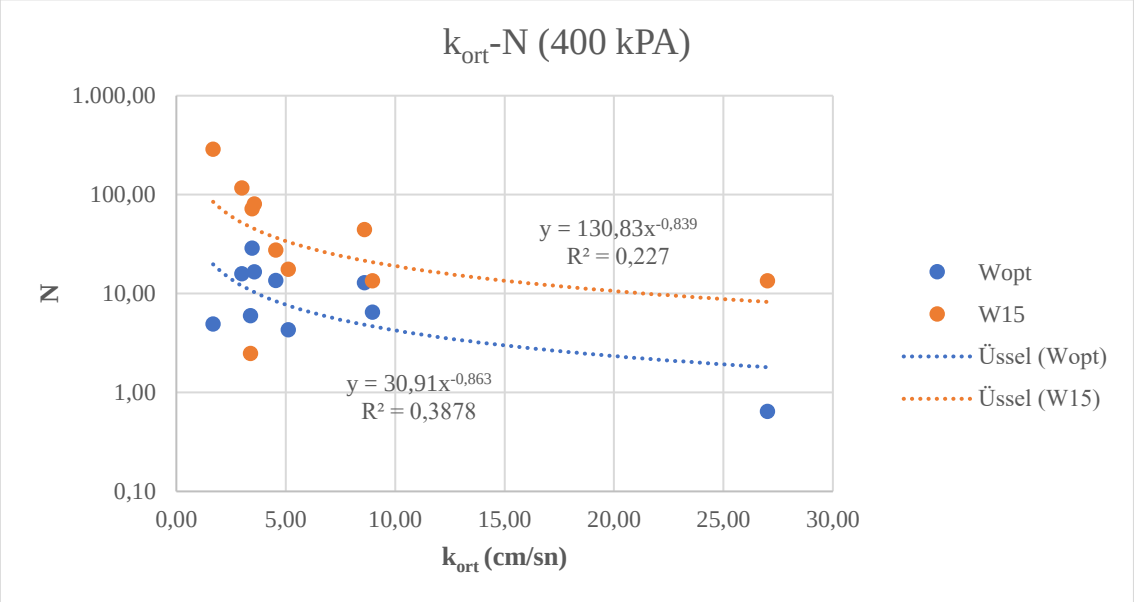
5.1.3. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{ort}) 400 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{400}) ile karşılaştırılması

400 kPa konsolidasyon yüklemesi altında konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerleri ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden bulunun k_{ort} değerleri Çizelge 5.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Şekil 5.3.'ün hesap tablosu

Numune No.	k_{ort} (cm/sn)	k_{400} (cm/sn) (w=opt)	k_{400} (cm/sn) (w=%15)	k_{ort} x 10^8	$N_1 = k_{400}$ (w=opt) / k_{ort}	$N_2 = k_{400}$ (w=%15) / k_{ort}
1	3,39E-08	2,03E-07	8,42E-08	3,39	5,97	2,48
2	4,54E-08	6,18E-07	1,26E-06	4,54	13,61	27,69
3	3,57E-08	5,95E-07	2,89E-06	3,57	16,66	80,95
4	1,68E-08	8,28E-08	4,86E-06	1,68	4,93	289,44
5	8,96E-08	5,82E-07	1,21E-06	8,96	6,49	13,53
6	5,13E-08	2,22E-07	9,01E-07	5,13	4,32	17,58
7	3,47E-08	1,00E-06	2,50E-06	3,47	28,81	71,93
8	3,00E-08	4,77E-07	3,52E-06	3,00	15,91	117,48
9	8,59E-08	1,11E-06	3,81E-06	8,59	12,91	44,33
10	2,70E-07	1,74E-07	3,63E-06	27,02	0,64	13,44

Şekil 5.3.'te k_{ort} değerleri ile 400 kPa'lık yükleme için hesaplanan N_1 ve N_2 değerleri çizdirilmiş ve eğilim grafikleri oluşturularak datanın davranışıyla eğilim grafiklerinin birbirine korelasyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.3. 400 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği

İki eğilim eğrisi incelendiğinde; iki eğrinin birbirine çok benzediğini, üstel değerlerinin neredeyse aynı olduğunu sadece başlarındaki katsayılarının farklılık gösterdiği görülmektedir. N_1 katsayısını incelendiğinde; 1,4,5 ve 6 numaralı numunelerin N_1 katsayıları birbirlerine çok yakın olduğu saptanmıştır. Aynı şekilde 2,3,8 ve 9 numaralı numunelerin N_1 katsayıları da birbiriyle çok yakın değerler olarak ortaya çıkmıştır. Fakat bu 2 grup

numunelerin N_1 katsayıları arasında bir fark mevcut olduğu da aşikardır. Bunların aksine; 10 numaralı numune diğer numuneler göre çok küçük, 7 numaralı numune ise diğer numunelere göre çok büyük N_1 katsayısı değerlerine sahiptir. N_2 katsayılarında ise; en büyük katsayı ile en küçük katsayı arasında çok büyük bir fark mevcut olduğu görülmekte ve diğer katsayı değerleri ise bu aralıkta değişmektedir.

Önceki yüklemeler değerlendirildiğinde artan yükleme seviyesine karşılık optimum su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon numunelerinden elde edilen k değerleri ile permeabilite deneylerinden elde edilen k değerleri arasındaki korelasyon iyileşmektedir. Üç yükleme seviyesi için en iyi eğilim eğrisi 400 kPa'lık yükleme altında oluşmuştur (R^2=0,388). Fakat w=%15 su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon numunelerinden elde edilen k değerlerinin permeabilite deneylerinden elde edilen değerlerle olan korelasyonu için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. En iyi eğilim eğrisi 100 kPa'lık yükleme altında ortaya çıkmışken, 200 kPa'lık yükleme altında data en yaygın haldedir (R^2=0.004).

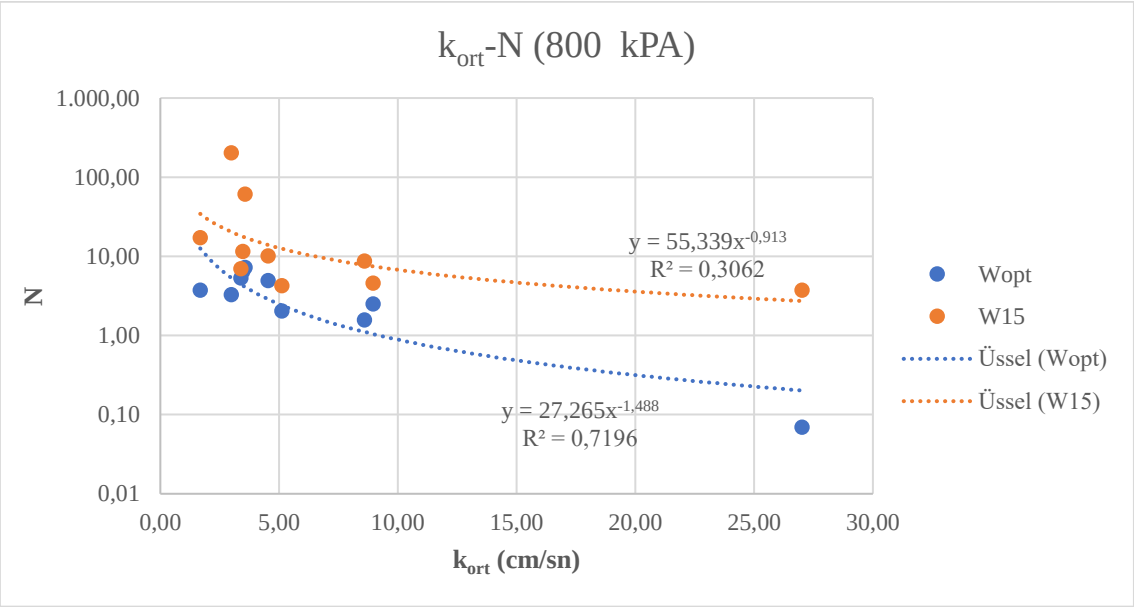
5.1.4. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{ort}) 800 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{800}) ile karşılaştırılması

Çizelge 5.4.'de bir sonraki yükleme seviyesi olan 800 kPa'lık yükleme altında konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerleri ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden bulunun k_{ort} değerleri gösterilmiştir. N_1 ve N_2 hesaplanarak tablonun son kısmında yer almıştır.

Çizelge 5.4. Şekil 5.4.'ün hesap tablosu

Numune No.	k_{ort} (cm/sn)	k_{800} (cm/sn) (w=opt)	k_{800} (cm/sn) (w=%15)	k_{ort} x 10^8	$N_1 = k_{800}$ (w=opt) / k_{ort}	$N_2 = k_{800}$ (w=%15) / k_{ort}
1	3,39E-08	1,81E-07	2,36E-07	3,39	5,33	6,94
2	4,54E-08	2,25E-07	4,58E-07	4,54	4,94	10,08
3	3,57E-08	2,59E-07	2,17E-06	3,57	7,25	60,92
4	1,68E-08	6,24E-08	2,89E-07	1,68	3,72	17,19
5	8,96E-08	2,24E-07	4,09E-07	8,96	2,50	4,56
6	5,13E-08	1,05E-07	2,17E-07	5,13	2,04	4,23
7	3,47E-08	2,25E-07	3,98E-07	3,47	6,47	11,46
8	3,00E-08	9,82E-08	6,06E-06	3,00	3,28	202,24
9	8,59E-08	1,35E-07	7,47E-07	8,59	1,57	8,70
10	2,70E-07	1,87E-08	1,01E-06	27,02	0,07	3,74

Çizelge 5.4.'de 800 kPa'lık yükleme için hesaplanan N_1 ve N_2 değerleri hesaplanan değerler ile k_{ort} değerlerinin ilişkisi çizdirilmiş ve eğilim grafikleri oluşturularak Şekil 5.4.'te sunulmuştur.



Şekil 5.4. 800 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği

Eğilim grafikleri incelendiğinde başlangıç yüklemelerinin aksine trend grafikleri birbirine yakın başlamış fakat artan k_{ort} değerleri için aradaki fark açılmıştır. N_1 katsayılarını incelediğimizde ise; diğer yüklemelerdeki fark görülmemektedir. En büyük N_1 katsayısı ile en küçüğü arasında yaklaşık 7 civarında fark bulunmaktadır. 10^{-8} mertebeleri düşünüldüğünde, diğer yüklemelere göre daha kabul edilebilir bir fark görülmektedir. Fakat N_2 katsayılarına bakıldığında; en yüksek ve en düşük katsayı arasındaki fark çok büyüktür.

Diğer yüklemeler de göz önünde bulundurulduğunda optimum su muhtevası seviyesinde oluşturulan konsolidasyon numunesi için hesaplanan k değerleri ile permeabilite deneyinden elde edilen k değerlerinde yakın bir korelasyon olduğu görülmüştür bu da R^2 sayısına yansımış ve 0.7196 olarak ortaya çıkmıştır. w=%15 su muhtevasında hazırlanan numunelerden elde edilen k değerleri ile k_{ort}'lar arasında daha az bir korelasyonun olduğu görülmüştür.

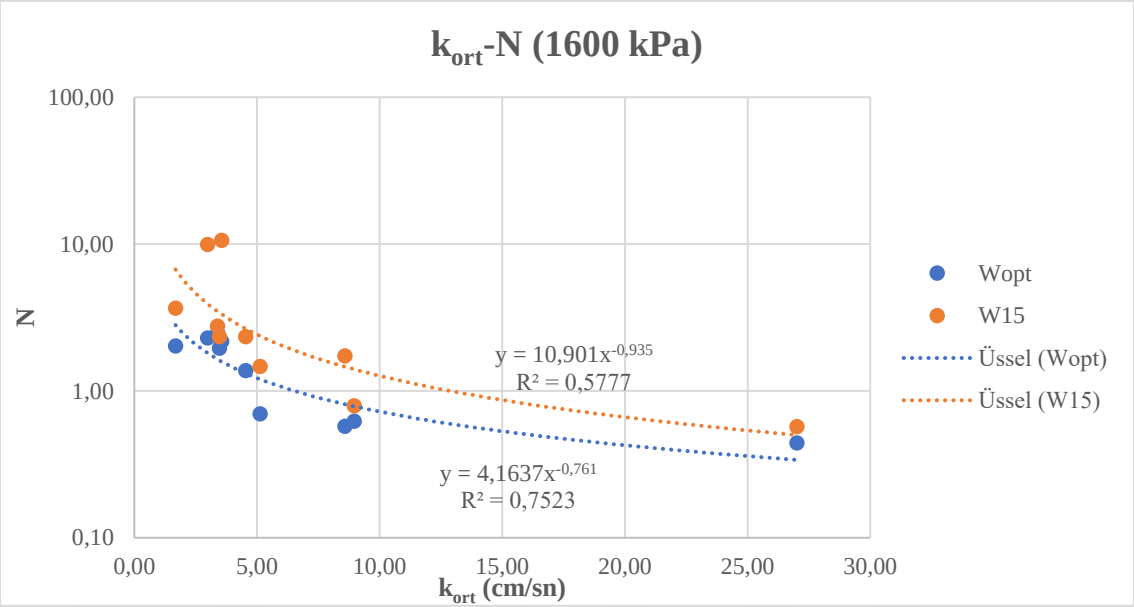
5.1.5. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{ort}) 1600 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayıları (k_{1600}) ile karşılaştırılması

En son yükleme seviyesi olan 1600 kPa'lık yükleme altında konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerleri ile bunlardan hesaplanan N_1 ve N_2 değerleri ile düşen seviyeli permeabilite deneylerinden bulunun k_{ort} değerleri Çizelge 5.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Şekil 5.5'in hesap tablosu

Numune No.	k_{ort} (cm/sn)	k_{1600} (cm/sn) (w=opt)	k_{1600} (cm/sn) (w=%15)	k_{ort} x 10^8	$N_1 = k_{1600}$ (w=opt) / k_{ort}	$N_2 = k_{1600}$ (w=%15) / k_{ort}
1	3,39E-08	8,44E-08	9,38E-08	3,39	2,49	2,76
2	4,54E-08	6,25E-08	1,06E-07	4,54	1,37	2,34
3	3,57E-08	7,75E-08	3,79E-07	3,57	2,17	10,61
4	1,68E-08	3,39E-08	6,13E-08	1,68	2,02	3,65
5	8,96E-08	5,56E-08	7,07E-08	8,96	0,62	0,79
6	5,13E-08	3,57E-08	7,52E-08	5,13	0,70	1,47
7	3,47E-08	6,79E-08	8,11E-08	3,47	1,95	2,34
8	3,00E-08	6,85E-08	2,98E-07	3,00	2,29	9,93
9	8,59E-08	4,92E-08	1,49E-07	8,59	0,57	1,73
10	2,70E-07	1,19E-07	1,54E-07	27,02	0,44	0,57

Şekil 5.5.'te ise k_{ort} değerleri ile 1600 kPa'lık yükleme için hesaplanan N_1 ve N_2 değerleri çizdirilmiş ve eğilim grafikleri oluşturularak datanın davranışıyla eğilim grafiklerinin birbirine korelasyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.5. 1600 kPa yüklemeden gelen permeabilite katsayıları için k_{ort}-N grafiği

Şekil 5.5.'teki eğilim eğrileri incelendiğinde; diğer eğrilere göre en çok benzerlik gösteren eğrilerin bu grafikteki eğriler olduğu görülmektedir. Fakat bu benzerlik eğilim grafiklerini ifade eden fonksiyonların aynı üstel değerlere sahip olduğunu söylememektedir. N_1 katsayılarına baktığımızda; katsayılar arasındaki fark en düşük olarak ortaya çıkmış bu sebeple en iyi korelasyonun 1600kPa'lık yükleme altında olduğu sonucuna varılmıştır. N_2 katsayılarına baktığımızda ise; 3 ve 8 numaralı numuneler haricinde katsayılar birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ama 3 ve 8 numaralı numunelerle diğer numunelerin farkı da daha önceki yüklemelerdeki kadar çok değildir.

Sonuç olarak tüm yüklemelerden elde ettiğimiz N_1 ve N_2 katsayılarına baktığımızda; korelasyonlar için en üstünde durulması gereken yüklemenin katsayılar arasındaki farkın en düşük olduğu 1600kPa yüklemesi olduğu görülmektedir.

Bu yüklemede (1600kPa konsolidasyon yüklemesinde), optimum su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinden elde ettiğimiz N_1 katsayıları ile %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinden elde ettiğimiz N_2 katsayılarını düşen seviyeli permeabilite deneylerinden elde ettiğimiz permeabilite katsayıları (k_{ort}) ile kıyaslandığımızda; N_1 katsayısının N_2 katsayısına göre daha kabul edilebilir değerlerde olduğunu görmekteyiz. Dolayısıyla konsolidasyon deneyi için hazırlanan numunelerin optimum su muhtevasında hazırlanması daha düşük su muhtevasında hazırlanmasına göre

daha iyi korelasyon vermesi sebebiyle tercih edilmesi uygun olacaktır. Farklı yüklemeler için oluşturulan eğilim eğrisi denklemleri ile R^2 değerleri Çizelge 5.6.'da sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Farklı yüklemeler için oluşturulan eğilim eğrisi denklemleri ve R^2 değerleri

	Yükleme Seviyesi (kPa)	**Denklem**	**R^2**		**Yükleme Seviyesi (kPa)**	**Denklem**	**R^2**
$w=w_{opt}$ (%)	100	$y = 26{,}63x^{-1{,}765}$	0,2861	**w=15 (%)**	100	$y = 6{,}9116x^{-1{,}452}$	0,3709
	200	$y = 36{,}571x^{-0{,}937}$	0,3031		200	$y = 43{,}253x^{-0{,}135}$	0,0038
	400	$y = 30{,}91x^{-0{,}863}$	0,3878		400	$y = 130{,}83x^{-0{,}839}$	0,227
	800	$y = 27{,}265x^{-1{,}488}$	0,7196		800	$y = 55{,}339x^{-0{,}913}$	0,3062
	1600	$y = 4{,}1637x^{-0{,}761}$	0,7523		1600	$y = 10{,}901x^{-0{,}935}$	0,5777

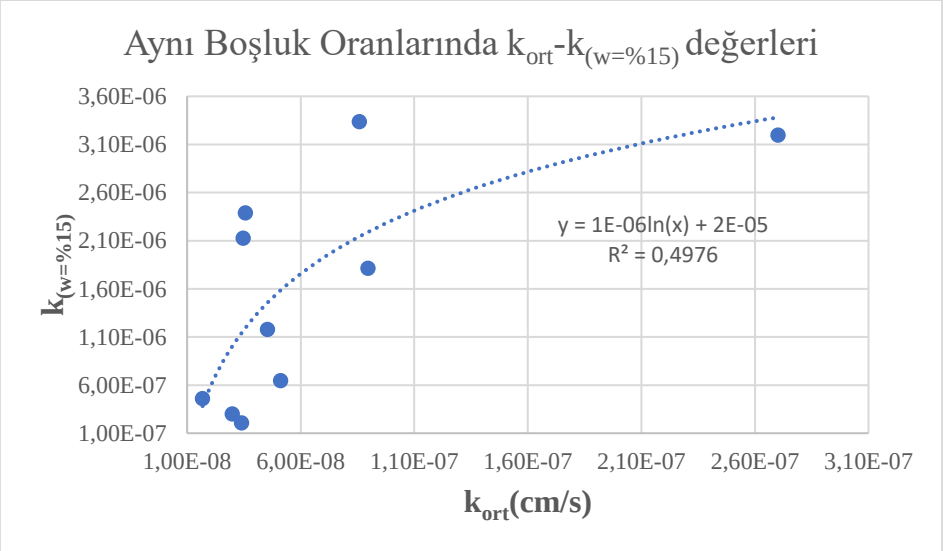
Görüldüğü üzere artan yükleme seviyesine göre optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerde elde edilen k katsayıları arasındaki korelasyonda artış vardır ve en iyi korelasyon 1600 kPa'lık yükleme altında olmuştur. Bunun yanında daha düşük bir su muhtevasında hazırlanan konsolidasyon numuneleri için bulunan k değerleri için de en iyi korelasyonun 1600 kPa'lık yükleme altında olmasına rağmen ikinci en iyi eğilim modelinin 100 kPa'lık yükleme altında olduğu görülmüştür.

5.1.6. %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayısının düşen seviyeli permeabilite deneyi sonunda bulunan boşluk oranlarına göre karşılığı

Önceki bölümlerde yapılan karşılaştırmalarda %15 su muhtevasıyla yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayılarının düşen seviyeli permeabilite deneyinden elde edilen permeabilite katsayılarıyla ilişkilendirilemediğini görmüştük. %15 su muhtevasıyla hazırlanan konsolidasyon numuneleri optimum su muhtevasında hazırlanan permeabilite numunelerine göre daha az gevşek olduğu ve aynı boşluk oranlarında permeabilite katsayılarının nasıl değiştiğinin ilgi alanında olduğundan bahsedilmişti. Bu nedenle düşen seviyeli permeabilite deneylerinin sonunda elde edilen boşluk oranlarına bakarak konsolidasyon deneyindeki yüklemelerdeki aynı boşluk oranları için yaklaşık permeabilite katsayıları elde edilmiştir. Bu permeabilite katsayıları aşağıdaki Çizelge 5.7.'de görülmektedir.

Çizelge 5.7. Boşluk oranları oranlanarak elde edilen permeabilite katsayıları ve k_{ort}'lar

Numune No.	$e_{deney\ sonu}$	k_{ort} (cm/s)	$k_{(w=15\%)}$ (cm/s)
1	0,67	3,39E-08	2,07E-07
2	0,78	4,54E-08	1,18E-06
3	0,68	3,57E-08	2,39E-06
4	0,78	1,68E-08	4,60E-07
5	0,77	8,96E-08	1,81E-06
6	0,79	5,13E-08	6,45E-07
7	0,75	3,47E-08	2,13E-06
8	0,76	3,00E-08	2,98E-07
9	0,86	8,59E-08	3,34E-06
10	0,84	2,70E-07	3,20E-06



Şekil 5.6. Aynı boşluk oranlarında k_{ort}-$k_{(w\%15)}$ grafiği

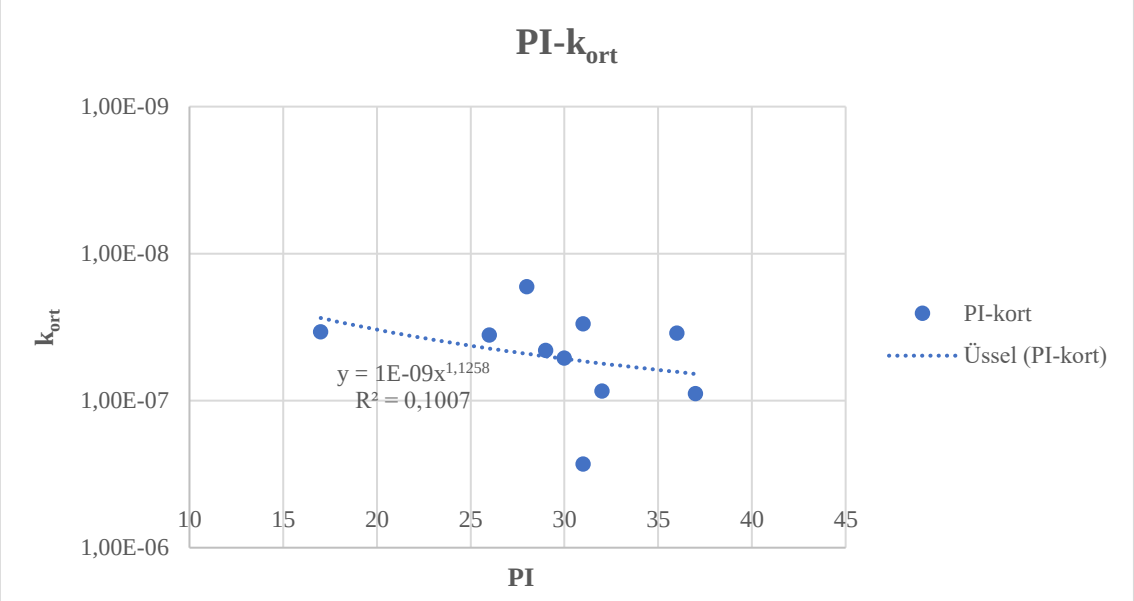
Şekil 5.6.'daki grafiğe ve Çizelge 5.7.'ye baktığımızda; düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulduğumuz permeabilite katsayıları, boşluk oranlarını oranlayarak bulduğumuz konsolidasyondan elde edilen yeni permeabilite katsayılarından oldukça küçüktür. En yüksek fark yaklaşık 60 kat iken en düşük fark ise yaklaşık 6 kat olduğu görülmektedir. Permeabilite katsayıları arasında standart bir bağ olmamasına rağmen, data için önerilen en iyi eğilim eğrisi için R^2=0.498 civarında olması çok iyi olmasa da arasında yaklaşık bir korelasyonun olduğunu göstermiştir.

5.2. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının Ve Konsolidasyon Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının Numunelerin Plastisite İndisleri (PI) İle Karşılaştırılması

Bu bölümde ise düşen seviyeli permeabilite deneyinden elde edilen permeabilite katsayıları (k_{ort}), optimum su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinden elde ettiğimiz permeabilite katsayıları ve %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinden elde ettiğimiz permeabilite katsayıları ile ince daneleri zeminlerinin davranışlarını tanımlamada önemli bir parametre olan numunelerin plastisite indisleri (PI) ayrı ayrı karşılaştırılacaktır.

5.2.1. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayılarının (k_{ort}) plastisite indisleri (PI) ile karşılaştırılması

Şekil 5.7.'de permeabilite deneylerinden elde edilen k_{ort} değerleri ile numunelerin plastisite indisleri kıyaslanmıştır.



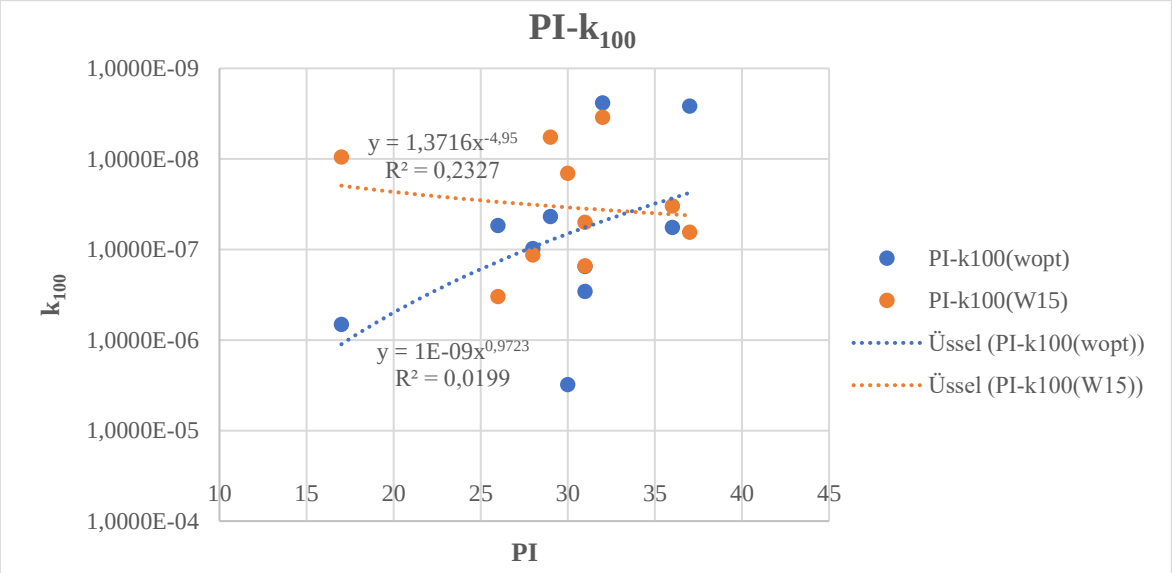
Şekil 5.7. PI-k_{ort} grafiği

Deneylerde kullanılan 10 tane zemin numunesinin 6 tanesinin yüksek plastisiteli kil diğerlerinin ise yüksek plastisiteli kil-silt karışımı, yüksek plastisiteli silt ve düşük plastisiteli kil olduğu önceki bölümlerde bahsedilmişti. Şekilde görüldüğü üzere artan plastisite indisine

göre permeabilite katsayısında da artış görülmüştür. Direkt olarak böyle bir yorumu doğrulamak için aynı cins zeminler için ayrı ayrı ilişkilerine bakmak gerekir fakat numune sayısının yeterli olmaması böyle bir değerlendirmeye engel olmuştur. Yine de dataya toplu olarak bakıldığında bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. Verilen data için k_{ort} ile PI arasında iyi bir korelasyon tanımlanamamış, en iyi korelasyonun R^2=0,101 olan ve şekilde gösterilen eğilim modeli olduğu görülmüştür.

5.2.2. Farklı konsolidasyon yüklemelerinden bulunan permeabilite katsayılarının (k) plastisite indisleri (PI) ile karşılaştırılması

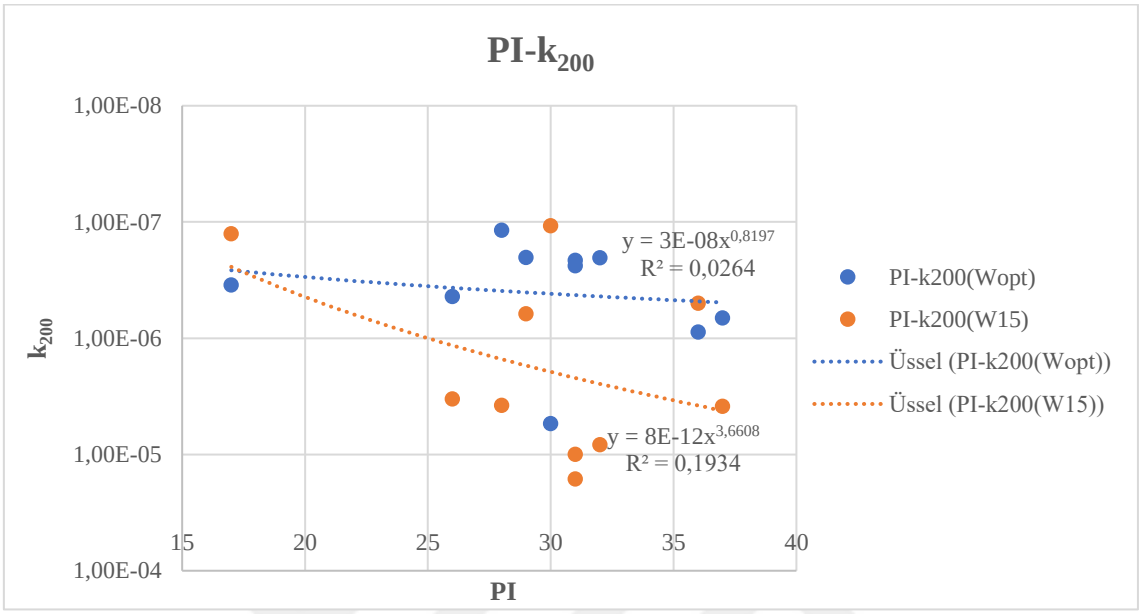
Bu bölümde ise farklı yükleme seviyelerinde iki set konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayılarının plastisite indisine göre davranışı incelenmiş ve Şekil 5.8., 5.9., 5.10., 5.11. ve 5.12.'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Data için eğilim grafikleri oluşturulmuş ve farklılıkların veya benzerliklerin görülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5.8. PI-k_{100} grafiği

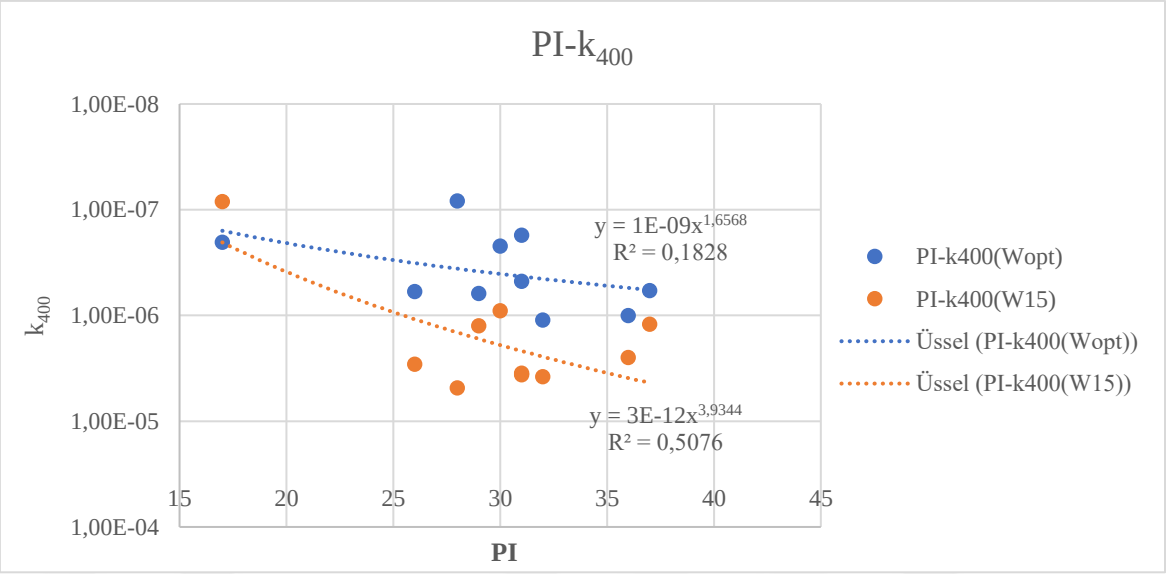
Şekil 5.8.'de görüldüğü üzere 100 kPa'lık yükleme altında data dağınık bir davranış sergilemektedir. Eğilim grafiklerinden görüldüğü üzere optimum su muhtevasında sıkıştırılan konsolidasyon numunesinden elde edilen k değerleri PI arttıkça azalırken w=%15 su muhtevasında sıkıştırılan konsolidasyon numuneleri için durum tam tersidir. R^2'in de

küçük değerleri gösterir ki, 100 kPa'lık yükleme altında plastisite indisleri ile permeabilite katsayıları arasında iyi bir korelasyonun varlığı görülmemiştir.



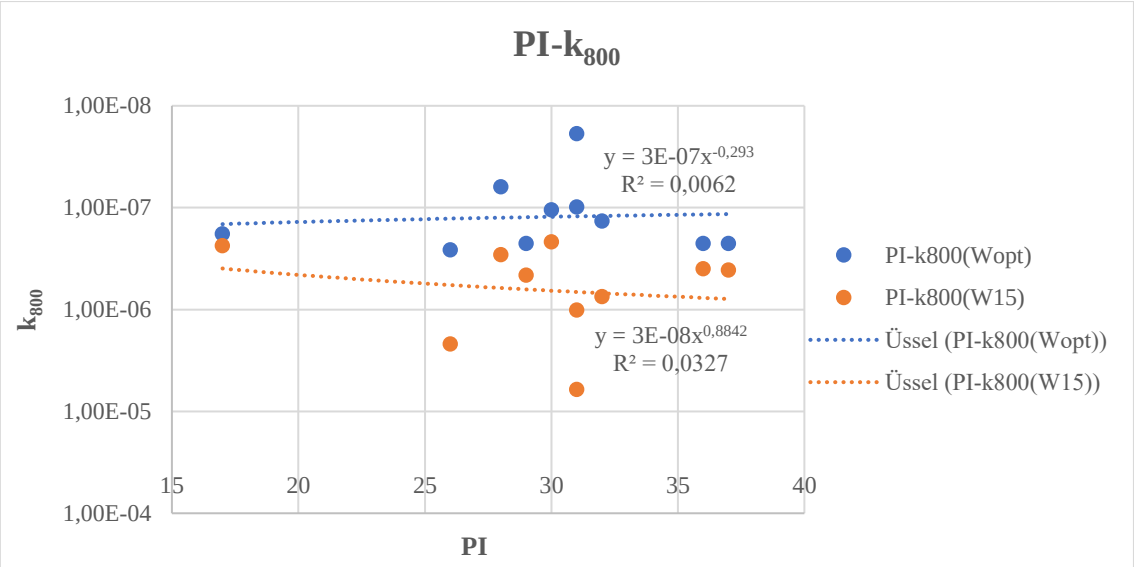
Şekil 5.9. PI-k_{200} grafiği

Şekil 5.9.'da ise 200 kPa'lık yükleme altında PI ile k değerleri arasında ilişki gösterilmektedir. Bir önceki şekilde görüldüğü gibi data yine dağınık bir davranış sergilemektedir. Bir önceki davranışın aksine eğilim grafikleri iki farklı deney setleri için de PI arttıkça k değerlerinde genel bir artış olduğu görülmektedir. Yine de datanın dağınık olması ve önerilen trendlerin R^2'lerinin düşük olması PI ile k arasında bu yükleme seviyesinde de iyi bir korelasyon olmadığını gösterir.

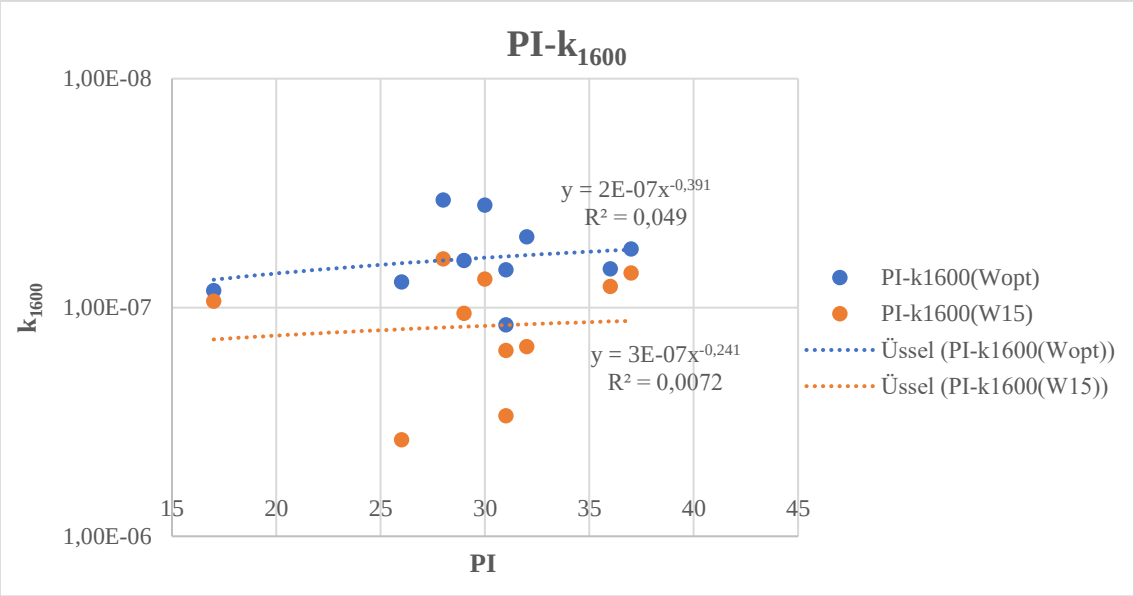


Şekil 5.10. PI-k_{400} grafiği

400 kPa'lık yükleme altında konsolidasyon deneylerinden elde edilen k değerlerinin plastisite indisine göre dağılımı Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. Diğer yükleme seviyelerine kıyasla, w=%15 su muhtevasında sıkıştırılan konsolidasyon numunelerinden elde edilen k değerleri plastisite indisleriyle daha iyi korele olmuşlardır. Her iki konsolidasyon setleri için de benzer davranış görülmüştür: Plastisite indisi değerleri arttıkça permeabilite katsayılarının arttığı görülmüştür. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan konsolidasyon numuneleri için hesaplanan k değerleri yaklaşık 10 kat mertebesinde daha küçüktür ve bir iki değer dışında PI-k ilişkisi en iyi bu yükleme durumunda korele olmuştur.



Şekil 5.11. PI-k_{800} grafiği



Şekil 5.12. PI-k_{1600} grafiği

Şekil 5.11. ve Şekil 5.12. grafiklerinde sırasıyla 800 kPa ve 1600 kPa'lık yüklemeler altında elde edilen k değerleri ile PI ilişkisi gösterilmiştir. İki grafikte de iki farklı konsolidasyon deney setlerinden elde edilen permeabilite katsayılarıyla PI değerleri arasında genel bir ilişki görülmemiştir. İki data seti de yeterince dağınık bir davranış göstermiş bu da yaklaşık eğilim grafiklerinin düşük R^2 değerleriyle ispatlanmıştır. Bu iki yükleme seviyelerinde dataya uygun en iyi eğilim denklemi için R^2 değeri 0,049 olarak hesaplanmış bu da plastisite indisleri ve permeabilite katsayıları arasında bir iyi bir bağlantının olmadığını göstermiştir.

5.3. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyinden Bulunan Permeabilite Katsayılarının ve D_{50} Çapı ve D_e Efektif Dane Çapı ile Karşılaştırılması

Daha önce Bölüm 3.4.'te permeabilite katsayısının ampirik bağıntılarla bulunmasını ve bu bağıntıları anlatılmıştı. Bu bağıntılar incelediğinde, çoğunun genellikle ya kumlar için ya da D_{10} çapını içeren bağıntılar olduğunu ve deney setlerinde kullanılan ince daneli zeminler için uygun olan bağıntılar olmadığı görülmüştür. Deneylerde kullanılan numunelerin, 24 saat hidrometre okuma sonucu çoğu numune için D_{10} hesaplanamamıştır. Bu sebeple literatürde korelasyonlarda çokça kullanılan numunelerin D_{50} ve D_e efektif çapları ile düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulduğunuz permeabilite katsayıları karşılaştırılmıştır.

D_{50} çapı granülometre eğrisinden %50 elek altında kalan dane çapı olarak tanımlanır. Tanımlama deneyleri bölümünde sunulan granülometre eğrilerinden elde edilen D_{50} değerleri ve bu numunelerin k_{ort} değerli Çizelge 5.8.'de sunulmuştur. En küçük D_{50} çapı 0,0018 mm iken en büyük D_{50} çapı 0.022 mm olarak grafikten okunmuş ve yaklaşık olarak 10 kat farklık olduğu saptanmıştır. Dağılımı gösteren grafik Şekil 5.8 de sunulmuştur.

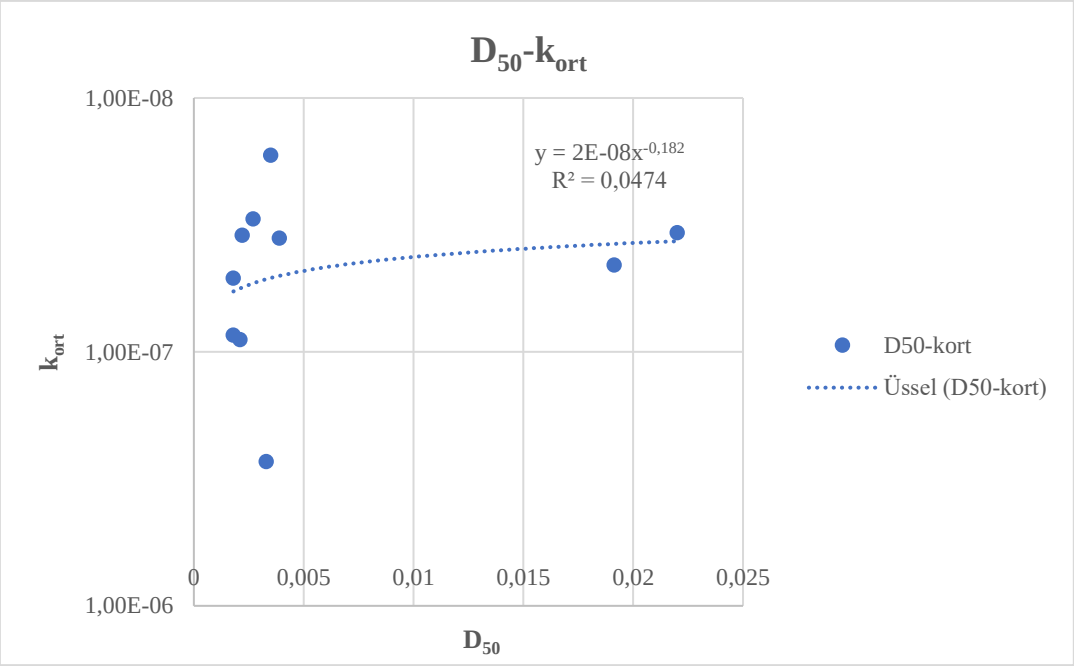
Çizelge 5.8. Numunelerin D_{50} çapları ve permeabilite katsayıları

Numune No.	**D_{50} (mm)**	**k_{ort} (cm/sn)**
1	0,022	3,39E-08
2	0,01914	4,54E-08
3	0,0039	3,57E-08
4	0,0035	1,68E-08
5	0,0021	8,96E-08
6	0,0018	5,13E-08
7	0,0022	3,47E-08
8	0,0027	3,00E-08
9	0,0018	8,59E-08
10	0,0033	2,70E-07

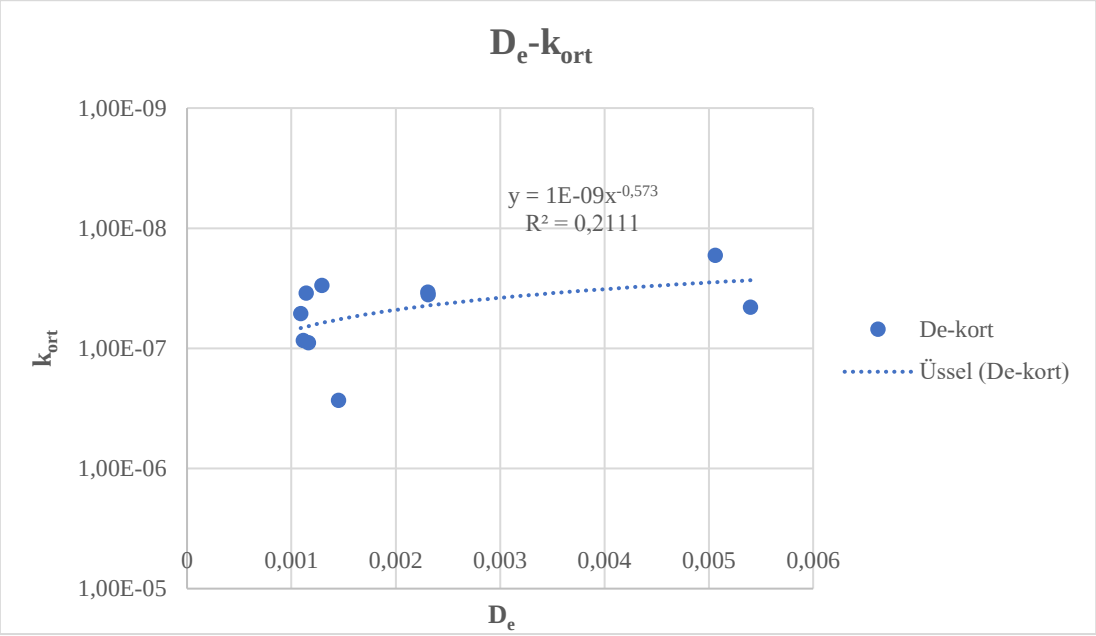
D_e ise efektif çap olup, dane dağılımında danelerin yüzdeliklerine göre ağırlıklı çap olarak tanımlanmıştır. D_e değerleri incelendiğinde, en büyük değerin 0,005062 mm ve en küçük değerin 0,001114 mm olarak hesaplanmıştır. Aradaki farkın yaklaşık 4,5 kat olduğu ve dane efektif çaplarının birbirine daha yakın olduğu görülmüştür. İlgili değerler Çizelge 5.9.'da ve permeabilite katsayısıyla dağılımı Şekil 5.13.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Numunelerin D_e efektif çapları ve permeabilite katsayıları

Numune No.	**D_e (mm)**	**k_{ort} (cm/sn)**
1	0,002308	3,39E-08
2	0,005399	4,54E-08
3	0,002311	3,57E-08
4	0,005062	1,68E-08
5	0,001165	8,96E-08
6	0,001089	5,13E-08
7	0,001142	3,47E-08
8	0,001292	3,00E-08
9	0,001114	8,59E-08
10	0,001453	2,70E-07



Şekil 5.13. D_{50}-k_{ort} grafiği



Şekil 5.14. D_e-k_{ort} grafiği

Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'de D_{50} ve D_e çaplarının k_{ort} değerleri ile dağılımı görülmektedir. D_e çap değerleri D_{50} değerlerine göre permeabilite katsayısı ile daha iyi bir dağılım göstermektedir. İnce daneli zemin numuneleri için D_{50} değerleri yerine D_e değerlerinin kullanılması ya da D_e değerlerinin k ile korelasyonunun daha iyi olması makuldür. Yine de kesin bir yorum için data sayısı yeterli değildir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 10 adet ince daneli zemin numuneleri üzerinde düşen seviyeli permeabilite ve konsolidasyon deneyleri yapılıp, zeminlerin permeabilite özellikleri aralarındaki ilişki araştırılmıştır. Ayrıca düşen seviyeli permeabilite ve konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları zeminlerin plasitisite indisleri ile de karşılaştırılmıştır. Son olarak da düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ile zeminlerin D_{50} çapları ve D_e efektif dane çapları karşılaştırılmıştır.

İlk olarak, düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ile optimum su muhtevasında ve %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinden bulunan permeabilite katsayıları karşılaştırılmıştır. 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa ve 1600 kPa konsolidasyon yüklemelerinden gelen permeabilite katsayıları ile düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları arasında en iyi korelasyonun 1600 kPa'lık yükleme altında olduğu görülmüştür. Ayrıca optimum su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneyi, %15 su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneyine göre daha düzgün sonuçlar ortaya koymuştur. Bu yüzden daha iyi korelasyonlar elde etmek için konsolidasyon deneyi numunelerinin optimum su muhtevasında hazırlanması tercih edilmelidir.

Daha sonra, düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ve optimum su muhtevasında ve %15 su muhtevasında hazırlanan numuneler ile yapılan konsolidasyon deneylerinden bulunan permeabilite katsayıları zeminlerin plasitisite indisleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. En iyi PI-k ilişkisi, iki numune dışında optimum su muhtevasında yapılan konsolidasyon deneylerinin 400 kPa konsolidasyon yüklemesinden bulunan permeabilite katsayıları ile olmuştur. Düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ve diğer konsolidasyon yüklemelerden elde edilen permeabilite katsayıları ile plastisite indisleri arasında bir ilişki kurulamamıştır. Bu yüzden plastisite indisi ve permeabilite katsayısı arasında bir ilişki olduğunu söylemek doğru olmayabilir.

Son olarak düşen seviyeli permeabilite deneyinden bulunan permeabilite katsayıları ile zeminlerin D_{50} çapları ve D_e efektif çapları karşılaştırılmıştır. Permeabilite katsayısı ile D_e efektif çaplarının D_{50} çaplarına göre daha iyi bir dağılım gösterdiği görülmüştür. İnce daneli numuneler için permeabilite katsayıları ile karşılaştırma yaparken D_{50} çapları yerine D_e efektif çaplarının kullanılması daha uygun olacaktır. Bu çaplar ve permeabilite katsayıları arasında bir ilişki olduğunu söylemek için data sayısı yeterli değildir.

Bu çalışma ve kapsamı süresince deney sayıları mecburen belli bir limitte tutulmuştur. Koleratif ilişkilerin arandığı çalışmalarda deney sayısının fazlalığı her zaman daha iyi bir ilişkiye ulaşılmasını imkan sağlayacaktır. Bu sebeple deney sayıları ve zemin çeşitliliği arttırılarak daha iyi ilişkilerin bulunması mümkün olacağından gelecekte yapılacak çalışmalarla bu tezin desteklenmesi hem literatür hem de saha uygulamalarında kullanımı açısından iyi olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Arsoy S., Keskin E., Yılmaz C., 2007, Permeabilite ve konsolidasyon deneyleri ile elde edilen permeabilite katsayılarının karşılaştırılması, http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1509.pdf, erişim tarihi: 09.02.2017

Assaad J.J., Harb J., 2013, Use of the falling-head method to assess permeability of freshly mixed cementitious-based materials, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 25, No. 5, p.580-588

ASTM C136 / C136M-14, 2014, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D422-63(2007)e2, 2007, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D698-12e2, 2012, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D2434-68, 2006, Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D2435/D2435M-11, 2011, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D4318-17e1, 2017, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D5084-16a, 2016, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D 6391-11, 2011, Standard Test Method for Field Measurement of Hydraulic Conductivity Using Borehole Infiltration, ASTM International, West Conshohocken, PA

BS EN 1997-2, 2007, Eurocode 7-Geotechnical Design Part 2:Ground Investigation and Testing, British Standard

Boynton S.S., Daniel D.E., 1985, Hydraulic conductivity tests on compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 111, No.4, p.465-478

Chapuis R.P., 2010, Using a leaky swimming pool for a huge falling-head permeability test, Engineering Geology, 114 (2010), p.65–70

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chiasson P., 2012, Interpretation of falling-head tests in presence of random measurement error, ISRN Civil Engineering, Vol 2012, Article ID 871467

Chu J., Bo M.W., Chang M.F., Choa V., 2002, Consolidation and permeability properties of Singapore Marine Clay, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, Vol 128, No.9, p.724-732

Daniel D.E., 1984, Predicting hydraulic conductivity of clay liners, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 110, No.2, p.285-300

Day S.R., Daniel D.E., 1985, Hydraulic conductivity of two prototype clay liners, Journal of Geotechnical Engineering. Vol 111, No. 8, p.957-970

Detmer D.M., 1995, Permeability,porosity and grain-size distribution of selected Pliocene and Quaternary sediments in the Albuquerque Basin, New Mexico Geology,Ojai

Dobak P., Gaszyñskı J., 2015, Evaluation of soil permeability from consolidation analysis based on Terzaghi's and Biot's theories, Geological Quarterly, 59(2)

Elhakim A.F., 2016, Estimation of soil permeability, Alexandria Engineering Journal, 55, p.2631-1638

Finno R.J., Chung K., Yin J., Feldkamp J.R., 1996, Coefficient of permeability from ac electroosmosis experiments, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 122, No.5

Holtz R.D., Kovacs W.D., Sheahan T.C., 2015, Geoteknik Mühendisliğine Giriş, (Çev. Editörü Ayfer Erken),Nobel Akademik Yayıncılık

Lei H., Wu Y., Yu Y., Zhang B., Lu H., 2016, Influence of shear on permeability of clayey soil, International Journal of Geomechanics,

Ma B., Muhunthan B., Xie X., 2013, Modeling effects of clay structure on consolidation behavior, Poromechanics V, p.862-871

Morris P.H., 2003, Compressibility and permeability correlations for fine-grained dredged materials, Journal Of Waterway, Port, Coastal And Ocean Engineering, 129, p.188-191

Odong, J., 2007, Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis, Journal of American Science, 3(3)

Pedescoll A., Samsó R., Romero E., Puigagut J., García J., 2011, Reliability, repeatability and accuracy of the falling head method for hydraulic conductivity measurements under laboratory conditions, Ecological Engineering, 37 (2011), p.754-757

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pliakas F., Petalas C., 2011, Determination of hydraulic conductivity of unconsolidated river alluvium from permeameter tests, empirical formulas and statistical parameters effect analysis, Water Resour Manage

Ranaivomanana H., Razakamanantsoa A., Amiri O., 2016, Permeability prediction of soils including degree of compaction and microstructure, International Journal of Geomechanics, 04016107

Song C.R., Kim J., Cheng D., 2008, Estimation of soil permeability using an acoustic technique, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, Vol 134, No.12, p.1829-1832

Tiwari B., Ajmera B., 2011, Consolidation and permeability of clay minerals - expansive to non-expansive, Geo-Frontiers

Yeo S., Shackelford C.D., Evans J.C., 2005, Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, Vol 131, No.10, p.1189-1198

Zhai Q., Rahardjo H., 2015, Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve, Engineering Geology, 199 (2005), p.148–156