

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YOĞRULMUŞ İNCE TANELİ ZEMİNLERDE DOYGUNLUK DERECESİNİN
KONSOLİDASYON PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

DENİZ YILMAZ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YOĞRULMUŞ İNCE TANELİ ZEMİNLERDE DOYGUNLUK DERECESİNİN KONSOLIDASYON PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Deniz YILMAZ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kâmil KAYABALI

Terzaghi (1943)'nin teorisine göre konsolidasyon deneylerinde zeminin %100 doygun olduğu kabul edilir. Bu koşul yalnızca kılcal zonda ve su tablasının altındaki zeminlerde gelişen konsolidasyonu temsil etmektedir. Buna göre, doğadaki doygun olmayan jeolojik ortamlar için konsolidasyon teorisi sınırlı kalmaktadır. Bu tez çalışmasında yoğrulmuş killi zeminlerin doygunluk derecesinin (S_r) konsolidasyon parametrelerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, %70, 80, 90 ve 100 doygunluktaki ve sekiz farklı plastiklikteki (PI) örneklerin şişme basıncı, sıkışma indeksi (C_c), yeniden sıkışma indeksi (C_r), konsolidasyon katsayısı (c_v) ve ön konsolidasyon gerilmesi (σ_p') değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, artan PI değerlerindeki örneklerin doygunlukları azalırken şişme basıncı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Artan doygunluk dereceleriyle sıkışma indeksi arasında belirtme katsayıları $R^2=0,32$ ile $R^2=0,94$ arasında değişen pozitif ilişkilerin olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte doygun örneklerde ($S_r = 1$) C_c oldukça belirgin bir şekilde artmaktadır. C_r - S_r ilişkilerinde örneklerin doygunluk derecesinin C_r değerlerini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Neredeyse tüm örneklerde doygun örneğe ait C_r değerinin ani bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak örneklerin S_r değerleri artarken σ_p' azalmaktadır. Doygun olmayan yüksek plastisiteli örneklerin σ_p' değerleri birbirine çok yakınken, doygun yüksek plastisiteli örneklerin ön konsolidasyon gerilmesinde belirgin bir azalma olduğu gözlenmiştir. Son olarak, konsolidasyon katsayısının ise doygunluk derecesinden ve numunelerin plastikliğinden etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

Kasım 2021, 51 Sayfa

Anahtar kelimeler: Doygunluk derecesi, konsolidasyon katsayısı, ön konsolidasyon gerilmesi, konsolidasyon parametreleri, sıkışma indeksi, yeniden sıkışma indeksi.

ASBTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION THE EFFECTS OF SATURATION DEGREE ON CONSOLIDATION PARAMETERS OF REMOLDED FINE-GRAINED SOILS

Deniz YILMAZ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kâmil KAYABALI

According to Terzaghi's (1943) theory, the ground is considered to be fully saturated in consolidation experiments. This condition represents the consolidation that develops only in the capillary zone and under the water table. Accordingly, the theory of consolidation theory has some limitations for unsaturated geological environments in nature. In this thesis, the effect of degree of saturation of remolded clays on the consolidation parameters (S_r) was investigated. For this purpose, have 70, 80, 90 and 100 % saturations and eight different plasticity (PI) values the samples swelling pressure, compression index, recompression index, coefficient of consolidation, and pre-consolidation stress were determined. According to the results obtained, it was determined that the saturations of the samples with increasing PI values decreased with increasing the swelling pressure values. It has been determined that there are positive correlations between the increasing degrees of saturation, and the compression index, ranging from $R^2 = 0.32$ to $R^2 = 0.94$. In addition, C_c increases significantly in saturated samples ($S_r = 1$). It was obtained that the degree of saturation of the samples significantly affected C_r values in C_r - S_r relations. Also, it was determined that the C_r value of the saturated sample decreased suddenly in almost all samples. In general, while the S_r values of the samples increase, σ_p' decreases. It was observed that The σ_p' values of unsaturated high plasticity samples were very close to each other whereas there was a significantly decrease in the pre-consolidation stress of saturated high plasticity samples. Lastly, it was concluded that the coefficient of consolidation was not affected by the degree of saturation and the plasticity of the samples.

November 2021, 51 pages

Key words: Degree of saturation, coefficient of consolidation, preconsolidation pressure, consolidation parameters, compression index, recompression index

TEŞEKKÜR

Lisans-Yüksek lisans dönemleri boyunca bilgi birikimini ve çalışma alanlarındaki kazanımlarıyla birlikte arazi ve laboratuvar çalışmalarında edindiği tecrübeyi özen, titizlik aktaran ve bilimin ışığında yol gösteren tez danışmanın Prof. Dr. Kâmil Kayabalı'na, öneriyle teze katkı sağlayan tez jüri üyeleri Prof. Dr. Hasan Çetin ve Prof. Dr. Mustafa Fener'e ve tez dönemi boyunca desteklerini esirgemeyen Dr. Elif Avşar'a ve bilimsel çalışmalar konusunda beni teşvik eden aileme teşekkür ederim.

Deniz YILMAZ
Ankara, Kasım 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ASBTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
3.1 Numunelerin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Belirlenmesi.....	19
3.1.1 Elek analizi – Hidrometre analizi.....	19
3.1.2 Likit limit ve Plastik limit deneyleri	20
3.1.3 Piknometre deneyi	21
3.2 Numune Hazırlama.....	22
3.3 Şişme Basıncı Deneyleri.....	23
3.4 Konsolidasyon Deneyleri	25
4. DENEYSEL BULGULAR.....	29
4.1 Numunelerin Fiziksel ve İndeks Özellikleri.....	29
4.2 Şişme Basıncı	30
4.3 Boşluk Oranı Efektif Gerilme İlişkileri	31
4.4 Sıkışma İndeksi, C_c	34
4.5 Yeniden Sıkışma İndeksi, C_r	35
4.6 Ön Konsolidasyon Gerilmesi, σ_p'	35
4.7 Konsolidasyon Katsayısı, c_v	39
5. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	42
KAYNAKLAR	44
EK - Konsolidasyon katsayısı – Efektif gerilme grafikleri.....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_c	Sıkışma indeksi
C_r	Yeniden sıkışma indeksi
c_v	Konsolidasyon katsayısı (cm^2/s)
e	Boşluk Oranı
e_o	Başlangıçtaki boşluk oranı
G_s	Özgül ağırlık
M_s	Kuru birim ağırlık
M_w	Su miktarı
M_t	Toplam kütle
R^2	Belirleme katsayıları
S_r	Doygunluk derecesi (%70, 80, 90, 100)
t_{90}	%90 konsolidasyonun tamamlandığı zaman
t_{50}	%50 konsolidasyonun tamamlandığı zaman
u_a	Boşluk havası basıncı
u_w	Boşluk suyu basıncı
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemi
V_t	Zemin kütesinin toplam hacmi,
V_s	Katı partiküllerin hacmi,
V_v	Boşlukların hacmi,
w	Su içeriği,
σ	Toplam gerilme
σ'	Efektif gerilme (kPa, 25, 50, 100, 200, 400)
σ'_p	Ön konsolidasyon gerilmesi (kPa)
σ_o	Örtü yükü (kPa)
ΔH	Yükleme aşamalarında boydaki değişim
$\Sigma \Delta H$	Yüklemeler sonucunda boydaki toplam değişim
ρ_t	Toplam yoğunluk,
ε	Birim deformasyon

Kısaltmalar

LL	Likit limit (%)
M ₁	Saf su ile dolu piknometrenin kütlesi
M ₂	Piknometre + kuru zemin + saf su kütlesi
M ₃	Kuru zemin kütlesi
N1	Numune no 1
N2	Numune no 2
N3	Numune no 3
N4	Numune no 4
N5	Numune no 5
N6	Numune no 6
N7	Numune no 7
N8	Numune no 8
PI	Plastiklik indeksi (%)
PL	Plastik limit (%)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Ön konsolidasyon basıncının belirlemek için (a) Tavenas (1979), (b) Eski, (c) Van Zelst, (d) Şenol (1997) tarafından önerilen yöntemlere ait grafikler.	7
Şekil 2.2 Uysal vd. (2018) tarafından Plaxis 2D ile oluşturulan model ve sonlu eleman ağları.	9
Şekil 2.3 Yumuşak kilin konsolidasyon aşaması (a) bulamaç kalıba dökülmesi ve (b) ön konsolidasyon yüklemesinin ağırlıklar yerleştirilerek yapılması (Uysal vd., 2018).	9
Şekil 2. 4 a. Şematik santrifüj gösterimi (ölçeksiz): 1. Örnek haznesi, 2. Mesafe ölçen lazer ünitesi, 3. Lazer ünitesini sabit kirişe bağlayan kol, 4. Kiriş, 5. Döner tabla, 6. Motor, 7. Sistemi sabit tutan kirişler, 8.Kapak, b. Santrifüjün değişik açılardan çekilen görüntüleri Balcı (2015).	13
Şekil 2.5 Permeabilite-konsolidasyon deney düzeneği (Asadi, 2017).	14
Şekil 2.6 (a) Doymun olmayan zeminlerde zemin yapısına, hava ve su fazlarına ait temel yüzeyler, (b) zemin yapısı ve (c) boşluk basınçlarına (su ve hava basıncı) karşı zaman grafiği (Fredlund ve Hasan, 1979).	16
Şekil 2.7 Farklı örtü basınçları uygulanarak elde edilen toplam ilksel sıkışma miktarına karşılık doymunluk derecesi grafiği (Phanikumar ve Amrutha, 2013)	18
Şekil 2.8 Farklı doymunluk derecelerinde elde edilen yeniden sıkışma miktarına karşılık doymunluk derecesi grafiği (Phanikumar ve Amrutha, 2013)	18
Şekil 3. 1 Hidrometre deney düzeneği.	20
Şekil 3.2 (a) Vakum pompası ve desikatör, (b) Piknometre kapları.	21
Şekil 3.3 (a) Tek eksenli sıkışma düzeneği ve numune hazırlama aparatlarının yakından görünüşü, (b) Konsolidasyon hücresi parçaları, (c) Permeabilite-konsolidasyon düzeneği parçaları (plan görünümü) ve (d) Permeabilite-konsolidasyon düzeneği ve parçaları.	24
Şekil 3. 4 Şişme basıncı test düzeneği	25
Şekil 3.5 (a) Geleneksel konsolidasyon deney düzeneği, (b) değiştirilmiş konsolidasyon deney düzeneği ve (c) su seviyesini gösteren panosu.	26
Şekil 3.6 Birim deformasyon (ϵ) veya boşluk oranı (e) - efektif gerilme (σ') grafiği (Casagrande, 1936).	27
Şekil 3.7 Boşluk oranı (e) – Efektif gerilme (σ') grafiği (Casagrande, 1936).	27

Şekil 3.8 Konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için kullanılan deformasyon-karekök zaman grafiği (Bell 2006'dan düzenlenerek alınmıştır).....	28
Şekil 4.1 Numunelerin USCS'ye göre dağılımı.....	30
Şekil 4.2 N4 örneği için boşluk oranı-efektif gerilme grafiklerinde eğriselliğin en yüksek olduğu noktalar.....	31
Şekil 4.3 Tüm örneklerle ait boşluk oranı-efektif gerilme grafikleri.....	32
Şekil 4.4 Farklı plastiklikteki örneklerin sıkışma indeksi – doygunluk derecesi grafikleri.....	36
Şekil 4.5 Farklı plastiklikteki örneklerin yeniden sıkışma indeksi – doygunluk derecesi grafikleri.....	37
Şekil 4.6 Farklı plastiklikteki örneklerin ön konsolidasyon gerilmesi – doygunluk derecesi grafikleri.....	38
Şekil 4.7 N1 (CL) ve N8 (CH) örneklerin konsolidasyon katsayısı – efektif gerilme grafikleri.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Cortellazzo (2002), Alshenawy (2007) ve Muntohar (2009) tarafından konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için kullanılan yöntemler.	4
Çizelge 2.2 Ön konsolidasyon basıncını bulmak için kullanılan grafiksel yöntemler ve temelleri (Boone, 2010).	6
Çizelge 3.1 Faz diyagramlarından elde edilen eşitlikler kullanılarak hesaplanan değerler (N1 örneği).	23
Çizelge 4.1 Numunelerin fiziksel ve indeks özellikleri	29
Çizelge 4.2 Tüm örneklerin şişme basıncı değerleri (kPa)	31
Çizelge 4.3 Boşluk oranı-efektif gerilme grafiklerinden elde edilen konsolidasyon parametrelerine ait sonuçlar (C_c , C_r ve σ_p')	33
Çizelge 4.4 Tüm örneklere ait konsolidasyon katsayıları (c_v).	39
Çizelge 4.5 Tüm örneklere ait konsolidasyon katsayıları (c_v) çizelgesinin devamı.	40

1. GİRİŞ

Terzaghi 'nin 1943'de ortaya koyduğu teoriye göre konsolidasyon deneyinin yapılması için zemin numunelerinin %100 doygun olması gerekmektedir. Bu tanım zemin numunelerinin su tablasının altında olduğu durumlar ve kılcal kuşak için geçerlidir. Ancak, zeminler her zaman su tablasının altında veya kılcal kuşakta değildir. Zeminlerin boşluklarında su ile birlikte hava da bulunmaktadır. Bu koşullar göz önüne alındığında her konsolidasyon deneyi %100 doygunlukta gerçekleşmemektedir.

Terzaghi (1925)'nin tek yönlü konsolidasyon teorisi zeminlerde meydana gelen düşük birim deformasyonları, Gibson vd. (1967), Yong vd. (1983) ve Fox ve Berles (1997) gibi araştırmacıların çalışmaları da yüksek birim deformasyonları açıklamaktadır. Biot (1941), Terzaghi (1925)'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisini üç boyutlu olarak geliştirmiş, Biot (1956) ise bu teoriyi dinamik problemlerin çözümünde kullanmışlardır. Tek yönlü konsolidasyon teorisi üzerinde çalışan Davis ve Raymond (1965), Xie vd. (2002), Geng vd. (2006) ve Cai vd. (2007) gibi araştırmacılar konsolidasyon sırasında numune üzerine uygulanan yüklemelerin bir sonucu olarak sıkışabilirlik ve geçirimsizliğin zeminlerdeki gözeneklerin küçülmesiyle azaldığını savunmuşlardır. Hansbo (1960), Davis ve Raymond (1965) ve Geng (2008) ise yüklemeler sonucunda azalan sıkışma ve permeabilite katsayılarını kullanarak konsolidasyon problemlerinin doğrusal olmayan çözümünü geliştirmişlerdir. Doygunluk derecesini dikkate alarak hazırladığı yoğurulmuş killer üzerinde çalışan Barden (1965), Bishop (1959)'un ilişkisini kullanarak doygun olmayan zeminler üzerinde gerilme durumunu açıklamıştır. Fredlund (1977), Fredlund ve Morgenstern (1976) ise doygun olmayan zeminlerde konsolidasyon problemlerinin çözümü için matematiksel ilişkiler geliştirmişlerdir.

Casagrande ve Fadum (1940) ve Taylor (1943) konsolidasyon katsayısının bulunması için yöntemler geliştirmiş ve Cortellazzo (2002), Alshenawy (2007) ve Muntohar (2009) ise konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen yöntemleri karşılaştırmıştır. Ön konsolidasyon gerilmesinin hesaplanması için çalışma yapan Boone (2010) birçok araştırmacının çalışmasını da özet şeklinde sunmuştur. Özocak ve Altundağ (2016) ön konsolidasyon gerilmesi vererek hazırladığı numunelere konsolidasyon deneyi uygulamıştır. Ayrıca farklı çalışmacılar tarafından geliştirilen

grafiklerden yararlanarak da ön konsolidasyon gerilmesini hesaplamıştır. Sonuçlar üzerinde karşılaştırmalar yaparak kendi uyguladığı ön konsolidasyon gerilmesine en yakın olan gerilmenin Casagrande yöntemi olduğunu vurgulamıştır. Fener (2006) zemin hafızası ve ön konsolidasyon gerilmesi üzerinde çalışarak tane boyu dağılımının bu parametreler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yurtçu ve Özocak (2016) bulanık mantık yöntemi ve regresyon analizlerini kullanarak literatür çalışmasından elde ettiği verilerle sıkışma indeksini etkileyen parametreler üzerinde çalışmıştır. Dipova ve Cangir (2010) arazi ve laboratuvar deneylerinden elde ettiği veriler üzerinde çoklu regresyon analizleri yaparak, yapay sinir ağları ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak killerin sıkışabilirlik özelliklerine ulaşmaya çalışmıştır. Farklı yöntemlerden elde ettiği sonuçları arazi ve laboratuvar deneyleriyle karşılaştırmıştır. Naser (2013) konsolidasyon deneyini yaptığı program yoluyla bilgisayarda gerçekleştirmiştir. Sünnetçi ve Ersoy (2016) killerin indeks özellikleri arasında ampirik ilişkiler kurarak kısa zaman içinde konsolidasyon parametrelerini hesaplamışlardır. Kayabalı ve Demir (2011) şişme basıncı değerini sabit hacimde doğrudan hesaplamak için deney düzeneği tasarlamışlardır. Kayabalı ve Yıldız (2014) zemin indeks özelliklerini kullanarak şişme basıncı değerinin hesaplanması için ampirik ilişkiler geliştirmiştir. Kayabalı ve Özdemir (2010) konvansiyonel yöntemlerle uzun zaman alan konsolidasyon deney yöntemi ile kısa zamanda sonuç veren santrifüj konsolidasyon deney yöntemini karşılaştırmışlardır. Balcı (2015) santrifüj konsolidasyon deneyinden ve geleneksel konsolidasyon deneyinden elde edilen konsolidasyon parametrelerini karşılaştırmıştır. Asadi (2017) santrifüj cihazı ile hazırladığı örnekler üzerinde geleneksel konsolidasyon ve permeabilite konsolidasyon deneyleri yaparak konsolidasyon katsayısını bulmuş ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Fredlund ve Hasan (1979) doygun olmayan zeminlerde tek yönlü konsolidasyon teorisini çalışmışlardır. Gallipoli vd. (2002) doygun olmayan zeminler üzerinde yeni parametreler geliştirmiştir.

Doygun olmayan zeminlerde konsolidasyon parametrelerini belirlemek için yapılan çalışmalarda araştırmacılar doygun olmayan konsolidasyon test cihazlarını kullanmışlardır. Ancak, bu tez çalışmasında doygun ve doygun olmayan zeminlerin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisini karşılaştırmak için konsolidasyon deneyleri geleneksel konsolidasyon test cihazında yapılmıştır.

Phanikumar ve Amrutha (2013) (i) kazı öncesi, (ii) kazı sonrası ve (iii) inşa sonrası durumları laboratuvar ortamında sağlamak amacıyla doymunluk derecesi geniş aralıkta (%25, 50, 75 ve 100) olan zemin numuneleri üzerinde bir dizi konsolidasyon deneyi yapmıştır. Ancak, çalışmalarının temel amacı doymun ve doymun olmayan zeminlerin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisini karşılaştırmak değildir. Araştırmacılar kazı öncesi ve kazı sonrası durumlarını laboratuvar ortamında gerçekleştirebilmek için farklı doymunluktaki numunelere 25, 50 ve 100 kPa gerilme uygulayıp kaldırdıktan sonra inşa sonrası durumunu gerçekleştirmek için 400 kPa'ya kadar gerilme uygulamışlardır. Bu tez çalışmasında ise deneyin uygulanışı açısından Phanikumar ve Amrutha (2013)'den farklı olarak numunelere şişme basıncı kadar gerilme uygulanmış ve ardından yükleme aşamalarına geçilmiştir.

Bu çalışmanın amacı yapay olarak sıkıştırılmış doymun olmayan zeminler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapmak ve deneylerden belirlenen konsolidasyon parametrelerini (konsolidasyon katsayısı, sıkışma indeksi, yeniden sıkışma indeksi ve ön konsolidasyon gerilmesini) doymun numunelerden elde edilen konsolidasyon parametreleri ile kıyaslamaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Konsolidasyon katsayısını belirlemek amacıyla Casagrande ve Fadum (1940) deformasyon-logaritma zaman grafiğindeki %0 ve %100 konsolidasyon derecelerini kullanarak log t_{50} yöntemini ve Taylor (1943) ise deformasyon-karekök zaman grafiğindeki %0 ve %90 konsolidasyon derecelerini kullanarak karekök t_{90} yöntemini geliştirmişlerdir. Cortellazzo (2002), Alshenawy (2007) ve Muntohar (2009)'ın konsolidasyon katsayısını belirlemek amacıyla kullandıkları yöntemler Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Cortellazzo (2002) Casagrande t_{50} yönteminden elde edilen konsolidasyon katsayılarının diğer yöntemler (bkz. Çizelge 2.1) kullanılarak elde edilen katsayılardan farklı olduğunu belirtmiştir. Alshenawy (2007)'ye göre Taylor karekök zaman yöntemiyle değerlendirilen konsolidasyon katsayıları, Casagrande logaritma zaman yöntemine göre daha büyük değerler verirken, dik hiperbol yönteminden hesaplanan konsolidasyon katsayıları en yüksek değeri vermiştir. Muntohar (2009) ise Taylor karekök zaman yönteminin en uygun sonuçları verdiğini ifade etmiştir.

Çizelge 2.1 Cortellazzo (2002), Alshenawy (2007) ve Muntohar (2009) tarafından konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için kullanılan yöntemler.

Yöntem	Cortellazzo (2002)	Alshenawy (2007)	Muntohar (2009)
Casagrande ve Fadum (1940), t_{50}	+	+	+
Taylor (1943), t_{90}	+	+	+
$H^2 / t-U$	+		
$\log d - \log t$	+		
Dik hiperbol		+	
Erken evre logaritma zaman		+	+
Feng $\sqrt{t60}$			+

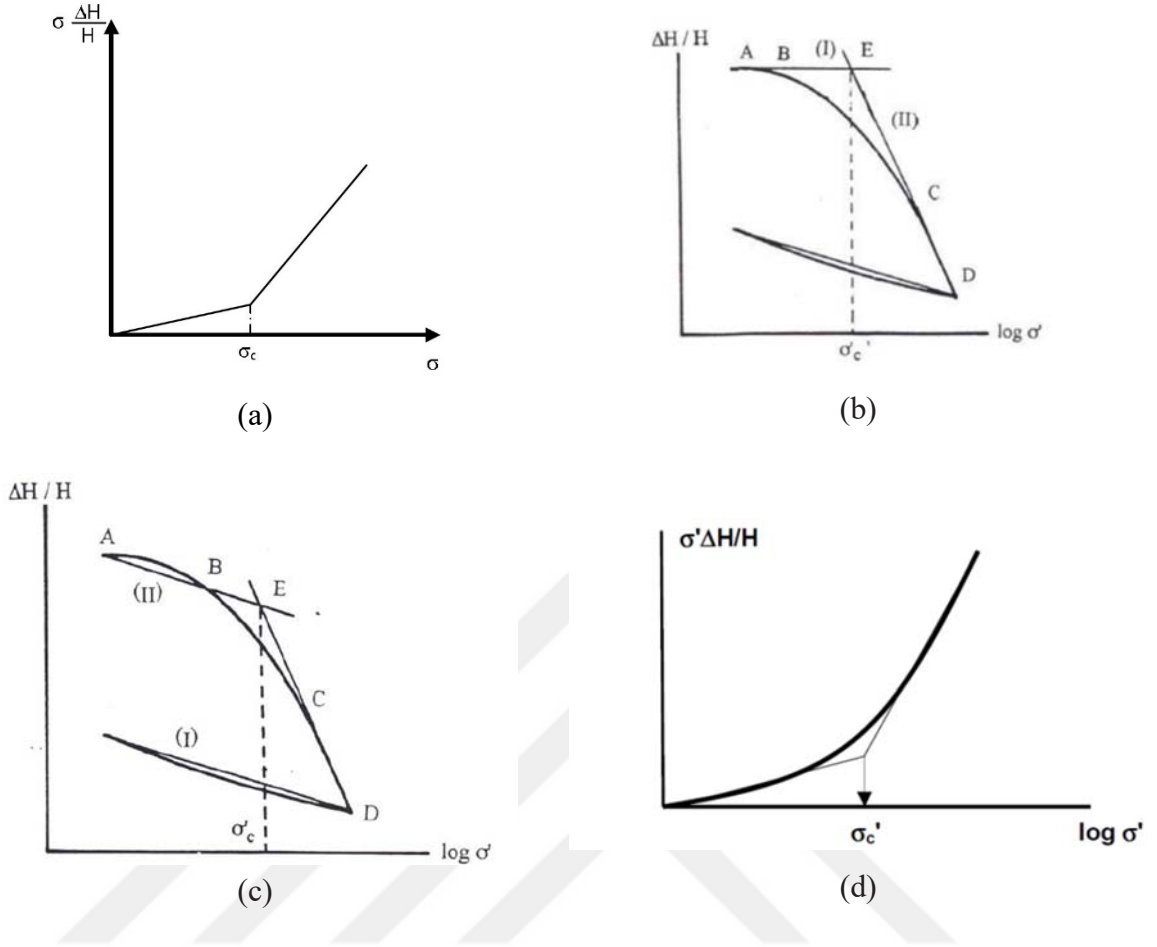
Son 70 yılda konsolidasyon testi kullanılarak sıkışabilir zeminlerin ön konsolidasyon basınçlarını tanımlamak için birçok yöntem geliştirilmiştir (Boone, 2010). Düşey efektif gerilme ya da ön konsolidasyon gerilmesi kavramı jeoteknik mühendisliğinde oturma ya da deformasyon davranışını analiz ve tahmin etmekte faydalı olmuştur. Boone (2010) karakteristik efektif gerilmeyi tanımlamak için belirsizlikler içeren grafiksel yöntemlerin

(özellikle yarı logaritmik grafik yöntemler) kullanıldığını belirtmiştir. Araştırmacı tarafından hazırlanan ve literatürdeki ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi için önerilen yöntemlerin özeti Çizelge 2.2’de sunulmuştur. Ayrıca bu araştırmacı, ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi için alternatif bir yöntem de önermiştir.

Özocak ve Altundağ (2016) ön konsolidasyon basıncının zeminin sıkışma- konsolidasyon davranışını etkileyen önemli bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir. Bu araştırmacılar, daha önce yapılan çalışmaların çoğunun konsolidasyon deneyinden elde edilen konsolidasyon eğrileri kullanılarak yapıldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, 8 farklı silt örneğini farklı kil oranlarında bulamaç haline getirmişler ve 100 kPa ön konsolidasyon basıncında örneklerin konsolide edilmesini sağlamışlardır. Ön konsolidasyon basıncını bulmak için Casagrande (1936), Schmertmann (1955), Burmister (1951), Butterfield (1979), Van Zelst ve eski yöntemler olmak üzere 6 farklı grafik yöntem kullanılmışlar ve bu yöntemlerde grafik çizildikten sonra grafik üzerinde bir dizi işlemin yapılmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, okuma yöntemleri olarak tanımlanan grafik şeklinden faydalanarak doğrudan (işlemsiz) ön konsolidasyon basıncını veren Janbu (1982), Tavenas (1979) ve Şenol (1997)’un önerdiği yöntemleri de kullanılmışlardır. Bu yöntemler içinde gerçeğe en yakın gerilme değerini veren yöntemin Casagrande yöntemi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yöntemlere ait grafikler Şekil 2.1’de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 Ön konsolidasyon basıncını bulmak için kullanılan grafiksel yöntemler ve temelleri (Boone, 2010).

Yöntem	Yöntemlerin temelleri
Casagrande yöntemi, (1936)	Düşey eksen (e , boşluk oranı) – yatay logaritmik eksen (σ' , efektif gerilme) üzerinde eğimi en yüksek olan noktayı seçin, bu noktaya sırasıyla teğet geçen ve paralel bir doğru çizin, bu iki doğru arasında kalan açığı ikiye bölen uzun bir doğru çizin. Bakir sıkışma eğrisine teğet olan doğru ile uzun doğrunun kesişim noktası ön konsolidasyon basıncı (σ'_p) olarak tanımlanır. Matematiksel ilişkiler zeminlerin konsolidasyon testinde maruz kaldıkları tekrarlamalı yükleme ve boşaltma eğrilerini ve ayrıca yükleme kısmındaki bakir sıkışma eğrisini tanımlar.
Janbu yöntemi, (1969)	$\sigma' - m$ grafiğinde, m 'nin belirgin düşüş gösterdiği basınç değeri ön konsolidasyon basıncı (σ'_p) olarak tanımlanır. Deneysel ilişkiler zeminin yapısal dağılımını ve grafikleri temsil eder.
Pacheco Silva yöntemi, (1970)	Casagrande (1936) grafiğinde e_0 noktasından bir doğru çizin, bu doğru ile bakir sıkışma eğrisinin düz kısmından çizilen doğru ile kesiştiği noktayı belirleyin, bu noktadan $e - \sigma'$ grafiğine uzanan bir dik çizin. Bu noktanın bakir sıkışma eğrisinden çizilen doğru ile kesiştiği nokta ön konsolidasyon basıncı (σ'_p) olarak tanımlanır. Deneysel ilişkiler ve grafik yöntem.
Butterfield yöntemi, (1979)	Doğrusal ölçekte $\ln(1+e)$ ve $\ln \sigma'_p$ tepe noktalarının kesişimi ön konsolidasyon basıncı (σ'_p) olarak tanımlanır. Deneysel ilişkiler ve grafik yöntem.
Becker et al. Yöntemi, (1987)	Efektif gerilme (σ') – iş (w , kJ / m^3) grafiğinde bakir sıkışma eğrisinin ve yeniden sıkışma eğrisinin kesişim noktası ön konsolidasyon basıncı (σ'_p) olarak tanımlanır. Numuneyi sıkıştırmak için gereken enerjiyi baz alan bir yaklaşımdır.
Oikawa yöntemi, 1987	Doğrusal olan $\log(1+e)$ ve gerilme eksenlerinin kesişim noktası olarak tanımlanır. Deneysel ilişkiler ve grafik yöntem.
Burland yöntemi, (1990)	100 kPa gerilme altındaki boşluk oranı ve C_c tanımlanır ve boşluk oranı indeksi belirlenir [$I_v = (e - e_{100}) / C_c$]. I_v ise gerilme grafiğinde bakir sıkışma ve yeniden sıkışma eğrilerinin kesişim noktası olarak tanımlanır. Boşluk oranına ve gerilme davranışına bağlı olarak zeminin sıkışma davranışını baz alan deneysel ve grafiksel yöntem.
Jacobsen yöntemi, (1992)	$\sigma'_p = 2,5\sigma_k$. σ_k , Casagrande yönteminden belirlenen eğim noktası. Grafiksel ve deneysel gözlem (Danish killeri davranışı).
Onitsuka et al. Yöntemi, (1995)	$\ln(1+e)$ eğrisinin doğrusal kısmı ile logaritmik gerilme eksenlerinin kesişme noktası. Deneysel gözlemlere ve grafik yöntemine dayanır.



Şekil 2.1 Ön konsolidasyon basıncının belirlemek için (a) Tavenas (1979), (b) Eski, (c) Van Zelst, (d) Şenol (1997) tarafından önerilen yöntemlere ait grafikler.

Fener (2006) çalışmasında zeminlerin sahip olduğu tane boyu dağılımının ön konsolidasyon basıncı ve zemin hafızası üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla farklı kil-kum oranlarında ve doymun ortamdaki karışımlara $0,028 \text{ kgf/cm}^2$ sürşarj yükü 12 ay uygulayarak 10 adet yapay zemin numunesi hazırlamıştır. Bu numunelerin her birinden 15 adet örnek alınarak konsolidasyon deney düzeneğine yerleştirilmiş ve $2,86 \text{ kgf/cm}^2$ ön konsolidasyon basıncı farklı sürelerde uygulanarak gerilmelerin doku yoluyla zeminlerin hafızasına kaydedilmesi sağlanmıştır. Zeminlerin ön konsolidasyon basınçlarını elde edebilmek için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca zemin hafızası ve geçirimlilik arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek için örneklerin permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Zeminlerdeki tane boyu dağılımının zemin hafızası ve ön konsolidasyon gerilmesi üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Farklı oranlarda hazırlanan kil-kum karışımında zemin hafızasının kil yüzdesi ve ön yükleme süresine bağlı olduğunu, kil yüzdesi arttıkça

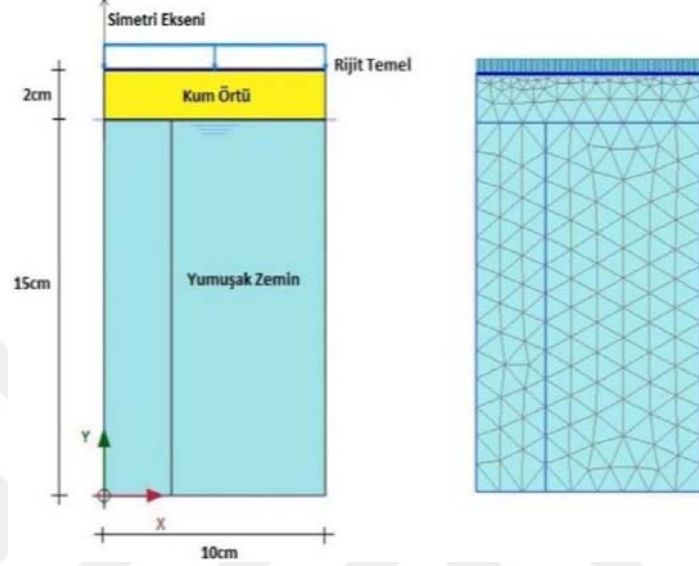
uygulanan gerilmenin zemin hafızasına işlenme süresinin arttığını ve ön yükleme süresinin artmasıyla da ön konsolidasyon gerilmesinin arttığını belirlemiştir. Zeminlerin permeabilite katsayılarının tane boyu dağılımına bağlı ve ters orantılı olduğunu belirtmiştir.

Yurtçu ve Özocak (2016), bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemlerini kullanarak konsolidasyon deneyinden elde edilen sıkışma indeksinin bulunmasını çalışmışlardır. Literatür araştırması yaptıktan sonra, toplam 285 adet veri derlemiş ve bu verilerin 200'ünü eğitim ve 85'ini ise test aşamasında kullanmışlardır. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini değerlendirmek için çoklu regresyon analizleri yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, likit limit, doğal su içeriği, plastisite indisi, doğal birim ağırlık, boşluk oranı ve efektif gerilmenin sıkışma indisini etkileyen parametreler olduğu anlaşılmıştır. Araştırmacılar ayrıca, yapay sinir ağları yönteminin arazi analizleri sonucunda sıkışma indeksini tahmin etmede en iyi yöntem olduğunu belirlemiştir.

Dipova ve Cangir (2010) yumuşak mavi killerin sıkışabilirlik özelliklerinin arazi ve laboratuvar deneyleriyle bulunmasını amaçlamışlardır. Bu amaçla sondaj kuyularında SPT, bu kuyuların yakınlarda CPT ve laboratuvar da zemin indeks deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri değerlerin sıkışabilirlik parametreleriyle olan ilişkisini bulmak için çoklu regresyon analizleri yapmışlar ve yapay sinir ağları yöntemi kullanmışlardır. Çalışma sonunda yapay sinir ağları yönteminin arazi analizleri sonucunda sıkışabilirlik parametrelerini tahmin etmede en iyi yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Uysal vd. (2018) yumuşak zemin model parametrelerinin zemin davranışına etkisini çalışmışlardır. Bu çalışmanın ilk kısmında yumuşak kilin (kaolin, likit limitin 1,5 katı su katılarak 30 kPa basınçla konsolide edilen kilin) konsolidasyon davranışı büyük ölçekli konsolidasyon cihazıyla ölçülmüştür. İkinci kısımda ise, laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen parametrelerin yumuşak zemin davranışına etkisi Plaxis 2D sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde yumuşak zemin modeli ve model parametreleri olarak da laboratuvar sonuçlarından elde edilen parametreler kullanılmıştır. Permeabilitenin artmasıyla oturmaların hızlandığı, ön konsolidasyon basıncının artmasıyla oturmaların zamana bağlı olarak azaldığı ve ön konsolidasyon basıncının artmasıyla

permeabilitenin azaldığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Modelin doğruluğu ise sayısal modelden ve deneylerden elde edilen parametrelerin yakın olmasıyla anlaşılmıştır. Oluşturulan model, numune hazırlama ve ön konsolidasyon aşamalarına ait görüntüler sırasıyla Şekil 2.2 ve 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Uysal vd. (2018) tarafından Plaxis 2D ile oluşturulan model ve sonlu eleman ağları.



(a)



(b)

Şekil 2.3 Yumuşak kilin konsolidasyon aşaması (a) bulamaç kalıba dökülmesi ve (b) ön konsolidasyon yüklemesinin ağırlıklar yerleştirilerek yapılması (Uysal vd., 2018).

Naser (2013) yaptığı çalışmada konsolidasyon deney düzeneğinin benzerini bilgisayar ortamına sayısal olarak aktarmıştır. Bu amaçla konsolidasyon hücresine yerleştirilen kil numunesini homojen olarak, alt ve üst yüzeylerine yerleştirilen filtre kâğıdı ve poroz taşları da geçirgen olarak bilgisayar yazılımında tanımlamıştır. Tek düze olmayan başlangıç aşırı boşluk suyu basıncı dağılım durumu Craig (2007) tarafından geliştirilen numerik analizle uyum göstermiştir. Araştırmacılar, başlangıçtaki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımlarının, farklı akışkan sınır koşullarının ve zeminin çeşitli özelliklerinin bu program yardımıyla incelenebileceğini savunmuşlardır.

Sünnetçi ve Ersoy (2016), killerin indeks özelliklerini kullanılarak konsolidasyon parametrelerini ampirik ilişkilerle pratik olarak bulmanın önemli olduğunu ve bu konunun birçok araştırmacı tarafından incelendiğini söylemişlerdir. Sünnetçi ve Ersoy (2016) bu özellikler arasında ampirik ilişkiler kurmuşlar ve kısa süre içinde konsolidasyon parametrelerini bulmayı hedeflemişlerdir. Bu araştırmacılara göre, yapılan çalışmaların büyük kısmında belirli saf killer üzerinde çalışılmış olması ampirik ilişkilerin kullanılabilirliğini kısıtlamıştır. Sünnetçi ve Ersoy (2016)'nın çalışmasında Ünye-Ordu yöresinde 15 ayrı noktadan alınan doğal zemin örneklerinin konsolidasyon özellikleri, Atterberg limitleri, özgül ağırlıkları, ıslak elek analizi ve hidrometre ile tane boyu dağılımları ve X-ışını kırınımı yöntemi ile örneklerin içerisindeki kil minerallerinin türü belirlenmiştir. Zeminin ön konsolidasyon gerilmesi ile likit limit değeri arasında istatistiksel analizler sonucunda korelasyon katsayısı $K=0,5$ olarak belirlenmiştir. Sıkışma indeksi ve yeniden sıkışma indeksi ile likit limit, plastisite indeksi ve doğal su içeriği arasında ise $K = 0,04$ ile $0,4$ arasında belirlenmiştir. Zemin özellikleri: Kum %28, Silt %38, Kil %34, PL 24-34, LL %63-76, IAEG (1976)'ya göre yüksek-çok yüksek plastisiteli kil, USCS'e göre yüksek plastisiteli kil (CH)'dir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi 0,189 ile 0,625 arasında ve yeniden sıkışma indeksi ise 0.011 ile 0.041 arasında değişmektedir.

Kayabalı ve Demir (2011) doğal zeminlerden elde ettikleri 12 adet yoğurulmuş zemin numunesi kullanmışlardır. Birçok araştırmacının şişme basıncını dolaylı yollardan saptadığını fakat dolaylı yoldan şişme basıncı hesaplayan yöntemlerin çok sayıda ve aynı özellikli numune gerektirdiğini belirtmişlerdir. Şişme basıncı değerini doğrudan yöntem

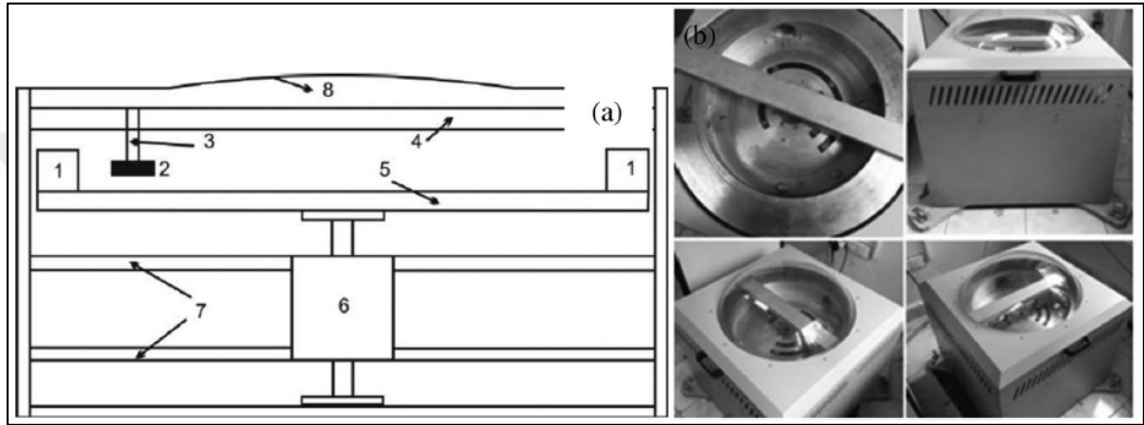
olarak tanımladıkları yöntemle hesaplamak için sabit hacimli deney yapabilen bir ölçüm aleti tasarlamışlardır. Basma vd. (1995) tarafından dolaylı testler olarak adlandırılan kısıtlanmış şişme, şişme-konsolidasyon, sıfır şişme ve çift konsolidasyon yöntemleriyle doğrudan yöntem olarak adlandırdıkları sabit hacimli şişme yöntemini kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama sonucunda sabit şişme deneyinden elde edilen şişme basıncı değerlerine göre kısıtlanmış şişme yönteminden elde edilen sonuçlar düşük, şişme-konsolidasyon ve sıfır şişme yöntemlerinden elde edilen sonuçlar yüksek çıkmış ve son olarak çift konsolidasyon yönteminden elde edilen sonuçlarda ise uyumsuzluk olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar doğrudan yöntemden elde ettikleri şişme basıncı değerleri ile serbest şişme deney yönteminden belirlenenler arasında önemli ilişki olduğunun altını çizmişlerdir.

Kayabalı ve Yıldız (2014), zeminlerin şişme basıncını dolaylı yollarla ölçen konsolidasyon düzeneğinin çoğu zaman olması gerekenden farklı sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacıların çalışmasında, statik kompaksiyon yoluyla elde edilen 124 adet numuneye sabit hacimli şişme ve serbest şişme yöntemleri kullanılarak 1000 adet deney yapılmıştır. Şişme basıncı deneyleri doğal su içeriği ve kuru yoğunluk parametrelerinden önemli derecede etkilenmektedirler. Fakat, bu parametreler ampirik olarak tek başlarına şişme basıncını tahmin etmede yeterli değildir. Şişme basıncını tahmin etmek için yapılan regresyon analizleri sonucunda; plastisite indisi 60'a kadar olan numunelerde kıvam limitleri, doğal su içeriği ve kuru yoğunluk parametreleriyle şişme basıncı arasındaki ilişkilerin yüksek regresyon sabitine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sabit hacimli şişme ve serbest şişme deney sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılması sonucunda regresyon sabiti yüksek bir bağıntı elde edilmiştir. Serbest şişme deneyi basit bir deney olup, verdiği sonuçların doğruluğu tartışmalıdır. Şişme basıncı belirlenen numunelerin Plastisite indisi 20 ile 60 arasındadır. Bu aralıktaki değerler dışında yapılan deneylerde ek araştırmalar yapılmalıdır. Zemin indeks özellikleri ile şişme basıncının hesaplanması için ampirik ilişki geliştirilen bu çalışma ile daha önce yapılan çalışmalar kıyaslandığında 50 kat farklılık gözlenmiştir. Bu farklılığın sebebi konsolidasyon yönteminin kullanılması, veri tabanının kısıtlı oluşu ve zemin plastisitesinin belirli aralıkta kalması olabilir.

Kayabalı ve Özdemir (2010) tarafından yapılan çalışmadaki ana amaç geleneksel konsolidasyon yönteminde bir haftadan fazla zaman alan deneysel çalışmaların süresini birkaç saate indirebilen santrifüj tekniğinin değerlendirilmesidir. Deney süresini kısaltmak için kullanılan santrifüjün çapı 60 cm, dönme hızı ise dakikada 3000 devirdir. Konsolidasyon teorisinde 1g olan yerçekimi ivmesi altında konsolidasyonun gerçekleşirken, santrifüj yönteminde ise 1000 g ve üzeri merkezkaç kuvveti uygulanarak zeminin konsolidasyonu sağlanmaktadır. Bunun sonucu olarak zemin numunesinin gözeneklerinden boşluk suyunun atılmasıyla konsolidasyon işleminin birkaç saat içinde gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Çalışmada 20 farklı seviyeden numune alınan Merzifon kilinden her seviye için 4 adet santrifüj örneği ve 3 adette konsolidasyon örneği hazırlanarak faydalanılmıştır. Geleneksel konsolidasyon deneyinde yüklemelerin iki kat artırılmasından dolayı Santrifüj konsolidasyon yönteminde de yüklemeler dönme hızları iki katına çıkarılarak artırılmıştır. Deney sonuçları yorumlanırken her seviyede yapılan deneyler için birim deformasyon – yük grafikleri çizilmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında sıkışma indeksi, yeniden sıkışma indeksi ve ön konsolidasyon gerilmesi değerlerinden yüksek korelasyon katsayısı elde edilmiş ve yöntemin bu anlamda %80-90 başarı gösterdiği saptanmıştır. Konsolidasyon katsayısı değerinin belirlenmesinde de yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilmesi durumunda önerdikleri yöntemin yüksek güvenilirlikte indeks bir deney olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Böylece, konsolidasyon deney süresinin birkaç saate ineceğini bildirmişlerdir.

Balcı (2015), santrifüjle konsolidasyon yönteminden elde edilen konsolidasyon parametreleriyle tek yönlü konsolidasyon deneylerinden elde edilen konsolidasyon parametrelerini karşılaştırmıştır. Santrifüjle konsolidasyon deneyinde eşdeğer yük olarak tanımlanan parametre konvansiyonel konsolidasyon yönteminde efektif gerilmeye denk gelmektedir. Bu parametre santrifüj cihazının dönme hızı ve dönme süresiyle alakalıdır. Konvansiyonel yükleme koşullarının santrifüjle konsolidasyon yöntemindeki yükleme koşullarıyla aynı olması gerekmektedir. Bu amaçla denemeler yapılmış ve iki yöntem arasında yapılan regresyon analizleri sonucunda da kısa süreli ve uzun süreli olmak üzere iki yöntem geliştirilmiştir. Uzun süreli yöntemden elde edilen oturma-zaman eğrilerinin durumu incelendiğinde konvansiyonel konsolidasyon yönteminden elde edilen grafiklere

daha yakın olduğu, kısa süreli yöntemin ise deney süresini kısaltmak üzere yapılacak çalışmalarda avantaj sağlayacağı düşünülmüştür. Santrifüjle konsolidasyon deneyi konvansiyonel konsolidasyon teorisiyle kıyaslandığında ön konsolidasyon gerilmesini ve sıkışma indeksini bulmada başarılı, yeniden sıkışma indeksini bulmada başarısız olduğunu ve konsolidasyon katsayısının hesaplanmasının da mümkün olmadığını bildirmiştir. Çalışmada kullanılan santrifüjün farklı açılardan ve şematik olarak görünüşü Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2. 4 a. Şematik santrifüj gösterimi (ölçeksiz): 1. Örnek haznesi, 2. Mesafe ölçen lazer ünitesi, 3. Lazer ünitesini sabit kirişe bağlayan kol, 4. Kiriş, 5. Döner tabla, 6. Motor, 7. Sistemi sabit tutan kirişler, 8.Kapak, b. Santrifüjün değişik açılardan çekilen görüntüleri Balcı (2015).

Asadi (2017) konsolidasyon deneyinden elde ettiği konsolidasyon katsayısını permeabilite-konsolidasyon deneyinden elde edilen katsayı ile kıyaslamıştır. Bu amaçla farklı indeks özelliklerdeki 12 yoğurulmuş numuneyi 6 farklı santrifüj hızında sıkıştırarak 72 farklı deney örneği hazırlamıştır. Hazırlanmış örnekler ve doğal numuneler üzerinde konsolidasyon-permeabilite deneyi, tek yönlü konsolidasyon deneyi ve santrifüjle konsolidasyon deneylerini uygulamıştır. Konvansiyonel konsolidasyon deney düzeneğinden ve permeabilite-konsolidasyon deney düzeneğinden (kombine düzenek olarak adlandırılan 1 gün yükleme ardından düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılan Şekil 2.5'te gösterilen düzenekten) elde edilen deney sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğunu belirlemiştir. Konvansiyonel yöntemlerle elde edilen konsolidasyon katsayısının yüksek plastisiteli numunelerde yük artışıyla birlikte azaldığı, düşük plastisiteli numunelerde herhangi bir ilişki gözlenemediği sonucuna varmıştır.

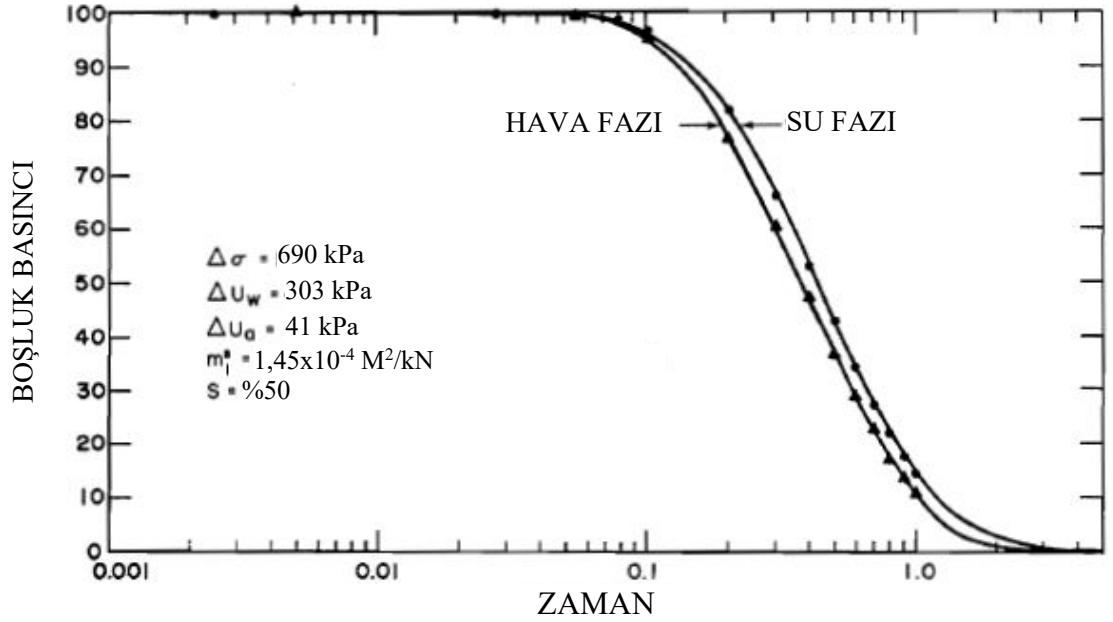
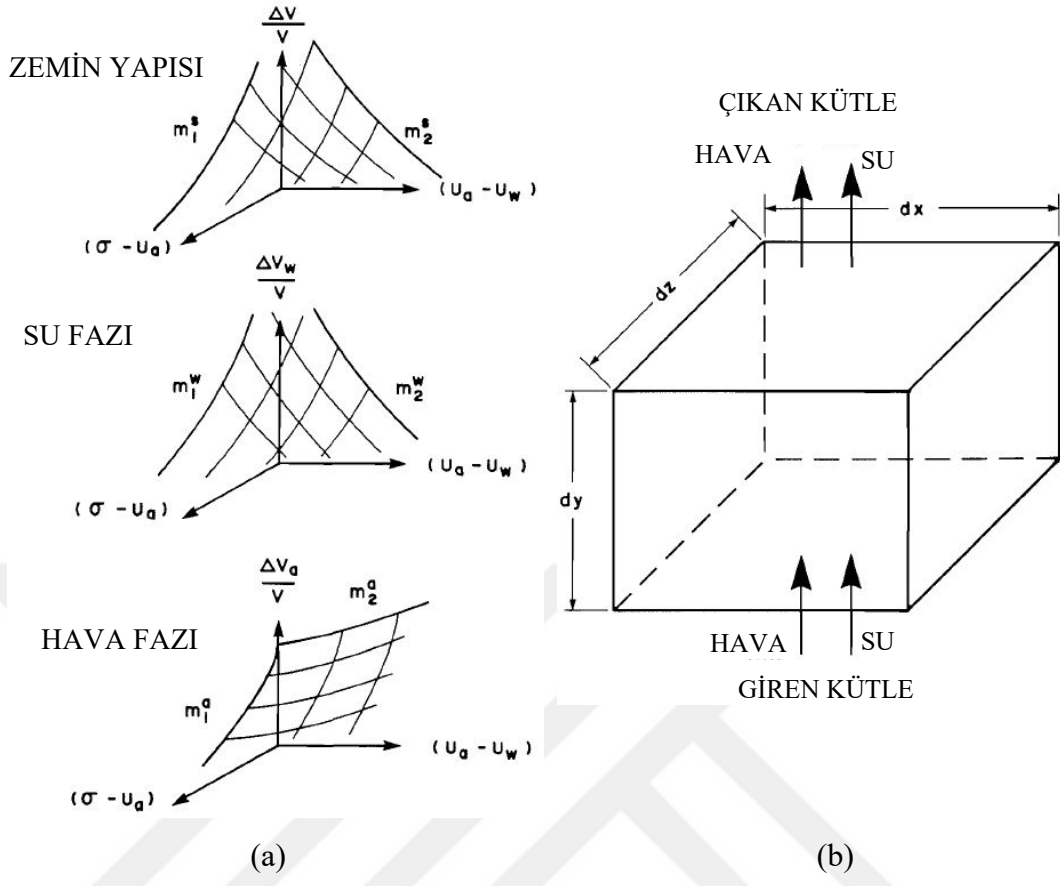


Şekil 2.5 Permeabilite-konsolidasyon deney düzeneği (Asadi, 2017).

Gallipoli vd. (2002) daha önceki çalışmalarda yarı doymuş zeminler için önerilen modellerin daha etkin kullanılması ve yarı doymuş zeminlerin elastoplastik davranışlarının araştırılmasına temel bir çerçeve geliştirmek amacıyla yeni parametreler içeren modeller önermişlerdir. Önerdikleri parametreleri daha önceden yayınlanan normal konsolide örneklerde uygulanan deney sonuçlarını kullanarak doğrulamışlardır. Taneler arası dokanaklardaki menüsküs suyundan kaynaklanan taneleri bir arada tutma ya da bağlanma etkisinin hesaplanması için emme ve doymuluk derecesinin birlikte temsil edildiği bir sayısal değere ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar, bu amaçla menüsküs suyunun da dikkate alındığı bir model önermişlerdir.

Fredlund ve Hasan (1979) yaptıkları çalışmada doymamış zeminler için tek yönlü konsolidasyon teorisini çalışmışlardır. Bu araştırmacılar, Fredlund ve Morgenstern (1976 ve 1977)'nin çalışmalarında kullandığı denklemlerden, ilişkilerden ve önerilerden faydalanmışlardır. Araştırmacıların faydalandıkları temel bilgiler çalışmalarındaki alt yapının anlaşılması açısından özet şeklinde sıralanmıştır. Fredlund ve Morgenstern (1976), doymamış zeminlerdeki gerilme ve deformasyon durum değişkenleri arasında bağıntı kurmak ve hacim değişikliklerini öğrenmek için ilişkiler sunmuştur (Şekil 2.6a). Fredlund (1977), doymamış zeminlerde denge denklemlerine dayanarak çok fazlı bir

sistem için gerilme durumu değişkenleri önermişlerdir. Doymamış zeminlere gerilme uygulandığında dengeye gelen iki faz olarak zemin taneleri ve hava ile su ara yüzeylerini ayrıca akan iki faz olarak da hava ve suyu değerlendirerek 4 fazlı sistem tanımlamışlardır. Doymamış zeminlerde gerilme durumunu tanımlamak için ise üç değişken önermişlerdir. Bu gerilme değişkenleri $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$; $(\sigma - u_w)$ ve $(u_a - u_w)$; ve $(\sigma - u_a)$ ve $(\sigma - u_a)$ şeklindedir. Fredlund ve Hasan (1979) çalışmasında konsolidasyon denklemlerini türetmek için $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$ gerilme değişkenlerini kullanmıştır. Burada σ : toplam gerilme; u_a : boşluk havası basıncı ve u_w : boşluk suyu basıncıdır. Araştırmacılar zeminlere gerilme uygulandığında su fazının sıkıştırılmaz olduğunu ve zamanla zeminden suyun aktığını, hava fazının ise sıkışabilirlik özelliğe olduğunu ve su fazından bağımsız olarak aktığını vurgulamışlardır (Şekil 2.6b). Araştırmacılar doymamış zeminlere yük uygulandıktan sonra meydana gelen ani sıkışmaların hava ve su fazlarında aşırı basınçlara neden olduğunu ayrıca bu aşırı gözenek basınçlarının zeminin sıkışabilirliğine, hava ve su fazlarına bağlı olduğunu savunmuşlardır. Gözenek havası ve gözenek suyu basınç değerlerini zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplamak için iki denklem elde etmişlerdir. Bu denklemler, herhangi bir zamanda su ve hava basınçlarını öğrenmek için aynı anda çözülmüştür. Sonuç olarak doygun olmayan zeminlere yük uygulandıktan sonra zeminden hava ve suyun aynı anda denge koşullarına ulaşılincaya kadar aktığını ifade etmişlerdir (Şekil 2.6c).

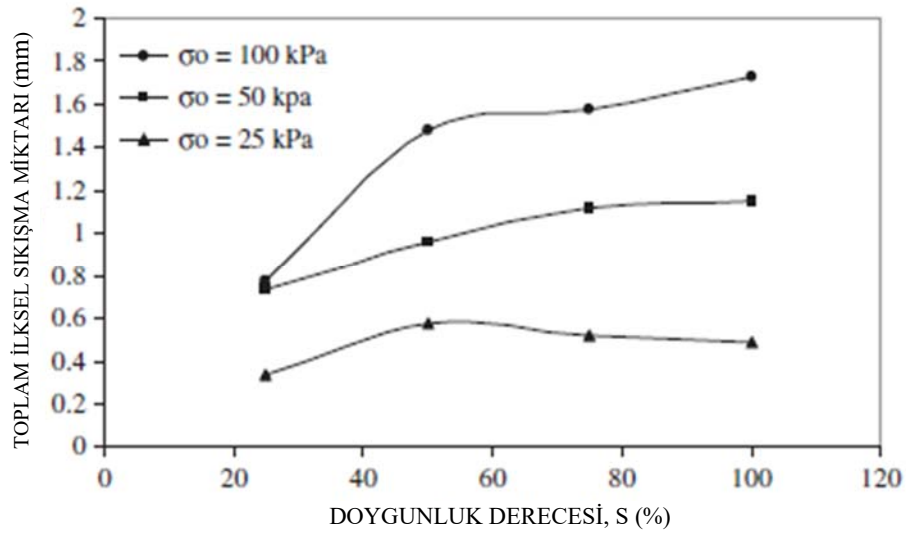


(c)

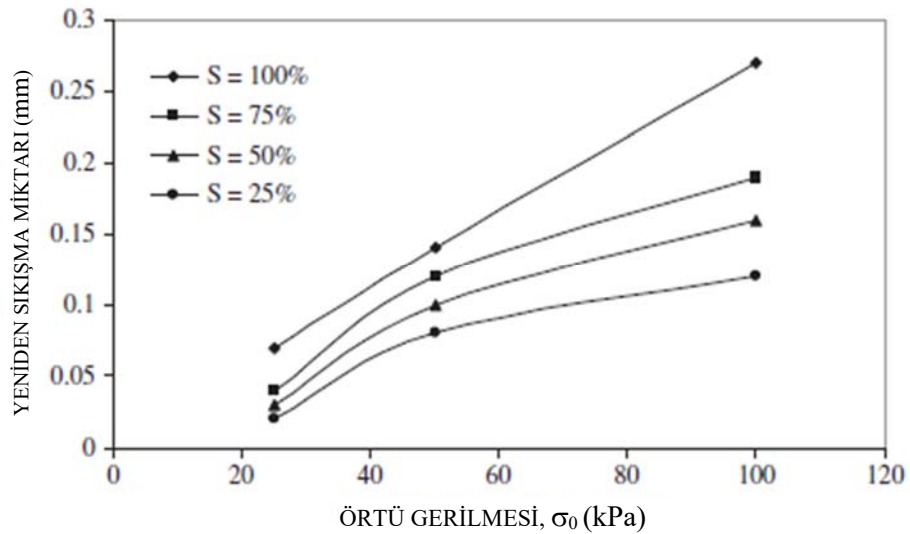
Şekil 2.6 (a) Doymun olmayan zeminlerde zemin yapısına, hava ve su fazlarına ait temel yüzeyler, (b) zemin yapısı ve (c) boşluk basınçlarına (su ve hava basıncı) karşı zaman grafiği (Fredlund ve Hasan, 1979).

Phanikumar ve Amrutha (2013), (i) kazı öncesi yerindeki koşullar, (ii) kazı sonrası koşullar ve (iii) inşa sonrası temel ve yapı yüklerinin uygulanması koşulları için ani oturma (elastik oturma) ve konsolidasyon oturması şartlarını laboratuvar ortamında sağlamak için bir dizi konsolidasyon deneyi uygulamışlardır. Araştırmacılar, düşey yönde ve tek yönlü yüklenen bir kil tabakasının konsolidasyon oturmasını etkileyen parametrelerin; doyumluk derecesi (% S), ilksel boşluk oranı (e), örtü yükü (σ_o), yeniden sıkışma miktarı ve yapılardan gelen yükler (σ) olduğunu ifade ederek, bu parametrelerin kilin sıkışabilirlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kurutulduktan sonra 425 μm açıklığa sahip elekten geçirilerek hazırlanan yoğurulmuş numunelerin birim ağırlıklarını 13 kN/m^3 'de sabit tutan Phanikumar ve Amrutha (2013) numunelerin doyumluk derecelerini %25, %50, %75 ve %100 olarak seçmişlerdir. Araştırmacılar, kazı öncesi yerindeki ve kazı sonrası koşulları laboratuvar ortamında sağlamak için 25, 50 ve 100 kPa'lık örtü yüklerini bir gün boyunca numuneler üzerine uygulayıp ardından kaldırarak bir gün süreyle yük boşaltma aşamasını kaydetmiş ve inşa sonrası aşamasını sağlamak için de yüklemeleri 400 kPa normal gerilemeye ulaşmıncaya kadar uygulamışlardır. Böylece, örtü yükünün uygulanması ve kaldırılmasıyla kazı öncesi ve sonrası koşullar, normal gerilmelerin uygulanmasıyla da inşa sonrası durumlar için parametreler elde edilmiştir. Araştırmacılar, konsolidasyon deneyleri sonucunda ilksel sıkışma miktarının ve yeniden sıkışma miktarının doyumluk derecesindeki (%S) bağlı değişimini araştırmışlardır. Buna göre %25 ve %50 doyumluk derecelerinde hazırlanan üçer örneğe 25, 50 ve 100 kPa yapı yükünü ayrı ayrı uygulanmışlardır. %25 doyumluk derecesinden %50 doyumluk derecesine geçişte ilksel sıkışma miktarlarının 0,34 mm'den 0,49 mm'ye, 0,74 mm'den 1,15 mm'ye ve 0,78 mm'den 1,73 mm'ye arttığı görülmüştür (Şekil 2.7). Bu sonuç ilksel sıkışma miktarının artan doyumluk derecesiyle birlikte arttığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni olarak örneğin su içeriğinin artması, örneğe uygulanan yükün artması, doyumluğu artan örneklerin yumuşaması ve hacimce azalma eğiliminde olması gösterilmiştir. Benzer sonuçlar %75 ve %100 doyumluk derecelerinde de elde edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar %75 ve %100 doyumluk derecelerinde hazırlanan üçer örneğe 25, 50, 75 ve 100 kPa yapı yükünü ayrı ayrı uygulanmıştır. %75 doyumluk derecesinden %100 doyumluk derecesine geçişte yeniden sıkışma miktarlarının 0,02 mm'den 0,12 mm'ye, 0,03 mm'den 0,16 mm'ye, 0,04 mm'den 0,2 mm'ye ve 0,07 mm'den 0,27 mm'ye arttığı görülmüştür (Şekil 2.8). Benzer sonuçlar

%25 ve %50 doygunluk derecelerinde de elde edilmiştir. Bu sonuç yeniden sıkışma miktarının artan doygunluk derecesiyle birlikte arttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, başlangıç boşluk oranı (e_0) aynı olan numunelerde tüm doygunluk dereceleri için örtü yükünün artışı ile birlikte sıkışabilirliğin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, sıkışabilirlik katsayısı (a_v), hacimsel sıkışabilirlik katsayısı (m_v), sıkışma indeksi (C_c) ve yeniden sıkışma miktarı değerlerinin %75 doygunluğa kadar arttığı ve bu değerden itibaren daha yüksek doygunluklarda ve tam doygun durumlar için düştüğü sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.7 Farklı örtü basınçları uygulanarak elde edilen toplam ilksel sıkışma miktarına karşılık doygunluk derecesi grafiği (Phanikumar ve Amrutha, 2013)



Şekil 2.8 Farklı doygunluk derecelerinde elde edilen yeniden sıkışma miktarına karşılık örtü gerilmesi grafiği (Phanikumar ve Amrutha, 2013)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Ankara çevresinden derlenen farklı plastiklikteki numuneler laboratuvarında kurutulup öğütülerek 40 numaralı elekten eilenmiştir. Çalışmanın geniş bir plastiklik aralığını temsil etmesine özen gösterilmiştir. Özdeş örnekler hazırlamak için faz diyagramlarından üretilen eşitliklerden yararlanılmıştır. Bunun için örneklerin başlangıç boşluk oranları ve kuru birim ağırlıkları sabit tutulmuştur. Numunelerin indeks ve fiziksel özellikleri belirlenmiş, numuneler statik yöntemler kullanılarak sıkıştırılmıştır. Doygunluk derecesinin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada 8 adet zemin numunesinin her birinden 4 farklı doyumluktaki (%70, 80, 90 ve 100) toplam 32 adet örnek üzerinde çalışılmıştır. Doygun örnekler elde etmek ve bu örnekler üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmek için permeabilite-konsolidasyon hücresi kullanılmıştır. Doygun olmayan örneklerin şişme basıncı değeri Kayabalı ve Demir (2010) tarafından geliştirilen düzenekte ölçülmüştür. Konsolidasyon deneylerine başlamadan şişmenin etkisini hesaba katmak için örnekler şişme basınçları kadar yük uygulanmıştır. Konsolidasyon deneylerinde tüm örnekler 25 ile 400 kPa arasında değişen normal gerilmeler uygulanmış ve bu gerilmeler geri yükleme aşamasında kademeli olarak kaldırılmıştır.

3.1 Numunelerin Fiziksel ve İndeks Özelliklerinin Belirlenmesi

Numunelerin fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre deneyi, likit limit ve plastik limit deneyleri, piknometre deneyi yapılmış ve USCS'e göre zemin sınıfları belirlenmiştir.

3.1.1 Elek analizi – Hidrometre analizi

6 çeşit numunenin her birinden elek analizi için 100 gr kuru numune ve hidrometre analizi için 200 nolu eleğin altına geçen 50 gr kuru numune tartılarak beherlere alınmıştır. Islak elek analizi için beherlere alınan 100 gr örnek üzerine tanelerin birbirinden kolay ayrılması için su eklenerek karıştırılmış ve 1 gün süreyle bekletilerek deneye tabi

tutulmuştur. 200 nolu elek üzerinde kalan numunelerin yüzdesi kum boyu taneler olarak kaydedilmiştir.

40 gram sodyum hegzametafosfat $[(NaPO_3)_6]$, 4 gram sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve 1000 cc saf sudan oluşan homojen bir karışım hazırlanarak beherlerde bulunan numunelerin üzerine 125 cc dökülmüş ve cam bagetlerle karıştırılarak 12 saat bekletilmiştir. Ardından numuneler hidrometre mezürüne alınarak üzerine 875 cc saf su eklenmiş ve homojen olarak karıştırıldıktan sonra deneye başlanmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1 Hidrometre deney düzeneği.

3.1.2 Likit limit ve Plastik limit deneyleri

Plastik limit ve likit limit deneylerinde numunelerin 40 nolu elek altına geçen kısmı kullanılmıştır. Plastik limit deneyleri her numuneden 5 tekrar ve tekrardaki numune miktarı 50 gr olacak şekilde ASTM D 4318 – 05'e göre elde yuvarlama yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Likit limit deneylerinde her bir numune için 10-30 mm arasındaki batma miktarlarına denk gelen 5 noktada BSI 1377'e göre düşen koni yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

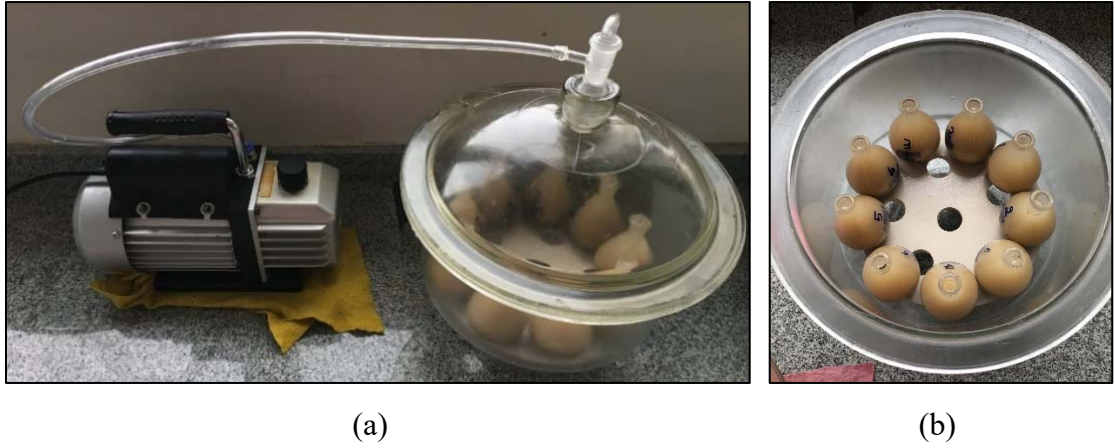
3.1.3 Piknometre deneyi

Numunelerin katı partikül yoğunlukları ASTM.D 854 – 06'ya göre piknometre deneyi uygulanarak 50 ml'lik piknometrelere kaplarında 25 gr kuru numune kullanarak hesaplanmıştır. Numunelerin gözeneklerinde bulunan havanın uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla piknometre kaplarında numunelerin üzerine bir miktar su eklenip vakumlanmak üzere desikatöre yerleştirilmiş ve 2 saat boyunca vakum uygulanmıştır (Şekil 3.3). Vakum uygulamasının ardından, piknometreler tamamen su ile doldurularak 30 dakika boyunca tekrar vakumlanmış, kapakları takılarak kurulanmış ve tartılmıştır.

Eşitlik (3.1)'deki formül kullanılarak numunelerin katı partikül yoğunluğu belirlenmiştir.

$$G_s = \frac{M_3}{M_1 + M_3 - M_2} \quad (3.1)$$

M_1 = Saf su ile dolu piknometrenin kütlesi, M_2 = Piknometre + kuru zemin + saf su kütlesi, M_3 = kuru zemin kütlesi, G_s = özgül ağırlık.



Şekil 3.2 (a) Vakum pompası ve desikatör, (b) Piknometre kapları.

3.2 Numune Hazırlama

Her numuneden %70, 80, 90 ve 100 doygunluk derecesinde homojen şekilde yoğrulmuş 4 adet özdeş örnek hazırlanmıştır. Örnek hazırlama aşamasında statik sıkıştırma yöntemi kullanılarak 2 adet %70 doygunluk derecesinde ve 1'er adet %80 ve %90 doygunluk derecesinde örnekler hazırlanmıştır. %70 doygunluktaki örneklerden biri permeabilite-konsolidasyon düzeneğinde doymuş numune elde etmek için kullanılmıştır.

Faz diyagramlarından elde edilen eşitlikler kullanılarak örnek hazırlamak için gerekli kuru birim ağırlıklar (M_s) ve su miktarları (M_w) hesaplanmıştır (Çizelge 3.1). Bu hesaplarda örneklerin başlangıç boşluk oranları ve kuru birim ağırlıkları sabit tutulmuştur. Örnek hazırlama aşamasında olası nem kaybını önlemek için hesaplanan su miktarlarının %0,5 fazlası kullanılmıştır.

Statik sıkıştırma yöntemi tek eksenli sıkışma dayanımı deney düzeneğinde numune hazırlama aparatı kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 3.3-a). Bu aparatta örnekler 2 cm yüksekliğe kısılanı kadar sıkıştırılmış ve yine bu aparat yardımıyla konsolidasyon hücresi ringlerine ve permeabilite-konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir.

Ringler içine yerleştirilen örneklerin alt ve üst yüzeylerine sırasıyla filtre kâğıdı ve poroz taş eklenerek konsolidasyon hücresinin tabanına oturtulmuştur. Ring sabitleyici kısım ringin üstüne yerleştirilmiş ve vidalarla hücreye sabitlenmiştir. Yükleme plakası poroz taşın üzerine oturtularak şişme basıncı ve ardından yapılacak konsolidasyon deneylerine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.3-b).

Permeabilite-konsolidasyon deney düzeneğindeki silindirik hücreye yerleştirilen örneklerin de alt ve üst kısımlarına sırasıyla filtre kâğıdı ve poroz taşlar yerleştirilmiştir. Üst kısımda yer alan poroz taşın üzerine suyun örneğe ulaşmasına izin veren delikli yükleme plakası yerleştirilerek hücre tabana oturtulmuştur. Hücrenin üzerine başlık yerleştirilmiş ve tabana vidalar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Başlık üzerinde yer alan yükleme pistonu yükleme plakası üzerine oturtularak düzenek konsolidasyon düzeneğine yerleştirilmiştir. Böylece örnekler doyurma işlemi ve ardından konsolidasyon deneyine

hazır hale getirilmiştir. Doyurma işlemi için üzerinde uzunluğu 11 cm ve iç çapları 4 mm olan 4 adet hortum ve 1 m uzunluğunda cetvel bulunan su seviyesi ölçme panosu kullanılmıştır. Bu hortumlar panonun alt ve üst kısmında vanalara bağlanmış ve su ile doldurulmuşlardır. Alt kısımdaki vanaya bağlanan su dolu ilave hortumlar yardımıyla permeabilite-konsolidasyon düzeneğinin başlık kısmında yer alan su giriş vanasından hücreye hidrolik eğimle su girişi sağlanmıştır. Böylece permeabilite-konsolidasyon düzeneğine yerleştirilen %70 doyumluk derecesinde hazırlanan örneklerin içinden hidrolik eğimle su geçirilerek %100 doyumluğa ulaşması sağlanmıştır (Şekil 3.3-c, d). Ayrıca konsolidasyon düzeneğinde yer alan saplamalar permeabilite-konsolidasyon düzeneğinden kısa olduğu için değiştirilerek daha uzun saplamalar kullanılmıştır (2 adet 35 cm ve 1 adet 60 cm, Şekil 3.5-a, b).

Çizelge 3.1 Faz diyagramlarından elde edilen eşitlikler kullanılarak hesaplanan değerler (N1 örneği).

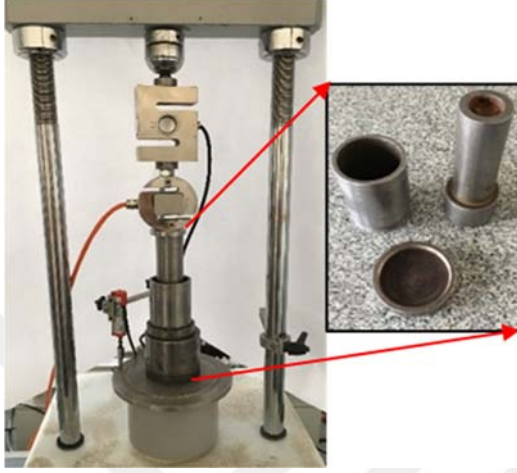
$e_0 (V_v/V_s)$	M_s (gr)	M_w (gr)	M_t (gr)	w (%)	$\rho_t (M_t/V_t)$	$S_r (V_w/V_v)$
0,7	63,2	11,3	74,5	18	1,90	0,7
0,7	63,2	12,9	76,1	20	1,94	0,8
0,7	63,2	14,6	77,7	23	1,98	0,9
0,7	63,2	11,3	74,5	18	1,90	0,7

V_t : zemin kütlesinin toplam hacmi, V_s : katı partiküllerin hacmi, V_v : boşlukların hacmi, w : su içeriği, ρ_t : toplam yoğunluk, S_r : doyumluk derecesi, e_0 : başlangıç boşluk oranı, M_s : kuru kütle, M_w : su miktarı ve M_t : toplam kütle

3.3 Şişme Basıncı Deneyleri

Kayabalı ve Demir (2010) tarafından geliştirilen düzeneğe içinde doyum olmayan örneklerin bulunduğu konsolidasyon hücreleri yerleştirmiş ve 2 kgf başlangıç yükü uygulanmıştır (Şekil 3.4). Ardından konsolidasyon hücresine numunenin şişmesini sağlamak için su eklenerek deney başlatılmıştır. Test düzeneğinde bir gün süreyle bekletilen doyum olmayan örneklerin şişme basıncı değerleri kaydedilmiştir.

Konsolidasyon deneylerine başlamadan şişmenin etkisini hesaba katmak için örneklerle bu düzenden elde edilen şişme basınçları kadar yük uygulanmıştır.

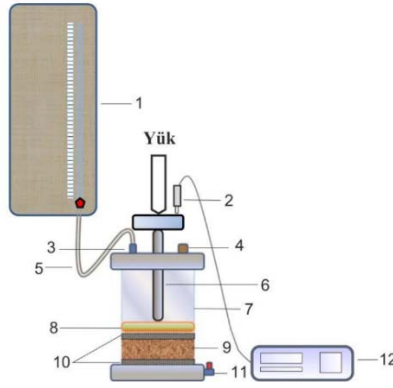


(a)



1. konsolidasyon hücresi, 2. ring sabitleyici, 3. vidalar, 4. poroz taş ve filtre kağıtları, 5. ring ve 6. yükleme plakası

(b)



1. su gösterge panosu, 2. deformasyon ölçer, 3. su giriş vanası, 4. su-hava çıkış vanası, 5. şeffaf hortum, 6. yükleme pistonu, 7. pleksiglas hücre, 8. yükleme başlığı, 9. zemin numunesi, 10. poroz taşlar, 11. su, 12. veri toplayıcı

(c)



(d)

Şekil 3.3 (a) Tek eksenli sıkışma düzeneği ve numune hazırlama aparatlarının yakından görünüşü, (b) Konsolidasyon hücresi parçaları, (c) Permeabilite-konsolidasyon düzeneği parçaları (plan görünümü) ve (d) Permeabilite-konsolidasyon düzeneği ve parçaları.



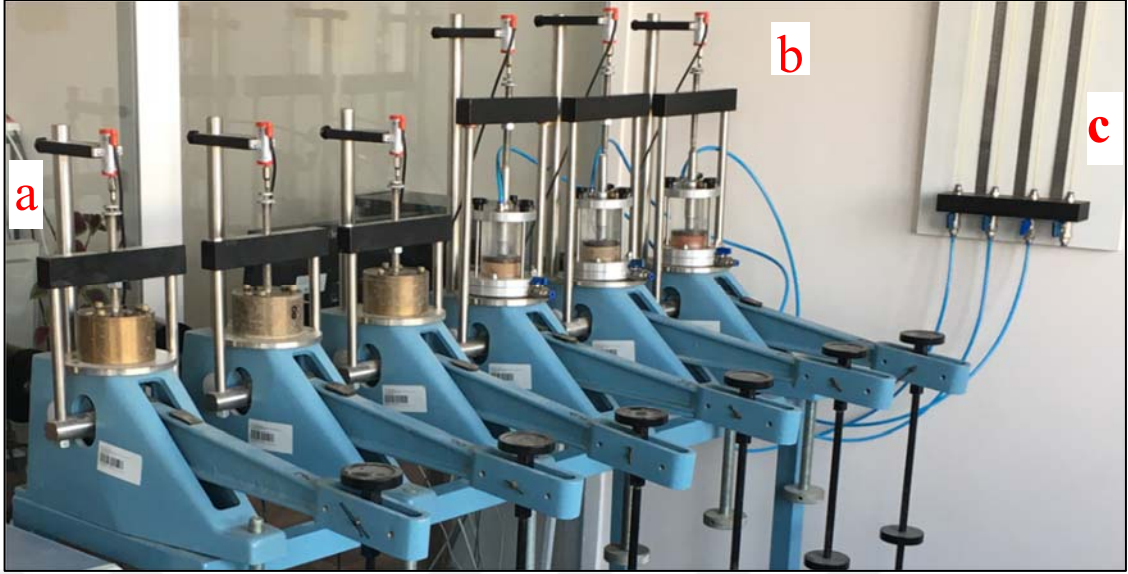
Şekil 3. 4 Şişme basıncı test düzeneği

3.4 Konsolidasyon Deneyleri

Permeabilite-konsolidasyon düzeneğinde ve konsolidasyon hücresinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon hücreleri ve permeabilite-konsolidasyon hücreleri üzerine yükleme başlıkları oturtulmuş ve örneğin yüklemeler sırasında kurumasını engellemek için hücreye su koyulmuştur. Konsolidasyon deneyine başlamadan önce şişme basıncı deney düzeneğinden elde edilen gerilmeler kadar örneklere yükleme yapılarak bir gün süreyle beklenmiştir.

%70, 80, 90 ve 100 doygunluk derecesindeki her bir örneğe 25, 50, 100, 200, 400, 200, 100, 50 ve 25 kPa normal gerilmeler uygulanarak ASTM D 2435-04'e göre konsolidasyon deneyleri yapılmış ve her bir gerilme için 1 gün süreyle deformasyon verileri kaydedilmiştir. Şekil 3.5'te konsolidasyon deney düzeneği sunulmuştur.

Zemin üzerine yapılan yüklemeler ve boşaltmalar sonucu numune boyundaki değişimi kaydetmek için deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Deformasyon ölçerlerden alınan veriler düzenli aralıklarla veri toplama ünitesine kaydedilmiştir. Bu aralıklar 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 600, 900, 1200, 1800, 2400, 3600, 7200, 10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 86400 sn. şeklinde seçilmiştir.



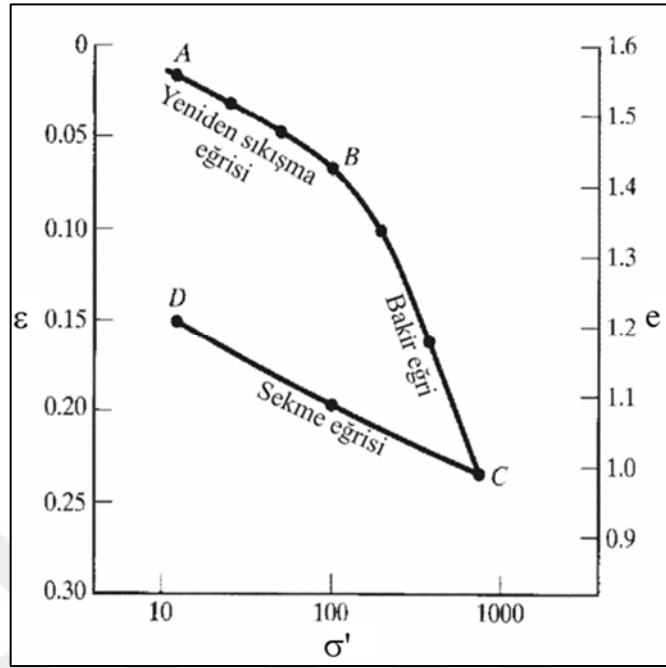
Şekil 3.5 (a) Geleneksel konsolidasyon deney düzeneği, (b) değiştirilmiş konsolidasyon deney düzeneği ve (c) su seviyesini gösteren panosu

Konsolidasyon deneyi sonucunda farklı doygunluk derecelerindeki numunelerin sıkışma indeksi (C_c), yeniden sıkışma indeksi (C_r), konsolidasyon katsayısı (c_v), ön konsolidasyon gerilmesi (σ'_p) gibi konsolidasyon parametreleri elde edilmiştir. Doymunluk derecelerindeki değişimin bu parametreler üzerindeki etkisi grafikler ve çizelgelerle açıklanmış ve yorumlanmıştır.

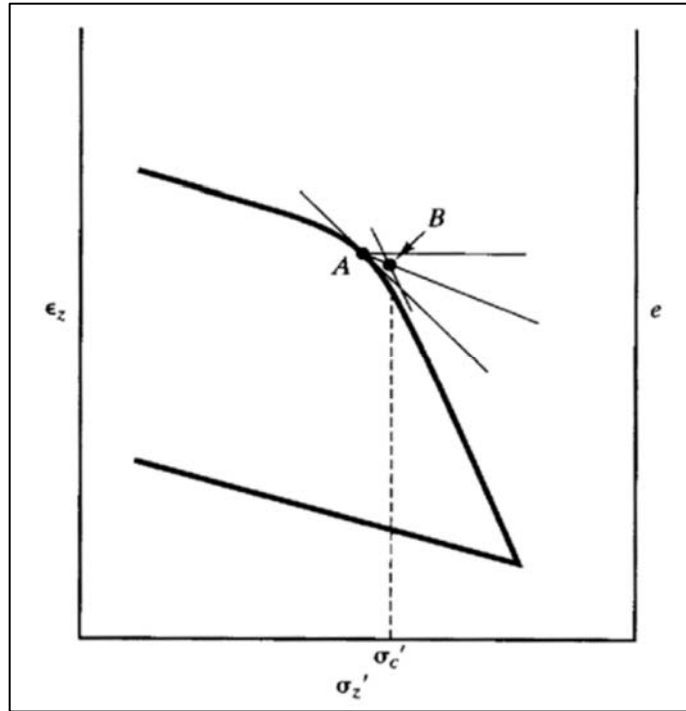
Örneklerin sıkışma indeksi, yeniden sıkışma indeksi ve ön konsolidasyon gerilmelerini belirlemek için boşluk oranı (e) - efektif gerilme (σ') grafikleri kullanılmıştır. Bu grafiklerde sıkışma indeksini bulmak için bakir sıkışma eğrisinin eğimi (B-C), yeniden sıkışma indeksini bulmak için yeniden sıkışma eğrisinin eğimi (A-B) yerine sekme eğrisinin eğimi (D-C) kullanılmıştır (Şekil 3.6).

Ön konsolidasyon gerilmesi Casagrande (1936) yöntemine göre boşluk oranı (e) – efektif gerilme (σ') grafiği üzerinde aşmalı olarak bulunmuştur. Bu aşamalar a) yeniden sıkışma eğrisinden bakir sıkışma eğrisine geçişteki en küçük yarıçap noktasının seçilmesi (A), b) bu noktadan yatay çizgi çekilmesi ve bu noktaya teğet çizilmesi, c) A noktasından teğetle yatay çizgi arasındaki açıyı ikiye bölecek şekilde çizgi çekilmesi, d) bakir sıkışma eğrisi üzerinden açıyı ikiye bölen çizgiyi kesecek şekilde bir doğru çizilmesi ve kesiştikleri

noktann (B) ön konsolidasyon basıncı olarak kabul edilmesi olarak belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6 Birim deformasyon (ϵ) veya boşluk oranı (e) - efektif gerilme (σ') grafiği (Casagrande, 1936).



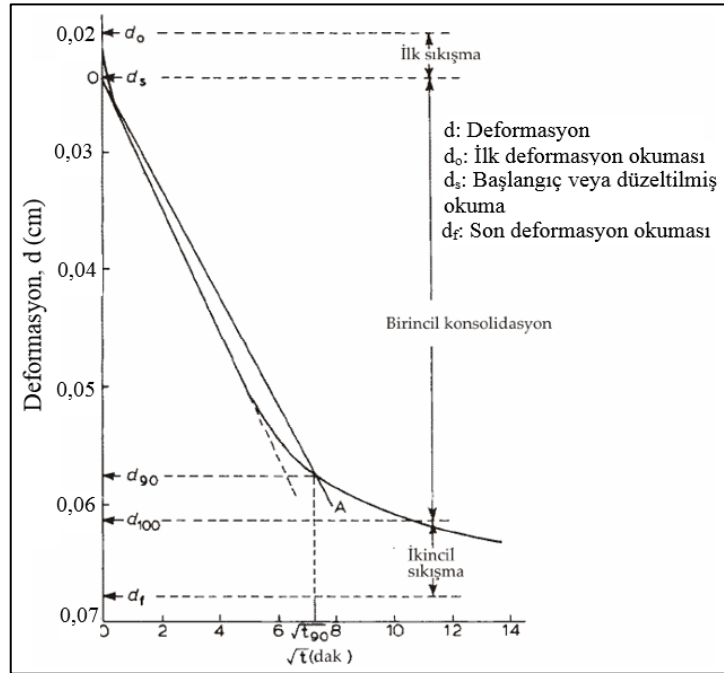
Şekil 3.7 Boşluk oranı (e) - Efektif gerilme (σ') grafiği (Casagrande, 1936).

Konsolidasyon katsayısı (c_v) deformasyon (d) - karekök zaman (\sqrt{t}) grafiğinden Eşitlik (3.2) kullanılarak bulunmuştur.

$$C_v = T_v d^2 / t_{90} \quad (3.2)$$

t_{90} değerini bulmak için deformasyon-karekök zaman eğrisinin düz kısmından deformasyon eksenini kesen bir doğru çizilmiş ve eksenini kestiği nokta (d_s) işaretlenmiştir. Deformasyon ekseninin herhangi bir noktasından bu doğruyu kesen bir yatay çizgi çizilmiş ve uzunluğu kaydedilmiştir. Kaydedilen değer 1,15 ile çarpılmış ve deformasyon ekseninden hesaplanan yeni uzunluk değeri kadar yatay bir çizgi çekilmiştir. Yeni yatay çizginin sonu ile d_s noktasından geçen bir doğru çizilmiş ve deformasyon-karekök zaman eğrisini kestiği nokta işaretlenmiştir. Bu noktadaki karekök zaman değeri kaydedilmiştir (Şekil 3.8). Kaydedilen değerın karesi alınarak t_{90} değeri elde edilmiştir.

T_v ise t_{90} değeri deformasyon karekök zaman grafiğinden elde edildiğinden dolayı sabit bir sayı olan 0,848 değerini almaktadır. Konsolidasyon deney düzeneği numune içine iki yönde su giriş-çıkışına izin verdiği için d kalınlığı da 1,0 cm olarak alınmıştır.



Şekil 3.8 Konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için kullanılan deformasyon-karekök zaman grafiği (Bell 2006'dan düzenlenerek alınmıştır).

4. DENEYSEL BULGULAR

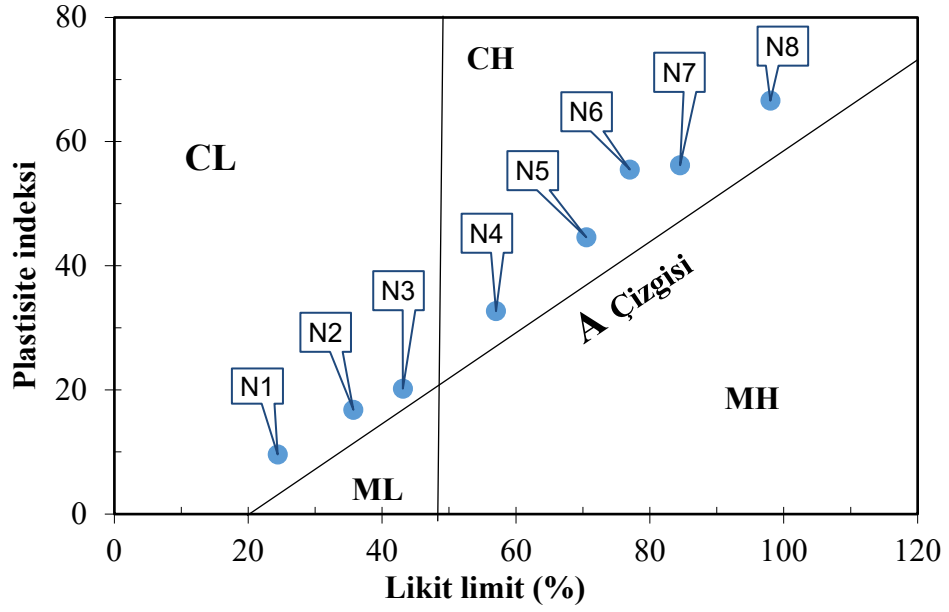
8 adet kil numunesinin fiziksel ve indeks özellikleri belirlenmiş, bu numunelerden elde edilen 32 adet homojen örneğin şişme basıncı değerleri, ilksel sıkışma değerleri, yeniden sıkışma değerleri, ön konsolidasyon gerilmesi değerleri ve konsolidasyon katsayısı sonuçları hesaplanmış ve Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5’de sunulmuştur.

4.1 Numunelerin Fiziksel ve İndeks Özellikleri

Tane boyu dağılımı, likit limit, plastik limit, katı partikül yoğunluğu birleştirilmiş ve zemin sınıflama sistemine göre (USCS, Şekil 4.1’de) zemin sınıfları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Numunelerin likit limit değerleri 24,4 ile 98, plastik limit değerleri 14,8 ile 31,4 arasında değişim gösterirken, plastisite indeksi değerleri ise 9,6 ile 66,6 arasında değişmektedir. N1, N2 ve N3 numuneleri düşük plastisiteli kil (CL) ve N4, N5, N6, N7 ve N8 numuneleri ise yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflanmıştır. Numunelerin özgül ağırlık değerleri 2,68 ile 2,78 arasında değişim göstermektedir. Elek ve hidrometre analizleri sonucu numunelerin kum, silt ve kil yüzdeleri sırasıyla %16-80, %18-64 ve %3-37 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.1 Numunelerin fiziksel ve indeks özellikleri

Numune Adı	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
LL	24,4	35,7	43,1	57,0	70,5	77	84,5	98
PL	14,8	18,9	22,9	24,3	25,9	21,5	28,3	31,4
PI	9,6	16,8	20,2	32,7	44,6	55,5	56,2	66,6
Zemin sınıfı (USGS)	CL	CL	CL	CH	CH	CH	CH	CH
Özgül ağırlık (G_s)	2,70	2,74	2,76	2,76	2,75	2,68	2,74	2,78
Kum (%)	80	23	23	20	19	51	18	16
Silt (%)	18	64	63	60	56	30	58	47
Kil (%)	3	13	14	20	25	19	25	37



Şekil 4.1 Numunelerin USCS'ye göre dağılımı.

4.2 Şişme Basıncı

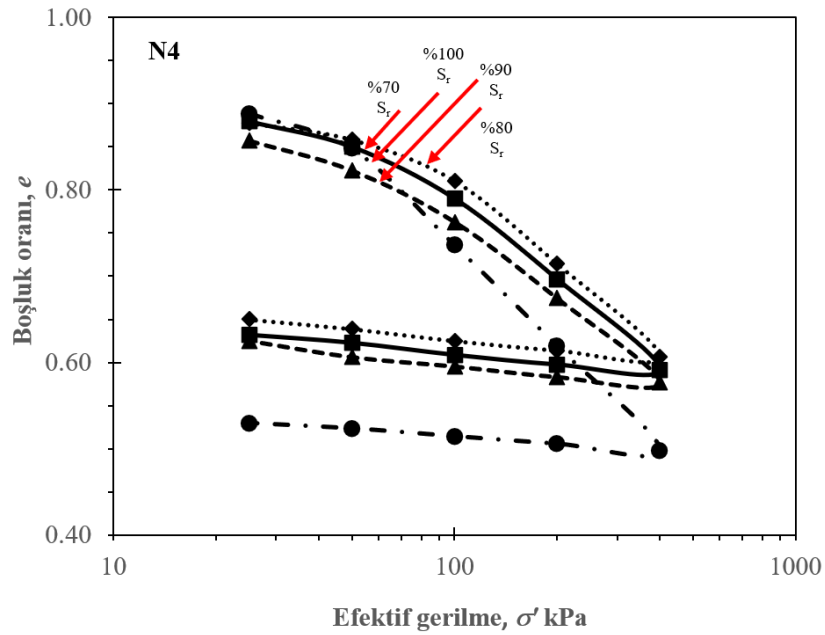
Örneklerde meydana gelen şişme miktarları konsolidasyon deneylerinden önce örneklere şişme basınçları kadar yükleme yapılması için kullanılmıştır. Tüm örneklerin farklı doygunluk derecelerindeki şişme basıncı değerleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur ve bu değerler 3 ile 100 kPa arasında değişim göstermektedir. Doymun olmayan örnekler için şişme basıncı ile doygunluk derecesi ve plastik limit arasındaki ilişkiler de değerlendirilmiştir. Artan doygunluk dereceleriyle şişme basıncı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu sonuç doygunluk derecesi yüksek zeminlerdeki su muhtevasının fazla olması ve bu zeminlerin su emme eğiliminin az olmasından kaynaklanmaktadır. Artan plastiklikle birlikte şişme basıncı değerlerinin arttığı anlaşılmıştır. Ayrıca, düşük plastisiteli örneklerde (N1 ve N2) şişme davranışı gözlenmezken yine düşük plastisiteli N3 örneğinde az miktarda şişme meydana gelmiştir.

Çizelge 4.2 Tüm örneklerin şişme basıncı değerleri (kPa)

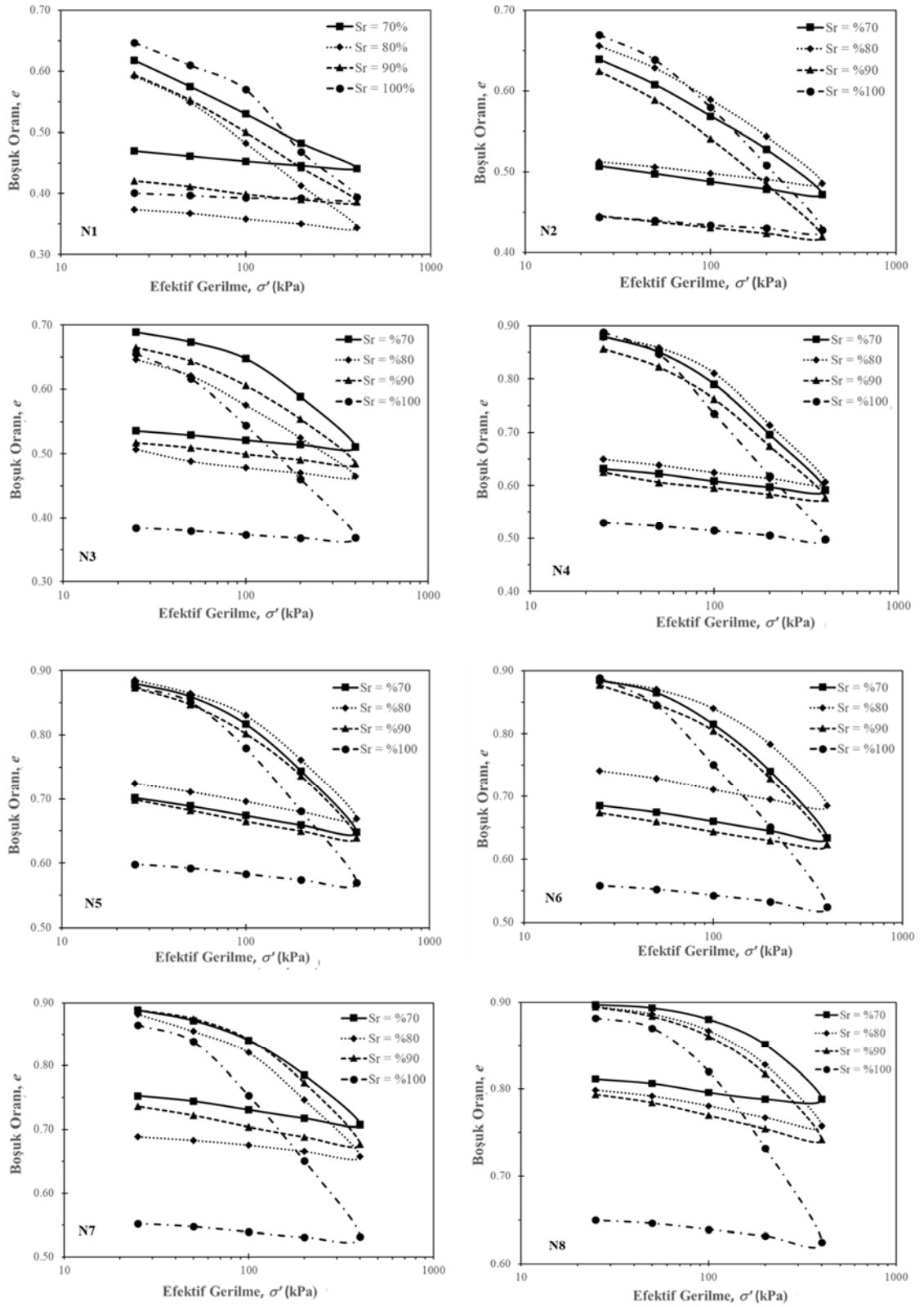
Parametre	Numune adı	Doygunluk derecesi, S_r			
		%70	%80	%90	%100
Şişme basıncı, kPa	N 01	-	-	-	-
	N 02	-	-	-	-
	N 03	10	3	-	-
	N 04	10	8	3	-
	N 05	25	20	10	-
	N 06	28	25	18	-
	N 07	65	35	30	-
	N 08	100	80	65	-

4.3 Boşluk Oranı Efektif Gerilme İlişkileri

Konsolidasyon deneyleri sonucunda boşluk oranı-efektif gerilme grafikleri çizilerek tüm örneklerin konsolidasyon parametreleri (C_c , C_r ve σ_p') belirlenmiştir. Bu parametrelere ilişkin ayrıntılı değerlendirmeler aşağıdaki bölümlerde sunulurken çalışma sonunda elde edilen veriler Çizelge 4.3'te yer almaktadır. Tüm örneklerin boşluk oranı-efektif gerilme grafikleri Şekil 4.3'te ve bu grafiklerin eğriselliğin en yüksek olduğu noktalar N4 örneği için Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2 N4 örneği için boşluk oranı-efektif gerilme grafiklerinde eğriselliğin en yüksek olduğu noktalar.



Şekil 4.3 Tüm örneklere ait boşluk oranı-efektif gerilme grafikleri

Çizelge 4.3 Boşluk oranı-efektif gerilme grafiklerinden elde edilen konsolidasyon parametrelerine ait sonuçlar (C_c , C_r ve σ_p')

Numune adı	Doygunluk derecesi, S_r	Sıkışma indeksi, C_c	Yeniden sıkışma indeksi, C_r	Ön konsolidasyon gerilmesi, σ_p' (kPa)
N1	0,7	0,15	0,023	0
	0,8	0,23	0,024	50
	0,9	0,19	0,028	55
	1,0	0,29	0,006	100
N2	0,7	0,16	0,029	60
	0,8	0,17	0,022	70
	0,9	0,20	0,021	68
	1,0	0,25	0,013	70
N3	0,7	0,23	0,021	110
	0,8	0,18	0,035	85
	0,9	0,20	0,027	80
	1,0	0,29	0,012	56
N4	0,7	0,33	0,033	81
	0,8	0,34	0,036	90
	0,9	0,31	0,040	82
	1,0	0,39	0,026	44
N5	0,7	0,28	0,045	110
	0,8	0,27	0,046	115
	0,9	0,27	0,049	100
	1,0	0,35	0,024	82
N6	0,7	0,30	0,043	122
	0,8	0,26	0,047	180
	0,9	0,30	0,042	120
	1,0	0,38	0,028	57
N7	0,7	0,22	0,038	130
	0,8	0,27	0,026	82
	0,9	0,27	0,049	120
	1,0	0,37	0,017	58
N8	0,7	0,15	0,019	200
	0,8	0,18	0,034	170
	0,9	0,20	0,043	140
	1,0	0,32	0,021	98

4.4 Sıkışma İndeksi, C_c

Sıkışma indeksi değerleri 0,15-0,39 arasında değişim göstermektedir. Tüm örneklerin doygunluk derecesi-sıkışma indeksi grafikleri Şekil 4.4’de sunulmuştur. Artan doygunluk dereceleriyle sıkışma indeksi arasında belirtme katsayıları $R^2=0,32$ ile $R^2=0,94$ arasında değişen pozitif ilişkilerin olduğu belirlenmiştir.

Örneklerin sıkışma indeksi-doygunluk derecesi (S_r-C_c) ilişkileri değerlendirilirken plastiklik de dikkate alınmıştır. S_r ile C_c arasındaki ilişkilerin belirleme katsayılarının her örnekte farklı olduğu görülmüştür. Bu farklılığın nedeni örneklerin farklı PI değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. S_r-C_c ilişkileri PI de dikkate alınarak değerlendirildiğinde; PI değerleri %9,6 ve %16,8 olan N1 ve N2 örneklerinin $C_c - S_r$ ilişkilerine ait belirleme katsayıları oldukça yüksek olup, C_c ile S_r arasında pozitif doğrusal ilişkiler vardır. Ancak, PI değeri %20,2 olan N3 örneğine ait C_c-S_r ilişkisinin yine pozitif olduğu ancak belirleme katsayısının oldukça düşük olduğu ($R^2 = 0,32$) görülmektedir. Böylece bu üç örnek için PI artmasına rağmen S_r-C_c ilişkilerinin korelasyon katsayıları önce artıp sonra azalmıştır. Diğer PI değerleri daha yüksek olan beş örneğe ait S_r-C_c ilişkileri incelendiğinde ise PI değerlerinin %32,7’den %66,6’ya yükselmesiyle $S_r -C_c$ ilişkilerinin de belirleme katsayılarının 0,34’ten 0,81’e yükseldiği belirlenmiştir. Bu farklı PI değerlerine sahip örnekleri değerlendirirken zemin grubunun da (CL ve CH) dikkate alınması gerektiği düşünülmüştür. Buna göre CL zemin gurubunda ilk üç örnek için S_r-C_c ilişkilerinde uyumsuzluk söz konusuken, diğer CH zemin gurubunda olan beş örnek için PI arttıkça ilişkilerin anlamlılığı da artmıştır.

S_r-C_c ilişkileri incelenirken PI etkisinin dikkate alınmasının yanı sıra, doygun olmayan ($S_r = %70, %80$ ve $%90$) olan örnekler ile doygun örnek arasındaki farklılıklar da gözlemlenmiştir. Şekil 4.3’teki grafikler incelendiğinde, doygunluğun %90’a ulaşana kadar artmasıyla tüm PI değerleri için C_c değerleri de artmıştır. Ancak, %100 doygun örneklerde C_c oldukça belirgin şekilde artmıştır. Bu sonuçlar doygun ve doygun olmayan örneklerin C_c değerlerinin birbirinden oldukça farklı olabileceğini açık şekilde ortaya koymaktadır.

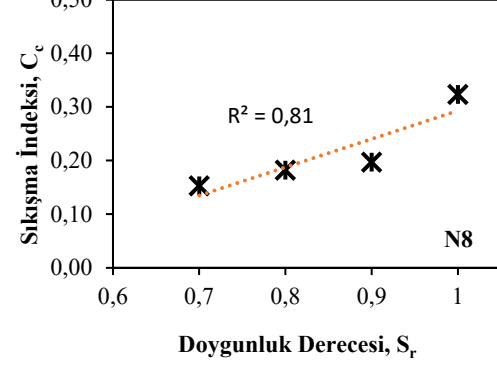
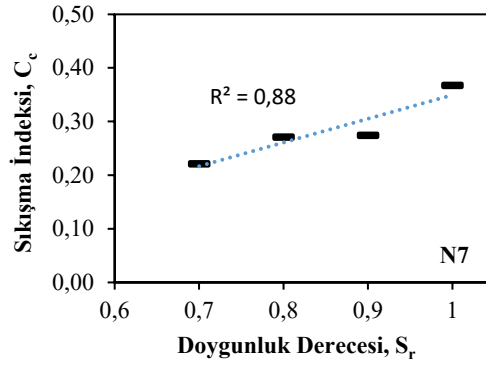
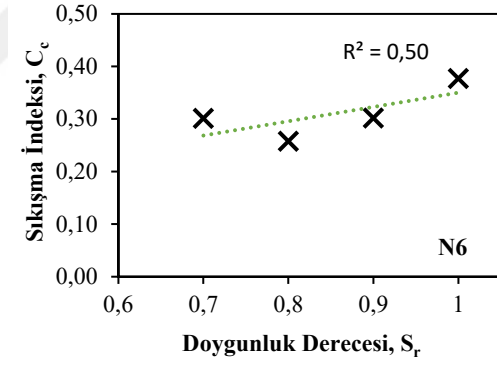
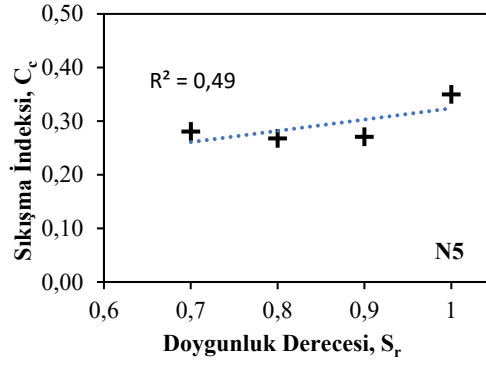
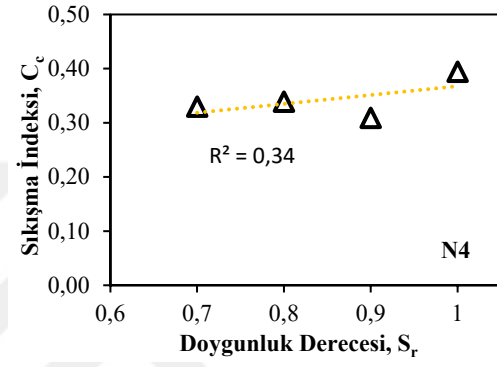
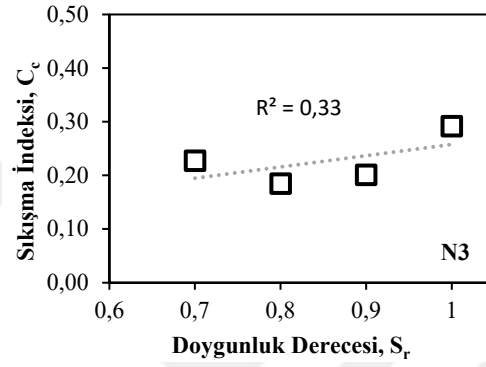
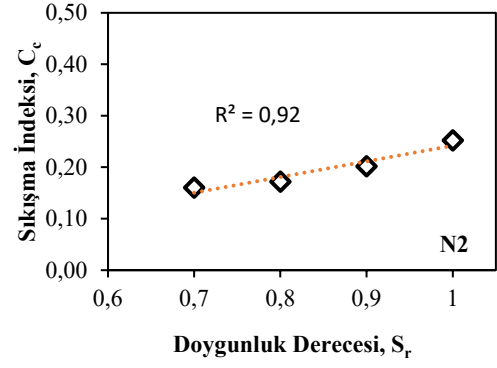
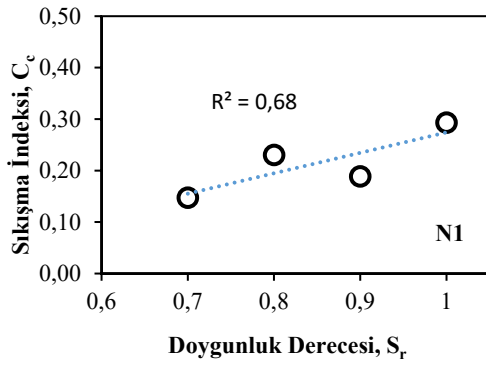
4.5 Yeniden Sıkışma İndeksi, C_r

Yeniden sıkışma indeksi değerleri 0,01-0,05 arasında değişim göstermektedir. Tüm numunelerin doygunluk derecesi-yeniden sıkışma indeksi grafikleri Şekil 4.5’de sunulmuştur. Yeniden sıkışma indeksi-doygunluk derecesi ilişkilerinde (C_r - S_r), örneklerin doygun ($S_r = \%100$) ve yarı doygun ($S_r = \%70, \%80$ ve $\%90$) olmasının C_r değerlerini önemli derecede etkilediği Şekil 4.5’teki grafiklerden de açıkça görülmektedir. Buna göre, N1, N3, N4, N5 ve N8 örneklerine ait ilişkiler incelendiğinde $\%100$ doygun örneğe ait C_r değerlerinin diğer C_r değerleri ile uyumsuz olduğu anlaşılmıştır. Neredeyse tüm örneklerde doygun örneğe ait C_r değerinin ani bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Böylece doygun olan örneğin C_r değerinin C_r - S_r ilişkilerinin genel eğilimini bozduğu ve R^2 değerlerini önemli oranda azaltarak etkilediği anlaşılmıştır. C_r - S_r ilişkileri artan PI değerlerine ve zemin gurubuna göre değerlendirildiğinde bu iki parametrenin ilişkiler üzerinde herhangi bir ilişkisinin olmadığı belirlenmiştir.

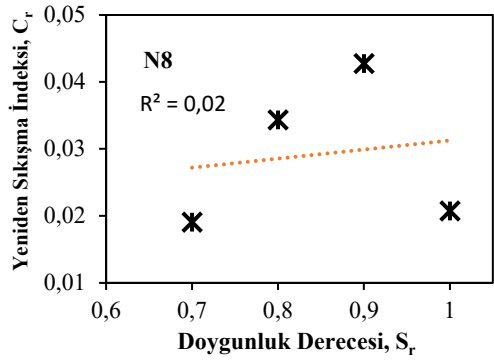
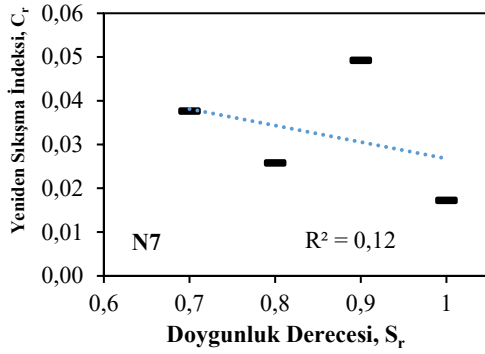
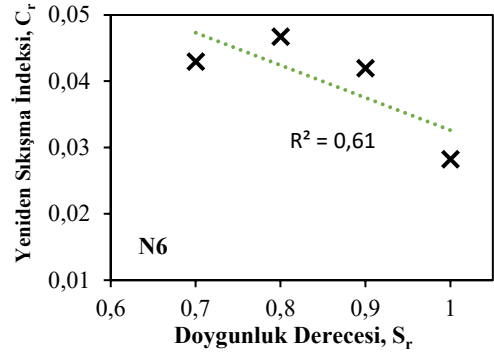
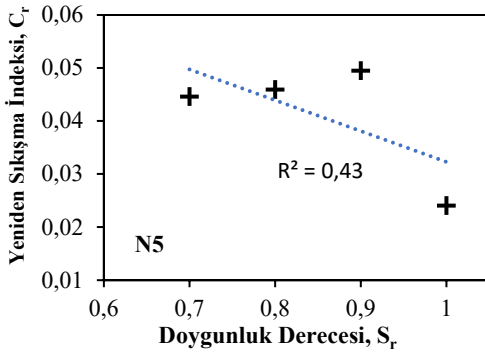
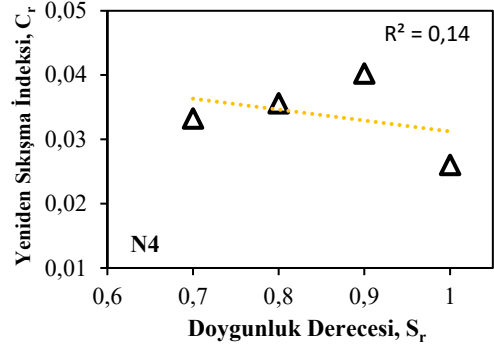
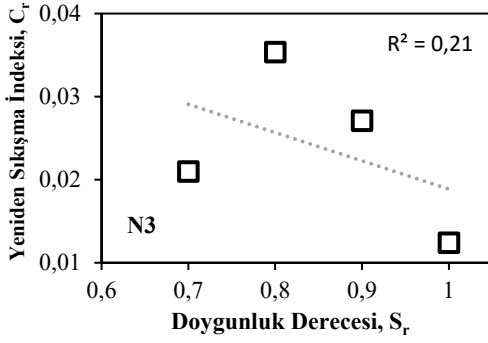
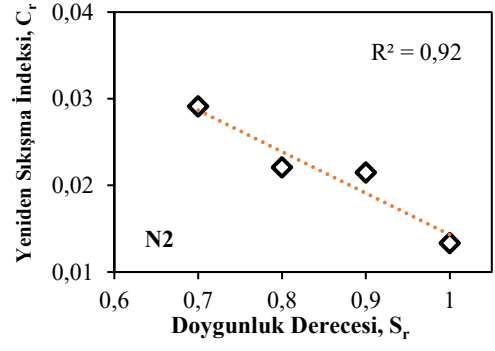
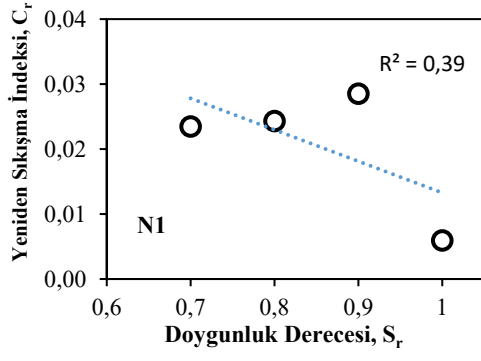
4.6 Ön Konsolidasyon Gerilmesi, σ_p'

Örneklerin ön konsolidasyon gerilmesi değerleri 44 ile 200 kPa arasında değişim göstermektedir. Tüm numunelerin doygunluk derecesi-ön konsolidasyon gerilmesi grafikleri Şekil 4.6’da sunulmuştur. N1 nolu örnekte $\%70$ doygunluk derecesinde e-log σ' grafiği doğrusal olduğundan ön konsolidasyon gerilmesi hesaplanamamıştır. Yüksek plastisiteliler başta olmak üzere doygun örneklerin ön konsolidasyon gerilmesinin doygun olmayan örneklere ait değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür.

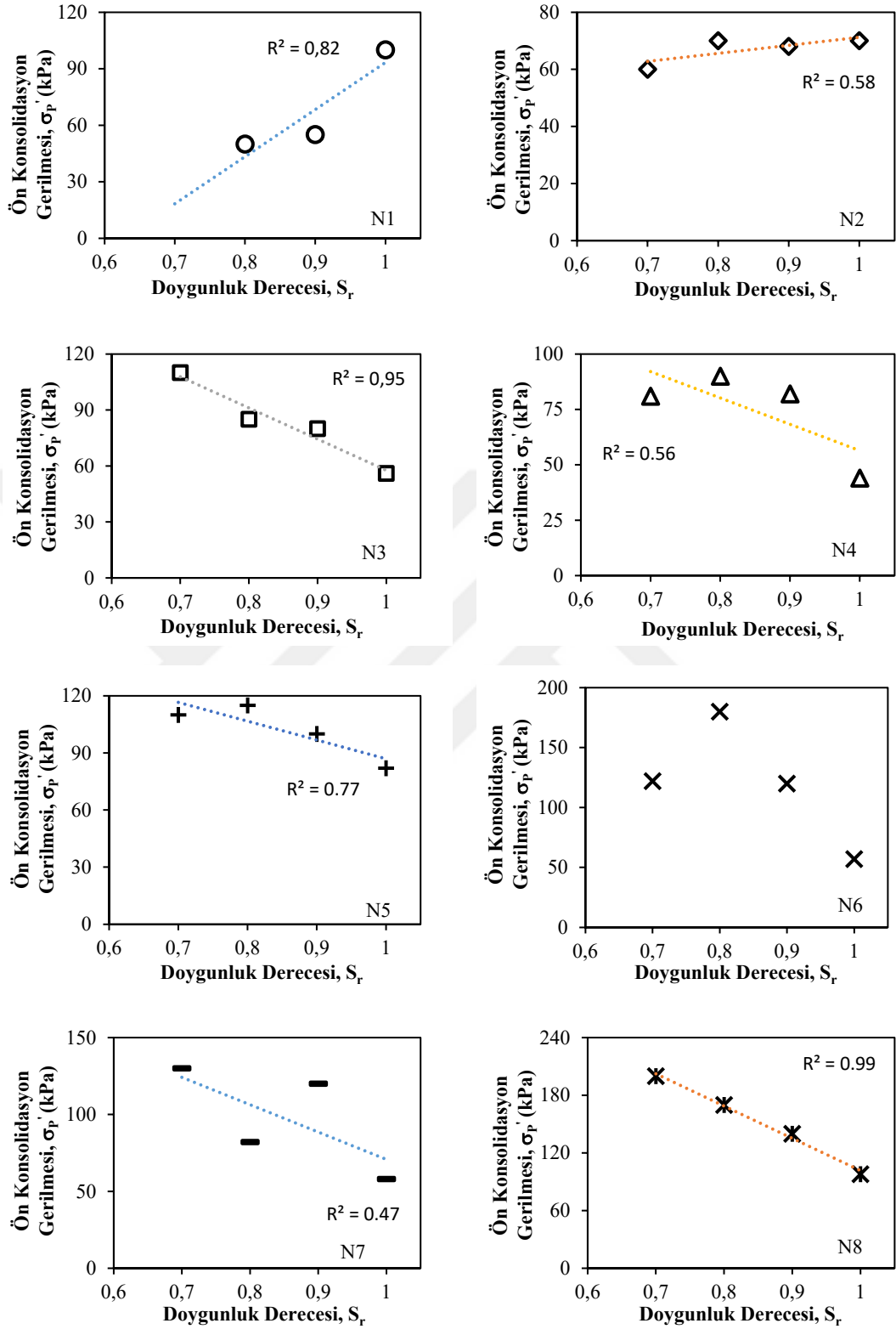
N1 ve N2 nolu örnekler dışında diğer örneklerin doygunluk derecesi artarken ön konsolidasyon gerilmesi azalmaktadır. Yüksek plastisiteli doygun olmayan örneklerin ön konsolidasyon gerilmesi değerleri birbirine çok yakinken, yüksek plastisiteli doygun örneklerin ön konsolidasyon gerilmesinde belirgin bir azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.4 Farklı plastiklikteki örneklerin sıkışma indeksi – doygunluk derecesi grafikleri.



Şekil 4.5 Farklı plastiklikteki örneklerin yeniden sıkışma indeksi – doygunluk derecesi grafikleri



Şekil 4.6 Farklı plastiklikteki örneklerin ön konsolidasyon gerilmesi – doyunluk derecesi grafikleri

4.7 Konsolidasyon Katsayısı, c_v

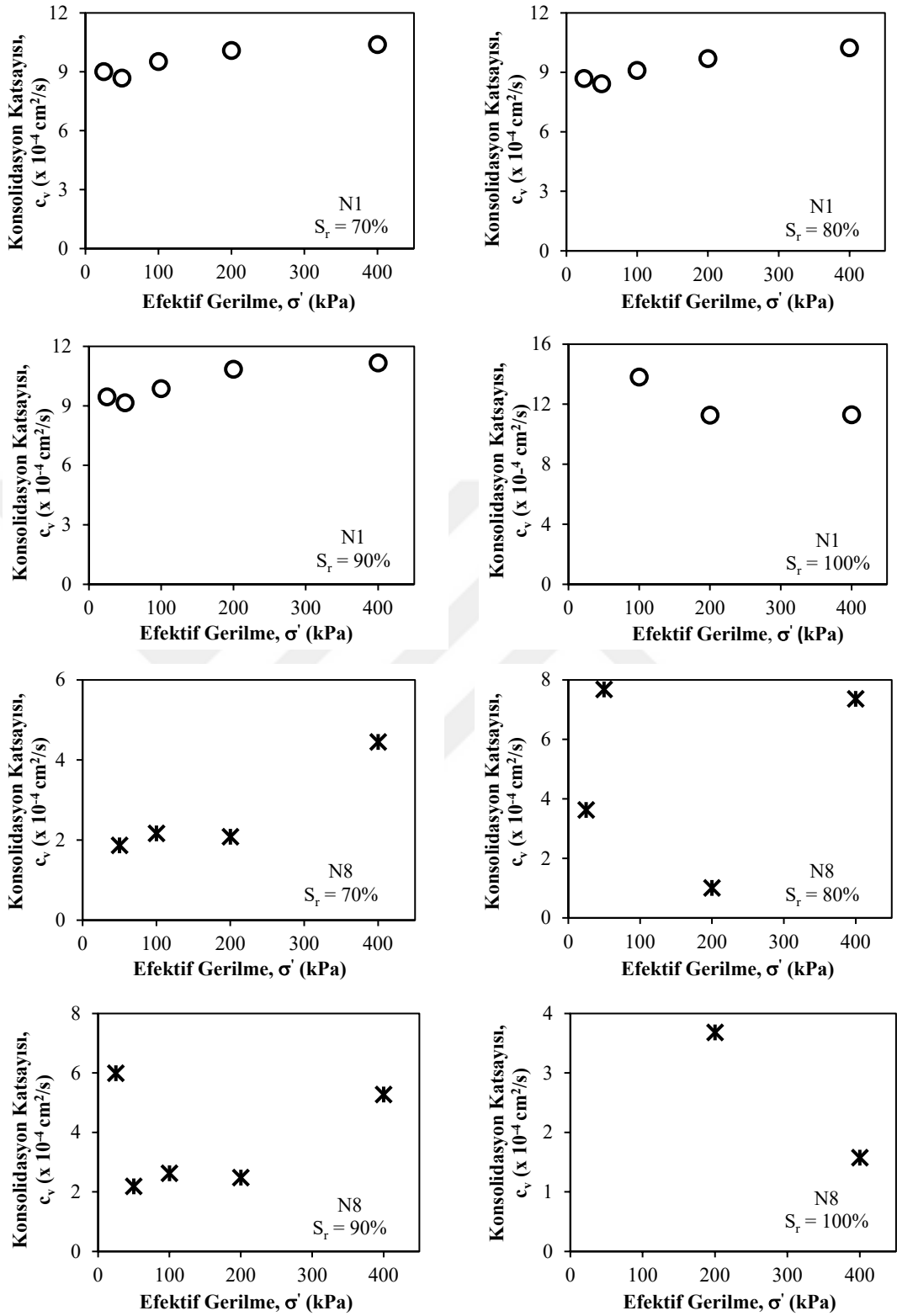
Örneklerin konsolidasyon katsayısı değerleri $1 \times 10^{-4} - 14 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ arasında değişim göstermektedir. N1 ve N8 örneklerinin %70, %80, %90 ve %100 doygunluk derecelerinde uygulanan 25, 50, 100, 200 ve 400 kPa gerilmeler için doygunluk derecesi-konsolidasyon katsayısı grafikleri Şekil 4.7’de ve tüm örneklere ait grafikler EK-1’de sunulmuştur. Ayrıca tüm örneklere ait Konsolidasyon katsayısı değerleri Çizelge 4.4 ve 4.5’te yer almaktadır. Konsolidasyon katsayısı değerleri ile efektif gerilmeler arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Buna göre, bu ilişkiye ait belirleme katsayıları oldukça düşük olup, anlamlı ilişkilerin olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, konsolidasyon katsayısı değerleri ile doygunluk derecesi ve plastik limit arasındaki ilişkiler de değerlendirilerek konsolidasyon katsayısının doygunluk derecesinden ve numunelerin plastiklik değerinden etkilenmediği görülmüştür.

Çizelge 4.4 Tüm örneklere ait konsolidasyon katsayıları (c_v).

Parametre	Numune adı	Efektif gerilme, σ' (kPa)	Doygunluk derecesi, S_r			
			%70	%80	%90	%100
Konsolidasyon katsayısı, c_v ($\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$)	N1	25	9	9	9	0
		50	9	8	9	0
		100	10	9	10	14
		200	10	10	11	11
		400	10	10	11	11
	N2	25	9	6	4	0
		50	8	5	1	11
		100	8	6	5	12
		200	8	7	5	10
		400	8	8	7	9
	N3	25	6	10	9	0
		50	9	7	8	5
		100	8	7	5	8
		200	9	8	7	7
		400	7	7	6	6
	N4	25	4	10	6	0
		50	1	2	5	6
		100	7	8	5	11
		200	7	5	6	5
		400	4	2	5	3

Çizelge 4.5 Tüm örneklere ait konsolidasyon katsayıları (c_v) çizelgesinin devamı.

Parametre	Numune adı	Efektif gerilme, σ' (kPa)	Doygunluk derecesi, S_r			
			%70	%80	%90	%100
Konsolidasyon katsayısı, c_v ($\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$)	N5	25	5	7	8	0
		50	5	1	4	2
		100	5	8	5	8
		200	7	7	5	7
		400	6	6	4	6
	N6	25	0	6	5	0
		50	0	0	8	0
		100	6	7	4	8
		200	8	8	7	5
		400	7	7	6	4
	N7	25	7	8	0	0
		50	0	8	0	7
		100	5	4	1	8
		200	5	5	8	5
		400	5	5	5	3
	N8	25	0	4	6	0
		50	2	8	2	0
		100	2	0	3	0
		200	2	1	2	4
		400	4	7	5	2



Şekil 4.7 N1 (CL) ve N8 (CH) örneklerin konsolidasyon katsayısı – efektif gerilme grafikleri.

5. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Numunelerin likit limit değerleri %24 ile %98, plastik limit değerleri %14,8 ile %31,4 arasında değişim gösterirken, plastisite indisi değerleri ise %9,6 ile %66,6 arasında değişmektedir. İlk üç numune düşük plastisiteli kil (CL) ve diğer beş numune ise yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflanmıştır. Numunelerin özgül ağırlık değerleri 2,68-2,78 arasında değişim göstermektedir. Numuneler kum (%16 –%80), silt (%18 – %64) ve kil (%3 – %37) içermektedirler.
2. Yüzde 70, 80, 90 ve 100 doygunluk derecelerindeki örneklerin şişme basıncı değerleri 3 ile 100 kPa arasında değişmektedir. Doygunluk derecesi yüksek örneklerde su muhtevasının fazla ve su emme eğiliminin az olmasından dolayı doygunluk derecesindeki artışla şişme basıncı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, artan plastiklikle birlikte şişme basıncı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, doygun olmayan düşük plastisiteli örneklerde genel olarak şişme davranışı gözlenmemiştir. Doygun örneklere ise şişme basıncı deneyi uygulanmamıştır.
3. S_r 'nin artmasına bağlı olarak C_c 'nin artış gösterdiği belirlenmiş olup, S_r ile C_c arasında doğrusal ilişkilerin olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, doygun ve doygun olmayan örneklerin C_c değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür.
4. C_r - S_r ilişkileri incelendiğinde doygun örneğe ait C_r değerlerinin diğer C_r değerlerinden daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, artan S_r değerleri için C_r değerlerinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. PI değerlerinin C_r - S_r ilişkileri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
5. Doygun yüksek plastisiteli örneklerin ön konsolidasyon gerilmesinin doygun olmayan örneklere ait değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Örneklerin önemli bir kısmının doygunluk derecesi artarken ön konsolidasyon gerilmesi değerlerinin azaldığı saptanmıştır.

6. Konsolidasyon katsayısı değerleri 1×10^{-4} ile 14×10^{-4} cm^2/sn arasında değişmektedir. Konsolidasyon katsayısı değerleri ile efektif gerilmeler arasındaki ilişkilere ait belirtme katsayıları oldukça düşük olup, bu iki parametre arasında anlamlı ilişkilerin olmadığı sonucuna varılmıştır. Son olarak, doğunluk derecesi ve plastik limit ile konsolidasyon katsayısı arasındaki ilişkiler de değerlendirilerek, konsolidasyon katsayısının doğunluk derecesinden ve numunelerin plastiklik değerlerinden etkilenmediği ortaya konmuştur.

Başta karasal iklimin hüküm sürdüğü bölgelerde kurak dönemlerde belirli bir derinliğe kadar ya da su içeriğinin artık değişmediği aktif zonun altına kadar olan kısımlarda killi zeminlerin yarı doğun durumda olmaları söz konusudur. Bunun dışında dolgu barajlardaki kil çekirdek gibi izole yapılar da sürekli olarak doğun olmayan koşullardadır. Altyapı ve yollar vb. gibi bazı hafif ve gömülü mühendislik yapılarının inşası aşamasında kil gibi ince taneli zeminlerin örselenerek yeniden sıkıştırılması söz konusudur. İnşa aşamasından sonra bu yerlerdeki killi zeminler konsolidasyona maruz kalabilmektedirler. Yine bu sıkıştırılmış killi zeminler de kurak dönemlerde yarı doğun koşullarda olabilirler. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar yukarıda bahsedilen zemin koşulları ve mühendislik yapılarının içinde/üstünde bulunduğu killi zeminlerdeki konsolidasyon hesaplarında farklı doğunluk derecelerindeki konsolidasyon parametrelerini değerlendirmek ve yorumlamak için katkı sağlayacaktır. Son olarak, sıkışma indeksinin ve ön konsolidasyon gerilmesinin daha fazla sayıdaki farklı doğunluk derecelerinde araştırılması gelecekte yapılacak olan çalışmalara bir öneri olarak sunulabilir.

KAYNAKLAR

- Asadi, R., 2017, İnce taneli zeminlerde konsolidasyon katsayısının alternatif bir yöntemle incelenmesi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- ASTM D850-06 Standart test methods for specific gravity of solids by water pycnometer.
- ASTM D2435-04 One dimensional consolidation properties of soils using incremental loading,
- Balcı, M. C., 2015, Konsolidasyon parametrelerinin santrifüj yöntemi ile elde edilmesi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Barden, L. 1965. Consolidation theory of unsaturated clays. Geotechnique, London, Vol. 15, No. 3, pp 267-286.
- Biot, M.A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics, 12, 155–164.
- Biot, M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. The Journal of the Acoustical Society of America, 28, 168–191.
- Bishop, A.W. 1959. The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, 106, No.39, pp. 859-863.
- Boone, S.J. 2010. A critical reappraisal of "preconsolidation pressure" interpretations using the oedometer test. Can. Geotech. J. 47, 281-296.
- Cai, Y.Q., et al., 2007. Solution of one-dimensional finite-strain consolidation of soil with variable compressibility under cyclic loadings. Computers and Geotechnics. 34, pp 31-40.
- Coduto, D. P., 2011, Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar, Bölüm 3.5: Sıkışabilirlik ve Oturma, Gazi Kitabevi, Ankara, Çeviren: Kâmil Kayabalı, Murat Mollamahmutoğlu.
- Cortellazzo, G. 2002. Comparison between laboratory and In situ values of the coefficient of primary consolidation c_v . Canadian Geotechnical Journal, 39, pp. 103-110.

- Davis, R.E. and Raymond, G.P. 1965. A non-linear theory of consolidation. *Geotechnique*. 15, No. 2. 161-173.
- Dipova, N. ve Cangir. B., 2010, Lagün Kökenli Kil-Silt Zeminde Sıkışabilirlik özelliklerin regresyon ve yapay sinir ağları yöntemleriyle belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 5069-5086, Yazı 332.
- Fener, M., 2006, Zemin granülometrisinin ön konsolidasyon basıncı ve zemin hafızasına etkisi. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Fox, P.J. and Berles, J.D., 1997. CS2: a piecewise-linear model for large strain consolidation. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(7), 453-475.
- Fredlund, G. and Morgenstern, R., 1976. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 13, pp. 261-276.
- Fredlund, G., 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103 (GT5), pp. 447-466.
- Fredlund, F. D. and Hasan, J., 1979. One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils: *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 521-531.
- Gallipoli, D. et al., 2002, Role of degree of saturation on the normally consolidated behaviour of soils: 3rd International Symposium on Unsaturated Soil (Unsaturated Soils), Brazil, 10-13 March 2002, Balkema Publishers 115-120.
- Geng, X.Y. et al., 2006. Non-linear consolidation analysis of soil with variable compressibility and permeability under cyclic loadings. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 30, pp 803-821.
- Geng, X. 2008. Non-linear consolidation of soil with vertical and horizontal drainage under time-dependent loading. *Advanced Computer Theory and Engineering*, 2008. ICACTE '08. International Conference on Australia: IEEE. pp. 800-804.
- Gibson, R.E. and Lo, K.Y. 1961. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. Report No. 41, Norwegian Geotechnical Institute.
- Gibson, R.E., et al., 1967. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. *Geotechnique*, Vol. 17, pp.261-273.

- Hansbo, S. 1960. Consolidation of clays with special reference to influence of vertical sand drains. Proc. Royal Swedish Geotech. Inst., No. 18 (160 pp.).
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 2010, Geoteknik Mühendisliğine giriş, Bölüm 8: Konsolidasyon ve konsolidasyon oturmaları, Gazi Kitabevi, Ankara, Çeviren: Kâmil Kayabalı.
- Kayabalı, K. and Demir, S., 2011, Measurement of swelling pressure: direct method versus indirect method: Canadian Geotechnical Journal, 48, 354-364.
- Kayabalı, K. and Yıldız, Ö., 2014, Estimation of swelling pressure using simple soil indices: Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 149, 175-178.
- Kayabalı, K. and Özdemir, A., 2010, Evaluation of the centrifuge technique as an alternative and fast method for oedometer test on soils: In: Geologically Active: Proceedings of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010, A. L. Williams, G. M. Pinches, C. Y. Chin, T. J. Mc Morran, C. I. Massey, Eds., p. 1989-1994.
- Muntohar, A.S. 2009. Reliability of the method for determination of coefficient of consolidation (c_v). 13rd Annual Scientific Meeting of Indonesian Society for Geotechnical Engineering, Denpasar, Bali, 5-6 November 2009.
- Naser, H. A., 2013, Finite Difference Analysis of One Dimensional Consolidation of Homogeneous clay layer, Journal of Babylon University/Engineering Sciences/ No. (5) / Vol. (21), 1661-1674.
- Özocak, A. ve Altundağ, Y., 2016, Farklı Kil Oranına Sahip Siltli Zeminlerde Ön Konsolidasyon Basıncının belirlenmesi, 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science.
- Phanikumar, B. R. and Amrutha, K., 2014, Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics Geomechanics and Geoengineering, 9:1, 52-62.
- Storer J. Boone, 2010, A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test, Can. Geotech. J. 47: 281–296.
- Sünnetçi, M. O. ve Ersoy. H., 2016, Ünye (Ordu) Killerinin Konsolidasyon ve Plastik Özellikleri Arasındaki ilişkilerin araştırılması, Jeoloji Mühendisliği Dergisi 40, 89-102.

- Taylor, D.W. 1942. Research on consolidation of clays. Publ. Serial 82, Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, pp. 147.
- Terzaghi, K., 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage, Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 399 pp.
- Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 510 pp.
- Uysal, S., vd. 2018, Yumuşak Zemin Model Parametrelerinin Zemin Davranışına Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1), ss. 97-106.
- Yong, R.N. et al., 1983. On the stability and settling of suspended solids in settling ponds. Part I. Piece-wise linear consolidation analysis of sediment layer. Canadian Geotechnical Journal, 20(4), 817-826.
- Yurtçu. Ş. ve Özocak. A., 2016, İnce daneli zeminlerde sıkışma indisinin istatistiksel ve yapay zekâ yöntemleri ile tahmin edilmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 31:3, 597-608.
- Xie, K.H. et al., 2002. A study on one-dimensional nonlinear consolidation of double-layered Soil. 29, pp 151-168.

EK - Konsolidasyon katsayısı – Efektif gerilme grafikleri

