
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# YOĞURULMUŞ ÖZDEŞ NUMUNELER İÇİN KONSOLİDASYON TESTİ SÜRE VE PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

**Ayşe KARAASLAN ÜLKER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2025**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ayşe KARAASLAN ÜLKER

12/05/2025

# YOĞURULMUŞ ÖZDEŞ NUMUNELER İÇİN KONSOLİDASYON TESTİ SÜRE VE PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayşe KARAASLAN ÜLKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2025

## ÖZET

Konsolidasyon teorisi, zeminin konsolidasyon sürecindeki davranışını ve bu süreçte meydana gelen oturmaların büyüklüğü ile zamanlamasını açıklayan temel bir yaklaşımdır. Bu oturmalar sırasında ortaya çıkan deformasyonlar, genellikle uzun zaman dilimlerine yayılmaktadır. Bu çalışmada sunulan yeni konsolidasyon testi önerisinin temel hipotezi, konsolidasyon deney süresinin bir gün gibi kısa bir zamana indirgenmesini hedeflemektir. Bu hedef doğrultusunda, laboratuvar ortamında yeterli sayıda özdeş özelliklere sahip zemin numunesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Özdeş karakteristiklere sahip numunelerin laboratuvar koşullarında temini için santrifüj düzeneği kullanılmış ve yapay numuneler hazırlanmıştır. Üç farklı likit limit su içeriğine sahip zemin örnekleri hazırlanmış; her bir zemin numunesi için sırasıyla 300, 400, 500 ve 600 devir/dakika (RPM) olacak şekilde santrifüj deneyleri uygulanmıştır. Toplamda 96 adet zemin numunesi üzerinde hem geleneksel konsolidasyon deneyleri hem de bu çalışmada sunulan hipoteze dayalı alternatif yükleme senaryosu çerçevesinde günlük deneyler gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemde kademeli yükleme, suyun daha etkin drenajını sağlayarak özellikle yüksek efektif gerilme düzeylerinde boşluk oranlarında günlük yönteme göre daha belirgin azalmaya yol açmıştır. Likit limit arttıkça başlangıç boşluk oranı artarken, RPM artışı ise bu oranı düşürmüştür. RPM değerindeki artış, her iki yöntemde de ön konsolidasyon basıncının yükselmesine neden olmuştur. Ayrıca, sıkışma ve yeniden sıkışma indisleri geleneksel yöntemde, günlük yönteme kıyasla nispeten yüksek bulunmuştur.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Konsolidasyon, sıkışma indisi, ön konsolidasyon basıncı, alternatif yöntem, santrifüj.
Sayfa Adedi : 67
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Güneş BABAGİRAY

# ASSESSMENT OF CONSOLIDATION TEST DURATIONS AND PARAMETERS FOR REMOLDED IDENTICAL SAMPLES

(M. Sc. Thesis)

Ayşe KARAASLAN ÜLKER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2025

## ABSTRACT

Consolidation theory is a fundamental approach that explains the behavior of soil during the consolidation process and the magnitude and timing of settlements that occur during this process. The deformations that occur during these settlements are generally spread over long periods of time. The basic hypothesis of the new consolidation test proposed in this study is to reduce the consolidation test duration to a short period of time, such as one day. To achieve this goal, it was necessary to obtain a sufficient number of soil samples with identical characteristics in a laboratory setting. A centrifuge apparatus was used to prepare artificial samples with identical characteristics under laboratory conditions. To represent different water contents, soil samples with three different liquid limit water contents were prepared; each soil sample was subjected to rotation at 300, 400, 500, and 600 revolutions per minute (RPM), respectively. In total, 96 soil specimens were tested using both conventional consolidation methods and the proposed daily test approach based on alternative loading scenarios derived from the study's hypothesis. In the conventional method, stepwise loading enabled more effective drainage of water, resulting in a more pronounced decrease in void ratio compared to the daily method, especially at higher levels of effective stress. As the liquid limit increased, the initial void ratio also increased, whereas higher RPM values led to a decrease in this ratio. The increase in RPM resulted in higher preconsolidation pressure in both methods. Additionally, compression and recompression indices were found to be relatively higher in the conventional method compared to the daily method.

Science Code : 91105
Key Words : Consolidation, compression index, pre-consolidation pressure, alternative method, centrifuge.
Page Number : 67
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Güneş BABAGİRAY

# TEŞEKKÜR

Öncelikle bana rehberlik eden danışman hocam Dr. Öğr. Üye. Güneş BABAGİRAY'a, tüm laboratuvar çalışmalarımı gerçekleştirmem için bana kapılarını açan Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı, bu kurumda bana destek olan hocam Prof. Dr. Kâmil KAYABALI'na, Sayın Dr. Turgay BEYAZ' a eşim Ferhat'a varlığıyla manevi desteğim kızım Büşra'ya ve tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKİLER ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... x

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xiii

1. GİRİŞ ..... 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ..... 3

3. KONSOLİDASYON VE KONSOLİDASYON OTURMASI ..... 7

3.1. Zeminlerin Sıkışması ..... 7

3.2. Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi ..... 9

3.3. Normal Konsolidasyon, Aşırı Konsolidasyon ve Ön Konsolidasyon Basıncı ..... 11

3.4. Zeminin Gerilme Geçmişi ve Yapısal Hafızası ..... 12

3.5. Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesi ..... 13

4. MALZEME VE YÖNTEM ..... 17

4.1. Zemin Malzemesi Temini ..... 17

4.2. Laboratuvar Çalişmalari ..... 21

4.2.1. Koni düşürme (penetrasyon) deneyi ..... 22

4.2.2. Santrifüj düzeneği kullanılarak özdeş numune hazırlanması ..... 25

4.2.3. Konsolidasyon testlerinin gerçekleştirilmesi ..... 34

4.2.4. Geleneksel Konsolidasyon Deneyi ..... 36

4.2.5. Yeni sunulan hipoteze dayalı günlük konsolidasyon deneyi ..... 41

5. DENEY SONUÇLARI VE HESAPLAMALARI ..... 45

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 63

**Sayfa**

KAYNAKLAR ..... 65

ÖZGEÇMİŞ ..... 67

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 4.1. Koni batma deneyinden elde edilen örnek sonuç (LL=45 için) ..... 24

Çizelge 4.2. Likit limit ve RPM değerleri belirlenmiş veri setleri..... 33

Çizelge 4.3. Kayıt tablosu arayüzünden alınmış örnek zamanlar görülmektedir ..... 40

Çizelge 5.1. LL=37 için her RPM değerine ait geliştirilmiş veri seti örneği..... 47

Çizelge 5.2. Yoğurulmuş özdeş numunelerin ön konsolidasyon ve sıkışma indisi sonuçları..... 61

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 3.1. Konsolidasyonu anlatmak için kullanılan yay modeli ..... 8

Şekil 3.2. Konsolidasyon deney aletinin şematik kesiti: (a) yüzen halkalı konsolidasyon; (b) sabit halkalı konsolidasyon..... 10

Şekil 3.3. Hacim azalmasının blok diyagramlarda görünümü ..... 11

Şekil 3.4. Boşluk oranı-logaritmik efektif gerilme konsolidasyon grafiği ..... 13

Şekil 3.5. Ön konsolidasyon basıncını belirlemek için Casagrande, (1936) yöntemi ..... 14

Şekil 4.1. Nallıhan ilçesi numune yeri ..... 18

Şekil 4.2. Gölbaşı ilçesi numune yeri ..... 19

Şekil 4.3. Sahadan zemin numunelerinin alınması ..... 19

Şekil 4.4. Numunenin laboratuvara getirtilip etüvde kurutma işlemi ..... 20

Şekil 4.5. Laboratuvar tipi haçlı değirmen..... 20

Şekil 4.6. Elekten geçirilen malzeme örnekleri: a.Eleğin üzerinde kalan malzeme, b. Eleğin altında kalan malzeme..... 21

Şekil 4.7. Laboratuvar ortamı ..... 22

Şekil 4.8. Likit limit tayininde kullanılan koni penetrasyon cihazı ..... 23

Şekil 4.9. Likit limit belirlenme örnek grafiği (LL=45 için) ..... 24

Şekil 4.10. Geoteknik santrifüj türleri a. Kiriş tipi santrifüj, b. Davul tipi santrifüj..... 26

Şekil 4.11. Santrifüj düzeneği. ..... 26

Şekil 4.12. Santrifüj cihazı hücreleri..... 27

Şekil 4.13. Santrifüj cihazı için özel olarak tasarlanmış hücrelerin farklı parçaları ..... 28

Şekil 4.14. Santrifüj cihazı ayrıntıları: (a) Düzeneğin şematik kesiti, (b) Konsolidasyon hücrelerinin plan görünümü, (c) Konsolidasyon hücresi detayları 1: Hazne, 2: Başlık, 3: Santrifüj kolu, 4: Gösterge, 5: Drenaj delikleri, 6: Ekran, 7: Filtre kâğıdı, 8: Konsolidasyon ringi, 9: Zemin örneği, 10: Filtre kâğıdı, 11: Poroz taş, 12: Sürşarj ortalayıcı, 13: Sürşarj..... 28

Şekil 4.15. Santrifüj cihazı için numunelerinin hazırlanma aşamaları (LL=45 için)..... 30

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 4.16. Santrifüj cihazı numune hücrelerinin hazırlanma aşamaları (LL=45 için) ..... 31

Şekil 4.17. Santrifüj düzeneğinin kontrol panosu ..... 32

Şekil 4.18. Santrifüjden çıkan numunenin desikatördeki görünümü (LL=45 için) ..... 32

Şekil 4.19. Konsolidasyon cihazı: a. Cihazın genel görünümü, b. Elektronik deformasyon ölçer, c. Hücre içi elemanları, d. Yükleme plakaları ..... 35

Şekil 4.20. Zemin numunesinin tartılması (LL=45 için) ..... 36

Şekil 4.21. Konsolidasyon hücresi ve içerisinde yerleşen farklı ekipmanların görüntüleri a: Konsolidasyon hücresi, b: Merkezleyici, c: Alt poroz taş, d: Filtre kâğıdı, e: Üst poroz taş, f: Cıvatalar, g: Yükleme başlığı olarak isimlendirilmektedir ..... 37

Şekil 4.22. Konsolidasyon deney aletine ait: a. konsolidasyon hücresi, b. Konsolidasyon aleti kolunun yatay ayar terazisi ..... 37

Şekil 4.23. Konsolidasyon hücrelerinin ödometre cihazına yerleştirilmesi ..... 38

Şekil 4.24. Veri toplayıcı cihaz ..... 38

Şekil 4.25. Çoklu veri kaydedici yazılımının bağlantı arayüzünün görüntüsü ..... 39

Şekil 4.26. Çoklu veri kaydedici yazılımının kanal bilgileri arayüzü ..... 39

Şekil 4.27. Çoklu veri kaydedici yazılımının kayıt tablosu arayüzü ..... 40

Şekil 4.28. Günlük konsolidasyon testi yükleme örneği (LL= 37, RPM=300 için) ..... 43

Şekil 5.1. LL=37 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 50

Şekil 5.2. LL=45 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 51

Şekil 5.3. LL=53 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 52

Şekil 5.4. RPM: 300 ve 400 veri seti için, likit limit değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 54

Şekil 5.5. RPM: 500 ve 600 veri seti için, likit limit değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 55

Şekil 5.6. LL=37 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 57

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.7. LL=45 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 58

Şekil 5.8. LL=53 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları ..... 59

Şekil 5.9. L37_300 ön konsolidasyon basıncının karşılaştırılması ..... 60

# SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullandığım simgeler ile kısaltmalar, açıklaması ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **A** | Numunenin kesit alanı |
| **$a_v$** | Sıkışabilirlik katsayısı |
| **$C_c$** | Sıkışma indisi |
| **$C_r$** | Yeniden sıkışma indisi |
| **$c_v$** | Konsolidasyon katsayısı |
| **e** | Boşluk oranı |
| **$e_0$** | İlk boşluk oranı |
| **$e_s$** | Deney sonucundaki boşluk oranı |
| **$h_0$** | Numune ilk yüksekliği |
| **$h_s$** | Kuru numune yüksekliği |
| **H, $H_0$** | Başlangıç yüksekliği (sıkıştırılabilir katman kalınlığı) |
| **$H_f$** | Numune son yüksekliği |
| **$M_s$** | Kuru numune kütlesi |
| **$M_t$** | Toplam kütle |
| **$M_w$** | Su kütlesi |
| **$m_v$** | Hacimsel sıkışma katsayısı |
| **$\sigma'_{vo}$** | Düşey efektif basınç |
| **$\sigma_v$** | Düşey basınç |
| **$\sigma'_p$** | Ön konsolidasyon basıncı |
| **$\rho_s$** | Zemin yoğunluğu |
| **$S_c$** | Konsolidasyon oturması |
| **$S_i$** | Ani oturma |
| **$S_s$** | İkincil oturma |
| **$S_t$** | Toplam oturma |
| **S** | Doygunluk derecesi |
| **$u_0$** | İlk boşluk suyu basıncı |
| **V** | Toplam hacim |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| $V_s$ | Katıların hacmi |
| **w** | Su muhtevası |
| $w_n$ | Doğal su muhtevası |
| $\gamma_n$ | Doğal birim hacim ağırlığı |
| **Δe** | Boşluk oranındaki değişim |
| **ΔH** | Yükseklikteki değişim |
| **Δu** | Boşluk suyu basıncındaki değişim |
| **ΔV** | Hacimdeki değişim |
| **Δσ** | Toplam gerilmedeki değişim |
| **Δσ'** | Efektif gerilmedeki değişim |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **ASTM** | Amerikan test ve malzeme derneği |
| **CRS** | Sabit gerilme oranı |
| **CL** | Düşük plastisiteli kil |
| **kPa** | Kilopascal |
| **LL** | Likit limit |
| **MRCE** | Orta hızlı konsolidasyon ekipmanı |
| **OCR** | Aşırı konsolidasyon oranı |
| **RACE** | Hızlı konsolidasyon ekipmanı |
| **RPM** | Dakika başına devir sayısı |

# 1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının tasarımında, yapıların üzerine inşa edileceği zeminin özelliklerinin belirlenmesi ve farklı yük durumları için zemin davranışının tayin edilmesi, yapıların sağlamlığı, güvenilirliği ve ekonomik olması açısından son derece önemli bir etkiye sahiptir. Zemin katmanları üzerinde oluşacak ek bir yük, katmanlardaki gerilmede artışa, dolayısıyla sıkışmaya neden olmaktadır. Yüklemenin neden olduğu gerilmelerdeki değişiklikler nedeniyle oluşan zemin yüzeyindeki toplam düşey deformasyona “oturma" denilmektedir. Yapılarda oturmalar önemli hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle oturma miktarlarının izin verilebilir ölçülerde olması son derece önemlidir. Yapı için planlanan tasarımın, ömrü boyunca oturma bileşenlerinin izin verilebilir sınırları aşması durumunda, yapısal bütünlüğü bozan bazı hasarlar (kırıklar, çatlaklar, yarıklar vb.) meydana gelmektedir. Bu etkinin ileri bir seviyeye ulaşması durumunda yapı kısmen hasar görür, ilerleyen seviyelerde ise yapı tamamen kullanılamaz hale gelmektedir Asadi ve ark., (2021). Bu nedenle zemin davranışının ve parametrelerinin olabilecek en hızlı ve güvenilir bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir.

Bir temelin ve/veya yapı zemininin uygunluğunu değerlendirmek için hem taşıma kapasitesi hem de oturmaya karşı tasarım yapmak gerekmektedir. Kohezyonlu zeminler üzerindeki temeller için tasarım kriteri, oturmaya karşı verdiği tepkiyle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle izin verilebilir yer değiştirmeler belirlendikten sonra, yapının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı toplam oturmanın tahmini çok önemlidir (Fox, 2003).

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan birçok parametre arasında konsolidasyon ayrı bir öneme sahiptir. Yüklemeye maruz kalan bir zeminde oturmanın ($S_t$), üç bileşeni vardır. Bunlar: ani oturma ($S_i$), konsolidasyon oturması ($S_c$) ve ikincil oturma ($S_s$) olmak üzere sıralanabilir. Ani oturma veya distorsiyon oturması genellikle elastik teoriden hesaplanmaktadır. Konsolidasyon oturması zamana bağlı bir işlemdir ve permeabilite katsayısı düşük, ince taneli, suya doygun zeminlerde meydana gelir. Oturmanın derecesi boşluk suyunun drenajına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Zamana bağlı diğer bileşen olan ikincil oturma, sabit efektif gerilmede oluşur ve oluşumunda boşluk suyu basıncında değişim söz konusu değildir (Holtz ve ark., 2015a).

Bununla birlikte, bileşenlerin büyüklüğü ve oluşma hızı göz önüne alındığında zemin türlerinde farklılıklar mevcuttur. Kumlar gibi granüler zeminler için hidrolik iletkenlik, konsolidasyonun anlık gerçekleşmesi için yeterince büyüktür. Ayrıca, granüler zeminlerde, ikincil oturma genellikle önemsizdir. Killer gibi kohezyonlu zeminler için hidrolik iletkenlik çok küçüktür ve konsolidasyonun tamamlanması yıllar sürebilmektedir. İkincil oturma, kohezyonlu zeminler için önemli olabilir. Hem kumlardan hem de killerden farklı olarak, organik zeminler genellikle hızlı konsolidasyona ve kapsamlı, uzun vadeli ikincil oturmaya maruz kalmaktadır (Fox, 2003).

Kohezyonlu zeminlerin konsolidasyon oturması, oturmanın zamana bağlı olarak geçekleştiği konsolidasyon teorisine dayanmaktadır. Konsolidasyon teorisi, konsolidasyon işlemi sırasında zeminin davranışı ve konsolidasyondan kaynaklanan oturmaların büyüklüğü ve zamanlaması hakkında bilgi veren teoremdir. Terzaghi'ye göre konsolidasyon, doymuş bir zeminin su içeriğinin hava ile yer değiştirmeden azalmasını içeren bir süreçtir. İnce taneli bir zemindeki konsolidasyon oranı, zeminin boşluk oranına ve geçirgenliğine bağlıdır. Zeminlerin boşluk oranları ve ilgili geçirgenlik katsayıları arttıkça konsolidasyon oranı da artmaktadır Terzaghi ve Peck, (1967). Düşük geçirgenliğe sahip, ince taneli zeminlerde yükleme sonucunda zemin taneleri arasındaki gözeneklerde bulunan su gözeneklerden dışarı hemen çıkamaz. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasına neden olur. Artan boşluk suyu basıncı nedeniyle zemin içerisinde bir su akışı meydana gelir ve boşluk suyu zamanla dışarı atılır (Sridharan ve Nagaraj, 2004).

Konsolidasyon deneyi laboratuvar ortamında ödometre olarak da bilinen konsolidasyon cihazı ile gerçekleşmektedir. Örselenmemiş, doğal yapısını, su içeriğini ve gözenek yapısını bozmadan elde edilmiş doygun kil numuneleri üzerinde yapılan deneyler, farklı ve giderek artan yüklerin neden olduğu oturmanın belirlenmesi ile gerçekleştirilir ve bu işlem bir hafta ya da bir aya kadar süren bir zaman diliminde gerçekleşmektedir. Bu tezin amacı uzun bir süre gerektiren konsolidasyon deneyinin, özdeş üretilmiş numuneler üzerinde konsolidasyon (ödometre) cihazı ile yükleme başına aynı sayıda konsolidasyon aleti kullanılarak bir gün içinde gerçekleştirmektir.

# 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geoteknik mühendisliğinde oldukça önemli olan konsolidasyon parametrelerinin elde edilmesi, uzun zaman alan bir süreçtir ve bu parametrelerin kısa sürede elde edilebilmesi için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Sridharan ve ark., (1999), konsolidasyon testi için hızlı bir yöntem önermeye çalışmışlardır. Geleneksel konsolidasyon testi kullanıldığında 1-2 hafta süren test süresine kıyasla 4-5 saat gibi kısa bir sürede tamamlanan hızlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Buna göre, konsolidasyon sürecinin herhangi bir anında konsolidasyon yüzdesini ve dolayısıyla efektif gerilmeyi belirlemek için eğri uyarlama prosedürü (örneğin, dikdörtgen hiperbol yöntemi) kullanılarak bir sonraki yük artışı gerçekleştirilmiştir. Böylece tüm geleneksel sıkıştırılabilirlik özellikleri ($C_c$, $c_v$ ve $m_v$) ve geçirgenlik özellikleri bu prosedür benimsenerek çok kısa bir sürede elde edilmiştir. Bu hızlı test yöntemi, geleneksel, daha uzun süreli testlere benzer sonuçlar üretmiş ve doğruluk kaybı olmaksızın önemli miktarda zaman ve emek tasarrufu sağlamıştır.

Yong ve ark., (2007), tek boyutlu Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine göre bulunan konsolidasyon oranı ve zaman arasındaki ilişkinin, konsolidasyon katsayısının analitik çözümünü değerlendirmek için yeni bir yöntem önermek için kullanılabileceğini iddia etmiştir. Önerilen bu yeni yöntem, grafiksel yöntemlerin dezavantajlarını ve ilk ile ikincil konsolidasyonun etkilerini ortadan kaldırmıştır. Buna ek olarak, en küçük kareler prensibine dayalı bazı istatistiksel yazılımlar orijinal verileri değerlendirmek için kullanılabilmiştir. Uygulamalı iki örnek, diğer geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, konsolidasyon katsayısını iyi bir doğrulukla, güvenilirlikle ve kolaylıkla belirleyebilmiştir.

Sivakumar ve ark., (2010), araştırmalarında konsolidasyon süresinin azaltılmasının yollarını incelemişler. Bu araştırma, çeşitli zemin parametrelerini ölçmek için yapılan standart laboratuvar testlerine dayanmaktadır. Konsolidasyon için gereken süre, zemin geçirgenliğine ve drenaj yolu uzunluğuna bağlıdır. Bu sebeple konsolidasyon sürecinin hızlandırılması, etkili drenaj uzunluğunun azaltılmasını gerektirir ve bunun sağlanması genellikle zemin numunesinin etrafına filtre drenleri yerleştirilerek sağlanır. Bu filtre

drenajlarının etkili bir şekilde çalışması için gereken değişiklikleri değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, çift filtre kullanımının konsolidasyon süresini azalttığını göstermiştir.

Kayabali ve Ozdemir, (2012), yaptıkları araştırma ile konsolidasyon davranışını tahmin etmek için bir araç olarak santrifüj konsolidasyon deneyinin uygulanabilirliğini göstermeyi amaçlamışlardır. Santrifüj konsolidasyonunun, konsolidasyon süresini önemli ölçüde kısalttığı kanıtlanmış olmasına rağmen, santrifüjlerin çok büyük olması ve çoğunlukla sadece bilim insanları tarafından kullanılması nedeniyle bu yöntemin topluma sunulması için daha önce herhangi bir girişimde bulunulmamıştır. Bu araştırmada 32 zemin numunesi, tek boyutlu geleneksel ve santrifüj konsolidasyon deneylerine tabi tutulmuştur. İki farklı teknik arasında ampirik bir ilişki kurulmuştur. Sonuçlar uyumlu çıkmıştır, bu nedenle, yeniden sıkışma ve sıkışma indekslerini makul bir doğrulukla belirlemek mümkün olmuştur. Bununla birlikte, önerilen aparatla ilgili tek pratik sınırlama, konsolidasyon katsayısının belirlenmesidir ve araştırmanın bu kısmı devam etmektedir.

Kassim ve ark., (2016), kohezyonlu zeminin konsolidasyon karakteristiğini belirlemek için alternatif bir cihaz olarak hızlı konsolidasyon hücresi ekipmanı (RACE) geliştirmiştir. Bu hızlı konsolidasyon hücresi ekipmanı, CRS (Sabit gerilme oranı) yöntemini benimseyerek geliştirilmiştir ve test süresini birkaç saate indirebilmiştir. Dört tip zemin numunesi farklı gerilme oranlarıyla test edilmiş ve sonuçları aynı zemin tipi üzerinde ödeometre kullanılarak yapılanlarla karşılaştırılmış ve birçok numunede oldukça iyi sonuçlar olduğu görülmüştür.

Raheena ve Robinson, (2018), önerdikleri yöntem %90'a eşit konsolidasyon derecesini belirlemek için standart $\sqrt{t}$ eğri-uydurma prosedürüne dayanmaktadır. Yeniden yapılandırılmış 5 adet ve örselenmemiş 3 adet zemin numunesi üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar geleneksel tek boyutlu konsolidasyon verileri ile karşılaştırılmıştır. Sıkışma indisi, konsolidasyon katsayısı ve ön konsolidasyon basıncı gibi konsolidasyon parametreleri, kısa bir sürede elde edilebilmiştir. Bununla birlikte, yeniden sıkışma indisi değerlerini yaklaşık %25 oranında fazla tahmin etmektedir.

Balcı, (2015), küçük boyutlu özel bir santrifüj cihazının konsolidasyon testlerinde uygulanabilirliğini araştırmıştır. Konsolidasyon test süresini azaltmak için statik

yaklaşımlara alternatif olarak daha yüksek ivmelerin uygulandığı dinamik yaklaşımlar geliştirilmiş olsa da bu yöntemler pahalıdır ve büyük santrifüjler gerektirmektedir. Bu çalışma için geliştirilen özel cihaz, dünyadaki diğer modellere kıyasla çok küçük bir santrifüjdür. Sonuçlar, testlerde bu cihazın kullanılmasının test süresini birkaç saate indirdiğini ortaya koymuştur. Önerilen yaklaşımdan elde edilen sonuçları geleneksel konsolidasyon testi sonuçlarıyla ilişkilendirmek için yeni bir parametre olan eşdeğer santrifüj yükü tanımlanmıştır. Geliştirilen ampirik ilişki, bakir sıkışma çizgisini yüksek bir doğrulukla tahmin edebilirken, ön konsolidasyon gerilmesini orta düzeyde bir doğrulukla tahmin edebilmiştir. Bu ilişkiler doğal zemin örneklerine uygulanmıştır ve sonuçlar oldukça umut vericidir.

Raftari ve ark., (2022), zemin-çimento kolonları ile işlenen yumuşak zeminin oturma tutumunu belirlemek için Orta Hızlı Konsolidasyon Ekipmanını (MRCE) geliştirmiştir. MRCE, geleneksel ödeometre ve Rowe hücre testlerine kıyasla kohezyonlu zeminin konsolidasyon sürecini hızlandırabilen sürekli yükleme test yöntemi olan sabit gerilme oranı (CRS) konsolidasyon teorisine dayalı olarak çalışmaktadır. CRS teorisi, zemin-çimento kolonlarının rijitliği zamanla arttığı için, belirli bir zamandaki oturmayı belirlemek için oldukça iyi bir yöntemdir. Zemini daha fazla doyurmak için bir geri basınç sisteminin eklenmesi ve aşırı boşluk suyu basıncı ölçümü dahil olmak üzere MRCE'de farklı değişiklikler yapılmıştır. Stabilize edilmiş yumuşak zeminin oturma davranışını araştırmak için MRCE kullanılarak farklı iyileştirme alanı değerlerine sahip dört deney gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, iyileştirme alanının %15,3'ten %30,7'ye çıkarılmasıyla, deformasyon oranlarının işlenmemiş zemine kıyasla %41'den %53'e yükseldiği tespit edilmiştir.

Moozhikkal ve Robinson, (2023), konsolidasyon testlerinin sınırlamalarının üstesinden gelmek için boşluk suyu basıncı ölçümleri ile hızlandırılmış bir artımlı yük konsolidasyon testi yöntemi geliştirmiştir. Kohezyonlu zeminlerin konsolidasyon özellikleri genellikle kontrollü şekil değiştirme yüklemesi (CSL) deneyi kullanılarak belirlenmektedir. Sıkışma indisi ($C_c$), konsolidasyon katsayısı ($c_v$) ve ön konsolidasyon basıncı ($\sigma_p'$) gibi konsolidasyon özelliklerinin CSL testini gerçekleştirmek için benimsenen eksenel gerinim oranına bağlı olduğu bilinmektedir. CSL testlerinde uygun eksenel gerilme oranının belirlenmesi zorlu bir görevdir. Test prosedürü, 6 sulandırılmış ve 4 sağlam zemin numunesi üzerinde bir dizi test gerçekleştirilerek doğrulanmıştır. Önerilen yöntemden elde

edilen konsolidasyon parametreleri, geleneksel IL testinin yanı sıra CSL konsolidasyon testiyle de karşılaştırılmış ve bu yöntemin geçerliliğini göstermiştir.

Geoteknik mühendisliğinin temel konularından biri olan konsolidasyon süreci, laboratuvar ortamında klasik konsolidasyon deneyleriyle gerçekleştirilir. Ancak, bu deneyler uzun zaman alması nedeniyle mühendislik uygulamaları açısından pratik sınırlamalar içermektedir. Bu bağlamda, önceki çalışmalarda hızlı konsolidasyon yöntemleri, konsolidasyon süresini azaltmaya yönelik farklı yaklaşımlar ve santrifüj konsolidasyon deneylerinin uygulanabilirliği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar genellikle tek numune üzerine artımlı yüklemeler veya büyük ve pahalı santrifüj sistemleri ile yürütülmüş, bu da sonuçların genelleştirile bilirliğini ve uygulamadaki yaygınlığını kısıtlamıştır.

Bu tez kapsamında önerilen yöntem ise, geleneksel ödometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, zamandan tasarruf sağlamayı hedefleyen ve deneysel tekrar edilebilirlik üzerine odaklanan yeni bir deneysel yaklaşım sunmaktadır. Önerinin temel dayanağı, her bir yükleme adımı için özdeş karakteristiklere sahip farklı numunelerin kullanılmasıdır. Böylece, klasik yöntemle aynı prensiplere dayanan, ancak zaman açısından çok daha verimli ve pratik bir test kurgusu ortaya konulmaya çalışılmıştır. Deneysel tasarımda yapay numuneler üretmek amacıyla santrifüj düzeneği kullanılmış ve üç farklı su içeriği seviyesinde zemin örnekleri hazırlanmıştır. Her bir su içeriği seviyesi için dört farklı devir sayısı uygulanarak toplamda 96 adet özdeş numune elde edilmiştir. Bu kapsamlı numune seti, yalnızca klasik yöntemin hızlandırılması açısından değil, aynı zamanda deneysel tekrar edilebilirlik ve güvenilirlik açısından da çalışmayı önceki çalışmalardan ayıran güçlü bir yön olarak öne çıkmaktadır. Gerçekleştirilen analizlerde, hem geleneksel ödometre yöntemine dayalı sonuçlar hem de bu tezde önerilen yeni hipoteze dayalı alternatif yükleme senaryosu karşılaştırılmıştır.

# 3. KONSOLİDASYON VE KONSOLİDASYON OTURMASI

Bir zemin tabakası herhangi bir nedenden dolayı basınç gerilmesine maruz kaldığında sıkışmaya uğramaktadır. Sıkışmaya, zemin danelerinin deformasyonu, boşluklardaki hava ve suyun sıkışarak dışarı çıkması neden olabilmektedir. Sıkışma, yükün türüne, süresine ve büyüklüğüne ve malzemelerin özelliklerine bağlı olarak kademeli olabilmektedir.

Bir yapının bu sıkışma nedeni ile oturması, yapıya zarar verme riski, yapının faydası ve yapının görünümü gibi sebeplerden ötürü araştırılması gerekmektedir. Yapının estetik görünümü, oturmanın neden olduğu çatlak varlığı veya yapının eğilmesi nedeniyle bozulabilmektedir. Bir yapıda meydana gelen oturmalar, drenajlar, pompalar, elektrik hatları gibi bazı tesisatlara zarar verebilmektedir. Daha fazla oturma, yapısal başarısızlığa ve yapının çökmesine neden olabilir. Oturma, zamandan bağımsız (ani oturma) ve zamana bağlı oturmanın (konsolidasyon) birleşimidir.

## 3.1. Zeminlerin Sıkışması

Malzemeleri yüklendiğinde veya basınca maruz kaldığında deformasyona uğradıkları bilinen bir gerçektir. Deformasyonlar şekil değişimi veya hacim değişimi şeklinde olabilirler. Bazı malzemelerde yükleme olurken deformasyon gerçekleşir, bazı malzemelerde ise bu tepki oldukça uzun zaman alır.

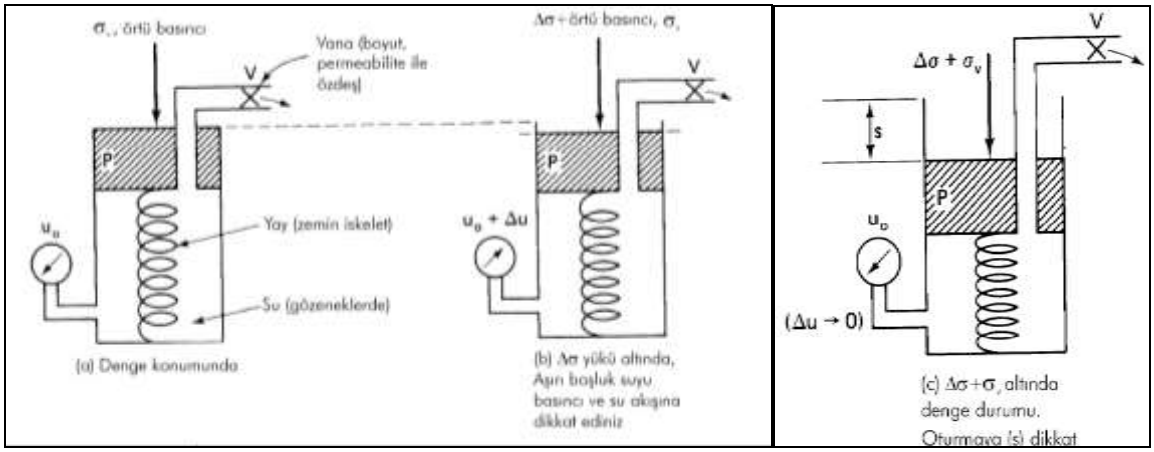
Basınç-şekil değiştirme ilişkisinin en basit hali elastik malzemelerde görülebilir. Elastik malzemelerde şekil değişikliği basınç ile aynı anda gerçekleşir ve yük kaldırıldığında malzeme eski haline geri döner. Bazı özel malzemeler yüklemeye hemen tepki vermezler ve bunlar visko-elastik malzeme olarak nitelendirilir. Fakat zeminler bundan daha karmaşıktır. Yük boşaltıldığında zeminlerin çoğu orijinal şekline geri dönmez, bazı deformasyonları muhafaza ederler.

Killer yüklemeye maruz kaldıklarında oldukça düşük geçirgenliklerinden dolayı, sıkışmaları suyun boşluklardan dışarı çıkış hızı tarafından kontrol edilir. Bu süreç konsolidasyon olarak isimlendirilen bir basınç-şekil değiştirme zaman olayıdır. Bu durum iri daneli malzemelerin sıkışması ile kohezyonlu zeminin konsolidasyonu arasındaki temel

ve tek farktır; kumların sıkışması neredeyse anında gerçekleşir, oysa konsolidasyon daha çok zamana-bağımlı bir süreçtir. Oturma hızlarındaki fark geçirimliliklerdeki farka bağlıdır.

Kilin konsolidasyonu Şekil 3.1'de gösterilen yay modeli ile açıklanmaktadır. Bir P pistonu bir düşey basınç ($\sigma_v$) tarafından yüklenir ve odanın içerisindeki su ile doldurulmuş silindir yay sıkışır. Silindirdeki su, zemin boşluklarındaki suyu temsil ederken yay, zeminin mineral iskeleti ile benzeştirilir. Pistonun üstündeki valf (V) zeminin geçirimliliğini temsil eder. Denge halinde, valf açık olduğunda yay basıncı tamamen desteklediği için su çıkışı olmaz. Silindire bir basınç ölçer bağlanır ve bu özel durumda zemindeki hidrostatik basıncı $u_0$ gösterir. Zemin tabakası bir ilave basınç artışı ile, $\Delta\sigma$, yüklenir (Şekil 3.1 (b)). Konsolidasyon sürecinin başında, varsayalım ki, valf V başlangıçta kapatılır. Basıncın uygulanması üzerine, basınç silindir içerisindeki suya aktarılır. Bu durumda basınç ölçer $u_0+\Delta u$ değerini okur. Burada $\Delta u=\Delta\sigma$ eklenen ilave basıncı gösterir.

Düşük geçirimliliği ile bir ince-taneli zemine benzetebilmek amacıyla, valfi açabilir ve başlangıçtaki fazla boşluk suyu basıncı altında $\Delta u$ suyun yavaşça silindiri terk etmesine müsaade edilir. Zamanla su dışarı aktığında, su basıncı azalır ve gitgide basınç $\Delta\sigma$ bu basınç altında sıkışan yaya aktarılır. Sonunda (Şekil 3.1 (c)) silindirin dışına başka su çıkmaz, yay zemin yükü ve uygulanan basınç altında denge halindedir (Holtz ve ark., 2015a).



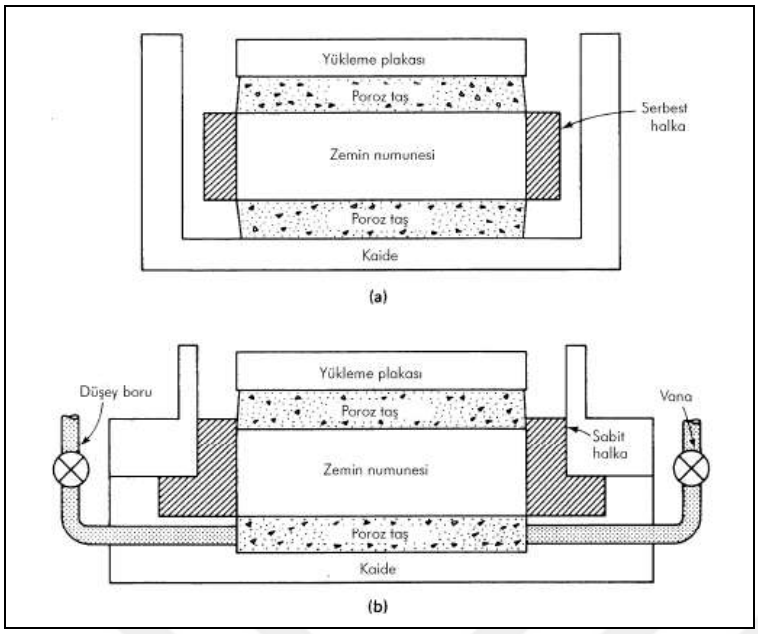

Şekil 3.1. Konsolidasyonu anlatmak için kullanılan yay modeli (Holtz ve ark., 2015a)

### 3.2. Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi

Geniş bir alan kaplayan zemin tabakaları düşey olarak yüklendiğinde, sıkışma bir boyutlu olarak varsayılabilir. Laboratuvarda bir boyutlu sıkışmayı modellemek için, zemin konsolidasyon (ödometre) deney aleti içerisinde sıkıştırılır. Yüzen halkalı konsolidasyon ve sabit halkalı konsolidasyon olmak üzere iki tip konsolidasyon deney aletinin ana bileşenleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Sıkışabilir zemin tabakasına ait bir elemanı temsil eden örselenmemiş numune dikkatlice tıraşlanır ve kapalı konsolidasyon halkasının içerisine yerleştirilir. Halka, yatay deformasyonlara izin vermeyecek ölçüde rijittir. Numunenin altında ve üstünde konsolidasyon işlemi sırasında drenaja izin veren poroz taşlar bulunmaktadır. Poroz taşlar ya sinterleşmiş korindon ya da gözenekli pirinçten yapılır. Numunenin yüklenmesi sırasında poroz taşın halkanın iç yüzeyine sürtünmesini önlemek amacıyla üst poroz taşın çapı halkanın çapından genellikle 0,5 mm daha küçük tutulur. Numunenin çapının yüksekliğine oranı genellikle 2 ile 5 arasında muhafaza edilir ve numune çapı çoğu zaman test edilen örselenmemiş örneğin çapına bağlıdır. Kalınlığı az ve çapı küçük örneklerde tıraşlama sırasında daha fazla örselenme meydana gelmektedir. Diğer taraftan, yüksekliği fazla numunelerde daha büyük kenar sürtünmesi söz konusudur. Seramik halkalar veya teflon kaplı halkalar kullanmak suretiyle veya halkanın iç yüzeyi molibden disülfit ile yağlanarak kenar sürtünmesinin bir ölçüde azalması sağlanabilmektedir (Holtz ve ark., 2015a).

Yüzen -halkalı konsolidasyon deneyinde (Şekil 3.2 (a)) sıkışma zemin numunesinin her iki yüzünde de meydana gelir. Sabit-halkalı deneyde tüm hareket aşağı halkaya doğrudur. Sabit halkalı deneyin başlıca avantajı, alttaki poroz taştan gerçekleşen drenajın ölçülebilir veya kontrol edilebilir olmasıdır (Holtz ve ark., 2015a).



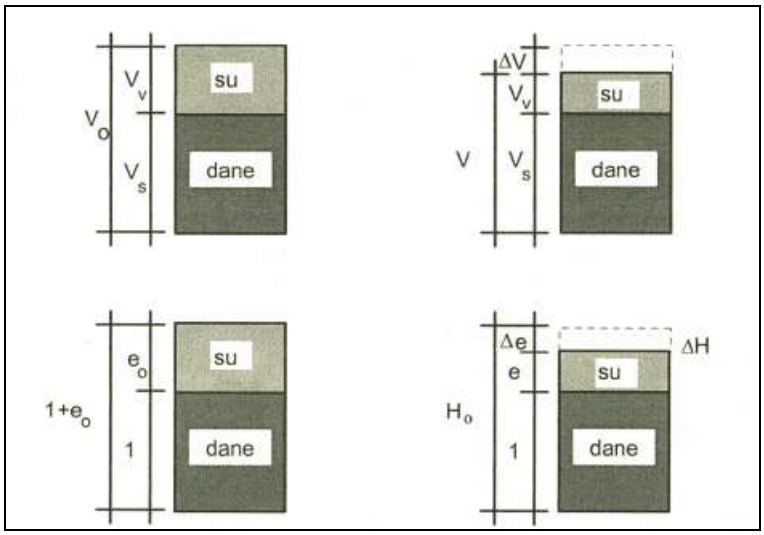

Şekil 3.2. Konsolidasyon deney aletinin şematik kesiti: (a) yüzen halkalı konsolidasyon; (b) sabit halkalı konsolidasyon (Holtz ve ark., 2015a).

Konsolidasyon deneyi esnasında, deney zeminine ait numunenin yük ve deformasyon arasındaki ilişkisini elde etmek için uygulanan yük ve deformasyon dikkatli bir şekilde ölçülür. Konsolidasyon deneyinin amacı verilen dış yükler altında zeminin sıkışmasını belirlemektir.

Tek boyutlu konsolidasyon şu hususlara dayanmaktadır:

- Yer değiştirmeler düşeydir, yani yanal gerilmeler yoktur.
- Zemin katmanından tüm su akışı sadece düşey yöndedir.
- Boşluk oranındaki değişim efektif gerilmenin düşey bileşeninin doğrudan bir fonksiyonudur.

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, konsolidasyon tek boyutlu olduğundan, ilk hacim birimi (V) başına hacimdeki değişim ($\Delta V$), ilk yükseklik birimi (H) başına yükseklikteki değişime ($\Delta H$) eşit alınabilir (Eşitlik 3.1).




Şekil 3.3. Hacim azalmasının blok diyagramlarda görünümü (Aytekin, 2004)

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta V}{V} \tag{3.1}$$

V ve ΔV değerleri boşluk oranı cinsinden de gösterilebilir; Eşitlik (3.2)'de Δe boşluk oranındaki değişim, $e_0$ ise başlangıçtaki boşluk oranıdır:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \rightarrow \Delta H = H\frac{\Delta e}{1 + e_0} \tag{3.2}$$

Bu genel ilişki zeminin doygunluk derecesinden ve hacim değişimine neden olan mekanizmadan bağımsızdır.

### 3.3. Normal Konsolidasyon, Aşırı Konsolidasyon ve Ön Konsolidasyon Basıncı

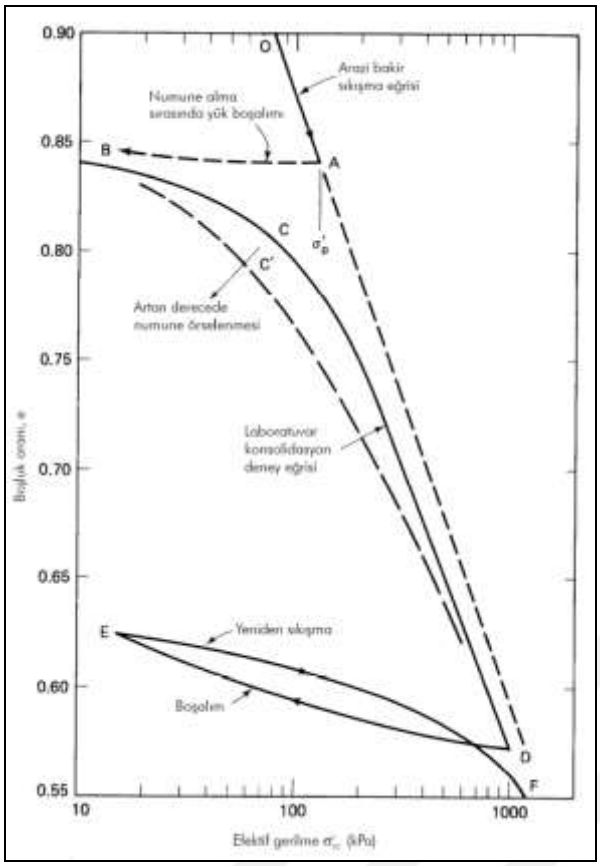
Ön konsolidasyon basıncının ($\sigma'_p$), şu andaki mevcut düşey efektif zemin basıncına ($\sigma'_{vo}$) eşit olduğu bir zemine normal konsolide (NC) zemin denilmektedir ($\sigma'_p=\sigma'_{vo}$). Eğer ön konsolidasyon basıncı mevcut zemin yükünden daha büyük ise ($\sigma'_p>\sigma'_{vo}$), bu zemin için aşırı konsolide (OC) zemin tanımı kullanılmaktadır. Eşitlik (3.3)'de gösterildiği gibi, ön konsolidasyon basıncının mevcut düşey efektif zemin basıncına olan oranına aşırı konsolidasyon oranı, (OCR: Over Consolidation Ratio), denilmektedir.

$$OCR = \frac{\sigma_p'}{\sigma_{vo}'} \tag{3.3}$$

Bir zeminin neden aşırı konsolide olabileceğine dair birçok sebep vardır. Nedeni toplam basınç veya boşluk suyu basıncındaki bir değişiklik olabilir; her iki değişiklikte efektif basıncı değiştirebilir (Holtz ve ark., 2015a).

### 3.4. Zeminin Gerilme Geçmişi ve Yapısal Hafızası

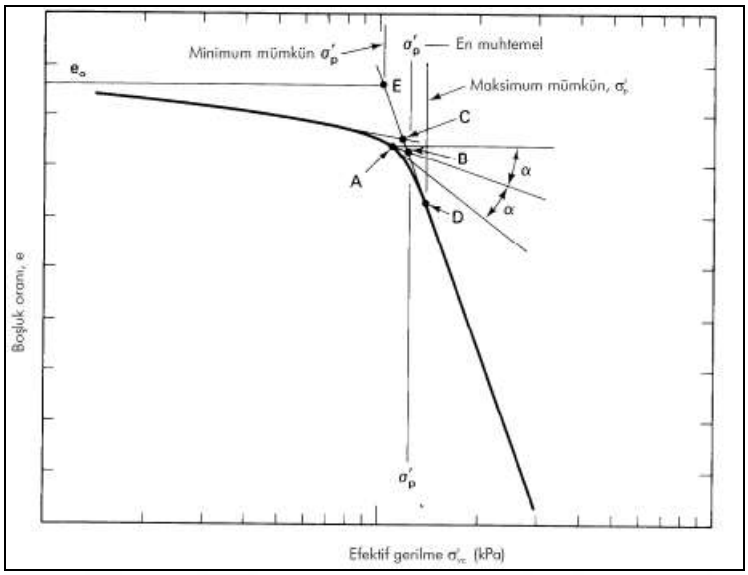
Zeminler, oluşumundan itibaren etkisi altında kaldıkları basınç ve bu basınçtaki değişimlerin etkisiyle bir hafızaya sahiptirler. Bu değişimler zeminin basınç tarihinin bir kısmıdır ve zemin yapısında korunurlar Casagrande, (1936). Bir laboratuvar numunesi veya arazideki bir zemin kütlesi, geçmişte daha önce maruz kaldığından daha büyük bir basınç ile yüklendiğinde, zemin yapısı artık bu fazla yükü taşıyamaz ve bozulmaya başlar. Bunun sebebini anlamak için yapılan, zemin birikmesi, numune alma ve nihai olarak laboratuvarda konsolidasyon deneyi ile tekrar yüklenmesi aşamalarında bir çökelme kilinin komple basınç- şekil değiştirme detayları Şekil 3.4'de görülmektedir. OA doğrusu birikme esnasında bir zemin elemanına ait boşluk oranı ve logaritmik efektif basınç arasındaki ilişkiyi temsil eder. Numune alma işlemi gerçekleştiğinde zemin basınçları kaldırılmış olur ve grafikte kesikli çizgi ile gösterilen AB eğrisi boyunca geriye gelir. Laboratuvar ortamına gelen numune yeniden yüklendiğinde BC elde edilir. C noktası civarında zemin bozulmaya başlar ve yükleme devam ettikçe CD elde edilir. Neticede arazi ve laboratuvar deneyi eğrileri OAD ve BCD, D noktasından ötede bir noktada birbirine kavuşacaklar ve aynı yolda devam edeceklerdir (Holtz ve ark., 2015a).




Şekil 3.4. Boşluk oranı-logaritmik efektif gerilme konsolidasyon grafiği (Holtz ve ark., 2015a).

### 3.5. Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesi

En eski ve en yaygın kullanılan prosedür Casagrande tarafından önerilmiştir Casagrande, (1936). Maksimum eğriliğe (veya minimum yarıçapa) karşılık gelen A noktası, Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, ilk laboratuvar yükleme eğrisi üzerinde seçilir. A noktasından itibaren yatay bir doğru çizilir. A noktasında eğriye bir teğet çizilir. Bu yatay doğru ve teğet arasında oluşan açının açı ortayı bulunur. Bakir sıkışma eğrisinin düz-doğru kısmı, elde edilen açı ortay doğrusu ile kesişinceye kadar uzatılır. Bu iki doğrunun kesişim noktası ön konsolidasyon basıncıdır ($\sigma'_p$).




Şekil 3.5. Ön konsolidasyon basıncını belirlemek için Casagrande, (1936) yöntemi

Konsolidasyon deneyi sonucunda, boşluk oranı (e) zeminin ne kadar boşluk içerdiğini göstermektedir ve yükleme kademeleri altında boşluk oranının nasıl azaldığını takip edebilmek, zeminin sıkışma davranışını anlamak için önemli bir adım olmaktadır. Başlangıç boşluk oranı ve her yükleme kademesi sonundaki boşluk oranı yanında konsolidasyon teorisine ait farklı parametreler hesaplanmaktadır. Sıkışabilirlik katsayısı ($a_v$), birim gerilme değişimine karşılık gelen hacim değişimini ifade etmektedir ve zemin örneğinin sıkışabilirliğini belirlemek için kullanılmaktadır. Hacimsel sıkışma katsayısı ($m_v$), birim efektif gerilme artışı başına zeminde meydana gelen hacimsel birim deformasyonu ifade etmektedir. Konsolidasyon katsayısı ($c_v$), zeminin konsolidasyon hızını belirleyen parametredir. Yapılardaki oturmaların zamanla nasıl gelişeceğini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında ise bu parametrelerden boşluk oranı (e), ön konsolidasyon basıncı ($\sigma'_p$), sıkışma indisi ($C_c$) ve yeniden sıkışma indisi ($C_r$) değerleri hesaplanarak geleneksel ve günlük konsolidasyon deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Boşluk oranı ve logaritmik efektif basınç cinsinden çizildiğinde, bakir sıkışma eğrisinin eğimi sıkışma indisi $C_c$ olarak tanımlanır (Eşitlik (3.4)) Zeminin daha önce maruz kaldığı en yüksek efektif gerilme seviyesinden daha düşük gerilmeler altında yeniden sıkışması (rekompresyon) sırasında gösterdiği deformasyon $C_r$ olarak tanımlanır (Eşitlik (3.5)) (Holtz ve ark., 2015a).

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{log\sigma_2' - log\sigma_1'} = \frac{e_1 - e_2}{log\frac{\sigma_2'}{\sigma_1'}} \quad (3.4)$$

$$C_r = \frac{e_1 - e_2}{log\sigma_2' - log\sigma_1'} = \frac{e_1 - e_2}{log\frac{\sigma_2'}{\sigma_1'}} \quad (3.5)$$

# 4. MALZEME VE YÖNTEM

Yoğurulmuş (remolded) ve özdeş özelliklere sahip numuneler üzerinde konsolidasyon süresi ve parametrelerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan malzeme, ekipman ve yöntemler sunulmuştur.

Bu çalışmada izlenecek aşamalar aşağıdaki gibidir:

- Yoğurulmuş özdeş zemin numuneleri üzerinde çalışmak üzere sahadan zemin numunelerinin alınması
- Çalışmada kullanılacak özdeş zemin numunelerinin likit limitlerinin koni batma deneyi ile belirlenmesi
- Santrifüj kullanılarak yoğurulmuş özdeş zemin numunelerinin hazırlanması
- Numunenin genel özelliklerine bakılması ve tartım işleminin yapılması
- Yoğurulmuş özdeş zemin numuneleri üzerinde günlük konsolidasyon testi ile geleneksel konsolidasyon testinin gerçekleştirilmesi
- Numunenin fiziksel özelliklerinin incelenmesi ve kilo tartımının yapılması
- Elde edilen verilerin analiz edilerek sonuçların yorumlanması ve önerilerin geliştirilmesi

## 4.1. Zemin Malzemesi Temini

Bu çalışmada, deneysel analizlerde kullanılmak üzere yoğurulmuş ve özdeş özelliklere sahip zemin numuneleri hazırlanmıştır. Yoğurulmuş özdeş numuneler; zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği gibi disiplinlerde sıklıkla kullanılan, belirli bir zemin örneğinin homojenleştirilerek aynı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip çok sayıda numunenin laboratuvar ortamında yeniden şekillendirilmesiyle elde edilen özel numune türleridir. Bu tür numunelerin kullanılmasının temel amaçları aşağıda özetlenmiştir:

- Homojenlik: Yoğurma işlemiyle zemin, tüm kesitlerinde benzer özellikler gösterir; bu da deneysel sonuçların güvenilirliğini artırır.
- Tekrarlanabilirlik: Farklı deneylerde aynı özellikte numunelerin kullanılması, karşılaştırmalı analizlerin sağlıklı bir şekilde yapılmasına imkân tanır.

- Standardizasyon: Yoğurma işleminin belirli bir prosedüre göre yapılması, farklı araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalar arasında tutarlılığı sağlar ve elde edilen verilerin genel geçerliliğini artırır.

Bu bağlamda, çalışmada kullanılan zemin numuneleri, laboratuvar koşullarında uygun su muhtevası ile yeniden yoğrularak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu yoğurulmuş özdeş numuneler, konsolidasyon deneylerinin güvenilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar vermesi amacıyla kullanılmıştır.

Zemin gruplarının çeşitliliğini artırmak amacıyla, yoğurulmuş numunelerin hazırlanmasında farklı kaynaklardan alınan zeminler kullanılmıştır. Bu kapsamda, zemin örnekleri Ankara ili Nallıhan (Şekil 4.1) ve Gölbaşı (Şekil 4.2) ilçelerinden temin edilmiştir.




Şekil 4.1. Nallıhan ilçesi numune yeri




Şekil 4.2. Gölbaşı ilçesi numune yeri

Şekil 4.3'de gösterilen şekilde gidilen bölgenin farklı kesimlerinden kürekle kazılarak alınan malzeme doğal su içeriklerinin korunması amacıyla şeffaf poşetlere konularak laboratuvar ortamına taşınmıştır.



Şekil 4.3. Sahadan zemin numunelerinin alınması

Laboratuvara getirilen zemin numuneleri, Şekil 4.4'de gösterildiği gibi tepsilere konularak 105 + 5°C sabit sıcaklık sağlayan etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur.



Şekil 4.4. Numunenin laboratuvara getirtilip etüvde kurutma işlemi

Daha sonra zemin numunesinin öğütülmesi ve ince agreganın kum boyutuna indirilmesi için laboratuvar tipi bir haçlı değirmen kullanılmıştır. Bu değirmen, agrega, doğal taş ve benzeri malzemelerden istenilen küçük tane boyutlu numunelerin laboratuvar ortamında elde edilmesi amacıyla kırma veya öğütme işlemlerinde tercih edilmektedir. Agregaların belirlenen boyutlarda öğütülmesini sağlayan elek sistemi, haçlı değirmenin tabanında yer almakta olup, numunenin istenilen tane büyüklüğünde alttaki toplama kabına aktarılmasını sağlamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Laboratuvar tipi haçlı değirmen

Bu deneyde farklı tane boyutlarını ayırmak için çeşitli elekler kullanılır; bunlardan biri de 40 numaralı (425 μm) elektir. Bu eleğin tercih edilme nedeni, bu elekten geçen malzemenin zemindeki ince tanecikleri temsil etmesidir. İnce tanecikler (kil ve silt gibi), toprağın su tutma kapasitesi, sıkışabilirliği ve geçirgenliği gibi mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Zemin numunelerinin her biri 40 numaralı elekten elenmiş (Şekil 4.6 (a)), eleğin altında kalan malzeme ise test için kullanılmıştır (Şekil 4.6 (b)).



a) b)

Şekil 4.6. Elekten geçirilen malzeme örnekleri: a.Eleğin üzerinde kalan malzeme, b. Eleğin altında kalan malzeme

## 4.2. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmalarında, yoğrulmuş özdeş numune hazırlamak için santrifüj düzeneğinin bulunması ve laboratuvar altyapısının tüm deneyler için uygun olması nedeniyle, Şekil 4.7'de gösterilen Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı tercih edilmiştir. Konsolidasyon testi için gerekli olan özdeş numunelerin santrifüj cihazı ile hazırlanmasından önce, numunelerin likit limit su içerikleri tespit edilmek üzere laboratuvar çalışmalarına başlanmıştır.



Şekil 4.7. Laboratuvar ortamı

### 4.2.1. Koni düşürme (Penetrasyon) deneyi

Bu deney yönteminde, likit limit değeri, konik uçlu bir metalin kendi ağırlığıyla, önceden belirli su içeriğinde hazırlanan homojen zemine batırılması esasına dayanır. Şekil 4.8'de gösterilen koni penetrasyon cihazı kullanılarak deney aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

TS 1900-1 (2006) standardına göre, 400 µm göz açıklıklı elekten geçirilen malzeme karıştırma kabına konmuş ve palet bıçaklar (spatula) yardımıyla, damıtık su eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan numune, metal deney kabına sıkıca yerleştirilmiş ve yüzeyi çelik cetvelle tesviye edilerek penetrometre tabanına konulmuştur. Koni, zeminin yüzeyini belirsiz şekilde çizecek seviyeye indirilmiş ve komparatör saatinin sıfır okuması alınmıştır. Ardından, 5 saniyelik ayarlı mekanizmaya basılmış ve koni serbest düşmeye bırakılmıştır. Süre sonunda batma miktarı okunarak kaydedilmiştir. Koni kaldırıldıktan sonra, metal kaptan bir miktar zemin alınmış ve ağırlığı ölçülmüştür. Bu işlem, su miktarı artırılarak tekrarlanmış; her defasında batma derinliğinin 15 mm ile 25 mm arasında tutulmasına dikkat edilmiştir. Deneyler, kurudan ıslak karışıma doğru ilerletilmiş ve koni ile deney kabı her denemeden sonra temizlenmiştir.



Şekil 4.8. Likit limit tayininde kullanılan koni penetrasyon cihazı

Su içeriğini belirlemek için aşağıdaki Eşitlik (4.1) kullanılmıştır:

$$w = \frac{M_w}{M_s} . 100 \qquad (4.1)$$

w: su muhtevası

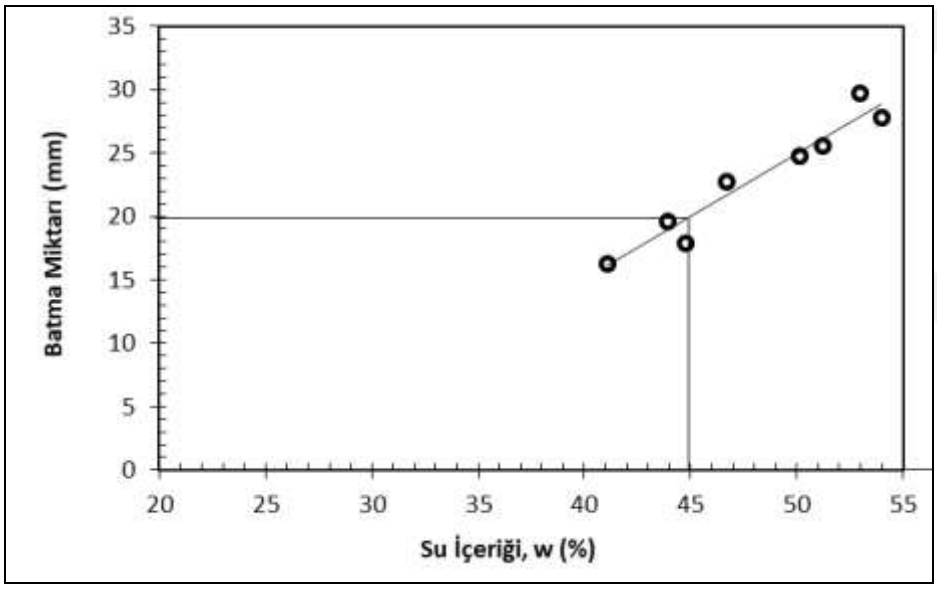
$M_w$: su kütlesi

$M_s$: kuru zemin numunesi kütlesi

Deney sonuçları öncelikle Çizelge 4.1'de sunulduğu şekilde elde edilmiştir. Ardından, Şekil 4.9'da gösterilen koordinat ekseninde su içeriği yatay eksene, penetrasyon değeri ise düşey eksene yerleştirilerek deney noktaları belirlenmiştir. Bu noktalar üzerinden en uygun eğri geçirilmiş ve 20 mm penetrasyon değerine karşılık gelen su içeriği, zeminin Likit Limit (LL) değeri olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada uygun LL değerlerini tespit etmek amacıyla tüm likit limitler bu yöntemle hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Koni batma deneyinden elde edilen örnek sonuç (LL=45 için)

| Kap kütlesi (gr) | Kap+yaş numune kütlesi (gr) | Kap+kuru numune kütlesi (gr) | Su muhtevası (w) (%) | Koni batma miktarı (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 9,99 | 16,07 | 14,3 | 41 | 16,27 |
| 12,9 | 18,98 | 17,1 | 45 | 17,87 |
| 10,52 | 18,45 | 16,03 | 44 | 19,63 |
| 10,78 | 17,91 | 15,64 | 47 | 22,78 |
| 9,46 | 15,72 | 13,63 | 50 | 24,81 |
| 9,05 | 13,98 | 12,31 | 51 | 25,54 |
| 10,46 | 19,93 | 16,61 | 54 | 27,76 |
| 11,76 | 16,96 | 15,16 | 53 | 29,73 |




Şekil 4.9. Likit limit belirlenme örnek grafiği (LL=45 için)

Konsolidasyon testleri için, farklı plastisite özelliklerine sahip üç tip ince taneli yoğurulmuş özdeş numune ile deneyler gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla, kullanılacak zemin numuneleri üzerinde ön çalışmalar yapılarak likit limit (LL) değerleri belirlenmiş ve uygunlukları değerlendirilmiştir.

Yapılan likit limit deneyleri sonucunda 24, 37, 45, 53, 61, 69, 70, 72, 77 ve 78 şeklinde değişen değerler elde edilmiştir. Santrifüj cihazı kullanılarak hazırlanan numunelerin bazıları aşırı derecede akışkan, bazıları ise oldukça katı kıvamda bulunmuştur. Bu durum, deneysel çalışmalarda kullanılacak numunelerin konsolidasyon davranışlarını sağlıklı bir şekilde temsil edebilmesi açısından likit limit değerlerinin belirli bir aralıkta tutulması

gerekliliğini ortaya koymuştur. Yapılan ön değerlendirmeler doğrultusunda, uygun zemin kıvamının sağlanabilmesi için likit limit değerlerinin belli bir aralıkta olması gerektiğine karar verilmiştir.

Deneylerde kullanılacak nihai likit limit (LL) değerleri 37, 45, 53 olarak belirlenmiştir. Farklı plastisite özelliklerine sahip bu üç ince taneli zemin türünün her biri için 12 veri seti hazırlanmıştır. Her bir veri seti 8 adet yoğurulmuş zemin numunesinden oluşmakta olup, toplamda 96 adet numune santrifüj cihazı kullanılarak hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır.

### 4.2.2. Santrifüj düzeneği kullanılarak özdeş numune hazırlanması

Yoğurulmuş özdeş numunelerin hazırlanmasında santrifüj düzeneği kullanılmıştır. Bu sayede, çalışmanın hipotezini test edebilmek için gerekli sayıda özdeş numune elde edilmiştir.

Kullanılan santrifüj düzeneği, Kayabali ve Özdemir, (2012), tarafından tasarlanmış olup, laboratuvar koşullarında farklı ön konsolidasyon basınçlarına sahip yoğurulmuş özdeş zemin numunelerinin hazırlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntemle, doğal yapısı büyük ölçüde korunmuş ve homojenliği yüksek numuneler elde edilerek deneylerin güvenilirliği artırılmıştır (Balcı, 2015).

Geoteknik santrifüjler genel olarak iki ana tipe ayrılmaktadır: kiriş tipi (Şekil 4.10.a) ve davul tipi (Şekil 4.10.b). Her iki tip, mühendislik problemlerinin santrifüj ortamında modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya genelindeki birçok araştırma laboratuvarı ve üniversitede, yüksek kapasiteli ve büyük boyutlara sahip santrifüj sistemleri kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan bu cihazların kol uzunlukları genellikle birkaç metre olup, yükleme kapasiteleri ise birkaç yüz kilogram düzeyindedir.



Şekil 4.10. Geoteknik santrifüj türleri a. Kiriş tipi santrifüj, b. Davul tipi santrifüj (Balcı, 2015)

Gelişen teknolojiyle birlikte, geoteknik santrifüjlerin boyutlarında küçülmeler meydana gelmiş ve bu doğrultuda kullanım alanlarında çeşitlilik gözlemlenmiştir. Kiriş ve davul tipi santrifüjlerin yanı sıra, daha küçük boyutlara sahip masaüstü santrifüjlerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak bu tür santrifüj sistemleri, genellikle bilimsel amaçlı araştırmalarda tercih edilmekte olup, büyük ölçekli geoteknik uygulamalarda sınırlı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımdan hareketle, Kayabali ve Özdemir, (2012), gerçekleştirdikleri çalışmada küçük ölçekli bir santrifüj düzeneği geliştirmiştir (Şekil 4.11). Araştırmacılar, doğal zemin örnekleri üzerinde hem geleneksel hem de santrifüj konsolidasyon deneyleri yaparak, her iki yöntemle elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmalarında, santrifüj konsolidasyon deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak, geleneksel konsolidasyon deneyine ait boşluk oranı (e) – efektif gerilme ($\sigma_v'$) ilişkilerinin yaklaşık doğrulukla elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır (Balcı, 2015).



Şekil 4.11. Santrifüj düzeneği (Kayabali ve Özdemir, 2012).

Bu bağlamda, Balcı, (2015) ile Asadi, (2017) tarafından geliştirilen yöntem takip edilmiştir. Söz konusu araştırmacılar, laboratuvar ortamında bir santrifüj düzeneği kullanarak aynı özelliklere sahip yoğurulmuş özdeş konsolidasyon numuneleri üretmişlerdir. Benzer bir prosedür bu çalışmada da izlenmiş; farklı plastisite özelliğine sahip ince taneli zemin numuneleri, likit limitleri doğrultusunda belirlenen su içerikleri ile homojen şekilde karıştırılmıştır. Deneyde kullanılacak zeminler, belirlenen likit limit su içeriklerinde homojen bir şekilde karıştırılmış ve santrifüj kefelerine yaklaşık 100 gram olacak şekilde doldurularak tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan özdeş kefeler, her biri Şekil 4.12'de gösterildiği gibi santrifüj cihazına yerleştirilir. Bu kefelerin içerisinde, Şekil 4.13'de gösterilen deney düzeneği yer almaktadır. Düzeneği oluşturan bileşenler; alt filtre kâğıdı, üst poroz taş, sürşarj plakası ile birlikte geleneksel ve santrifüj konsolidasyon deneylerinde kullanılan, 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde konsolidasyon ringlerinden oluşmaktadır. Yoğrulmuş zemin numunesi hazırlamak için kullanılan santrifüj cihazının çalışma prensibine ait şematik detaylar Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Bu düzeneğin dakikadaki devir sayısı maksimum 3000 RPM'ye ulaşabilmektedir (Balcı, 2015).

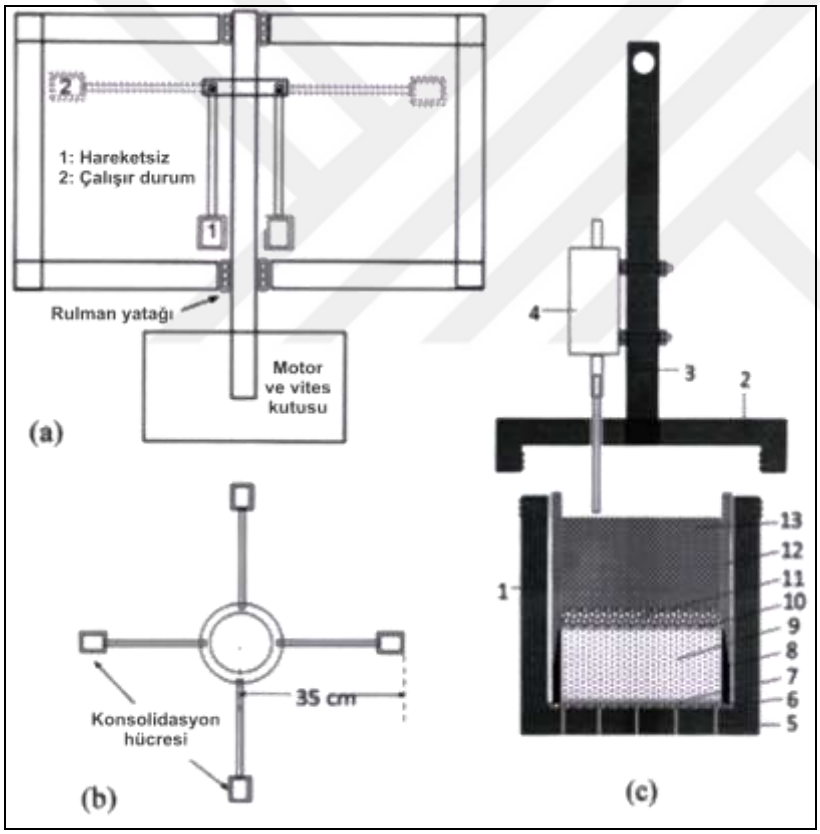


Şekil 4.12. Santrifüj cihazı hücreleri

Santrifüj cihazında kullanılan özel olarak tasarlanmış hücreler Şekil 4.13'de gösterildiği gibi metal tül (1), geçirimli filtre kâğıdı (2), konsolidasyon ringi (3), ring sabitleyici (4), filtre (5), poroz taş (6), yükleme plakası (7) olmak üzere yedi parçadan oluşmaktadır.



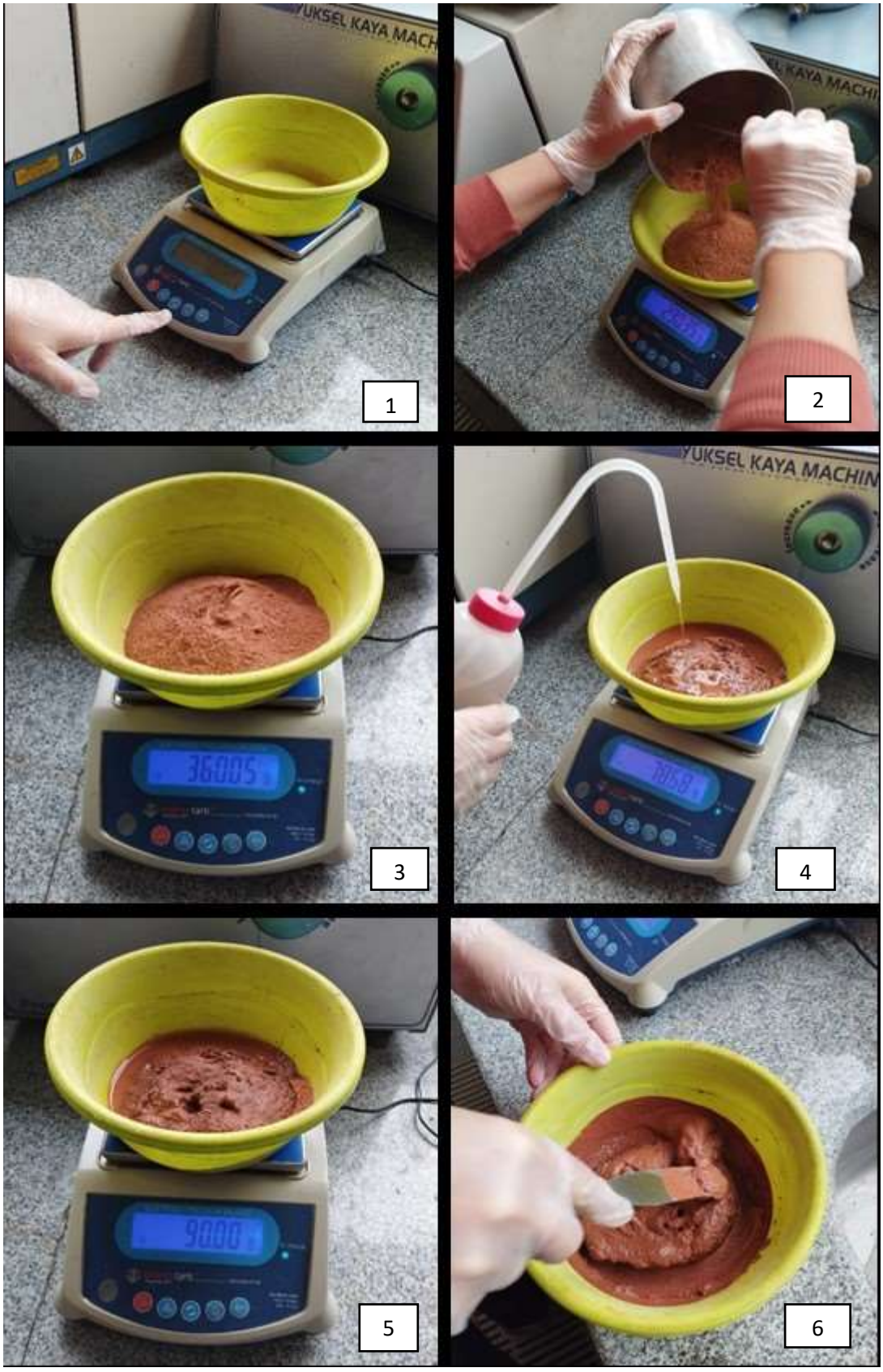

Şekil 4.13. Santrifüj cihazı için özel olarak tasarlanmış hücrelerin farklı parçaları (Asadi, 2017)




Şekil 4.14. Santrifüj cihazı ayrıntıları: (a) Düzeneğin şematik kesiti, (b) Konsolidasyon hücrelerinin plan görünümü, (c) Konsolidasyon hücresi detayları 1: Hazne, 2: Başlık, 3: Santrifüj kolu, 4: Gösterge, 5: Drenaj delikleri, 6: Ekran, 7: Filtre kâğıdı, 8: Konsolidasyon ringi, 9: Zemin örneği, 10: Filtre kâğıdı, 11: Poroz taş, 12: Sürşarj ortalayıcı, 13: Sürşarj (Balcı, 2015)

Santrifüj cihazına yerleştirilecek karışım, Şekil 4.15'te görüldüğü üzere öncelikle kabın darası alınarak hazırlanmakta, ardından belirli miktarda zemin numunesi eklenerek tartım işlemi gerçekleştirilmekte ve uygun miktarda su ilavesiyle dört santrifüj kefesine yetecek

miktarda karışım hazırlanarak, zemin homojen bir kıvama ulaşıncaya kadar karıştırılmaktadır. Sonrasında, Şekil 4.16'da gösterilen deney hücresinin iç çapına uygun şekilde kesilmiş metal tül, geçirimli filtre kâğıdı işlevi gören bez parçası, konsolidasyon deneyinde de kullanılan 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğindeki konsolidasyon halkası (ring) ile bu halkayı sabitleyen parça, santrifüj düzeneğinde yer alan hücrelerin (kefelerin) içerisine önceden belirtildiği şekilde yerleştirilmiştir. Terazide darası alınarak hazırlanmış zemin karışımı, her bir kefeye 100 gram olacak şekilde aktarılmıştır. Yerleştirme işlemi sonrasında hücreler sert bir yüzeye hafifçe vurularak zemin içinde hava boşluğu kalmamasına özen gösterilmiştir. Son olarak, sırasıyla filtre elemanı, poroz taş ve yükleme plakası yerleştirilerek hazırlık tamamlanmıştır.




Şekil 4.15. Santrifüj cihazı için numunelerinin hazırlanma aşamaları (LL=45 için)




Şekil 4.16. Santrifüj cihazı numune hücrelerinin hazırlanma aşamaları (LL=45 için)

Santrifüj cihazı için Şekil 4.17‘de gösterilen kontrol panelinde, RPM (dakika başına devir) ayarlaması yapılmıştır. Uygun RPM değeri elde edildiğinde kontrol panosu üzerinde bulunan “run” tuşuna basılarak deney, cihaz standartlarında başlatılmıştır.




Şekil 4.17. Santrifüj düzeneğinin kontrol panosu

6 saatlik sürenin sonunda santrifüj durdurulmuş ve numune üzeri bir şerit cetvel yardımı ile tıraşlandıktan sonra (Şekil 4.18 (a)) konsolidasyon deneyine kadar desikatörde bekletilmiştir (Şekil 4.18 (b)).



a) b)

Şekil 4.18. Santrifüjden çıkan numunenin desikatördeki görünümü (LL=45 için)

Hazırlanan bu sistem, 200, 300, 400, 500, 600 ve 800 RPM (Revolutions Per Minute – Dakika Başına Devir) dönme hızlarında, toplam 6 saat süreyle çalıştırılmıştır. Bu işlem süresince zemin numunelerinin homojen yapısı korunmuştur. Sürenin sonunda santrifüj durdurularak kefeler cihazdan çıkarılıp, konsolidasyon ringleri dikkatlice dışarı alınmıştır.

Deneylerde kullanılan zemin numuneleri ve dönüş hızları belirlenirken, zeminlerin akışkanlık ya da katılık durumu dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, dönüş hızlarının değerlerine karar verilmiştir. Özellikle 200 RPM hızında yapılan santrifüj işlemi sonucunda elde edilen numuneler çok akıcı olmuş ve konsolidasyon deneylerinde oturmalar fazla gerçekleştiğinden, bu sonuçların güvenilir olmadığı tespit edilmiştir. Öte yandan, 800 RPM hızında elde edilen numuneler ise çok katı yapıda olduğundan konsolidasyon testlerinde oturmalar düşük çıkmış ve sağlıklı deformasyon ölçümleri yapılamamıştır. Sonuç olarak, 200 RPM ve 800 RPM hızlarında hazırlanan numunelerde yaşanan bu sorunlar nedeniyle, çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu dönüş hızlarının kullanılmamasına karar verilmiştir. Elde edilen deneyimlere dayanarak, diğer numunelerin hazırlanmasında santrifüj cihazında 300, 400, 500 ve 600 RPM hızlarının ideal olduğu belirlenmiştir.

Her bir dönüş hızı (300, 400, 500 ve 600 RPM) için, üç farklı likit limit değerine sahip (LL=37, 45, 53) zemin grubunun her birinden 8 adet özdeş numune üretilmiştir. Böylece her zemin grubu için toplam 32, genel toplamda ise 96 adet yoğurulmuş numune hazırlanmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Likit limit ve RPM değerleri belirlenmiş veri setleri

| LL | RPM | Numune Adedi | Toplam Veri Seti |
|---|---|---|---|
| 37 | 300 | 8 | 32 |
| | 400 | 8 | |
| | 500 | 8 | |
| | 600 | 8 | |
| 45 | 300 | 8 | 32 |
| | 400 | 8 | |
| | 500 | 8 | |
| | 600 | 8 | |
| 53 | 300 | 8 | 32 |
| | 400 | 8 | |
| | 500 | 8 | |
| | 600 | 8 | |
| | | | 96 |

### 4.2.3. Konsolidasyon testlerinin gerçekleştirilmesi

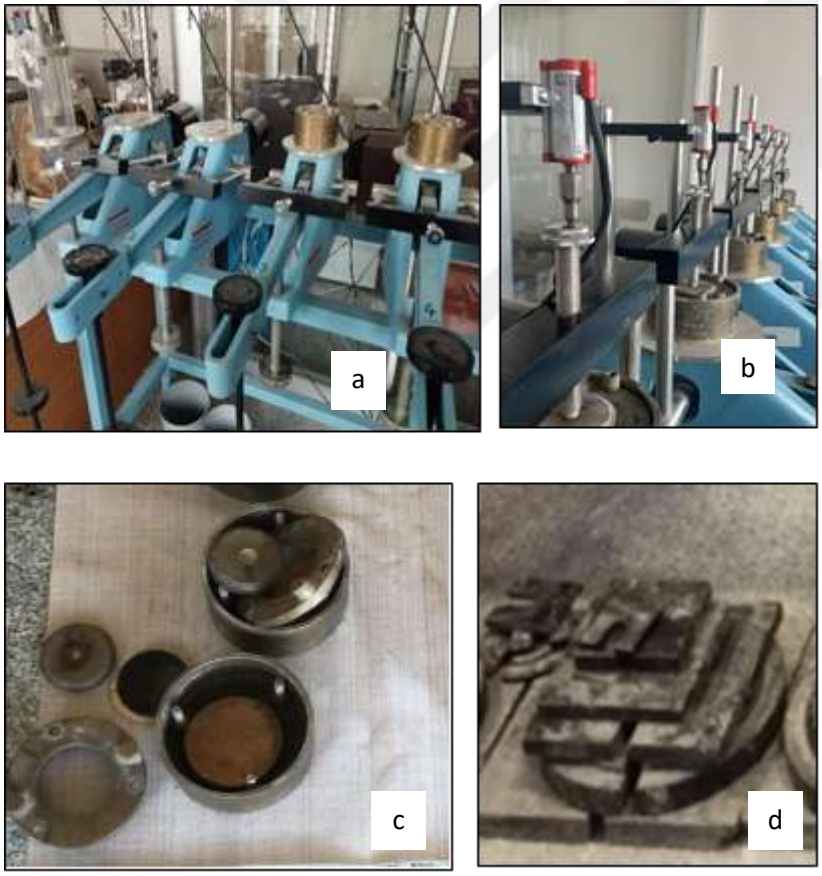
Düşey olarak yüklenen zemin katmanlarının sıkışmalarını laboratuvar ortamında bir boyutlu olarak temsil etmek için ödometre (konsolidasyon testi) adı verilen cihaz kullanılmaktadır ASTM, (2004). Bu cihaz, deformasyon ölçer, konsolidasyon hücresi, hücre içi elemanları, yükleme cihazı ve yükleme plakaları gibi ana parçalardan oluşmaktadır (Şekil 4.19). Taylor, (1948) tarafından geliştirilen ve zemin mekaniği deneylerinde geleneksel yöntem olarak kabul edilen ödometre yönteminin temelinde tek boyutlu (1-D) konsolidasyon teorisi bulunmaktadır. Deformasyon ölçerler, deney süresince ring içerisindeki numunede meydana gelen şişme ve sıkışma miktarını ölçebilen mekanik veya elektronik cihazlardır. Bu çalışmada 0,001 mm hassasiyete sahip elektronik deformasyon ölçerler ve bunlara bağlı veri toplama üniteleri kullanılmıştır. Konsolidasyon hücresi, içerisindeki suyu kenarlardan sızdırmayan ve yükleme sonucu oluşabilecek gerilmelere dayanabilen, konsolidasyon ringindeki numunenin alt ve üst kısmına yerleştirilen gözenekli disklerle birlikte kullanılan, paslanmaz çelik veya rijit pirinçten imal edilmiş hücrelerdir.

Şekil 4.19 (c)'de gösterilen hücre içi elemanları poroz taşlar, filtre kağıtları, konsolidasyon ringi ve ring sabitleyicilerden oluşmaktadır. Poroz taşlar konsolidasyon sırasında drenaja izin veren zemin numunesinin altında ve üstünde yer alan zımpara taşından yapılmış 3 mm kalınlığındaki geçirimli elemanlardır. Deney sırasında zemin numunesinin serbestçe sıkışmasını sağlamak amacıyla, konsolidasyon halkasının iç çapından 0,5 mm daha küçük olurlar. Filtre kağıtları, konsolidasyon ringi içerisindeki killi numunelerin poroz taşların gözeneklerini doldurmaması için poroz taşlarla numune arasına yerleştirilirler. Konsolidasyon ringleri rijit pirinç ya da paslanmaz çelikten yapılan, çeşitli çap ve yükseklikteki uç kısımlarının et kalınlığı bütününe göre daha ince olan elemanlardır. Bu çalışmada 20 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapındaki konsolidasyon ringleri kullanılmıştır. Ring sabitleyiciler ise yükleme sırasında hücre içerisindeki numunenin hareket etmesini engelleyerek, uygulanan gerilmenin düşeyliğini ve numunenin yüzey alanına doğru bir biçimde etki etmesini sağlarlar. Hücre içerisine vidalarla sabitlenirler.

Yükleme cihazı konsolidasyon hücresinin ve deformasyon saatlerinin üzerine yerleştirilebileceği rijit bir tablası olan, ring içerisindeki numuneye istenilen düşey yükleri uygulamaya yarayan cihazdır. Bu cihaz, ring içerisindeki numunenin sıkışmasını sağlayan

bir yükleme koluna sahiptir. Bu kollar genel olarak üzerine yerleştirilen yükün 10 katını hücre içerisindeki numuneye aktaracak bir moment prensibine göre çalışır. Farklı standartlara göre farklı moment etkisi (1:9, 1:10, 1:11) oluşturan, 100 kg'a kadar dayanabilen yükleme kolları genellikle rijit demirden imal edilirler. Numuneye uygulanacak düşey yüklerin istenilen basıncı en az %0,5 doğrulukla oluşturması gerekmektedir.

Yükleme plakaları, konsolidasyon hücresi içerisindeki numuneye istenilen düşey gerilmeyi uygulamak amacıyla yükleme kolu üzerine yerleştirilen ve ağırlıkları değişebilen elemanlardır (Balcı, 2015).




Şekil 4.19. Konsolidasyon cihazı: a. Cihazın genel görünümü, b. Elektronik deformasyon ölçer, c. Hücre içi elemanları, d. Yükleme plakaları

Yoğurulmuş numuneler üzerinde ASTM, (2004) standardına uygun olarak gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinde zemin numunesine yük uygulamak için kullanılan pistonlar, genellikle farklı uzunluklardaki kollarla birbirine bağlanır. Bu kollara uygulanan kuvvetler, numune üzerinde farklı büyüklüklerde momentler oluşturur. 1:10 moment etkisi demek

numuneye aktarılan yükün 10 kat arttırılarak etki ettiği manasına gelen yükleme kollarına sahip yükleme cihazı kullanılmıştır. Deneylere başlanmadan önce cihaz kalibre edilerek uygulanan yükün oluşturduğu gerilme değerleri ölçülmüştür.

Bu çalışmada geleneksel konsolidasyon deneyi ile tezin amacını oluşturan ve günlük konsolidasyon deneyi olarak adlandıracağımız yoğurulmuş özdeş numuneler için konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır.

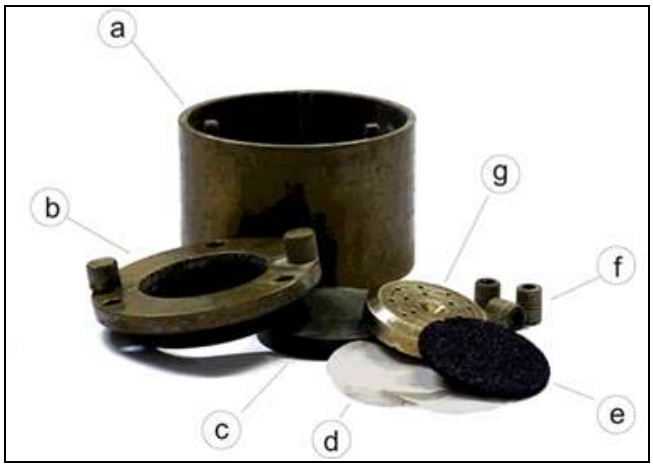
### 4.2.4. Geleneksel konsolidasyon deneyi

Santrifüj cihazında hazırlanmış numuneler, desikatörden çıkarıldıktan sonra konsolidasyon hücresine yerleştirilmeden önce, konsolidasyon halkaları ile birlikte ıslak ağırlıkları tartılmıştır (Şekil 4.20).



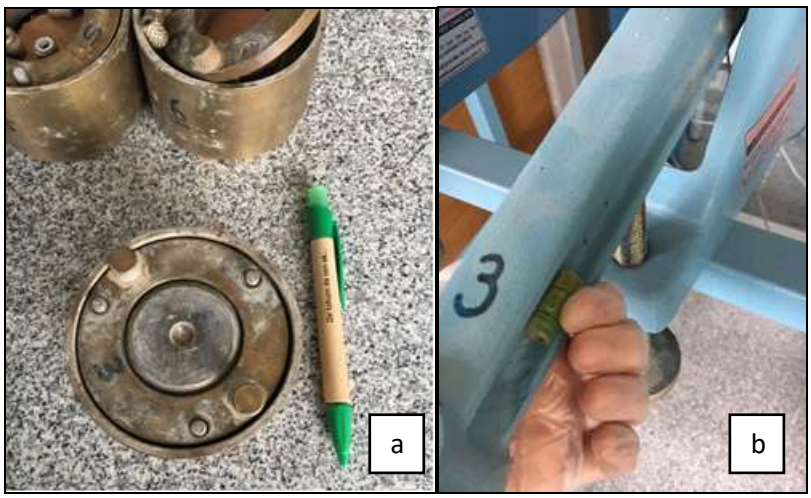
Şekil 4.20. Zemin numunesinin tartılması (LL=45 için)

Konsolidasyon hücresi ve içine yerleştirilen ekipman Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Yükleme başlığının merkezleyici içinde serbestçe hareket etmesine dikkat edilmiştir.




Şekil 4.21. Konsolidasyon hücresi ve içerisinde yerleşen farklı ekipmanların görüntüleri a: Konsolidasyon hücresi, b: Merkezleyici, c: Alt poroz taş, d: Filtre kâğıdı, e: Üst poroz taş, f: Cıvatalar, g: Yükleme başlığı olarak isimlendirilmektedir (Asadi, 2017)

Konsolidasyon hücresinde alt poroz taş (büyük poroz taş), filtre kâğıdı, zemin numunesini içeren konsolidasyon halkası, filtre kâğıdı, üst poroz taş (küçük poroz taş) ve yükleme başlığı ortalanmış bir şekilde yerleştirildikten sonra merkezleyici yerine yerleştirilmiştir. Yükleme kolu üzerinde bulunan ayar vidası ile yükleme kolu yatay konuma getirilmiştir. Daha sonra konsolidasyon hücresi konsolidasyon test cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23). Aynı zamanda, gerinim ölçer (deformasyonun ölçülmesi için) de bu ayar vidasına yerleştirilmiştir. Zemin numunesinin ilk okuması, gerinim ölçere bağlı veri toplayıcıdan kaydedilmiştir.




Şekil 4.22. Konsolidasyon deney aletine ait: a. konsolidasyon hücresi, b. Konsolidasyon aleti kolunun yatay ayar terazisi



Şekil 4.23. Konsolidasyon hücrelerinin ödometre cihazına yerleştirilmesi

Numuneye yük uygulamadan önce veri toplayıcı, Şekil 4.24'de gösterilen cihaz bilgisayara bağlanmıştır. Ölçümlerde, Multi Data Logger (Çoklu veri kaydedici) yazılımı kullanılmıştır (Şekil 4.25).




Şekil 4.24. Veri toplayıcı cihaz



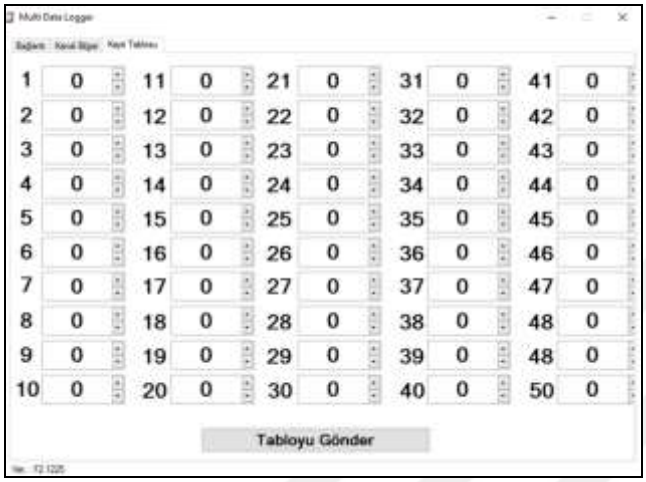

Şekil 4.25. Çoklu veri kaydedici yazılımının bağlantı arayüzünün görüntüsü

Bağlantı kurulduktan sonra kanal bilgileri arayüzüne erişilmiştir (Şekil 4.26). Burada farklı kanallar için kayıt başlatma ve kaydetme komutları ile mevcut 12 kanal görülmektedir. Çalışmaların yürütüleceği ve daha önce bahsedilmiş olan zemin mekaniği laboratuvarında 12 adet ödometre cihazı bulunmaktadır. Her konsolidasyon cihazında bulunan gerinim ölçer için bir kanal bulunmaktadır.




Şekil 4.26. Çoklu veri kaydedici yazılımının kanal bilgileri arayüzü

Çoklu veri kaydedici yazılımının son arayüzü kayıt tablosunu içermektedir (Şekil 4.27). Kayda başlamadan önce veri toplayıcıdaki önceki kayıtlar silinmiştir. Çizelge 4.3'de kayıt tablosu arayüzünden alınmış olan deney boyunca hangi zaman aralıklarında kayıt yapılacağını gösteren çizelgedir. Bu çizelgede gösterilen çoklu veri kaydedici numaralarına karşılık gelen zaman dilimi 1'den 27'ye kadar gösterilmiştir.




Şekil 4.27. Çoklu veri kaydedici yazılımının kayıt tablosu arayüzü

Çizelge 4.3. Kayıt tablosu arayüzünden alınmış örnek zamanlar görülmektedir

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zaman (s) | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 180 |
| No. | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Zaman (s) | 240 | 480 | 900 | 1200 | 1500 | 1800 | 2700 | 5400 | 10800 |
| No. | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| Zaman (s) | 14400 | 18000 | 21600 | 28800 | 36000 | 43200 | 57600 | 72000 | 86400 |

Yüklemeye başlamadan önce her numuneye ait kanaldan alınan ilk okuma, hazırlanan forma kaydedilmiştir. Yükleme işlemi, yükleme kolu üzerine farklı ağırlıklarda yükleme plakaları yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Yükleme plakaları, konsolidasyon hücresindeki numuneye istenilen düşey gerilmeyi uygulamak amacıyla yükleme kolu üzerine yerleştirilen elemanlardır. Teste başlamadan önce doğrulukları kontrol edilmiştir.

Her bir numuneye yük uygulandıktan hemen sonra multi data logger yazılımının kanal bilgileri arayüzünde o numuneye ait kanal numarası seçilmiş ve deformasyonlar daha önce belirlenen kanal numaralarında kaydedilmeye başlanmıştır.

Yükleme başladıktan 24 saat sonra yüklemenin ikinci aşamasına geçilmiştir. İkinci aşama başlamadan önce her bir numune için okunan değerler hazırlanan forma kaydedilmiştir. Zamana bağlı deformasyon verileri bilgisayar ortamında ve multi data logger yazılımının kanal bilgileri arayüzü üzerinden kaydedilmiştir. Kanal bilgileri arayüzünde her numunenin kanal numarası seçilip kayıt butonuna basılmış ve önceden tanımlanmış zamanlarda deformasyonlar kaydedilmiştir.

Bu çalışmada yüklemeler sırasıyla 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 4 kg, 7 kg, 10 kg olarak uygulanmıştır. Yüklemenin ikinci aşamasında mevcut yüke aynı miktarda yük eklenerek yük miktarı iki katına çıkarılmış ve önceki işlemler tekrarlanmıştır.

Test tamamlandıktan sonra, uygulanan yükler kaldırılmış ve numuneyi içeren konsolidasyon halkaları konsolidasyon hücresinden çıkarılmıştır. Konsolidasyon halkaları ile birlikte numune 24 saat boyunca 105˚C'deki etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkan numunelerin kuru ağırlıkları konsolidasyon halkaları ile birlikte tartılmış ve numune konsolidasyon halkalarından çıkarıldıktan sonra halkalar da tartılarak, yükseklikleri ve çapları ölçülmüştür.

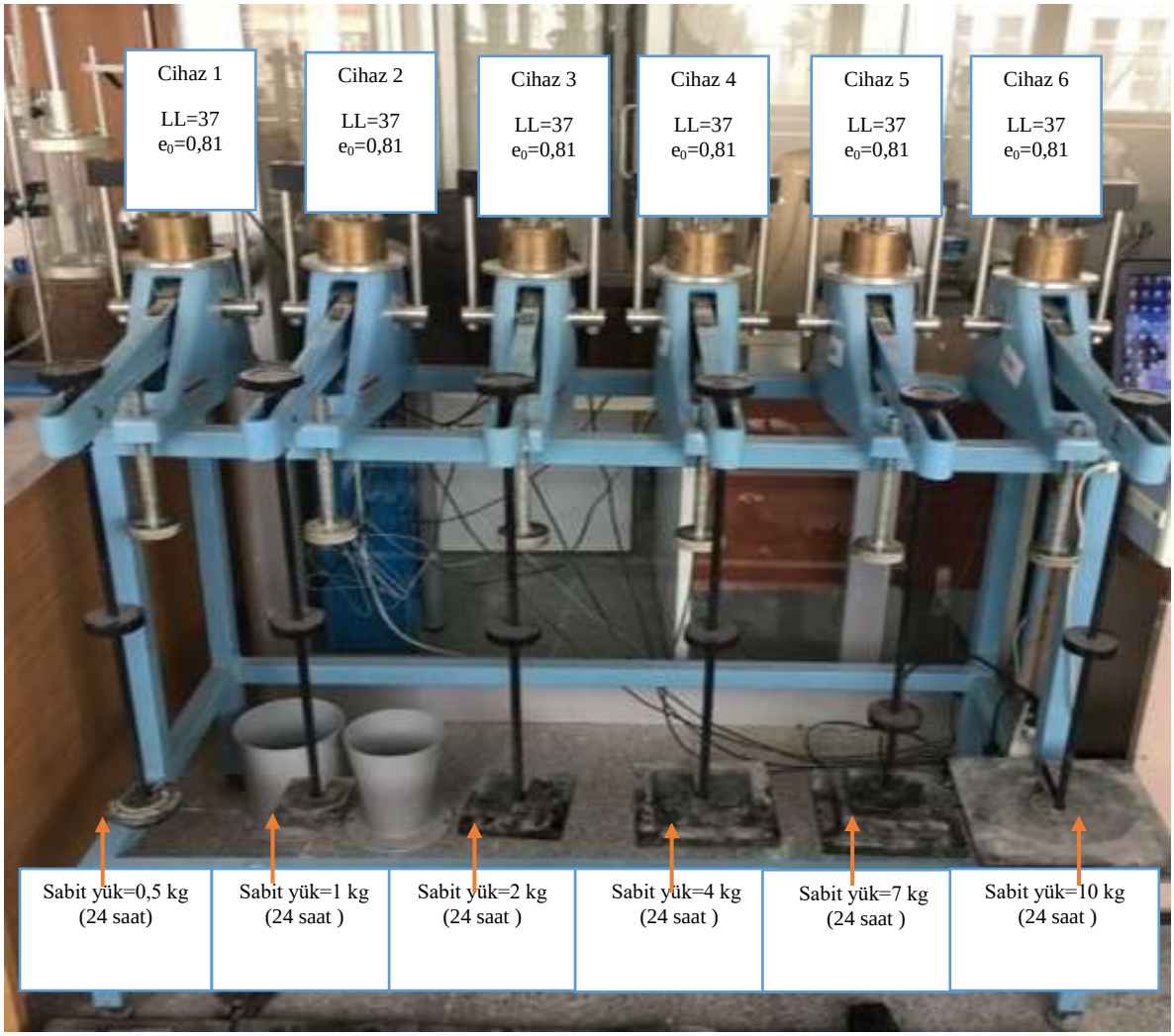
### 4.2.5. Yeni sunulan hipoteze dayalı günlük konsolidasyon deneyi

Araştırmanın temel amacı olan konsolidasyon deneyinin bir gün içerisinde tamamlanabilmesi için izlenen prosedür, yük senaryosu hariç olmak üzere, geleneksel konsolidasyon deneyi ile aynıdır. Bu çalışmada “Günlük” adı ile anılacak numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler, konsolidasyon hücresine yerleştirilmeden önce, konsolidasyon halkaları ile birlikte ıslak ağırlıkları tartılmıştır. Zemin numunesini içeren konsolidasyon halkası, konsolidasyon hücresine yerleştirilmiş; ardından yükleme kolu üzerindeki ayar terazisi yardımıyla yükleme kolu yatay konuma getirilmiştir. Konsolidasyon hücresi, ödometre düzeneğine yerleştirilmiş ve bir başka ayar vidası ile sabitlenerek hücrenin hareket etmesi engellenmiştir. Aynı ayar vidası üzerine deformasyon ölçümünü gerçekleştiren gerinim ölçer (deformasyon ölçer) yerleştirilmiştir.

Kayda başlamadan önce veri toplama ünitesindeki önceki kayıtlar silinmiş, numunede su kaybı yaşanmaması için gerekli önlemler alınmıştır. Bilgisayar ortamında tek kanal ayarlanmış ve yükleme kolu üzerindeki vida açılarak yükleme başlatılmıştır. Ardından bilgisayarda veri kaydı başlatılmıştır. Bu adımlar, diğer tüm numuneler için de aynı şekilde uygulanmıştır.

Uzun süreli geleneksel konsolidasyon deneyi ile bu çalışmada uygulanan yöntem arasındaki temel fark; zemin numunesine uygulanacak yüklerin her birinin, ayrı ödometre düzeneklerinde gerçekleştirilmesidir. Geleneksel yöntemde olduğu gibi tek bir numune üzerine kademeli olarak yük artırımı yapılmamış, bunun yerine aynı özelliklere sahip numuneler (özdeş), farklı ödometre düzeneklerine yerleştirilmiş ve her birine yalnızca tek bir yük uygulanmıştır.

Yani, her ödometre düzeneğinde yalnızca bir yük seviyesi uygulanmış (Şekil 4.28) ve bu sayede farklı yükleme durumlarının aynı anda karşılaştırılması mümkün hâle gelmiştir. Testlerin başlangıcından 24 saat sonra yükleme sonlandırılmış, konsolidasyon halkaları içerisindeki numuneler ödometre hücrelerinden çıkarılmıştır. Ardından, numuneler halkaları ile birlikte 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, halkalar içerisindeki zemin numuneleri ile birlikte tartılmış; daha sonra numuneler halkalardan dikkatlice çıkarılarak halkaların boş kütleleri ölçülmüş ve numunelere ait nihai yükseklik ve çap ölçümleri yapılmıştır.




Şekil 4.28. Günlük konsolidasyon testi yükleme örneği (LL= 37, RPM=300 için)

# 5. DENEY SONUÇLARI VE HESAPLAMALARI

Deneyler sırasında deformasyonlar ve oturma miktarları günlük kaydedilmiştir. Tek tip numune için bulunması istenen düşey deformasyonlar ve oturma miktarları hesaplanmıştır. Şekil 3.4'te gösterilen boşluk oranı–logaritmik efektif konsolidasyon basıncı grafiğinden, her numuneye ait bir adet boşluk oranı (e)–efektif gerilme (σ') eğrisi elde edilmiştir. Grafiklerde gözlemlenen genel davranışa göre, uygulanan yükle birlikte zemindeki boşluk suyunun dışarı atılması sonucu efektif gerilme artmakta ve bu artış, boşluk oranının azalmasına neden olmaktadır. Hesaplamalar sırasında kullanılan bazı eşitlikler (Eşitlik 5.1-Eşitlik 5.7) sunulmuştur.

Kuru numune yüksekliği (cm), $$h_s = M_s/(\rho_s A)$$ (5.1)

Boşluk oranı, $$e_0 = (h_0 - h_s)/h_s$$ (5.2)

Doğal birim hacim ağırlığı (kN/m$^3$) $$\gamma_n = M_t/V_t$$ (5.3)

Su içeriği (%), $$w = M_w/M_s$$ (5.4)

Doygunluk derecesi (%), $$S = (\rho_s w)/e_0$$ (5.5)

Sıkışma katsayısı (m$^2$/kN), $$a_v = \Delta e/\Delta\sigma'$$ (5.6)

Hacimsel sıkışma katsayısı (m$^2$/kN), $$m_v = a_v/(1 + e_0)$$ (5.7)

Yukarıdaki eşitliklerde; $M_s$: kuru numune kütlesi, $\rho_s$: katı partikül yoğunluğu, $h_o$: numune ilk yüksekliği, $h_s$: kuru numune yüksekliği, $M_w$: su kütlesi ve $\Delta\sigma'$: efektif gerilme farkıdır.

Likit limit değeri 37 olan, 500 RPM devir ile döndürülmüş numuneye uygulanmış geleneksel teste tabi tutulmuş olan numune için örnek hesap adımları:

$$h_s = \frac{M_s}{(\rho_s A)} = \frac{63,43}{(2,7x19,63)} = 1,19 \text{ cm} \quad (5.8)$$

$$e_0 = \frac{h_0 - h_s}{h_s} = \frac{2 - 1,19}{1,19} = 0,68 \quad (5.9)$$

$$\gamma_n = \frac{M_t}{V_t} = \frac{79,65x9,806}{39,26} = 19,89 \text{ kN/m}^3 \quad (5.10)$$

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{16,22}{63,43} x100 = 25,57(\%) \quad (5.11)$$

$$S = \frac{(\rho_s w)}{e_0} = \frac{(2,7x0,2557)}{0,68} x100 = 100(\%) \quad (5.12)$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = \frac{0,0033}{25} = 1,32E-04 \ {}^{m^2}/_{kN} \quad (5.13)$$

$$m_v = \frac{a_v}{(1 + e_0)} = \frac{0,0000132}{(1 + 0,68)} = 7,85E-05 \ {}^{m^2}/_{kN} \quad (5.14)$$

Likit limit değeri 37 olan numunelerde doğal birim hacim ağırlığı 19 ile 20 kN/m³, likit limit değeri 45 olan numunelerde 18 ile 20 kN/m³, likit limit değeri 53 olan numunelerde ise 17 ile 19 kN/m³ arasında değişkenlik göstermektedir. Her iki deney yönteminde de numunelerin özdeş özelliklere sahip olması nedeniyle benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Belirlenen likit limit (LL) değerleri ve dönme hızları doğrultusunda elde edilen numuneler, sistematik bir şekilde adlandırılmıştır. Bu kapsamda; “L37”, “L45” ve “L53” ifadeleri sırasıyla 37, 45 ve 53 olarak belirlenen likit limit değerlerini temsil etmektedir. 300, 400, 500 ve 600 sayıları numunelerin hazırlandığı santrifüj dönme hızlarını (RPM) ifade ederken; “Y1”, “Y2”, “Y3”, “Y4”, “Y5” ve “Y6” ibareleri, “Yeni” yönteme göre gerçekleştirilen günlük testlerdeki numune sırasını göstermektedir. “C1” ise geleneksel (Conventional) konsolidasyon yöntemine göre hazırlanan numuneyi ifade etmektedir.

Örneğin, likit limit değeri 37 olan, 300 RPM hızında hazırlanmış ve yeni yönteme göre 0,5 kg ile test edilmiş numune “L37_300_Y1” şeklinde adlandırılmıştır.

Deney sonuçlarından elde edilen hesaplamalar, ilk boşluk oranlarının günlük ve geleneksel deneylerde numunelerin özdeş olması nedeniyle eşit olduğunu göstermektedir. Yeni yöntemle gerçekleştirilen günlük testlerde, her yükleme seviyesi için elde edilen son boşluk oranı ($e_s$) değerleri ayrı ayrı değerlendirilirken, geleneksel yöntemde bu değerler kademeli yüklemelere karşılık olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.1’de, likit limit değeri 37 olan numuneler için örneklendirilmiş numune adına göre sıralanmış ilk ve yükleme sonu boşluk oranları yer almaktadır.

Çizelge 5.1. LL=37 için her RPM değerine ait geliştirilmiş veri seti örneği

| LL | RPM | Yöntem | Numune | İlk boşluk oranı ($e_0$) | Yükleme (kg) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 7 | 10 |
| | | | | | Her yük için son boşluk oranı ($e_s$) | | | | | |
| 37 | 300 | Günlük | L37_300_Y1 | 0,81 | 0,79 | | | | | |
| | | | L37_300_Y2 | 0,81 | | 0,77 | | | | |
| | | | L37_300_Y3 | 0,81 | | | 0,76 | | | |
| | | | L37_300_Y4 | 0,81 | | | | 0,75 | | |
| | | | L37_300_Y5 | 0,81 | | | | | 0,75 | |
| | | | L37_300_Y6 | 0,81 | | | | | | 0,68 |
| | | Geleneksel | L37_300_C1 | 0,81 | 0,77 | 0,76 | 0,67 | 0,57 | 0,48 | 0,45 |
| 37 | 400 | Günlük | L37_400_Y1 | 0,72 | 0,72 | | | | | |
| | | | L37_400_Y2 | 0,72 | | 0,70 | | | | |
| | | | L37_400_Y3 | 0,72 | | | 0,70 | | | |
| | | | L37_400_Y4 | 0,72 | | | | 0,67 | | |
| | | | L37_400_Y5 | 0,72 | | | | | 0,62 | |
| | | | L37_400_Y6 | 0,72 | | | | | | 0,64 |
| | | Geleneksel | L37_400_C1 | 0,72 | 0,72 | 0,71 | 0,68 | 0,64 | 0,59 | 0,56 |
| 37 | 500 | Günlük | L37_500_Y1 | 0,68 | 0,65 | | | | | |
| | | | L37_500_Y2 | 0,68 | | 0,65 | | | | |
| | | | L37_500_Y3 | 0,68 | | | 0,63 | | | |
| | | | L37_500_Y4 | 0,68 | | | | 0,62 | | |
| | | | L37_500_Y5 | 0,68 | | | | | 0,60 | |
| | | | L37_500_Y6 | 0,68 | | | | | | 0,58 |
| | | Geleneksel | L37_500_C1 | 0,68 | 0,67 | 0,65 | 0,63 | 0,60 | 0,56 | 0,52 |
| 37 | 600 | Günlük | L37_600_Y1 | 0,63 | 0,58 | | | | | |

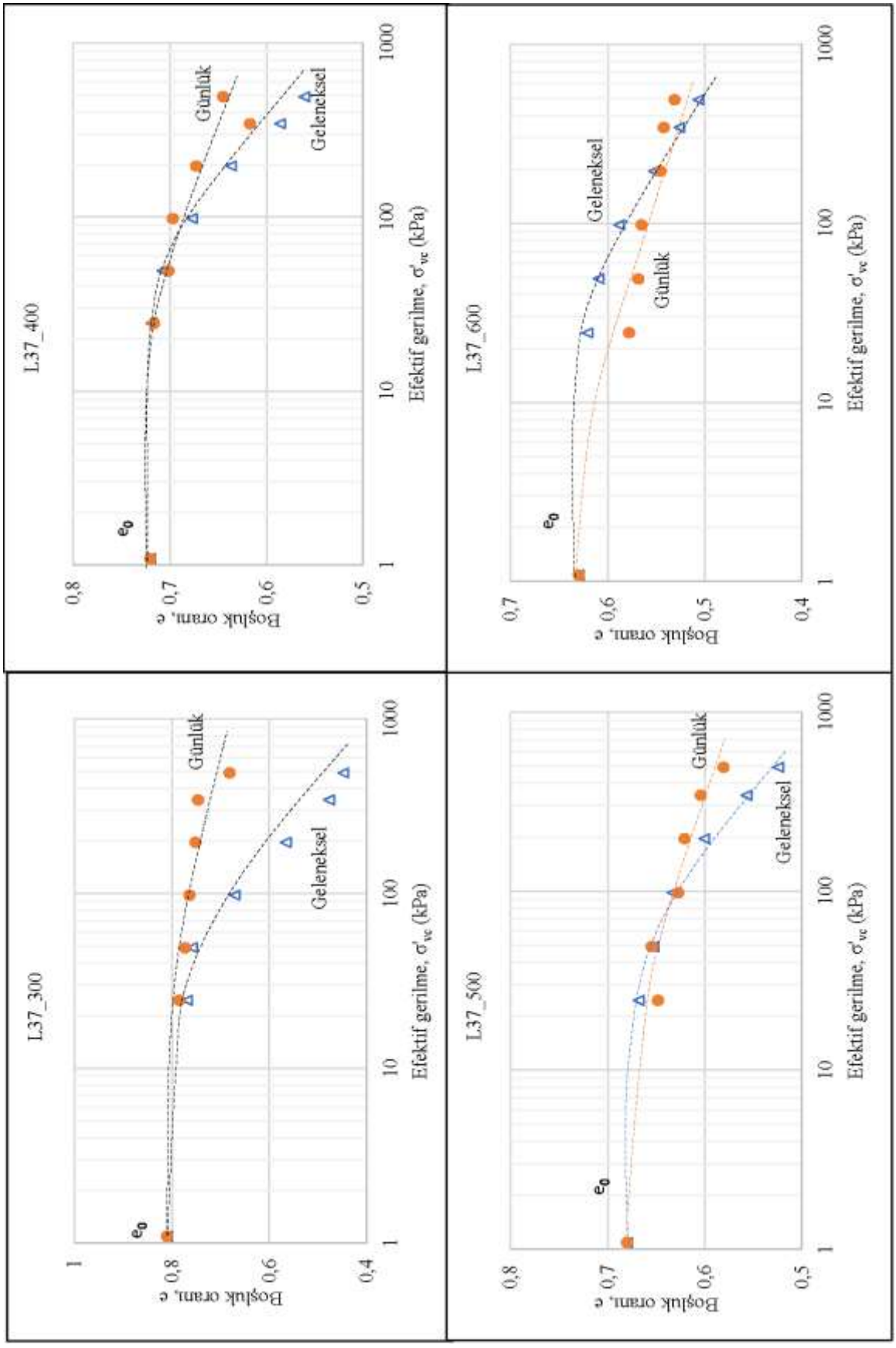
Çizelge 5.1. (devam) LL=37 için her RPM değerine ait geliştirilmiş veri seti örneği

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | L37_600_Y2 | 0,63 | | 0,57 | | | | |
| | | | L37_600_Y3 | 0,63 | | | 0,57 | | | |
| | | | L37_600_Y4 | 0,63 | | | | 0,55 | | |
| | | | L37_600_Y5 | 0,63 | | | | | 0,54 | |
| | | | L37_600_Y6 | 0,63 | | | | | | 0,53 |
| | | Geleneksel | L37_600_C1 | 0,63 | 0,62 | 0,61 | 0,59 | 0,55 | 0,53 | 0,51 |

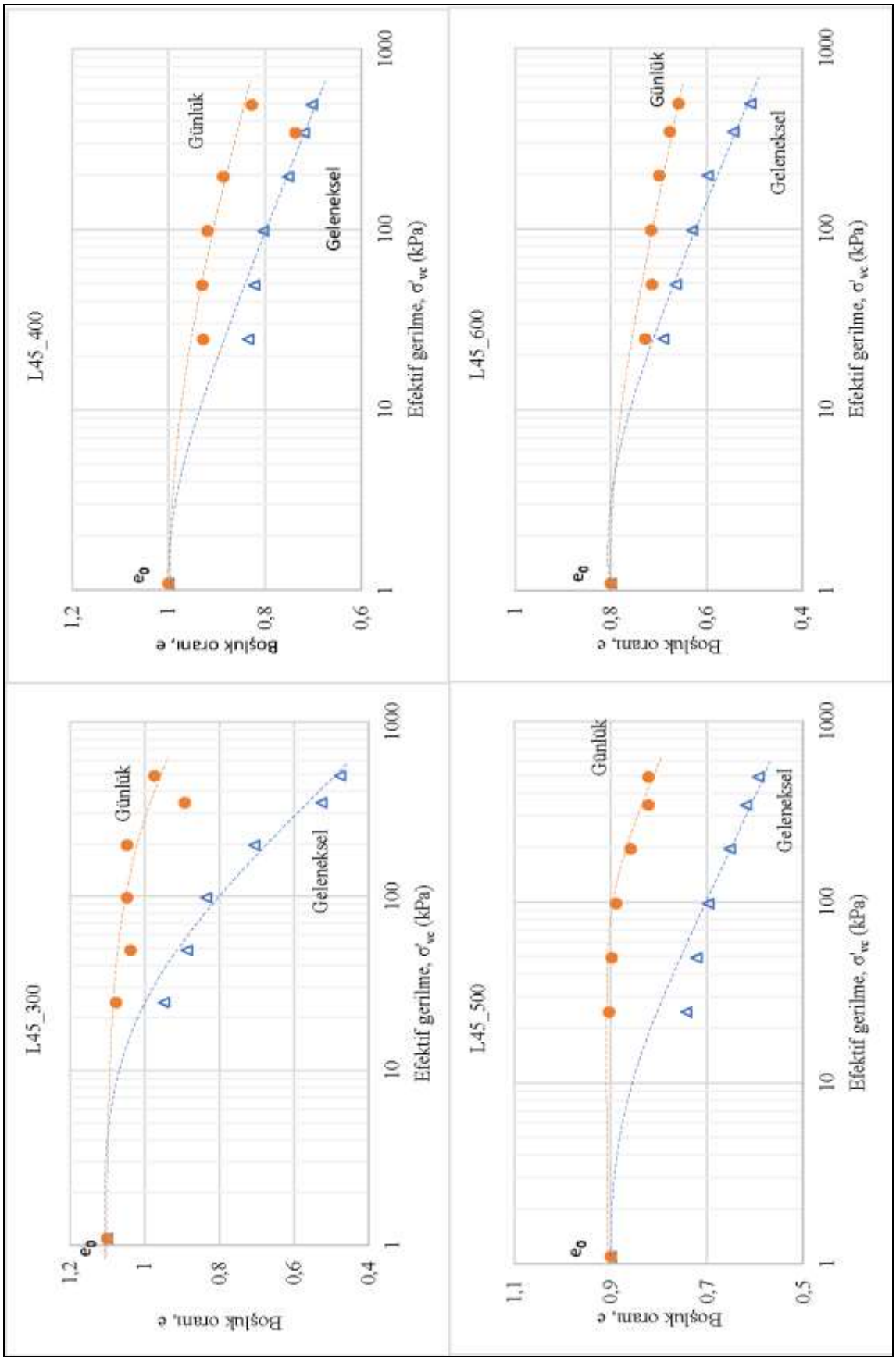
Farklı likit limit (LL: 37, 45, 53) değerlerine sahip zemin grupları için, her bir RPM değeri altında günlük ve geleneksel yöntemlerle elde edilen boşluk oranı–logaritmik efektif gerilme grafikleri karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de sunulmuştur. Geleneksel yöntemde boşluk oranı–efektif gerilme değişimi, tek bir numuneye sırasıyla kademeli artan yükler uygulanarak elde edilmiştir. Günlük yöntemde ise her bir yük seviyesi, özdeş altı farklı numuneye doğrudan uygulanmış ve bu şekilde boşluk oranı–efektif gerilme ilişkisi belirlenmiştir. Literatürde kabul görmüş konsolidasyon eğrileri çizildiğinde, iki yöntemin kıyaslanması bakımından, deneylerin başlangıç koşullarını daha net yansıtabilmesi amacıyla numunelerin ilk boşluk oranlarına ($e_0$) dair bilgi edinilebilmesi için, grafiklerde her numunenin $e_0$ değeri uygun bir gösterimle belirtilmiş ve eğilim çizgileri eklenerek davranışın daha sağlıklı yorumlanması sağlanmıştır.

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde, geleneksel yönteme ait eğrilerin daha belirgin bir konsolidasyon davranışı sergilediği, buna karşın günlük (yeni) yöntemle elde edilen eğrilerin daha yatay seyrederek daha sınırlı bir boşluk oranı değişimi gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, düşük RPM değerlerinde elde edilen numunelerin ilk boşluk oranlarının daha yüksek olması, numunelerin daha gevşek bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir. LL=37 iken RPM değeri arttıkça, günlük yöntemle elde edilen konsolidasyon eğrileri geleneksel yönteme daha fazla yaklaşmakta; diğer bir ifadeyle, düşük RPM'de eğriler arasındaki fark daha belirgin olurken, yüksek RPM değerlerinde bu fark azalmaktadır. Bu durumun temel nedeni olarak, santrifüjleme işlemi sırasında uygulanan yüksek RPM'nin, boşluk suyunun daha etkin bir şekilde dışarı atılmasını sağlaması ve böylece konsolidasyon sürecine daha fazla katkı yapması olduğu düşünülebilir. LL = 45 ve LL = 53 veri setleri için, geleneksel yönteme ait eğriler yine daha belirgin bir konsolidasyon davranışı sergilerken; günlük (yeni) yöntemle elde edilen

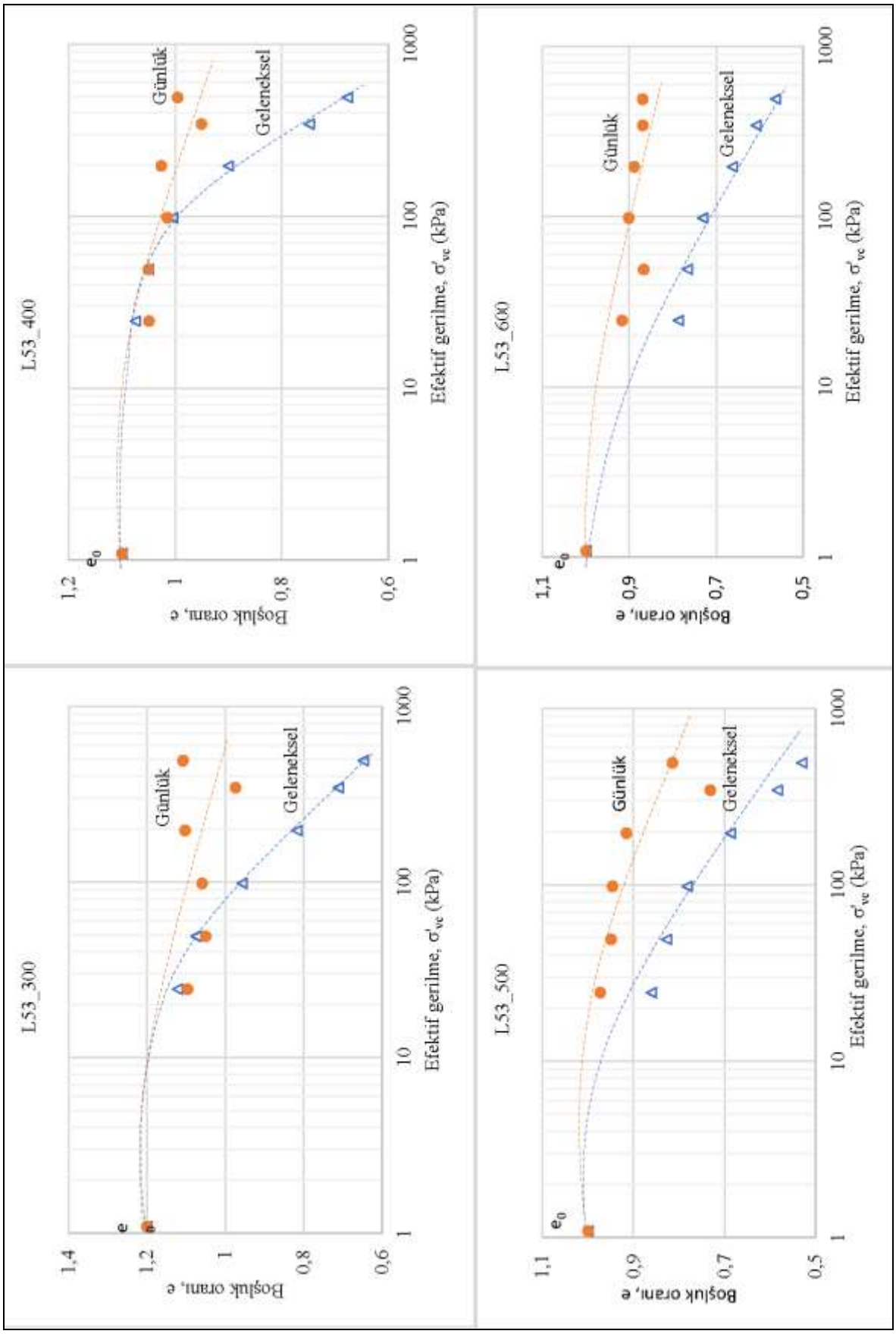
eğrilerin, özellikle yüksek RPM değerlerinde daha uyumlu olmakla birlikte, genel olarak yataya yakın bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Likit limit değeri arttıkça, günlük yöntemle elde edilen verilerde yüksek efektif gerilme seviyelerinde dalgalanmalar artmakta ve yöntemler arasındaki fark daha belirgin hâle gelmektedir.




Şekil 5.1. LL=37 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

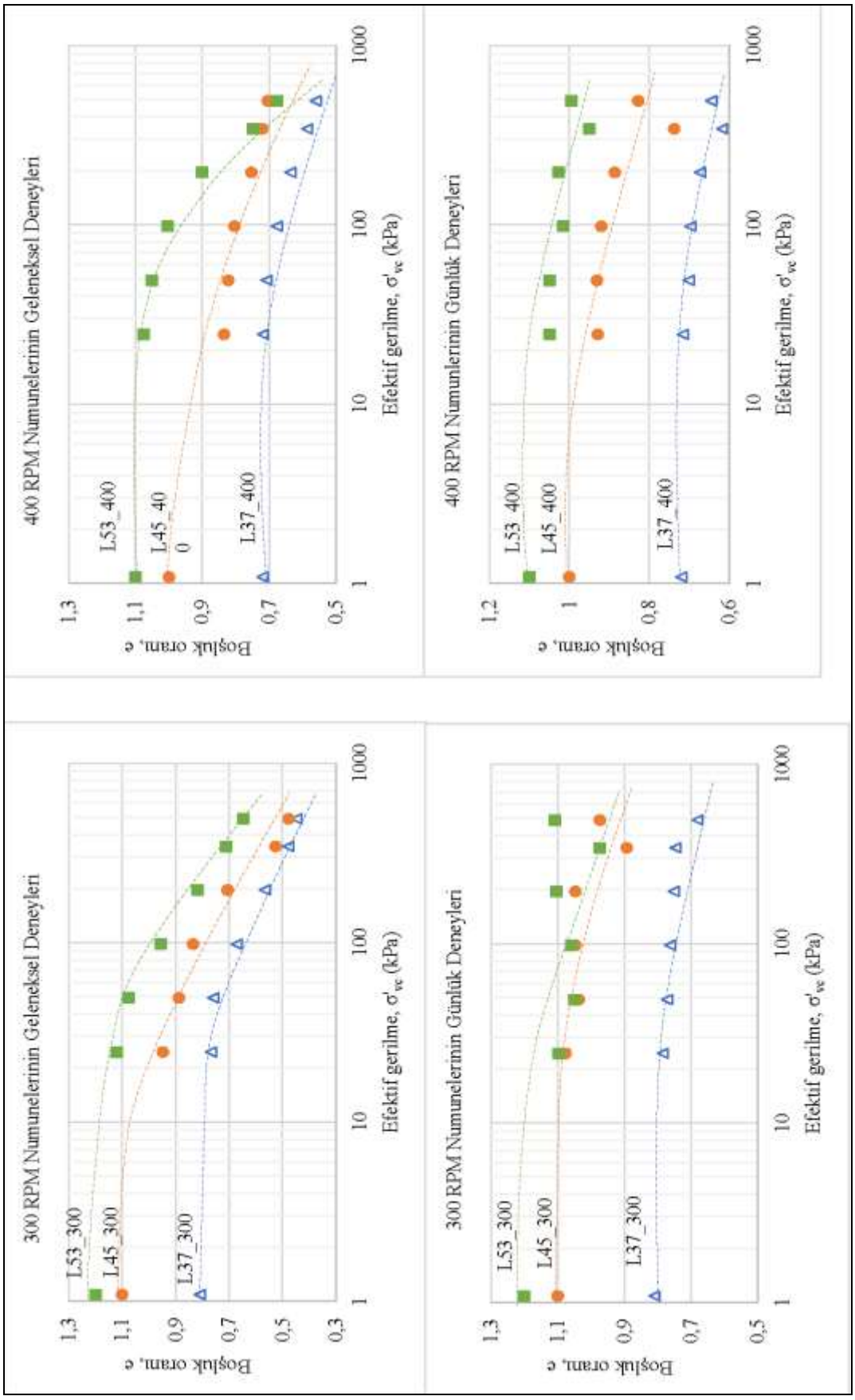



Şekil 5.2. LL=45 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

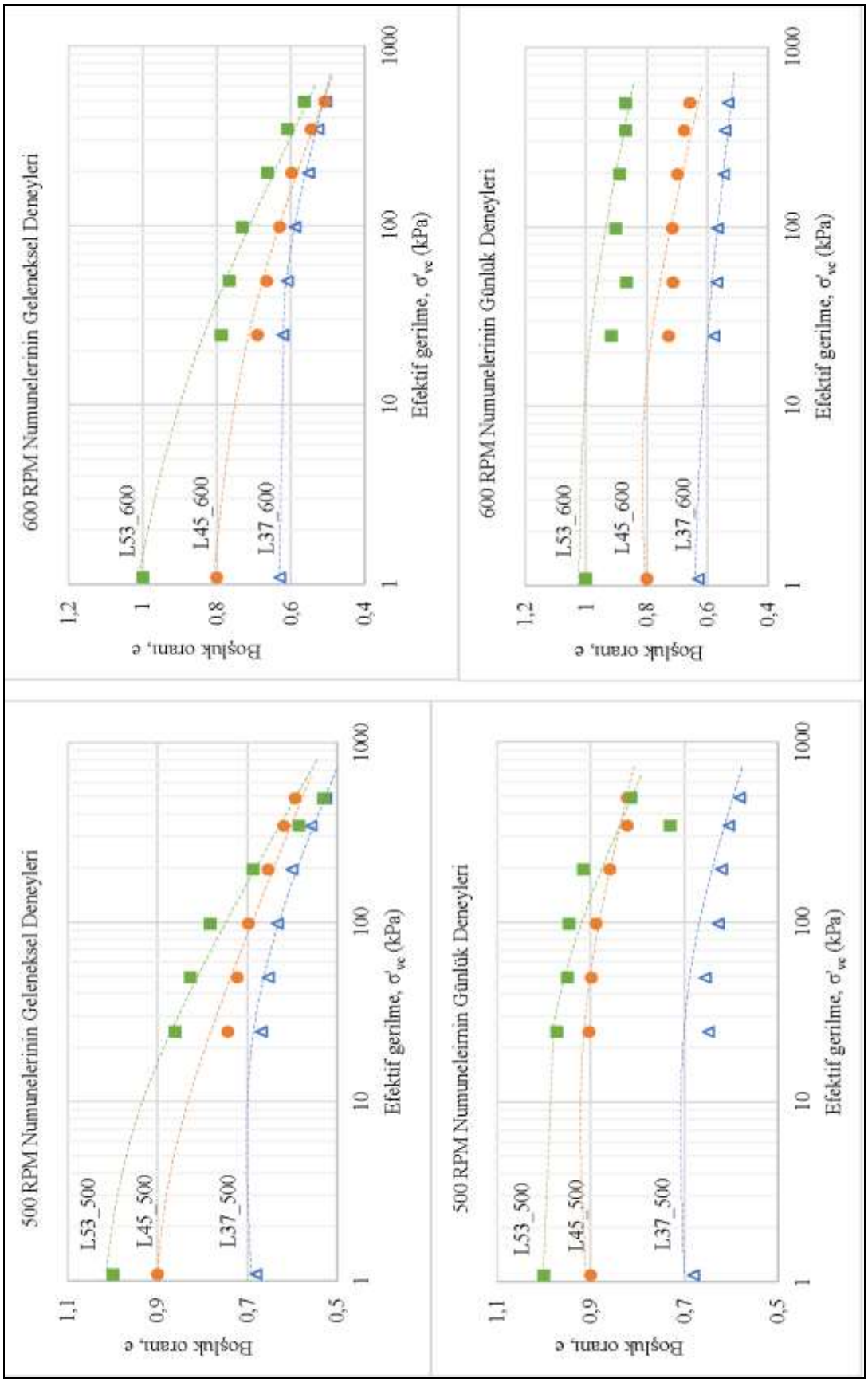



Şekil 5.3. LL=53 veri seti için, her RPM değeri için günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

Aynı RPM değerinde santrifüjlenmiş, likit limit (LL) değerleri farklı olan zemin gruplarının geleneksel ve günlük yöntemle elde edilen konsolidasyon eğrileri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de sunulmuştur. Geleneksel yöntemde uygulanan kademeli yükleme ile suyun dışarı çıkışı daha etkin gerçekleşmiş, bu nedenle boşluk oranında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. LL=53 numunelerde, başlangıç boşluk oranı daha yüksek olup yük altında daha fazla sıkışma göstermiştir. Aynı şekilde ön konsolidasyon gerilmesi ($\sigma'_p$) de yüksek seyretmiştir. Diğer yandan, LL=45 ve LL=37 olan numunelerde daha düşük başlangıç boşluk oranları ve daha sınırlı konsolidasyon davranışı tespit edilmiştir. LL değeri azaldıkça eğriler daha yatay bir seyir izlemekte, bu da sıkışma miktarının daha düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, RPM değerinin artmasıyla birlikte boşluk oranındaki değişimlerde sınırlı da olsa bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Günlük yöntemde, konsolidasyon eğrilerinin geleneksel yönteme kıyasla daha yatay seyretmesi ve boşluk oranındaki değişimlerin daha düşük olması; yük kademelerinin, her biri özdeş olan farklı numunelere tek tek ve doğrudan uygulanması nedeniyle, su drenajı ile zemin yapısındaki yeniden düzenlenmenin daha sınırlı gerçekleşmesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilebilir. Bu durum, yük artışına rağmen daha az sıkışma ve dolayısıyla daha sınırlı bir boşluk oranı değişimiyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, likit limit değeri arttıkça numunelerin başlangıç boşluk oranlarının da arttığı, ayrıca yöntemler arasındaki farkın yüksek efektif gerilme seviyelerinde daha belirgin hâle geldiği görülmektedir.

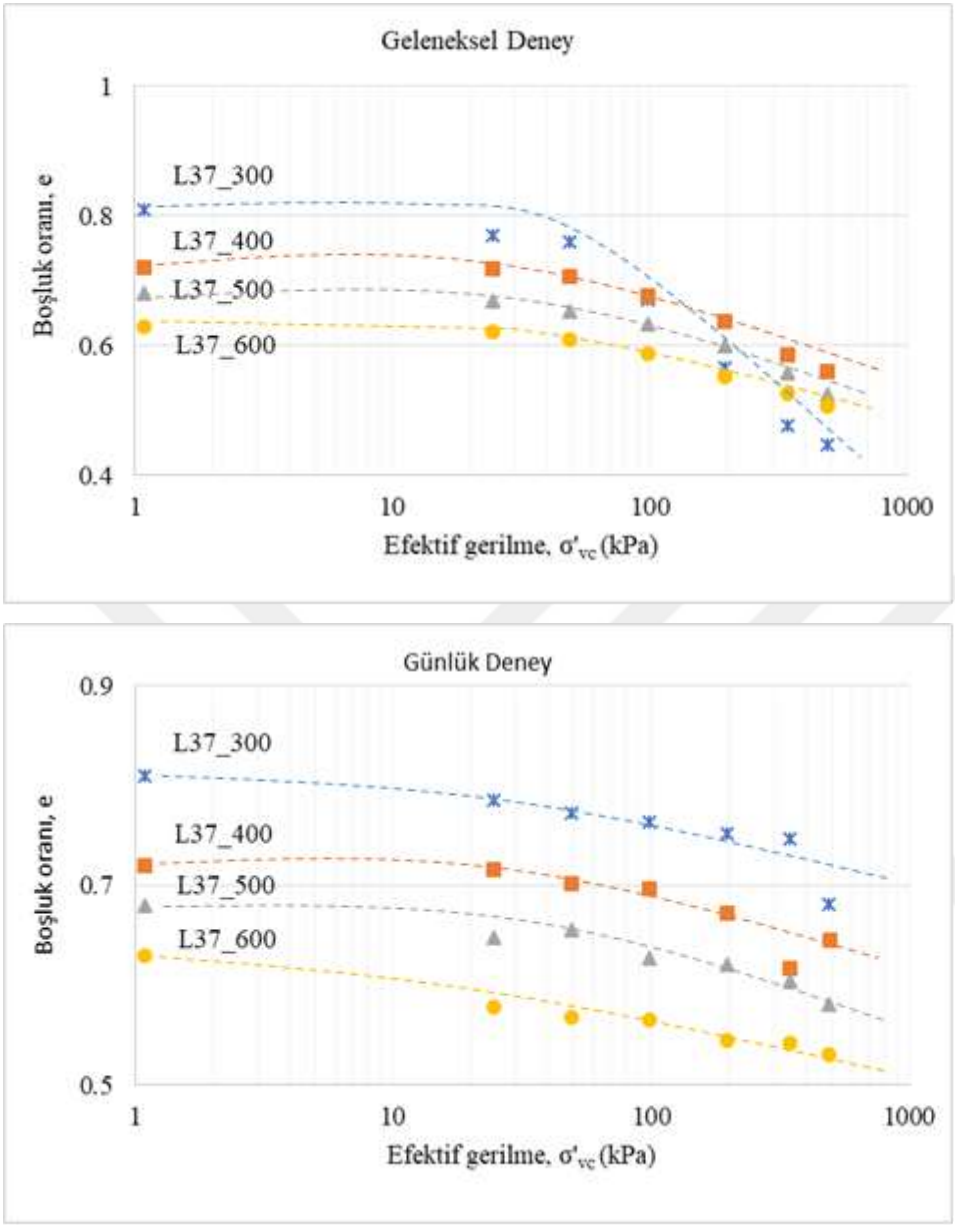



Şekil 5.4. RPM: 300 ve 400 veri seti için, likit limit değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

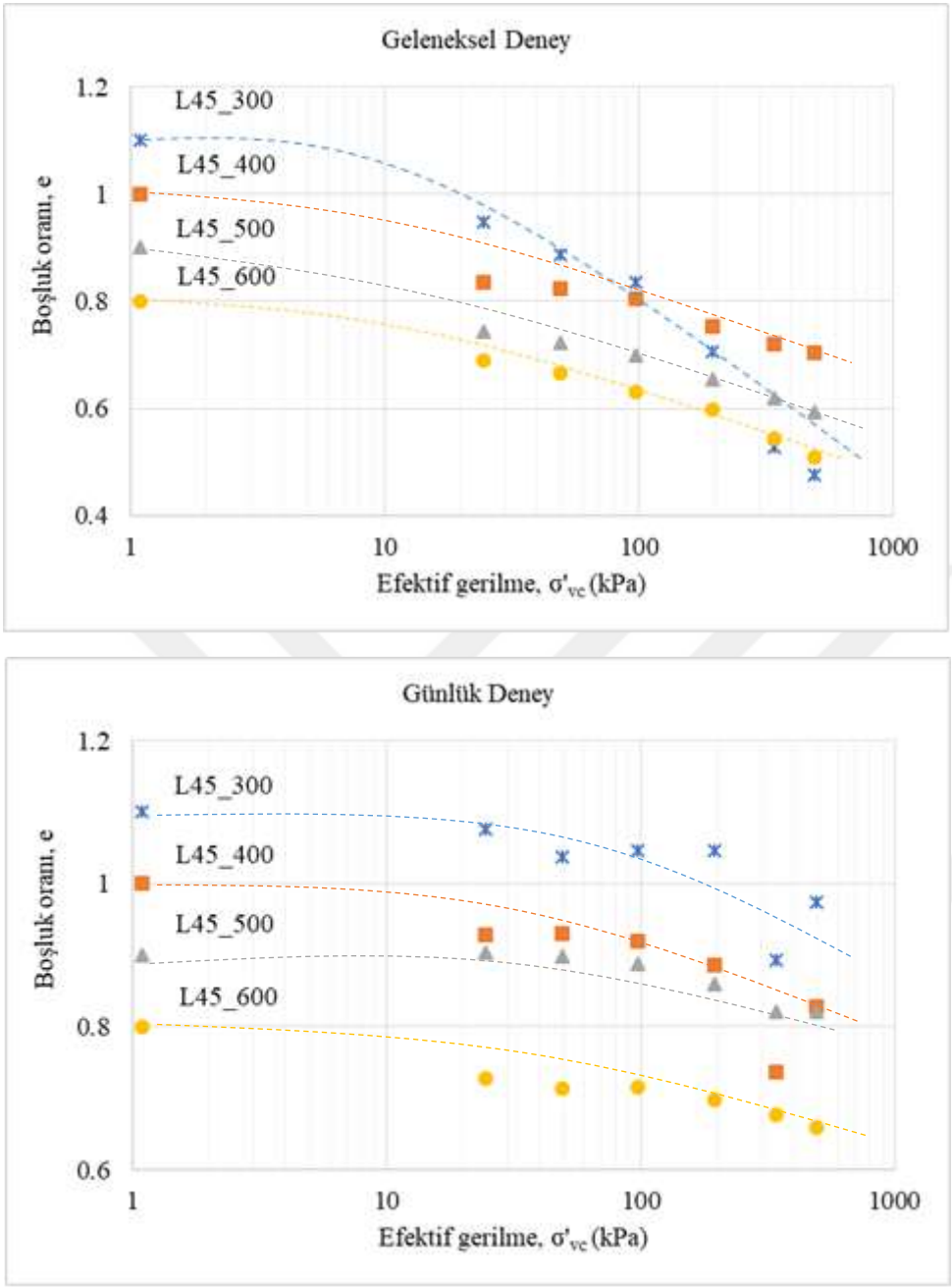



Şekil 5.5. RPM: 500 ve 600 veri seti için, likit limit değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

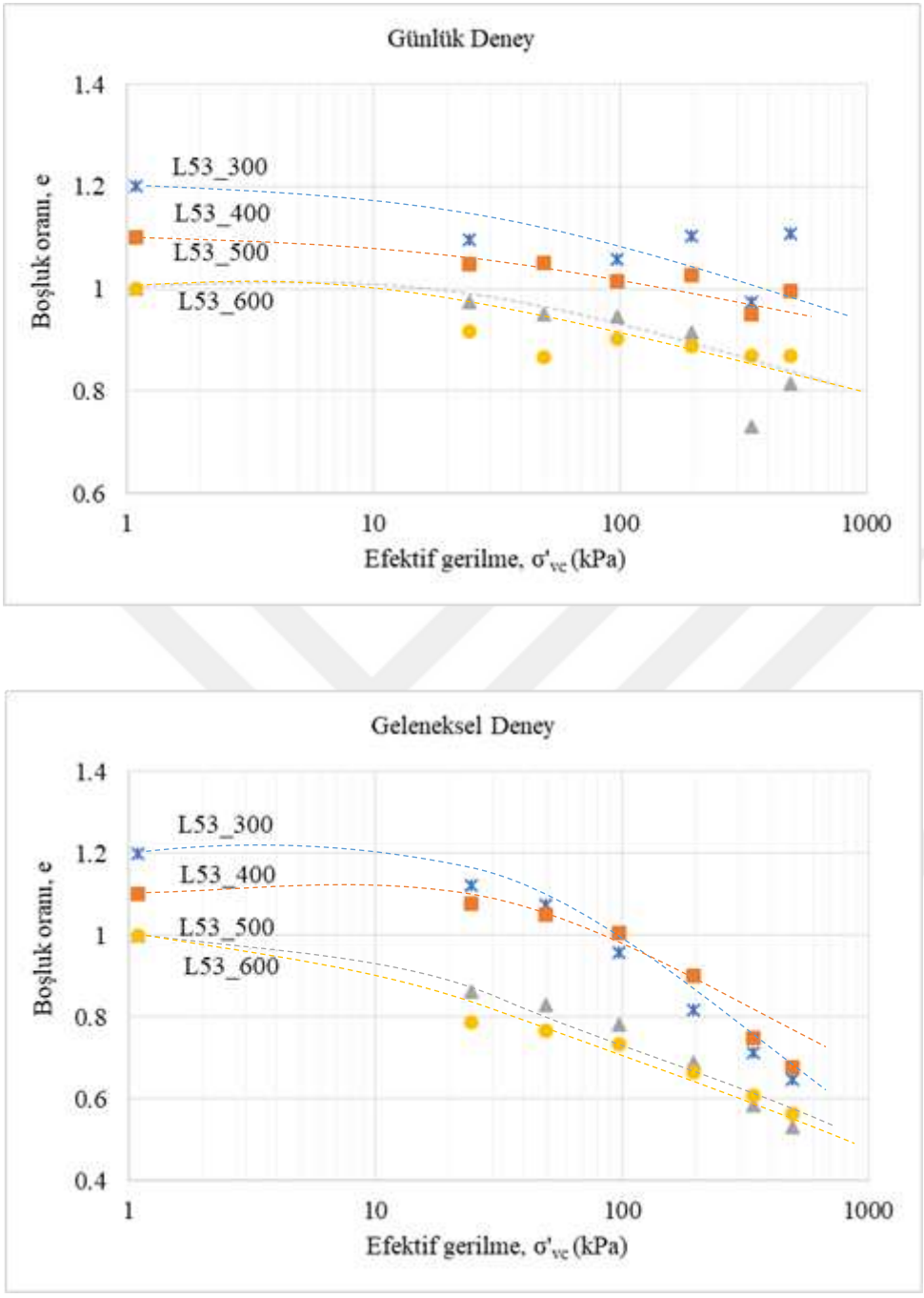
LL değerleri sabit tutulduğunda, farklı RPM değerlerinde (300, 400, 500 ve 600) yapılan uygulamaların etkisi, geleneksel ve günlük yöntemlerle elde edilen boşluk oranı–efektif gerilme ilişkileri üzerinden değerlendirilmiştir (Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). Geleneksel yöntemde elde edilen eğriler genel olarak daha dik eğimli olup, efektif gerilme arttıkça özellikle 300 RPM değerinde boşluk oranında daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, 300 RPM değerinde en yüksek başlangıç boşluk oranına sahiptir. 400, 500 ve 600 RPM değerlerinde ise geleneksel ve günlük yönteme ait konsolidasyon eğrilerinin eğimleri benzer bir seyir izlemiştir. RPM değeri arttıkça, numunelerin başlangıç boşluk oranlarının daha düşük olduğu ve efektif gerilme ile birlikte boşluk oranındaki azalmanın daha sınırlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, RPM arttıkça örselenmenin de arttığını ve numunelerin daha sıkı bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir. Özellikle 600 RPM ile yapılan deneylerde boşluk oranı en düşük değerlere ulaşmış; bu da yüksek RPM'nin, boşluk suyunun tahliyesini hızlandırarak konsolidasyona katkı sağladığını ortaya koymuştur. Günlük deneylerde ise eğriler, geleneksel yönteme kıyasla çok daha yatay seyretmekte, yani eğimleri daha düşüktür. Bu durum, günlük yöntemde boşluk oranı değişiminin daha sınırlı kaldığını; dolayısıyla suyun drenajı ve zemin yapısındaki yeniden düzenlenmenin daha az gerçekleştiğini göstermektedir. RPM artışı örselenmenin de arttığını ve numunelerin daha sıkı bir yapıya kavuştuğunu gösterse de günlük deneyler için LL=53 gibi yüksek plastisiteli yapıda grafiklerde dalgalı ve kararsız bir seyir izlenmiştir. Bu durum, yüksek RPM değerlerinin her zaman daha iyi sıkışma sağlamadığını, aksine belli bir sınırdan sonra konsolidasyon davranışını bozabilecek ölçüde düzensizlik yaratabileceğini göstermektedir.




Şekil 5.6. LL=37 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları



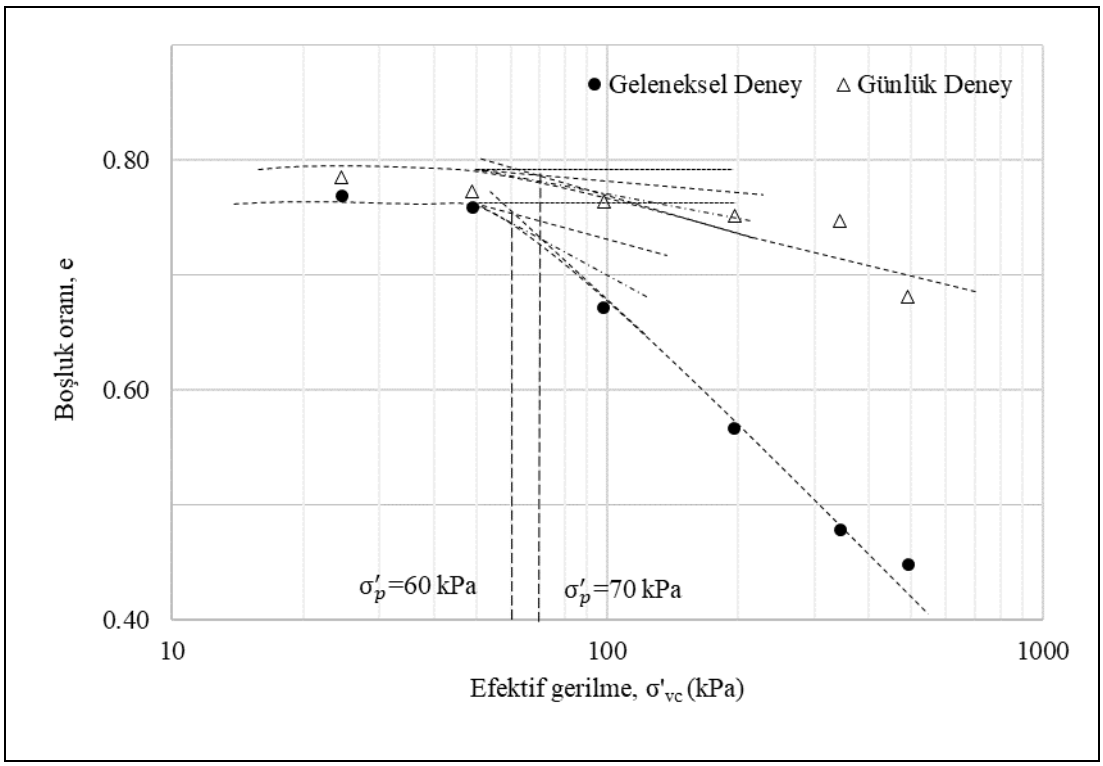

Şekil 5.7. LL=45 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları




Şekil 5.8. LL=53 veri seti için, RPM değişimlerine göre günlük ve geleneksel yöntem karşılaştırmaları

Numunenin boşluk oranı–efektif gerilme (e–log σ') grafiğinden elde edilen sonuçlarla, eğriler üzerinde ön konsolidasyon basıncı ($\sigma'_p$) ve sıkışma indisi ($C_c$) belirlenmiştir. Bu amaçla, deney sonucunda elde edilen veriler sayısal analiz ortamına aktarılmış ve değerlendirmelerde en yaygın kullanılan yöntem olan Casagrande (1936), prosedürü uygulanmıştır. Casagrande (1936) yöntemine göre, eğrinin maksimum eğrilik gösterdiği noktadan itibaren yatay bir doğru çizilmiş, aynı noktadan eğriye bir teğet geçirilmiştir.

Yatay doğru ile teğet arasında oluşan açının açıortayı belirlenmiş ve bakir sıkışma eğrisinin doğrusal kısmı bu açıortay doğrusu ile kesişinceye kadar uzatılmıştır. Bu iki doğrunun kesişim noktasının x eksenini (log σ') kestiği nokta, ön konsolidasyon basıncı ($\sigma'_p$) olarak tanımlanmıştır. Örnek teşkil etmesi bakımında Şekil 5.9'da numunelerden birine ait çizimli hesap sunulmuştur.




Şekil 5.9. L37_300 ön konsolidasyon basıncının karşılaştırılması

Deney verileri boşluk oranı–logaritmik efektif gerilme (e–log σ') grafiğinde gösterildiğinde, bakir sıkışma eğrisinin eğimi sıkışma indisi ($C_c$) olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, sıkışma indisinin tahmini için birde Holtz ve ark. (2015b) tarafından literatürde önerilen bazı ampirik denklemlere yer verilmiştir. Bu ampirik yaklaşımlardan yoğurulmuş killer için Skempton (1944)'un önerdiği Eşitlik (5.8) ile elde edilen değerler ve Casagrande (1936) yöntemi kullanılarak elde edilen ön konsolidasyon basıncı ($\sigma'_p$), sıkışma indisi ($C_c$) ve yeniden sıkışma indisi ($C_r$) değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

$$C_c = 0{,}007\ (LL - 7) \qquad (5.15)$$

Çizelge 5.2. Yoğurulmuş özdeş numunelerin ön konsolidasyon ve sıkışma indisi sonuçları

| Numune | Ön konsolidasyon basıncı ($\sigma'_p$) (kPa) | | Sıkışma İndisi ($C_c$) | | | Yeniden Sıkışma İndisi ($C_r$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Günlük | Geleneksel | Günlük | Geleneksel | Ampirik yaklaşım (Skempton, 1944) | Günlük | Geleneksel |
| L_37_300 | 70 | 60 | 0,12 | 0,21 | 0,21 | 0,03 | 0,05 |
| L_37_400 | 80 | 70 | 0,12 | 0,13 | | 0,01 | 0,02 |
| L_37_500 | 100 | 80 | 0,11 | 0,12 | | 0,01 | 0,02 |
| L_37_600 | 105 | 90 | 0,11 | 0,10 | | 0,01 | 0,02 |
| L_45_300 | 65 | 70 | 0,13 | 0,39 | 0,26 | 0,02 | 0,05 |
| L_45_400 | 68 | 75 | 0,12 | 0,13 | | 0,02 | 0,02 |
| L_45_500 | 70 | 80 | 0,11 | 0,13 | | 0,03 | 0,03 |
| L_45_600 | 80 | 80 | 0,10 | 0,13 | | 0,01 | 0,03 |
| L_53_300 | 70 | 52 | 0,15 | 0,44 | 0,32 | 0,04 | 0,03 |
| L_53_400 | 80 | 65 | 0,11 | 0,33 | | 0,02 | 0,04 |
| L_53_500 | 82 | 70 | 0,11 | 0,11 | | 0,02 | 0,05 |
| L_53_600 | 90 | 75 | 0,12 | 0,19 | | 0,02 | 0,04 |

Çizelge 5.2'de sunulmuş veriler, LL değeri farklı üç grup için (LL = 37, 45, 53), her birine ait günlük yöntem ve geleneksel yöntemle yapılan deney sonuçlarını kapsamaktadır. Genel olarak, RPM arttıkça ön konsolidasyon basıncında artış meydana gelmiş ve bu eğilim her iki yöntemde de benzer şekilde gerçekleşmiştir. Ön konsolidasyon basıncı, günlük yöntemde nispeten daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, RPM değerinin yükselmesiyle örselenmenin artmasına ve bu nedenle numunenin daha fazla "konsolide olmuş gibi" davranmasına bağlanabilir. Günlük deneyler sonucundaki $C_c$ değerleri 0,1-0,15 aralığında, geleneksel deneyler ise $C_c$ değerleri 0,1-0,44 değerleri aralığında değişmektedir. Bu aralıklar Holtz ve ark. (2015b) kitabında sıkışma indisi tipik değerleri tablosunda malzemenin düşük plastisiteli kil (CL) aralığına uygun olduğunu göstermiştir. Malzemenin $C_c$ değerleri geleneksel yöntemdeki her grup için, günlük yönteme göre daha yüksek çıkmıştır. Skempton (1944)'un ampirik $C_c$-LL ilişkisine göre öngörülen değerlerle karşılaştırıldığında, geleneksel yöntemin çok daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Holtz ve ark. (2015b) kitabında sıkışma indisi tipik değerleri tablosunda $C_r$'nin tipik

değerleri 0,015-0,035 arasında değişmektedir. Düşük değerler genellikle düşük plastisiteli ve düşük OCR'li killere aittir. Günlük deneyler sonucunda $C_r$ 0,01-0,04 aralığında, geleneksel deneyler ise 0,02-0,05 aralığında değişen değerler görülmektedir. Yeniden sıkışma indisi ($C_r$) değerleri geleneksel yöntemde biraz daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, günlük yöntemde uygulanan hızlı yükleme nedeniyle zeminin daha az yapılandığını ve dolayısıyla yeniden sıkışma davranışının daha sınırlı kaldığını gösterebilir. LL=37 için sıkışma indisi değerlerinde ise günlük yöntemde dalgalanmalar görülürken, geleneksel yöntemde azalma eğilimi hâkim olmuştur. Yeniden sıkışma indisi değerlerinde ise günlük ve geleneksel yöntemde de azalma eğilimi hâkim olmuştur. LL=45 için sıkışma indisi değerleri her iki yöntemde de azalma eğiliminde olmuştur. Yeniden sıkışma indisi değerlerinde ise her iki yöntemde de dalgalanma eğilimi hâkim olmuştur. LL=53 içinse sıkışma indisi değerleri her iki yöntemde de azalma eğiliminde iken, yeniden sıkışma indisi değerlerinde günlük deneyde azalma eğiliminde ancak geleneksel deneyde dalgalanma eğilimi hâkim olmuştur.

# 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konsolidasyon, zemine uygulanan bir yük sonucunda, zemin boşluklarındaki suyun zamanla dışarı atılması ve tanelerin birbirine yaklaşmasıyla meydana gelen hacimsel azalma sürecidir. Bu hacim kaybı, yüzeyde oturma şeklinde gözlemlenir ve genellikle uzun bir zaman dilimine yayılır. Bu çalışmada ise, sürece ilişkin zaman ve bazı parametreler bakımından yeni bir hipotez ortaya konulmuş ve bu hipotezin geçerliliğini test etmek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, likit limitleri 37, 45 ve 53 olan üç farklı ince taneli zemin numunesi üzerinden 12 adet veri seti elde edilmiştir. Her bir set, 8 zemin numunesi içermektedir. Numuneler laboratuvar ortamında dört farklı santrifüj hızına (300, 400, 500 ve 600 RPM) tabi tutulmuştur. Bu kapsamda toplam 96 adet deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyler, geleneksel konsolidasyon testi ile bu çalışmada önerilen yeni hipoteze dayalı günlük konsolidasyon yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda boşluk oranı – efektif gerilme (e-log$\sigma'$) grafiklerinin yanı sıra ön konsolidasyon basıncı, sıkışma indisi ($C_c$) ve yeniden sıkışma indisi ($C_r$) değerleri hesaplanmıştır.

Boşluk oranı – efektif gerilme (e-log$\sigma'$) grafiklerinde, geleneksel yönteme ait eğrilerin daha belirgin bir konsolidasyon davranışı sergilediği, buna karşın günlük (yeni) yöntemle elde edilen eğrilerin daha yatay seyrederek daha sınırlı bir boşluk oranı değişimi gösterdiği görülmektedir.

Geleneksel yöntemde uygulanan kademeli yükleme ile suyun dışarı çıkışı daha etkin gerçekleşmiş, bu nedenle boşluk oranında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. LL=53 numunelerde, başlangıç boşluk oranı daha yüksek olup yük altında daha fazla sıkışma göstermiştir. Aynı şekilde ön konsolidasyon gerilmesi ($\sigma'_p$) de yüksek seyretmiştir. Diğer yandan, LL=45 ve LL=37 olan numunelerde daha düşük başlangıç boşluk oranları ve daha sınırlı konsolidasyon davranışı tespit edilmiştir.

Likit limit değeri arttıkça, başlangıç boşluk oranı da artmakta ve geleneksel yöntemde daha belirgin bir sıkışma gözlemlenmektedir. Günlük yöntem, hızlı ve pratik olsa da özellikle

yüksek LL'li zeminlerde, suyun dışarı çıkış süreci sınırlı kaldığı için, geleneksel yöntem kadar belirgin bir konsolidasyon eğilimi sunmamaktadır. Bu fark, özellikle yüksek efektif gerilme düzeylerinde daha net şekilde gözlenmektedir.

RPM değeri arttıkça, numunelerin başlangıç boşluk oranlarının daha düşük olduğu ve efektif gerilme ile birlikte boşluk oranındaki azalmanın daha sınırlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu, RPM arttıkça örselenmenin de arttığını ve numunelerin daha sıkı bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte, günlük deneyler için LL=53 gibi yüksek plastisiteli yapıda grafiklerde dalgalı ve kararsız bir seyir izlenmiştir. Bu durum, yüksek RPM değerlerinin her zaman daha iyi sıkışma sağlamadığını, aksine belli bir sınırdan sonra konsolidasyon davranışını bozabilecek ölçüde düzensizlik yaratabileceğini göstermektedir. Düşük RPM değerlerinde elde edilen numunelerin ilk boşluk oranlarının daha yüksek olması, numunelerin daha gevşek bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir.

RPM arttıkça ön konsolidasyon basıncında artış meydana gelmiş ve bu eğilim her iki yöntemde de benzer şekilde gerçekleşmiştir. Ön konsolidasyon basıncı, günlük yöntemde nispeten daha yüksek bulunmuştur. $C_c$ değerleri geleneksel yöntemdeki her grup için, günlük yönteme göre daha yüksek çıkmıştır. Skempton (1944)'un ampirik $C_c$-LL ilişkisine göre öngörülen değerlerle karşılaştırıldığında, geleneksel yöntemin çok daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Yeniden sıkışma indisi ($C_r$) değerleri geleneksel yöntemde biraz daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, günlük yöntemde uygulanan hızlı yükleme nedeniyle zeminin daha az yapılandığını ve dolayısıyla yeniden sıkışma davranışının daha sınırlı kaldığını gösterebilir.

Bu araştırmadan elde edilen bulguların, yalnızca bu çalışmaya özgü kullanılan zemin numuneleri için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Başka bir deyişle, gelecekte yapılacak çalışmalar için zemin indeks özelliklerinin çeşitlendirilmesi, likit limit (LL) aralıklarının daha sık ve kapsamlı şekilde ele alınması önem arz etmektedir. Gelecekte daha fazla numune ile desteklenmesi durumunda, bu çalışmada önerilen yeni yöntemle kısa sürede tamamlanan testlerin, geleneksel yöntemle elde edilen sonuçlara ulaşmasını sağlayacak ampirik denklemler geliştirilmesi mümkün olabilir. Bu yönüyle, mevcut çalışma, farklı zemin türlerinin dahil edilmesiyle ampirik denklem önerilerine temel oluşturabilecek nitelikte uygun bir ön çalışma olarak değerlendirilebilir.

# KAYNAKLAR


Asadi, R. (2017). *İnce taneli zeminlerde konsolidasyon katsayısının alternatif bir yöntemle incelenmesi*. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi.

Asadi, R., Kayabalı, K., Balcı, M. C. (2021). Investigation of the coefficient of consolidation of fine-grained soils using combined apparatus. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 166(166), 71-83.

ASTM. (2004). *ASTM D2435-Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.*

Aytekin, P. D. M. (2004). *Deneysel zemin mekaniği*. (4. Baskı).İstanbul: Teknik Yayınevi. 624.

Balcı, M. C. (2015). *Konsolidasyon parametrelerinin santrifüjyöntemiyle elde edilmesi* Doktora tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Casagrande, A. (1936). The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In I. C. o. S. M. a. F. Engineering (Ed.), *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* III, 60-64. Harvard University.

Enstitüsü, T. S. (2006). TS 1900-1-İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri. Bölüm-1. In. Ankara.

Fox, P. J. (2003). *Consolidation and Settlement Analysis*, 2.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C. (2015a). *Geoteknik mühendisliğine giriş* (P. D. A. Erken, Trans.).

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C. (2015b). Geoteknik mühendisliğine giriş (P. D. A. Erken, Trans.). In, 393-394.

Kassim, K. A., Rashid, A. S. A., Kueh, A. B. H., Yah, C. S., Siang, L. C. (2016). Criteria of acceptance for constant rate of strain consolidation test for tropical cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 931-947.

Kayabali, K., Ozdemir, A. (2012). Assessing the practicality of the centrifuge method for 1-D consolidation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 735-745.

Knappett, J. (2012). *Craig's soil mechanics*. London: Spon Press, 95.

Moozhikkal, R., Robinson, R. G. (2023). One-dimensional consolidation test with pore pressure Measurements—an accelerated procedure. *Geotechnical Testing Journal*, 46(2), 335-350.

Raftari, M., Kassim, K. A., Bunawan, A. R., Rashid, A. S. A., Horpibulsuk, S., Isobe, K. (2022). Development of a new consolidation test for soil cement columns treated ground. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 29(2), 97-101.

Raheena, M., Robinson, R. G. (2018). Accelerated consolidation test using t method. *Indian Geotechnical Journal*, 48(1), 84-91.

Sivakumar, V., MacKinnon, P., Zaini, J., Cairns, P. (2010). Effectiveness of filters in reducing consolidation time in routine laboratory testing. *Géotechnique*, 60(12), 949-956.

Sridharan, A., Nagaraj, H. (2004). Coefficient of consolidation and its correlation with index properties of remolded soils. *Geotechnical Testing Journal*, 27(5), 469-474.

Sridharan, A., Nagaraj, H., Srinivas, N. (1999). Rapid method of consolidation testing. *Canadian geotechnical journal*, 36(2), 392-400.

Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics* (Vol. 66). LWW.

Terzaghi, K., Peck, B. C. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley.

Yong, Z., Ling-Wei, K., Bing, B., Xiong-Wei, L. (2007). A new method for evaluating coefficient of consolidation. *Yantu Lixue(Rock and Soil Mechanics)*, 28(2), 355-358.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*