



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KİL ZEMİNLERDE ÖN KONSOLİDASYON
BASINCININ ZEMİNİN KAYMA
MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNE
ETKİSİ**

İrem ERKAN İYİGÖNÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İrem ERKAN İYİGÖNÜL tarafından hazırlanan “Kil zeminlerde ön konsolidasyon basıncının zeminin kayma mukavemeti parametrelerine etkisi ” adlı tez çalışması 19/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mustafa Yıldız

Danışman

Prof. Dr. Mustafa Yıldız

Üye

Doç. Dr. Ali Sinan Soğancı

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı Erkan

İmza

.....

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

İrem ERKAN İYİGÖNÜL

Tarih: 27.12.2022

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****KİL ZEMİNLERDE ÖN KONSOLIDASYON BASINCININ ZEMİNİN KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ****İrem ERKAN İYİGÖNÜL****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ****2022, 104 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Mustafa Yıldız****Doç. Dr. Ali Sinan Soğancı****Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı Erkan**

Yumuşak kil zeminler, düşük kayma mukavemeti ve oturma problemleriyle sıklıkla karşılaşılan problemlidir. Düşey eksenel basınca maruz kaldıklarında büyük deformasyonlar gösterebilirler. Dolayısıyla zeminlerin kayma direnci parametrelerinin, konsolidasyon oturmasının doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Konsolidasyon, zemin tabakasına düşey eksenel basınç uygulanması sonucunda efektif düşey gerilme artışıyla artan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi, zemin danelerinin yer değiştirmesi ile oluşan oturmalarla oluşur. Oturmalar uzun sürede gerçekleşir. Bu nedenlerden dolayı zaman kazanmak ve doğru bir şekilde oturma tahmin edilebilmesi için bilim insanları istatistiksel olarak anlamlı denklemler elde etmek üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada, farklı konsolidasyon basınçlarında, düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri ile ön konsolidasyon basınçları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Likit kıvamda hazırlanan düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminler 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarında ön konsolidasyona tabi tutulmuştur. Konsolide edilmiş numunelerin serbest basınç, kesme kutusu ve veyn deneyleri ile kayma mukavemeti parametreleri kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) bulunmuştur. Kohezyon ve içsel sürtünme açılarıyla ön konsolidasyon basıncı arasında anlamlı bağıntılar oluşturulamamıştır. Sonuçta, düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminler için yapılan serbest basınç, kesme kutusu ve Veyn deneylerinden elde edilen verilerle kayma mukavemeti parametrelerini ön konsolidasyon basıncına bağlı olarak tahmin edebilen ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek hata miktarı en düşük, korelasyon katsayısı en yüksek denklemler oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Düşük plastisiteli kil, Kayma mukavemeti parametreleri, Ön konsolidasyon, Yumuşak kil, Yüksek plastisiteli kil.

ABSTRACT**MS THESIS****THE EFFECT OF THE PRE-CONSOLIDATION PRESSURE ON SOIL SLIP
STRENGTH PARAMETERS OF THE CLAY SOILS****İrem ERKAN İYİGÖNÜL****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering****Advisor: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ****2022, 104 Pages****Jury****Prof. Dr. Mustafa Yıldız****Doç. Dr. Ali Sinan Soğancı****Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı Erkan**

Soft clay soils are problematic soils that are frequently encountered with low shear strength and settlement problems. They can show large deformations when exposed to vertical axial pressure. Therefore, it is very important to determine the slip resistance parameters and consolidation settlement of soils correctly. Consolidation is the subsidence of the pore water pressure, which increases with the increase in the effective vertical stress as a result of the application of vertical axial pressure to the soil layer, and the settlements formed by the displacement of the soil grains. Settlements are events that take a long time. For these reasons, scientists have worked on obtaining statistically significant equations to save time and accurately predict fit.

In this study, the relationship between shear strength parameters and pre-consolidation pressures of low and high plasticity clay soils at different consolidation pressures was investigated. Low and high plasticity clay soils prepared in liquid consistency were pre-consolidated at 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa and 400 kPa pressures. Unconfined pressure, shear box and vein tests and shear strength parameters cohesion (c) and internal friction angles (ϕ) of the consolidated samples were found. No significant correlations could be established between the cohesion and internal friction angles and the pre-consolidation pressure. As a result, equations with the lowest error amount and the highest correlation coefficient were created that can predict shear strength parameters depending on the pre-consolidation pressure and can be used for practical purposes, with the data obtained from the free pressure, shear box and Veyn experiments for low plasticity and high plasticity clay soils.

Keywords: High plasticity clay, Low plasticity clay, Pre-consolidation, Shear strength parameters, Soft clay.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve birikiminden faydalandığım ve akademik anlamda önemli katkılar sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa YILDIZ'a teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında ve deney aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'ya teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde beni hep destekleyen yardımcı olan teyzem Prof. Dr. Nermin ŞARLAK'a teşekkür eder ve sevgilerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, destekleyen, iyi bir eğitim almam için ellerinden geleni yapan ve beni sevgiyle büyüten annem, babam ve kardeşime, dualarıyla varlıklarıyla hep destek olan sevgili büyüklerime ve büyük aileme teşekkür eder ve minnetlerimi sunarım.

Bu süreçte ve hayatımın her dönemindeki manevi destekçilerim arkadaşlarıma yanımda olup yardımcı oldukları için teşekkür ederim.

Hayatımdaki en büyük destekçilerimden olan, tez sürecimde de yardımlarını esirgemeyen, her zaman hoşgörülü ve merhametli olan değerli eşime çok teşekkür ederim.

İrem ERKAN İYİGÖNÜL
Aralık-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xii
EK ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Materyal	9
3.1.1. Killer	9
3.1.2. Normal konsolide killer	17
3.1.3. Aşırı konsolide killer	18
3.1.4. Konsolide olmamış killer.....	18
3.2. Yöntem.....	19
3.2.1. Zeminlerin kayma mukavemeti	19
3.2.2. Konsolidasyon	22
3.2.3. Killerde konsolidasyon kuramları.....	23
3.2.4. Konsolidasyon süreci	24
3.2.5. Konsolidasyon deneyi.....	26
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
4.1. Kullanılan Kil Zeminler	28
4.1.1. Yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminler	28
4.2. Elek Analizi Deneyi.....	29
4.3. Hidrometre Deneyi	30
4.4. Piknometre Deneyi	34
4.5. Kıvam Likit Deneyleri	35
4.2. Zemin Numunelerinin Konsolide Edilmesi	37
4.2.1. Kil numunelerin hazırlanması.....	37
4.2.2. Serbest basınç deneyleri.....	40
4.2.3. Kesme kutusu deneyleri.....	42

4.2.4. Laboratuvarda Veyn deneyi.....	44
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	45
5.1. Serbest Basınç Deney Sonuçları	45
5.2. Kesme Kutusu Deney Sonuçları	53
5.3. Laboratuvarda Veyn Deneyi Sonuçları.....	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
6.1 Sonuçlar	70
6.2 Öneriler	71
KAYNAKLAR	72
EKLER	75
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kil tanelerinin mikroskop altındaki görüntüleri	10
Şekil 3.2. (a) Kil tanelerinin yapısı, (b) temsili gösterimleri (Grim, 1974).....	10
Şekil 3.3. Kaolinit grubu kil minerallerinin yapısı	12
Şekil 3.4. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).	12
Şekil 3.5. Kaolinit grubu kil minerallerinin katman yapısı (Türköz, 2007)	12
Şekil 3.6. İllit kil mineralinin yapısı	13
Şekil 3.7. İllit türü minerallerin şematik görünümü (Başer, 2009).....	14
Şekil 3.8. Smektit grubu kil minerallerinin katman yapısı (Türköz, 2007).....	15
Şekil 3.9. Montmorillonitin atomik yapısı (Mitchell, 1976)	15
Şekil 3.10. Montmorillonitin şematik görünümü (Başer, 2009).....	16
Şekil 3.11. Aşırı konsolide kil zeminin sıkışma eğrisi	18
Şekil 3.12. Kayma mukavemeti eğrisi.....	20
Şekil 3.13. Mohr – Coulomb göçme hipotezi - asal gerilmeler ve yenilme düzlemindeki gerilmeleri.....	21
Şekil 3.14. Normal ve Aşırı konsolide killeri için kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi.....	22
Şekil 3.15. Konsolidasyon süreci (Das and Sobhan 2014).	25
Şekil 3.16. Konsolidasyon (ödometre) deneyi düzeneği (Önalp, 2007).....	26
Şekil 3.17. Ödometre aleti (Önalp, 2007).....	26
Şekil 3.18. Boşluk Oranı-Efektif Gerilme Grafiği - Logaritmik Eksende (Holtz vd. 2010)	27
Şekil 4.1. Yüksek plastisiteli kilin temin edildiği açık maden işletmesinden görseller .	28
Şekil 4.2. Kullanılan düşük plastisiteli zemin numunesinden görseller	29
Şekil 4.3. Elekler üzerinde kalan numuneler	30
Şekil 4.4. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil zemin için hidrometre deneyi ...	31
Şekil 4.5. Düşük Plastisiteli Kil (CL) granülometrisi.....	32
Şekil 4.6. Yüksek Plastisiteli Kil (CH) granülometrisi	33
Şekil 4.7. Piknometre deneyi kabın darasının ölçümü işlemi (M1)	34
Şekil 4.8 Piknometre deneyi vakumlama işlemi	34
Şekil 4.9. Casagrande aletiyle likit limitin belirlenmesi.....	36
Şekil 4.10. Düşen koni deneyi ile likit limitin belirlenmesi	37
Şekil 4.11. Kil numunenin lilit kıvamda hazırlanması	38
Şekil 4.12. (a) Filtre kağıdı yerleştirilen kalıp,.....	39
(b) Hazırlanan zeminin şişlenmesi,.....	39
(c) Deney kalıbına yerleştirilen likit kıvamda hazırlanmış zeminler.....	39
Şekil 4.13. (a) Konsolidasyon cihazı,.....	39
(b) Konsolidasyon kalıbının cihza yerleştirilmesi,	39
(c) Yükleme.....	40
Şekil 4.14. (a) 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde silindirik kalıplar	41
(b) Konsolide edilmiş Zeminden çakılarak kalıplardan elde edilen numuneler	41
Şekil 4.15. Serbest basınç deneyi aleti	41
Şekil 4.16. (a) Konsolide edilmiş zeminden kesme kutusu kalıbının çakılarak numune alınması.....	43
(b) Hücreye yerleştirilen kalıp	43
Şekil 4.17. (a) Numunenin deney kalıbına yerleştirilmesi,	43
(b) Kesme kutusu deneyi hücresi	43
Şekil 4.18. (a) Sondanın zemine batırılması,.....	44
(b) 4 plakadan oluşan sonda	44

Şekil 5.1. Düşük plastisiteli kil numunenin serbest basınç deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	47
Şekil 5.2. Düşük plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	48
Şekil 5.3. Düşük plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	48
Şekil 5.4. Düşük plastisiteli kil numunelerinin yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.....	49
Şekil 5.5. Düşük plastisiteli kil numunelerinin yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.....	49
Şekil 5.6. Yüksek plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	51
Şekil 5.7. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	51
Şekil 5.8. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	52
Şekil 5.9. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.....	52
Şekil 5.10. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.	53
Şekil 5.11. Düşük plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	55
Şekil 5.12. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	55
Şekil 5.13. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	56
Şekil 5.14. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.....	56
Şekil 5.15. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.	57
Şekil 5.19. Yüksek plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	58
Şekil 5.20. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	58
Şekil 5.21. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	59
Şekil 5.22. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.....	59
Şekil 5.23. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.	60
Şekil 5.25. Düşük plastisiteli kil numunenin Veyn deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	62
Şekil 5.26. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	63

Şekil 5.27. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	63
Şekil 5.28. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.	64
Şekil 5.29. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.	64
Şekil 5.30. Yüksek plastisiteli kil numunenin veyn deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği	65
Şekil 5.31. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği. .	66
Şekil 5.32. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.	66
Şekil 5.33. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.	67
Şekil 5.34. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.	67
Şekil 5.35. Yüksek ve düşük plastisiteli kil numunelerin tüm deney sonuçları karşılaştırması	69

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Kil mineral tiplerinin kimyasal oluşumu (Mitchell, 1193).....	11
Çizelge 3.2. Kil minerallerinin karşılaştırılması (Mitchell, 1993).	17
Çizelge 3.3. Konsolidasyon Sürecinde Gerilme Durumları (Das and Sobhan 2014).....	25
Çizelge 4.1. Düşük Plastisiteli Kil Elek Analizi Sonuçları	30
Çizelge 4.2. Yüksek Plastisiteli Kil Elek Analizi Sonuçları.....	30
Çizelge 4.3. Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminlerin granülometri sonuçları.....	33
Çizelge 4.4. Piknometre deneyi sonuçları	34
Çizelge 4.5. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil numunelerin kıvam limit deney sonuçları.....	37
Çizelge 5.1. Düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları	45
Çizelge 5.2. Yüksek plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları	46
Çizelge 5.3. Düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçlarından oluşturulan denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE).....	50
Çizelge 5.4. Yüksek plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE).....	53
Çizelge 5.5. Düşük plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.....	54
Çizelge 5.6. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.....	54
Çizelge 5.7. Düşük plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE).....	57
Çizelge 5.8. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değeri (RMSE).....	60
Çizelge 5.9. Düşük plastisiteli kil numunelerin veyn deney sonuçları.....	61
Çizelge 5.10. Yüksek plastisiteli kil numunelerin veyn deney sonuçları.....	62
Çizelge 5.11. Düşük plastisiteli kil numunelerin veyn deneyi sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE).....	65
Çizelge 5.12. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kanatlı veyn deneyi sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE).....	68

EK ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil EK 1.1. Düşük plastisiteli kil zeminlerin serbest basınç deney sonuçları	76
Şekil EK 1.2. Serbest basınç deney sonuçları	76
(25 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)	76
Şekil EK 1.3. Serbest basınç deney sonuçları	76
(25 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)	76
Şekil EK 1.4. Serbest basınç deney sonuçları	77
(25 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)	77
Şekil EK 1.5 Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	77
(25 kPa’da konsolide edilmiş)	77
Şekil EK 1.6. Serbest basınç deney sonuçları	78
(50 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)	78
Şekil EK 1.7. Serbest basınç deney sonuçları	78
(50 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)	78
Şekil EK 1.8. Serbest basınç deney sonuçları	79
(50 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)	79
Şekil EK 1.9. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	79
(50 kPa’da konsolide edilmiş)	79
Şekil EK 1.10. Serbest basınç deney sonuçları	80
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)	80
Şekil EK 1.11. Serbest basınç deney sonuçları	80
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)	80
Şekil EK 1.12. Serbest basınç deney sonuçları	81
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)	81
Şekil EK 1.13. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	81
(100 kPa’da konsolide edilmiş)	81
Şekil EK 1.14. Serbest basınç deney sonuçları	82
(200 kPa’da konsolide edilmik düşük plastisiteli numune 1)	82
Şekil EK 1.15. Serbest basınç deney sonuçları	82
(200 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)	82
Şekil EK 1.16. Serbest basınç deney sonuçları	83
(200 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)	83
Şekil EK 1.17. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	83
(200 kPa’da konsolide edilmiş)	83
Şekil EK 1.18. Serbest basınç deney sonuçları	84
(400 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)	84
Şekil EK 1.19. Serbest basınç deney sonuçları	84
(400 kPa’da konsolide edilmik düşük plastisiteli numune 2)	84
Şekil EK 1.20. Serbest basınç deney sonuçları	85
(400 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)	85
Şekil EK 1.21. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	85
(400 kPa’da konsolide edilmiş)	85
Şekil EK 2.1. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin serbest basınç deney sonuçları	87
Şekil EK 2.2. Serbest basınç deney sonuçları	87
(25 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)	87
Şekil EK 2.3. Serbest basınç deney sonuçları	87
(25 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)	87
Şekil EK 2.4. Serbest basınç deney sonuçları	88
(25 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)	88

Şekil EK 2.5. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	88
(25 kPa'da konsolide edilmiş)	88
Şekil EK 2.6. Serbest basınç deney sonuçları	89
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1).....	89
Şekil EK 2.7. Serbest basınç deney sonuçları	89
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2).....	89
Şekil EK 2.8. Serbest basınç deney sonuçları	90
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3).....	90
Şekil EK 2.9. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	90
(50 kPa'da konsolide edilmiş)	90
Şekil EK 2.10. Serbest basınç deney sonuçları	91
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1).....	91
Şekil EK 2.11. Serbest basınç deney sonuçları	91
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2).....	91
Şekil EK 2.12. Serbest basınç deney sonuçları	92
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3).....	92
Şekil EK 2.13. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	92
(100 kPa'da konsolide edilmiş)	92
Şekil EK 2.14. Serbest basınç deney sonuçları	93
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1).....	93
Şekil EK 2.15. Serbest basınç deney sonuçları	93
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2).....	93
Şekil EK 2.16. Serbest basınç deney sonuçları	94
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3).....	94
Şekil EK 2.17. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	94
(200 kPa'da konsolide edilmiş)	94
Şekil EK 2.18. Serbest basınç deney sonuçları	95
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1).....	95
Şekil EK 2.19. Serbest basınç deney sonuçları	95
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2).....	95
Şekil EK 2.20. Serbest basınç deney sonuçları	96
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3).....	96
Şekil EK 2.21. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler	96
(400 kPa'da konsolide edilmiş)	96
Şekil EK 3.1. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	97
(25 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)	97
Şekil EK 3.2. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	97
(50 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)	97
Şekil EK 3.3. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	98
(100 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)	98
Şekil EK 3.4. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	98
(200 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)	98
Şekil EK 3.5. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	99
(400 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)	99
Şekil EK 3.6. Kesme kutusu deney sonunda numuneler	99

(Düşük plastisiteli kil).....	99
Şekil EK 3.7. Kesme kutusu deney sonunda numuneler	100
(Düşük plastisiteli kil).....	100
Şekil EK 4.1. Kesme kutusu deney sonuçları	101
(25 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)	101
Şekil EK 4.2. Kesme kutusu deney sonuçları	101
(50 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)	101
Şekil EK 4.3. Kesme kutusu deney sonuçları	102
(100 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)	102
Şekil EK 4.4. Kesme kutusu deney sonuçları	102
(200 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)	102
Şekil EK 4.5. Kesme kutusu deney sonuçları	103
(400 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)	103
Şekil EK 4.6. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler	103
(Yüksek plastisiteli kil).....	103
Şekil EK 4.7. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler	104
(Yüksek plastisiteli kil).....	104
Şekil EK 4.8. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler	104
(Yüksek plastisiteli kil).....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	:	Yüzde
c (kPa)	:	Kohezyon
τ (kN/m ²)	:	Kesme dayanımı
ρ_s (Kg/m ³)	:	Tane yoğunluğu
σ' (kN/m ²)	:	Efektif Normal Gerilme
σ'_0 (kN/m ²)	:	Ön konsolidasyon basıncı
e	:	Boşluk oranı
k	:	Permeabilite
σ (kN/m ²)	:	Gerilme
δ (kN/m ²)	:	Kayma gerilmesi
ϕ (derece)	:	İçsel sürtünme açısı
C _r	:	Yeniden sıkışma indisi
C _s	:	Kabarma indisi
C _c	:	Sıkışma indisi
ϵ	:	Birim deformasyon
q _u	:	Serbest basınç dayanımı
w _L	:	Likit limit

Kısaltmalar

CL	:	Düşük plastisiteli kil
CH	:	Yüksek plastisiteli kil
ML	:	Düşük plastisiteli silt
MH	:	Yüksek plastisiteli silt
OL	:	Düşük plastisiteli kil
OH	:	Yüksek plastisiteli kil
LL	:	Likit limit
PL	:	Plastik limit
PI	:	Plastisite indisi
M	:	Moment
°C	:	Santigrat
g	:	Gram
mm	:	Milimetre
ml	:	Mililitre
N	:	Newton
kN	:	Kilonewton
kPa	:	Kilopaskal
ASTM	:	Amerikan test ve malzeme kurumu
R ²	:	Determinasyon katsayısı
RMSE	:	Ortalama hata kareleri karekökü
UCS	:	Serbest Basınç Deneyi

1. GİRİŞ

Yeryüzünde kalın tabakalar halinde geniş alanlar kaplamakta olan kil zeminler, son yıllarda geoteknik mühendisliğinin önemli problem ve çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. Kil zeminlerin uzun süreli oturması, ortamdaki suyun varlığına bağlı olarak şişme veya büzülme eğilimi göstermeleri vb., özelliklerinden dolayı üzerine inşa edilecek mühendislik yapılarının projelerinde tasarım ve yapım zorluğu oluşturur. Bu tür alanlarda uygulanacak zemin iyileştirme, bina temellerinin veya dolguların inşası oldukça karmaşık ve pahalı olabilir.

Yumuşak killer düşük dayanımlı ve yüksek sıkışma potansiyeli olan zeminlerdir. Düşey yönde bir yüklemeye maruz kaldıklarında zeminlerin mekanik davranışında yüksek derecede lineer olmayan davranış etkin olur ve meydana gelen deformasyonlar zamana bağlı olarak gerçekleşir. Yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Pane, Croce, Znidarcic, Ko, Olsen Schiffman (1983), DeGroot, (2001), Berilgen (2003)).

Yumuşak kil zeminler genellikle normal konsolide durumdadır. Bazı durumlarda az miktarda aşırı konsolide özellik gösterebilme ihtimalleri olsa da ilk yüklenme sırasında hızlı şekilde konsolide olurlar ve bu durum ortadan kalkar ve yumuşak zemin normal konsolide hale gelir. Bu nedenle yumuşak kil zeminler üzerinde genellikle toplam gerilmelere göre hesap yapılmaktadır.

Yumuşak kil zeminler üzerinde düşey yönde uygulanan yükler nedeniyle zeminde yatay hareketler oluşur ve bu hareketler nedeniyle zeminde kayma oluşur. Gerilme artışı ile yumuşak zeminde oluşan gelen hareketler sonucunda boşluk suyu basınçları artmaktadır. Zemini eğer suya doymuş ve permeabilitesi düşükse suyun drene olması ve ilave boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi uzun sürede gerçekleşir. Zemindeki boşluk suyu basıncının sönmelenmesi sonucunda zeminde meydana gelen zamana bağlı düşey deformasyon konsolidasyon oturmasıdır. Konsolidasyon neticesinde mühendislik yapısında toplam veya farklı oturmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle ince daneli zeminlerde karşılaşılabilecek önemli sorunların başında gelmekte ve mühendislik açısından önem arz etmektedir.

Zeminlerin konsolidasyon oturması davranışının ve miktarının tahmini için çeşitli modeller geliştirilmiş ve halen çalışmalara devam edilmektedir. Konsolidasyon zamana bağlı bir oturma olduğu için deneylerin zaman alması araştırmacıları istatistiksel yöntemlere yönlendirmiştir. 1940'lı yıllardan itibaren yapılan çalışmalarda zeminlerin

Granülometresi, plastisite ve indeks özellikleri ile zeminlerin sıkışma parametrelerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Sridharan ve Nagaraj (2005), Sivrikaya vd. (2008), Di Matteo vd. (2009) ve Jesmani vd. (2012) çeşitli bağıntılar oluşturmuştur (Sünnetçi ve Ersoy, 2016).

Zeminlerde kayma mukavemeti parametreleri “kohezyon (c)” ve “kayma direnci açısı(ϕ)” arazi deneyleri veya laboratuvar deneyleri ile tespit edilirler. Laboratuvar ortamında genel olarak serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmaktadır. Veyn deneyleri ise hem laboratuvar hem de arazide de kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı basınçlarda konsolide edilmiş düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) killerin kayma mukavemeti parametreleri ile ön konsolidasyon basıncı arasında korelasyonlar oluşturulmuştur. Ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin Serbest basınç, Kesme kutusu ve Veyn deneylerinde c ve ϕ değerlerinin sonuçları incelenmiştir.

Çalışmanın materyal bölümünde killer hakkında; killerin mineral yapısı, mineral çeşitleri, tanımlanması ve sınıflandırılması, problemli kil grupları ve killerin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Yöntem bölümünde zeminlerin kayma mukavemeti, kil zeminlerin kayma mukavemeti, konsolidasyon ve killerde konsolidasyon kuramları anlatılmıştır.

Yapılan deneyler ve uygulanan metotlar bölümünde kullanılan kil zeminlerin, indeks özelliklerinin belirlenmesi için yapılan elek analizi deneyi, hidrometre deneyi, piknometre deneyi ve kıvam limitlerinin nasıl yapıldığı anlatılmış sonrasında kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için laboratuvarda yapılan Serbest basınç, Kesme kutusu ve Veyn deneyleri anlatılmıştır.

Araştırma sonuçları bölümünde deney sonuçları grafikler halinde verilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Kil ve silt gibi ince taneli zeminler, iri taneli zeminlerin aksine ortamda suyun varlığına bağlı olarak şişme veya büzülme eğilimi gösterdikleri için, geoteknik mühendisliği açısından, genellikle problemli zeminler olarak bilinmektedir. Bu tür zeminlerin oturma ve şişme-büzülme potansiyelinin diğer zemin cinslerine göre daha yüksek olması, üzerinde inşa edilen mühendislik yapılarının taşıyıcı unsurlarını etkilemekte ve yapılarda deformasyonların oluşmasına ve dolayısıyla yapıda hasarlar oluşmasına neden olur. Bu nedenle zemin özellikleri konusunda (fiziksel özellikleri,

geçirimsizliği, sıkışabilirliği vb.) yeterli bilgiye sahip olunması ve zeminlerin gerilme-deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesi ve zeminin üzerine kurulacak mühendislik yapısının temel tasarımı için kayma mukavemetinin belirlenmesi, taşıma gücü hesabı, konsolidasyon oturması hesabı için gereklidir. Zeminlerin oturma davranışı laboratuvar ortamında yapılan konsolidasyon deneyi ile belirlenir. Konsolidasyonda örselenmemiş kil zemin numunelerinin boşluklarında bulunan su hareketine izin verilerek yük altında sıkışmasına izin verilir.

Tez çalışmasında laboratuvarında farklı konsolidasyon basınçlarında, düşük ve yüksek plastisiteli kil numuneler kullanılarak yapılan deneylerle konsolidasyon basıncının zeminin kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla,

- Likit kıvamda, düşük ve yüksek plastisiteli kil numunelerin hazırlanmış,
- Hazırlanan likit kıvamdaki numunelerin bir hazne içerisine dökülerek, farklı konsolidasyon basınçlarında konsolidasyon işlemine tabi tutulmuştur.
- Hazne içerisinde konsolidasyonunu tamamlamış numuneden örnekler alarak, örnekler üzerinde serbest basınç, veyn, kesme kutusu deneyleri yapılmış, her bir konsolidasyon basıncı için numunenin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmiştir.
- Bu deneyler düşük ve yüksek plastisiteli kil numuneler için ayrı ayrı yapılmıştır.
- Deneylerden elde edilen kayma mukavemeti ve konsolidasyon basıncı arasında anlamlı yeni bağıntılarının oluşturulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularından olan kil zeminlerin davranışlarıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda kil zeminlerin indeks özelliklerinin kayma mukavemetine, konsolidasyon oturmasına olan etkileri incelenmiştir. Kil zeminlerin stabilite problemlerinin çözümlenmesinde önem arz eden kayma mukavemeti parametreleri, konsolidasyon parametreleri, drenajlı ve drenajsız koşullarda arazi ve laboratuvar deneyleriyle tayin edilmiş ve yorumlanmıştır. Literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Yasuhara, Hirao ve Hyde (1992) yaptıkları çalışmada, Arake kili ile yapılan bir dizi üç eksenli deneylerinden tekrarlı yükleme sırasında ve sonrasında kilin mukavemeti ve deformasyon davranışını araştırmışlardır. Normal konsolide killerde, çevrimsel yükleme, deformasyon büyüklüğüne bağlı olarak kil zeminlerin asal gerilme ekseninin azalmasına sebep olmuştur. Çevrimsel yükleme sonrasında yapılan üç eksenli deneylerde drenajsız mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Ancak, drenaja izin verildiğinde boşluk basıncının azalmasına bağlı olarak drenajsız mukavemetin arttığı gözlenmiştir. Drenajsız mukavemetin hesaplanması için gerekli A_0 , C_s , ve C_c parametreleri ödometre ve üç eksenli basınç deneylerinden elde edilmiştir.

Berilgen (2003) yaptığı çalışmada, yüksek su muhtevasına sahip konsolidasyonu tamamlanmamış zeminlerde, çok büyük miktarda düşey deformasyon (oturma) meydana geldiğinden bu tür zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplamak için analizler yapmıştır. Sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri ile efektif gerilme-boşluk oranı ($e-\sigma_v'$) ve permeabilite-boşluk oranı ($k-e$) ilişkisi araştırılmıştır. Farklı plastisite indisine sahip numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda killerin yüksek su muhtevalarında düşük efektif gerilme seviyelerindeki boşluk oranı değerlerinin yüksek plastisiteli kil zeminlerde büyük, düşük plastisiteye sahip silt oranı yüksek killi zeminlerde ise küçük değerler aldığı gözlenmiştir. Gerilme seviyeleri arttıkça yüksek düşük plastisiteli killerin yüksek plastisiteli killere göre daha yüksek boşluk oranına sahip oldukları ve oturma miktarının daha düşük olduğu görülmüştür.

Baydoğan (2007), üç boyutlu konsolidasyon üzerine yaptığı çalışma da klasik ödometre deneyi ile yeni deney sistemi Model ayaklı deney aleti ile yapılan deneyleri kıyaslamıştır. Tüm deneylerin oturma-gerilme eğrileri çizilip karşılaştırılmış ve klasik ödometrede düşey yöndeki deformasyonların üç boyutlu sistemdeki düşey deformasyona göre daha düşük olduğu görülmüştür. Oturma-zaman eğrileri kıyaslaması yapıldığında üç boyutlu

sistemde oturma süresinin daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu iki durumda klasik ödometre de tek yönlü konsolidasyona bırakılan numunenin yükleme arttıkça daha rijit hale geldiği, bundan dolayı da düşey yönde deformasyonunun güçleştiği ve oturma süresinin uzadığı şeklinde açıklanmıştır. Yeni deney sisteminin arazi şartlarına daha yakın sonuçlar verdiği fakat kesin bir sonuç için arazi deneyleri yapıp oturmalarının izlenmesi gerektiğini söylemiştir.

Kılıç (2007) yaptığı çalışmada, zeminlerin konsolidasyon özelliklerinden olan sıkışma indisi, kabarma indisi ve her yük kademesinde hacimsel sıkışma katsayısı parametrelerinin, çeşitli zemin sınıflarına ait kil numuneleri üzerinde yapılmış olan konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen korelasyonlar ile istatistiksel değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada, zemin indeks özelliklerinin sıkışma ve kabarma indisi ile hacimsel sıkışma katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, yüksek oranda zemin plastisite özelliklerinin, birim hacim ağırlığı ile boşluk oranının ise zemin oturma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Zeminin plastisite özelliğinin ve zemin sınıfının, konsolidasyon oturmalarında etkisinin büyük olduğu gözlenmiştir. Zemin permeabilitesi, aşırı konsolidasyon oranı ve zemin minerolojisi gibi parametrelerinin de göz önüne alınması, elde edilen ve sunulan sonuçları büyük ölçüde etkileyeceği düşünülmüştür.

Yüksel (2007) yaptığı tez çalışması kapsamında konsolidasyon deneyleri yapmış ve deneyleri boyunca değişen sürelerde bekletilen kil zemin numunelerinin konsolidasyon davranışı sonucunda oluşan fabrik yapısı araştırmıştır. Konsolidasyon davranışını ve konsolidasyon sırasında kilin yapısında meydana gelen değişimleri taramalı elektron mikroskopu (ESEM) altında incelemiştir. Elde edilen sonuçlardan numunelerin sabit gerilme altında bekleme süresi arttıkça boşluk oranında (e) azalma olduğu, bekleme süreleri esas alındığında ise gerilme arttıkça boşluk oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin uygulanan maksimum gerilme altında konsolide olma süresine bağlı olarak kil dane ve minerallerinin bir yönelme davranışında bulunduğu ve her yeni yüklemenin kil yapısındaki dizilimi değiştirdiği görülmüştür. Yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda her yükleme kademesine ait konsolidasyon katsayılarının (Cv) hem gerilme artışından hem de kil yapısındaki değişiminden dolayı her deney grubunda farklı bulunmuştur. Konsolidasyon katsayılarından elde edilen permeabilite katsayılarında (k) genel olarak konsolidasyona paralel bir şekilde azalma eğilimi olduğu tespit edilmiştir.

Ataç (2009) çalışmasında farklı fiziksel özelliklere sahip kil numuneler üzerinde halka kesme deneyleri ve tekrarlı kesme deneyleri yaparak plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisini araştırmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti açısının belirlenmesi için çeşitli korelasyonlar geliştirilmiş ve en güvenilir sonuçların kalıcı kayma mukavemeti açısıyla likit limit ve plastisite indisi arasındaki ilişkilerden elde edilen sonuçlar olduğu tespit edilmiştir. Artan likit limit ve plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığı görülmüştür. Daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi ve korelasyonların geliştirilmesi için daha fazla deney yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Deneyler esnasında boşluk suyu basıncının ölçülmesi ve halka kesme deney aletinin hızının düşürülmesi gerektiği önerilmiştir.

Öser (2010) yaptığı çalışmada, yumuşak zeminler üzerine inşa edilecek dolguların tasarımında kullanılmak üzere limit denge ve zemin plastisitesi teorilerini birlikte kullanan melez bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem ile dolgunun limit yüksekliğinin belirlenmiş, gelişmiş gerilme izi yöntemiyle de zemin elemanlarında göçmeye neden olmayacak kademe yükü belirlenerek yükleme yapılmış, zeminde meydana gelen hacimsel ve kayma deformasyonları ile konsolidasyon oturmaları hesaplanmıştır. Hacimsel ve kayma deformasyonlarının karşılaştırılmasında, yüzeye yakın olan zemin elemanlarının deformasyon değerlerinin hem gerilme izi yöntemi hem de Plaxis programı ile birbirine yakın elde edildiği görülmüştür. Çalışma kapsamında geliştirilen ve kullanılan yöntemlerin ve programların karşılaştırılması sonucu, yöntemlerin gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Olsson (2010), yumuşak killerin uzun vadede oturmalarının hesaplanması üzerine çalışmalar yapmıştır. İsveç Göteborg bölgesindeki yumuşak killeri kullanmıştır. İki gerçek saha vakası ve bir modellenen vaka ile çalışılmıştır. Olsson konsolidasyon oturma durumunu İsveç'te yumuşak zeminlerde oturmayı hesaplamak için en yaygın kullanılan Embankco, GS Settlement ve Plaxis-Soft Soil Creep programları ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda yaklaşık değerlere ulaşılmıştır.

Kahraman (2012), zemin indeks özellikleri ile konsolidasyon parametreleri arasında tek değişkenli lineer bağıntılar geliştirilmiştir. Sıkışma indisi, kabarma indisi, hacimsel sıkışma katsayısı ile indeks özellikleri arasında çeşitli zemin sınıflarına ait numunelerden elde edilen veriler kullanılarak geçmiş çalışmalara göre daha güçlü istatistiksel veriler elde edilmiştir. Tüm zemin sınıfları, CH zemin sınıfı, CL zemin sınıfı, MH-OH zemin sınıfı, ML-OL zemin sınıfı, kil zemin sınıfı, silt zemin sınıfı, yüksek plastisiteli zemin sınıfı, düşük plastisiteli zemin sınıfı, aşırı konsolide zemin sınıfı ve normal konsolide

zemin sınıfı ile ilgili normal denklemleri bulunup tablolaştırılmıştır. Zemin sınıfının, indeks özelliklerinin deney başı hacim ağırlığı ve boşluk oranının konsolidasyon oturmasında önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.

Binarbaşı (2014) yaptığı çalışmada farklı indeks özelliklerine sahip killi zemin numuneleri üzerinde bilgisayar kontrollü tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmış ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiş, korelasyonlar geliştirilmiştir. Likit limit, plastik limit, kil yüzdesi ve plastisite indisi ile kalıcı mukavemet açısının ters orantılı olduğu görülmüştür. Artan kayma mukavemeti açısı ile kalıcı kayma mukavemeti de artmıştır. Endeks özellikleriyle (likit limit, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranı), kalıcı kayma mukavemeti arasında korelasyonlar bulunmuştur. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen bağıntıların artan deney sayısı ile geliştirilip değiştirilmesinin mümkün olabileceği de eklenmiştir.

Satı (2016) yaptığı çalışmada, laboratuvarında örselenmiş numuneler üzerinde üç farklı sıkıştırma enerjisinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçları altında suya doymun durumda ve su muhtevası değerindeki doymunluk oranında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirmiştir. Sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin drenajlı koşullarda, suya doymun ve doymun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişimlerini incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarından doymun ve doymun olmayan durumda, üç farklı sıkıştırma enerjisinde kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin doymun durumdaki değerler ile yaklaşık olarak aynı olması nedeniyle kalıcı kayma mukavemeti açılarında bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir. Kalıcı kayma mukavemetini elde edebilmek amacıyla doymun olmayan durumda yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden, istenilen kesme yüzeyinin sağlanamamasından dolayı anlamlı sonuçlar elde edilemediği görülmüştür.

Sünnetci ve Ersoy (2016), yaptıkları çalışmada killerin konsolidasyon ve plastik özellikleri arasında ilişki olup olmadığını araştırmışlardır. Elde ettikleri verilerden regrasyon analizleri yaparak ön konsolidasyon basıncı ve likit limit arasında korelasyon katsayısı 0.5 olan istatistiksel bir ilişki belirlemişlerdir. Elde edilen bağıntı literatürdeki çalışmalar ile kıyaslandığında farklılıklar görülmüştür. Literatürdeki çalışmalarda zeminin konsolidasyon özellikleri ile plastik ve indeks özellikleri arasında çok daha yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür.

Uysal, Bağrıaçık ve Yıldız (2018) yumuşak kilin birincil konsolidasyon davranışını laboratuvarda ödometre deneyi yaparak ve Plaxis 2D sonlu elemanlar programında sayısal analizle karşılaştırmışlardır. Deneyler de kaolin kili kullanılmış dört kademede yükleme yapılarak basınç uygulanmıştır. Yeniden yapılanmış kil numunesinde klasik laboratuvar deneyleri yapılarak elde edilen parametrelerden modelleme yapılmıştır. Yapılan deneylerde permeabilitenin artmasıyla oturmaların hızlandığı, farklı basınç kademelerinde gerçekleştirilen analizler karşılaştırıldığında da basıncın artmasıyla permeabilitenin azaldığı görülmüştür. Modifiye sıkışma indisinin artmasıyla oturma hızının arttığı, ön konsolidasyon basıncının artmasıyla zamana bağlı oturma hızının azaldığı görülmüştür.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

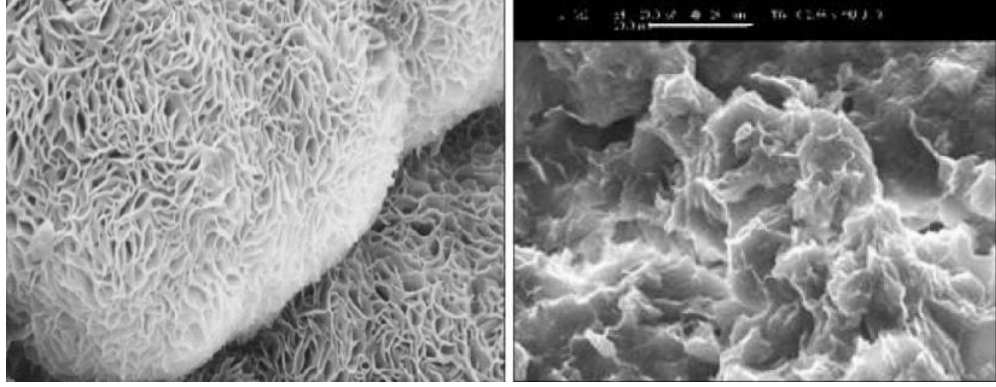
3.1. Materyal

3.1.1. Killer

Killer, plastisitesi olan, kohezyonlu, doğada oldukça fazla miktarda bulunan minerallerdir. Killerin, tıp, eczacılık, kozmetik sektörü, tarım, ormancılık, seramik sektörü, kauçuk sanayi, döküm sanayi, kimya sanayi gibi birçok endüstriyel alanda hammadde olarak kullanım alanı bulunmaktadır. İnşaat sektöründe de kerpiç, tuğla, kiremit, fayans gibi yapı malzemelerinde hammadde olarak, toprak baraj çekirdeklerinde, drenaj kanallarında, barajlarda ve atık depolarında geçirimsizliğin sağlanması amacıyla ve kendini tutamayan zeminlerde etkin destek sağlaması amacıyla kullanılmaktadır. Birçok alanda yararlı olan killer, geoteknik mühendisliğinde önemli sorunlara yol açan istenmeyen bir malzemelerdir. Kil mineralleri elektrokimyasal olarak çok aktiftirler ve bir zemin kütlesi içinde kil miktarı arttıkça zemin davranışı kil özelliklerine göre evrilmektedir (Durmuş, 2007).

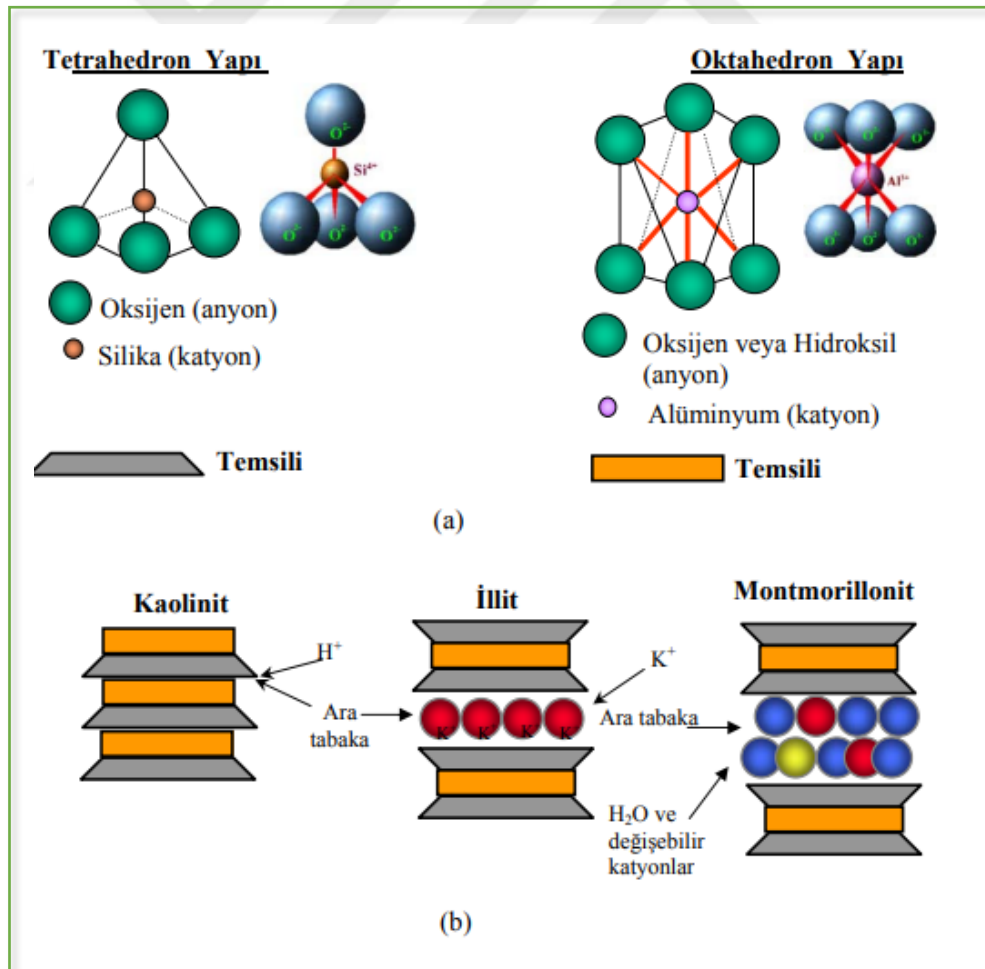
3.1.1.1. Kil minerali

Zemin sınıflandırma sistemlerinde kil taneleri, 0.002 mm veya daha küçük tane çapına sahip partiküller boyutta taneler olarak tanımlanmaktadır. Kil mineralleri silikatların ayrışmasıyla oluşan, yumuşak ve ince taneli, su ile karıştırıldığında çamur haline gelen ve şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahip olan, doğal bir ikincil zemin türüdür. Kil tanelerinin yapıları yaprakçıklı ve tabakalıdır, çok küçük olduklarından dolayı gözle ayırt edilemezler fakat mikroskop yardımıyla görülebilirler. Şekil 3.1’de mikroskop altındaki görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Kil tanelerinin mikroskop altındaki görüntüleri

Kil tanelerinin yaprakçıklı ve tabakalı yapıları iki, üç veya dört tetrahedron ve oktahedrondan meydana gelmişlerdir. Tetrahedron merkezinde silisyum katyonu, etrafında da dört oksijen anyonundan oluşmaktadır. Oktahedronda ise merkezinde alüminyum katyonu, etrafında altı oksijen veya hidroksil anyonundan oluşmaktadır (Grim, 1974). Kil tanelerinin yapıları ve temsili gösterimleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. (a) Kil tanelerinin yapısı, (b) temsili gösterimleri (Grim, 1974).

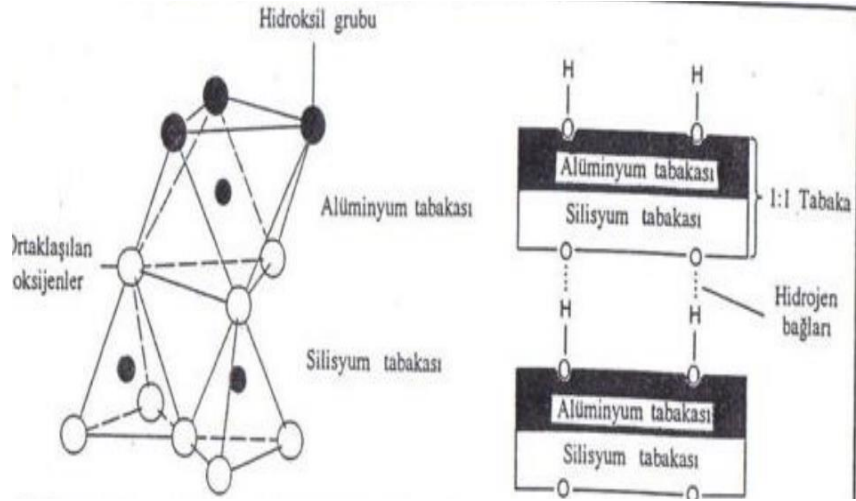
3.1.1.2. Killerin sınıflandırılması

Killer çok nadir saf halde bulunurlar. Genelde farklı minerallerle karışıktırlar ve kimyasal analiz yapılarak tanımlanırlar (Çizelge 3.1). Killer içerdikleri mineraller ve bileşimlerine göre beyaz, sarı, mavi, yeşil ve kahverengi renklerde bulunmaktadır. İçerdikleri minerallere ve kristal yapıya göre de sınıflandırılırlar. Kristal yapı, kil minerallerinin tabakamsı yapılarının kalınlığını, şişme ve büzülme potansiyellerini ve katyonların yer değiştirebilme kabiliyetlerini etkiler. Mühendislik amaçlı sınıflandırma da, kil mineralleri kaolinit, mika ve smektit grubu olarak 3 ana grupta incelenirler.

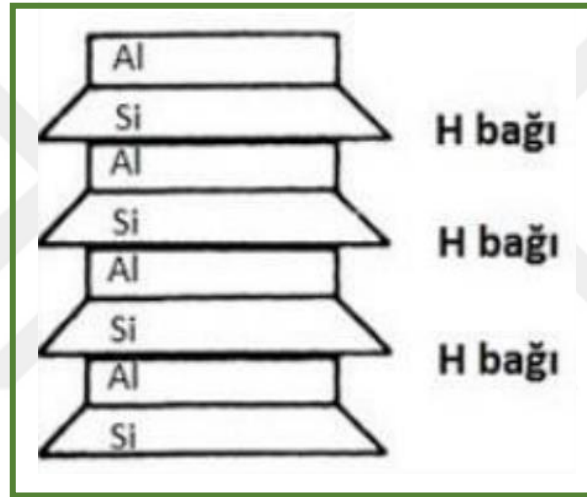
Çizelge 3.1. Kil mineral tiplerinin kimyasal oluşumu (Mitchell, 1193).

Kil Minerali Tipi	Formülü
Montmorillonit	$Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$
İllit	$K_0-2Al_4(Si_8-6AlO-2)O_{20}(OH)_4$
Kaolinit	$Al_2(OH)_4Si_2O_5$

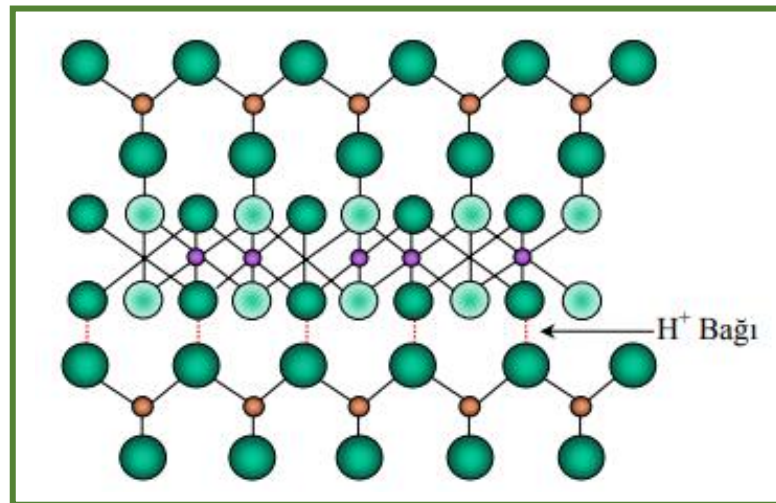
Kaolinit grubu, silika (tetrahedron) ve alümina (oktahedron) tabakaları içeren, 1:1 katman yapısında olan levha şeklindeki kristallerdir (Şekil 3.3, Şekil 3.4 Şekil 3.5). Kendi içerisinde kaolin, dikt ve nakrit, halloysit olmak üzere 3 gruba ayrılır. Kaolin grubu tabakalar arasında Hidrojen bağları ve Van Der Waals kuvvetleri mevcuttur. Çok güçlü bir bağ olan hidrojen bağları, kil mineralleri su ile temas ettiğinde tabakalar arasında su ve katyonların emilimini engelleyerek şişmeyi önler. Kaolinit grubu diğer kil minerallerine kıyasla kohezyon, adezyon, plastisite, çatlama, şişme ve büzülme özellikleri çok daha zayıftır. İçsel sürtünme açıları yüksek, katyon değişim kabiliyetleri ise düşüktür (Türköz, 2007).



Şekil 3.3. Kaolinit grubu kil minerallerinin yapısı

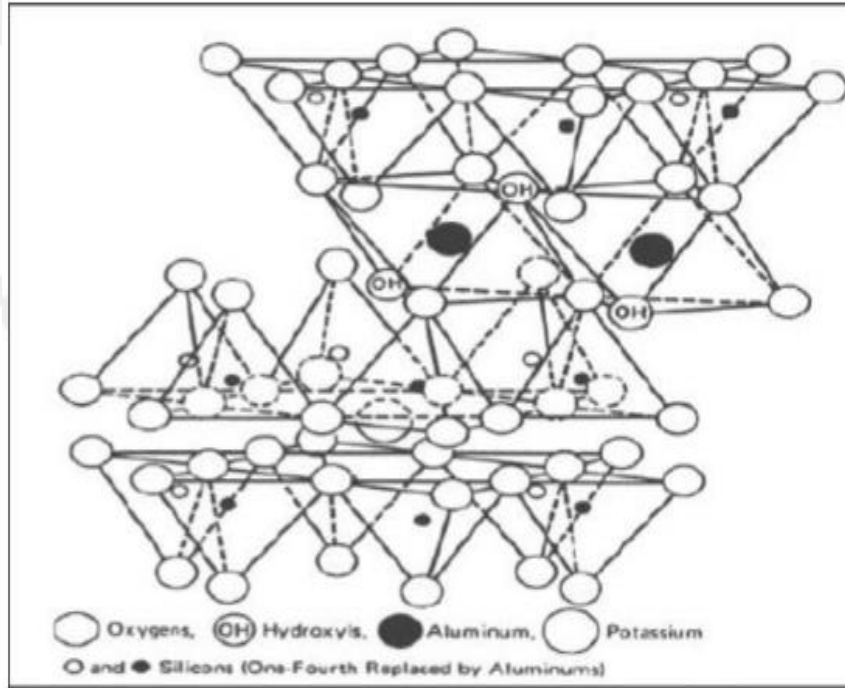


Şekil 3.4. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).

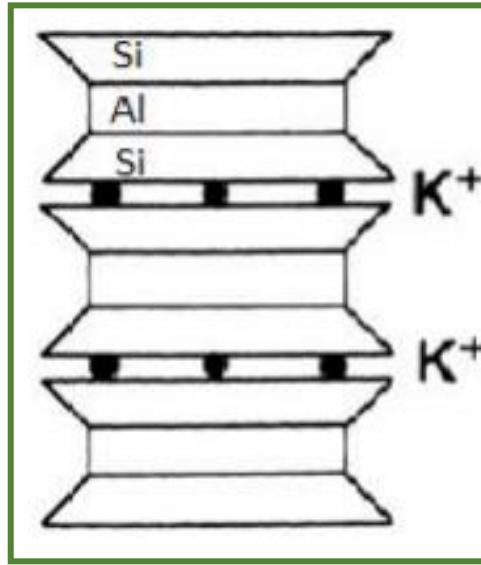


Şekil 3.5. Kaolinit grubu kil minerallerinin katman yapısı (Türköz, 2007)

Mika grubu; illit ve vermikulit tipi killeri kapsar. İllit grubunun yapısı silika tetrahedronlar ve alümina oktahedronlar olmak üzere iki tabakalı ve 2:1 katman yapısındadır. İllit iki alüminyum hidroksit ve bir silika levhalarından oluşmaktadır. Bu levhalar birbirine potasyum hidratlanması olayı ile bağlıdırlar.. İllit mineralli kil grubu suyla temas ettiklerinde şişme davranışı kaolinite göre daha fazla, montmorillonite göre ise azdır. İllit’ in katyon değişim kabiliyeti az, içsel sürtünme açısı fazladır. İllit mineralleri, diğer minerallere göre daneleri çok daha küçük ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 3.6’da illit kil mineralinin yapısı, Şekil 3.7’de şematik görünümü gösterilmektedir. Vermikulit, illit minerali yapısında bulunan potasyumun yerine magnezyumun olduğu kil mineralidir. Vermikülitler de şişme potansiyeli yüksek minerallerdir (Türköz, 2007).

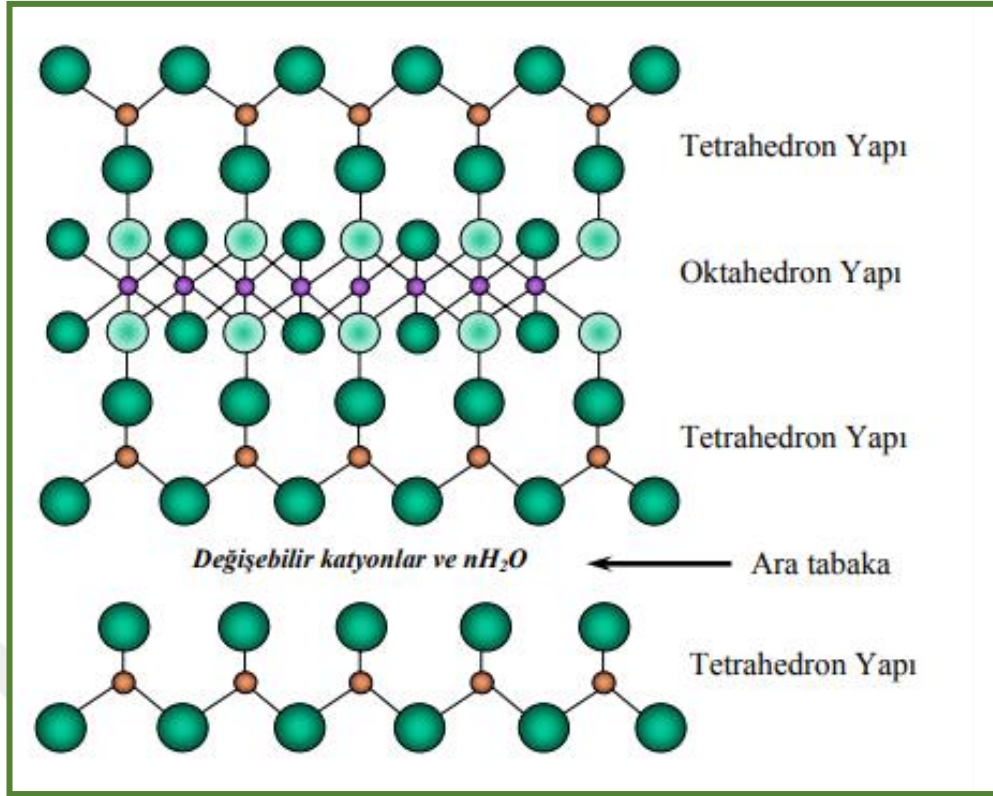


Şekil 3.6. İllit kil mineralinin yapısı

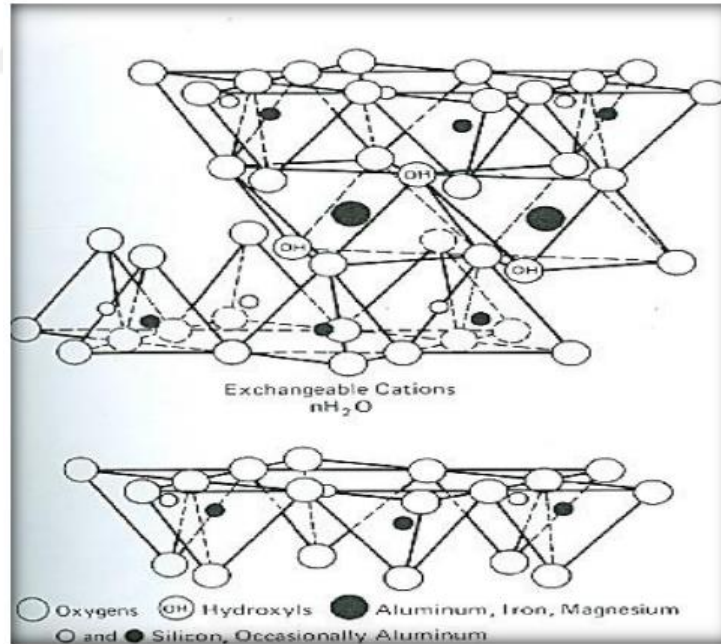


Şekil 3.7. İllit türü minerallerin şematik görünümü (Başer, 2009).

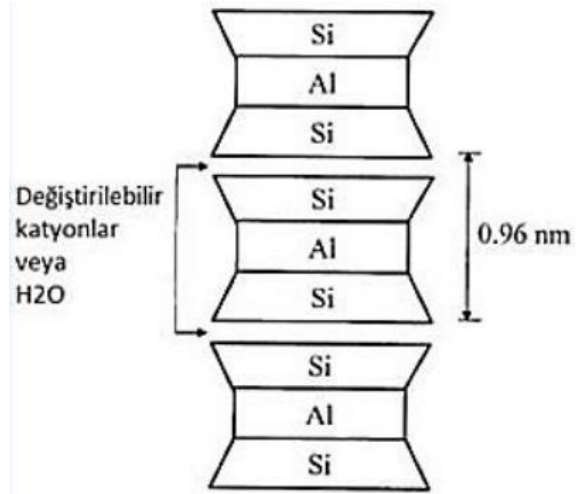
Smektit grubu; montmorillonitler kilini içerir. Montmorillonit killeri yapısında alüminyum hidroksit ve silika içeren üç katmanlı ve eş boyutlu minerallerdir (Şekil 3.8). Kendi içlerinde Montmorillonit, Baydellit, Nontronit, Saponit (Hektorit) olarak 4 gruba ayrılırlar. Şekil 3.9’da montmorillonitin atomik yapısı görülmektedir. Montmorillonit minerali 2 tetrahedral tabakanın arasına 1 oktahedral tabakanın sıkışması ile oluşur dolayısıyla katman yapısı 2:1 şeklindedir. Şekil 3.10’da montmorillonitin şematik yapısı görülmektedir. Montmorillonitin katyon değişim kapasitesi diğer gruplara kıyasla yüksektir. Montmorillonit killer suya maruz kaldıklarında düşük içsel sürtünmeye ve yüksek plastisiteye sahiptirler (Türköz, 2007).



Şekil 3.8. Smektit grubu kil minerallerinin katman yapısı (Türköz, 2007)



Şekil 3.9. Montmorillonitin atomik yapısı (Mitchell, 1976)



Şekil 3.10. Montmorillonitin şematik görünümü (Başer, 2009).

Mühendislik amaçları açısından kil minerallerinin tanımlanması ve değerlendirilmesine yönelik olarak literatür de birçok çalışma mevcuttur (Mitchell, 1993, Türköz, 2007). Çizelge 3.2’de mühendislik amaçları için yapısal grupları temsil eden üç ana kil mineral tipinin tipik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 3.2. Kil minerallerinin karşılaştırılması (Mitchell, 1993).

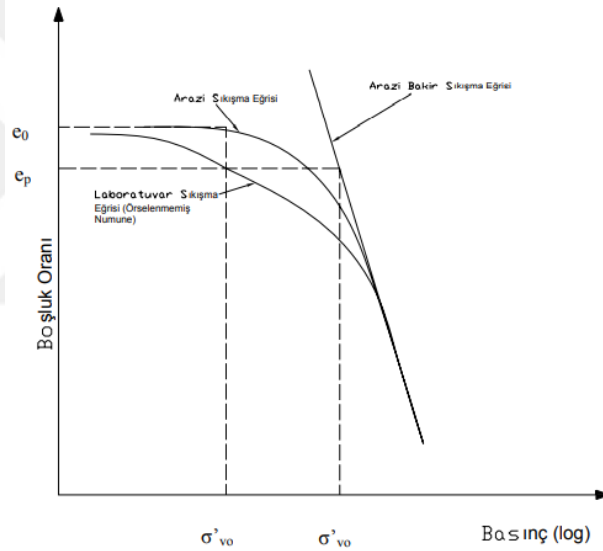
Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Tane Boyutu (μm)	0,01-1,0	0,02-2,0	0,5-5,0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m^2/g)	70-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m^2/g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektrik Yüğü	0,5-0,9	1,0-1,5	0
KDK ($\text{meq}/100\text{g}$)	80-150	10-40	3-15
Özgöl Gravite	2,35-2,7	2,6-3,0	2,6-2,8
Tabakalar arası mesafe (nm)	1,0-2,0	1,0	0,7
Tabakalar arası bağ	Van der Waal's bağları	K İyonları	Hidrojen
Net negatif yük (cmolc/kg)	80-120	15-40	2-5

3.1.2. Normal konsolide killler

Hali hazırda mevcut efektif gerilmeden (σ_0) fazlasını oluşumundan itibaren almamış killere "normal konsolide kil" denir. Normal konsolide killerin doğal su muhtevası çoğunlukla likit limit dolayında bulunur. Normal konsolide yumuşak killerin ani yüklenmesi boşluk suyu basıncının ani yükselmesine ve bu boşluk suyu basıncının sistem dışına çıkamadığında zeminde kritik gerilmeler meydana gelmesine neden olabilir. Bu tür durumlarda efektif gerilmenin sıfıra düşmesine ani göçme durumunu meydana gelmesine neden olabilir. Bu durumdan dolayı normal konsolide yumuşak killerde analizler toplam gerilmeler üzerinden yapılmalıdır.

3.1.3. Aşırı konsolide killer

Oluşumu sırasında veya sonrasında bugün aldığından daha fazla efektif gerilme (σ_0) almış killere 'Aşırı Konsolide Olmuş' veya 'Önceden Yüklenmiş' killer denir. Bundan dolayı aşırı konsolide killer katı veya sert kıvamdadırlar. Aşırı konsolide kil, geçmişte karşılaştığı en büyük basıncı tanımlayan ön konsolidasyon basıncı değerine ulaşılan kadar alacağı yükler altında normal konsolide kile göre daha düşük sıkışma davranışı gösterir. Ön konsolide basıncına ulaştıktan sonra zemin normal konsolide hale gelir ve gerilme-sıkışma ilişkisi değişir. Ulaşılan gerilme değerinden sonra uygulanan ilave gerilme artışları daha büyük sıkışmaya neden olur. Aşırı konsolide kil zeminin sıkışma eğrisi Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Aşırı konsolide kil zeminin sıkışma eğrisi

3.1.4. Konsolide olmamış killer

Karşılaşılan problemlili zeminlerden biri de, oluşumundan itibaren konsolidasyonunu tamamlamamış olan killerdir. Boşluk suyu basınçları henüz sönmemiş olmasından dolayı ilave bir gerilme aldıklarında göçme riski veya oluşan ilave boşluk suyu basıncı, hidrostatik değerlerin çok üstüne çıkabilir ve ciddi oturma problemleri meydana gelebilir. Konsolide olmamış kilin sıkışmasının hesaplanmasında, gerilme artışından gelen ve kilin devam etmekte olan konsolidasyonundan gelen bileşenlerin toplamı alınmalıdır.

3.2. Yöntem

Zemin mekaniğinde, problemler “gerilme problemleri” ve “deformasyon problemleri” olarak iki ana başlık altında toplanmaktadır. Yumuşak killerde oluşacak deformasyonlar oturmalar ve yanal hareketlerdir. Deformasyon problemleri, zeminin elastik ve plastik şekil değiştirmesidir. Zemin üstüne inşa edilen mühendislik yapısının tehlike altına girmemesi için deformasyonların müsaade edilen sınırların altında kalması gerekir. Bir mühendislik yapısında meydana gelen farklı oturmaları veya bir asfaltın üzerindeki dalgalanmaları deformasyon problemlerine örnek olarak verebiliriz. Bir temel veya şev üzerine gelen yük veya gerilme, deformasyon sınırlarının üzerinde olursa, o temel veya şevde yenilme diğer bir deyişle göçme meydana gelir. Zeminde yenilme meydana gelmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma gerilmesinin aşılması gerekir. Genel olarak yenilme, belli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinden meydana gelir. Zeminlerde kayma direnci “kohezyon (c)” ve “kayma direnci açısı (ϕ)” gibi iki parametre ile ifade edilmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesinde konsolidasyon basıncı, boşluk oranı, su muhtevası, doygunluk derecesi en önemli faktörlerdir. “kohezyon (c)” ve “kayma direnci açısı (ϕ)” parametreleri arazi deneyleri veya laboratuvar deneyleri ile tespit edilmektedirler (Özaydın, 2000).

3.2.1. Zeminlerin kayma mukavemeti

Zeminin kayma mukavemeti ise, göçmeye mahal vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesidir. Karayolu ve havalimanı temel tasarımında şev stabilite problemlerinde, iksa ve benzeri yapılarda kayma direnci önemli bir faktördür. Geoteknik mühendisliğinde kayma direnci önemli bir parametredir. Bu parametre yükleme, drenaj koşullarına ve zamana bağlı değişim gösterdiği için dikkat edilmesi gerekir.

Mühendislikte birçok göçme hipotezi vardır. Bunlardan en çok tercih edileni Mohr-Coulomb kırılma hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminin kayma direnci düşey ekseninde kayma gerilmeleri (τ), yatay ekseninde normal gerilmeler (σ) olarak gösterilen eğri ile temsil edilmektedir (Şekil 3.12). Bu doğrunun denklemi zeminin kayma mukavemetini vermektedir. Mohr-Coulomb hipotezinde kayma mukavemeti aşağıdaki denklemle gösterilir (Özaydın, 2000).

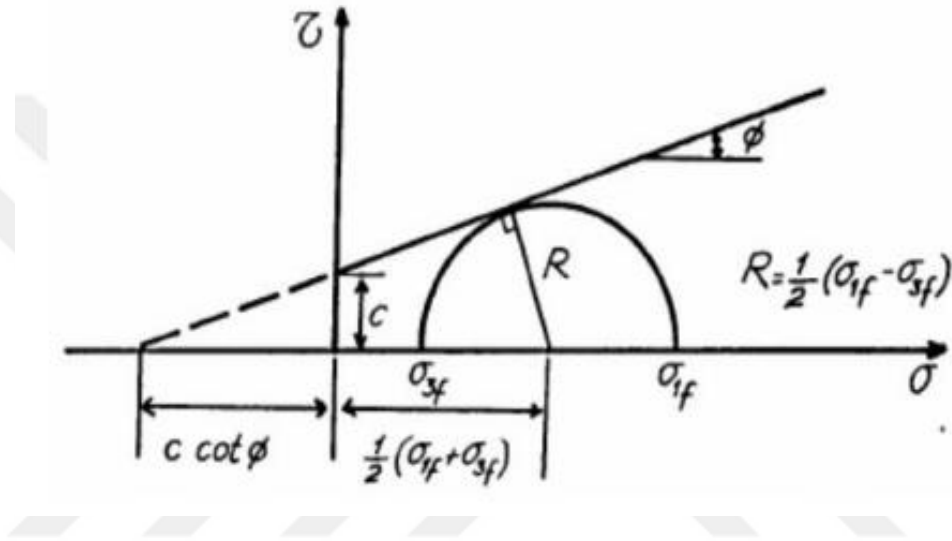
$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

τ_f =Göçme anındaki kayma mukavemeti değeri

σ = Kayma düzlemine etkiyen normal gerilme

c = Zeminin kohezyonu

ϕ =İçsel sürtünme açısı



Şekil 3.12. Kayma mukavemeti eğrisi

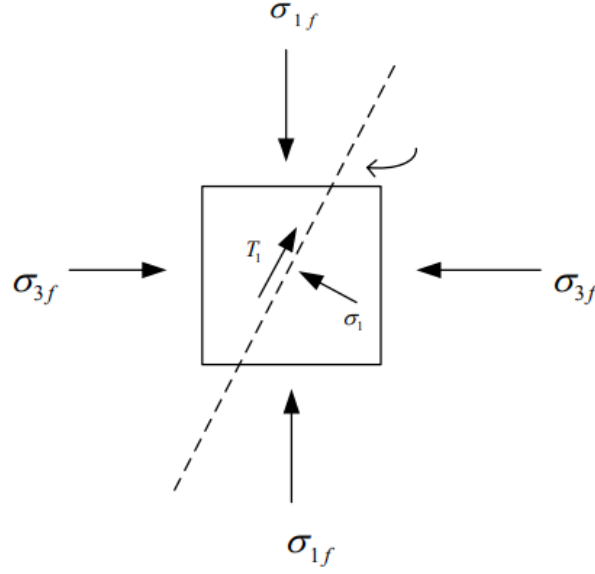
Göçme zarfına mukavemet zarfı da denilmektedir. Mohr dairesinin göçme (mukavemet) zarfına teğet olduğu noktadan çizilen doğru, göçme düzleminin eğimini yani en büyük asal gerilme düzlemi ile yaptığı açıyı vermektedir. Göçme düzleminin eğimi α_f aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$\alpha_f = 45 + \phi/2 \quad (3.2)$$

Göçme anındaki asal gerilmeler σ_{1f} ve σ_{3f} aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilirler. Asal gerilmeleri ve yenilme düzlemindeki gerilmeleri gösteren yenilme elemanları Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$\sigma_{3f} = \sigma_{1f} \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.4)$$



Şekil 3.13. Mohr – Coulomb göçme hipotezi - asal gerilmeler ve yenilme düzlemindeki gerilmeleri

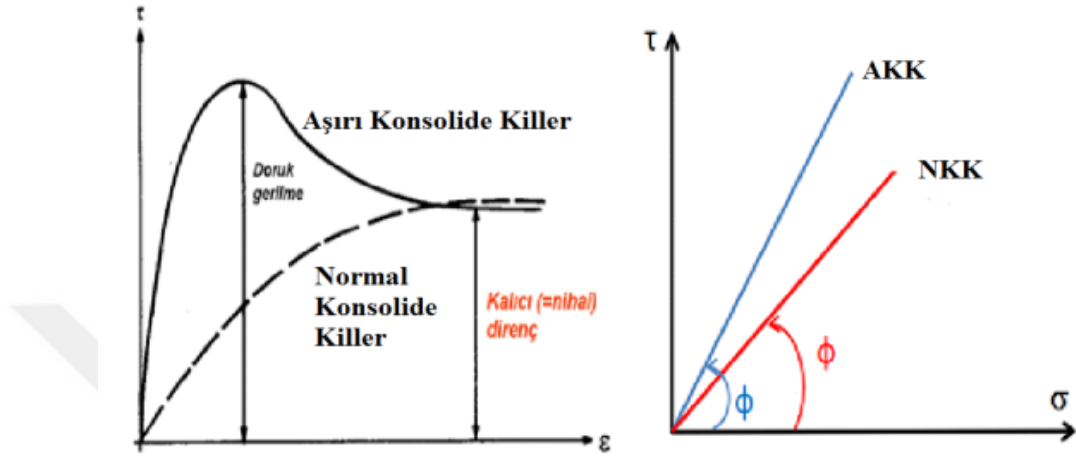
Zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla arazide Standart Penetrasyon Deneyi, Koni Penetrasyon Deneyi, Sondaj Kuyusu Kesme Aleti ve Arazi Kanatlı Kesici Deneyleri yapılmaktadır. Laboratuvarında kullanılan en yaygın yöntemler ise kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç ve laboratuvarında veyn deneyleridir.

3.2.1.2. Kil zeminlerin kayma mukavemeti

Killerin kayma direncini kumlardan ayıran en önemli özellik killerin düşük permeabilite özelliğidir. Bununla birlikte jeolojik etkenler yani daha önce maruz kaldığı yükler de kayma direncini belirleyen önemli etkenlerdir. Killerin kayma direnci; efektif gerilme düzeyi, kilin plastisitesi, çimentolanma, daneler arası çekme veya itme kuvveti, su muhtevası, doygunluk derecesi, kesilme hızı, numunenin gevrekliği ve ortamın anizotropluğu etkilenmektedir. Bu tür sebeplerden dolayı killerin kayma mukavemetini hesaplamak kumlara göre daha karmaşık ve zor bir problem olmaktadır (Önalp, 2007).

Yapılan çalışmalar neticesinde killerin davranışının daha açık bir şekilde tanımlanabilmesi için, jeolojik kökenlerine göre normal konsolide killer, aşırı konsolide killer, aşırı konsolide killer ve fisürlü killer olmak üzere 3 ana gruba ayrılmıştır. Aşırı

konsolide killer kayma davranışı olarak sıkı kumlara, normal konsolide killer ise gevşek kumların kayma davranışına benzemektedirler. Şekil 3.14’de aşırı konsolide killerin aynı deformasyona karşılık gelen kayma dirençleri normal konsolide killere göre daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14. Normal ve Aşırı konsolide killer için kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi

Arazide kil tabakaları suya doymuş ve suya doymuş olmayan durumlarda bulunmaktadır. Suya doymuş olmayan zeminlerde suyun emilmesinin de etkili olması nedeniyle bu tür ortamlarda gerilme birim deformasyon ilişkisi daha karmaşıktır ve bu tür zeminlerin kayma direncini belirlemek oldukça güçtür. Geoteknik mühendisleri genellikle güvenli tarafta kalmak için bu tarz suya doymuş olmayan zeminleri suya doymuş hale getirerek bulunan kayma direncine göre tasarım yaparlar.

3.2.2. Konsolidasyon

Zemin tabakası düşey yönde bir yük ile yüklendiğinde zemin tabakalarında efektif düşey gerilme artışına, dolayısıyla da sıkışmaya neden olmaktadır. Bu sıkışmanın sebepleri danelerin deformasyonu, boşluklardaki havanın ve/veya suyun sıkışması, boşluklardaki suyun dışarı çıkması ve zeminin hacminin azalmasıdır. Konsolidasyon oturması, efektif düşey gerilme artışı sonucunda artan boşluk suyu basıncının sönmülmesiyle zemin danelerinin yer değiştirmesi ile oluşan oturmalarla zemin tabakasındaki çakıl ve kum gibi iri daneli yüksek permeabiliteli zeminler üzerine yük uygulandığında; boşluk suyu basıncı kısa sürede sönmülür, ani (drenajsız) oturma ve

konsolidasyon (drenajlı) oturma hemen hemen aynı anda gerçekleşir dolayısıyla birbirinden ayıramazlar. Kil ve silt gibi ince daneli zeminler düşük permeabiliteli olduklarından zemin tabakasındaki suyun dışarı çıkması uzun sürede meydana gelir. Dolayısıyla hacimsel sıkışma, ani oturmada çok daha uzun sürer ve hacimsel sıkışma miktarı ani oturmaya göre daha fazla olur. İnce daneli zeminlerdeki bu zamana bağlı konsolidasyon oturması, zemin üzerindeki yapılarda hasar oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle kil ve silt gibi ince taneli zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır.

3.2.3.Killerde konsolidasyon kuramları

Killerde konsolidasyon teorisi, kil zeminlerin konsolidasyon sürecindeki davranışı, konsolidasyondan oturmalarının hesaplanması ve konsolidasyon süresi hakkında bilgi verdiği için kullanılmıştır.

Terzaghi (1925), killerin sıkışmasında en önemli etkenin oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içinde sistem dışına atılması sonucu boşluk hacminde azalma olduğunu fark etmiş ve gözlemlerine dayanarak “**Terzaghi bir boyutlu konsolidasyon teorisi**” ni geliştirmiştir. Terzaghi bu teoride bir takım kabuller yapmıştır.

Bu teoriye göre;

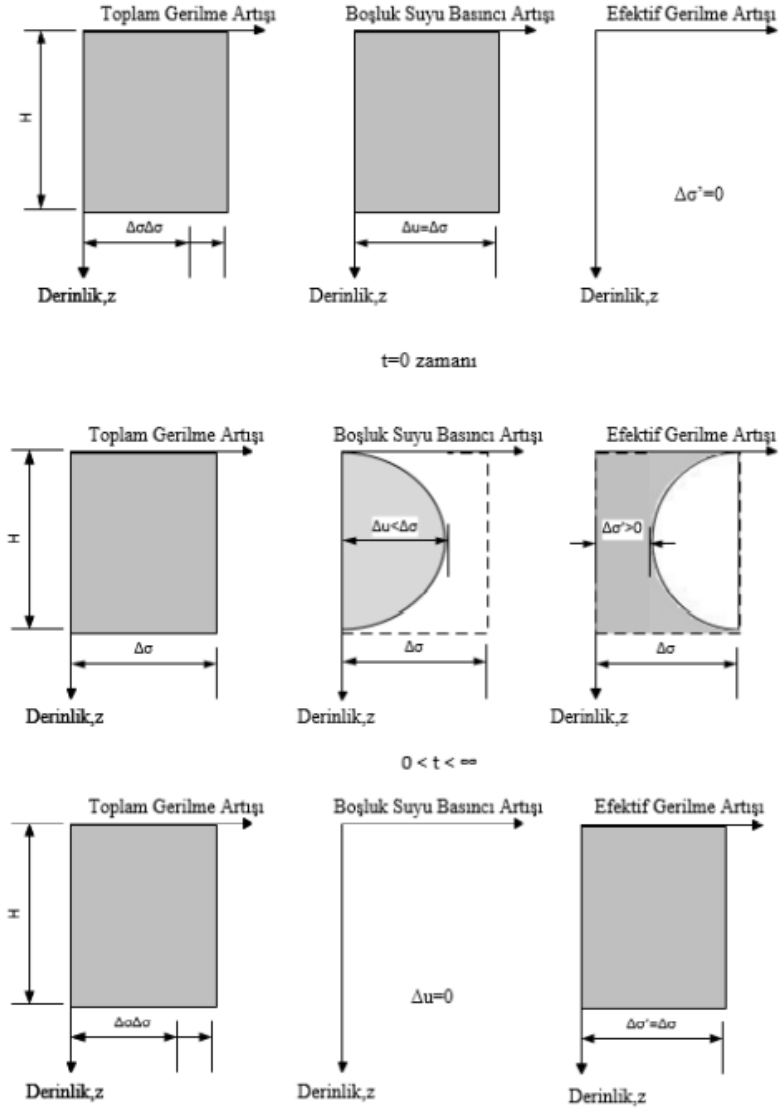
1. Zemin homojendir,
2. Zemin suya doygunudur ($S_r = \%100$),
3. Zemin içerisindeki suyun ve danelerin sıkışabilirliği ihmal edilebilir,
4. Zeminin kendi ağırlığı ihmal edilebilir,
5. Darcy kanunu geçerlidir ($v = k.i$),
6. Zemin içerisindeki suyun hareketi ve zemin sıkışması tek yönde oluşur ($k_x = k_y = 0$),
7. Zeminin permeabilite katsayısı deney boyunca sabittir.
8. Boşluk oranı efektif gerilmenin fonksiyonu olup zamanla değişmez,
$$e = f(\Delta\sigma_0),$$
9. Sıcaklık sabit kabul edilir. Çünkü sıcaklıktaki 10°C 'lik bir değişim suyun viskozitesinde $\% 30$ a varan değişimlere sebep olmaktadır.

Bu kabuller gerçekçi olmamasına rağmen farklı zemin tiplerindeki oturmaların tahminin de başarılı olması ve bu kabullerin konsolidasyon olayını daha basit çözülmesini

sağlamasından dolayı çok kullanılan bir teori olmuştur. Terzaghi'nin konsolidasyon teorisi halen kullanılmaktadır ayrıca geoteknikçiler tarafından ayrıntılı olarak incelenmeye ve teoride eksik olan noktalar açıklanmaya çalışılmıştır.

3.2.4. Konsolidasyon süreci

Terzaghi teorisinde sıkışma, permeabilite katsayısı düşük ince daneli zeminlerde yüklenme sonrasında fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içerisinde sönümlenmesiyle ortaya çıkar. Zemin ilk yüklendiğinde toplam gerilme boşluk suyu basıncıyla karşılanır. Zamanla boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle efektif gerilme toplam gerilmeye eşit olur (Önalp, 2007). Çizelge 3.3'te konsolidasyon sürecindeki gerilme durumları görülmektedir. Konsolidasyon, suya doygun geçirimsizliği düşük zeminlerde efektif gerilmelerdeki değişime bağlı olarak boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucunda zeminde meydana gelen hacimsel azalmadır. Konsolidasyon sürecindeki hacimsel azalmadan dolayı oluşan düşey yer değiştirmeye konsolidasyon oturması denir. Şekil 3.15'te zeminde yükleme yapıldıktan sonraki boşluk suyu basıncının, efektif gerilmenin yükselmesinin ve hacim azalmasının zaman parametrelerine bağlı olduğu konsolidasyon sürecinin tamamlanması görülmektedir.



Şekil 3.15. Konsolidasyon süreci (Das and Sobhan 2014).

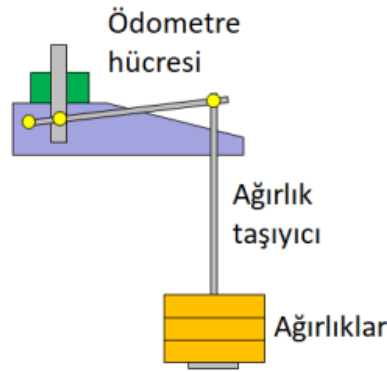
Çizelge 3.3. Konsolidasyon Sürecinde Gerilme Durumları (Das and Sobhan 2014)

Zaman (t)	Gerilme artışı ($\Delta\sigma$)	Artık Boşluk Suyu Basıncı (Δu)	Efektif Gerilme ($\Delta\sigma'$)
0	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	0
0 < t < ∞	$\Delta\sigma$	< $\Delta\sigma$	> 0
∞	$\Delta\sigma$	0	$\Delta\sigma$

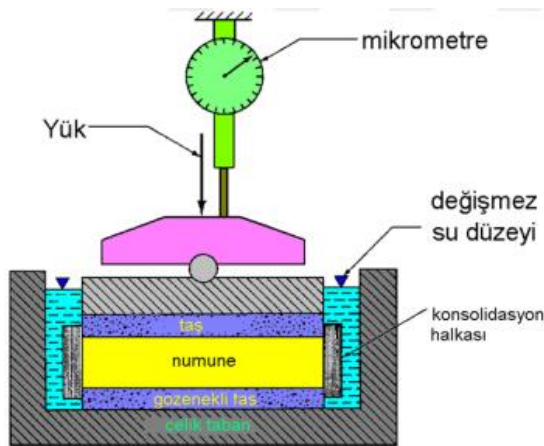
3.2.5. Konsolidasyon deneyi

Konsolidasyon deneyi, düşey eksenel basınç altında, yanal hareketi engellenmiş, suya doygun, örselenmemiş bir zemin numunesinin alt ve üst yüzeyine konan gözenekli taşlar ile zemin içindeki suyun düşey yönde drenajı sağlanarak, konsolidasyon miktarı ve hızının ölçüldüğü deneydir.

Deney de Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de görülen ödometre aleti kullanılır. Zemin numunesinin üzerine uygulanan düşey eksenel basınç sonrasında numune konsolidasyona bırakılır. Boşluk suyu basıncı sönümlenip, konsolidasyon oturmasının büyük ölçüde tamamlanmasına kadar devam edilir.

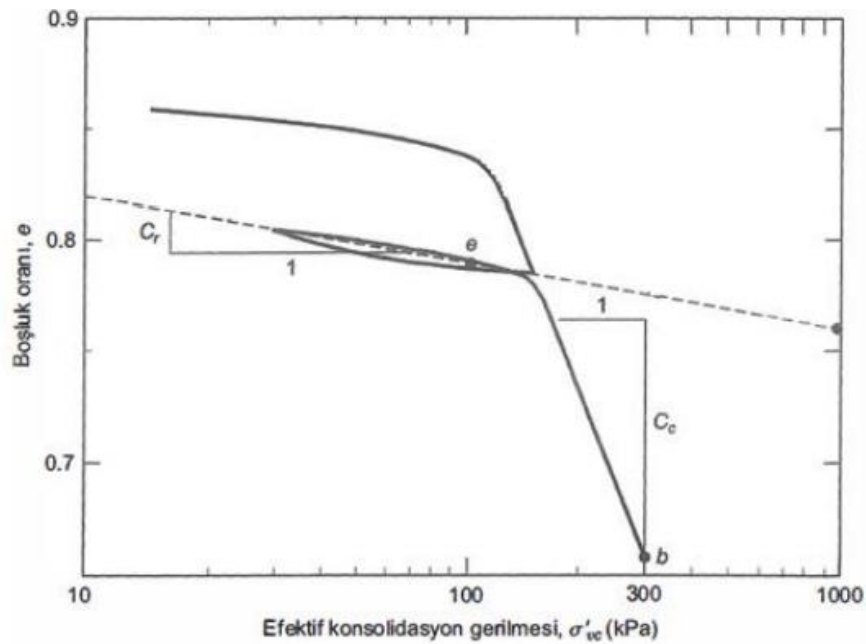


Şekil 3.16. Konsolidasyon (ödometre) deneyi düzeneği (Önalp, 2007)



Şekil 3.17. Ödometre aleti (Önalp, 2007)

Konsolidasyon deneyi sonucunda, boşluk oranı (e)-konsolidasyon basıncı (σ) grafiği çizilir (Şekil 3.18). Grafiğin logaritmik eksenlerdeki değerlerine göre zeminin sıkışma indisi (C_c), kabarma indisi (C_s), yeniden sıkışma indisi (C_r) değerleri belirlenir. Deneydeki amaç, düşey eksenel gerilme altında zeminin sıkışması, numunenin sıkışma özelliklerinin değerlendirilerek, arazideki zeminin oturmasının tahmin edilmesidir.



Şekil 3.18. Boşluk Oranı-Efektif Gerilme Grafiği - Logaritmik Eksende (Holtz vd. 2010)

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Kil Zeminler

4.1.1. Yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminler

Deneyisel çalışmada kullanılan yüksek plastisiteli kil zemin, Konya ili, Ilgın İlçesinde bulunan açık maden işletmesinden temin edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Yüksek plastisiteli kilin temin edildiği açık maden işletmesinden görseller

Deneyisel çalışma, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyisel çalışmada kullanılan düşük plastisiteli kil zemin ise, Konya'nın Selçuklu ilçesi, 2.

Organize Sanayi Bölgesinden arazide belirlenen uygun bir noktadan alınmıştır (Şekil 4.2).

Kil zeminler etüvde 100 °C’de kurutulmuş, bu işlem sonrasında öğütme makinasında öğütülmüştür. Kil zeminlerin sınıflandırılması için elek analizi, hidrometre ve kıvam limit deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.2. Kullanılan düşük plastisiteli zemin numunesinden görseller

4.2. Elek Analizi Deneyi

Kullanılacak yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminlerin sınıflarının belirlenmesi için elek analizi deneyleri yapılmıştır. Öncelikle zeminlerden çeyreklemeye metoduyla bir miktar numune alınmıştır. Alınan numuneler kurutulmuş, başlangıç kuru ağırlığı tartılmıştır. Ardından numuneler ASTM D 422 standartlarına uygun olarak yıkamalı analiz kabında 200 no’lu elek kullanılarak yıkanmış ve sonrasında elek üzerinde kalan numuneler etüvde kurutulmuştur. Kurumuş numuneler üzerinde elek analizi yapılmıştır (Şekil 4.3). Deneyler sonucunda bütün eleklerde kalan ve geçen yüzdelere Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca 200 No’lu elekten geçen ince daneli zeminlerin dane çapı dağılımının belirlenmesi için hidrometre deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Düşük Plastisiteli Kil Elek Analizi Sonuçları

Elek No	Açıklık (mm)	Geçen %
3/4''	19	100
4	4,76	97,2
10	2	90,3
16	1,19	85,7
40	0,42	77,7
200	0,075	68,4

Çizelge 4.2. Yüksek Plastisiteli Kil Elek Analizi Sonuçları

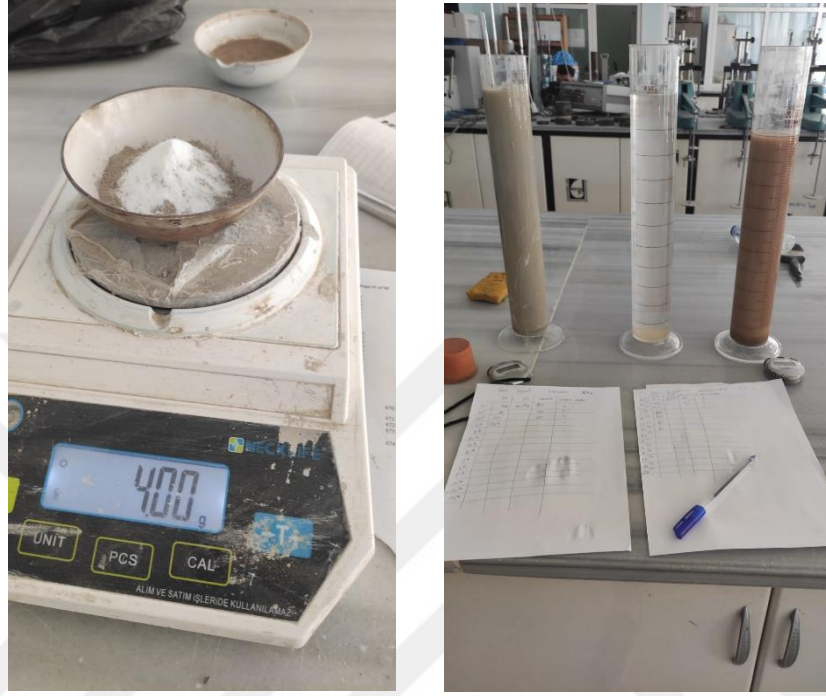
Elek No	Açıklık (mm)	Geçen %
3/4''	19	100
4	4,76	100
10	2	91,7
16	1,19	88,2
40	0,42	69,3
200	0,075	52,1

**Şekil 4.3.** Elekler üzerinde kalan numuneler

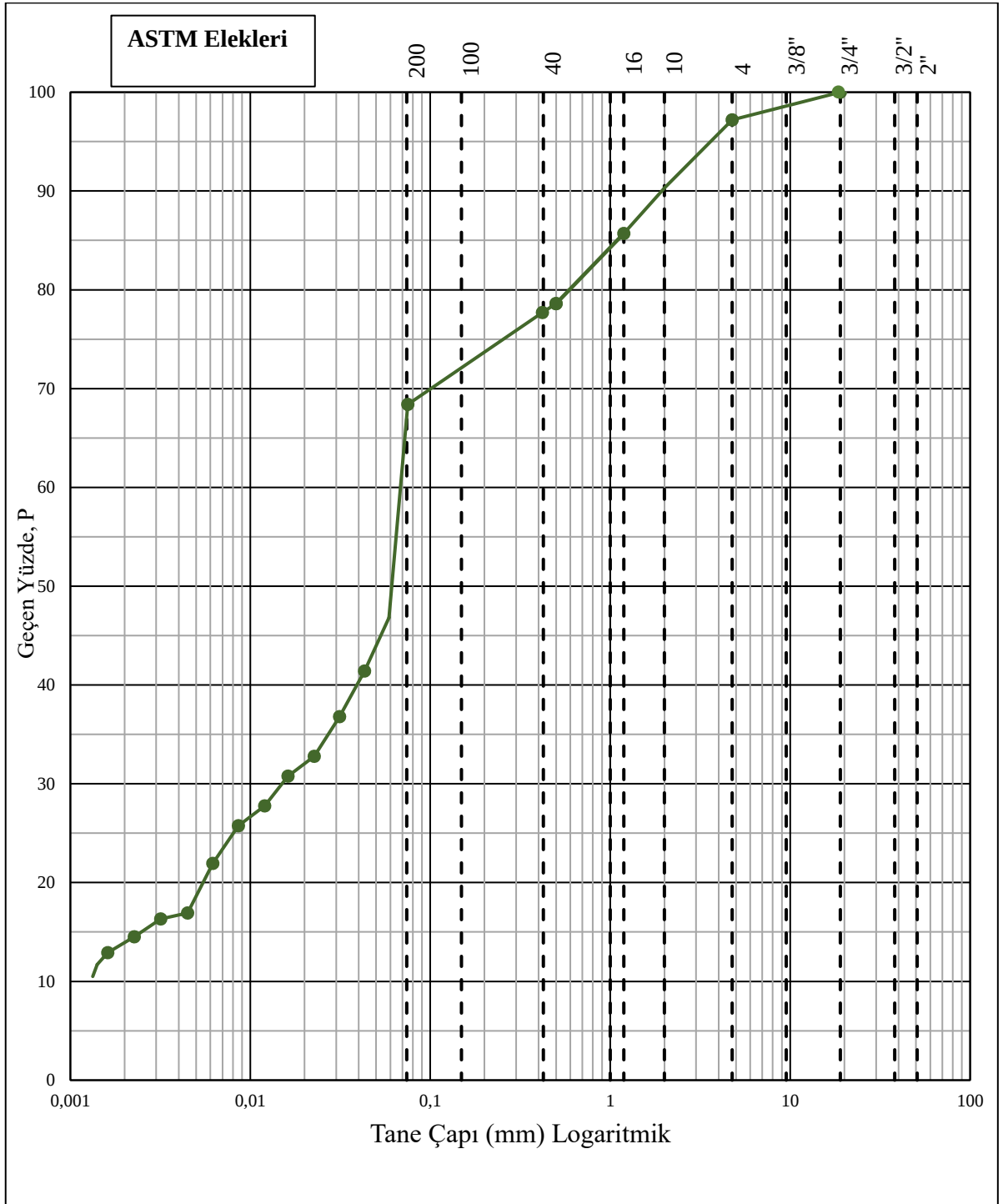
4.3. Hidrometre Deneyi

Hidrometre analizi, ASTM D 422 standardına uygun çökelme prensibine göre yapılmıştır. Deneyde öncelikle 200 No'lu elekten geçen kurutulmuş 50 gram zemine 5 gram hekzametafosfat ilave edilerek karıştırılmış sonrasında 1000 ml'lik silindirik kap (mezür) içerisine boşaltılmıştır. Mezürün 1000 ml hacim ölçek çizgisine kadar su ilave

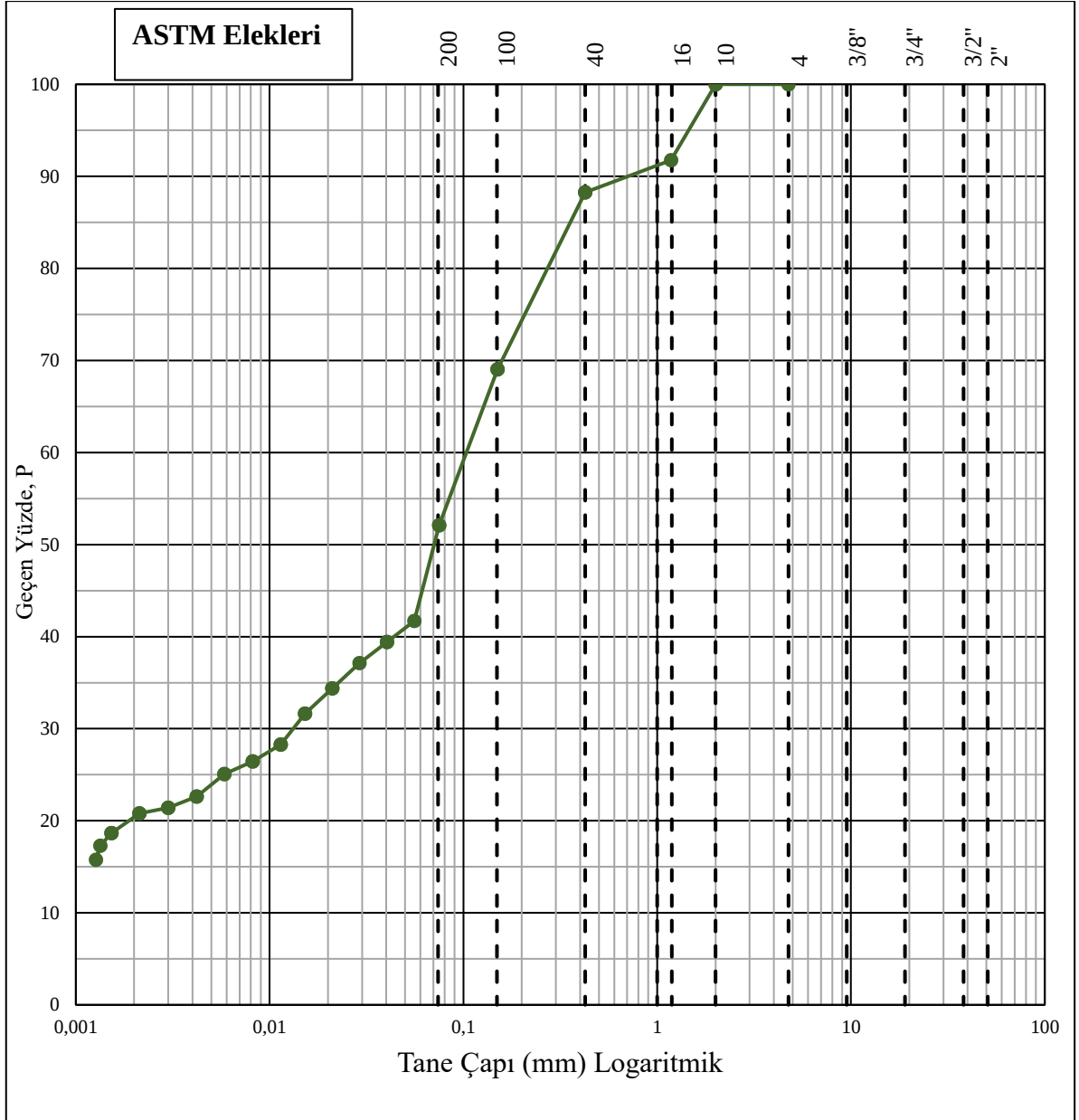
edilmiş, ağzı kapatılarak bir süre çalkalanmıştır. Hazırlanan süspansiyondan kronometre eşliğinde belirli zamanlarda hidrometre okumaları yapılmıştır (Şekil 4.4). Deney sonucunda sıcaklık düzeltmesi, dağıtıcı madde düzeltmesi ve menisküs düzeltmeleri yapılarak grafiğe eklenmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).



Şekil 4.4. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil zemin için hidrometre deneyi



Şekil 4.5. Düşük Plastisiteli Kil (CL) granülometrisi



Şekil 4.6. Yüksek Plastisiteli Kil (CH) granülometrisi

Çizelge 4.3'te düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminlerin granülometri sonuçları yüzde (%) olarak verilmiştir.

Çizelge 4.3. Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminlerin granülometri sonuçları

	Düşük Plastisiteli Kil	Yüksek Plastisiteli Kil
Çakıl (G)	%2,8	%0
Kum (S)	%28,8	%47,9
Silt (M)	%53,8	%30,7
Kil (C)	%14,6	%21,4

4.4. Piknometre Deneyi

Piknometre deneyi ile yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminlerin tane yoğunluğu (ρ_s) belirlenmiştir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Piknometre deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Piknometre deneyi sonuçları

	M_1 =şişe (g)	M_2 =şişe+kuru Zemin (g)	M_3 =şişe+kuru zemin +su (g)	M_4 =şişe+su (g)	ρ_s (g/cm ³)
Düşük Plastisiteli Zemin (CL)	38,87	55,27	149,71	139,36	2,71
Yüksek Plastisiteli Zemin (CL)	51,39	124,19	592,75	548,1	2,59



Şekil 4.7. Piknometre deneyi kabın darasının ölçümü işlemi (M1)



Şekil 4.8 Piknometre deneyi vakumlama işlemi

4.5. Kıvam Likit Deneyleri

Kıvam limitleri, ince daneli zeminlerde mühendislik davranışlarının belirlenmesinde kullanılan sınır su muhtevalarıdır. Kohezyonlu zeminler, zemin taneleriyle su arasındaki temaslar ve değişen su içeriğine göre sert, yumuşak ya da viskoz durumlarda olabilirler. İnce daneli zeminler suyun varlığından önemli ölçüde etkilenir ve zemin su muhtevalarındaki değişimler, plastisitesindeki değişimler Atterberg limitleri kavramları ile anlatılır (Holtz, Kovacs, Sheaden,2015).

Bu kavramlar;

Rötre limiti: Zemin su kaybederek kuruması sırasında büzülme davranışında yani hacminin küçülmesinde değişikliğin olmadığı su içeriğidir.

Plastik limit özelliği: Atterberg tarafından kilin plastisite özelliğini kaybettiği sınır su içeriği olarak tanımlanmıştır. Plastik limit deneyi zemine farklı miktarlarda su eklenerek hazırlanan numunelerin pürüzsüz bir yüzeyde elimizin iç kısmını kullanarak 3 mm inceliğine geldiğinde kopmaların ve çatlamların olduğu su içeriğinin belirlenmesidir. Deneyler ASTM D 4318-98 standardına uygun bir şekilde laboratuvarda yapılmıştır.

Likit limit: Likit limit viskoz akmanın alt sınırı yani zeminin kendi ağırlığı altında akmaya başladığı en düşük su içeriği olarak tanımlanmıştır. Deneyler ASTM D 4318-98 standardına uygun laboratuvarda Casagrande yöntemi ve düşen koni yöntemi ile yapılmıştır.

Casagrande Deneyi:

Likit limit deneyinde, 40 No'lu (0,425 mm) elekten elenmiş kil numunelere kademeli olarak damıtık su eklenerek iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar homojen olması amacıyla 1 gün boyunca oda sıcaklığında desikatörde bekletilmiştir. 24 saatlik sürenin sonunda numuneler üzerinde Casagrande deneyleri yapılmıştır.

Casagrande aletinin yarım küre şeklindeki pirinç tası içerisine hazırlanmış numunelerden bir miktar alınarak spatula yardımıyla boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilmiş ve orta kısmına standart oyuk bıçağı ile yarık açılmıştır. Pirinç tas belirli bir hızla sistemdeki kolun çevrilmesiyle belirli yükseklikten düşürülerek vuruşlar yapılmıştır (Şekil 4.9). Pirinç tasın ortasından açılan yarık 10 mm olana kadar vuruşlar yapılmış ve kaydedilmiştir. Sonrasında pirinç tasan bir miktar zemin alınıp tartılmış ve kaydedilmiş, ardından etüvde kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan kuru numune tartılıp su muhtevası hesaplanmıştır.

Bu işlem 5 farklı numunede tekrarlanmıştır. Su muhtevası-vuruş sayısı grafiği çizilmiş ve grafikte 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası zeminin likit limit değeri olmuştur. Deneyler numunelerin kurummasına izin vermemek adına hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Casagrande aletiyle likit limitin belirlenmesi

Koni Penetrasyon Deneyi:

Koni penetrasyon deneyinde de Casagrande deneyinde olduğu gibi 5 farklı su içeriğinde numuneler hazırlanmış ve desikatörde 1 gün bekletilmiştir. Hazırlanan numuneler boşluk kalmayacak şekilde deney kabına yerleştirilmiş ve koni batma cihazına yerleştirilmiştir. Koninin ucu numunenin yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiş ve toplamda 80 gram ağırlığındaki koni numunenin içine batmaya bırakılmıştır (Şekil 4.10). 5 saniyelik sonunda batma miktarları not edilmiştir. Deney sonunda kaplardan bir miktar zemin numunesi alınarak tartılmış ardından etüvde kurumaya bırakılmıştır. 1 gün sonunda kurutulmuş numune tartılmış ve kaydedilmiştir. Su içeriği-batma miktarı grafiği çizilmiştir. Batma doğrusunda 20 mm'lik batma miktarına karşılık gelen su muhtevasıyla zeminin likit limiti belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Düşen koni deneyi ile likit limitin belirlenmesi

Likit kıvamda hazırlanan numunelerde Casagrande deneyi ve koni Penetrasyon deneyinden elde edilen likit limit değerlerinin ortalamasının alındığı sonuçları Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil numunelerin kıvam limit deney sonuçları

	Yüksek plastisiteli kil	Düşük plastisiteli kil
Likit limiti (LL)	%56,5	%34,4
Plastik Limiti (PL)	%31	%20
Plastisite İndisi (PI)	%25,5	%14,4
Zemin Sınıfı	CH	CL

4.2. Zemin Numunelerinin Konsolide Edilmesi

4.2.1. Kil numunelerin hazırlanması

Tez çalışmasında konsolidasyon basıncının zeminin kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla,

- Likit kıvamda, düşük ve yüksek plastisiteli kil numuneler hazırlanmış,
- Hazırlanan likit kıvamdaki numunelerin bir hazne içerisine dökülerek, farklı konsolidasyon basınçlarında konsolidasyon işlemine tabi tutulmuştur.

- Hazne içerisinde konsolidasyonunu tamamlamış numuneden örnekler alarak, örnekler üzerinde serbest basınç deneyi, veyn deneyi ve kesme kutusu deneyleri yapılmış, her bir konsolidasyon basıncı için numunenin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.

- Bu deneyler düşük ve yüksek plastisiteli kil numuneler için ayrı ayrı yapılmıştır.

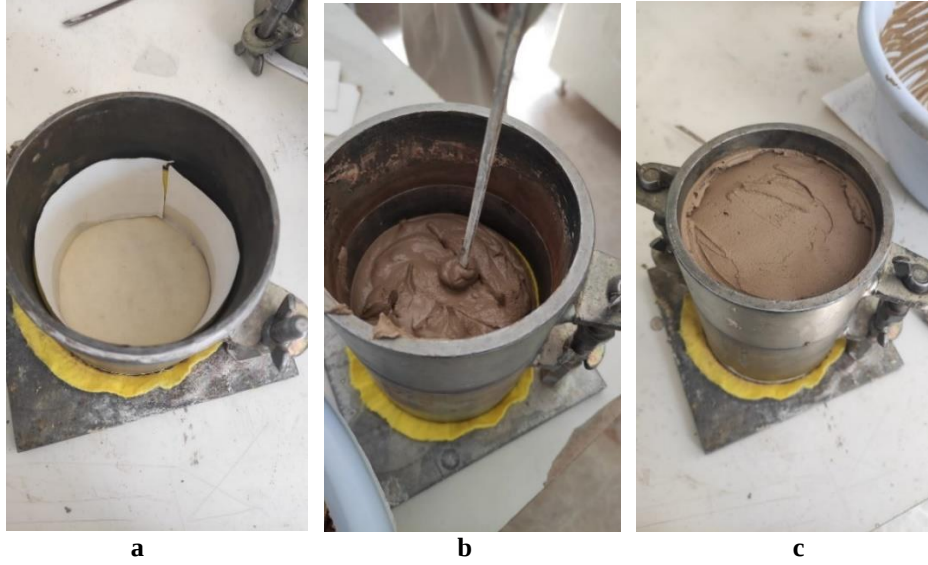
- Deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile konsolidasyon basıncı arasında anlamlı bir bağıntı kurularak, yeni korelasyonların geliştirilmiştir.

Deneylerde, düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminler kullanılmıştır. Düşük plastisiteli kil zeminin su muhtevası $w_L=34,4$; yüksek plastisiteli kil zeminin su muhtevası $w_L=56,5$ olarak alınmış, likit kıvamda hazırlanmış numuneler kil partiküllerinde suyun homojen olarak dağılımını sağlamak için iyice karıştırılmıştır (Şekil 4.11).



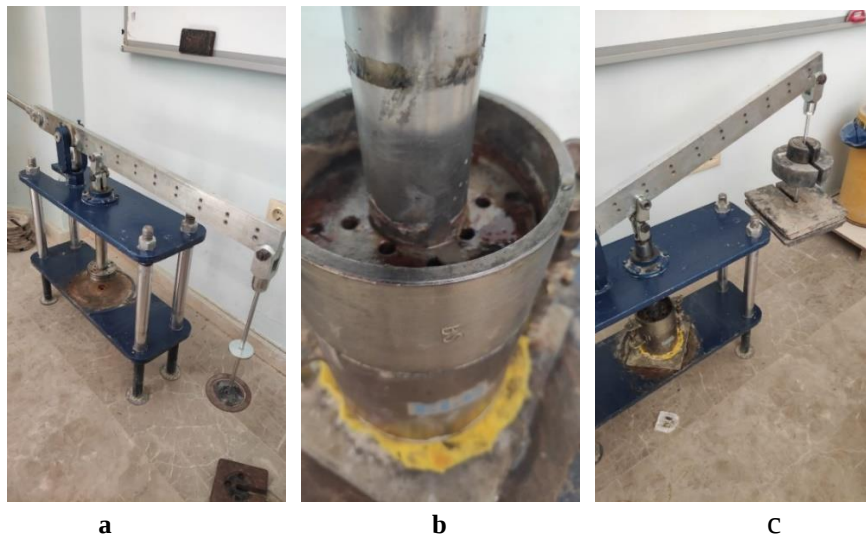
Şekil 4.11. Kil numunenin likit kıvamda hazırlanması

Hazırlanan likit kıvamdaki zeminler dikkatlice ve boşluk kalmayacak şekilde deney kalıbına yerleştirilmiştir. Deney kalıbının iç duvarı filtre kağıdı ile kaplanarak konsolidasyon süresince suyun yan yüzlerden drenajı sağlanmıştır. Ayrıca hücre tabanına da suyun drenajını kolaylaştırmak için filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Ardından kademeli eklenen zemin şişlenerek boşluk kalmadan yerleşmesi sağlanarak kap doldurulmuştur (Şekil 4.12 a,b,c).



Şekil 4.12. (a) Filtre kağıdı yerleştirilen kalıp,
(b) Hazırlanan zeminin şişlenmesi,
(c) Deney kalıbına yerleştirilen likit kıvamda hazırlanmış zeminler

Sonrasında hazırlanan zeminler Şekil 4.13a'da görülen konsolidasyon cihazına Şekil 4.13b'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Hazırlanan düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlere istenilen basınçlarda yüklemeler yapılarak konsolide edilmiştir (Şekil 4.13c). Her yüklemede, yük altında deformasyonun tamamlanması ve boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmesi beklenilmiştir. Belirlenen basınç altında konsolide edilen düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerden kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için numuneler alınmıştır.



Şekil 4.13. (a) Konsolidasyon cihazı,
(b) Konsolidasyon kalıbının cihaza yerleştirilmesi,

4.2.2. Serbest basınç deneyleri

Serbest basınç deneyi ASTM D 2166-00 (2003) standardına göre yapılmıştır. Deney numuneleri likit kıvamda hazırlanmış 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarında konsolide edilmiş zeminden 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde silindirik tüpler çakılarak numuneler alınmıştır (Şekil 4.14a, 4.14b). Her basınç kademesi için 3 adet numune alınmış ve deneye tabi tutulmuştur.

Hazırlanan silindirik numuneler serbest basınç aletinin iki plaka arasına yerleştirilmiş, alt plakanın yukarı yönde hareket ettirilmesiyle numune 2.0 mm/dk yükleme hızıyla sıkıştırılmıştır (Şekil 4.15). Eksenel boy kısaltmalarına karşılık gelen yük değerlerinin okunmasıyla deney gerçekleştirilmiştir. Eksenel boy kısaltmasının ilk boya bölünmesiyle birim boy deformasyonları bulunmuştur. Kırılma anındaki yükün numunenin A_f en kesit alanına bölünmesiyle gerilme değerleri bulunmuştur. Birim boy kısaltmasına karşılık deformasyon-gerilme grafikleri çizilmiştir. Serbest basınç deneylerinde çizilen deformasyon- gerilme grafiğindeki eğrinin tepe noktası numunenin serbest basınç mukavemeti değerini vermektedir. Numuneler yumuşak olduğundan dolayı ilk boyunun %15-%20 oranına kadar deformasyonda göçme meydana gelmemiştir. Dolayısıyla % 15-%20 boy kısaltması anındaki gerilme değeri numunenin serbest basınç mukavemeti olarak alınmıştır. Serbest basınç deneyinde zemin numunesinin toplam hacminde değişiklik olmamaktadır. Hesaplamalar denklem (4.1-2-3-4-5-6)'lerden yapılmıştır;

$$q_u = \sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (4.1)$$

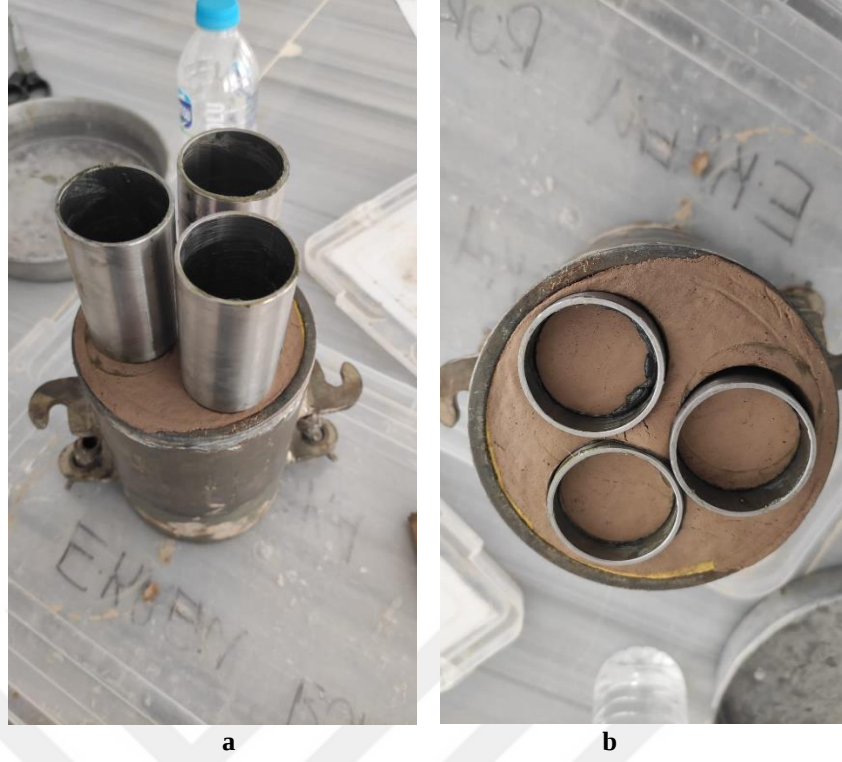
$$\epsilon = \Delta H / H_o \quad (4.2)$$

$$A_f = A_o / (1 - \epsilon) \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (4.4)$$

$$q_u = \sigma_1 \quad (4.5)$$

$$c = q_u / 2 \quad (4.6)$$



Şekil 4.14. (a) 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde silindirik kalıplar (b) Konsolide edilmiş Zeminden çıkılarak kalıplardan elde edilen numuneler



Şekil 4.15. Serbest basınç deneyi aleti

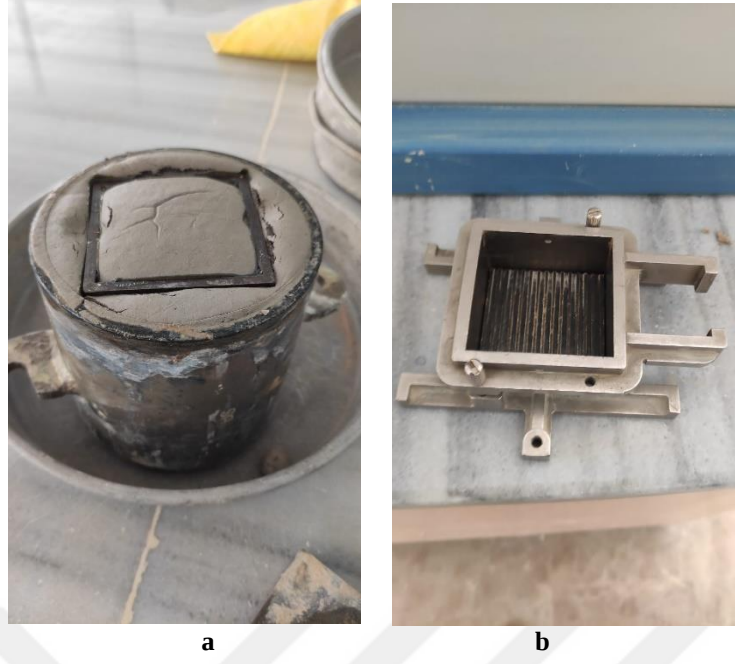
4.2.3. Kesme kutusu deneyleri

Kesme kutusu deneyi ASTM D 3080-98 standardına göre yapılmıştır. Deney numuneleri likit kıvamda hazırlanmış 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarında konsolide edilmiş zeminin 60*60*20'lik kalıp çakılarak numuneler alınmıştır (Şekil 4.16a,b). Her basınç kademesi için 3 adet numune alınmıştır. Kalıplarda olan numuneler dikkatlice kesme kutusu deneyi kalıbına Şekil 4.17a'da ki gibi yerleştirilmiştir. Deney kalıbının vidaları iyice sıkıştırılıp yük hücresine konulmuştur. Hücreye yerleştirilen kalıp alt kısmının hareketinin engellenmesi için yine vidalar ile sıkıştırılmış sonrasında alt ve üst parçalarını bir arada tutan vidalar çıkarılmıştır (Şekil 4.17b). Ardından sistem kontrol edilmiş ve kesme kutusundaki okuma saatleri tekrar sıfırlanarak deneye hazır hale getirilmiştir. Yükleme koluna hesaplanan yükler koyulmuş ve gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Deneyde 200, 400 ve 800 N' luk yük değerleri uygulanmıştır. Yük kolunun altını boşa çıkararak deneye başlanmıştır. Deney 1 mm/dk yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde yatay deformasyonlara karşılık gelen yük değerleri ve okunmuş ve kırılma anındaki kayma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Numuneler yumuşak olduğu için kırılmanın meydana gelip yükte düşme meydana gelmiş dolayısıyla %20 deformasyona ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Gerekli boşaltma işlemi yapıldıktan sonra kalıp yük hücresinden çıkarılmış. Aynı işlem 200 N, 400 N ve 800 N yüklerinin hepsinde uygulanarak zeminin kohezyon değeri (c) ve ϕ açısı bulunmuştur.

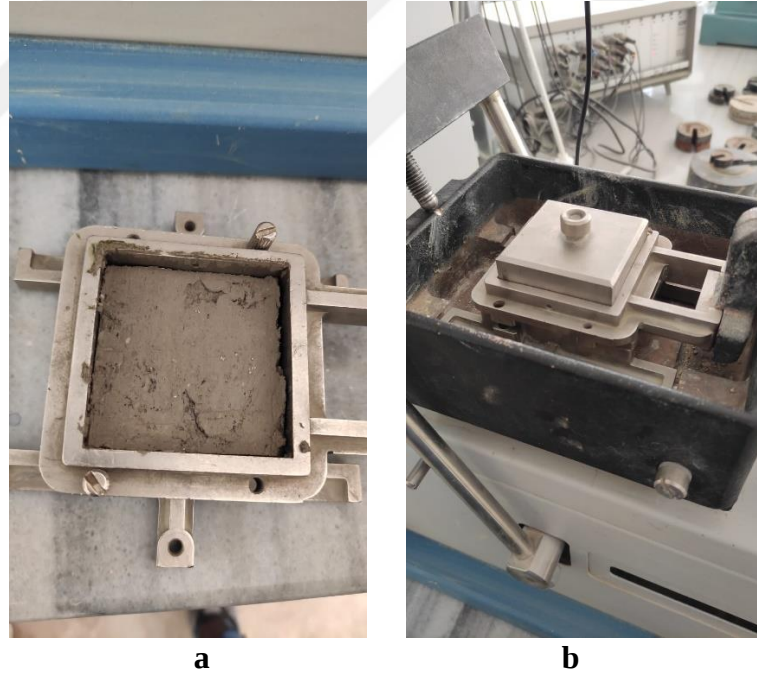
Kesme kutusu deneyi kayma mukavemeti parametreleri; kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısının bulunması için gerekli deney denklemleri 4.7 ve 4.8' de verilmiştir.

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \quad (4.7)$$

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{A} \quad (4.8)$$



Şekil 4.16. (a) Konsolide edilmiş zeminden kesme kutusu kalıbının çıkılarak numune alınması
(b) Hücreye yerleştirilen kalıp



Şekil 4.17. (a) Numunenin deney kalıbına yerleştirilmesi,
(b) Kesme kutusu deneyi hücresi

4.2.4. Laboratuvarda Veyn deneyi

Laboratuvarda Veyn deneyleri ASTM D 2573-01 standardına uygun yapılmıştır. Deney numuneleri likit kıvamda hazırlanmış 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarında konsolide edilmiş zeminlerdir. Deney için çapı, yükseklik oranı ½ olan 4 adet kanattan oluşan sonda numuneye batırılmıştır. Cihazın üst kısmından dönme açısı okuması yapılmıştır. Döndürmeye karşı lineer, elastik davranan, kalibre edilmiş 1,2,3,4 no'lu kullanılan yaylardan ve dönme açısından elde edilen verilerden cihazın kalibrasyon kartından okumalar yapılmış ve deney tamamlanmıştır. Veyn deneyi hesaplamalarında denklem 4.9 kullanılmıştır.

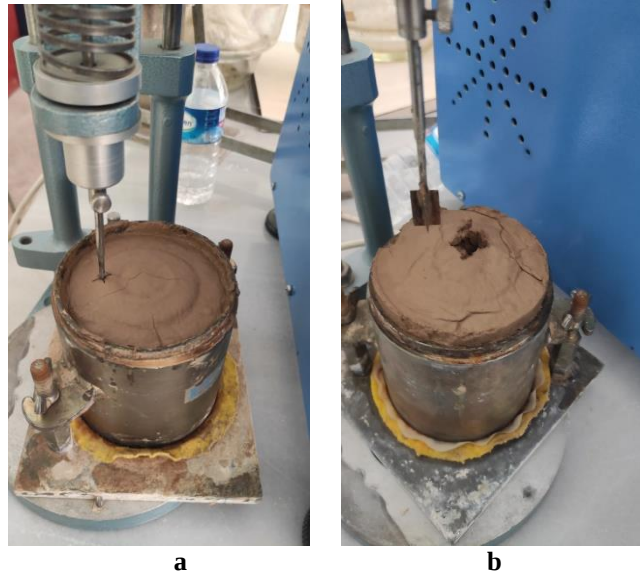
$$C = \frac{M_{\max}}{\left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6}\right)\pi D^2} \quad (4.9)$$

H= Kanat yüksekliği

D= Kanat çapı

M_{max}= Burulma momenti

C= Kohezyon (kayma direnci)



Şekil 4.18. (a) Sondanın zemine batırılması,
(b) 4 plakadan oluşan sonda

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

5.1. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Serbest basınç deneyleri, farklı konsolide basınçlarında hazırlanmış düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerden alınan numunelerde uygulanmıştır. Hazırlanan kil zeminlerden 38 mm çapında, 76 mm yüksekliğindeki kalıpların çakılmasıyla elde edilen numunelerin serbest basınç deney sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Düşük plastisiteli killerin (CL) sonuçları Çizelge 5.1’de, yüksek plastisiteli killerin (CH) sonuçları çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Ön Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Numune No	Serbest Basınç Mukavemeti (kN/m ²)	Kohezyon (c) kPa	Ortalama Kohezyon Değerleri (c) kPa
25	N1	20,12	9,55	9,50
	N2	19,10	9,55	
	N3	18,814	9,40	
50	N1	29,00	14,50	13,50
	N2	26,09	13,04	
	N3	25,945	12,97	
100	N1	46,02	23,01	21,81
	N2	43,99	21,393	
	N3	42,09	21,04	
200	N1	68,73	34,36	35,50
	N2	71,64	35,82	
	N3	72,659	36,32	
400	N1	103,22	51,61	55,00
	N2	109,04	54,52	
	N3	117,77	58,88	

Çizelge 5.2. Yüksek plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları

Ön Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Numune No	Serbest Basınç Mukavemeti (kN/m ²)	Kohezyon (c) kPa	Ortalama Kohezyon (c) kPa
25	N1	10,08	4,98	5,26
	N2	10,37	5,18	
	N3	11,24	5,62	
50	N1	24,49	14,50	13,04
	N2	24,63	12,31	
	N3	24,63	12,31	
100	N1	42,68	21,34	20,60
	N2	42,09	20,16	
	N3	40,643	20,32	
200	N1	77,60	38,80	40,08
	N2	82,55	41,27	
	N3	80,37	40,18	
400	N1	127,96	63,98	66,28
	N2	138,87	69,43	
	N3	130,87	65,4	

Her farklı basınç kademesinde konsolide edilmiş kil numunelerden 3'er örnek alınmış ve deney sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. 5 farklı konsolide basıncında toplam da 30 adet serbest basıncı deneyi yapılmıştır. Beklenildiği üzere konsolide basınçları arttıkça kohezyon değerleri de artmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde en düşük kohezyon (c) değerine sahip zemin örneği, 25 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kilde, en yüksek kohezyon (c) değerine sahip olan zemin örneği ise 400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kilde görülmüştür.

Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kilde serbest basınç değerleri kıyaslandığında, 50 kPa'da konsolide edilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuş

zemin örneklerinin kohezyon değerlerinin ortalamasına göre değerlendirildiğinde düşük plastisiteli kil 0,605 kPa farkla daha yüksek çıkmıştır.

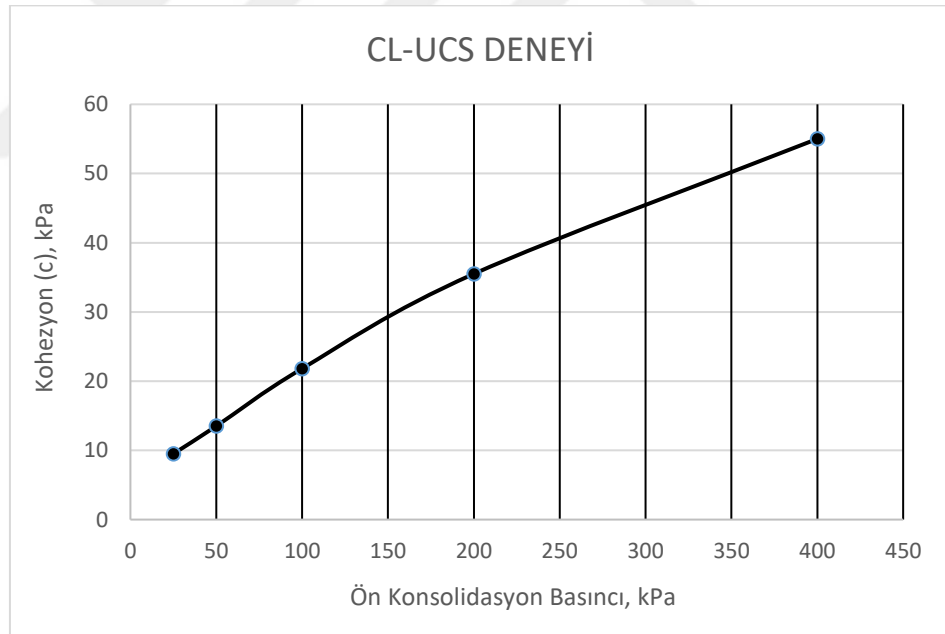
100 kPa'da konsolide edilmiş numunelerde kohezyon değerlerinin ortalamasına göre değerlendirildiğinde düşük plastisiteli kil 1,3117 kPa farkla daha yüksek çıkmıştır.

200 kPa'da konsolide edilmiş numunelerde kohezyon değerlerinin ortalamasına göre değerlendirildiğinde yüksek plastisiteli kil 4,584 kPa farkla daha yüksek çıkmıştır.

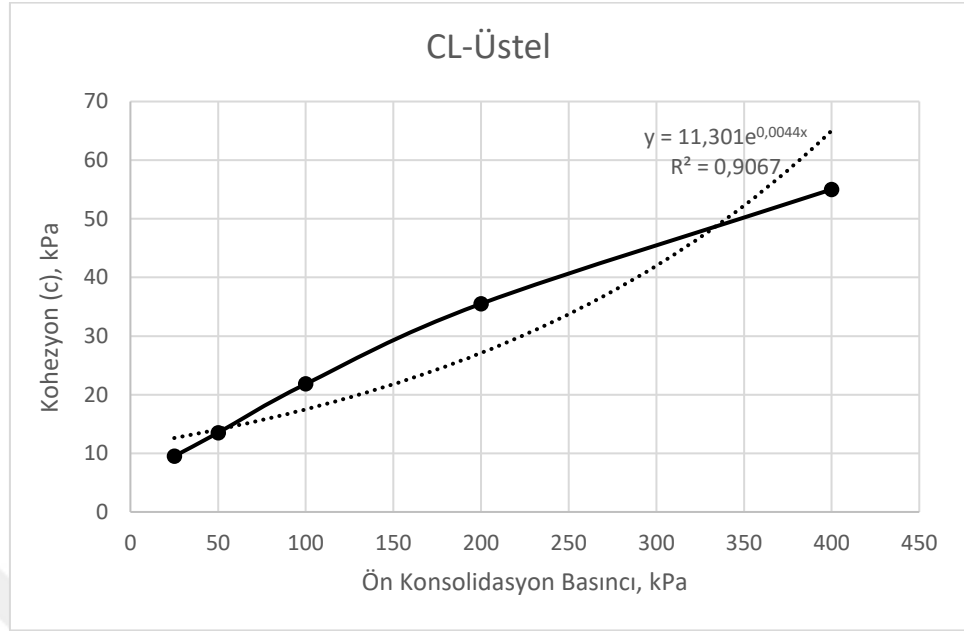
Son olarak 400 kPa'da konsolide edilmiş numunelerde kohezyon değerlerinin ortalamasına göre değerlendirildiğinde de yüksek plastisiteli kil 11,2784 kPa farkla daha yüksek çıkmıştır.

Likit kıvamda hazırlanmış, farklı ön konsolidasyon basınçlarına konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları, ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında oluşturulmuş bağıntılar ve grafikler verilmiştir.

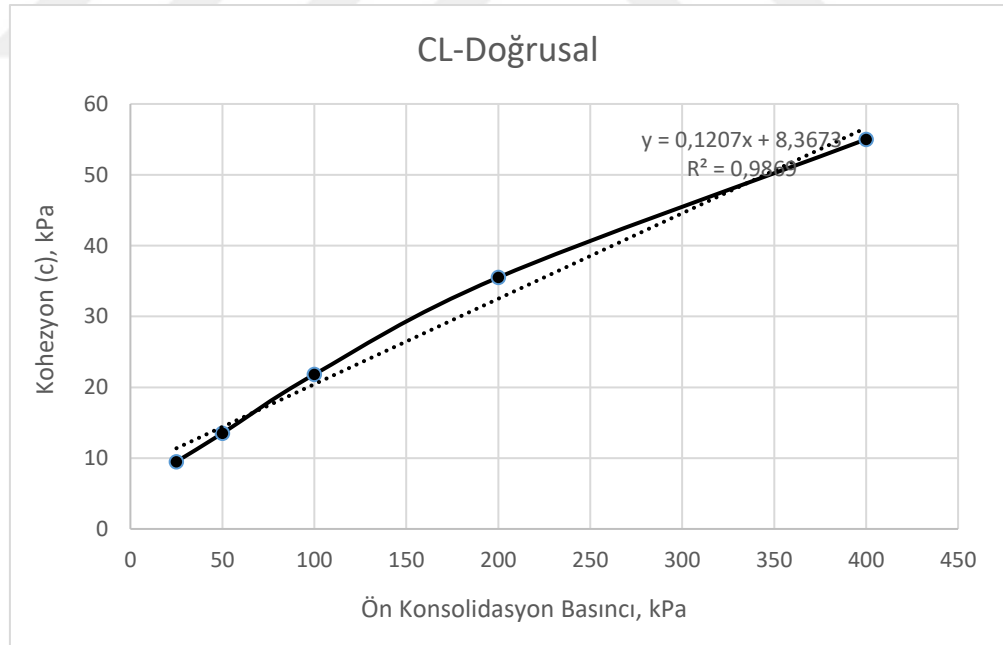
(Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5). Grafiklerde ortalama kohezyon (c) değerleri kullanılmıştır.



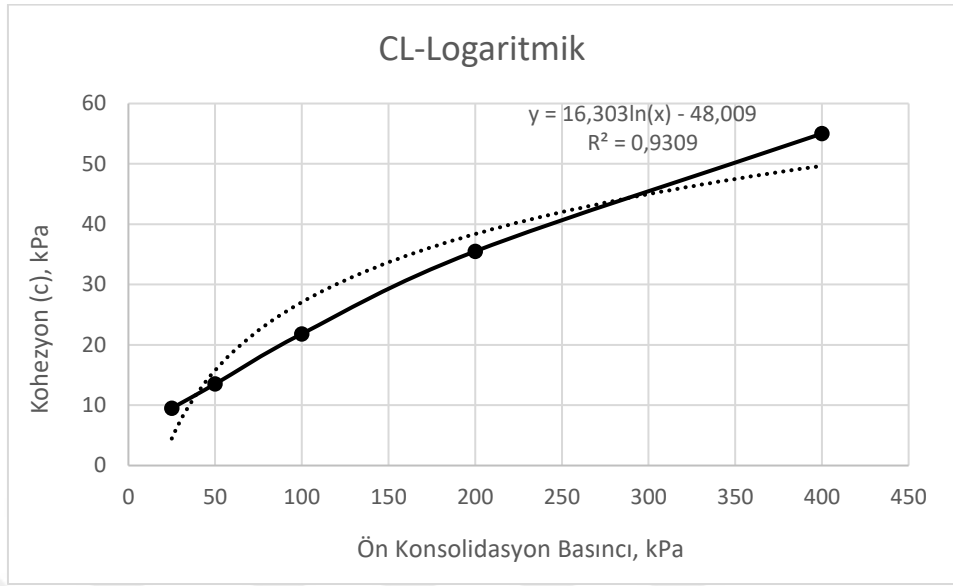
Şekil 5.1. Düşük plastisiteli kil numunenin serbest basınç deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



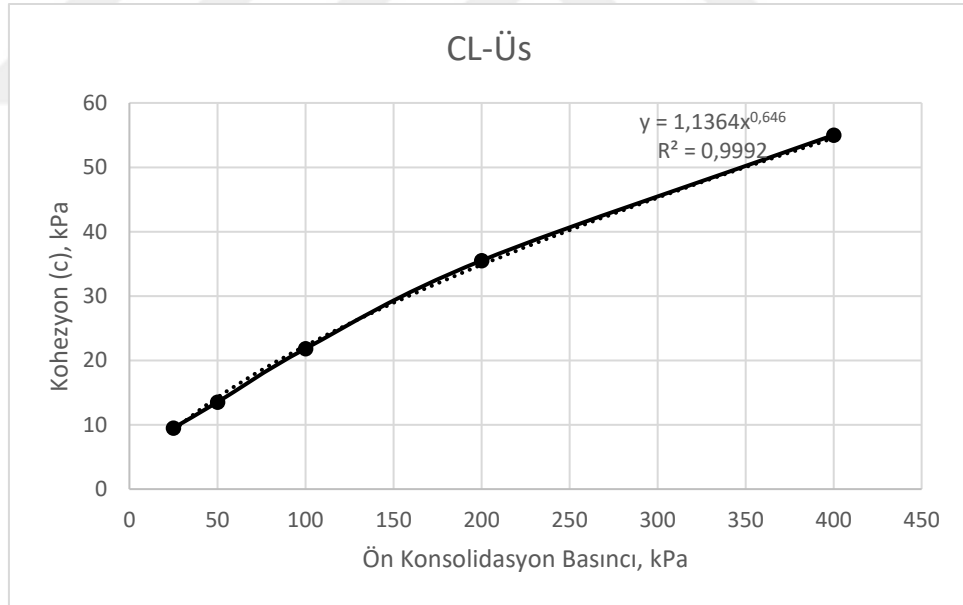
Şekil 5.2. Düşük plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.3. Düşük plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.4. Düşük plastisiteli kil numunelerinin yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



Şekil 5.5. Düşük plastisiteli kil numunelerinin yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.

Çizelge 5.3. Düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçlarından oluşturulan denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE)

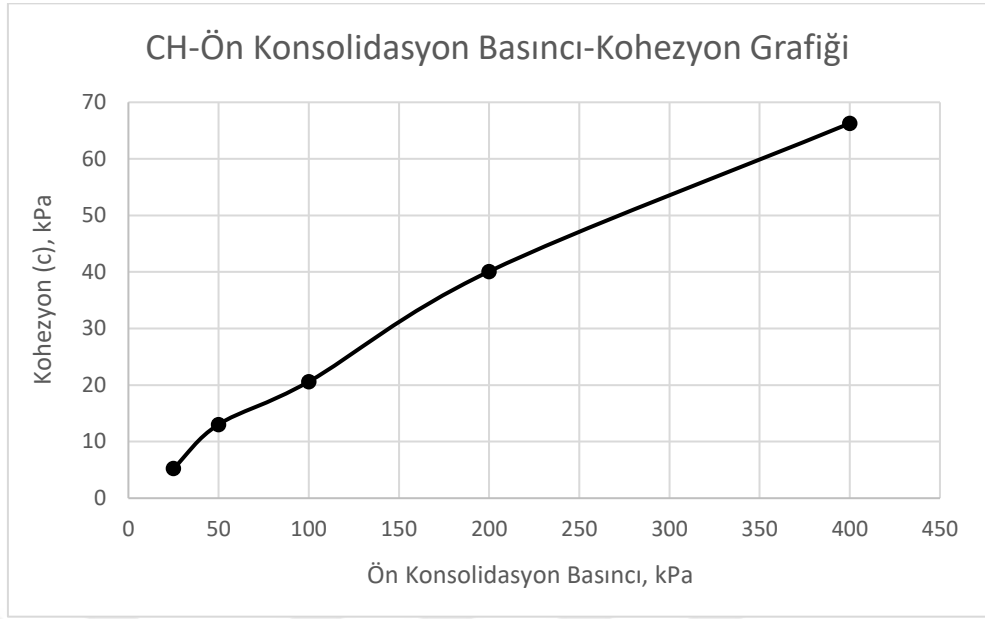
Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=11,301e^{0,0044x}$	0,8852	6,489256
$y=0,1207x+8,3673$	0,9869	5,203441
$y=16,303\ln(x)-48,009$	0,9309	4,352412
$y=1,1364x^{0,646}$	0,9973	1,693259

Çizelge 5.3’de düşük plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deney sonuçlarından oluşturulan denklemler, determinasyon katsayıları ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri verilmiştir. Determinasyon katsayısı (R^2) elde edilen denklemlerle açıklanabilen kısmı gösterir. 0 ila 1 arasında değer alır. 1’e yakın olması denklemlerle açıklanamayan miktarın az olması demektir.

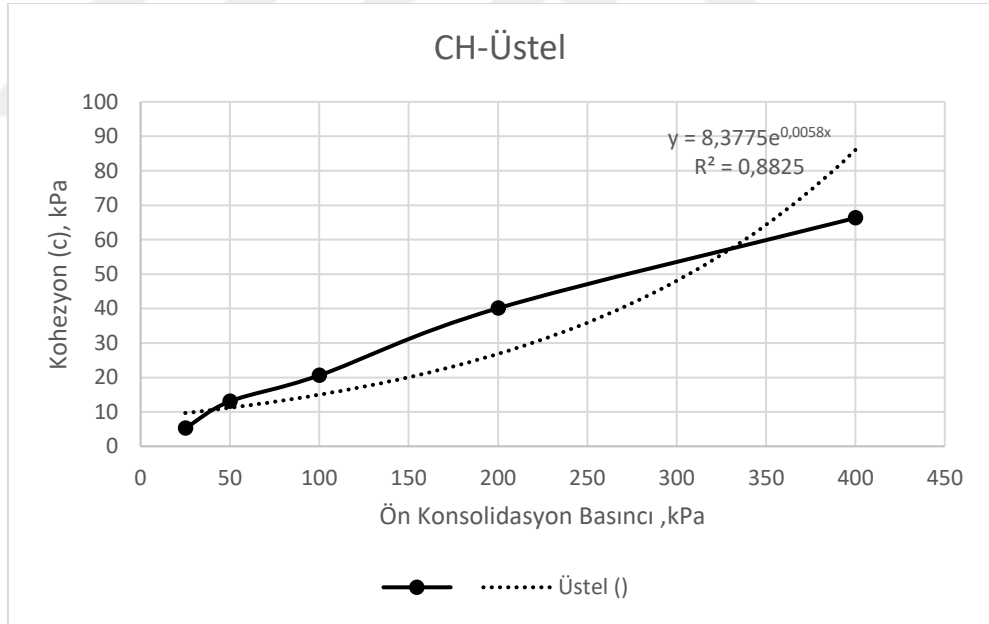
Ortalama hata kareleri karekökü (RMSE), denklemlerden elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçları arasındaki farklardan elde edilir. 0’a yakın olması hata miktarının az olduğunu ifade eder.

Sonuç olarak, düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan bağıntılardan R^2 ’si 0,9973 olan ve RMSE değeri 1,130748 olan $y=1,1364x^{0,646}$ denklemi sonraki çalışmalar için önerilir.

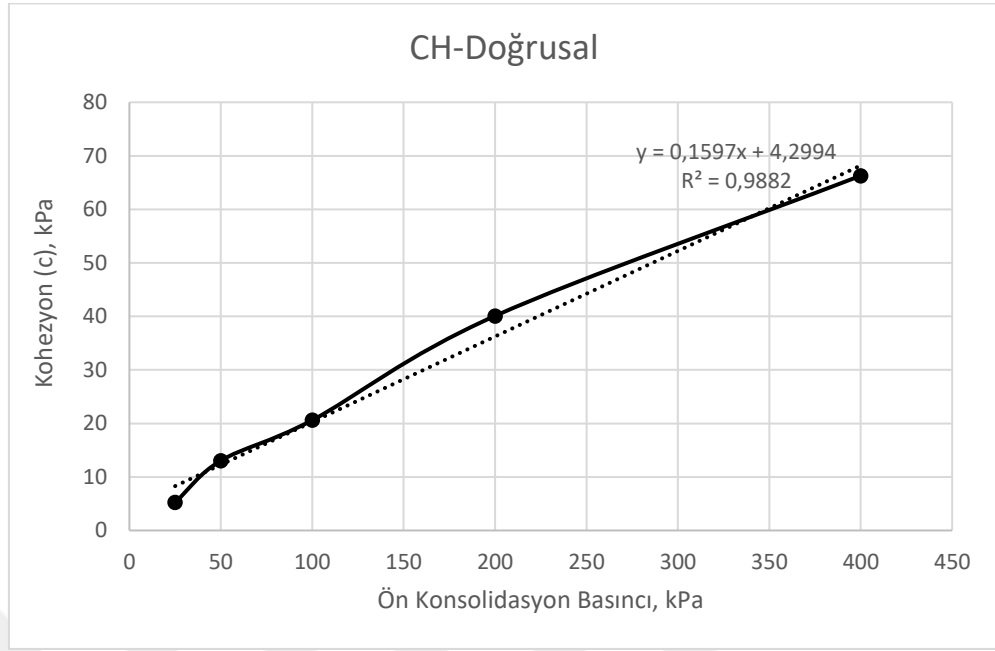
Yüksek plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçları, ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında oluşturulan bağıntılar ve grafikler verilmiştir (Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10).



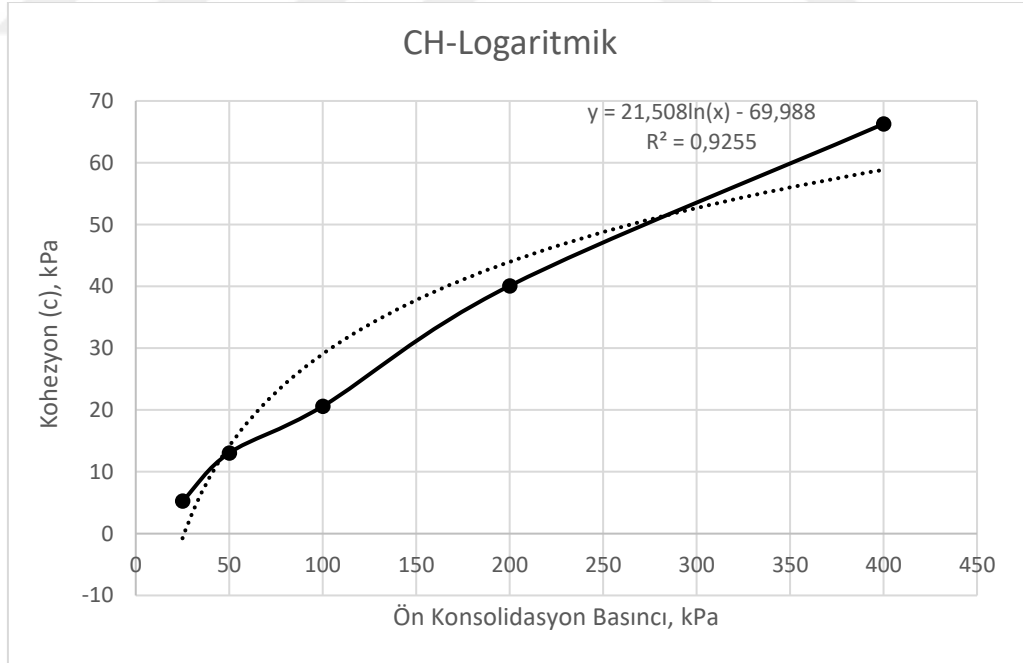
Şekil 5.6. Yüksek plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



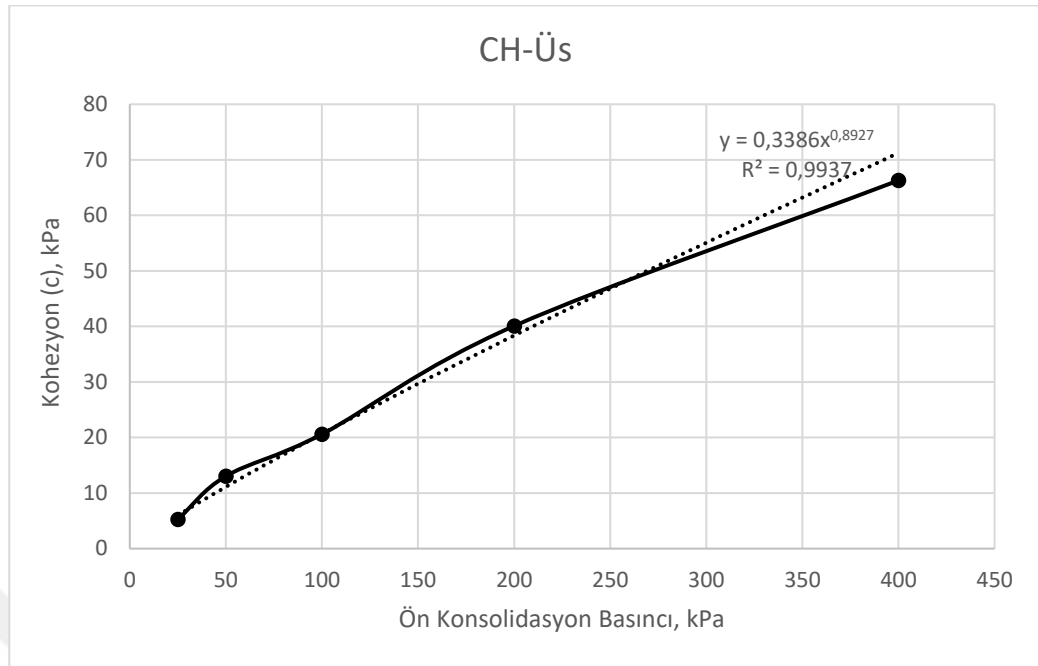
Şekil 5.7. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.8. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.9. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



Şekil 5.10. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deneyleri sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.

Çizelge 5.4. Yüksek plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE)

Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=8,3775e^{0,0058x}$	0,8131	10,89077
$y=0,1597x+4,2994$	0,9882	2,377512
$y=21,508\ln(x)-69,988$	0,9255	5,980514
$y=0,3386x^{0,8927}$	0,9873	2,509707

Çizelge 5.4’de yüksek plastisiteli kil numunelerinin serbest basınç deney sonuçlarından oluşturulan denklemlerden, determinasyon katsayısı (R^2) değerinin 1’e en yakın olduğu 0,9882, ortalama hata kareleri karekökü (RMSE) değeri 0’a en yakın olan 2,377512 olan $y=0,1597x+4,2994$ denklemi önerilir.

5.2. Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Kesme kutusu deneyleri, farklı konsolide basınçlarında hazırlanmış düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerde uygulanmıştır. Hazırlanan kil zeminlerden $60 \times 60 \times 20$ kalıpların çakılmasıyla elde edilen numunelerin deney sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

Düşük plastisiteli killerin (CL) sonuçları Çizelge 5.5’de, yüksek plastisiteli killerin (CH) sonuçları çizelge 5.6’da gösterilmiştir.

25 kPa’da konsolide edilmiş zemin numunelerinde 100 N, 200 N ve 400 N, geri kalan numunelerde 200 N, 400 N VE 800 N yük altında kesme kuvveti uygulanmıştır.

25 kPa ve 50 kPa’da konsolide edilmiş zemin numuneleri çok yumuşak oldukları için kesme kutusu kalıbının altına yükseltici eklenmiştir.

Çizelge 5.5. Düşük plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları

Konsolide Basıncı (kPa)	Kohezyon (c)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
25	7,50	2,29°
50	12,08	2,68°
100	16,11	2,744°
200	20,14	8,26°
400	23,05	15,59°

Çizelge 5.6. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları

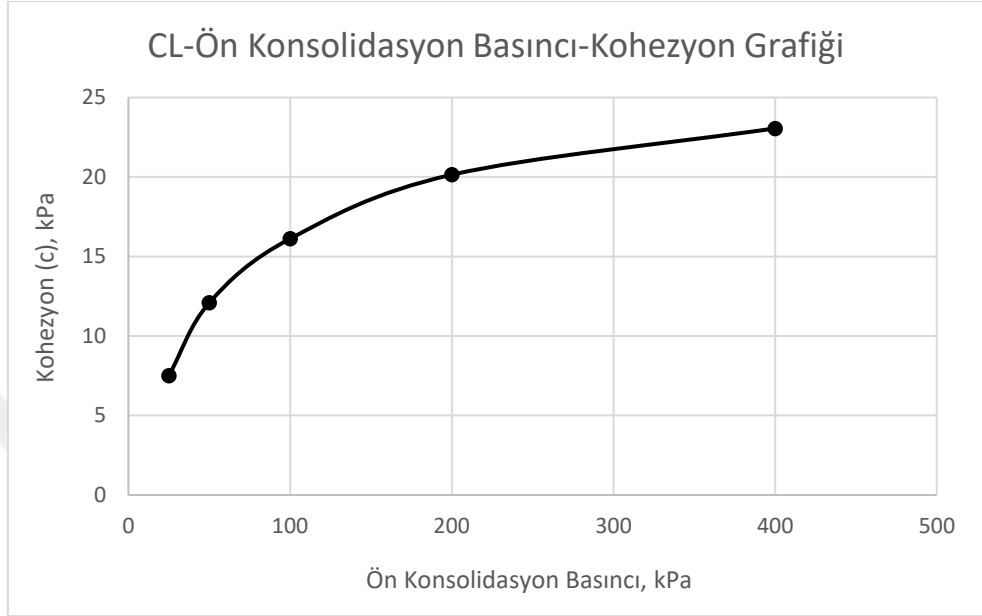
Konsolide Basıncı (kPa)	Kohezyon (c)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
25	2,77	2,29°
50	6,77	7,16°
100	10,19	1,0427°
200	20,28	9,574°
400	31,553	7,463°

Her farklı basınç kademesinde konsolide edilmiş kil numunelerden 3’er örnek alınmış ve 3 farklı yük yüklenerek kesme kuvveti uygulanmıştır. Konsolide basınçları arttıkça kohezyon değerleri artmıştır.

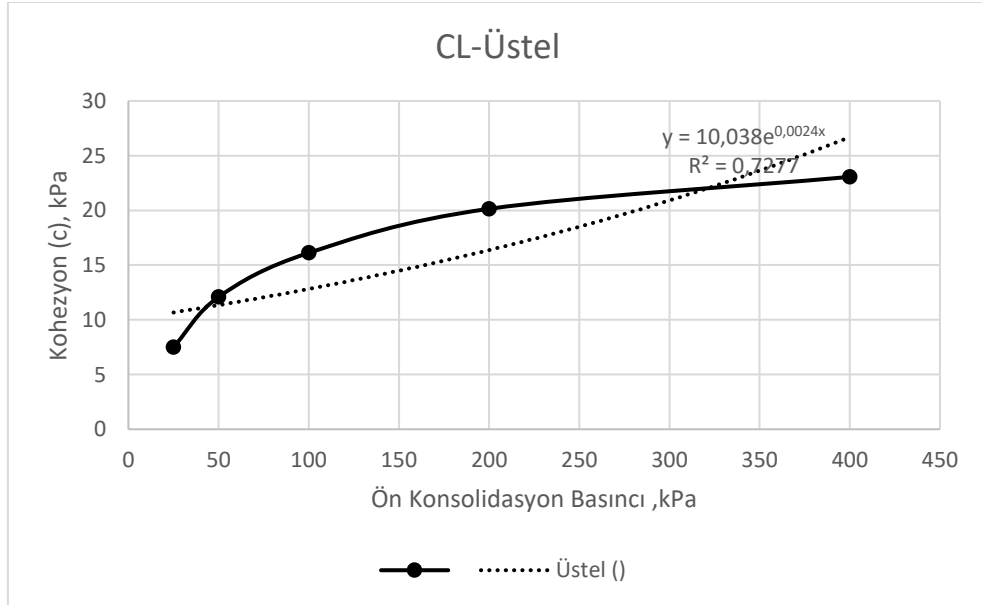
Hatipoğlu ve İyisan (2016), yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemetine plastisitenin etkisini araştırdıkları çalışmada likit limit ve plastisite indisi arttığında kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığı görülmüştür.

Karapınar (2022), yaptığı deneysel çalışmalar neticesinde, plastik limit, likit limit, plastisite indisi, kil yüzdesi ve aktivite değerlerinin artışıyla birlikte tüm deney yöntemlerinden pik ve kalıcı kayma direnci açısı değerlerinin azaldığı görülmüştür.

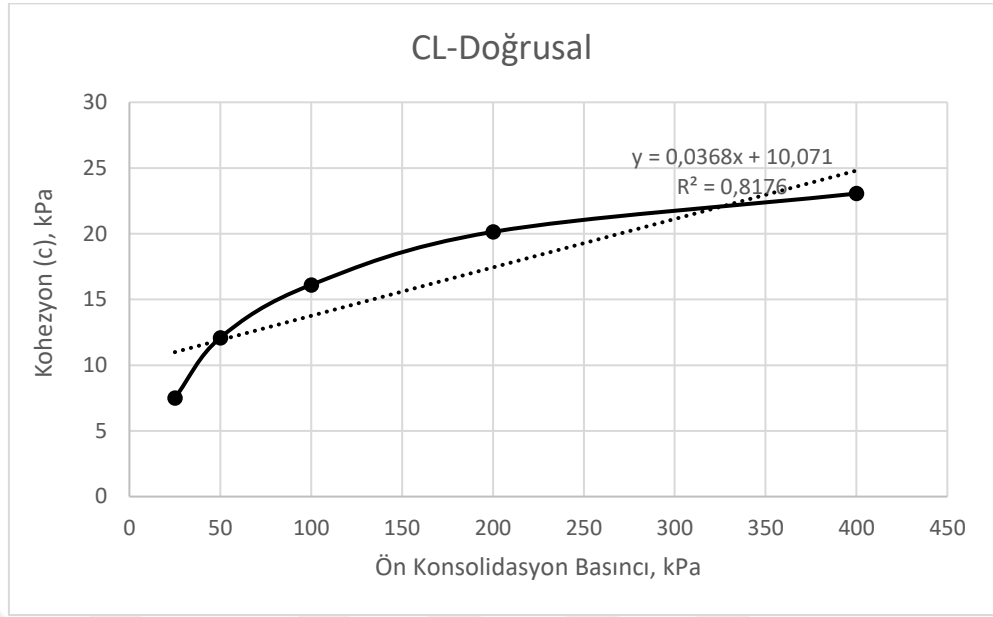
Likit kıvamda hazırlanmış, farklı ön konsolidasyon basınçlarına konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları, ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında oluşturulmuş bağıntılar ve grafikler verilmiştir. (Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15,).



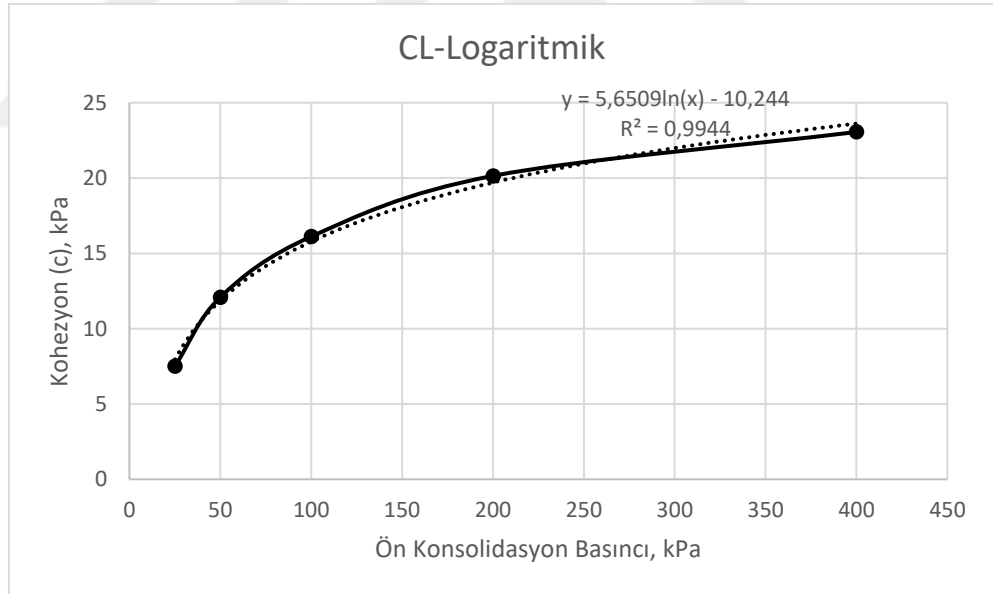
Şekil 5.11. Düşük plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



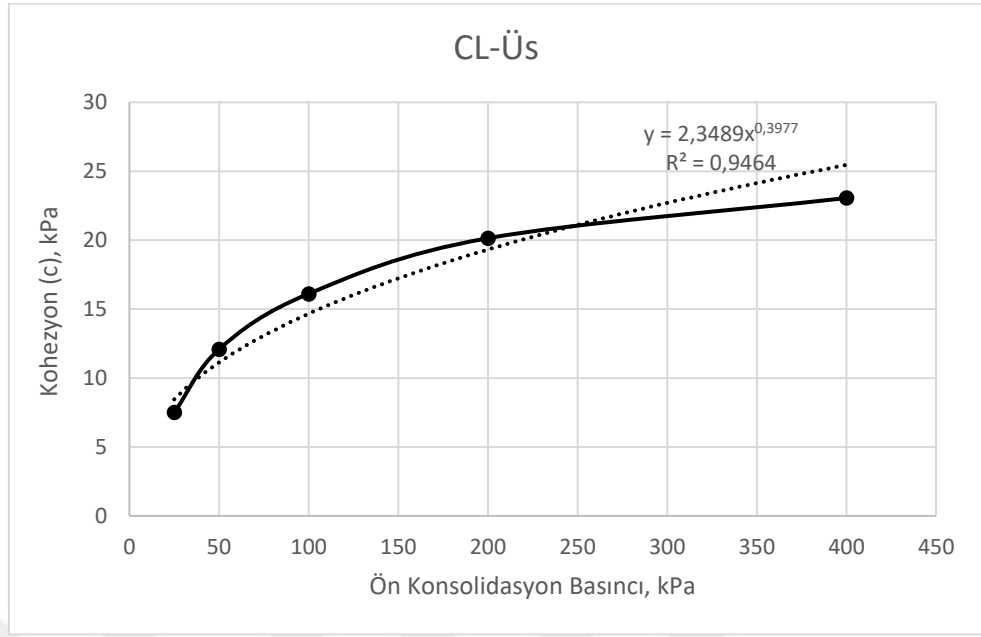
Şekil 5.12. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.13. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.14. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



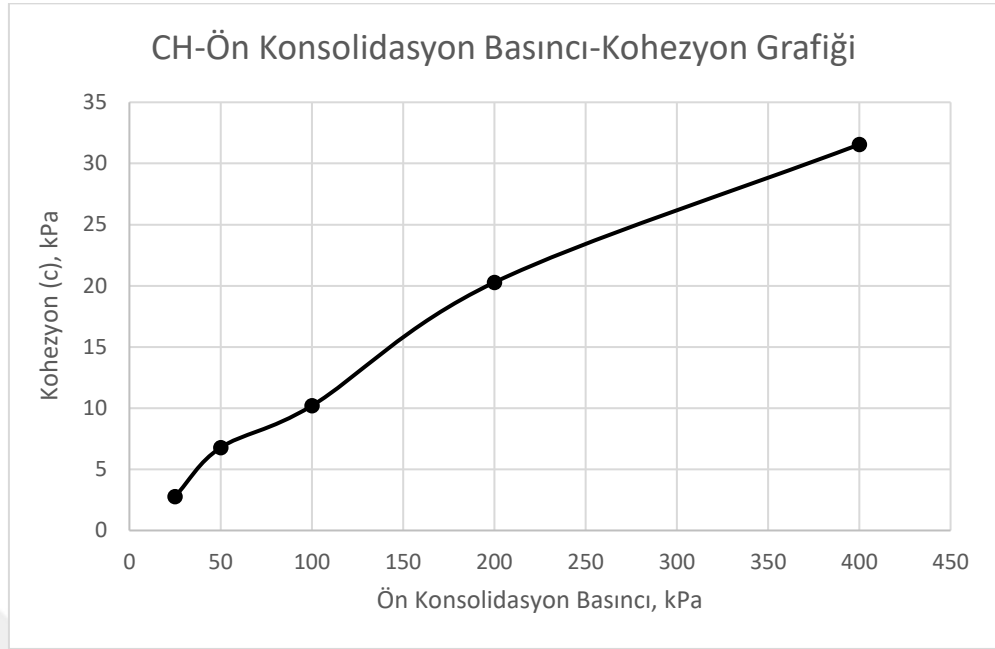
Şekil 5.15. Düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan $\dot{U}s$ bağıntı grafiği.

Çizelge 5.7. Düşük plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE)

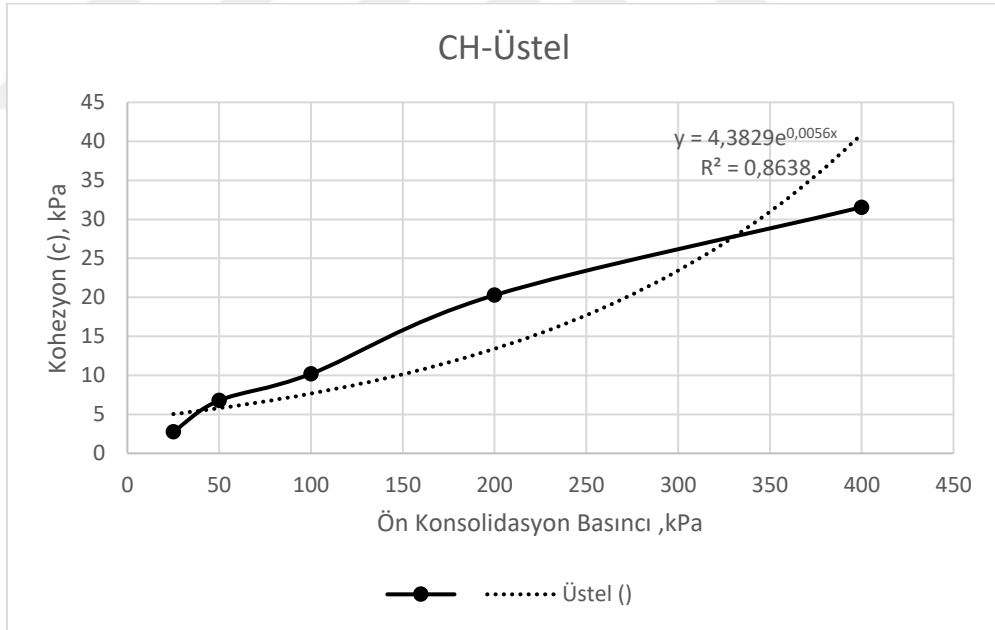
Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=10,038e^{0,0024x}$	0,6942	3,070595
$y=0,0368x+10,071$	0,8176	2,372581
$y=5,6509\ln(x)-10,244$	0,9944	0,416286
$y=2,3489x^{0,3977}$	0,9484	1,053692

Çizelge 5.7’de düşük plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deney sonuçlarından determinasyon katsayıları (R^2) 1’e en yakın olan ve ortalama hata kareleri karekökü 0’a en yakın olan $y=5,6509\ln(x)-10,244$ denklemi önerilir.

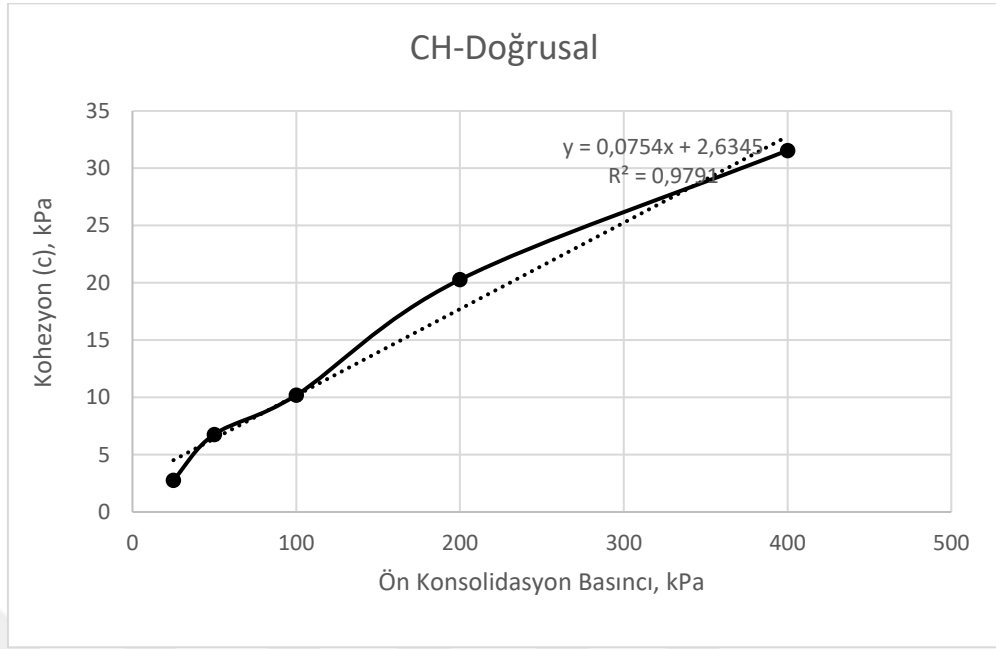
Yüksek plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçları, ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında oluşturulmuş bağıntılar ve grafikler Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’te verilmiştir.



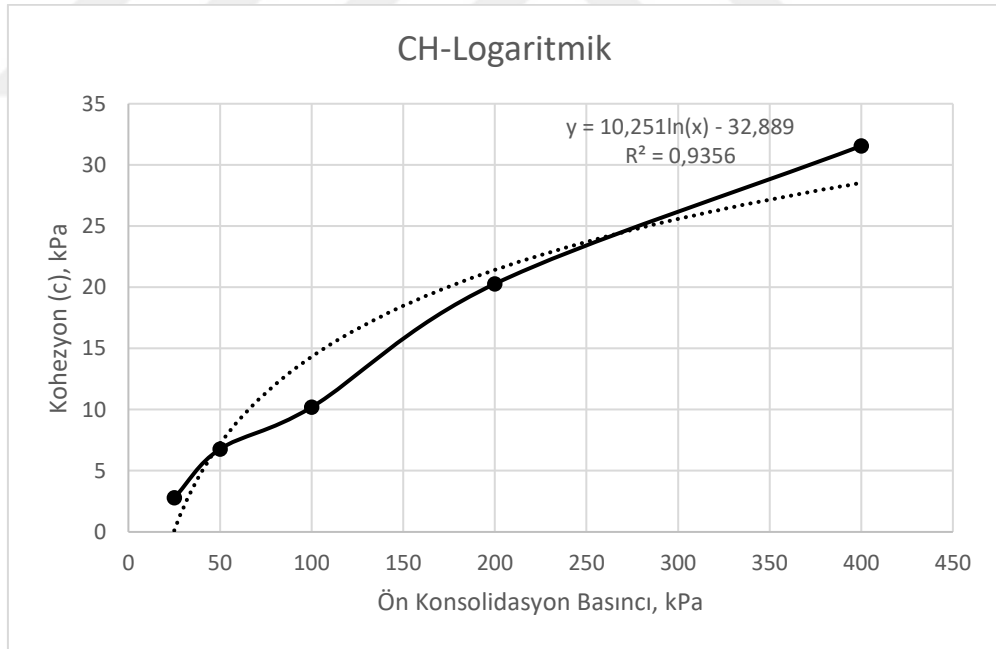
Şekil 5.19. Yüksek plastisiteli kil numunenin ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



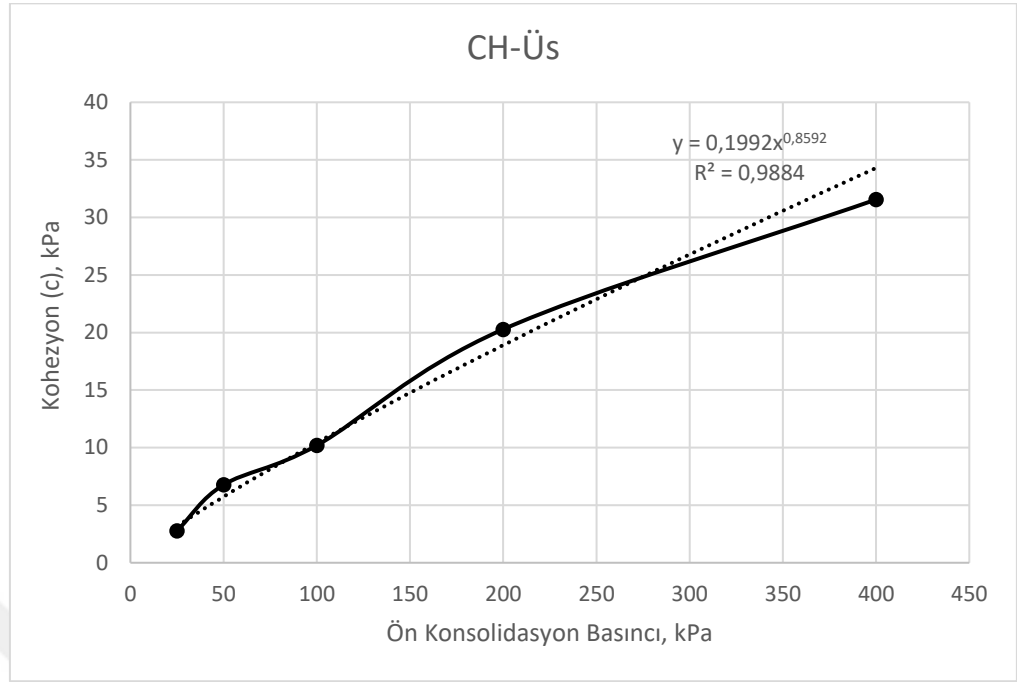
Şekil 5.20. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.21. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.22. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



Şekil 5.23. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.

Çizelge 5.8. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değeri (RMSE)

Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=4,3829e^{0,0056x}$	0,8056	5,510258
$y=0,0754x+2,6345$	0,9791	1,503023
$y=10,251\ln(x)-32,889$	0,9356	2,636985
$y=0,1992x^{0,8592}$	0,9842	1,456119

Çizelge 5.8’de yüksek plastisiteli kil numunelerinin kesme kutusu deney sonuçlarından oluşturulan denklemlerden 0,9842 determinasyon katsayısı (R^2) ile 1,456119 ortalama hata kareleri karekökü değeriyle $y=0,1992x^{0,8592}$ denklemi önerilir. Ancak basit olması ve hiç de azımsanmayacak determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0,9791 ve ortalama hata kareleri karekökü değeri 1,503023 olan $y=0,0754x+2,6345$ denklemi ileri ki çalışmalar için önerilir.

5.3. Laboratuvarda Veyn Deneyi Sonuçları

Her farklı basınç kademesinde konsolide edilmiş yüksek ve düşük plastisiteli kil numunelerinin birkaç farklı noktasında kanatlı Veyn deneyi yapılmıştır. 25 kPa, 50 kPa ve 100 kPa'lık ön konsolidasyona basıncına tabi tutulmuş numunelerde serbest basınç ve kesme kutusu deneyleriyle yakın sonuçlar alınmıştır. 200 kPa ve 400 kPa da ise kohezyon değerleri serbest basınç ve kesme kutusu deneylerine göre yüksek çıkmıştır. Farklı yay numaralarıyla denenmiş fakat çıkan sonuçlar değişmemiştir.

Kanatlı Veyn deneyinin yumuşak zeminlerde daha doğru sonuç verdiği görülmüştür.

Çizelge 5.9'da likit kıvamda hazırlanıp farklı basınçlarda ön konsolidasyona tabi tutulmuş düşük plastisiteli kil numunelerin, Çizelge 5.10'da likit kıvamda hazırlanıp farklı basınçlarda ön konsolidasyona tabi tutulmuş yüksek plastisiteli kil numunelerin Veyn deneyi sonuçları verilmiştir.

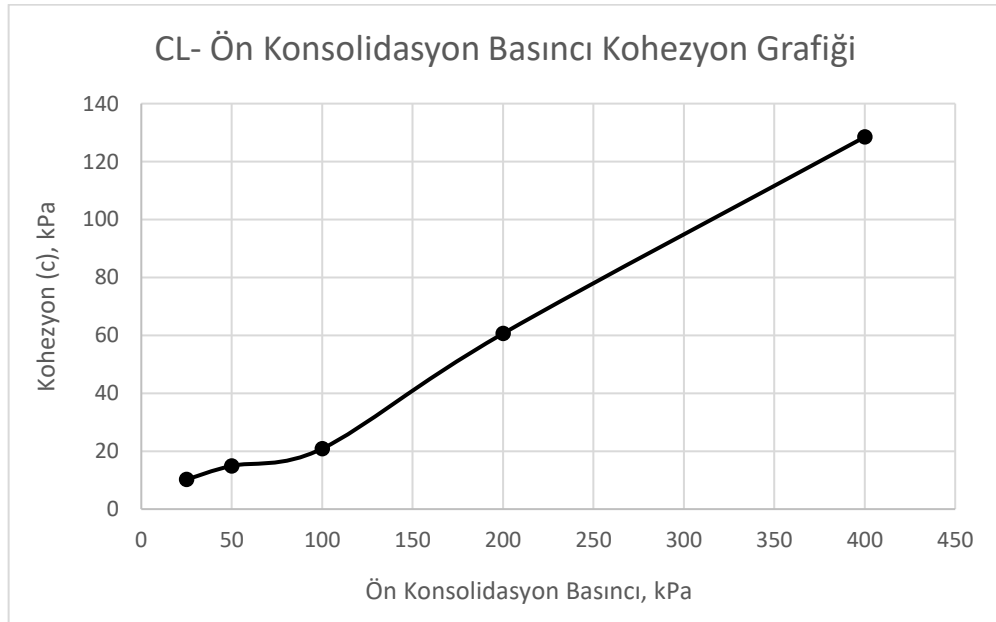
Çizelge 5.9. Düşük plastisiteli kil numunelerin veyn deney sonuçları

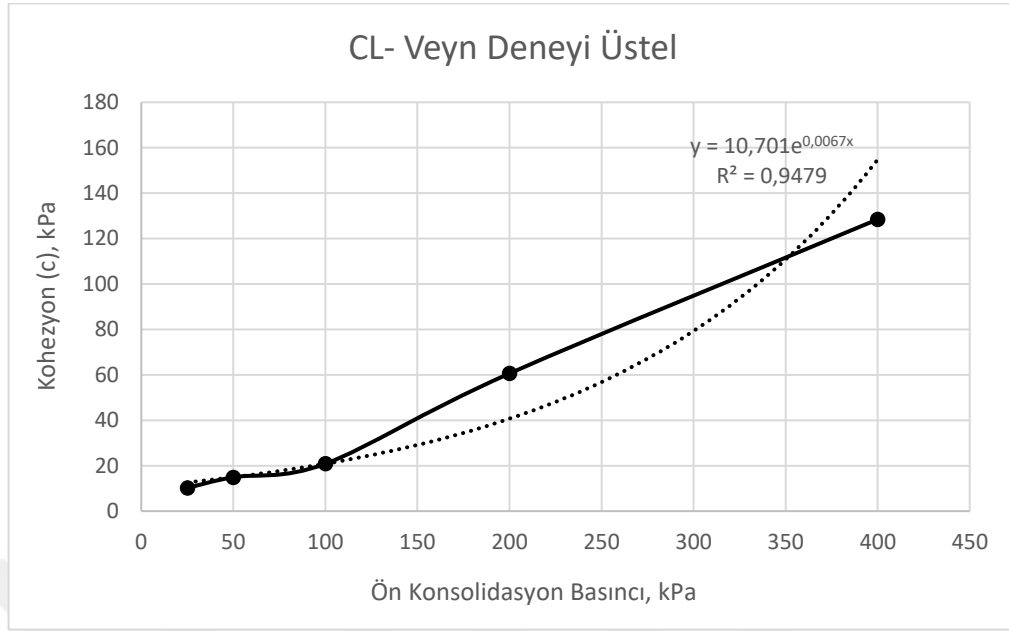
Ön Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Yay No	Kohezyon (c) kPa	Ortalama Kohezyon(c) kPa
25	1	10,23	10,23
50	2	12,01	14,93
	2	17,85	
100	2	21,29	20,87
	3	20,46	
200	2	59,92	
	3	63,94	60,61
	4	57,97	
400	4	122,80	
	4	129,59	128,46
	4	133,01	

Çizelge 5.10. Yüksek plastisiteli kil numunelerin veyn deney sonuçları

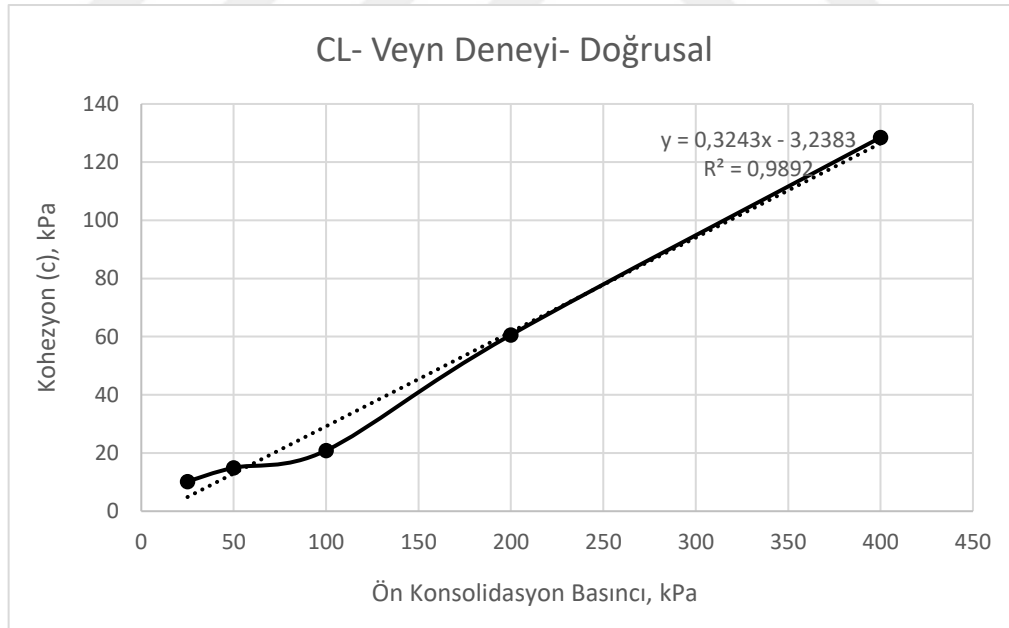
Ön Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Yay No	Kohezyon (c) kPa	Ortalama Kohezyon(c) kPa
25	1	5,77	6,28
	2	6,80	
50	1	17,83	16,67
	2	15,52	
100	2	32,4	28,85
	3	25,30	
200	3	59,70	60,54
	4	61,38	
400	4	143,24	143,24
	4	156,88	
	4	129,60	

Veyn deneylerine tabi tutulmuş likit kıvamda hazırlanmış, farklı ön konsolidasyon basınçlarına konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil numunelerin sonuçlarıyla oluşturulan ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında bağıntılar ve grafikler Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29’da verilmiştir.

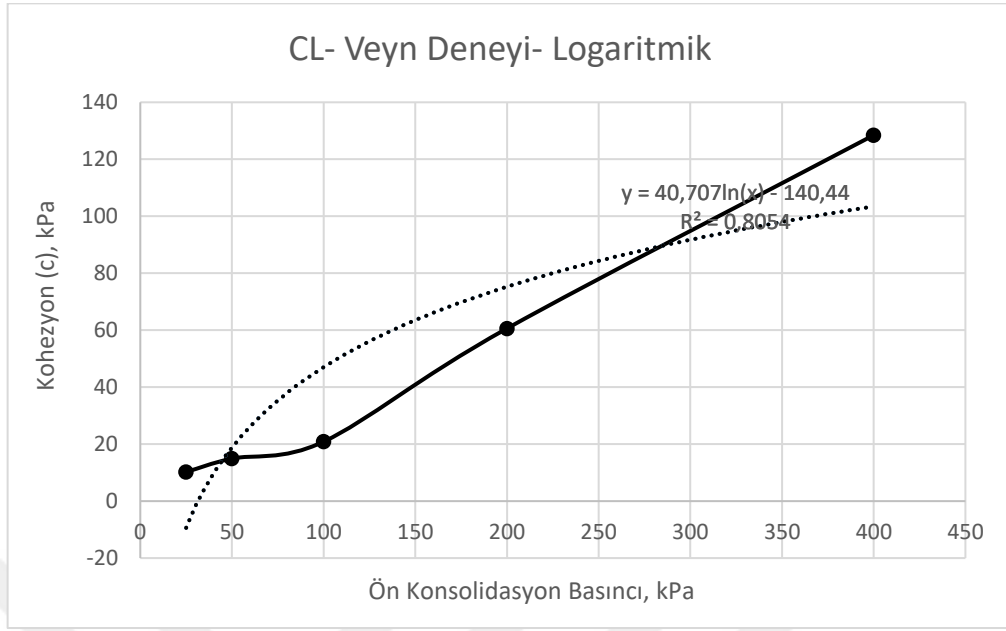
**Şekil 5.25.** Düşük plastisiteli kil numunenin Veyn deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



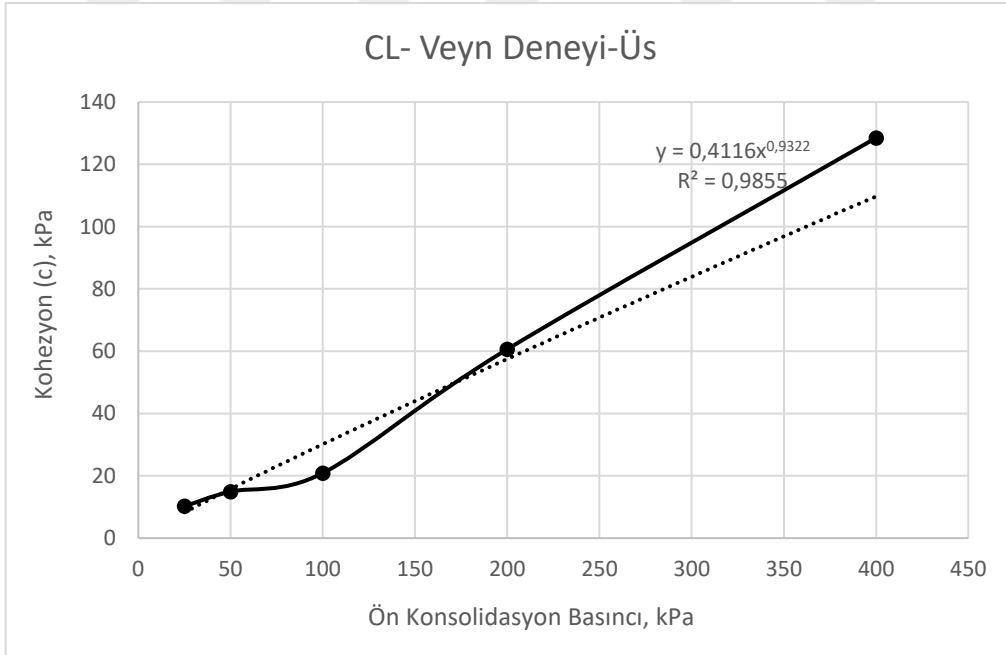
Şekil 5.26. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.27. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.28. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



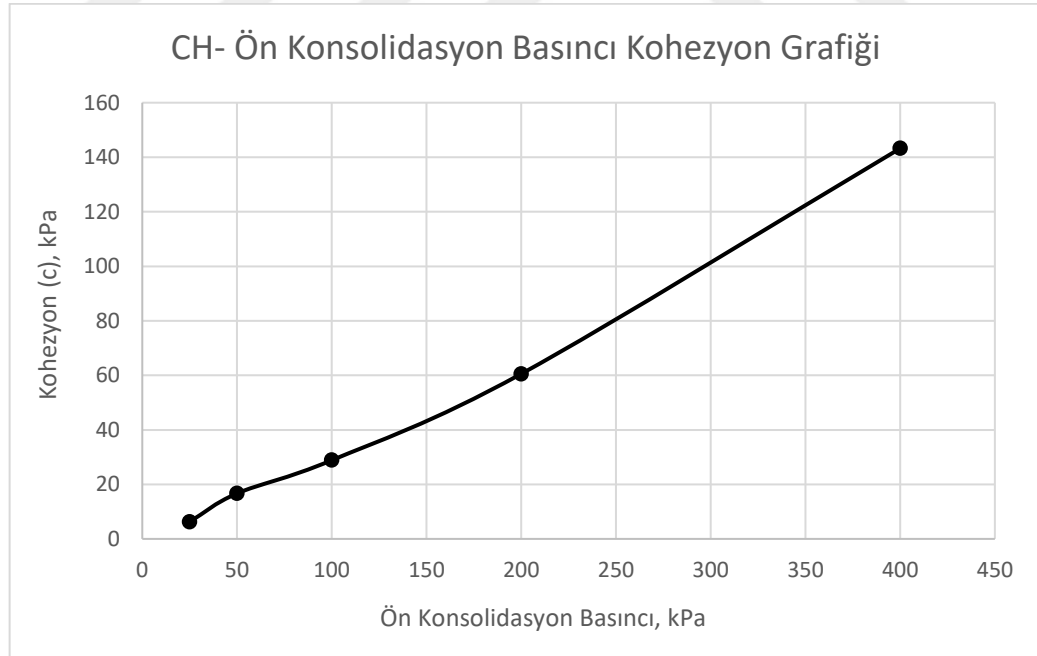
Şekil 5.29. Düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.

Çizelge 5.11. Düşük plastisiteli kil numunelerin veyn deneyi sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE)

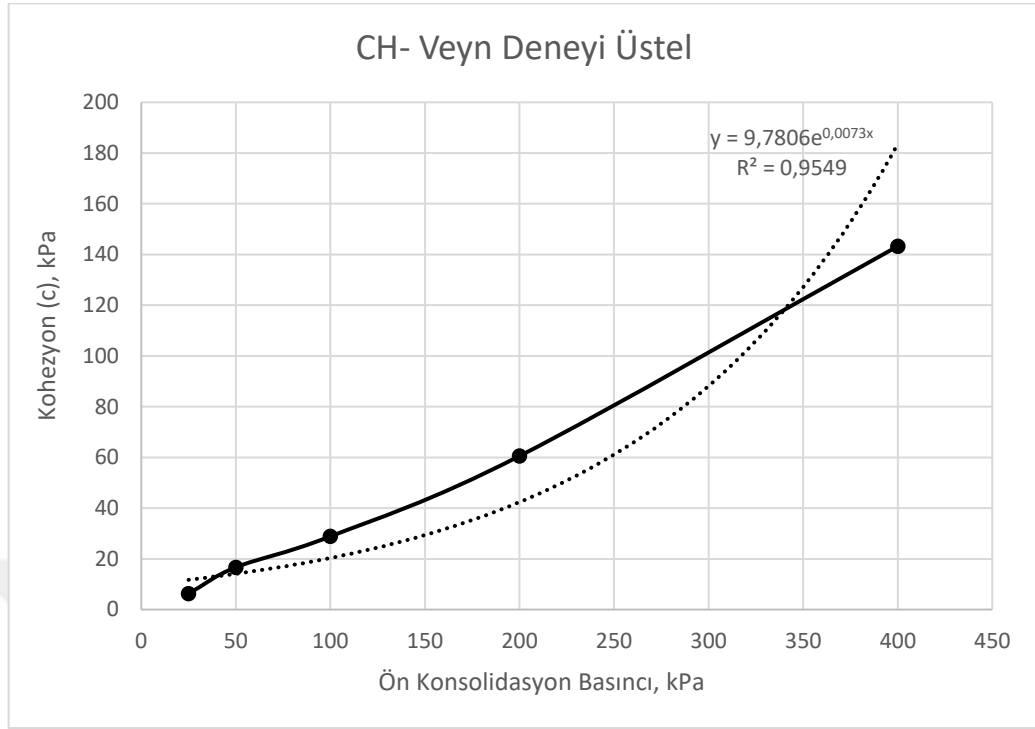
Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=10,701e^{0,0067x}$	0,9457	15,21663
$y=0,3243x-3,2383$	0,9892	4,619393
$y=40,707\ln(x)-140,44$	0,8054	19,61707
$y=0,4116x^{0,9322}$	0,952	9,518533

Çizelge 5.11’de düşük plastisiteli kil numunelerinin veyn deney sonuçlarından oluşturulan bağıntılardan $R^2=0,9892$ ve $RMSE=4,619393$ değerlerine sahip $y=0,3243x-3,2383$ denklemi ileri dönemdeki çalışmalar için önerilir.

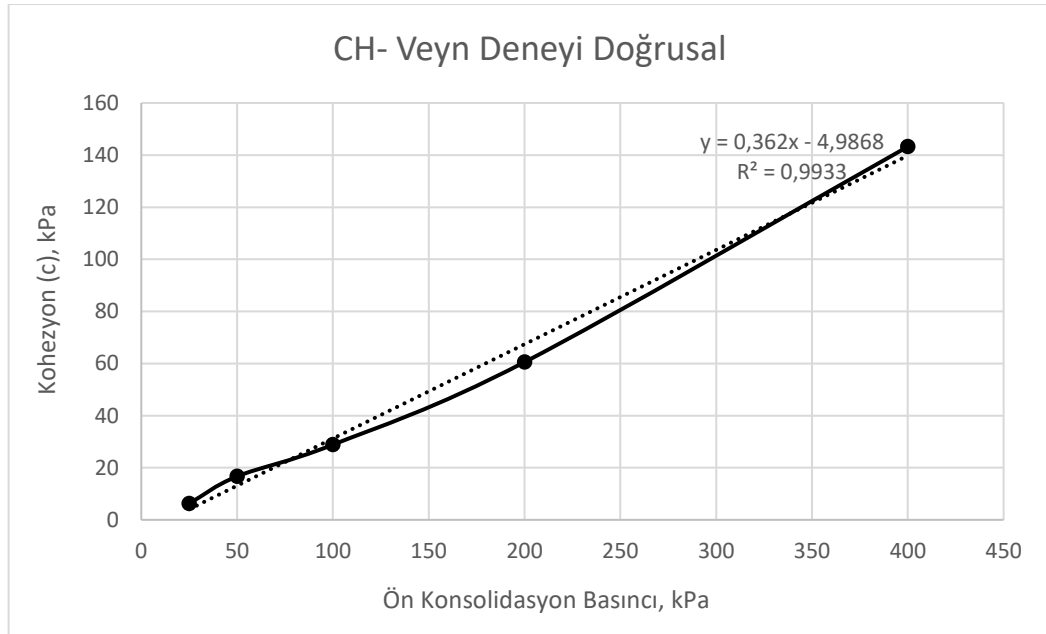
Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’te Veyn deneyinden elde edilmiş yüksek plastisiteli kil numunelerin sonuçları ön konsolidasyon basıncı-kohezyon (c) değerleri arasında oluşturulmuş bağıntılar ve grafikler verilmiştir.



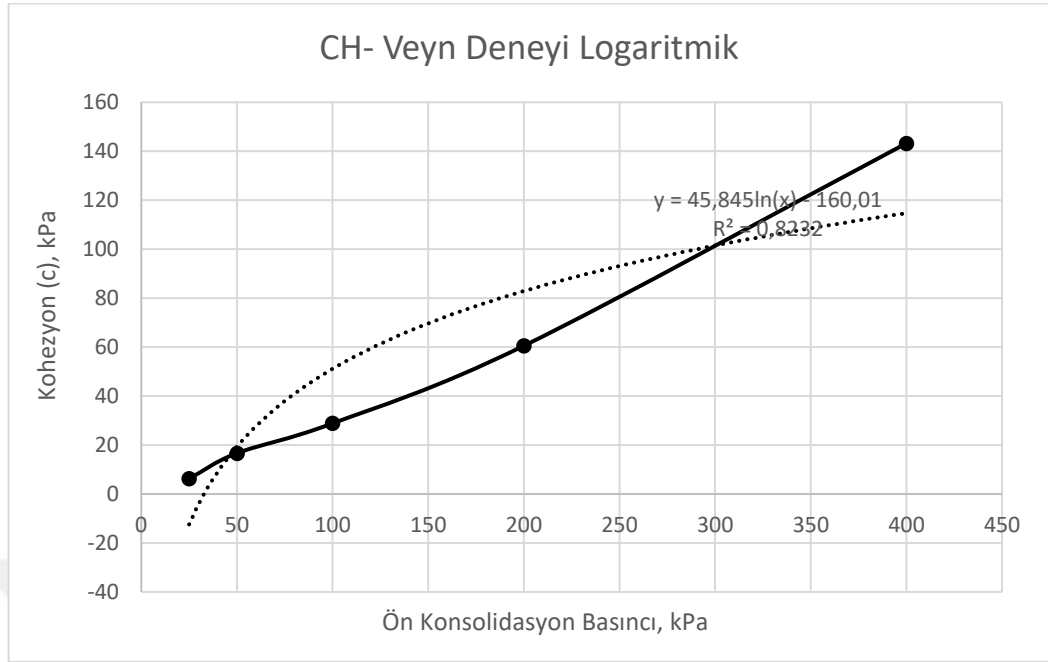
Şekil 5.30. Yüksek plastisiteli kil numunenin veyn deneyleri ön konsolidasyon-kohezyon grafiği



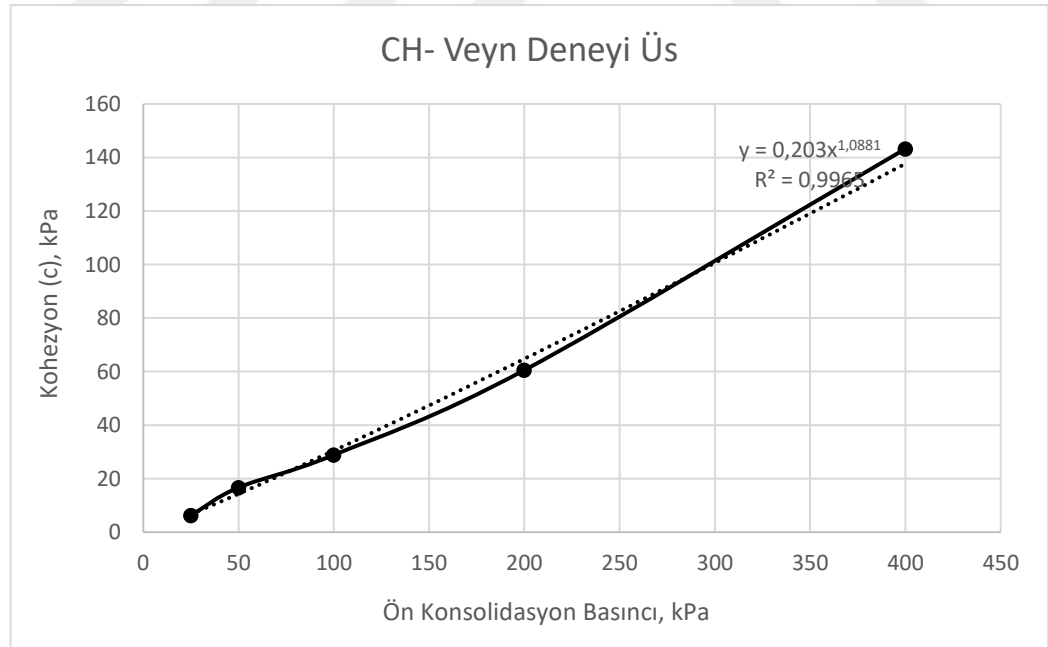
Şekil 5.31. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üstel bağıntı grafiği.



Şekil 5.32. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Doğrusal bağıntı grafiği.



Şekil 5.33. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Logaritmik bağıntı grafiği.



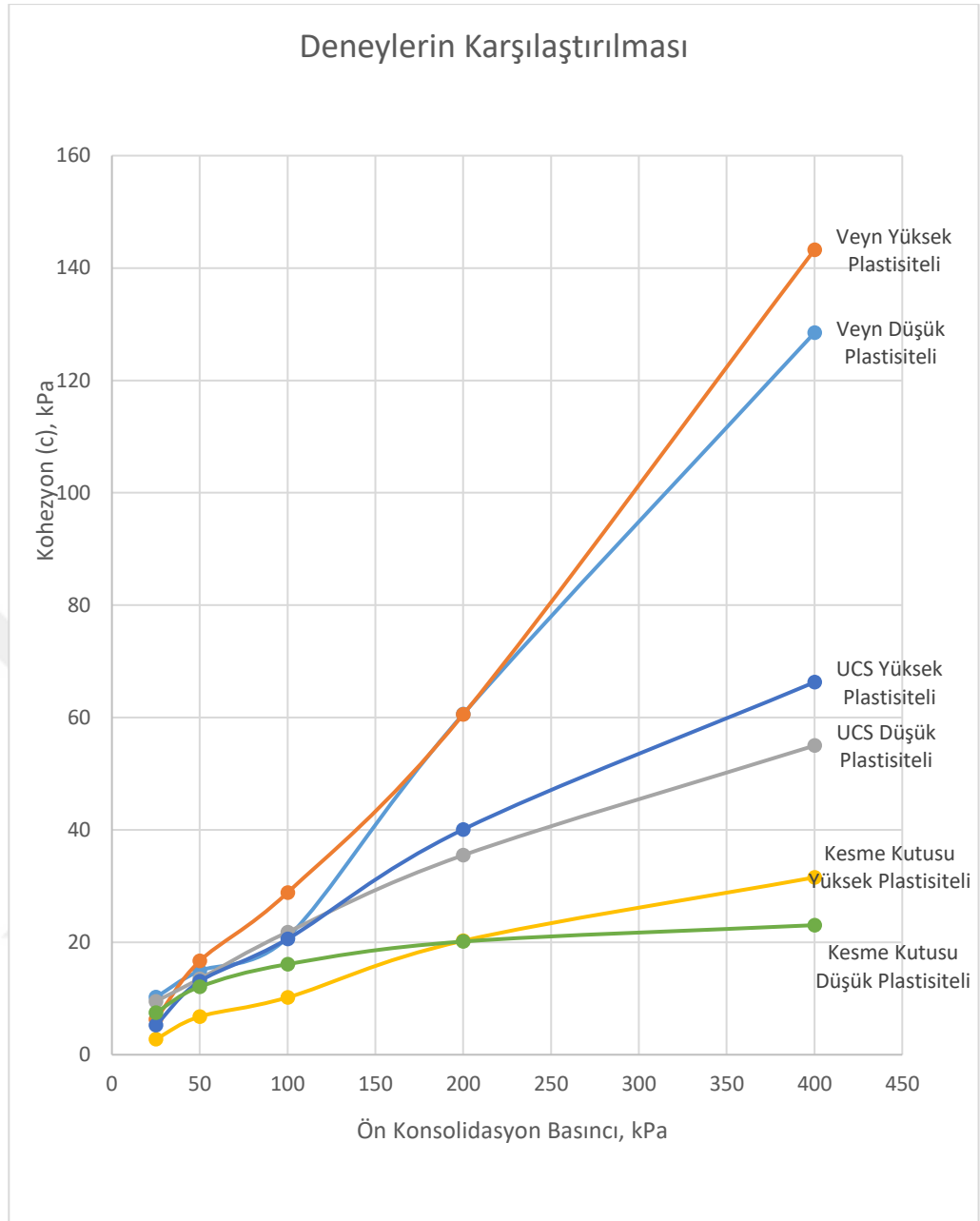
Şekil 5.34. Yüksek plastisiteli kil numunelerinin veyn deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı-kohezyon değerleri arasında oluşturulan Üs bağıntı grafiği.

Çizelge 5.12. Yüksek plastisiteli kil numunelerin kanatlı veyn deneyi sonuçlarından elde edilen denklemler, determinasyon katsayıları (R^2) ve ortalama hata kareleri karekökü değerleri (RMSE)

Elde edilen denklemler	R^2	RMSE
$y=9,7806e^{0,0073x}$	0,8726	19,49939
$y=0,362x-4,9868$	0,9933	4,054065
$y=45,845\ln(x)-160,01$	0,8232	20,82878
$y=0,203x^{1,0881}$	0,9935	3,382341

Çizelge 5.12’de verilen yüksek plastisiteli kil numunelerinin Veyn deney sonuçlarından oluşturulan denklemlerden, $R^2= 0,9935$ ile $RMSE=3,382341$ değerleriyle $y=0,203x^{1,0881}$ denklemi önerilebilir. Ancak basit olması ve hiç de azımsanmayacak determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0,9933 ve ortalama hata kareleri karekökü değeri (RMSE) 4,054065 olan $y=0,362x-4,9868$ denklemi ileri ki çalışmalar için önerilir.

Yüksek ve düşük plastisiteli kil numunelere yapılan serbest basınç, kesme kutusu ve Veyn deneyleri sonuçlarının karşılaştırması Şekil 5.35’de verilmiştir.



Şekil 5.35. Yüksek ve düşük plastisiteli kil numunelerin tüm deney sonuçları karşılaştırması

Yapılan tüm deneyler karşılaştırıldığında yüksek ve düşük plastisiteli kil numunelerin serbest basınç deneyleri, kesme kutusu deneyleri ve veyn deneylerinden elde edilen kohezyon (c) değerlerinin 25 kPa, 50 kPa ve 100 kPa da konsolidasyon basınçlarında benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. 200 kPa ve 400 kPa'lık ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerde serbest basınç ve kesme kutusu deneylerinden elde edilen verilerin kısmen yakın olduğu fakat veyn deneylerinde büyük farklar olduğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, likit kıvamda hazırlanan düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminler 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarında konsolidasyona tabi tutulmuştur. Farklı basınçlarda konsolide edilmiş numunelerin serbest basınç, kesme kutusu ve veyn deneyleri ile kayma mukavemeti parametreleri kohezyon (c) ve içsel sürtünme açıları (ϕ) bulunmuştur. Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli kil zeminler için yapılan serbest basınç, kesme kutusu ve Veyn deneylerinden elde edilen verilerle kohezyon değerini ön konsolidasyon basıncına bağlı olarak tahmin edebilen ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek denklemler oluşturulmuştur. Bu türetilen denklemlerden hata miktarı en düşük, korelasyon katsayısı en yüksek denklem ileri ki çalışmalarda kullanılmak için önerilmiştir.

Çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1-Likit kıvamda hazırlanan farklı ön konsolidasyon basıncına tabi tutulmuş düşük ve yüksek plastisiteli kil numunelerin yapılan serbest basınç deneyleri, kesme kutusu deneyleri ve veyn deneylerinin aynı özellikteki 25 kPa, 50 kPa ve 100 kPa basınçlarında konsolide edilmiş zemin numunelerinde sonuçları hemen hemen birbirine yakın çıkmıştır.

2- Ön konsolidasyon basıncı arttıkça veyn deneyi sonuçları ile serbest basınç deneyi ve kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlar arasında büyük farklar oluşmuştur. Bu durumdan dolayı veyn deneyinin yumuşak zeminlerde daha doğru sonuç verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

3- Likit kıvamda hazırlanmış düşük ve yüksek plastisiteli zeminlerin düşük ön konsolidasyon basınçlarında konsolide edilmesinden sonra da çok yumuşak kaldığı dolayısıyla fazla deformasyon gösterdiği görülmüştür.

4-Yapılan serbest basınç deneyleri neticesinde en düşük kohezyon (c) değerine sahip zemin örneği, ön konsolidasyon basıncı 25 kPa olan yüksek plastisiteli kilde görülmüştür. En yüksek kohezyon (c) değerine sahip olan zemin örneği ise ön konsolidasyon basıncı 400 kPa olan yüksek plastisiteli kilde görülmüştür.

5- Yapılan kesme kutusu deneyleri neticesinde de serbest basınç deney sonuçlarında olduğu gibi en düşük kohezyon (c) değerine sahip zemin örneği, ön konsolidasyon basıncı 25 kPa olan yüksek plastisiteli kilde görülmüştür. En yüksek

kohezyon (c) değerine sahip olan zemin örneği ise ön konsolidasyon basıncı 400 kPa olan yüksek plastisiteli kilde görülmüştür.

6- Düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerde yapılan her deney için ön konsolidasyon basıncı- kohezyon değerleri arasında farklı bağıntılar oluşturulmuştur. Düşük plastisiteli killer için serbest basınç deneylerinden $y=1,1364x-0,646$ denklemi, kesme kutusu deneylerinden $y=5,6509\ln(x)-10,244$ denklemi ve Veyn deneylerinden $y=0,3243x-3,2383$ denklemi önerilmiştir. Yüksek plastisiteli killer içinde yukarıdaki sıralamayla $y=0,1597x+4,2994$, $y=0,0754x+2,6345$, $y=0,362x-4,9868$ denklemleri önerilmiştir.

7- Ön konsolidasyon basıncı- içsel sürtünme açısı (ϕ) ile anlamlı bağıntılar oluşturulamamıştır.

6.2 Öneriler

Deney sayılarının artırılmasıyla daha güçlü istatistiksel bağıntılar oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- ASTM D 2217-85, 1998. Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. United States.
- ASTM D 422-63, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. United States.
- ASTM D 2166-00, 2003. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, In: Annual Book ASTM Standarts, Volume 04.08, West Conshohocken, pp. 201-206.
- ASTM D 2573-01, 2007. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil, ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, PA 283-289
- ASTM D 4318-10, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. United States.
- Ataç, A., E., 2009, Plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Başer, O., 2009, Stabilization of Expansve Soils Using Waste Marble Dust, Master Thesis, Middle East Technical University, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering*, Ankara.
- Baydoğan, H., 2007, Üç Boyutlu Konsolidasyon, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Berilgen, S., A., 2003, Yumuşak Killerin Konsolidasyon Davranışı, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bilici, H., 2017, Aşırı Konsolide Killerin Dayanım Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Binarbaşı, Y., 2014, Killi Zeminlerde Deformasyona Bağlı Kayma Mukavemetinin DeneySEL Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Das, B., M., and Sobhan K., 2014, Compressibility of Soil. Principles of Geotechnical Engineering, 8th edition, ISBN: 978-1-133-10867-2, Cengage Learning, Stamford, 353-428.
- DeGroot, D.J., 2001, Laboratory measurement and interpretation of soft clay mechanical behaviour, *Soil Behaviour and Soft Ground Construction*, ASCE GSP 119: 167-200.
- Di Matteo, L., Bigotti, F., Ricco, R., 2009. Bestfit models to modified proctor properties of compacted soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (7), 992- 996.

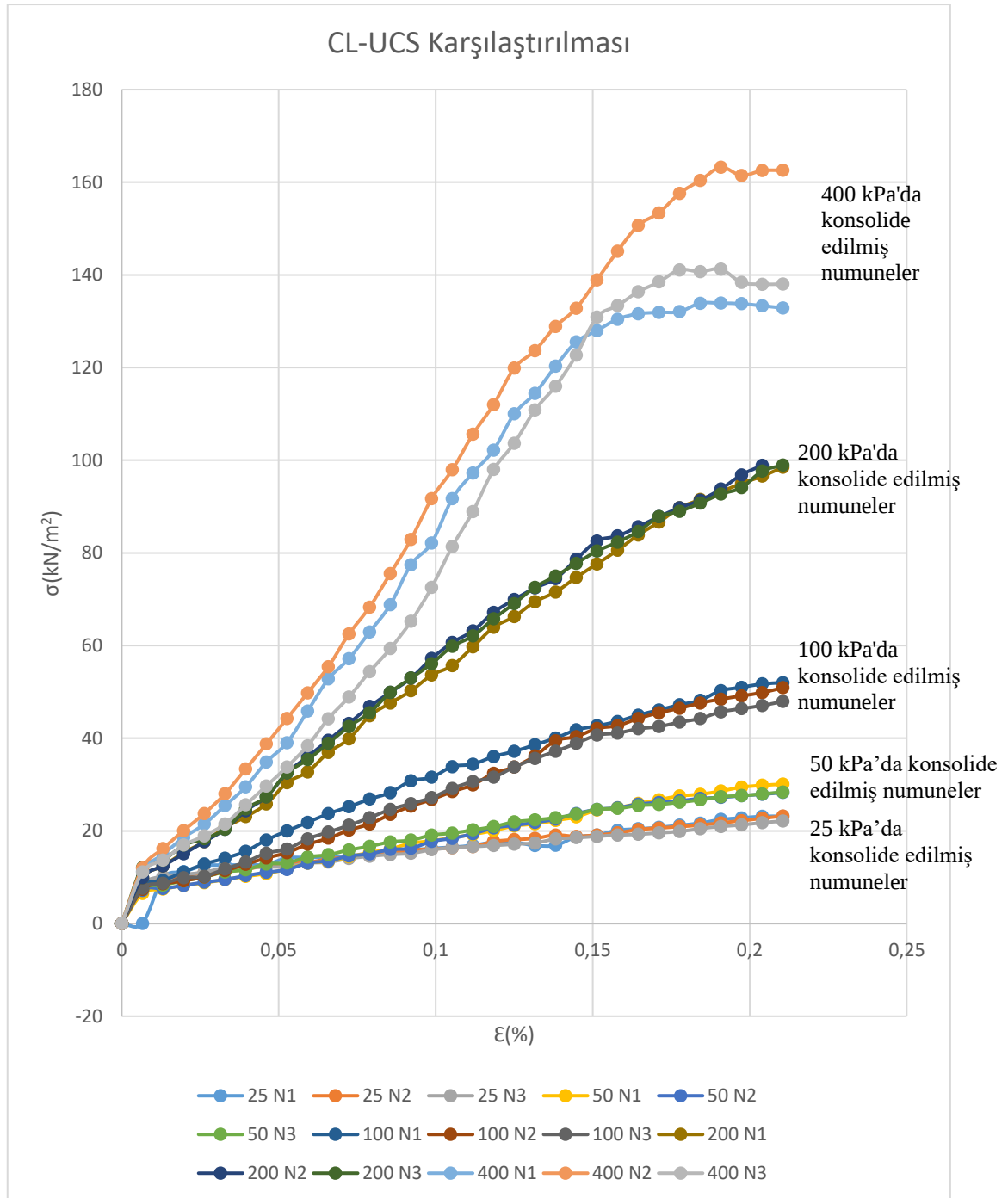
- Durmuş, S., 2007, Düşük Plastisiteli Killi-Kumların Kayma Direnci Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Grim, R.E., 1974, Clay mineralogy, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Hatipoğlu, M., İyisan R., 2016, Yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemetine plastisitenin etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32:2 (2017) 313-322.
- Holtz, D. R., Kovacs, D. W., ve Sheaden, C. T., 2015, *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*, 2, Nobel Akademik, Ankara.
- Jesmani, M., Vaezi, R., Kamalzare, M., 2012. Correlation between C_c alpha/ C_c ratio and index parameters of soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45 (2), 207-220.
- Kahraman, E., 2012, Konsolidasyon Özelliklerinin Arttırılmış Veri Seti ile İstatistiksel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Karapınar, M., 2022, Killerin Kayma Direncinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik.
- Kılıç, E., 2007, Konsolidasyon Özelliklerinin İstatistiksel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Mitchell, J. K., 1976. Fundamentals of Soil Behaviour, USA.
- Mitchell, J.K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, 2nd ed., John Wiley, New York.
- Olsson, M., 2010, Calculating long-term settlement in soft clays – with special focus on the Gothenburg region, *Swedish Geotechnical institute*, Linköping.
- Önalp, A., 2002, Geoteknik Bilgisi I, Birsan Yayınevi Ltd.Şti., İstanbul.
- Öser, C., 2010, Yumuşak Zeminler Üzerindeki Toprak Dolguların Limit Denge ve Performansa Dayalı Tasarımı, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Özaydın, K., 2000: Zemin Mekaniği. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Pane, V., Croce, P., Znidarcic, D., Ko, H.-Y., Olsen, H. W., VE Schiffman, R-L..(1983), Effects of Consolidation on Permeability Measurements for Soft Clay, *Geotechnique*, London, 33(1),67-72.
- Richard, K., Paul, W. M., Jubert, P., (2013), In-situ and laboratory testing of soft clays *Australian Geomechanics Journal* 48(3),61-72.

- Satı, Y., 2016, Sıkıştırılmış İnce Daneli Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Drenajlı Koşullarda İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Sivrikaya, O., Togrol, E., Kayadelen, C., 2008, Estimating compaction behavior of fine-grained soils based on energy, *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 877-887.
- Sridharan, A., Nagaraj, H. B., 2005, Plastic limit and compaction characteristics of fine grained soils, *Ground Improvements*, 9 (1), 17-22.
- Sünnetçi, M., O., Ersoy, H., 2016, Ünye (Ordu) Killerinin Konsolidasyon ve Plastik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 40 (1) 2016.
- Şengül Nomaler, G., 2006, Kilde Kayma Direnci Parametrelerinin Ölçümünde Numune Boyutlarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi , *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Tosun, H., 1994, Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi, *DSİ Teknik Bülteni*, sayı:80, ss.51-60.
- Türköz, M., 2007, Yüksek Plastisiteli Killerin Şişme Potansiyelinin Direkt Deneylerle Belirlenmesi ve Karşılaştırmalı Analiz, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- URL1: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kil> (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2022).
- Uysal, F., Bağrıaçık, B., Yıldız, A., 2018, Yumuşak Zemin Model Parametrelerinin Zemin Davranışına Etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), ss. 97-106.
- Yasuhara, K., Hirao, K., Fl Hyde, A., 1992, Effects Of Cyclic Loading On Undrained Strength and Compressibility Of Clay, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.32, No.1, 100-116.

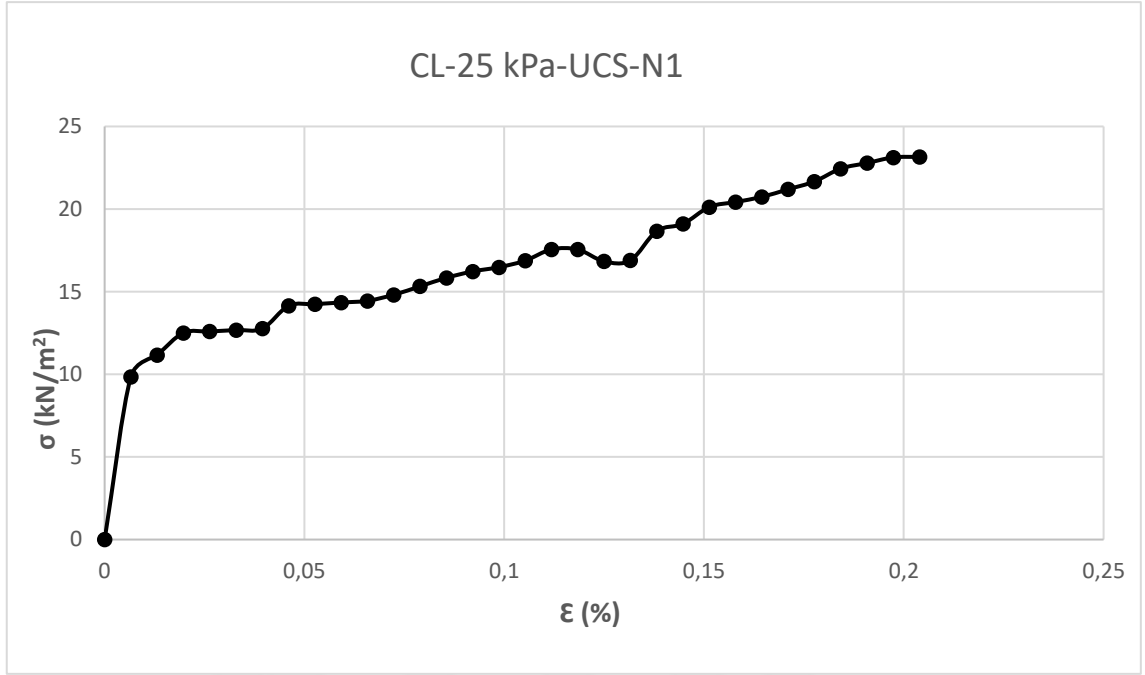
EKLER

EK-1 Düşük plastisiteli kil zeminin serbest basınç deney sonuçları

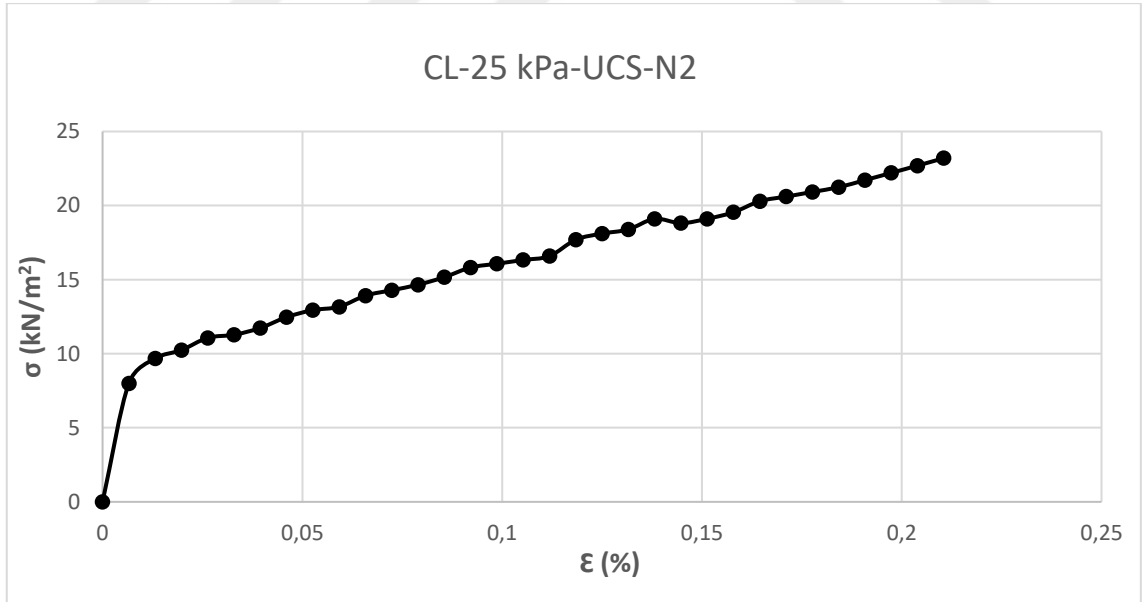
Şekilde 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarda ön konsolidasyona tabi tutulmuş numuneler, Numune 1, Numune 2 ve Numune 3'ün kısaltması olarak N1, N2 ve N3 olarak gösterilmiştir.



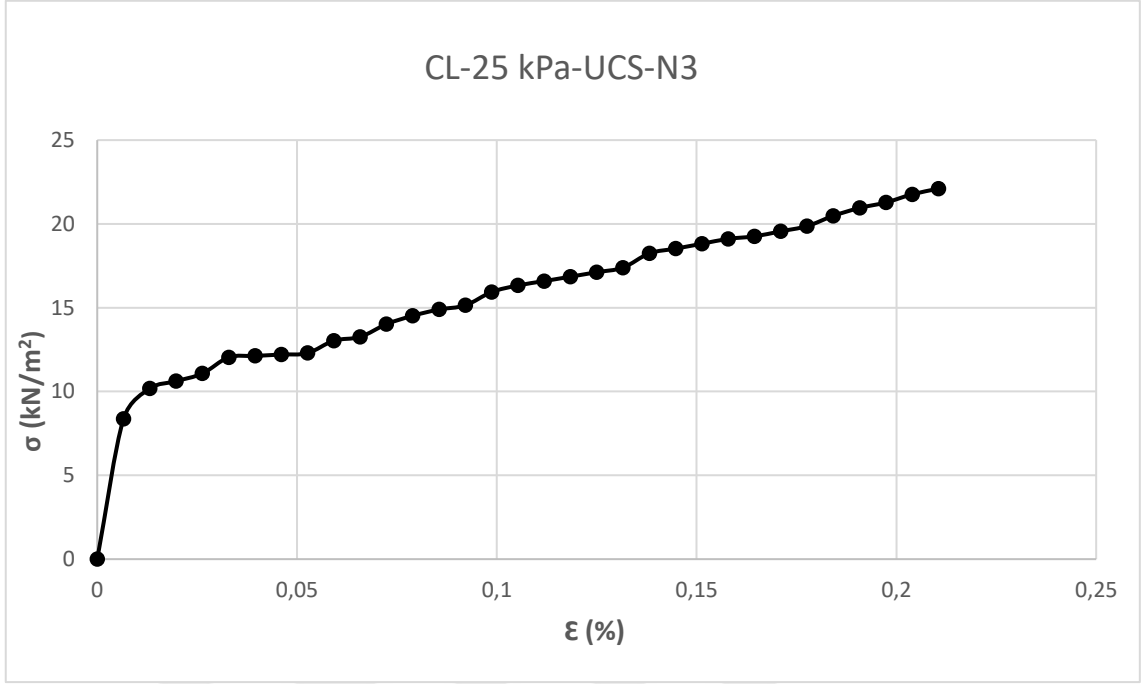
Şekil EK 1.1. Düşük plastisiteli kil zeminlerin serbest basınç deney sonuçları



Şekil EK 1.2. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)



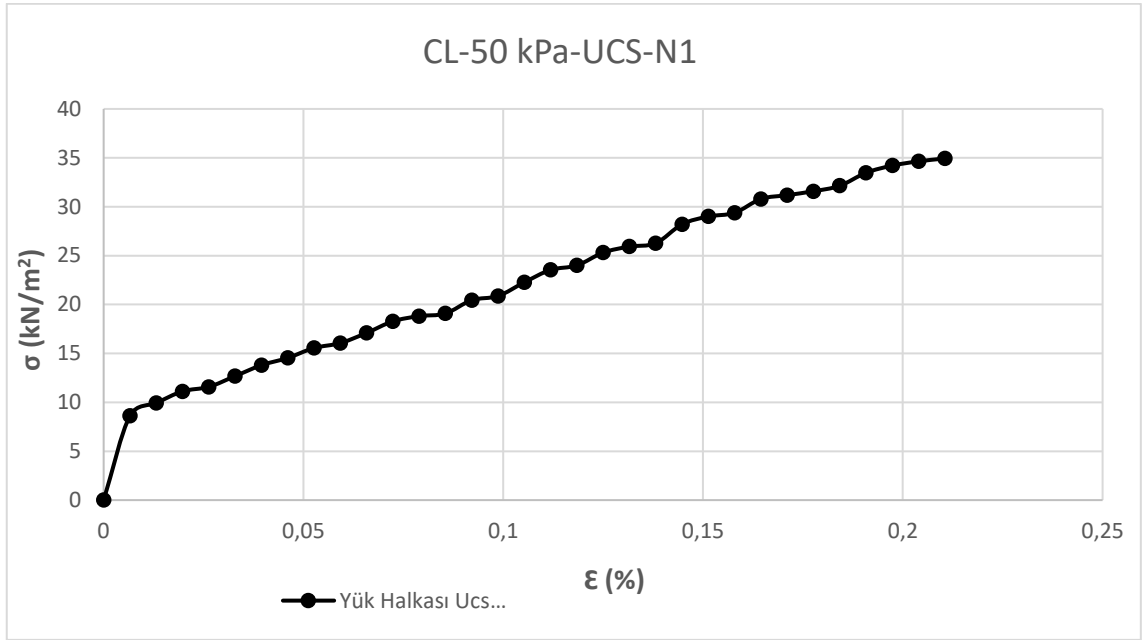
Şekil EK 1.3. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)



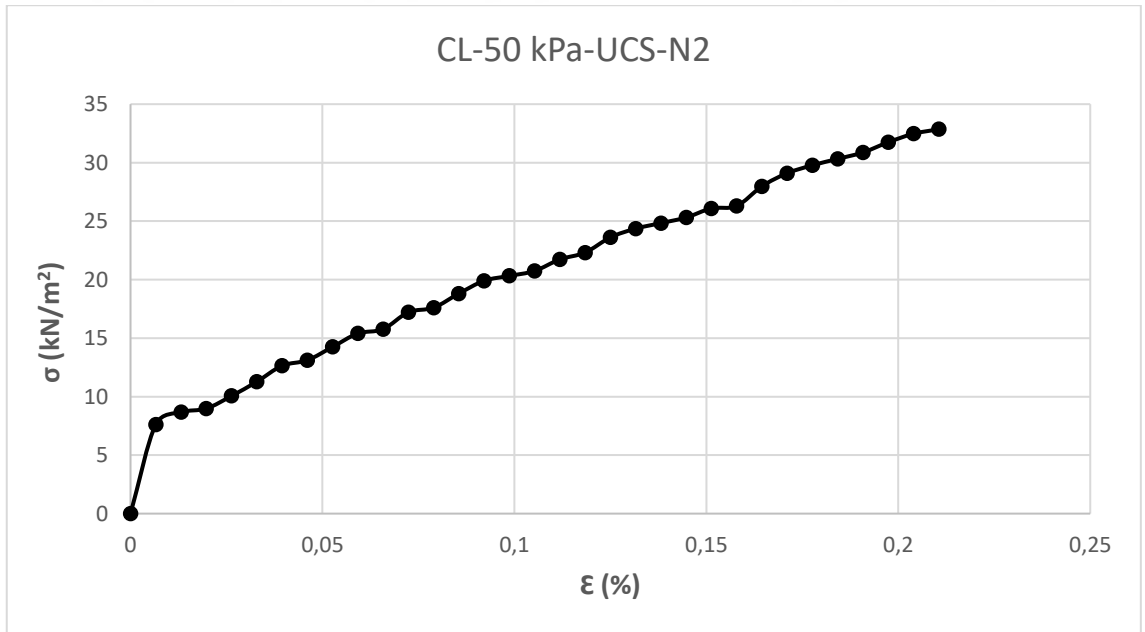
Şekil EK 1.4. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)



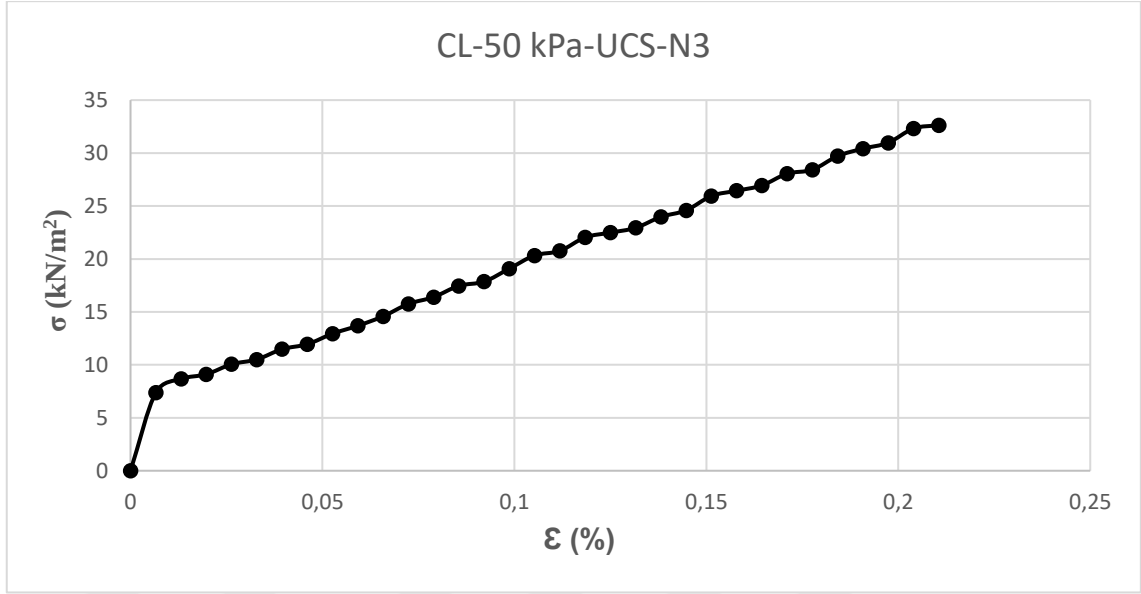
Şekil EK 1.5 Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(25 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 1.6. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)



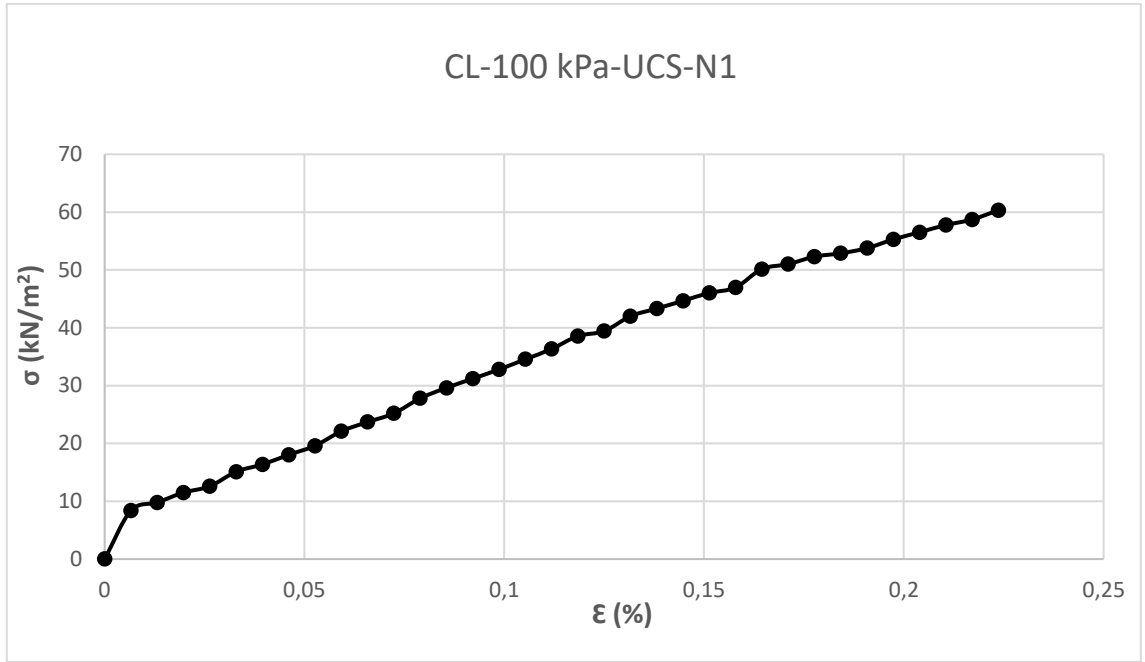
Şekil EK 1.7. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)



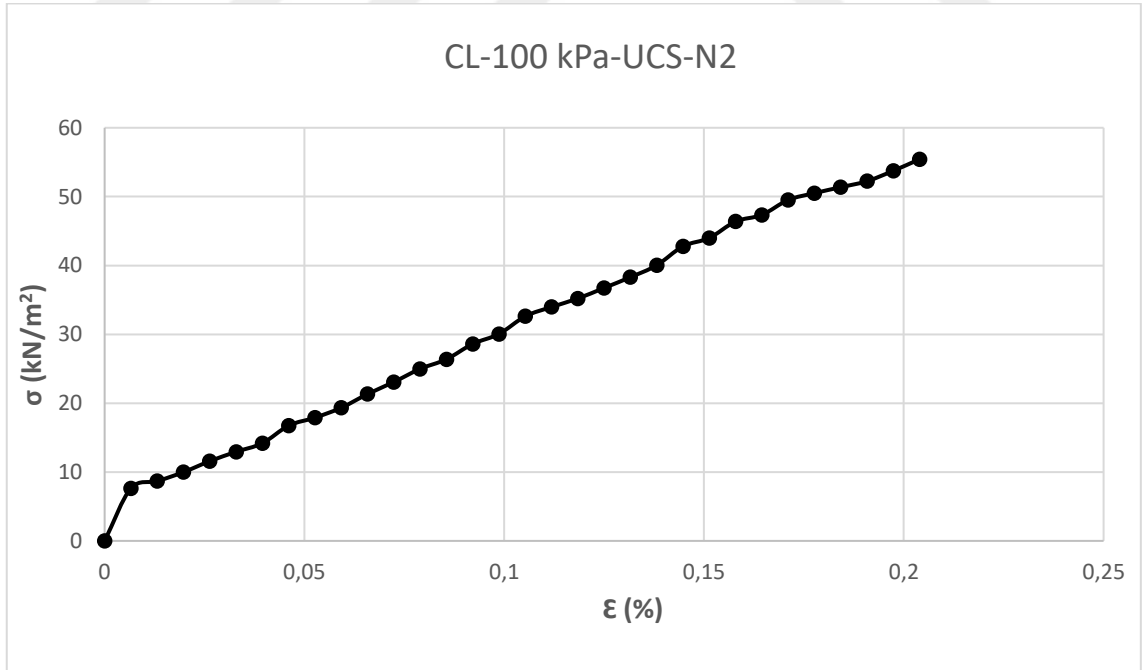
Şekil EK 1.8. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)



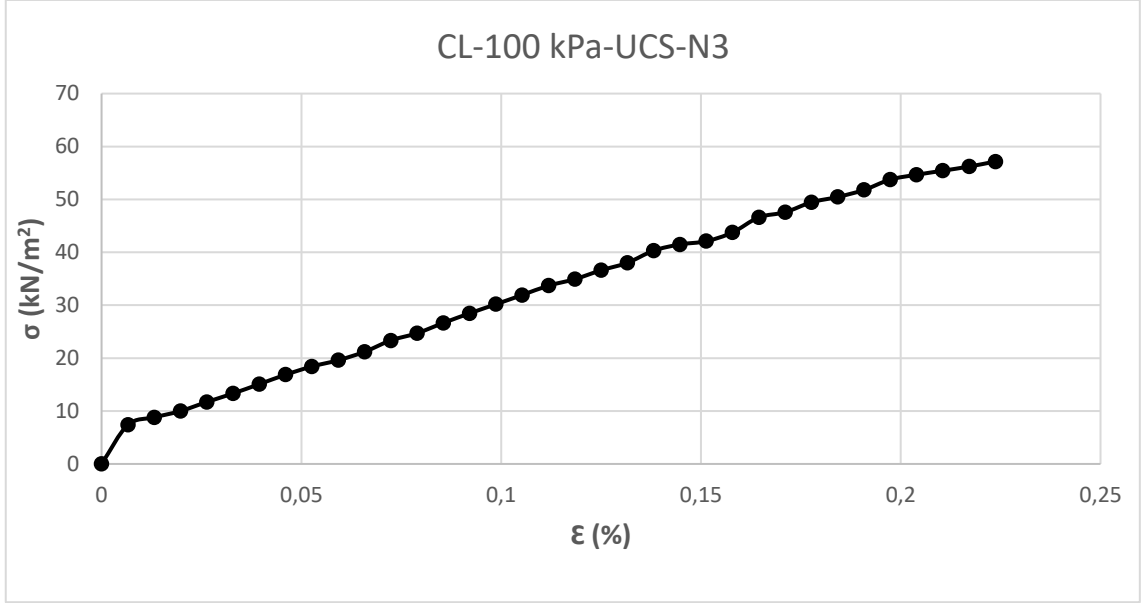
Şekil EK 1.9. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(50 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 1.10. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)



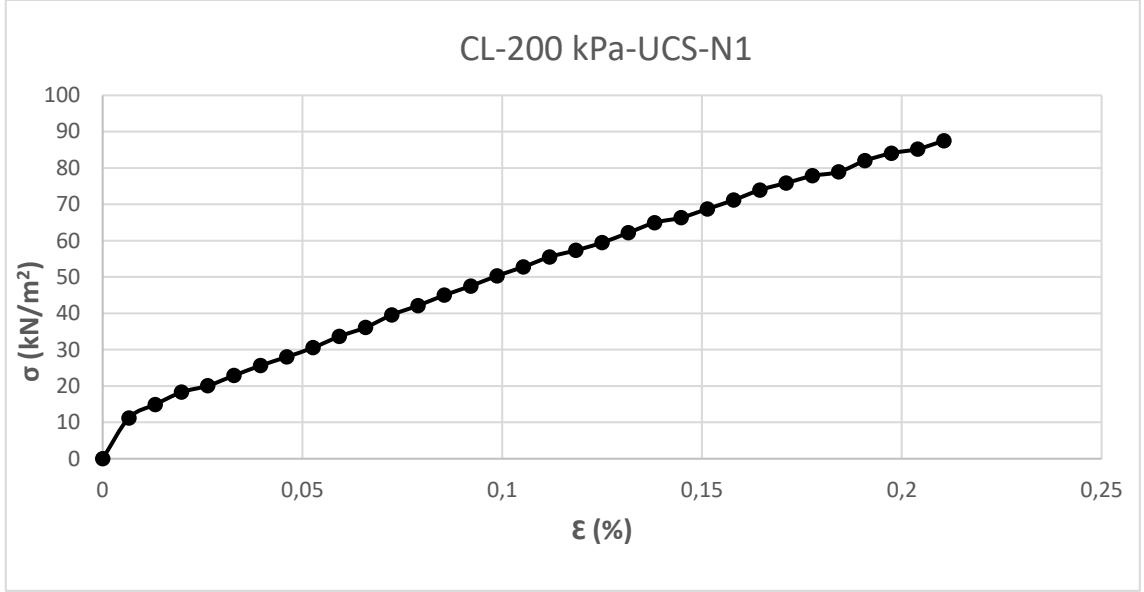
Şekil EK 1.11. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)



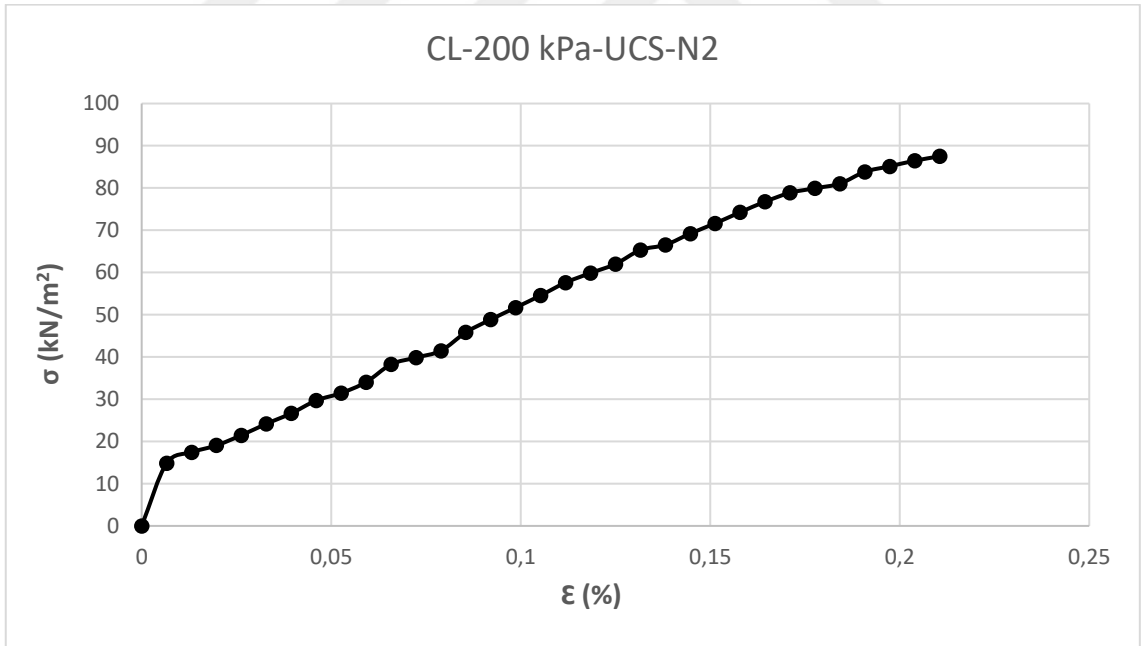
Şekil EK 1.12. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)



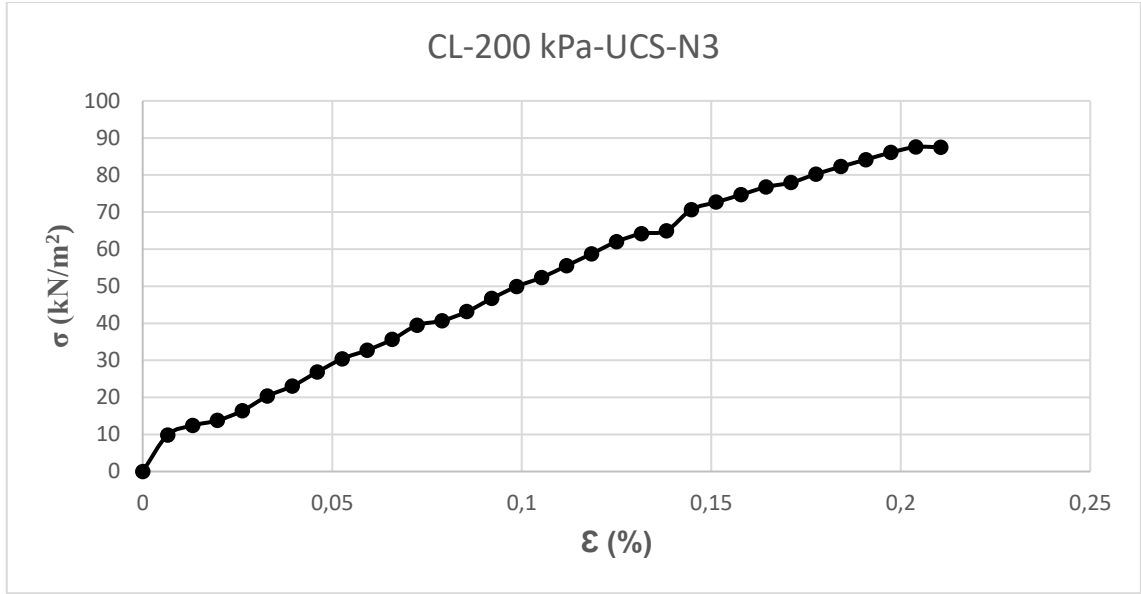
Şekil EK 1.13. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(100 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 1.14. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmik düşük plastisiteli numune 1)



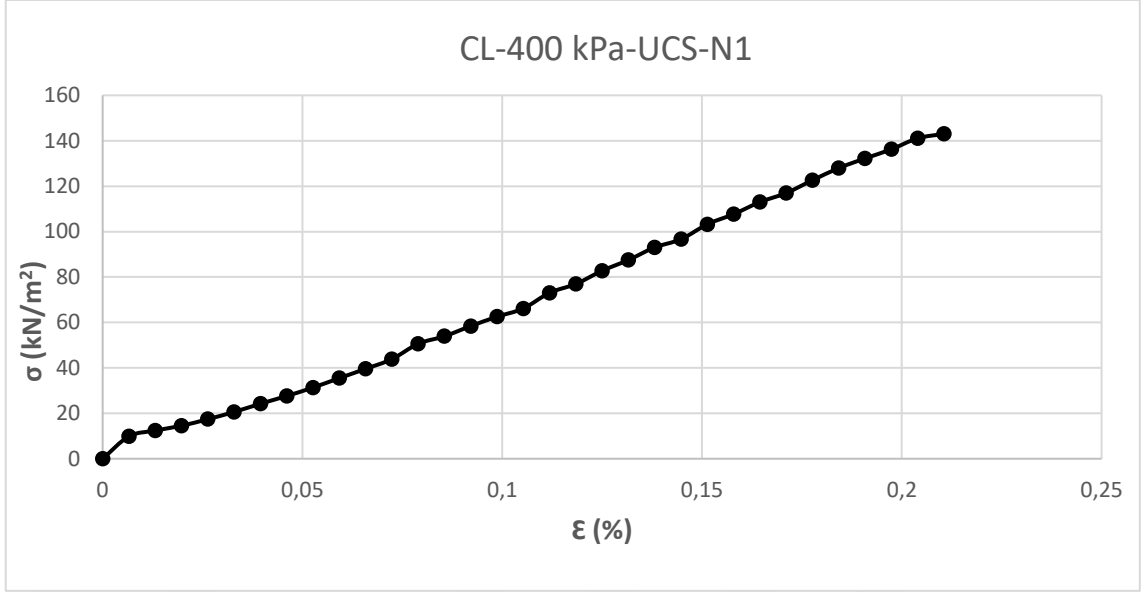
Şekil EK 1.15. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 2)



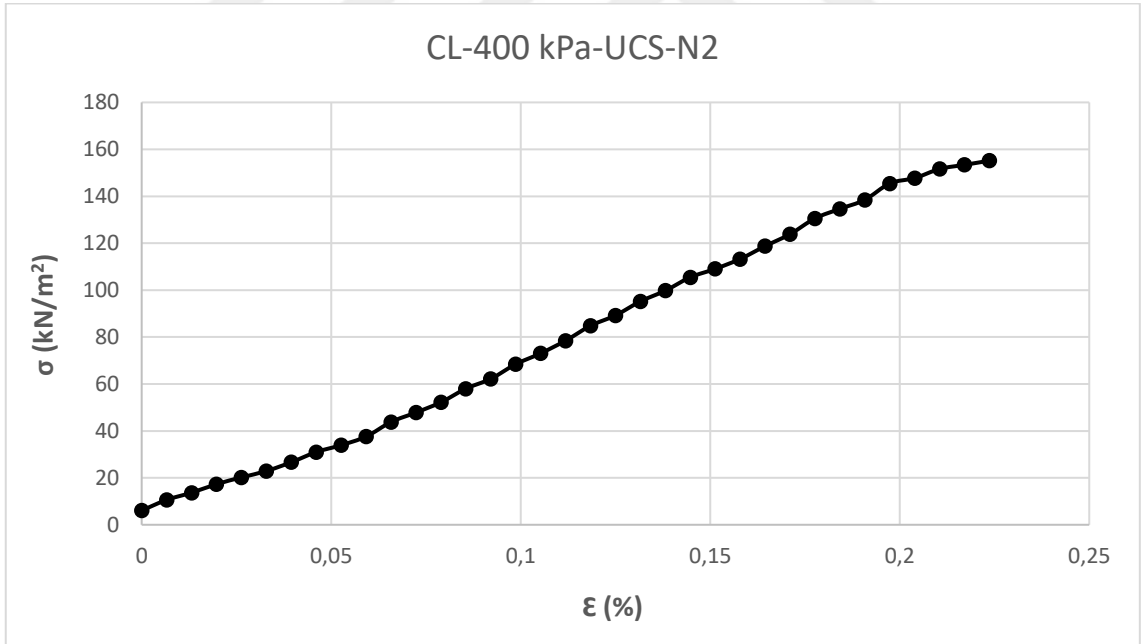
Şekil EK 1.16. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)



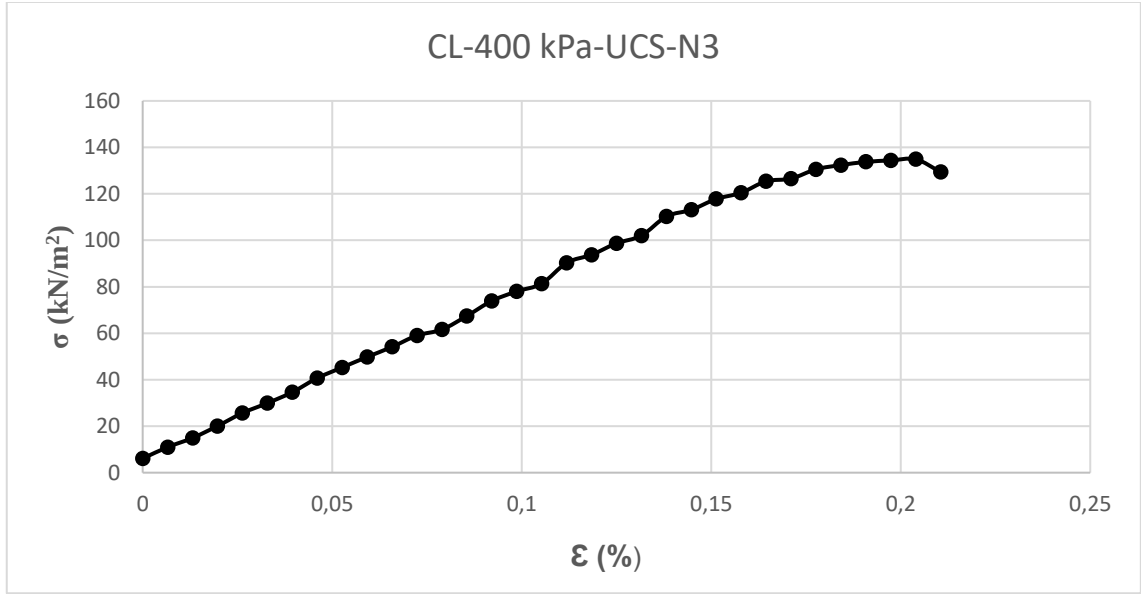
Şekil EK 1.17. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(200 kPa'da konsolide edilmiş)



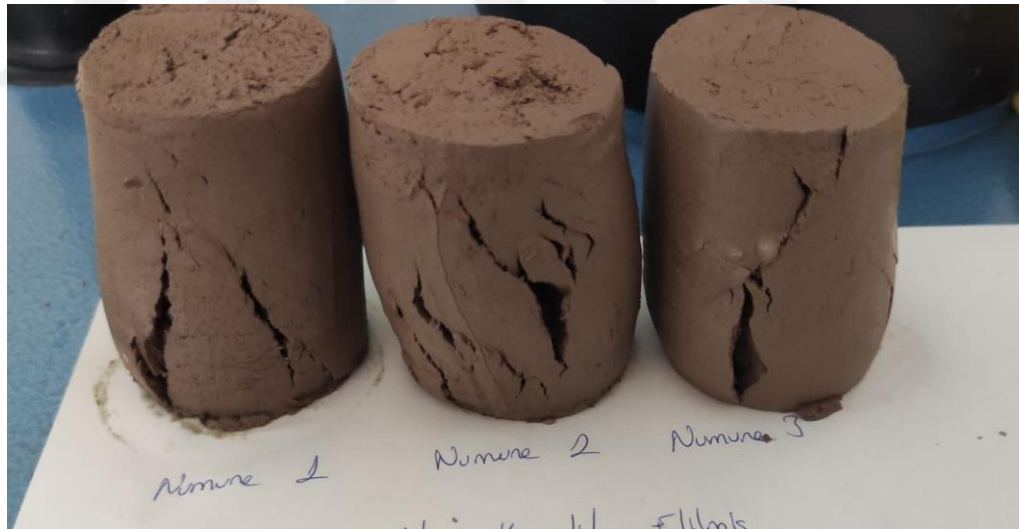
Şekil EK 1.18. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 1)



Şekil EK 1.19. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmik düşük plastisiteli numune 2)



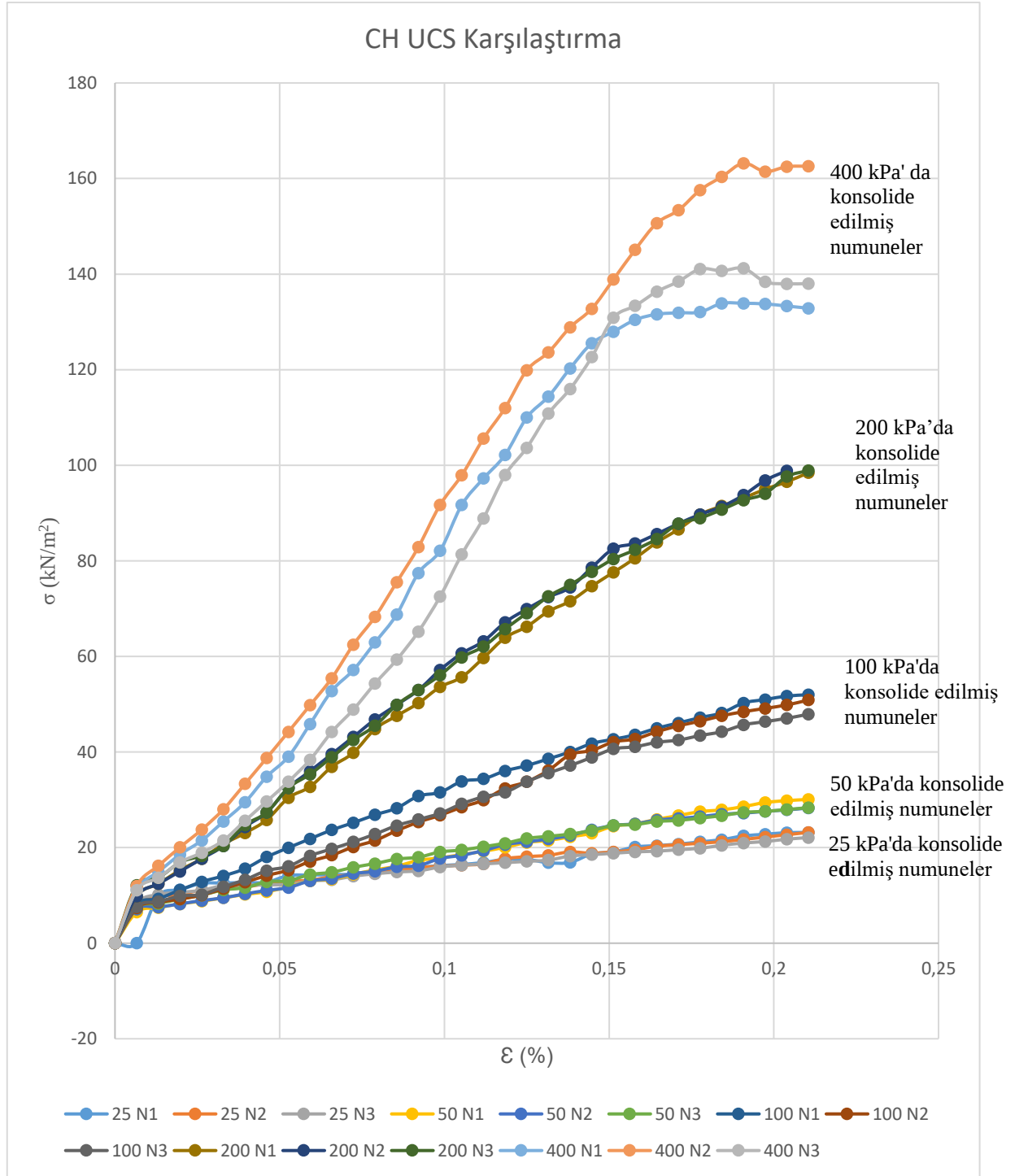
Şekil EK 1.20. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli numune 3)



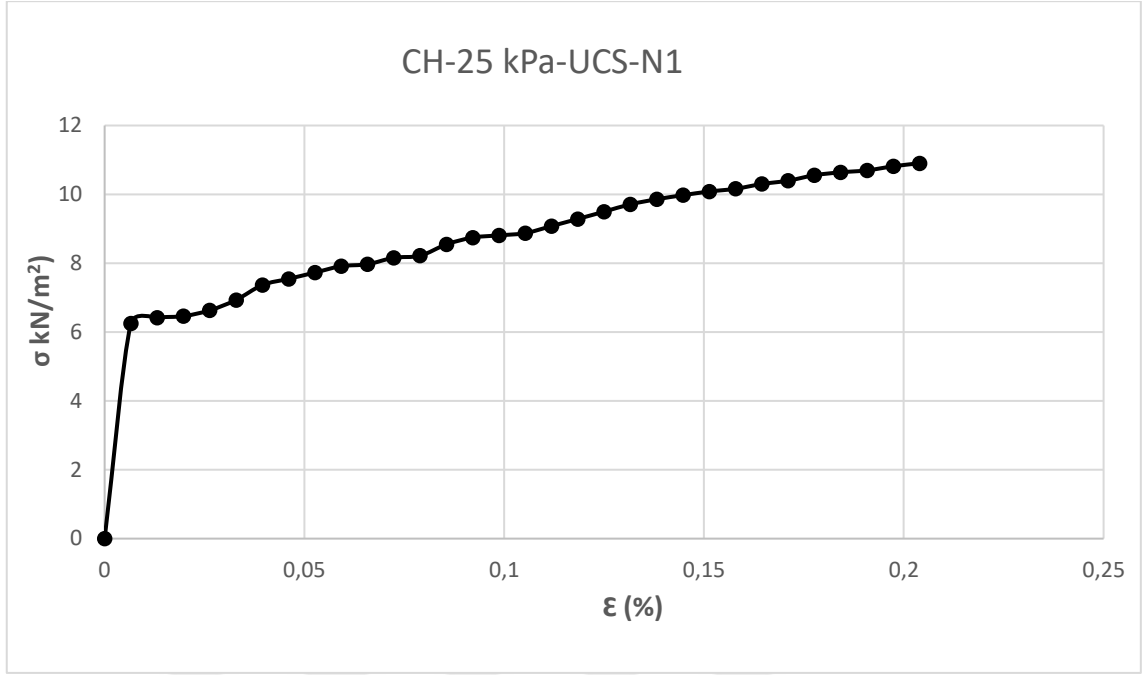
Şekil EK 1.21. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(400 kPa'da konsolide edilmiş)

EK-2 Yüksek plastisiteli kil zeminin serbest basınç deney sonuçları

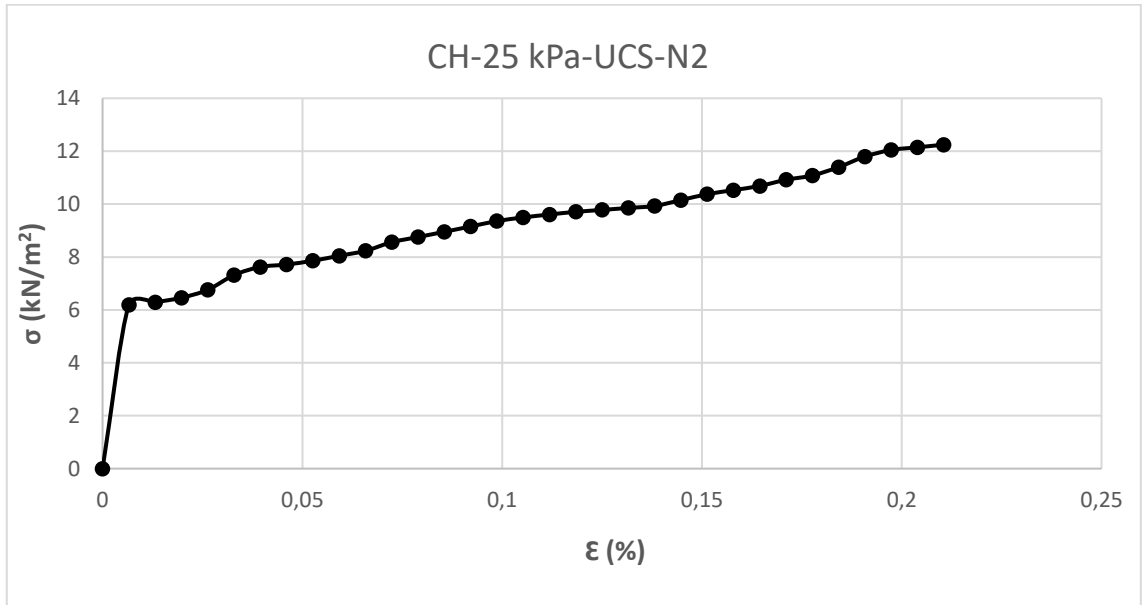
Şekilde 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınçlarda ön konsolidasyona tabi tutulmuş numuneler, Numune 1, Numune 2 ve Numune 3'ün kısaltması olarak N1, N2 VE N3 olarak gösterilmiştir.



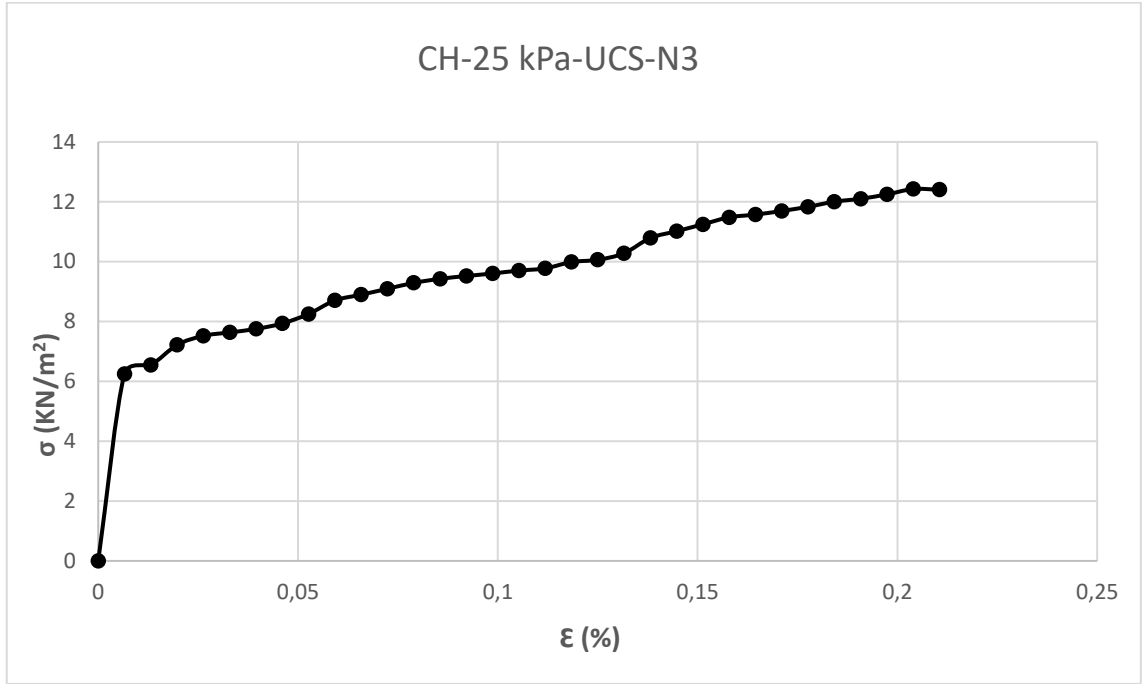
Şekil EK 2.1. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin serbest basınç deney sonuçları



Şekil EK 2.2. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)



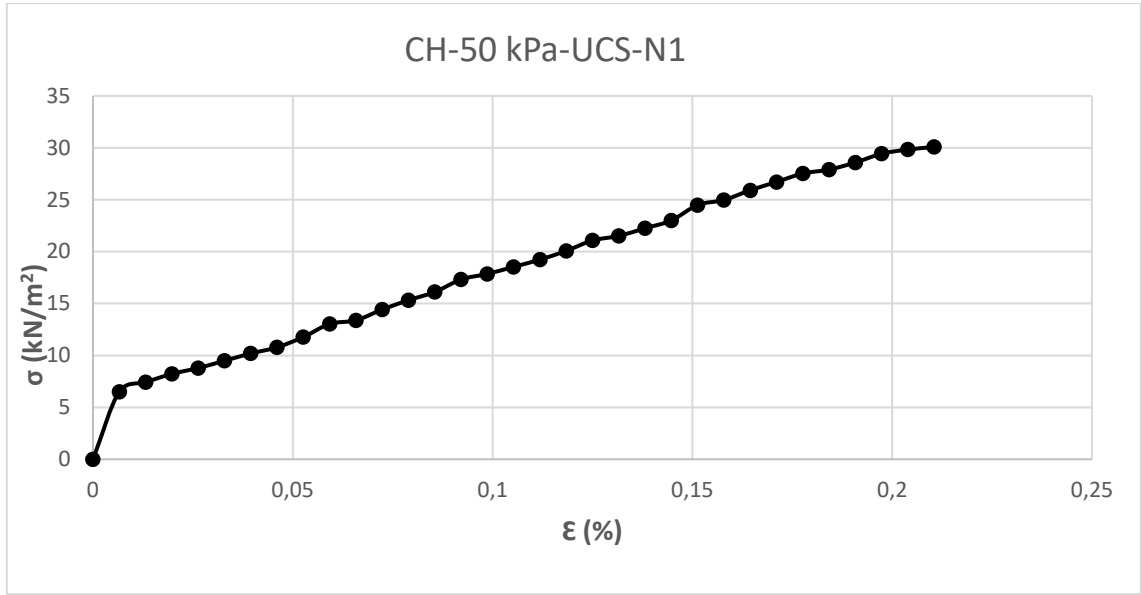
Şekil EK 2.3. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)



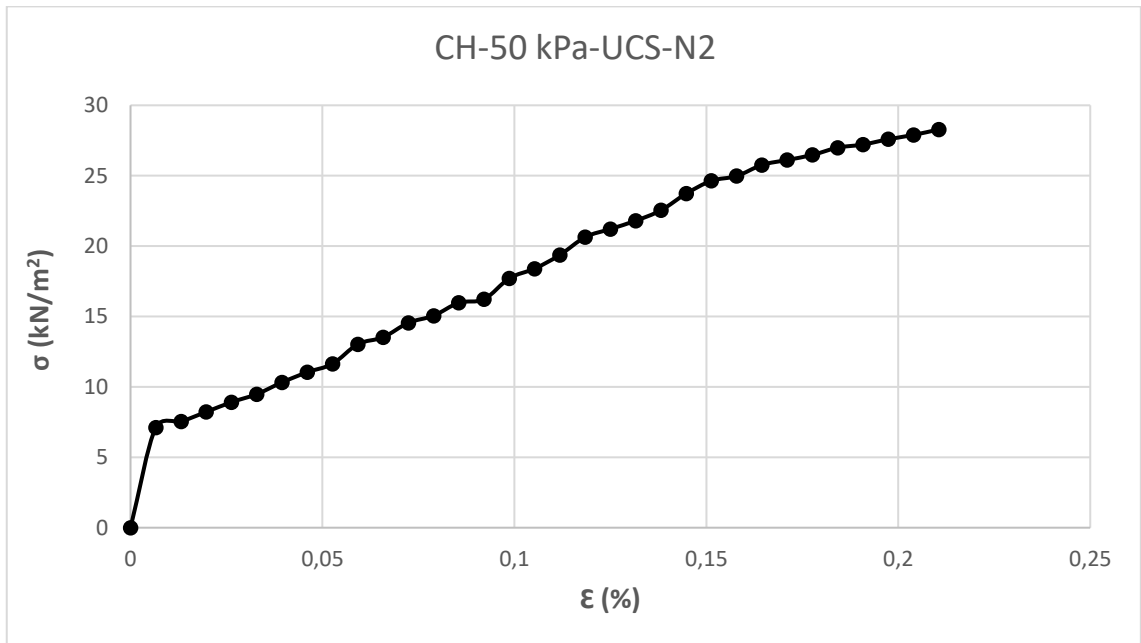
Şekil EK 2.4. Serbest basınç deney sonuçları
(25 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)



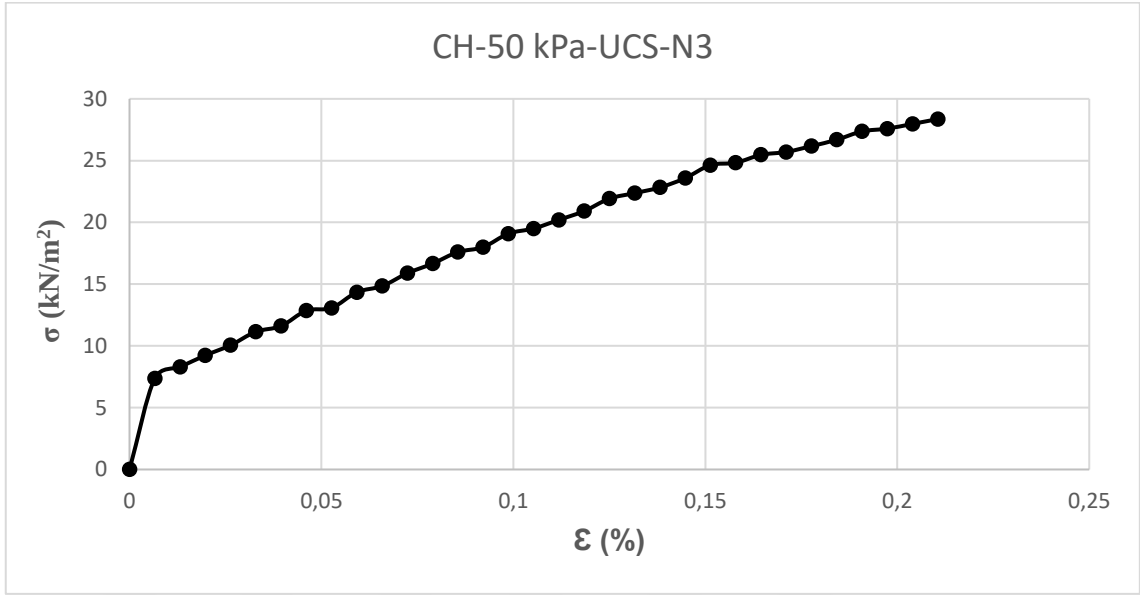
Şekil EK 2.5. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(25 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 2.6. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)



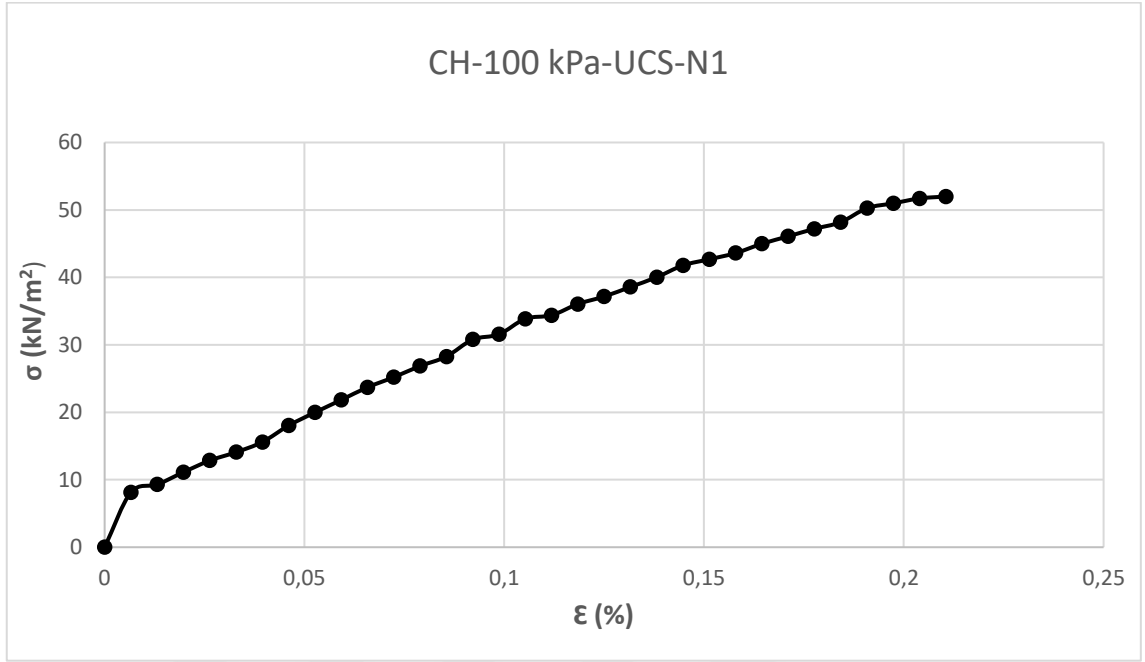
Şekil EK 2.7. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)



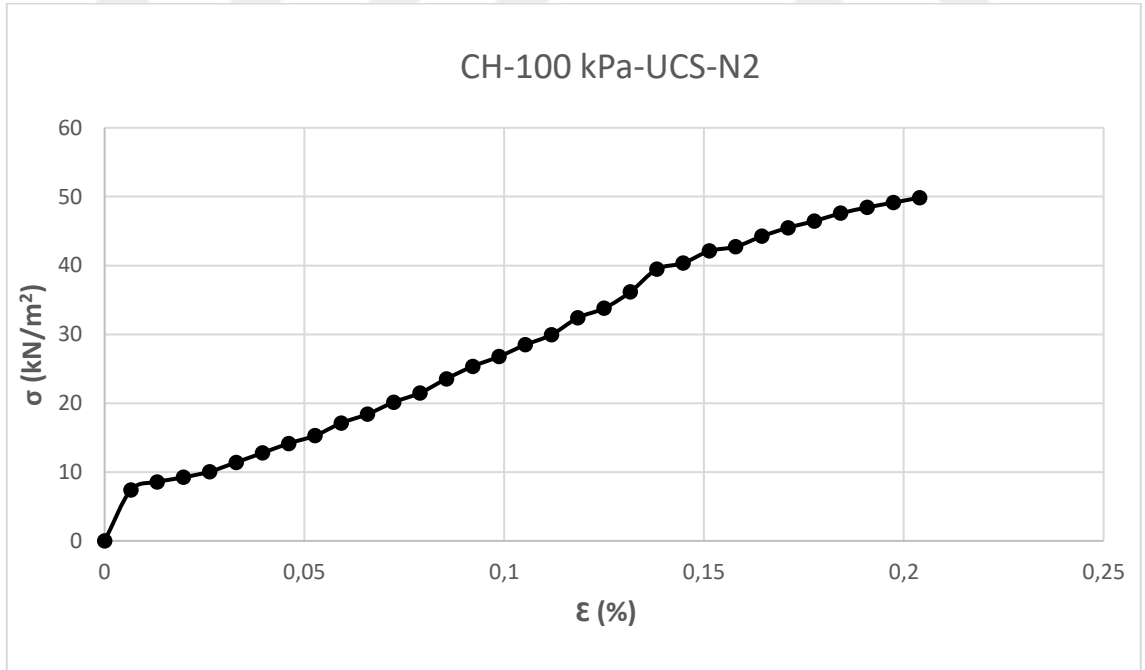
Şekil EK 2.8. Serbest basınç deney sonuçları
(50 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)



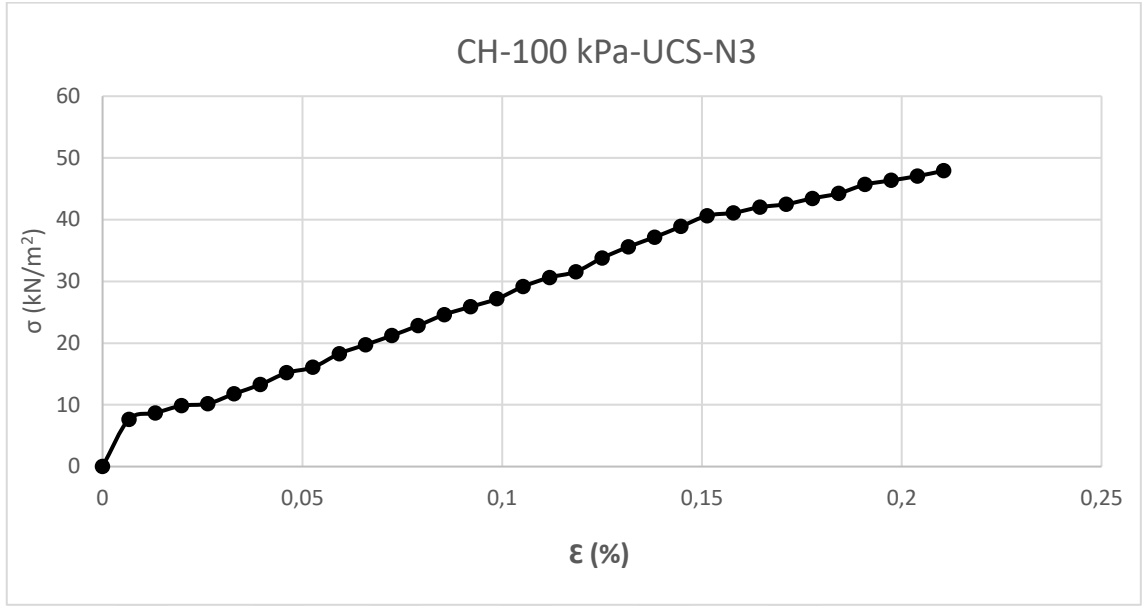
Şekil EK 2.9. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(50 kPa'da konsolide edilmiş)



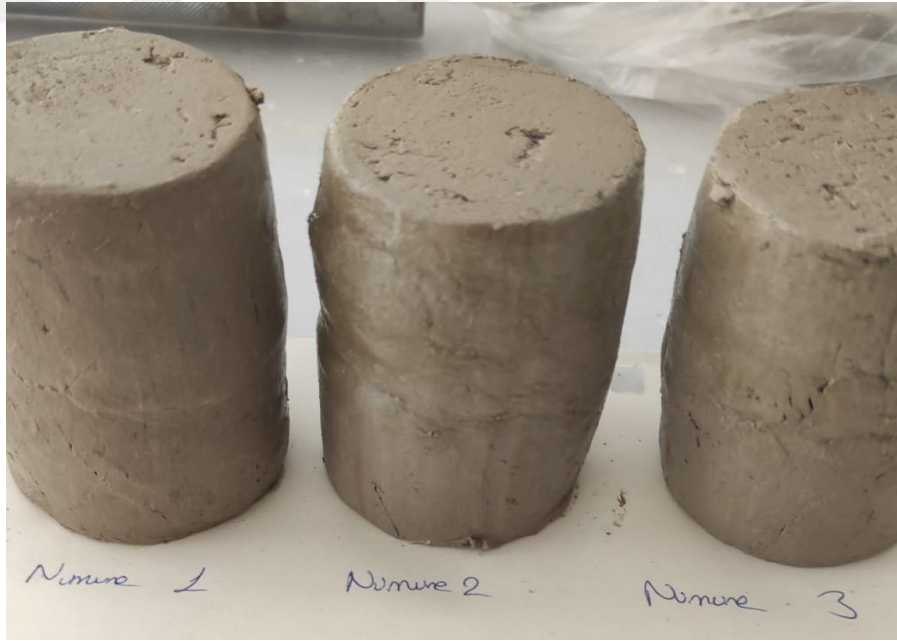
Şekil EK 2.10. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)



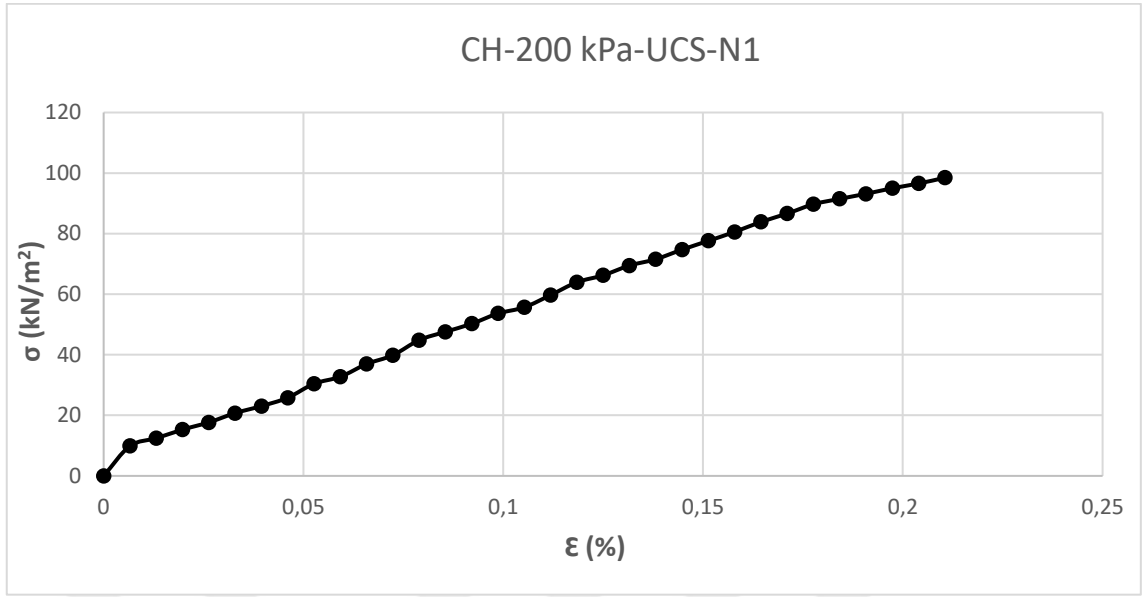
Şekil EK 2.11. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)



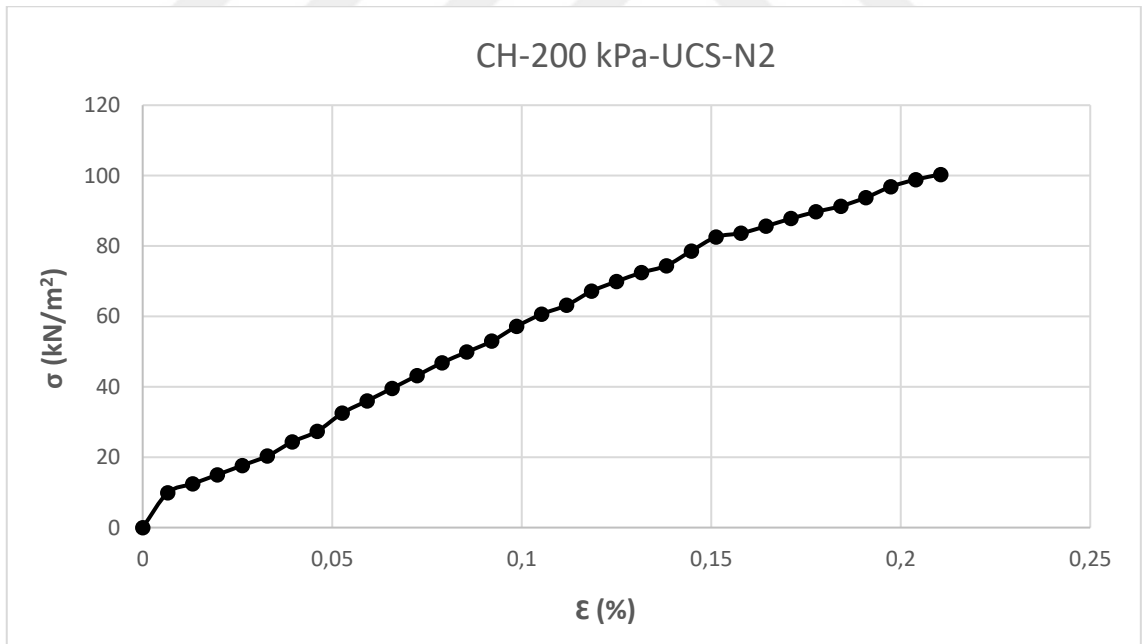
Şekil EK 2.12. Serbest basınç deney sonuçları
(100 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)



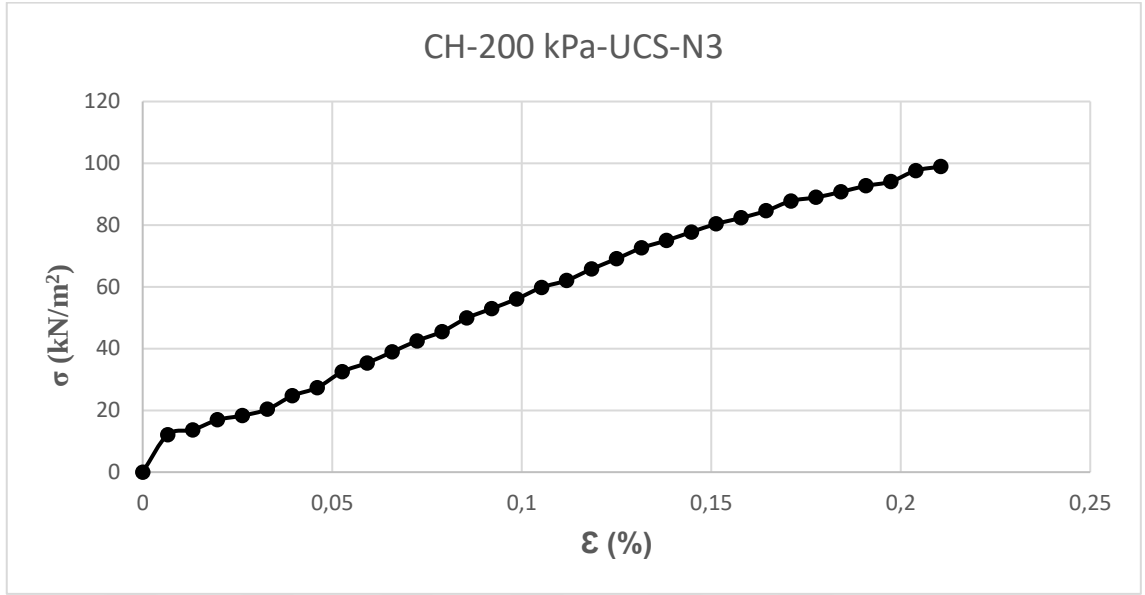
Şekil EK 2.13. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(100 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 2.14. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)



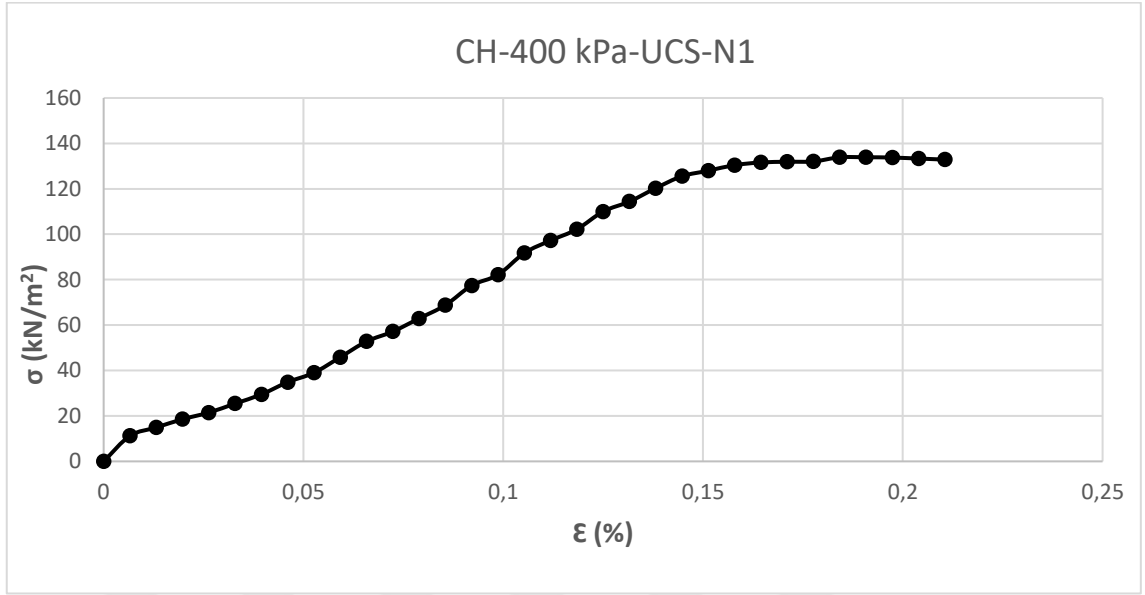
Şekil EK 2.15. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)



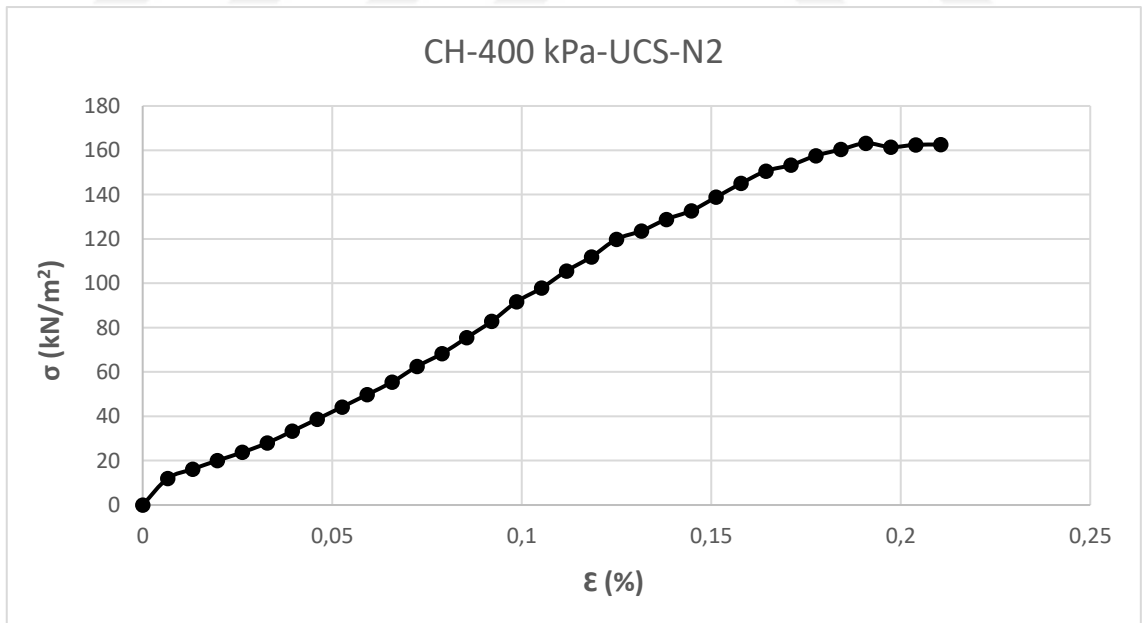
Şekil EK 2.16. Serbest basınç deney sonuçları
(200 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)



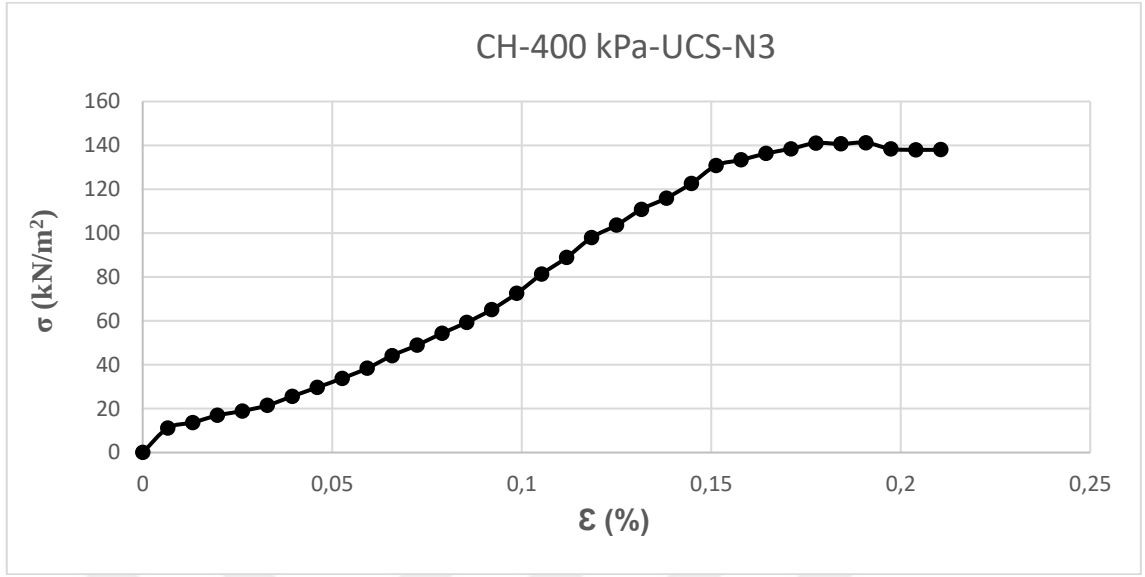
Şekil EK 2.17. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(200 kPa'da konsolide edilmiş)



Şekil EK 2.18. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 1)



Şekil EK 2.19. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 2)

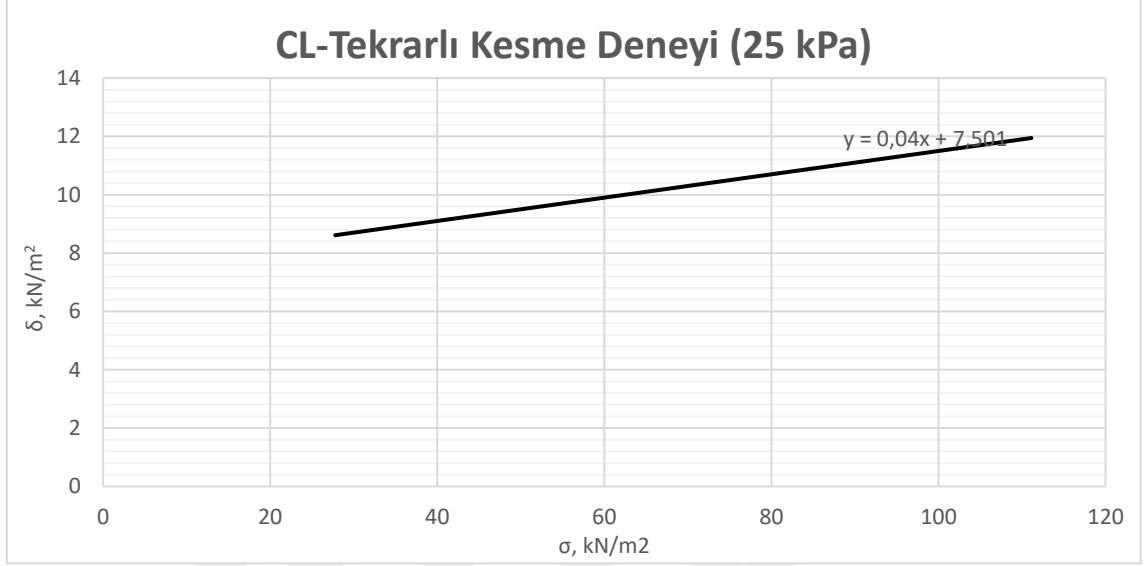


Şekil EK 2.20. Serbest basınç deney sonuçları
(400 kPa'da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli numune 3)

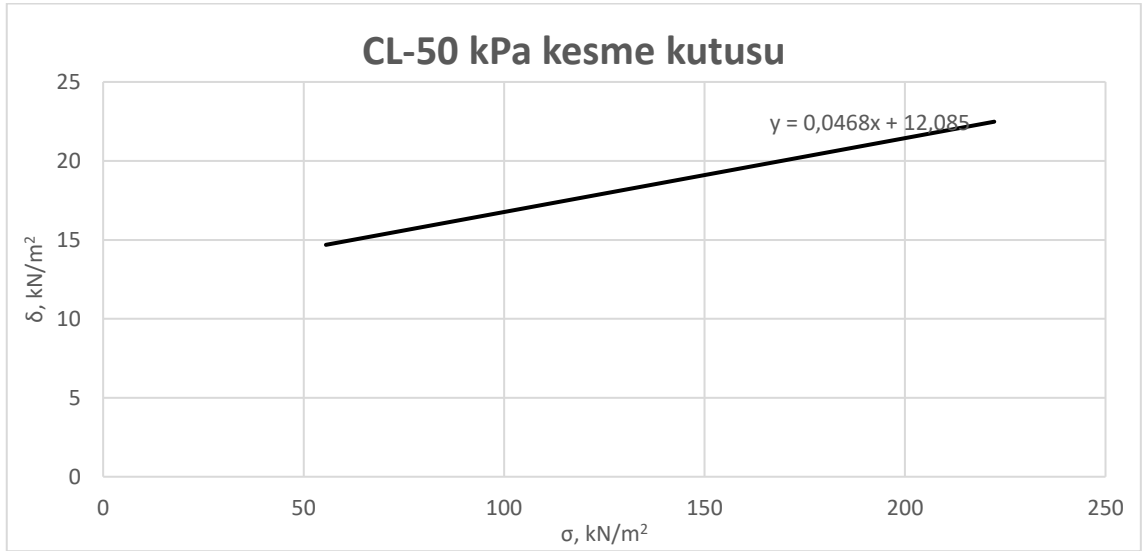


Şekil EK 2.21. Serbest basınç deneyi sonunda numuneler
(400 kPa'da konsolide edilmiş)

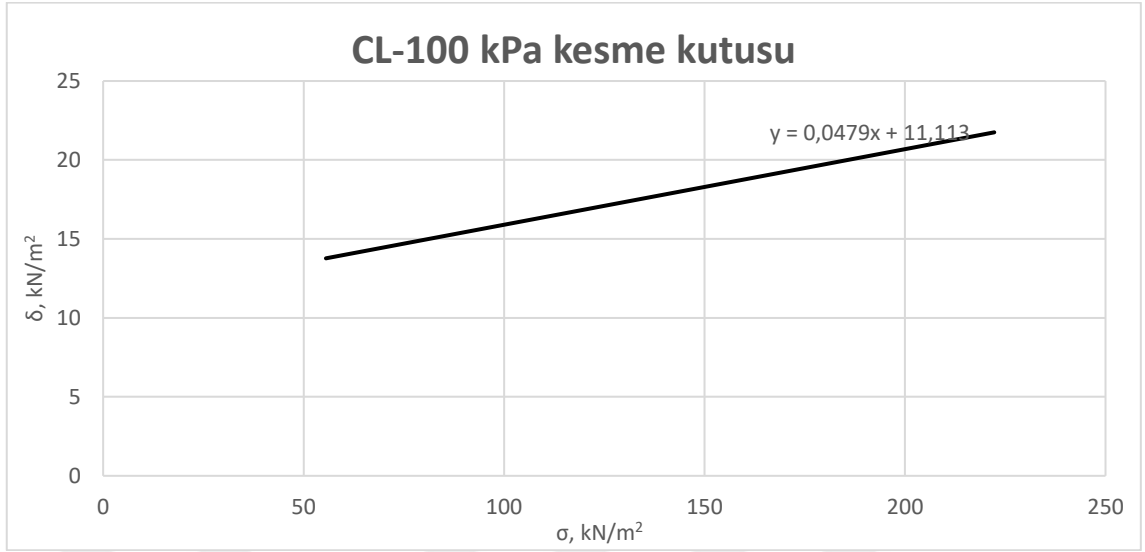
EK-3 Düşük plastisiteli kil zeminin kesme kutusu deneyi sonuçları



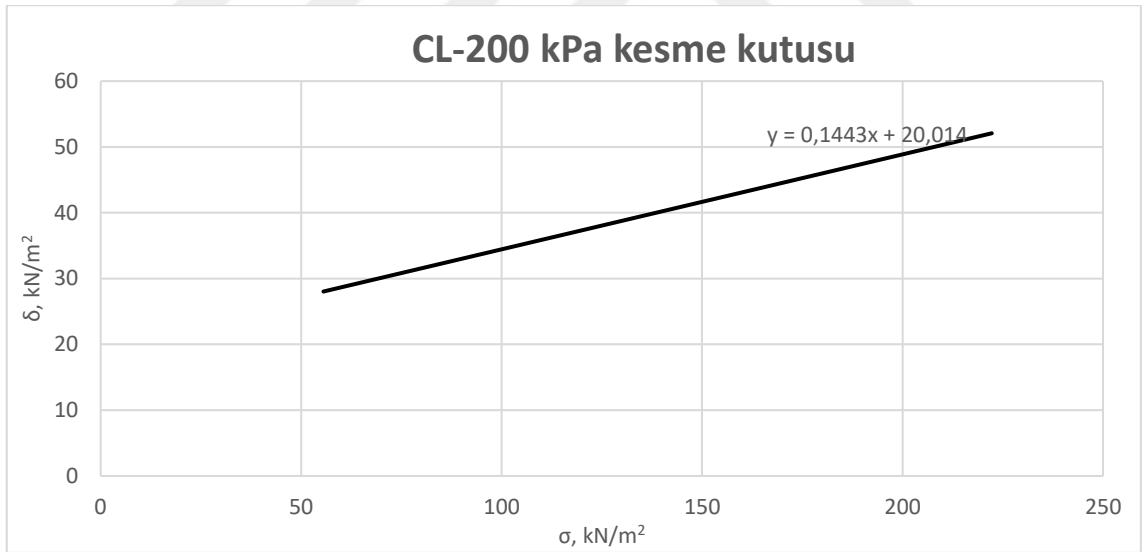
Şekil EK 3.1. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği
(25 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)



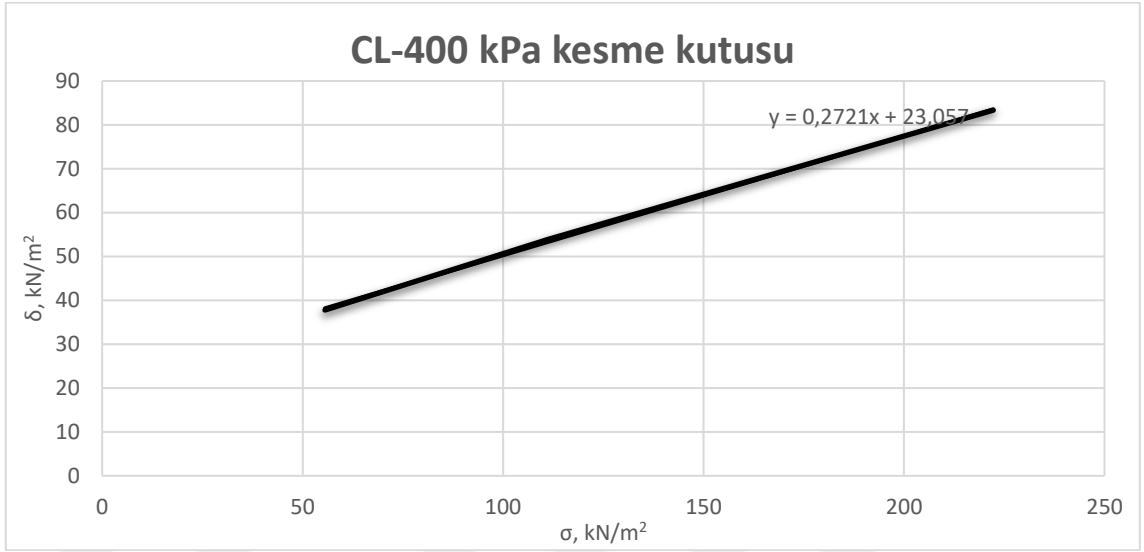
Şekil EK 3.2. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği
(50 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)



Şekil EK 3.3. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği
(100 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)



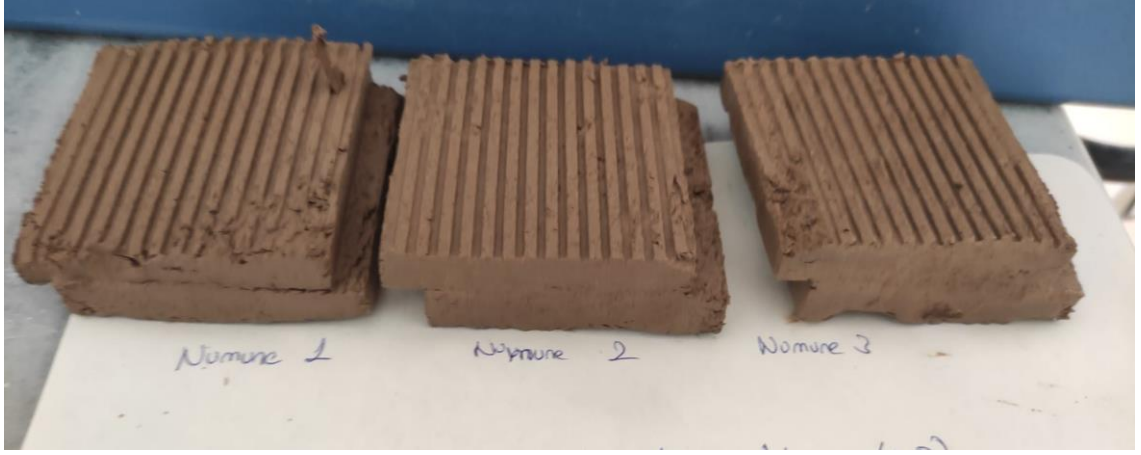
Şekil EK 3.4. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği
(200 kPa’da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)



Şekil EK 3.5. Kesme kutusu deney sonuçları gerilme-kayma gerilmesi deformasyon grafiği
(400 kPa'da konsolide edilmiş düşük plastisiteli kil)

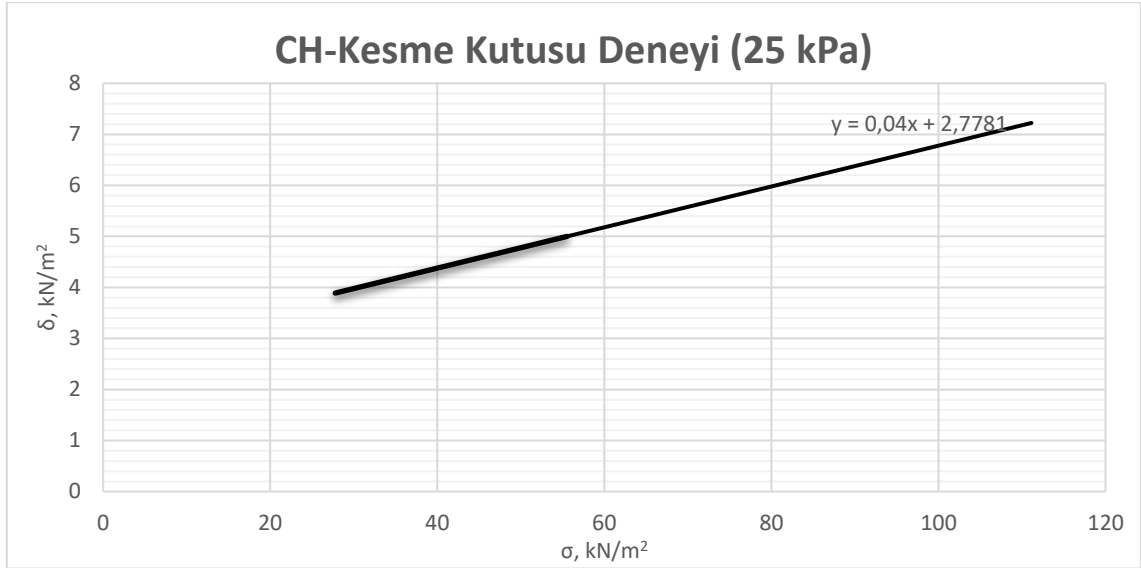


Şekil EK 3.6. Kesme kutusu deney sonunda numuneler
(Düşük plastisiteli kil)

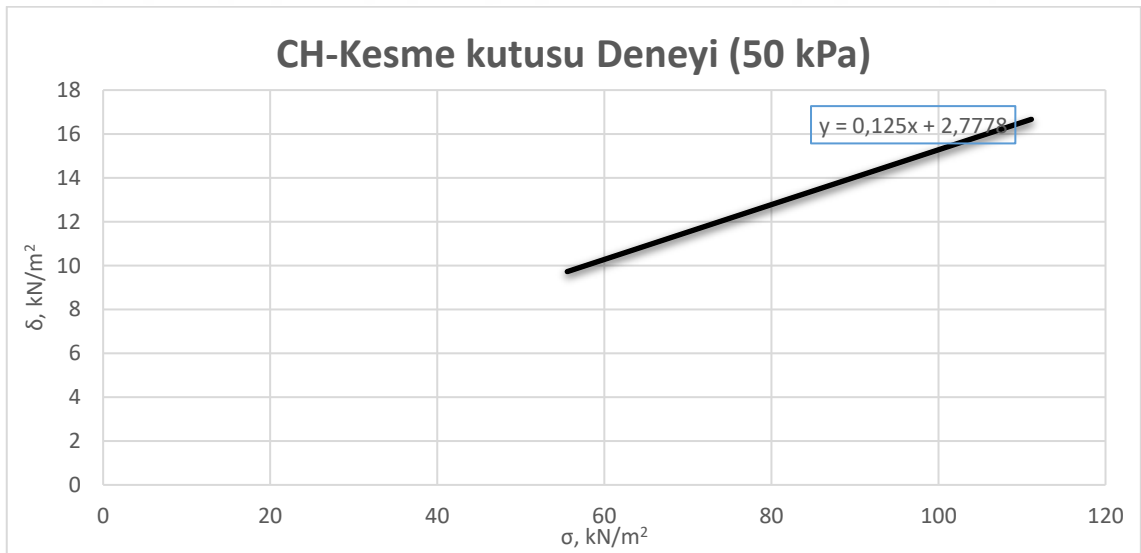


Şekil EK 3.7. Kesme kutusu deney sonunda numuneler
(Düşük plastisiteli kil)

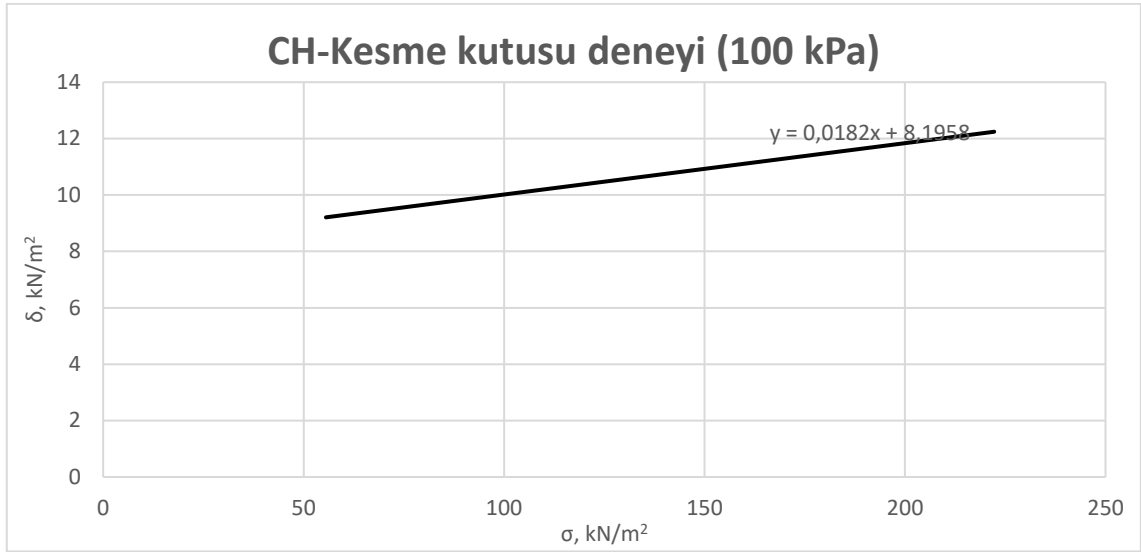
EK-4 Yüksek plastisiteli kil zeminin kesme kutusu deneyi sonuçları



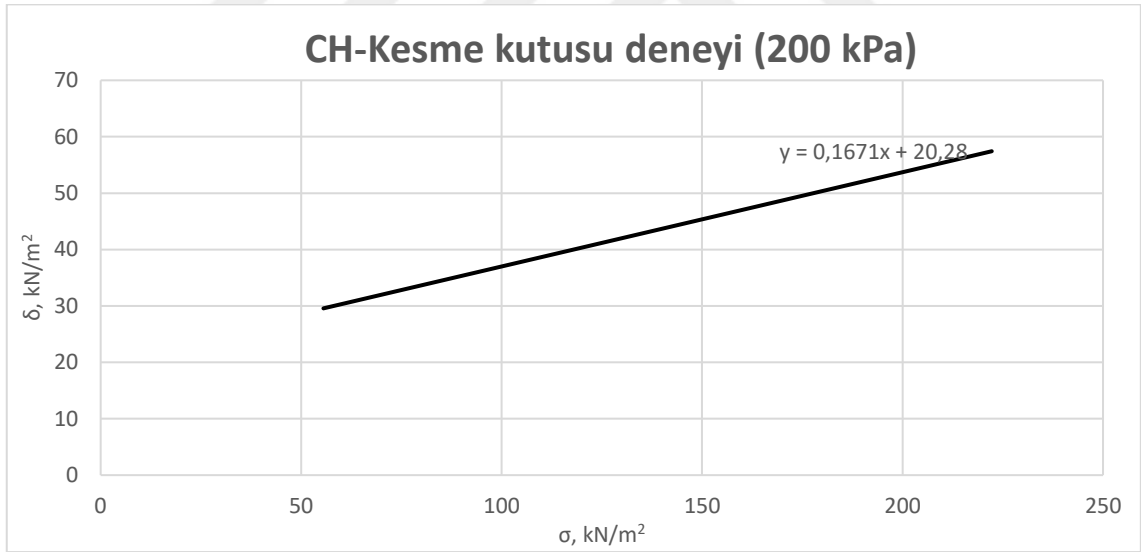
Şekil EK 4.1. Kesme kutusu deney sonuçları
(25 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)



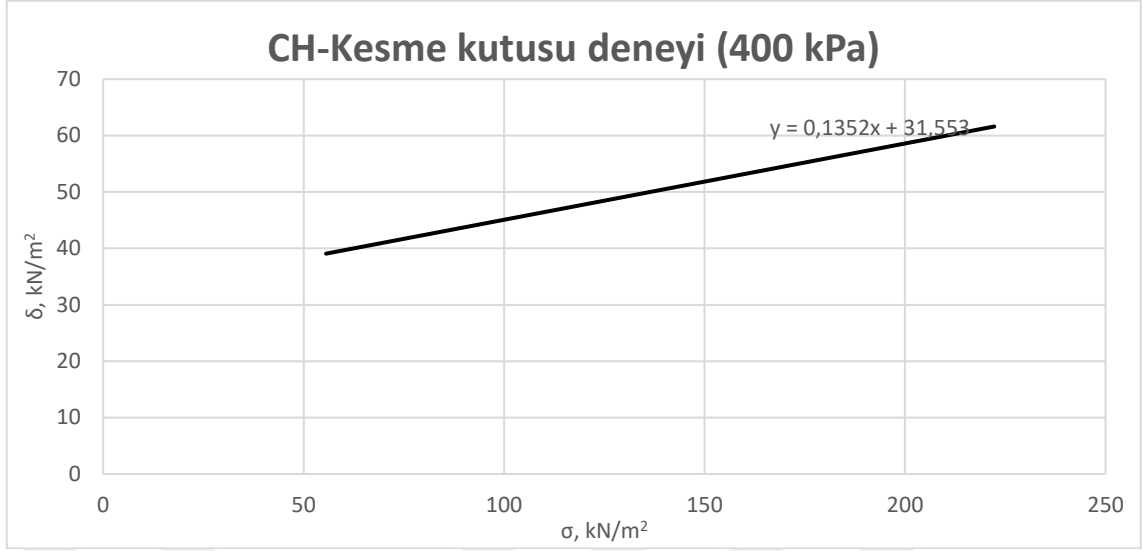
Şekil EK 4.2. Kesme kutusu deney sonuçları
(50 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)



Şekil EK 4.3. Kesme kutusu deney sonuçları
(100 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)



Şekil EK 4.4. Kesme kutusu deney sonuçları
(200 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)



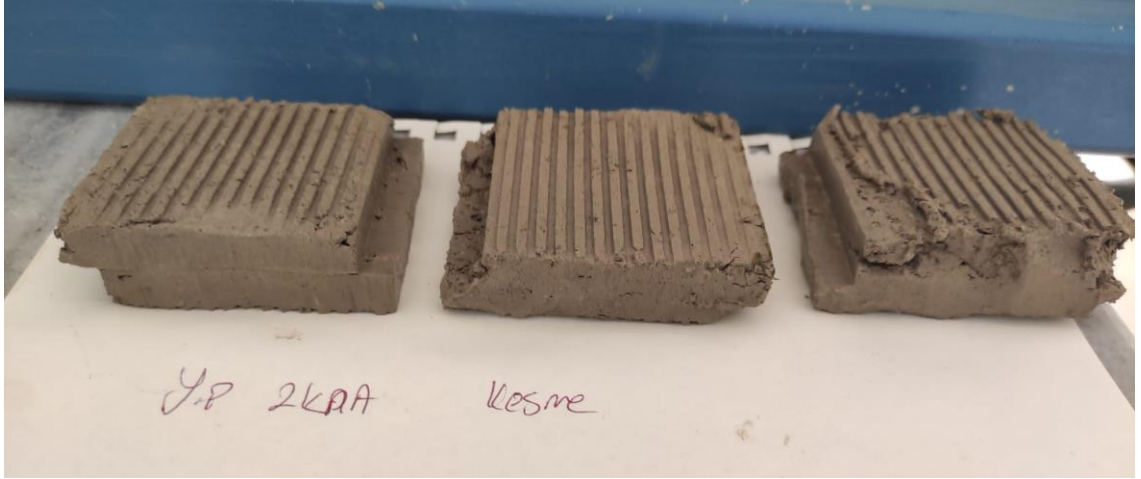
Şekil EK 4.5. Kesme kutusu deney sonuçları
(400 kPa’da konsolide edilmiş yüksek plastisiteli kil)



Şekil EK 4.6. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler
(Yüksek plastisiteli kil)



Şekil EK 4.7. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler
(Yüksek plastisiteli kil)



Şekil EK 4.8. Kesme kutusu deneyi sonunda numuneler
(Yüksek plastisiteli kil)