

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİİTLİ ZEMİNLERİN KONSOLİDASYON KARAKTERİSTİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yadigar ALTUNDAĞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK

Kasım 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLTİ ZEMİNLERİN KONSOLİDASYON
KARAKTERİSTİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yadigar ALTUNDAĞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 10.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Aşkın ÖZOCAK
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Murat Emre KARTAL
Üye


Doç. Dr.
Ertan BOL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Yadigar ALTUNDAĞ

10.11.2016

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin süresince değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkür ederim.

Çalışmam süresince fikirlerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi öğretim üyeleri Doç. Dr. Ertan BOL'a, Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT'e ve yaptığım laboratuvar çalışmalarında her türlü konuda destek çıkan ve yardımcı olan Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvar Görevlileri Recep EYÜPLER ve Sebahattin İŐ'e teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında yanımda olan meslektaşlarım Merve ÇETİN ve Nasrudin MUSE'ye teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, iyi bir birey olarak yetişmeme gayret eden, benden sevgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ZEMİNLERİN SIKIŞMASI VE KONSOLİDASYONU	3
2.1. Sıkışma ve Konsolidasyon	4
2.2. Zeminin Sıkışabilirliği	4
2.3. Konsolidasyon Süreci	6
BÖLÜM 3.	
TERZAGHI BİR BOYUTLU SIKIŞMA/KONSOLİDASYON TEORİSİ	8
3.1. Terzaghi Bir Boyutlu Sıkışma Teorisi	8
3.2. Bir Boyutlu Sıkışma Denklemi	9
3.3. Bir Boyutlu Konsolidasyon	10
3.4. Zemin Sıkışma Parametrelerinin Belirlenmesi	12
3.4.1. Sıkışma katsayısı	12
3.4.2. Sıkışma indisi	13
3.4.3. Yeniden sıkışma indisi	18

3.4.4. Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	18
3.4.4.1. Casagrande yöntemi	20
3.4.4.2. Schmertmann yöntemi	22
3.4.4.3. Janbu yöntemi	25
3.4.4.4. Butterfield yöntemi	27
3.4.4.5. Tavenas yöntemi	30
3.4.4.6. Burmister yöntemi	31
3.4.4.7. Eski yöntem	32
3.4.4.8. Van Zelst yöntemi	33
3.4.4.9. Şenol yöntemi	34
3.4.5. Konsolidasyon katsayısı	34
3.4.5.1. Casagrande logaritmik yöntemi	35
3.4.5.2. Taylor karekök yöntemi	36
BÖLÜM 4.	
SİİTLİ ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU	38
4.1. Siltli Zeminlerin Sıkışabilirliği	38
4.2. Tek Yönlü Drenaj Sistemli Konsolidasyon Deneyleri	39
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
5.1. Giriş	42
5.2. Numune Hazırlama	42
5.3. Fiziksel Deneyler	45
5.4. Konsolidasyon Deneyleri	48
5.5. Deneysel Sonuçlar	55
5.5.1. Sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) sonuçları	55
5.5.2. Sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) sonuçları	58
5.5.3. Konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları	60
5.5.3.1. Casagrande logaritmik yöntem ile konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları	61

5.5.3.2. Taylor karekök yöntem ile konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları	62
5.5.4. Farklı yöntemlerle bulunan n konsolidasyon basıncı (σ_c) değerlerinin karşılaştırılması	64
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	100

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AKO(OCR)	: Aşırı konsolidasyon oranı
a_v	: Sıkışma katsayısı
B	: Temel genişliği
C	: Kil yüzdesi
C_c	: Sıkışma indisi
C_r	: Yeniden sıkışma indisi
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
Δe	: Boşluk oranındaki azalma
ΔH	: Boy değişim farkı
$\Delta H/H$: Yük kademelerindeki boy değişimi
Δq	: Su debisi farkı
Δu_w	: Boşluk suyu basıncı değişimi
ΔV	: Hacim değişimi
$\Delta \sigma$: Gerilme değişimi
$\Delta \sigma'$: Tabanın orta seviyesindeki efektif gerilme artımı
ϵ	: Eksenel deformasyon
E	: Elastisite modülü
e	: Boşluk oranı
e_0	: Başlangıç boşluk oranı
H_0	: Başlangıçtaki numune boyu
I_0	: Temel rijitlik katsayısı
i	: Hidrolik eğim
k	: Permeabilite veya hidrolik iletkenlik
LL	: Likit limit (%)
M	: Gerilme-deformasyon oranı
m	: Gerilme-M diyagramı eğimi

MI	: Orta plastisiteli silt
ML	: Düşük plastisiteli silt
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
P'	: Esas efektif gerilme (kritik durum)
p'	: Gerilme invaryanı
PI	: Plastisite indisi (%)
PL	: Plastik limit (%)
q	: Temel taban basıncı
q'	: Gerilme invaryanı
$Q_{çıkkan}$: Çıkan suyun debisi
Q_{giren}	: Giren suyun debisi
R	: Korelasyon katsayısı
ρ_{ilk}	: Deney başı dane birim hacim ağırlığı
ρ_{son}	: Deney sonu dane birim hacim ağırlığı
ρ_w	: Suyun özgül ağırlığı
σ'	: Efektif gerilme
σ'_c	: Ön konsolidasyon basıncı
σ'_o	: Efektif gerilme
S_i	: Ani oturma
S_r	: Doygunluk derecesi
S_∞	: Konsolidasyon oturması
t	: Birincil konsolidasyonun başlangıcından itibaren ikincil konsolidasyonun sonuna kadar olan süre
t_{50}	: %50 oturmanın olduğu zaman dilimi
t_{90}	: %90 oturmanın olduğu zaman dilimi
T_v	: Boyutsuz zaman faktörü
U_s	: Konsolidasyon yüzdesi
v	: Deşarj hızı
V_o	: Başlangıçtaki numune hacmi
V_s	: Katıların hacmi
ν	: Poisson oranı
w	: Su muhtevası

w_{ilk} : Deneý başı su muhtevası
 w_L : Likit limit
 w_n : Doğal su muhtevası
 w_{son} : Deneý sonu su muhtevası

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Zeminlerde yükleme ve boşaltma süresince sıkışma ve şişme modeli ...	4
Şekil 2.2. İri ve ince daneli zeminlerde konsolidasyonun zamanla gelişimi	6
Şekil 2.3. Konsolidasyon süreci: Toplam gerilmenin zaman içinde efektif gerilmeye dönüşmesi	7
Şekil 3.1. a.Doygun bir zemin elemanı b.Doygun zeminde tek boyutlu sıkışma ...	9
Şekil 3.2. Zemin elemanında akım	10
Şekil 3.3. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi	13
Şekil 3.4. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi	13
Şekil 3.5. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi	18
Şekil 3.6. Ön konsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Grafik yöntemleri)	19
Şekil 3.7. Ön konsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Okuma yöntemleri)	20
Şekil 3.8. Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	20
Şekil 3.9. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi ile elde edilen ($e - \log \sigma'$) diyagramı	23
Şekil 3.10. Schmertmann yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi ...	24
Şekil 3.11. İki kil numunesine ait gerilme – deformasyon ve gerilme – modül grafikleri	25
Şekil 3.12. Mexico-City kiline ait bir çalışma	29
Şekil 3.13. Londra kiline ait bir çalışma	29
Şekil 3.14. Tavenas yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	30
Şekil 3.15. Burmister yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	32
Şekil 3.16. Eski yöntem ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	33
Şekil 3.17. Van Zelst yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	33
Şekil 3.18. Şenol yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi	34
Şekil 3.19. Konsolidasyon katsayısının logaritma yöntemiyle bulunuşu	36
Şekil 3.20. Konsolidasyon katsayısının karekök yöntemiyle bulunuşu	37
Şekil 4.1. Siltli zeminde tipik log-zaman/sıkışma eğrisi	39

Şekil 4.2. Tek ve çift yönlü konsolidasyon hücresi	40
Şekil 4.3. Adapazarı silt için zaman - sıkıştırma eğrileri ($r = 100-200$ kPa)	41
Şekil 5.1. Numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması	42
Şekil 5.2. Numunenin 40 nolu elekten elenmesi	42
Şekil 5.3. Elekten geçirilen siltin serilip kurutulması	43
Şekil 5.4. Çöktürme tekniği aşamaları	43
Şekil 5.5. Farklı oranlarda kil ve silt içeren numunelerin hazırlanması	44
Şekil 5.6. Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi	45
Şekil 5.7. Koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyi	46
Şekil 5.8. Plastik limit deneyi	46
Şekil 5.9. Hidrometre ve pipet deneyi numuneleri	46
Şekil 5.10. Hidrometre deneyi	47
Şekil 5.11. Pipet deneyi	47
Şekil 5.12. Elek analizi	47
Şekil 5.13. Su ilave edilip hazırlanan numuneye vakum uygulama	48
Şekil 5.14. Vakum uygulanan numunelerin 5 cm çaplı hücrelere yerleştirilmesi ...	49
Şekil 5.15. Numunelerin bulamaçtan 100 kPa düşey gerilme altında yeniden oluşturulması	49
Şekil 5.16. 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde konsolidasyon halkasının deney öncesi tartımı	50
Şekil 5.17. Konsolidasyon halkası ile beraber hazırlanan numunenin deney öncesi tartımı	51
Şekil 5.18. Konsolidasyon hücresinin alt ve üst yüzeylerine filtre kağıdının yerleştirilmesi	51
Şekil 5.19. Konsolidasyon hücresinin hazırlanması ve deneye başlanması	52
Şekil 5.20. Konsolidasyon deneyi sırasında yapılan yüklemeler	53
Şekil 5.21. Konsolidasyon deneyi sırasında okumaların forma geçirilmesi	54
Şekil 5.22. Numunenin konsolidasyon halkasından çıkarılması	54
Şekil 5.23. Deney sonunda ve etüvden çıkarıldıktan sonra numunenin tartımı	54
Şekil 5.24. %50 kil katkılı silt numunesine ait sıkışma eğrisi	55
Şekil 5.25. Numunelerin 200 kPa'da sıkışma katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi	57

Şekil 5.26. Numunelerin 200 kPa’da hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi	57
Şekil 5.27. Numunelerin 200-1600 kPa sıkışma indisi değerlerinin kil oranı ile değişimi	58
Şekil 5.28. Numunelerin yeniden sıkışma indisi değerlerinin kil oranı ile değişimi	59
Şekil 5.29. Sıkışma indisi (Cc) ve casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri ile değişimi	59
Şekil 5.30. Sıkışma indisi (Cc) ve koni yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri ile değişimi	60
Şekil 5.31. Casagrande logaritmik yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi	62
Şekil 5.32. Taylor karekök yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi	64
Şekil 5.33. Ön konsolidasyon basıncı değerlerinin farklı yöntemlere göre kil oranı ile değişimi	66
Şekil 5.34. Ön konsolidasyon basıncı değerlerinin farklı yöntemlere göre grafiksel gösterimi	67

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları	15
Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları (devamı)	16
Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları (devamı)	17
Tablo 5.1. Hazırlanan numunelerin silt ve kil ağırlıkları	44
Tablo 5.2. Numunelerin fiziksel özellikleri	45
Tablo 5.3. Numunelerin sıkışma katsayısı ve hacimsel sıkışma katsayısı değerleri	56
Tablo 5.4. Numunelerin sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisi değerleri	58
Tablo 5.5. Numunelerin t_{50} değerleri	61
Tablo 5.6. Numunelerin Casagrande logaritmik yöntemine göre konsolidasyon katsayısı değerleri (cm^2/dk)	61
Tablo 5.7. Numunelerin t_{90} değerleri	63
Tablo 5.8. Numunelerin Taylor karekök yöntemine göre konsolidasyon katsayısı değerleri (cm^2/dk)	63
Tablo 5.9. Deneylerde kullanılan numunelerin zemin özellikleri	65
Tablo 5.10. Numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri (kPa)	66

ÖZET

Anahtar kelimeler: Silt, kil oranı, konsolidasyon, ödometre, ön konsolidasyon basıncı, konsolidasyon katsayısı, sıkışma katsayısı, sıkışma indisi, yeniden yükleme indisi.

Zemin tabakalarının sıkışma ve oturma miktarı, konsolidasyon deneylerinden elde edilen zemin sıkışma parametreleri ile belirlenir. Klasik ödometre deneyi, Terzaghi tarafından doymuş killerin bir boyutlu konsolidasyonu için geliştirilmiş bir deneydir. Bu çalışmada siltli zeminlerin konsolidasyon karakteristikleri ödometre deneyleri yardımıyla incelenmiştir.

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmayla farklı kil oranlarına sahip siltli zeminlerin sıkışma parametreleri ve farklı yöntemlerle elde edilen ön konsolidasyon basıncı değerleri incelenmiştir. Bu amaçla, Adapazarı kentinden alınan siltli zemin numunesinin içerdiği kil ve kum boyutundaki daneler ayıklandıktan sonra içerisine belirli oranlarda kil numunesi ilavesi ile hazırlanan karışımlar saf su ilavesi ile bulamaç haline getirilmiş ve bu bulamaçlar konsolide ederek hazırlanan numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, laboratuvarında farklı silt ve kil oranlarına sahip 8 adet karışım hazırlanmıştır. Elde edilen bu numunelerin fiziksel özellikleri ölçülmüş, Casagrande yöntemi ve koni düşürme yöntemi ile kıvam limit değerleri, hidrometre ve pipet analizi gibi çöktürme deneyleri ile dane dağılım eğrileri elde edilmiştir. Hazırlanan 8 numune laboratuvarında bulamaçtan 100 kPa düzeyi gerilme altında konsolide edilerek yeniden oluşturulmuştur. Numuneler klasik ödometre aletinde konsolidasyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen konsolidasyon eğrileri kullanılarak literatürde bulunan 6 farklı yöntemle göre numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri belirlenmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen veriler kullanılarak her numunenin sıkışma katsayısı, konsolidasyon katsayısı, sıkışma indisi, yeniden yükleme indisi hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF SILTY SOILS

SUMMARY

Keywords: Silt, clay ratio, consolidation, odometer, pre-consolidation pressure, coefficient of consolidation, settlement coefficient, compression index, reloading index.

The amount of settlement of soil layers is determined by the compression parameters obtained from the consolidation experiments. Standard oedometer test is an experiment developed by Terzaghi for one dimensional consolidation of saturated clays. In this study, consolidation characteristics of silty soils have been investigated by means of oedometer experiments.

In this study, compression parameters of silty soils with different clay ratios and preconsolidation values obtained by using different methods have been investigated. For this purpose, consolidation experiments have been carried out on the specimens prepared by adding clay at a certain ratio to the the silt sized grain samples extracted from the silty soil obtained from Adapazarı city.

In this study, 8 mixtures with different silt and clay ratios have been prepared in the laboratory. The physical properties of these samples have been determined from the consistency limit values and grain distribution curves obtained using the Casagrande and cone penetration method and sedimentation experiments such as hydrometer and pipette analysis respectively. These samples were consolidated under 100 kPa stress which are then subjected to consolidation tests using the classic oedometer instrument. The pre-consolidation pressure values have been determined based on the obtained consolidation curves by employing 6 different methods. In addition to this, using the data obtained from the experiments, compression coefficient, consolidation coefficient, compression index and reloading index of each sample are calculated and the results obtained have been compared.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapı temelleri vasıtası ile zemine aktarılan gerilmeler zemin tabakalarında gerilme artışına, dolayısı ile de bu tabakalarda sıkışmaya neden olmaktadır. Zemin tabakalarında uygulanan yüke bağlı olarak ani veya zamana bağlı oturma meydana gelmektedir. İri daneli zeminlerde yüksek geçirimsizlikten dolayı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi kısa sürede tamamlanmaktadır. Bu nedenle iri daneli zeminlerde ani oturma gerçekleşecektir. İnce daneli zeminlerde ise boşluk suyu basıncının sönümlenmesi çok yavaş olacaktır ve zamana bağlı bir oturma gerçekleşecektir. Zeminde boşluk suyu basıncının zamana bağlı sönümlenmesi konsolidasyon sıkışmasını ifade etmektedir.

Zemin sıkışmalarından dolayı yüzeyde oluşan oturmalar, yapılarda çeşitli oranlarda hasarlara neden olmaktadır. Bundan dolayı yapı yapılmadan önce zeminde meydana gelebilecek oturma miktarının bilinmesi gerekir. Zeminlerin oturma potansiyeli laboratuvar ortamında yapılan konsolidasyon deneyi ile belirlenir. Konsolidasyon deneyi zemin numunelerinin boşluklarında bulunan suyun hareketine izin verilerek belirli yükler altında sıkışma miktarlarının belirlenmesi olarak ifade edilebilir. Konsolidasyon deneyi ile zemin sıkışma parametreleri bulunarak arazide uygulanan yüklemeye bağlı olarak zemin tabakasında meydana gelecek oturma miktarları belirlenir.

Zemin sıkışma parametreleri arasında önemli bir yer tutan zeminlerin ön konsolidasyon basıncı söz konusu zemin tabakasının geçmişinde maruz kaldığı en büyük gerilme büyüklüğünü göstermektedir. Bu değer o zemin tabakasının gerilme değişimi altında göstereceği sıkışma-konsolidasyon davranışını belirleyen önemli bir büyüklüktür. Zeminlerin ön konsolidasyon basıncını bulmaya yönelik çok sayıda çalışma literatürde gözlenebilmektedir. Bu yöntemlerin hepsi zeminin konsolidasyon

deneyi ile belirlenen konsolidasyon eğrisinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çok sayıda yöntemlerin içinden Casagrande yöntemi günümüzde en çok tercih edilen yöntem olmaktadır.

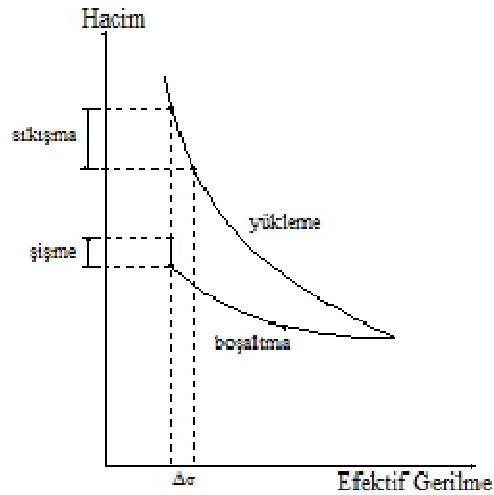
Bu çalışmada Adapazarı kent merkezinden elde edilen siltli zeminden farklı kil oranlarında hazırlanan 8 numunenin sıkışma parametrelerini tespit etmek amacıyla klasik ödometre aletinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Böylece her numunenin sıkışma katsayısı, konsolidasyon katsayısı, sıkışma indisi, yeniden yükleme indisi hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen konsolidasyon eğrileri kullanılarak literatürde bulunan 6 farklı yöntemle göre numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar pratikte de en çok tercih edilen Casagrande yönteminin gerçeğe en yakın sonuç verdiğini göstermiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİNLERİN SIKIŞMASI VE KONSOLİDASYON

Herhangi bir malzemeye gerilme uygulandığı zaman şekil değiştirme özelliği gözlenir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğunun belirli mutlak bir gerilmeye kadar Hooke Yasasına uyduğu kabul edilir. Örneğin, çeliğin akma sınırına dek gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusaldır, elastik sınır içinde yük boşaltıldığında şekli eski haline döner. Betonda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi doğrusallıktan yoksundur. Zeminlerde ise gerilme-şekil değiştirme ilişkisi genellikle karmaşıktır ve zeminin cinsine göre büyük farklılıklar gösterir. Özellikle ince daneli zeminlerde şekil değiştirmeler zamana bağlı olarak gözlenmektedir. Zeminin zamanla ilişkili şekil değiştirmesi (konsolidasyon) özellikle ince daneli zeminlerde oturma hesabında kullanılmaktadır.

İnce daneli zeminlerde oturma, çok büyük ölçüde zamana bağlı olarak gerçekleşir. İnce daneli zeminlerin permeabilitesi çok düşük olduğu için yüklenen zeminden, suyun dışarı çıkması çok yavaş olacaktır ve zamana bağlı bir oturma gerçekleşecektir. Yüklemeden dolayı küçük bir miktar ani oturma gerçekleşecektir.

Oturma yer altı su seviyesindeki düşüş, titreşim gibi etkilerle de oluşmasına rağmen genellikle dış yükleme nedeniyle belirmektedir. Tipik olarak, lineer olmamakla beraber gerilmenin artmasıyla oturma büyüklüğü artmaktadır. Örneğin, zemin yüzeyine uygulanan herhangi bir yükün sonucu olarak temel altında oturmalar tahmin edilebilmektedir. Bunun yanında kazı ve yer altı su seviyesindeki yükselişten dolayı efektif gerilmedeki azalış gibi nedenlerle yükün kalkması durumunda ise şişme veya kabarma meydana gelebilir. Şekil 2.1.'deki tam doğrusal olmayan ve geri dönmeyen özellikteki sıkışma gerçek bir zeminin sıkışma davranışını temsil etmektedir [1].



Şekil 2.1. Zeminlerde yükleme ve boşaltma süresince sıkışma ve şişme modeli [1]

2.1. Sıkışma ve Konsolidasyon

Zemin hacmi ve efektif gerilme arasındaki zamandan bağımsız ilişki ise sıkışma olarak tanımlanır. Sıkışmanın nedenleri; zemin danelerinin sıkışması, zemin boşluklarındaki hava ve/veya suyun sıkışması, boşluklardaki hava ve suyun dışarı çıkması sonucu danelerin birbirine yaklaşması ve zeminin toplam hacminin azalmasıdır.

Bir üst yapı yükü veya toprak dolgusu ağırlığı altında efektif düşey gerilmedeki artış sonucu, zamanla zemin yüzeyinde meydana gelen oturmaya konsolidasyon denir. Doygun zeminlerde geçerli olduğu kabul edilen efektif gerilmede artış olduğunda, boşluklardaki suyun basıncı artmaktadır. Bu basınç suyun zeminden çıkmasına neden olmaktadır. İnce daneli zeminlerde konsolidasyonu zamana bağlı olarak yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla zaman burada önemli parametrelerden biridir.

2.2. Zeminin Sıkışabilirliği

Sıkışma, zemin kütlelerinin hacmindeki azalmanın sonucudur. Yüzeğe uygulanan yükler zemin kesiti boyunca yatay ve düşey yönlerde gerilme artışları yaratmakta, drenajsız (ani) ve drenajlı konsolidasyon oturması oluşmaktadır. İri daneli zeminlerde, yüksek geçirimsizlikten dolayı, sıkışma kısa sürede tamamlanmaktadır. İnce daneli zeminlerin

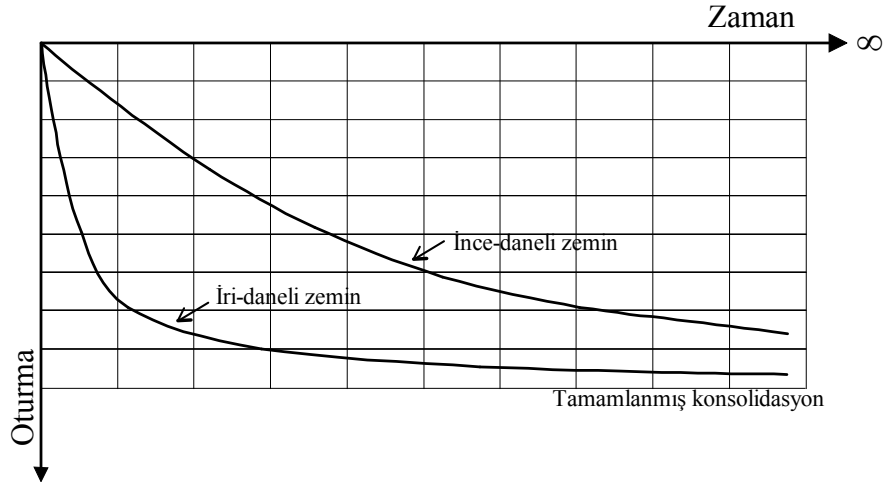
geçirimliliği çok düşük olduğu için yüklenen zeminden, suyun dışarı çıkması çok yavaş olacaktır ve zamana bağlı bir oturma gerçekleşecektir. Geçirimliliği düşük doygun ince daneli zeminlerdeki toplam oturma, üç bileşenden oluşmaktadır:

1. Ani oturma tüm diğer malzemelerde de gerçekleşen sıkışma türüdür. Zeminin düşük geçirimliliğinden dolayı kayda değer hacim değişimi olmaksızın meydana gelen ani oturma doygun olmayan zeminlerde önemli değerlere ulaşabilmektedir. Temel özelliğine bağlı olan ani oturma elastisite kuramına göre aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir [2].

$$S_i = q \cdot B \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot I_0 \quad (2.1)$$

Burada; q: Temel taban basıncı
 B: Temel genişliği
 I₀: Temel rijitlik katsayısı
 E: Zemin elastisite modülü
 ν: Poisson oranı

2. Birincil konsolidasyon oturması doygun tabakaya gelen gerilme artışı nedeniyle artan boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile ortamdan su çıkışı sonucu oluşan oturmadır. Boşluk suyu basıncının sönmülmesi iri daneli zeminlere oranla çok daha yavaş oluşacağından sıkışma da benzer yavaşlıkla meydana gelecektir.

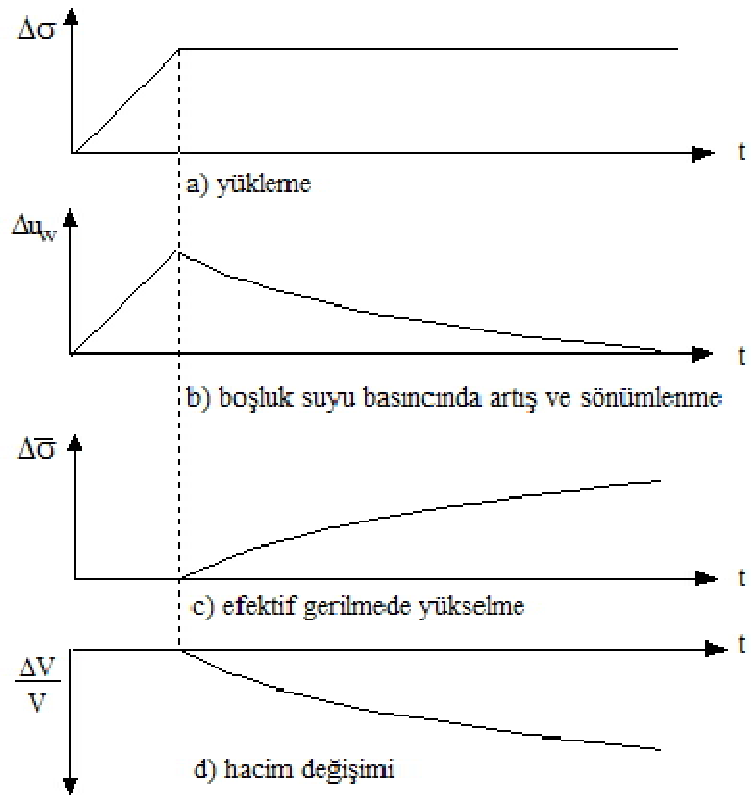


Şekil 2.2. İri ve ince daneli zeminlerde konsolidasyonun zamanla gelişimi [1]

3. İkincil konsolidasyon oturması birincil konsolidasyon oturması tamamlandıktan sonra, aşırı boşluk suyu basıncı sönümlenince oluşan sabit efektif gerilmelerin etkisiyle zamana bağlı olarak meydana gelir. Su içeriği çok yüksek plastik ve organik killerde sünme sonucu beliren ikincil konsolidasyon bu çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır.

2.3. Konsolidasyon Süreci

Terzaghi konsolidasyon teorisi geçirimsiz zeminde sıkışmanın sadece yüklenme sonucu dışarıya kaçamadığı için oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içinde sönümünden kaynaklandığını kabul etmektedir [3]. Bir başka deyişle, B parametresi 1 olan bir zemin ani gerilme artışı $\Delta\sigma$ aldığıında $B=1$ olduğundan boşluk suyu basıncı da $\Delta u_w = \Delta\sigma$ ile aynı yükselişi gösterecektir (Şekil 2.3.a, 2.3.b) [4].



Şekil 2.3. Konsolidasyon süreci: Toplam gerilmenin zaman içinde efektif gerilmeye dönüşmesi [4]

Zeminin geçirirliliği sıfırdan büyük ise bu fazla boşluk suyu basıncının zaman (t) içinde sönümlenmesi beklenir. O halde, başlangıçta uygulanan $\Delta\sigma$ gibi bir toplam gerilmenin ilk aşamada tümü su tarafından taşınırken zaman içinde boşluk suyu basıncının sönmesiyle yük danelere aktarılacağından, efektif gerilme denklemine göre sistemdeki boşluk suyu basıncı sıfıra yönelirken efektif gerilme artışı toplam gerilme artışına eşit olacaktır. Bunun doğal sonucu da Şekil 2.3.d'de gösterilen hacim azalmasıdır (ΔV) [5].

BÖLÜM 3. TERZAGHI BİR BOYUTLU SIKIŞMA / KONSOLIDASYON TEORİSİ

3.1. Terzaghi Bir Boyutlu Sıkışma Teorisi

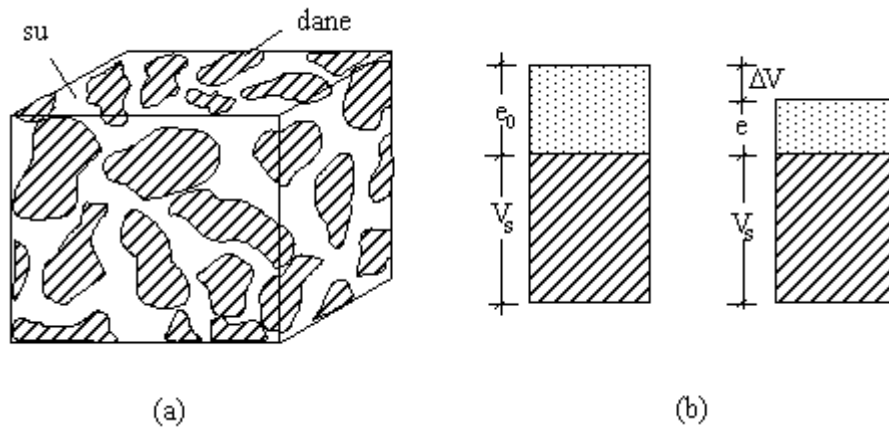
Karl Terzaghi İstanbul'da bulunduğu yıllarda yaptığı gözlemlerde killerin sıkışmasında en önemli etkenin oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içinde sistem dışına atılması sonucu boşluk hacminde azalma olduğunu fark etmiş ve bu gözlemlere dayanarak "Terzaghi bir boyutlu konsolidasyon teorisi" ni geliştirmiştir. Terzaghi bu teoride kabuller yapmıştır. Bu teoriye göre;

1. Zemin homojendir,
2. Tüm boşluklar sıkışmaz suyla doludur ($S_r = \%100$), ancak su eriyik gaz içerebilir,
3. Danelerin sıkışabilirliği suyunkine oranla ihmal edilebilir,
4. Suyun sıkışabilirliği de zemin iskeletine göre ihmal edilebilir,
5. Darcy yasası geçerlidir ($v = k.i$),
6. Sıkışmalar ve suyun zeminde hareketi tek yönde oluşur ($k_x = k_y = 0$),
7. Sıkışabilirlik ve geçirimsizlik zeminin aldığı gerilme kademesinden bağımsızdır,
8. Boşluk oranı efektif gerilmenin fonksiyonu olup zamanla değişmez, $e = f(\Delta\sigma_0)$,
9. Oluşan sıkışmalar kilin ilk kalınlığına oranla küçük olduğundan ortalama özellikler ve ortalama boyutlar kullanılabilir ($\Delta H \ll H_0$),
10. Gerilme artışları ani olarak uygulanmaktadır ($t = 0$),
11. Zemin iskeleti hacim değişimine viskoz direnç göstermez [4].

3.2. Bir Boyutlu Sıkışma Denklemi

Gerilme artışına maruz kalan bir doygun zeminde yatay şekil değiştirmelerin ihmal edilebilir düzeyde kalacağı kabul edildiğinde sıkışma sadece dūřey yōnde incelenebilir. Hacim bağıntıları Őekil 3.1.'de gōsterilen blok diyagramına ait zemin Őrneęi için, bir blok diyagramda gōsterilen doygun bir zeminde (Őekil 3.1.) hacim değişiminin sadece boşluk hacmindeki azalmadan kaynaklanacağı kabul edilmektedir:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{V_s(1+e_0) - V_s(1+e)}{V_s(1+e_0)} = \frac{e_0 - e}{1+e_0} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1a. Doygun bir zemin elemanı b. Doygun zeminde tek boyutlu sıkışma

Hacimdeki azalma oranı tek boyutlu durumda sadece boydaki azalma oranına eşit olduğu kabul edilirse bir boyutlu sıkışma denklemi;

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.

3.3. Bir Boyutlu Konsolidasyon

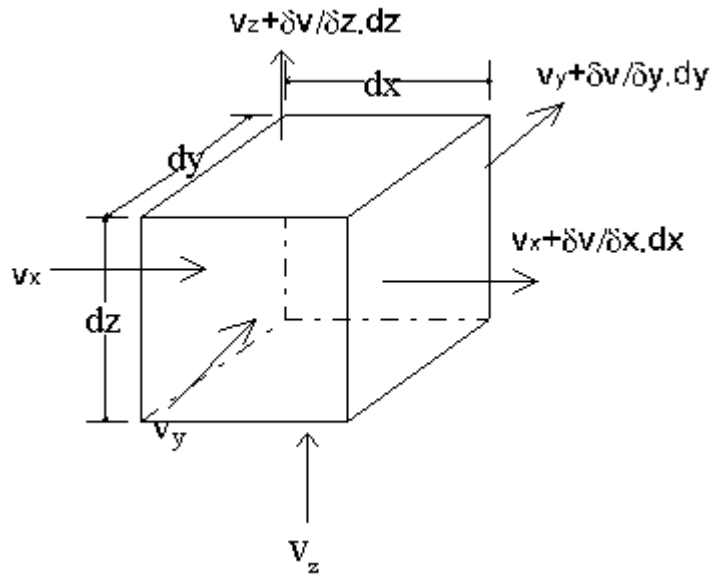
Terzaghi [3]'ye göre doymun bir küp zemin elemanına giren ve çıkan su miktarı arasındaki farkın sıkışma miktarına eşitlenmesiyle bir boyutlu konsolidasyon denkleminin çözümü sağlanmaktadır. Şekil 3.2.'deki birim küpe giren ve çıkan su debileri;

$$q_{giren} = \left(v_x - \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + \left(v_y - \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz + \left(v_z - \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \quad (3.3)$$

$$q_{çıkan} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \quad (3.4)$$

ifadelerinden oluşmaktadır. Giren ve çıkan debiler arasındaki fark zeminin o süre sonundaki sıkışmasını göstermektedir:

$$\Delta q = \frac{\partial V}{\partial t} = \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. Zemin elemanında akım

Bu ifadeler yukarıda kabuller çerçevesinde çözüldüğünde çeşitli sınır koşullarında çözümlü yapılabilen diferansiyel denklem, 3.6'daki bir boyutlu konsolidasyon denklemini elde edilir:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (3.6)$$

Burada c_v , konsolidasyon katsayısını (cm^2/s) göstermektedir.

Denklemin çözümünde tanımlanan konsolidasyon katsayısı;

$$c_v = \frac{k}{\rho_w} \left(\frac{1+e}{a_v} \right) \quad (3.7)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Burada;

k : geçirimsizlik katsayısı (cm^2/s)

a_v : sıkışma katsayısı'nı göstermektedir.

Konsolidasyon katsayısının boyutsuz zaman faktörüyle bulunması denklem 3.8'deki gibidir:

$$c_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (3.8)$$

Burada, T_v : zaman faktörü (boyutsuz)

H : Akaçlama mesafesini temsil etmektedir.

Örneğin başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı üniform ortamda zaman faktörü konsolidasyon yüzdesi ($U_s = \Delta H/S_\infty$) veya ona eşit olan boşluk suyu basıncı sönümlenme derecesinden (U_p) bulunabilir.

$$U_s = U_p = \frac{\int_0^H (1 - \frac{u(z)}{u_0}) dz}{\int_0^H u_0 dz} = 1 - \Sigma \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (3.9)$$

3.4. Zemin Sıkışma Parametrelerinin Belirlenmesi

Zeminin sıkışma miktarını tayin etmek için zemin parametreleri geliştirilmiştir. Bu parametreler sıkışma katsayısı (a_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), sıkışma indisi (C_c), yeniden sıkışma indisi (C_r), ön konsolidasyon basıncı (σ_c), konsolidasyon katsayısı (c_v)'dir.

3.4.1. Sıkışma katsayısı (a_v)

Zeminin sıkışabilirliği boşluk oranındaki azalmayı belirten denklem 3.10'daki sıkışma katsayısı a_v ile ifade edilir. Sıkışma katsayısı boşluk oranı-efektif gerilme eğrisinin eğimidir. Eğrinin eğimi sabit olmadığından sıkışma katsayısının değeri de değişkendir [6].

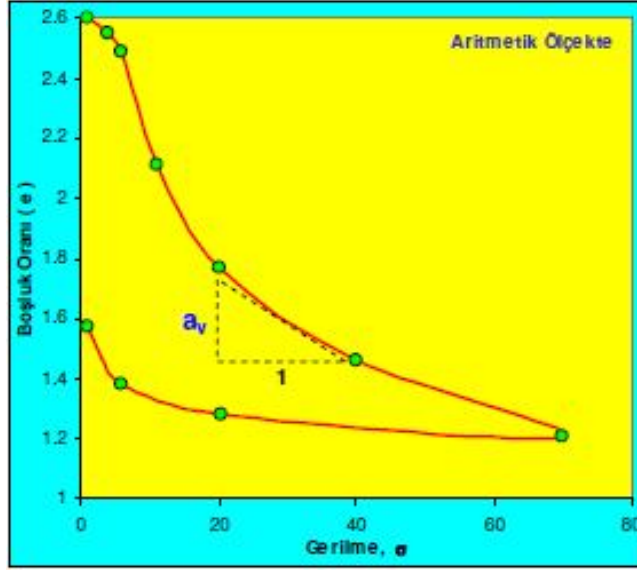
$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (\text{m}^2/\text{kN}) \quad (3.10)$$

Denklem 3.1'deki son sıkışma miktarı da böylece

$$S_\infty = \Delta H = H_0 \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \sigma' \quad (3.11)$$

halini alır. Ortadaki terim blok diyagramda hacim ifade ettiğinden hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) adını almaktadır.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (3.12)$$

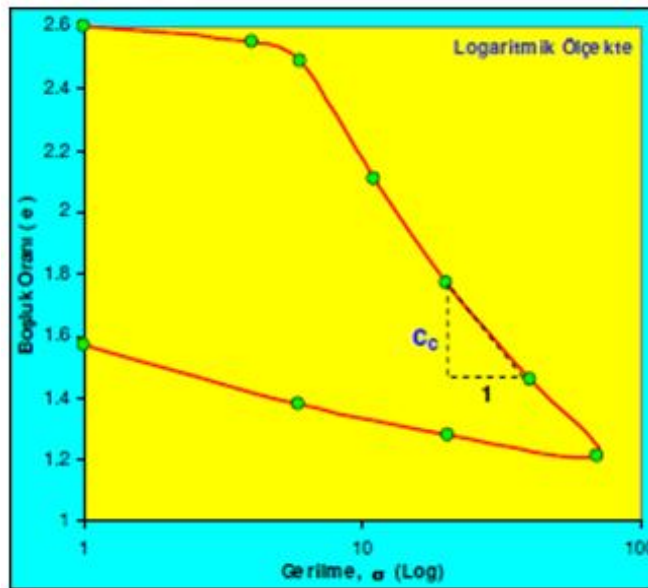


Şekil 3.3. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

3.4.2. Sıkışma indisi (C_c)

Boşluk oranı – gerilme ($e - \log \sigma$) eğrisinde, bakir sıkışma bölgesinin doğrusal kısmının eğimine sıkışma indisi (C_c) denir.

$$C_c = -\frac{de}{d(\log \sigma')} \quad (3.13)$$



Şekil 3.4. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

Sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasında aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır.

$$a_v = \frac{0.435C_c}{\sigma'} \quad (3.14)$$

Sıkışma indisi kullanıldığında son sıkışma denklemi (3.11)'de

$$S_\infty = \Delta H = H_0 \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \quad (3.15)$$

biçimine dönüşmektedir [7].

Terzaghi ve Peck'in [7] geliştirdiği (3.16) ve (3.17) bağıntıları pratikte en çok kullanılanlardır. Bunlar örselenmemiş killer için;

$$C_c = 0,009(w_L - 10) \quad (3.16)$$

Yoğrulmuş killer için;

$$C_c = 0,007(w_L - 10) \quad (3.17)$$

dir. Ayrıca çeşitli bilim adamlarının deneysel çalışmalar ile geliştirdiği yöntemlerle de sıkışma indisi hesaplanabilmektedir [8].

Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları [8]

Bağıntı	Korelasyon Katsayısı	Numune Sayısı	Bölge	Referans
$C_c = 0,007(w_L - 7)$			Yoğrulmuş Killer	Skempton (1944)
$C_c = 1,15(e_0 - 0,35)$			Tüm Killer	Nishida (1956)
$C_c = 0,256 + 0,43(e_0 - 0,84)$			Brezilya Killeri	Cozzolino (1961)
$C_c = 0,0046(w_L - 10)$			Brezilya Killeri	Cozzolino (1961)
$C_c = 0,009(w_L - 10)$			Normal Konsolide Killer	Terzaghi & Peck (1961)
$C_c = 0,40(e_0 - 0,25)$	0,85	717		
$C_c = 0,01(w_L - 5)$	0,79	717		
$C_c = 0,006(w_L - 9)$	0,59	678	ABD ve Yunanistan killerinin bir kısmı	Azzouz ve diğerleri (1976)
$C_c = 0,37(e_0 + 0,003w_L - 0,34)$	0,86	678		
$C_c = 0,40(e_0 + 0,001w_n - 0,25)$	0,85	717		
$C_c = 0,37(e_0 + 0,003w_L + 0,001w_n - 0,34)$	0,86	678		

Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları (devamı)

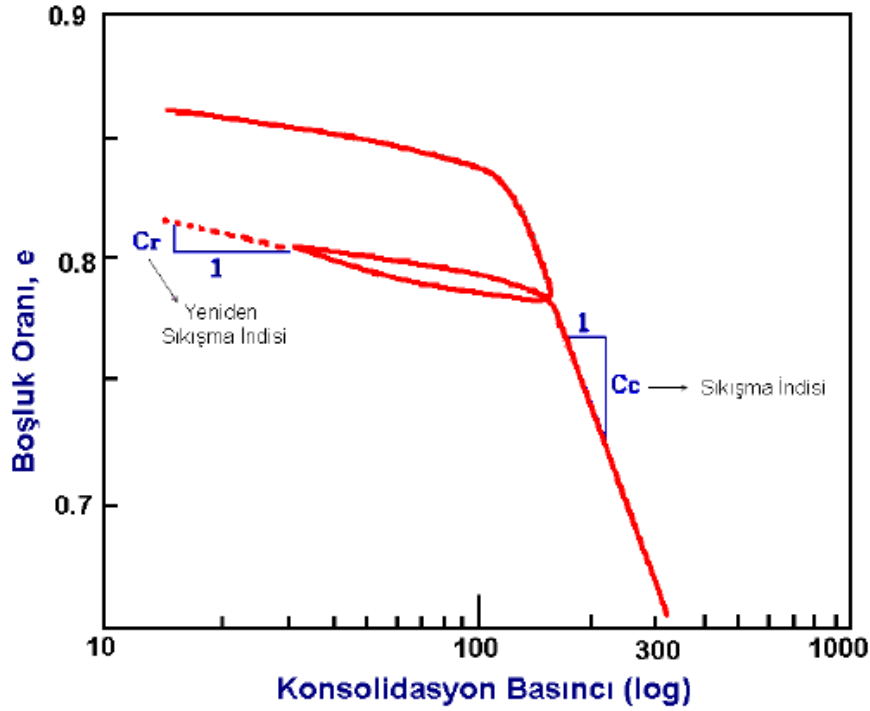
Bağıntı	Korelasyon Katsayısı	Numune Sayısı	Bölge	Referans
$C_c = 0,21 + 0,008w_L$	0,70	113		
$C_c = 0,22 + 0,29e_0$	0,77	113	Yumuşak Bankok Kili	Adikari (1977)
$C_c = 0,20 + 0,0008w_n$	0,77	113		
$C_c = 0,20 + 0,00080w_L + 0,009e_0$	0,70	113		
$C_c = 0,1882 + 0,3097e_c$	0,88		Yumuşak Bankok Kili	Sivandran (1979)
$C_c = 0,1509 + 0,3401e_0 - 0,0062e_c^2$	0,90			
$C_c = 0,575e_0 - 0,241$	0,966		Fransız Killeri	Vidalie (1977)
$C_c = 0,0147w_L - 0,213$	0,963			
$C_R = 0,0043w_n$			Güneydoğu Asya Deniz Killeri	Cox (1968)
$C_R = 0,0045w_L$				
$C_R = 0,156e_0 + 0,0107(e_0 < 2)$	0,93	≈ 230	Tüm Killer	Elnaggar & Krizek (1970)
$C_r = 0,14(e_0 - 0,007)$	0,74	717		
$C_r = 0,003(w_n + 7)$	0,68	717	ABD ve Yunanistan killerinin bir kısmı	Azzouz ve diğerleri (1976)
$C_r = 0,002(w_L + 9)$	0,53	678		

Tablo 3.1. Sıkışma indisi (C_c) ve sıkışma oranı (C_r) bağıntıları (devamı)

Bağıntı	Korelasyon Katsayısı	Numune Sayısı	Bölge	Referans
$C_R = 0,00566w_n - 0,037$	0,81			
$C_r = 0,00463w_L - 0,013$	0,63		Bankok Killeri	Barand (1981)
$C_r = 0,0039w_n - 0,013(w_n < \%00)$	0,86			
$C_r = 0,403 \log w_n - 0,478$	0,86		Fransız Killeri	Vidalie (1977)

3.4.3. Yeniden sıkışma indisi (C_r)

Boşluk oranı – gerilme (e - $\log \sigma$) eğrisinde, boşaltma (veya yeniden yükleme) bölgesinin doğrusal kısmının eğimine yeniden sıkışma indisi (C_r) denir.



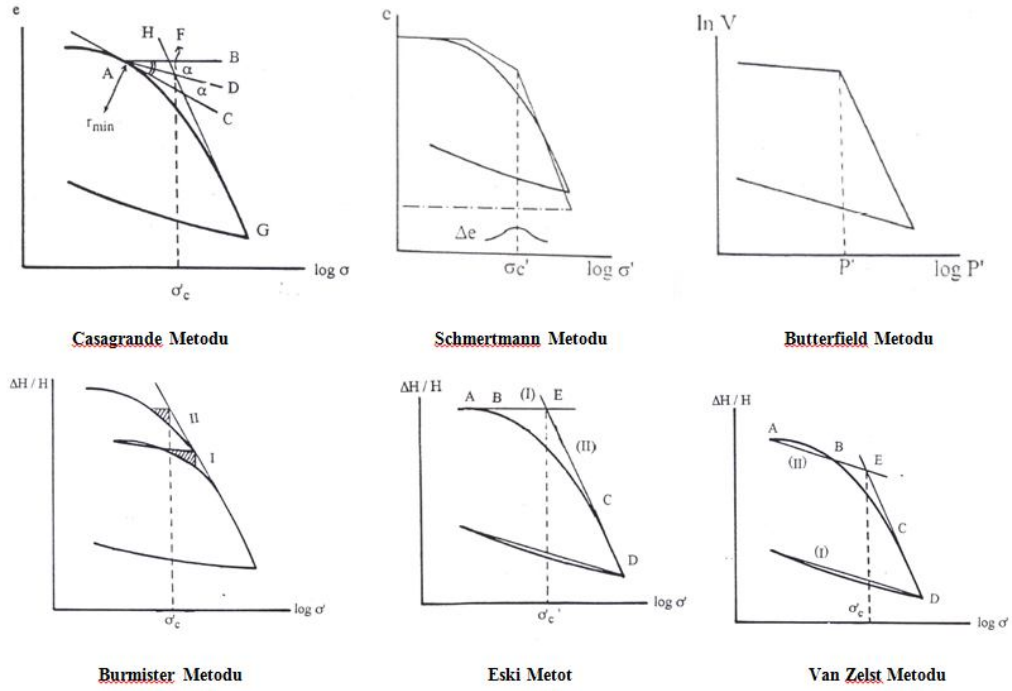
Şekil 3.5. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

$$C_r = \frac{-de}{d(\log \sigma')} \quad (3.18)$$

3.4.4. Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi (σ_c)

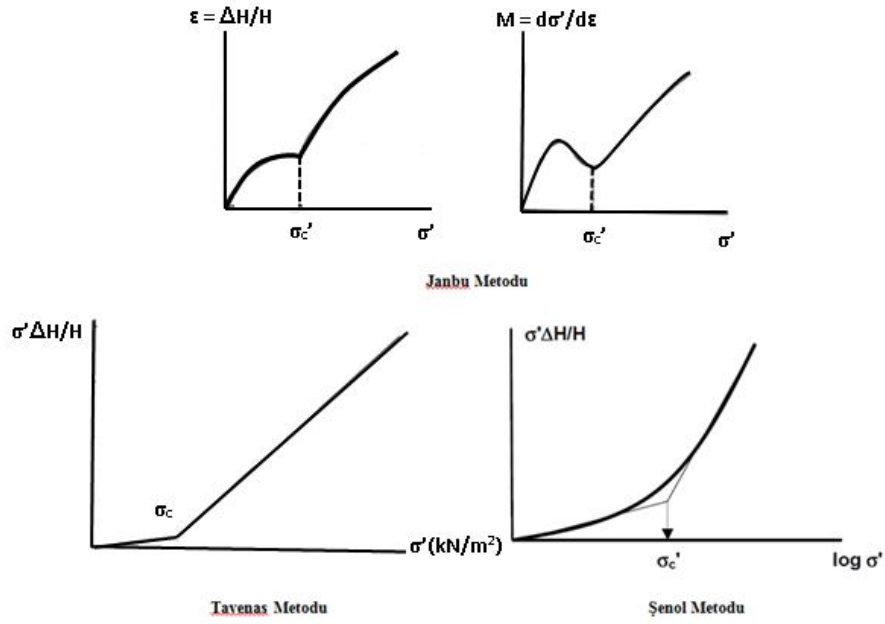
Arazideki bir zemin tabakasının geçmişte etkisi altında kaldığı en büyük gerilme değeridir. Oturma hesaplarında ön konsolidasyon basıncını belirlemek amacıyla, birçok bilim adamı çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan bir kısmı zaman içerisinde geçerliliğini yitirirken, bir kısmı da günümüzde hala tercih edilmektedir. Bu yöntemler; Casagrande, Schmertmann, Janbu, Butterfield, Tavenas, Burmister, Eski Yöntem, Van Zelst ve Şenol Yöntemi'dir. Bu yöntemler ön konsolidasyon basıncını belirleme şekline göre iki grupta toplanabilir [9]:

1. Grafik Yöntemler: Deney verileri bu yöntemlere göre eksen takımlarına uyarlanıp, çizildikten sonra eğrilerin bir seri işleme tabi tutulmasından sonra ön konsolidasyon basıncının bulunduğu yöntemlerdir. Bunlar; Casagrande, Schmertmann, Burmister, Butterfield, Van Zelst ve Eski yöntemlerdir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Ön konsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Grafik yöntemler)

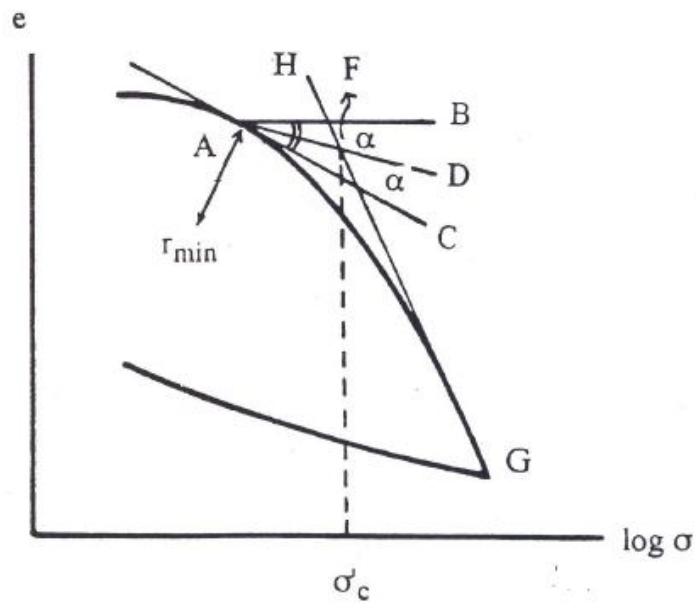
2. Okuma Yöntemleri: Grafik üzerindeki eğrinin şeklinden doğrudan ön konsolidasyon basıncının okunduğu yöntemlerdir. Dolayısıyla bu sistemde analitik hesap veya eğri düzeltilmesi yoktur. Doğrudan grafik üzerinden ön konsolidasyon basıncı değeri anlaşılabilir. Bunlar; Janbu, Tavenas ve Şenol yöntemleridir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Ön konsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Okuma yöntemleri)

3.4.4.1. Casagrande yöntemi

Casagrande yöntemi [10], ön konsolidasyon basıncını belirlemek için en çok kullanılan yöntemdir. Boşluk oranı ile konsolidasyon gerilmesi arasındaki ($e - \log \sigma'$) bağıntıdan çıkan bir belirleme yöntemidir. Şekil 3.8.'de yükleme eğrisinden ön konsolidasyon basıncının bulunması gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [10]

1. $(e-\log\sigma)$ eğrisi üzerinde minimum eğrilik yarıçapı veren A noktası bulunur,
2. Yatay eksene paralel olacak şekilde AB doğrusu çizilir,
3. A noktasına teğet olan AC doğrusu çizilir,
4. BAC açısının açığortayı olan AD doğrusu belirlenir,
5. GH doğrusunun uzantısının, AD doğrusunu kestiği nokta F olarak saptanır. F noktasının yatay eksenindeki izdüşümü, zeminin ön konsolidasyon basıncı olarak belirlenmiş olur. Bu verinin elde edilmesiyle kil zeminin, aşırı konsolidasyon oranı, (3.19) bağıntısından hesaplanabilir [11,12].

$$AKO(OCR) = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \quad (3.19)$$

AKO (OCR) : Aşırı konsolidasyon oranı

Normal konsolide zeminlerde, $(e-\log\sigma')$ eksen takımlı grafikten belirlenen ön konsolidasyon basıncı (σ'_c) ile güncel arazi efektif gerilme (σ'_o) üst üste düşmelidir. Ayrıca bu değer efektif gerilmeye bağlı olarak değişebileceği de unutulmamalıdır [13].

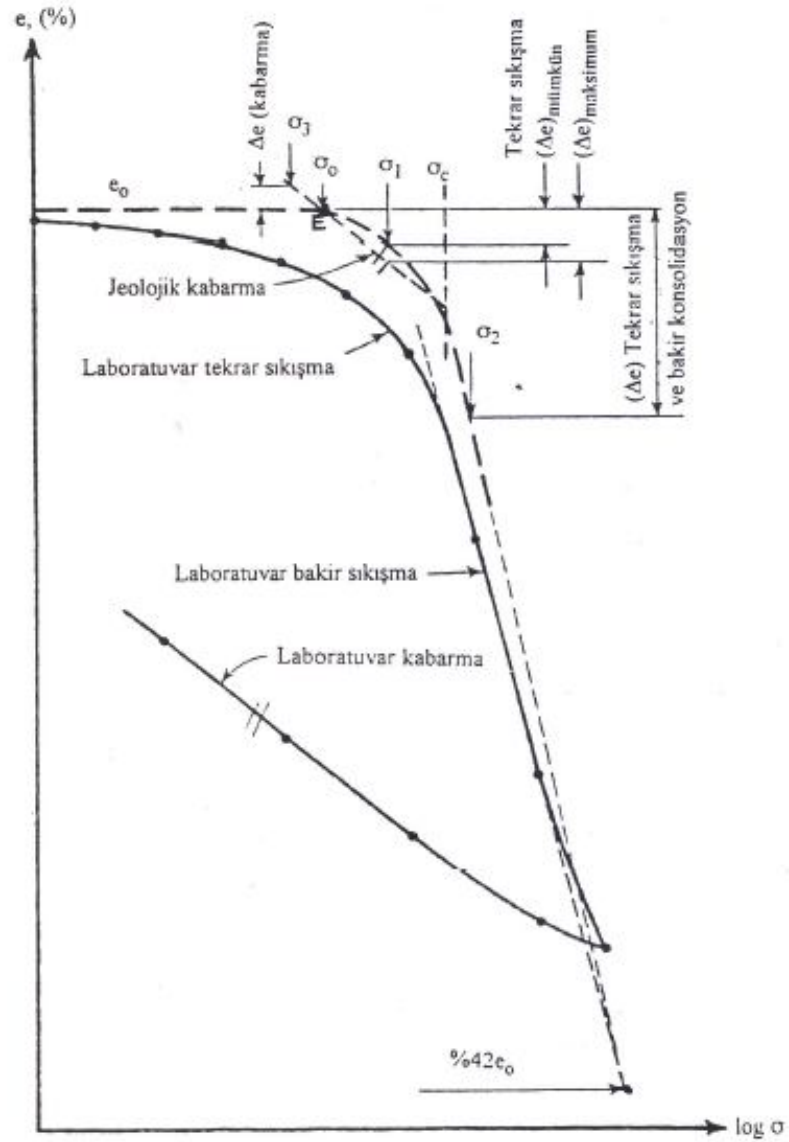
Sonuç olarak Casagrande yönteminin hassaslığı, numunenin örselenmemiş olması, deney şartları, ortamın uygunluğu ve hesap eden kişinin tecrübesi ile doğrudan ilgilidir. Bunun yanı sıra eğriliğin minimum olduğu yeri tayin etmekteki güçlük ve logaritmik ölçek kullanılması bir belirsizliğe neden olmasına rağmen, Casagrande yöntemi, en çok kullanılan yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [13].

3.4.4.2. Schmertmann yöntemi

Schmertmann yöntemi boşaltma eğrisini dikkate alan bir yöntemdir. Deney sonuçlarında, boşaltma eğrileri ön konsolidasyon basıncını belirlemede en önemli verilerdir. Schmertmann yönteminde boşluk oranı ile sıkışma ($e-\Delta H$) okumaları, ön konsolidasyon basıncını bulmada temel etkindir. Bu yöntemde zemin numunesinin gerçek düşey gerilme değerinin bilinmesi gerekir.

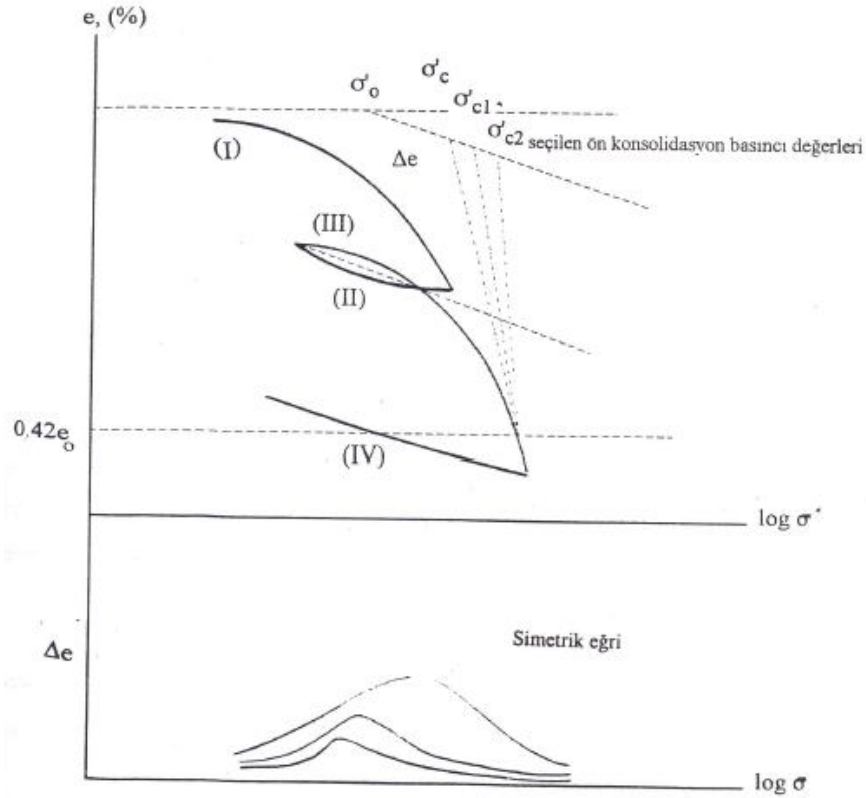
Schmertmann yöntemi, su muhtevasının zeminin ön konsolidasyon basıncını belirlemek için önemli bir parametre olmadığını vurgulamaktadır. Tek yönlü bir konsolidasyon deneyi sonucunda ($e - \log \sigma'$) diyagramı Şekil 3.9.'da olduğu gibi elde edilmiştir. Schmertmann yönteminin prensipleri de adım adım aşağıda açıklanmaktadır [8,14]:

1. Minimum eğrilik yarıçapı bölgesi geçilene kadar yüklemeye (I) devam edilir, ardından arazi efektif gerilme değerine kadar birinci boşaltma (II) yapılır. Kabarmannın yavaşlamasıyla ikinci yükleme (III) ve ikinci boşaltma (IV) yapılır. Casagrande yöntemine benzer şekilde ($e-\log \sigma'$) eksen takımında konsolidasyon eğrisi çizilir,
2. Başlangıç boşluk oranından (e_0) yatay eksene paralel çizilir,



Şekil 3.9. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi ile elde edilen $(e - \log \sigma')$ diyagramı [14]

3. Boşaltma eğrisinin eğim doğrusu geçirilir ve arazi efektif gerilme değerinden bu doğruya paralel çizilir,
4. Şekil 3.9.'da ifade edildiği gibi, (E) noktasından boşaltma eğrisine çizilen paralel doğru üzerinde, ön konsolidasyon basıncı için tahmini bir nokta seçilir. Bu noktanın seçimi, büyük ölçüde mühendislik tecrübesine dayanmaktadır,
5. Bu nokta, $0.42e_o$ noktasıyla birleştirilir ve böylece tahmini arazi sıkışma eğrisi elde edilmiş olur,



Şekil 3.10. Schmertmann yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [14]

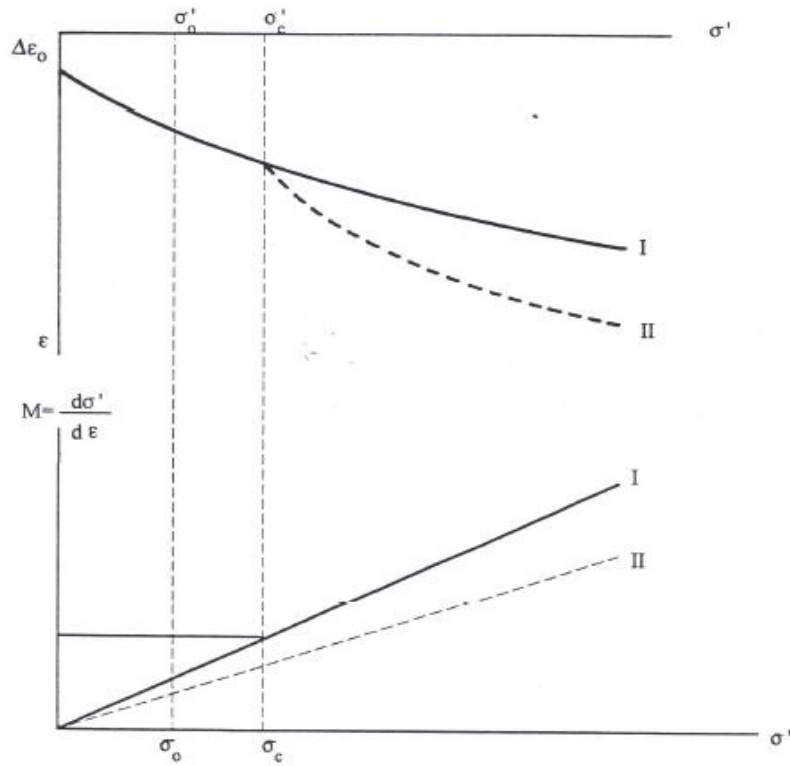
6. Bu eğri ile laboratuvar eğrisi arasındaki ordinat farkları, ($\Delta e - \log \sigma'$) eksen takımında işaretlenir (Şekil 3.10.). Bu işlem birkaç defa tekrarlanır ve simetrik ($\Delta e - \log \sigma'$) eğrisine karşılık gelen tahmini değer, gerçek ön konsolidasyon basıncı değeri olarak belirlenmiş olur.

Zeminin normal konsolide olması halinde ön konsolidasyon basıncı ile jeolojik gerilme (yük) değeri aynıdır. Arazi sıkışma eğrisinin (e_0) yatay doğrusunu kestiği nokta ön konsolidasyon basıncı değerini doğrudan verir. Arazi efektif gerilme öncesindeki küçük gerilme değerlerinden, bu gerilme değerine ulaşıncaya kadar zeminde şişme, bu değer aşıldıktan sonra sıkışma meydana gelmektedir.

Deneme – yanılma sistemine dayalı ve uzun bir yöntem olması, deneyin yapılışına bağlı olarak elde edilebilecek eğrilerdeki değişkenlik yöntemin dezavantajlarını gösterirken; buna karşın hassas sonuçlar elde edilmesi de yöntemin avantajını göstermektedir.

3.4.4.3. Janbu yöntemi

Bu yöntem, logaritmik ölçeklerin konsolidasyon olayını tam ifade edemediğini ileri sürmektedir. Bu nedenle normal ölçek kullanılarak ölçümler yapılmaktadır. Özellikle gerilme ekseninin normal ölçek üzerinde gösterilmesi ile ön konsolidasyon basıncının daha belirginleşeceği belirtilmektedir. Şekil 3.11.'de ön konsolidasyon basıncı, gerilme – deformasyon grafiği ile gerilme – modül grafiği üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.11. İki kil numunesine ait gerilme – deformasyon ve gerilme – modül grafikleri [15]

($\sigma'_o < \sigma'_c$ veya $\sigma'_o > \sigma'_c$) durumu grafikten basit bir şekilde gözlenebilmektedir. Grafiklerin herhangi biri ya da her ikisi yöntem için uygun bulunmaktadır. Yarı logaritmik eksen takımının zeminin konsolidasyon davranışını şekildeki gibi net göstermesi beklenmemektedir. Az hassas ve büyük ön konsolidasyon basıncına sahip killer için, gerilme – modül diyagramı ön konsolidasyon basıncını belirlemede en uygun sonucu vermektedir. Şekil 3.11.'de (σ' - M) diyagramında (I) no'lu grafiğin kırıklık gösterdiği yer doğrudan (sadece gözlem yoluyla) ön konsolidasyon basıncı

olarak belirlenir. Yüksek hassasiyetli ve düşük konsolidasyon oranına sahip kil zeminlerde ise ön konsolidasyon basıncı, gerilme – deformasyon ($\sigma' - \varepsilon$) eksen takımı diyagramında (II) no'lu eğrinin sürekliliğinin bozulduğu nokta olarak saptanır. Şekil 3.11.'de iki kil zemin numunesi örneğine ait eğriler gösterilmektedir. Kil zeminlerin gerekli parametrik özellikleri bilindiği takdirde, hangi eksen takımının kullanılacağına daha iyi karar verilebilmektedir [15].

Şekil 3.11.'deki diyagramlardan ($\sigma' - M$) grafiğinden (3.20) bağıntısı kolaylıkla elde edilebilir,

$$M = m.\sigma' \quad (3.20)$$

M : Gerilme – deformasyon oranı

m : Gerilme – M diyagramı eğimi

Ayrıca (M) modül (3.21) bağıntısı şeklinde de gösterilebilir,

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (3.21)$$

Burada (3.20) ile (3.21) eşitliğinden, deformasyon değeri, (3.22) bağıntısındaki gibi elde edilir ve (3.23) bağıntısındaki hale getirilir.

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma'}{m\sigma'} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_o} \right) \quad (3.23)$$

(3.24) bağıntısındaki gerilme değeri,

$$\sigma'_c = \sigma' = \sigma'_o + \Delta \sigma' \quad (3.24)$$

anlamına gelmektedir. Ancak aşırı konsolide kil zeminlerde (3.25) şartı olduğu takdirde, gerilme değeri (3.26) bağıntısındaki şekle dönüşür.

$$\sigma'_c > \sigma'_o + \Delta \sigma' \quad (3.25)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma'}{M} \quad (3.26)$$

Sonuç olarak, Janbu yöntemi ön konsolidasyon basıncının gerilme – deformasyon ve gerilme – modül grafikleri üzerinde doğrudan görülebildiği bir yöntemdir. Basit bir yöntem olduğu düşünülebilir. Yöntemin pratik olması diğer yöntemlere karşı en büyük avantajıdır. Buna karşın normal standart yüklemeli ödometre aleti ile sabit gerilme artımları altında yapılmayan deneyler, tam ve hassas sonuçlar verememektedir. Dolayısıyla, Janbu yöntemi sürekli yüklemeli ödometre deneyine göre geliştirilmiş bir yöntemdir.

3.4.4.4. Butterfield yöntemi

Butterfield yöntemi [16], Kritik Durum Teorisi'ne dayanır. Bu yöntem esas efektif gerilmelerle (P') zemin yapısındaki hacimsel değişikliklerin tamamıyla ($e - \log P'$) eğrilerine bağlı olarak saptanabileceğini savunur. Burada, önemli dezavantaj teşkil eden üç nokta belirtilmiştir:

1. Çok yüksek sıkışma özelliğine sahip zeminlerde gerilmelere bağlı olarak meydana gelen boşluk oranı değişimleri, ($e - \log P'$) grafiğinde doğrusal bir nitelik taşımayabilir,
2. Karmaşık teorik zemin modelleri veya basit oturma problemlerinde esas hesap yöntemi olarak, hacimsel deformasyon – efektif gerilme ilişkisi düşünülmektedir,

$$de = -\frac{dH}{H} = -\frac{de}{1+e_0} = \frac{c_c}{1+e_0} d(\log P') = \frac{\lambda}{1+e_0} d(\ln P') = m_v dP' \quad (3.27)$$

$$m_v = \frac{0,435c_c}{(1+e_0)P'} = \frac{\lambda}{(1+e_0)} \quad (3.28)$$

3. (3.29) bağıntısından (3.30)'a geçilebilir,

$$de = -\lambda d(\ln P') \quad (3.29)$$

$$(e_1 - e_0) = -\lambda \ln\left(\frac{P'_1}{P'_0}\right) \quad (3.30)$$

(e - P') ilişkisine bağlı olarak P₁'ü çekilirse ve (e₁) değerinin negatif olduğu düşünülürse (3.31) bağıntısı elde edilir,

$$\ln\left(\frac{P'_1}{P'_0}\right) > \frac{e_0}{\lambda} \quad (3.31)$$

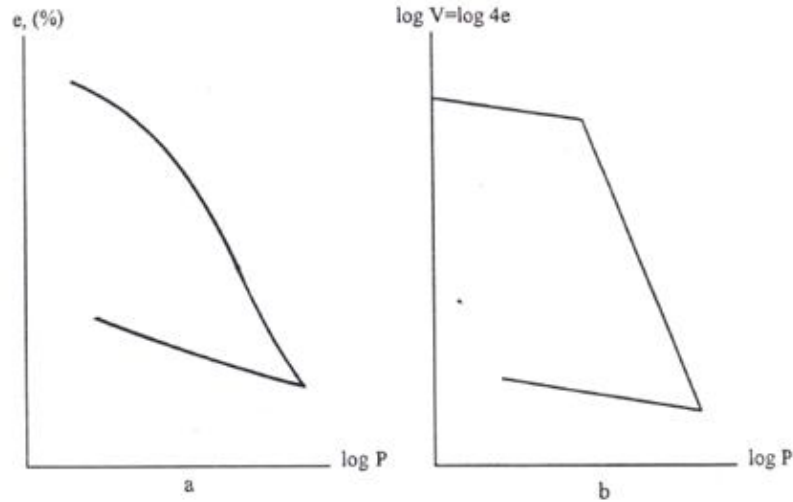
Ancak bu yaklaşım, gerçek gerilme seviyesinin bir miktar farklı hesaplanmasına neden olmaktadır [16]. (3.32) ve (3.33) bağıntıları da ayrıca göz önüne alınabilmektedir,

$$d[\ln(1+e)] = \frac{de}{(1+e)} = -Cd \ln(P') = -C \frac{dP'}{P'} \quad (3.32)$$

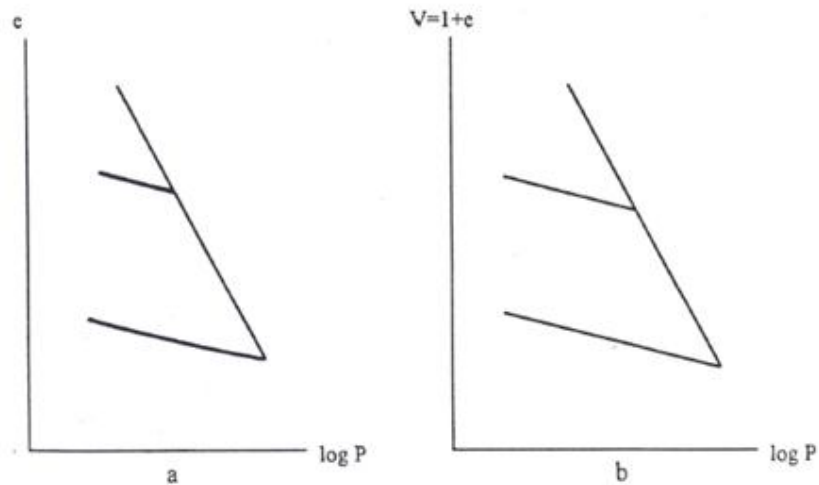
$$d(\ln H) = \frac{dH}{H} = -Cd \ln(P') = -C \frac{dP'}{P'} \quad (3.33)$$

[ln(1+e) - lnP'] eksen takımında çizilen konsolidasyon eğrisi, farklı bir yaklaşımı göstermektedir [17].

(3.32) ile (3.33) bağıntıları, (3.30) bağıntısına göre daha iyi ve kapsamlı bir eşitlik elde edildiği görülmektedir. Ayrıca bu ilişkiyi Şekil 3.12.'de gözlemek mümkündür. Şekil 3.12a.'da bakır sıkışma eğrisini doğrusal kabul etmek mümkündür fakat buna karşın eksen takımı Şekil 3.12b.'deki gibi logaritmik hale getirildiğinde ($\ln V - \ln P'$) eksen takımlı grafikten aynı data ile doğrusal bir diyagram elde edilebilmektedir. Ayrıca Henkel'in (1956) Londra kili üzerinde yaptığı çalışmalar Şekil 3.13.'de görülmektedir. ($e - \log P'$) arasında çizilen grafik, eğri olarak elde edilmiştir. Ancak eksen takımı ($V=1+e, \log P'$) olarak değiştirildiğinde davranışın doğrusal bir hale geldiği açıktır. [$\ln(1+e), \log P'$] eksen takımlı grafikte ön konsolidasyon basıncı, eğrinin kırıklık gösterdiği yerdir.



Şekil 3.12. Mexico-City kiline ait bir çalışma [16]

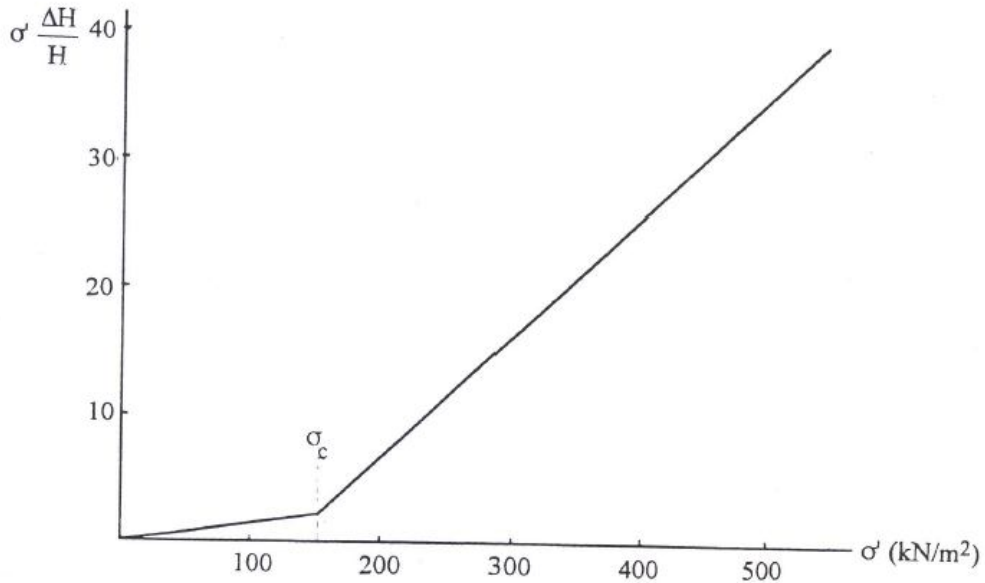


Şekil 3.13. Londra kiline ait bir çalışma [16]

Sonuç olarak, Butterfield yönteminde $[\ln(1+e) - \log P']$ arasındaki ilişkinin ($e - \log P'$) arasındaki ilişki daha lineer olduğu görülmektedir. Yöntem, deney verileri iyi elde edildiği sürece kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Her konsolidasyon deneyi bu yöntemle tam olarak uyarlanmamaktadır.

3.4.4.5. Tavenas yöntemi

Tavenas yönteminde [18], deformasyon enerjisi zemin davranışında önemli bir kriterdir. Ödometre deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrilerinin altında kalan alan, deformasyon enerjisini vermektedir. Tavenas yöntemi, gerilme değerlerine karşı gelen deformasyon enerjileri değerleri ile çizilen, gerilme-deformasyon enerjisi ($\sigma' - \sigma' \Delta H / H$) grafiğinin yorumlanması şeklindedir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Tavenas yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [18]

Başlangıçta sıkışma eğrisi doğrusaldır ve eğimi düşüktür. Gerilmeler (yükleme) arttıkça eğri belli bir noktada, eğimini değiştirir ve daha büyük bir eğimle gidişine devam eder. Böylece grafik birbirini takip eden iki doğru şeklinde belirir. Bu iki doğrunun kesiştikleri nokta, doğrudan ön konsolidasyon basıncı olarak okunur. Yöntemin en büyük avantajı herhangi bir saptama gerektirmeksizin, ön

konsolidasyon basıncının kolaylıkla bulunabilmesidir. Bunun yanı sıra, diyagramın diğer standart yükleme eğrilerinden oldukça farklı olduğu da bir gerçektir [18,19].

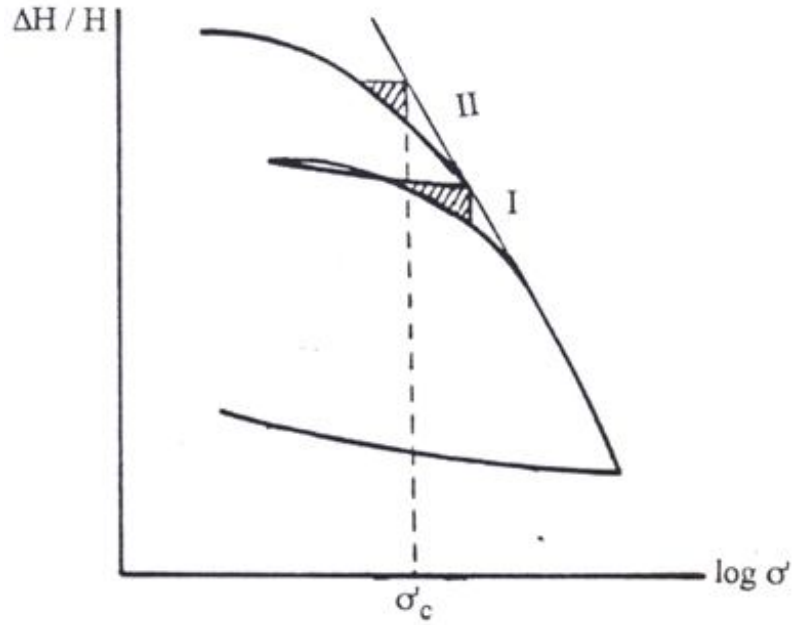
Sonuç olarak, kolay olması ve hemen hemen tüm deney verilerinde uygun sonuç vermesi Tavenas yönteminin en büyük avantajıdır. Standart yüklemeli kademeli ödometre deneylerinde uygun sonuçlar vermektedir.

3.4.4.6. Burmister yöntemi

Burmister yönteminde ön konsolidasyon basıncının hesabında gerilme – deformasyon ($\Delta H/H$, $\log \sigma'$) yarı logaritmik eksen takımını esas almıştır. Yöntem bu sınır şartlarına göre geliştirilmiştir. Ayrıca sıkışma miktarı, deformasyon ve yükleme kademelerinin aralarındaki birebir ilişkiyi ve önemi de vurgulamıştır [13].

Yükleme ve boşaltma eğrilerinin davranışları, sistemin esasını teşkil eder. Yükleme-boşaltma kısımlarından meydana gelen konsolidasyon eğrisi çizildikten sonra aşağıdaki sıra takip edilerek ön konsolidasyon basıncı belirlenir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için birinci yükleme değerini aşan ikinci yükleme kısmının deneyde mutlaka yer alması gerekir [13].

1. Birinci yükleme eğrisinin son değerinden, ikinci yükleme eğrisine bir dik inilerek (I) nolu taralı üçgen belirlenir,
2. İkinci yükleme eğrisinin lineer kısmının üst tarafındaki uzantısı çizilir,
3. Taralı üçgen alanın yatay bileşeninden daha çok düşey bileşeni göz önüne alınarak, kendi sayısal büyüklüğü kadar olan değer, lineer doğru ile ilk yükleme eğrisi arasındaki bölgede işaretlenir. Bu (II) nolu taralı üçgenin düşey bileşeninin apsis üzerindeki yeri ön konsolidasyon basıncı olarak bulunur.

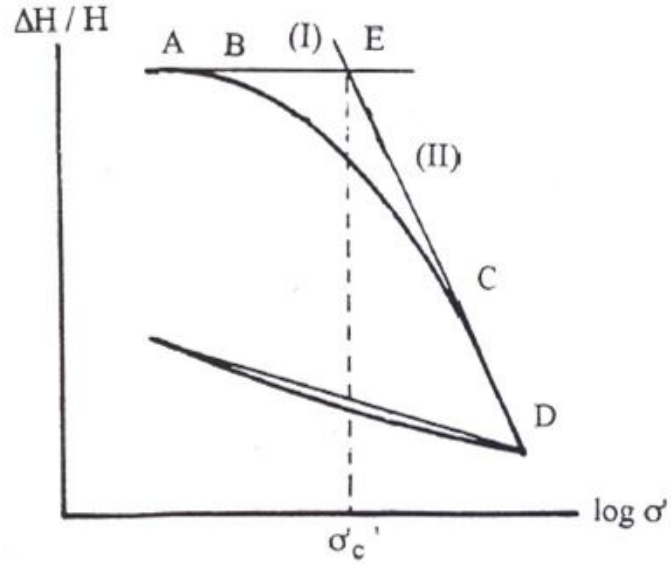


Şekil 3.15. Burmister yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [13]

Bu yöntem, grafiğin çok hassas bir bölgesinin davranışına dayandırıldığı için tüm deneylerde net sonuç vermemekte, hatta bir kısım çalışmalara da uymamaktadır. Ayrıca birinci boşaltma eğrisi ile ikinci yükleme eğrisinin üst üste çakışması halinde yöntem kullanılmaz hale gelmektedir. Sonuç olarak, Burmister yöntemi diğer yöntemlere göre basit kalması ve her deney eğrisine birebir uymaması nedeniyle günümüzde tercih edilen bir yöntem değildir.

3.4.4.7. Eski yöntem

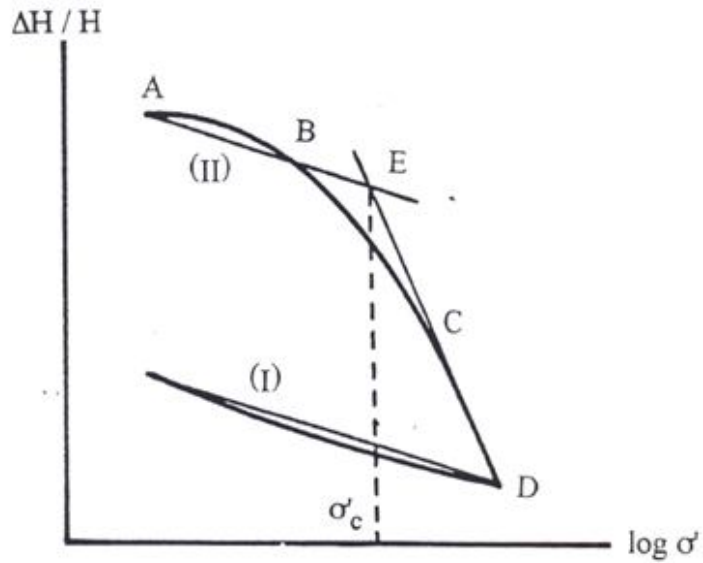
Casagrande yönteminden yola çıkılarak meydana getirilmiş bir yöntemdir. Şekil 3.16.'da bu yöntem gösterilmektedir. Yükleme eğrisinin küçük yükleme değerlerinin uzantısının (I), ileri yükleme değerlerinin lineer doğrusunun uzantısı (II) ile kesişim noktası (E) zeminin ön konsolidasyon basıncı olarak ifade edilir. Ön konsolidasyon basıncını belirlemek için grafikteki eğrinin düzenlenmesi, doğrudan yorumlayan kişinin bakış açısına bağlıdır.



Şekil 3.16. Eski yöntem ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [20]

3.4.4.8. Van Zelst yöntemi

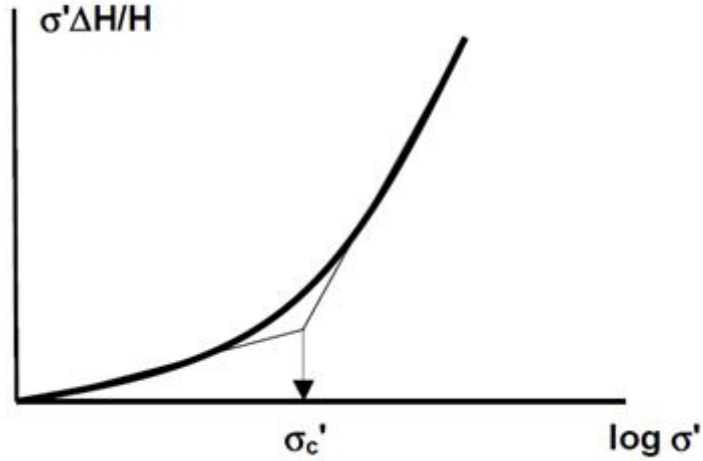
Casagrande yönteminden türetilmiş bir diğer yöntemdir. Şekil 3.17.'de bu yöntem gösterilmektedir. Boşaltma eğrisine (I) paralel olarak yüklemenin başlangıç değerinden bir doğru (II) çizilir. Yüklemenin lineer kısmının uzantısı (II) doğrusu ile kesiştirilir. Bulunan (E) noktası yatay eksen üzerinde ön konsolidasyon basıncı olarak belirlenir. Yöntemin hassasiyetinin grafikteki boşaltma eğrisine bağlı olması, bu yöntemin zayıf bir noktasını gösterir.



Şekil 3.17. Van Zelst yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [20]

3.4.4.9. Şenol yöntemi

Şenol yöntemi [8] Tavenas yönteminden türetilmiş bir yöntemdir. Eksen takımı Tavenas yöntemindeki gibidir. Aradaki tek fark düşey gerilme, lineer eksen yerine logaritmik eksen olarak seçilip deney verileri grafiklere yerleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Şenol yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi [21]

Grafik, Tavenas yöntemine benzer şekilde iki farklı eğimdedir. Ancak bu iki eğri bir noktada kesişmek yerine bir büküm eğrisi ile birleşmiştir. Ön konsolidasyon basıncı değerine yaklaştıkça eğri doğrusal bir şekilde elde edilmekte, tahmini ön konsolidasyon basıncı bölgesinde bu kısmı doğrusallığını kaybetmektedir. Casagrande yönteminde olduğu gibi, ileri yükleme kademelerinde bakir sıkışma eğrisi gibi doğrusal bir şekilde gidişine devam etmektedir. Bu iki doğrusal kısmın uzantılarının kesim noktasının yatay eksendeki izdüşümü, doğrudan ön konsolidasyon basıncı değeri olarak belirlenmektedir.

3.4.5. Konsolidasyon katsayısı (c_v)

Bu katsayı, konsolidasyon denkleminde konsolidasyon sürecini kontrol eden malzeme özelliklerini içermesinden dolayı konsolidasyon katsayısı olarak adlandırılır. Bir diğer deyişle c_v zeminin bir mekanik parametresi olmayıp geçirimsizlik ve sıkışabilirliğe bağlı bir değerdir. Yük artışları ile sıkışma oranında meydana gelecek değişimdir. Zeminin geçirimsizlik katsayısı (k) değeri biliniyorsa:

$$c_v = \frac{k}{m_v p_w} = \frac{1 + e_0}{a_v p_w} \quad (3.34)$$

Denklemden bulunur. Ancak geçirimsizlik katsayısı değeri bilinmiyorsa, c_v 'yi bulmak için ödometre deneyinden yararlanılır. Numune üzerine belli zaman aralıklarında yük artımı yapılarak elde edilen deformasyon – zaman grafiğinden konsolidasyon katsayısı elde edilir. Bu şekilde bulunan eğri teorik U, Tv eğrileriyle büyük benzerlik içerisindedir. Casagrande ve Taylor tarafından geliştirilen eğri uyarlama yöntemi olarak da adlandırılan yöntemler ile c_v belirlenir. Bu ampirik yöntemler, gözlemsel laboratuvar deney verilerini Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine yaklaşık olarak uygulanarak geliştirilmiştir.

Numune örselenmesi, gerilme artım oranı, süre, ısı ve deney mekanı gibi birçok faktörün eğri uyarlama yönteminden elde edilen c_v değerleri üzerinde etki yaptığı belirlenmiştir. Eğri uyarlama yöntemi laboratuvar deney verilerinde c_v 'nin bulunmasında kullanılabileceği gibi, birincil ve ikincil konsolidasyonlar da birbirinden ayırır [22].

3.4.5.1. Casagrande logaritma yöntemi

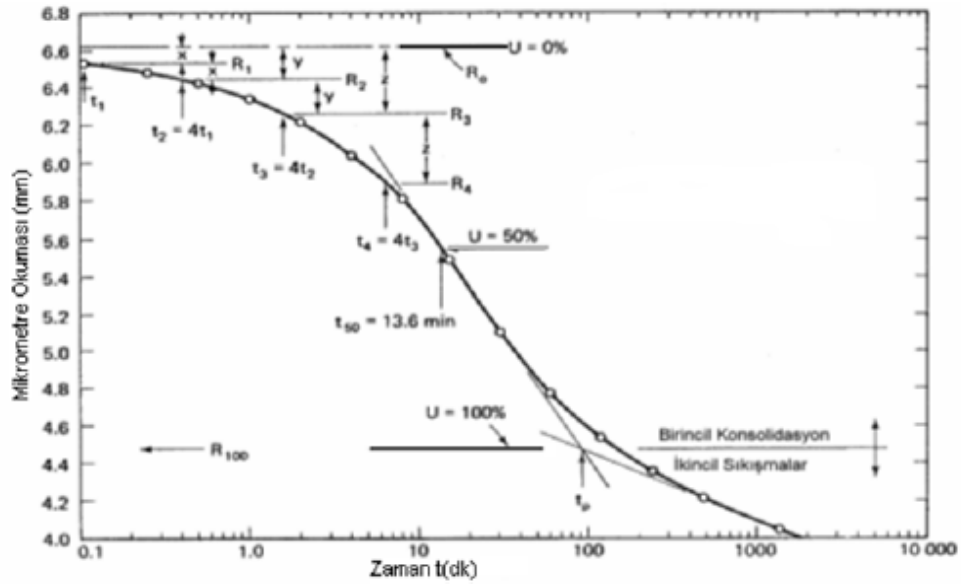
Bu yöntemde amaç %50 konsolidasyonun tamamlandığı süre olan t_{50} 'yi sıkışma – log zaman eğrisi üzerinde çizimle bulmaktır. Casagrande yöntemiyle c_v 'nin bulunması için izlenecek adımlar şöyledir:

1. Ödometre deneyinin herhangi bir yük kademesi için numunenin (ΔH) zamanın logaritmik apsis değerlerine karşı noktaları ($\log t$),
2. Eğrinin bir doğruya en yakın olduğu bölgeye bir teğet, eğrinin yataya döndüğü sağ ayağına diğer bir teğet çizilir ve iki doğrunun kesiştiği birincil konsolidasyonun tamamlandığı R_{100} noktası olarak işaretlenir,
3. %0 konsolidasyon noktası olan R_0 'ı bulmak için oranları 4 olan t_1, t_2 noktaları seçilir, t_1 'in üstüne ($R_1 - R_2$) kadar çıkılarak işaretlenir. Bu nokta R_0 'ın yerinin

verir. Bu yeri doğru olarak bulmak için t_1 , t_2 noktaları için yeni denemeler yapılmalıdır.

4. $U=0$ ve $U=100$ 'e karşılık olan zamanlar bulduktan sonra, $U=50$ 'nin yeri aralarındaki düşey uzaklık ikiye bölerek bulunur ve işaretlenir.
5. %50'ye karşılık gelen zaman faktörünü (t_{50}) kullanarak c_v bulunur [4].

$$c_v = 0,197 \frac{(2H/2)^2}{t_{50}} \quad (3.35)$$



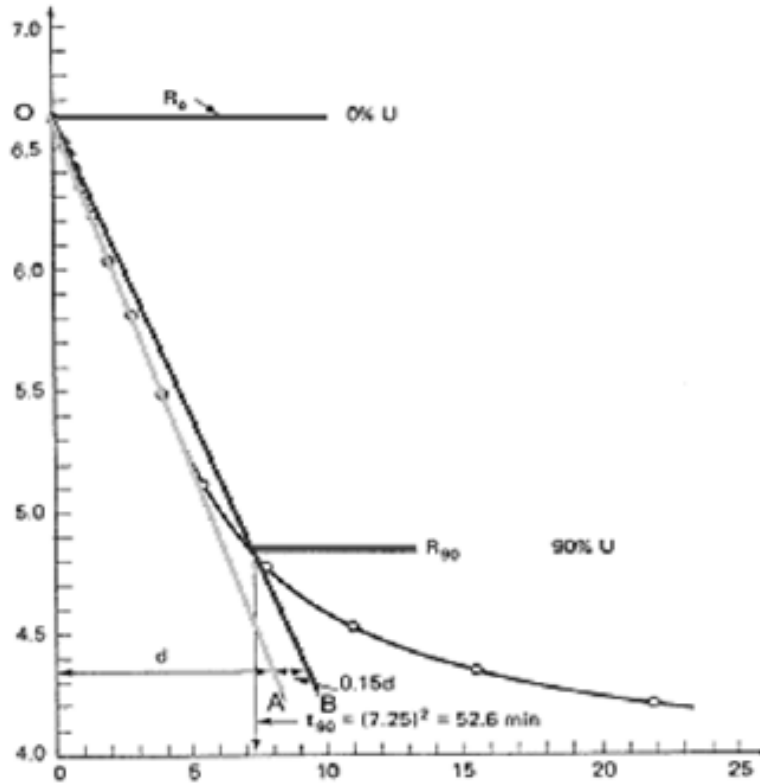
Şekil 3.19. Konsolidasyon katsayısının logaritma yöntemiyle bulunuşu

3.4.5.2. Taylor karekök yöntemi

Taylor 1948'de karekök yöntemi olarak da bilinen ve c_v 'nin değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Taylor % 90 konsolidasyona karşılık gelen değer eğrinin düz hattının apsise kadar olan uzantısının apsisi kestiği noktanın 1,15 katındaki noktadan geçen doğrunun eğriyle kesiştiği noktaya karşılık geldiğini gözlemiştir. Karekök yöntemiyle c_v 'yi bulmak için şu yol izlenir:

1. Şekil 3.18.'de çizilen $\Delta H - \sqrt{t}$ başlangıç bölümünde bir doğru üzerine düşen maksimum sayıda noktadan bir doğru geçirilir ve düşey eksen kestirilir. Bu nokta R_0 noktasıdır ve çoğun ilk noktaların altında belirir.
2. R_0 noktasından apsisi OA'nın 1,15'i kadar büyük olan OB doğrusu $\Delta H - \sqrt{t}$ eğrisini kesmek üzere çizilir. Kesişme noktası C'nin apsisi %90 konsolidasyonun tamamlandığı süre $\sqrt{90}$ 'ı verecektir.
3. $U=90$ 'a karşılık olan T_v değeri 0,848 ile konsolidasyon katsayısı hesaplanır [4].

$$c_v = 0,848 \frac{(2H/2)^2}{t_{90}} \quad (3.36)$$



Şekil 3.20. Konsolidasyon katsayısının karekök yöntemiyle bulunuşu

Karekök yöntemiyle hesaplanan konsolidasyon katsayılarının genellikle logaritma yöntemiyle bulunanlardan bir miktar büyük çıkması beklenmelidir.

BÖLÜM 4. SİTLİ ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU

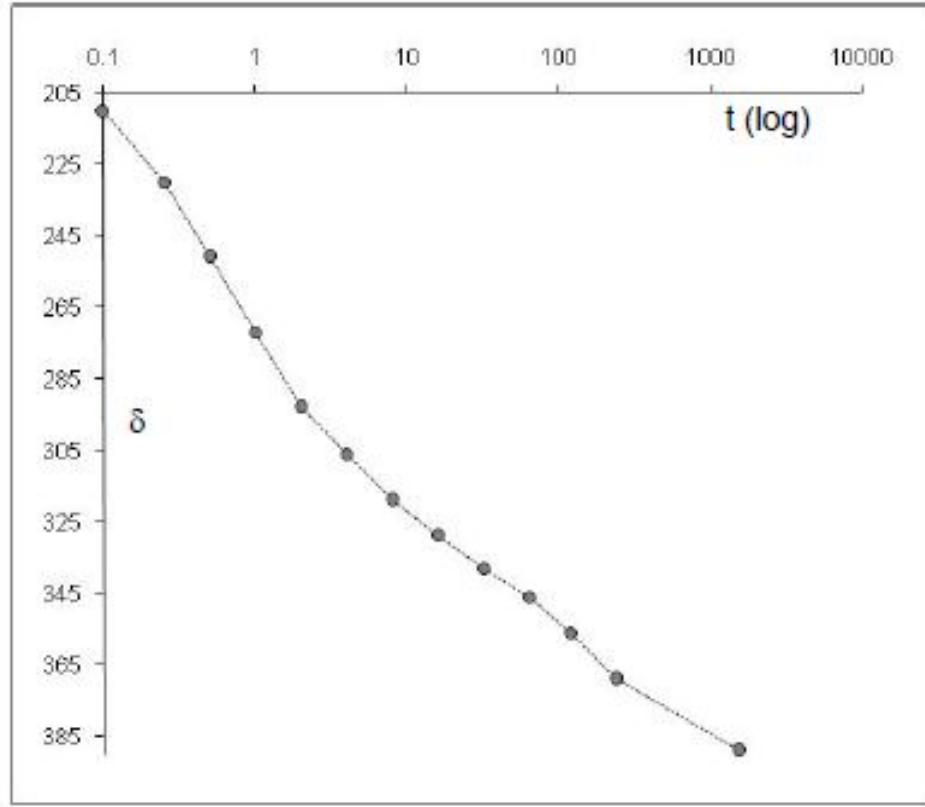
4.1. Siltli Zeminlerin Sıkışabilirliği

İnce daneli zeminlerin sıkıştırılabilirliğini ölçmek için standartların çoğunluğunda ödometre deneyinin yapılması şart sayılmaktadır. Dane boyutuna göre ince daneli olan Adapazarı siltinin sıkıştırılabilirliğini ölçmek için yapılan denemelerde birkaç ilginç özelliğe rastlanmıştır. Adapazarı siltlerinde alınan sonuçlar, bu tür fluviyal kökenli siltlerde konsolidasyonun beklenenden çok daha hızlı tamamlandığını göstermiştir.

Siltli zeminler killere oranla daha çabuk drene olduğundan log-zaman oturma okumaları Şekil 4.1.'de verildiği gibi bir eğri oluşturmaktadır. Bu tür zeminlerin eğrisi ilk okumadan itibaren yukarı doğru konkav olarak gelişmektedir. Bu dönüşüm 6 s'den önce oluşmaktadır. Bu nedenle, bu tür eğrilerde standart okuma ile t_{50} değeri bulunamamaktadır. Zamanın karekökü eğrisinde ise ilk okumadan sonra belirgin bir doğrusallık göstermediği için t_0 bu tür eğrilerden de belirlenememektedir. Bununla birlikte, kabul edilebilir bir t_{50} değeri deneyin başlangıcı ile bitişi arasının orta noktasından elde edilebilir. Buradan elde edilecek t_{50} değeri 0,1 dakikadan önce olmalıdır. Böylece 20 mm kalınlıktaki standart örnek için c_v ,

$$(0,0256 \times 20^2)/0,1 = 102,4 \text{ m}^2/\text{yıl}$$

şeklinde rapor edilir. Bu da çok hızlı bir konsolidasyonu temsil etmektedir [23].



Şekil 4.1. Siltli zeminde tipik log-zaman/sıkışma eğrisi [23]

Konsolidasyonun bu denli hızlı tamamlandığı durumlarda diğer bir seçenek ise, standart ödometre hücresinden tek yönlü drenajın yapıldığı deneylere yönelmektir [23].

4.2. Tek Yönlü Drenaj Sistemli Konsolidasyon Deneyleri

Aynı basınçta olan zaman-sıkıştırma eğrileri kısa sürede ulaşılan t_{50} ve t_{90} değerleri benzersiz şekiller göstermektedir, genelde 6-30 s okumalarında t_{100} belirsiz olduğu için konsolidasyon katsayısını belirlemek için yeterli bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle, ödometre deneyinde sadece üst drenaj ile bir halka kullanılarak gerçekleştirilmiş (Şekil 4.1.) ve ilişki

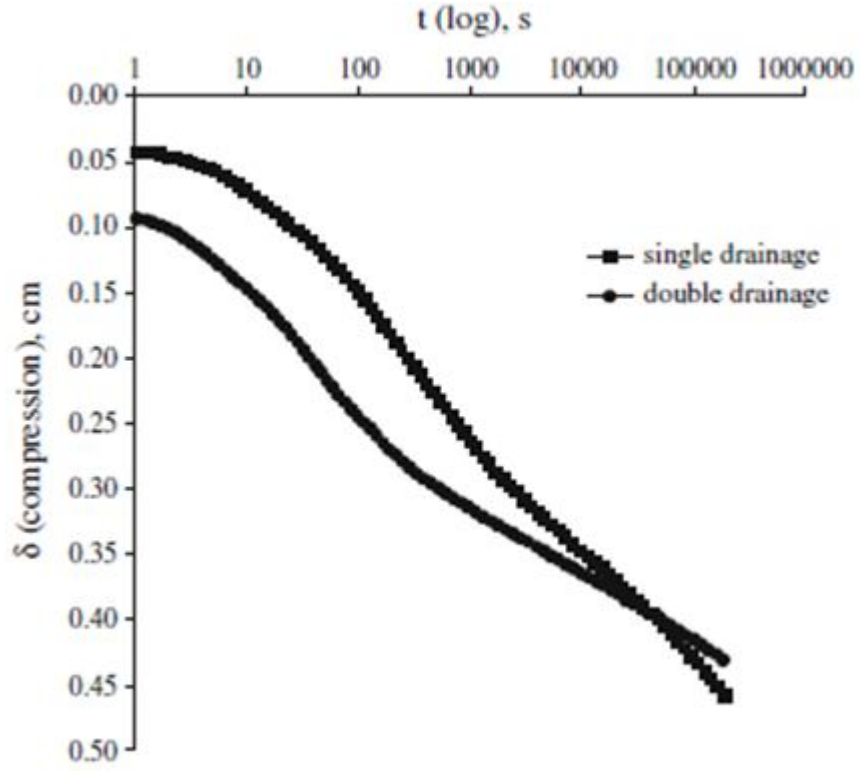


Şekil 4.2. Tek ve çift yönlü konsolidasyon hücresi [23]

$$c_v = 0,104 \frac{H^2}{t_{50}} \quad (4.1)$$

$$c_v = 0,72 \frac{H^2}{t_{90}} \quad (4.2)$$

burada H numunenin kalınlığı, t_{50} konsolidasyon %50 ulaşma zamanı ve t_{90} konsolidasyon %90 ulaşma zamanıdır. Ancak, bu tür deneyde de işlem son derece hızlıdır. Bu nedenle literatürde, zaman-sıkıştırma değerleri elektronik olarak kaydedildiğinde tek ve çift drenaj tip deneyleri için t-log σ eğrilerinin karşılaştırması Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi sunulmuştur [24]. Grafikteki örneklerin son sıkışması aynı olabilir, ancak t-log σ eğrilerinin şekillerinde önemli farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 4.3. Adapazarı silt için zaman - sıkıştırma eğrileri ($r = 100-200$ kPa) [24]

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Bu çalışmada siltli zemin numunesinin içerdiği kil ve kum boyutundaki daneler ayıklanarak içerisinde belirli oranlarda kil numunesi ilave edilerek, farklı karakterdeki siltlerin sıkışma parametrelerini tespit etmek amacıyla numuneler üzerinde ödometre deney aletiyle konsolidasyon deneyi yapılarak zemin sıkışma parametrelerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

5.2. Numune Hazırlama

Deneylerde ham numune olarak, Adapazarı Yenigün Mah. Tacettin Sert arazisinden alınan siltli zemin kullanılmıştır. Numune el arabasına yüklenerek laboratuvar içerisine taşınmıştır. Numune ilk olarak 40 nolu elekten elenerek büyük danelerden arındırılmış ve elek altından geçen malzeme havada kurutulmuştur.



Şekil 5.1. Numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması

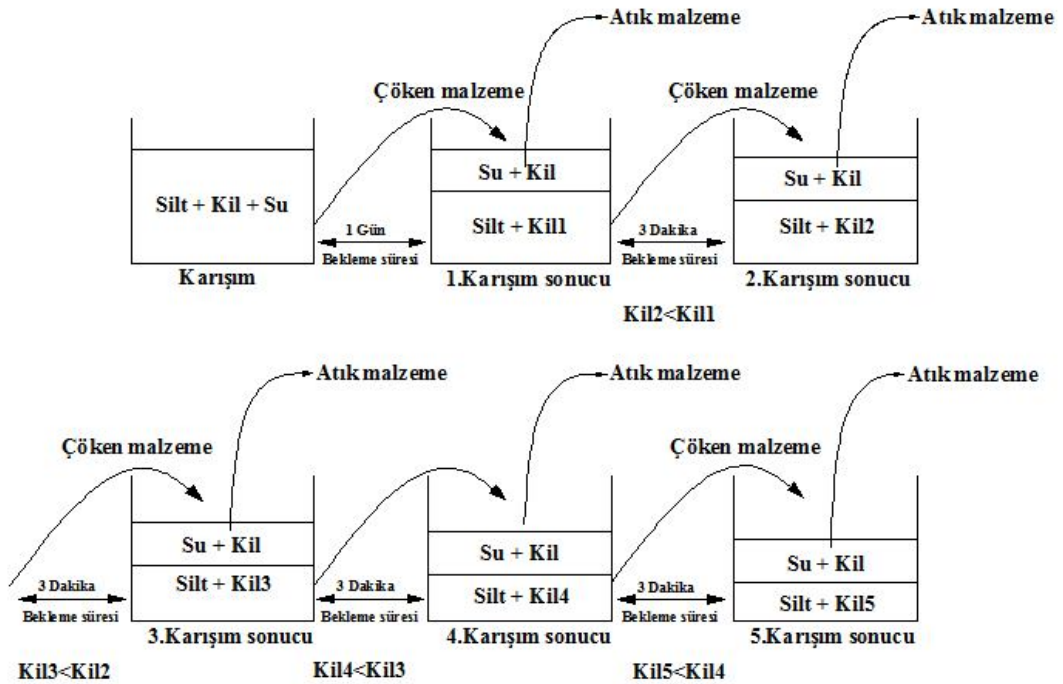


Şekil 5.2. Numunenin 40 nolu elekten elenmesi



Şekil 5.3. Elekten geçirilen siltin serilip kurutulması

Zemin numunesi içerisindeki silt ve kili birbirinden ayırmak için çöktürme yöntemi kullanılmıştır. Çöktürme yöntemi siltli zeminin dibine çökmesi ve üst kısımda suda asılı halde kalan killi kısmın ayrıştırılması amaçlanmıştır. Bu yöntemde, numune boş bir kovaya koyulmuş ve üzerine su eklenerek karıştırılmıştır. Karışım bir gün bekletilerek dinlenmesi ve çökmesi sağlanmıştır. Tamamen çöken numune 3 dakika ara ile 5 kere karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Her karıştırma-bekleme süresi sonunda kovanın üst kısmındaki süspansiyon boşaltılmıştır. Böylece sonunda kovaların dibinde mümkün olduğunca az kil oranına sahip siltli zemin elde edilmeye çalışılmıştır. Çöktürme yönteminin aşamaları Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Çöktürme tekniği aşamaları

Yeterli miktarda silt numunesi örneği alınıp, daha sonra bu numuneye süspansiyondan alınan killi kısımdan aşağıda verilen oranlarda konularak 2500 gr ağırlığında 5 farklı homojen bir zemin elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında ham numune olan %100 doğal siltli zemin, çöktürülmüş siltten ayırtlanmış süspansiyondan alınan %100 killi zemin ve çöktürülmüş siltli zeminden 2500'er gr numune olarak hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Hazırlanan numunelerin silt ve kil ağırlıkları

Numune Tanımı	Numune No	Silt Ağırlığı (gr)	Kil Ağırlığı (gr)
Çöktürülmüş Siltli Numune	C52	2500	-
%100 Siltli Zemin Numune	C65	2500	-
%10 Killi Zemin Katkılı Numune	C116	2272	228
%20 Killi Zemin Katkılı Numune	C128	2084	416
%30 Killi Zemin Katkılı Numune	C154	1923	577
%40 Killi Zemin Katkılı Numune	C161	1786	714
%50 Killi Zemin Katkılı Numune	C187	1667	843
%100 Killi Numune	C210	-	2500



Şekil 5.5. Farklı oranlarda kil ve silt içeren numunelerin hazırlanması

5.3. Fiziksel Deneyler

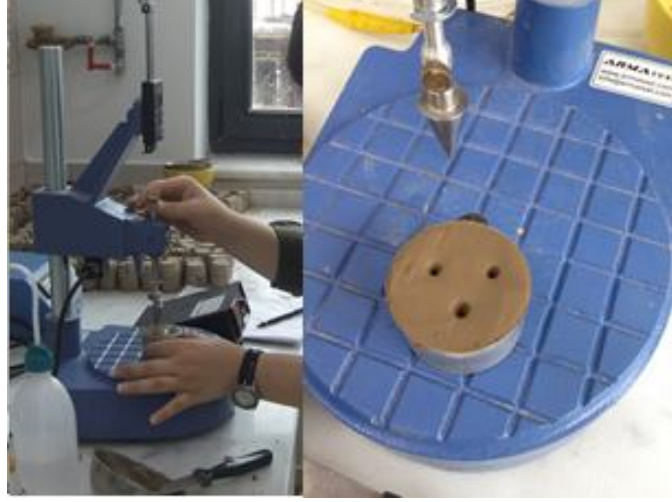
Hazırlanan numunelerin fiziksel deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler; Casagrande yöntemi (Şekil 5.6.) ve koni düşürme yöntemi (Şekil 5.7.) ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyi (Şekil 5.8.), dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre (Şekil 5.10.) ve pipet deneyleri (Şekil 5.11.) dir. Deneysel çalışmada kullanılan bu numunelerin TS 1900/2006 uyarınca belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 5.2.'de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Numunelerin fiziksel özellikleri

Numune No	LL _{Cas}	LL _{Koni}	PL	PI	%C _{Hid}	%C _{Pipet}	Sınıf (TS1500)
C52	33	33	28	5	7,5	5,2	ML
C65	33	34	24	9	6	6,5	ML
C116	33	36	28	5	11	11,6	ML
C128	33	36	29	4	12,5	12,8	ML
C154	33	37	29	5	14	15,4	ML
C161	34	35	30	4	15,5	16,1	ML
C187	35	35	26	9	17	18,7	MI
C210	48	50	33	15	20,5	21	MI



Şekil 5.6. Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi



Şekil 5.7. Koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyi



Şekil 5.8. Plastik limit deneyi



Şekil 5.9. Hidrometre ve pipet deneyi numuneleri



Şekil 5.10. Hidrometre deneyi



Şekil 5.11. Pipet deneyi



Şekil 5.12. Elek analizi

5.4. Konsolidasyon Deneyleri

Konsolidasyon deneyleri yukarıda tanımlanan örneklerin 100 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış olan karışımların her birinden 1 kg alınarak içerisine su muhtevası değerinin likit limiti değerini geçmesini amaçlayarak 400 ml su ilave edilerek iyice karıştırılmış ve en az 2 saat boyunca desikatörde vakuma bırakılmıştır (Şekil 5.13.).



Şekil 5.13. Su ilave edilip hazırlanan numuneye vakum uygulama

Bulamaç haline gelen numuneler 5 cm çaplı hücrelere önce poroz taşı ardından filtre kağıdını takip ederek yerleştirilmiştir. Bulamaç numune 12 cm boyunca hücreye homojen bir şekilde yerleştirilmiştir. Numune üzerine filtre kağıdı ve poroz taşı koyulup, ağzına kadar su ilave edilmiştir. Daha sonra hücre kapağı conta yardımıyla kapatılmıştır. Üzerine 1 kg yük koyup 24 saat bekletilmiştir (Şekil 5.14.).



Şekil 5.14. Vakum uygulanan numunelerin 5 cm çaplı hücelere yerleştirilmesi

Hücre 24 saat bekletildikten sonra yükleme askısına asılmıştır. Bulamaç halindeki numuneler önce kendi ağırlığı altında sonra yavaş yavaş artırılan düşey gerilme ile 4-5 günlük bir süreç içinde 100 kPa altında konsolide edilmişlerdir (Şekil 5.15.).



Şekil 5.15. Numunelerin bulamaçtan 100 kPa düşey gerilme altında yeniden oluşturulması

Konsolidasyon deneyleri 50 mm çapında ve 20 mm ykseklisindeki konsolidasyon halkasında yapılmıştır. Askıdan alınan hücredeki numune konsolidasyon halkasının ykseklinden bir miktar daha uzun bir bölümü hücreden kriko yardımı ile çıkarılmıştır. Bu işlem sırasında numunenin rselenmemesine ve konsolidasyon halkasına dik şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. Numune yerleştirilmeden önce konsolidasyon halkası hassas terazide tartılmaktadır (şekil 5.16.).



şekil 5.16. 50 mm çapında ve 20 mm ykseklisinde konsolidasyon halkasının deney öncesi tartımı

Konsolidasyon halkası hücreden kesilerek alınmış olan disk şeklindeki numunenin üzerine bastırılarak yerleştirildikten sonra, halkanın dışında kalan numune özenle traşlanmaktadır. Konsolidasyon halkası numuneye tamamen geçirilip, numunenin alt ve st yüzeyleri halkanın alt ve st uçlarından dışarıya taşıncaya kadar tıraşlamaya devam edilmiştir. Bu işlem halkanın alt ve st yüzeyi ile numunenin yüzeyleri aynı seviyeye gelene kadar sürmüştür. Elde edilen numunenin alt ve st düzeylerinin mümkün olduğunca birbirine paralel olmasına dikkat edilmiştir. Bu aşamalar sırasında işlemler mümkün olduğunca titiz ve hızlı yapılarak numunenin su muhtevasında herhangi bir değişiklik olmamasına zen gösterilmiştir. Konsolidasyon

numunesinin kalınlığı kumpas yardımı ile ölçülüp ve halka ile beraber hassas terazide tartılmıştır (Şekil 5.17.).



Şekil 5.17. Konsolidasyon halkası ile beraber hazırlanan numunenin deney öncesi tartımı

Konsolidasyon hücresinin tabanına alt gözenekli disk yerleştirilmiştir. Halka içindeki numune alt ve üst yüzeylerine geçirimli filtre kağıtları konularak gözenekli diskin ortasına yerleştirilmiştir (Şekil 5.18.).



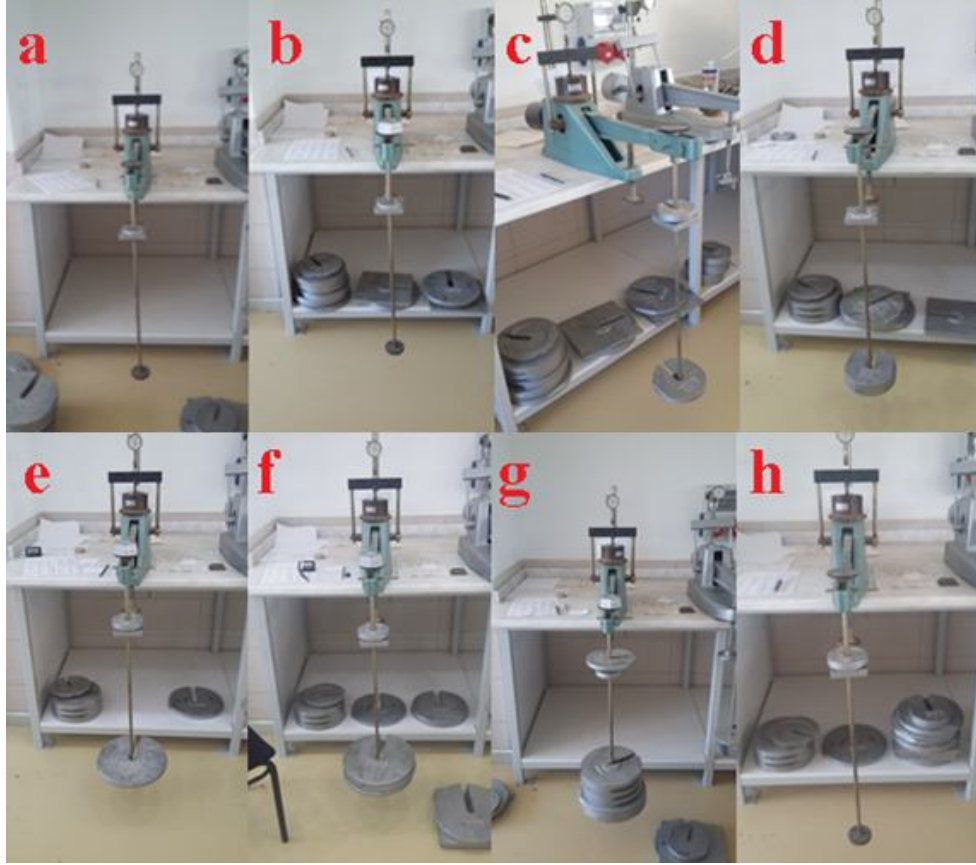
Şekil 5.18. Konsolidasyon hücresinin alt ve üst yüzeylerine filtre kağıdının yerleştirilmesi

Sonra üst gözenekli disk ve yükleme plakası numunenin ortasına yerleştirilir. Daha sonra ödometre yükleme cihazının gerilme uygulayan kolu dengelenerek gerilmelerin numuneye aksenal bir biçimde iletilecek düzener kurur. Bu dengelemede yükleme kolu yatay duruma getirilip yükü numuneye aktaran parça yükleme plakasına degecek biçimde ayarlanır. Mekanik mikrometre, konsolidasyon hücresinin tabanı ile yükleme plakası arasındaki bağıl hareketi ölçecek biçimde sabitlenir. Bu ayarlamalar yapıldıktan sonra yüklemeler yapılarak deneye başlanır (Şekil 5.19.).



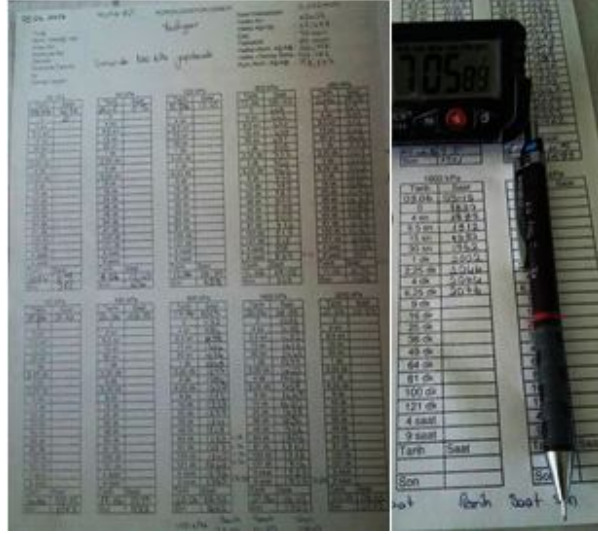
Şekil 5.19. Konsolidasyon hücresinin hazırlanması ve deneye başlanması

Deney aşamasında numuneye uygulanacak yüklemeler sırası ile 25 – 50 – 100 – 200 – 400 – 100 – 800 – 1600 – 3200 – 100 kPa olarak takip edilmiştir. Her yükleme kademesinde 24 saat beklenmiştir (Şekil 5.20.).



Şekil 5.20. Konsolidasyon deneyi sırasında yapılan yüklemeler

200 – 400 – 800 – 1600 kPa yüklemelerinde zamana bağlı sıkışma okumaları alınmıştır. İlk önce göstergenin başlangıç okuması forma kaydedilmiştir. Daha sonra ilk yük ağırlık askısına yerleştirilerek kaldırma kolu destek civatası döndürülerek aşağıya indirilip kaldırma kolunun serbest kalması sağlanmaktadır. Yükün numuneye aktarıldığı an göstere ibresinin harekete geçişinden anlaşılır. Aynı anda kronometre çalıştırılır, belirli süreler sonunda göstergeden sıkışma okumaları alınır. Bu okumaların, yükün uygulandığı andan itibaren 0, 4'', 8,5'', 15'', 30'', 1', 2,25', 4', 6,25', 9', 16', 25', 36', 49', 64', 81', 100', 121', 4, 9 ve 24 saat sonunda alınması, deney sonunda konsolidasyon katsayısını belirlemek amacıyla çizilecek oturma-zaman eğrisinde noktaların düzenli aralıklarla ve kolaylıkla yerleştirilmesini sağlar (Şekil 5.21.).



Şekil 5.21. Konsolidasyon deneyi sırasında okumaların forma geçirilmesi

Deney sonunda numune konsolidasyon halkası ile hassas terazide tartılır. Sonra numune konsolidasyon halkasından çıkarılır ve etüve konular (Şekil 5.22.). 24 saat sonunda etüvden çıkarılır ve tartılır. Böylece kuru numune ağırlığı belirlenir (Şekil 5.23.).



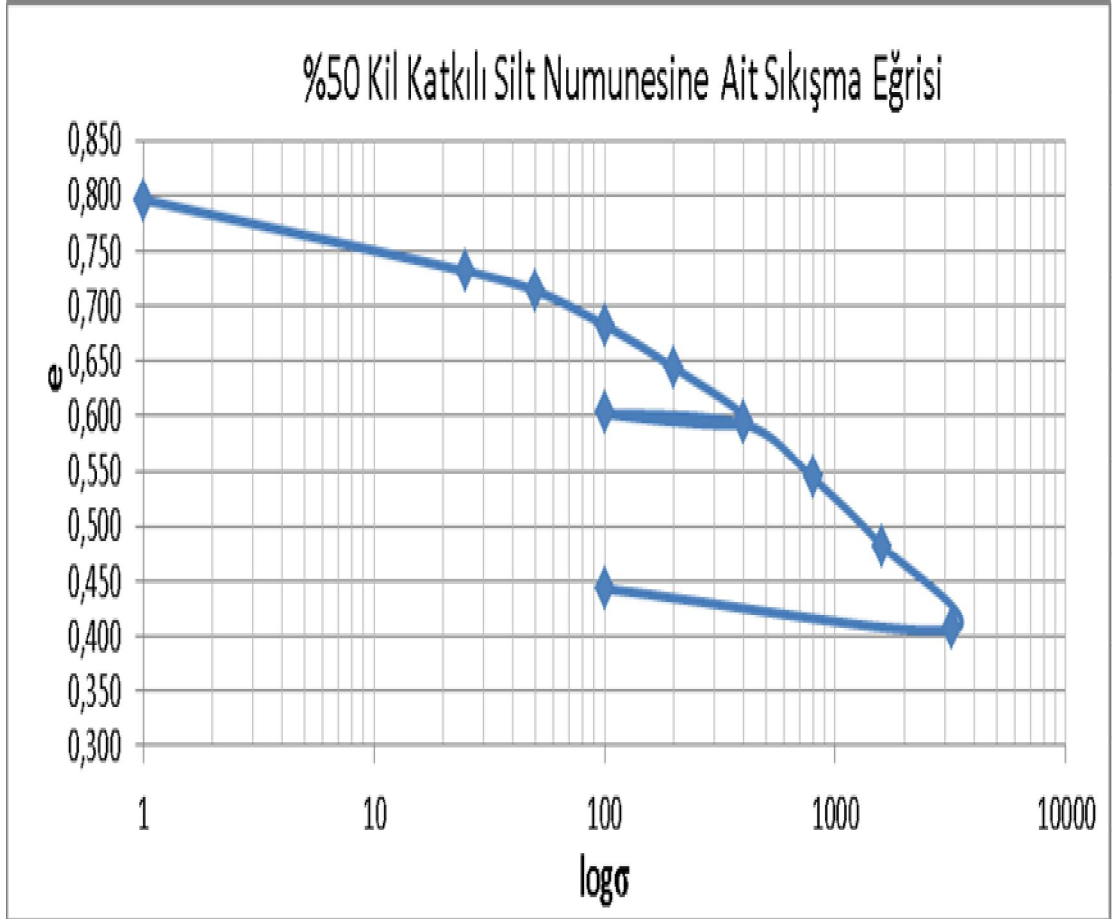
Şekil 5.22. Numunenin konsolidasyon halkasından çıkarılması



Şekil 5.23. Deney sonunda ve etüvden çıkarıldıktan sonra numunenin tartımı

5.5. Deneysel Sonuçlar

Deneyle sonucunda sıkışma ($e - \log \sigma$) eğrileri (şekil 5.24.) izilip elde edilen parametreler; sıkışma katsayısı (a_v), sıkışma indisi (C_c), yeniden sıkışma indisi (C_r), konsolidasyon katsayısı (c_v), n konsolidasyon basıncı (σ_c)'dir.



şekil 5.24. %50 kil katkılı silt numunesine ait sıkışma eğrisi

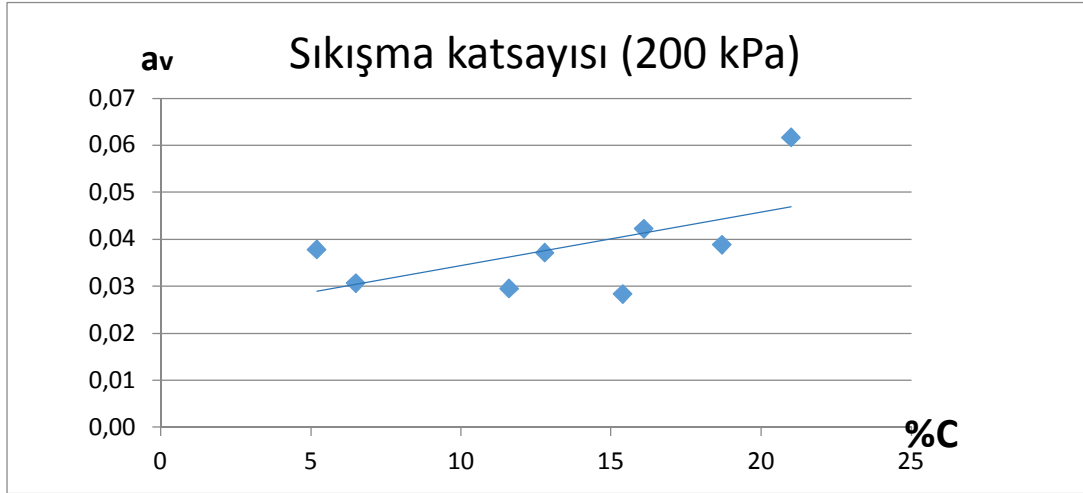
5.5.1. Sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda her numune için boşluk oranı – gerilme ($e - \log \sigma$) grafikleri çizilip, sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 5.3.'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Numunelerin sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerleri

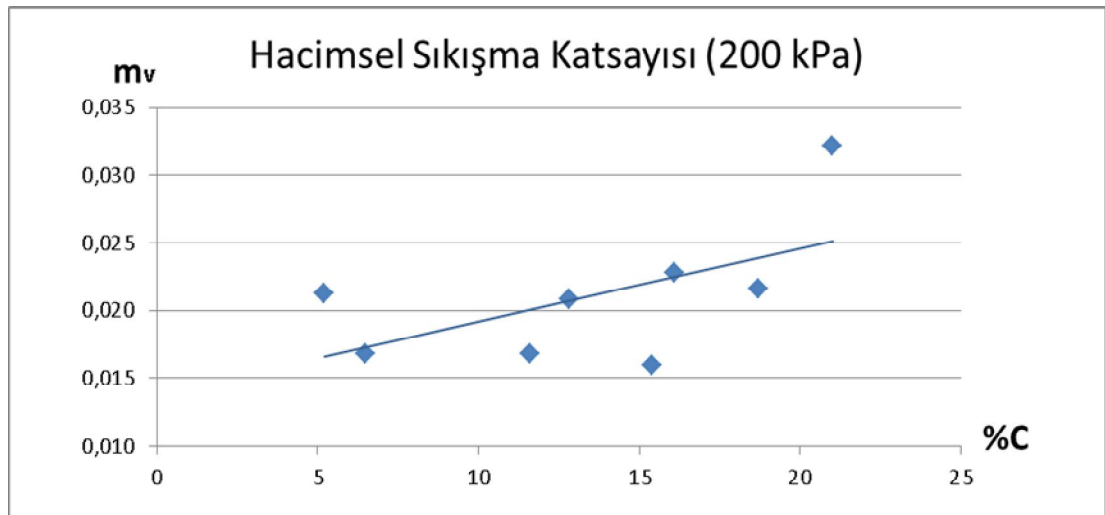
σ	C52		C65		C116		C128		C154		C161		C187		C210	
	$e_0 = 0,78$		$e_0 = 0,82$		$e_0 = 0,75$		$e_0 = 0,78$		$e_0 = 0,77$		$e_0 = 0,85$		$e_0 = 0,80$		$e_0 = 0,92$	
	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v	a_v	m_v
25	0,34554	0,19412	0,35007	0,19235	0,45261	0,25863	0,42120	0,23663	0,52818	0,29841	0,57049	0,30837	0,26567	0,14759	0,41416	0,21571
50	0,06706	0,03767	0,00948	0,00521	0,06037	0,03450	0,09342	0,05248	0,05949	0,03361	0,10731	0,05801	0,07256	0,04031	0,13713	0,07142
100	0,05640	0,03169	0,06340	0,03484	0,05400	0,03086	0,06310	0,03545	0,03720	0,02102	0,07700	0,04162	0,06210	0,03450	0,09920	0,05167
200	0,03781	0,02124	0,03062	0,01682	0,02948	0,01685	0,03708	0,02083	0,02833	0,01601	0,04219	0,02281	0,03880	0,02156	0,06167	0,03212
400	0,02122	0,01192	0,02123	0,01166	0,01957	0,01118	0,02157	0,01212	0,02603	0,01471	0,02442	0,01320	0,02514	0,01397	0,03476	0,01810
100	0,00238	0,00134	0,00237	0,00130	0,00222	0,00127	0,00232	0,00130	0,00283	0,00160	0,00870	0,00470	0,00257	0,00143	0,00440	0,00229
400	0,00327	0,00184	0,00365	0,00201	0,00363	0,00207	0,00547	0,00307	0,00384	0,00217	0,00944	0,00510	0,00299	0,00166	0,00606	0,00316
800	0,01079	0,00606	0,01130	0,00621	0,01022	0,00584	0,00985	0,00553	0,01168	0,00660	0,01078	0,00583	0,01217	0,00676	0,01623	0,00845
1600	0,00590	0,00331	0,00720	0,00396	0,00660	0,00377	0,00620	0,00348	0,00550	0,00311	0,00740	0,00400	0,00780	0,00433	0,01010	0,00526
3200	0,00360	0,00202	0,00380	0,00209	0,00330	0,00189	0,00380	0,00213	0,00370	0,00209	0,00430	0,00232	0,00470	0,00261	0,00540	0,00281
100							0,00140	0,00079	0,00120	0,00068	0,00140	0,00076	0,00120	0,00067	0,00230	0,00120

Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da numunelerin $\sigma = 200$ kPa'daki sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerlerinin kil oranı ile değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.25. Numunelerin 200 kPa'da sıkışma katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi

Sıkışma katsayısı ve kil oranı arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. 200 kPa gerilme altında numunedeki kil oranı arttıkça sıkışma katsayısında artış (Şekil 5.25.) görülmektedir. Hesaplanan düşük $a_v = 0,02833$ cm²/kg, en yüksek $a_v = 0,06167$ cm²/kg olmuştur.



Şekil 5.26. Numunelerin 200 kPa'da hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi

Hacimsel sıkışma katsayısı ve kil oranı arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. 200 kPa gerilme altında numunedeki kil oranı arttıkça hacimsel sıkışma katsayısında da

artış (Şekil 5.26.) görülmektedir. Hesaplanan en düşük $m_v=0,01601 \text{ cm}^2/\text{kg}$, en yüksek $m_v = 0,03212 \text{ cm}^2/\text{kg}$ 'dır.

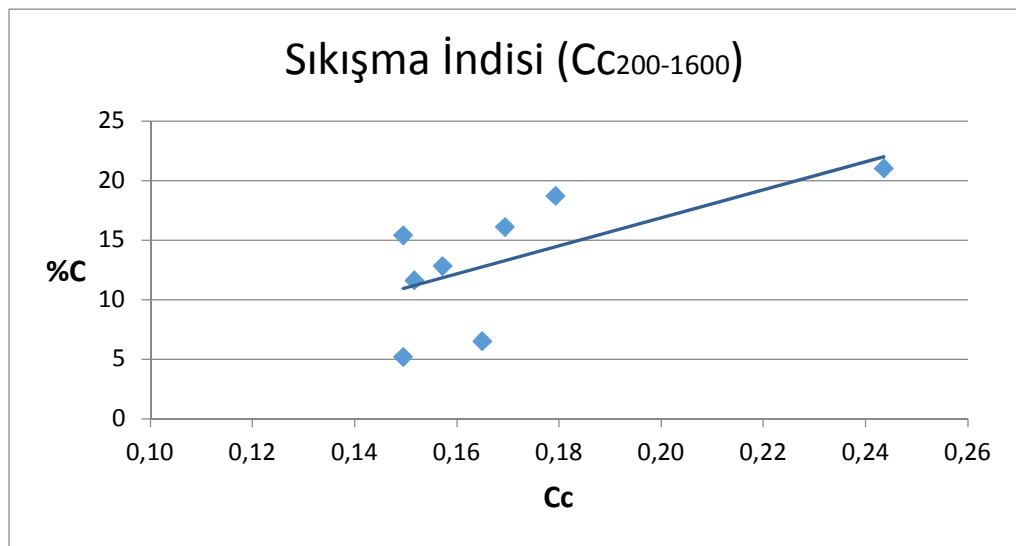
5.5.2. Sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda her numune için boşluk oranı – gerilme ($e - \log \sigma$) grafikleri çizilip, sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 5.4.'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Numunelerin sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisi değerleri

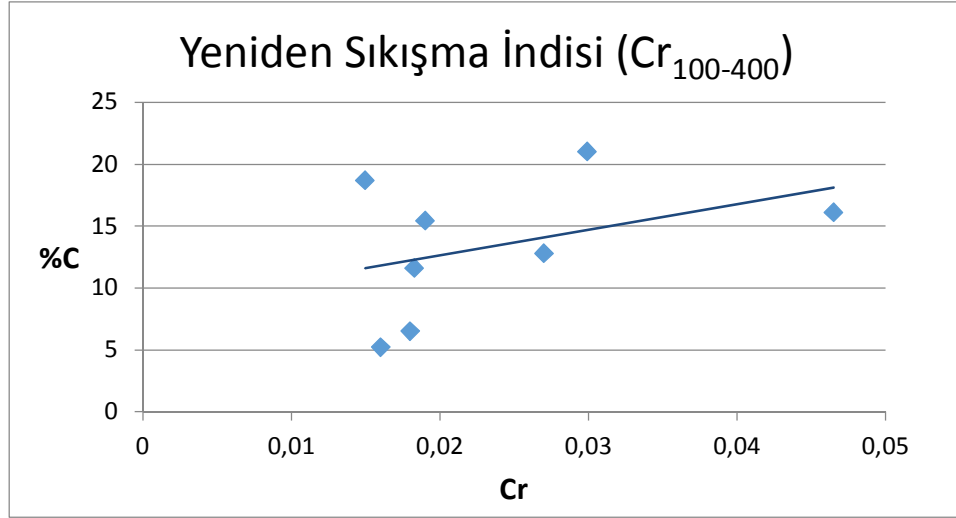
Numune No	%C	LLcas	LLkoni	$C_{c(200-1600)}$	$C_{r(100-400)}$
C52	5,2	33	33	0,1495	0,016
C65	6,5	33	34	0,1650	0,018
C116	11,6	33	36	0,1517	0,018
C128	12,8	33	36	0,1572	0,027
C154	15,4	33	37	0,1495	0,019
C161	16,1	34	35	0,1694	0,047
C187	18,7	35	35	0,1794	0,015
C210	21	48	50	0,2436	0,030

Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de numunelerin sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) değerlerinin kil oranı ile değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.27. Numunelerin sıkışma indisi değerlerinin kil oranı ile değişimi

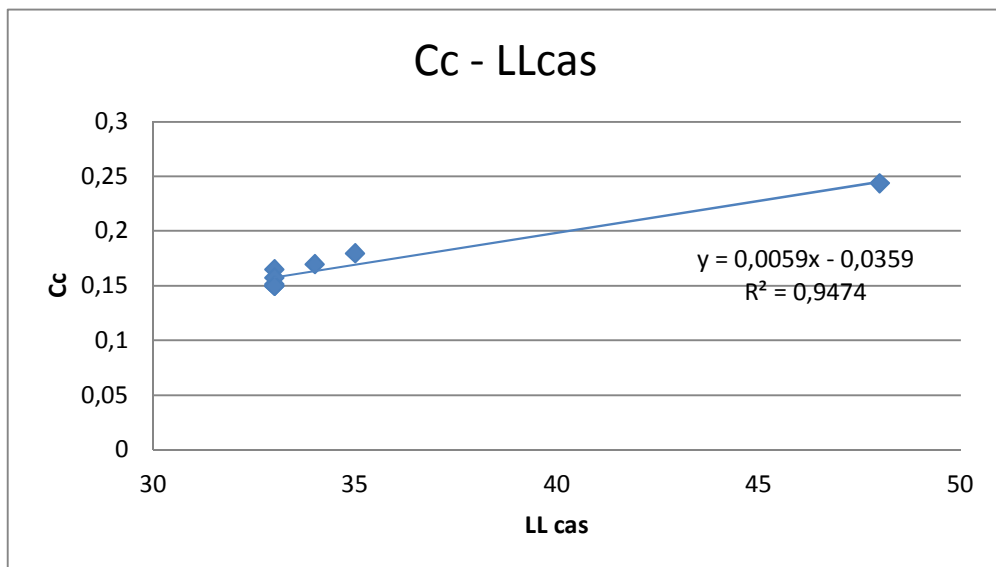
Sıkışma indisi ve kil oranı arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Numunedeki kil oranı arttıkça sıkışma indisinde artış (Şekil 5.27.) görülmektedir.



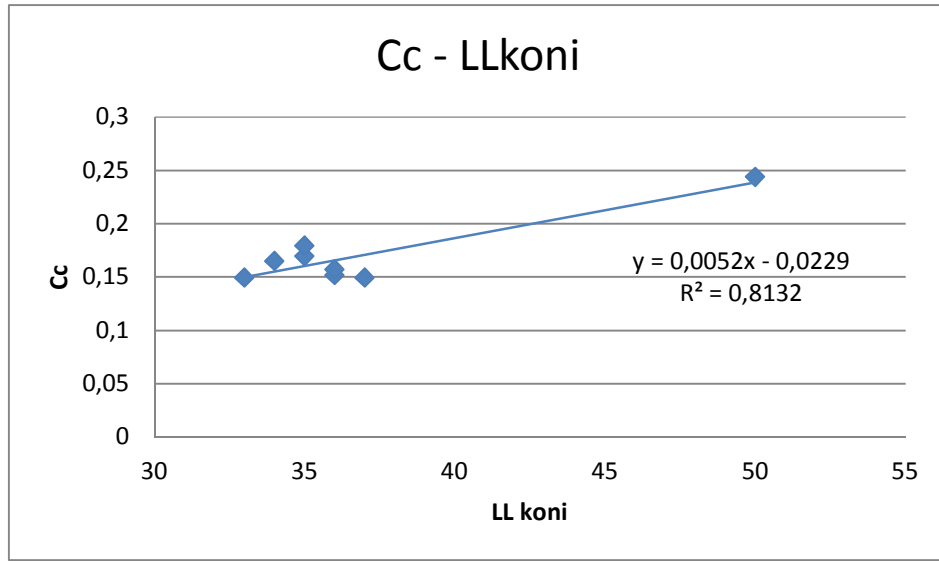
Şekil 5.28. Numunelerin yeniden sıkışma indisi değerlerinin kil oranı ile değişimi

Yeniden sıkışma indisi ve kil oranı arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Numunedeki kil oranı arttıkça yeniden sıkışma indisi de (Şekil 5.28.) artmaktadır.

Şekil 5.29. ve Şekil 5.30.'da sıkışma indisi (C_c) likit limit (LL) değerleri ile değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.29. Sıkışma indisi (C_c) ve casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri ile değişimi



Şekil 5.30. Sıkışma indisi (Cc) ve koni yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri ile değişimi

Sıkışma indisi ve Casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri arasında korelasyon katsayısı $R^2 = 0,95$ olup doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Numunelerde likit limit değerleri arttıkça sıkışma indisinde de artış (Şekil 5.29.) görülmektedir. Sıkışma indisi ve koni yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri arasında korelasyon katsayısı $R^2 = 0,81$ olup doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Numunelerde likit limit değerleri arttıkça sıkışma indisinde de artış (Şekil 5.30.) görülmektedir.

Şekil 5.29. ve Şekil 5.30. karşılaştırıldığında likit limit değerlerinde en iyi sonucu Casagrande yöntemine göre elde edilen değerlerin verdiği görülmektedir.

5.5.3. Konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları

Yapılan deneylerde her numune için, 200 – 400 – 800 – 1600 kPa yüklemelerinde zamana bağlı sıkışma okumaları alınmıştır. Bu okumalarla Casagrande logaritmik yöntem ve Taylor karekök yöntemi ile konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri hesaplanmıştır.

5.5.3.1. Casagrande logaritmik yöntem ile konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları

Alınan okumalar ve hesaplamalar sonucunda 200 – 400 – 800 – 1600 kPa yüklemelerinde her numunede $\log(t)$ – deformasyon grafiği çizilip, t_{50} değerleri bulunup konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da verilmiştir.

Tablo 5.5. Numunelerin t_{50} değerleri

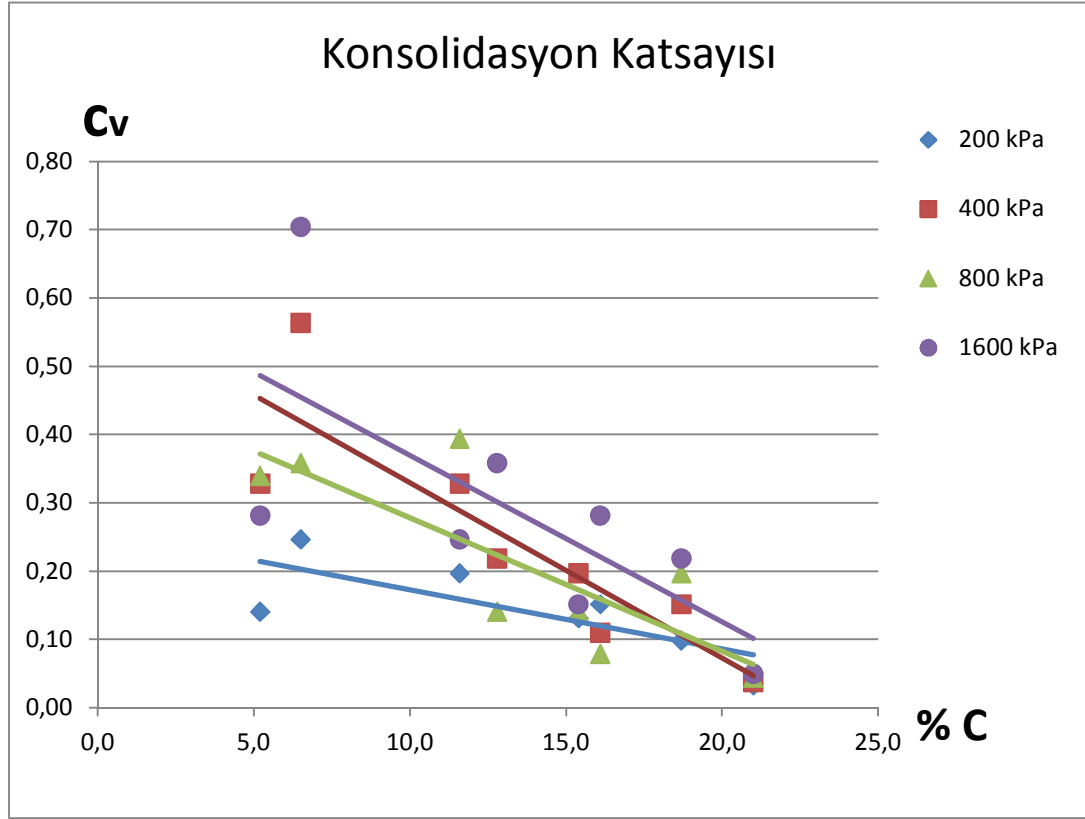
Numune No	%C	t_{50}			
		200 kPa	400 kPa	800 kPa	1600 kPa
C52	5,2	1,40	0,60	0,58	0,70
C65	6,5	0,80	0,35	0,55	0,28
C116	11,6	1,00	0,60	0,50	0,80
C128	12,8	-	0,90	1,40	0,55
C154	15,4	1,50	1,00	1,40	1,30
C161	16,1	1,30	1,80	2,50	0,70
C187	18,7	2,00	1,30	1,00	0,90
C210	21	6,00	5,25	4,50	4,00

Tablo 5.5.'te görüldüğü gibi numunelere uygulanan yüklemeler arttıkça t_{50} değerleri azalmakta, numunelerde kil oranı arttıkça t_{50} değerleri artmaktadır. Numunelerin t_{50} değerinin hesaplandığı $\log(t)$ – deformasyon grafikleri EK 1'de verilmiştir.

Tablo 5.6. Numunelerin Casagrande logaritmik yöntemle göre konsolidasyon katsayısı değerleri (cm^2/dk)

Numune No	%C	c_v (Konsolidasyon Katsayısı) (cm^2/dk)			
		200 kPa	400 kPa	800 kPa	1600 kPa
C52	5,2	0,1407	0,3283	0,3397	0,2814
C65	6,5	0,2463	0,5629	0,3582	0,7036
C116	11,6	0,1970	0,3283	0,3940	0,2462
C128	12,8	-	0,2189	0,1407	0,3582
C154	15,4	0,1313	0,1970	0,1407	0,1515
C161	16,1	0,1515	0,1094	0,0788	0,2814
C187	18,7	0,0985	0,1515	0,1970	0,2189
C210	21	0,0328	0,0375	0,0438	0,0493

Şekil 5.31.'de numunelerin her yüklemdeki konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri ile kil oranı değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.31. Casagrande logaritmik yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi

Şekil 5.31.'de görüldüğü gibi kil oranı arttıkça Casagrande logaritmik yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Konsolidasyon katsayısı değerlerinde yüklemelerin hepsinde ise lineer bir azalma meydana gelmiştir.

5.5.3.2. Taylor karekök yöntemi ile konsolidasyon katsayısı (c_v) sonuçları

Alınan okumalar ve hesaplamalar sonucunda 200 – 400 – 800 – 1600 kPa yüklemelerinde her numunede \sqrt{t} – deformasyon grafiği çizilip, t_{90} değerleri bulunup konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 5.7. ve Tablo 5.8.'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Numunelerin t_{90} değerleri

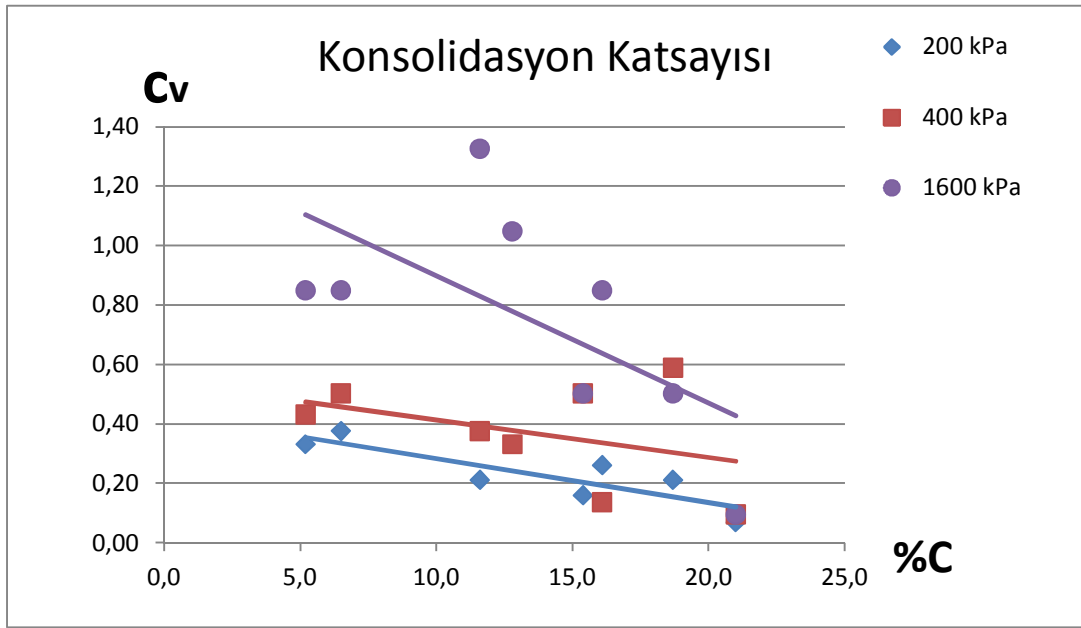
Numune No	%C	t_{90}			
		200 kPa	400 kPa	800 kPa	1600 kPa
C52	5,2	2,56	1,96	2,56	1,00
C65	6,5	2,25	1,69	2,25	1,00
C116	11,6	4,00	2,25	1,21	0,64
C128	12,8	-	2,56	2,56	0,81
C154	15,4	5,29	1,69	1,21	1,69
C161	16,1	3,24	6,25	0,64	1,00
C187	18,7	4,00	1,44	0,64	1,69
C210	21	12,25	9,00	9,00	9,00

Tablo 5.7.'de görüldüğü gibi numunelere uygulanan yüklemeler arttıkça t_{90} değerleri azalmakta, numunelerde kil oranı arttıkça t_{90} değerleri artmaktadır. Numunelerin t_{90} değerinin hesaplandığı \sqrt{t} – deformasyon grafikleri EK 2’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Numunelerin Taylor karekök yöntemine göre konsolidasyon katsayısı değerleri (cm^2/dk)

Numune No	%C	c_v (Konsolidasyon Katsayısı) (cm^2/dk)			
		200 kPa	400 kPa	800 kPa	1600 kPa
C52	5,2	0,3313	0,4327	0,3313	0,8480
C65	6,5	0,3769	0,5018	0,3769	0,8480
C116	11,6	0,2120	0,3769	0,7008	1,3250
C128	12,8	-	0,3313	0,3313	1,0469
C154	15,4	0,1603	0,5018	0,7008	0,5018
C161	16,1	0,2617	0,1357	1,3250	0,8480
C187	18,7	0,2120	0,5889	1,3250	0,5018
C210	21	0,0692	0,0942	0,0942	0,0942

Şekil 5.32.’de numunelerin her yüklemedeki konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri ile kil oranı değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.32. Taylor karekök yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinin kil oranı ile değişimi

Şekil 5.32.'de görüldüğü gibi kil oranı arttıkça Taylor karekök yöntemine göre elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Konsolidasyon katsayısı değerlerinde 200 kPa, 400 kPa ve 1600 kPa yüklemelerinde ise lineer bir azalma meydana gelmiştir.

5.5.4. Farklı yöntemlerle bulunan ön konsolidasyon basıncı (σ_c) değerlerinin karşılaştırılması

Konsolidasyon deneyleri 100 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada konsolidasyon deneyinden bulunan parametre ve büyüklükler değerlendirildiğinde, deney başı ve sonu su muhtevaları, birim hacim ağırlıkları, başlangıç boşluk oranı değerleri ve numune çaplarının, bulunan ön konsolidasyon basıncı değerlerine etkisi olduğu düşünülmektedir. 8 adet deneyde kullanılan numunelerin başlangıç ve nihai su muhtevaları, dane birim hacim ağırlıkları, başlangıç ve nihai boşluk oranları Tablo 5.9.'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Deneyleerde kullanılan numunelerin zemin özellikleri

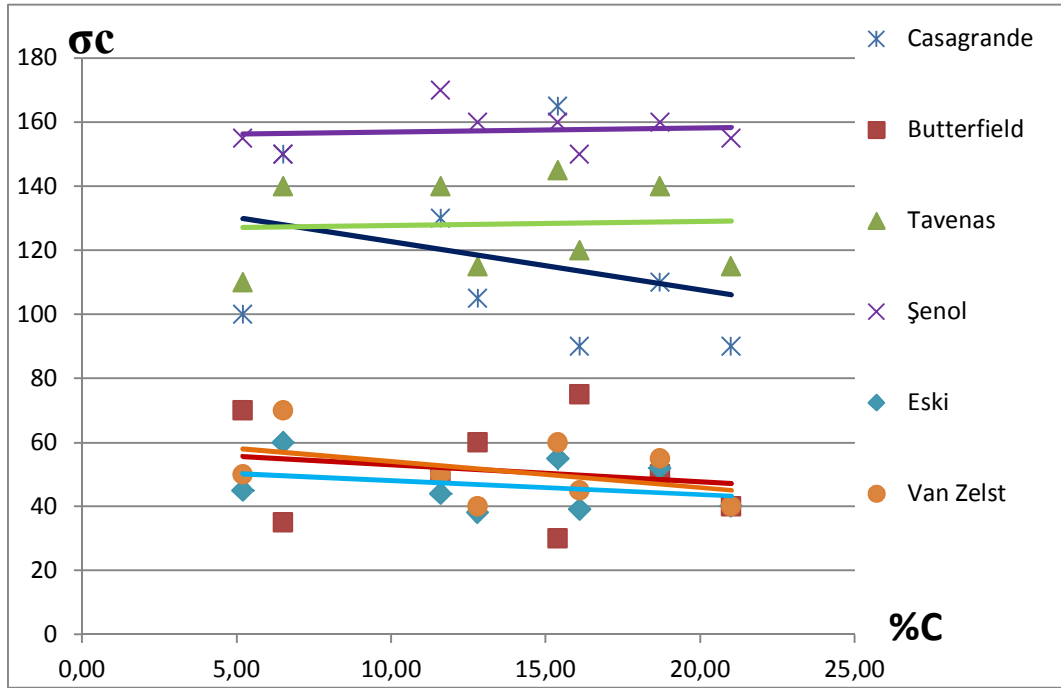
Numune No	%C	Deneş Başş	Deneş Sonu	Dane Birim	Dane Birim	Deneş Başş Boşluk	Deneş Sonu Boşluk
		Su Muhtevası W_{ik} %	Su Muhtevası W_{son} %	Hacim Ağırılığı γ_{ilk} (kN/m ³)	Hacim Ağırılığı γ_{son} (kN/m ³)	Oranı e_0	Oranı e
C52	5,2	32	19	19,38	17,89	0,78	0,43
C65	6,5	32	21	18,95	17,68	0,82	0,46
C116	11,6	31	21	19,51	18,44	0,75	0,40
C128	12,8	31	21	19,25	18,12	0,78	0,39
C154	15,4	32	20	19,55	18,10	0,77	0,39
C161	16,1	35	20	19,10	17,46	0,85	0,38
C187	18,7	32	21	19,24	18,00	0,80	0,41
C210	21	31	14	17,95	16,03	0,92	0,36

Yapılan konsolidasyon deneyleri değerlendirildiğinde 6 farklı yöntem ile grafikler çizilip, ön konsolidasyon basıncı hesaplamaları ve okumaları yapılmıştır. Bu değerlendirmelerin sonuçları bir çizelge halinde Tablo 5.10.'da sunulmuştur.

Tablo 5.10. Numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri (kPa)

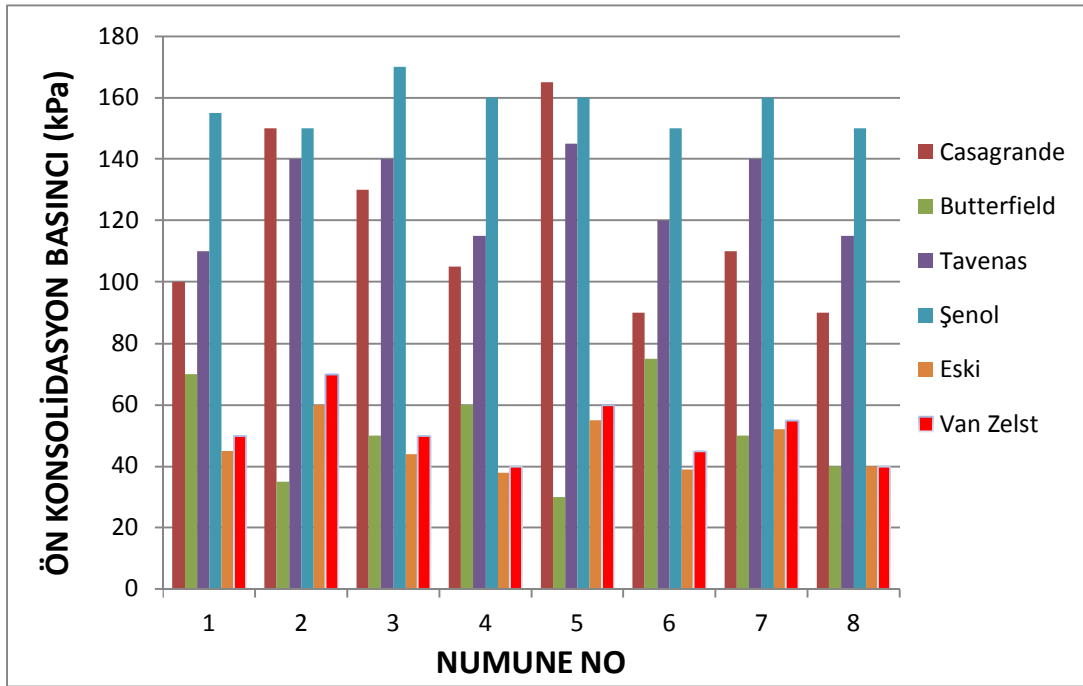
Numune No	%C	Casagrande ($e - \log \sigma'$)	Butterfield ($\ln(1+e) - \log \sigma'$)	Tavenas ($\sigma' \Delta H/H - \log \sigma'$)	Şenol ($\sigma' \Delta H/H - \log \sigma'$)	Van Zelst ($\Delta H/H - \log \sigma'$)	Eski ($\Delta H/H - \log \sigma'$)
C52	5,2	100	70	110	155	50	45
C65	6,5	150	35	140	150	70	60
C116	11,6	130	50	140	170	50	44
C128	12,8	105	60	115	160	40	38
C154	15,4	165	30	145	160	60	55
C161	16,1	90	75	120	150	45	39
C187	18,7	110	50	140	160	55	52
C210	21	90	40	115	150	40	40

Şekil 5.33.'de numunelerin farklı yöntemlere göre bulunan ön konsolidasyon basıncı değerlerinin kil oranı ile değişimi noktalanmıştır.



Şekil 5.33. Ön konsolidasyon basıncı değerlerinin farklı yöntemlere göre kil oranı ile değişimi

Deneyleerde 100 kPa dūşey gerilme altında yeniden oluşturulan numuneler kullanıldığından aslında numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri pratik olarak 100 kPa değerindedir. Buna rağmen teorik-grafik yaklaşımlar ile sonuç veren farklı yöntemler birbirinden çok uzak sonuçlar verebilmişlerdir. Tablo 5.10. incelendiğinde, 6 farklı yöntem arasında gerçeğe en yakın sonucu veren yöntemler Casagrande ve Tavenas olarak söylenebilir.



şekil 5.34. Ön konsolidasyon basıncı değerlerinin farklı yöntemlere göre grafiksel gösterimi

Casagrande, Butterfield, Tavenas, şenol, Eski ve Van Zelst yöntemleri grafiksel olarak incelendiğinde (şekil 5.34.) 6 yöntem arasından en yüksek değerlerin ön konsolidasyon basıncı şenol yönteminden elde edildiği net bir şekilde görölmektedir. En küçük değerler ise Eski yöntemden elde edilmiştir.

Tavenas yöntemi ile bulunan değerler aralarında çok fazla fark yoktur. Tavenas yönteminin deney hatalarını daha fazla kapattığı düşünölmektedir. Bu yöntemin hassas olmasının yanı sıra kolay olması diğer bir avantajdır.

Eski yöntem ile Van Zelst yönteminden bulunan ön konsolidasyon basınçları birbirlerine daha yakın çıkmıştır. Butterfield yönteminde ise daha küçük değerler okunmuştur ve değerler 100 kPa'ın altındadır.

Her numune için 6 farklı yöntem ile elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri ve hesapları EK 3'te verilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında siltli zemin numunelerinin içerdiği kil ve kum boyutundaki daneler ayıklanarak içerisinde belirli oranlarda killi zemin numunesi ilave edilerek, farklı karakterdeki siltlerin sıkışma parametrelerinin tespiti hedeflenmiştir. Bu amaçla numuneler üzerinde klasik ödometre deney aletiyle konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilerek zemin sıkışma parametreleri karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda Adapazarı kent merkezinden elde edilen siltli zeminden farklı kil oranlarında 8 farklı zemin karışımı hazırlanmış ve hazırlanan numuneler laboratuvarında bulamaçtan 100 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek yeniden oluşturulmuştur.

Tez çalışması kapsamında laboratuvarında Casagrande yöntemi ve düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyleri, dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre yöntemi ve pipet yöntemi ile çöktürme deneyleri yapılarak hazırlanan 8 numunenin fiziksel özellikleri elde edilmiştir. Farklı oranlarda silt ve kil içerecek şekilde hazırlanmış bütün karışımların kil yüzdeleri belirlenmiştir.

Yapılan konsolidasyon deneyleri ve hesaplamalar sonucunda hazırlanan numunelerde kil oranı arttıkça elde edilen konsolidasyon katsayısı (c_v) değerlerinde azalma meydana gelirken; sıkışma katsayısı (a_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) değerlerinde ise artma meydana gelmiştir.

Ön konsolidasyon basıncının önemi, belirleme yöntemleri, karşılaştırmaları ve yorumları ele alınmıştır. Elde edilen konsolidasyon eğrileri kullanılarak literatürde bulunan 6 farklı yöntemle göre numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri belirlenmiştir. Yapılan konsolidasyon deneylerinden ön konsolidasyon basıncı

Casagrande, Butterfield, Van Zelst ve Old yöntemlerinden hesaplanarak; Tavenas ve Şenol yöntemlerinden ise direk grafikten okunarak elde edilmiştir.

Konsolidasyon deneyinden bulunan parametre ve büyüklükler değerlendirildiğinde deney başı ve sonu su muhtevaları, birim hacim ağırlıkları, başlangıç boşluk oranı değerlerinin bulunan ön konsolidasyon basıncı değerlerine etkisi olduğu anlaşılmıştır. Hazırlanan numunelerin deney başı boşluk oranlarının dane dağılımıyla ilişkili olduğu ve karışımlardaki kil oranına bağlı olduğu gözlenmiştir. Kil oranı arttıkça başlangıçtaki boşluk oranı değerlerinin büyüdüğü sonucuna varılmıştır.

Laboratuvarda oluşturulan numunelere 100 kPa büyüklüğünde düşey gerilme uygulanmasına karşın farklı yöntemlere göre numunelerin ön konsolidasyon basıncı değerleri 30 ile 170 kPa arasında ölçülebilmştir. 6 yöntem arasından en yüksek değerler Şenol yönteminden, en küçük değerler ise Eski yöntemden elde edilmiştir. Butterfield yöntemi diğer yöntemlere göre uyumsuz sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlar pratikte de en çok tercih edilen Casagrande yöntemi gerçeğe en yakın sonuç verdiğini göstermiştir.

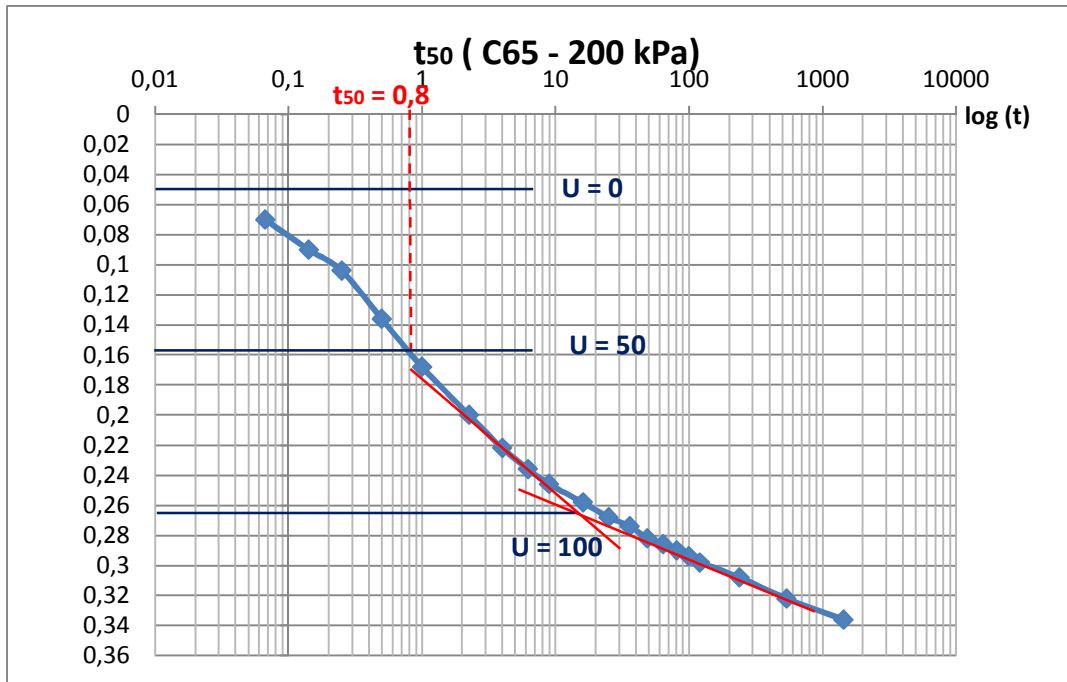
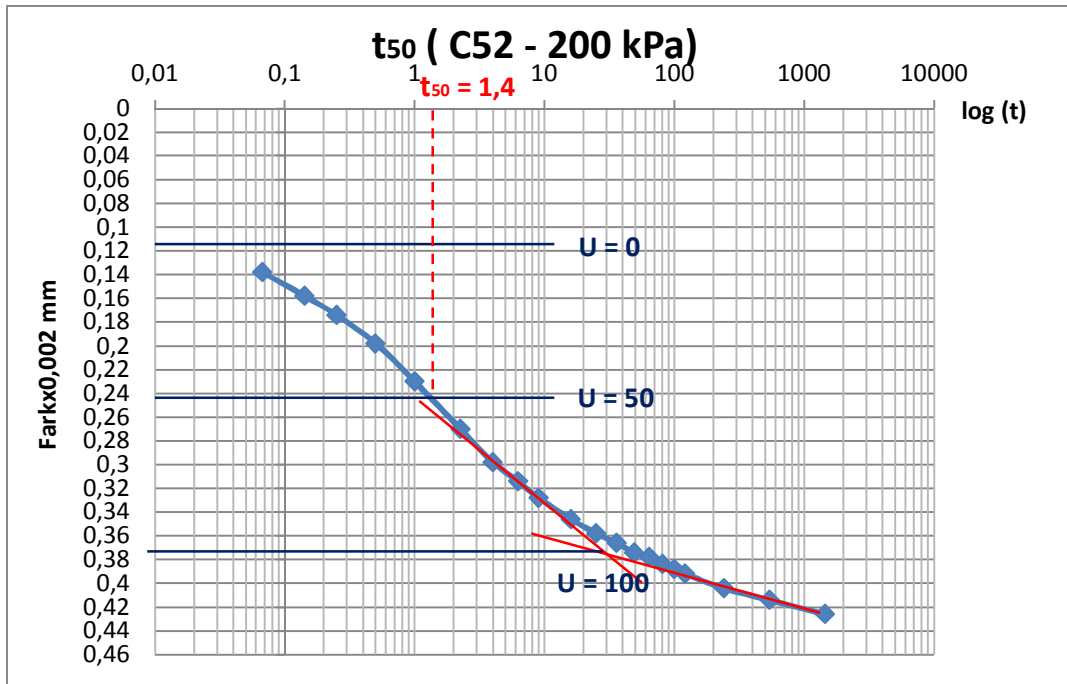
KAYNAKLAR

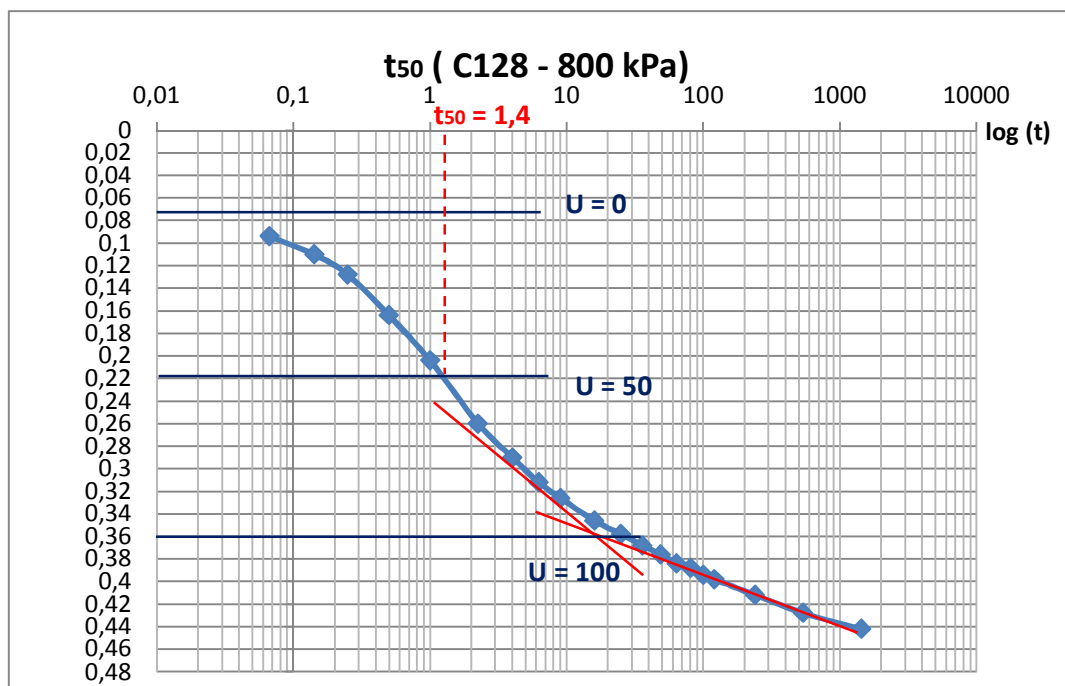
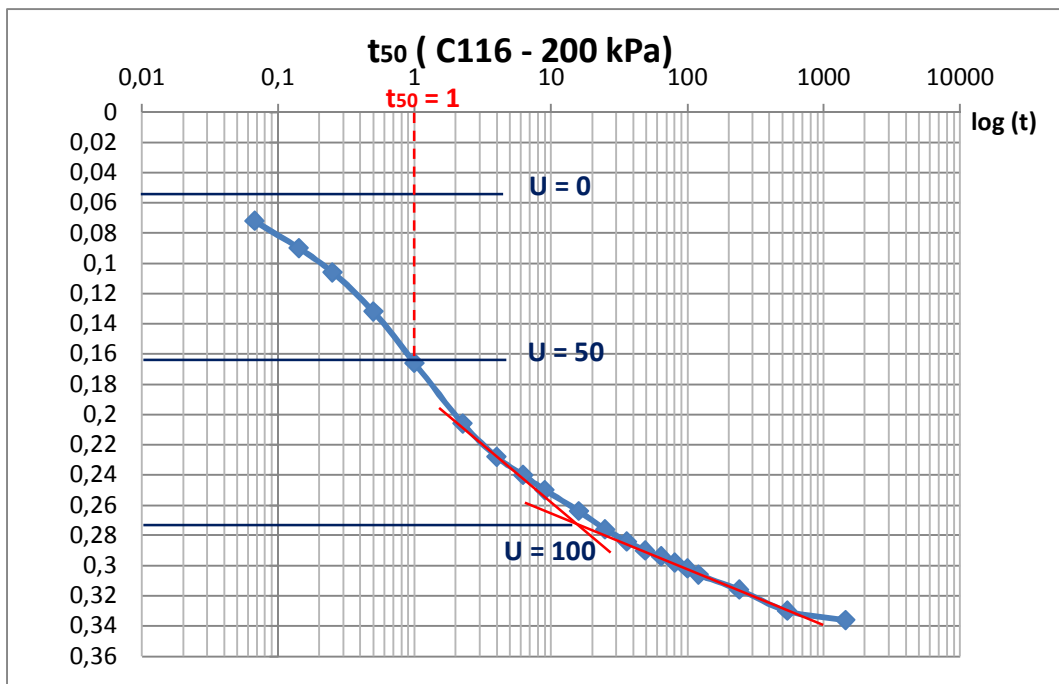
- [1] Cernica, J.N. Geotechnical Engineering: Soil Mechanics. John Wiley & Sons, U.S.A., 1995.
- [2] Uzuner, B.A. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği. IMO Trabzon Şubesi, Teknik Yayınevi, 1990.
- [3] Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York, 1943.
- [4] Önalp, A., Arel, E. Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2013.
- [5] Özocak, A. Doygun Olmayan Siltli Zeminlerin Sıkışabilirliği. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [6] Tapan, M. Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Yanal Konsolidasyon Özelliğinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [7] Terzaghi, K., Peck, R.B. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, U.S.A., 1967.
- [8] Şenol, A. Zeminlerde Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- [9] İnalkaç, M. Zemin Parametrelerinin Deneysel ve Teorik Olarak İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [10] Casagrande, A., Farum, R.E. Application of Soil Mechanics in Designing Building Foundation. Transaction ASCE Vol.109, 1944.
- [11] Das, B.M. Principles of Geotechnical Engineering. PWS – KENT Publishing Company, Boston, 1990.
- [12] Das, B.M. Advanced Soil Mechanics. Mc Graw – Hill Book Company, International Edition, Singapore, 1983.
- [13] Leonards, G.A. Foundation Engineering. Mc Graw – Hill Company, 1962.

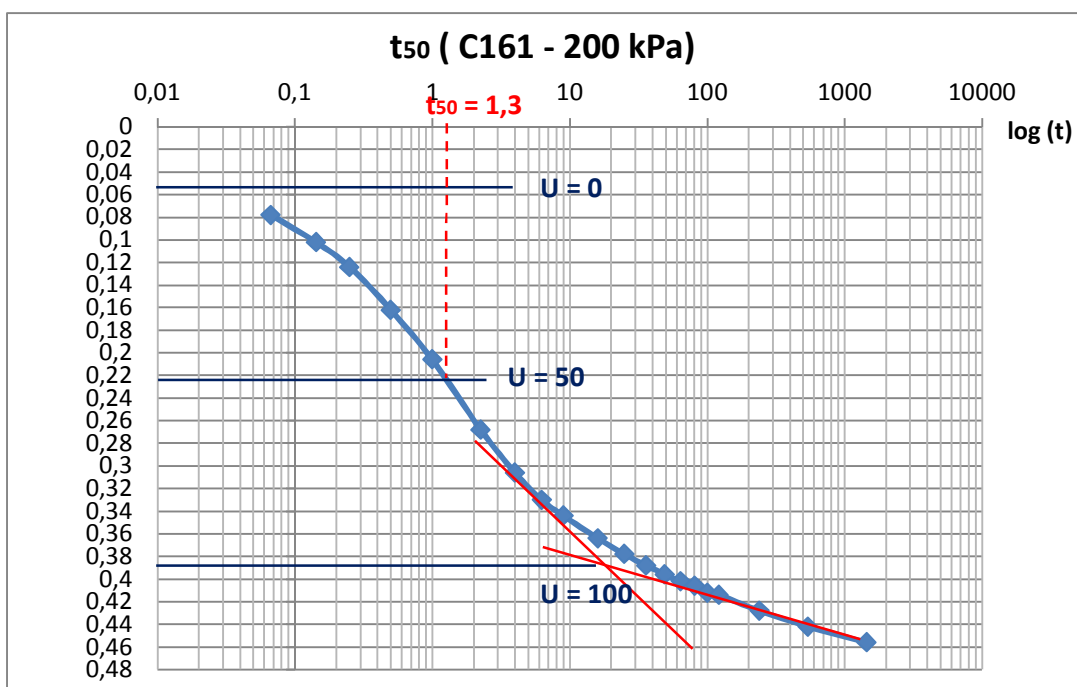
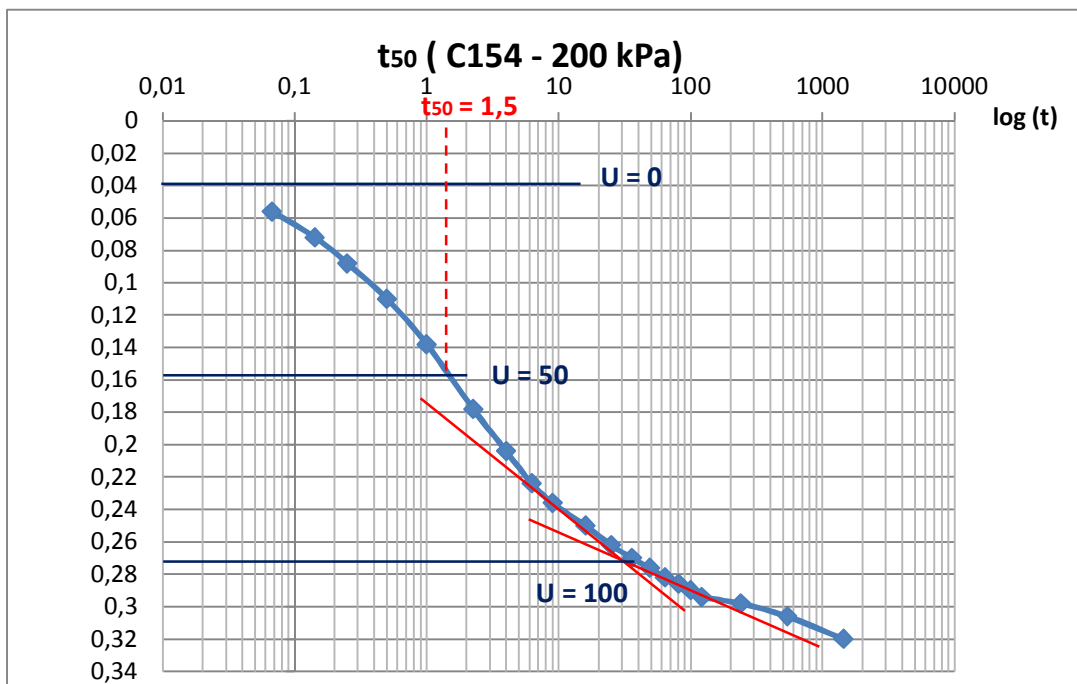
- [14] Schmertmann, J.H. Undisturbed Consolidation Behaviour of Clay. Transaction, ASCE, 1955.
- [15] Janbu, N. The Resistance Concept Applied to Deformations of Soils (With Discussions). Meddelelse 3 Bulletin, Geotechnical Division The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1982.
- [16] Butterfield, R. A Natural Compression Law for Soils (An Advance on $e - \log P'$). Technical Note, Geotechnique, 1979.
- [17] Sridharan, A., Abraham, B.M., Jose, B.T. Improved Technique for Estimation of Preconsolidation Pressure. Geotechnique, 1991.
- [18] Tavenas, F., Des Rosiers, J.P., Leroueil, S., La Rochelle, P., Roy, M. The Use of Strain Energy As a Yield and Creep Criterion for Lightly Overconsolidated Clays. Geotechnique, 1979.
- [19] Tavenas, F., Leroueil, S., La Rochelle, P., Roy, M. Creep Behaviour of an Undisturbed Lightly Overconsolidated Clay. Canadian Geotechnical Journal, 1978.
- [20] Ülker, R. Über die Ermittlung der Vorbelastung des sandigen Berliner Geschiebemergels. Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) an der Technischen Universtat, Heft 32, Berlin, 1976.
- [21] Şenol, A., Sağlamer, A. Düşük Plastisiteli Bir Kilde Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem. İMO Teknik Dergi, 2555-2572, Yazı 172, 2002.
- [22] Başkan, T. Adapazarı Killerinin Konsolidasyon Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [23] Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A., Sert, S. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) Sönümlene Yönteminin Uygulanması. Tübitak Mag (Proje No: 104M387), 2007.
- [24] Önalp, A., Arel, E. Geotechnical Properties of Adapazarı Silt. Bull. Eng. Geol. Environ., 71:709-720, Berlin Heidelberg, 2012.
- [25] Özocak, A., Altundağ, Y. Farklı Kil Oranına Sahip Siltli Zeminlerde Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesi. 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 3-5 Nov., 2016.
- [26] TS 1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması. Ankara, 2000.
- [27] TS 1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1 Fiziksel Özelliklerinin Tayini. Ankara, 2006.

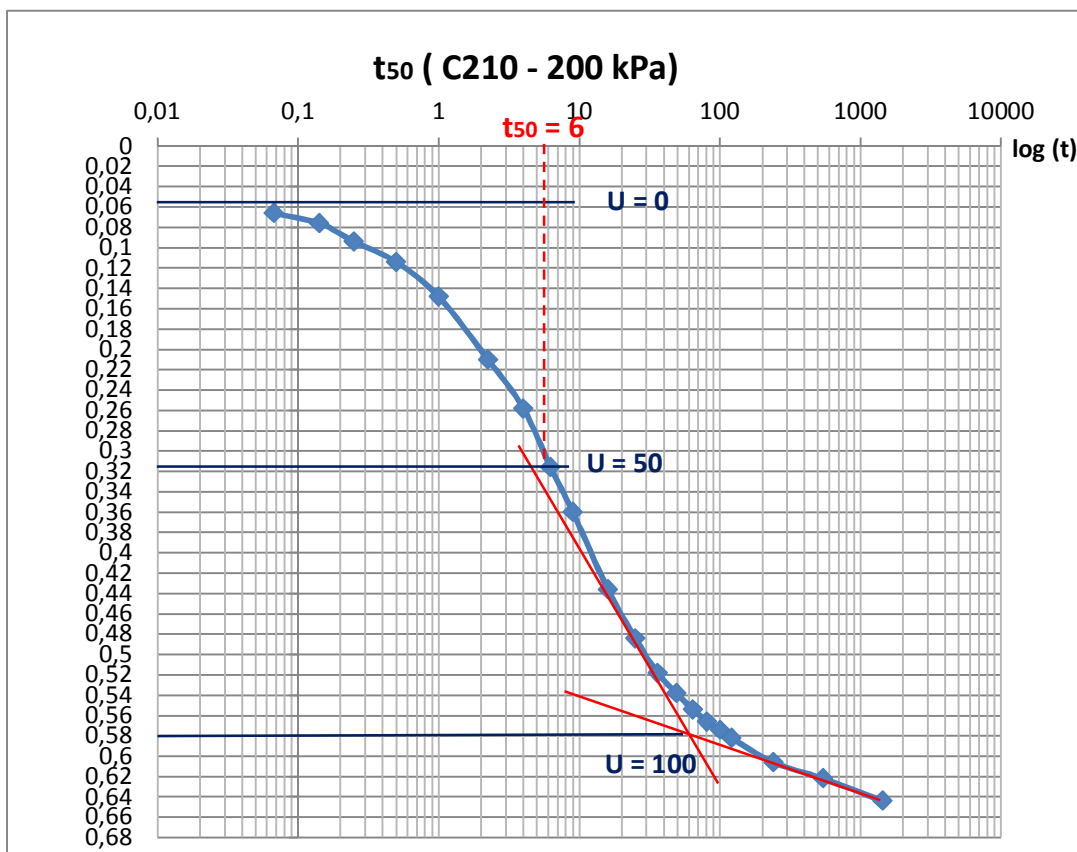
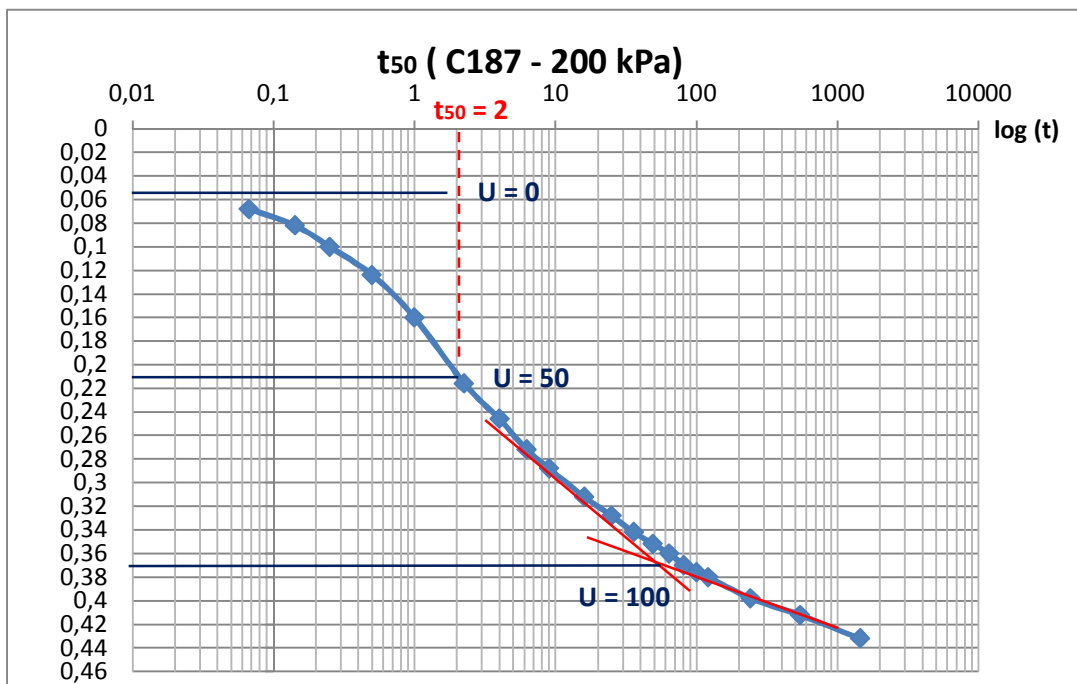
EKLER

EK 1: Casagrande logaritmik yöntemine göre numunelerin t_{50} değerlerinin bulunması

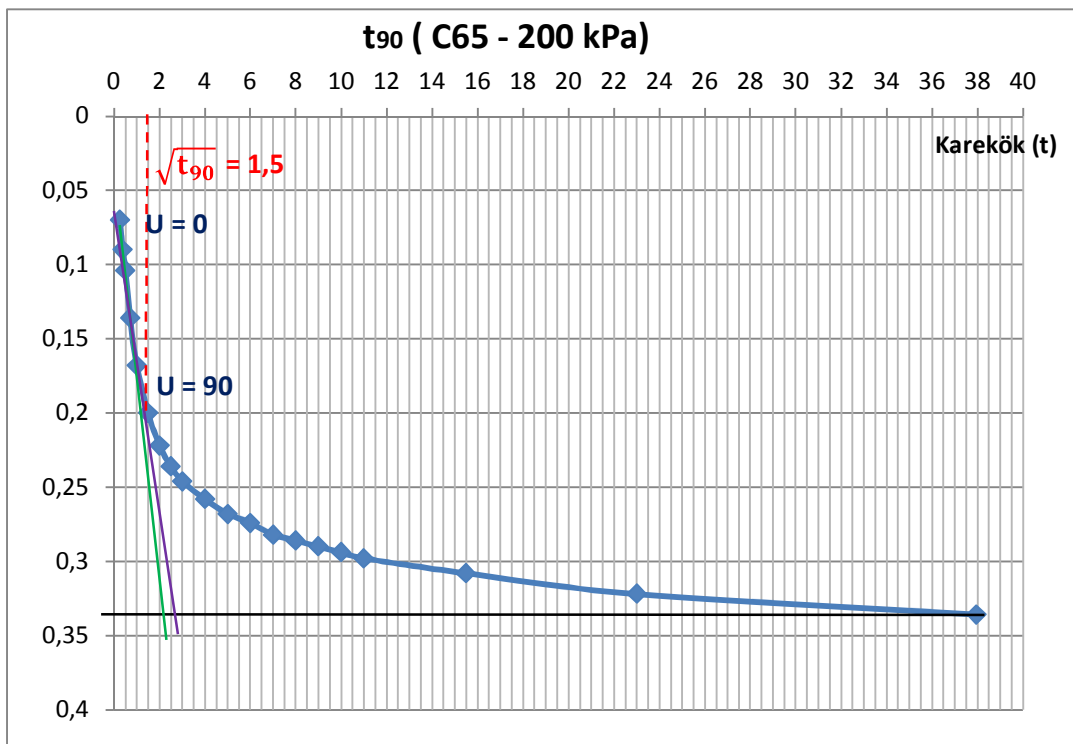
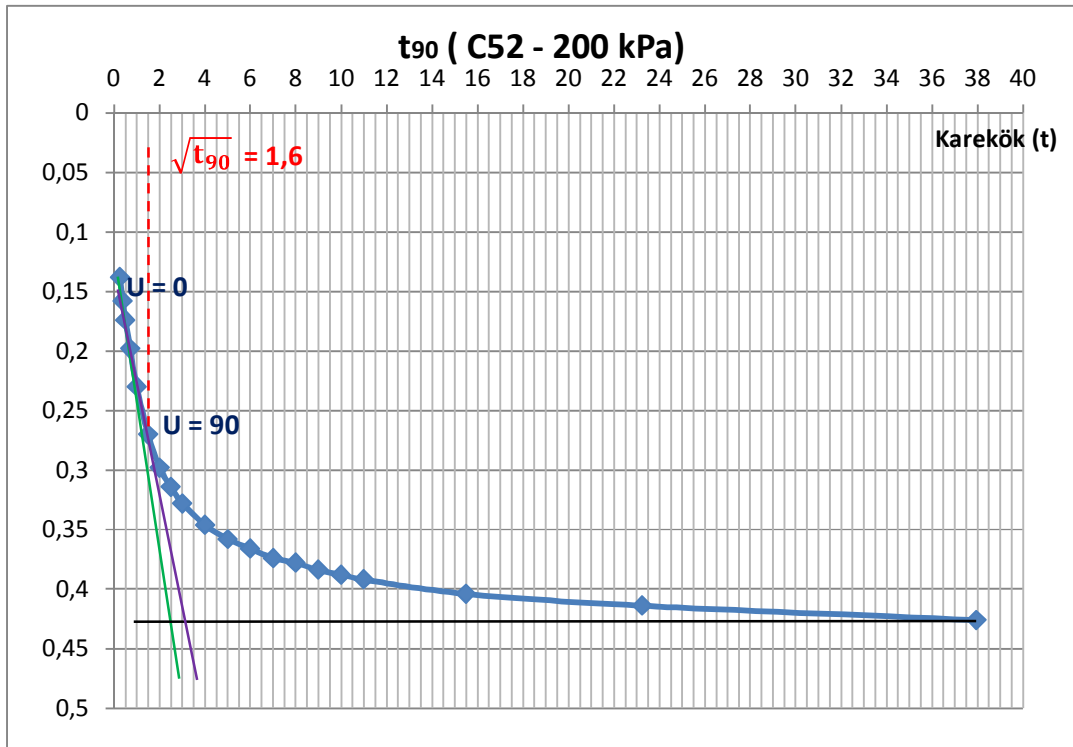


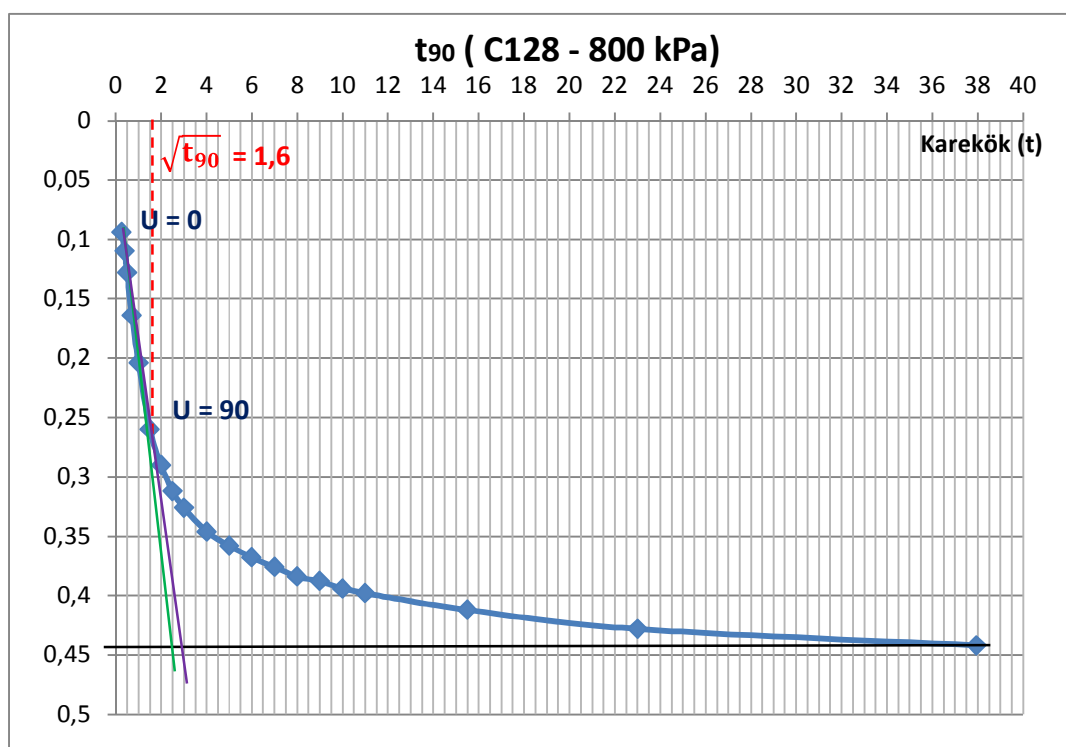
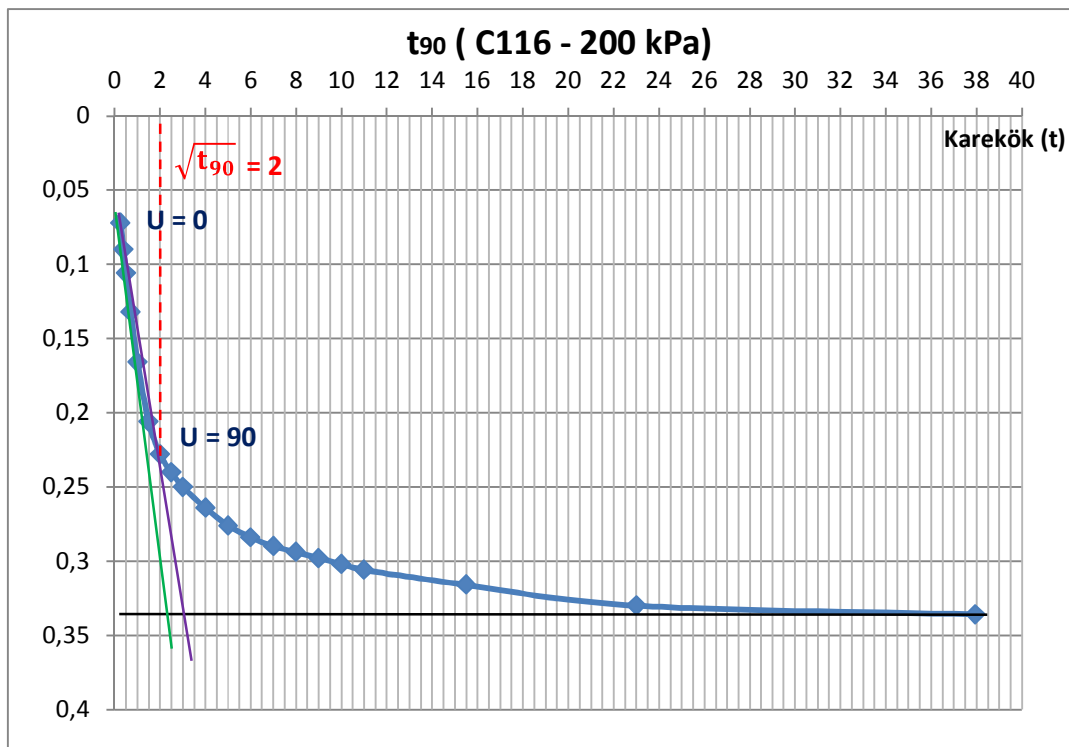


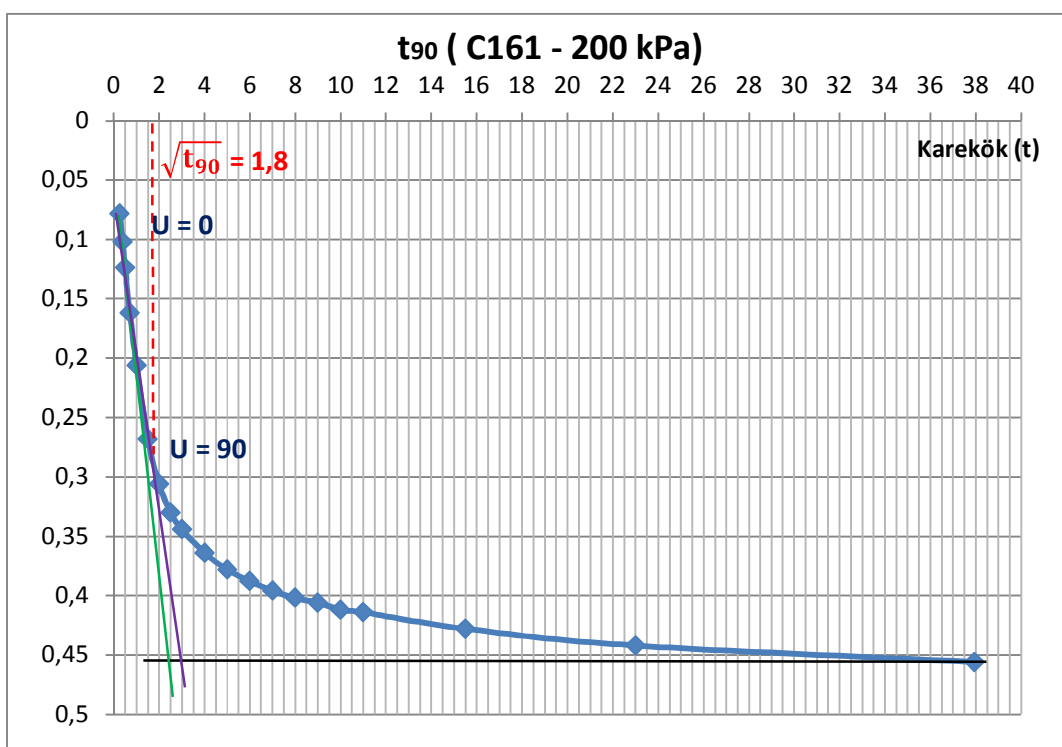
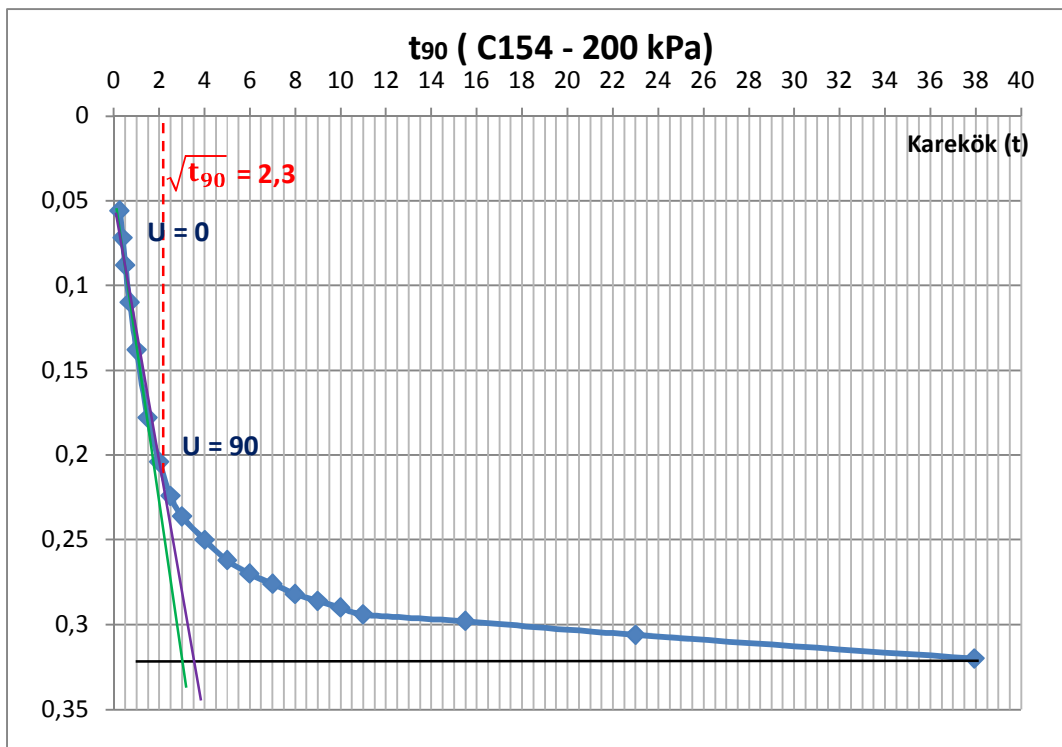


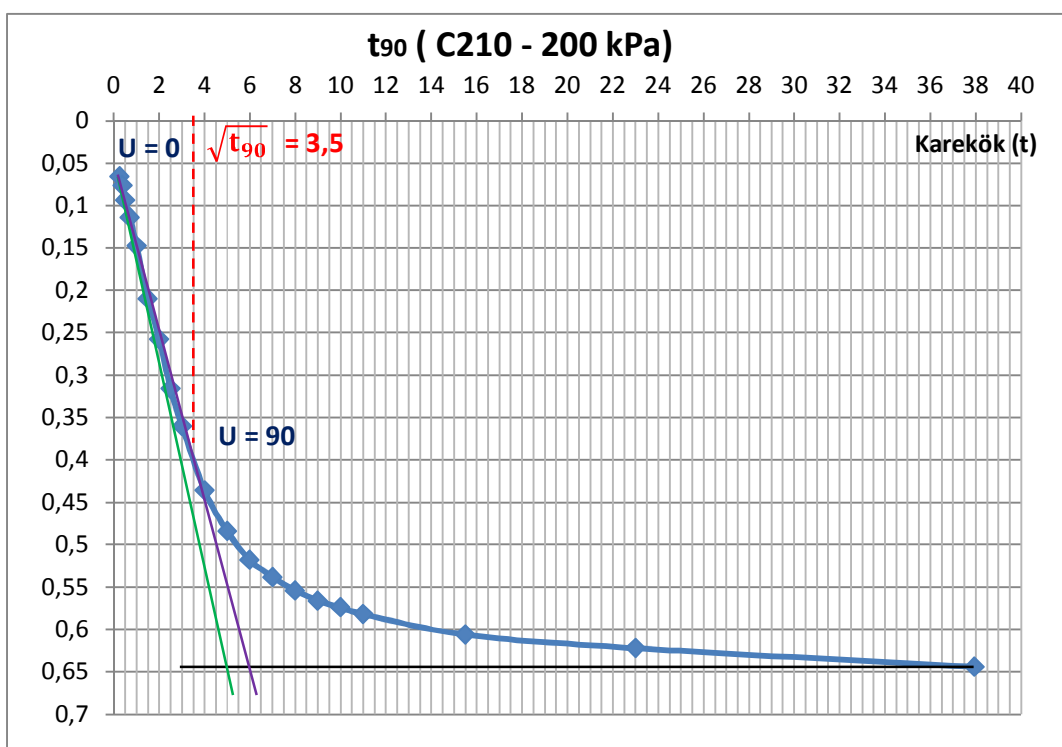
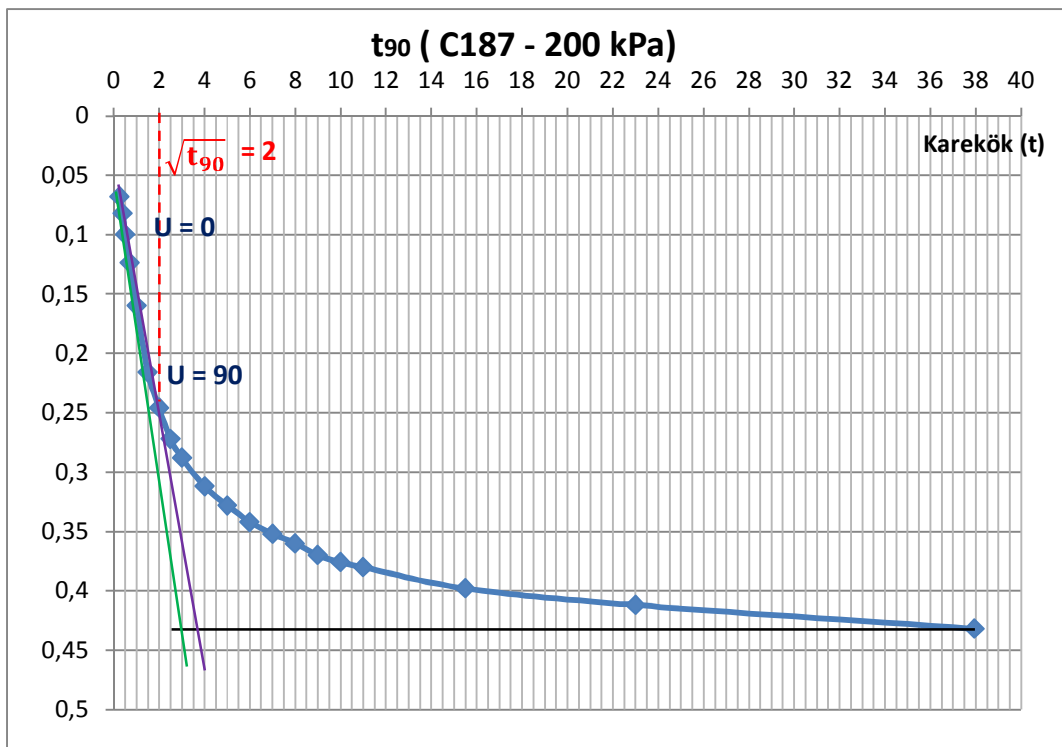


EK 2: Taylor karekök yöntemine göre numunelerin t_{90} değerlerinin bulunması



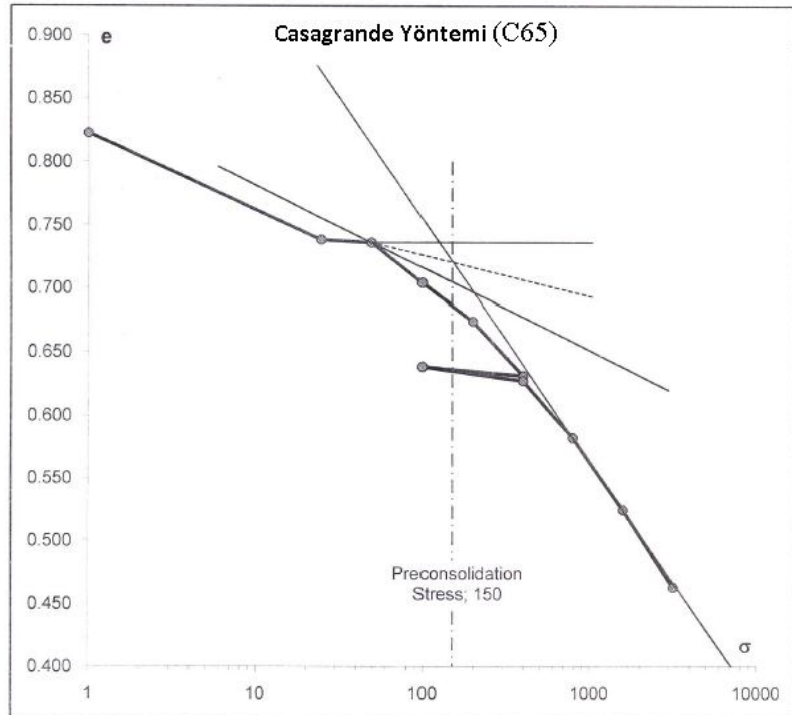
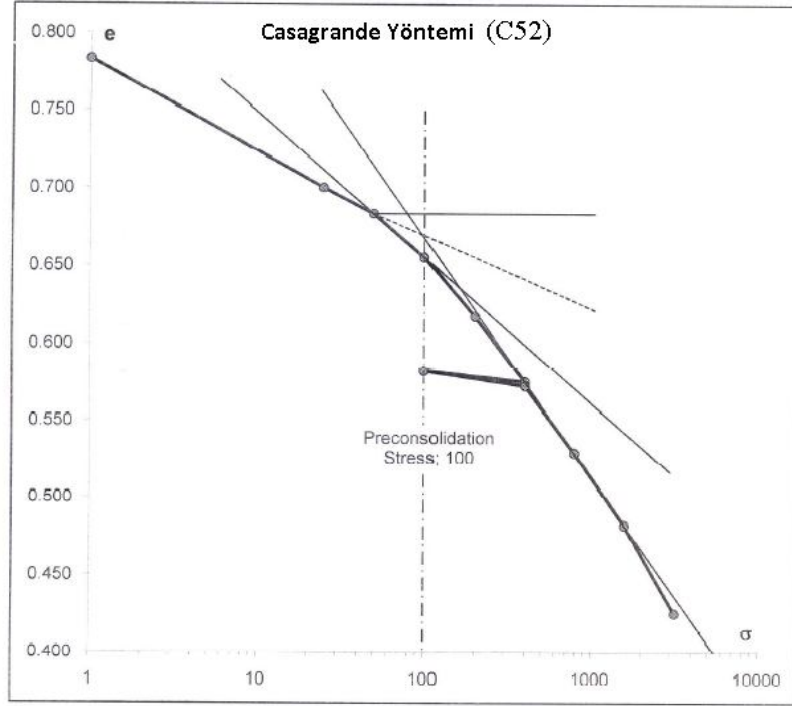


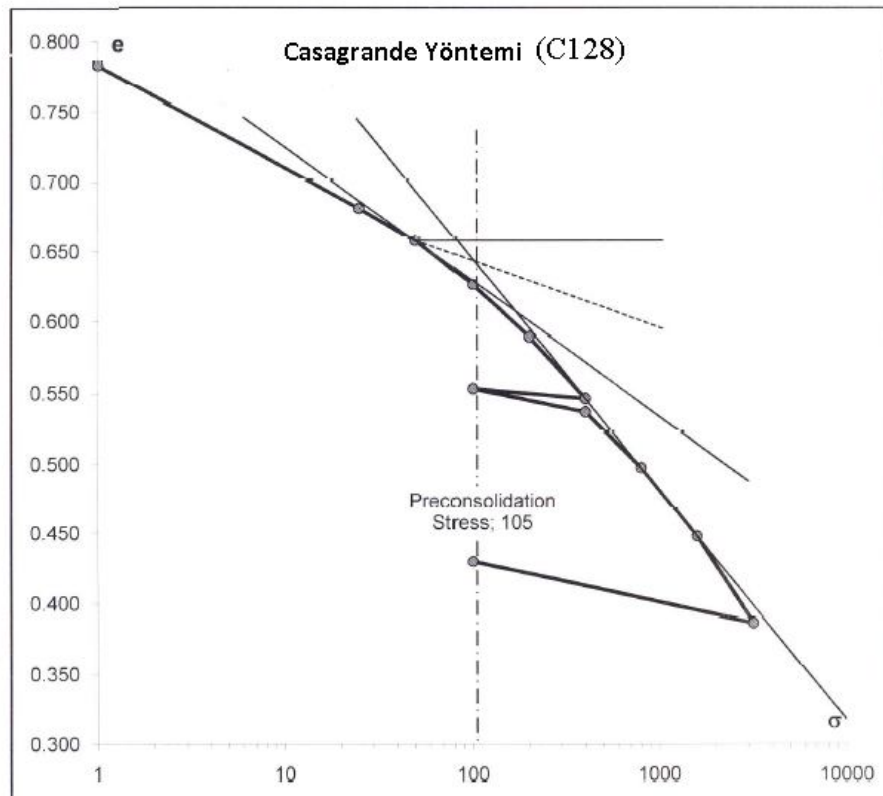
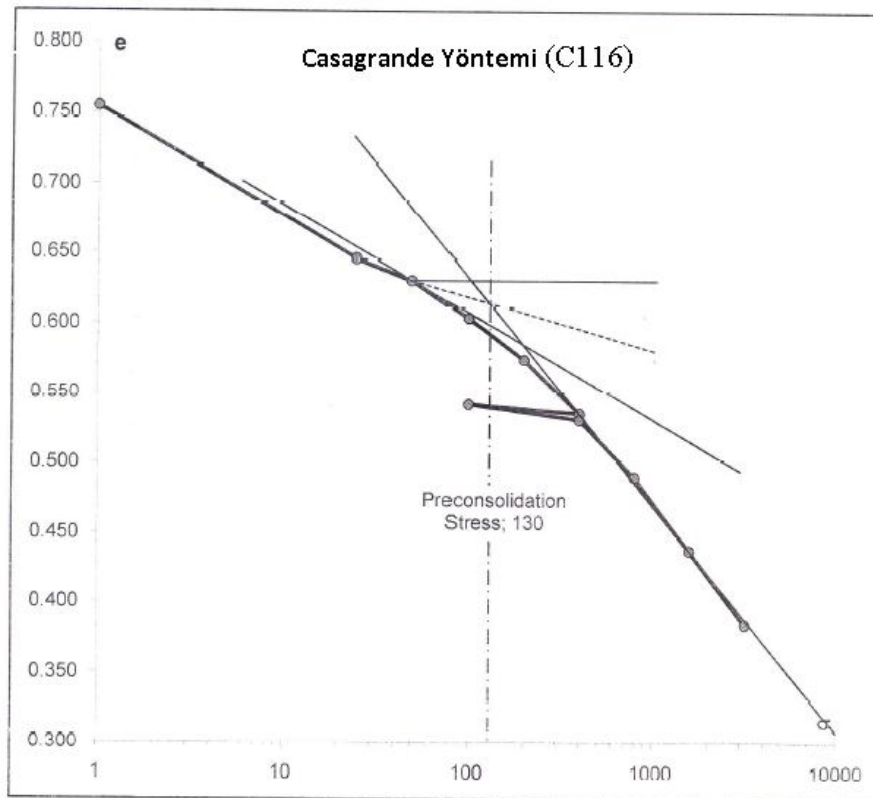


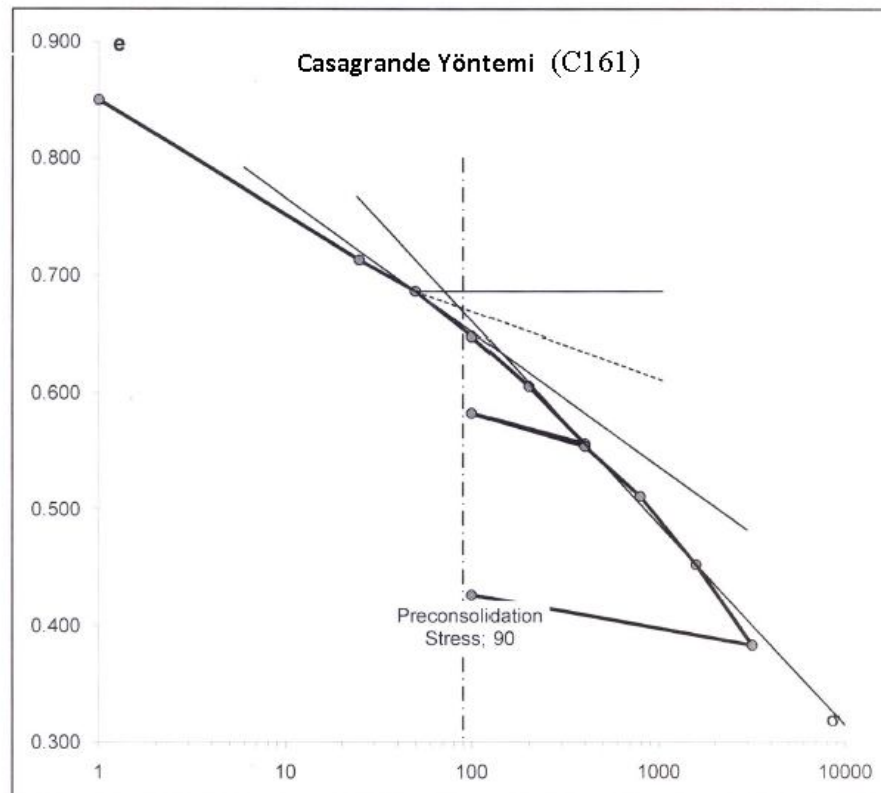
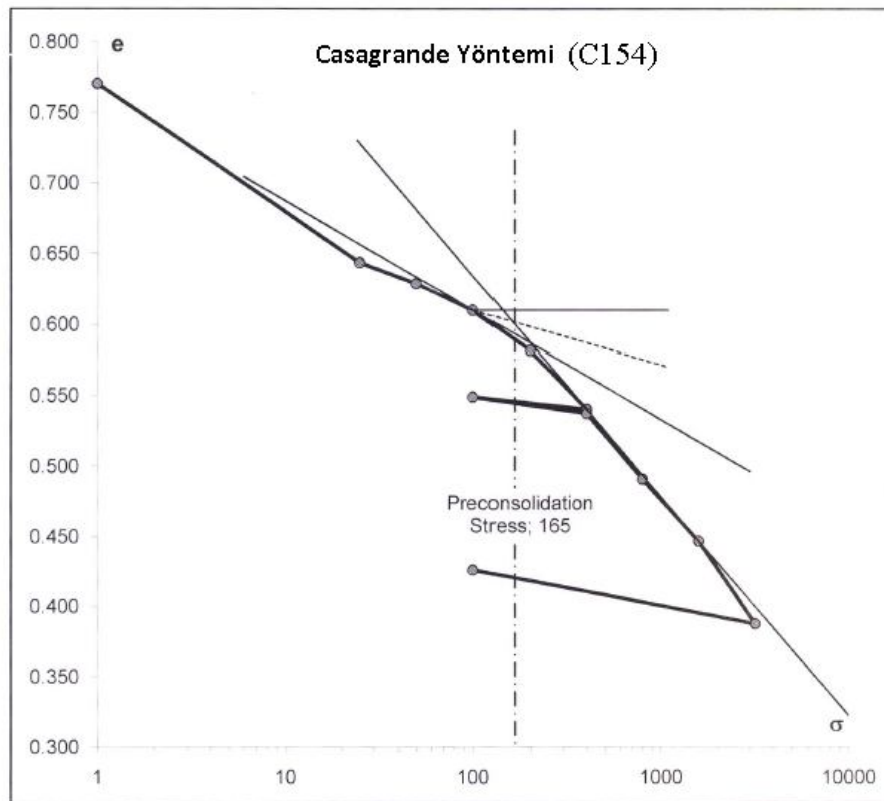


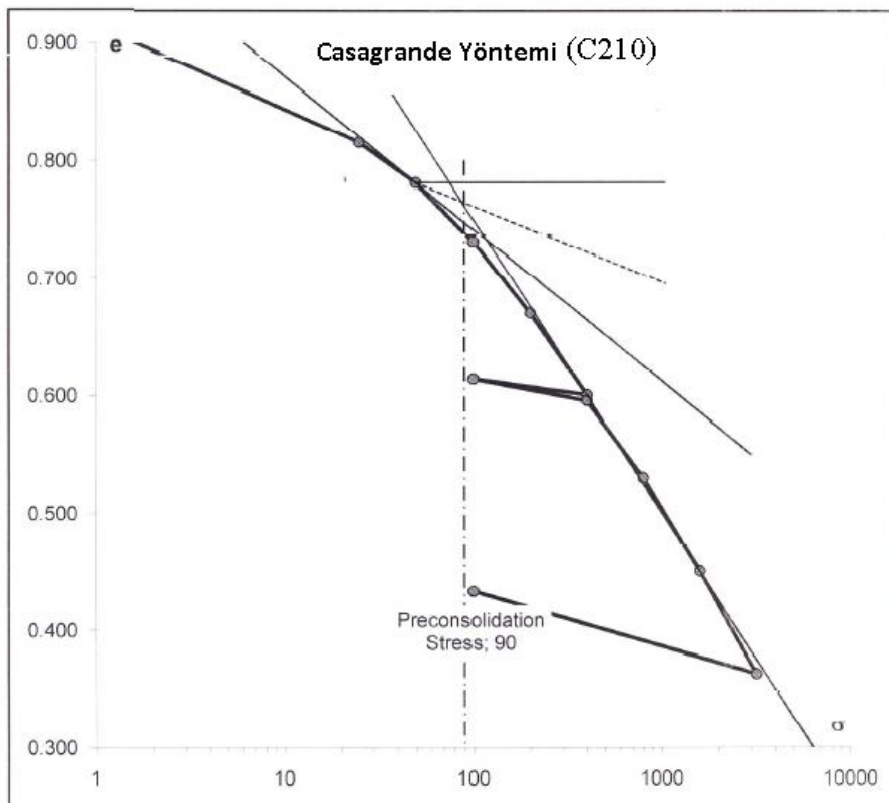
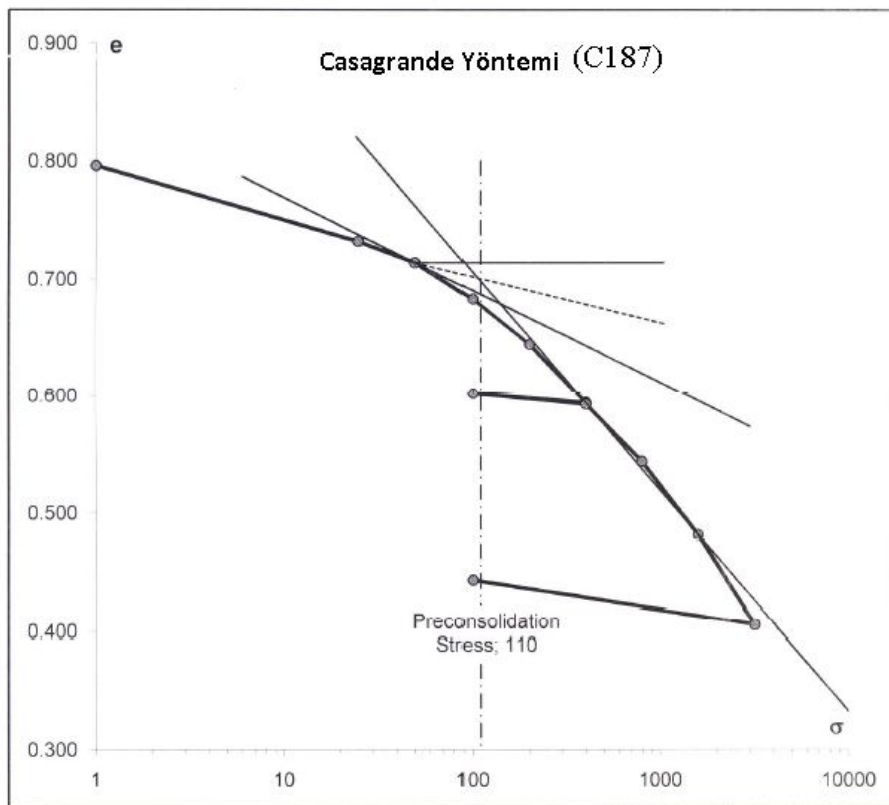
EK 3: 6 farklı yöntem ile ön konsolidasyon basıncı değerlerinin bulunması

1. Casagrande yöntemine göre elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri

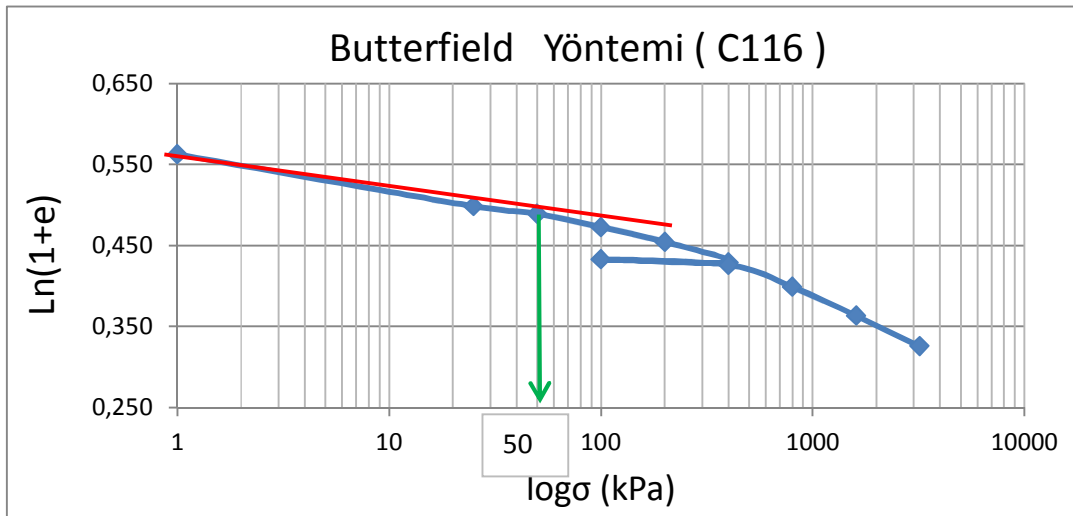
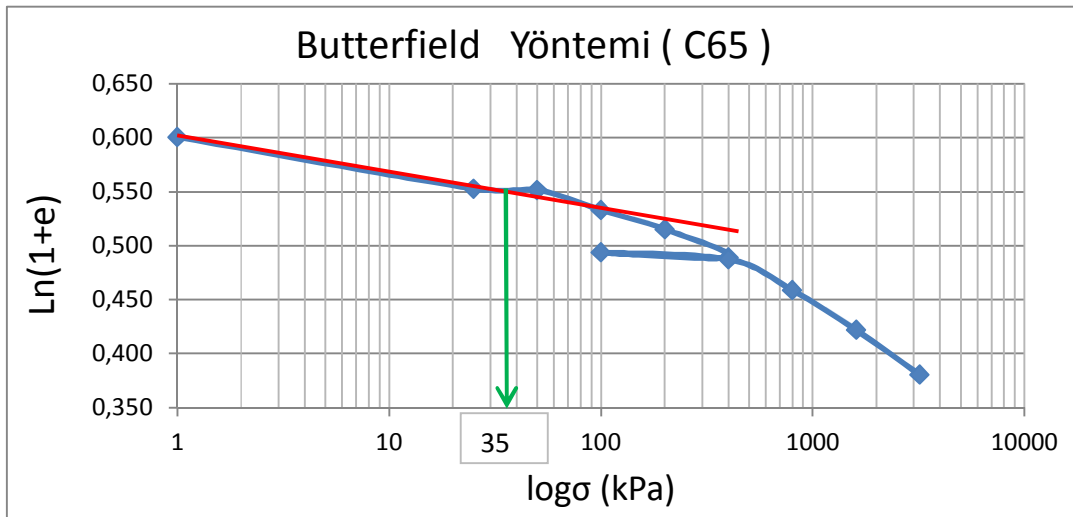
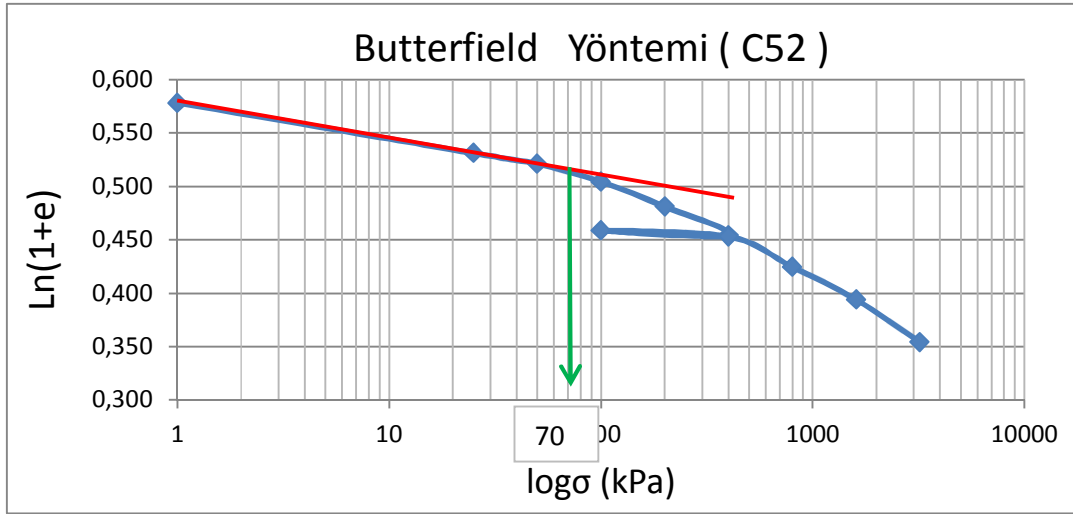


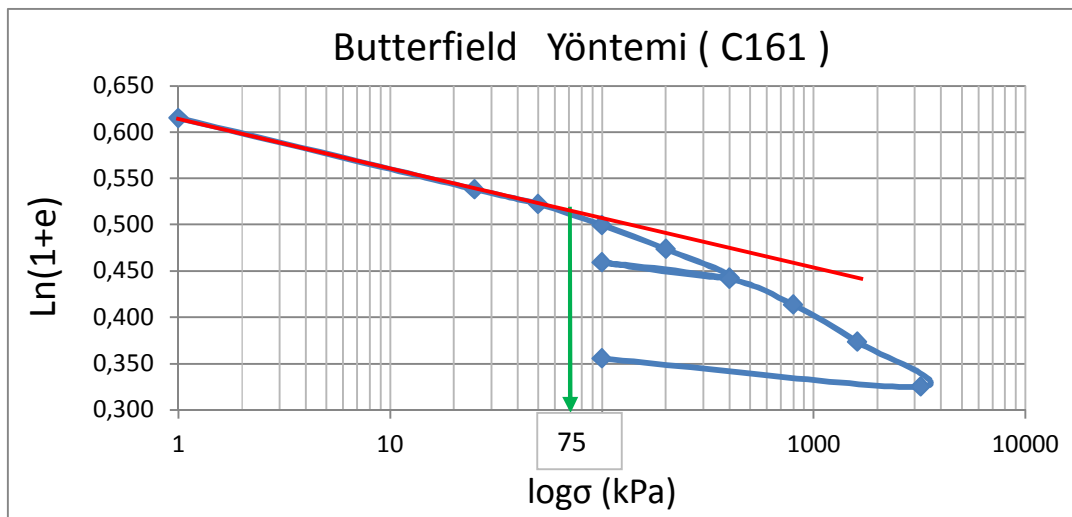
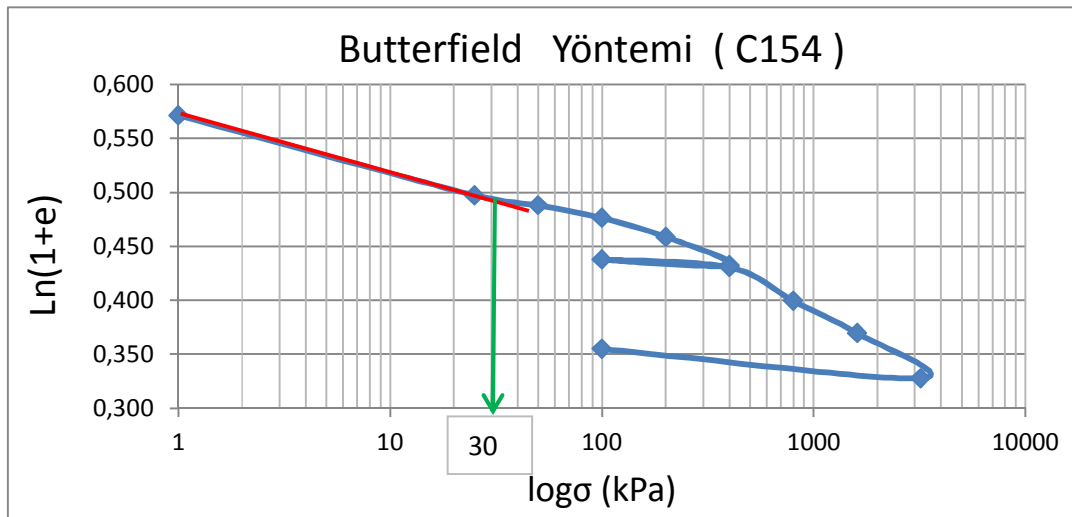
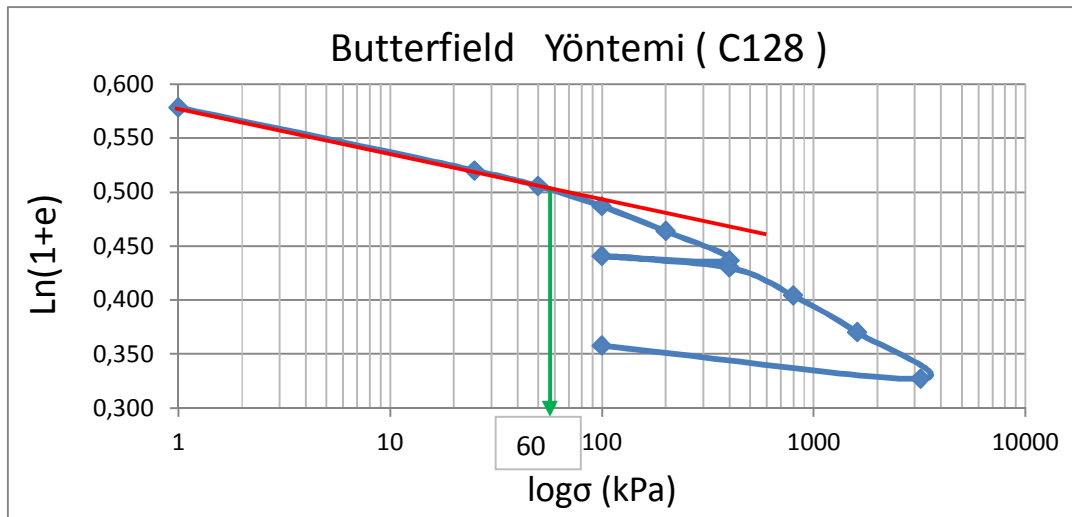


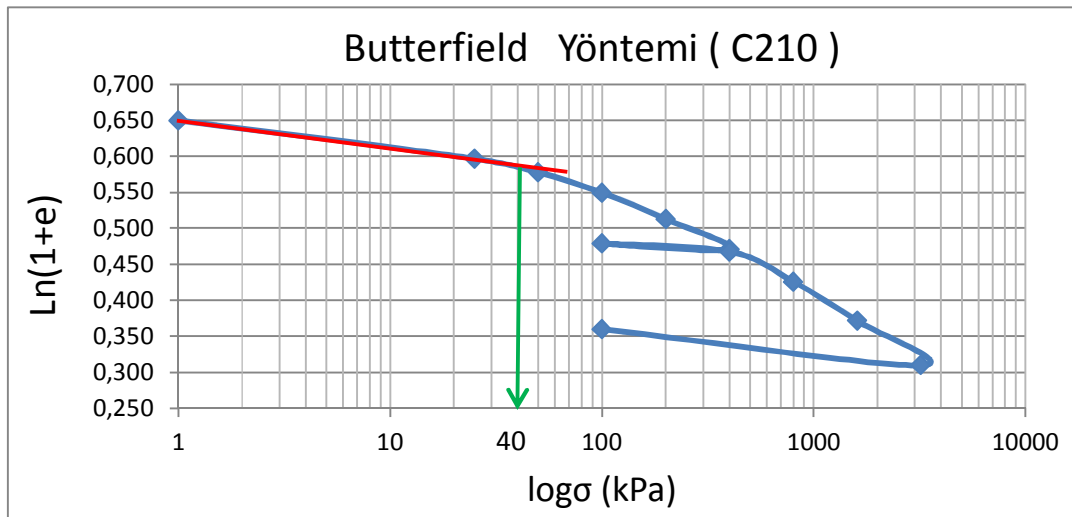
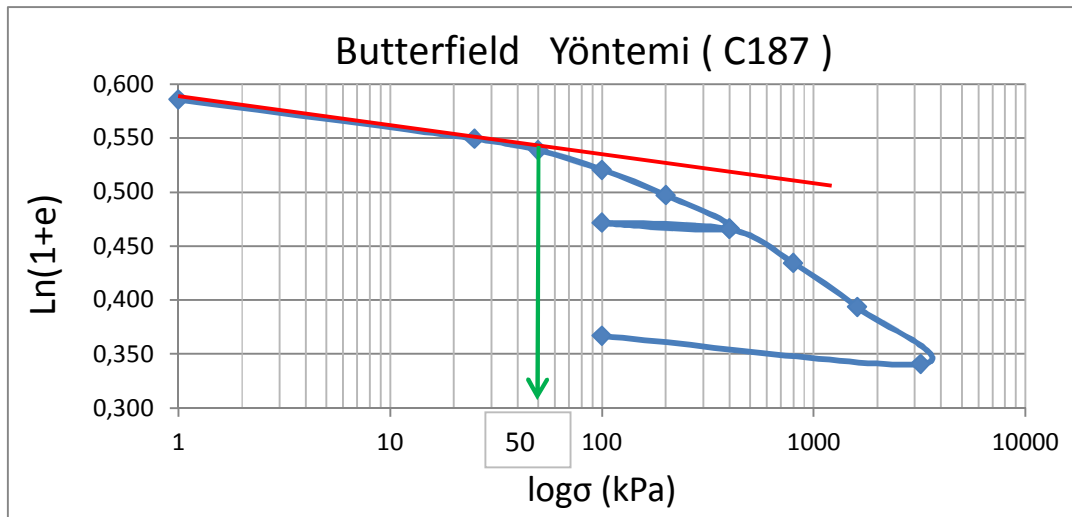




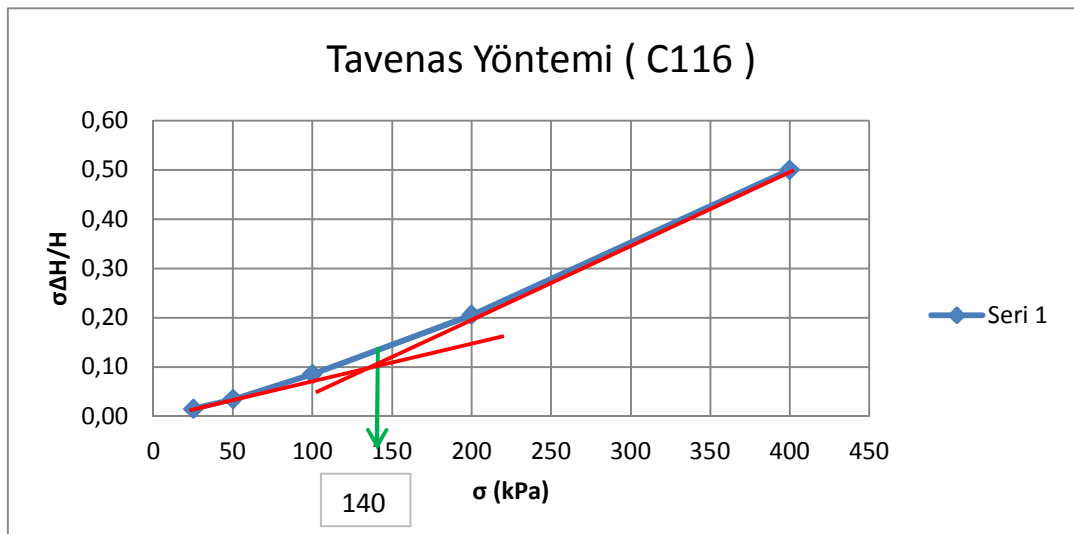
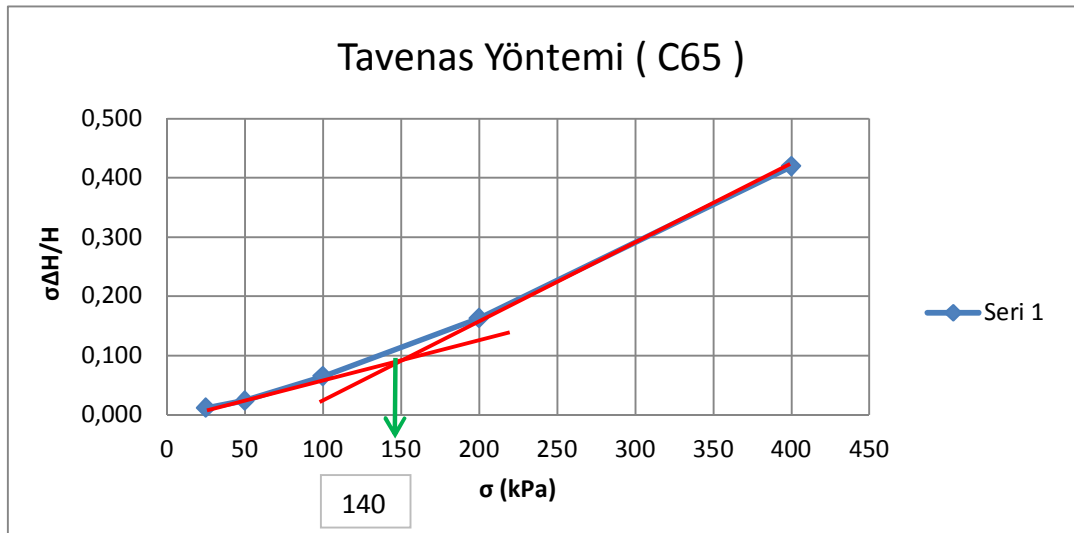
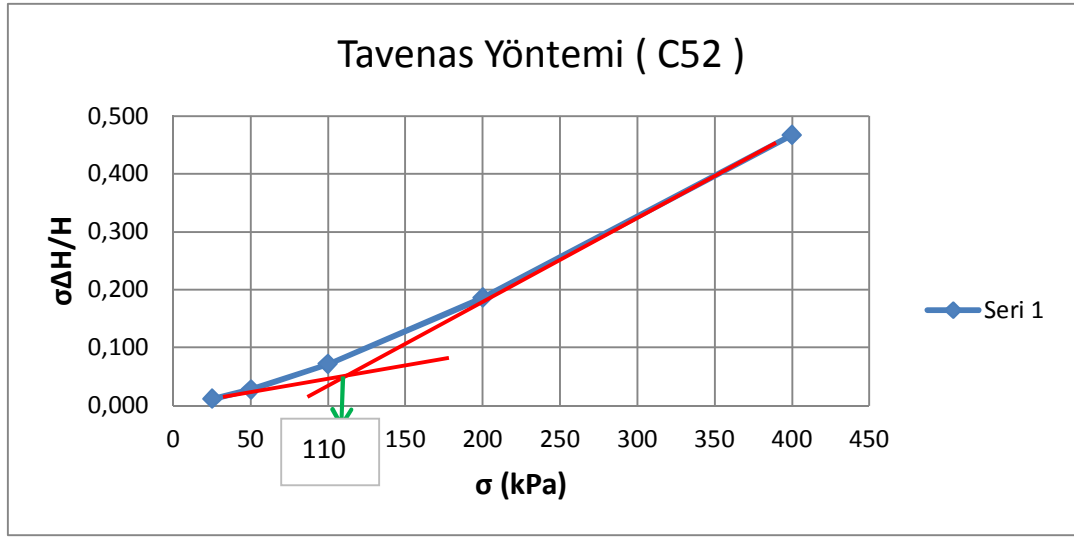
2. Butterfield yöntemine göre elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri

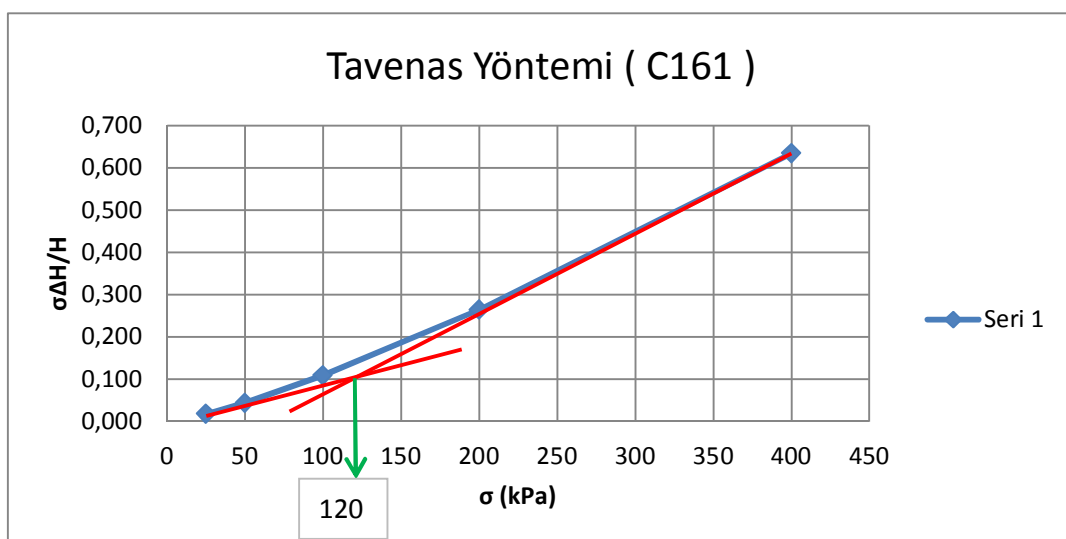
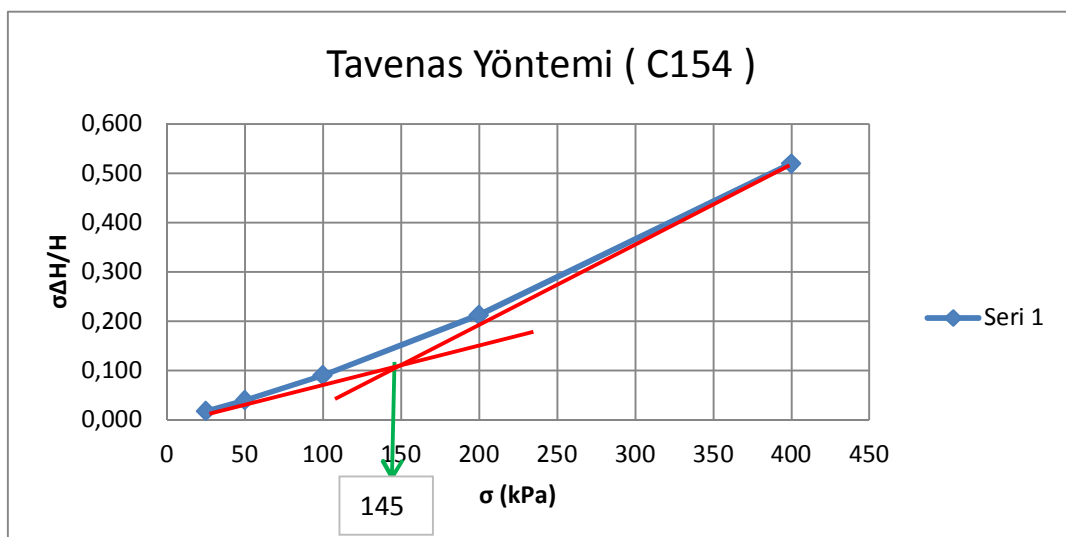
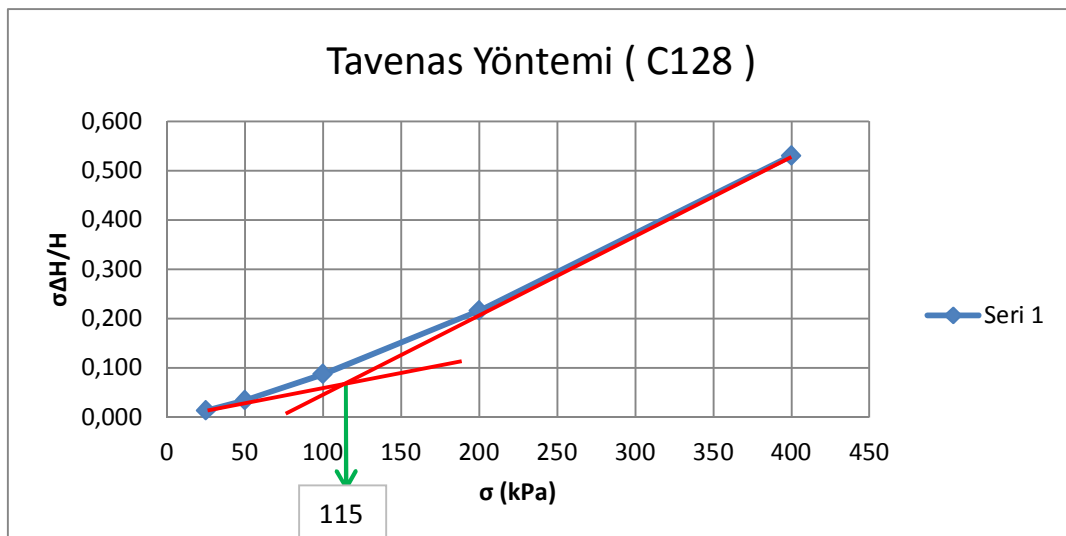


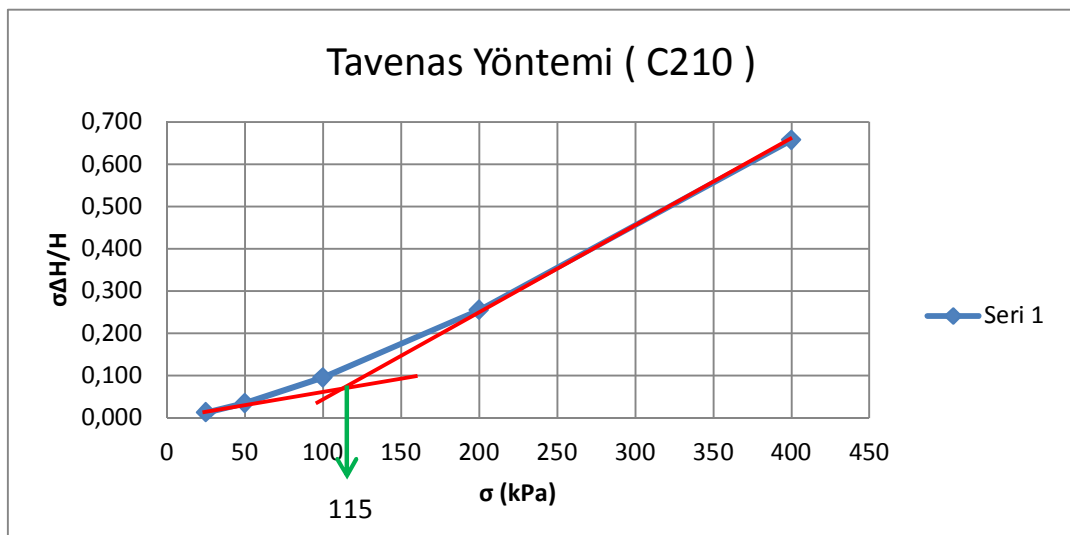
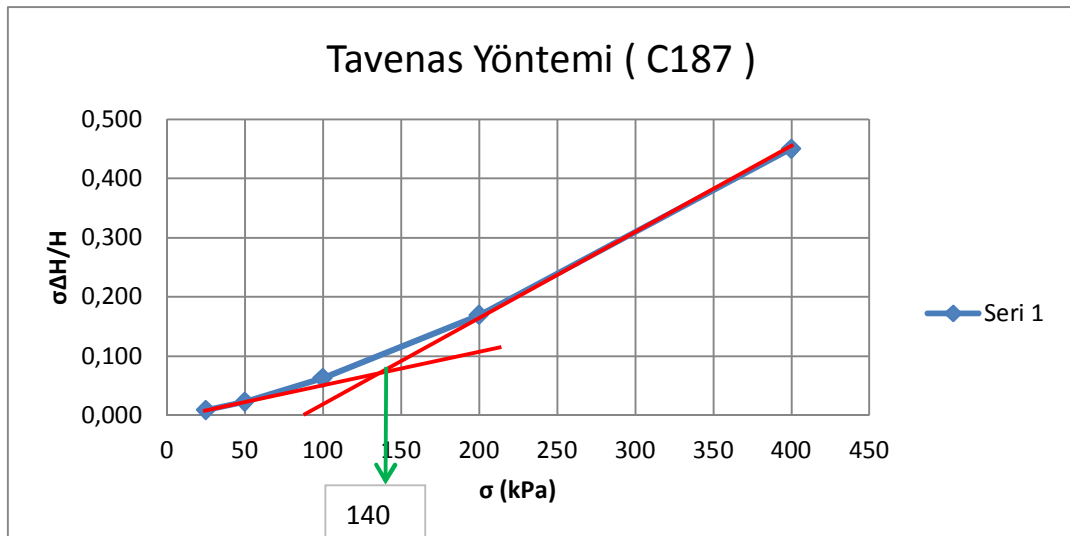




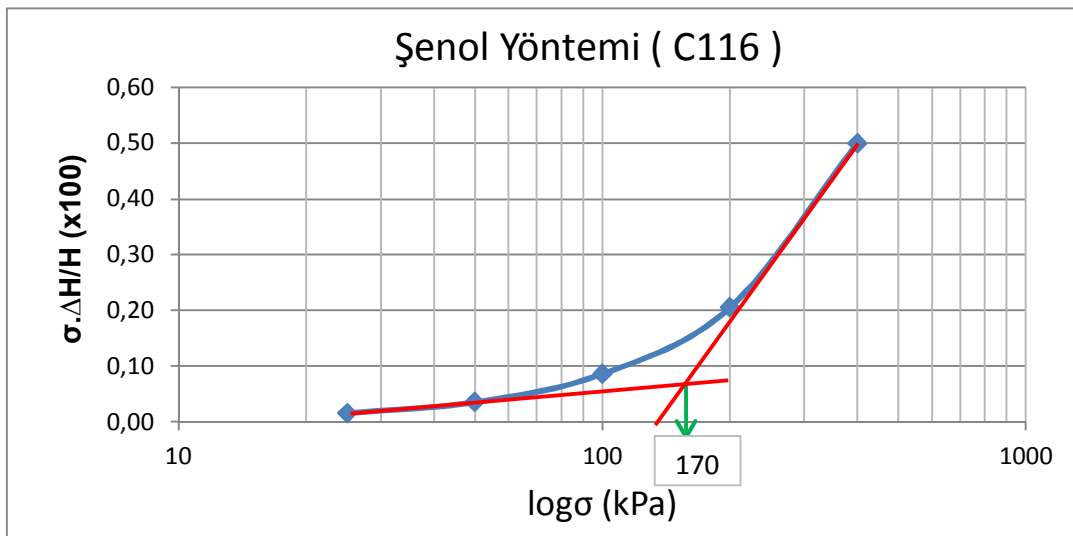
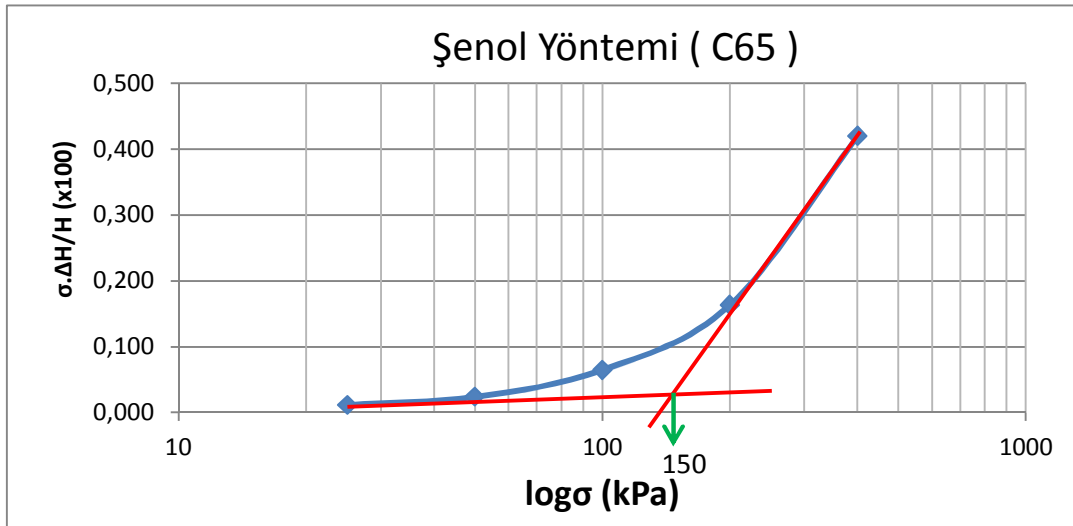
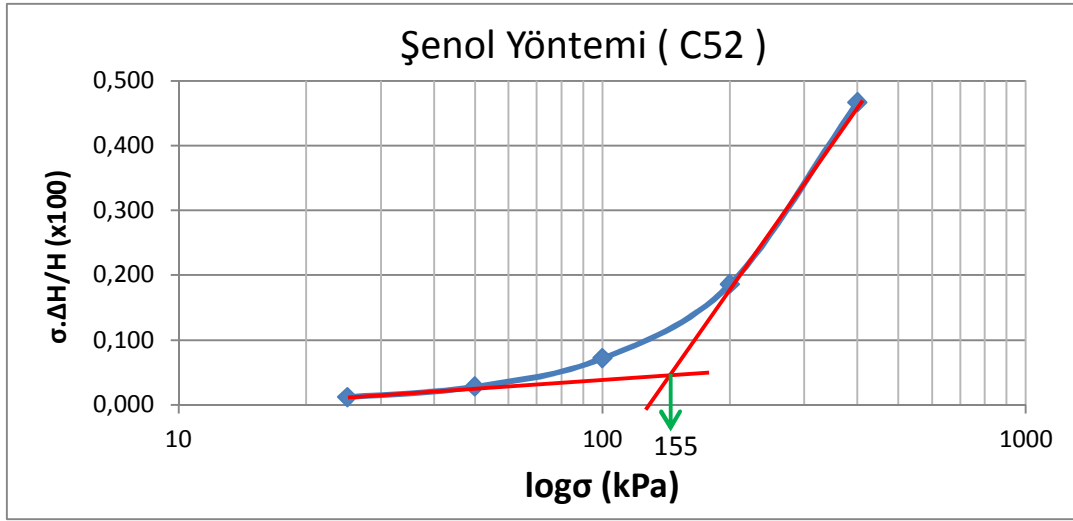
3. Tavenas yöntemine göre elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri

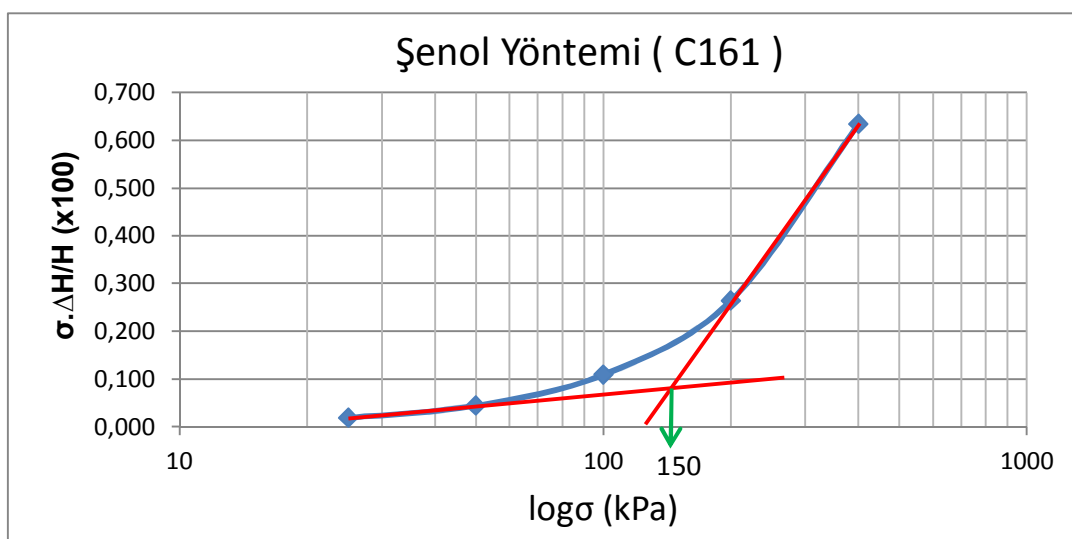
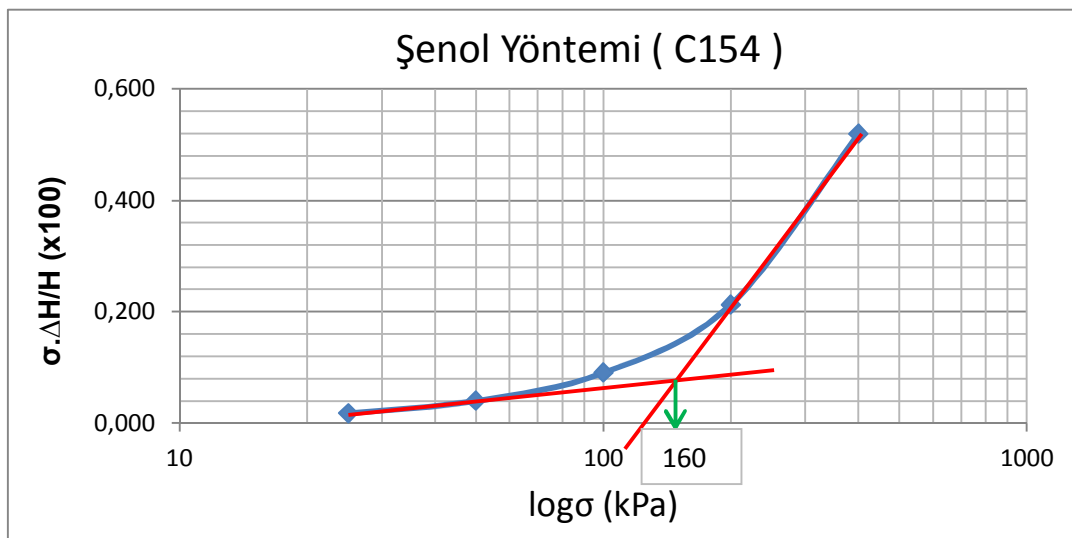
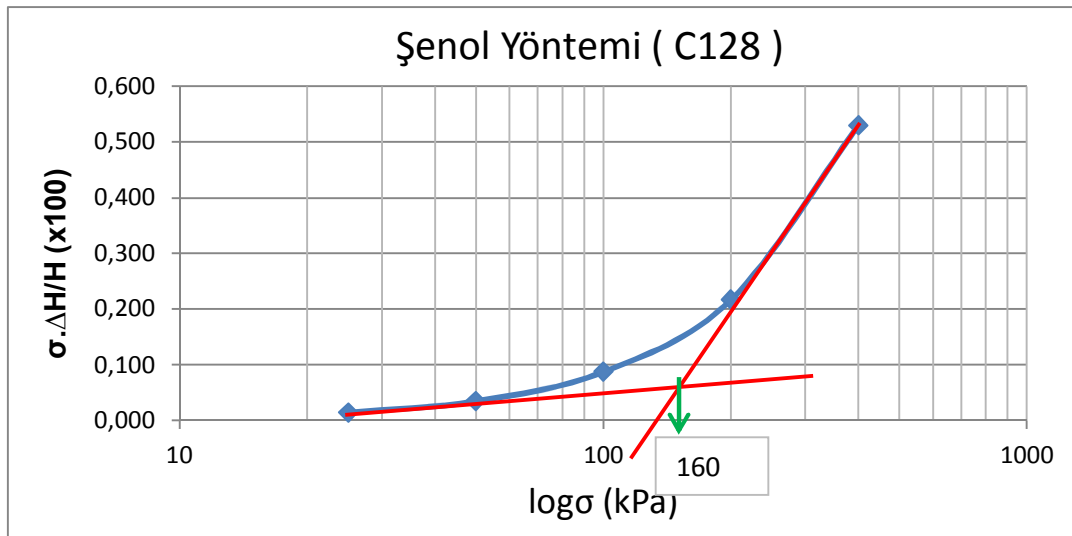


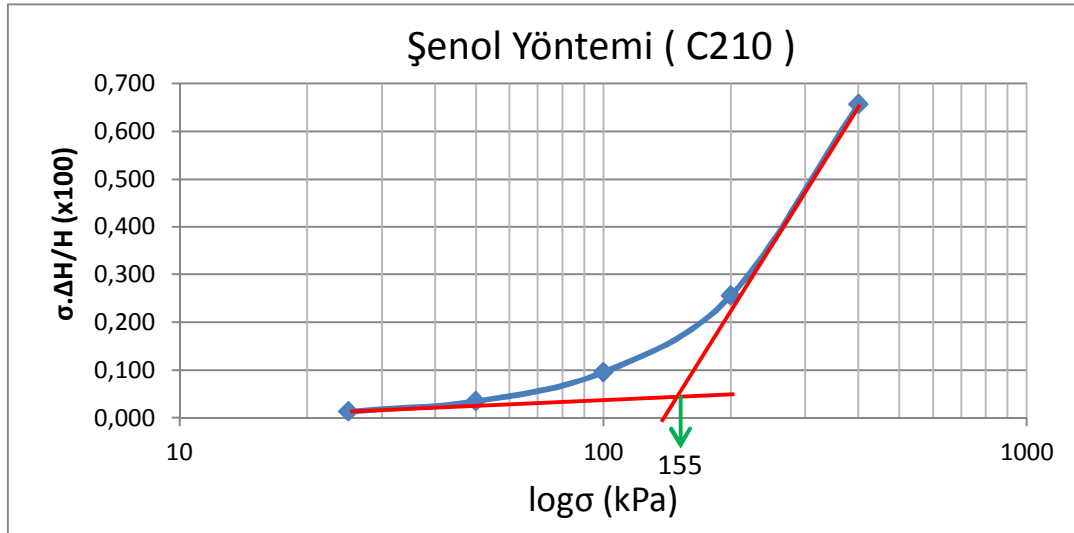
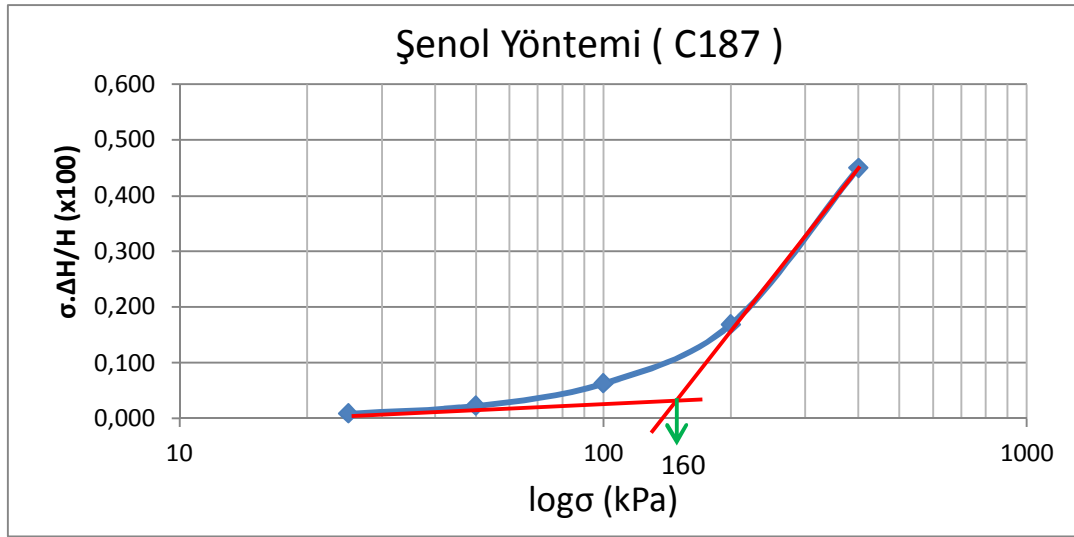




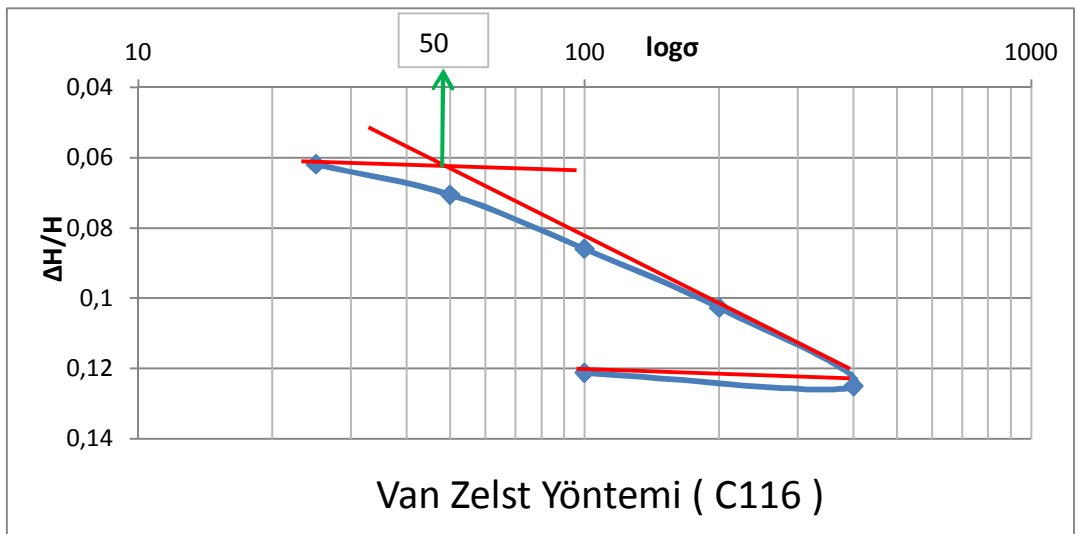
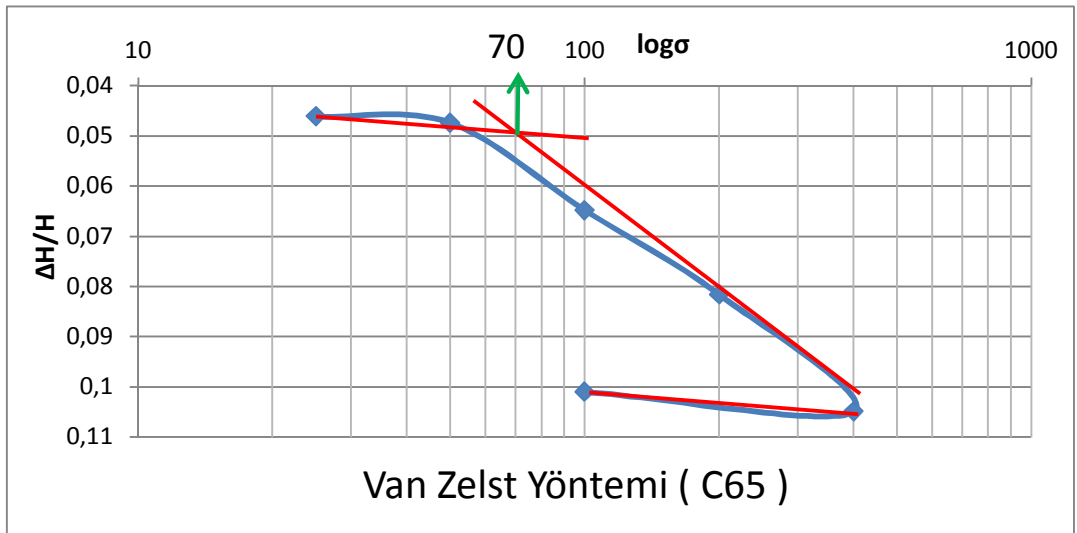
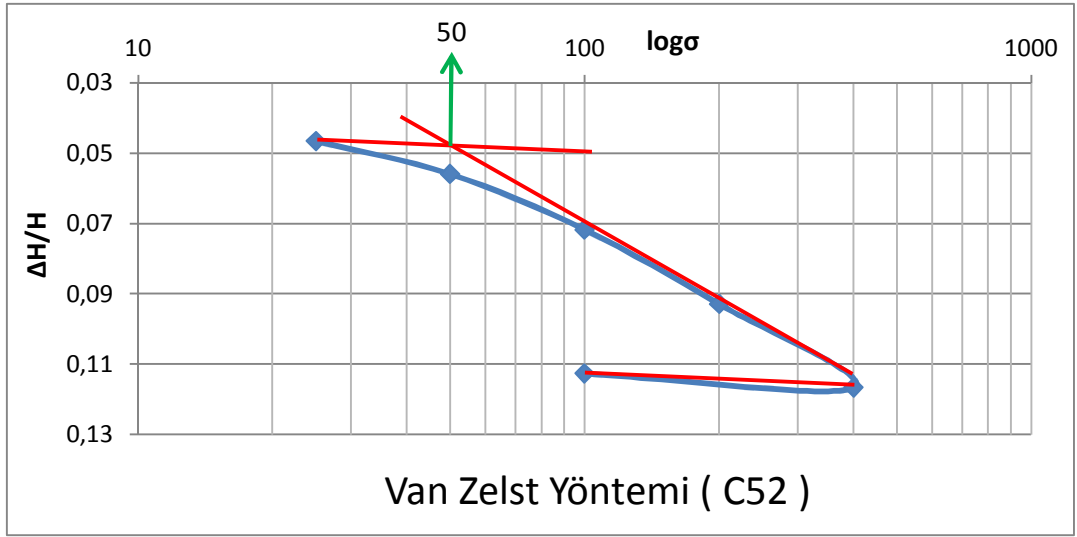
4. Şenol yöntemine göre elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri

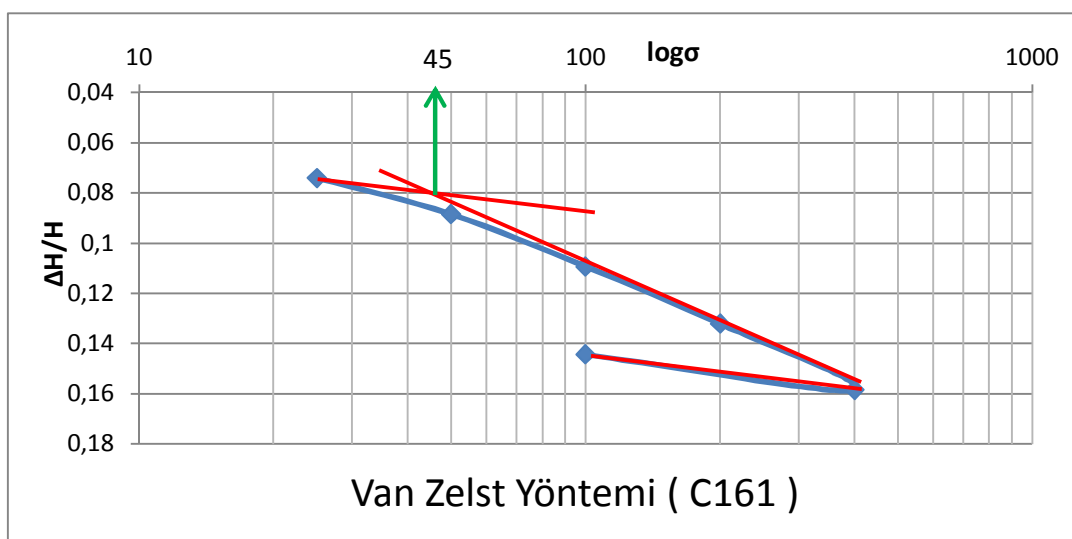
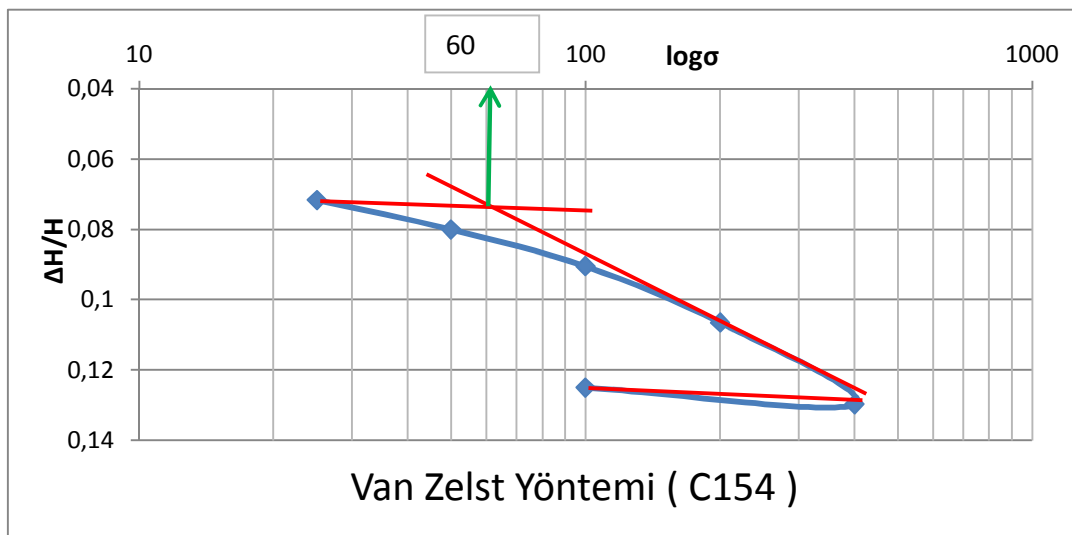
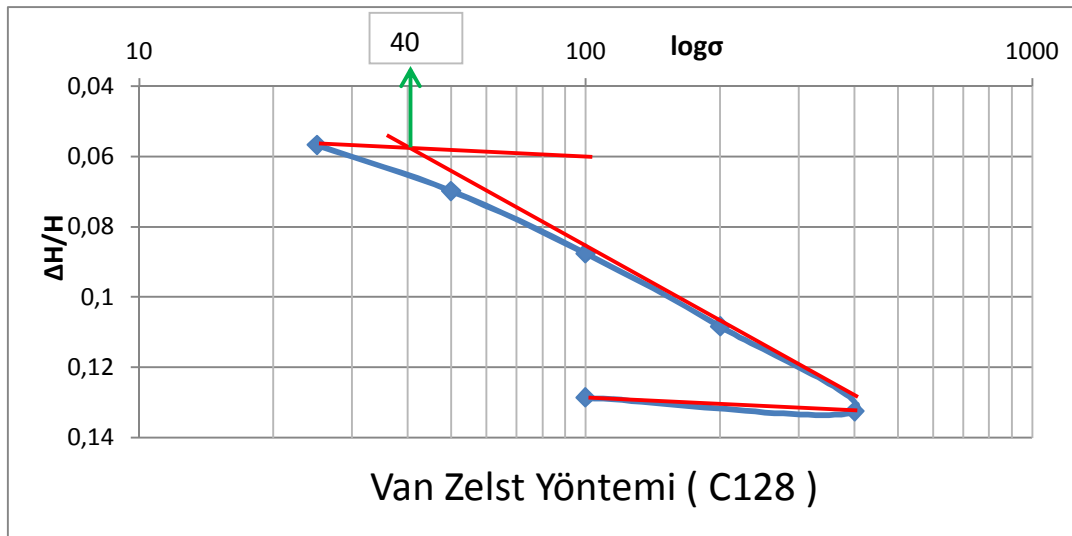


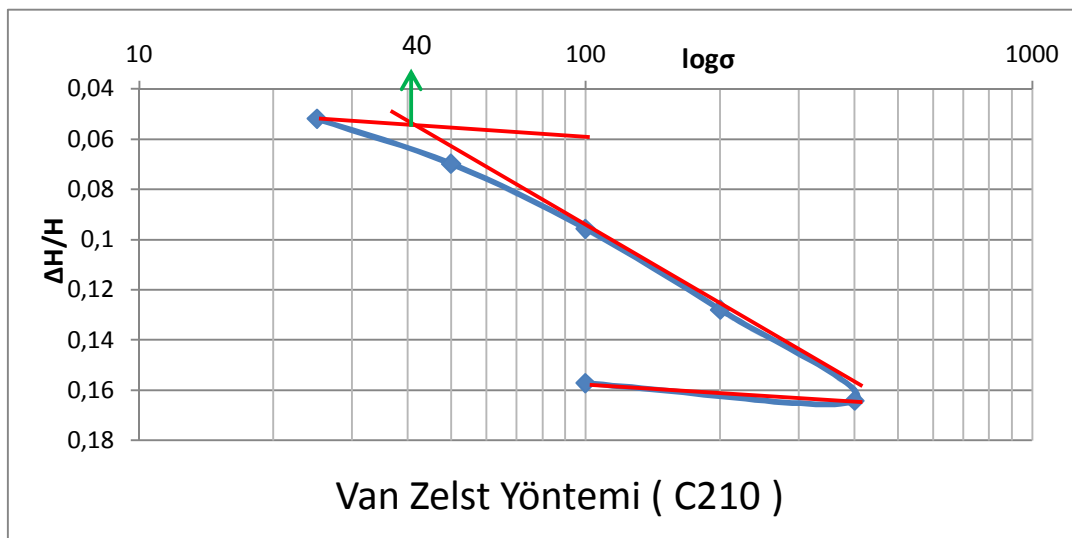
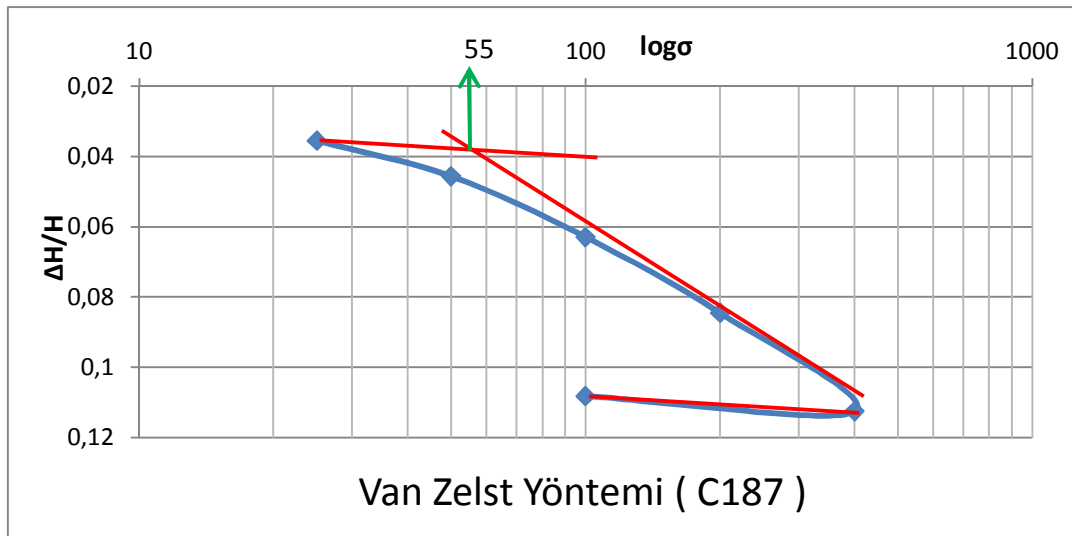




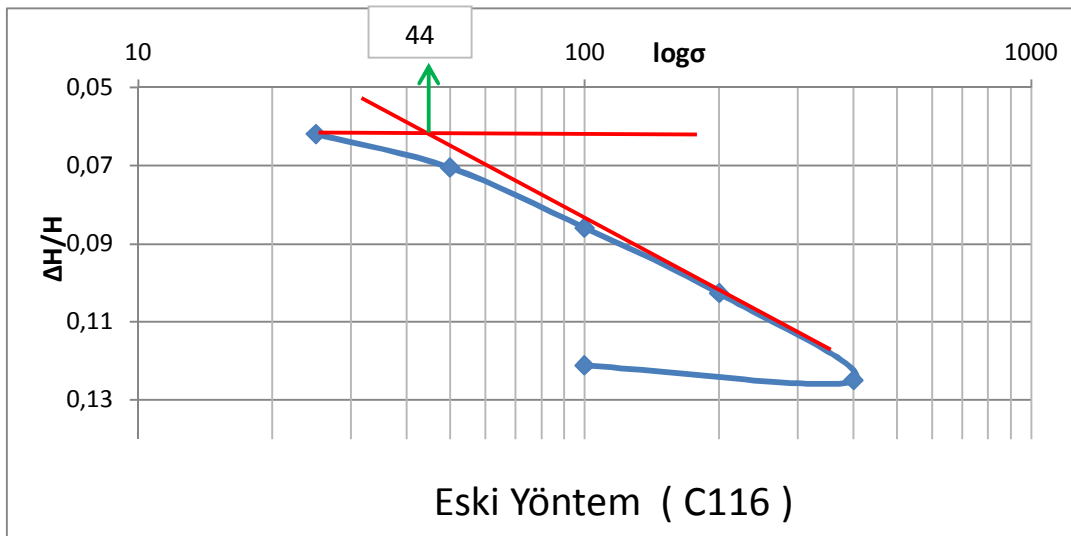
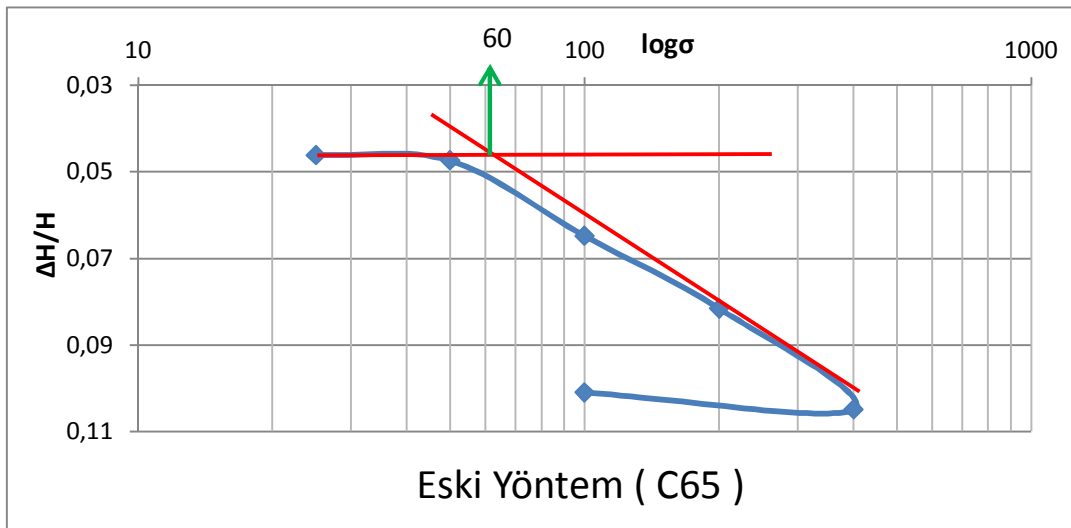
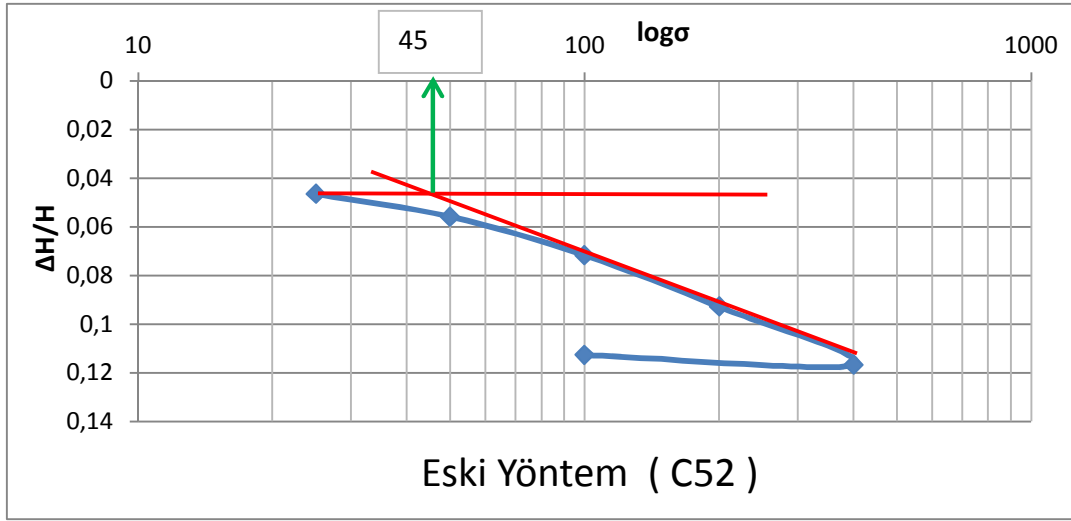
5. Van Zelst yöntemine göre elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri

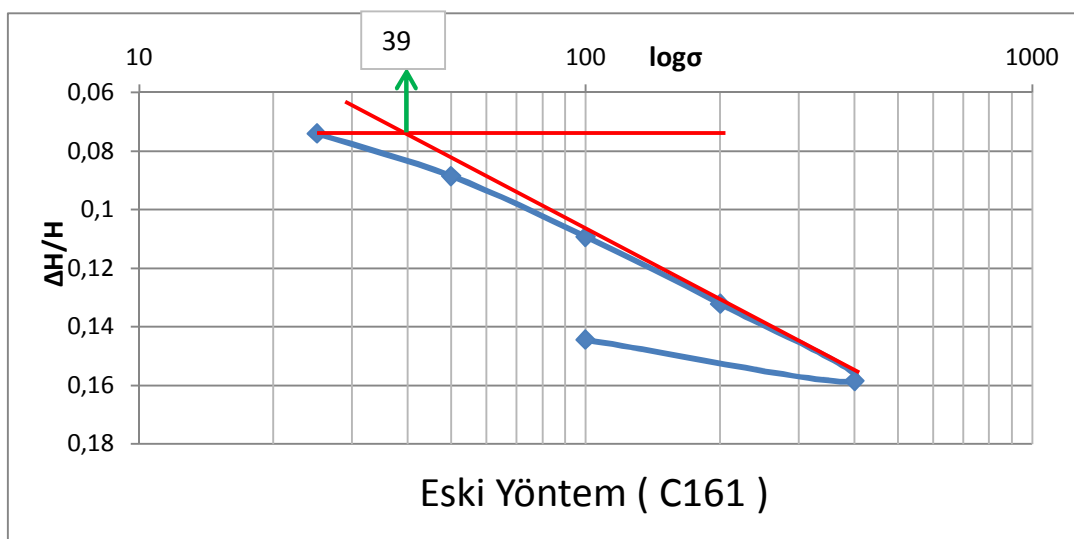
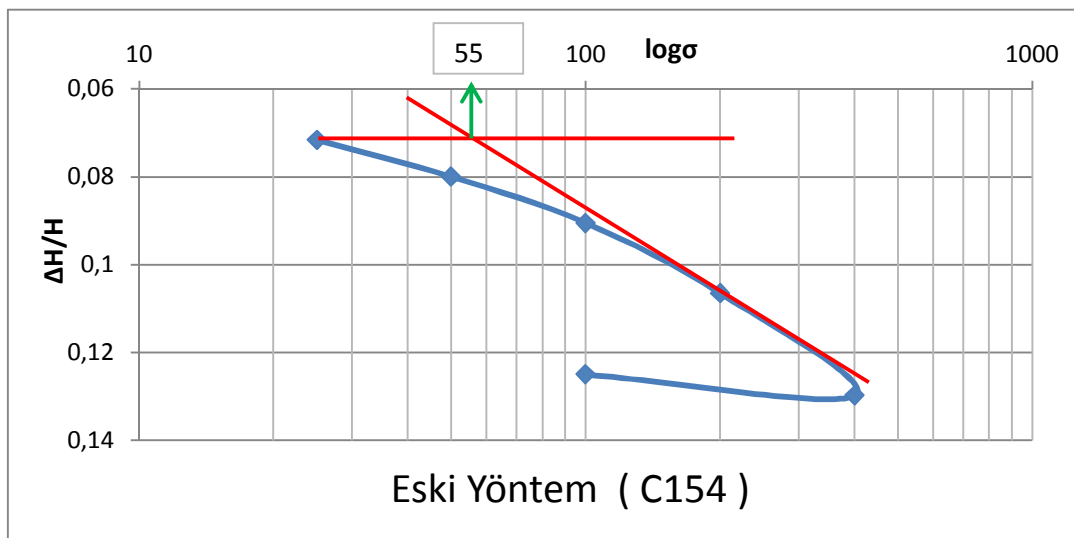
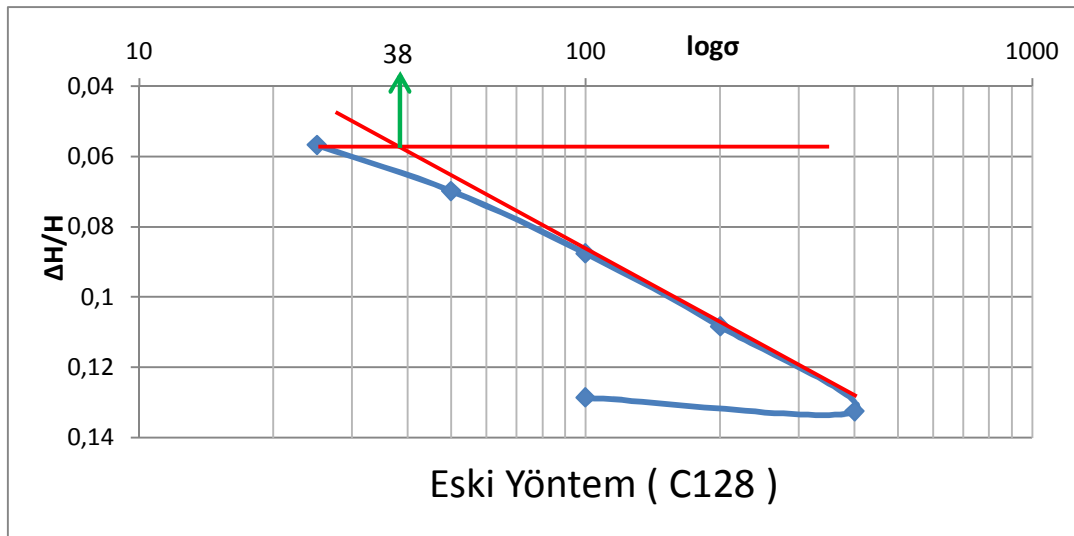


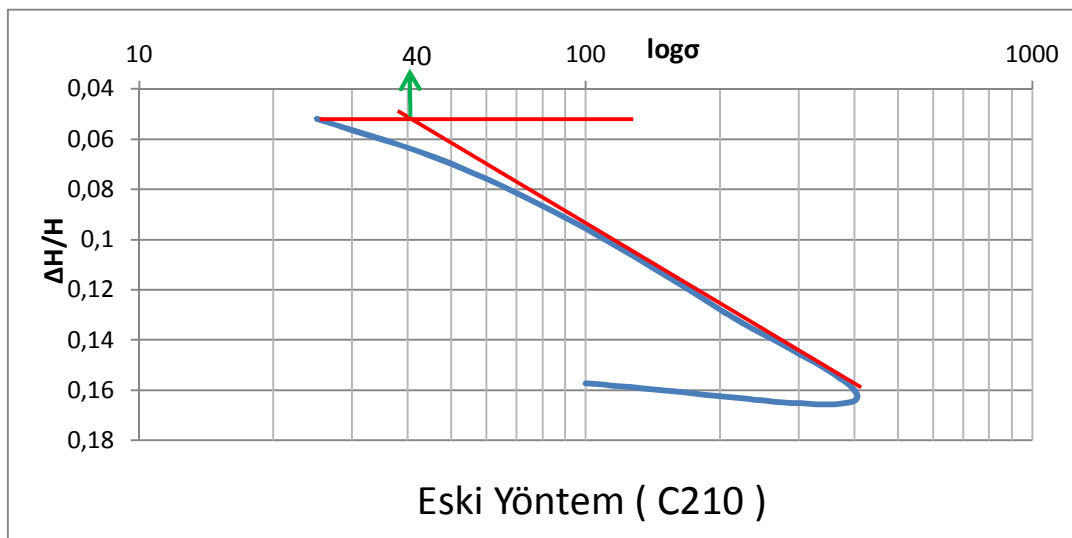
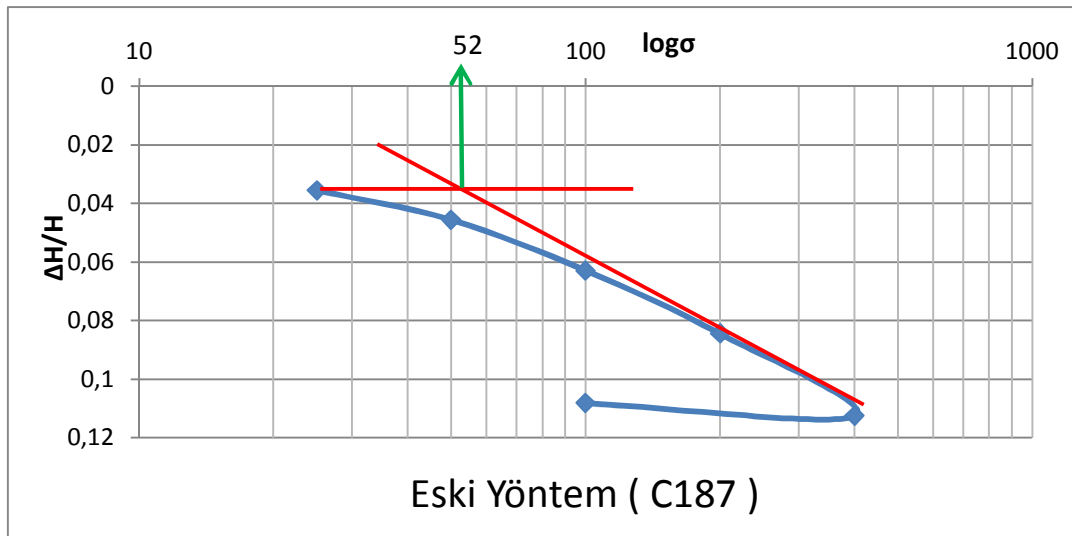




6. Eski yöntemle elde edilen ön konsolidasyon basıncı grafikleri







ÖZGEÇMİŞ

Yadigar ALTUNDAĞ, 18.09.1991 yılında Bolu'da doğdu. İlköğrenimini Sakarya ve Ankara'da, lise öğrenimini ise Ankara'da tamamladı. 2009 yılında Ankara Yahya Kemal Beyatlı Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazanmıştır.