

Aşırı Konsolide Killerin Dayanım Özellikleri

Hakan Bilici

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2017

Strength Properties of Overconsolidated Clays

Hakan Bilici

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

February 2017

Aşırı Konsolide Killerin Dayanım Özellikleri

Hakan Bilici

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Derviş Volkan OKUR

Şubat 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hakan Bilici'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Aşırı Konsolide Killerin Dayanım Özellikleri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Derviş Volkan Okur

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi: Üye : Doç. Dr. Derviş Volkan Okur

Üye : Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

Üye : Doç. Dr. Murat Türköz

Üye : Doç. Dr. Hasan Savaş

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

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

Prof. Dr. Hürriyet Erşahan
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Derviş Volkan OKUR danışmanlığında hazırlamış olduğum “ Aşırı Konsolide Killerin Dayanım Özellikleri” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/02/2017

Hakan Bilici

ÖZET

Bu tez kapsamında, İstanbul'un çeşitli bölgelerindeki sahalardan ve farklı derinliklerden alınan aşırı konsolide killerin; kesme kutusu, serbest basınç, konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleriyle dayanım özellikleri belirlenmiştir. Zeminlerin göçme oluşmadan karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi değeri, zeminin kayma direnci(dayanımı) olarak tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesi, en büyük değere ulaştıktan belirli bir süre sonra deformasyon artmasına rağmen değişmeyen sabit bir değer alır, bu değere rezidüel yada kalıcı kayma direnci denilmektedir. Kayma direnci, kohezyon ve içsel sürtünme açısı denilen kayma parametrelerinden oluşur ve zeminin mukavemeti, daneler arasındaki kohezyona ve daneler arasındaki sürtünme direncine bağlıdır. Kohezyon, gerilmeden bağımsız, zeminin cinsine ve mineralojisine bağımlı bir parametre iken, sürtünme direnci efektif gerilmeye bağımlı bir parametredir. Bir zemin tabakası üzerine, şu anda etkiyen yük o tabaka üzerinde etkimiş en yüksek konsolidasyon basıncına eşitse o tabaka için normal konsolide olmuş kil denir. Diğer taraftan kil tabakası üzerine, şu anda etki eden efektif düşey basınç o kil tabakası üzerine geçmişte etkiyen basınçtan az ise o kil tabakası için aşırı konsolide olmuş kil denmektedir. Bu çalışmada, aşırı konsolide killerin endeks özelliklerine bağlı, kayma ve kalıcı kayma direnci parametreleri karşılaştırılmış ve laboratuvarında yoğrulma sonucu oluşturulan örselenmiş numunelerin dayanım parametrelerine etkisinin tespiti yapılmıştır. Numunelerin örselenmesi kayma dayanımını düşürmektedir.

Anahtar kelimeler: Aşırı konsolide, Kil, Kayma Dayanımı, Örselenmiş, Örselenmemiş

SUMMARY

In this thesis, resistance specifications of overconsolidated clays taken from different locations and depths in Istanbul are determined by shear box test, nonconfined compression test, consolidation and triaxial compression test. Shear resistance of the ground is determined as the maximum shear stress value without occurrence of any collapse. After shear stress reached its maximum value, it remains at a constant value after even though increase in deformation and this constant value is called as residual or permanent shear resistance. Shear resistance which is composed of parameters namely cohesion and inertial friction angle, depends on soil strength, cohesion between grains and friction resistance between grains. The cohesion is a parameter that depends on the type of soil and minerology of soil but it is independent from stress, while friction resistance is a parameter that depends on effective stress. If the current active load on a ground layer is equal to the maximum consolidation pressure acted on this layer, this layer called as normal consolidated clay. On the other hand if the effective vertical pressure acted on the clay layer is less than the acted pressure on this layer in the past, this clay layer is called as overconsolidated clay. In this study, parameters of the shear and the permanent shear resistance depending on the index properties of overconsolidated calys are compared and the effect on the resistance parameters of disturbed samples obtained by kneading is detected. The disturbance of the samples decreases shear resistance.

Key words: Overconsolidated, Clay, Shear Stress, Disturbed, Undisturbed

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda beni yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen, her daim anlayış ve empati sahibi olan danışman hocam Doç. Dr. Derviş Volkan Okur'a sonsuz şükran, teşekkür ve en derin saygılarımı sunarım. Samimi yaklaşımları ve yapmış oldukları yardımlardan dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri Doç. Dr. Murat Türköz'e, Doç. Dr. Hasan Savaş'a ve Yrd. Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan'a, her daim vefa borçlu olduğum bölüm teknikerimiz Eyüp Ertaş'a, insaniyetinden dolayı imrendiğim ve yolundan yürümeyi arzu ettiğim kıymetli bölüm başkanım Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu'na, her zaman çok ince düşünceli vefakâr bölüm sekreterimiz Türkan Yönlüer'e, bölümümüzün kıymetli öğretim üyelerine ve personellerine, Anadolu Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Gülgün Yılmaz'a, Dicle Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri Doç. Dr. Salih Keskin'e ve Doç. Dr. Taha Taşkıran'a, her halime her daim itimat eden dostum 18 yıllık arkadaşım Safer Döğer'e, hayatımın her aşamasında bana içtenlikle ve samimiyetle destek olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi(DATEM)'nde görevli değerli arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Songül Tortuk'a, iyi niyetli, içten ve yardımsever Bilgisayar Mühendisi aday arkadaşım Ali Ellez'e, kardeşliğin, vefanın, saygının, sevilmenin ne olduğunu iliklerime kadar hissettiren hayatıma anlam katan kardeşlerim Gökhan ve Yunus'a, yanlarında ayrı bir huzur bulduğum, onlarsız vakit geçirincede özlediğim, tatlı yaramazlıklarıyla hayatıma neşe katan kardeşlerim Enes ve Eren'e, hayatımda çok özel bir yere sahip, hayatımı üstün fedakârlıklarına borçlu olduğum kıymetlerini ifade etmem de kelimelerin kifayetsiz kaldığı Annem Gülsem'e ve Babam Sedrettin'e hayatımın her aşamasında bana göstermiş oldukları anlayış, destek ve sabırdan dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı.....	6
2.2. Kil Mineral Tipleri.....	9
2.2.1. 1:1 Kil mineralleri.....	9
2.2.2. 2:1 Kil mineralleri.....	11
2.2.3. Diğer kil mineralleri.....	13
2.3. Kil Minerallerinin Tanımlanması ve Sınıflandırılması.....	14
2.4. Problemlili Kil Grupları.....	18
2.4.1. Şişen killer.....	18
2.4.2. Dispersif killer.....	18
2.4.3. Lateritler.....	19
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	20
3.1. Mohr - Cloumb Kırılma Hipotezi.....	21
3.2. Efektif Gerilmeler ve Kayma Direnci.....	24
3.3. Kumların Kayma Direnci.....	26
3.4. Killerin Kayma Direnci.....	28
3.5. Kayma Direncinin Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi.....	31
3.5.1. Serbest basınç deneyi.....	32
3.5.2. Kesme kutusu deneyi.....	34
3.5.3. Basit kesme deneyi.....	36
3.5.4. Üç eksenli basınç deneyi.....	37

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
3.6. Zeminlerin Kalıcı Kayma Direnci.....	40
3.6.1 Kalıcı kayma direncinin tahmini için yöntemler.....	44
<u>3.6.1.1. Kayma yüzeyini önceden şekillendirmek</u>	44
<u>3.6.1.2. Kayma yüzeyini deney sırasında oluşturmak</u>	44
<u>3.6.1.3. Kalıcı kayma direncinin tahmini için diğer yöntemler</u>	45
<u>3.6.1.3.1. Geri analiz</u>	45
<u>3.6.1.3.2. Endeks özellikleriyle kalıcı kayma mukavemetinin tahmin edilmesi</u>	45
3.6.2. Kalıcı kayma direncini etkileyen faktörler.....	46
<u>3.6.2.1. Mineralojinin etkisi</u>	47
<u>3.6.2.2. Kıvam limitlerinin etkisi</u>	47
<u>3.6.2.3. Kil yüzdesinin etkisi</u>	47
<u>3.6.2.4. Efektif normal gerilmenin etkisi</u>	48
<u>3.6.2.5. Kesme hızının etkisi</u>	49
<u>3.6.2.6. Zemin yapısının etkisi</u>	50
3.6.3. Geoteknik mühendisliğinde kalıcı kayma direncinin önemi.....	51
4. MATERYAL VE YÖNTEM	52
4.1. Tanımlama Deneyleri.....	58
4.1.1. Elek analizi.....	59
<u>4.1.1.1. Deneyin yapılışı</u>	60
<u>4.1.1.2. Deney sonuçları</u>	61
4.1.2. Hidrometre deneyi.....	62
<u>4.1.2.1. Deneyin yapılışı</u>	63
<u>4.1.2.2. Deney sonuçları</u>	63
4.1.3. Atterberg(Kıvam) limitleri.....	64
<u>4.1.3.1. Likit limit deneyi</u>	65
<u>4.1.3.1.1. Casagrande yöntemi ile deneyin yapılışı</u>	65
<u>4.1.3.1.2. Deney sonuçları</u>	66
<u>4.1.3.2. Plastik limit deneyi</u>	67

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.3.2.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	67
4.1.3.2.2. <u>Deney sonuçları</u>	68
4.1.4. Özgül gravite deneyi.....	68
4.1.4.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	69
4.1.4.2. <u>Deney sonuçları</u>	69
4.2. Kayma Dayanım Deneyleri.....	70
4.2.1. Konsolidasyon deneyi.....	70
4.2.1.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	73
4.2.1.2. <u>Deney sonuçları</u>	75
4.2.2. Serbest basınç deneyi.....	79
4.2.2.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	80
4.2.2.2. <u>Deney sonuçları</u>	80
4.2.3. Kesme kutusu deneyi.....	81
4.2.3.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	82
4.2.3.2. <u>Deney sonuçları</u>	83
4.2.4. Üç eksenli basınç deneyi.....	84
4.2.4.1. <u>Deneyin yapılışı</u>	84
4.2.4.2. <u>Deney sonuçları</u>	85
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	86
5.1. Tanımlama Deney Sonuçları.....	91
5.2. Konsolidasyon Deney Sonuçları.....	96
5.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	98
5.4. Kesme Kutusu Deney Sonuçları.....	98
5.5. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları.....	102
5.5.1. Konsolidasyonlu - drenajlı üç eksenli basınç(CD) deney sonuçları.....	102
5.5.2. Konsolidasyonsuz - drenajsız üç eksenli basınç(UU) deney sonuçları.....	103
5.5.3. Konsolidasyonlu - drenajsız üç eksenli basınç(CU) deney Sonuçları.....	104
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR DİZİNİ	109

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
EK AÇIKLAMALAR	114
Ek Açıklama - A.....	114
Elek analizi deney sonuçları.....	114
Ek Açıklamalar - B.....	123
Konsolidasyon deney sonuçları.....	123
Serbest basınç deney sonuçları.....	127
Kesme kutusu deney sonuçları.....	128
Üç eksenli basınç deney sonuçları.....	146

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi.....	8
2.2. Oktahedron tabakası a) oktahedron yapıtaşı b) alümina tabakası c) alümina tabakasının temsili gösterimi.....	8
2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi.....	10
2.4. Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı.....	10
2.5. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi.....	11
2.6. Montmorillonitin elektron mikroskop fotoğrafı.....	12
2.7. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi.....	12
2.8. Casagrande'nin plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları.....	14
3.1. Göçme durumundaki asal gerilmeler arasındaki ilişki.....	23
3.2. Efektif ve toplam gerilmeler cinsinden mohr gerilme daireleri.....	25
3.3. Kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi - normal gerilme ilişkisi.....	27
3.4. Gevşek kumlar ve sıkı kumlar için kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi - normal gerilme ilişkisi.....	27
3.5. Normal konsolide killer ve aşırı konsolide killer için kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi - normal gerilme ilişkisi.....	29
3.6. Konsolidasyonsuz-drenajsız kayma mukavemeti zarfı.....	29
3.7. Normal konsolide ve aşırı konsolide killerde gerilme zarfları.....	30
3.8. Konsolidasyonlu - drenajlı deneylerden elde olunan kayma mukavemeti zarfı ve doyumluk derecesinin oturmaya etkisi.....	30
3.9. Serbest basınç deneyinde gerilme-birim deformasyon eğrisi ve kırılma zarfı.....	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.10. Serbest basınç deney aleti ve serbest basınç numunesinin yenilme anı.....	34
3.11. Kesme kutusu deney aleti.....	35
3.12. Basit kesme deney aleti.....	37
3.13. Üç eksenli deney hücresinin şemasal gösterimi.....	38
3.14. Üç eksenli deney aleti.....	39
3.15 Rezidüel kayma mukavemeti.....	40
3.16 Eksenel yükleme sırasında gözlenen zemin davranışı a) gerilme-birim deformasyon grafiği b) ilave boşluk suyu basıncı-birim deformasyon grafiği c) birim hacim değişimi-birim deformasyon grafiği.....	42
3.17 Boşluk suyu basıncı katsayısının eksenel yer değiştirme ile değişimi.....	43
3.18 Kil yüzdesi ve kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki.....	46
3.19 Likit limit kil yüzdesi ve kalıcı kayma direnci ilişkisi.....	46
4.1. İçi dolu ve boş numune tüpleri a) farklı numune tüpleri b) dolu ve boş shelby tüpleri c) boş shelby tüpleri.....	54
4.2. Tüplerden numuneyi çıkarmak için kullanılan kriko.....	55
4.3. Numunenin tüplerden çıkarılışı.....	56
4.4. Mekanik krikoyla çıkarılan numune.....	57
4.5. Tanımlama deneyleri için alınmış numuneler.....	58
4.6. Elek seti ve elenmek üzere hazırlanmış numune.....	60
4.7. Hidrometre deney tüpleri.....	62
4.8. Casagrande deney aleti.....	66
4.9. Piknometre.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.10. Zamanla, boşluk suyu ve efektif gerilmedeki değişim.....	72
4.11. Konsolidasyon deney aletleri.....	73
4.12. Konsolidasyon deney hücresi.....	74
4.13. Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi.....	76
4.14. Konsolidasyon deney numunesi ve yükleme ağırlıkları.....	77
4.15. Logaritma-zaman yöntemi ile C_v 'nin bulunması.....	78
4.16. C_v 'nin karekök - zaman yöntemiyle bulunması.....	79
4.17. Kesme kutusu deney hücresi.....	83
4.18. Kesme kutusu deney numuneleri.....	83
4.19. Konsolidasyonlu - drenajsiz üç eksenli deney numunesi.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	9
2.2. Kil minerallerinin(ağırlığa göre) kimyasal bileşimi.....	14
2.3. Değişik kil minerallerinin aktiviteleri.....	16
2.4. Kil minerallerinin sınıflandırılması ve oluşma şekilleri.....	16
3.1. Kırılma-yenilme kriterleri.....	22
4.1. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sayıları.....	58
4.2. ASTM ve DIN standartlarında kullanılan bazı elekler ve açıklık değerleri.....	59
5.1. Birinci grup deney listesi.....	86
5.2. İkinci grup deney listesi.....	88
5.3. Birinci grup tanımlama sonuçları.....	91
5.4. İkinci grup tanımlama sonuçları.....	93
5.5. Konsolidasyon sonuçları.....	96
5.6. Serbest basınç sonuçları.....	98
5.7. Kesme kutusu deney sonuçları.....	99
5.8. Kil yüzdesinin kohezyona etkisi.....	101
5.9. Plastik limit-Likit limit oranının kohezyona etkisi.....	101
5.10. Likit limitin kayma mukavemeti açısına etkisi.....	102
5.11. Konsolidasyonlu – drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları.....	103
5.12. Konsolidasyonsuz – drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçları.....	103
5.13. Konsolidasyonlu – drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçları.....	104

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AASTHO	Amerika Karayolları Zemin Sınıflama Sistemi
ASTM	American Society for Testing and Material
AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı
AKK	Aşırı Konsolide Killer
USCS	Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi
USDA	Dokuya Dayalı Zemin Sınıflama Sistemleri
KK	Kesme Kutusu Deneyi
CPT	Koni Penetrasyon Deneyi
KONS	Konsolidasyon Deneyi
CU	Konsolidasyonlu-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
CD	Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
UU	Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
NKK	Normal Konsolide Killer
SB	Serbest Basınç Deneyi
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi

1. GİRİŞ

Zeminlerin kayma dayanımı geoteknik mühendisliğinin önemli konularından birini teşkil eder. Yüzeysel ve derin temellerin taşıma kapasitesi, şev stabilitesi, istinat duvarı tasarımı ve dolaylı olarak karayolu kaplaması tasarımı zeminin kayma dayanımından etkilenmektedir. Yapı ve şevler maksimum yükleme şartlarında yüklendiği zaman duraylı ve göçmeye karşı sağlam kalabilmektedir. Bundan dolayı bu yapıların tasarımında analizin sınır denge yöntemleri uygun şekilde kullanılır ve bu yöntemler, zeminin nihai veya sınır kayma direnci(kayma dayanımı)'nin tanımlanmasını gerektirir(Holtz vd., 2015).

Zeminlerde, hem kendi ağırlıklarından(jeolojik gerilmeler) dolayı, hem de uygulanan yüklerden dolayı gerilme artışları oluşmaktadır. Bu gerilme artışlarından dolayı zeminde şekil değiştirmeler oluşur. Zeminin gerilme - şekil değiştirme davranışı, diğer mühendislik malzemelerinden daha karmaşık bir yapıdadır. Zeminlerin gerilme şekil değiştirme ilişkisi, zeminin başlangıç gerilme durumuna, gerilme geçmişine (yüklenme tarihçesi), yükleme anındaki drenaj koşullarına ve yükleme hızı gibi farklı faktörlere bağlıdır. Zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmeler genellikle uygulanan yükler ile doğrusal olarak artmadığı ve yükler kaldırıldığında da şekil değiştirmelerin büyük bir kısmının kalıcı olduğu (geri gelmediği) gözlenmektedir.

Uygulanan yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin, zeminin kayma direncini aşması durumunda göçme meydana gelmektedir. Malzemelerin göçme biçimleri farklıdır. Çelik gibi elasto-plastik davranış gösteren malzemelerde akma tipi göçme gözlenirken, beton gibi gevrek malzemelerde ani göçme meydana gelebilmektedir. Zeminlerde gözlenen göçme türü, zeminin cinsine ve bazı fiziksel ve bünyesel özelliklerine(su muhtevası gibi) bağlı olmakla beraber, genellikle zeminin göçmesi, izin verilebilir şekil değiştirme seviyelerinin aşılması olarak tanımlanmaktadır(Özaydın, 2011).

Zeminlerin kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkisi incelendiğinde, kayma gerilmesinin aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda deformasyonun artmasıyla birlikte en büyük gerilme değerine ulaşıncaya kadar arttığı ve bir tepe noktasına ulaştığı, daha sonra azalarak, deformasyon artmasına rağmen sabit bir değer aldığı görülmektedir. Bu sabit olan kayma gerilmesi değerine kalıcı veya rezidüel kayma direnci denilmektedir. Normal konsolide killerde veya gevşek kumlarda ise, kayma gerilmesi - deformasyon ilişkisi incelendiğinde, belirli bir pik değer elde edilmediği görülmekte, artan deformasyon ile birlikte kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı kayma direnci olmaktadır.

Zeminlerin kalıcı kayma direncinin belirlenmesi, özellikle şev duraylılığına duyulan ilgi ile önem kazanmaya başlamıştır. Kalıcı kayma direnci her ne kadar büyük deformasyonlar sonucu oluşmakta ise de bu değer göçmeye neden olan gerilme değeri değildir. Fakat göçme sonucu oluşan yüzeylerdeki direnç, kalıcı kayma direnci değerine çok yakın olduğu bilinmesine rağmen, göçme direnci kalıcı kayma direncinden düşüktür. Önceden büyük kayma hareketlerinin meydana gelmiş olduğu göçme yüzeyleri içeren şevlerin stabilitesi ve fisürlü(ince çatlaklı) – sert kil zeminlerin oluşturduğu şevlerin stabilite analizlerinde kalıcı kayma direnci önem kazanmaktadır. Kalıcı kayma direnci parametrelerinin önemi, ülkemizdeki şevlerin çoğunun konsolide veya ince çatlaklı killerden oluştuğu göz önünde bulundurulduğunda ve özellikle ulaşım alanındaki şevlerde bir süre sonra ciddi stabilite problemlerinin oluşmasından anlaşılmaktadır. Laboratuvar deney yöntemleri kullanılarak Zeminlerin yukarıda bahsedilen gerilme – şekil değiştirme diyagramları ve kayma dayanımı parametrelerini belirlenebilmektedir. Bu çalışmada Tekrarlı Kesme kutusu ve konsolidasyonlu – drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyi ile zeminlerin residuel kayma dayanımı parametreleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Deney yönteminin yanı sıra zeminin cinsi, mineral yapısı, kesme hızı ve efektif gerilmenin de rezidüel kayma parametrelerine etkisi olduğu tespit edilmiştir (Skempton,1985; Mitchell,1993).

Bu çalışmada zeminlerin kayma dayanım parametrelerini belirlemek için İstanbul'un farklı sahalarından, farklı derinliklerden alınan ve farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde, öncelikle tanımlama deneyleri yapılmış ve sonrasında serbest basınç, konsolidasyon, kesme kutusu ve üç eksenli basınç (konsolidasyonlu-drenajlı(CD)),

konsolidasyonsuz-drenajsız(UU), konsolidasyonlu-drenajsız(CU)) deneyleri yapılmıştır. Kesme hızı arazideki koşullara uygun olabilmesi için önce konsolidasyon yapıp ilgili standarta göre (ASTM D3080) drenaj hızı ve süresi hesaplanmış ve drenaj hızından daha yavaş olacak şekilde kesme hızı belirlenmiştir. Kesme hızı deney aşamasında önemli bir parametredir. Çünkü; kesme hızı drenaj hızından yavaş olursa yapılan kesme yüklemesinin bir kısmı zemin içeriğindeki su tarafından karşılanır. Dolayısıyla bu durum, kayma parametreleri olan kohezyon ve kayma mukavemeti açısı açısının hatalı olmasına ve zeminin geoteknik özelliklerinin yanlış tespit edilmesine yol açmaktadır. Bu nedenle kesme hızı doğru seçilmediği takdirde parametreler hatalı elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak kil minerallerinin genel özellikleri ve mineral yapısı, kil mineral çeşitleri, kil minerallerinin tanımlanması ve sınıflandırılması, killerin fiziksel özellikleri ve problemlili kil grupları hakkında bilgi verilmiştir.

Sonraki bölümde, aşırı konsolide killerin kayma(pik) ve kalıcı kayma(rezidüel) dayanımı hakkında genel bilgilerin yanısıra geoteknik mühendisliğindeki önemi, pik ve rezidüel kayma parametreleri arasındaki farklar, kayma dayanımını etkileyen faktörler ve konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, bu çalışmada kullanılan numunelerin endeks özellikleri ve kayma dayanım parametrelerini belirlemek için yapılan laboratuvar deney yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde ise yapılan serbest basınç, konsolidasyon, serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç (konsolidasyonlu-drenajlı(CD), konsolidasyonsuz-drenajsız(UU), konsolidasyonlu-drenajsız(CU)) deneylerinin sonuçları ve deney sonuçları arasındaki ilişkiler verilmiştir.

Son bölümde ise deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerden yararlanılarak çıkartılan genel sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

2. KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Belirli bir kimyasal yapıya sahip olan ve atomları sistematik içsel bir yapı ile dizilmiş, organik olmayan ve doğal yollarla oluşmuş katılara mineral denir. Kayaç ise yer kabuğunda bulunan bir veya daha fazla mineralin doğal yollarla bir araya gelmesiyle oluşan kütleler olarak adlandırılır(Holtz vd., 2015). Kayaçların bileşim ve yapılarının kimyasal, fiziksel veya biyolojik bir takım süreçler sonucunda bozulmasına ayrışma denir. Tüm zemin türleri bu ayrışma sonucunda meydana gelmiştir.

Zeminler kaba daneli veya kohezyonlu zeminler ve ince daneli veya kohezyonsuz zeminler olmak üzere iki ana grup altında toplanırlar. İnce daneli zeminler bir arada bulunma kabiliyetine sahiptirler yani ince daneli zeminlerde daneler birbirine yapışma eğilimindedirler. Bu durum kohezyon olarak adlandırılır. Sınıflandırma mühendislikte dane boyutlarına bakılarak yapılır ve yaygın bir kullanım alanına sahiptir. İri daneli zeminler kum, çakıl ve blok boyutundaki malzemelerden oluşur. Bu tarz zeminler parçalanmış iri boyuttaki kayaç tanelerinin oluşturduğu zeminlerdir. Kumlar 0.075 mm ile 2 mm arasındaki boyuta sahip kayaç ve mineral parçacıklarıdır. Kumlar genellikle silt ve kil boyutlarındaki ince daneli malzemeleri de içerirler. Kumlu zeminler çakıllı zeminlere göre daha düşük taşıma gücüne sahiptirler. Çapları 2 mm ile 200 mm arasında olan dane boyutundaki malzemelere çakıl adı verilir. Çakıllar bünyesinde kum ve silt bulundurabilirler. Dinamik ve tekrarlı etkiler karşısında(deprem gibi) suya doymun kumlu zeminlerin sıvılaşma özelliği vardır.

İnce daneli zeminler ise silt ve kil malzemelerden oluşur. İnce daneli zeminlerde daneler çıplak gözle görülmezler. İnce daneli zeminlerin deformasyonuna karşı koyan kuvvet, zemin ve su arasındaki çekim kuvvetidir. Killer su ile temas ettiğinde şişebilir. Bu sebeple deformasyona neden olup şev kaymalarına yol açabilirler. Genellikle ince daneli malzemeler doğada karışık bir şekilde bulunurlar. Bu zeminlerin oluşmasında mekanik olduğu kadar kimyasal ayrışmanın da etkisi vardır. Siltlerin çapı 0.002 mm ile 0.075 mm arasında değişir. Killer ise siltlerden daha düşük boyutta olan daneleri içerir(Özçep, 2008). Siltler hem granüler hem de ince daneli(kohezyonlu) zeminlerdir. Silt zemin numunesi

avuç içinde hızla sallandığında yüzeyinde su görülebilir. Siltli zeminler sudan etkilenmesine rağmen yani su ile şişebilen bir zemin olmasına rağmen plastisiteleri çok düşük olduğundan yani plastisite indisleri sıfıra çok yakın olduğundan plastik özelliğe sahip değildir veya çok az plastiklerdir. İnce daneli olmasına karşın bazı zeminler kohezyonsuz olabilirler. Kaya unları bu tarz zeminlere örnek olarak verilebilir (Holtz vd., 2015).

Mühendisler zeminleri basit olarak karakterize etmek ve mühendislik özelliklerini genel olarak değerlendirmek için sınıflandırma ihtiyacı duymuşlardır. Derecelendirmeyi belirlemek için öncelikle dane boyutu analizi, hidrometre yöntemi ve Atterberg Limiti Testleri yapılmalıdır. Bu iri daneli zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Herhangi bir zemin sınıflama sisteminin amacı farklı zeminler arasında ortak tanımlar grubu sağlamaktır. Zemin sınıflandırması için bir çok sınıflama sistemi mevcuttur. Fakat bu sınıflamaların çoğu tarımsal amaç ve özel amaçlar için geliştirilmiş olup mühendislik amaçlı kullanım için uygun değildir (Özçep, 2008).

Zemin için çeşitli sınıflama sistemleri mevcuttur. Bunlar;

1. Jeolojik zemin sınıflama sistemleri
 2. Ziraat amaçlı zemin sınıflama sistemleri
 3. Dokuya dayalı zemin sınıflama sistemleri(USDA)
 4. Amerika Karayolları sınıflaması(AASTHO)
 5. Birleşik zemin sınıflama sistemi(USCS)
 6. ASTM(American Society for Testing and Material) sınıflama sistemi
 7. Federal Havacılık Ajansı sınıflama sistemi
- şeklinde sıralanabilir.

Kum ve çakılları sınıflandırmak için dane büyüklüğü kullanılır. Bunun aksine kil ve silt yani ince daneli zeminlerin sınıflandırılması, dane boyutuna göre değil de malzemenin plastisitesine göre yapılır. Killer; belirli bir su muhtevası aralığında çatlamaya, kırılmaya

ve hacminde değişikliğe uğramadan deforme olabilen ve aldığı şekli muhafaza edebilen bir yapıya sahiptirler. Bu durum killerin söz konusu su muhtevası aralığında plastik olduğunu gösterir. Kuruduğu zaman killer, çok güçlü bir hal alır yani ezilmeye karşı dirençli olur.

Kil; ince daneli minerallerden oluşan, doğada doğal olarak meydana gelmiş, yeterli miktarda su katılınca genel olarak plastikleşen ve kuruma veya pişmeyle sertleşebilen bir malzemedir (Şengül, 2003). İnşaat Mühendisliğinde; genellikle belirli bir su muhtevasına sahip, aynı zamanda kuruduğunda sertleşen ve diğer mineral bileşikleri ile beraber bazı kil minerallerini de içeren belirli bir plastisiteye sahip kohezyonlu bir zemin anlaşılmaktadır. Fakat Hatheway (2000)'de kil teriminin çok genel bir terim olduğu herhangi bir niteleyici ve ya tanımlayıcı bir ifade olmadan kullanılmasının bazı belirsizliklere yol açabileceği yani yanlış anlamalara sebep olabileceğini ifade etmiştir. Kil mineralleri çok küçük boyutta ve kristal bir yapıya sahiptirler. Bu sebepten dolayı bir zemin içeriğinde çok az miktarda bile kil minerali bulunuyorsa içeriğinde bulunan kil minerali o zeminin geoteknik özelliklerini önemli derecede etkileyebilmektedir. Kil içeriği %25 ve %35 mertebelerinde olması durumunda zemin içinde yer alan iri tanelerin (sitler, kumlar ve ya çakıllar) zeminlerin mühendislik davranışına etkisi oldukça az olacaktır. Kil zeminlerin önemli özelliklerinden bir diğeri ise su içeriğinin killi zemin davranışlarını önemli ölçüde etkilemesidir. Dane granülometrisi (dane boyutu dağılımı) ve dane şekli iri daneli zeminlerin davranışına önemli derecede etki ederken, kil zeminlerde davranış üzerindeki etkisi oldukça sınırlıdır. Bunun aksine suyun varlığı killi zeminlerin davranışını önemli oranda etkilerken iri daneli zeminlerde bir kaç istisna dışında oldukça azdır (Holtz vd., 2015).

2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı

Kil mineralleri kayaç içeriğinde bulunan bazı minerallerin kimyasal olarak ayrışması sonucu meydana gelen, koloidal boyutta (dane çapları bir mikrondan daha az) kristal yapıya sahiptirler ve sadece elektron mikroskopuyla görülebilirler.

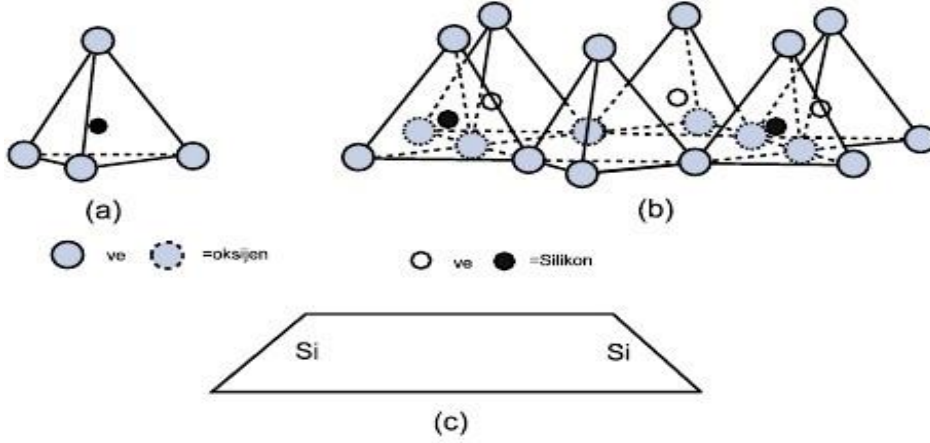
Gerçek bir kilin mineral bileşimi diğer zemin türlerin mineral bileşiminden farklı olduğundan dolayı, bazen kil mineralleri ve kil dışı mineraller şeklinde ayırım yapılır. Neredeyse tüm kil minerallerinin bünyesindeki moleküller düzenli bir şekilde tekrarlayarak tabaka biçiminde bir doku oluştururlar yani kristal yapısında minerallerdir ve kohezyon ve plastisite özelliklerine sahiptirler. Killerin sahip olduğu yüksek kohezyon ve plastisite özelliğinin asıl nedeni dane boyutu değil, mineral çeşididir. Bu durum, kil dışı minerallerin 0.002 mm'den küçük dane çaplarında parçalara bölünmesi durumunda kil özellikleri kazanmayacağını gösterir(Mccarthy, 2010).

Elektrokimyasal olarak çok aktif bir zemin türü olan kil mineralleri çok küçük partiküllerden oluşmaktadır. Bir zemin kütesinin mühendislik özelliklerini içinde kil minerallerini barındırıyorsa, söz konusu kil mineralleri zeminin geoteknik özelliklerini ciddi derecede etkileyebilmektedir. Kil Zemin kütesi içinde, içeriği az dahi olsa etkisini göstermektedir ve kil oranı arttıkça, diğer zemin türleri(çakıl, kum, silt gibi)'nin etkisini azaltarak kendi özellikleri ile kütleyle domine etmektedir. Öyle ki, zeminin içeriğindeki kil oranı %50'yi aştığında diğer zemin türlerinin etkileri yok denecek kadar azalır. Bu da gösteriyor ki kil baskın bir yapıya sahiptir(Ünver,2015).

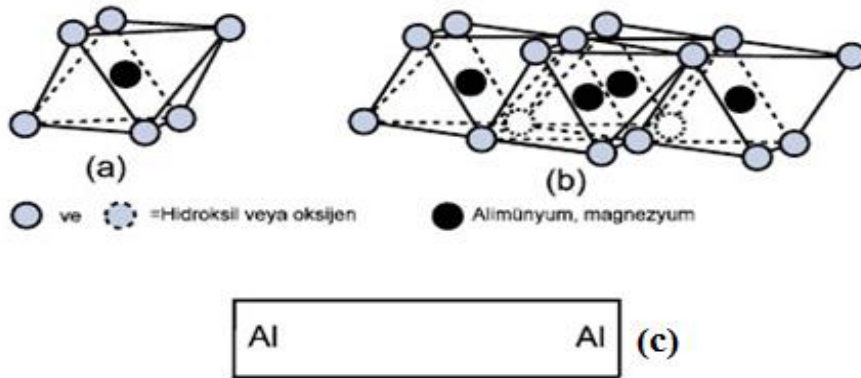
Kil mineralleri ince plaka ya da levha şeklinde olabilirler. Minerologlar tarafından yapılan X ışını kırılımı çalışmalarında bu levhaların tekrarlı atomik yapılara sahip bir çok kristal plakadan meydana geldiği gözlenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde; silika levhaları diğer adıyla dörtyüzlü(tetrahedral) ile alimüna(alüminyum oksit) diğer adıyla sekizyüzlü(oktahedral) olmak üzere iki esas kristal plaka var olduğu görülmüştür. Kil mineralleri,bu kristal kafes içindeki farklı metalik iyonların değişik bağlanma şekilleriyle bir araya gelmesiyle oluşur. Her oluşturulan farklı dizilim farklı kil minerallerini meydana getirir.

Dörtyüzlü levhalar köşelerde dört oksijen atomunun tek bir silika atomunu çevrelemesiyle oluşan dörtyüzlü silikaların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır(Şekil 2.1.a). Her bir dörtyüzlünün tabanındaki oksijen atomları birleşerek silika levhasının yapısını oluşturur(Şekil 2.1.b). Oluşan dörtyüzlünün tabanındaki oksijenler aynı düzlem

üzerindedir. Dörtüzlü levhaların yaygın olarak kullanılan şematik kısmı Şekil 2.1(c)'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Tetrahedron tabakası a)tetrahedron yapıtışı b)silika tabakası c)silika tabakasının temsili gösterimi(Fell vd., 1992)



Şekil 2.2. Oktahedron tabakası a)oktahedron yapıtışı b)alümina tabakası c)alümina tabakasının temsili gösterimi (Fell vd., 1992)

Sekizyüzlü alümine levha ise altı tane oksijen ya da hidroksilin alüminyum, magnezyum, demir ya da diğer metalik atomlarla çevrenmesiyle oluşmaktadır. Şekil 2.2(a)'da tek bir sekizyüzlü yer alırken Şekil 2.2(b)'de sekizyüzlüler bir araya gelerek levha şeklinde bir yapı oluşturdukları görülmektedir. Sekizyüzlülerin şematik gösterimi Şekil 2.2(c)'de gösterilmiştir. Sekizyüzlü bir levhada farklı katyonların yer değiştirmesiyle farklı kil mineralleri oluşmaktadır. Yer değişen iyonların yaklaşık olarak aynı boyuta sahip olmaları durumunda bu yer değiştirme İzomorf(eşbiçim) olarak adlandırılır. Sekizyüzlüler katyon içermediği durumlarda fiziksel özellikleri farklı bir kil mineralinin oluşmasına

neden olur. Bu duruma ‘Gibsit’ ve ‘Brusit’ örnek olarak verilebilir. Gibsitler sekizyüzlü levhaların tüm anyonlarının ve katyonlarının 3’de 2’sinin dolu olması durumunda adlandırılan mineral çeşitidir. Brusit ise, alüminyumun yerini magnezyumun alması ve tüm katyonlarda yer alması durumunda oluşur (Savaş, 2008).

2.2. Kil Mineral Tipleri

Kil mineralleri yapısına göre 1:1 kil mineralleri ve 2:1 kil mineralleri olmak üzere ikiye ayrılırlar.

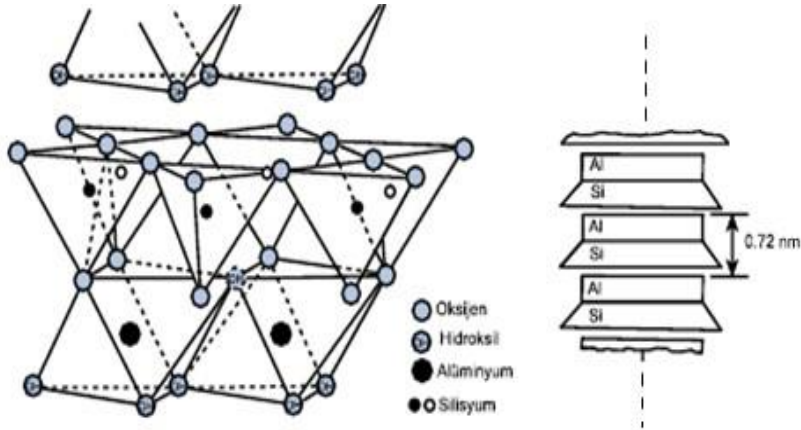
Çizelge 2.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması

Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit	Kaolinit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$
Serpantinit	Halloysit	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İlit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_4nH_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(Mg,Fe^{2+})[Si_3Al_5O_{20}](OH)_4nH_2O$
Simektit	Montmorillonit	$M^{x-y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Beidellit	$M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Notronit	$(M^{x-}Fe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Saponit	$(M^{x-}Mg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
Profilit ve Talk	Profilit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$
	Talk	$Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Donbassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit	Paligorskit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_44H_2O$
Sepiyolit	Sepiyolit	$Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

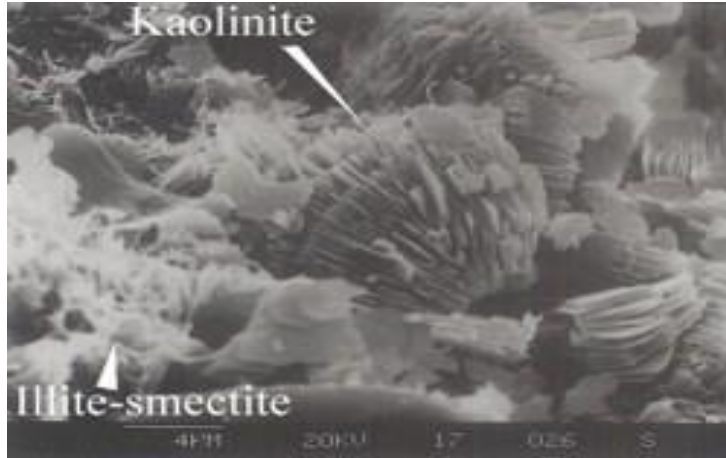
2.2.1. 1:1 Kil mineralleri

Bir dörtyüzlü ve bir sekizyüzlü kristal levhaların tekrarlanan katmanlardan oluşmasıyla 1:1 kil mineralleri oluşur. Bu tarz minerallere Kaolinit-Serpantin grubu mineraller denir. Bu gurubun en önemlisi en az 13 farklı minerali içeren Kaolinit’dir. Bir

kaolinit kristali, yaklaşık 0.72 nm kalınlığa sahip bir çok katmanın birleşmesiyle oluşmaktadır. Tipik bir kaolinit kristalinde 70 ile 100 arasında katman bulunmaktadır (Şekil 2.3). Şekil 2.4'te kaolinit mineralinin elektron mikroskopuyla görüntüsü yer almaktadır. Kaolinit, feldspar ve mikanın(biotit) ayrışması sonucu oluşmuştur. Kaolinit aynı zamanda kağıt, boya ve ilaç endüstrisinde de kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)



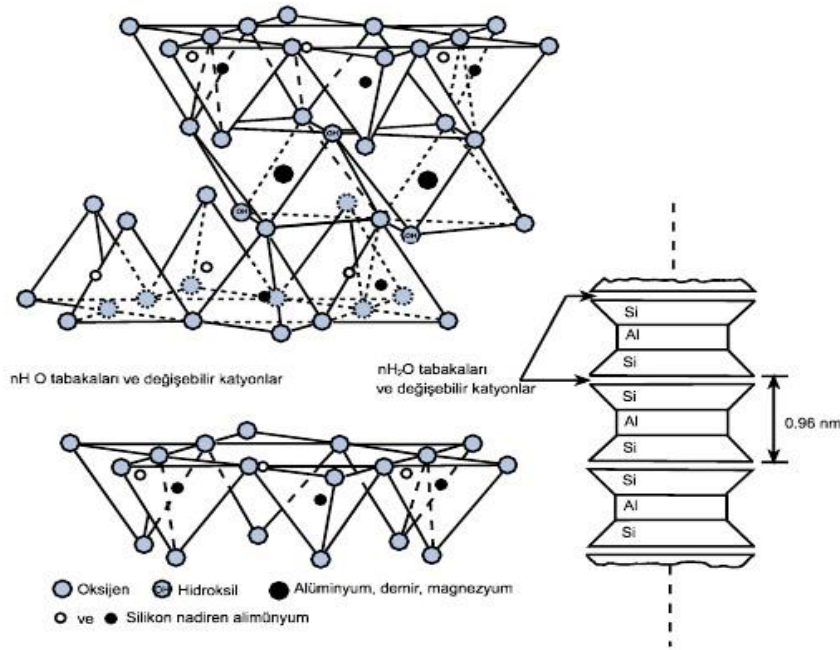
Şekil 2.4. Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı (Anonim, 2012)

Uygulamada en çok kullanılan diğer 1:1 yapılı mineralde Halloysit'dir. Halloysitin kaolinitten farkı katmanlar arasında hidrotasyona uğramaları sonucunda kristal kafesinin değişerek boru şeklinde bir şekle sahip olmasıdır. Halloysit mineralinin içindeki su ısıtma veya havayla kurutma ile kolayca dışarı çıkabilir. Bu durumda halloysitler tüp şeklini kaybederek kaolinite benzerler. Bu halloysitin kaolinite dönüşme süreci geoteknik uygulamalarında önemli sonuçlar doğurabilir. Çünkü halloysit tekrar hidratasyona uğramaz

yani su ilave edildiğinde tekrar eski halini almaz. Bu durumun sonucu olarak hava ile veya etüvde kurutulmuş numuneler kullanılarak yapılan sınıflandırma ve dayanım deneylerinde bulunan sonuçlar ile, kendi doğal su muhtevalarında hazırlanan numunelerle yapılan deneylerden farklı sonuçlar verebilir.

2.2.2. 2:1 Kil mineralleri

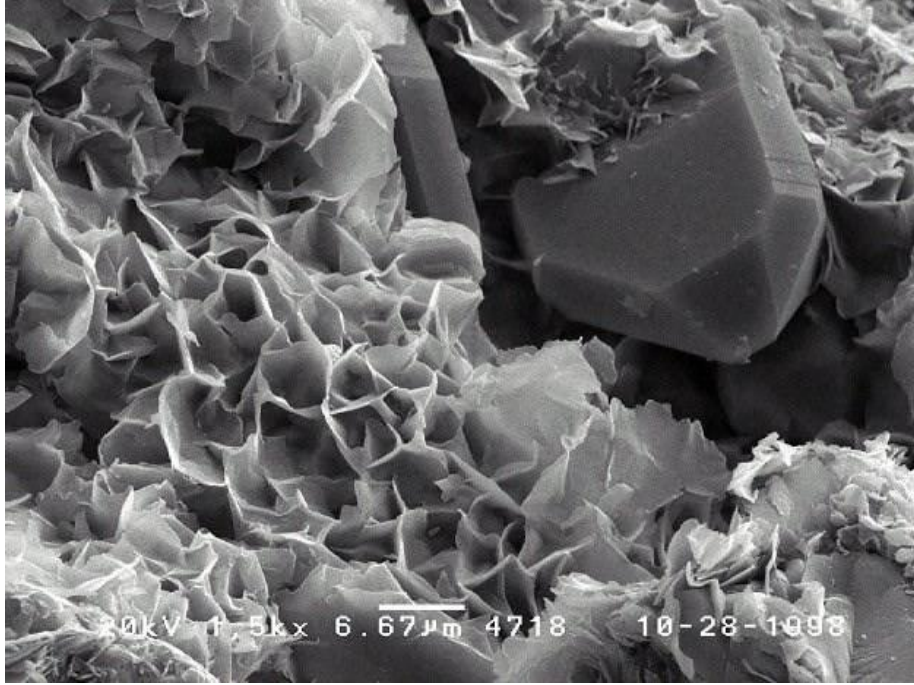
İki dörtyüzlü levhanın arasında bir sekizyüzlü levhanın tekrarlanan katmanlardan oluşmasıyla 2:1 kil mineralleri oluşur. Bu mineraller 40'dan fazla minerali içermektedirler. Bu grubun önemli mineralleri Montmorillonit, Bentonit, İllit ve Vermikülittir.



Şekil 2.5. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

Montmorillonit; Simektit grubu 2:1 kil minerallerinin en çok bilinen mineralidir. Montmorillonit kilinde dörtyüzlülerin uçlarındaki oksijen ve hidroksiller sekizyüzlü levhalarla paylaşılmaktadır ve böylece katmanlar oluşur (Şekil 2.5). Her bir katmanın kalınlığı 0.96nm'dir. Bu grubun tabakaları arasına su ve organik sıvılar girmesi sonucu tabaka kalınlığının değişken olabilmesi en önemli özelliklerinden biridir(Önalp, 2002). Bünyesinde montmorillonite ihtiva eden zeminler su muhtevası arttıkça şişmeye karşı daha

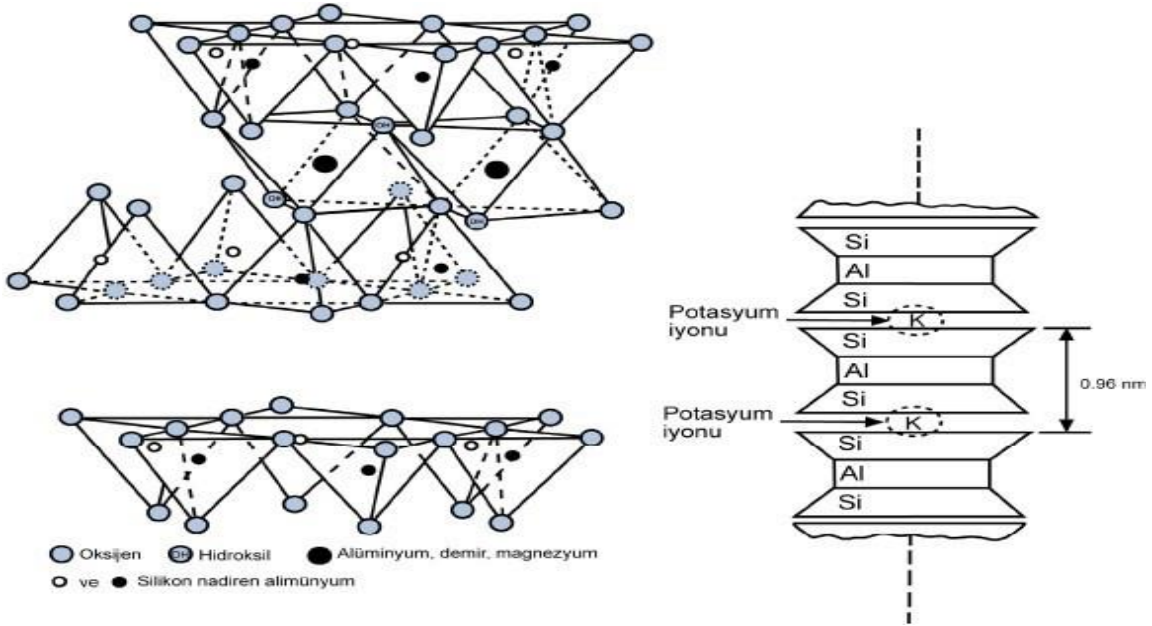
hassas olmaktadır ve oluşan şişme üzerindeki yapılara (özellikle hafif ve yolüstü kaplamalarına) kolaylıkla zarar verebilmektedir(Holtz vd., 2015).



Şekil 2.6. Montmorillonitin elektron mikroskop fotoğrafı (Anonim, 2012)

Bentonit; bir diğer 2:1 mineralidir. Önemli miktarda montmorillonit ve diğer simektit minerallerini içeren killer ve yumuşak kayalar için yaygın olarak kullanılan bir isimdir. Volkanik külün kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşur ve Geoteknik Mühendisliğinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun sebebi bentonitin şişme özelliğinden dolayıdır. Kullanım yerleri; sondaj ve geçirimsizlik perdelerinin stabilizasyonunda, sondaj dalgilerinin kapatılmasında ve geçirimli zeminlerde su akımını azaltmak amacıyla geçirimsiz tabakalar elde edilmesinde kullanılır(Holtz vd., 2015).

İllit minerallerinin, katmanları birbirine potasyum iyonu ile bağlanması ile oluşan 2:1 kil minerallerinin bir çeşididir. Kristal yapıları ve oluşum süreçleri montmorillonite benzemektedir(Şekil 2.7). Ancak; simektitlerden farkı bu potasyum iyonunun çokça bulunma zorunluluğudur. İllitler Kuzey Amerika Kıtasının ortasındaki buzul-lakustrin kil katmanlarında ve aynı bölgedeki kömür yataklarının altındaki kil tabakalarında yaygın olarak bulunur. Ana mineralleri; zengin magmatik ve metaformik kayalardan oluşmaktadır(Holtz vd., 2015).



Şekil 2.7. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

Vermikülit; yapısal olarak montmorillonite benzeyen bir diğer 2:1 kil minerali çeşididir. Montmorillonitten farkı katmanlar arasında su tabakası bulunmasıdır. Bu suyun dışarı çıkması için yüksek ısıda kurutulması gerekmektedir. Yüksek ısıda kurutulan vermikülit genişler ve çok iyi bir yalıtım malzemesi olma özelliğini kazanır.

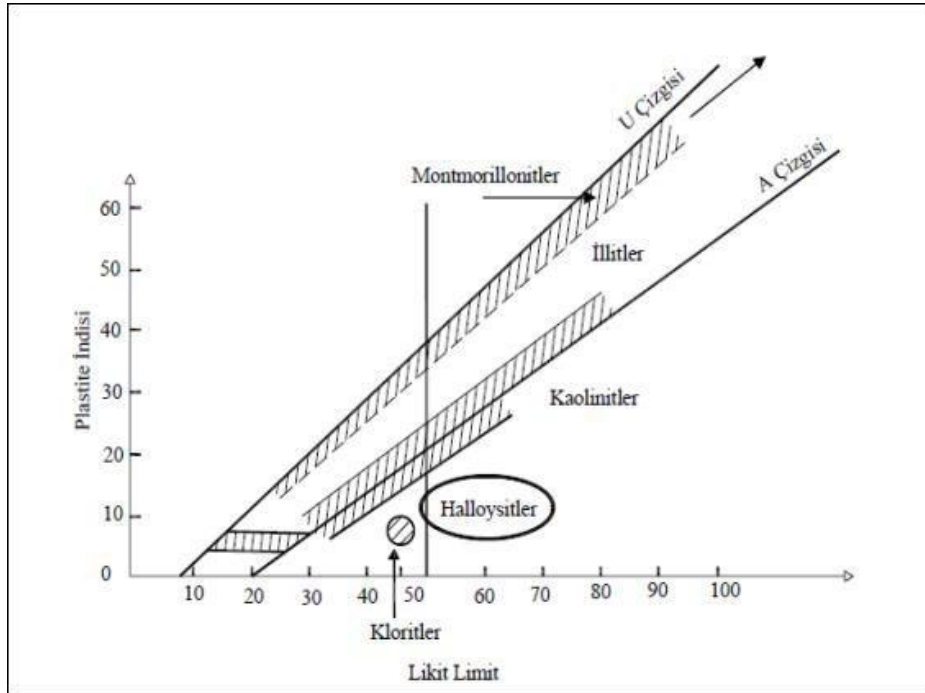
2.2.3. Diğer kil mineralleri

Bu gruba giren kil mineralleri 1:1 kil mineralleri ve 2:1 kil mineralleri dışında kalan minerallerdir. Bu grubun en yaygın minerali klorittir. Klorit minerali, art arda sıralanan bir dörtyüzlü, bir sekizyüzlü, başka bir dörtyüzlüye ilave olarak gipsit veya brusitten herhangi birisinin oluşturduğu yapıdır. Eğer klorit minerallerinde çok büyük izomorf bir yer değiştirme varsa brusit ya da gipsit katmanı eksik olabilir. Kloritler, başkalaşım kayalar ve bu tür kayalardan oluşan zeminlerde yer almaktadır(Holtz vd., 2015). Kil minerallerinin ağırlıklarına göre kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kil Minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi(%)

Kil mineralleri	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Kaolinit	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonit	42-55	0-28	0-30	0-0.5	0-3	0-2.5	0-0.5	0.3
İllit	50-56	18-31	2-5	0-0.8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermikulit	33-37	7-18	3-12	0-0.6	0-2	20-28	0-2	0-0.4
Klorit	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1

2.3. Kil Minerallerinin Tanımlanması ve Sınıflandırılması



Şekil 2.8. Casagrande'nin plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları (Casagrande, 1932; geliştirilmiş veriler Mitchell; 1976)

Çok küçük boyuta sahip kil minerallerini tanımlamak oldukça zordur. Bunun için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En fazla kullanılan yöntem X ışını kırılım yöntemidir. Bir başka teşhis tekniği diferansiyel termal analizdir. Bu analiz yöntemleri oldukça zordur. Bu sebeplerden dolayı kil minerallerinin tanımlanmasında Casagrande tarafından önerilen

likit ve plastisite indisi değerleri kullanılarak kil mineralleri hakkında bilgi edinmek m¼mk¼nd¼r(Şekil 2.8).

Plastisite indisi(PI); likit limit(LL) ile plastik limit(PL)'in farkıdır.

$$PI = LL - PL \quad (2.1)$$

Likit limit; kil danelerinin plastik kıvamdan likit(akışkan, viskoz, sıvı) kıvama geçtiği su muhtevasıdır. Plastik limit ise, killerin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği su muhtevasıdır.

Kilin geoteknik özelliklerinin ve sınıflandırılmasının yanında Atterberg limitleri genellikle yeterli olmakla birlikte ilave bilgi için aktivite denilen kavram kullanılmaktadır. Skempton(1953) bir kilin aktivitesini(A), platisite indisinin kil yüzdesine oranı ile hesaplamıştır.

$$A = PI / \text{Kil Yüzdesi} \quad (2.2)$$

Burada kil yüzdesi 2 µm (0.002 mm)'den daha küçük boyuttaki zeminlerin ağırlıkça yüzdesi olarak kabul edilir. Kilin aktivitesi 0.75 < A < 1.25 ise normal, aksi takdirde aktif kil olarak adlandırılır. Aktivite olayını bir örnekle açıklamak gerekirse; aktif olmayan kaolinit mineralleri Cassagrande kartında A hattının altında ve sağ tarafında yer almaktadır. Bu mineral teknik açıdan kil olarak tanımlansa bile mühendislik açısından ML – MH olarak yani sitli bir zemin gibi davranış göstermektedir. Bu sebeple aktivite kavramı bilinmesi zemin davranışı açısından önemlidir. Çizelge 2.3.'de bazı kil minerallerinin aktiviteleri ve Çizelge 2.4.'de kil minerallerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Değişik Kil Minerallerinin Aktiviteleri

Mineral	Aktivite
Na-Montmorillonit	4 - 7
Ca-Montmorillonit	1.5
İllit	0.5 - 1.3
Kaolinit	0.3 – 0.5
Halloysit(Hidratsız)	0.5
Halloysit(Hidrathlı)	0.1
Atapulgit	0.5 - 1.2
Allofan	0.5 - 1.2
Mika(Muskovit)	0.2
Kalsit	0.2
Kuvars	0

Çizelge 2.4. Kil Minerallerinin sınıflandırılması ve oluşma şekilleri (Önem, 2000)

Kaolinit Sulu Alüminyum Silkat	Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Magmatik ve volkanik kayaların ayrışmasıyla oluşur. Tabakalı bir yapı gösterir.
	Dikit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Nakrit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur. Yapısı kaolinit ve dikite benzemez.
	Anoksit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur. Yapısal kaolinite benzer.

	Halloysit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Sadece ayrışma ile oluşur.
	Endellit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$	Sadece ayrışma ile oluşur.
Simektit magnezyum ve ya demirle birlikte potasyum dışı alkalileri ve bazı toprak alkalileri içeren kil mineral grubu	Montmorillonit	$Mg_2Al_10Si_{24}(OH)_{12}(Na,Ca)$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Nontronit	$FeSi_{22}Al_{22}O_{60}(OH)_{12}(Na_2)$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
	Saponit	$Mg_{18}Si_{22}Al_2O_{60}(OH)_{12}(Na_2)$	Hidrotermal bozuşmayla oluşur.
	Beidellit	$Al_{13}Si_{19}Al_5O_{60}(OH)_{12}(Na)$	Hidrotermal bozuşmayla oluşur.
	Hektorit	$Li_2(Al,Fe,Mg)(Si_2Al_2)O_5OH$	Hidrotermal ayrışmayla oluşur.
İllit potasyum içerir	Muskovit	$K_2O_3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Birbirinden kolayca ayrılan ince yapraklar halindedirler.
	Biyotit	$K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH)_2$	Kahverengi veya siyah mikadır.
	Flogopit	$H_2KMg_3Al(SiO_4)_3$	Kristalleşmiş dolomitler ve dolomitik mermerlerde siyah lekeler şeklinde görülür.
Klorit magnezyumlu sulu alüminyum silikatlı killer	Atapuljit	$Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Ayrışma veya kimyasal yolla çökelmek suretiyle oluşur.
	Sepiyolit	$Mg_2Si_3O_8 \cdot 2H_2O$	Uygun karasal şartlar doğunca manyezitin magnezyum hidrosilika dönüşmesiyle oluşur.
	Allofan	$Al \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$	Ayrışma ile oluşur.

Zeminler homojen değil heterojen malzemelerdir yani fiziksel ve mekanik özellikleri tabaka içinde özellik gösterebilir. Bu durum zemin davranışlarında değişimlere yol açtığı nazar-ı dikkatten kaçmamalıdır. Bu sebeple zemin tanımı yaparken zeminin endeks özelliklerinin iyi bilinmesi yanında, zeminin heterojen olduğu unutulmamalıdır.

2.4. Problemlı Kil Grupları

Geoteknik mühendisliğinde olağandışı olarak kabul edilen ve sorun yaratma potansiyeli olan ve dolayısıyla özel işlemler gerektiren bazı zemin grupları mevcuttur. İri daneli yani kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma ve kebilen zeminler ve ince daneli yani kohezyonsuz zeminlerde şişen killer, dispersif killer ve lateritler üzerinde durulması gereken problemlı zemin gruplarının en önemlileridir. Bu bölümde sadece problemlı kil grupları tanımlanacaktır.

2.4.1. şişen killer

Özellikle montmorillonit minerali iererin killer kuru mevsimlerde büzülme ve yağışlı mevsimlerde veya su ile temans olduğunda büyük hacim değiştirerek genleşirler. Bu tarz killere genleşen veya şişen killer adını vermekteyiz. Bu genleşme üzerindeki yapılara zarar verecek boyutta olabilir. Aynı durumda kuru mevsimlerdeki büzülme de zeminde çok büyük oturmalar oluşturarak üzerindeki yapıya zarar verebilir. Yüksek şişme basınçları yüksek nemli killerde bile görülebilir. Bu tarz hacimsel değişikliklere yol açan ve üzerindeki yapılara zarar veren killerin bu özelliğini engellemek olduğa zordur.

2.4.2. Dispersif killer

Durgun suda dağılan ve düşük hızlı akan suda bile erozyona uğrayabilen ince taneli zeminler dispersif olarak adlandırılırlar. Normal killer genelde suyun akış hızı çok yüksek değilse erozyona uğramazlar. Her zaman olmasa da doğal dispersif killerle örtülü alanlarda dik erozyon kanalları ve tünelleri görülür. Bu durum dispersif killerle yapılan toprak setlerde de görülür. Örneğin toprak barajlarda dispersif killerin bulunması borulanma denilen erozyon tünellerinden büyük miktarda su sızıntısına neden olur. Dispersif kille yapılan setleri işlevsel halde tutabilmek için geniş çaplı bir tamirat gerekir. İnaşat yapım aşamasında dispersif killerin bu olumsuz özelliğini fark etmek oldukça zordur. Çünkü borulanma durumu genellikle rezervuarda su tutulmaya başlanmasından kısa bir süre sonra

ortaya çıkar. Bu borulanma suyun oturma ve hidrolik kırılma neticesinde çok küçük çatlaklara girmesinden dolayıdır. Suyu maruz kalan kil partikülleri süspansiyona girer ve gittikçe artan oranda erozyonla sonuçlanır. Dispersif kilin erozyonunu ağırlık olarak %1-%2 oranında alüminyumsülfat ya da sönmemiş kireç kullanarak azaltmamız mümkündür. Dispersif killerin kullanma zorunluluğu olduğu yerlerde, özellikle barajların çekirdek zonlarında, dispersif kil ile su yüzeyi arasındaki zemindeki güçlü sızıntılar yalıtılmalıdır. Bu durum dispersif kilin aşınabilirliğini yani erozyonunu azaltmaktadır. Son zamanlarda bu erozyonun kontrolü için geosentetik malzemelerin kullanımı da yaygındır(McCarthy, 2010).

2.4.3. Lateritler

Lateritler; özellikle tropic bölgelerde görülen volkanik kayanın yüksek sıcaklık ve bol yağış sonucunda meydana gelen yerinde oluşmuş zeminlerdir. İçeriğindeki Kalsiyum, Magnezyum ve Potasyum oranları çok düşüktür. Genellikle kırmızı renklidir. Zemin bünyesinde serbest demiroksitin bulunmasına bağlı olarak lateritin çimentolaşma özelliği sayesinde bina yapımında tuğla amacıyla kullanılabilir. Fakat bu tarz zeminler inşaat malzemesi olarak kullanıldıkları zaman stabil olmadığı ve taşıma, deneyleme, kazı veya yerleştirme işlemleri sırasında çok fazla aşınmaya maruz kaldıkları görülmüştür. Laterit bir zemin önce kurutulup sonra ıslatılırsa özelliklerinde büyük bir olasılıkla önemli değişiklikler oluşur. Genellikle plastisite ve sıkıştırılabilirlik özellikleri değişir. Yapılan incelemeler neticesinde laterit malzemeler sudan ve tekrarlayan ağır yüklemelerden korunulabilirse başarıyla hizmet edebilir. Ayrıca özellikleri çimento ve kireç gibi katkı maddeleriyle iyileştirilebilir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kayma direncinin ilk incelenmesini yapan Coulomb(1776), zeminin kayma direncini tek parametre ile göstermiştir. Daha sonra Tresca 1869'da bu konu üzerine ilave çalışmalar yapmıştır. Kayma direncinin tarihsel başlangıcı bu çalışmalar kabul edilir. Bir matematikçi olan Otto Mohr(1911) Coulomb'un bu yaklaşımını geliştirerek, çok farklı bir formülasyon olan ilk geçerli göçme hipotezini oluşturmuştur. Yalnız Terzaghi'ye kadar hiç bir bilim adamı efektif gerilmeyi göz önüne almamıştır. Daha sonra Terzaghi efektif gerilme kavramının kayma direncine olan etkisini de katarak, bu araştırmacıların bileşimi ile geoteknikte kayma direnci uygulamasının nihai haline ulaşmıştır(Önalp, 2002).

Zeminlerin gerime – şekil değiştirme davranışı diğer inşaat malzemelerine göre oldukça karmaşıktır. Kayma direnci göçme meydana gelmeden zeminin karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesidir. Bir zeminin kayma direnci temellerin tasarımında, karayolu ve havaalanı tasarımında şev stabilite problemlerinde ve yanal basınca maruz kalan iksa ve benzeri yapılarda önemli bir faktördür. Kayma mukavemeti bahsedilen yapıların tasarımında yani geoteknik mühendisliğinde çok önemli bir zemin parametresidir. Fakat dikkat edilmesi gereken en önemli husus; Yükleme, drenaj koşullarına ve zamana bağlı değişim göstermesidir. Bu sebeple doğru sonuçlara ulaşabilmek için, laboratuvarında yapılan çalışmalarda arazi koşullarını tamamen sağlayabilmek gerekir.

Önalp (2002), zeminlerin kayma direncinin en sade haliyle boşluk oranı (e) zeminin türü, yapı dokusu ve etkisinde kaldığı gerilmeler(σ) olarak tarif etmiştir. Her ne kadar zeminlerin kayma direncini göçme meydana gelmeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlamış olsak da, kayma direnci zeminlerin kendine özgü bir özelliği değildir. Yükleme ve drenaj koşullarına, zamana bağlı olarak değişim gösterebilir.

Zeminlerin kayma direnci kavramını üç ayrı bölüme ayırırsak, tanımlamak daha kolay olabilmektedir.

- a) İri daneli (kum-çakıl) zeminlerin kayma direnci (zamandan bağımsız)
- b) Drenajsız koşullar altında bulunan çok yumuşak kohezyonlu zeminlerin kayma direnci
- c) Drenaja müsaade edilen killi zeminlerin kayma direnci

Kayma direncini belirlemek için önceliğimiz, çalışma yapılacak zeminin geoteknik özelliklerinin yukarıdaki bölümlerden hangisinin kapsamına girdiğini tespit etmek olmalıdır. Zeminin geoteknik özelliklerini belirledikten sonra, problemin çözümü için laboratuvarında gerçeğe yakın modelleme yapabiliriz.

Mühendislikte göçmeyi tanımlamanın bir çok yolu vardır yani bir çok göçme kriteri vardır. Zeminlerin heterojen bir malzeme olduğundan daha önce bahsetmiştik. Ayrıca zeminin elasto-plastik bir malzeme olduğu bilindiğinden dolayı bir çok göçme kriteri zeminler için kullanılamaz. Hatta zeminler için geçerli olan göçme hipotezleri de her zaman iyi sonuçlar vermeyebilirler. Bu duruma rağmen zeminler için en çok tercih edilen ve uygulamada en yaygın kullanılan göçme hipotezi Mohr-Coulomb göçme hipotezidir(Holtz vd., 2015).

3.1. Mohr – Coulomb Kırılma Hipotezi

Zeminlerin kayma direncini belirlemek için olan bu yöntem 1776 yılında Coulomb'un kayma direnci için geliştirdiği matematiksel bir ifadenin, 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmesiyle günümüzde de en yaygın kullanılan yöntem olan Mohr-Coulomb Kırılma teorisidir. Kayma hareketinin gerçekleşmesi için zemin blokları arasında uygulanan kuvvetin sürtünme kuvvetinden daha büyük bir değerde olması gerekir.

Tresca-Coulomb hipotezi yatay bir doğru iken Mohr-Coulomb hipotezi eğimli bir doğruyu göstermektedir. Zeminlerin gevrek değil sünek bir malzeme olduğu kabul edilmektedir ve bu teoriler bu kabulden yola çıkarak yapılmıştır. Bu teorilerden bazıları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Çizelgenin en alt kısmında ise bir gevrek kırılma teorisi verilmiştir bu teorinin verilmesinin amacı gevrek kırılmanın zemin gibi sünek kırılma

gerçekleştiren teorilerle karşılaştırılmasıdır. Burada; σ sigma malzemenin çekme dayanımı k ise denklem değişmezi olan sabit bir katsayıyı göstermektedir(Çizelge 3.1)

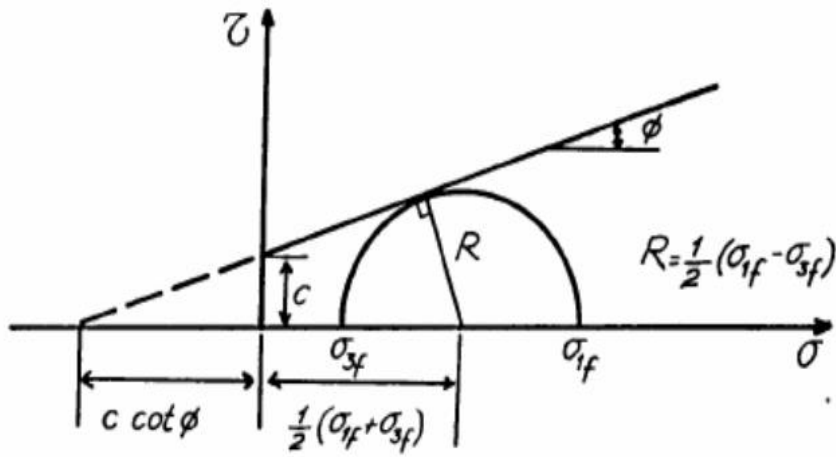
Çizelge 3.1. Kırılma-Yenilme Kriterleri (Önalp, 2007)

Teori	Bağıntı
Tresca-Coulomb	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k_1$
Geliştirilmiş Tresca	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_2 \times (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_3^2$
Geliştirilmiş Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_4^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2$
Mohr-Coulomb	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_5^2(\sigma_1 + \sigma_3)$
Griffith (gevrek)	$\sigma_1 = \sigma_1(\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0) (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_6(\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0)$

Mohr yenilme kriterine göre, kayma gerilmesi kayma düzlemi üzerinde normal gerilmenin belirli bir değerine ulaşırsa yenilme meydana gelir. Mohr Hipotezi üzerinde yapılan araştırmalar sonrasında Cloumb'un sürtünme yasası ile birleştirilerek Mohr – Cloumb Göçme Hipotezi oluşturulmuştur. Bu hipoteze göre zeminin kayma mukavemeti aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterilen eğri ile temsil edilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere normal gerilmeler yatay eksenle kayma gerilmeleri düşey eksenle gösterilmektedir. Göçme zarfı diye adlandırılan bu eğrinin altında kalan gerilmelerde göçme oluşmaz. Mohr daireleri bu zarfa ulaştığı anda zeminde göçme meydana gelmektedir. Göçme zarfı gerçekte bir eğri ile temsil edilmesine rağmen uygulamada bu eğri doğrusal olarak kabul edilir. Bu doğrunun yatay eksenini kestiği değer 'c' olarak adlandırılırken, yatay ile yaptığı açı 'Φ' olarak gösterilir. Bu durumda kayma mukavemeti aşağıdaki denklemde gösterilir(Özaydın, 2011).

$$\tau = c + \sigma \times \tan\Phi \quad (3.1)$$

Burada; c ve Φ kayma mukavemeti parametreleri olarak adlandırılır. 'c' kohezyon terimini ifade ederken Φ kayma mukavemeti açısı veya kayma direnci açısı olarak tanımlanır. Kayma mukavemeti parametreleri belirli bir zemin için sabit değerlerdir, yapılan yüklemelere ve direnaja şartlarına göre değişim göstermektedirler. Danelerin birbirini tutma özelliği olan kohezyon(c)'un, aynı zeminin farklı koşullarda yüklemeye tabi tutulması ile bu katsayı değişebilmektedir. Bu sebeple c parametresi zeminin bir fiziksel özelliği olmayıp, sadece belirli koşullarda sürtünme direncini ifade etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Göçme durumundaki asal gerilmeler arasındaki ilişki

Göçme zarfına aynı zamanda mukavemet zarfı da denir. Çünkü bu doğrunun denklemi zeminin kayma mukavemetini vermektedir. Mohr dairesinin göçme zarfına teğet olduğu noktadan çizilen doğru, göçme düzleminin eğimini yani en büyük asal gerilme düzlemi ile yaptığı açıyı vermektedir. Göçme düzleminin eğimi α_f ile gösterilir ve

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

şeklinde hesaplanır. Tam göçme anında; göçmeye yol aşan asal gerilmeleri ile kayma mukavemeti arasında aşağıdaki ilişkiyi aşağıdaki trigonometrik bağıntı ile vermek mümkündür.

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

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

3.2. Efektif Gerilmeler Ve Kayma Direnci

Geoteknik mühendisliğinde; zemin türü, yükleme hızı ve drenaj koşullarına bakılarak stabilite problemlerinin hangi yaklaşımla yapılacağına karar verilir. Bu yaklaşım çeşitleri drenajlı ve drenajsız yaklaşımlardır. İri daneli zeminler yüksek geçirimsizliğe sahip olduğundan dolayı drenajlı durumun hakim olduğu kabul edilir. İnce daneli zeminlerde ise zemin davranışının ve direncinin efektif gerilmeler tarafından kontrol edildiği bilinmektedir. Buna rağmen pratik olarak stabilite hesapları yapmak için drenajsız kayma direnci parametrelerini kullanabiliriz. Yükleme hızı oldukça hızlı olduğu yani suyun drenajı için yeterince zaman olmadığı durumlarda drenajsız kayma direnci kullanılmaktadır. Örnek olarak normal konsolide killer üzerine yapılan dolguların ve yapı temellerinin stabilitesi verilebilir. Bu durumda ani yenilmeler meydana gelebilir. Bunun sebebi hızla artan gerilmeler sonucunda kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistemin dışına çıkamadan kayma gerilmeleri almasıdır.

Boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma direncinin belirlenmesinde önemli bir etkidir. Çünkü drenajlı kayma direncini hesaplamak için efektif gerilmeler kullanılır ve herhangi bir noktadaki efektif gerilme o noktadaki toplam gerilme değerinden boşluk suyu basıncının çıkartılmasıyla bulunur ($\sigma' = \sigma - u$). Bu durumda Mohr-Coulomb geçme kriterine göre kayma mukavemetini veren bağıntıyı efektif gerilmeler cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Özaydın, 2011).

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan\Phi' \quad (3.5)$$

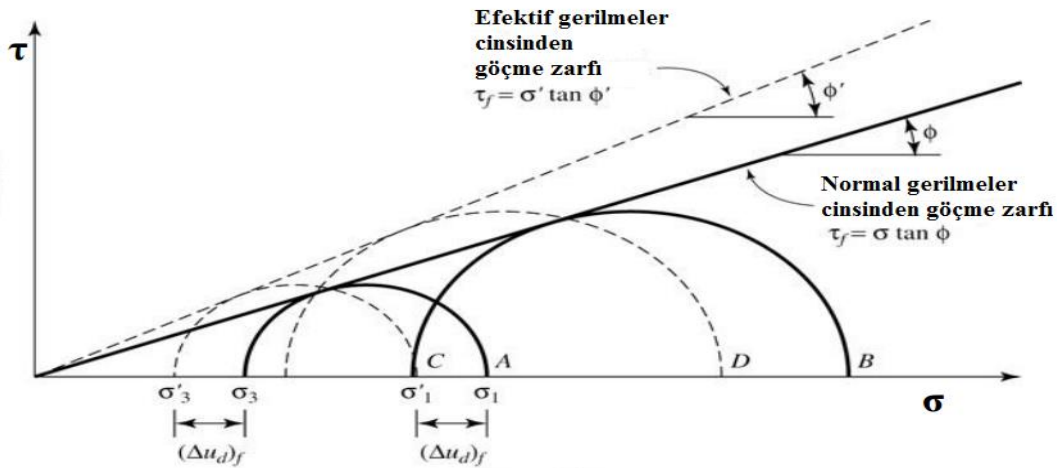
Bu eşitlikte; σ' efektif gerilmeyi, c' ve Φ' efektif gerilmeler cinsinden kayma direnci parametrelerini göstermektedir.

Boşluk suyu basıncı her doğrultuda eşit olarak etkilenir. Bu sebeple efektif asal gerilmeler aşağıdaki şekilde olmaktadır. Burada u_f boşluk suyu basıncının göçme anındaki değeridir.

$$\sigma_1^1 = \sigma_1 - u_f \quad (3.6)$$

$$\sigma_3^1 = \sigma_3 - u_f \quad (3.7)$$

Toplam ve efektif kayma dairelerinin çapları birbirine eşittir. Efektif kayma daireleri, toplam kayma dairelerinin u_f kadar sola kaydırılması ile bulunur. Kayma dairelerine çizilen teğetlerin düşey ekseni kestiği nokta, kohezyon(c) değerini ve çizilen teğetin yatay ile yaptığı açı kayma mukavemeti açısını(Φ) değerini verdiğini daha önceden bahsetmiştik. Bu durumda Şekil 3.2'den de anlaşılacağı üzere; daima efektif kohezyon değeri(c'), normal kohezyon değerine(c) göre daha küçük bir değere sahiptir. Aynı zamanda efektif kayma mukavemeti açısı(Φ'), normal kayma mukavemeti açısına(Φ) göre daima daha büyük bir açı olur.

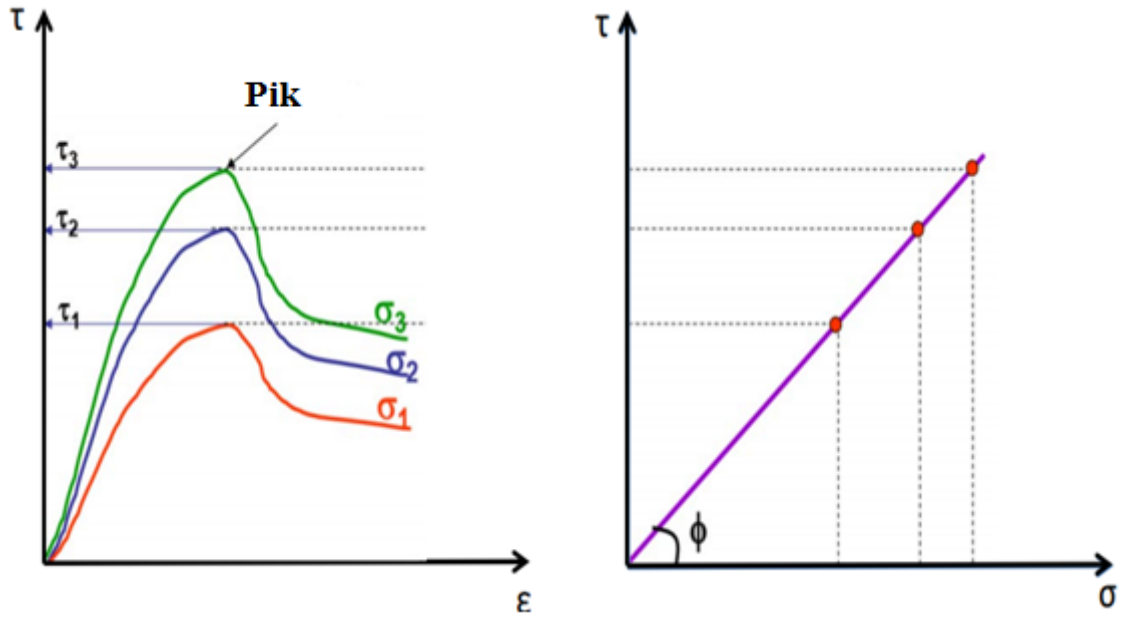


Şekil 3.2. Efektif ve toplam gerilmeler cinsinden Mohr gerilme daireleri

3.3. Kumların Kayma Direnci

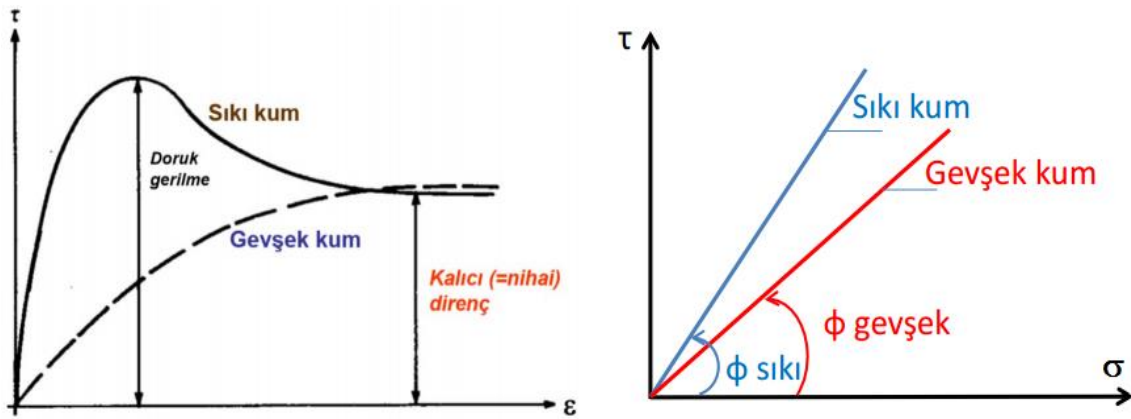
İri daneli ve kohezyonsuz olarak nitelendirilen en belirgin özellik yerçekimi yani kütle kuvvetlerinin hakim olmasıdır. İri taneli zemin olarak nitelendirilen kumlar, çakıllar ve bunların hakim olduğu zeminlerde kohezyon parametresi yok denecek kadar azdır. Bu sebeple bu tarz zeminlerde kohezyon sıfır alınmaktadır ve kohezyonsuz zeminler olarak adlandırılmaktadır. İri taneli zeminlerde permeabilite (geçirgenlik) çok yüksektir. Bu nedenle yükleme esnasında boşluk suyunun drenajı hemen gerçekleşir. Boşluklarda su kalmadığından dolayı yükleme direk efektif gerilme tarafından karşılanır.

Danelerin minerolojik kökeni ve biçimi, danelerin boyutu ve granülometrisi, dane yüzeyi pürüzlülüğü, su, aşırı konsolidasyon veya öngerilme, birim hacim ağırlık ve boşluk oranı, doygunluk derecesi ve etkiyen efektif gerilmeler kumların kayma dayanımına etkiyen parametrelerdir. Bu parametrelerin etkisini kısaca açıklayacak olursak; köşeli daneler arasında sürtünme ve kilitlenme daha büyük olduğundan kayma direncini arttıran faktörlerden biridir. İyi derecelenmiş zeminlerin kayma direnci açısı daha yüksektir. Birim hacim ağırlık arttıkça ve boşluk oranı azaldıkça kumun kayma direnci artmaktadır. Çimentolanma kumda kayma direncini arttırmaktadır. Aşırı Konsolidasyon Oranı (A.K.O) kumların kayma direncini arttıran bir başka faktördür. Kumun kayma direnci laboratuvarında en kolay kesme kutusu deneyi ile belirlenir. Kesme kutusu deneyinde kumun kayma direncini ölçmek için aynı sıklıkta hazırlanmış en az üç numune gerekmektedir. Her bir numune farklı gerilmeler altında belirlenen sabit bir kesme hızında kesilmektedir. Buradaki kesme hızı çok önemlidir. Kesme hızı daneler arasındaki boşluk suyunda basınç oluşmayacak şekilde olmalıdır yani suyun drenaj hızı kesme hızından daha büyük olmalıdır. Kumlar yüksek geçirimsizliğe sahip olduğundan kesme hızı killer için daha büyük önem arz etmektedir. Her bir numunenin kayma deformasyonuna karşı kayma gerilmesi ölçülmektedir. Her deney için en büyük kayma gerilmesine (τ) karşılık gelen normal gerilme (σ) çizildiğinde numuneye ait kırılma zarfı elde edilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi

Yatay bir düzlemde serbest dökülerek oluşturulmuş bir kuru kum yığınının şev açısı o kumun gevşek durumdaki sürtünme açısına eşittir. Şekil 3.4'de gevşek ve sıkı kumların birim deformasyon-kayma gerilmesi ve göçme zarfları arasındaki farklar gösterilmiştir.



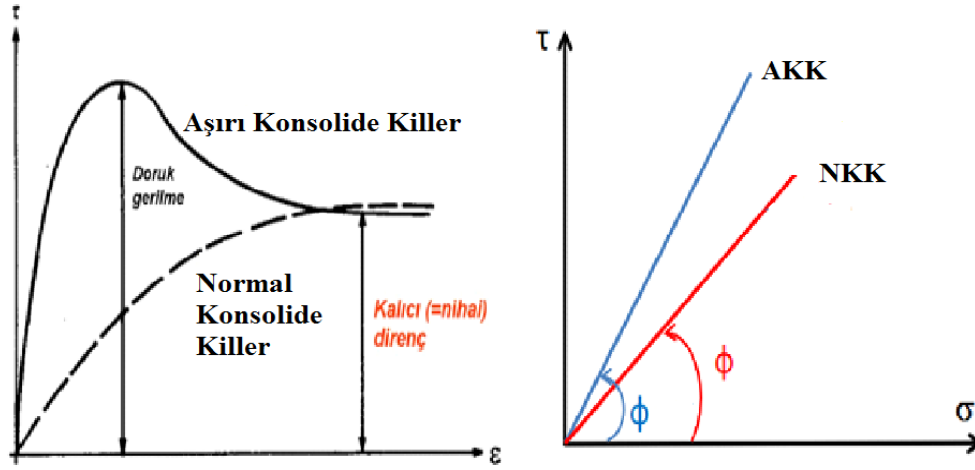
Şekil 3.4. Gevşek kumlar ve Sıkı kumlar için kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi - normal gerilme ilişkisi

3.4. Killerin Kayma Direnci

Killerin kayma direncini kumlardan ayıran en önemli özellik kumların yüksek geçirimsizliğidir. Buna karşılık killerde de jeolojik etkenler yani daha önce maruz kaldığı yükler kayma direncini belirleyen önemli etkidir. Killerin kayma direnci; efektif gerilme düzeyi, kilin plastisitesi, çimentolanma, daneler arası çekme veya itme kuvveti, su muhtevası, kesilme hızı, numunenin gevrekliği, ortamın anizotropluğu, ölçüm tekniği ve numunenin kalitesinden etkilenmektedir. Bu sebeple killerin kayma mukavemetini hesaplamak kumlara göre daha karmaşık ve zor bir problem olmaktadır. Çünkü arazideki bir kil tabakasının suya doygunluk derecesi(S), başlangıç gerilme durumu ve gerilme tarihçesi ile kayma gerilmelerinin oluşması sırasındaki yükleme ve drenaj koşulları kilin kayma mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir(Önalp, 2007).

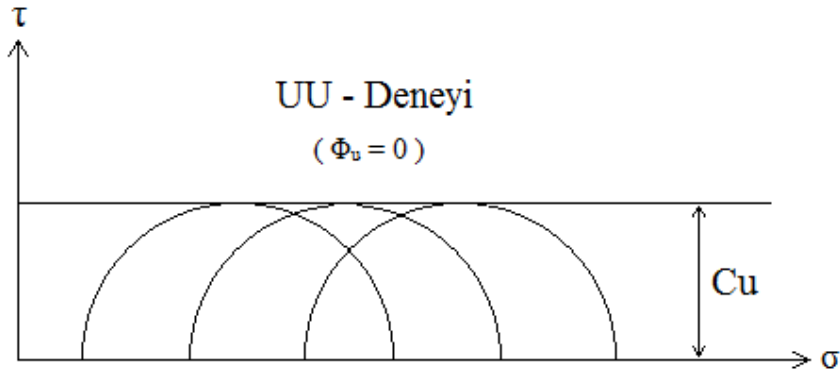
Yapılan çalışmalar killerin davranışının daha açık bir şekilde tanımlanabilmesi için, jeolojik kökenlerine göre üç ana grup altında incelenmesinin gerekli olacağını göstermiştir. Bu üç grup normal yüklenmiş killer, aşırı yüklenmiş killer (aşırı konsolide killer) ve fisürlü killerdir. Normal yüklenmiş killere, normal konsolide killer (NKK) de denir. Bu killerin mevcut gerilmeleri kilin tarihinde gördüğü en yüksek gerilmelerdir. Aşırı konsolide killer(AKK), daha önceden maruz kaldığı yük, şu anda mevcut gerilmeden daha büyük killerdir. Fisürlü kelimesinin anlamı ince çatlaklı demektir. Fisürlü killerin kırılma yüzeyleri beklenenden farklı olabilir ve dolayısıyla dayanımları beklenenden düşük olabilir.

Normal ve aşırı konsolide zeminlerin kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu davranışları birbirinden farklıdır. Aşırı konsolide killerin kayma davranışı sıkı kumların kayma davranışına benzemektedir. Normal konsolide killerin ise kayma davranışı gevşek kumların kayma davranışına benzemektedir. Şekil 3.5'den de görüleceği üzere aşırı konsolide killerin aynı defarmonyona karşılık gelen kayma dirençleri normal konsolide killere göre daha büyüktür.



Şekil 3.5. Normal konsolide killer ve Aşırı konsolide killer için kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ve kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi

Killer için laboratuvarında yapılacak en ideal deney üç eksenli basınç deneyidir. Çünkü üç eksenli basınç deneyi konsolidasyonsuz-drenajsız(UU), konsolidasyonlu-drenajsız(CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı(CD) deneyidir. Arazideki koşullara bağlı olarak, en uygun deney laboratuvarında modellenmelidir.

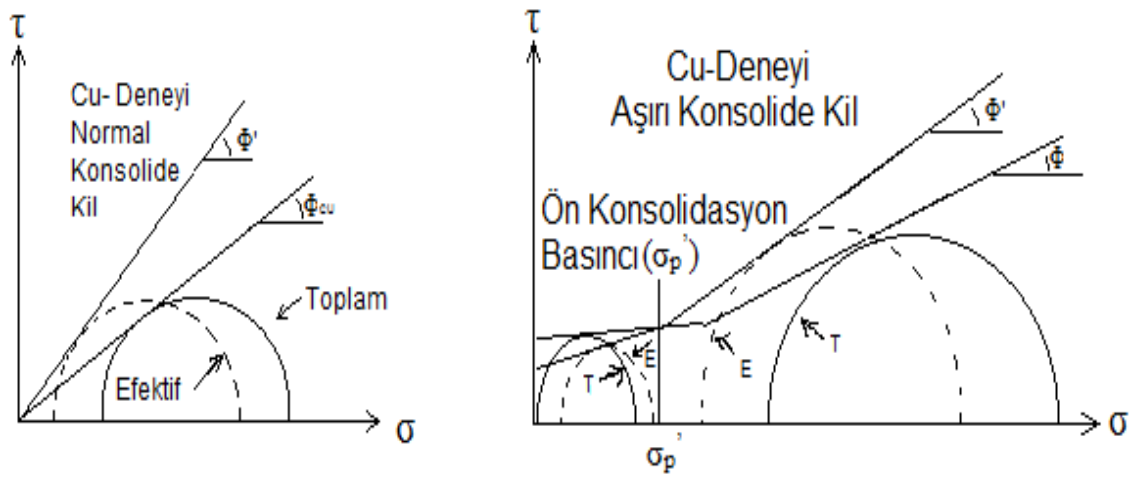


Şekil 3.6. Konsolidasyonsuz-Drenajsız kayma mukavemeti zarfı

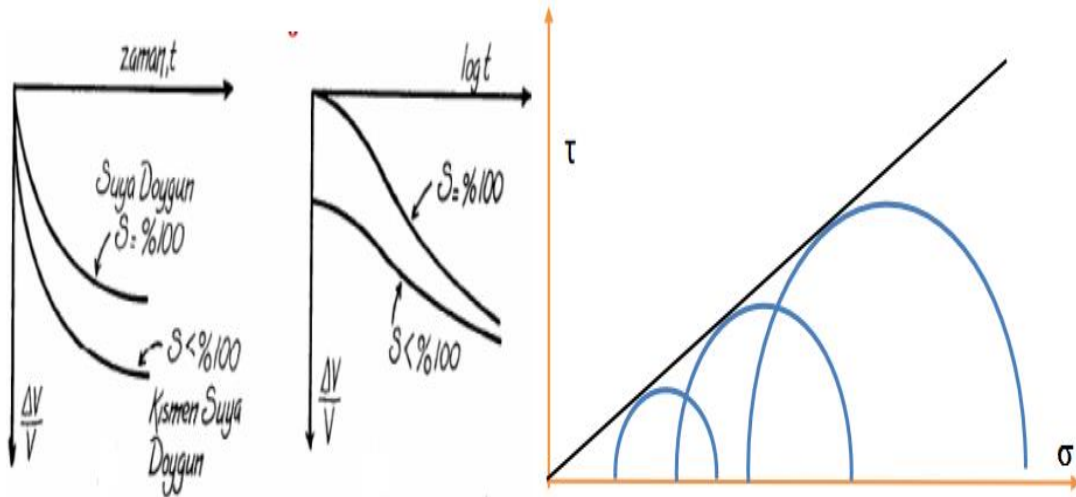
UU deneyi; arazideki kil tabakasının uygulanan dış yükler anında konsolidasyona uğramaması yani hızlı olarak yüklenmesi durumunda oluşan kayma mukavemeti parametrelerini bulmak için kullanılır. Bu durumda; kayma gerilmesi zarfı yatay olduğundan dolayı kayma mukavemeti açısı(Φ_u) sıfır olur ve kayma gerilmesi kohezyon katsayısına eşit olur(Şekil 3.6)

$$\tau_f = C_u \quad (3.8)$$

CU deneyi; arazide kil tabakasının konsolide olduktan sonra hızlı yüklemeye yani drenajsız yüklemeye tabi olması durumunda yapılan laboratuvar deneyi çeşididir. Laboratuvarda bu deneyi yapmak için önce numune arazide bulunduğu basınca eşdeğer bir basınca maruz bırakılarak konsolide edilir. Daha sonra drenaja müsaade edilmeden yükleme yapılır ve zeminin kayma parametreleri hesaplanır. Normal konsolide killerde kayma gerilme zarfları orijin noktasından geçer yani normal kohezyon efektif kohezyona eşit ve sıfır olur. Aşırı konsolide killerde ise eğimleri farklı iki doğrusal kısımdan oluşur(Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Normal konsolide ve aşırı konsolide killerde gerilme zarfları



Şekil 3.8. Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerden elde olunan kayma mukavemeti zarfı ve doygunluk derecesinin oturmaya etkisi

CD deneyi; arazideki kil tabakasının konsolidasyonu tamamlandıktan sonra çok yavaş olarak ve boşluk suyu basınç artışlarının oluşmasına müsaade edilmeden yüklenmesi durumunun laboratuvarında modellenmesidir. Sürekli sızıntı kuvvetlerinin etkidiği bir baraj çekirdeği ya da bir şevin duraylılığı modellerinde bu deney kullanılır.

Normal konsolide killerde CD durumunda kohezyon sıfır olurken, aşırı konsolide killerde ön konsolide basıncından daha düşük basınçlarda kohezyon sıfırdan büyük olmaktadır. Yeraltı su seviyesinin altındaki zeminler suya doymun olmaktadır. Ayrıca yeraltı su tabakasının üstündeki bazı kohezyonlu zeminler kapilarite etkisiyle doymun hale gelebilmektedirler. Bu sebeple geoteknik mühendisliğinde meydana gelen problemlerin bir çoğunun çözümü için suya doymun kil zeminlerin davranışlarının iyice bilinmesi gerekir. Arazide bazı kil tabakaları ve sıkıştırılmış toprak dolguları tamamen suya doymun olmamaktadır. Suya doymun olmayan killerin oturması, suya doymun killere göre daha fazladır(Şekil 3.8). Bu tür zeminlerin kayma direncini belirlemek oldukça güçtür. Çünkü suya doymun olmayan zeminlerde su emmesinin de etkili olması sebebiyle bu tür ortamlarda gerilme birim deformasyon ilişkisi daha karmaşıktır. Geoteknik mühendisleri genellikle güvenli tarafta kalmak ve hesapları basitleştirmek için bu tarz suya doymun olmayan zeminleri doymunlaştırarak bulunan kayma direncine göre tasarım yaparlar.

3.5. Kayma Direncinin Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi

Kayma direnci parametreleri araziden alınan numunelerin laboratuvarında çeşitli deneyler yapılarak gerilme-şekil değiştirme davranışının grafiğinden elde edilen kayma parametrelerine bağlı olarak hesaplanır. Laboratuvarında yapılan deneylerin sağlıklı olabilmesi için, laboratuvarında arazi koşullarının olabildiğince benzer modellenmesi gerekmektedir. Bazı zeminlerde örselenmemiş numune almak oldukça güçtür. Bu tarz zeminler kumlu zeminler ve yumuşak killerdir. Bu durumda arazi deneylerini yapmak gerekmektedir. Standart Penetrasyon Deneyi(SPT), Koni Penetrasyon Deneyi(CPT), Dilatometre Deneyi ve Veyn deneyidir. Bunların içerisinde en fazla kullanılan deney olan SPT deneyinin sonuçları ile zeminlerin drenajsız kayma direnci belirlenebilir.

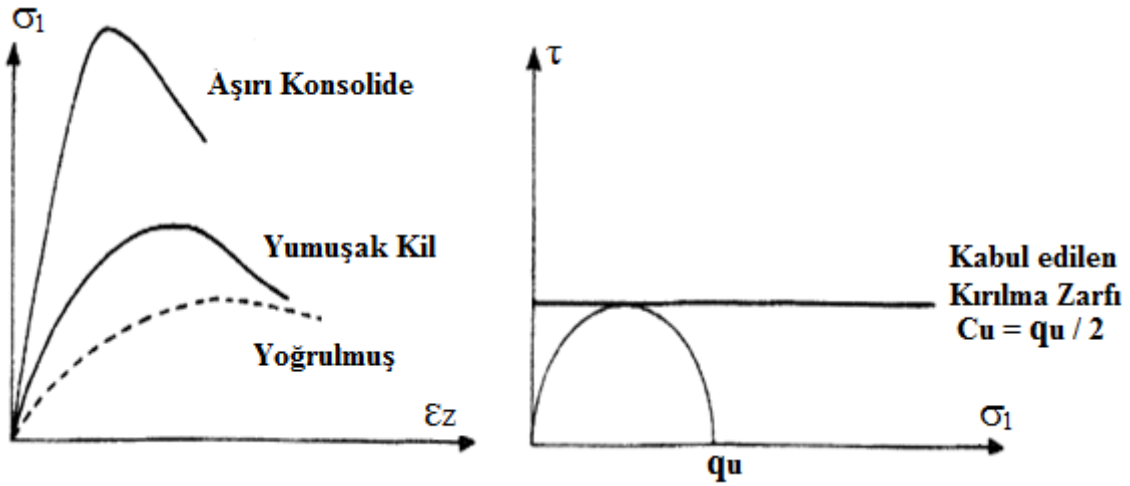
Zeminlerin kayma direncinin laboratuvarında belirlenebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar; numune alımı sırasında örselenme yapılmaması, zeminde mevcut normal gerilmelerin örnek alınması sonucunda sıfıra düşmesi hususu ve numunenin laboratuvara taşınması sırasında su içeriğinin değişmemesidir. Bu sebeplerden dolayı kayma direnci parametreleri farklı çıkabilir. Zeminlerin kayma parametrelerini hesaplamak için laboratuvarında kullanılan en yaygın yöntemler; kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve serbest basınç deneyidir.

Laboratuvarında yapılan deneyler örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılır. Kayma direnci bu deneyler yapılarak hesaplanır. Zeminin kayma direnci numuneye uygulanan kesme veya farklı normal gerilmelerle ölçülür. Serbest basınç, kesme kutusu, basit kesme ve üç eksenli basınç deneyleri en yaygın kullanılan laboratuvar yöntemleridir(Önalp,2002).

3.5.1. Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyine, tek eksenli deney de denir. En basit kayma direnci hesaplama yöntemidir. Zemine tek yönde uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği dayanıma tek eksenli dayanım diyebiliriz. Genellikle yüzeye çok yakın yerlerde tek eksenli dayanım olayı gerçekleştirilebilir. Silindirik zemin numunesinin yalnızca eksenel doğrultuda yani dış basınç uygulanmadan düşey basınca maruz bırakılarak deforme olması sonucunda çizilen grafik ile elde edilen maksimum gerilmeye serbest basınç dayanımı denir yani bu deneyde numunede kırılma oluşana kadar eksenel yük arttırılır. Bu yük artışları altında numunenin şekil değiştirmesi yani düşey deformasyonu ölçülmektedir. Belli bir seviyeden sonra numunedeki deformasyon artmasına rağmen aldığı yük azalmaktadır. Eksenel gerilmenin maksimum değerinden sonra göçme kabul edilir ve bu değere zeminin basınç direnci(q_u) denir(Şekil 3.9). Zeminin basınç direnci ile drenajsız kayma direnci(c_u) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

$$\tau = c_u = q_u / 2 \quad (3.9)$$



Şekil 3.9. Serbest basınç deneyinde gerilme-birim deformasyon eğrisi ve kırılma zarfı

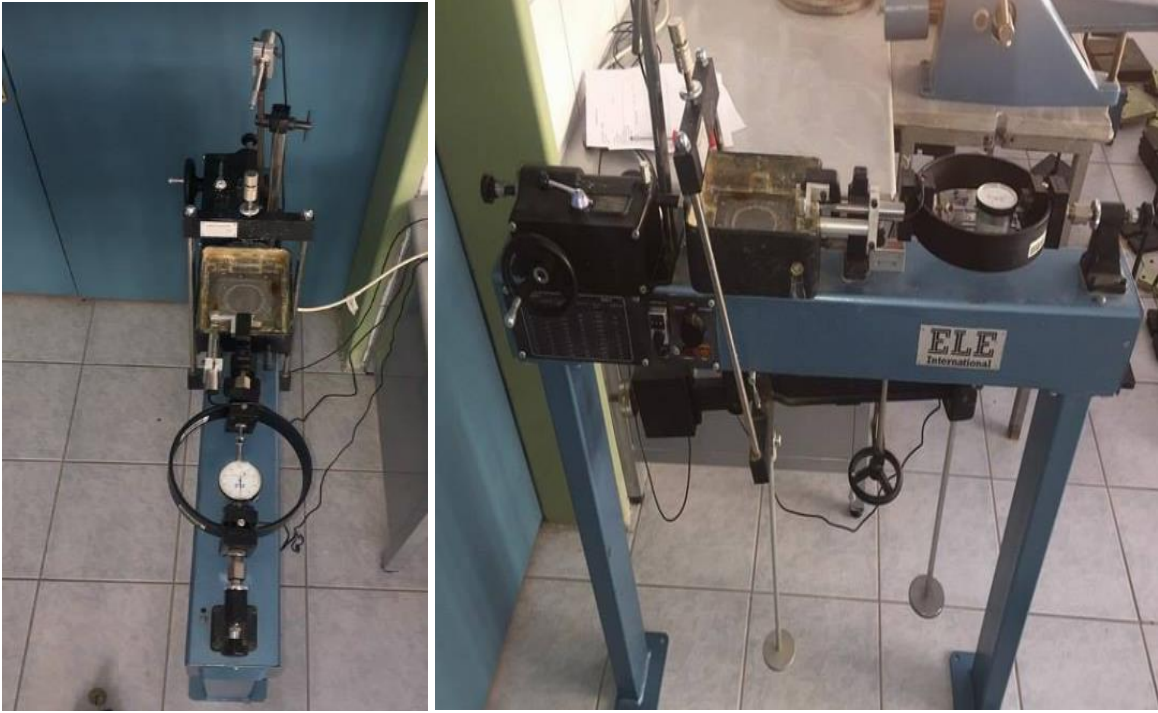
Serbest basınç deneyinin üç eksenli deneyden farkı hücre su içine konulmaz ve yanal gerilmeler uygulanmaz. Dolayısıyla bu deney herhangi bir yanal destek almadan kendini ayakta tutabilen zeminlerde uygulanır. Bu deney kum zeminler için uygulanması mümkün değildir. Sadece kil zeminler üzerinde uygulanan deneydir. Serbest basınç deneyi ucuz ve basit bir deneydir. Bu sebeple zeminlerin drenajsız kayma direncini belirlemede en çok kullanılan yöntemdir. Şekil 3.10'da Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan serbest basınç deney aletinin genel görünümü ve serbest basınç numunesinin yenilme anı görülmektedir.



Şekil 3.10. Serbest basınç deney aleti(ESOGÜ) ve serbest basınç numunesinin yenilme anı

3.5.2. Kesme kutusu deneyi

Direk kesme deneyi zeminlerin en eski kayma direnci ölçüm deneyidir. Coulomb bundan yaklaşık 240 yıl önce bu deneyi kullanmıştır. Bazı gelişmeler göstermiş olsa da iki asır daha uzun zaman önce kullanılan kesme kutusu deney aleti, günümüzde kullanılan deney aletine benzemektedir. Günümüzde kullanılan kesme kutusu deney aleti ASTM D3080'dir. Kesme kutusu deneyinin amacı kohezyonlu veya kohezyonsuz zemin numunesinin kayma parametrelerini bulmaktır. Bu deney kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için uygun olmakla birlikte, daha ziyade kumlar için kullanılması gerekir. Bunun sebebi kumlar kendini ayakta tutamayan malzemelerdir. Şekil 3.11'de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan kesme kutusu deney aletinin genel görünümü görülmektedir.



Şekil 3.11. Kesme kutusu deney aleti(ESOGÜ)

Kesme kutusu; dikdörtgen kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutudur. Kesme kutusu içerisine yerleştirilen numune kare, dikdörtgen veya daire kesitli olabilir. Deney düzeneğinde yük ve deformasyonların okunabileceği saatler bulunmaktadır. Numune önce sabit düşey bir yük altında konsolide edilir. Daha sonra uygulanan sabit bir kesme kuvveti altında kesme kutusu deney aletinin üst parçası sabit tutulurken alt bölümü yatay bir düzlemde sabit bir hızda hareket ederek numunenin ortasından geçen bir düzlem boyunca kesmeye zorlamaktadır. Uygulanan bu kesme kuvveti kayma gerilmesine neden olur. Bununla birlikte kumlarda yükleme hızı yenilme bir kaç saatte olacak şekilde uygulanmaktadır. Bunun sebebi kumlarda zemin içinde bulunan suyun zeminin geçirirliliğinin fazla olduğundan dolayı, hızlı drenaj olmasıdır. Killerde drenaj hızı daha yavaş olduğundan dolayı uygulanan kesme kuvvetinin hızı da yavaş olmalıdır. Burada en önemli husus kesme hızının drenaj hızından daha düşük hızda olmasıdır. Aksi takdirde uygulanan yükler zeminin içinde bulunan boşluk suyu tarafından karşılanabilir ve gerçek değerinden yüksek dayanımlar elde edilebilir. Bu yükleme işlemi değişik yükler için tekrarlanarak zeminin kayma direnci parametreleri elde edilir. Kesme kutusu deney sonuçlarında kıyas yapabilmek için, aynı özelliklere sahip özdeş numuneler kullanılması gerekmektedir.

Yüksek geçirimsizliğe sahip iri daneli zeminlerde boşluk suyu basınçlarının oluşmayacağı kabul edilmektedir. İnce daneli zeminlerde ise drenajın sağlanacağı kabul edilerek uzun süreli stabilite analizinde efektif gerilmeye göre hesap yapılmalıdır(Mitchell, 1993).

Kesme kutusu deneyi özellikle kumlarda basit ve ucuz bir deneydir. Killerde drenaj çok zor olduğundan dolayı daha az güvenilir sonuçlar verir. Ayrıca; konsolidasyonlu-drenajsız koşullarda numune hangi hızla kesilirse kesilsin drenaj tamamen önlenememektedir.

Boşluk suyu basıncının ölçülememesi ve göçme olduğu anda asal gerilmelerin yönlerinin belirsiz olması deneyin dezavantajlarından birisidir. Bir başka dezavantajı ise numune içerisinde gerilme yığılmalarından dolayı uniform olmayan gerilme şartları oluşmasıdır. Fakat bütün bu dezavantajlarına rağmen kesme kutusu deneyi günümüzde en fazla kullanılan deneydir.

3.5.3. Basit kesme deneyi

Kesme kutusu deneyinde numune belirli bir düzlemden kesilir. Basit kesme deneyi belirli bir düzlemden numunenin kesilmesi sakıncasını gidermek için üstüste dizilmiş metal halkaların içine yerleştirilen silindir biçiminde numunenin öne itilmesi yoluyla 1940'lı yıllarda gündeme gelmiştir. Daha sonra halkaların yerine kauçuk kılıfla kaplanmış tel sargılı membran kullanılmıştır. Böylece numunede kesitin değişmez ve gerilme dağılımının uniform olması sağlanmıştır. İsveç, Norveç ve Cambridge modelleri bulunmaktadır. Model farklarının sebebi uygulanan yükün dağılışı için farklı materyal veya yöntem uygulanmasındandır. İsveç modelinde numunenin çevresi üstüste dizilmiş çelik halkalar iken, Norveç modelinde kauçuk kılıfın içinde tel sargı, Cambridge modelinde ise numune çevresinde rijit plaklar bulunmaktadır. Direk basit kesme sistemi yumuşak kil temellerde ve derin kazılarda zeminin heyelana neden olabilecek drenajsız ortalama kesme dayanımının ölçülmesi için kullanılmaktadır. Basit kesme deneyi numunede oldukça homojen bir kesme koşulu oluşturur. Bu homojen kesme gerilmesi sayesinde üç eksenli

basınç deneyleri gibi arazi koşullarındaki yüklemeye benzer modelleme yapılarak, başlangıç gerilmesi ve deformasyon olanaklarının oluşturulmasına olanak sağlanır. Bu deney aletinde sistem konsolidasyon yapabilmektedir ve belirli sürelerde deformasyon yük kontrolü yapılabilir. Basit kesme deneyi statik ve dinamik yüklerle yapılabilir ve kayma düzlemi kenarlarında gerilme yığınlarının oluşmasına müsaade etmemektedir. Bu sebeple basit kesme deneyi tercih edilmektedir. Şekil 3.12’de tam otomatik direk basit kesme deney aleti gösterilmektedir.

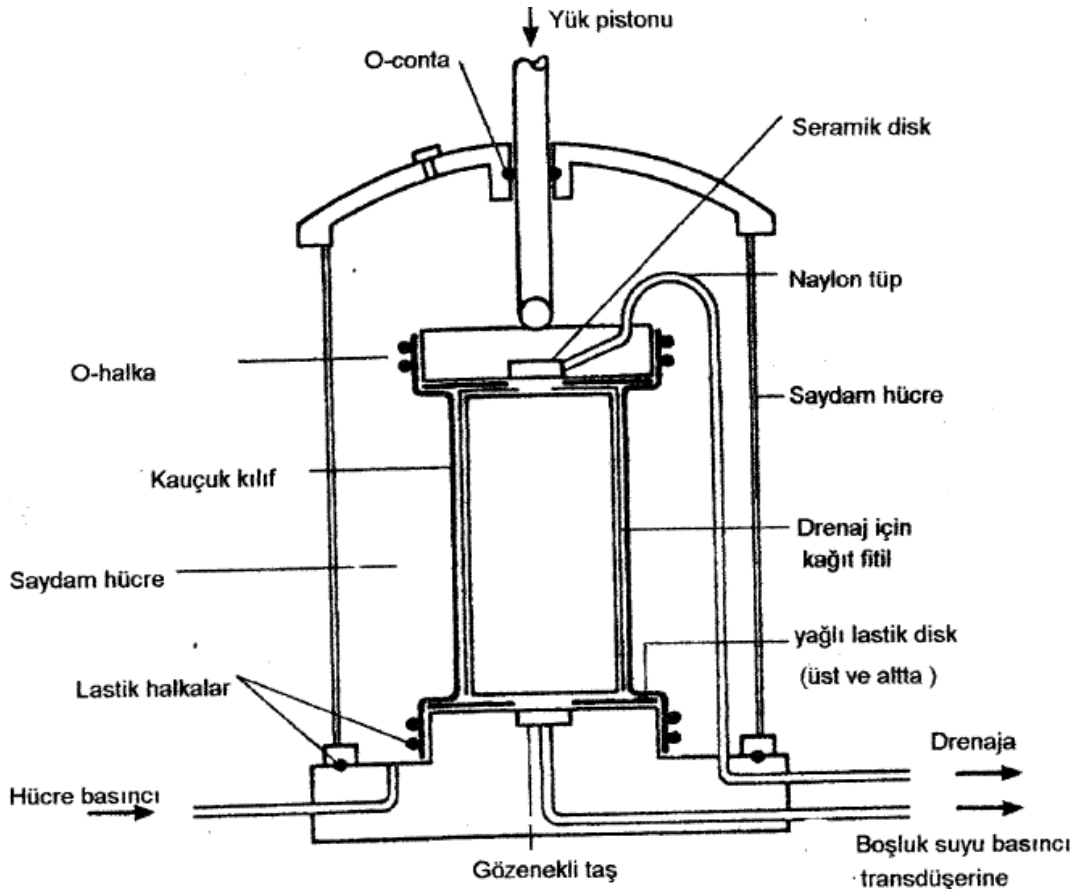


Şekil 3.12. Basit kesme deney aleti(UTEST web sayfası)

3.5.4. Üç eksenli basınç deneyi

Zemin mekaniğinde kayma parametrelerini en iyi bir şekilde hesaplayan, en gelişmiş kayma mukavemeti deneyi üç eksenli basınç deneyidir. Üç eksenli basınç deneyi arazi koşullarına bağlı olarak drenajlı ve drenajsız koşullar altında yapılabilir. Üç eksenli deneyi hücrede silindir kesme deneyi olarak da adlandırılır. Üç eksenli deneyi direk kesme

deneyine göre oldukça karmaşık bir deneydir. Fakat çok amaçlı olduğundan dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Üç eksenli basınç deneyinde drenaj kontrol edilebildiği gibi numuneye istenilen değerde dış basınç da verilebilmektedir. Burada dış basınçtan kastımız yanal basınçtır. Bilindiği üzere herhangi bir zemin derinliğinde yanal basınç muhakkak mevcut olmaktadır. Bu sebeple üç eksenli basınç deneyi arazi koşullarının laboratuvarında en benzer bir şekilde modellenilmiş halidir. Böylece kayma direnci parametreleri gerçeğe en yakın bir şekilde belirlenir. Üç eksenli deney yönteminde boyu çapının iki katı olan su geçirmez plastik bir membran ile sarılmış zemin numunesi bir hücre içerisine konulmaktadır. Plastik membranın amacı zemin numunesinin suyla temansını önlemek ve zemin numunesinin su muhtevastaki değişimi engellemektir. Bu zemin numunesine su yardımıyla dış basınç verilir ve bir piston yardımıyla eksenel yük uygulanır ve zemin numunesindeki hacim değişimi(drenajlı deneyde) ve boşluk suyu basıncı(drenajsız deneyde) ölçülür. Numune herhangi zayıf bir düzlemden geçer. Şekil 3.13’de üç eksenli deney hücresi şekilsel olarak görülmektedir.



Şekil 3.13. Üç eksenli deney hücresinin şemasal gösterimi

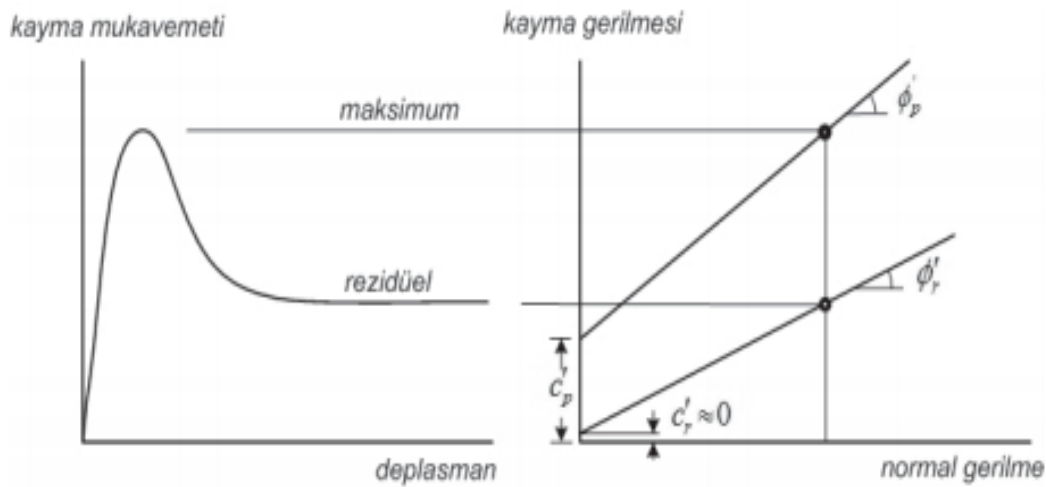
Üç eksenli deney şekilleri konsolidasyonsuz-drenajsız(UU), konsolidasyonlu-drenajsız(CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı(CD) olmak üzere üç şekilde yapıldığından bahsetmiştik. UU deneyinde numune göçene kadar hızlı bir şekilde yüklenir. Arazide hızlı yapılan yüklemelerin modellenmesi laboratuvarında UU deneyidir. CU deneyine başlamadan önce numune arazide bulunduğu çevre şartlarına kadar çevre gerilmesine eşdeğer bir basınca maruz bırakılarak oturması sağlanır. Suyun drenajına mücade edilmez ve numune göçene kadar yüklenir. CD deneyinde ise numune önce konsolide edilir, konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenaja mücade edilerek göçmesi sağlanır. Burada dikkat edilecek husus yüklemenin çok düşük hızda olması yani boşluk suyu basınçlarında artış meydana gelmemesidir. Şekil 3.14’de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı’nda bulunan üç eksenli deney aletinin genel görünümü görülmektedir.



Şekil 3.14. Üç eksenli deney aleti(ESOGÜ)

3.6. Zeminlerin Kalıcı Kayma Direnci

Zeminlerin kalıcı kayma direnci, aşırı konsolide fisürlü kil zeminlerde kayma gerilmesiyle kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde görülmektedir. Pik değerlere göre yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde güvenli olduğu düşünülen şevlerin belirli bir süre sonra göçtüğü gözlemlenmiştir. Göçmüş olan şevlerde yapılan kayma gerilmesi deneylerinde ortalama bir kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir. Belirlenmiş olan değer pik kayma gerilmesi değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu tarz zeminler üzerinde bundan sonra yapılan çalışmalarda zeminin kayma gerilmesi değeri önce pik bir değere ulaşmış sonrasında azalmaya başlamış ve belirli bir deformasyon değerinden sonra deformasyon artmasına rağmen değişmeyen sabit bir değer almıştır. Bu değere kalıcı kayma direnci veya rezidüel kayma gerilmesi denilmektedir. Bu durumun sebebi kayma gerilmesinde kesilen yüzeye suyun girmesi ile kesilen yüzeylerin ıslanması, dolayısıyla daneler arası kuvvetlerin ve kenetlenmelerin azalmasıdır. Diğer bir neden ise kesilme işlemi sırasında zemin danelerinin birbirine paralel olacak şekilde yönelimidir. Kesilmeye devam edildikçe, daneler numune ile aynı doğrultuda yüzeye paralel olacak şekilde yönelmeye başlar(Skempton, 1964). Bazı zeminlerde, özellikle aşırı konsolide ve fisürlü kil zeminlerde, kayma direncinin zamanla azalıp, kalıcı değere ulaşması ani yenilmelere neden olmaktadır(Mitchel, 1993). Ülkemizde bu tarz zeminler çok fazla bulunmaktadır. Bu durum ülkemizde inşa edilecek mühendislik yapılarında ve şev analizlerinde kalıcı kayma direncinin önemini göstermektedir.



Şekil 3.15 Rezidüel kayma mukavemeti (Head, 2006)

Şekil 3.15'de kayma gerilmesi-kayma yer değiştirmesi grafiği ve kalıcı kayma gerilmeleri zarfları verilmiştir. Burada kayma gerilmesi önce artan deformasyon ile artarak pik yapmakta daha sonra pik gerilmesi değerinden daha düşük ve deformasyon ile değişmeyen sabit bir değer almaktadır ayrıca kayma gerilmesi yenilme zarfları incelendiğinde pik parametrelerin rezidüel parametrelerden daha büyük olduğu ve rezidüel kayma gerilmesi grafiğinde kohezyonun sıfıra yaklaştığı görölmektedir.

Pik kayma direnci için denklem;

$$\tau_p = c_p + \sigma_p \times \tan\Phi_p \quad (3.10)$$

Rezidüel kayma direnci için denklem;

$$\tau_r = c_r + \sigma_r \times \tan\Phi_r \quad (3.11)$$

Bu denklemlerde;

c_p : pik kohezyon değerini

Φ_p : pik kayma direnci kayma mukavemeti açısı

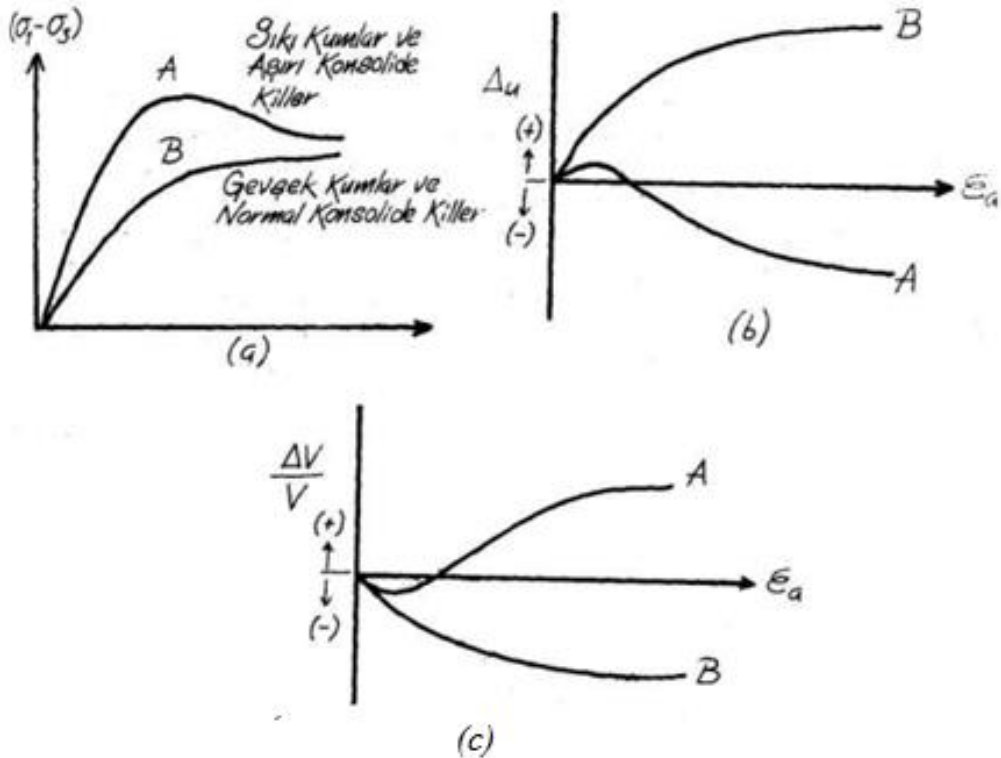
c_r : rezidüel kohezyon değerini(c')

Φ_r : rezidüel kayma direnci kayma mukavemeti açısı(ϕ') vermektedir.

Normal konsolide zeminlerde pik ile rezidüel direnç arasındaki fark aşırı konsolide zeminlere göre daha düşüktür. Kayma gerilmesi yer değiştirme grafiğinden hatırlanacağı üzere aşırı konsolide zeminler, normal konsolide zeminlere göre küçük yer değiştirme değerinden daha yüksek kayma direncine sahiptir. Daha sonra direnç belirgin bir azalma göstererek kalıcı değere ulaşır.

Aşırı konsolide zeminlerde; kesme işlemi sırasında hacim öncelikle artan bir yer değiştirme ile azalmakta yani büzülme'dedir. Daha sonra kesme işleminin devamında hacim genişlemeye başlar. Kumların davranışı da aynı şekildedir. Normal konsolide zeminlerde ise kesme işlemi sırasında hacimde artma meydana gelmemektedir(Şekil 3.16). Bunun nedeni aşırı konsolide zeminlerde ön konsolidasyon basıncının uygulanan gerilmeden büyük olmasıdır. Kesme işlemi sırasında hacim değişiminde ise aşırı konsolide zeminlerde artan yer değiştirme ile hacim öncelikle azalmakta ve daha sonra artıp sabit bir değerde kalmaktadır. Normal konsolide zeminlerde ise hacimde azalma görülmektedir. Hem normal konsolide zeminlerde hem aşırı konsolide zeminlerde belirli bir yer değiştirme değerinden sonra hacim değişimi olmamaktadır.

Normal konsolide zeminlerde boşluk oranı kesme işlemi süresince azalırken aşırı konsolide zeminlerde boşluk oranında artma meydana gelir. Danelerin kesilme sırasında ilk konumlarından ayrılarak hacim değiştirmeden hareket edebilecekleri boşluk oranına kritik boşluk oranı denir.

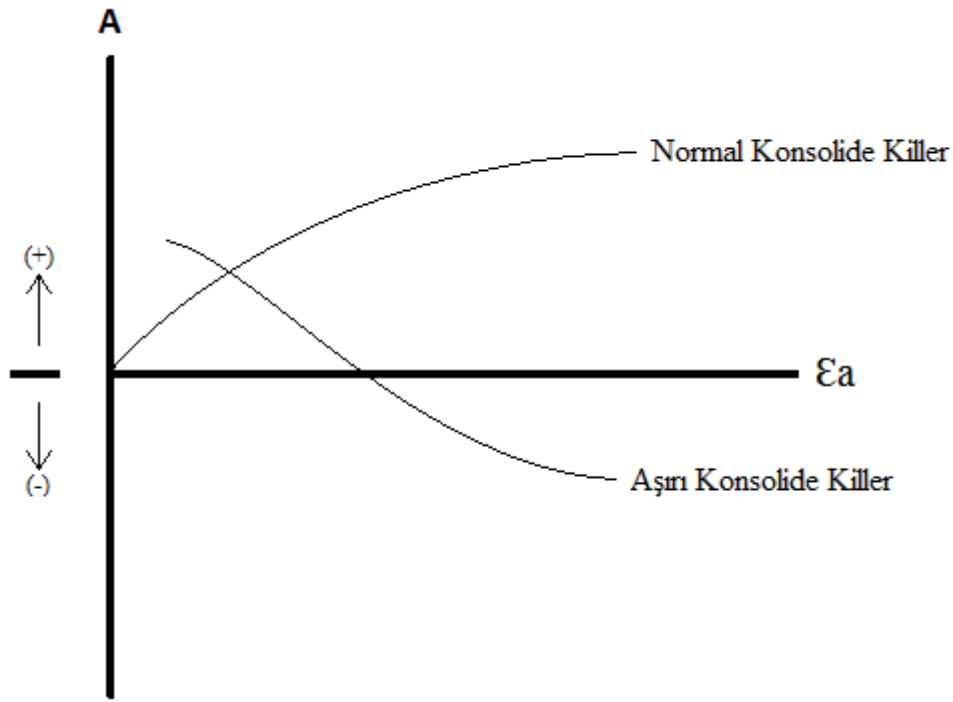


Şekil 3.16 Eksenel yükleme sırasında gözlenen zemin davranışı a) gerilme-birim deformasyon grafiği b) ilave boşluk suyu basıncı-birim deformasyon grafiği c) birim hacim değişimi-birim deformasyon grafiği

Drenajsız deneylerde eksenel yükleme sırasında meydana gelen değişimlerden dolayı ikinci bir boşluk suyu parametresi tanımlanma gereği duyulmuş ve Denklem 3.12'deki formülle hesaplanmaktadır(Skempton, 1954).

$$A = \Delta u / (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (3.12)$$

Burada A sabit bir değer olmayıp şekil değiştirme seviyesine bağlı olarak değişmektedir(Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Boşluk suyu basıncı katsayısı A'nın eksenel yer değiştirme ile değişimi

Yüksek kil yüzdesine sahip aşırı konsolide kilerde kayma direncinin iki kademedede düştüğü gözlemlenmiştir. İlk düşüş küçük deplasman değerindeki su muhtevastındaki artıştan, ikinci düşüş kademesi ise oluşan deplasmanlar büyük olması sonucu yassı kil minerallerinin kayma düzlemine paralel bir şekilde dane yönelimi oluşturmasından dolayıdır.

Kayma oluşmuş kesit yüzeyi net bir şekilde bilinemediğinden araziden alınan örselenmemiş numunelerin kayma mukavemeti daha yüksektir. Arazide kayma meydana gelmiş zeminden numune alınamadığında gerçek rezidüel değerini ölçmek oldukça zordur. Şevlerde birkaç metrelik kaymalar meydana gelebilir. Bu tarz zeminlerde numune almak oldukça zordur. Bu sebeple laboratuvarında arazi deformasyonuna benzer deformasyonlar yapmak daha doğru yani gerçek değerine daha yakın sonuçlar elde etmemizi sağlayacaktır. Rezidüel kayma mukavemetini ölçmek için üç eksenli basınç, kesme kutusu ve basit(halka) kesme deneyi yapılabilir.

3.6.1 Kalıcı kayma direncinin tahmini için yöntemler

3.6.1.1. Kayma yüzeyini önceden şekillendirmek

Numune bıçak veya tel yardımı ile kesilerek iki parçaya ayrılır. Parçanın yüzeyleri cam yüzey üzerine sürülerek cilalı hale getirilir. Sonra iki parça birleştirilip istenilen basınç altında konsolide edilir. Bu yöntem her ne kadar kullanışlı gözükse de iyi sonuçlar elde etmek oldukça güçtür.

3.6.1.2. Kayma yüzeyini deney sırasında oluşturmak

Kayma yüzeyi laboratuvarında kesme kutusu ve halka kesme deneyi ile oluşturulabilir. Üç eksenli basınç deneyinde arazide meydana gelen deplasmanlara ulaşmak mümkün değildir. Bu sebeple; Kesme kutusu deneyinde numune her iki yönde deplasman sınırlarına kadar kesilerek geri dönüş hızlı bir şekilde yapılır ve numune tekrardan kesmeye maruz bırakılır. Halka kesme deneyinde ise istenilen ölçülerde örselenmemiş numune temin etmek zor olduğu için deney plastik limit civarı su muhtevalarında örselenmiş numuneler üzerinde yapılır. Bu tez kapsamında hesaplanan rezidüel kayma dayanım parametreleri kesme kutusu deneyi kullanılarak yapılmıştır.

3.6.1.3. Kalıcı kayma direncinin tahmini için diğer yöntemler

İnce daneli zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti için diğer yaklaşımlar göçme meydana gelmiş şevlerde geri analiz ve zeminin indeks özelliklerinden elde edilen deneysel ilişkilerdir.

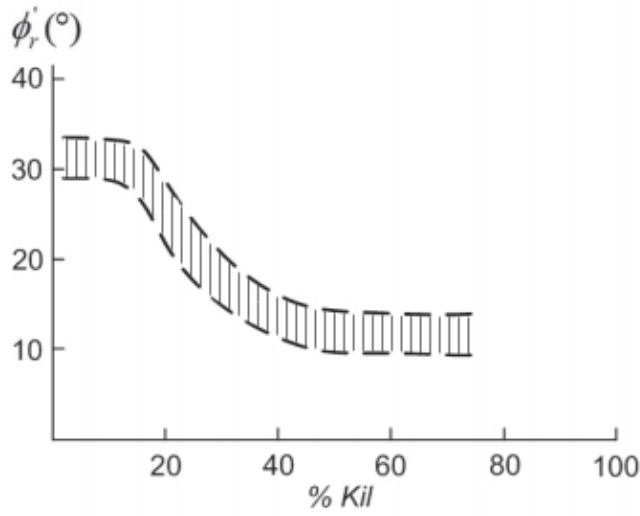
3.6.1.3.1. Geri analiz

Geri analizde incelenen şevin hareketi modellenerek kaymaya karşı güvenlik katsayısını bir yapan parametreler araştırılır. Geri analizin yapılabilmesi için; kayma yüzeyinin yerinin ve geometrisinin bilinmesi, geometriye uygun analiz yönteminin belirlenmesi ve zemin tabakalarına uygun kayma parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Kohezyonlu normal konsolide killer dairesel, kohezyonsuz zeminler ile aşırı konsolide killer yüzeysel, kayma direnci çok düşük ya da çok yüksek tabaka içeren şevler ise blok kayması şeklinde göçme modeli gösterirler. Göçme modeline uygun analiz yöntemi seçilmelidir.

Kalıcı kayma direnci ince daneli zeminlerde problem teşkil eder. Deformasyonlar belirli bir değere ulaştığında kohezyon sıfıra yakın bir değer alır. Kohezyon sıfır kabul edilirse, kayma direnci tek bir parametreye yani kayma mukavemeti açısına bağlı olur. Kayma direncinin tek bir parametreye bağlı olması geri analizde kolaylık sağlar. Kayma direncine karşı güvenlik sayısı bir alınarak kalıcı kayma direnci açısı bulunur(Tan, 2013)

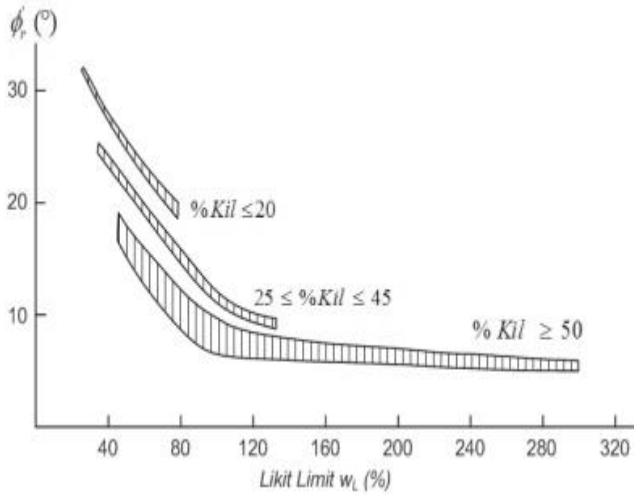
3.6.1.3.2. Endeks özellikleriyle kalıcı kayma mukavemetinin tahmin edilmesi

Kalıcı kayma direncini etkileyen en önemli parametreler kil yüzdesi ve kil kısmın plastisite özellikleridir. Skempton (1985) zeminin kalıcı kayma direncini %20-%50 kil aralığında hızla azalmakta olduğunu ve artan kil yüzdesi ile sabit kaldığı sonucuna varmıştır(Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Kil yüzdesi ve kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki

Stark ve Eid (1994) ise rezidüel kayma direnci açısının likit limitin %100 değerine kadar hızla arttığını ve daha sonra 6° ile 8° aralığında kaldığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Likit limit kil yüzdesi ve kalıcı kayma direnci ilişkisi

3.6.2. Kalıcı kayma direncini etkileyen faktörler

Kalıcı kayma direncini etkileyen faktörler; zeminlerin mineralojik yapısı, kıvam limitlerinin etkisi, kil yüzdesi, efektif gerilme seviyesi, kesme hızı ve zemin yapısı olarak sıralanabilmektedir.

3.6.2.1. Mineralojinin Etkisi

Zeminler mekanik ve kimyasal ayrışma sonucu küçük parçalara bölünmesi ile oluştuğundan bahsetmiştik. Zemin daneleri farklı boyutlarda ve biçimlerde yer almaktadır. Danelerin parçalanmasıyla boyutlarında meydana gelen azalma danelerin yassılığını arttırmaktadır. Danelerde yassılık arttıkça yüzey-yüzey etkileşimi etkili olmaktadır. Yassı şekilli danelerin sayısı arttıkça, kalıcı kayma direnci de azalmaktadır.

3.6.2.2. Kıvam Limitlerinin Etkisi

Boşluklarda suyun varlığı özellikle kohezyonlu olarak adlandırılan ince daneli zeminlerde mühendislik davranışını önemli bir şekilde etkilemektedir. Kıvam limitleri bilinirse zeminin su içeriğine göre mühendislik davranışı hakkında bir çok şey tahmin edilebilir. Bu sebeple; kıvam limitlerinin kalıcı kayma dirençlerine etkisi dikkate alınırken çalışma yapılan bölgedeki killerin su içerikleri ve kıvam limitlerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Killerin su yüzdelere göre kalıcı kayma direnç açıları değişmektedir. Örnek vermek gerekirse; Güney Gallerde bulunan aşırı konsolide zeminlerde kalıcı kayma direnci açısının 29° ile 31° arasında değiştiğini De ve Furdas(1973) önermişlerdir(Bayın, 2011).

3.6.2.3. Kil Yüzdesinin Etkisi

Kil daneleri çok küçük oldukları için biçimleri ancak mikroskop ile görülebilir. Kil yüzdesiyle kil içeriği aynı anlama gelmemektedir yani farklı anlamlar içermektedir. Kil içeriği dane boyutu gözetmeksizin zeminde bulunan kil mineralini ifade ederken, kil yüzdesi zemindeki kil minerallerinin miktarını yani 0.002 mm'den daha küçük çaplı danelerin yüzdesini ifade etmektedir. 0.002 mm'den büyük çaplı danelerin genellikle hacimli ve yuvarlak danelerden, 0.002 mm'den küçük danelerin yani kil minerallerinin yassı şekilli oldukları görülmektedir.

Hawkins ve Privett (1985), aynı kil yüzdesine sahip zeminler farklı fiziksel özelliklere sahip kil minerallerinden oluşabildiğini ve bunun da kayma direnci parametrelerini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), illit, montmorillonit ve kaolin gibi genel kil mineralleri için yassılık-dane boyutu arasındaki ilişkiden dolayı yassılık ile kil yüzdesi arasında bir ilişki olacağını ifade etmişlerdir. Mitchell (1993), kil minerallerinin kalıcı kayma dirençlerinin, pik dirençlerinden yaklaşık olarak aynı değeri aldığını ve efektif gerilmelerden önemli ölçüde etkilenmediğini söylemiştir. Kuvars, feldispat ve kalsit gibi mineralleri bu durumun istisnası olarak söylemiştir.

3.6.2.4. Efektif Normal Gerilmenin Etkisi

Zeminlerin kalıcı kayma direncinin plastisite indisi ve kil yüzdesi gibi diğer parametrelerle ilişkilendirilen bağıntıların sadece aynı efektif gerilme değerinde ve bu efektif gerilme seviyesinde gerçekleşen problemlerde anlam taşımaktadır. Killerde yüksek gerilmelerde kenar-yüzey etkileşimlerinden daha ziyade yüzey-yüzey etkileşimleri olmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma direnci temas alanı arttığında azalmakta ve kalıcı göçme zarfı doğrusal olmamaktadır (Hawkins ve Privett, 1985).

Mitchell (1993), efektif gerilmeyle zeminlerin kayma direnci açıları arasında bulunan doğrusal bir ilişki bulunduğunu ve yüksek kil yüzdesine sahip zeminlerde bu doğrusal ilişkinin 200 kPa'ya kadar geçerli olduğunu belirtmiştir. 200 kPa'dan daha yüksek gerilme değerlerinde kalıcı kayma direnci açısı efektif gerilmeden bağımsız olduğunu tespit etmiştir. Stark ve Hisham (1994) ise kil yüzdesi %50'den fazla ve likit limit % 60 - % 220 arasında olan zeminlerde kalıcı rezidüel göçme zarfında eğriliğin olabileceğini ifade etmiştir.

3.6.2.5. Kesme Hızının Etkisi

Kesme hızı kayma direncini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Zeminler çok farklı kayma hızlarına maruz kalabilirler. Bir deprem anında kayma hızı çok yüksekken, heyelanlarda çok yavaş hareketlere maruz kalabilirler. Bu nedenle yapılan çalışmalarda kesme hızını belirlemek çok önemlidir. Bu hususda Lemos (1985-2003), Suzuki ve dig. (2001) ve Skempton (1985) kesme hızının etkilerini incelemek için çalışma yapmışlardır.

Lemos(2003), yüksek kesme hızının, kil yüzdesine ve kalıcı kayma direncine etkisini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlarda kil yüzdesi %25'den daha az olan zeminlerde kesme hızı arttıkça kalıcı kayma direnç açısı azalır veya değişmez. Kil yüzdesi %25 ile %50 arasında olan zeminlerde kesme hızı arttıkça kalıcı kayma direnç açısı azalmaktadır. Kil yüzdesi %50'den fazla olan zeminlerde kesme hızı arttıkça kalıcı kayma direnç açısı artar veya azalır. Burada kalıcı kayma direnç açısı değişimlerinin azalması, negatif hız etkisi ve artması, pozitif hız etkisi olarak adlandırılır. Negatif hız etkisi ve hız etkisinin değişmediği durumlar, kil yüzdesinde meydana gelen değişimlere karşı çok hassas zeminlerde görülür. Bu tarz zeminler normal gerilmeye bağlı olarak her iki hız etkisini de gösterebilirler. Bu zeminler yuvarlanma tipi kayma davranışına sahip zeminlerdir. Kayma tipi davranış gösteren zeminlerde ise negatif veya pozitif hız etkisi görülür. Burada negatif hız etkisinin görülmesinin sebebi kayma yüzeyinde hızlı kesilmeden dolayı meydana gelen su muhtevastaki ve boşluk oranındaki artıştır. Bu nedenle kayma direnci daha düşük bir değer olarak ölçülmektedir.

Suzuki vd.(2005), kaolin ve çamur taşı numuneleri üzerinde 0.02 mm/dak ile 2 mm/dk arasında değişen kesme hızlarında hızın kalıcı kayma direncine etkisini incelemiş ve hız etki katsayısını belirlemiştir. Yaptıkları çalışma sonrasında hız etki katsayısının, kesme hızının zeminlerin kalıcı kayma direncine olan etkisini değerlendirmek için çok önemli bir etken olduğunu ve kesme hızından dolayı oluşan değişimlerin kil mnerallerinin çeşidine ve yapısını bağlı olarak kalıcı kayma direncinin değiştiğini belirtmişlerdir. Kaolin numunesi üzerinde 0.0005-0.005 ve 0.0025 rad/dak değerlerindeki kesme hızlarında hız arttıkça yüzey pürüzlülüğünde arttığını tespit etmişlerdir.

Skempton (1985), değişik kesme hızlarında laboratuvar deneyleri yaparak, kesme hızının kayma direncine etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmalarda düşük kesme hızlarında kayma direncinde nazara alınabilecek önemde değişimlerin olmadığını tespit etmiştir. Kesme hızı 0.005 mm/dak alınırca kayma direncinde -%3 ile +%5 arasında sapmalar olmaktadır. Yüksek kesme hızlarında gerçekleştirdiğı deneyler sonucunda kayma direncinden göz önüne alınması gereken değişimlerin 100 mm/dak kesme hızını aşan değerlerde oluştuğunu belirlemiştir.

Kesme hızının kayma direncine etkisinde, zeminin geçirgenliğinin payı büyüktür. Bu sebeple numunenin önce yük altında konsolidasyon hızı belirlenmelidir ve zemin numunesi konsolidasyon hızından daha düşük hızlarda kesilmelidir. Bilindiğı gibi, dane boyutu küçüldükçe konsolidasyon hızı azalmaktadır. Eğer konsolidasyon hızından daha düşük hızlarda zemin numunesine kesme işlemi uygulanırca boşluk suyu basınçlarının oluşması engellenmiş olur.

3.6.2.6. Zemin Yapısının Etkisi

Kayma direncini etkileyen önemli parametrelerden biri de zeminlerin yapısıdır. Daneler arası oluşan kuvvetler ve danelerin geometrik olarak dizilimleri zeminin yapısını oluşturur.

Zeminin kalıcı durumdaki kayma direncini kayma düzlemine paralel olarak yönelen yassı biçimli daneler arasındaki sürtünme direnci meydana getirir. Bu sebeple zemin yapısının kalıcı kayma direncine etkisi yoktur (Bishop vd., 1971).

Zeminlerde kalıcı kayma direnci aşırı ve normal konsolide kil olup olmadığı dikkate alınmaksızın yaklaşık aynı değerde olduğu bilinmektedir(Bkz. Şekil 3.5). Bu nedenle aşırı konsolidasyon oranının(AKO) zeminin kayma direncine etkisi yoktur. Fakat aşırı konsolide killerde pik ile kalıcı kayma direnci arasında oldukça yüksek bir fark vardır. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça killerin maksimum kayma gerilmesi değeri artmaktadır.

Bu sebeple aşırı konsolidasyon oranı kalıcı kayma direncini değiştirmese de önemli bir parametredir.

3.6.3. Geoteknik mühendisliğinde kalıcı kayma direncinin önemi

1930'lu yıllardan beri ince taneli zeminlerde kayma direncinin büyük kayma deformasyon değişimi incelenmiş ve bu yöndeki çalışmalar günümüze kadar gelmiştir. Bu güne kadar yapılan gelişmelere rağmen özellikle şevlerin duraylılığın değerlendirilmesinin çözümü günümüzde bile oldukça zordur. Heyelanların oluştuğu sahalarda kayma düzlemleri belirlenirken kalıcı kayma direnci büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde heyelanlar büyük can ve mal kayıplarını yol açmaktadır. Heyelanlardan kaynaklanan can ve mal kaybını önlemek için kalıcı kayma direncinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

İnsanoğlu tarafından gerek yapılar için taşıyıcı tabaka olarak, gerekse inşaat malzemesi olarak tarih boyunca kullanılan zemin, özellikleri su ile beton özellikleri kadar farklılık gösterebilen bir malzemedir. Bu nedenle arazide karşılaşılan zeminler, her zaman üzerinde gerçekleştirilecek mühendislik faaliyetleri için uygun özellikleri sağlamayabilmektedir. Bu nedenle, zeminin özelliklerinin mühendislik çalışması için yeterli olmaması durumunda çözüm için projenin değiştirilmesi, proje arazisinin değiştirilmesi veya zeminin arazide yerinde iyileştirilmesi gibi seçenekler kullanılabilir(Kılıç, 2008).

Stabilizasyon kavramı genellikle zeminin kayma mukavemetini artıran, geçirgenlik ve sıkışma özelliğini azaltan işlemler için kullanılır. Benzer şekilde Karayolları Teknik Sözlüğüne göre; zeminin mühendislikle ilgili özelliklerini ıslah etmek için, stabilizesini arttırmak veya muhafaza etmek amacıyla kimyasal ve mekanik işlemlere tabi tutulması olarak tanımlanmaktadır. (Kılıç, 2008)

Zemin özelliklerinin mühendislik yönünden uygun olmaması durumunda geoteknik mühendisi aşağıdaki alternatiflerden birine karar vermek durumundadır. Bunlardan birincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmek, ikincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini atıp, yerine amaca yönelik uygun zemin yerleştirmek, üçüncüsü stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini ıslah etmektir. Zeminlerin dirençlerini arttırmak veya belirli koşullarda sahip oldukları direnci her türlü hava koşullarında korumak ve aynı zamanda değişken yük ve iklim koşullarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacakları hale getirilmeleri amacıyla, mekanik veya katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesi işlemi stabilizasyon olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin üzerinde yapılan işlemler sonucunda, hacimsel stabilite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve konsolidasyon gibi mühendislik özelliklerinde pozitif değerler elde edilmektedir. Zeminlerin stabilizasyonu; zeminin kayma direncini arttıran, geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan işlem olarak da tanımlanmaktadır (Angin vd., 2005).

Yapılacak yapıya uygun bir şekilde zeminlerin stabilizasyonu yani iyileştirilmesi için evvella zemin özelliklerini bilmemiz gerekir. Bir zeminin özelliklerinin bilinmesi için aşağıdaki iş sıralaması yapılmalıdır.

- 1- Zeminden numune alma
- 2- Tanımlama deneyleri
- 3- Dolgu yapılacak ise kompaksiyon deneyi
- 4- Oturma problemi için konsolidasyon deneyi
- 5- Kayma dayanımı için üç eksenli, kesme kutusu veya serbest basınç deneyleri

Numune alımı bir tuple zemin içerisine basınç uygulayarak alınır. Numune tüpleri metal yada sert plastikten olabilir. Metal olanına Shelby tüpü, sert plastikten olanına ise Denison denilmektedir. Denison genellikle daha yumuşak zeminlerde alındığından dolayı daha derin numuneler Denisonla alınır. Shelby türlerinde su muhtevasında değişim olmaması için, uç kısımları parafin denilen bir malzeme ile kaplatılmalıdır.

Şekil 4.1(a)'da Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarına getirilen farklı numune tüpleri bulunmaktadır. Şekil 4.1(b)'de sağda içerisindeki numune henüz çıkarılmamış, su muhtevası kaybını engellemek için parafinlenmiş numune, solda ise boş Shelby tüpü bulunmaktadır. Şekil 4.1(c)'de ise boş Shelby tüpleri gözükmektedir. Shelby tüpü numune alıcı, vidalar ve Shelby kafa adaptöründen oluşur. Denison numunelerinde parafine gerek yoktur. Onun yerine, yine sert plastikten imal edilen kapak şeklinde bir aparat kullanılır ve su muhtevası kaybını engellemek için bantlanır veya muhteva kaybını engellemek için benzer bir koruma yöntemi uygulanır.



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.1. İçi Dolu ve Boş Numune Tüpleri a)Farklı Numune Tüpleri b) Dolu ve Boş Shelby Tüpleri c) Boş Shelby Tüpleri

Parafin petrolden elde edilen renksiz ve kokusuz bir mum çeşididir. Ham petrolün arıtımında yan ürün olarak elde edilen parafin önce sıcakta eritilir, sonra soğutularak donması sağlanır. Parafinin erime noktası 48°C ile 66°C arasında değişir. Parafinin özelliği herhangi bir madde ile reaksiyona girmemesidir.

Shelby tüplerindeki numuneler mekanik krikoyla çıkarılır(Şekil 4.2). Numune çıkarıldıktan hemen sonra yapılacak en önemli hususlardan birisi numunenin doğal su muhtevasını belirlemektir. Daha sonra tanımlama deneyleri ve kayma dayanım deneyleri yapılmalıdır.



Şekil 4.2. Tüplerden numuneyi çıkarmak için kullanılan kriko(ESOGÜ)



Şekil 4.3. Numunenin tüplerden çıkarılışı

Şekil 4.3'de mekanik krikoyla numunenin tüplerden çıkarılışı gözükmektedir. Laboratuvarda programlı çalışılmalıdır. Şekil 4.4'de ise çıkarılan numunenin ölçüleri ve deney için numuneleri alınarak, numuneler deneye hazırlanmaktadır.



Şekil 4.4. Mekanik krikoyla çıkarılan numune

Bu çalışma kapsamında İstanbul Bölgesinin çeşitli sahalarından numuneler 2 grup halinde laboratuvara getirilmiştir. Her grup için ayrı ayrı ve toplam deney miktarları Çizelge 4.1’de görülmektedir. Toplam olarak; 79 tanımlama, 23 Konsolidasyon(Kons), 2 Serbest Basınç(SB), 36 Kesme Kutusu(KK), 21 konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç deneyi(CU), 7 konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi(CD) ve 11 konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi(UU) olmak üzere 179 deney yapılmıştır. Daha sonra örselenmemiş numunelerle örselenmiş numunelerin kayma direnci parametrelerinin farkını tespit etmek amacıyla, deney sonrası 10 adet numunenin üzerinde kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Ayrıca; örselenmiş ile örselenmemiş numuneler üzerindeki konsolidasyon davranışı değişimlerini kontrol etmek amacıyla 8 adet örselenmiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

Örselenmiş deneyleri yapmak için deney yapılan örselenmemiş numuneler etüvde kurutulmuş, arazideki başlangıç su muhtevasına getirilerek bir gün beklenilmiş ve aynı sıklıkta numuneler hazırlanmıştır. Burada numune hazırlama çok önemli bir husus teşkil etmektedir. Sıklık oranı deney numunesinin her tarafında eşdeğer olmalıdır yani yoğunlaşmalar olmamalıdır.

Çizelge 4.1. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sayıları

	Tanımlama	KONS	SB	KK	CU	CD	UU
I. Grup	33	11	2	18	10	4	2
II. Grup	46	12	X	18	11	3	9
Toplam	79	23	2	36	21	7	11

4.1. Tanımlama Deneyleri

Bu çalışma kapsamında zemini tanımlamak için; numuneler üzerinde Elek Analizi (Islak Analiz), Hidrometre, Atterberg Limitleri (Likit Limit-Plastik Limit) ve Özgül Gravite Deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Tanımlama Deneyleri için alınmış numuneler

4.1.1. Elek analizi

Zeminler dane boyutu dağılımına göre iyi derecelendirilmiş ve kötü derecelendirilmiş olarak tanımlanırlar. Zeminin sınıflandırılmasında yani grup sembolünün belirlenmesinde Uniformluk ve Derecelenme katsayısının belirlenebilmesi için dane boyutunun dağılımının saptanması gerekmektedir. Elek analizi ile zemin içeriğindeki çakıl, kum ve ince danelerin yüzde miktarları belirlenir. Elek analizi sonucunda zeminlerin sınıflandırılmasına bağlı olarak porozite, hidrolik iletkenlik, su tutma özellikleri, dayanım özellikleri gibi mühendislik özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Üretilebilecek en küçük dane çaplı elek 200 nolu(çapı 0,075 mm) elektir. 200 nolu denmesinin sebebi 1 inç² alanında 200 adet elek deliği olmasından dolayıdır. 200 nolu elekten sadece ince daneler olan kil ve silt geçebilir. Kil ve silt danelerinin, dane dağılımının saptanması için hidrometre analizi yapılmalıdır. Elek ve hidrometre analizleri sonucunda malzemeyi oluşturan farklı boylardaki danelerin ağırlık olarak yüzde miktarları bulunur. Yatay ekseninde logaritmik bir şekilde dane boyu, düşey ekseninde ise elekten geçen dane ağırlıkları yüzdesel bir şekilde çizilir. Bu eğriye “Dane boyu dağılım eğrisi” veya “Granülometre eğrisi” denir. Çizelge 4.2’de Amerikan(ASTM) ve Alman(DIN) Standartlarında kullanılan bazı elekler ve açıklık değerleri verilmiştir. Bu çalışmada kapsamında Amerikan(ASTM) Standartları kullanılmıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında kullanılan Elek Seti ve elenmek için hazırlanmış numune örneği Şekil 4.6’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. ASTM ve DIN Standartlarında kullanılan bazı elekler ve açıklık değerleri

ASTM		DIN	
Elek No	Elek Açıklığı(mm)	Elek No	Elek Açıklığı(mm)
4	4,75	4	5,00
10	2,00	10	2,00
20	0,850	20	0,800
40	0,425	40	0,400

60	0,250	60	0,250
100	0,150	100	0,200
140	0,106	140	0,100
200	0,075	200	0,071



Şekil 4.6. Elek Seti ve elenmek üzere hazırlanmış numune(ESOGÜ)

4.1.1.1. Deneyin yapılışı

Deney “Islak Analiz” ve “Kuru analiz” olmak üzere iki şekilde yapılır. Islak analiz ile kuru analizin farkı numunenin elek analizinden önce yıkama işlemine tabi tutulmasıdır. Bu çalışma kapsamında ıslak analiz yapılmıştır. Islak analiz yapılmasının sebebi bazı danelerin özellikle kil danelerinin birbirine yapışarak, daha büyük dane yapısına sahipmiş gözükmesine engel olup, yanlış sonuçlara yol açmasının engellenmesidir. Bu sebeple; elek

analizi yapılmadan önce saf su içerisinde bir kaç saat beklenerek danelerinin ayrışması beklenilmiştir.

Deneyin yapılışını maddeler halinde özetlersek;

- a) Bir miktar numune 24 saat süreyle Etüv(105°C'deki fırın)'de kurutulur.
- b) Etüvde kurutulan kuru numuneden bir miktar(500-1000gr) alınır. Kuru numune ağırlığı deney föyüne yazılır.
- c) Numune birkaç saat saf su içerisinde bekletilir ve daha sonra 200 nolu elekten yıkanır.
- d) Numune tekrar 24 saat süreyle etüvde kurutulur. 24 saat sonra etüvden alınarak ağırlığı tartılır. Aradaki kayıp yıkama esnasında 200 nolu elekten geçen ince danelilerin ağırlıkça miktarıdır.
- e) Numune ASTM Standardına göre büyükten küçüğe doğru sıralanmış elek takımına konularak 15 dakika sallanır.
- f) Her elek üzerinde kalan numune ağırlıkları deney föyüne yazılır ve elek altına geçen toplan yüzdeye göre granülometri eğrisi çizilir.

4.1.1.2. Deney sonuçları

Elek analizi sonucunda kaba daneli zeminlerin granülometri eğrisi çizilir. Bu eğriyi çizmemizdeki amaç Uniformluk Katsayısı(Cu) ve Derecelenme Katsayısı(Cc)'ni hesaplayıp, zeminin grup sembolünü bulmaktır.

$$Cu = D_{60} / D_{10} \quad (4.1)$$

$$Cc = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} \quad (4.2)$$

Burada; D_{10} danelerin %10'unun geçtiği elek çapını

D_{30} danelerin %30'unun geçtiği elek çapını

D_{60} danelerin %60'ının geçtiği elek çapını temsil etmektedir.

Zeminlerin %10'undan fazlasının 200 nolu elekten geçtiği durumlarda granülometri eğrisinin devamını çizmek için hidrometre deneyini yapmak zorundayız.

4.1.2. Hidrometre deneyi

İnce daneli zeminlerde zemin daneleri gözle görülemeyecek kadar küçük olduğundan dolayı bu daneleri çaplarına ayırmak mümkün değildir. Bu sebeple bu tür zeminlerin dane sınıflamasında hidrometre analizi yapmamız gerekir. Hidrometre analizi Stoke Yasasına dayanmaktadır. Stoke Yasası; herhangi bir akışkan içerisindeki birim kütleyle etki eden ivmelenme değişimlerinin, basınç değişimleri ile sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.7. Hidrometre Deney Tüpleri(ESOGÜ)

4.1.2.1. Deneyin yapılışı

- a) 200 nolu elekten geçen 50 gr numune alınır.
- b) %4'lük Sodyum Hegzafosfat (NaPO_3)₆ içeren çözelti içerisinde 16 saat bekletilerek kil ve silt boyutundaki tanelerin ayrışması sağlanır.
- c) 16. saat sonunda çözelti karıştırıcıyla karıştırılıp 1000 ml'lik süspansiyon silindirine dökülür(Şekil 4.7) ve saf su ile 1000 ml'ye tamamlanır.
- d) Daha sonra silindirin ağzı elin içiyle kapatılarak 1 dakika süreyle çalkalanıp tam süspansiyon haline getirilir.
- e) Deney füyüne 15sn, 30sn, 1dak, 2dak, 4dak, 8dak, 15dak, 30dak, 1saat, 2saat, 4saat, 8saat, 16saat, 24saat, 48saat sonra yapılan okumalar kaydedilir.
- f) Hidrometre okumaları sırasında süspansiyon sıcaklıkları da Stokes Yasası işlemlerinde kullanılmak üzere kayıt edilir.

Hidrometre deneyinde dikkat edilecek hususlar;

- 4. dakika ve sonrasına yapılan her okumanın ardından hidrometre, içerisinde saf su bulunan bir mezurda sonraki okumaya kadar bekletilmelidir.
- Hidrometre ile su arasında bir su yükselmesi meydana gelir. Bu yükselmeye menisküs denir. Hidrometre okuması bu menisküsten dolayı yükselen su seviyesinde yapılmalıdır. Fakat gerçek hidrometre okuması düzeltme yapılarak bulunmalıdır. Bu düzeltme değeri(Cm), su seviyesi ile menisküs tepe okuması arasındaki farktır. Bu fark her hidrometre için sabit bir değerdir.

4.1.2.2. Deney sonuçları

Bu deney ince daneli zeminlerin granülometre eğrisini izmek için yapılır. Granülometre eğrisinde Uniformluk(Cu) ve Derecelenme(Cc) katsayıları hesaplanıp

zeminin grup sembolü belirlenir. Hidrometre çözümlemesi 2 aşamada yapılır. 1. aşamada süspansiyonda kalan yüzde(P) bulunur. Bu yüzde aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$P = (G_s / (G_s - 1)) \times (100 / W) \times (R_h + M_t + C_d) \quad (4.3)$$

G_s; Deneyde kullanılan zeminin özgül gravitesi

W; Deney öncesi zeminin kuru ağırlığı

R_h; Düzeltilmiş Hidrometre okuması

M_t; Süspansiyon sıcaklık düzeltmesi

C_d; Numune dağıtıcı madde için kullanılan düzeltme(%4'lük Sodyum HegzametaFosfat için 4 alınmalıdır.)

Hidrometre çözümlemesi için 2. aşamada ise süspansiyonda kalan yüzde miktarlarına karşılık gelen dane boyutunun(D) hesaplanmasıdır. Dane boyutu aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$D = K \times \sqrt{ (L / t) } \quad (4.4)$$

K; Numunenin dane özgül gravitesine bağlı olarak saptanan katsayı

L; Düzeltilmiş hidrometre okumalarına karşılık etkin derinlik

t; Hidrometre okumasının yapıldığı zaman

4.1.3. Atterberg(Kıvam) limitleri

1911'de Atterberg tarafından, zeminlerin su muhtevasına bağlı değişik davranışlar göstermesi deneysel olarak tespit edilmiştir. Zemine ait Atterberg(Kıvam) sınırları ile zeminin birçok özelliği hakkında fikir edinilebilir. Zeminin 3 ana kıvam sınırı vardır.

Bunlar; Likit Limit, Plastik Limit ve Rötire Limitidir. Rötire Limiti(W_s) zeminin katı kıvamdan yarı katı kıvama geçtiği su muhtevası değeridir. Plastik Limit(W_p veya PL) zeminin yarı katı kıvamdan plastic kıvama geçtiği su muhtevasıdır. Likit Limit(W_L veya LL) zeminin plastic kıvamdan sıvı yani viskoz kıvama geçtiği su muhtevasıdır.

Özellikle ince daneli zeminlerde, zeminin cinsini belirlemek için plastisite kartını kullanmamız gerekir. Plastisite kartını kullanabilmemiz için plastisite indisini hesaplamamız gerekmektedir. Plastisite indisi "PI" veya "Ip" ile gösterilir ve daha öncede izah edildiği gibi likit limitle, plastik limitin farkı olarak hesaplanır. Bu çalışmada Rötire Limiti değerinin hesaplanmasına gerek görülmemiştir. Bu sebeple deneyin yapılışı ve sonuçlarının izahına gerek duyulmamıştır.

4.1.3.1. Likit limit deneyi

Likit Limit; zeminin kendi ağırlığı altında akabilmesi için gerekli su muhtevası değeridir. Bu değer Casagrande veya Düşen Koni Yöntemi ile bulunabilir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda likit limit değerleri Casagrande Yöntemi ile belirlenmiştir.

4.1.3.1.1. Casagrande yöntemi ile deneyin yapılışı

Likit Limit Casagrande Aletinin 25 vuruşa denk gelen su muhtevasıdır. Bu yöntemle Likit Limit değerini belirlemek için aşağıdaki prosedür sırasıyla izlenmelidir.

- a) 40 nolu elek(400 mikron) altına geçen malzemedden 200-300 gram alınmalıdır.
- b) Numune karıştırma kabına konur, bir miktar su eklenir ve homojen bir hamur kıvamına gelinceye kadar spatula ile karıştırılır.
- c) Elde edilen zemin su karışımında bir miktar Casagrande Aletine konur ve yüzeyi tabana paralel olarak düzlenir ve oyuk açma bıçağı ile ortasından numune ikiye bölünür

böylece V kesitli bir oluk açılmış olur. Şekil 4.8'da Casagrande deney aleti gözükmektedir.



Şekil 4.8. Casagrande Deney Aleti(ESOGÜ)

- d) Krank kolu saniyede iki devirlik hızla çevrilerek, ikiye bölünen numunedeki birleşim 0.5 inç yani yaklaşık olarak 12-13 mm olana kadar devir devam ettirilir.
- e) Oluğun kapanmış olan kesiminin çevresinden numune alınarak, etüve konur ve su muhtevası belirlenir.
- f) Aynı numune üzerinde su muhtevası artırılarak işlemler tekrarlanır.
- g) Numunede ikisi 25 vuruşun altında ikisi üstünde olmak üzere en az 4 deney yapılmalıdır ve düşüş sayıları 10 ile 50 arasında olacak şekilde su muhtevası ayarlanmalıdır.

4.1.3.1.2. Deney sonuçları

Casagrande yönteminde yatay eksene vuruş sayısı, düşey eksene su muhtevası olacak şekilde koordinat düzlemi çizilir ve vuruş sayılarına karşılık gelen su muhtevaları belirlenir. Doğrusal bir grafik çizilir ve 25 vuruşa denk gelen su muhtevası zeminin plastik kıvamdan likit kıvama geçtiği su muhtevası yani likit limit değeri olarak kabul edilir.

Düşen Koni Yöntemine göre ise yatay eksene su içeriği, düşey eksene ise koni batma miktarı olacak şekilde koordinat düzlemi çizilir. Batma miktarlarına karşılık gelen su muhtevaları değerleri grafikte gösterilir. Doğrusal bir grafik çizilir ve 20 mm batma miktarına denk gelen su muhtevası likit limit olarak kabul edilir.

4.1.3.2. Plastik limit deneyi

Zeminin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su muhtevası plastik limit değerini verir. Kırılma olmaksızın ya da çok küçük kılcal çatlaklar olduğu 3 mm çapında silindirik bir makarna şeklini aldığı andaki su muhtevası Plastik limit olarak kabul edilir.

4.1.3.2.1. Deneyin yapılışı

Plastik Limit değerini belirlemek için aşağıdaki prosedür sırasıyla izlenmelidir.

- a) 40 nolu elek(400 mikron) altına geçen malzemedan 20-30 gram alınmalıdır.
- b) Numune karıştırma kabına konur, bir miktar su eklenir ve homojen bir hamur kıvamına gelinceye kadar spatula ile karıştırılır.
- c) Hazırlanan karışım cam plaka üzerinde el ayası ile silindirik bir makarna şeklini Alana kadar yuvarlanır. Çapı yaklaşık 3 mm olması ve aynı zamanda zeminde çatlayıp, dağılmalar görülünceye kadar bu işlem sürdürülür. Çap 3 mm iken çatlama ve kopma meydana gelmemişse kuru numune katılıp su muhtevası azaltılmalıdır. Çap 3 mm'den daha büyük bir boyutta iken kırılma ve kopmalar meydana gelmişse su muhtevası artırılmalıdır.
- d) 3 mm çapında dağılan numunelerin parçaları toplanıp bir numune kabı yardımıyla etüve konur ve su muhtevası belirlenir.
- e) Olası bir hatayı önlemek için aynı deney en az 2 kez numune alınmalıdır ve hesaplanan su muhtevaları karşılaştırılmalıdır. Hesaplanan su muhtevaları arasında, fazla fark olmaması durumunda iki değer in ortalaması alınarak plastik limit değeri belirlenir.

4.1.3.2.2. Deney sonuçları

Deney sonucu bulunan su muhtevalarının ortalaması alınarak zeminin plastik limit değeri tespit edilir. Bulunan sonuçlar arasında çok büyük beklenmedik bir farklılık varsa o sonuç iptal edilmelidir.

4.1.4. Özgül gravite deneyi

Özgül Gravite(Gs)'nin dane yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranı olarak tanımlandığını ve dane yoğunluğunun dane kütlelerinin dane hacmine oranı olarak hesaplandığını daha önce belirtmiştik. Bu sebeple özgül graviteyi hesaplamak için öncelikle dane yoğunluğunu bulmamız gerekir. Dane yoğunluğunu hesaplarken dane kütlelerini basit bir şekilde hassas bir tartıda tartarak buluruz. Asıl sıkıntı, o kütlenin kapladığı dane hacmini(boşluksuz hacim) bulmaktır. Hacmi bulmak için piknometre denilen cam şişeler kullanılır(Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Piknometre(ESOGÜ)

4.1.4.1. Deneyin yapılışı

- a) Piknometre etüvde kurutulur, desikatörde soğutulur ve kapağı ile birlikte hassas terazide tartılır(M_1).
- b) Bir miktar numune(5-10 gr) alınır, piknometre içerisine konulur ve kapağı ile birlikte tartılır(M_2).
- c) İçerisinde zemin numunesi bulunan piknometre su ile doldurulur ve içeriğindeki hava çıkışı için vakum uygulanır.
- d) İçeriği zemin ve suyla dolu olan piknometre hassas terazide tartılır(M_3).
- e) Şişenin içerisindekiler boşaltılır, şişe temizlenir ve sadece havası alınmış su ile doluyken tartılır(M_4).
- f) Özgül gravite(G_s) değeri hesaplanır.
- g) Aynı deneyin bir kaç kez yapılması sağlıklı sonuç elde etmek için önemlidir.

4.1.4.2. Deney sonuçları

Özgül gravite maddenin sudan ne kadar ağır olduğunu ifade etmek için kullanılır. Zeminin içinde bulunan danelere özgüdür, su muhtevasına göre değişmez. Aşağıdaki formülle özgül gravite(G_s) hesaplanır.

$$G_s = (M_2 - M_1) / ((M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)) \quad (4.5)$$

M_1 ; Piknometrenin boş kütlesi(gr)

M_2 ; Piknometre + Zemin kütlesi(gr)

M_3 ; Piknometre + Zemin + Su kütlesi(gr)

M_4 ; Sadece Su dolu piknometre kütlesi(gr)

Bazı zeminlerde su yerine gaz yağı veya alkol kullanılabilir. Özellikle suda eriyebilen tuzlar içeren zeminlerde su yerine gaz yağı veya alkol kullanmak gereklidir. Su harici farklı bir sıvı kullanıldığında özgül graviteyi bulmak için yukarıda açıklanan formülasyonu ilaveten o sıvının yoğunluğuna da bölmemiz gerekmektedir. Bu durumda kullanılan sıvının o sıcaklıktaki yoğunluğunu bulmak için ayrı bir deney yapılmalıdır.

4.2. Kayma Dayanım Deneyleri

Kayma direnci parametrelerini belirlemek için kayma dayanım deneyleri yapılmalıdır. Bu çalışma kapsamında kayma dayanım parametrelerini belirlemek için serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Kayma deneylerinde doğru sonuç almak için yükleme hızının çok önemli olduğundan bahsetmiştik. Yükleme hızı, suyun drenaj hızından daha yavaş olmalıdır. Aksi takdirde kesme esnasında boşluk suyu basınçları oluşabilir. Bu sebeple numuneler üzerinde kayma dayanım deneylerinden önce konsolidasyon (oturma) deneyi yapılmalıdır. Zemin özellikleri her ne kadar derinliğe ve parsele göre bile, değişiklik gösterebilse de bu çalışma kapsamında numune alınan saha genel bir bölge olarak düşünülmüş ve zemin özelliklerinin birbirine yakın olacağı tahmin edilerek çalışmalar yapılmıştır. Her ne kadar konsolidasyon deneyi, kayma dayanım deneyleri içinde sayılmasa da, bu çalışma kapsamında kayma dayanım deneylerinin en önemli parametresi kesme hızının belirlenmesi için yapıldığından bu bölümde izah edilecektir.

4.2.1. Konsolidasyon deneyi

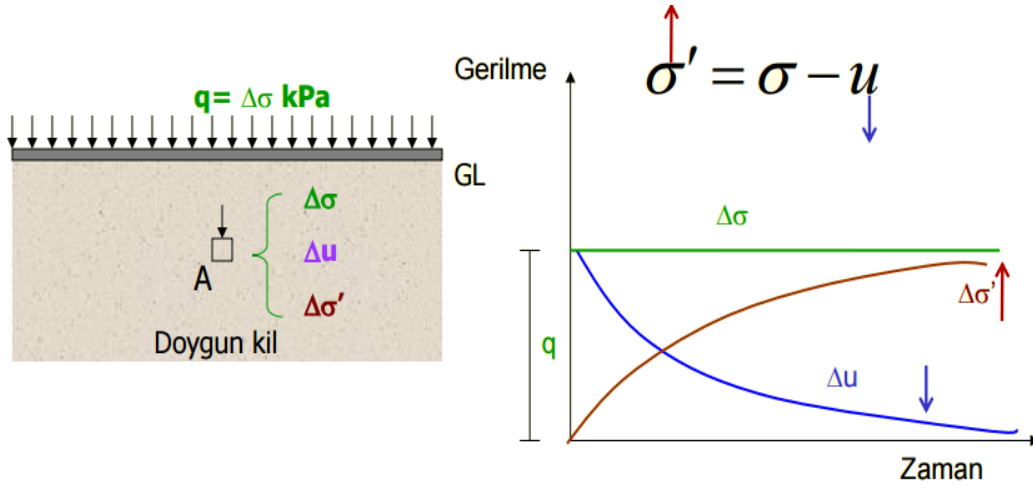
Konsolidasyon oturması zemin içerisinden suyun dışarı atılmasından dolayı sıkışması olarak kabul edilir. Bu süreç efektif gerilmedeki artışın neden olduğu aşırı boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmesine kadar devam eder. Sıfır yanal deformasyon koşulunda gerçekleşen tek yönlü konsolidasyon en basit konsolidasyon durumudur. Gerçekte konsolidasyon tek boyutlu değil, 3 boyutlu oluşabilir. Fakat diğer boyutlar çok geniş olduğundan dolayı geoteknik mühendisliğinde hesapları kolaylaştırmak için tek boyutlu işlemler yapılır. Laboratuvarda tek yönlü konsolidasyon davranışı

ödometre(konsolidasyon) deneyi ile belirlenir. Bu deney; yanal deformasyonu önlenmiş bir zemin numunesinin alt ve üst yüzeyinden drenaj sağlanarak, düşey eksenel bir basınç altında konsolidasyon miktarı ve drenaj hızının ölçümü ile belirlenir. Drenaj hızı zeminin permeabilitesine(geçirgenlik) bağlıdır. İri daneli zeminler daha büyük geçirimsizliğe sahiptir. Dolayısıyla; konsolidasyon iri daneli zeminlerde oluşmazken, ince daneli zeminlerde oluşur.

Laboratuvarda yapılan konsolidasyon teorisine göre; zeminin suya doymuş, drenajın düşey yönde olduğu ve zeminin yatay yönde genişlemediği varsayılır. Zemin suyu, doymuş zemin kütlesi içinde her yönde hareket edebilir. Ancak; zeminin suya tamamen doymuş olması çok zordur. Laboratuvarda zemin numunesinin doymuş hale getirmek için suyun içerisine günlerce bıraktığımızda bile(özellikle kil yüzdesi fazla olan zeminlerde) tamamen doymuş olmama ihtimali vardır.

Konsolidasyonu birincil ve ikincil diye ikiye ayırılır. Birincil konsolidasyon ilave boşluk suyu basınçlarındaki sönümlenme iken, ikincil konsolidasyon organik madde içeriği yüksek zeminlerde zemin içeriğindeki kimyasal ve benzeri etkileşimlerden dolayı oluşur. Bu çalışma kapsamında sadece boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesinden dolayı oluşan birincil konsolidasyon hesabı yapılmıştır. İkincil konsolidasyonun miktarının hesaplanması halen geoteknik mühendisliğinde araştırma konusudur.

Yüklemeler nedeniyle zemin hacminde meydana gelen değişimler en önemli dizayn kriterlerinden biridir. Eğer düşey deplasmanlar(oturmalar) kabul edilebilir sınırlar içerisinde değilse farklı bir dizayn yöntemi geliştirilmesi gerekir. Önceden dikkat edilmezse konsolidasyon oturması yapılarında çok büyük sıkıntılara neden olmaktadır. Bu sebeple Konsolidasyon oturmasının tahmini oldukça önemlidir. Bir zeminin toplam konsolidasyon oturmasının yanında konsolidasyon oranının yani zamana bağlı değişiminin de bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 4.10. Zamanla, boşluk suyu ve efektif gerilmedeki değişim

Konsolidasyon süresince ilave yük değişmez. $t = 0$ anında yani başlangıç zamanında ilave yükün tamamını su karşılar. Zamanla su yükünü zemine aktarır. Yukarıdaki Şekil 4.10'de ilave toplam yük sabit kalırken Δu 'nun azalması efektif gerilmenin ($\Delta \sigma'$) artışı görülmektedir.

Konsolidasyon süreci zeminin üzerine uygulanan efektif gerilmeden dolayı zaman içerisinde suyun çıkışıyla sağlanır. Yükleme anında numunenin önce geçirimli yüzeye yakın bölümlerinde boşluk suyu sönümlenmesi meydana gelir yani konsolidasyon sürecinde zeminin her noktasında ilave boşluk suyu basıncı eşit değildir. Geçirimli yüzeye yaklaştıkça ilave boşluk suyu basıncı değeri azalır. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra ilave boşluk suyu basıncı deney numunesinin dolayısıyla zemin tabakasının tamamında sönümlenir ve sıfıra eşit olur (Holtz vd., 2015).

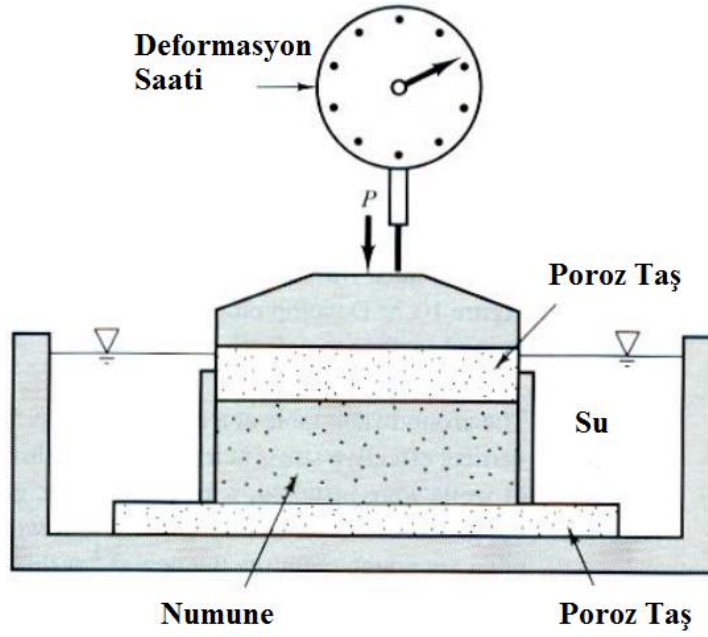
Killi zeminlerde meydana gelen oturmalar yalnızca sürşarj yükleri nedeniyle değil, bünyesindeki suyun dışarı atılmasıyla meydana gelen düşey gerilme artışı nedeniyle de oturma yapabilirler. Şekil 4.11'de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan konsolidasyon deney aletleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Konsolidasyon deney aletleri(ESOGÜ)

4.2.1.1. Denevin yapılışı

- a) Konsolidasyon halkasının içine yerleşecek şekilde numune alınır. Eğer numunenin halkadan taşan bölümü var ise kenarları ince ağızlı bir bıçakla veya çok ince bir tel ile düzeltilir.
- b) Konsolidasyon halkasına yerleştirilen numune halka ile birlikte tartılır. Numune konsolidasyon aletine istenmeyen zamanlarda yükleme yapılmasını engellemek için konsolidasyon aletinin kaldıraç kolu destekleme civatası ile sabitlenir.
- c) Deformasyon saatleri yerleştirilir ve okumalar sıfırlanır.
- d) Konsolidasyon aletine yerleştirilen numune hücresi su ile doldurulur(Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Konsolidasyon deney hücresi

- e) 24 saat numunenin doymun suya doyması beklenir ve bu sürede numunenin hacminin artmaması ile şişmesine müsade edilmez.
- f) Numune doymun hale geldikten sonra yükleme yapılacak miktarda ağırlık, ağırlık tablasına takılır.
- g) Bilgisayar ile deformasyon saatlerinin kontrolü yapılır ve destekleme civatası hızlı bir şekilde gevşetilerek yükleme başlatılır.
- h) Bilgisayardan sıkışma-zaman grafiği kontrol edilir. Grafik yatay konuma geldiğinde ya da çok yaklaştığında konsolidasyon aletinin kaldıraç kolu civatayla desteklenir ve yük iki katına çıkarılır.
- i) Yine aynı işlemler uygulanarak son gerilme düzeyine kadar aynı işlemler devam ettirilir. Uygulanacak son gerilem düzeyi projenin karakteristikleri ve zemin türünebağlı olarak seçilir.
- j) Son gerilme düzeyinden sonra yük kaldırıldığında numunedeki şişme miktarlarının kontrolü için bir kaç boşaltma yüklemesi yapılabilir.
- k) Numune halkadan çıkartıldıktan sonra deney sonu su muhtevası için etüve konur.

4.2.1.2. Denev sonuçları

Denev sonucunda her basınç kademesi için aşağıdaki parametreler hesaplanmalıdır.

$$\text{Numune kalınlığı}(H); \quad H = H_0 - d_f \quad (4.6)$$

$$\text{Boşluk kalınlığı}(H_V); \quad H_V = H - ((W_S / \gamma_S) / (\pi \times (D / 2)^2)) \quad (4.7)$$

$$\text{Boşluk oranı}(e); \quad e = H_V / (H_0 - H_V) \quad (4.8)$$

$$\text{Sıkışma katsayısı}(a_V); \quad a_V = \Delta e / \Delta p \quad (4.9)$$

$$\text{Hacimsel sıkışma katsayısı}(M_V); \quad M_V = a_V / (1 + e) \quad (4.10)$$

H_0 ; Bir nceki gerilme aŐamasındaki numune kalınlığı

d_f ; Denev yapılan gerilme aŐaması sonundaki dŐŐey deformasyon miktarı

W_S ; Danelerin ağırlığı

γ_S ; Dane birim hacim ağırlığı

D ; Numune apı

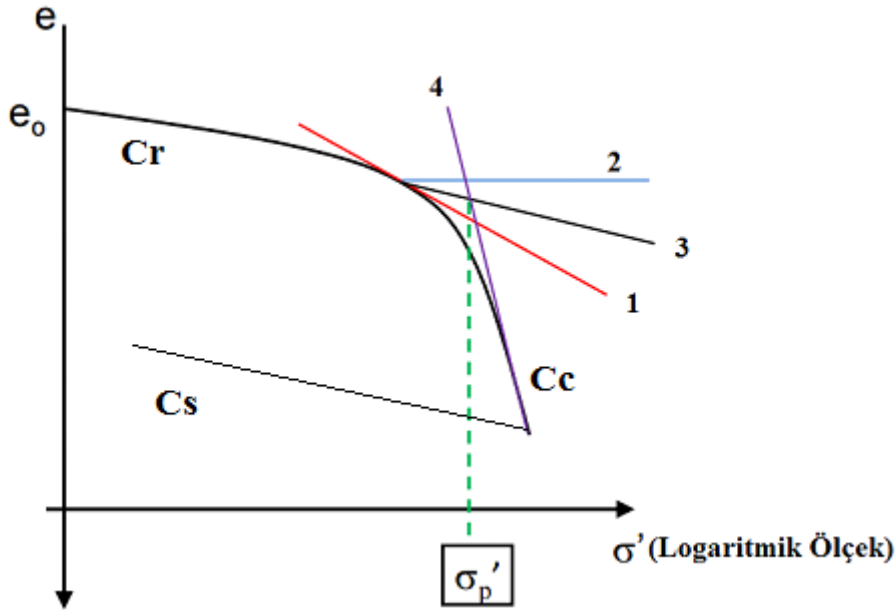
Δe ; Boşluk oranı ile bir önceki gerilmedeki boşluk oranı farkı

Δp ; Hesap yapılan ile bir önceki gerilme dŐzeyleri aralarındaki fark

Her efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranları belirlenir. Efektif gerilme değerleri yatay eksende(logaritmik), boşluk oranları dŐŐey eksende olacak Şekilde diyagram çizilir(Şekil 4.13). Boşluk oranı – Basınç(efektif gerilme) eğrisinde n

konsolidasyon basıncını belirlemek için grafikte eğimin döndüğü nokta belirlenir. Bu noktaya teğet(1) çizilir. Bu noktaya bir de yatay(2) çizilir. Yatay ile teğete bir açığırtay(3) çizilir ve sıkışma indisi(Cc) ile açığırtayın kesiştiği noktanın yatay izdüşümü ön konsolidasyon basıncı olarak kabul edilir. Ön konsolidasyon basıncı(σ_p'); zemin tabakalarının geçmişte maruz kaldığı en büyük gerilme değeridir. Başka bir deyişle zeminin hafızasıdır. Sıkışma indisi(Cc); normal konsolide killerde zeminin sıkışabilirliğini belirler. Sıkışma indisi veya başka bir deyişle bakir sıkışma eğrisi şeklinde gösterilen kısmın eğimidir ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma_v' \quad (4.11)$$



Şekil 4.13. Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi

Ön konsolidasyon basıncı killer için önemli bir parametredir. Bu basınç değerinden daha düşük basınç seviyelerinde zemin tekrar sıkışma gösterdiği için daha düşük oturmalara neden olur. Tekrar sıkışma gösterdiği bu kısmın eğimine tekrar sıkışma indisi(Cr) denir ve boşaltma kademelerinin eğimi olan Cs'ye eşit olarak kabul edilir.

Mevcut efektif gerilmesi bu güne kadar maruz kaldığı en büyük gerilmeye eşit olan zeminlere normal konsolide zeminler, mevcut efektif gerilmesi geçmişte maruz kaldığı efektif gerilmeden daha küçük olan zeminlere aşırı konsolide zeminler denir. Aşırı Konsolidasyon Oranı zeminin ön konsolidasyon basıncının mevcut efektif gerilmeye oranı ile bulunur. Normal konsolide zeminlerde aşırı konsolidasyon oranı bire eşittir. Düşük makaslama dayanımına sahiptirler. Aşırı konsolide zeminler ise aşırı konsolidasyon oranı birden büyük zeminlerdir. Aşırı konsolide zeminler yüksek makaslama dayanımına sahiptirler. Bunun sebebi daha önceden sıkışmaya maruz kaldıklarından dolayıdır. Aşırı konsolidasyon oranı birden küçük olamaz. Şekil 4.14’de yükleme ağırlıkları ve konsolidasyon deneyi sonuçlanmış bir numunenin deney sonu su muhtevasını ölçmek için etüve konmadan önceki hali görülmektedir.



Şekil 4.14. Konsolidasyon Deney Numunesi(Deney Sonu) ve yükleme ağırlıkları

Konsolidasyon katsayısı(C_v) zeminin konsolidasyon oranını belirleyen tek parametredir. C_v aşağıdaki formülasyonla belirlenir:

$$C_v = (T_v \times H_d) / t \quad (4.12)$$

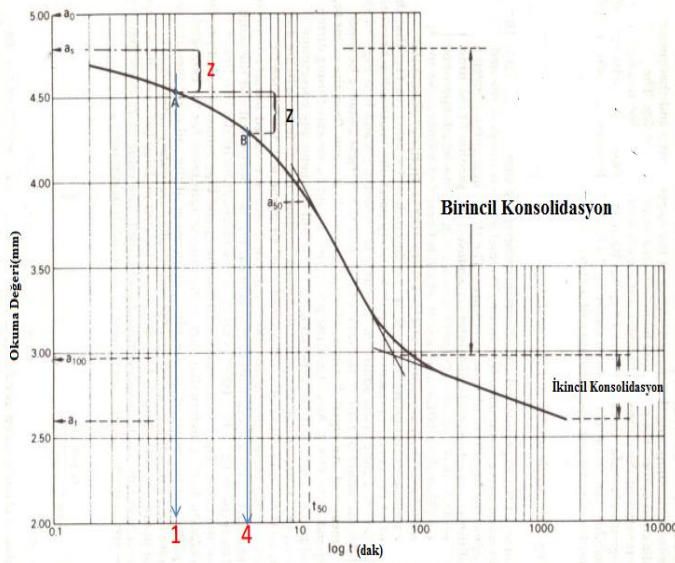
T_v ; Konsolidasyon yüzdesine bağlı zaman faktörü

H_d ; Drenaj boyu(m)

t ; zaman(sn)

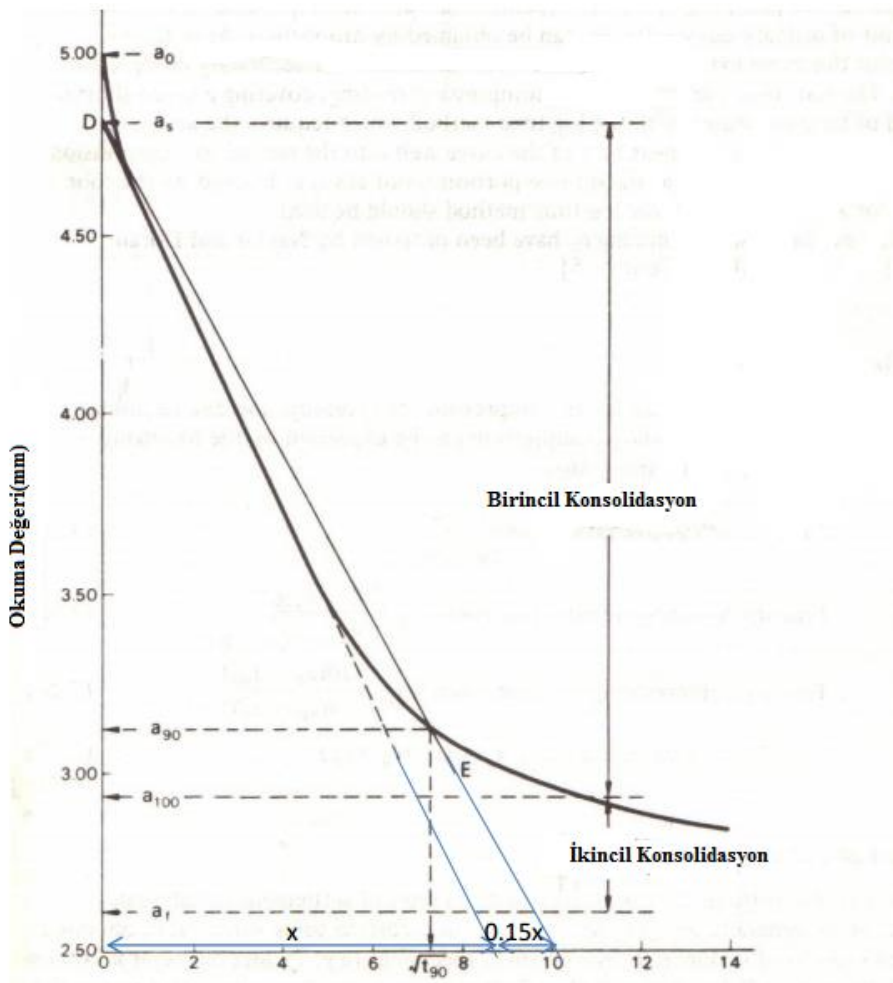
C_v 'nin belirlenmesinde iki farklı yöntem mevcuttur;

Casagrandenin Logaritma-Zaman Yöntemi ile C_v 'nin Belirlenmesi: Bu metotta deformasyon okumalarının zamanın logaritmasıyla değişimi çizilir. Eğri 3 kesimden oluşur; sırasıyla parabolik, doğrusal ve eğriseldir. Bir A noktası seçilir. A noktasının zaman olarak 4 katı sürede bir B noktası belirlenir. İkisi arasındaki z yüksekliği kadar A noktasından yukarı çıkılır. Burası oturmaların başlangıç noktasıdır($U = \%0$). Doğrusal kısmın teğeti ile eğrisel kısım teğetinin kesişim noktasının asimtotu $U = \%100$ noktası olarak tanımlanır. Başlangıçta ve $\%100$ konsolidasyona ait noktalar belirlendikten sonra deformasyon saati okumaları arasındaki düşey mesafenin yarısı alınarak, orta noktası hesaplanır. Grafikte orta noktaya karşılık gelen zaman değeri t_{50} olarak kabul edilir ve $C_v = (0.196 \times H_d^2) / t_{50}$ ile hesaplanır(Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Logaritma - zaman yöntemi ile C_v 'nin bulunması

Taylor'un Karekök-Zaman'a göre Uygun Eğri Oluşturma Yöntemi: Düşey deformasyon okumalarının zamanın kareköküne göre çizildiği konsolidasyon katsayısını belirleme yöntemidir(Holtz vd.,2015). Taylor (1948) %50 konsolidasyon oranında eğrinin yatay eksen mesafesinin doğrusal olarak devam eden kısmınının 1.15 katını yatayda alıp kestiği noktanın izdüşümü olarak gözlemlemiştir ve laboratuvar-zaman eğrisinde %90 konsolidasyona denk gelen noktayı bu şekilde hesaplamıştır ve $C_v = (0.848 \times H_d^2) / t_{90}$ ile hesaplanır(Şekil 4.16).



Şekil 4.16. C_v 'nin karekök - zaman yöntemiyle bulunması

4.2.2. Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi genellikle suya doymun killi zeminlerde ($\Phi = 0$) kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deneydir. Bu deneyde kullanılan numunelerin

genellikle boyu çapının iki katıdır. Serbest basınç deneyi yapılan zeminler doymun ve çatlak(fisür) içermeyen kohezyonlu zeminler olmalıdır. Deney süresince numunenin su içeriğinde değişiklikler olabileceğinden dolayı deney en fazla 10 dakika içinde ve birim boy kısalması dakikada %0.5 ile %2 arasında olmalıdır. Numunenin taşıdığı yük azaldığı zaman ya da %20 boy kısalması meydana geldiği zaman deney bitirilmelidir.

4.2.2.1. Denevin yapılışı

Serbest basınç deneyinde yaygın olarak 38 mm çapında ve 76 mm boyunda numuneler kullanılır. Deneye başlamadan önce numunenin alt ve üst yüzeyleri düzeltilmelidir. Numunenin çapı ve boyu 3 değişik yerden ölçülerek ortalama çap ile boyu bulunmalıdır. Deneye başlamadan önce su içeriği ve ağırlığı hesaplanmalıdır ve deney aşağıdaki sıraya göre yapılmalıdır.

- a) Numune alt başlığın merkezine yerleştirilir. Serbest basınç deney aleti çalıştırılarak numunenin üst başlığa teması sağlanır.
- b) Okuma saatleri sıfırlanır.
- c) Yükleme hızı yaklaşık olarak dakikada %1 deformasyon oranı elde edilecek şekilde yavaş yavaş yüklenmeye başlanır.
- d) Deformasyon okumaları bilgisayarda otomatik olarak kaydedilir.
- e) Numunede yük azalmaya başladığı zaman numunenin kırıldığı tespit edilir.
- f) Deney sonundaki su içeriği ve ağırlık belirlenerek deney tamamlanır.

4.2.2.2. Deney sonuçları

Deneyin sonucunda $\Phi = 0$ ve $\sigma_3 = 0$ koşullarına göre kohezyon ve kayma dayanımları tespit edilir.

4.2.3. Kesme kutusu deneyi

Zeminlerin kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve drenajsız kayma dayanımını belirlemek için kullanılır. Bu deneyde en önemli husus kesme hızının suyun drenaj hızından daha yavaş olmasıdır. Zeminin konsolidasyon özellikleri dikkate alınarak uygun bir kesme hızı seçilmelidir. Kesme hızı(R_d); Göçme için tahmin edilen yatay deplasmanın(d_f), göçme için tahmin edilen toplam zaman(t_f)'a oranıdır.

$$R_d = d_f / t_f \quad (4.13)$$

Göçme için tahmin edilen yatay deplasman zemin numunesine göre değişir. Göçme için tahmin edilen toplam zaman farklı yöntemlerle seçilebilir.

ASTM D3080'e göre;

$$t_f = 50 \times t_{50} \quad (\text{Ödometre deneyinde Logaritma-Zaman Grafiği kullanılarak}) \quad (4.14)$$

$$t_f = 11.6 \times t_{90} \quad (\text{Ödometre deneyinde Karekök-Zaman Grafiği kullanılarak}) \quad (4.15)$$

t_{50} ; %50 konsolidasyona ulaşması için gerekli zaman

t_{90} ; %90 konsolidasyona ulaşması için gerekli zaman

Gibson ve Henkel (1954) yenilme için tahmin edilen minimum zamanı(t_f);

$$t_f = h^2 / (2 \times C_v \times (1 - U_c)) \quad (4.16)$$

formülü ile tanımlamıştır. Burada; h; Numune yüksekliğinin yarısı, C_v ; Konsolidasyon katsayısı ve U_c ; Orta düzlem boşluk suyu sönümlenme oranı(minimum 0.95)'dir.

BS 1377-7:1990'da ise aşağıdaki şekilde hesaplanır. Burada; t_{100} ; %100 konsolidasyona ulaşması için gerekli zamanı ifade eder.

$$t_f = 12.7 \times t_{100} \quad (4.17)$$

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kesme hızı dakikada 0.02 mm yatay deplasman yapacak şekilde belirlenmiştir.

4.2.3.1. Denevin yapılışı

- a) Shelby tüpünden aynı özelliklere(sıklık, su muhtevası vb.) sahip, en az 3 adet deney numunesi hazırlanır.
- b) Hazırlanan zemin numunesi Şekil 4.17'da görülen kesme kutusu hücresinin içine yerleştirilir. Numunenin altına ve üstüne poroz taşlar konulmalıdır. Poroz taşın içindeki kılcal boşluklardan drenaj mümkündür.
- c) Numunenin üstüne yükleme başlığı yerleştirilir ve Deformasyon saatleri sıfırlanır.
- d) Numune önce doygun hale getirilmelidir.
- e) Daha sonra sabit bir düşey yük ile numune konsolidasyona bırakılır. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra numune bu deney için belirlenen kesme hızında kesmeye tabi tutulur.
- f) Gittikçe artan kesme kuvvetinden dolayı zemin örneğini 2 parçaya ayıran düzlem boyunca kesilir.
- g) Yatay kuvvet arttığı halde kuvvet halkasındaki yük değeri artmıyorsa ya da ani bir azalma meydana gelmiş ise numunenin kesilmiş olduğu sonucuna varılır. Numune kesildikten sonra deney son verilir.
- h) Kesme kutusundan çıkartılan numunenin deney sonu su muhtevası hesaplanır.
- i) Değişik sabit düşey yükler altında deney en az 3 kez tekrarlanır.



Şekil 4.17. Kesme Kutusu Deney Hücresi

4.2.3.2. Deney sonuçları



Şekil 4.18. Kesme Kutusu Deney Numuneleri (Deney Sonu)

Deney sonuçları yatay eksene normal gerilme, düşey eksene kayma gerilmesi olacak şekilde eksen takımında işaretlendikten sonra doğrusal bir yenilme zarfı aracılığıyla zeminin kohezyon(c) ve kayma mukavemeti açısı(Φ) elde edilir. Bu çalışma kapsamında bütün kesme numuneleri 50,100,200 kPa normal gerilmeler altında sıkıştırıldıktan sonra kesilmiştir(Şekil 4.18).

4.2.4. Üç eksenli basınç deneyi

Arazide zemin üç eksenli gerilme etkisi altında bulunduğu için gerçeğe en yakın kayma parametrelerinin elde edildiği deneydir. Boşluk suyu basınçları dikkate alınmadan zeminlerin değişik yanal basınçlarda makaslama dayanımları, kayma mukavemeti açısı, kohezyon değeri, deformasyon modülü gibi elastik özellikleri ve dayanımlarının saptanması için gerekli verilerin bulunması bu deneyle sağlanabilir. Üç Eksenli Basınç Deneyleri; Konsolidasyonlu-Drenajlı(CD), Konsolidasyonsuz-Drenajsız(UU) ve Konsolidasyonlu – Drenajsız(CU) yapılabilir.

4.2.4.1. Deneyin yapılışı

- a) Deney numuneleri serbest basınç deneyindeki gibi tüplerden çıkarıldıktan sonra uygun çaplarda hazırlanır.
- b) Deneye başlamadan önce deney başı su muhtevası alınır.
- c) Alt ve üst başlıkların ve deney numunesinin yüzeyleri temizlenir. Deney numunesi alt başlığın üzerine yerleştirilir.
- d) Üç eksenli basınç deney aletinin içerisindeki silindir hücreye numune etrafında lastik membran olacak şekilde yerleştirilir.
- e) Deney aletinin içindeki piston tam numuneye temas edecek şekilde ayarlanır. Üç eksenli silindir hücrenin etrafı su ile doldurulur ve böylece numune etrafında istenilen değerlerde hidrostatik basınç oluşturulabilir.
- f) Kuvvet halkası saati ve düşey deformasyon saati sıfırlanır.

- g) Yüklemeye başlandıktan sonra hücredeki basınç sabit kalırken düşey yük sabit bir hızla uygulanır.
- h) Deformasyon saati yardımıyla numunenin aksenal boy kısılması kuvvet halkası yardımıyla uygulanan düşey yük ölçülür.
- i) Ölçümler düşey yük halkasındaki okumaların sabitlenmesine veya azalmaya başladığı anda deney bitirilir.
- j) Yük halkasındaki okumalarda düşüş gözlenmez ise düşey deformasyonun %20'ye ulaşmasıyla deneye son verilir.
- k) Üç eksenli basınç deney aletindeki basınç düşürülür, hücredeki su boşaltılır ve numune çıkartılarak deney sonu su muhtevası hesaplanır.
- l) Farklı yanal basınç değerleri ile deney tekrarlanabilir.

4.2.4.2. Deney sonuçları

Farklı çevresel basınç değerleri ile yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonucunda çizilen Mohr daireleri yardımıyla kohezyon(c) ve kayma mukavemeti açıları(Φ) hesaplanır. Şekil 4.19'da Konsolidasyonlu – Drenajsız(CU) Üç Eksenli Deney Numunesinin deney sonrası fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.19. Konsolidasyonlu – Drenajsız(CU) Üç Eksenli Deney Numunesi (Deney Sonu)

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında 79 adet sondaj numunesinin tanımlama deneyi yapılmış, sonra bu numuneler üzerlerinde konsolidasyon, serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç(CU,CD,UU) deneyleri yapılmıştır. Araziden getirilen numuneler 2 grup halinde getirildiği için, adlandırma yapılırken karışıklı önlemek için ikinci gruptaki numunelerin deney isimlerinin sondaj numaralarına “B” indisi eklenerek değiştirilmiştir. Örneğin; “S1” şeklinde olan sondaj numaralası “SB1” şeklinde değiştirmiştir.

Çizelge 5.1’de birinci grup numunelerinin deney listesi, çizelge 5.2’de ise ikinci grup deney numunelerinin deney listesi bulunmaktadır. Hangi derinlikte alınan numuneden hangi deneyin yapıldığı “X” ile işaretlenerek belirtilmiştir. SB; serbest basınç, CONS; konsolidasyon, KK; kesme kutusu, CU; konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli deneyini, CD; konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneyini, UU; konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli deneyi ifade etmektedir.

Çizelge 5.1. Birinci grup deney listesi

1. GRUP DENEY LİSTESİ									
SN	Derinlik	Tanımlama	Grup Sembolü	SB	KK	CONS	CU	CD	UU
S1	7.50-8.00	X	CH		X		X		
	18.00-18.50	X	CH		X		X		
	27.00-27.50	X	CH		X				
	33.25-33.80	X	CH						X
	43.70-44.50	X	CH				X		

S2	3.00-3.50	X	CH		X	X			
	18.00-18.50	X	CH			X			
	28.50-29.00	X	CH		X		X		
	39.80-40.50	X	CH				X		
S3	3.00-3.50	X	CH					X	
	12.00-12.50	X	CH	X	X				
	16.50-17.00	X	CH		X	X		X	
	25.50-26.00	X	CH	X					
	35.00-35.80	X	CH					X	
S4	19.50-20.30	X	CH		X				
	24.00-24.80	X	CH		X				
	37.50-38.30	X	CH		X	X	X		
S5	0.80-1.30	X	MH				X		
	2.00-2.50	X	SM		X				
	22.50-23.30	X	CH			X			
S6	15.00-15.50	X	CH		X				
	18.00-18.50	X	CH						X
	19.50-20.00	X	CH				X		
S7	3.00-3.60	X	SM			X			
	7.50-8.10	X	CH		X	X			

	16.50-16.80	X	CH			X			
S9	3.00-3.50	X	CH		X				
S10	32.00-32.80	X	CH				X		
S11	3.00-3.50	X	CH		X	X			
	7.50-8.00	X	CH			X		X	
S12	4.50-4.85	X	CH		X				
	27.00-27.50	X	CH		X				
P3	5.50-6.50	X	CH		X	X	X		

Çizelge 5.2. İkinci grup deney listesi

2. GRUP DENEY LİSTESİ									
SN	Derinlik	Tanımlama	Grup Sembolü	SB	KK	CONS	CU	CD	UU
SB1	3.00-3.50	X	CH			X			
	25.50-25.75	X	CH				X		
	36.00-36.60	X	CH		X	X			
	42.50-43.10	X	CH		X				
SB3	7.50-8.00	X	MH			X		X	
	12.00-12.50	X	MH		X		X		
SB5	10.50-10.90	X	CH		X				
	16.50-16.80	X	CH				X		

	34.50-35.10	X	SM			X			
SB6	4.50-4.70	X	MH		X				
	10.50-10.75	X	CH		X	X			
	31.50-32.10	X	CH				X		
	37.50-38.00	X	CH		X				
	45.00-45.60	X	CH			X			
SB7	3.00-3.50	X	CH						X
	10.50-11.00	X	MH			X		X	
	34.50-35.10	X	CH		X				
	40.50-41.10	X	CH			X	X		
SB8	15.00-15.25	X	CH		X				
	39.00-39.60	X	CH			X			
SB9	10.50-10.75	X	CL		X				
	27.00-27.60	X	CH			X			
	36.00-36.60	X	CH				X		
SB11	9.00-9.40	X	MH						X
	28.50-29.10	X	CH		X	X			
	45.00-45.60	X	CH					X	
SB12	3.00-3.40	X	CH				X		
	5.50-6.00	X	CH		X				

	30.00-30.60	X	CH		X				
	37.50-38.10	X	CH						X
	42.00-42.60	X	CH						X
	48.00-48.45	X	CH			X			
SB13	9.00-9.50	X	MH				X		
	43.50-44.10	X	CH						X
SB14	39.00-39.60	X	CH						X
SB15	42.00-42.60	X	CH		X				
SB16	28.50-29.10	X	CH				X		
SB17	3.00-3.50	X	CH		X				
	31.50-32.00	X	CH						X
SB18	34.50-35.10	X	CH		X				
SB19	21.00-21.50	X	CH						X
SB21	28.50-29.10	X	CL				X		
SB23	4.50-5.00	X	CL		X				
	9.00-9.50	X	CH				X		
SB26	9.00-9.25	X	CH		X				
	28.50-29.10	X	CH						X

5.1. Tanımlama Deney Sonuçları

Birinci grupta 33, ikinci grupta 46 olmak üzere 79 tanımlama deneyi yapılmıştır. Çizelge 5.3'te birinci grup numunelerinin tanımlama sonuçlarını, Çizelge 5.4'te ise ikinci grup numunelerinin tanımlama sonuçları verilmiştir.

Birinci grup numunelerinin tanımlama sonuçlarına göre; numunelerin neredeyse tamamının yüksek plastisiteli kil(CH) olduğu tespit edilmiştir. Sadece; S5 sondaj kuyusunun, 0,80-1,30 m derinliklerinde yüksek plastisiteli silt(MH), S5 sondaj kuyusunun, 0,80-1,30 m derinliklerinde alınan numunelerin yüksek plastisiteli silt(MH), S5 sondaj kuyusunun, 2,00-2,50 m ve S7 sondaj kuyusunun, 3,00-3,60 m derinliklerinden alınan numunelerin ise siltli kum(SM) olduğu tespit edilmiştir. Bu sondaj numunelerinin yüzeysel derinliklerde olduğu düşünülürse ve aynı sondaj kuyularının daha derin seviyelerinden alınan numunelerin bile yüksek plastisiteli kil olduğu düşünüldüğünde birinci grup numunelerinin tamamının kil olduğunun söylenmesi mümkün olabilmektedir.

Çizelge 5.3. Birinci grup tanımlama sonuçları

1. GRUP TANIMLAMA SONUÇLARI									
Sondaj No	Derinlik	Grup Sembolü	LL (%)	PL (%)	PI (%)	PL/LL	Kil Yüzdesi	Gs	Wn
S1	7.50-8.00	CH	80,63	24,72	55,91	0,31	26,70	2,69	33,64
	18.00-18.50	CH	71,27	19,62	51,65	0,28	28,10	2,71	30,05
	27.00-27.50	CH	67,54	15,76	51,78	0,23	28,90	2,68	21,52
	33.25-33.80	CH	59,34	13,24	46,10	0,22	14,80	2,69	37,46
	43.70-44.50	CH	83,70	20,20	63,50	0,24	43,70	2,68	36,71
S2	3.00-3.50	CH	66,01	18,63	47,38	0,28	26,70	2,69	24,84
	18.00-18.50	CH	121,50	41,15	80,35	0,34	35,00	2,66	51,43

	28.50-29.00	CH	70,52	21,32	49,20	0,30	14,20	2,66	20,65
	39.80-40.50	CH	74,68	17,50	57,18	0,23	17,40	2,65	16,96
S3	3.00-3.50	CH	89,09	21,31	67,78	0,24	28,20	2,68	32,52
	12.00-12.50	CH	81,16	26,82	54,34	0,33	17,30	2,69	23,37
	16.50-17.00	CH	78,27	14,80	63,47	0,19	38,90	2,69	23,78
	25.50-26.00	CH	82,03	27,74	54,29	0,34	29,00	2,68	23,78
	35.00-35.80	CH	75,10	30,35	44,75	0,40	26,40	2,69	44,02
S4	19.50-20.30	CH	79,89	32,44	47,45	0,41	7,80	2,65	37,29
	24.00-24.80	CH	59,47	23,62	35,85	0,40	7,80	2,64	38,91
	37.50-38.30	CH	66,88	27,39	39,49	0,41	73,80	2,65	22,12
S5	0.80-1.30	MH	100,19	44,14	56,05	0,44	6,90	2,65	35,70
	2.00-2.50	SM	85,57	43,66	41,91	0,51	1,80	2,64	40,03
	22.50-23.30	CH	57,50	24,21	33,29	0,42	11,00	2,69	29,60
S6	15.00-15.50	CH	95,38	27,13	68,25	0,28	22,50	2,67	29,16
	18.00-18.50	CH	67,33	21,88	45,45	0,32	27,80	2,70	21,53
	19.50-20.00	CH	80,71	22,84	57,87	0,28	32,10	2,67	25,15
S7	3.00-3.60	SM	50,37	17,85	32,52	0,35	5,20	2,70	18,96
	7.50-8.10	CH	76,08	32,88	43,20	0,43	25,30	2,67	28,63
	16.50-16.80	CH	64,15	30,83	33,32	0,48	24,30	2,68	19,47
S9	3.00-3.50	CH	55,88	23,93	31,95	0,43	21,50	2,70	25,66
S10	32.00-32.80	CH	65,18	16,20	48,98	0,25	18,50	2,66	36,81

S11	3.00-3.50	CH	70,59	28,05	42,54	0,40	22,10	2,69	40,07
	7.50-8.00	CH	61,54	27,11	34,43	0,44	22,20	2,69	27,06
S12	4.50-4.85	CH	84,58	34,73	49,85	0,41	30,00	2,62	28,97
	27.00-27.50	CH	77,49	30,14	47,35	0,39	25,50	2,65	26,77
P3	5.50-6.50	CH	96,97	40,18	56,79	0,41	24,00	2,64	37,75

Birinci grup numunelerinin tanımlama deneyleri sonuçlarına göre; S7 sondaj kuyusunun 3,00-3,60 m derinliklerinden alınan siltli kum numunesini görmezden gelirse, yaklaşık %56 likit limit değeri ile en düşük likit limit S9(3,00-3,50 m) numunesinde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek likit limit ise S2(18,00-18,50 m) derinliğinden alınan numune üzerinde yaklaşık %122 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca çizelgede plastik limit, plastisite indisleri, plastik limit ve likit limit oranları, kil yüzdesi, özgül yoğunlukları ve doğal su muhtevası değerleri verilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin kil yüzdeleri 1,80 ile 73,80 arasında, özgül yoğunlukları ise 2,62 ile 2,71 arasında değişmektedir(Çizelge 5.3).

Çizelge 5.4. İkinci grup tanımlama sonuçları

2. GRUP TANIMLAMA SONUÇLARI									
Sondaj No	Derinlik	Grup Sembolü	LL (%)	PL (%)	PI (%)	PL/LL	Kil Yüzdesi	Gs	Wn
SB1	3.00-3.50	CH	72,78	31,79	40,99	0,44	22,86	2,69	27,74
	25.50-25.75	CH	70,62	30,51	40,11	0,43	26,79	2,63	25,64
	36.00-36.60	CH	77,76	31,42	46,34	0,40	25,74	2,65	42,26
	42.50-43.10	CH	78,36	23,54	54,82	0,30	22,95	2,64	39,92
SB3	7.50-8.00	MH	85,92	38,59	47,33	0,45	22,44	2,65	37,93

	12.00-12.50	MH	103,32	45,44	57,88	0,44	25,53	2,63	61,35
SB5	10.50-10.90	CH	59,22	29,02	30,20	0,49	26,61	2,67	24,41
	16.50-16.80	CH	82,96	31,69	51,27	0,38	26,61	2,66	29,94
	34.50-35.10	SM	56,24	36,24	20,00	0,64	14,79	2,52	47,69
SB6	4.50-4.70	MH	75,97	28,07	47,90	0,37	18,45	2,63	28,07
	10.50-10.75	CH	52,82	24,17	28,65	0,46	15,21	2,57	21,07
	31.50-32.10	CH	68,96	33,08	35,88	0,48	18,21	2,61	21,53
	37.50-38.00	CH	58,49	25,74	32,75	0,44	16,38	2,59	31,56
	45.00-45.60	CH	62,70	26,30	36,40	0,42	14,13	2,59	40,19
SB7	3.00-3.50	CH	56,05	24,29	31,76	0,43	18,27	2,69	29,75
	10.50-11.00	MH	82,23	40,65	41,58	0,49	21,15	2,63	34,46
	34.50-35.10	CH	65,98	27,22	38,76	0,41	23,31	2,57	18,35
	40.50-41.10	CH	78,62	31,49	47,13	0,40	23,64	2,57	20,48
SB8	15.00-15.25	CH	62,91	26,33	36,58	0,42	20,82	2,65	20,29
	39.00-39.60	CH	81,43	34,00	47,43	0,42	22,44	2,65	30,46
SB9	10.50-10.75	CL	39,93	20,99	18,94	0,53	16,38	2,66	17,66
	27.00-27.60	CH	76,45	31,87	44,58	0,42	24,36	2,64	28,20
	36.00-36.60	CH	66,66	31,54	35,12	0,47	22,08	2,65	34,99
SB11	9.00-9.40	MH	81,08	41,51	39,57	0,51	26,34	2,61	37,97
	28.50-29.10	CH	68,77	22,54	46,23	0,33	23,19	2,63	33,75
	45.00-45.60	CH	60,34	21,23	39,11	0,35	19,23	2,64	24,17

SB12	3.00-3.40	CH	78,19	28,30	49,89	0,36	25,00	2,61	24,79
	5.50-6.00	CH	59,09	24,01	35,08	0,41	19,60	2,68	24,79
	30.00-30.60	CH	67,37	22,71	44,66	0,34	24,39	2,63	26,69
	37.50-38.10	CH	71,84	25,87	45,97	0,36	23,73	2,63	25,74
	42.00-42.60	CH	50,90	19,13	31,77	0,38	22,32	2,61	22,36
	48.00-48.45	CH	71,03	28,80	42,23	0,41	22,68	2,64	26,26
SB13	9.00-9.50	MH	65,32	33,85	31,47	0,52	9,40	2,66	27,25
	43.50-44.10	CH	60,47	22,38	38,09	0,37	17,94	2,65	29,58
SB14	39.00-39.60	CH	50,19	19,89	30,30	0,40	19,80	2,72	20,07
SB15	42.00-42.60	CH	54,96	21,73	33,23	0,40	18,70	2,63	29,14
SB16	28.50-29.10	CH	71,80	25,35	46,45	0,35	25,26	2,63	27,49
SB17	3.00-3.50	CH	50,26	19,78	30,48	0,39	18,70	2,64	27,23
	31.50-32.00	CH	74,65	24,53	50,12	0,33	18,96	2,65	22,91
SB18	34.50-35.10	CH	64,78	26,95	37,83	0,42	22,47	2,65	32,62
SB19	21.00-21.50	CH	71,65	28,00	43,65	0,39	25,20	2,59	29,10
SB21	28.50-29.10	CL	44,45	17,51	26,94	0,39	23,40	2,65	18,39
SB23	4.50-5.00	CL	47,39	19,87	27,52	0,42	24,30	2,70	19,81
	9.00-9.50	CH	62,68	22,24	40,44	0,35	24,00	2,67	27,57
SB26	9.00-9.25	CH	59,24	24,25	34,99	0,41	8,58	2,65	24,68
	28.50-29.10	CH	51,93	18,83	33,10	0,36	19,74	2,62	19,97

İkinci grup numunelerinin tanımlama deneyleri sonuçlarına göre; 46 numuneden 36'sının yüksek plastisiteli kil(CH), 6'sı yüksek plastisiteli silt(MH), 3'ü düşük plastisiteli kil ve 1'i ise siltli kum(SM) olduğu tespit edilmiştir. Likit limit değerleri %50 ile %104 arasında değişmekte olduğu görülmüştür. Ayrıca çizelgede plastik limit, plastisite indisleri, plastik limit ve likit limit oranları, kil yüzdesi, özgül yoğunlukları ve doğal su muhtevası değerleri verilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin kil yüzdeleri 8,58 ile 26,79 arasında, özgül yoğunlukları ise 2,52 ile 2,72 arasında değiştiği tespit edilmiştir(Çizelge 5.4).

5.2. Konsolidasyon Deney Sonuçları

Birinci grup numunelerinden 11, ikinci grup numunelerinden 12 olmak üzere toplam 23 adet konsolidasyon numunesi deneye tabi tutulmuştur. 23 numuneden 19'unun yüksek plastisiteli kil(CH), 2'si yüksek plastisiteli silt(MH), ve 2'i ise siltli kum(SM) olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.5'de her iki grubun da konsolidasyon deney sonuçları verilmiştir. Çizelge 5.5'de konsolidasyon deneyi yapılan numunelerin ön konsolidasyon basınçları ve aşırı konsolidasyon oranları verilmiştir. Konsolidasyon deney sonuçlarına göre numunelerden 12 tanesinin normal konsolide, 11 tanesinin ise aşırı konsolide olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.5. Konsolidasyon sonuçları

KONSOLİDASYON SONUÇLARI (HER İKİ GRUP İÇİN)					
Sondaj Numarası	Derinlik	Grup Sembolü	Aşırı Konsolidasyon Oranı (AKO)	Örselenmemiş Ön Kons. Basıncı(kPa)	Örselenmiş Ön Kons. Basıncı(kPa)
S2	3.00-3.50	CH	2,40 – 2,60	150	150
	18.00-18.50	CH	1	200	180

S3	16.50-17.00	CH	1	150	150
S4	37.50-38.30	CH	1	370	
S5	22.50-23.30	CH	1	270	220
S7	3.00-3.60	SM	1,80 – 2,00	120	
	7.50-8.10	CH	1,20 – 1,30	150	150
	16.50-16.80	CH	1	280	
S11	3.00-3.50	CH	3,5 – 3,70	200	190
	7.50-8.00	CH	1,80 – 2,00	270	220
P3	5.50-6.50	CH	2,20 – 2,40	180	180
SB1	3.00-3.50	CH	3,50 – 3,70	210	
	36.00-36.60	CH	1	310	
SB3	7.50-8.00	MH	1,60 – 1,80	210	
SB5	34.50-35.10	SM	1	630	
SB6	10.50-10.75	CH	1,20 – 1,40	230	
	45.00-45.60	CH	1	610	
SB7	10.50-11.00	MH	1,20 – 1,40	210	
	40.50-41.10	CH	1	550	
SB8	39.00-39.60	CH	1	430	
SB9	27.00-27.60	CH	1	340	
SB11	28.50-29.10	CH	1	320	
SB12	48.00-48.45	CH	1	530	

5.3. Serbest Basınç DeneY Sonuçları

Birinci grup numunelerinden S3(12,00-12,50m) ve S3(25,50-26,00m) derinliklerinden iki adet serbest basınç deneyi yapılmıştır(Çizelge 5.6). Yapılan numunelerin yüksek plastisiteli kil(CH) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca; S3(12,00-12,50m) derinliğinden kıyas amaçlı bir de kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Kayma mukavemetleri kıyas edildiğinde birbirine çok yakın değerler çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.6. Serbest basınç sonuçları

SERBEST BASINÇ DENEY SONUÇLARI				
(HER İKİ GRUP İÇİN)				
Sondaj Numarası	Derinlik	Grup Sembolü	C_u (kN/m²)	Φ (°)
S3	12.00-12.50	CH	65,10	0,00
	25.50-26.00	CH	105,12	0,00

5.4. Kesme Kutusu DeneY Sonuçları

Birinci grup deneylerinden 18, ikinci grup deneylerinden 18 olmak üzere toplam 36 adet kesme kutusu deneyi yapılmıştır. 36 numuneden 31'inin yüksek plastisiteli kil(CH), 2'si yüksek plastisiteli silt(MH), 2'si düşük plastisiteli kil(CL) ve 1'inin de siltli kum(SM) olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.7'de her iki grubun da örselenmemiş kesme kutusu deney sonuçları verilmiştir. Ayrıca örselenmiş deney yapılan numunelerin örselenmiş deney parametreleri de yer almaktadır.

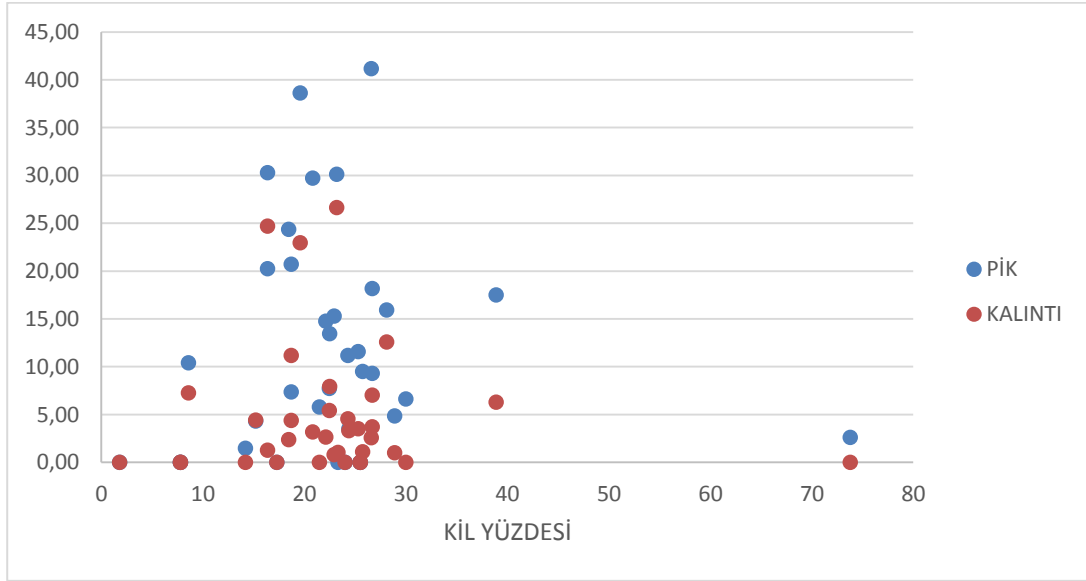
Çizelge 5.7. Kesme kutusu deney sonuçları

KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARI(HER İKİ GRUP İÇİN)								
SN	Derinlik	Grup Sembolü	Pik Kohezyon (kN/m²)	Pik Kayma Muk. Açısı(°)	Rezidüel Kohezyon (kN/m²)	Rezidüel Kayma Muk. Açısı (°)	Örselenmiş Kohezyon (kN/m²)	Pik Kayma Muk. Açısı (°)
S1	7.50-8.00	CH	9,28	18,25	3,71	17,56		
	18.00-18.50	CH	15,93	18,23	12,58	15,08		
	27.00-27.50	CH	4,84	22,08	0,98	16,20		
S2	3.00-3.50	CH	18,15	19,91	7,02	18,32		
	28.50-29.00	CH	1,48	33,76	0,00	24,93	0,00	23,20
S3	12.00-12.50	CH	0,00	27,54	0,00	22,33	0,00	20,20
	16.50-17.00	CH	17,49	28,46	6,28	25,17	5,80	22,23
S4	19.50-20.30	CH	0,00	15,51	0,00	11,12		
	24.00-24.80	CH	0,00	26,99	0,00	15,14		
	37.50-38.30	CH	2,60	17,14	0,00	14,17	0,00	13,52
S5	2.00-2.50	SM	0,00	28,07	0,00	19,40		
S6	15.00-15.50	CH	13,46	13,07	7,91	13,06	6,50	12,85
S7	7.50-8.10	CH	11,56	18,40	3,49	15,66	3,10	16,28
S9	3.00-3.50	CH	5,78	23,82	0,00	21,48	0,00	16,98
S11	3.00-3.50	CH	14,75	16,60	2,62	16,84	2,50	15,26
S12	4.50-4.85	CH	6,63	35,14	0,00	15,34		

	27.00-27.50	CH	0,00	23,70	0,00	16,19	0,00	15,59
P3	5.50-6.50	CH	0,00	23,92	0,00	18,02	0,00	15,70
SB1	36.00-36.60	CH	9,51	19,99	1,09	16,44		
	42.50-43.10	CH	15,30	21,22	0,79	19,02		
SB3	12.00-12.50	MH	0,00	20,88	0,00	13,34		
SB5	10.50-10.90	CH	41,16	22,82	2,56	19,46		
SB6	4.50-4.70	MH	24,34	18,77	2,36	17,59		
	10.50-10.75	CH	4,31	43,57	4,41	26,66		
	37.50-38.00	CH	30,29	11,48	24,70	10,15		
SB7	34.50-35.10	CH	0,00	34,45	1,02	24,64		
SB8	15.00-15.25	CH	29,72	32,34	3,17	27,77		
SB9	10.50-10.75	CL	20,23	35,48	1,27	34,81		
SB11	28.50-29.10	CH	30,11	11,59	26,64	10,15		
SB12	5.50-6.00	CH	38,62	16,02	22,95	14,97		
	30.00-30.60	CH	3,50	20,40	3,32	17,70		
SB15	42.00-42.60	CH	20,70	22,39	11,18	17,77		
SB17	3.00-3.50	CH	7,35	17,54	4,39	13,60		
SB18	34.50-35.10	CH	7,71	22,42	5,42	17,11		
SB23	4.50-5.00	CL	11,17	15,37	4,54	11,43		
SB26	9.00-9.25	CH	10,40	22,08	7,25	15,60		

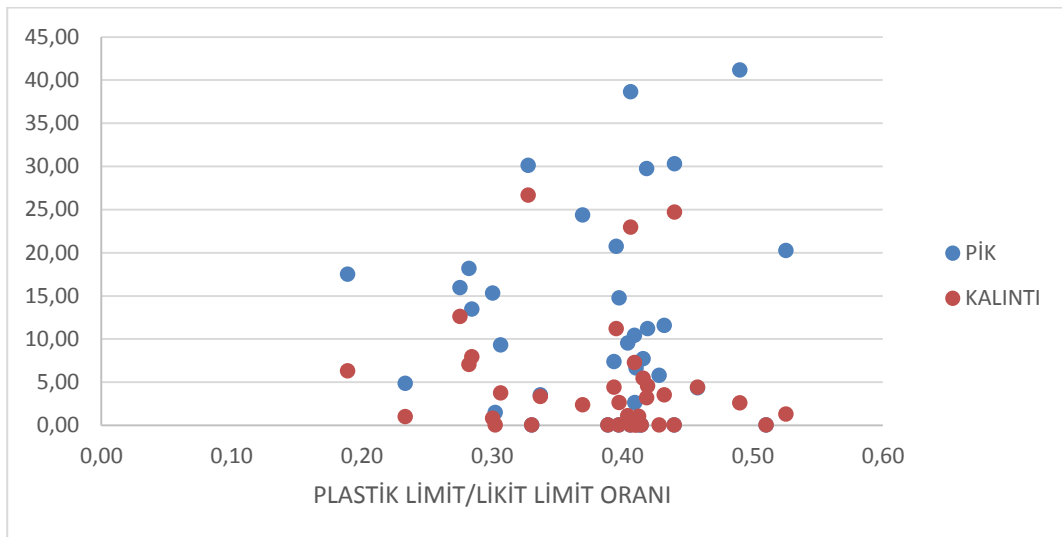
Kesme kutusu deneyinde örselenmemiş numuneler üzerinde hem pik hemde rezidüel kayma dayanım parametreleri hesaplanmıştır. Örselenmiş numuneler üzerinde ise sadece pik dayanım parametreleri hesaplanmıştır. Örselenmiş numunelerin pik dayanım parametreleri, örselenmemiş numunelerin pik dayanım parametrelerine yakın olmaktadır.

Çizelge 5.8. Kil yüzdesinin kohezyona etkisi



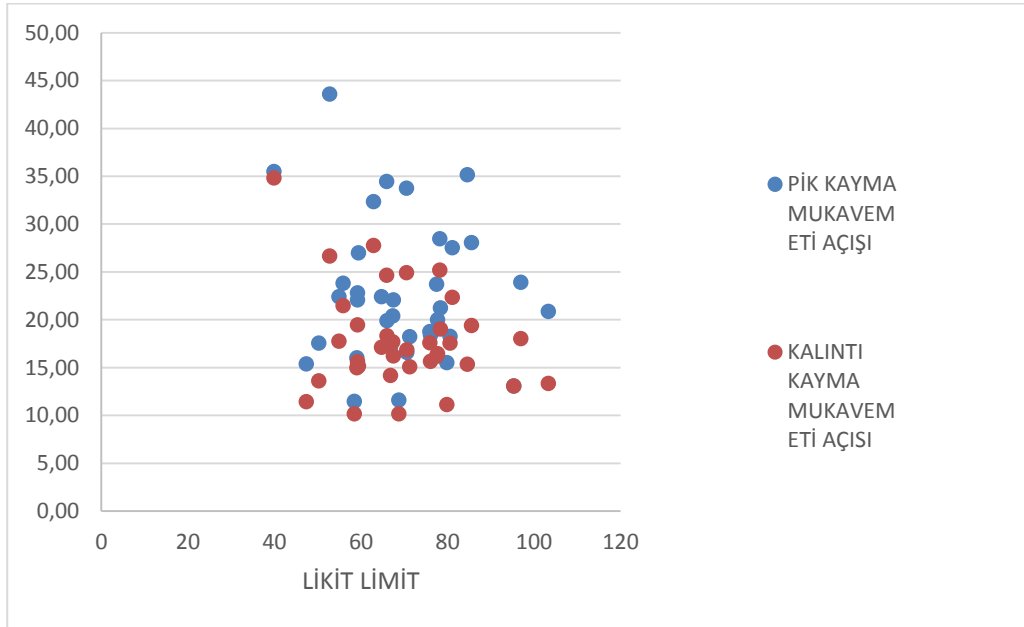
Numune içeriğindeki kil yüzdesi kohezyon değerini etkilemektedir. Kil yüzdesi arttıkça kohezyon ve efektif kohezyon değerleri artmaktadır(Çizelge 5.8).

Çizelge 5.9. Plastik limit/Likit limit oranının kohezyona etkisi



Numune içeriğindeki Plastik Limitin Likit Limite oranı kohezyon değerini etkilemektedir(Çizelge 5.9).

Çizelge 5.10. Likit limitin kayma mukavemeti açısına etkisi



Çizelge 5.10'da numune içeriğindeki likit limitin kohezyon değerine etkisi görülmektedir.

5.5. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

Birinci grup deneylerinden 16, ikinci grup deneylerinden 23 olmak üzere toplam 39 adet üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

5.5.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli basınç(CD) deney sonuçları

Birinci grup deneylerinden 4, ikinci grup deneylerinden 3 olmak üzere toplam 7 adet konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç(CD) deneyi yapılmıştır. 7 numuneden 5'inin yüksek plastisiteli kil(CH), 2'sinin de yüksek plastisiteli silt(MH) olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.11'de her iki grubun konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç(CD) deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.11. Konsolidasyonlu – drenajlı üç eksenli basınç(CD) deney sonuçları

KONSOLIDASYONLU - DRENAJLI (CD) ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI (HER İKİ GRUP İÇİN)				
Sondaj Numarası	Derinlik	Grup Sembolü	C' (kN/m²)	Φ' (°)
S3	3.00-3.50	CH	61,88	8,76
	16.50-17.00	CH	41,89	28,87
	35.00-35.80	CH	0	8,36
S11	7.50-8.00	CH	11,52	22,87
SB3	7.50-8.00	MH	39,12	5,35
SB7	10.50-11.00	MH	0	21,5
SB11	45.00-45.60	CH	1,74	28,45

5.5.2. Konsolidasyonsuz-Drenajsız üç eksenli basınç(UU) deney sonuçları

Çizelge 5.12. Konsolidasyonsuz – drenajsız üç eksenli basınç(UU) deney sonuçları

KONSOLIDASYONSUZ - DRENAJSIZ (UU) ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI (HER İKİ GRUP İÇİN)				
Sondaj Numarası	Derinlik	Grup Sembolü	C (kN/m²)	Φ (°)
S1	33.25-33.80	CH	41,95	0
S6	18.00-18.50	CH	160,87	3,57
SB7	3.00-3.50	CH	87,83	0

SB11	9.00-9.40	CH	63,23	0,24
SB12	37.50-38.10	CH	113	0
	42.00-42.60	CH	134,28	0
SB13	43.50-44.10	CH	160,45	0,16
SB14	39.00-39.60	CH	220,23	0
SB17	31.50-32.00	CH	110,84	0
SB19	21.00-21.50	CH	87	0
SB26	28.50-29.10	CH	91,5	0

Birinci grup deneylerinden 2, ikinci grup deneylerinden 9 olmak üzere toplam 11 adet konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç(UU) deneyi yapılmıştır. 11 numunenin tamamının yüksek plastisiteli kil(CH) olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.12’de her iki grubun konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç(UU) deney sonuçları verilmiştir.

5.5.3. Konsolidasyonlu-Drenajsız üç eksenli basınç(CU) deney Sonuçları

Çizelge 5.13. Konsolidasyonlu – drenajsız üç eksenli basınç(CU) deney sonuçları

KONSOLIDASYONLU - DRENAJSIZ (CU) ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI (HER İKİ GRUP İÇİN)				
Sondaj Numarası	Derinlik	Grup Sembolü	C (kN/m²)	Φ (°)
S1	7.50-8.00	CH	85,08	0,00
	18.00-18.50	CH	36,68	3,40
	43.70-44.50	CH	8,19	26,50

S2	28.50-29.00	CH	0,00	18,96
	39.80-40.50	CH	5,52	15,87
S4	37.50-38.30	CH	0,00	24,50
S5	0.80-1.30	MH	0,00	18,88
S6	19.50-20.00	CH	0,00	27,21
S10	32.00-32.80	CH	13,75	22,58
P3	5.50-6.50	CH	0,00	29,38
SB1	25.50-25.75	CH	0,00	31,51
SB3	12.00-12.50	MH	0,00	8,50
SB5	16.50-16.80	CH	0,00	19,28
SB6	31.50-32.10	CH	0,00	29,29
SB7	40.50-41.10	CH	0,00	23,87
SB9	36.00-36.60	CH	0,00	25,43
SB12	3.00-3.40	CH	0,00	23,73
SB13	9.00-9.50	MH	22,08	34,72
SB16	28.50-29.10	CH	0,00	15,00
SB21	28.50-29.10	CL	0,00	23,02
SB23	9.00-9.50	CH	0,00	16,01

Birinci grup deneylerinden 10, ikinci grup deneylerinden 21 olmak üzere toplam 31 adet konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç(CU) deneyi yapılmıştır. 31 numuneden 27'sinin yüksek plastisiteli kil(CH), 3'ünün yüksek plastisiteli silt(MH) ve 1'inin düşük

plastisiteli kil(CL) olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.13'de her iki grubun konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç(CU) deney sonuçları verilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında İstanbul'un çeşitli sahalarından alınan killi zeminlerin kayma dayanım parametreleri elde edilmiştir. 79 Tanımlama deneyi, 23 konsolidasyon deneyi, 2 serbest basınç, 36 kesme kutusu deneyi, 21 kondolidasyonlu - drenajsız üç eksenli basınç deneyi, 7 kondolidasyonlu - drenajlı üç eksenli basınç deneyi, 11 kondolidasyonsuz - drenajsız üç eksenli basınç deneyi yapılarak aşırı konsolide killerin dayanım özellikleri incelenmiştir. Ayrıca aynı numuneler üzerinde örselenmiş 10 adet kesme kutusu deneyi ile kayma dayanım parametreleri ve 8 adet konsolidasyon davranışları incelenmiştir. Bu araştırma kapsamında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır:

- i. Numune alınan bölgedeki zeminlerin genel olarak yüksek plastisiteli kil olduğu, killerin içerisinde farklı zemin tabakasının olabileceği, fakat bu farklı zemin tabakasının çok nadir olduğu ve tabaka kalınlığının sınırlı olduğu tespit edilmiştir.
- ii. Numune alınan bölgedeki killerin doğal su muhtevaları ortalama olarak % 30 civarındadır.
- iii. Üzerinde çalışma yapılan killerin plastik limit ve likit limit oranı genel olarak, 0,30 ile 0,45 arasında olduğu tespit edilmiştir.
- iv. Yapılan çalışma da, bölgedeki killerin ilk 20 m derinliğe kadar aşırı konsolidasyon oranının 2 ile 3 arasında olduğu, zeminin derinliklerine inildikçe aşırı konsolidasyon oranının düştüğü ve 30 metreden daha derinden alınan numunelerin normal konsolide olduğu tespit edilmiştir.
- v. Aynı derinlikte, farklı kayma deneyleri yapılmış olsa bile kayma direnci yaklaşık olarak eşit çıkmaktadır.
- vi. Deney yöntemlerinin farklı olması ve konsolidasyonlu – drenajlı üç eksenli basınç deneyi esnasında numunenin şekil değiştirme sınırının bulunmasından dolayı, Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı, kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısından büyüktür.
- vii. Plastik limit arttıkça kohezyon ve efektif kohezyon değerinin arttığı tespit edilmiştir.

- viii. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerine göre her iki durumda da ön konsolidasyon basınçlarının birbirine yaklaşık olarak eşit olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Angın Z., 2005, Angın A., Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi.
- Anonim, Utest Malzeme Test Cihazları, Tam Otomatik Direkt Basit Kesme Sistemi,
http://www.utest.com.tr/upload/Node/20368/xfiles/11-TAM_OTOMATIK_DIREKT_BASIT_KESME_SISTEMI.pdf, erişim tarihi:
29.12.2016
- ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- Bayın, A., 2011, Konsolidasyonlu - Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Yöntemi ile Kalıcı Kayma Direncinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, s45-46.
- Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A., Brown, J.D., 1971, “A New Ring Shear Apparratus and Its Application to The Measurement of Residual Strenght”, Geotechnique, Vol.21, No.4, s.273-328
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., 1992, Geotechnical engineering of embankment dams, Balkema, Rotterdam, s. 675
- Casagrande, A, 1932, Research on the Atterberg Limits of Soils, Public Roads, Vol.13, No:8, s.121-136
- Gibson, R.E. & Henkel D.J. 1954. “Influence of Duration of Tests at Constant Rate of Strain on Measured 'Drained' Strength”, Geotechnique, 4 (1), s. 6-15.
- Hateway, A.W., 2000, “Clays; Never Use the Term by Itself” AEG News, Vol.43, No:2, s.13-26
- Hawkins, A.B. and Privett, K.D., 1985. “Measurement and Use of Residual Shear Strenght of Cohesive Soils”, Ground Engineeering, s. 22-29
- Head, K.H., 2006, Manual Soil Laboratory Testing, 3rd edition, Whittles Publishing, s.416
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., An Introduction to Geotecnical Engineering, (Çev. A.Erken), Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, s. 71-73

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., An Introduction to Geotechnical Engineering, (Çev. A.Erken), Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, s. 122-123
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., An Introduction to Geotechnical Engineering, (Çev. A.Erken), Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, s. 405-407
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., An Introduction to Geotechnical Engineering, (Çev. A.Erken), Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, s. 430-432
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., An Introduction to Geotechnical Engineering, (Çev. A.Erken), Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, s.508
- Holtz, W. G., Gibbs, H.J., 1956, Engineering Properties of Expansive Clays, ASCE Transactions, 121, s. 641-663
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981, An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., s. 733
- Kılıç G., 2008, Çimento ile zemin stabilizasyonu, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 102
- Lemos, J.L.J., 2003, Shear behavior of pre-existing shear zone under fast loading insights on the landslide motion, s.229-235
- McCarthy, D.F., 2010, Zemin Mekaniğinin Esasları ve Temeller, (Çev. E.Basmacı), İstanbul, OYTEV Orhan Yavuz Teknik Eğitim Vakfı, s. 42-43
- McCarthy, D.F., 2010, Zemin Mekaniğinin Esasları ve Temeller, (Çev. E.Basmacı), İstanbul, OYTEV Orhan Yavuz Teknik Eğitim Vakfı, s. 54-59
- Mesri, G., Cepeda-Diaz, A.F., 1986, Residual Shear Strength of Clays and Shales” Geotechnique, Vol.36, No:2, s.269-274
- Mitchell, J.K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Mitchell, J.K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, New York, USA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 40-41
- Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 237-238
- Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 246-248
- Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 255-260
- Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 269-270
- Önalp, A., 1983, İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi; cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon.
- Önalp, A., 2007, “Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği”, İstanbul.
- Önem, S., 2000, Sanayi Hammaddeler Ders Kitabı, Ankara
- Özaydın K., 2011, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 140-166
- Özaydın K., 2011, Zemin Mekaniği, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 215-216
- Özaydın K., 2011, Zemin Mekaniği, İstanbul, Birsen Yayınevi, s. 219-222
- Özaydın, K., 1989, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özçep, F., Zeminlerin Geoteknik ve Jeofizik Analizi, İstanbul, Nobel Yayın Dağıtım, s. 165-166
- Savaş, H., 2008, Dolgu barajlar için dispersif killerin tanımlanmasında kullanılan iğne deliği deneyindeki gelişmeler ve karşılaştırmalı analizi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 212

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Skempton,A.W., 1985, Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory”, Geotechnique, 35, No.1, s. 3-18
- Skempton, A. W., 1953, The Collaidal Activity of Clays, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. I, s. 57-61.
- Skempton, A. W., 1953, The Collaidal Activity of Clays, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. I, s. 57-61.
- Skempton, A. W., 1964, Long-Term Stability of Clay Slopes, Geotechnique, vol. 14, No:2, s. 75-101.
- Stark,T.D.ve Eid,H.T., 1994, “Drained Residual Strength of Cohesive Soils”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, May, No.5, s.856-871
- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J. and Hasinaga, K., 2005. “Physical and Chemical Index Properties of Residual Shear Strenght of Various Soil” <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf>
- Şengül T., 2003, Ağır metal ve tuzlarla kirlenmiş killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 85
- Tan, O., 2013, Tabii Yamaçların Stabilitesi İçin Zemin İncelemeleri, Trabzon, Taşkın ve Heyelan Sempozyumu, s. 293-302
- TS 1900, “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri” , TSE, Mart 2006.
- Tumluer, G., 2006. Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, s. 89
- Ünver E., 2015, Problemlili kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 5-7
- Ünver, E., 2015, Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, s. 135.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wan, C.F., Fell, R., 2004, Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, April, s. 373-379.

EK AÇIKLAMALAR

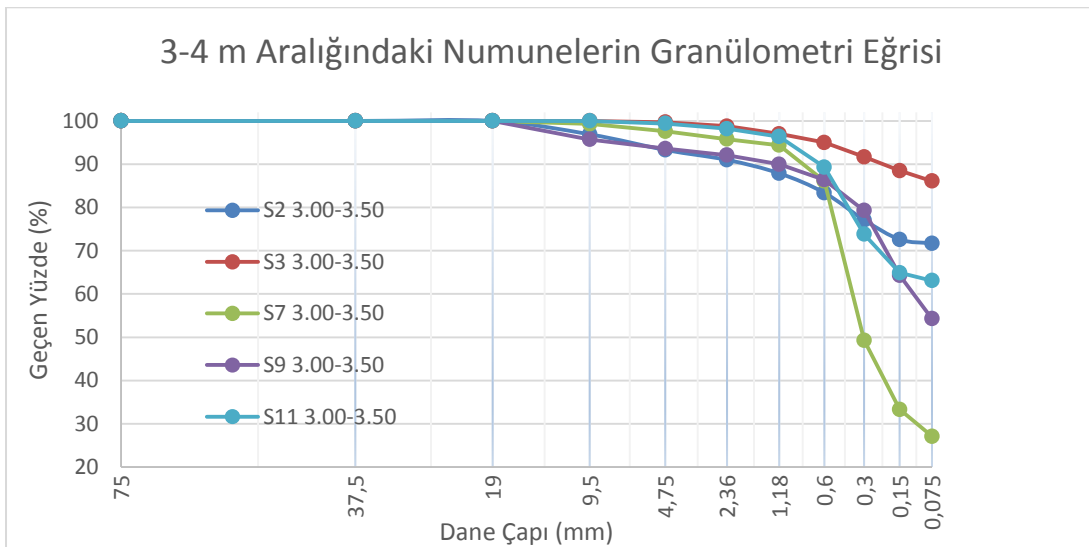
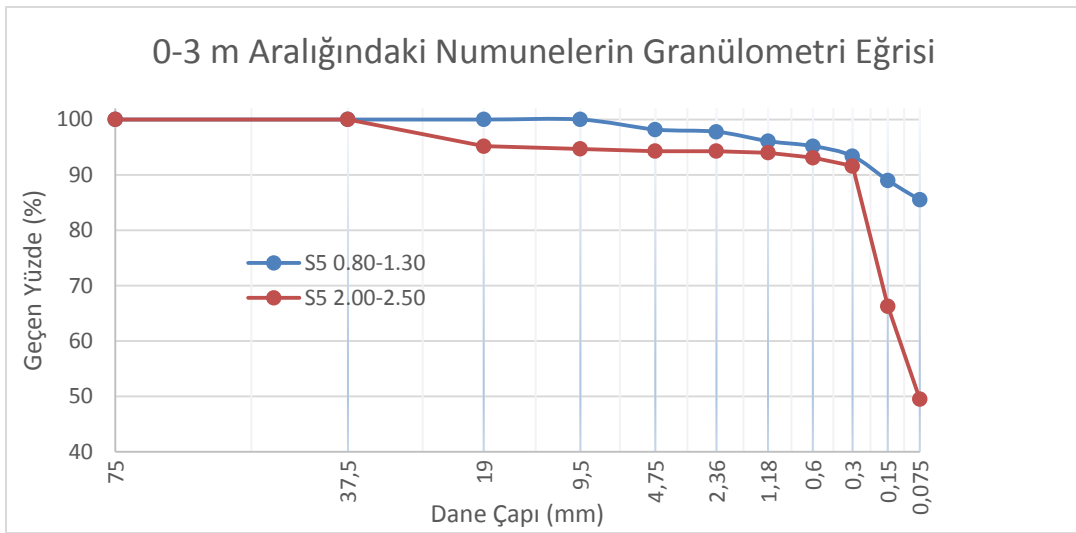
Ek Açıklamalar-A

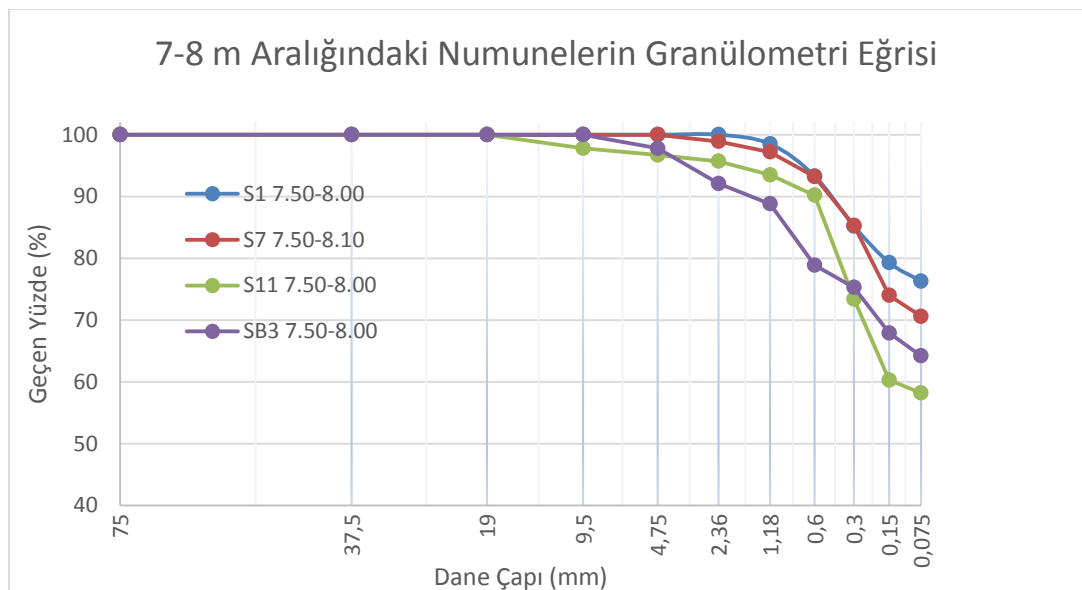
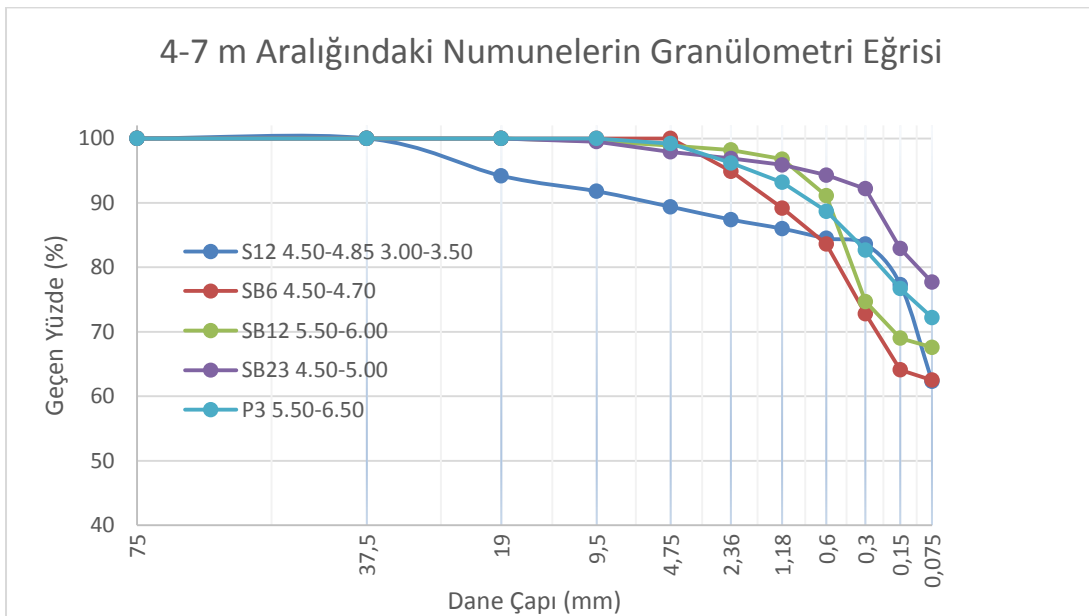
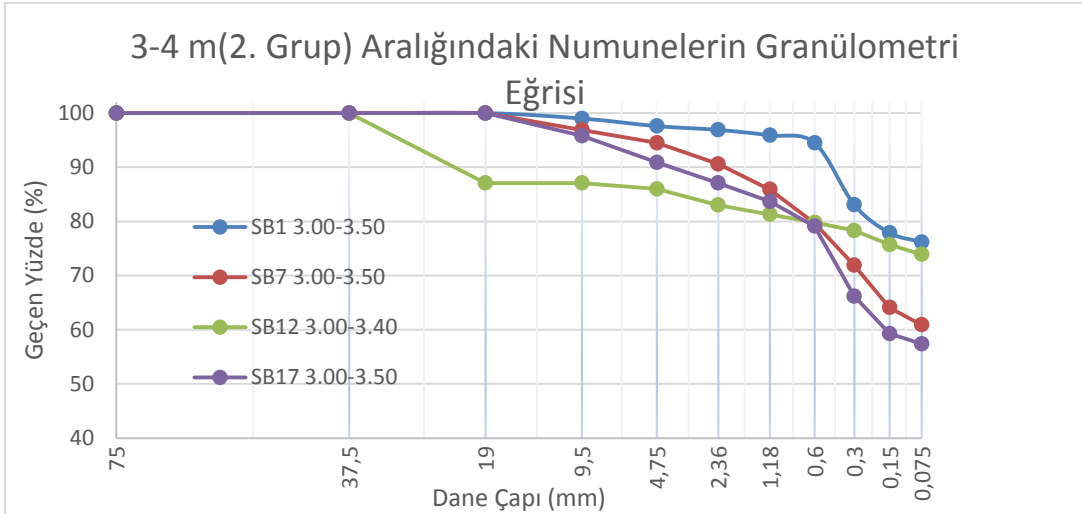
Elek analizi deney sonuçları

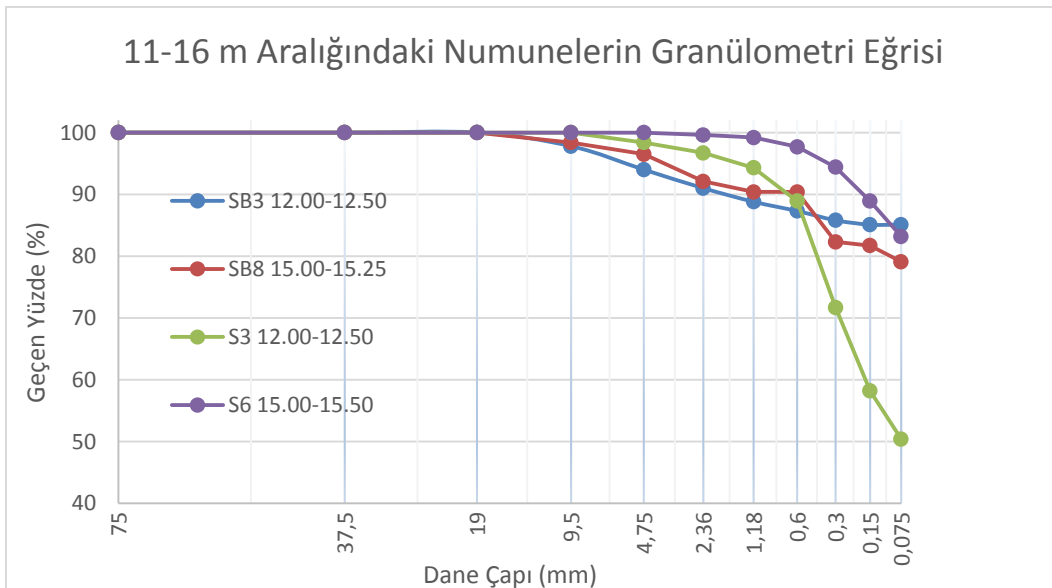
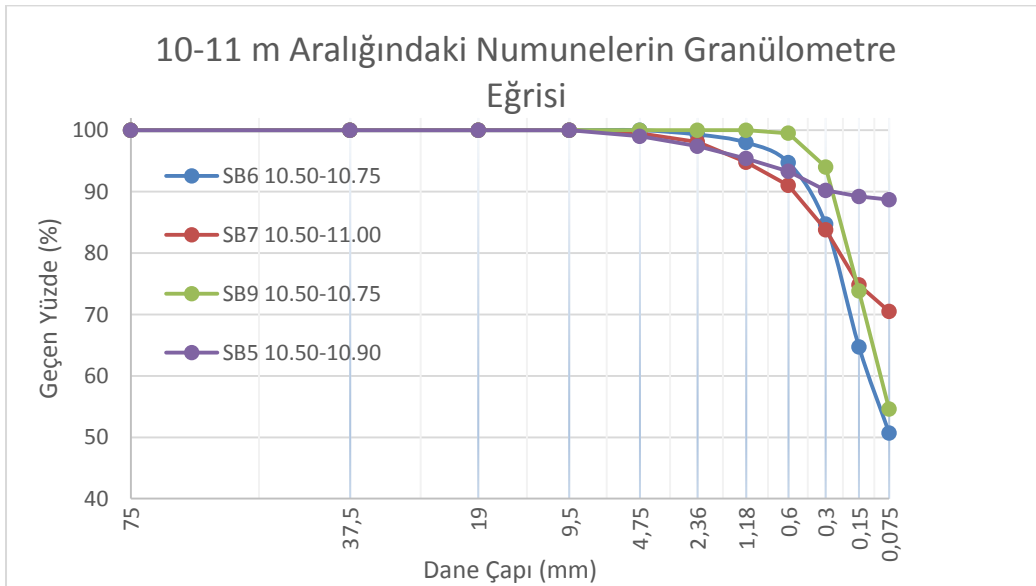
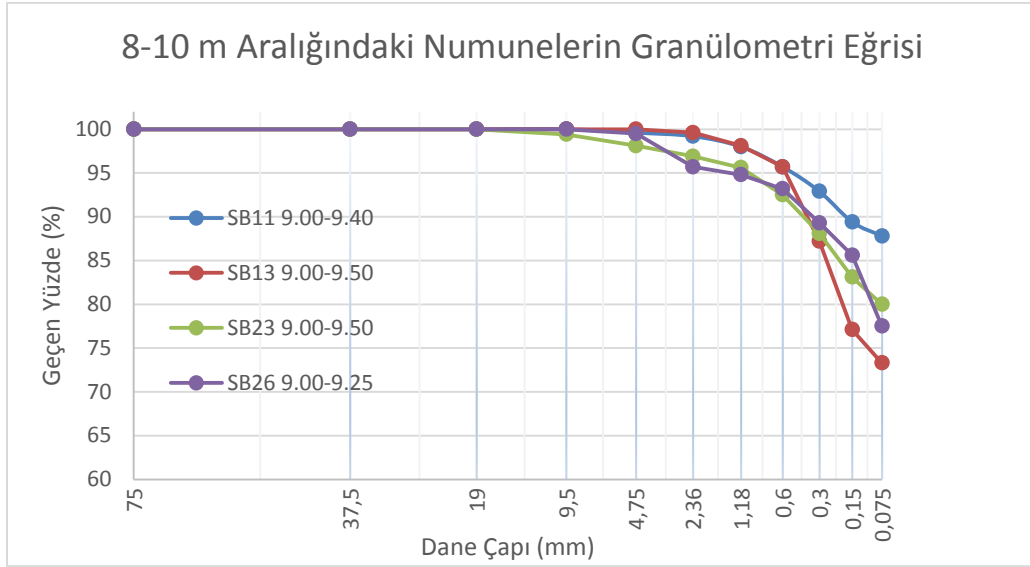
S1. GRUP NUMUNELERİNİN SINIFLANDIRILMASI						
Sondaj No	Derinlik	Grup Sembolü	Çakıl Yüzdesi	Kum Yüzdesi	Silt Yüzdesi	Kil Yüzdesi
S1	7.50-8.00	CH	0,00	23,70	49,60	26,70
	18.00-18.50	CH	0,80	18,20	52,90	28,10
	27.00-27.50	CH	1,60	16,40	53,10	28,90
	33.25-33.80	CH	3,70	31,70	49,80	14,80
	43.70-44.50	CH	4,20	12,90	39,20	43,70
S2	3.00-3.50	CH	6,70	21,50	45,10	26,70
	18.00-18.50	CH	0,00	13,10	51,90	35,00
	28.50-29.00	CH	1,90	33,70	50,20	14,20
	39.80-40.50	CH	1,20	23,20	58,20	17,40
S3	3.00-3.50	CH	0,30	13,60	57,90	28,20
	12.00-12.50	CH	1,60	48,00	33,10	17,30
	16.50-17.00	CH	0,50	23,10	37,50	38,90
	25.50-26.00	CH	0,50	29,60	40,90	29,00
	35.00-35.80	CH	0,70	17,60	55,30	26,40
S4	19.50-20.30	CH	14,20	19,80	58,20	7,80
	24.00-24.80	CH	2,70	46,20	43,30	7,80
	37.50-38.30	CH	1,20	31,20	13,80	53,80
S5	0.80-1.30	MH	1,80	12,70	78,60	6,90
	2.00-2.50	SM	5,70	44,70	47,80	1,80
	22.50-23.30	CH	8,80	24,00	56,20	11,00
S6	15.00-15.50	CH	0,00	16,80	60,70	22,50
	18.00-18.50	CH	0,00	14,60	57,60	27,80
	19.50-20.00	CH	0,30	14,60	53,00	32,10
S7	3.00-3.60	SM	2,10	70,80	21,90	5,20
	7.50-8.10	CH	0,00	29,40	45,30	25,30
	16.50-16.80	CH	1,60	33,90	40,20	24,30
S9	3.00-3.50	CH	6,40	39,30	32,80	21,50
S10	32.00-32.80	CH	3,40	43,90	34,20	18,50
S11	3.00-3.50	CH	0,60	36,30	41,00	22,10
	7.50-8.00	CH	3,30	38,60	35,90	22,20
S12	4.50-4.85	CH	10,60	27,10	32,30	30,00
	27.00-27.50	CH	9,50	29,30	35,70	25,50
P3	5.50-6.50	CH	0,80	27,10	48,10	24,00

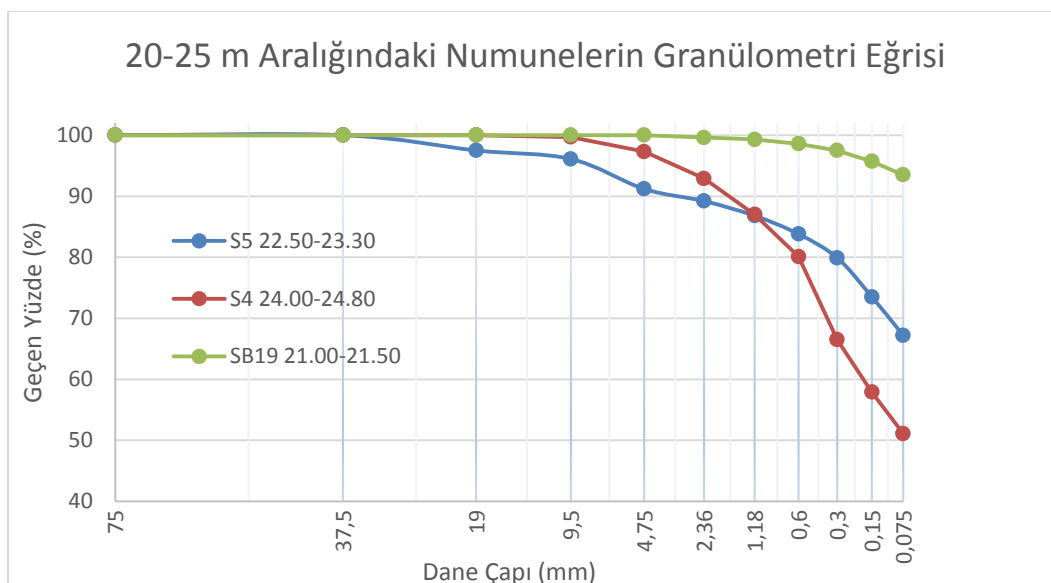
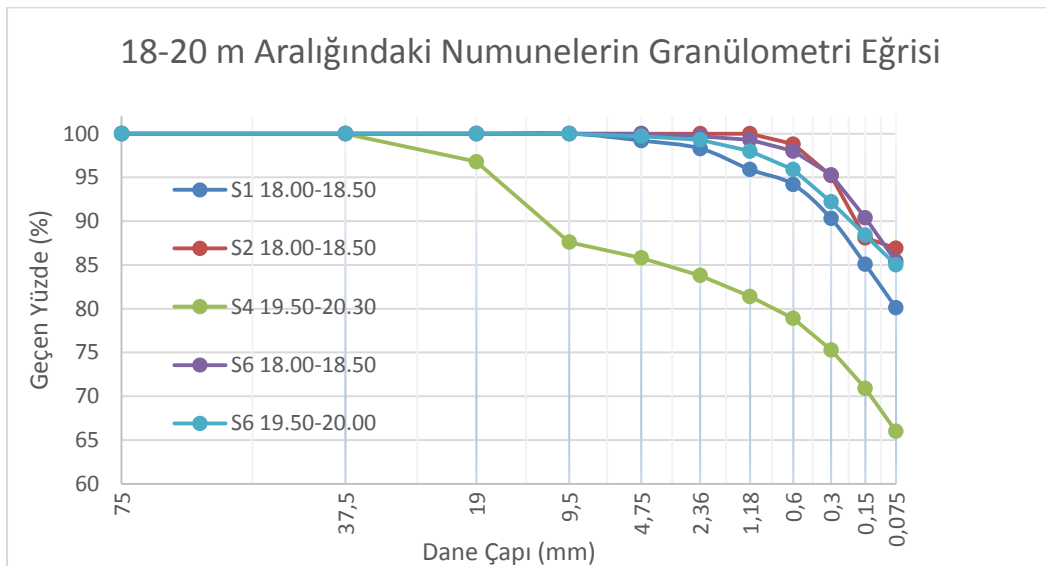
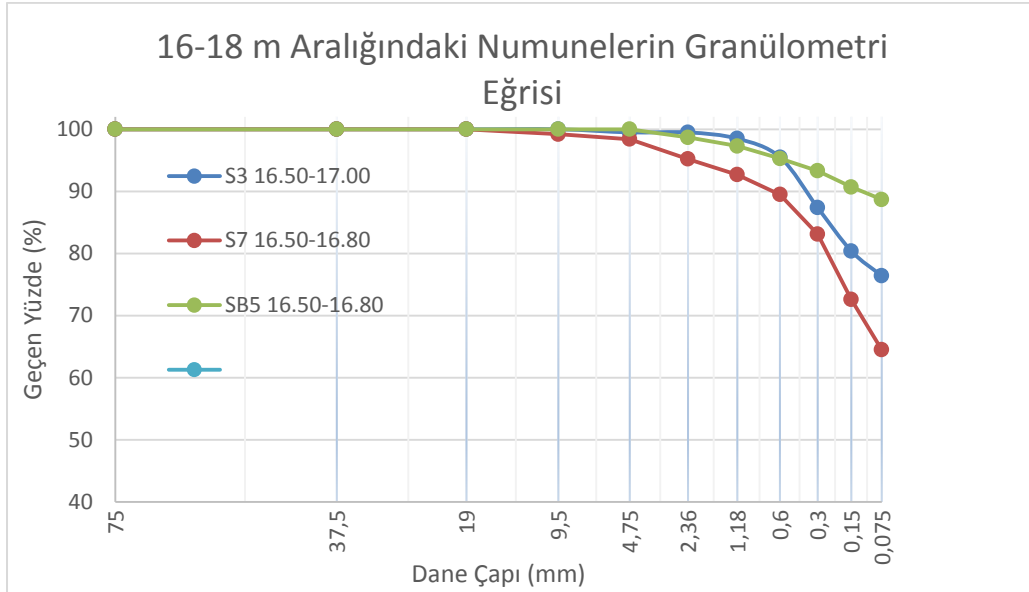
2. GRUP NUMUNELERİNİN SINIFLANDIRILMASI						
Sondaj No	Derinlik	Grup Sembolü	Çakıl Yüzdesi	Kum Yüzdesi	Silt Yüzdesi	Kil Yüzdesi
SB1	3.00-3.50	CH	2,40	21,40	53,34	22,86
	25.50-25.75	CH	1,90	8,80	62,51	26,79
	36.00-36.60	CH	0,00	14,20	60,06	25,74
	42.50-43.10	CH	3,10	20,40	53,55	22,95
SB3	7.50-8.00	MH	2,20	33,60	41,76	22,44
	12.00-12.50	MH	6,00	9,00	59,47	25,53
SB5	10.50-10.90	CH	1,00	10,30	62,09	26,61
	16.50-16.80	CH	0,00	11,30	62,09	26,61
	34.50-35.10	SM	1,50	49,30	34,41	14,79
SB6	4.50-4.70	MH	0,00	38,50	43,05	18,45
	10.50-10.75	CH	0,00	49,30	35,49	15,21
	31.50-32.10	CH	0,20	39,10	42,49	18,21
	37.50-38.00	CH	1,20	44,20	38,22	16,38
	45.00-45.60	CH	2,20	50,70	32,97	14,13
SB7	3.00-3.50	CH	5,50	33,60	42,63	18,27
	10.50-11.00	MH	0,50	29,00	49,35	21,15
	34.50-35.10	CH	1,10	21,30	54,29	23,31
	40.50-41.10	CH	0,40	21,80	54,16	23,64
SB8	15.00-15.25	CH	3,50	17,40	58,28	20,82
	39.00-39.60	CH	7,10	18,10	52,36	22,44
SB9	10.50-10.75	CL	0,00	45,40	38,22	16,38
	27.00-27.60	CH	0,80	18,10	56,74	24,36
	36.00-36.60	CH	0,50	25,90	51,52	22,08
SB11	9.00-9.40	MH	0,40	11,80	61,46	26,34
	28.50-29.10	CH	2,50	20,20	54,11	23,19
	45.00-45.60	CH	0,80	35,10	44,87	19,23
SB12	3.00-3.40	CH	14,00	12,10	48,90	25,00
	5.50-6.00	CH	1,10	31,30	48,00	19,60
	30.00-30.60	CH	0,70	18,10	56,81	24,39
	37.50-38.10	CH	0,30	20,60	55,37	23,73
	42.00-42.60	CH	1,40	24,30	51,98	22,32
	48.00-48.45	CH	0,90	23,40	53,02	22,68
SB13	9.00-9.50	MH	0,00	26,70	63,90	9,40
	43.50-44.10	CH	6,50	33,70	41,86	17,94
SB14	39.00-39.60	CH	3,40	34,00	42,80	19,80
SB15	42.00-42.60	CH	2,80	32,40	46,10	18,70
SB16	28.50-29.10	CH	1,40	14,40	58,94	25,26
SB17	3.00-3.50	CH	9,10	33,50	38,70	18,70
	31.50-32.00	CH	4,20	32,60	44,24	18,96
SB18	34.50-35.10	CH	3,60	21,60	52,33	22,47

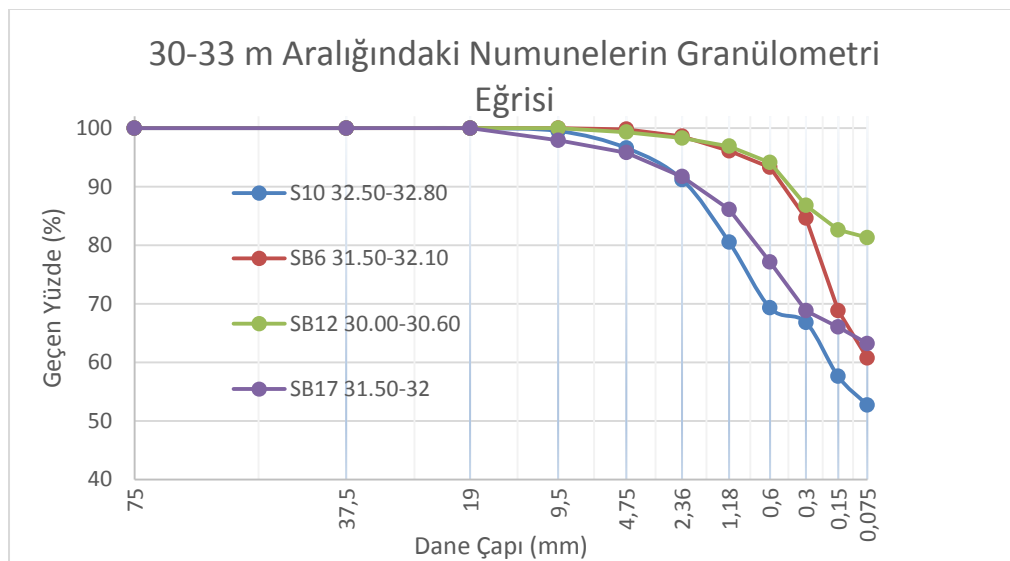
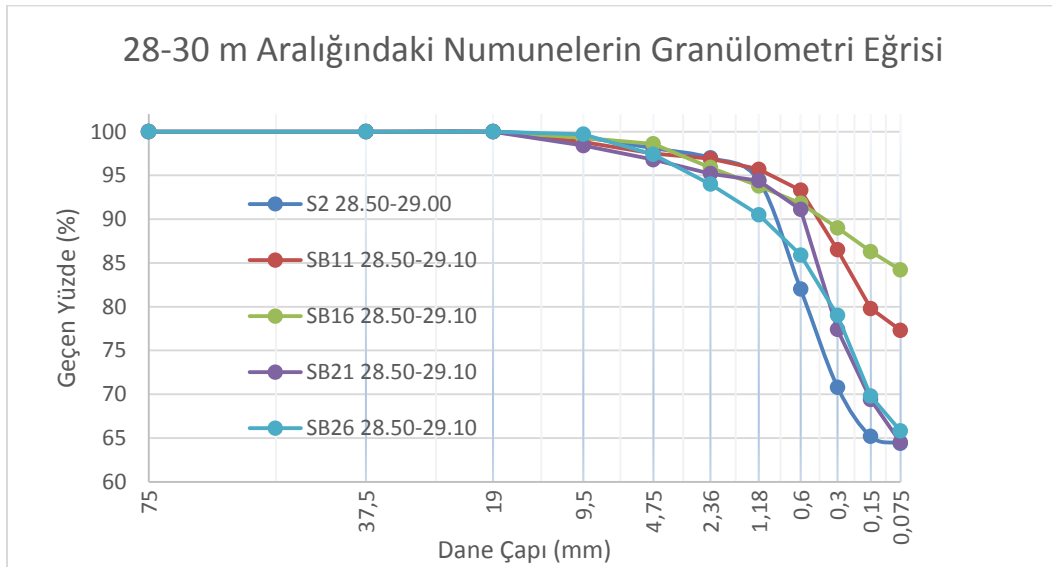
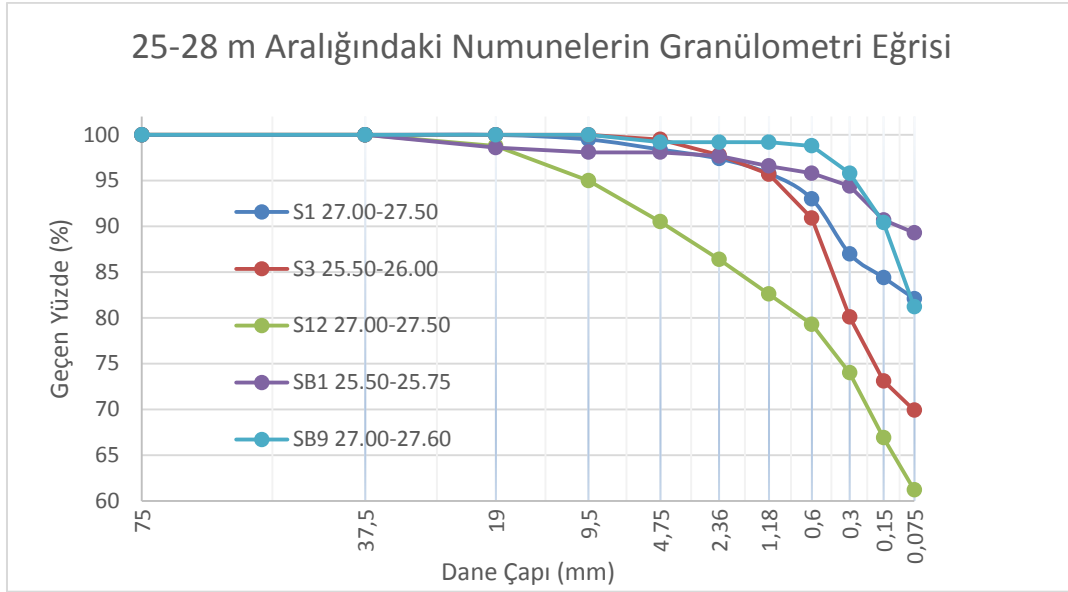
SB19	21.00-21.50	CH	0,00	6,50	68,30	25,20
SB21	28.50-29.10	CL	3,20	32,30	41,10	23,40
SB23	4.50-5.00	CL	2,10	20,20	53,40	24,30
	9.00-9.50	CH	1,90	18,10	56,00	24,00
SB26	9.00-9.25	CH	0,50	22,00	68,92	8,58
	28.50-29.10	CH	2,60	31,80	45,86	19,74

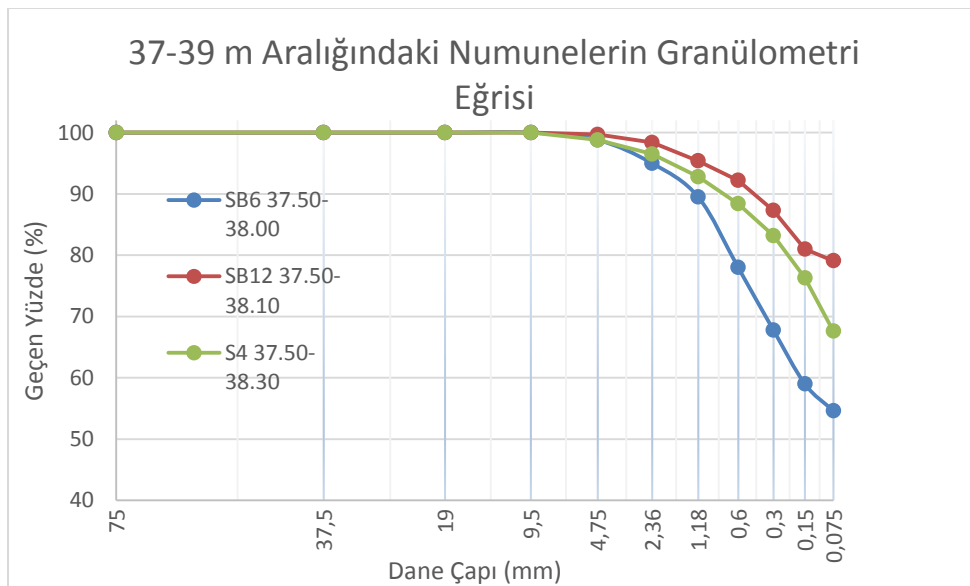
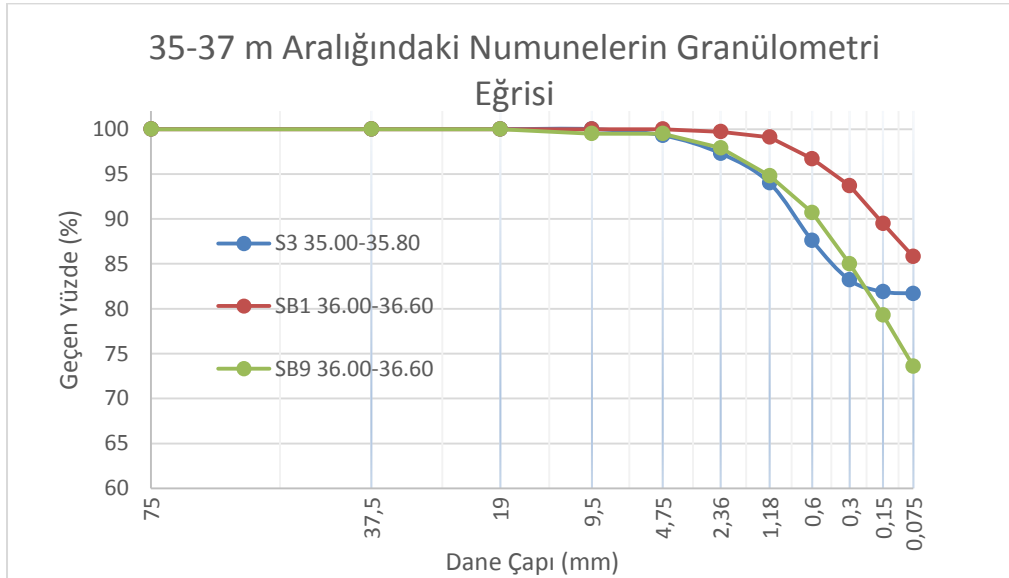
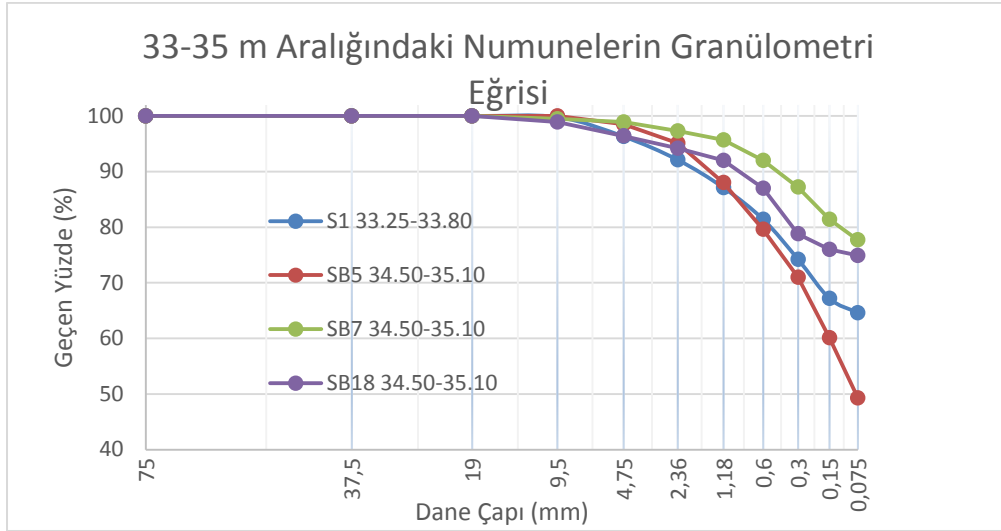


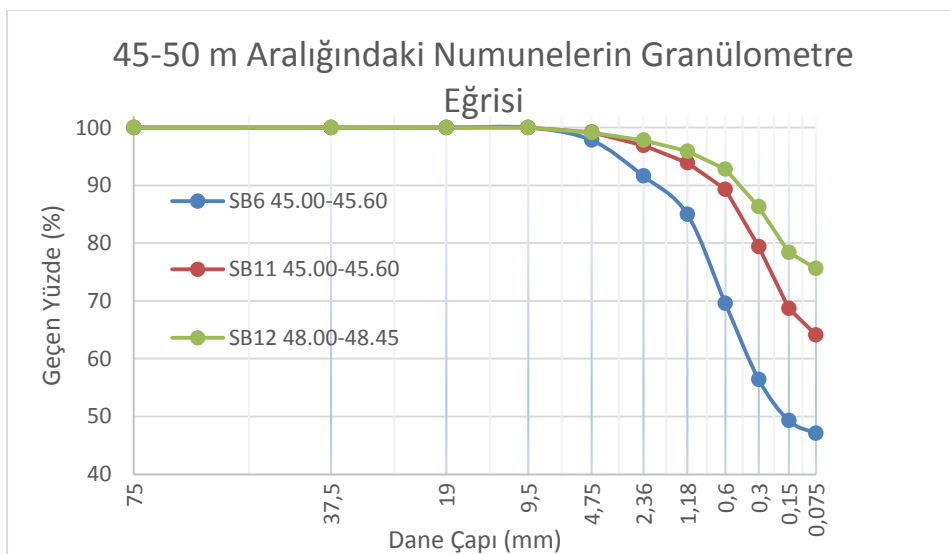
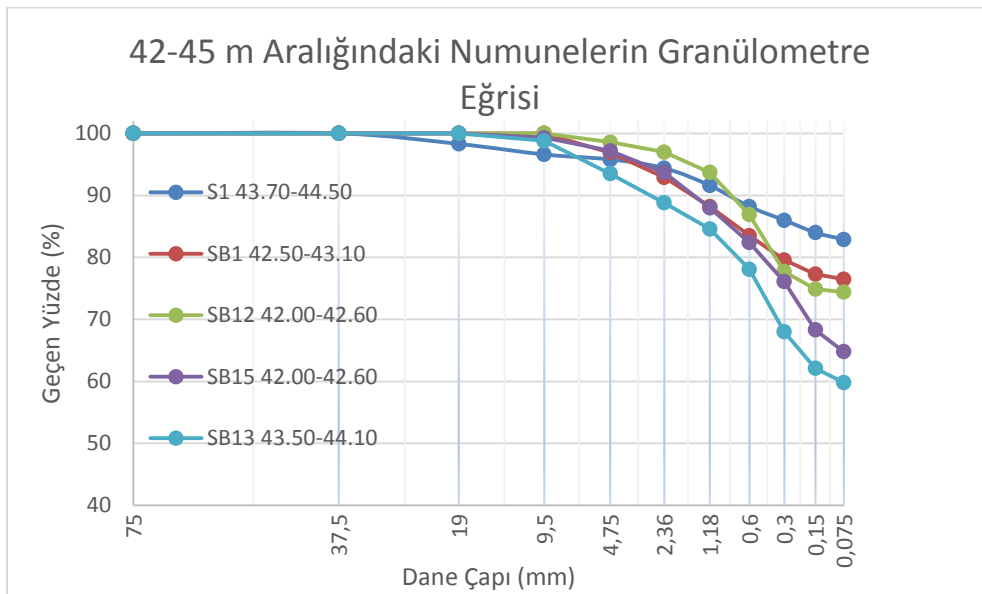
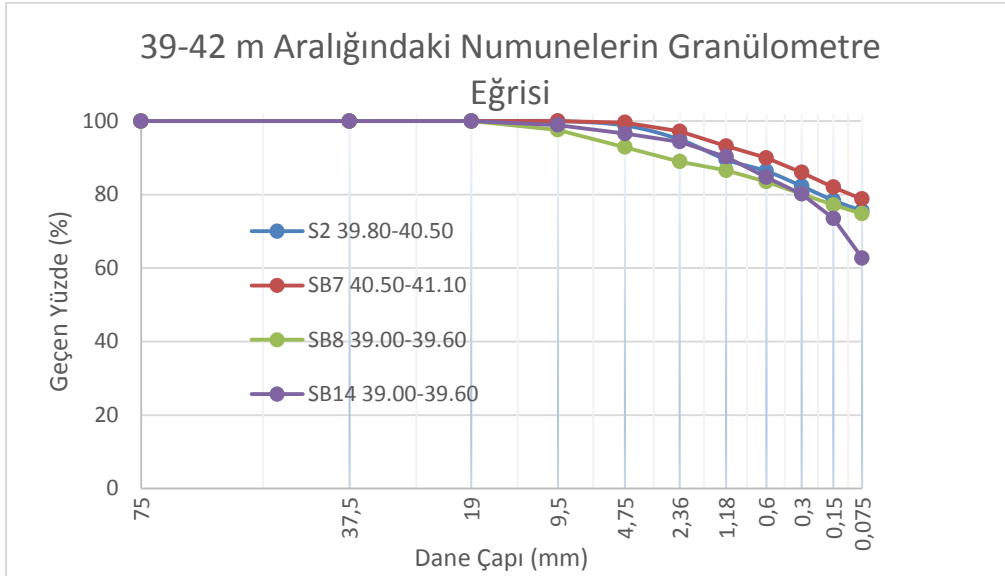






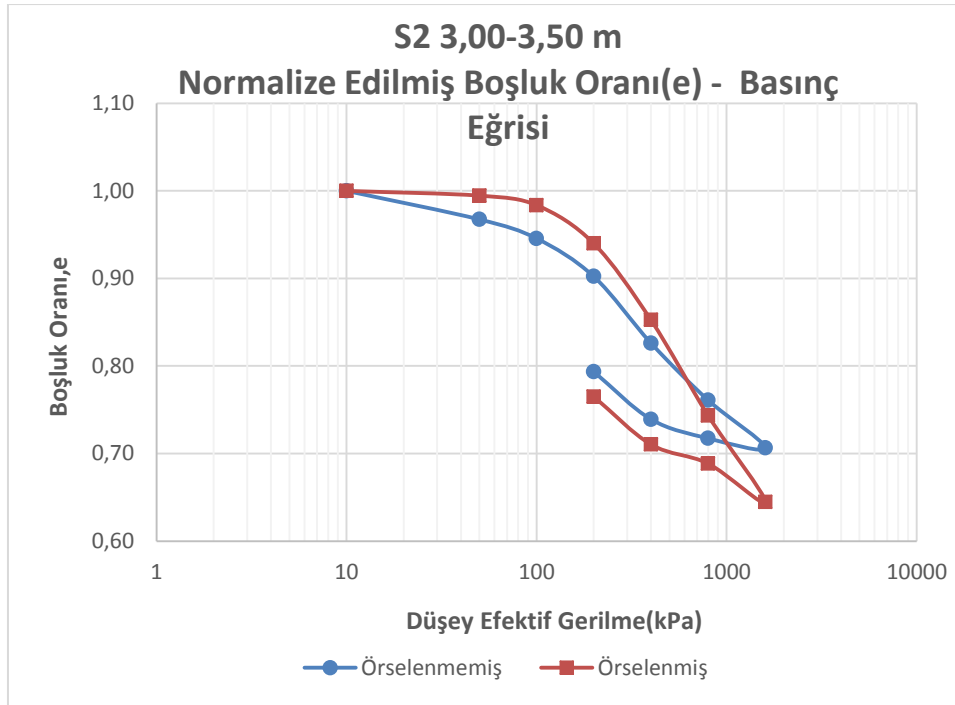
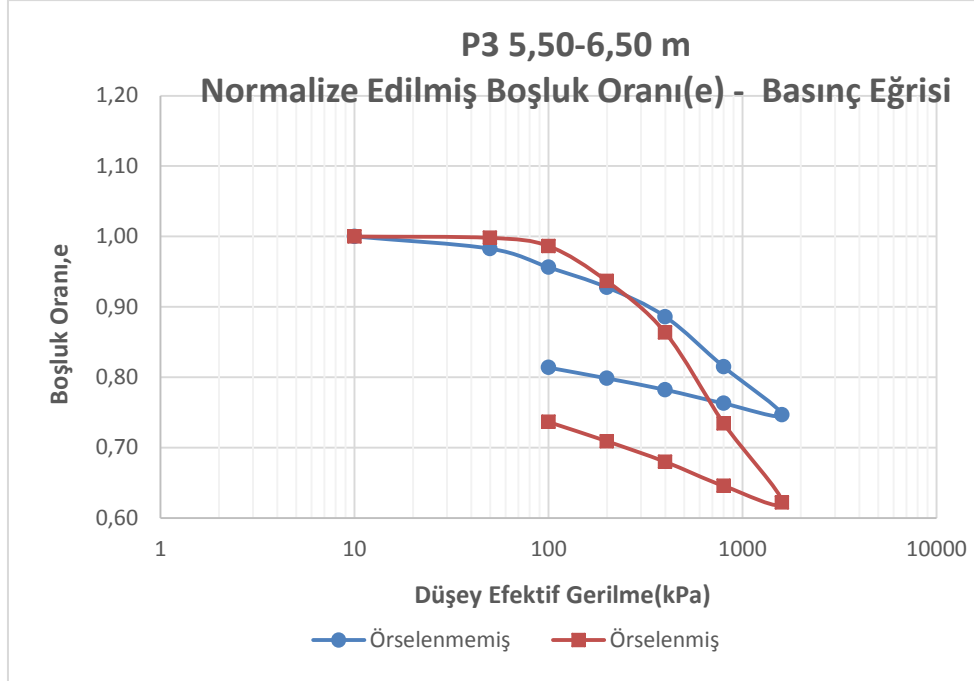


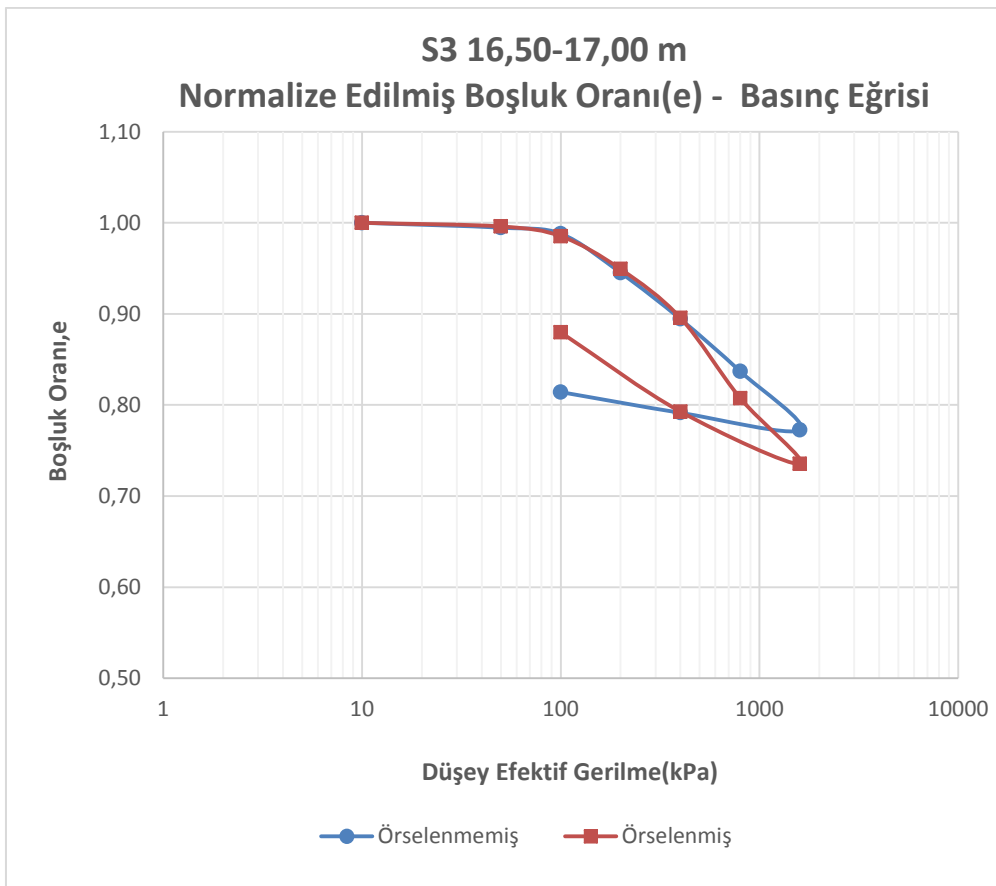
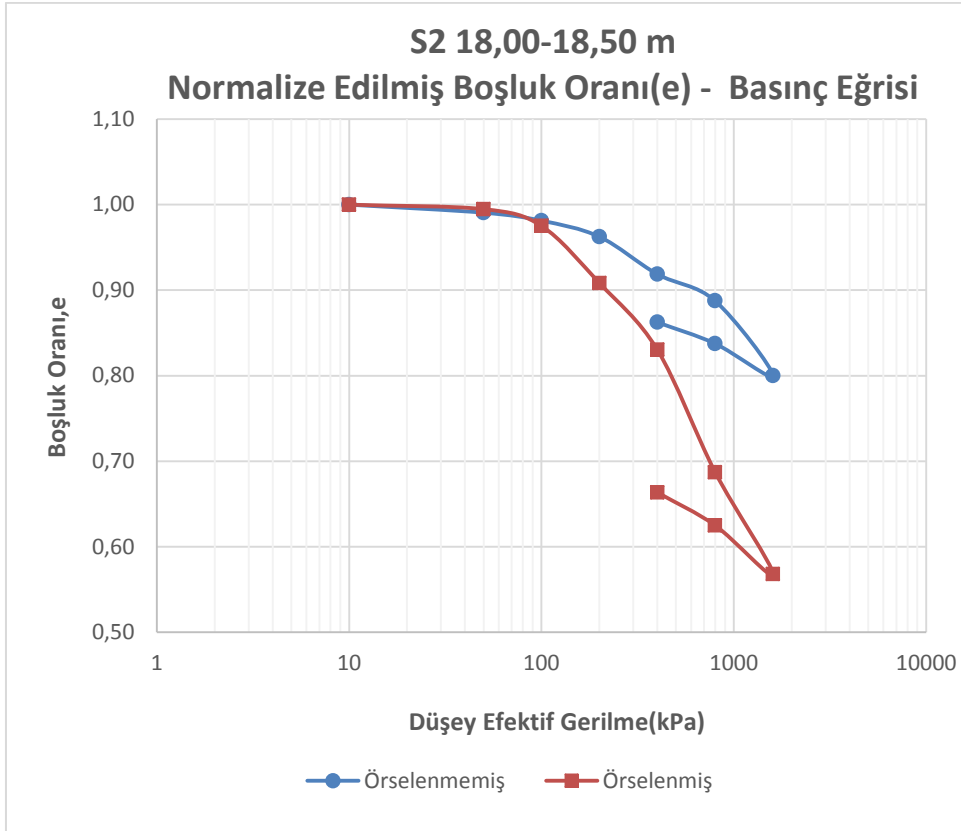


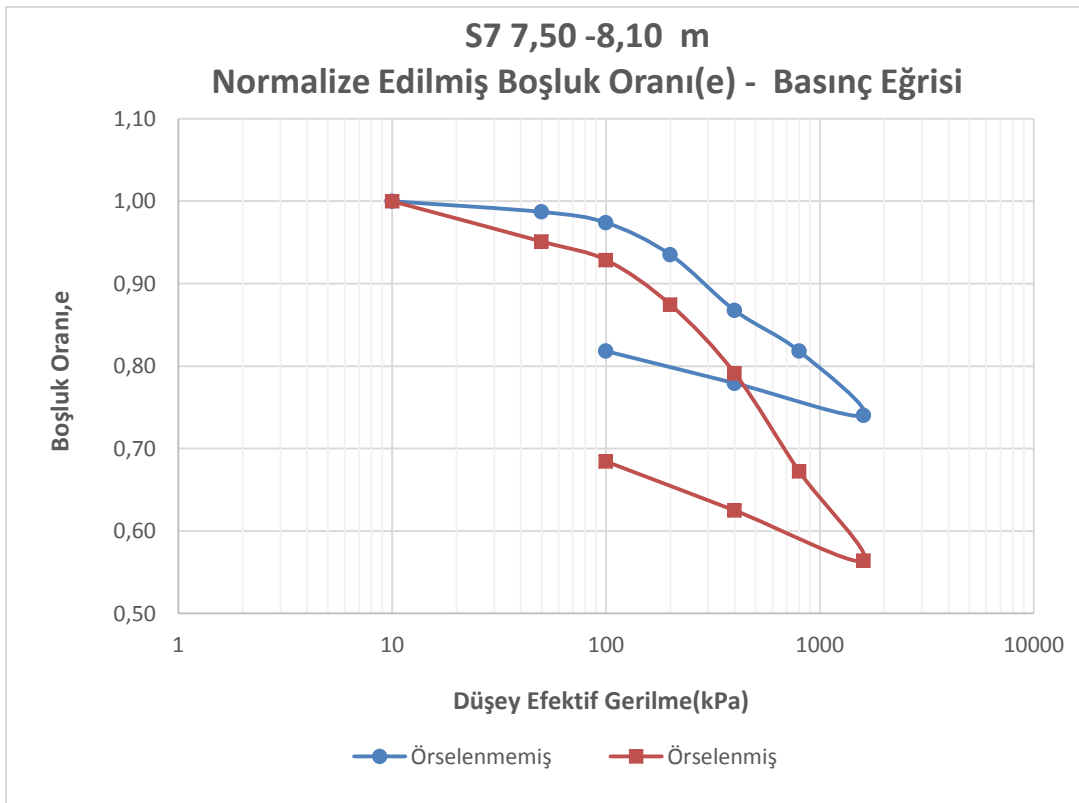
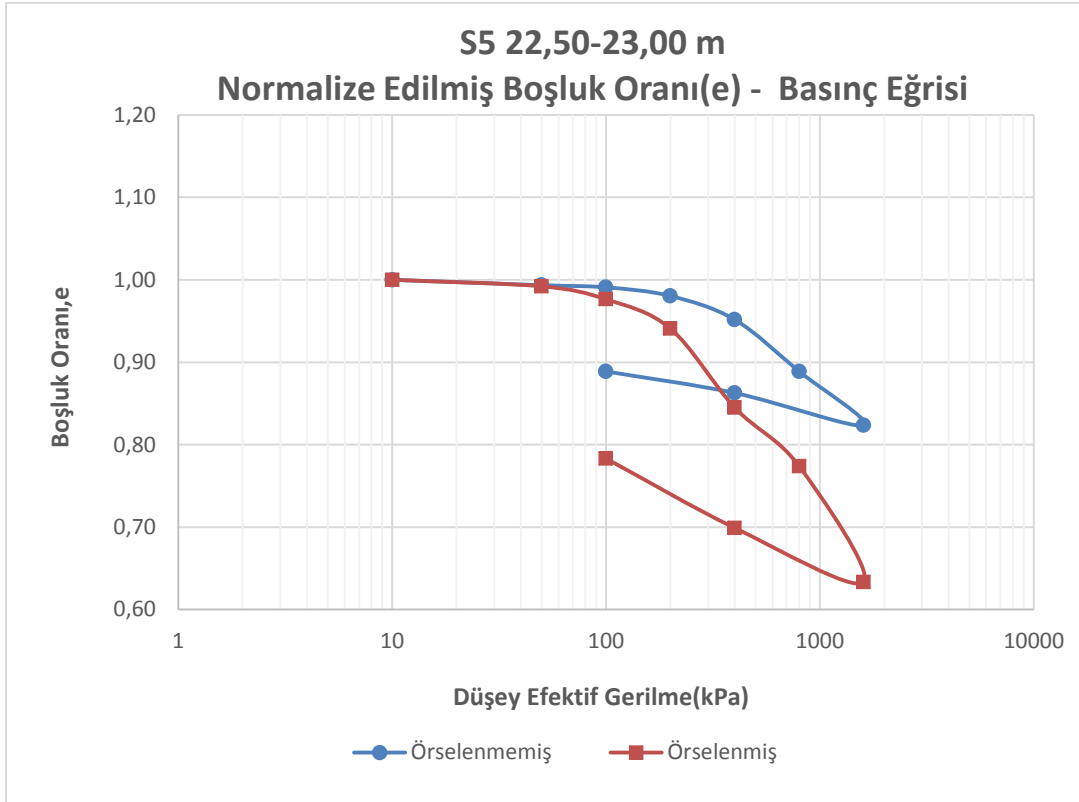


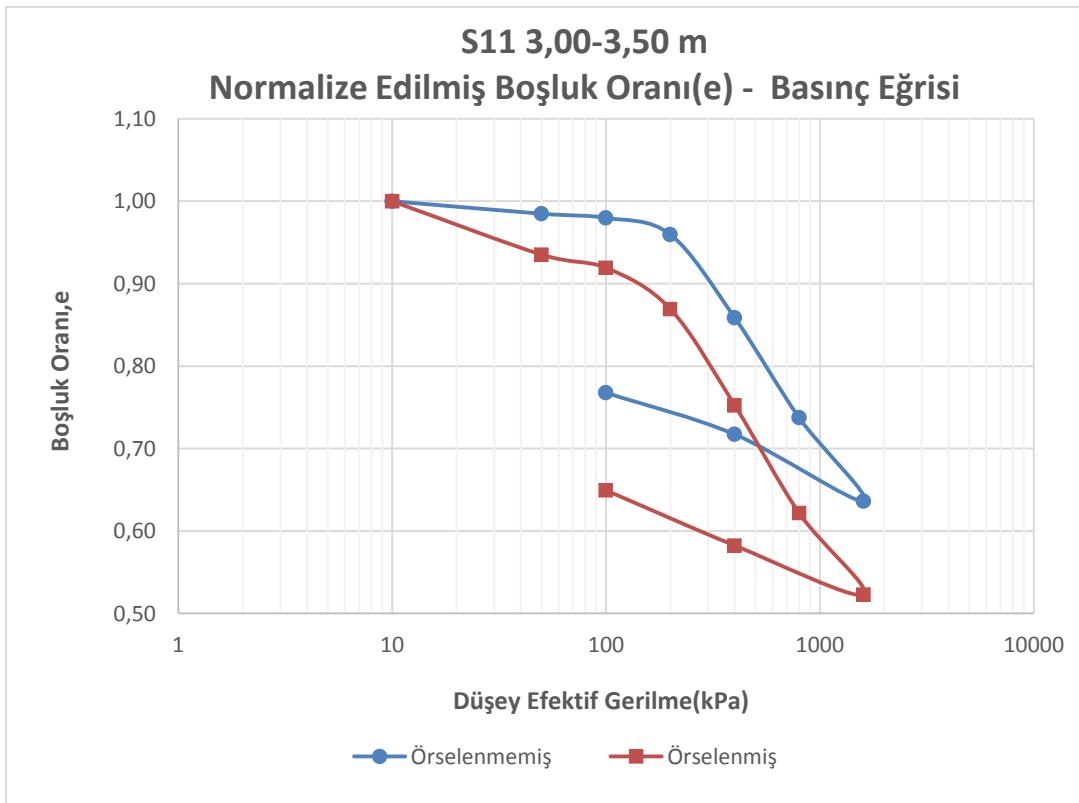
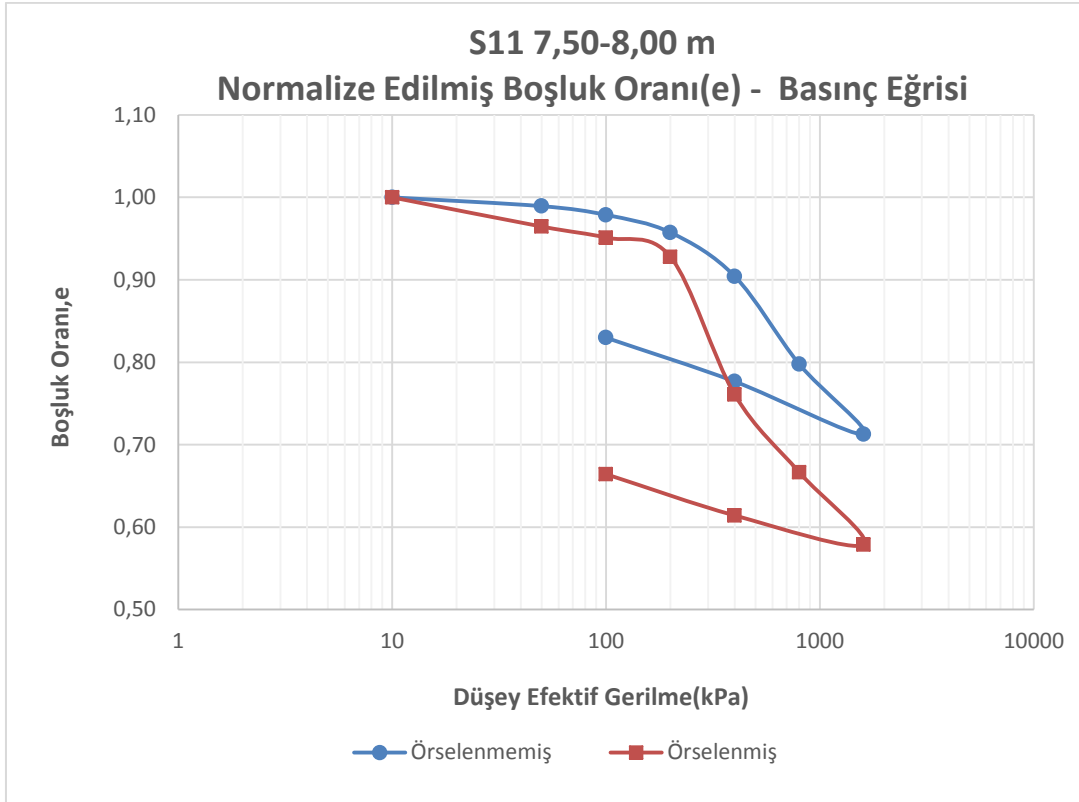
Ek Açıklamalar-B

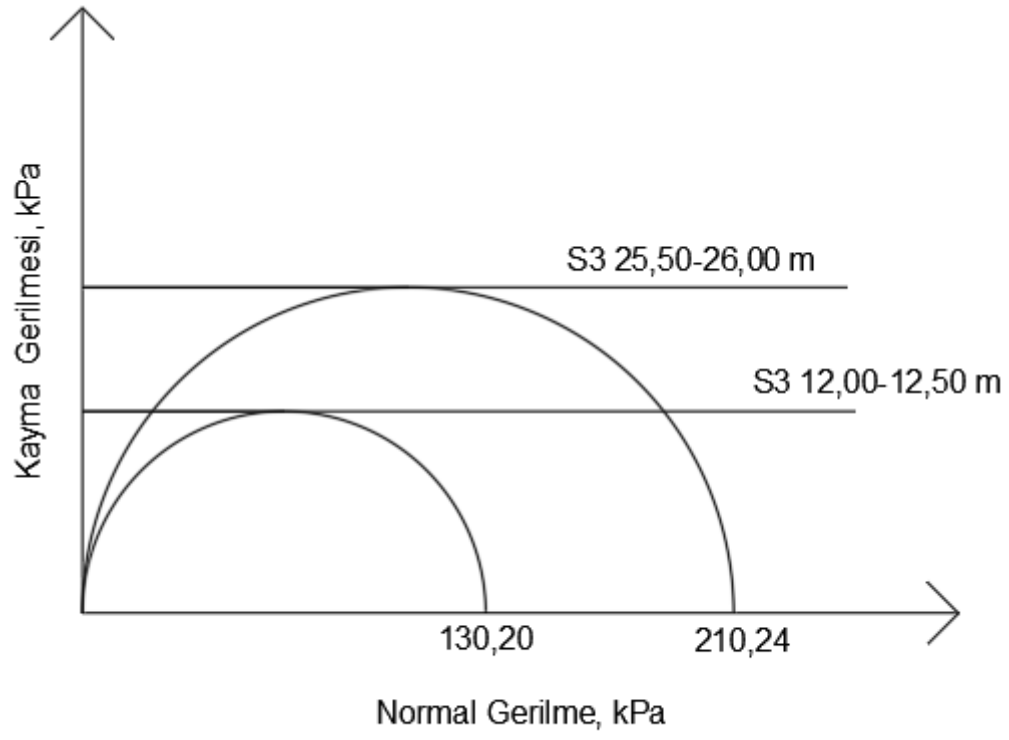
Konsolidasyon deney sonuçları



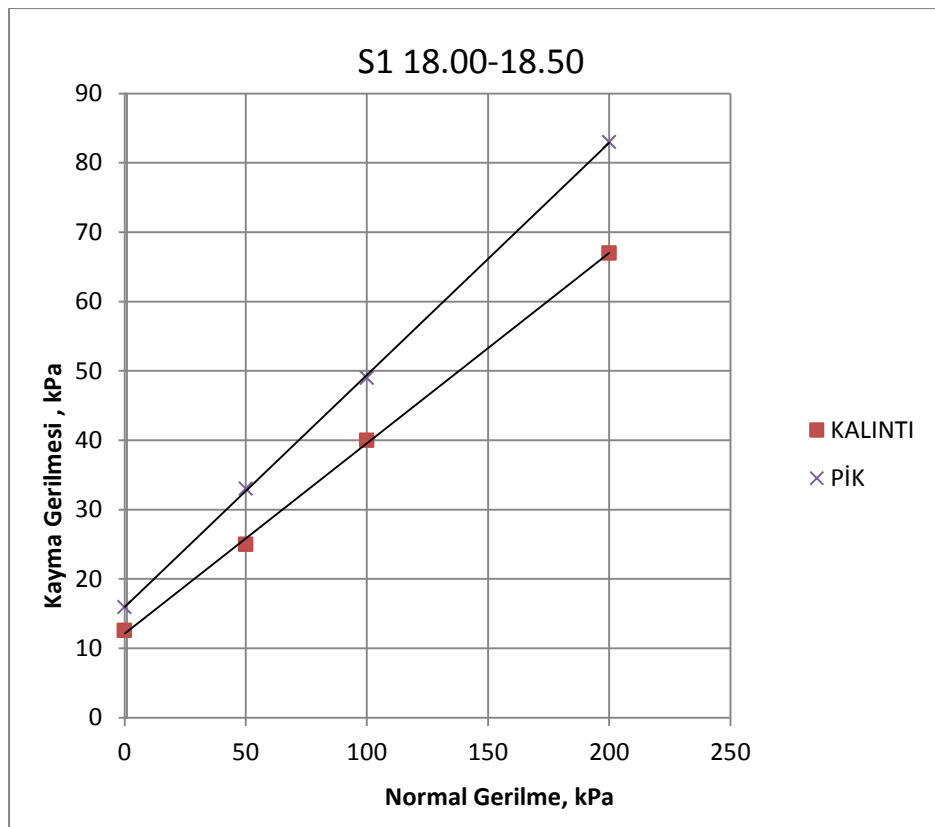
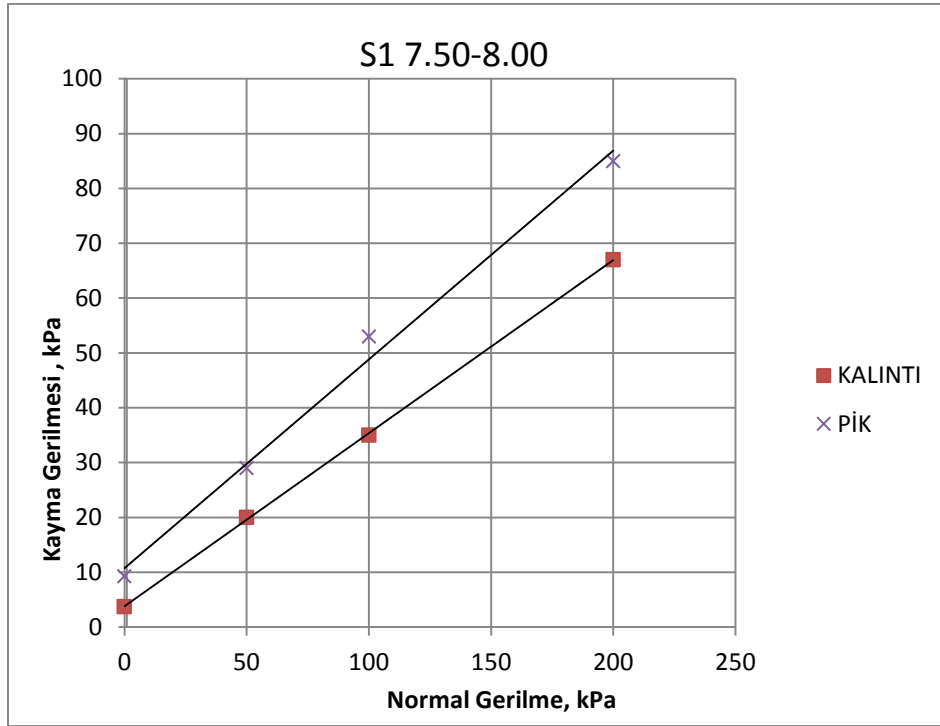


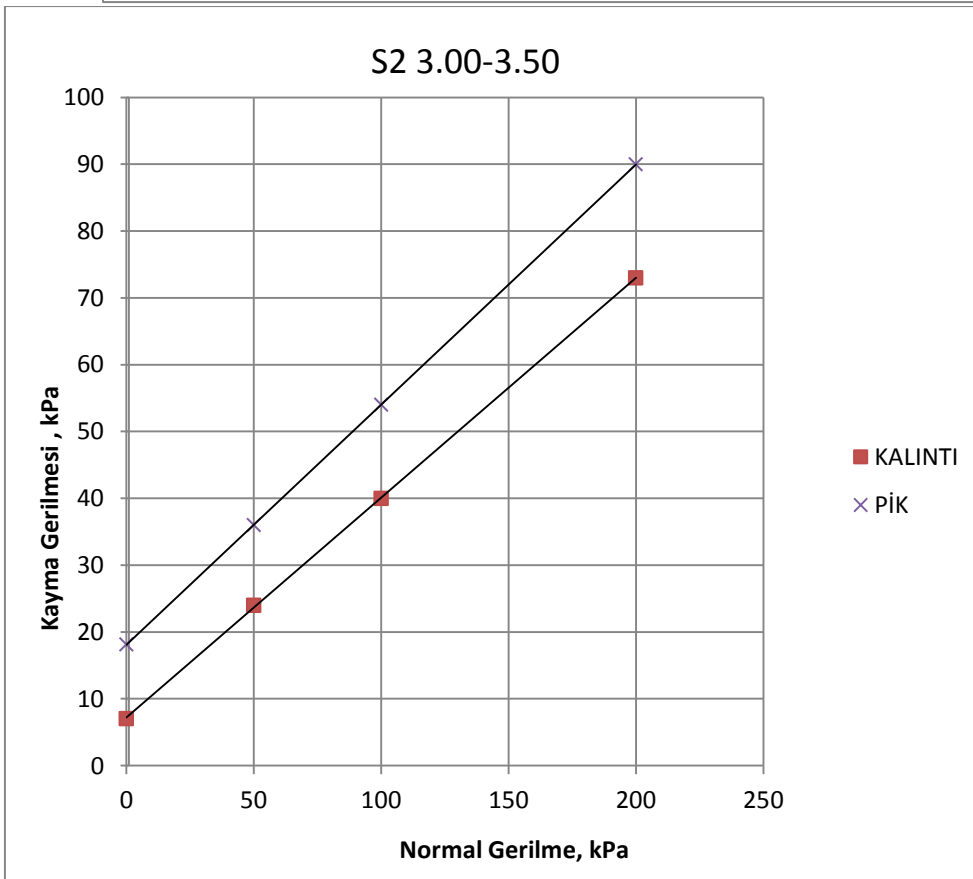
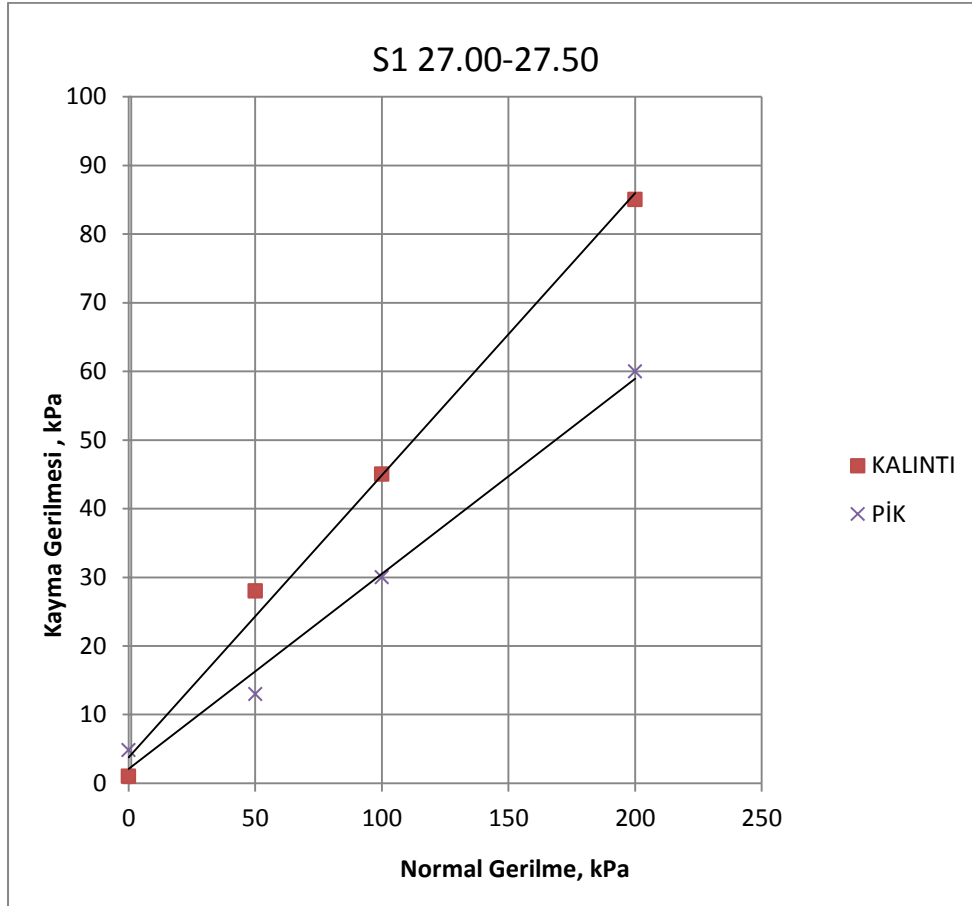


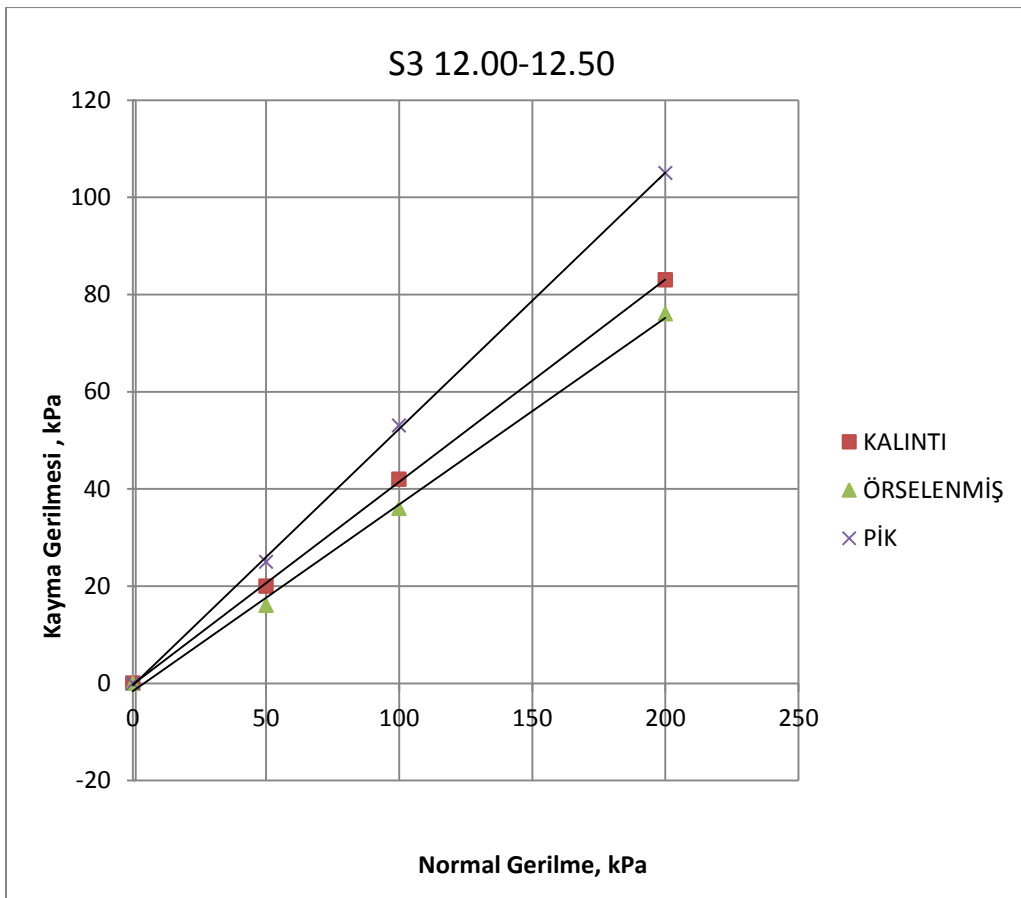
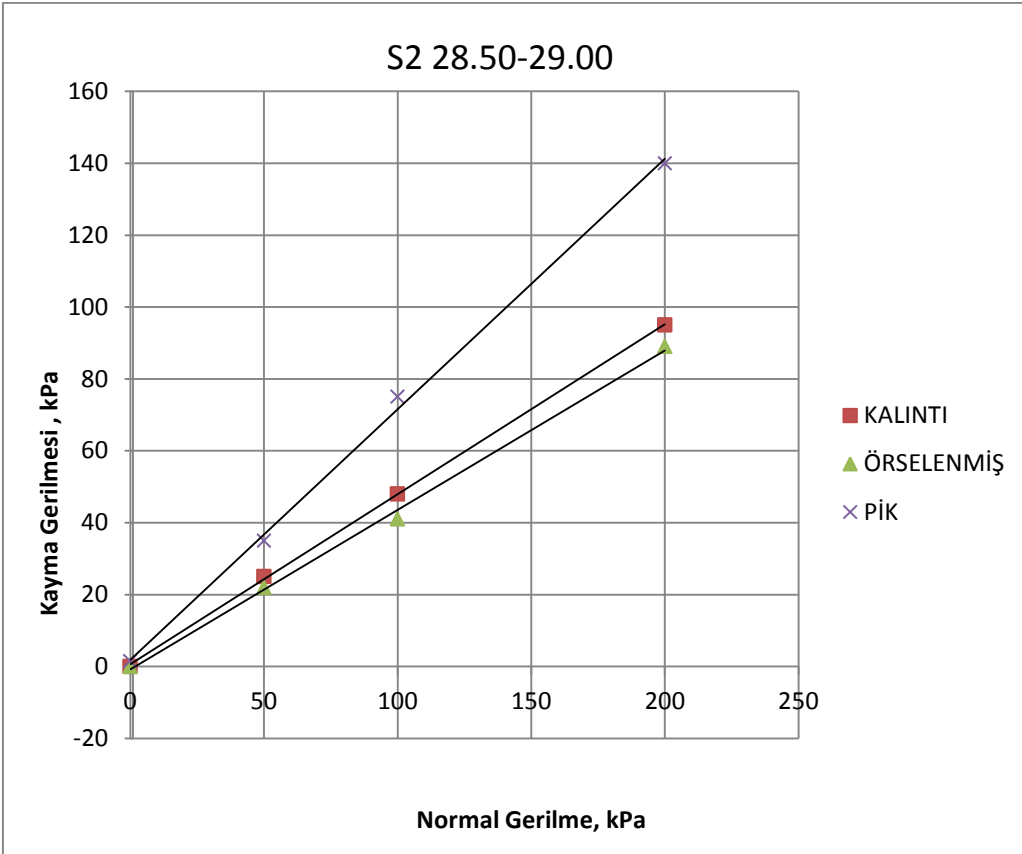


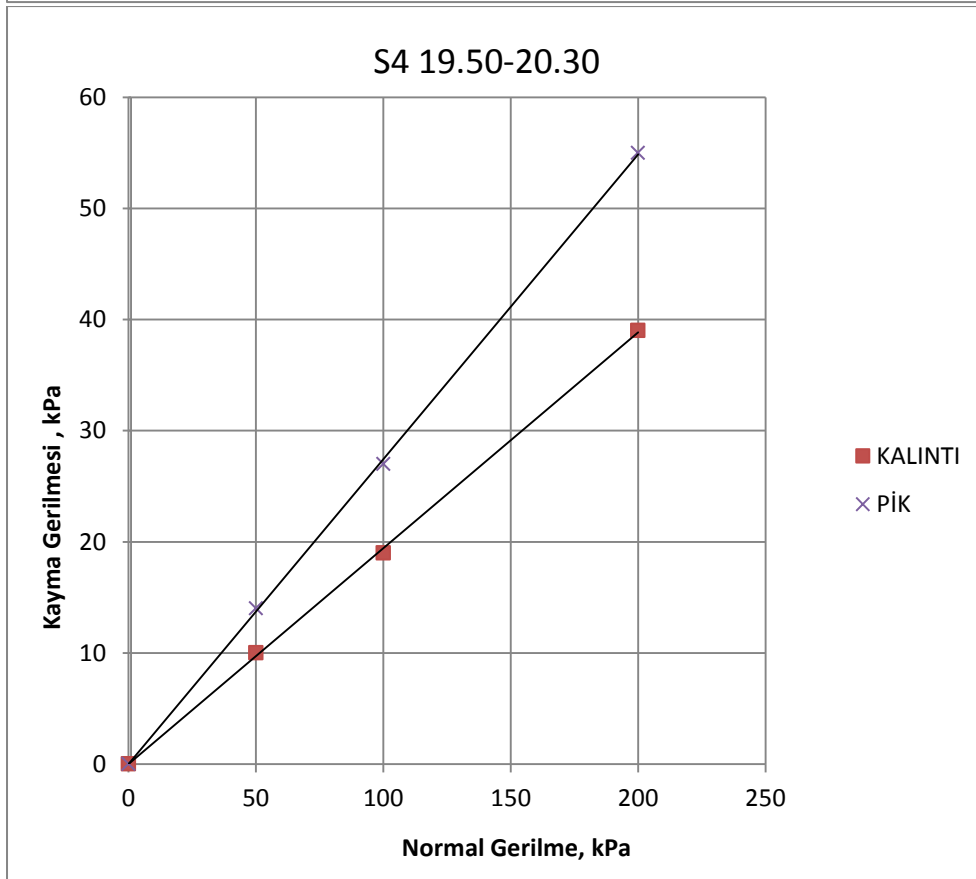
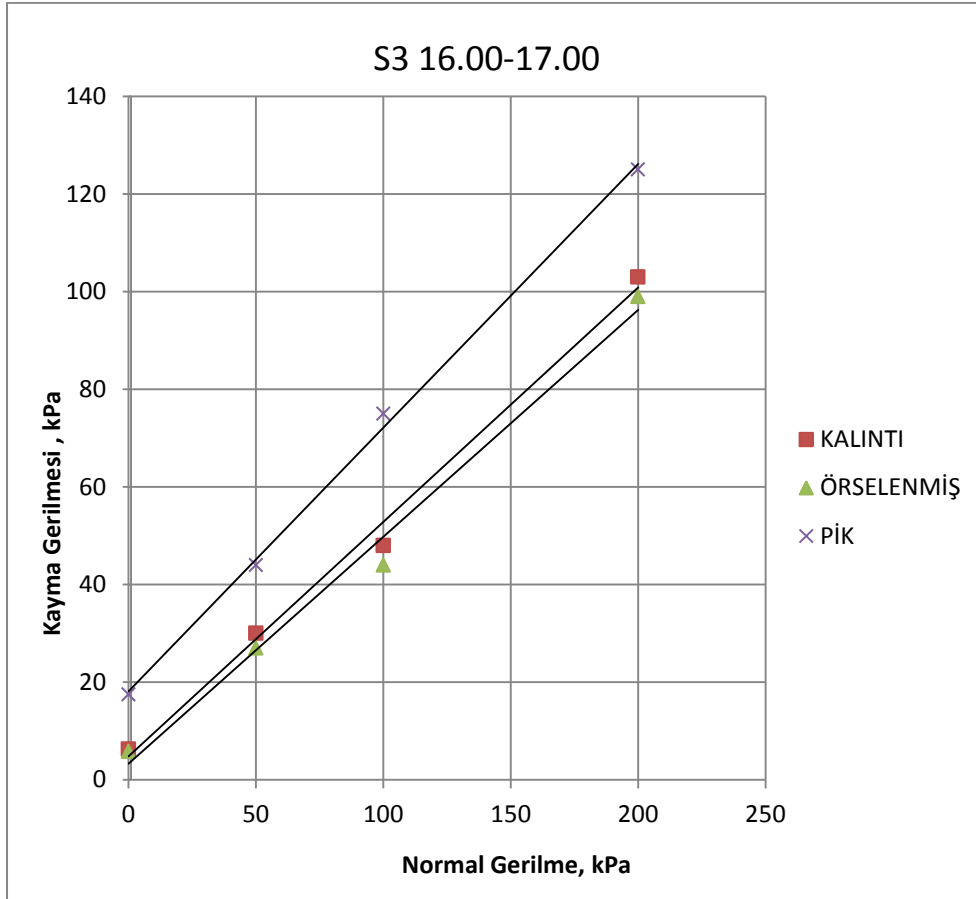
Serbest basınç deney sonuçları

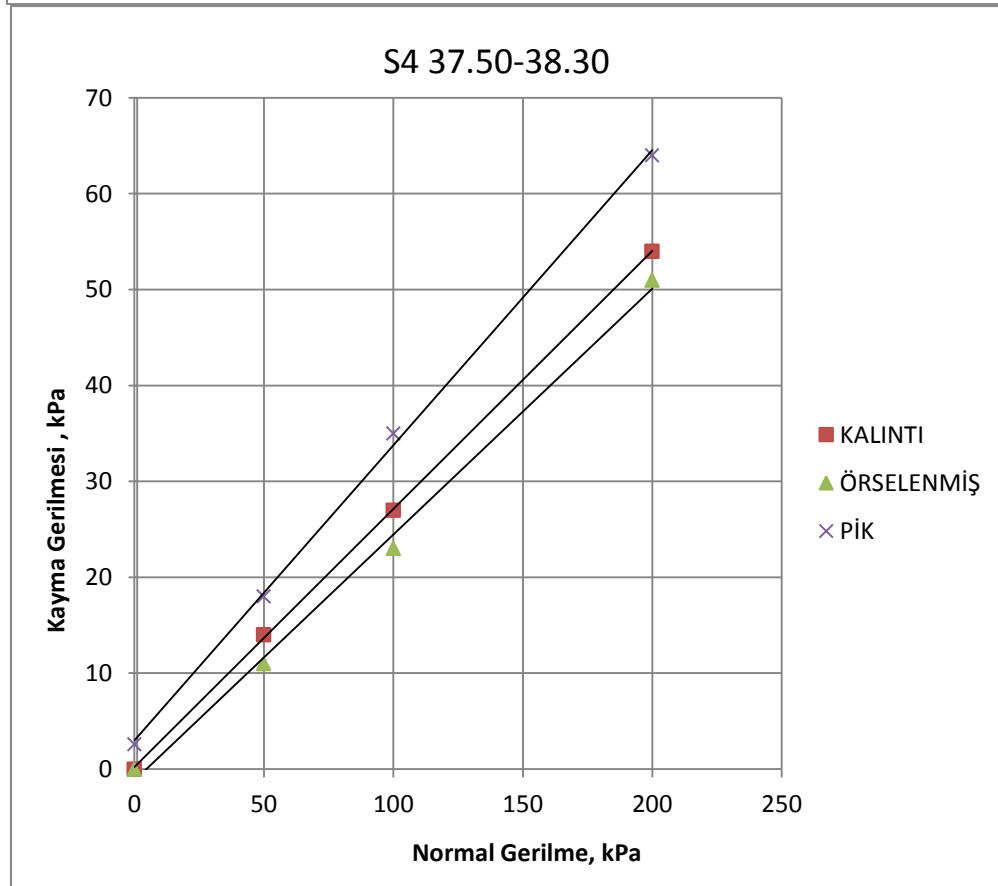
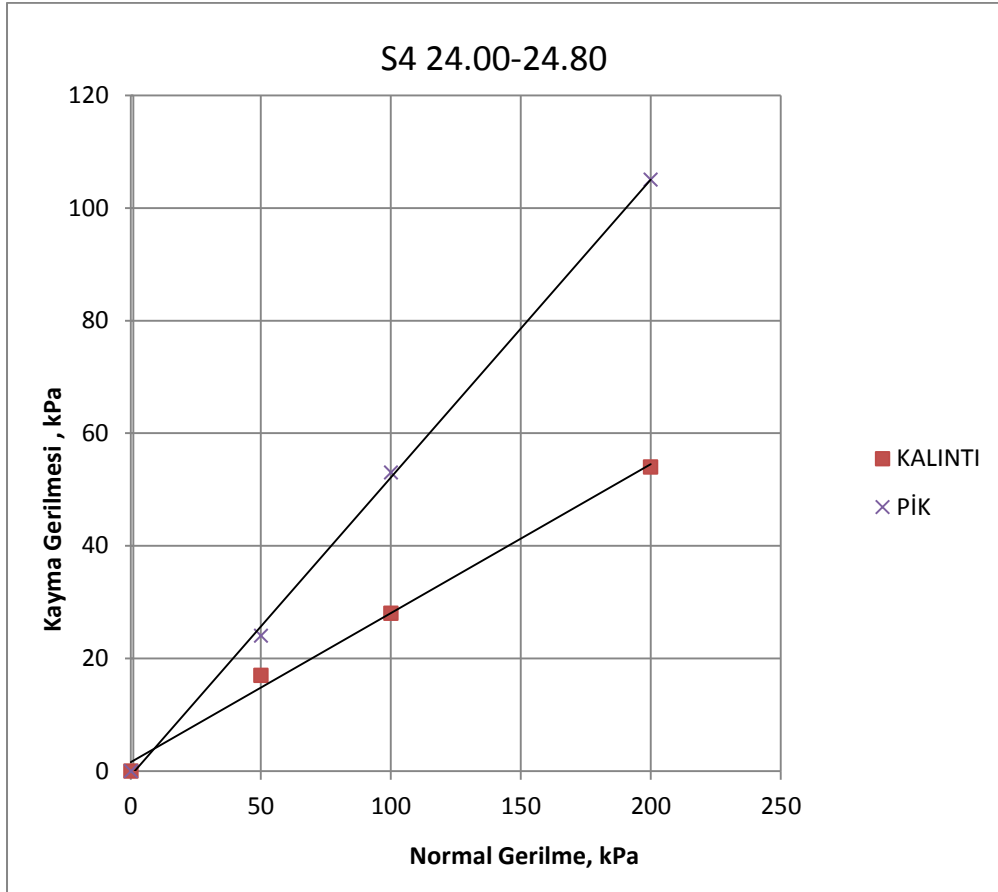
Kesme kutusu deney sonuçları

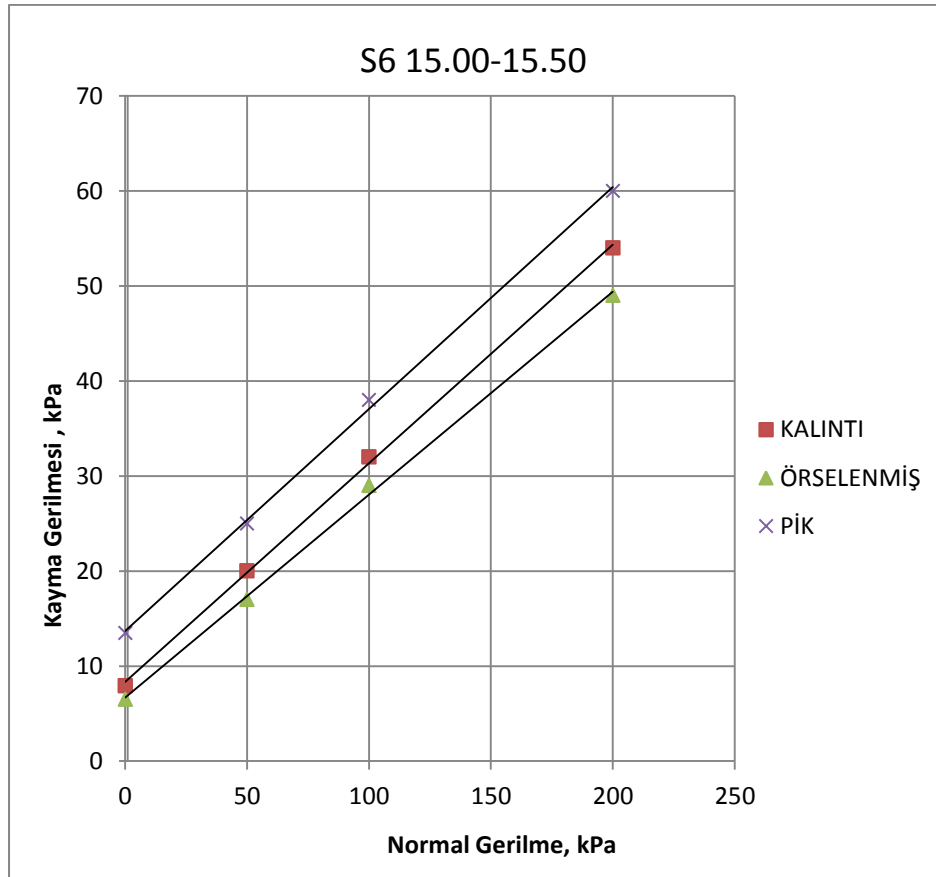
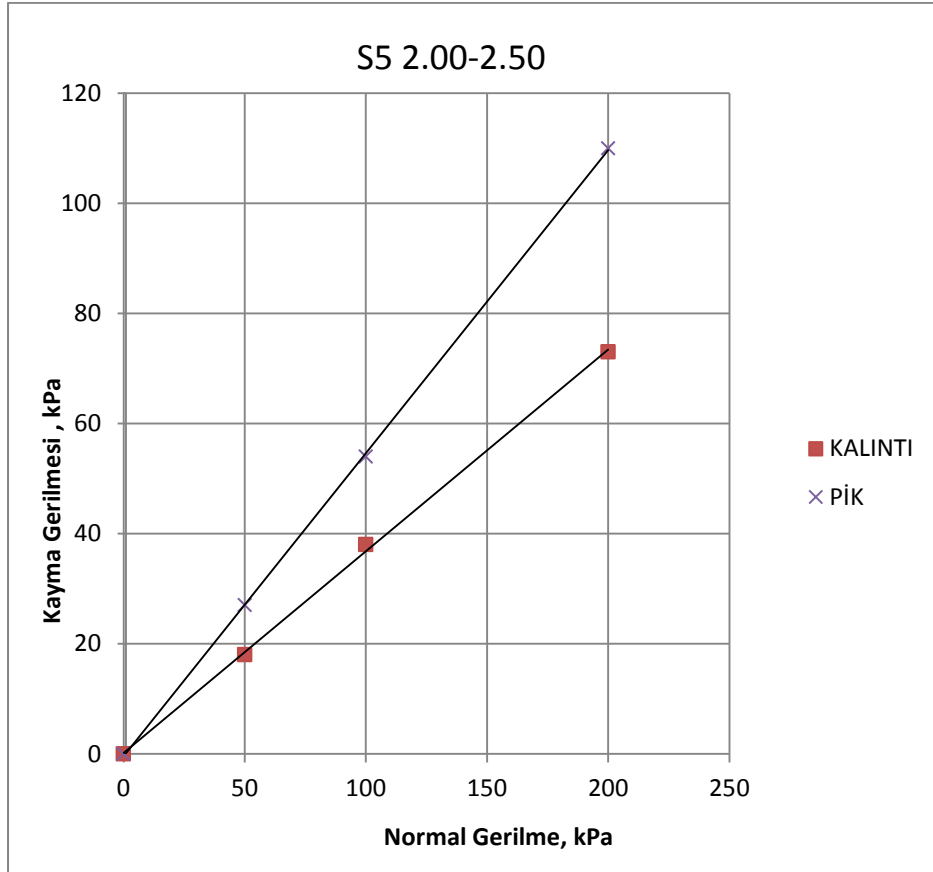


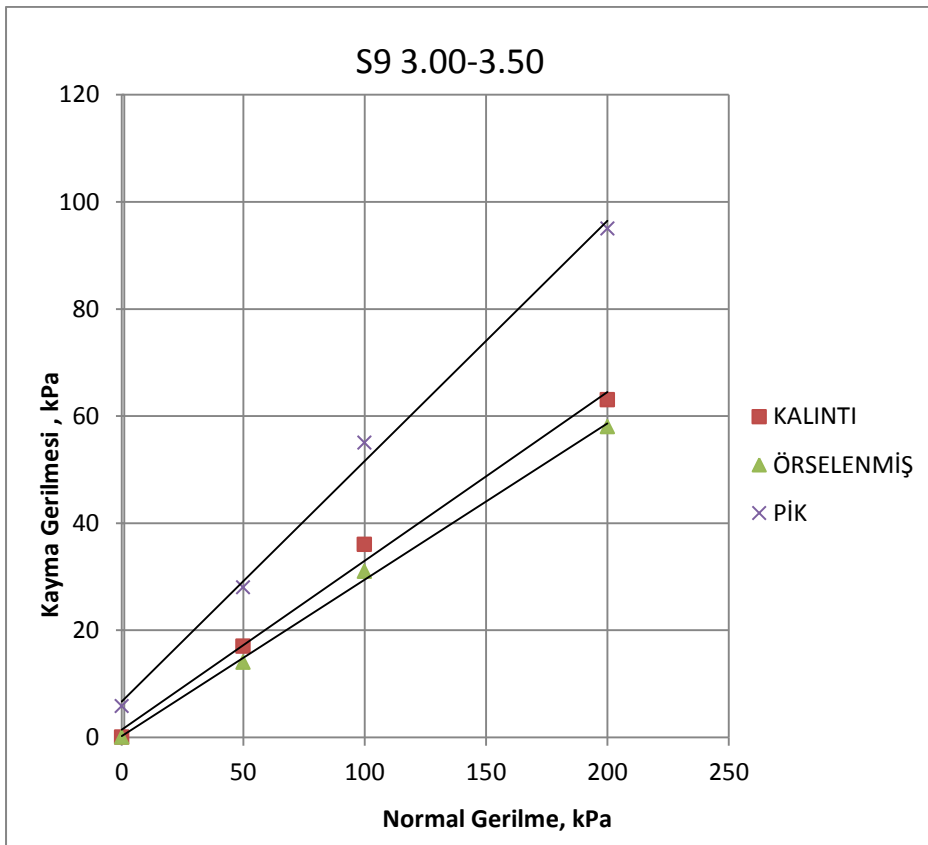
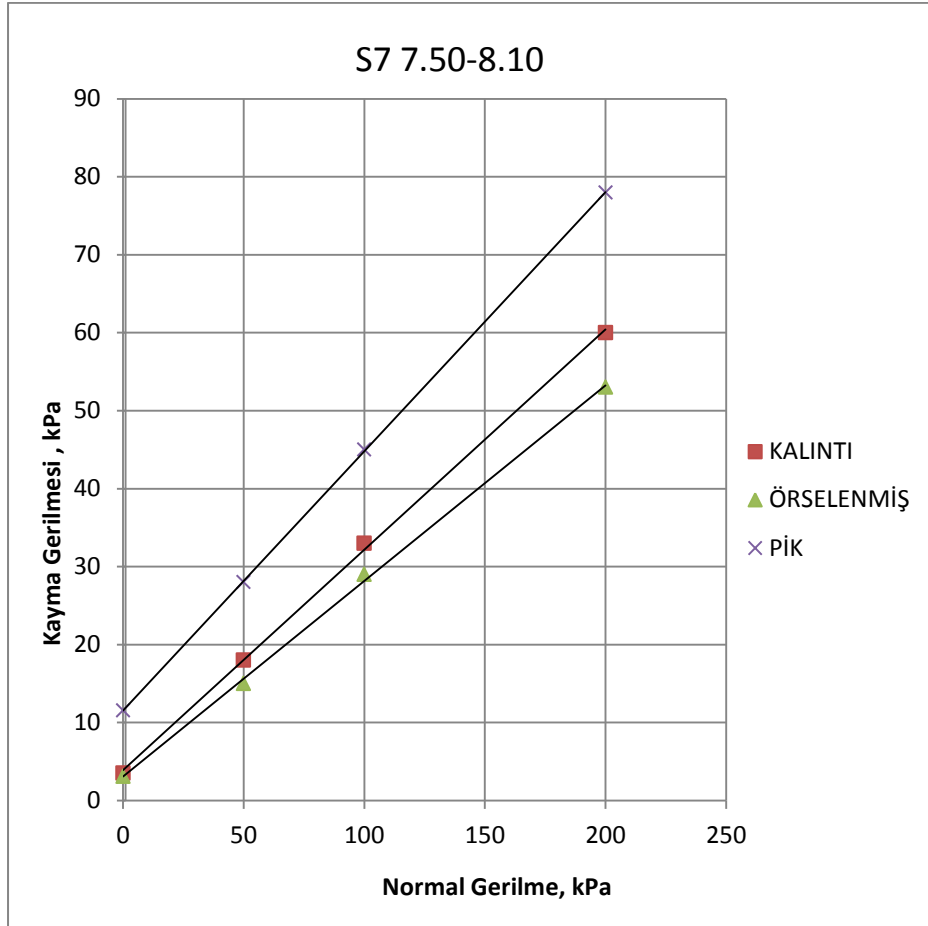


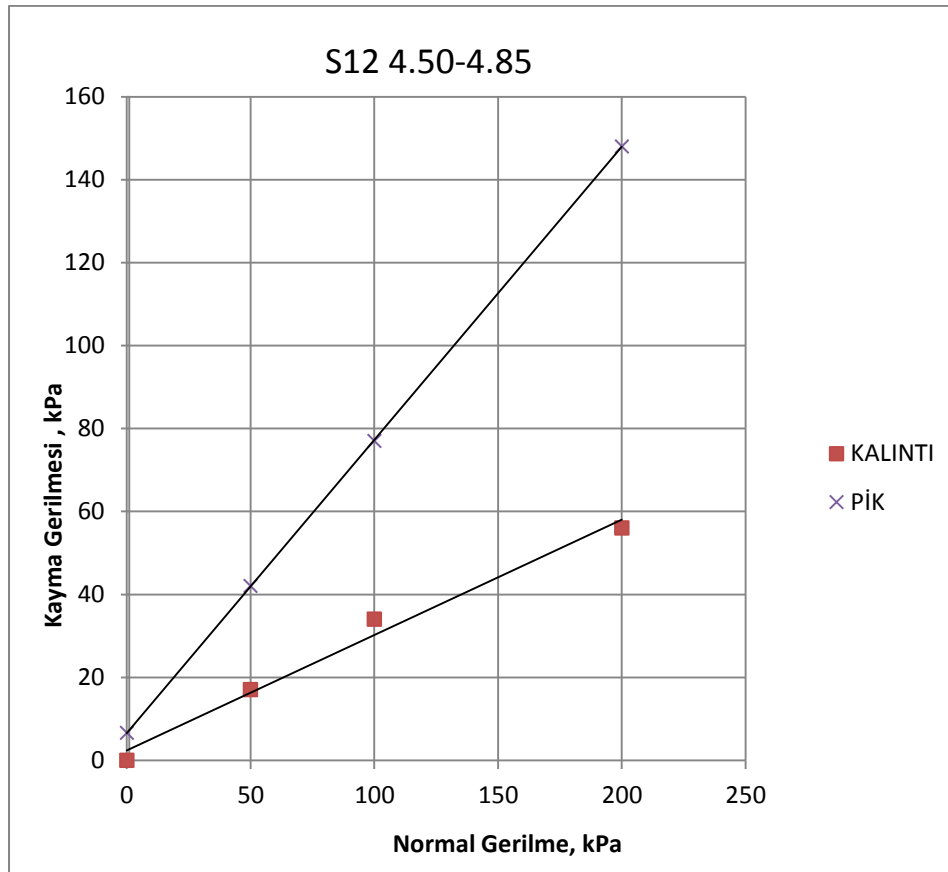
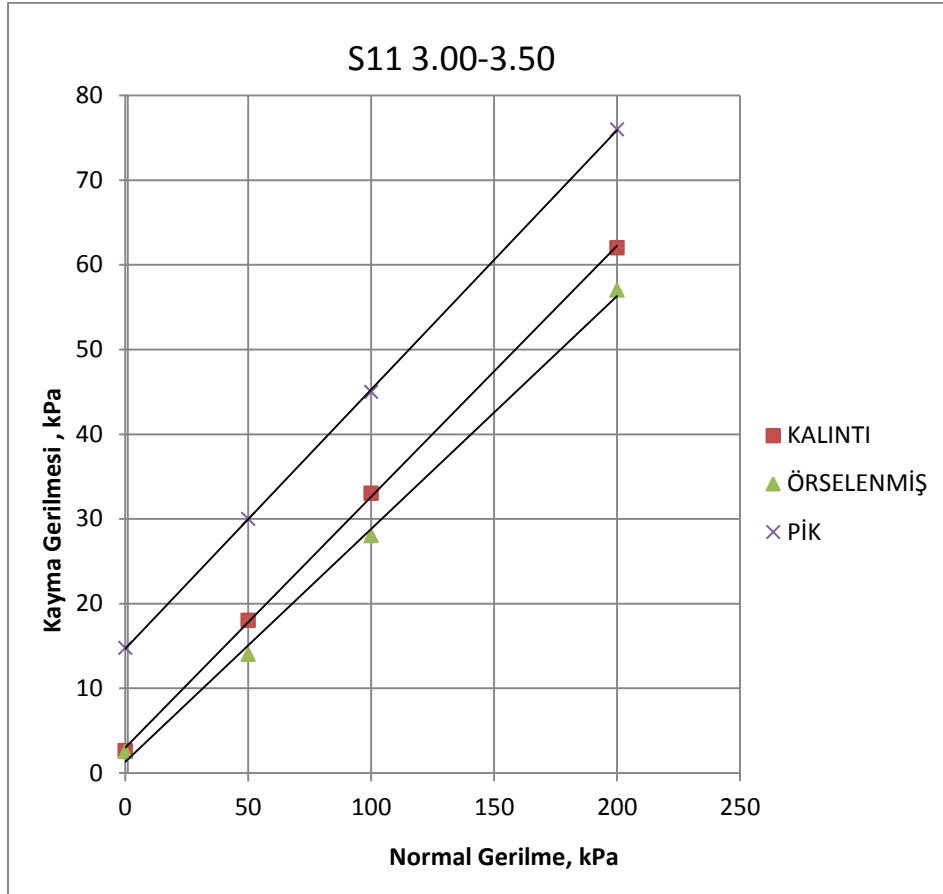


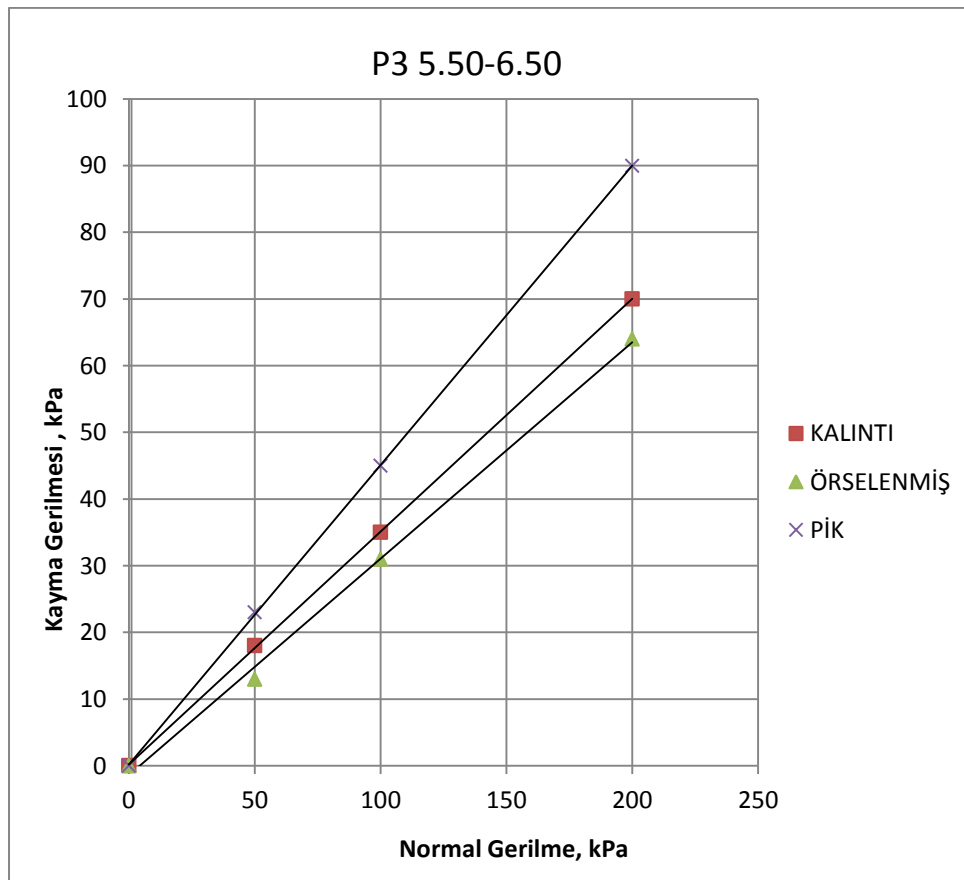
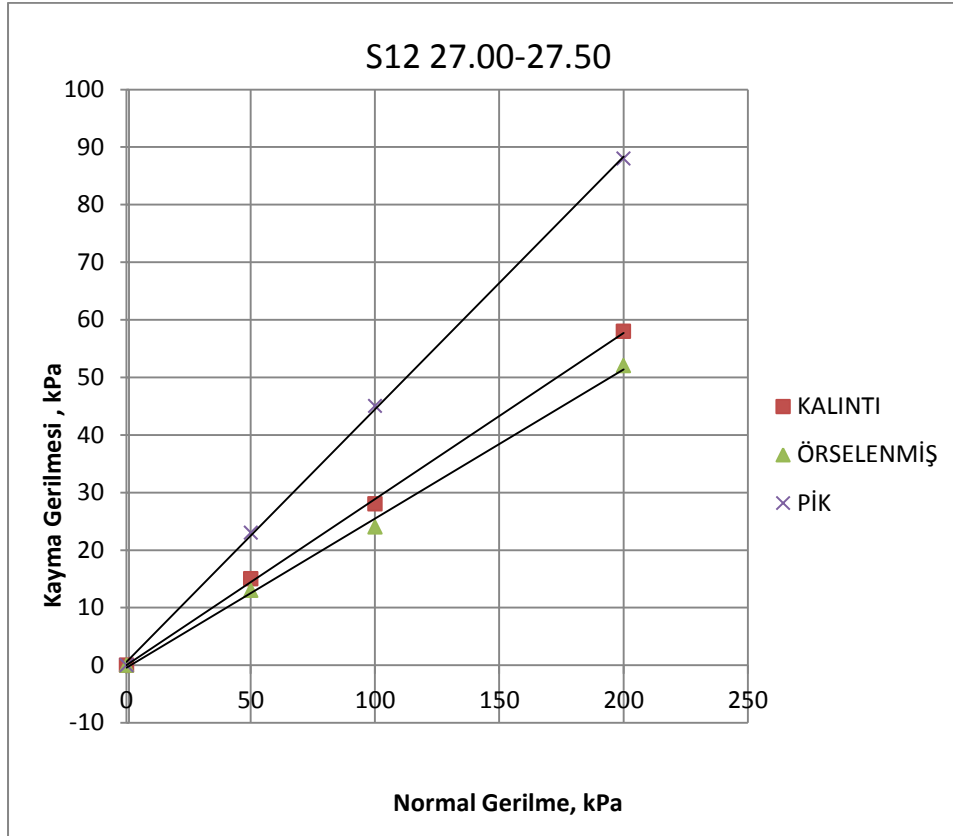


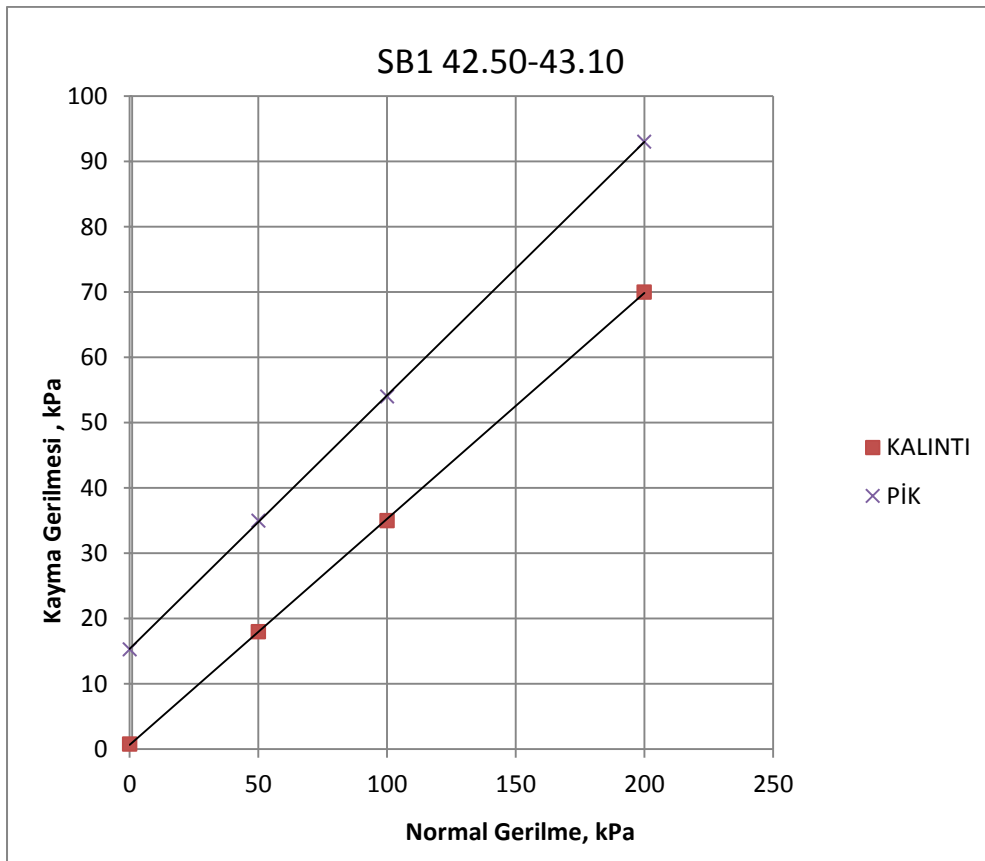
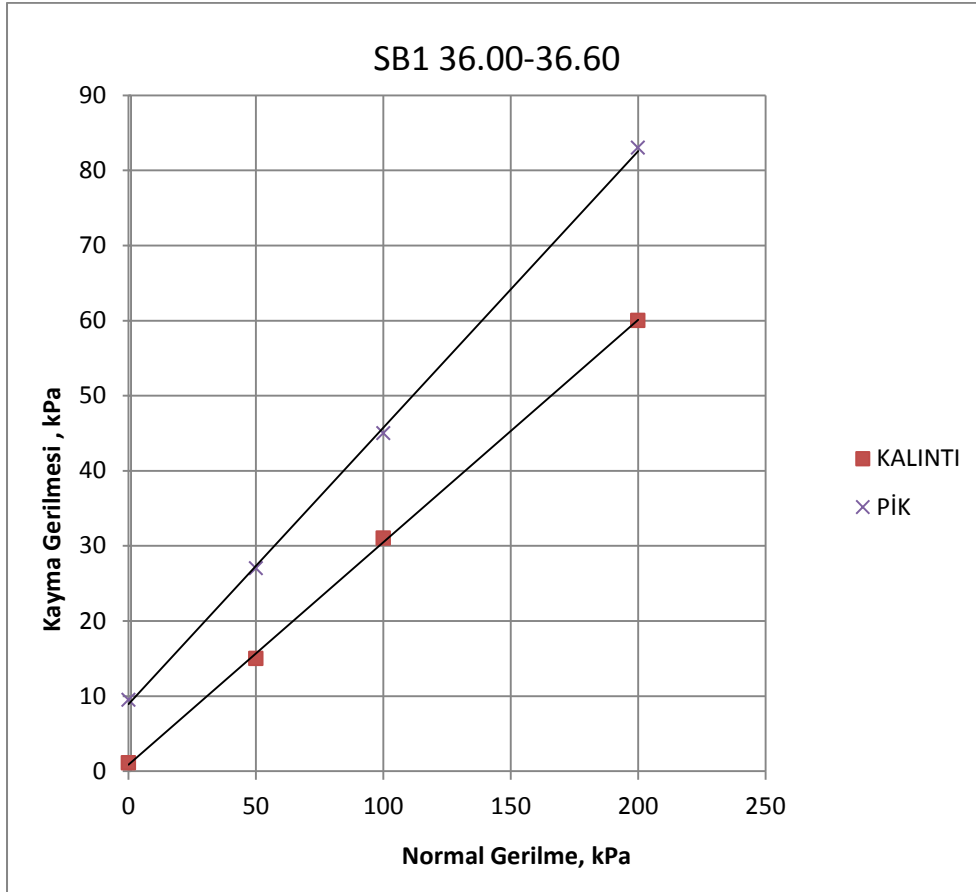


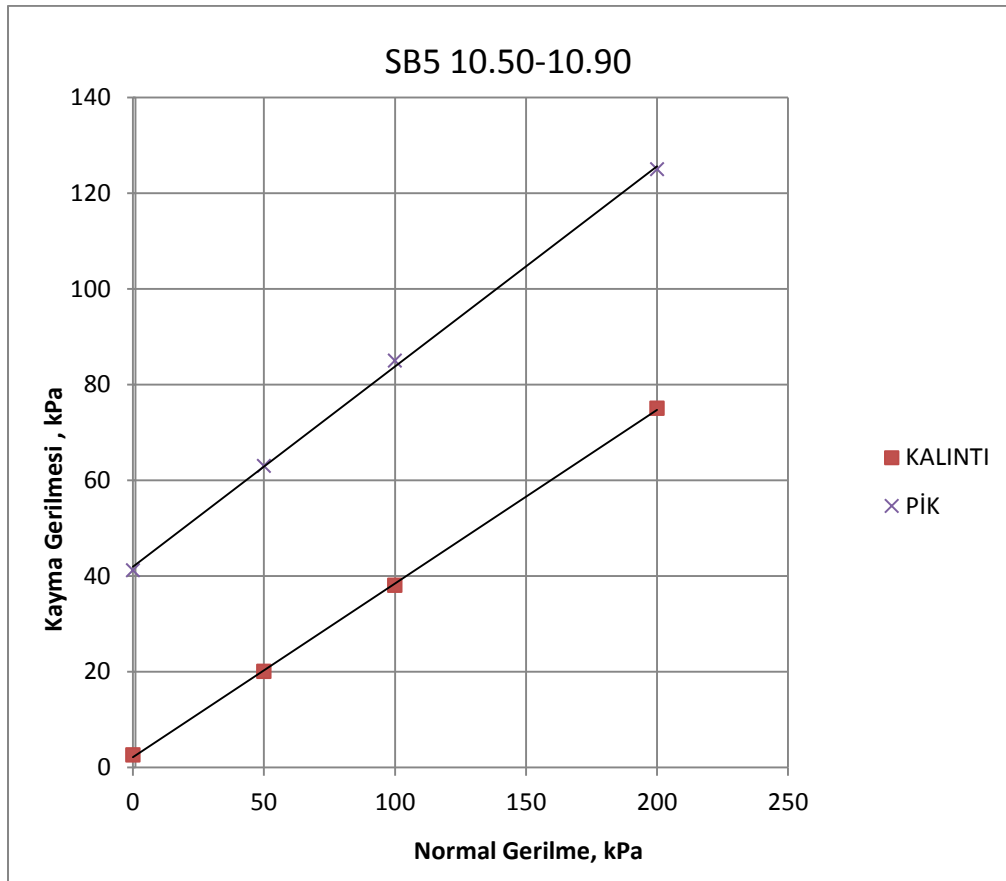
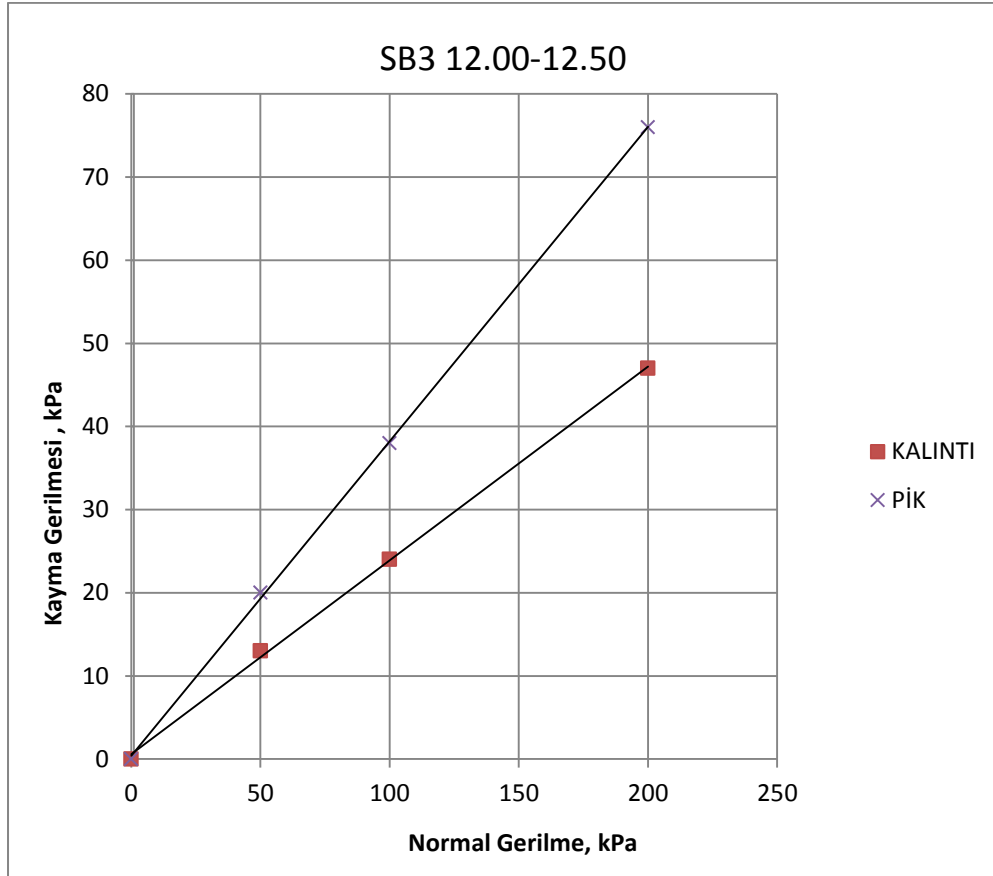


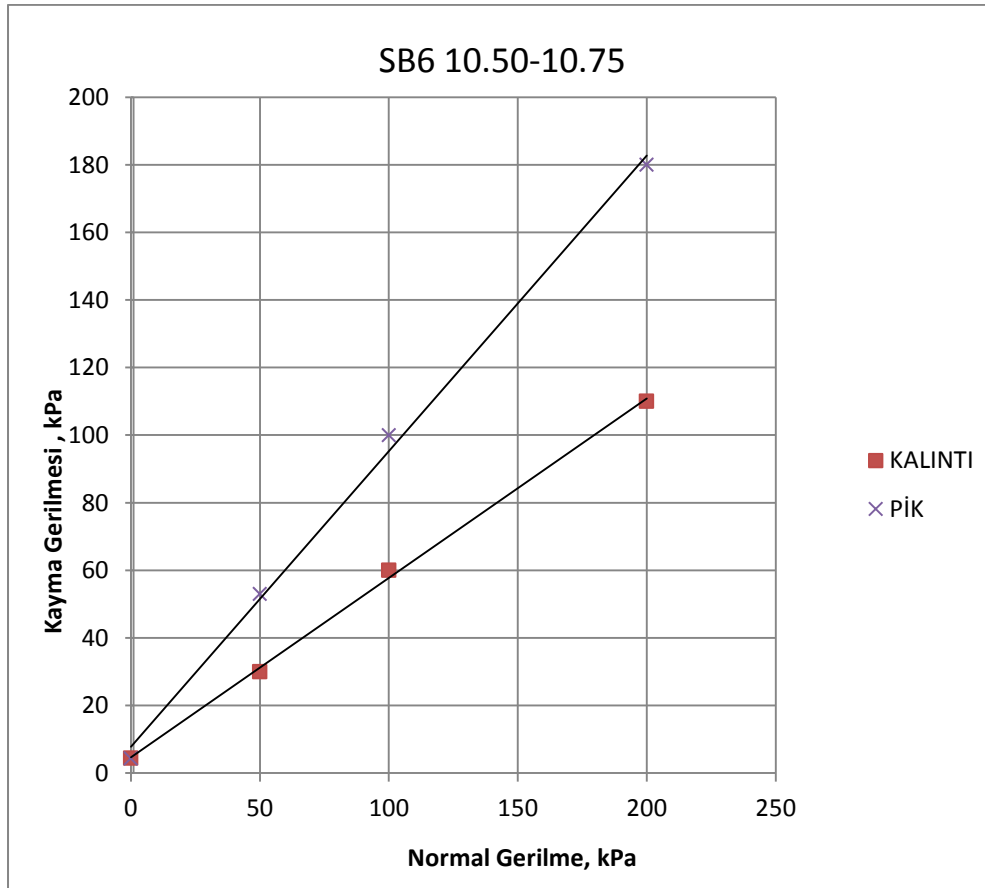
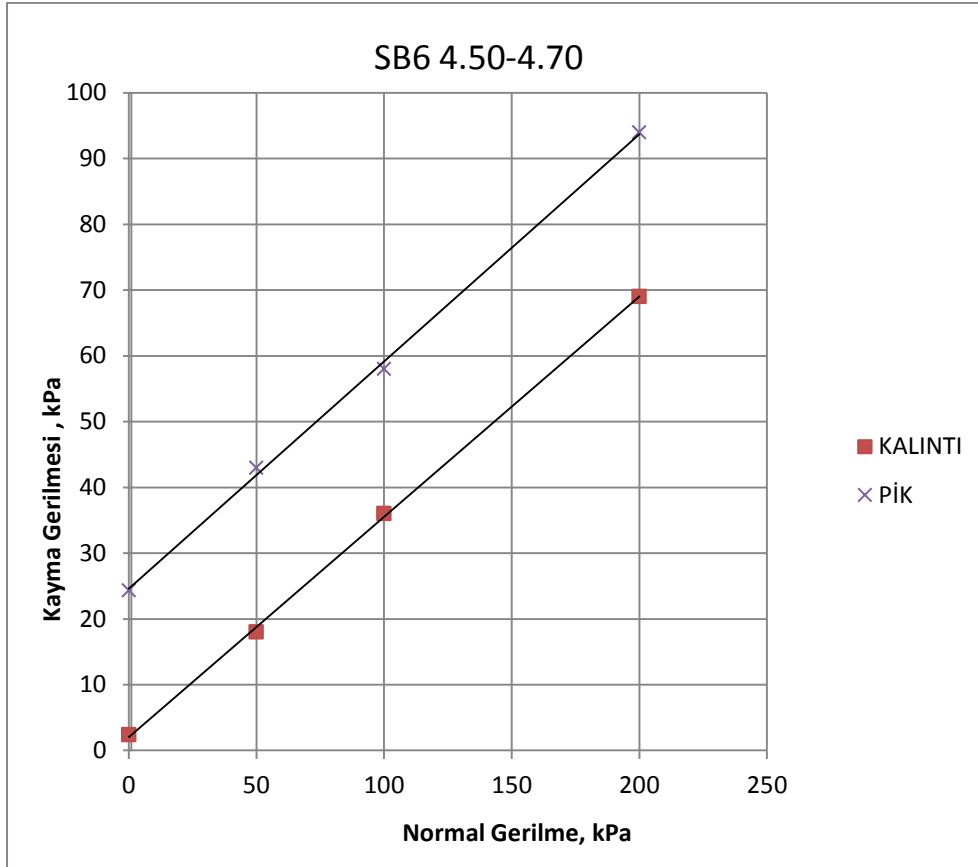


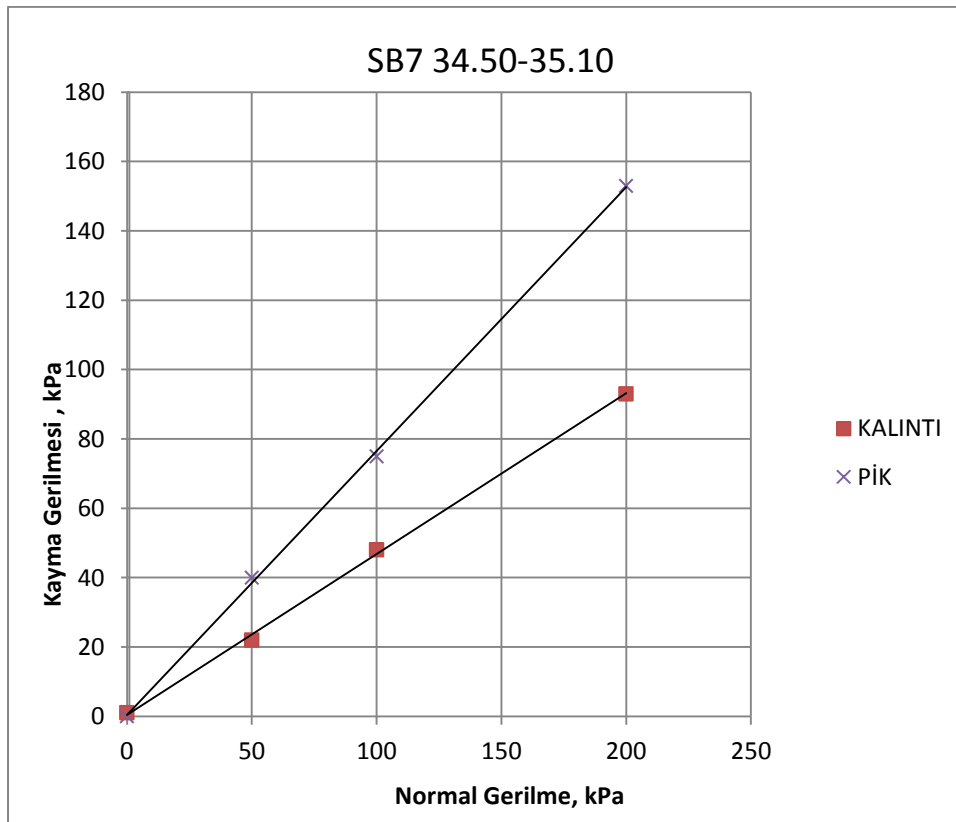
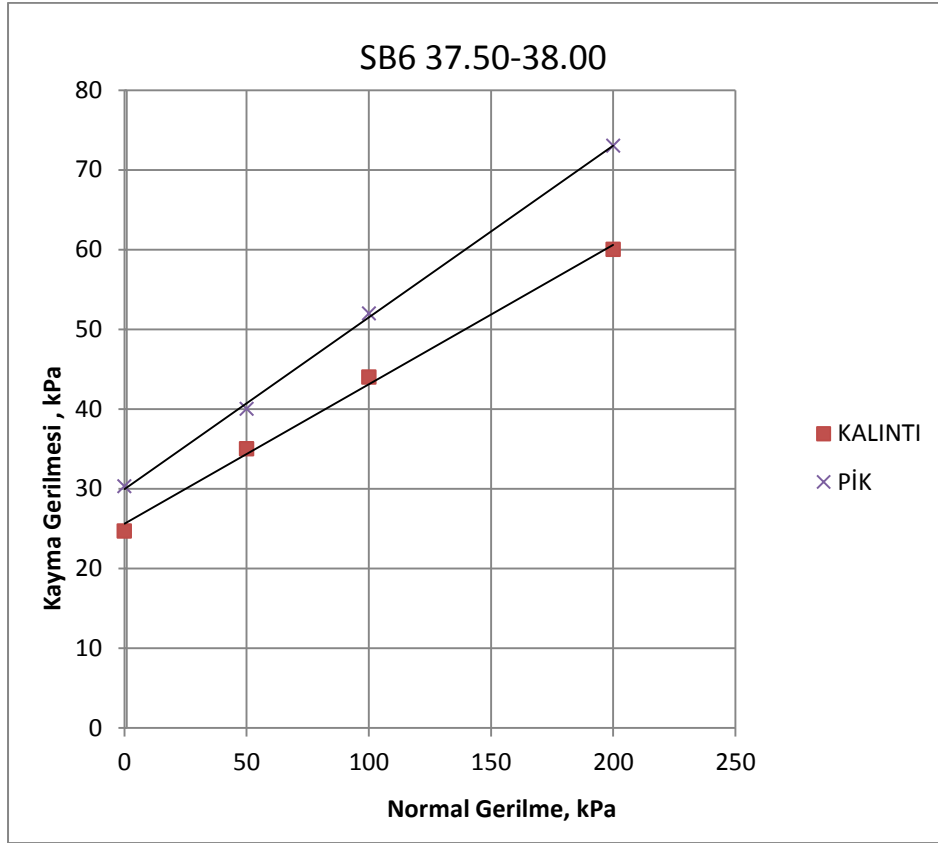


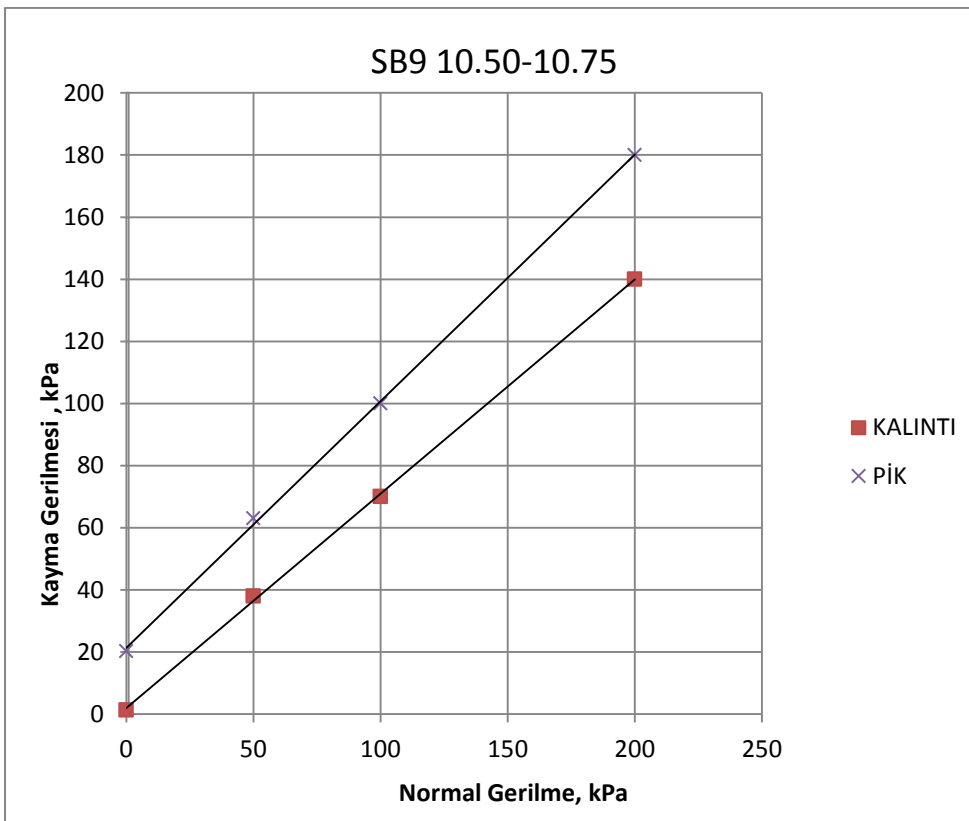
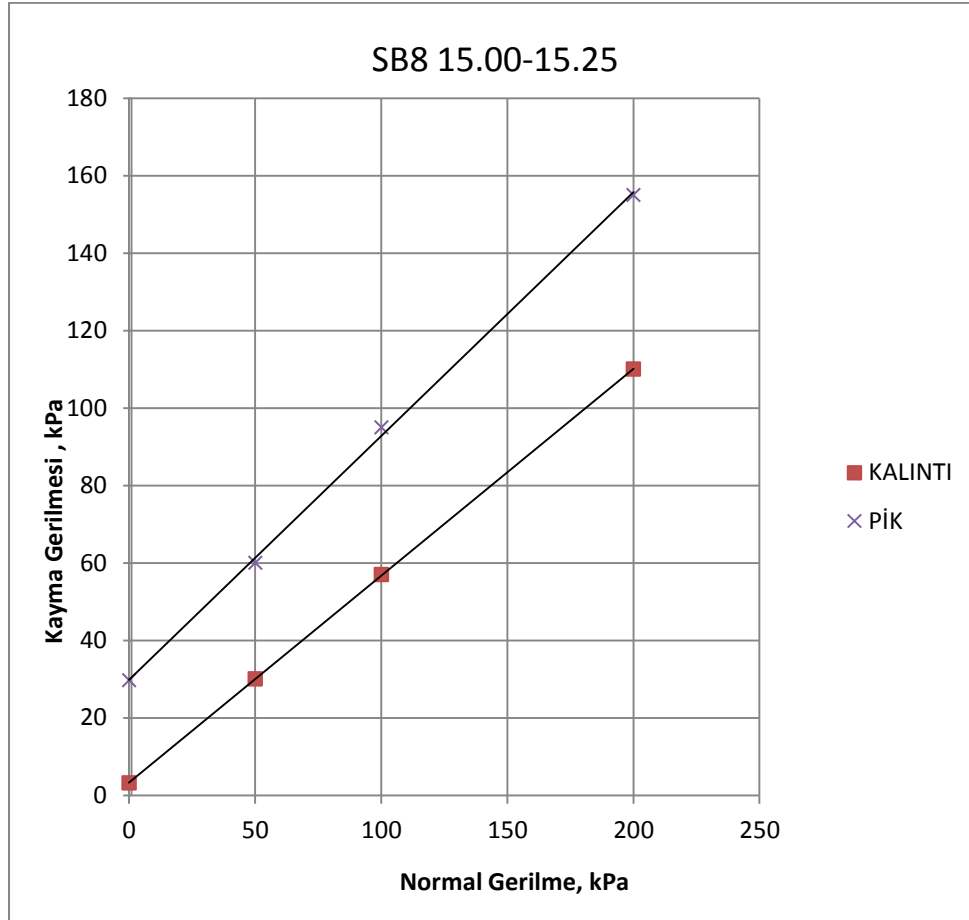


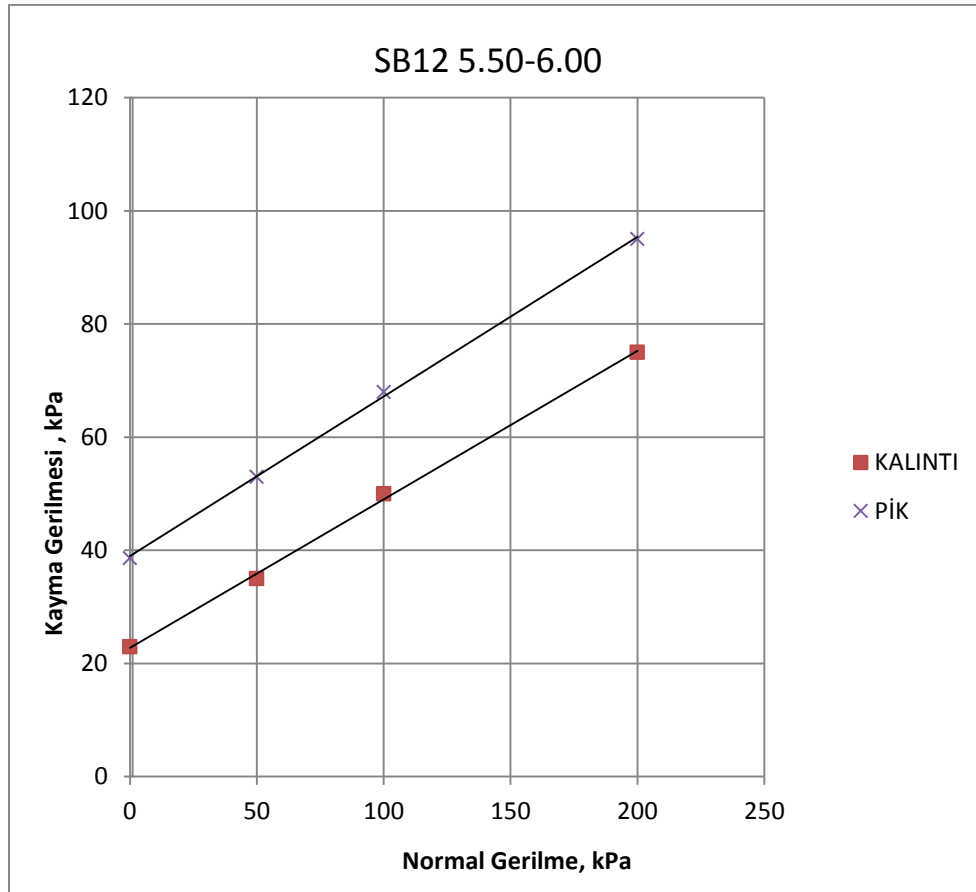
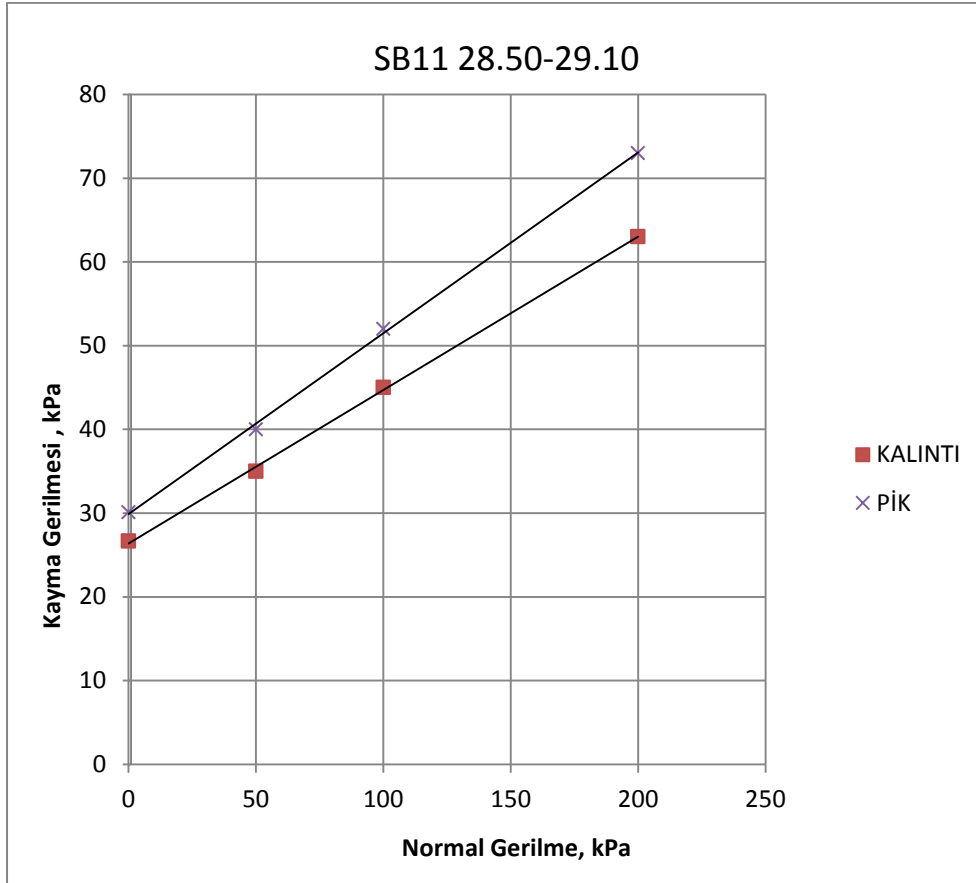


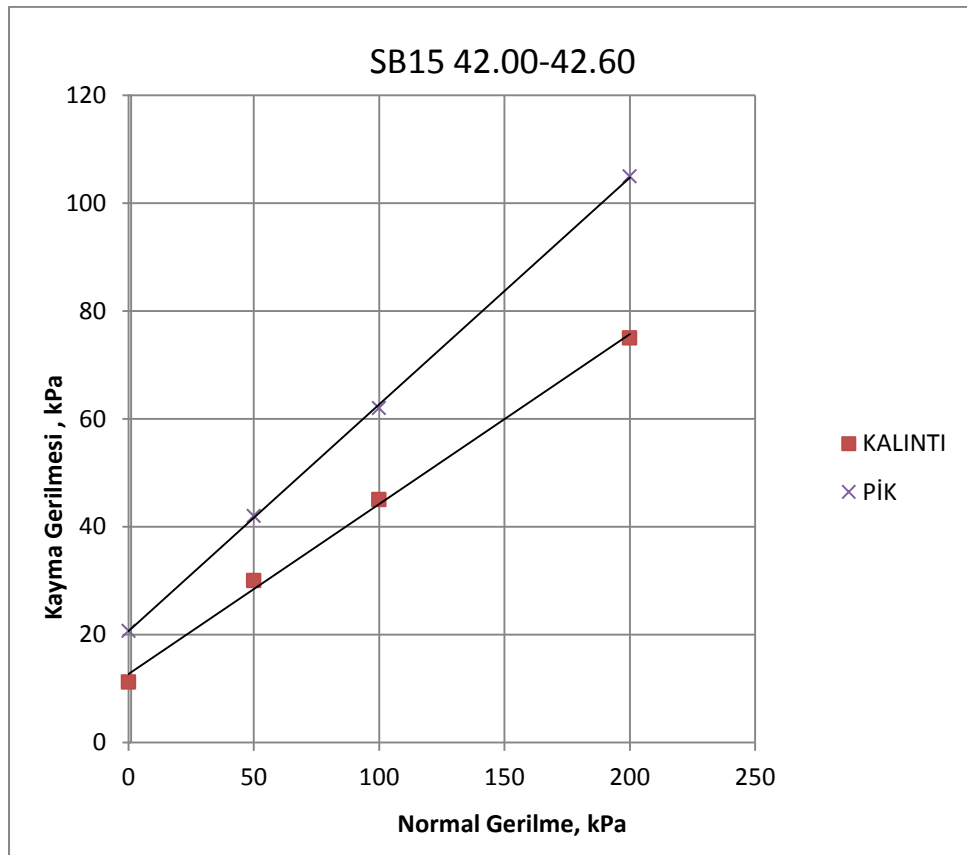
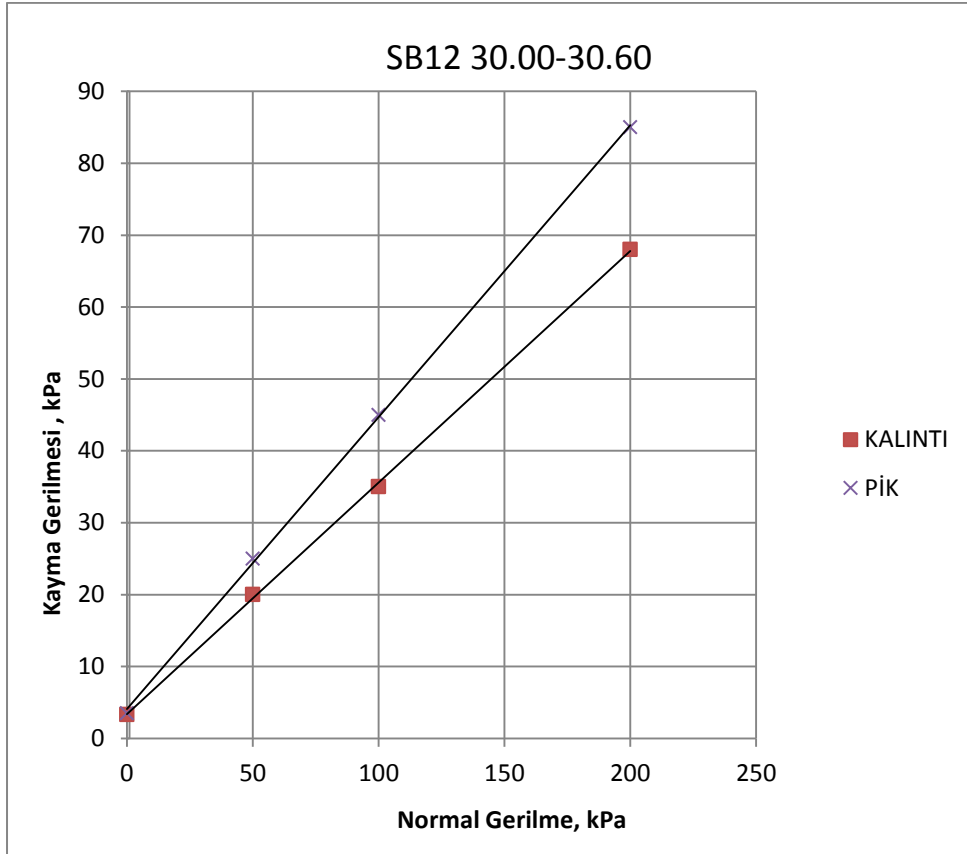


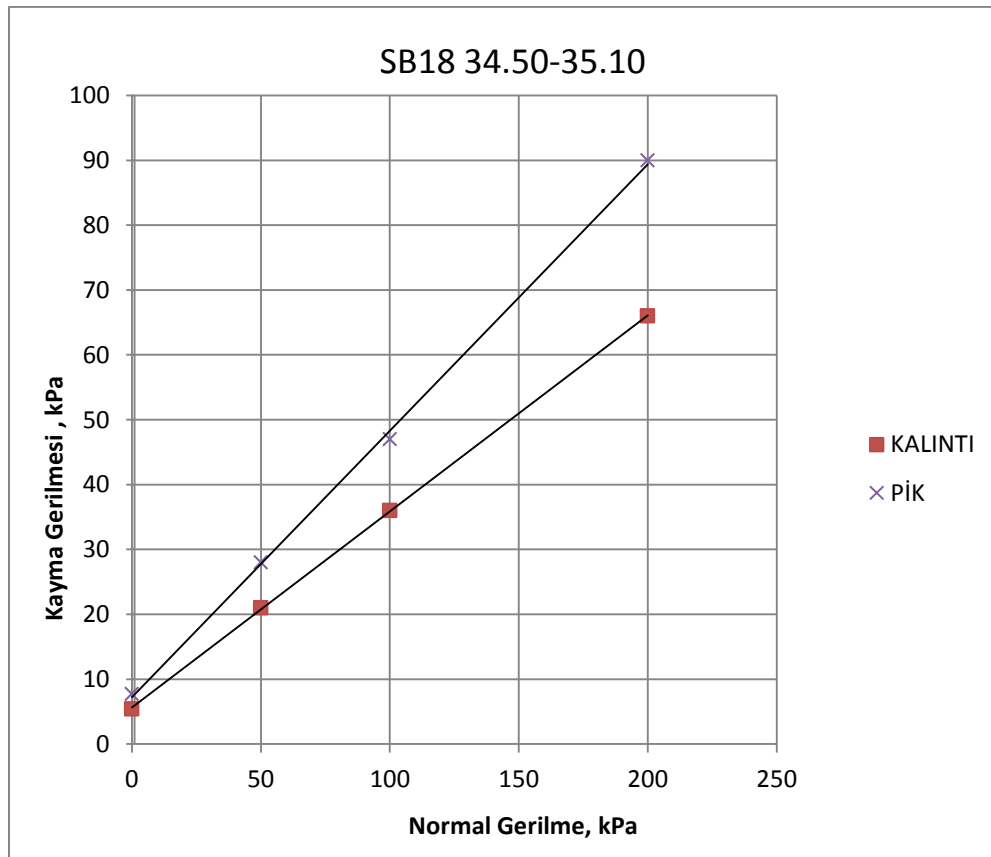
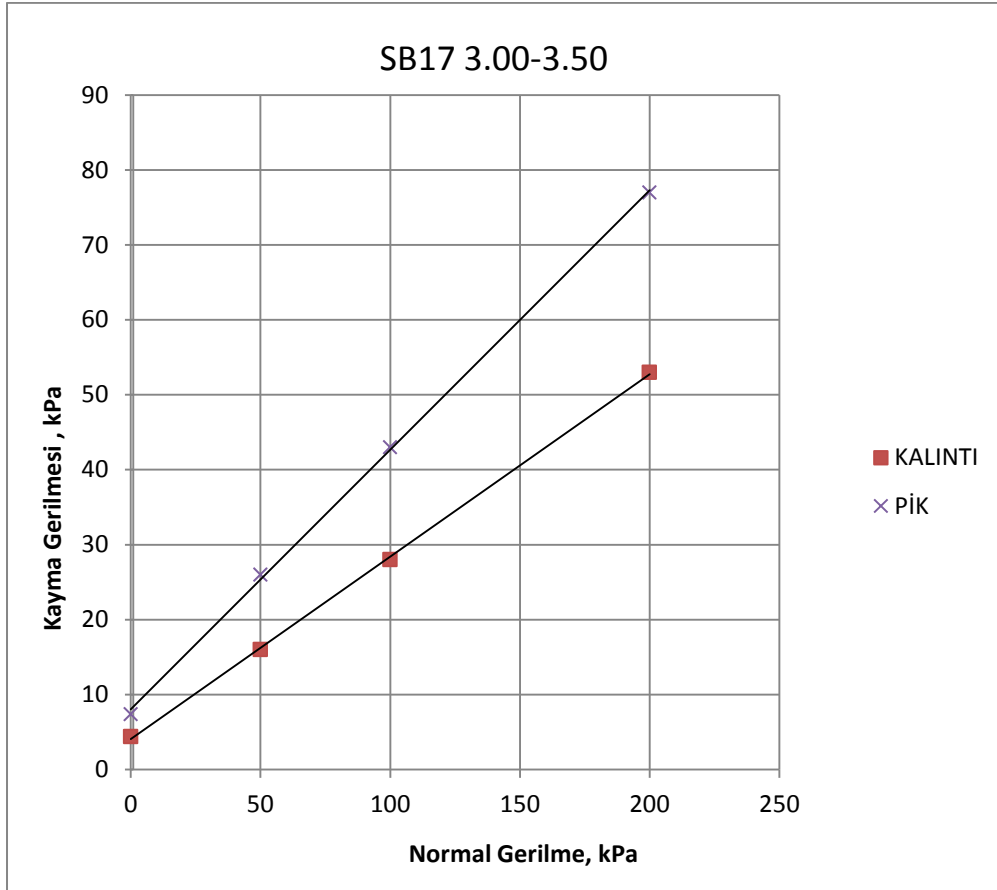


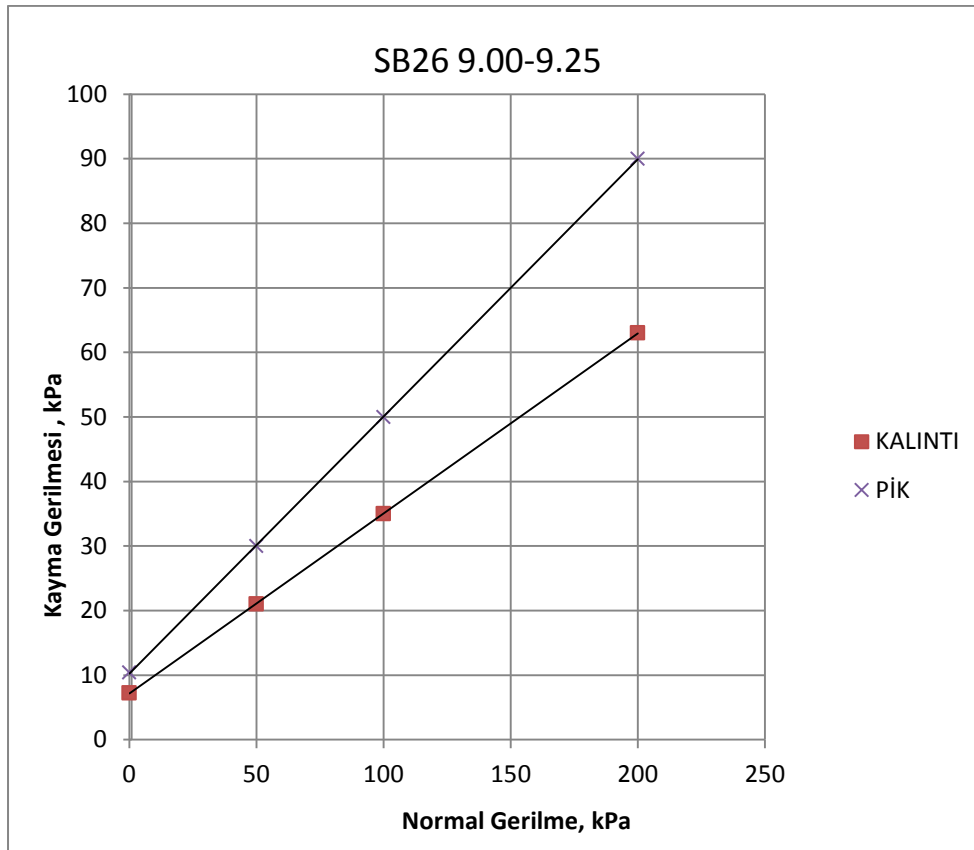
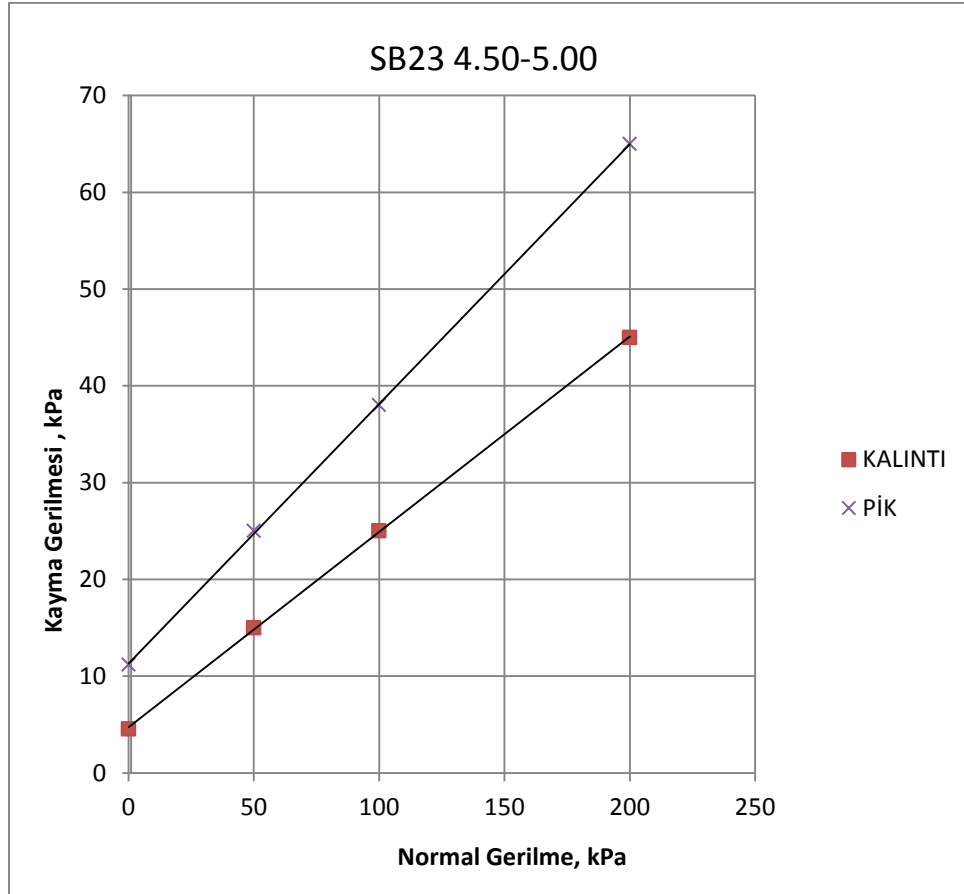












Üç eksenli basınç deney sonuçları

