

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAZI TRABZON ZEMİNLERİNİN KOMPAKSİYON DENEYLERİNDEKİ
KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ İLE GEÇİRİMLİLİK KATSAYILARI
ARASINDAKİ İLİŞKİLER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan Alper KAMILOĞLU

**HAZİRAN 2011
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAZI TRABZON ZEMİNLERİNİN KOMPAKSİYON DENEYLERİNDEKİ
KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ İLE GEÇİRİMLİLİK KATSAYILARI
ARASINDAKİ İLİŞKİLER

İnş. Müh. Hakan Alper KAMILOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.05.2011
Tezin Savunma Tarihi : 24.06.2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Hakan Alper KAMILOĞLU tarafından hazırlanan

**BAZI TRABZON ZEMİNLERİNİN KOMPAKSİYON DENEYLERİNDEKİ
KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ İLE GEÇİRİMLİLİK KATSAYILARI
ARASINDAKİ İLİŞKİLER**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2011 gün ve 1406 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/ 06 / 2011 tarihinde yapılan
sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

Üye : Prof. Dr. Fikri BULUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

İnsanlığın var oluşundan bu yana varlığını sürdüren, amaca uygun, ekonomik ve güvenli yapı ihtiyaçlarına bilimsel çözümler üreten inşaat mühendisliğinin kapsamı içerisinde olan zemin mekaniği, zeminlerin özelliklerini yük altındaki davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Bu çalışmada, zeminlerin fiziksel özelliklerinden olan geçirimsizlik ve boşluk oranı ilişkisi araştırılmıştır.

Yaptığım yüksek lisans tez çalışmam süresince, danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yönlendirmelerini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, ihtiyacım olan her konuda bana her zaman yardımcı olan ve yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER' e teşekkür eder, saygı ve minnetlerimi sunarım.

Gerek lisans gerek yüksek lisans eğitimim boyunca aldığım derslerle, kendimi geliştirmem ve mesleğim hakkında gereken tecrübeleri edinmem konusunda bana yardımcı olan ve bu seviyeye gelmemde emekleri olan tüm hocalarıma teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tezimin deneysel çalışma bölümünde deney aletleri temini, önemli yardımları ve hoş görülerinden ötürü KTÜ Geoteknik-Ulaştırma Laboratuvarı çalışanları ve sorumlularına teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın tüm dönemlerinde maddi manevi destekçim olan, tez çalışmalarım sırasında beni sabır ve anlayışla destekleyen, sevgili aileme, tez yazım sürecinde desteklerini esirgemeyen değerli Bayburt Üniversitesi araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU 'na çok teşekkür ederim.

Hakan Alper KAMILOĞLU
Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bazı Trabzon Zeminlerinin Kompaksiyon Deneyleindeki Kompaksiyon Özellikleri ile Geçirimsizlik Katsayıları Arasındaki İlişkiler” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/05/2011

Hakan Alper KAMILOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Literatür.....	1
1.2. Kompaksiyon	2
1.2.1. Kompaksiyonun Yararları	2
1.2.2. Kompaksiyon (Proktor) Deneyi	3
1.2.2.1 Standart Proctor Deneyi	5
1.2.2.2. Doygunluk Çizgileri.....	7
1.2.2.3. Hava İçeriği Çizgileri	9
1.2.2.4. Değiştirilmiş (Ağır, Modifiye) Proktor Deneyi	10
1.2.3. Arazide Kompaksiyon.....	11
1.2.3.1. Arazide Kullanılan Sıkıştırma Araçları.....	12
1.2.4. Rölatif Kompaksiyon	13
1.2.5. Kompaksiyonun Bağlı Olduğu Etmenler	13
1.2.5.1. Su İçeriği	13
1.2.5.2. Zemin Cinsinin Etkisi	13
1.2.5.3. Zemin Tanelerinin Şeklinin Kompaksiyona Etkisi	14
1.2.5.4. Kompaksiyon Enerjisinin Kompaksiyona Etkisi	15
1.3. Geçirimsizlik	16
1.3.1. Zeminlerde Su Akımları.....	17
1.3.1.1. Zeminlerde Su Akışını Etkileyen Faktörler	17
1.3.2. Zeminlerde Kılcallık Olayları	18
1.3.2.1. Zeminde Kılcal Bölgenin Özellikleri	19

1.3.3.	Laminer ve Türbülanslı Akış	19
1.3.4.	Darcy Yasası	20
1.3.5.	Geçirimsizlik Katsayısı ile İlgili Eşitlikler	21
1.3.6.	Geçirimsizlik Katsayısının Belirlenmesi	23
1.3.6.1.	Geçirimsizlik Katsayısının Laboratuvar Deneyleri ile Belirlenmesi	24
1.3.6.1.1.	Sabit Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi	24
1.3.6.1.2.	Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi	25
1.3.6.2.	Geçirimsizlik Katsayısının Arazi Deneyleri ile Belirlenmesi	26
1.3.6.2.1.	Zeminden Su Çekerek Geçirimsizlik Katsayısının Belirlenmesi	26
1.3.6.2.2.	Zemine Su Vererek Geçirimsizlik Katsayısının Belirlenmesi	29
1.3.7.	Tabakalı Zeminlerde Ortalama Geçirimsizlik	31
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1.	Zemin Sınıflandırma Deneyleri	34
2.1.1.	Özgül Yoğunluk Deneyi	34
2.1.2.	Islak Analiz (Hidrometre Yöntemi)	36
2.1.3.	Elek Analizi (Yıkamalı Analiz)	38
2.1.4.	Likit Limit Deneyleri	39
2.1.5.	Plastik Limit Deneyleri	40
2.2.	Kompaksiyon Deneyleri	41
2.3.	Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi	42
3.	BULGULAR VE TARTIŞMALAR	43
3.1.	Zemin Sınıflandırma Deneyleri	43
3.1.1.	Elek Analizi (Yıkamalı Analiz)	43
3.1.2.	Tane Yoğunluk Deneyi	45
3.1.3.	Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri	45
3.1.4.	Islak Analiz (Hidrometre Yöntemi)	48
3.2.	Kompaksiyon Deneyleri	54
3.3.	Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyleri	57
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
5.	KAYNAKLAR	69
6.	EKLER	73

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BAZI TRABZON ZEMİNLERİNİN KOMPAKSİYON DENEYLERİNDEKİ
KOMPAKSİYON ÖZELLİKLERİ İLE GEÇİRİMLİLİK KATSAYILARI ARASINDAKİ
İLİŞKİLER

Hakan Alper KAMILOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

2011, 72 Sayfa, 46 Sayfa Ek

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında, Trabzon İlinin çeşitli yerlerinden alınan beş farklı zemin örneği üzerinde, yıkamalı analiz, tane yoğunluk, ıslak analiz, likit ve plastik limit deneyleri, standart kompaksiyon deneyleri ve standart kompaksiyon enerjisinde artan su içeriği değerleriyle sıkıştırılmış zemin örnekleri üzerinde, düşen düzeyli geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. Yapılan zemin sınıflandırma deneyleri sonucunda zemin örnekleri, (USCS)'ye göre sınıflandırılmıştır. Yapılan standart kompaksiyon deneylerinde, zemin örneklerinin kuru yoğunluklarının, artan su içeriği ile birlikte önce artış gösterdiği, belirli bir su içeriği değerinde maksimum değer aldıkları ve daha sonra artan su içerikleriyle kuru yoğunluk değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Düşen düzeyli geçirimlilik deneyleri sonucunda su içeriklerindeki artışa bağlı olarak, optimum su içeriğinden önce geçirimlilik katsayılarında artış gözlenmiş olup, optimum su içeriğinde geçirimlilik katsayılarının minimum değer aldıkları ve optimum su içeriğinden sonra su içeriklerinin artmasıyla geçirimlilik değerlerinde de artış olduğu gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ($w-p_k$) ve grafiklerinin ($w-k$) üst üste getirilmesi ile $w-p_k$ grafiklerinin maksimum kuru yoğunluk değerleri ile $w-k$ grafiklerinin minimum geçirimlilik değerlerinin aynı su içeriği değerlerinde olduğu görülmüştür. Kompaksiyon ve düşen seviyeli geçirimlilik deneylerinden elde edilen (e) ve (k) değerlerinden oluşturulan $e - \log(k)$ grafiklerinin doğrusal oldukları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompaksiyon, Standart Kompaksiyon Deneyi, Boşluk Oranı, Su İçeriği, Maksimum Kuru Yoğunluk, Optimum Su İçeriği

Master Thesis

SUMMARY

THE RELATIONSHIP BETWEEN COEFFICIENT OF PERMEABILITY IN
FALLING HEAD TEST AND COMPACTION PROPERTIES OF SOME TRABZON
SOİLS

Hakan Alper KAMILOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Bayram Ali UZUNER
2011, 72 Pages, 46 Pages Appendix

In this master of science thesis study, sieve analysis, specific gravity, wet analysis, liquid and plastic limit tests, soil classification tests, standard compaction tests and falling head permeability tests are performed over five different soil samples taken from various places in Trabzon are examined. At the end of the soil classification tests, the soil samples are classified according to the Unified Soil Classification System (USCS). After standard compaction tests, it was found that dry density of soil increased with increasing water content. Until peak point where dry density is maximum and water content is optimum, dry density has maximum value and peak point, the dry density decreases with increasing water content. Moreover, in parallel with amount of increase of fine grained soils, it was found that optimum water content value decreases, and, maximum dry densities increase. As a result of falling head permeability tests, it was found that coefficient of permeabilities decrease with increasing water contents before in the 1st region. In the 2nd region, coefficient of permeabilities became minimum, with the increasing water contents, increase in the coefficient of permeabilities were observed in 3rd region. Water content – dry density ($w-\rho_k$) and water content – coefficient of permeability graphs are unified. It was seen that the water content of maximum dry density and minimum permeability is nearly the same. It is determined that the graph of void ratio – coefficient permeability ($e - \log k$) which is obtained from compaction tests and falling head tests is linear.

Keywords: Compaction, Standard Proctor Test, Void Ratio, Permeability, Optimum Water Content, Maximum Dry Density

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Su içeriği -kuru yoğunluk ilişkisi	2
Şekil 1.2. Sıkıştırılmış zeminde $w - \rho_k$ ilişkisi	4
Şekil 1.3. Çeşitli Likit Limit değerlerinde su içeriği - kuru yoğunluk eğrileri.....	5
Şekil 1.4. Standart Proctor kalıbı ve tokmağı	6
Şekil 1.5. Sıkıştırılmış zemine ait blok diyagram.....	7
Şekil 1.6. Doygunluk çizgileri	8
Şekil 1.7. Hava içeriği çizgileri	9
Şekil 1.8. Çeşitli zeminler için tipik $w-\rho_k$ ilişkileri.....	14
Şekil 1.9. Kompaksiyon enerjisinin kuru yoğunluğa ve su içeriğine etkisi	15
Şekil 1.10. Suyun zemin içerisindeki akışını gösteren şematik diyagram	16
Şekil 1.11. k , geçirimsizlik katsayısı belirleme yöntemleri	23
Şekil 1.12. Sabit düzeyli geçirimsizlik deneyinin şeması	24
Şekil 1.13. Düşen düzeyli geçirimsizlik şeması	26
Şekil 1.14. Serbest akiferde k' nın belirlenmesi	27
Şekil 1.15. Basınçlı akiferde k' nın belirlenmesi	28
Şekil 1.16. Açık uç deneyleri	29
Şekil 1.17. Packer deneylerinin sonuçları	30
Şekil 1.18. Hareketli yeraltı suyu	31
Şekil 2.1. Genel olarak deneylerde kullanılan bir hidrometrenin boyutları (ölçüler mm cinsindedir).....	38
Şekil 3.1. A1 zemin numunesine ait likit limit grafiği	47
Şekil 3.2. A2 zemin numunesine ait likit limit grafiği	48
Şekil 3.3. A3 zemin numunesine ait likit limit grafiği	48
Şekil 3.4. A4 zemin numunesine ait likit limit grafiği	49
Şekil 3.5. A5 zemin numunesine ait likit limit grafiği	49
Şekil 3.6. A1 Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	53
Şekil 3.7. A2 Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	54
Şekil 3.8. A3 Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	54
Şekil 3.9. A4 Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	55

Şekil 3.10.	A5 Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	55
Şekil 3.11.	A1 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi	57
Şekil 3.12.	A2 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi	57
Şekil 3.13.	A3 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi	58
Şekil 3.14.	A4 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi	58
Şekil 3.15.	A5 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi	59
Şekil 3.16.	A1 numunesine ait $w - k$ eğrisi.....	60
Şekil 3.17.	A2 numunesine ait $w - k$ eğrisi	61
Şekil 3.18.	A3 numunesine ait $w - k$ eğrisi	61
Şekil 3.19.	A4 numunesine ait $w - k$ eğrisi.....	62
Şekil 3.20.	A5 numunesine ait $w - k$ eğrisi	62
Şekil 3.21.	A1 zemini için $w - k$, $w - \rho_k$ grafiği	63
Şekil 3.22.	A2 zemini için $w - k$, $w - \rho_k$ grafiği	64
Şekil 3.23.	A3 zemini için $w - k$, $w - \rho_k$ grafiği	64
Şekil 3.24.	A4 zemini için $w - k$, $w - \rho_k$ grafiği	65
Şekil 3.25.	A5 zemini için $w - k$, $w - \rho_k$ grafiği	65
Şekil 3.26.	A1 zemini için $k - e$ grafiği	66
Şekil 3.27.	A2 zemini için $k - e$ grafiği	67
Şekil 3.28.	A3 zemini için $k - e$ grafiği	67
Şekil 3.29.	A4 zemini için $k - e$ grafiği	68
Şekil 3.30.	A5 zemini için $k - e$ grafiği	68

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Standart Proctor ve Modifiye Proctor Deneyi arasındaki farklar.....	11
Tablo 1.2. Zeminler için ortalama k değerleri	21
Tablo 2.1. Yapılan deneylerde kullanılan zemin türlerinin adı ve alındığı yerler	34
Tablo 3.1. A1 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları.....	44
Tablo 3.2. A2 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları.....	45
Tablo 3.3. A3 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları.....	45
Tablo 3.4. A4 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları.....	45
Tablo 3.5. A5 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları.....	46
Tablo 3.6. Deney sonucu numunelerin özgül yoğunlukları.....	46
Tablo 3.7. Likit ve plastik limit deneylerinin sonuçları	50
Tablo 3.8. A1 Zemininin ıslak analiz (hidrometre) sonucu elde edilen D-%P verileri	52
Tablo 3.9. A2 Zemininin ıslak analiz(hidrometre) sonucu elde edilen D-%P verileri	51
Tablo 3.10. A3 Zemininin ıslak analiz (hidrometre) sonucu elde edilen D-%P verileri	51
Tablo 3.11. A4 Zemininin ıslak analiz(hidrometre) sonucu elde edilen D-%P verileri	52
Tablo 3.12. A5 Zemininin ıslak analiz(hidrometre) sonucu elde edilen D-%P verileri..	52
Tablo 3.13. Zeminlerin USCS'ye göre sınıflandırılması.....	55
Tablo 3.14. Zeminlerin optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluklar	59

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür

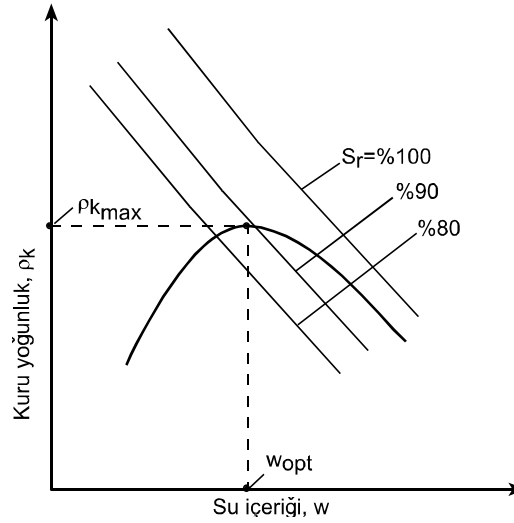
Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kompaksiyon şartlarının ve farklı boşluk çapı büyüklüğü dağılımlarının zeminlerde farklı hidrolik geçirimsizlik özellikleri oluşturmaktadır(Watobe, 2000). Kohezyonlu zeminlerin hidrolik iletkenliğine kompaksiyon şartlarının etkisi Bjerrum ve Huder (1957), Mitchell (1965) ve Daniel Benson (1990) tarafından araştırılmıştır. Kompaksiyon şartlarının ve boşluk çapı dağılımının zemin yapısına olan etkisi Propahoron (1991), Cobotve Le Bilhan (1993), Delage (1996) ve Vanopoli (1999) tarafından incelenmiştir. Bengochea (1979) % 90 silt ve % 10 kaolin içeren nonplastik kil – kaolin karışımlarında yaptığı araştırmalar sonunda kompaksiyon şartlarının boşluk çapı dağılımlarına etki ettiğini belirtmiştir.

Sheelheim (1880) permeabilitenin tane çapının karesi ile orantılı olduğunu açıklamasından sonra hidrolik iletkenliğin belirlenmesinde bir çok eşitlik geliştirilmiştir. Yayınlanan bir çok çalışmada (Sheidegger, 1953, 1954, 1974; Bear, 1974; Vukovic ve Saro, 1992; Mbanimpa, 2002) hidrolik çapı, istatistiki modelleri ve ampirik ilişkileri geçirimsizlik katsayısının tahmininde kullanılabilineceğini açıklamışlardır. Temiz kum ve çakılların geçirimsizlik katsayısı hakkında Hazen (1911) üç parametrelili bir eşitlik ortaya koymuştur. Terzaghi ve Pack (1948), Lambe ve Whithman (1969), Freeze ve Cherry (1979) bu eşitliğe yayınlarında değinmişlerdir. Kozenty (1927) permeabilite katsayısının doygun zeminler için porozitenin yada boşluk oranının bir fonksiyonu olduğunu öne sürmüştür. Taylor (1948) $k - [e^3/(1+e)]$ ve $\log k - e$ ilişkisinin doğrusal olduğunu deneysel yolla kanıtlamıştır. Ayrıca geçirimsizlik katsayısının (k), boşluk oranının (e) bir fonksiyonu olduğunu idda ederek Kozenty – Carman eşitliğini ortaya koymuştur. Çeşitli zeminlerin deneysel olarak incelenmesi ile Lambe ve Whitman (1969) $\log k - e$ ilişkisinin bir çok zemin türü için doğrusal olduğunu belirtmiş, bazı durumlarda $k - [e^3/(1+e)]$ ilişkisinin lineer yapıda olabileceğini belirtmişlerdir. 1974’de NAVFAC temiz kumlar ve çakıllar için geçirimsizlik katsayısı (k) değerlerini tahmin etmek için çizelgeler önermiştir. Bu çizelgelere göre verilen boşluk oranı (e) değerlerinde $\log(k)$ ve $\log(d_{10})$ arasında lineer bir ilişki olduğunu belirtmiştir. Vukovic ve Sana (1992) on adet geçirimsizlik katsayısı

tahmininde kullanılan eşitliği incelediği çalışmaları sonucunda en gerçekçi sonuç veren eşitliğin Kozenty – Carman eşitliği olduğunu belirtmiştir.

1.2. Kompaksiyon

Kompaksiyon, zeminlerin çeşitli yöntemler vasıtasıyla tabaklar halinde serilerek, zeminin boşluk oranının azaltılması ve zemin tanelerinin birbirine yaklaştırılması sonucu zeminin daha sıkı hal almasını sağlayan mekanik işlemlere verilen addır (Önalp,1997). Kompaksiyon, zemin tanelerinin daha sıkı yerleşmesini sağlayarak zeminin boşluk oranını azaltır. Zemin taneleri ve taneler arasındaki su pratik olarak sıkışmazdır. Sıkışma zemin tanelerinin havayı sıkıştırması veya havanın dışarı çıkması sonucu boşluklarının azalması ile oluşur (Uzuner,2007). Kompaksiyonun amacı maksimum kuru yoğunluğu veren su içeriği değerinin elde edilmesidir (Aytekin,2004).



Şekil 1.1. Su içeriği – kuru yoğunluk ilişkisi

1.2.1. Kompaksiyonun Yararları

Kompaksiyon ile genel olarak şu yararlar sağlanır:

- 1) Zeminin taşıma gücü artırılır.
- 2) Zeminin geçirimsizliği azaltılır, zemine daha kararlı bir yapı kazandırılır. Böylece zeminin su alarak hacimsel değişikliğe uğraması azaltılır.

- 3) Zeminin sabit, hareketli, dinamik yükler altında yapacağı oturmalar, çökmeler azaltılır (Uzuner, 2007).
- 4) Boşluk oranı azaltılarak, zeminde tutulabilen suyun miktarı azaltılır, istenilen dayanım özellikleri sağlanır.
- 5) Zeminin erozyona karşı zemin direnci artar (Coduto, 2006).
- 6) Sıvılaşmaya karşı direnç kazanır.
- 7) Dondan aşırı etkilenmez (Önalp, 2007).

1.2.2. Kompaksiyon (Proctor)Deneyi

Bir zemin için uygulanacak belli bir kompaksiyon enerjisi ile elde edilecek sıklık derecesinin su muhtevasına bağlı olarak değişimi, dolguda kullanılacak zemin için deneysel olarak saptanmalıdır. Proctor deneyi olarak da bilinen deney yöntemi 1933'te R.R.Proctor tarafından geliştirilmiştir (Bowles, 1986).

Sıkıştırılmış (kompaksiyona tabi tutulmuş) bir yaş zeminde kompaksiyonun (sıkışma durumunun) ölçüsü, o zemine ait kuru yoğunluktur. Bir yaş zemine ait kuru yoğunluk ne kadar büyükse, o yaş zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir. Sıkıştırılmış bir zemin için yaş ve kuru yoğunluklar yazılıp birbirlerine bölünürse kompaksiyonun temel bağıntısı elde edilir.

$$\rho_n = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e} \quad (1)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (2)$$

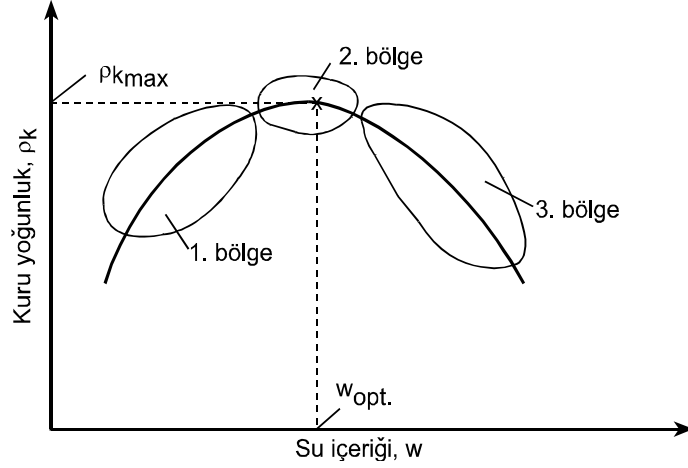
$$\frac{\rho_n}{\rho_k} = 1+w \quad (3)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_n}{1+w} \quad (4)$$

Proctor (1933), sıkıştırılmış yaş zeminde su içeriği ile o zemine ait kuru yoğunluk arasında Şekil 1.2.'de gösterilen ilişkiyi ortaya çıkarmıştır (Uzuner, 2007).

Bir zemin belli bir sıkıştırma enerjisi ile farklı su içeriklerinde sıkıştırılması durumunda artan su içeriği ile birlikte kuru yoğunluk önce artmakta, maksimum değere

ulaştıktan sonra da azalmaktadır. Kompaksiyon eğrisinin artan kısmı 1. Bölge, maksimum değerdeki kısmı, 2. Bölge, azalan kısmı da 3. Bölge olarak belirlenirse, kuru yoğunluk–su içeriği ilişkisi şu şekilde özetlenebilir.

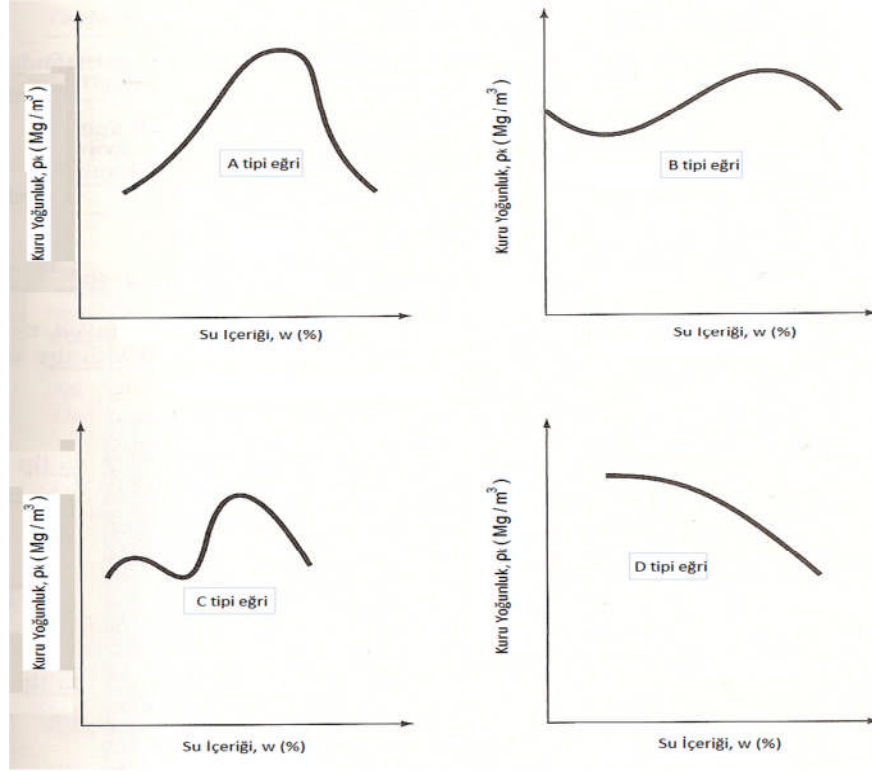


Şekil.1.2. Sıkıştırılmış zeminde $w - \rho_k$ ilişkisi

1. Bölge: Zeminde yeterli su bulunmamasından ötürü tanelerin daha az boşluklu yerleşmek için hareket etmeleri taneler arası sürtünme kuvveti etkisinden dolayı zordur (Uzuner, 2007).

2. Bölge: Zemine daha fazla su ilave edilmesi durumunda zemin tanelerinin çevresinde bulunan su filminin kalınlığı artar ve zemin taneleri birbirlerine göre kolaylıkla rölatif hareketler (birbirleri üzerinden kayma hareketi) yapabilirler (Aytekin, 2004). Bundan dolayı bu bölgede sıkışma en yüksek seviyede olmakta, kuru yoğunluk maksimum değere ulaşmaktadır. Kuru yoğunluğun (sıkıştırmanın) en yüksek olduğu (maksimum kuru yoğunluk), ρ_{max} durumdaki su içeriğine optimum su içeriği (w_{opt}) denilir (Uzuner, 2007).

3. Bölge: Zemine daha fazla su ilave edilmesine devamı sonucu zemin içerisindeki boşluklar su ile dolmaya başlar ve suyun sıkışmaması nedeniyle bir noktadan sonra yapılan su ilaveleri zeminin yoğunluğunu arttırmayacağı gibi yoğunluğun azalmasına sebep olacaktır (Aytekin, 2004).



Şekil 1.3. Çeşitli likit limit değerlerinde kuru yoğunluk-su içeriği eğrileri

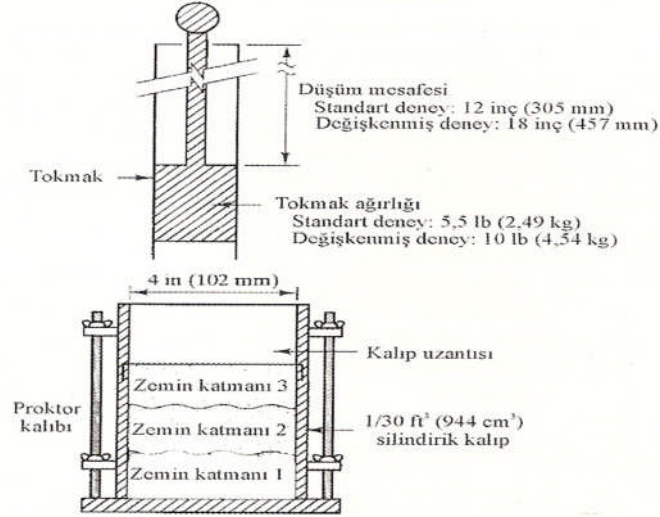
Lee ve Suedkamp (1972) 35 farklı zemin örnekleri kullanmak sureti ile kompaksiyon eğrileri üzerinde çalışmış sonuç olarak dört farklı tip kompaksiyon eğrisi belirlemiştir. Şekil 1.3.'de gösterilen A tipi eğrilerin tek bir pik noktası vardır. Bu tip eğriyi oluşturan zeminlerin likit limit değerleri 30- 70 arasındadır. B tipi eğrilerde bir tam bir de yarım pik nokta bulunur. C tipi eğride ise çift pik nokta vardır. B ve C tipi zeminlerin likit limit değerleri 30'dan azdır. D tipi kompaksiyon eğrisinde kesin bir pik nokta bulunmamaktadır. Bu tip eğriler 'şekilsiz' olarak isimlendirilmişleridir. C ve D tipi eğrilerin elde edilmesi çok yaygın olmamakla birlikte likit limit değerleri 70'in üzerinde olan zeminler bu tip eğrileri meydana getirir.

1.2.2.1. Standart Kompaksiyon Deneyi

Standart Kompaksiyon Deneyinde iç çapı 102 mm, yüksekliği 117 mm olan metal bir silindir kullanılır. Bu kabın üzerine, geçici olarak bir yaka (ek) eklenir. Deneyinin, kurutulmuş, tanelenmiş birkaç kg'lık zemin kullanılır. Zemine belirli miktarda su eklenerek iyice karıştırılır (Uzuner,2007).

Deney işlemleri aşağıdaki gibidir;

- 1) Sıkıştırılmak istenen dolguda kullanılacak büyük bir zemin numunesi alınır ve standartta tanımlandığı şekilde hazırlanır.
- 2) Hazırlanmış zeminin bir kısmını standart $9.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 'lük silindirik çelik kalıba, kalıbın yaklaşık %40'ı doluncaya kadar yerleştirilir (Şekil1.4).



Şekil.1.4. Standart Kompaksiyon Deneyi kalıbı ve tokmağı

- 3) Zemin, 305 mm yükseklikten düşen, özel 2.5 kg'lık tokmak ile 25 vuruş uygulayarak sıkıştırılır.
- 4) Hazırlanmış ikinci tabaka zemin, kalıp içine kabın yaklaşık %75'i doluncaya kadar yerleştirilir ve standart tokmak ile 25 vuruş kullanarak sıkıştırılır.
- 5) Hazırlanmış üçüncü tabaka zemin kalıp içerisine yerleştirilir ve aynı şekilde sıkıştırılır. Böylece 75 tokmak darbesi uygulanmış olur.
- 6) Numunenin hacmi tam olarak $9.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ olacak şekilde traşlandıktan sonra tartılır. Böylece, yoğunluk (ρ) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\rho = \frac{m_{ms} - m_m}{V_m} \quad (5)$$

m_{ms} :kalıp+zemin ağırlığı

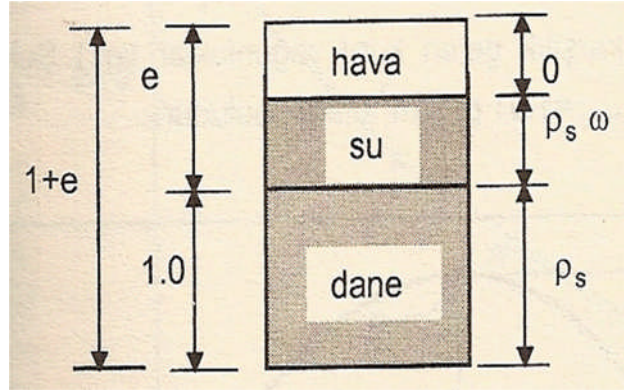
m_m : Kalıbın ağırlığı V_m :Kalıbın Hacmi

- 7) Sıkıştırılmış numunenin temsili bir parçası üzerinde bir su içeriği deneyi yapılır. Daha sonra (4) ve (5) eşitliği kullanılarak kuru birim ağırlığı hesaplanır.
- 8) Yukarıdaki adımların her biri farklı su içeriğindeki zemin ile üç veya dört kez tekrarlanır (Coduto,2006).

Yukarıdaki adımlardan elde edilen deney sonuçları, ρ_k -w eksen takımına işaretlenerek, kompaksiyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin tepe noktasından, w_{opt} ve ρ_{max} elde edilir (Uzuner, 2007).

1.2.2.2. Doygunluk Çizgileri

Yapılan kompaksiyon deneyi sonucu ρ_k -w eksen takımında sabit bir doymuluk derecesi elde etmek için teorik olarak çizilen eğri çizgiye, doymuluk çizgisi denilir(Uzuner, 2007).



Şekil.1.5. Sıkıştırılmış zemine ait blok diyagram

Blok diyagramdan;

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\rho_s \frac{w}{\rho_w}}{e} \quad (6)$$

$$e = \frac{\rho_s w}{S} \quad (7)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (8)$$

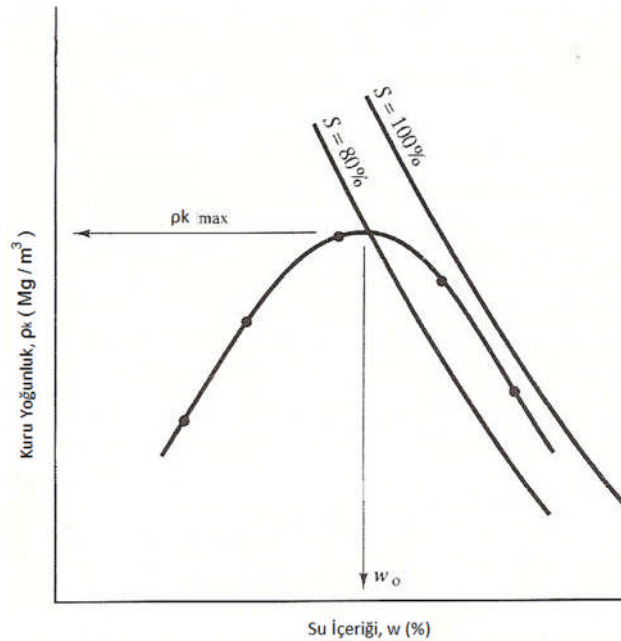
Yukarıda bulunan e ifadesi (7) ve (8) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$\rho_k = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_s}{1+\frac{\rho_s w}{S}} \quad (9)$$

bağıntısı elde edilir (Aytekin, 2004).

Zeminin yoğunluğu (ρ_s) bilirse, Bağıntı (9) kullanılarak S =sabit (1, 0.9, 0,8 v.b.) veya(%100, %90, %80) değerleri için doyumluk çizgisi ρ_k - w eksen takımına çizilerek çeşitli doyumluk çizgileri elde edilir.

Deneysel olarak pratik olarak tam doyum durum elde edilemez. Zeminde daima bir miktar hava kalır. Doyumluk çizgileri ile deneysel eğrinin herhangi bir noktasında, özellikle tepe noktasında zeminin doyumluk durumu öğrenilmiş olur. Tepe noktasında doyumluk durumu ne kadar yüksekse, sıkıştırmanın o kadar iyi olduğu düşünülür (Uzuner, 2007). Genellikle, kompaksiyon eğrisinin en yüksek noktası yaklaşık %80 doyumluk derecesinde meydana gelir (Coduto, 2006).

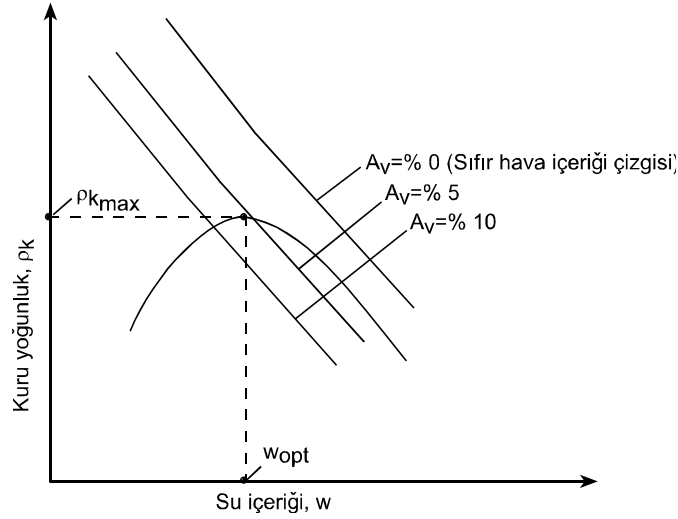


Şekil 1.6. Doyumluk çizgileri

Kompaksiyon eğrisini çizmeden önce %80 ve %100 doygunluk değerleri için doygunluk çizgilerini belirlemek daha mantıklıdır. Şekil 1.6. 'de gösterildiği gibi eğrilerin biri $S = 100$ (Bazen sıfır boşluklar çizgisi olarak da adlandırılır) ve diğeri $S = 80$ doygunluk oranlarını temsil eder. Çizilen bu iki eğriden, kompaksiyon eğrisinin çizilmesinde yararlanır. $S = 100$ eğrisi, daha yüksek doygunluk oranının elde edilmesinin olanaksız olmasından ötürü kompaksiyon eğrisinin üst sınırını teşkil eder. Zemindeki havanın tamamen çıkarılamamasından ötürü kompaksiyon eğrisinin sağ kolu $S = 100$ doygunluk çizgisinin hafifçe sol tarafında bulunması ve $S = 100$ doygunluk çizgisini kesmemesi gerekir. $S = 80$ eğrisinin, kompaksiyon eğrisinin pik noktasından yada eğrinin tepe kısmına yakın bölgeden geçmesi beklenir (Coduto, 2004).

1.2.2.3. Hava İçeriği Çizgileri

Doygunluk çizgilerine benzer olarak Şekil 1.7.'de görüldüğü gibi, kompaksiyon eğrisinin $w - \rho_k$ eksen takımına hava içeriği çizgileri çizilebilir.



Şekil 1.7. Hava içeriği çizgileri

Zemin içerisindeki hava içeriği aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$A_v = \frac{e - \frac{\rho_s w}{1 + e}}{1 + e} = \frac{e - G_s w}{1 + e} \quad (10)$$

$$e = \frac{\rho_s(1 - Av)}{1 - e} \quad (11)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_s(1 - Av)}{1 + G_s w} \quad (12)$$

Bağıntı (10) 'dan 'e' çekilirse, Bağıntı (11) elde edilir. Bağıntı (11), $\rho_k = \frac{\rho_s}{1 + e}$ eşitliğinde yerine koyulursa, Bağıntı (12) elde edilir.

Bağıntı (12)'de A_v yerine 0 (% 0), 0.05(% 5), 0.1(%10) vb. sabit değerler konularak ve ρ_k -w arasında eğriler çizilerek ilgili hava içeriği çizgileri elde edilir. Zemin içinde, her ne kadar sıkıştırma yapılırsa yapılısın bir miktar hava kalır. Bundan dolayı deneylerde sıfır hava içeriği elde edilemez (w - ρ_k eğrisi, $A_v = \%0$ çizgisinin solunda kalır).Yapılan bu uygulamalar sonucunda elde edilen grafikten kompaksiyon eğrisinin tepe noktasındaki hava içeriği durumu belirlenir ve bu değer mümkün olduğunca düşük olması istenir (Uzuner, 2007).

1.2.2.4. Değiştirilmiş (Ağır, Modifiye) Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon Deneyi, Standart Kompaksiyon ve Değiştirilmiş (Ağır, Modifiye) Kompaksiyon Deneyi olarak iki şekilde yapılmaktadır. Modifiye Kompaksiyon Deneyi, deney tokmağının ağırlığının ve düşüm yüksekliğinin artırılması, tabaka sayısının çoğaltılması esasına dayanır (Önalp, 2002).

Modifiye Kompaksiyon Deneyi, II. Dünya Savaşı sırasında geliştirilmiş olup, ağır nakliye uçaklarının iniş yaptığı hava alanlarında daha iyi sıkışma yapılması gerekliliğinden doğmuştur (Bowles, 1986). İnşaat araç gereçlerinde ve yapım tekniklerinde elde edilen gelişmeler, yüksek kompaksiyon enerjilerini ulaşılabılır kılmış ve bu olay da laboratuvar deneylerindeki sıkıştırma enerjisinin artırılmasını doğurmuştur (Yetimoğlu T., Güler E., Çiçek E.).

Ağır (Değiştirilmiş) Kompaksiyon Deneyi, Standart kompaksiyon Deneyine benzer olarak yapılır. Ağır Kompaksiyon Deneyinde zemin, 5 tabaka olarak sıkıştırılır. Ağır Kompaksiyon Deneyinde kullanılan tokmak kütlesi 4,5 kg olup, 0,45 m yükseklikten

serbest olarak düşer. Her iki deneyde de aynı kap kullanılır. Standart ve Modifiye Kompaksiyon Deneyi arasındaki temel farklar Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Standart Kompaksiyon ve Değiştirilmiş Kompaksiyon Deneyi arasındaki farklar (Coduto, 2006)

	Standart Kompaksiyon Deneyi	Değiştirilmiş Kompaksiyon Deneyi
Standartlar	ASTM D 698 , AASHTO T-99	ASTM D 1557 ve AASHTO T-180
Tokmak Kütlesi	2,5 kg	4,54 kg
Tokmak Düşü Yüksekliği	305 mm	457 mm
Zemin Katman Sayısı	3	5
Katman Başına Düşen Tokmak Düşüş Sayısı	25	25
Her Numuneye Uygulanan Enerji	600 kN-N/m ³	2700-N/m ³

1.2.3. Arazide Kompaksiyon

Zeminin, gerek temelden gelen yükleri taşıyıcı olarak, gerek yapının inşasında yapı malzemesi olarak (toprak dolgulu baraj) kullanılması durumunda belirli özellikleri karşılaması istenir. İstenilen düzeyde dayanım, sınırlı oturma, uygun geçirgenliğe sahip dolgu malzemesinin elde edilmesi için uygun malzeme seçiminin yanı sıra doğru yerleştirme yöntemi ile sıkıştırmanın yapılması gereklidir (McCarthy, 2010).

İstenilen düzeyde sıkıştırmanın yapılabilmesi için, belirlenen veya hazırlanan zemin, kullanılacak sıkıştırma aracına bağlı olarak belli kalınlıklarda (0,2 m-0,4 m v.b.) serilir. Zeminin su içeriği laboratuarda belirlenen optimum su içeriğine getirilir. Bunun için zemine bir miktar su katılır veya zemin karıştırılarak havada bir miktar kurutulur. Sonra zeminin cinsine uygun bir sıkıştırma aracıyla uygun sayıda geçişlerle sıkıştırma yapılır. Sıkıştırma araçları başlıca 3 tip olabilir.

- 1) Silindirler (düz, keçi ayaklı, lastik tekerlekli v.b.)
- 2) Vibratörler (silindir, plaka, kiriş v.b.)
- 3) Tokmaklar, silindirler (Uzuner, 2007).

1.2.3.1. Arazide Kullanılan Sıkıştırma Araçları

Düz silindirlerin, killi ve kumlu zeminlerde kullanımı uygundur. Bu tip silindirlerin zeminle temas yüzeyi % 100 'dür ve zemine $310-380 \text{ kN} / \text{m}^2$ basınçla etkir. Düz silindirlerin kullanıldığı durumlarda, sıkıştırılacak tabaka kalınlığı arttıkça, istenilen kuru yoğunluk değerini yakalamak zorlaşır.

Lastik tekerlekli silindirler, birçok konuda düz silindirlerden daha iyi performans gösterirler. Sayıları 4-6 arasında değişen, birbirlerine yakın, bir dizi halinde sıralanmış ağır tekerleklerle sahiplerdir. Temas sırasında zemine uyguladığı basınç $600-700 \text{ kN} / \text{m}^2$ 'dir. Temas yüzeyi % 70 - % 80 civarındadır. Bu tip araçlar kumlu ve killi zeminlerin kompaksiyonunda kullanılırlar. Sıkıştırma basınç ve yoğurma etkilerinin birleşmesi ile oluşur.

Keçi ayak silindirlerin yüzeylerinde fazla miktarda çıkıntıları vardır. Her bir çıkıntının yüzey alanı $25-85 \text{ cm}^2$ arasındadır. Keçi ayak silindir, killi zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılan en ideal araçtır. Çıkıntılarının zemine uyguladığı basınç $1380-6900 \text{ kN} / \text{m}^2$ arasındadır.

Vibrasyonlu silindirler, granüler zeminlerin kompaksiyonunda çok kullanışlıdır. Vibratörler, düz silindirlere, lastik tekerlekli silindirlere yada keçi ayaklı silindirlere zemine titreşim vermesi için eklenebilir. Titreşim ağırlıkların merkezi olmayan dönüşleri ile elde edilir.

Çeşitli kompaktörler ve elde kullanılan vibratörler, sınırlı alanda etkili sıkıştırma sağlayan granüler zeminlerde kullanımı etkili olan sıkıştırma aracıdır.

Arazide istenilen yoğunluğu elde edilmesine, zemin tipi ve su içeriğine ek olarak tabaka kalınlığı, kompaksiyon aletinin uyguladığı basıncın şiddeti ve basıncın uygulandığı alan gibi parametreler de etki etmektedir. Yüzeyde uygulanan basınç derinlikle birlikte azalır ve zeminde kompaksiyon derecesinin azalmasına sebebiyet verir. Kompaksiyon sırasında kuru yoğunluk, silindir geçiş sayısına bağlı olarak da etkilenir. Bir çok durumda yaklaşık 10-15 geçiş sonrası arazide maksimum kuru yoğunluk elde edilir.

Kötü derecelenmiş kum için titreşimli silindirlerle yapılan sıkıştırma sonucu elde edilen eğriler kompaksiyonun derinlik-kuru yoğunluk ilişkisini göstermektedir. Burada dikkate alınması gereken kısım herhangi bir derinlikte kuru yoğunluğun geçiş sayısı ile artmasıdır. Fakat 15 geçişten sonra kuru yoğunluktaki artış oranı kademeli şekilde azalır.

Ayrıca D_r maksimum değerine 0.5 m derinlikte ulaşmakta ve derinlik arttıkça, D_r 'de kademeli düşüş gözlenmektedir (D'Appolonia, 1969).

1.2.4. Rölatif Kompaksiyon

Rölatif Kompaksiyon, yüzdeli birimsiz bir sayıdır. İşin özelliğine göre uygulamada seçilerek(%90,%95, v.b.) kontrol edilir. Uygulamada bu değer yüksek olması istenilir.

Minimum ve maksimum boşluk oranına dayandırılan rölatif sıkılık (D_R), rölatif kompaksiyona (R_C) benzer. Bunun nedeni her iki teriminde zemin sıkılığını belirtmesi ve her iki terimin yüzde olarak ifade edilmesidir. Aralarındaki fark sayısal olarak eşit olmamalarıdır.

$$R_C = \frac{\rho_k(\text{arazi})}{\rho_{k\max}(\text{lab.})} \times 100 \quad (13)$$

1.2.5. Kompaksiyonun Bağlı Olduğu Etmenler

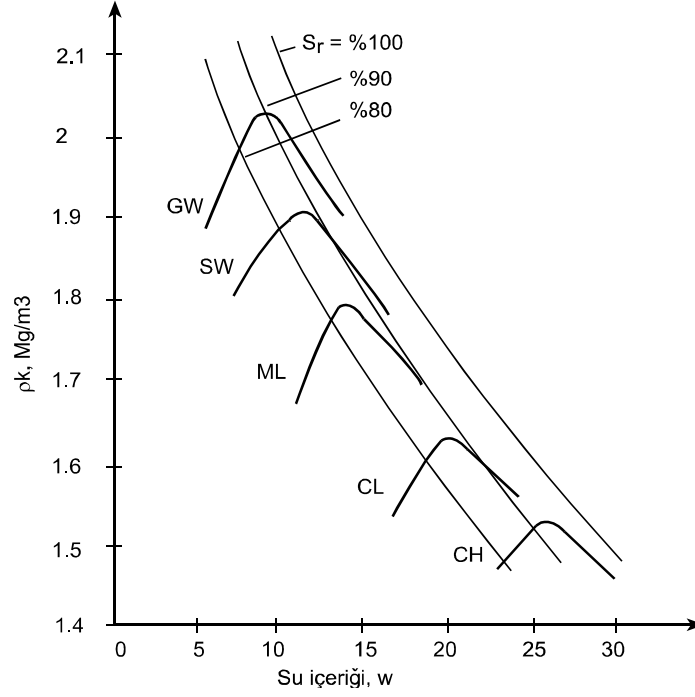
Zeminde kompaksiyon bir çok etmene bağlıdır. Bunlardan başlıcaları aşağıdaki gibi açıklanabilir.

1.2.5.1. Su İçeriği

Kompaksiyon üzerinde suyun etkisi 1.1.2. kısımda detaylı olarak incelenmiştir.

1.2.5.2. Zemin Cinsinin Etkisi

Zeminin tane dağılımı, zemin tanelerinin şekli, zemin tanelerinin yoğunluğu, zeminde bulunan kil minerallerinin tipi ve miktarının optimum su içeriğine ve maksimum kuru yoğunluğa büyük etkisi vardır. Çeşitli zeminler için ortalama kompaksiyon eğrileri Şekil 1.8.'de görülmektedir. Genel olarak taneli veya iri taneli zeminlerde düşük su içeriği, yüksek kuru yoğunluk değeri elde edilir. İyi derecelenmiş zemin kötü derecelenmiş zemine göre daha yüksek $\rho_{maks.}$ değerine sahip olur.



Şekil 1.8.Çeşitli zeminler için tipik w - ρ_k ilişkileri

1.2.5.3. Zemin Tanelerinin Şeklinin Kompaksiyona Etkisi

Granüler zeminlerde, zemin tanesinin boyutu zeminin boşluk oranına doğrudan etki eder. Yould (1973) yaptığı çalışmada zeminin boşluk oranının tane şekli, tane çapı ve dağılımı gibi özelliklerden etkilendiğini belirtmiştir. Buna benzer olarak bir çok araştırmacı, minimum ve maksimum boşluk oranlarının tane pürüzlülüğünün ve yuvarlaklığının azalmasına bağlı olarak azaldığı görüşünü dile getirmiştir (Miura , 1997 ; Cubrinowski ve Ishihoro, 2002).

Zemin tanesinin şeklinin ve pürüzlülüğünün zemin davranışına etkisi incelenmiş ve tane şeklinin zeminin kompaksiyon davranışını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır (Santamarina ve Coscande, 1998; Dods, 2003; Poulos, 1988). Işık (2010) yaptıkları araştırma sonucunda dere çakılı içeren karışımlarla standart kompaksiyon enerjisinde yapılan sıkıştırmanın, kırma taş ile yapılan sıkıştırma oranla daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

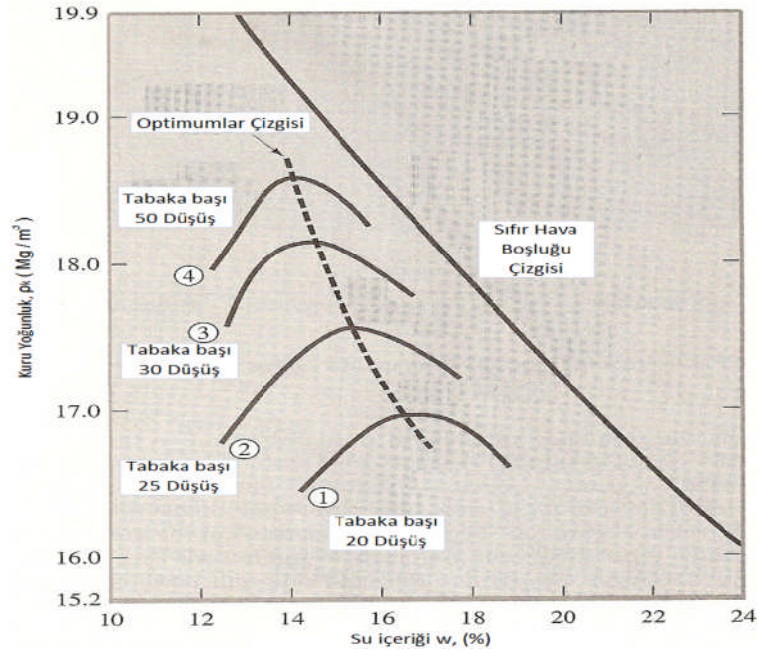
Yukarıdaki verilerden hareketle tane pürüzlülüğünün artmasıyla standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılan taneler arasındaki sürtünmenin daha fazla olmasından hareketle, zemin tanelerinde pürüzlülük arttıkça sıkıştırmanın zorlaşacağı sonucuna varılır.

1.2.5.4. Kompaksiyon Enerjisinin Kompaksiyona Etkisi

Şekil 1.9.' da görüldüğü gibi aynı zemin için daha büyük kompaksiyon enerjisi; daha yüksek maksimum kuru yoğunluk, daha düşük optimum su içeriği verir. Ağır Kompaksiyon Deneyinde daha büyük kompaksiyon enerjisi uygulanıp, daha yüksek kuru yoğunluk değeri elde edilir. Birim hacim başına gelen kompaksiyon enerjisi E, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = \frac{\text{Tabaka başı düşüş sayısı} \times \text{Tabaka sayısı} \times \text{Çekicinin ağırlığı} \times \text{Düşüş yüksekliği}}{\text{Kap hacmi}}$$

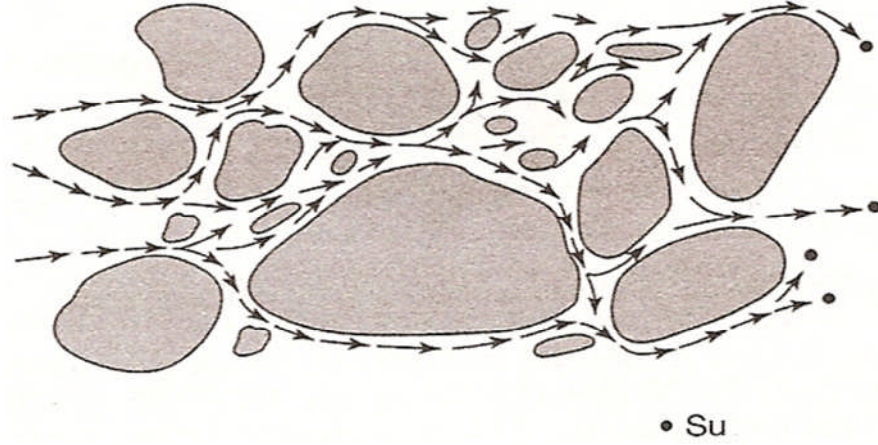
Standart Kompaksiyon Deneyinde birim hacime uygulanan kompaksiyon enerjisi aşağıdaki gibi değişir:



Şekil 1.9. Kompaksiyon enerjisinin kuru yoğunluğa ve su içeriğine etkisi

1.3. Geçirimsizlik

Taneciklerden oluşan bir madde olan zeminlerde, içinde bulunan partiküllerin düzensiz şekilleri nedeniyle, katı taneciklerin arasında bir çok boşluk veya gözenek bulunur. Çakıllar, kum ve siltler gibi yuvarlak ve kabaca eşit ölçülerde veya levha yada pul şeklinde olan kil kütlelerinde gözenekler birbirlerine bağlıdır. Akışkanlar (gazlar dahil) zemin içerisindeki gözeneklerden geçebilir veya akabilir. Bu nedenle zeminlerin yapıları gözeneklidir ve bu materyal geçirgen bir madde olarak bilinir. Dikkat edilmesi gereken husus akışın parçacıkların içinden değil, parçacıklar arasındaki boşluklardan olmasıdır (Mc Charty, 2007).



Şekil 1.10. Suyun zemin içerisindeki akışını gösteren şematik diyagram

Geoteknik mühendisliğinde permeabilite, zeminin içindeki boşluklar boyunca suyun zemin içinden geçebilmesi özelliği olarak tarif edilir (Sheidegger, 1974). Büyük boşluk oranına sahip zeminlerin geçirimsizliği küçük boşluk oranlı olanlara göre daha büyüktür. Zemin içerisindeki akışa olan direnci boşluk büyüklüğü, şekli ve geometrisi büyük ölçüde etkiler (Sridharan, 1971). Bu direnç sırasıyla boşluk özellikleri, zemin tanelerinin çapı, şekli, dizilimi gibi özellikleri ile alakalıdır. Genellikle kaba taneli zeminler, kil gibi ince taneli zeminlere göre daha yüksek geçirimsizlik değerlerine sahiptir (Cernica, 1995).

1.3.1. Zeminlerde Su Akımları

Zemin içerisindeki boşluklara yerleşen suya ‘zemin suyu’ adı verilmektedir. Yeraltında sürekli hacimlerde birikmiş zemin suyuna da ‘yeraltı suyu’ adı verilir. Yer altı suyu atmosfer basıncıyla statik dengeye gelmişse, suyun üst düzeyi yer altı su seviyesi (YASS, YASD) olarak adlandırılır. Su birikimi süresiz veya kısıtlı hacimlerde örneğin, geçirimsiz bir çanak içinde birikmişse buna ‘tünek su sehpası’ denilir. Yer altı suyu jeolojik ve topografik nedenlerle basınç altında bulunabilir. Yüzeğe çıkış yolu sağlandığında dışarı fışkırır. Bu duruma ‘artezyen durumu’ denilir (Önalp, 2007).

Kumlar ve çakıllar gibi bazı zeminler büyük miktarda yer altı suyunu iletebilirler. Akifer olarak bilinen bu zeminler, kuyu açmak için uygun malzemelerdir. Kil tarzı zeminler suyu çok yavaş iletirler. Bunlara ‘akiklöd’ denir. Siltli kum gibi ara zeminler suyu orta- yavaş arası bir hızda iletirler; bu tip zeminlere ‘akitard’ denilir. Tek bir zemin profilinde bu koşulların tümü bulunabilir. Serbest akifer, akış sınırı tabanında akitüd barındıran, üst akış sınırının serbest olduğu akifere verilen isimdir. Basınçlı akifer, üst ve alt sınırların ikisinde de akitüd bulunan akiferlere verilen isimdir. Bu tür akiferler içi su dolu haldeki boruya benzetilebilir. Basınçlı akiferlerin çoğu aynı zamanda artezyendir. Bu tip durumlarda su pompaj yapmadan akitüd içinden yükseleceğinden kuyular genelde bu tip akiferlerin içine açılır (Coduto, 2004).

1.3.1.1. Zeminlerde Su Akışını Etkileyen Faktörler

Boşluklar arasında bir noktadan diğerine ulaşırken bir akışkan partikülü tarafından alınan gerçek yol, zemin taneciklerinin düzensiz ve ölçülerinin farklı oluşu nedeniyle birçok zeminde dolambaçlı ve düzensizdir. Akış yönünün ve hızının önemli ölçüde değişkenlik göstermesi kuvvetle muhtemeldir.

Zemin içinde akan bir akışkanın akışını etkileyecek faktörler bilinmemektedir fakat bu faktörlerin tümünün etkisi henüz tam olarak belirlenmemiştir. Bu faktörlerden bazıları şunlardır:

- 1) Akışın olduğu iki farklı nokta arasındaki basınç farkı
- 2) Akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi
- 3) Gözenek açıklıklarının ölçüsü, sayısı ve şekli

- 4) İki materyal arasındaki çekim kuvvetini etkileyen, akışkan ve zemin partiküllerinin minerolojik, elektrokimyasal ve diğer özellikleri (Mc Charthy, 2010).

1.3.2. Zeminlerde Kılcalık Olayları

Kılcalık, su ile hava arasındaki ara yüzeyin belirli bir yarıçapın altına düşmesi ile yüzey geriliminin etkinlik kazanması şeklinde özetlenebilir. Değişik sıvıların havaya karşı yüzey gerilimleri de farklıdır. Bu gerilim ayrıca aynı sıvı için ısıya bağlı olarak da değişmektedir.

Yüzey gerilimi sebebiyle su, içinde bulunduğu cam kabın kenarlarında ıslatma açısı, θ adı verilen bir açı yapmaktadır. Kabın çapı çok geniş olduğundan suyun seviyesinde büyük bir yükselme olmayacaktır. Fakat kabın içerisine çok küçük çaplı bir cam tüp daldırıldığında su, tüp içerisinde h_c kadar yükselecektir. Cam tüpün çapı küçüldükçe h_c artacaktır. İnce borudaki yüzey gerilmesinde dolayı oluşacak olan çekme kuvvetinin düşey bileşeni;

$$F_v = 2 \pi r_s \cos \theta \quad (14)$$

Cam tüpte yükselen suyun kütlesi;

$$M_w = \pi r^2 h_c \rho_w \quad (15)$$

Düşey F_v kuvveti yükselen su kütlesine eşit olacağından Eşitlik (14) ve (15) birbirlerine eşitlenirse ;

$$h_c = \frac{2\tau_s}{r\rho_w} \cos\theta \quad (16)$$

elde edilir (Aytekin, 2004).

1.3.2.1. Zeminde Kılcal Bölgenin Özellikleri

Y.A.S.S.'nin zemin içinde belirli düzeye gelerek sabit kaldığını varsayalım. Bu düzeyden zemin yüzeyine kadar bölge önceleri kuru iken zamanla kılcallık nedeniyle suyun yükseldiği görülecektir. küresel daneler içerdiği kabul edilen bir kumda danelerin konumu bu tanelerin oluşturduğu boşluk geometrisi gösterilmektedir. Yeraltı suyu zaman içerisinde boşlukların oluşturduğu ve cam tüpte meniski temsil eden kamalara gelerek tutulmakta, daha sonra ise boşluğun tümü suyla dolarak doygun hale gelebilmektedir. Kılcal su tutuk niteliğinde olduğuna göre YASS'den yükseldiği her cm'de negatif bir gerilmeye (emme) tabi olmaktadır. YASS'den aşağıya inildikçe boşluk suyunun pozitif basınçla hidrostatik olarak arttığı; kılcal bölgede yükseldikçe YASS'de sıfır, yani atmosfer basıncından negatif değerlere $-\rho_w z$ hızıyla artarak ulaştığı görülecektir. Suyun alabileceği en yüksek çekme gerilmesi $-u_w$, 76 mm eşdeğeri cıva basıncına eşit olabilir. Emme (vakum) bu değeri geçtiğinde suda kavitasyon oluşmakta daha basit deyişle kaynama başladığından, sistemde süreklilik kaybolmaktadır. Bunun uygulamadaki anlamı kılcal yükselmenin pratikte yaklaşık 10 m maksimum değerini geçmeyeceğidir. Zemindeki su durumu şematik olarak gösterilmiştir. Su YASS'den yükselerek kılcal doygun bölgeyi oluşturur. Havalı bölge de kılcal su içermekle birlikte boşlukların önemli bir bölümü havayla kaplı olduğundan çoğunlukla YASS ile bir bağlantısı yoktur.

1.3.3. Laminer ve Türbülanslı Akış

Bir akışkanın kanal veya boşluk içindeki hareketi, akan su partiküllerinin izlediği yola bağlı olarak laminer veya türbülanslı akış olarak adlandırılır. Laminer (düzgün) akış, su partiküllerinin birbirine bitişik olan yolların birbirine paralel olduğunu, yön değiştirse bile yolların hiçbir zaman kesişmediğini gösterir. Bu akış tipi karışma olmayan düzgün bir akıştır. Türbülanslı akış ise, akan su partiküllerinin düzensiz, rastgele yollar izlediği, hareket doğrularının birbirleriyle kesiştiği ve sıklıkla genel akış yönüne aksi yönde veya bir açıda hareket ettiği düzensiz bir akış şeklidir. Yüksek bir derecede karışma vardır.

Hızın; bir akışın laminer veya türbülanslı oluşu üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Darcy akış kanunu laminer akışlar için geçerlidir. Zeminlerde akış hızı, boşluk açıklığının ölçüsünde ve hidrolik gradyan i' ye bağlıdır. Araştırmalara göre, iri yada daha ince kumlarda ve sıklıkla küçük çakıllı zeminlerde $i=5$ veya daha küçük olduğu zaman laminer

akış olmaktadır. Bu nedenle, pratik zemin mekaniği uygulamalarında, Darcy kanununun bu nedenle geniş bir uygulama alanı vardır.

1.3.4. Darcy Yasası

Zemin, boşluklu bir ortam olup, boşlukları birbirine bağlıdır. Bazı zeminler ise boşluklu olup, boşluklar birbirine bağlı değildir. Bundan dolayı su, zemin içerisinde boşlukların birbirleri ile bağlantısı olmadıkları durumda durgun halde kalabildikleri gibi, birbirleri arasında bağlantı varken de zemin içerisindeki boşluklardan geçerek akış durumuna geçebilirler. Darcy (1856), laminer akım koşullarında suya doygun bir zemin ortamında hızın hidrolik eğimle orantılı olduğunu göstermiştir. Genelde laminer akımlı olan yer altı sularında L uzunluklu, A en kesit alanına sahip bir zemin örneği, $h_1 - h_2$ su düzeyi farkına maruz bırakılırsa Darcy Yasası aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$v = ki \quad (14)$$

$$q = vA \quad (15)$$

$$v = q / A \quad (16)$$

$$q = Aki \quad (17)$$

bağıntı (14) ve (17)' deki v hızı, filtre hızı (debi hızı) olup, su akışının zeminin her noktasından akmayıp, taneler arası boşlukların oluşturduğu alandan akar. Bu kısımdaki akış hızına sızıntı hızı (gerçek hız), v_s denilir. Sızıntı hızı ile gerçek hız arasında aşağıdaki gibidir bağıntı vardır:

$$v_{\text{filtre}} = n v_{\text{sızıntı}} \quad (18)$$

n , zeminin porozitesi olup, porozitenin birden küçük bir değeri olduğundan filtre hızı sızıntı hızından küçük değerlidir. k , zeminin geçirimlilik (permeabilite, geçirgenlik)

katsayısı (Hidrolik iletkenlik veya geçirimsizlik) olup, zeminin su geçirme özelliğini yansıtır ve hız boyutundadır (m/s). Hidrolik eğim, i , aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$i_{BC} = \frac{\text{Su düzeyleri farkı}}{\text{Akış uzunluğu}} = \frac{h_1 - h_2}{L_{BC}} = \frac{\Delta h_{BC}}{L_{BC}} \quad (19)$$

Hidrolik eğim, i , boyutsuzdur. Q , debi olup, birim zamanda bir kesitten geçen suyun miktarını belirtir (m^3/s).

Tablo 1.2. Zeminler için ortalama k değerleri

Zemin cinsi	k , m/s	Geçirimsizlik durumu
Çakıl	$>10^{-1}$	Çok geçirimsiz
Kum	$10^{-1}-10^{-5}$	Geçirimsiz
Silt	$10^{-5}-10^{-7}$	Az geçirimsiz
Kil	$<10^{-7}$	Çok az geçirimsiz veya pratik olarak geçirimsiz

Tablodan anlaşılacağı üzere, iri taneli zeminlerde k büyük; ince taneli zeminlerde, k küçük değerler almaktadır. Kilin geçirimsizlik katsayısı çok küçük olduğundan, kil zemin geçirimsizliği çok azaltmada kullanılır. (Toprak barajlarda kil çekirdek oluşturma, çöp depolama alanlarının alt ve yanlarında kil tabaka oluşturma vb.) (Uzuner, 2007)

1.3.5. Geçirimsizlik Katsayısı ile İlgili Eşitlikler

Belirli bir sıvı ve zemine ait hidrolik iletkenlik (k), aşağıdakiler de dahil olmak üzere çok sayıda faktöre bağlıdır:

- 1) Zeminin ortalama tane çapına bağlı olup, kabaca tane çapının karesi ile orantılıdır. Allen Hazen (1930), aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$k = CD_{10}^2 \quad (20)$$

D_{10} (m): Zeminin efektif çapı. k (m/s), C , bir katsayı olup, yaklaşık 10000'dir.

- 2) Kumlu zeminlerin hidrolik iletkenliklerinin tahmininde iyi sonuçlar vere bir diğer eşitlik Kozenty-Carman eşitliğidir.

$$k = C_1 \frac{e^3}{1 + e} \quad (21)$$

k: Geçirimsizlik katsayısı, e: Boşluk oranı, C_1 : Sabit sayı (Das, 1997)

- 3) Kenney, Lau ve Ofoegbu (1984) tane çapları 0.074 ile 25.4 mm arasında değişen 1.04 ve 12 arasında uniformluk katsayısına sahip granüler zeminle, %80 ve daha fazla rölatif sıklık derecesinde, laminer akım koşullarında yaptıkları deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki eşitliğe ulaşmışlardır:

$$K = (0.05 \text{ to } 0.1) D_5^2 \quad (22)$$

- 4) Samarasinghe, Huang ve Drenevich (1982) normal konsolide killerde yaptıkları laboratuvar çalışmaları sonucu aşağıdaki eşitliği sunmuşlardır:

$$k = C_3 \left(\frac{e^n}{1 + e} \right) \quad (23)$$

k, zeminin boşluk oranına bağlı olup, boşluk oranının aşağıdaki ifadeleri ile orantılıdır.

$$e^2, \frac{e^3}{1 + e}, \frac{e^2}{1 + e}, \log e \quad (24)$$

- 5) k, boşluk sıvısının (suyun) birim ağırlığı ile doğru orantılı, sıvının viskozitesi ile ters orantılıdır. Muskat (1937), mutlak veya fiziksel permeabilite (k_p) diye, boşluk sıvısının özelliklerinden bağımsız olan (tüm sıvılar için aynı) ve sadece boşluklu ortamın fiziksel durumuna bağlı genel bir terim tanımlamıştır:

$$k_p = k \frac{\eta_{su}}{\gamma_{su}} \quad (25)$$

k_p 'nin birimi m^2 vb. dir. k : su için geçirimsizlik katsayısı (m/s vb.) (Darcy geçirimsizlik katsayısı). η_{su} : suyun viskozitesi viskozitesi (kNs/m^2 vb.), γ_{su} : suyun birim ağırlığı (kN/m^3 vb.). Suyun birim ağırlığının sıcaklıkla değişmesi ihmal edilebilirken, viskozitesinin sıcaklıkla değişmesi önemlidir.

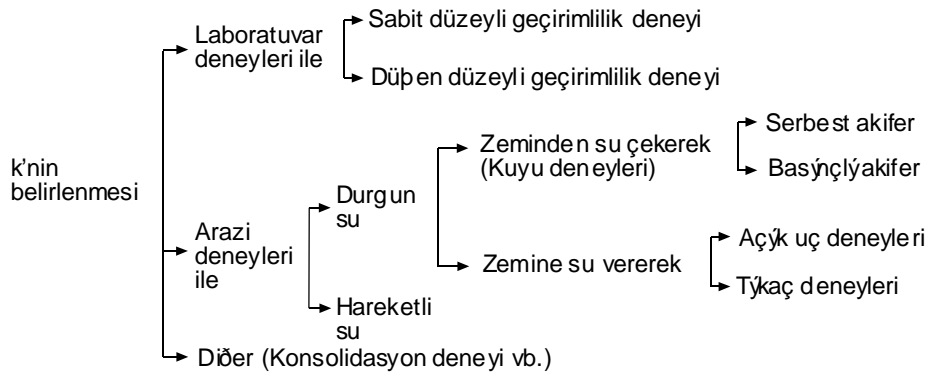
$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (26)$$

6) Zeminde tanelerin dizilişine bağlıdır. k , aynı boşluk oranında, zemin tanelerinin farklı dizilişine (zeminin oluşumu veya sıkıştırılması vb.) bağlı olarak farklı olabilir. Başkaca, aynı zemin, yatay ve düşey yönlerde farklı geçirimsizlik katsayılarına (anizotrop zemin) sahip olabilir. Örneğin; yatay doğal bir tabakada, genellikle yatay doğrultudaki geçirimsizlik katsayısı (Çöken tanelerde, yassı yüz yatay konumda oluyor.) düşey doğrultudakinden daha büyüktür (Uzuner, 2007).

Yukarıdaki maddelerden yoğunluk ve viskozitedeki herhangi bir değişim küçük olduğundan bu iki değer genellikle geçirimsizlik hesaplarında ihmal edilir. Bundan dolayı hidrolik iletkenlik sadece zemine bağlı bir özellik olarak düşünülür (Coduto, 2004).

1.3.6. Geçirimsizlik Katsayısının Belirlenmesi

Geçirimsizlik deneyleri arazi ve laboratuvar olmak üzere iki şekilde yapılabilir.



Şekil 1.11. k , geçirimsizlik katsayısı belirleme yöntemleri

$$k = \frac{q}{Ai} \quad (26)$$

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad i_{AB} = \frac{\Delta h_{AB}}{l_{AB}}, \quad i_{BC} = \frac{\Delta h_{BC}}{l_{BC}}, \quad i_{AC} = \frac{\Delta h_{AC}}{l_{AC}} \quad (27)$$

A, zeminin en kesit alanı (akışa dik) dır. Geçirimsizlik katsayısı; A-B, B-C veya A-C arasındaki ayrı ayrı hesaplanır. Deney, tercihen, değişik sabit düzeyler için tekrarlanarak, ortalama alınır (Uzuner, 2007).

1.2.6.1.2. Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi

Killer gibi geçirimsizliği düşük, akış oranının hassas bir şekilde ölçmenin gerekli olduğu çok düşük hidrolik iletkenlik durumlarında bu yöntemin uygulanması daha doğrudur. Ayrıca deney sırasında sabit seviyeli deneyde olduğu gibi deney düzeneğine su seviyesi takviyesi yapılmaz. Hidrolik eğim sabit olmadığından düşen seviyeli deney sonucunun analizi daha karmaşıktır. Akış oranının sabit olmamasından ötürü, k için yeni bir formül üretmek gerekir. Deneyin başlamasına takiben Δh_0 gibi bir yük ve t kadar zaman sonra da Δh_1 gibi bir yük kaybı göz önüne alındığında aşağıdaki değerler elde edilir (Coduto, 2004);

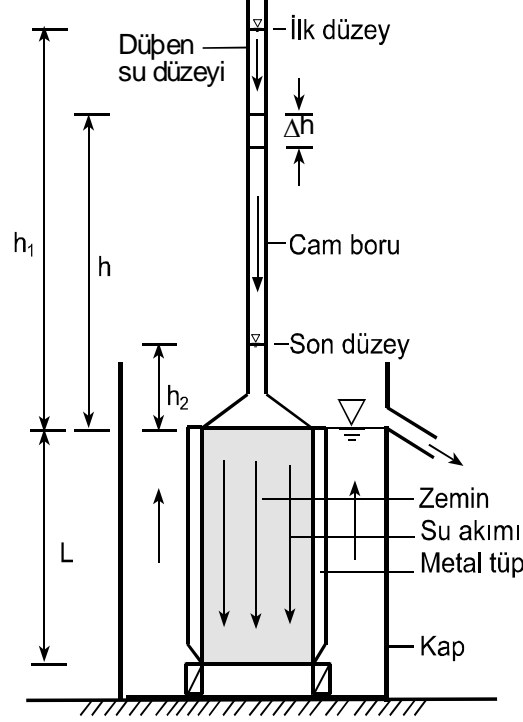
$$Q = kiA = k\left(\frac{\Delta h}{L}\right)A = -a \frac{d(\Delta h)}{dt} \quad (28)$$

$$\frac{kA}{L} \int_0^t dt = -a \int_{\Delta h_0}^{\Delta h_1} \frac{d(\Delta h)}{dh} \quad (29)$$

$$\frac{kAt}{L} = -a \ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}\right) \quad (30)$$

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}\right) \quad (31)$$

Deney, tercihen değişik çaplı borularla, değişik başlangıç yükseklikleri ve değişik deney süreleri kullanılarak tekrarlanır, k için ortalama değer hesaplanır (Uzuner, 2007).



Şekil 1.13. Düşen düzeyli geçirimlilik şeması

1.3.6.2. Geçirimlilik Katsayısının Arazi Deneyleri ile Belirlenmesi

Arazi permeabilite deneyleri; bozulmamış topraklarda, doğal yerlerinde yer yüzeyi, su tablası ve akış oranını etkileyen diğer faktörlere göre deney yapılabilmesi avantajını sunar. Diğer şeyler yanında yeraltı su tablasının üzerinde veya altındaki zeminlere bağlı olarak permeabiliteyi belirlemek için bir çok metot vardır. Burada açıklanacak olan metotlar, deney yapılacak zeminin içine sondaj yapılmasını gerektirir.

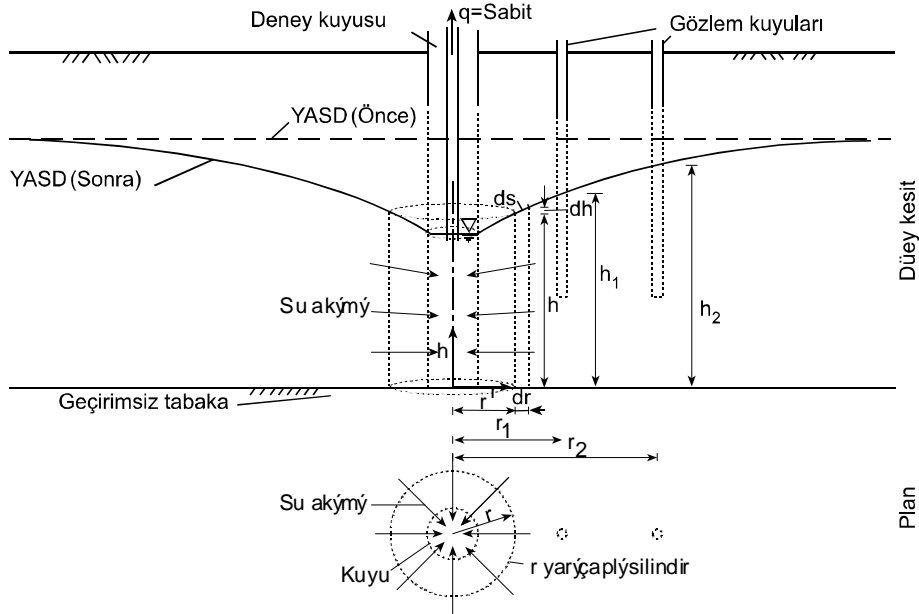
Esas olarak permeabilite deneyleri, belirli bir su hacminin bir sondaj deliğinin içerisine doğru veya dışına doğru akış süresinin kaydedilmesini içerir.

1.3.6.2.1. Zeminden Su ekerek Geçirimlilik Katsayısının Belirlenmesi

Serbest akiferde, geçirimlilik katsayısının belirlenmesinde pompa ile su çekmek için, zeminde bir kuyu açılır. Sabit bir debi ile sürekli su çekilir. Başlangıçta yatay olan yeraltı

su düzeyi, kuyu içinde alçalarak, Şekil 1.14.'deki sabit alçalmış durumu alır. Kararlı durumda, sabit q debisi çekimi sırasında, kuyudaki su düzeyi ve alçalmış su yüzeyi sabit kalır. Kararlı durum elde edildikten sonra, deney kuyusu merkezinden itibaren, aynı doğrultu üzerinde açılmış en az iki gözlem kuyusu ile alçalan su düzeyi, gözlenerek ölçülür.

Kuyu merkezinden itibaren, r yarıçaplı düşey bir kesit düşünelim (Şekil 1.14). r yarıçaplı, h yükseklikli silindir dış yüzünden birim zamanda geçen su, kuyudan çekilen q debisine, süreklilik ilkesi gereğince eşit olmalıdır. r yarıçaplı kesitte, hidrolik eğim, yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 1.14. Serbest akiferde k 'nın belirlenmesi.

$$i = \frac{dh}{ds} \approx \frac{dh}{dr} \quad (32)$$

Darcy Yasası yazılırsa,

$$q = Aki = 2\pi rhk \frac{dh}{dr} \quad (33)$$

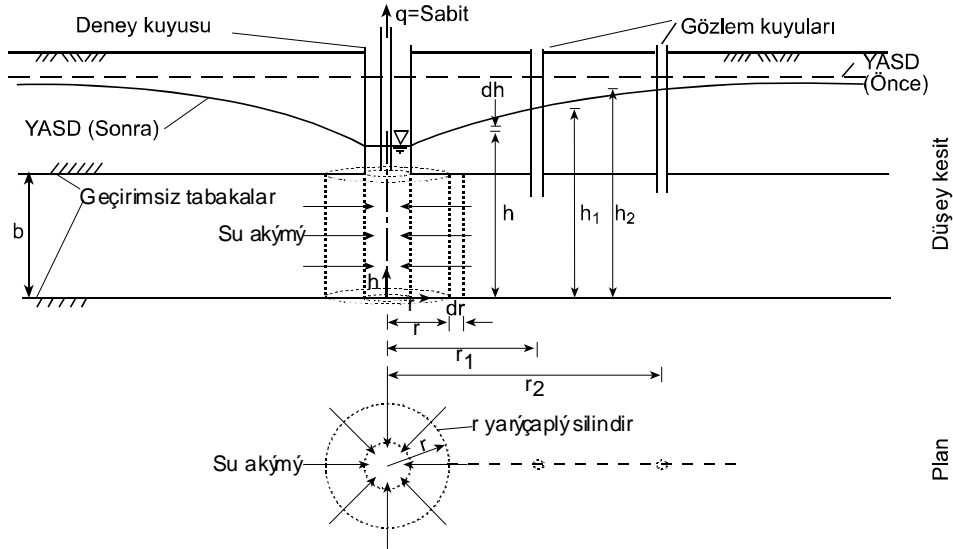
elde edilir. Bağıntı (33) değişkenlere göre düzenlenip, belli sınırlar içinde integre edilirse;

$$q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi k \int_{h_1}^{h_2} h dh \quad (34)$$

$$k = \frac{q \ln(r_2 / r_1)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (35)$$

elde edilir.

Basıncılı akiferde, benzer biçimde açılan kuyudan sabit bir q debisi çekilerek, kararlı durum elde edildikten sonra, gözlem kuyularındaki su düzeyleri gözlenerek, ölçülür (Şekil 1.15.). Kuyu merkezinden itibaren r yarıçaplı bir kesit düşünelim. Bu kesit için Darcy Yasası yazılır, integre edilirse;



Şekil 1.15. Basıncılı akiferde k 'nın belirlenmesi.

$$q = Aki = 2\pi r b \frac{dh}{dr} \quad (36)$$

$$q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi k b \int_{h_1}^{h_2} dh \quad (37)$$

$$k = \frac{q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi b(h_2 - h_1)} \quad (38)$$

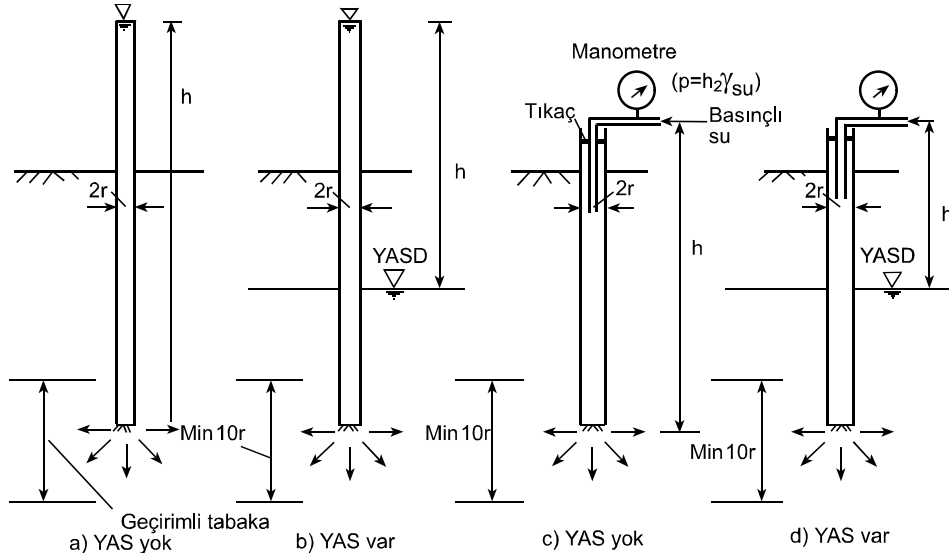
elde edilir.

1.3.6.2.2. Zemine Su Vererek Geçirimsizlik Katsayısının Belirlenmesi

Açılan bir sondaj kuyusunun dibinden veya sızdırmazlık elemanları kullanılarak, sondaj deliğinin kaplanmamış belli bir uzunluğunun yan yüzünden, sabit düzeyli veya düşen düzeyli düzenlerle zemine su gönderilir. Deney sonuçlarından, ampirik bağıntılarla (Cedergren, 1969) zeminin geçirimsizlik katsayısı hesaplanır.

Zemine su vererek yapılan geçirimsizlik deneyleri Açık uç deneyleri ve Packer (tıkaç) deneyleri olmak üzere ikiye ayrılır.

Açık uç deneylerinde, zemine indirilen bir borunun ucundan, sabit düzeyli bir düzenle zemine su gönderilir (Şekil 1.16). Zemine gönderilen sabit debi ölçülür.



Şekil 1.16. Açık uç deneyleri.

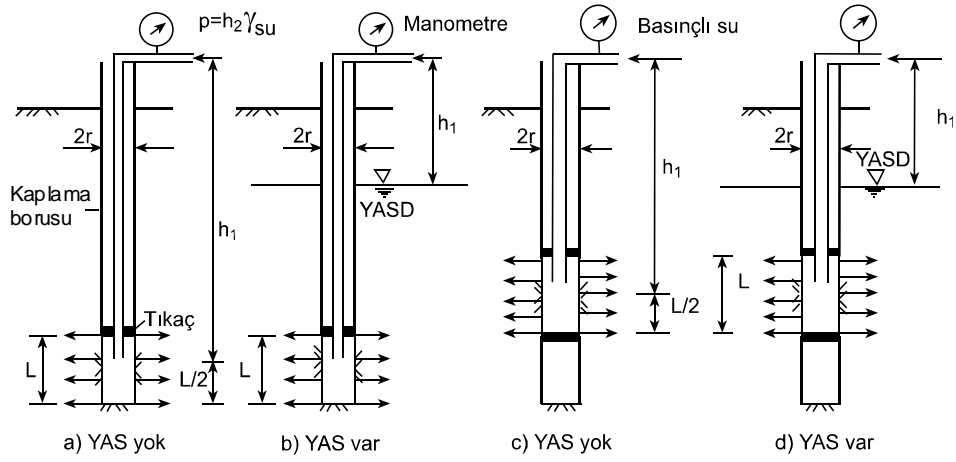
Zeminin geçirimsizlik katsayısı, aşağıdaki ampirik bağıntı ile hesaplanır.

$$k = \frac{q}{5.5rh} \quad (39)$$

h : su düzeyleri farkı, q : sabit debi, r : borunun iç yarıçapı. Basıncı su durumunda $h=h_1+h_2$ olarak hesaplanır.

Benzer olarak, bir borunun ucundan veya kaplanmış bir kuyunun dibinden, borudaki veya kuyudaki su düzeyinin düşmesi ile su sızarken yapılan düşen düzeyli geçirimsizlik deneyleri de vardır.

Packer (tıkaç) deneylerinde, bir sondaj kuyusunun kaplanmamış veya delikli kaplama borusunun belli bir uzunluğunun yanlarından, zemine sabit düzeyli bir düzenle su gönderilir (Şekil 1.17). Belli bir uzunluk, tek veya çift tıkaç (sızdırmazlık elemanı) ile sağlanır. Verilen suyun sabit debisi ölçülür.



Şekil 1.17. Packer deneylerinin şemaları.

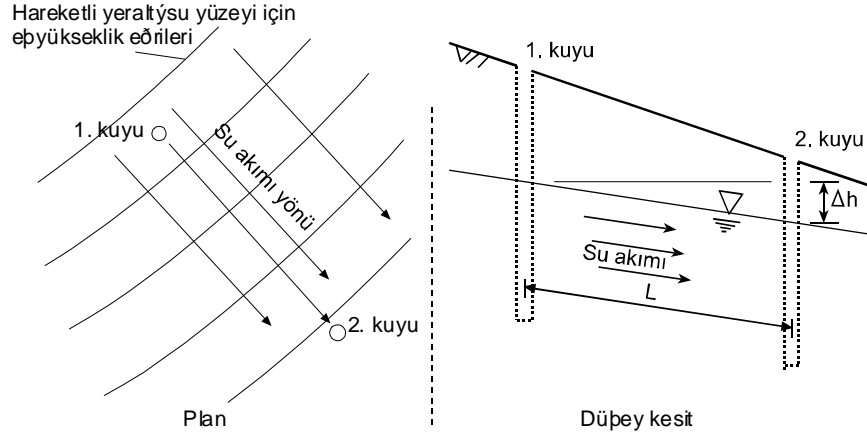
Zeminin geçirimsizlik katsayısı, aşağıdaki ampirik bağıntılarla belirlenir.

$$k = \frac{q}{2\pi Lh} \log \frac{L}{r} \quad L \geq 10r \quad (40)$$

$$k = \frac{q}{2\pi Lh} \sinh^{-1} \frac{L}{2r} \quad r \leq L \leq 10r \quad (41)$$

L : uzunluk, $h=h_1+h_2$

Bu ampirik bağıntılarda şu birimler kullanılabilir: q (m^3/s); r , h , L (m), k (m/s). Yeraltı suyu hareketli ise, akış doğrultusunda iki kuyu açılır (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Hareketli yeraltı suyu.

1. kuyudan tuz, boyalı madde, radyoaktif izotop vb. verilerek, bunların 2. kuyuya varış zamanları (Δt) 2. kuyuda ölçümler yaparak vb. belirlenir. Zeminin porozitesi n ise, k şöyle hesaplanır.

$$k = \frac{v}{i} = \frac{nv_{sızıntı}}{i} = \frac{nL / \Delta t}{\Delta h / L} = \frac{L^2 n}{\Delta t \Delta h} \quad (42)$$

1.3.7. Tabakalı Zeminlerde Ortalama Geçirimsizlik

Homogen zeminlerde yatay ve düşey yöndeki geçirimsizlik katsayıları ortamın anizotrop özellikleri nedeniyle genellikle farklılık gösterir. Tahmin edileceği gibi çakıl ve kumlarda bu fark, katsayıların yeterince yüksek olmasından ötürü önemsenmeyebilir. Ancak özellikle çöken killerde yatay-düşey geçirimsizlik oranının (k_h/k_v) 20'ye kadar yükselebildiği görülmektedir. Örneğin yumuşak killerde yapılan ölçümler şu bulguları vermektedir:

- 1) Doğal durumda bu tür killerin geçirimsizlik katsayısı aralığı $k = 10^{-10} - 10^{-8}$ dir.
- 2) Makro-dokunun gelişemediği denizel killerde k_h/k_v oranı bire yakındır.
- 3) Makro-dokunun gelişmiş olduğu killerde ise bu oran 1.5-15 arasındadır.

Zeminler oluşum koşullarına bağlı olarak genellikle tabakalıdır ve bu tabakaların k katsayıları önemli farklılıklar gösterebilir. Ortamın yatay ve düşey geçirimsizliği hidrolik yasalara ile hesaplanabilir (Terzaghi, 1967). Yatay ve düşey yönde akım koşulları gösterilmektedir. N sayıda tabakadan oluşan bir zemin sisteminde yatay yöndeki

geçirimsizlik katsayıları k_h , düşey yöndeki katsayılar ise k_v ile gösterilsin. Yatay yönde toplam debinin;

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad (43)$$

olacağı görülebilir. Q değeri her katmandan geçen debiyi göstermektedir. Burada esas olan, her katmanda hidrolik eğimin değişmezliğidir.

$$q_1 = k_{h1} i H_1 \quad (44)$$

$$q_2 = k_{h2} i H_2 \quad (45)$$

$$Q = k_{eh} i H \quad (46)$$

k_{eh} , sistemin karakteristik (temsili) yatay geçirimsizlik katsayısını, H ise tabaka alınlıklarını göstermektedir. Bağlantı (44), (45), (46) ifadeleri bağlantı (43)'e yerleştirilerek ortamın geçirimsizlik katsayısı bulunur.

$$k_{eh} = \frac{1}{H} (k_{h1} H_1 + k_{h2} H_2 + \dots + k_{hn} H_n) \quad (47)$$

Tabakalanmaya dikey yönde gelişen akımda ise temel kural her tabakadaki hızın eşit olmasıdır.

$$\begin{aligned} v &= v_1 = v_2 = \dots = v_n \\ v &= k_{ev} i = k_{va} i_1 = k_{v2} i_2 = k_{v3} i_3 = \dots \end{aligned} \quad (48)$$

Burada k_{ev} sistemin düşey yönde karakteristik geçirimsizlik katsayısı, k_{vn} , ilgili tabakaların düşey yönde geçirimsizlik katsayısı, i_n ise her tabakadaki farklı hidrolik eğimdir. Böylece, akım için toplam enerji her tabakada oluşan yük kaybının toplamına eşit olmalıdır,

$$iH = i_1 H_1 + i_2 H_2 + \dots + i_n H_n \quad (49)$$

Bağıntı (48) ve (47) birleştirilerek sistemin düşey yöndeki karakteristik geçirim katsayıları bulunur.

$$k_{ev} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{v1}} + \frac{H_2}{k_{v2}} + \frac{H_3}{k_{v3}} + \dots} \quad (50)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Trabzon İli Merkez İlçesi ile Vakfıkebir, Yomra, Arsin, Akçaabat ilçeleri gibi farklı bölgelerden alınan 5 farklı zemin örneğinin kullanıldığı bu çalışmada, kompaksiyonun geçirimsizliğe olan etkisi ve boşluk oranının geçirimsizlikle olan ilişkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda her zemin numunesi üzerinde Elek Analizi, Hidrometre Analizi, Kompaksiyon Deneyi, Özgül Ağırlık Deneyi, Plastik ve Likit Limit Deneyleri, Düşen Seviyeli Geçirimsizlik Deneyleri olmak üzere yedişer adet deney yapılmıştır. TS 1900' e göre yapılan deneyler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Tablo 2.1. Yapılan deneylerde kullanılan zemin türlerinin adı ve alındığı yerler (Ek 41-46)

Zemin Adı	Zemin numunesinin alındığı yer
A1	Vakfıkebir
A2	Arsin
A3	Yomra
A4	Akçaabat
A5	Merkez

2.1. Zemin Sınıflandırma Deneyleri

Deneylerde kullanılan zeminlerin sınıflandırmasında hidrometre analizi, elek analizi, likit ve plastik limit deneyleri, özgül ağırlık deneyleri yapılmış elde edilen tablolar aşağıda belirtilmiştir.

2.1.1. Özgül Yoğunluk Deneyi

Zemin sınıflandırma deneyleri kapsamında yapılan bu deneyde aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

1. Hacim şişesi, sıcaklığı (105 ± 5) °C olan etüvde kurutulur, desikatörde soğutulur ve 0,001 g doğrulukla tartılır.

2. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna, uygun olarak elde edilmiş malzemeden en az 400 g alınır ve gerekirse 4,75 mm'lik elekten geçecek biçimde öğütülür. Bu malzeme yaklaşık 250 g numune elde edilene kadar çeyrekleme metoduyla küçültülür. Elde edilen numune, sıcaklığı (105 ± 5) °C olan bir etüvde kurutulur. Su muhtevası deneyinde anlatıldığı şekilde, oda sıcaklığına kadar soğutulur. En az 10 g kütledeki zemin numunesi bağıl yoğunluk şişesine aktarılır. Şişe, içerisindeki zemin ve kapağı ile birlikte 0,001 g doğrulukla tartılır. Zeminin etüvde kurutulması işlemi sonucunda hidrasyon suyunda meydana gelecek kayıplardan ötürü danelerin bağıl yoğunluğunda değişme olabileceğinden kuşkulanıyorsa, zemin doğal durumunda denenmeli ve kullanılan numunenin kütlesi deneyin sonunda zemini, sıcaklığı 80 °C'ü aşmayan bir etüvde ve gerekirse 24 saatten daha uzun bir süre kurutularak ölçülmelidir. Ancak deney, sıkıştırma deneyinde hava boşlukları yüzdesinin hesabı için yapıyorsa (105 ± 5) °C sıcaklıklı etüv kullanılmalıdır.

3. Hacim şişesi içindeki numuneyi ancak örtecek miktarda, havası alınmış damıtık su eklenir, bazı zeminler (numunenin, suda eriyebilen tuzlar içeren zeminler) için su yerine gazyağı veya alkol kullanılabilir. Bunlardan herhangi biri kullanıldığında, durum deney raporunda belirtilmeli ve sıvının deneyde kullanılan belirli sıcaklıkta yoğunluğunu ölçmek için ayrı bir deney yapılmalıdır. Hacim şişesi, içerisindeki zemin numunesi ve suyla, (üzerinde kapağı bulunmaksızın), vakum desikatörüne konur ve emme uygulanarak yavaşça 760 mm eşdeğer cıva basıncına düşürülür. Bu işlem sırasında, zemin içindeki hava kabarcıklarının şiddetli köpürmeye yol açmamasına özen gösterilmelidir. Bu yapılmazsa, karışımdan sıçrayan ufak damlacıklar hacim şişesinin ağzından çevreye saçılarak malzeme kaybına yol açar. Hacim şişesi, numuneden hava çıkışı durana kadar desikatörde bekletilir.

4. Vakum kaldırılır ve desikatörün kapağı açılır. Hacim şişesinin içindeki numune, cam çubuk ile özenle karıştırılır veya hacim şişesi çalkalanır. Spatülün hacim şişesinden çıkarılmasından önce, üzerine yapışmış olan zemin tanecikleri, birkaç damla havası alınmış damıtık suyla yıkanır. Desikatörün kapağı kapatılır ve yeniden vakum uygulanır.

5. Hacim şişesi, desikatörden çıkarılır ve havası alınmış damıtık su ya da deney sıvısı eklenerek işaret çizgisine kadar doldurulur. Kapağı kapatıldıktan sonra, boyun seviyesine kadar su banyosu içine batırılır ve yaklaşık olarak 1 saat süreyle banyonun sıcaklığına (20 ± 1) °C erişene kadar bekletilir. Hacim şişesi içerisindeki sıvıda gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılır ve hacim şişesi işaret çizgisine kadar doldurup kılcal borusundan taşacak kadar havası alınmış damıtık su ya da sıvı eklendikten sonra kapak yeniden

kapatılır. Hacim şişesi banyo içerisine konur ve banyonun sıcaklığına yeniden erişene kadar bekletilir. Hacim şişesinin içindeki suda yine azalma oluyorsa, hacim şişesinin işaret çizgisine kadar dolması sağlanana kadar bu işlem tekrarlanır.

6. Kapağı kapalı durumdaki hacim şişesi banyodan çıkartılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 g doğrulukla tartılır.

7. Hacim şişesinin içindekiler boşaltılır, hacim şişesi temizlenir ve havası alınmış damıtık su veya deney sıvısı ile işaret çizgisine kadar doldurulur, kapağı kapatılır ve su banyosunda 1 saat süreyle veya banyonun deney için seçilmiş sıcaklığına erişene kadar bekletilir. Hacim şişesinin içerisindeki suda (deney sıvısında) gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılır ve hacim şişesini dolduracak kadar havası alınmış damıtık su eklendikten sonra kapak yeniden kapatılır. Hacim şişesi banyo içerisine konur ve banyonun belirli sıcaklığına yeniden erişmesine kadar bekletilir. Hacim şişesinin içindeki suda (deney sıvısında) yine azalma oluyorsa, hacim şişesinin işaret çizgisine kadar dolması sağlanana kadar bu işlem tekrarlanır. Son olarak, hacim şişesi banyodan çıkarılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 doğrulukla tartılır.

8. Yukarıdaki işlemler, aynı zeminden alınan ikinci numune üzerinde tekrarlanır ve böylece iki bağıl yoğunluk değeri elde edilmiş olur. Zeminlerin pek çoğu, aynı büyüklükteki ortalama zemin danesinden daha ağır veya daha hafif daneler içerir. Böyle danelerin çok olduğu zeminlerde, özenle yapılan bağıl yoğunluk deneyleri farklı sonuç verir. Bu gibi durumlarda, iyi bir ortalama değer elde etmek için deneyin bir çok defa tekrar gerekebilir.

2.1.2. Islak Analiz (Hidrometre Analizi)

Zemin sınıflandırılmasında kullanılan ıslak analiz yönteminde aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Bu metot, bir zeminde, iri kum boyutunda ve daha ince dane çapı dağılımının bulunmasıyla ilgilidir. Numunenin 75 µm'lik elekten geçen bölümünün % 10'dan daha az olduğu durumlarda bu deney burada anlatılan biçimi ile uygulanmaz.

TS 1900'e göre yapılan deneyin tanımı aşağıdaki gibidir:

1.Örselenmiş numunelerden elde edilerek havada kurutulan numuneden yarılama Metoduyla her biri 50-100 g iki numune elde edilir. Zemin tipine göre 50 g yada 100 g olarak alınan numunelerden birinin su muhtevası ölçülür.

2. Diğer numune 0,01 g duyarlılıkla tartılır ve geniş ağızlı konik bir şişeye koyulur. Üzerine 150 ml hidrojen peroksit çözeltisi ilave edilir birkaç dakika cam çubukla karıştırılır ve şişenin ağzı cam kapakla örtüldükten sonra 1 gün bekletilir. Bekletilmiş karışım kaynatılarak hacmi 50 ml'ye düşürülür.

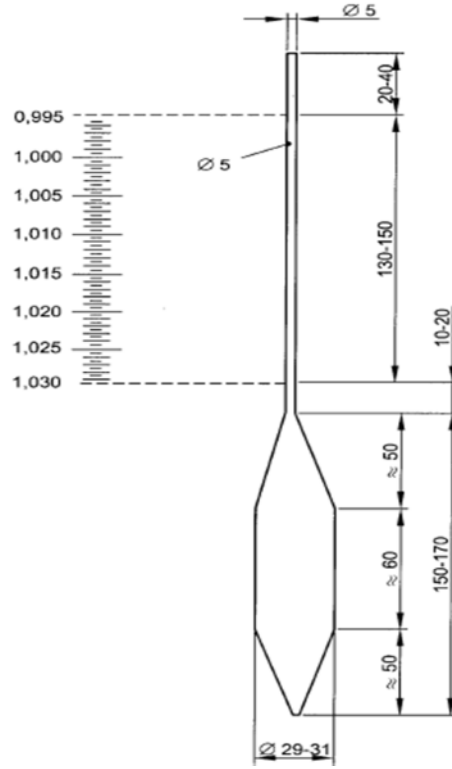
3. Porselen pota 0,01 g duyarlılıkla tartılır ve konik şişedeki bu karışım potaya aktarılır. Pota içindekilerle birlikte etüve koyulur ve kurutulur. Kuruyan numune pota ile birlikte tartılır ve zeminin ön işlemler sonundaki kütlesi elde edilir.

4. Potadaki numuneye 100 ml Sodyum heksametafosfat çözeltisi katılır ve karışım hafif ateşte 10 dk kadar ısıtılır. Karışım pisetten damıtık su fişkırtılarak karıştırma kabına aktarılır ve 15 dk kadar karıştırılır.

5. Karıştırılan süspansiyon 1000 ml 'lik mezüre alınır ve üzerine su eklenerek 1000ml'ye tamamlanır.

6. Mezürün ağzı lastik bir tıpa ile kapatılır ve çalkalanır. Çalkalama işlemi biter bitmez mezür düz bir yüzeye oturtulur ve kronometre çalıştırılır. Hidrometre yüzme durumuna az gelene kadar süspansiyona daldırılır. Kronometreye bakılarak 0.5, 1, 2 ve 5. Dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Bundan sonra hidrometre süspansiyondan çıkarılarak damıtık suda bekletilir.

7. Kronometre 10. Dakikaya yaklaşırken (15 sn kala) hidrometre yeniden süspansiyona daldırılır, okuma alınıp kaydedilir. Aynı şekilde 15, 30, 60, 240 ve 1440. dakikalarda aynı şekilde okumalar yapılır. Elde edilen tablodan tane çapı - % geçen değerleri elde edilir.



Şekil 2.1. Genel olarak deneylerde kullanılan bir hidrometrenin boyutları (ölçüler mm cinsindedir.)

2.1.3. Elek Analizi (Yıkamalı Analiz)

Bu metot, bir zeminde, ince kum ve daha iri boyuttaki malzemelerin dane çapı dağılımının tayini ile ilgili olup, zemin içindeki kil ve siltin toplam miktarı da bu deney sonuçlarından hesaplanabilir.

- 1) Deneyde kullanılacak eleklerin göz açıklıkları, deneye tabi tutulan zemindeki tane boyutlarını yeterli bir biçimde kapsmalıdır.
- 2) Örselenmiş numunelerin deneye hazır hale getirilir ve etüvde bekletilir.
- 3) Numune içinde iri zemin taneleri bulunuyorsa, üzerindeki ince malzemenin temizlenene kadar tel yada benzeri sert bir fırçayla fırçalanır.
- 4) Etüvde kurutulmuş malzeme 0,01 g duyarlıklı terazide tartılarak bulunan değer kaydedilir.
- 5) Zemin geniş bir tepsi üzerine serilir veya kova içerisine koyularak üzeri su ile örtülür.

6) Numuneyi örtmekte kullanılan suyun her bir litresi için 2 g sodyum hegzametafosfat kullanılır ve zeminin tamamının ıslanmasını sağlamak için zemin iyice karıştırılır.

7) Numune son bir kez daha karıştırıldıktan sonra bulanık su 75 μ m'lik eleğin üzerine aktarılır. İri tanelerin 75 μ m'lik eleğe zarar vermemesi için 75 μ m'lik eleğin üzerine daha büyük göz açıklıklı ve kalın telli başka bir elek (425 μ m veya 2 mm) konularak iri tanelerin bu eleğin altına geçmesi önlenir. Eleklerden herhangi birinin aşırı yüklenmemesine dikkat edilmesi gerekir.

8) Numuneye yeniden su katılır. Bulanık su, 75 μ m'lik elekten geçirilip atılır. Bu yıkama işlemi elekten geçen su duru oluncaya kadar devam ettirilir.

9) Eleklerde kalan malzemenin tamamı tepsilere yada porselen potalara boşaltılır ve etüvde kumaya bırakılır.

10) Etüvde kurutulan malzeme uygun bir elek serisinden elenir. Eleme mekanik sarsma cihazı ile yapılıyorsa eleme en az 10 dk. sürmelidir. Her elekte kalan zemin tartılır ve elde edilen kütleler kaydedilir.

2.1.4. Likit Limit Deneyleri

Elde edilen zemin numunelerinde yapılan likit limit deneyleri aşağıdaki yöntemler izlenerek yapılmıştır.

1) Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak 425 μ m'lik elekten geçirilen yaklaşık 200 g numune alınır. 425 μ m'lik elekten geçen miktar toplam zemin numunesine bölünür 425 μ m'lik elekten geçen yüzde bulunur. Numune cam plâkanın üstüne veya porselen potaya konur; damıtık su katılarak, homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılır. Sonra bu karışım, suyun numunenin her yanına yayılmasını sağlamak amacıyla, hava geçirmez bir kap içerisinde 24 saat süreyle oda sıcaklığında desikatörde bekletilir. Başlangıç su muhtevasının likit limitten düşük olması gerekir.

2) Numune kaptan çıkarılır ve en az 10 dakika süreyle yeniden karıştırılır. Bazı zeminlerde güvenilir sonuçlar alınabilmesi için deneye başlamadan önce numunenin 40 dakikaya kadar uzayabilen bir süre boyunca sürekli olarak karıştırılması gerekebilir. Elde edilen zemin-su karışımından bir miktar alınarak likit limit cihazının kabı içine konur (bu sırada kap tabana oturur konumda olmalıdır), yüzeyi tabana paralel olarak düzlenir ve oluk

açma bıçağı, menteşenin ortasından geçen çap boyunca kap içinde hareket ettirilerek, numune ikiye bölünür. Bıçağın hareketi sırasında bıçak, kap yüzeyine dik tutulmalı, bıçağın keskin ucu hareket yönüne bakmalıdır. Böylece numunenin ortasında 'V' kesitli bir oluk açılmış olur. Krank kolu saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilerek, iki yanda kalan zemin, oluğun dip kısmında 13 mm boyunca birbirine değene kadar, kap kaldırılıp düşürülür. Değmenin sağlandığı kesimin uzunluğu, oluk açma bıçağının ucuyla veya bir cetvelle ölçülür. Oluktaki bu kapanmayı sağlayan düşüş sayısı kaydedilir. Bazı zeminlerde oluk, zemindeki akma yoluyla kapanacağına, zeminin kap yüzeyi boyunca kayması yoluyla kapanma eğilimindedir. Bu gibi durumlarda, elde edilen sonuca güvenilmemeli ve zeminde akma görülene kadar deney tekrarlanmalıdır. Birkaç kez su eklenmesine karşın yine kayma oluyorsa, deneyin bu zeminde uygulanamadığı sonucuna varılır ve deney raporunda likit limitin ölçülemediği belirtilir.

3) Oluğun kapanmış olan kesiminin çevresinden, palet bıçağıyla alınan yaklaşık 30g numune, (10 g'dan daha az olmamalıdır) deney kabına konur ve Deney 1'deki metotla su muhtevası ölçülür.

2.1.5. Plastik Limit Deneyleri

Yapılan plastik limit deneylerinde izlenen yöntem aşağıda belirtilmiştir.

1) Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş ve likit limit deneyi için hazırlanmış olup 425 µm'lik elekten geçen malzemeden yaklaşık 20 g numune alınır. Zeminin 425 µm elekten geçen kısmının yüzdesi kaydedilir. Numune homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek kadar plâstik olana kadar, cam plâka üzerinde, damıtık su ile iyice karıştırılıp yoğrulur. Böylece hazırlanmış numune yaklaşık olarak iki eşit parçaya bölünür. Bunlara yeniden top biçimi verildikten sonra bir danesine, yukarıdaki işlemler uygulanır. ICS 93.020 TÜRK STANDARDI TS 1900-1/Mart 2006 25 değeri ise daha sonra denenmek üzere paslanmaz ve hava geçirmez bir kap içerisine konur.

2) Küre halindeki numune, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanır. Numunenin çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmemişse zemin tekrar toprak haline yoğrulur ve yeniden yumrulur. Çap tam 3mm'ye indiği anda, yuvarlanan zeminde çatlayıp dağılmalar görülene değin bu

işlem sürdürülür. Çapın doğru olarak belirlenmesinde karşılaştırma ölçeği olarak bir metal çubuk kullanılır.

3) Numunenin dağılan parçaları toplanıp bir numune kabına konur ve Deney 1'deki metotla su muhtevası ölçülür. Ölçüm için alınan numunenin yaş haldeki kütlesi en az 10 g olmalıdır.

4) Yukarıda verilen işlemler, başlangıçtaki numunenin ikinci yarısı için tekrarlanır.

2.2. Kompaksiyon Deneyleri

Elde edilen zemin numuneleri üzerinde yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda aşağıda belirtilen yöntemler izlenmiştir. Deney sonucunda ortaya çıkan grafikler, Şekil 2.12 – 2.16.'da gösterilmiş olup deneyler hakkında detaylı veriler, Ek.12 – 16'da belirtilmiştir.

Bu deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır.

1) Açıkta kurutulup ilgili elekten geçirilerek elde edilen zeminden 5kg'lık bir numune alınır. Numune zemin türüne göre uygun miktarda su ile iyice karıştırılır.

2) Kalıp, taban plâkası takılmış olarak 1 g doğrulukla tartılır (M1). Kalıp, beton döşeme gibi sert bir yüzey üzerine oturtulur ve nemli zemin, mümkün olduğu kadar eşit kütlede üç tabaka halinde, her birine 305 mm serbest düşüş yapan tokmakla 25 darbe veya 56 darbe uygulanarak, üst ucuna yakası takılmış kalıbın içine sıkıştırılır. Darbeler, her tabaka yüzeyine eşit aralıklarla dağıtılmalıdır. Tokmak kılavuzunun, tokmağın serbest düşüşünü engelleyecek biçimde, zeminle tıkanmamasına özen gösterilmelidir.

Kullanılan zemin miktarı, kalıbı doldurmaya yetmeli, ancak sıkıştırılıp yaka çıkarıldıktan sonra kesilip atılacak artık zemin yüksekliği 6 mm'yi aşmamalıdır. Yaka çıkarılır ve sıkıştırılmış zemin, çelik cetvelle, kalıbın üst kenarı düzeyinde dikkatle düzlenir. Kalıp ve zemin, 1 g duyarlılıkla tartılır.

3) Sıkıştırılmış zemin, kalıptan çıkarılıp büyükçe bir metal kaba konur. Bu zeminini temsil eden bir numune alınarak su muhtevası ölçülür.

4) Zeminin geriye kalanı, ufalanıp ilgili elekten geçirilir ve deneyin başında hazırlanan numuneden artmış oranla karıştırılır. Böylece elde edilen örneğe, uygun artışlarla su katılıp karıştırılır ve her defasında yukarıdaki işlemler tekrarlanır.

5) Deney, en az beş değer verecek biçime tekrarlanır ve kullanılan su muhtevaları en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su muhtevalarını içine alan sınırlar arasında değişmelidir.

2.3. Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi

Elde edilen zemin örnekleri üzerinde uygulanan düşen düzeyli geçirimsizlik deneyinde yapılan uygulamalar aşağıda açıklanmıştır. Deney sonucu ortaya çıkarılan grafikler Şekil 2.16 – 2.20.’de ki gibi olup deney ile ilgili detaylı veriler Ek.34-39’da belirtilmiştir.

Bölüm 1.2.6 ‘da düşen seviyeli geçirimsizlik deneyine detaylı olarak değinildiğinden ötürü bu kısım kısaca açıklanacaktır.

1) Kullanılacak numunenin ıslak kütlesi 0,01g duyarlı terazide tartılarak kaydedilir. Ayrıca numunenin su içeriği belirlenir.

2) İçinde numune olan silindirik kabın hacmi ve numunenin boyu ölçülür. Cam numunenin en kesit alanı hesaplanarak kaydedilir.

3) Numuneye su verilir doymuş hale gelinceye kadar beklenilir. Bekleme süresi numunenin durumuna göre 15 dakikadan birkaç güne kadar değişebilir (Yapılan deneylerde numuneler 1 gün botunca doymuşluğa bırakılmıştır). Zeminin iri taneli olması durumunda daha az ince taneli olması durumunda daha fazla süre beklenmesi gerekir.

4) Numune doymuş hale geldikten sonra numuneye suyun girdiği noktada bulunan vana kapatılarak cam borudaki suyun seviyesi ölçülür. Bu ölçüm seçilen herhangi bir referans düzlemine göre yapılabilir.

5) Uygun bir zamanda vana açılarak zaman kaydedilir. Uygun bekleme süresi sonunda vana kapatılır. Cam borudaki su seviyesi seçilen referans düzlemine göre yeniden ölçülür. Bekleme süresi yaklaşık olarak bir saatten fazla olacaksa buharlaşmanın olmaması için cam borunun ucu kapatılır. Son olarak deney suyunun sıcaklığı kaydedilerek deney sonlandırılır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu kısımda Trabzon İlinin çeşitli yerlerinden elde edilen beş ayrı zemin için, K.T.Ü. Geoteknik- Ulaştırma Laboratuvarında yapılan elek analizi (yıkamalı analiz), tane yoğunluk, ıslak analiz (hidrometre yöntemi), likit limit ve plastik limit deneyleri, standart kompaksiyon deneyi ve düşen düzeyli geçirimsizlik deneylerinden elde edilen veriler ve bu verilerin grafikleri yer almaktadır.

3.1. Zemin Sınıflandırma Deneyleri

Elde edilen zemin örneklerinin sınıflandırılması amacıyla yapılan deneyler sonucu elde edilen elek analizi (yıkamalı analiz), ıslak analiz (hidrometre yöntemi), plastik ve likit limit deneyleri, tane yoğunluk deneyleri verileri aşağıda belirtilmiştir

3.1.1. Elek Analizi (Yıkamalı Analiz)

Bölüm 2.1.3.'de detaylarıyla açıklanan deney sırasında elde edilen detaylı veriler tablolar halinde Ek.7 – 11'de verilmekte olup beş farklı zemin numunesi üzerinde yapılan elek analizi tabloları Tablo 3.1. – 3.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. A1 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları

	Elek no	Elekten geçen (%)
1	(3/8) ^{II}	100
2	4	85,7
3	10	63,6
4	25	37,8
5	40	33,2
6	60	25,8
7	100	20,4
8	200	18,7

Tablo 3.2. A2 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları

	Elek no	Elekten geçen (%)
1	(3/8) ^{II}	100
2	4	86,8
3	10	65,2
4	25	43,9
5	40	36,4
6	60	29,6
7	100	25,5
8	200	22,5

Tablo 3.3. A3 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları

	Elek no	Elekten geçen (%)
1	(3/8) ^{II}	100
2	4	93,6
3	10	83,1
4	25	63,9
5	40	57,9
6	60	46,8
7	100	41,6
8	200	40,2

Tablo 3.4. A4 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları

	Elek no	Elekten geçen (%)
1	(3/8) ^{II}	100
2	4	87,8
3	10	68,2
4	25	48,4
5	40	44,8
6	60	41,2
7	100	38,3
8	200	37,5

Tablo 3.5. A5 Zemininde yapılan elek analizi (yıkamalı analiz) sonuçları

	Elek no	Elekten geçen(%)
1	(3/8)"	100
2	4	92,5
3	10	82,3
4	25	68,5
5	40	64,9
6	60	62,2
7	100	60,4
8	200	58,0

Zemin örnekleri üzerinde yapılan hidrometre ve elek analizi deneyleri sonucu elde edilen D(mm)- P (%) grafikler Şekil 3.6.- 3.10' da verilmiştir.

3.1.2. Tane Yoğunluk Deneyleri

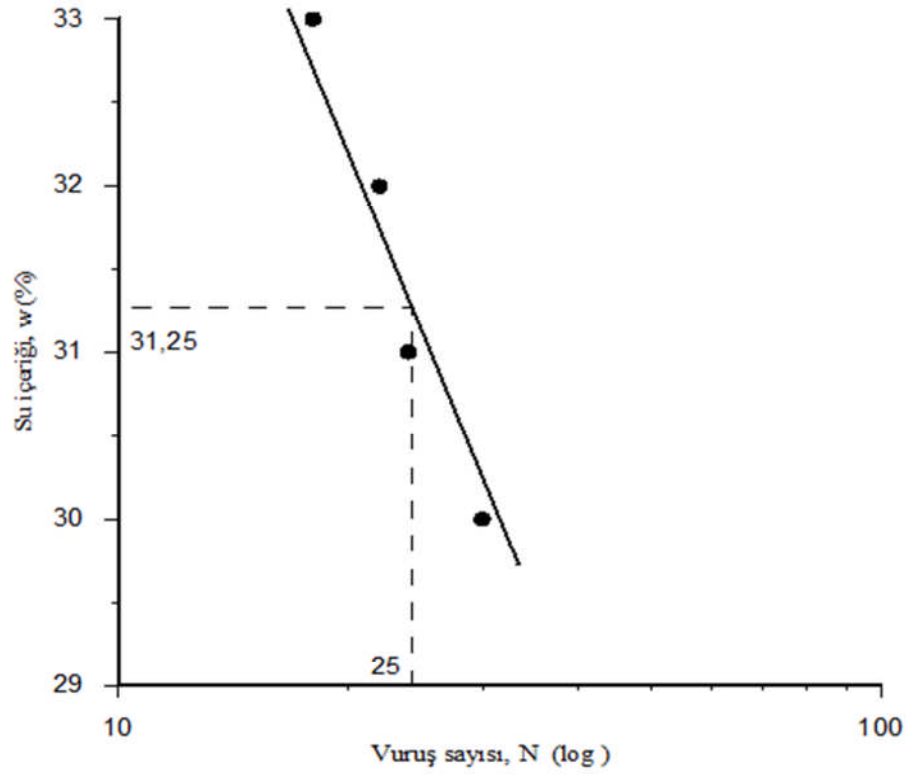
Adımlarına, 2.Bölümde değinilen özgül yoğunluk deneyinde elde edilen ayrıntılı veriler, tablolar halinde Ek.16-29'da verilmiş olup, deney sonuçları Tablo 3.6.'da verilmiştir. Elde edilen bu sonuçların literatürde önerilen değerlerle (2,5 – 3 Mg/m³) uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.6. Deney sonucu numunelerinin özgül yoğunlukları

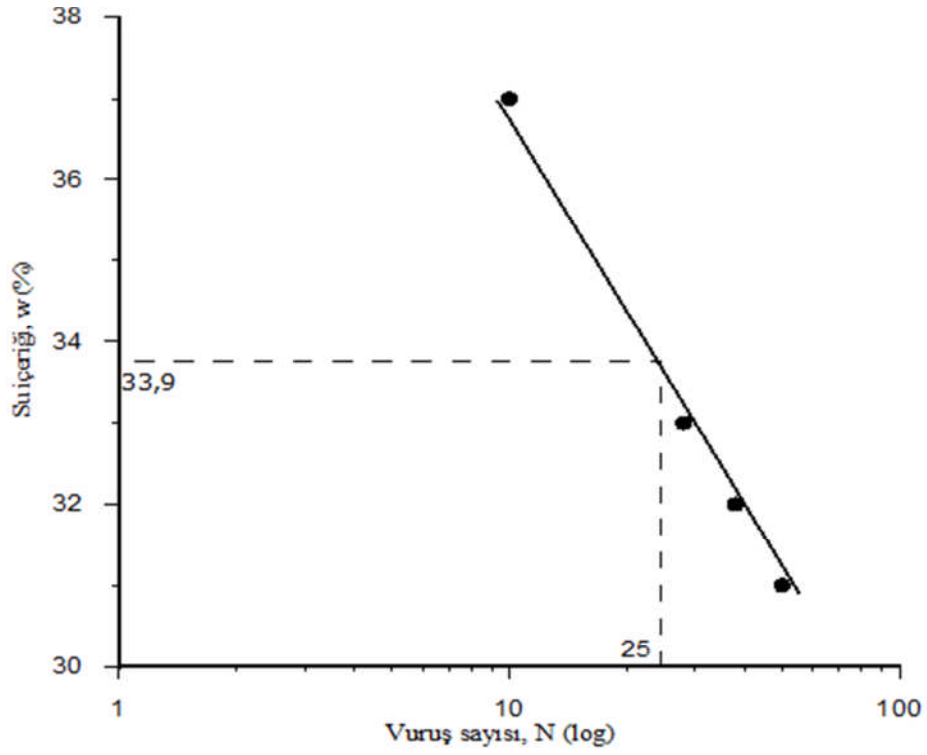
Zemin adı	Tane yoğunluğu, r_s (Mg/m ³)
A1	2,75
A2	2,73
A3	2,59
A4	2,68
A5	2,53

3.1.3. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri

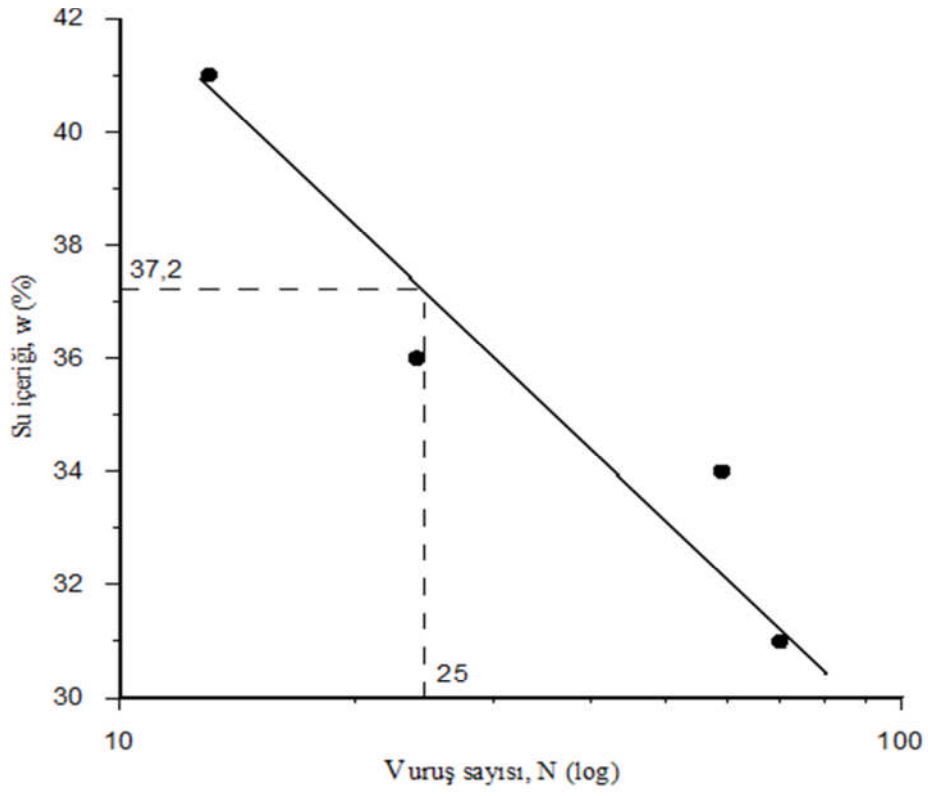
Likit limit deneyi sonucu elde edilen grafikler Şekil 3.1 – 3.5.'te, sonuç tablosu ise Tablo 3.7'de gösterilmiş olup plastik ve likit limit deneyleriyle ilgili detaylı bilgi içeren tablolar Ek.31 – 35'de verilmektedir.



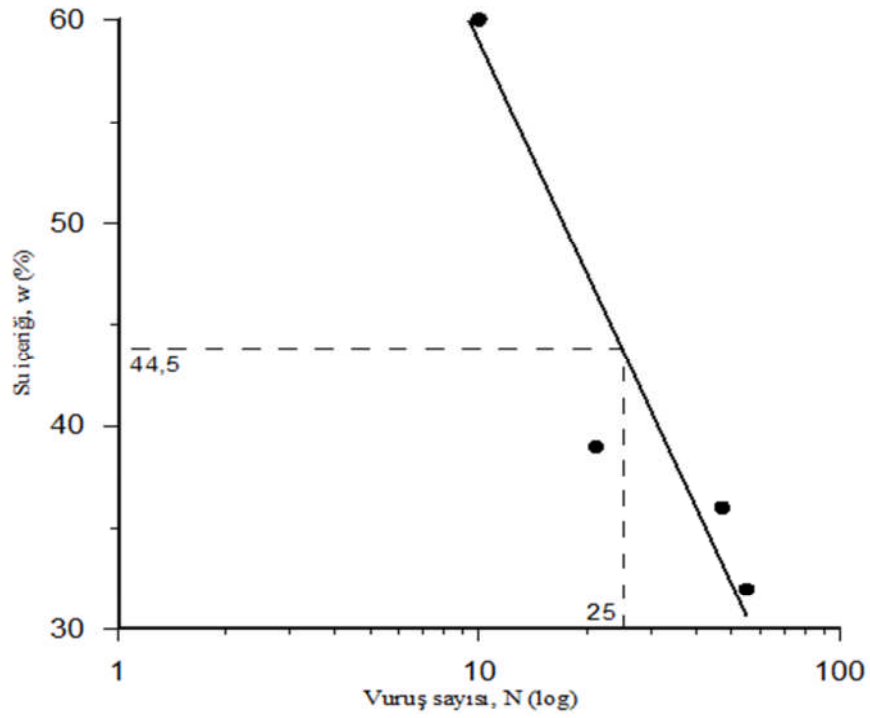
Şekil 3.1. A1 Zeminine ait likit limit grafiği



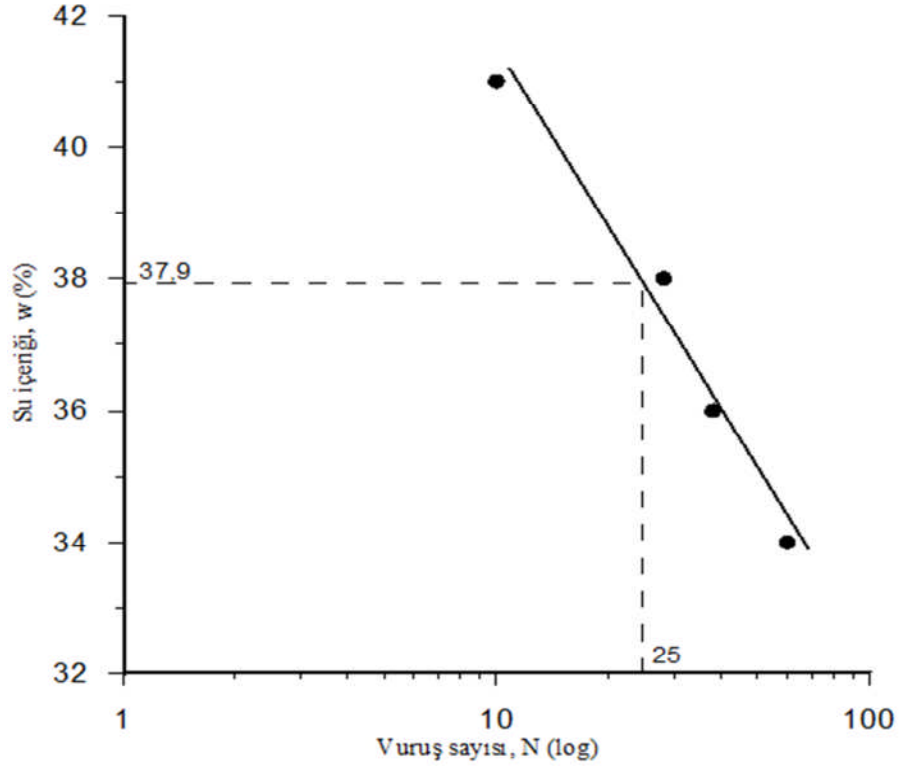
Şekil 3.2. A2 Zeminine ait likit limit grafiği



Şekil 3.3. A3 Zeminine ait likit limit grafiği



Şekil 3.4. A4 Zeminine ait likit limit grafiği



Şekil 3.5. A5 Zeminine ait likit limit grafiği

Zemin numunelerine uygulanan kıvam limitleri deneyleri sonucu elde edilen grafikerden 25 vuruş sayısına karşılık gelen su içeriği değeri olan likit limit ve plastik limit değerleri aşağıda Tablo 3.13'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Likit ve plastik limit deneylerinin sonuçları

Zemin Adı	Likit limit, w_L (%)	Plastik limit, w_p (%)
A1	31,2	27
A2	33,9	26
A3	37,2	29
A4	44,5	27
A5	37,9	21

3.1.4. Islak Analiz (Hidrometre Yöntemi)

Yapılan ıslak analiz sonucu elde edilen tane çapı (D)ve elekten geçen malzeme yüzdesi Tablo 3.8 - 3.12. 'de gösterilmiştir. Laboratuvarda numuneler üzerinde yapılan

ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deneyinden elde edilen detaylı bilgileri tablolar halinde Ek.1 – 5 'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. A1 Zemininin ıslak analiz (hidrometre yöntemi) sonucu elde edilen D-%P verileri

	Tane çapı,D (mm)	Yüzde geçen (%P')	Düzeltilmiş geçen yüzdesi (%)
1	0,0794	82,7	15,5
2	0,0576	76,5	14,3
3	0,0418	70,3	13,1
4	0,0311	57,8	10,8
5	0,0205	45,3	8,5
6	0,0148	39	7,3
7	0,0122	35,9	6,7
8	0,0088	29,7	5,6
9	0,0063	26,5	5
10	0,0031	17,2	3,2
11	0,0013	4,7	0,9

Tablo 3.9. A2 Zemininin ıslak analiz (hidrometre yöntemi) sonucu elde edilen D-%P verileri

	Tane çapı,D (mm)	Yüzde geçen (%P')	Düzeltilmiş geçen yüzdesi (%)
1	0,0794	85,2	19,2
2	0,0576	78,8	17,7
3	0,0418	72,5	16,3
4	0,0311	59,9	13,5
5	0,0205	47,3	10,6
6	0,0148	41	9,2
7	0,0122	37,8	8,5
8	0,0088	31,5	7,1
9	0,0063	28,4	6,4
10	0,0031	18,9	4,3
11	0,0013	6,3	1,4

Tablo 3.10. A3 Zemininin ıslak analiz (hidrometre yöntemi) sonucu elde edilen D-%P verileri

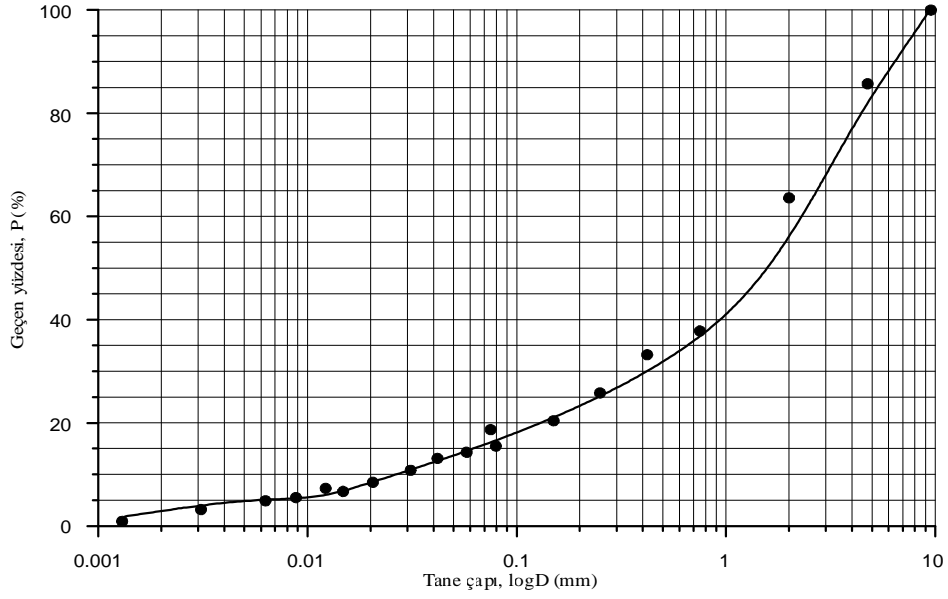
	Tane çapı,D (mm)	Yüzde geçen (%P')	Düzeltilmiş geçen yüzdesi (%)
1	0,07616	86,6	50,2
2	0,05430	85,1	49,4
3	0,03839	85,1	49,4
4	0,02744	81,9	47,5
5	0,01790	75,6	43,8
6	0,01278	72,5	42,1
7	0,01059	69,3	40,2
8	0,00803	50,4	29,2
9	0,00649	6,3	3,7
10	0,00325	4,7	2,7
11	0,00133	3,1	1,8

Tablo 3.11. A4 Zemininin ıslak analiz (hidrometre yöntemi) sonucu elde edilen D-%P verileri

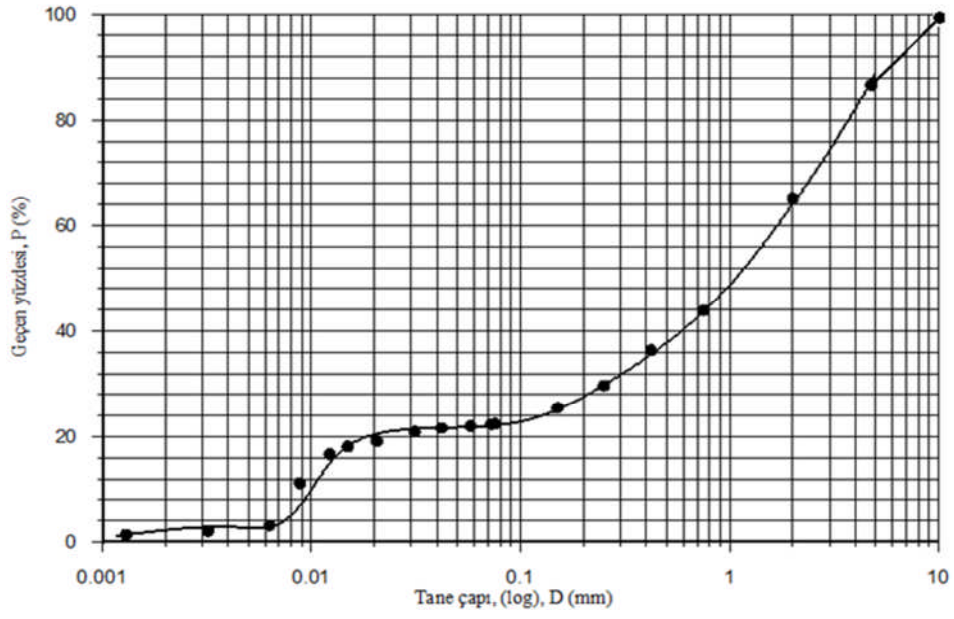
	Tane çapı,D (mm)	Yüzde geçen (%P')	Düzeltilmiş geçen yüzdesi (%)
1	0,07830	98,2	36,3
2	0,05563	96,6	35,7
3	0,03957	95,1	35,7
4	0,02828	92,0	34
5	0,01870	85,9	31,8
6	0,01335	79,8	29,5
7	0,01125	70,5	26,1
8	0,00875	36,8	13,6
9	0,00671	6,1	2,3
10	0,00335	3,1	1,1
11	0,00137	3,1	1,1

Tablo 3.12. A5 Zemininin ıslak analiz (hidrometre yöntemi) sonucu elde edilen D-%P verileri

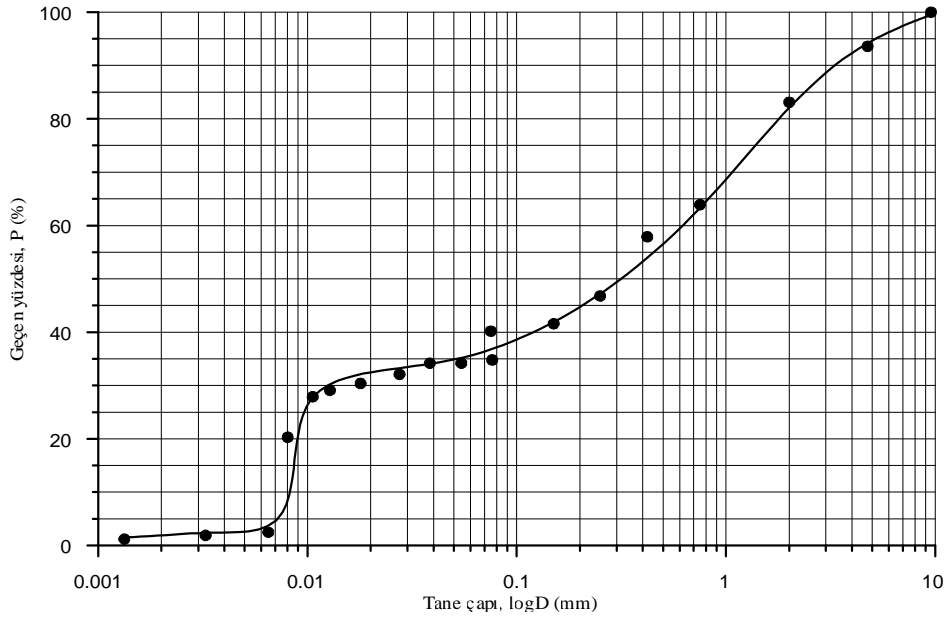
	Tane çapı, D (mm)	Yüzde geçen (%P')	Düzeltilmiş geçen yüzdesi (%)
1	0,07210	100	58
2	0,05227	99,7	57,8
3	0,03674	98,3	57
4	0,02645	95,1	55,2
5	0,01722	88,8	51,5
6	0,01251	82,4	47,8
7	0,01064	72,9	42,3
8	0,00853	38,0	22
9	0,00662	6,3	3,7
10	0,00333	3,2	1,9
11	0,00136	3,2	1,9



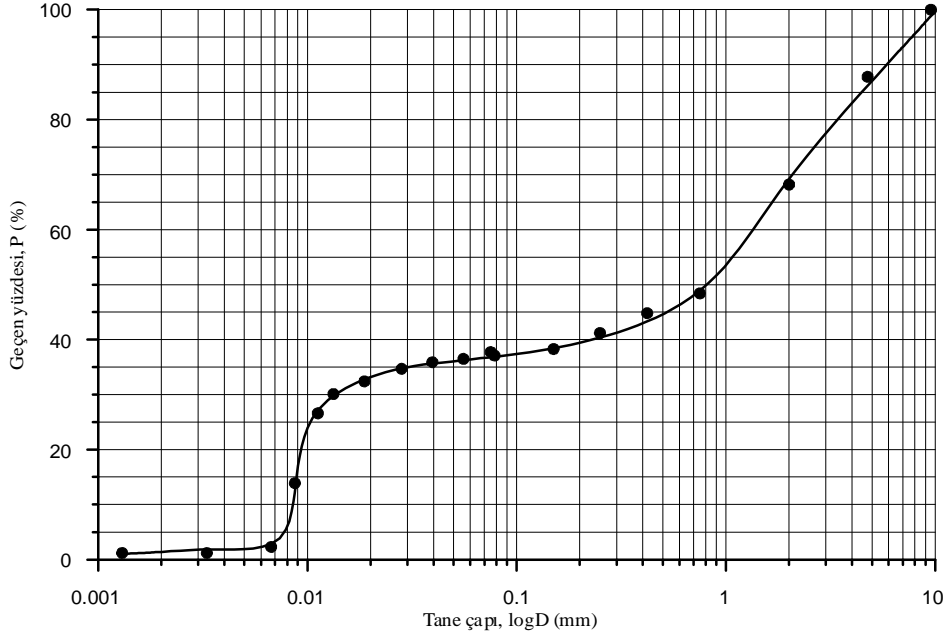
Şekil 3.6. A1 Zeminine ait granülometri eğrisi



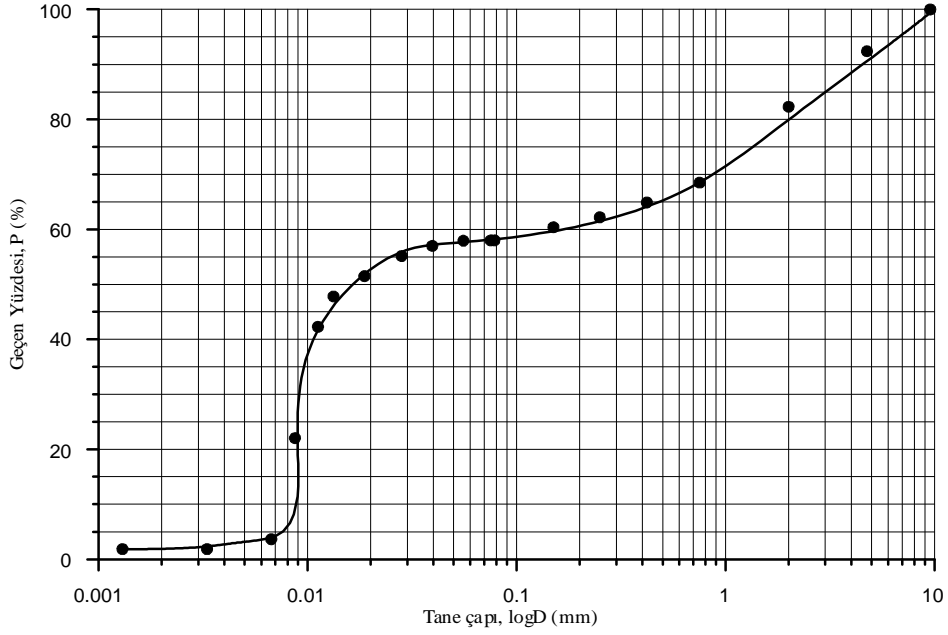
Şekil 3.7. A2 Zeminine ait granülometri eğrisi



Şekil 3.8. A3 Zeminine ait granülometri eğrisi



Şekil 3.9. A4 Zeminine ait granülometri eğrisi



Şekil 3.10. A5 Zeminine ait granülometri eğrisi

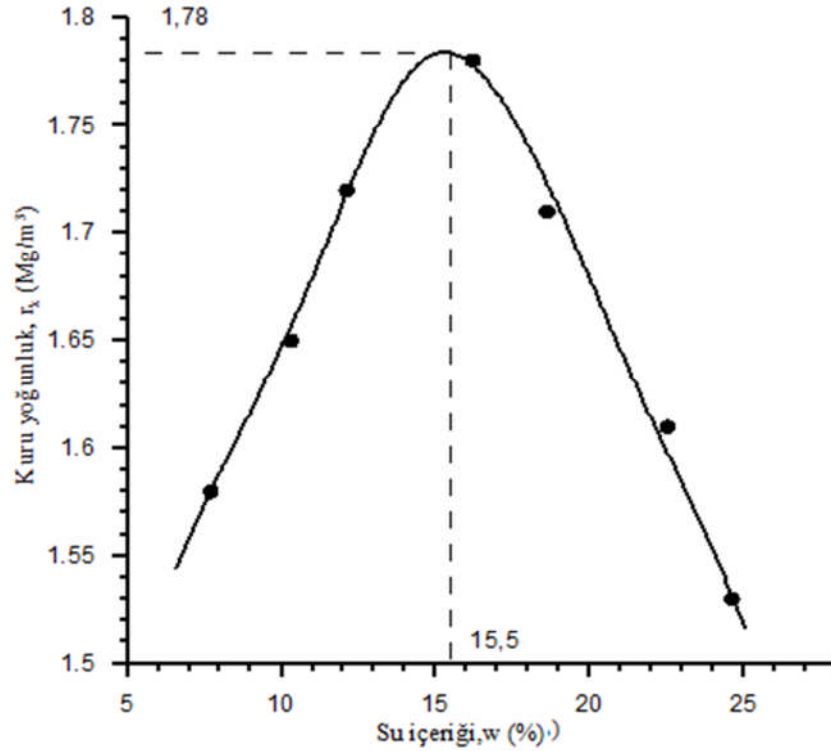
Yapılan zemin sınıflandırma deneyleri sonucunda zeminler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırılması Tablo 3.13.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırma sistemine göre ilk dört zemin örneği (A1, A2, A3, A4) siltli kum (SM) olarak, son zemin örneği (A5) ise düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 3.13. Zeminlerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre sınıflandırılması

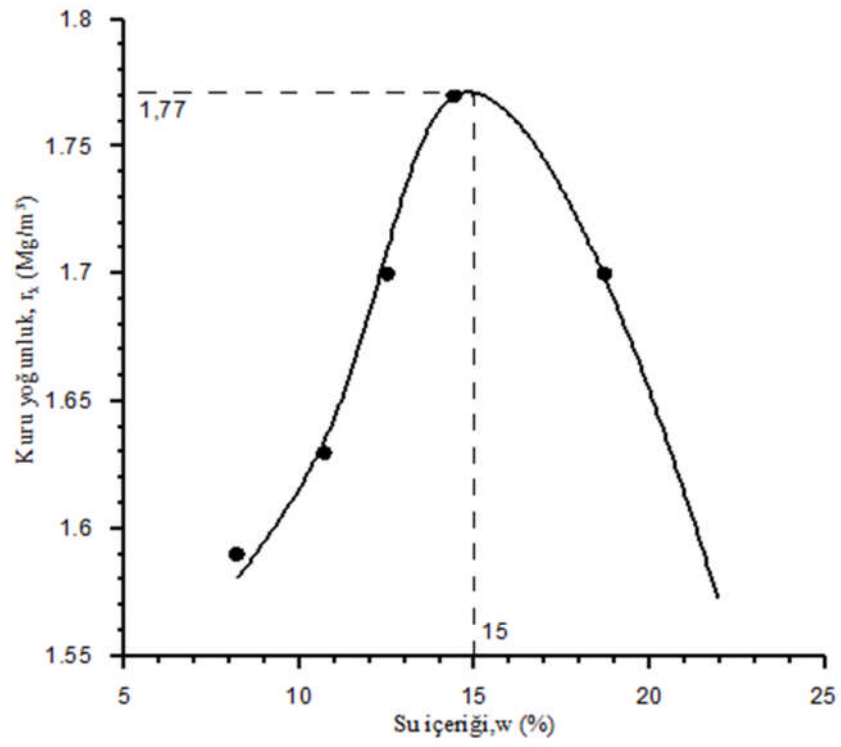
Zemin adı	4 No.% P	200 No% P	C_U	C_C	$w_L\%$	$w_p\%$	$I_p\%$	Sınıfı
A1	85,7	18,7	92	2,78	31,2	27	4,2	SM
A2	6,8	22,5	106,7	2,6	33,9	26	7,9	SM
A3	87,7	37,5	176,5	0,017	44,5	27	17,5	SM
A4	93,6	40,24	80	0,022	37,2	29	8,2	SM
A5	92,5	58	16,67	6,7	37,9	21	16,9	CL

3.2. Kompaksiyon Deneyleri

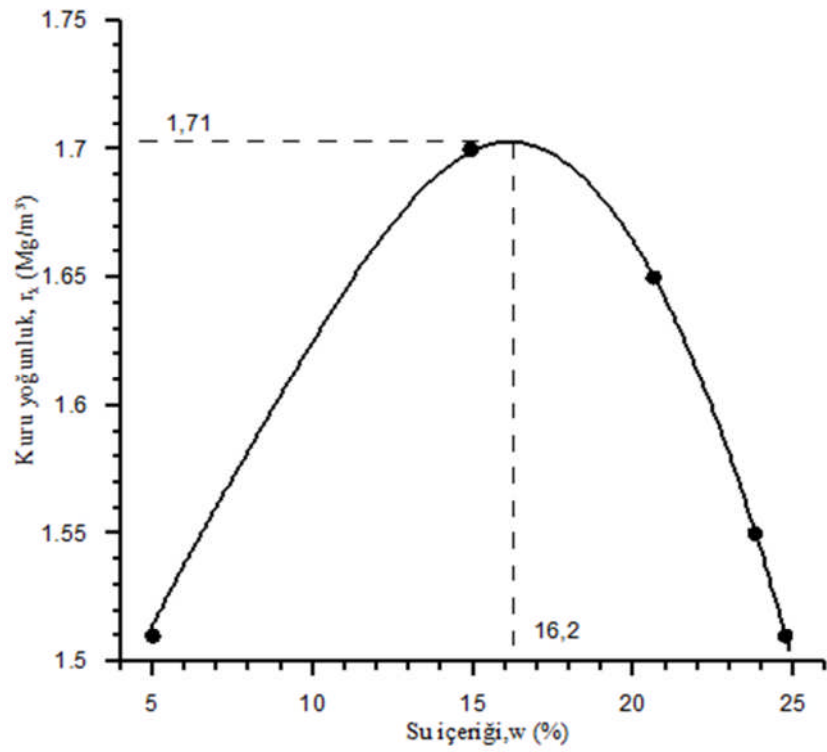
Deney sonucunda ortaya çıkan grafikler, Şekil 3.11 – 3.15.'de ve optimum su içerikleri - maksimum kuru yoğunluk ($w_{opt.}-\rho_{k\ max}$) değerleri Tablo 3.14'de gösterilmiş olup deneylerle ilgili detaylı verilere, Ek.12 – 16'da değinilmiştir.



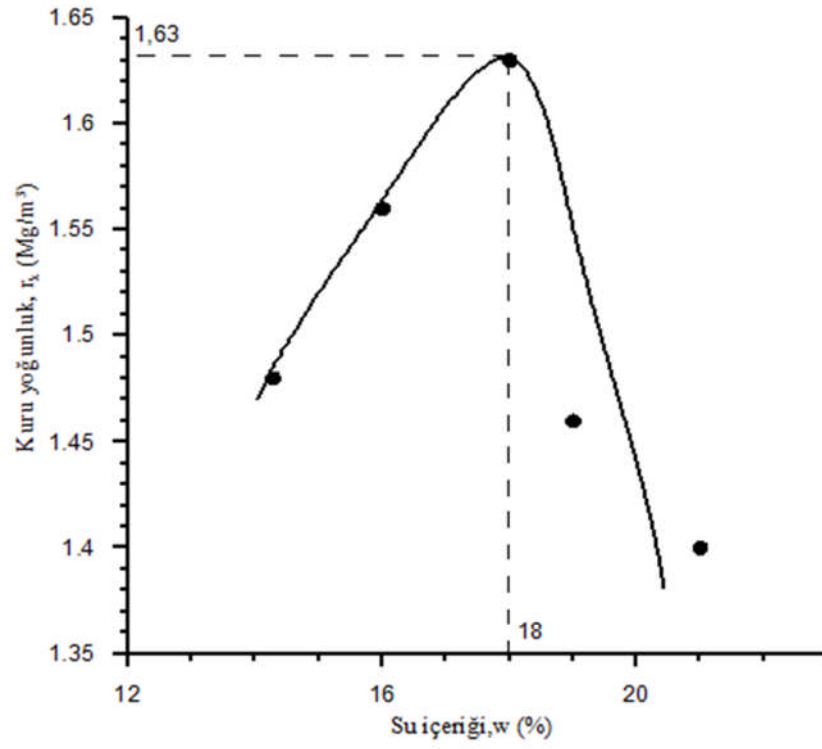
Şekil 3.11. A1 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi



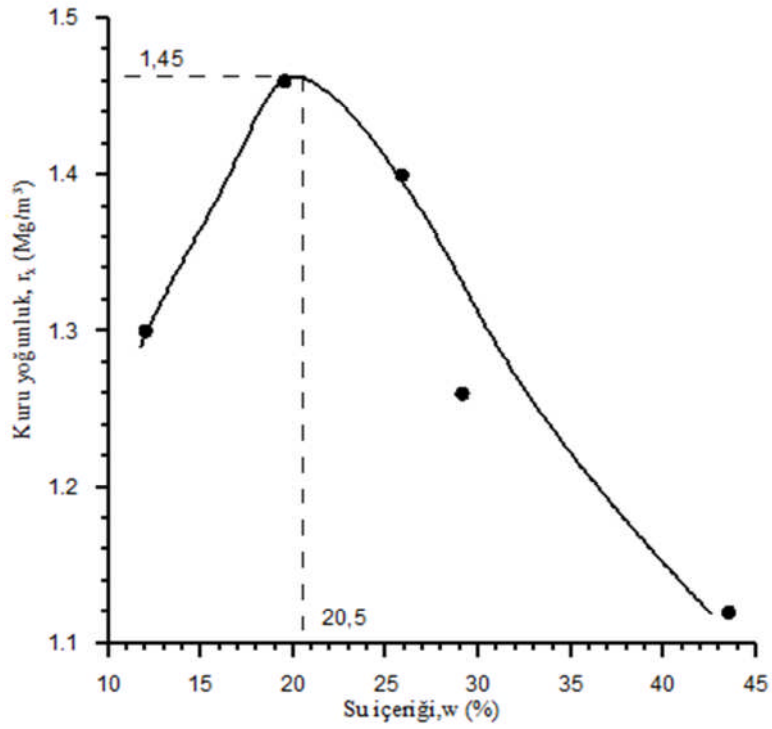
Şekil 3.12. A2 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.13. A3 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.14. A4 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.15. A5 Zeminine ait kompaksiyon eğrisi

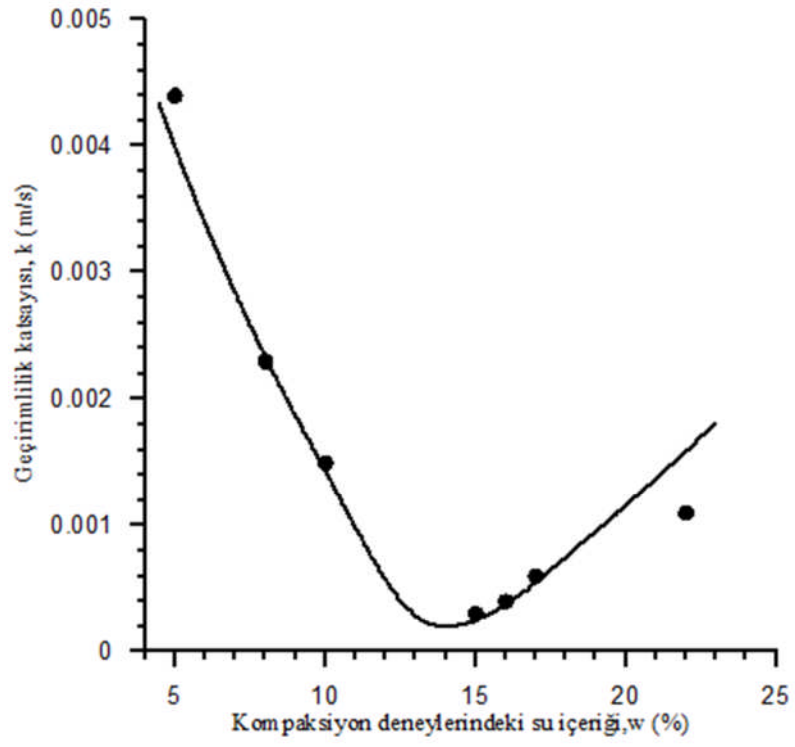
Yapılan standart kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen grafiklerden maksimum kuru yoğunluk- optimum su içeriklerini gösteren tablo aşağıdaki gibidir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen su içeriği – kuru yoğunluk ($w-\rho_k$) grafiklerinde (Şekil 3.11 – 3.15) artan su içeriğiyle birlikte kuru yoğunluk değerinin arttığı, daha sonra belirli bir noktada kuru yoğunluğun maksimum değer aldığı ve bu noktadan sonra artan su içeriği ile birlikte kuru yoğunluk değerinin düşmeye başladığı gözlemlenmiş olup bu grafiklerin literatürde verilen grafik tiplerine (Şekil 1.3.) uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca zemin içerisinde ince taneli malzemenin bulunma oranına bağlı olarak ince taneli malzeme yüzdesinin artması ile su içeriği – kuru yoğunluk ($w-\rho_k$) grafiklerinde optimum su içeriği değerlerinde artış gözlenmiş olup, maksimum kuru yoğunluk değerinde azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 3.14. Zeminlerin optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluklar

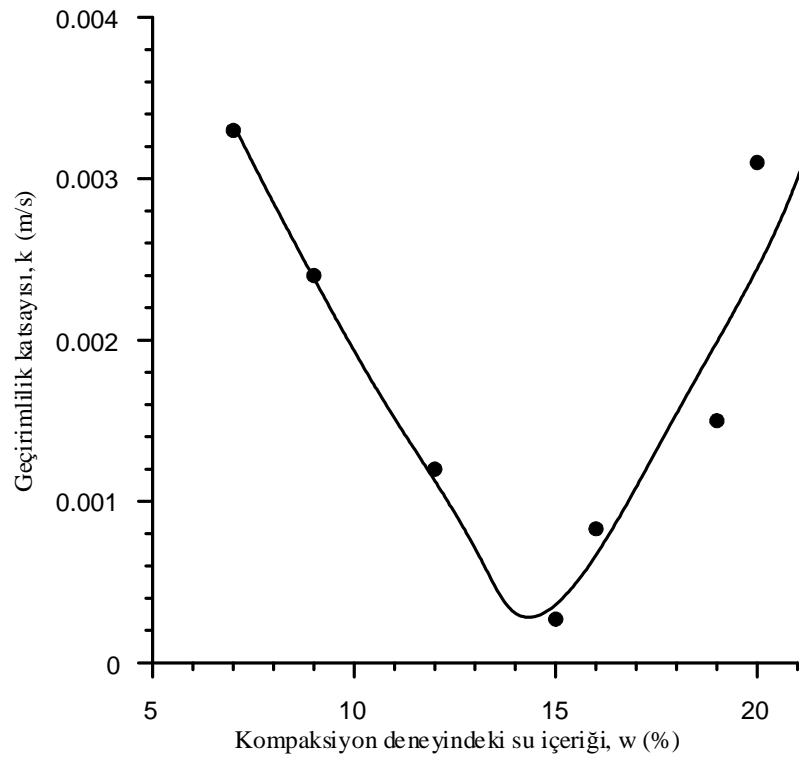
Zemin Adı	Optimum Su İçerikleri $w_{opt}(\%)$	Maksimum Kuru Yoğunluklar $\rho_{k \max} (Mg/m^3)$	İnce Tane (%)
A1	15,5	1,78	18,7
A2	15	1,77	22,5
A3	16,2	1,71	37,5
A4	18	1,63	40,2
A5	20,5	1,45	58

3.4. Düşen Düzeyli Geçirimsizlik Deneyleri

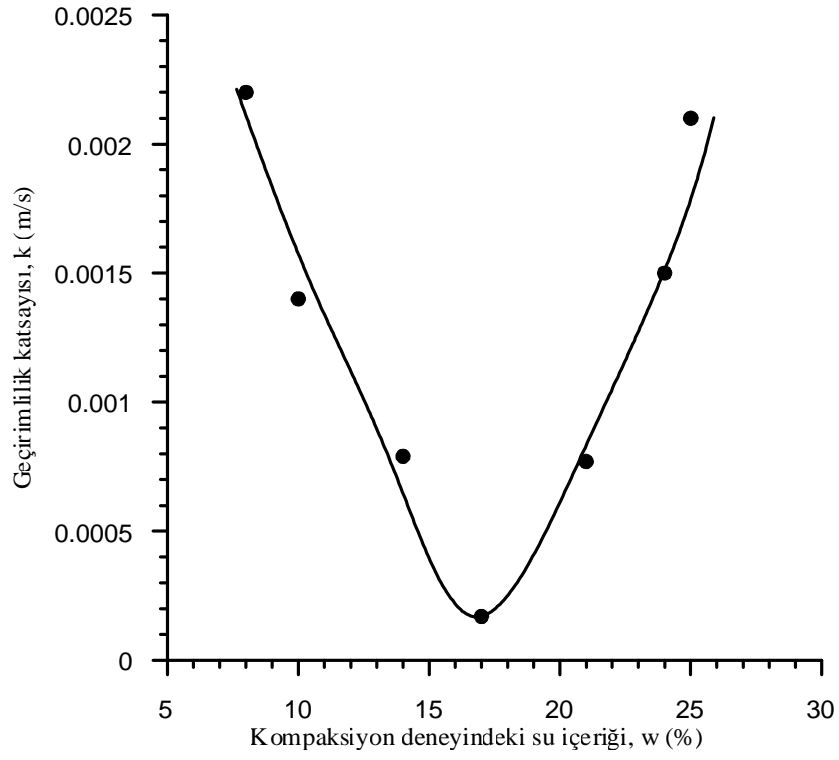
Beş farklı zemin örneğinden alınan numunelerin çeşitli su içeriklerinde sıkıştırılması sonucu elde edilen ($w - k$) su içeriği – geçirimsizlik grafikleri Şekil 3.16. – 3.20.'de gösterilmektedir. Deney verileri hakkında detaylı bilgiler Ek.35.- 39.'da verilmiştir.



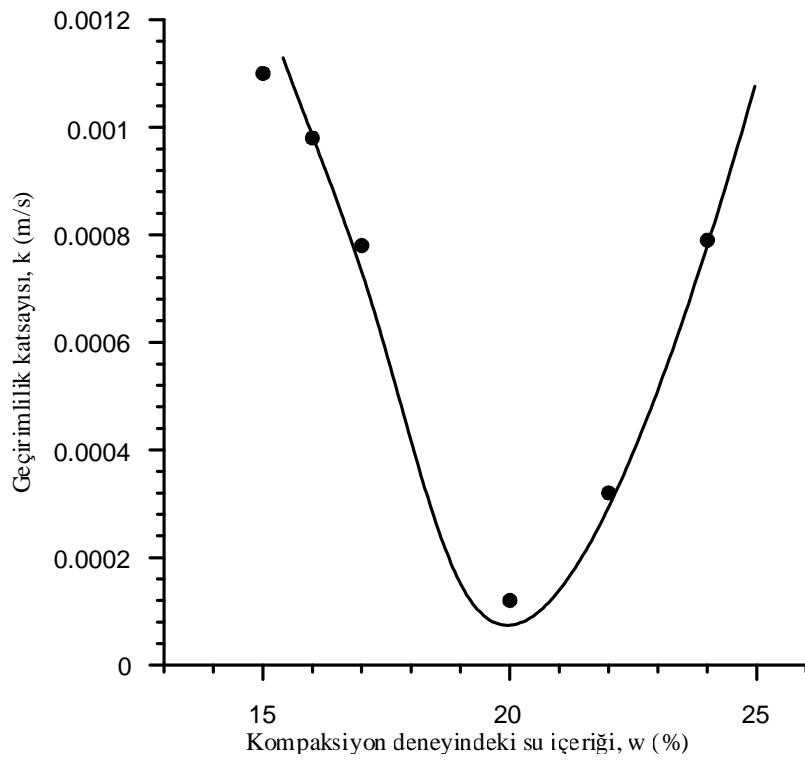
Şekil 3.16. A1 Zeminine ait w-k eğrisi



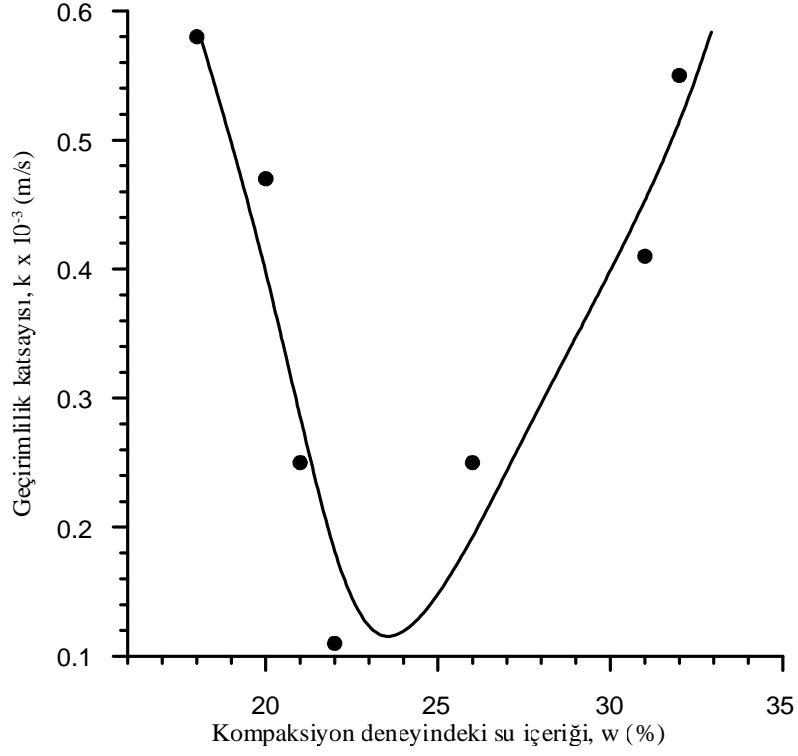
Şekil 3.17. A2 Zeminine ait w-k eğrisi



Şekil 3.18. A3 Zeminine ait w-k eğrisi



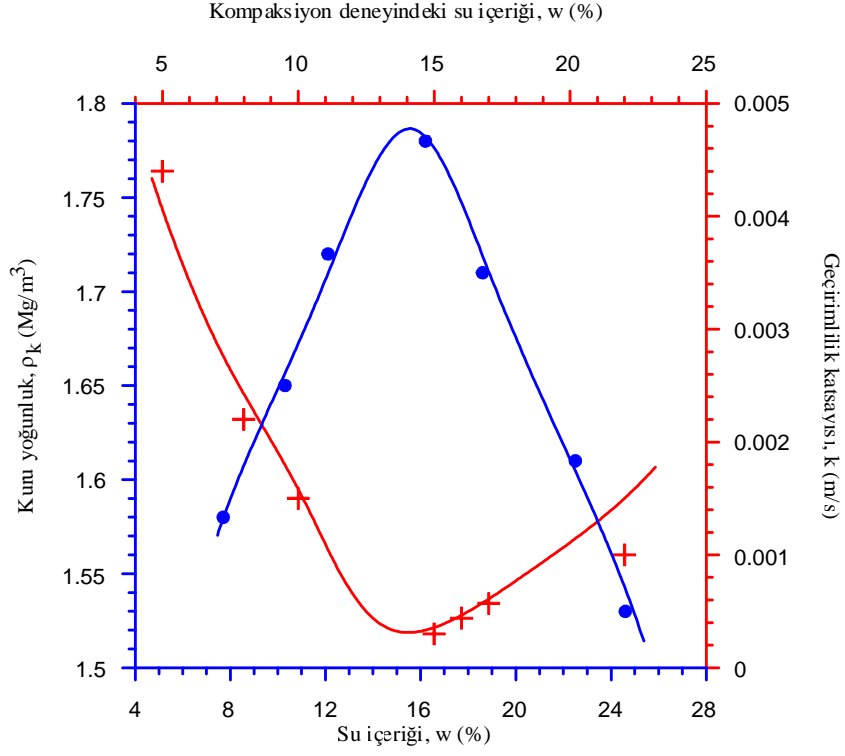
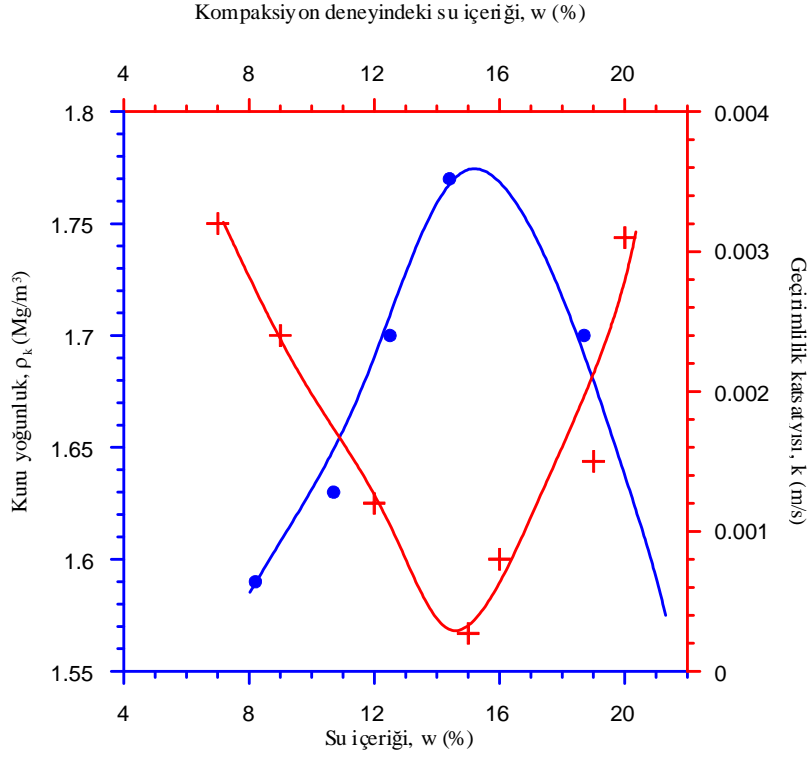
Şekil 3.19. A4 Zeminine w-k eğrisi

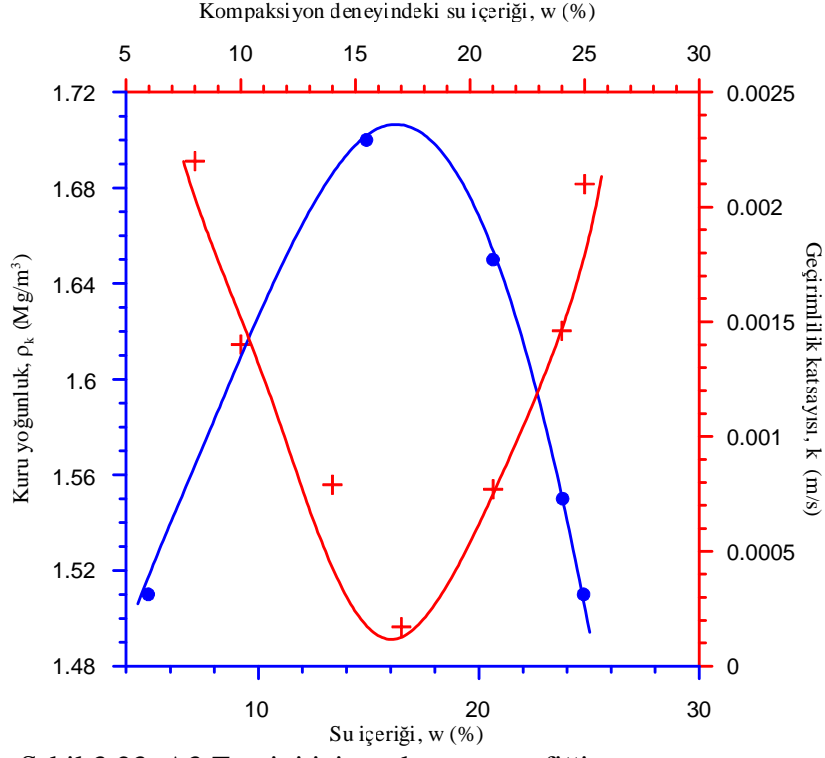
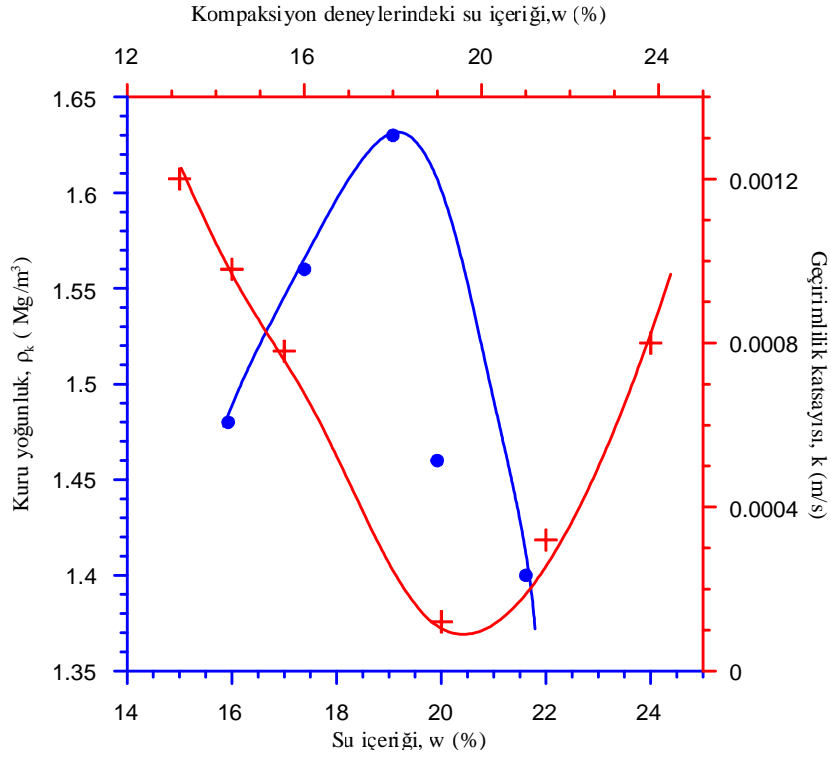


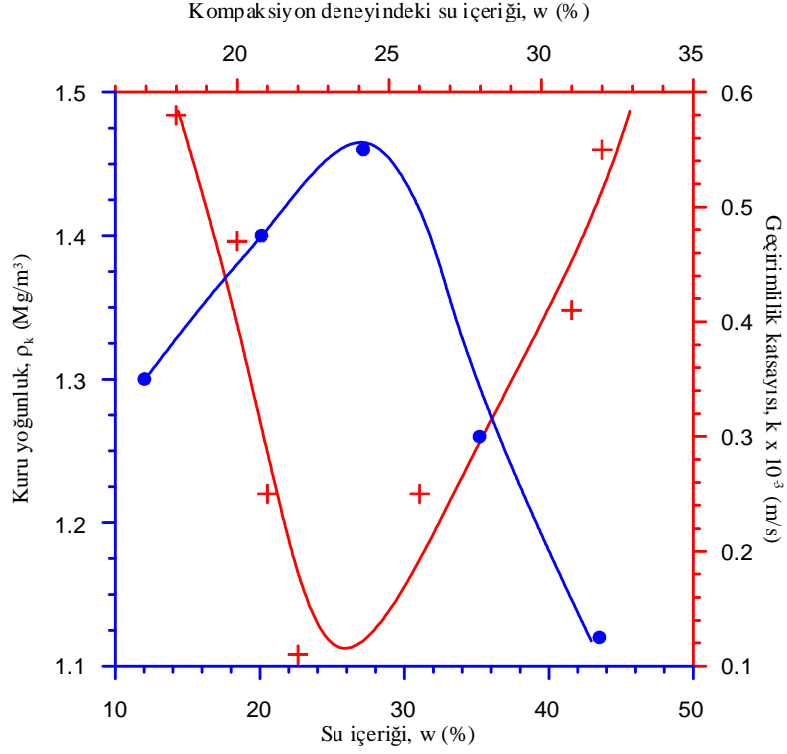
Şekil 3.20. A5 Zeminine ait k-w eğrisi

Yapılan geçirimlilik denelerinde, önceden belirlenen su içeriği değerlerinde standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılan örneklerde ince taneli zemin içeriğinin artmasına bağlı olarak geçirimlilik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan deneylerden elde edilen grafikler (Şekil 3.16 – 3.20) incelendiğinde 1. Bölgede geçirimlilik katsayısı (k) değerinin azaldığı, 2. Bölgede minimum değer aldığı ve 3. Bölgede artan su içeriği (w) ile birlikte geçirimlilik katsayısı (k) değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak elde edilen su içeriği – geçirimlilik katsayısı eğrilerinin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan standart kompaksiyon ve düşen düzeyli geçirimlilik deneyleri sonucu ortaya çıkan grafikler birleştirildiğinde grafiklerin uç noktalarının benzer su içerikleri değerlerine denk geldiği görülmektedir.

Şekil 3.21. A1 Zemini için w-k, w- ρ_k grafiğiŞekil 3.22. A2 Zemini için w-k, w- ρ_k grafiği

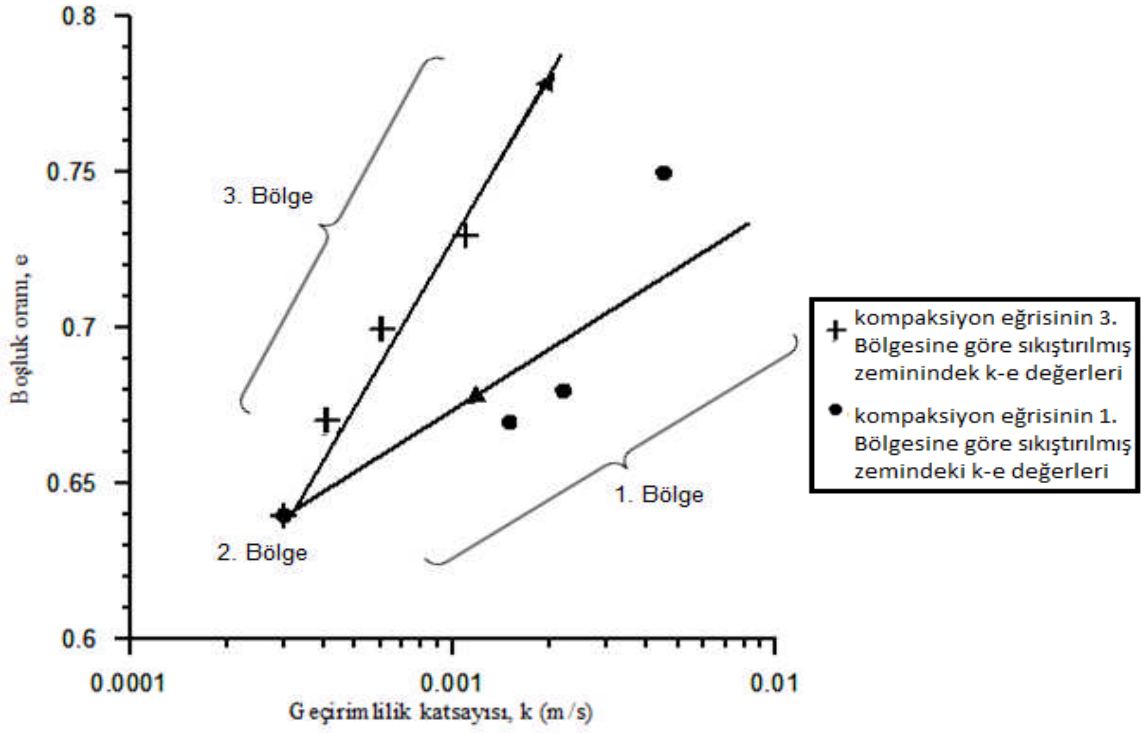
Şekil 3.23. A3 Zemini için w-k, w- ρ_k grafiğiŞekil 3.24. A4 Zemini için w-k, w- ρ_k grafiği



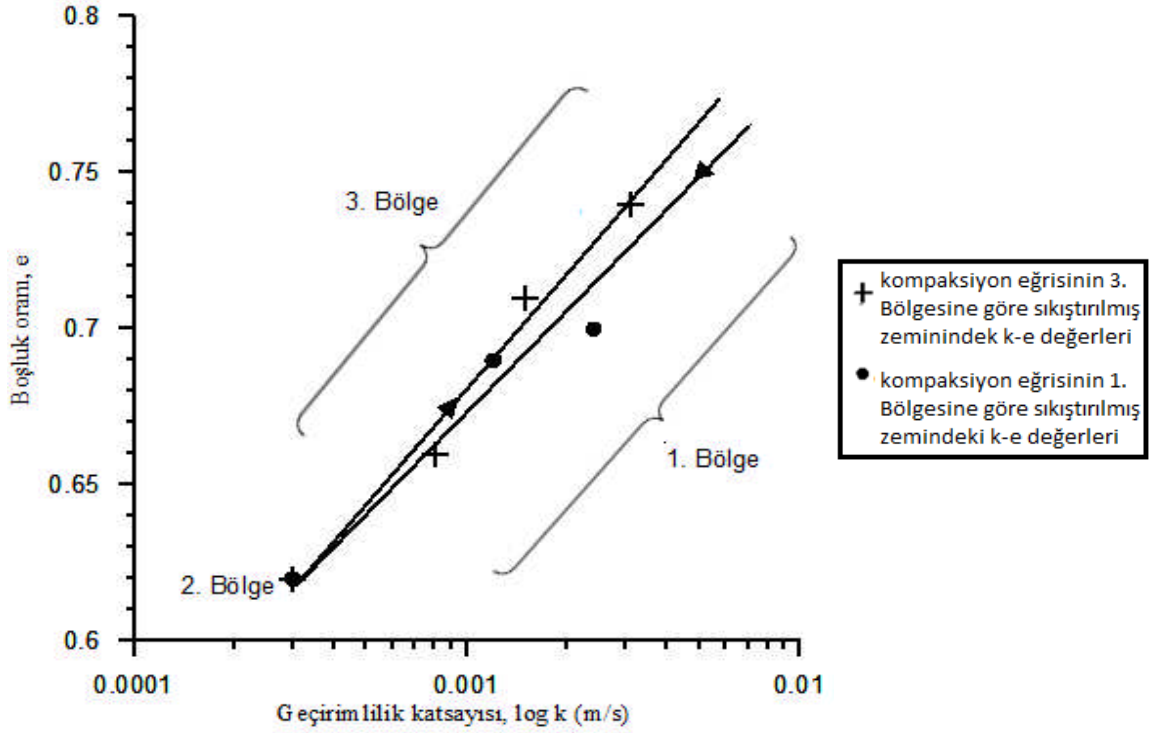
Şekil 3.25. A5 Zemini için w - k, w - ρ_k grafiği

Yukarıda birleştirilen su içeriği – kuru yoğunluk ($w-\rho_k$), su içeriği – geçirimsizlik katsayısı ($w-k$) grafikleri (Şekil 3.21. – 3.25.) incelendiğinde $w-\rho_k$ eğrilerinin tepe noktalarındaki su içeriği değerleri ile $w-k$ eğrilerinin dip noktalarındaki su içeriği değerleri yaklaşık olarak aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni zeminin standart kompaksiyon enerjisinde optimum su içeriğinde sıkıştırılmasıyla zemin boşluklarının minimum değer alması ve minimum düzeydeki boşluk oranının geçirimsizlik katsayısını da minimuma indirgemesidir.

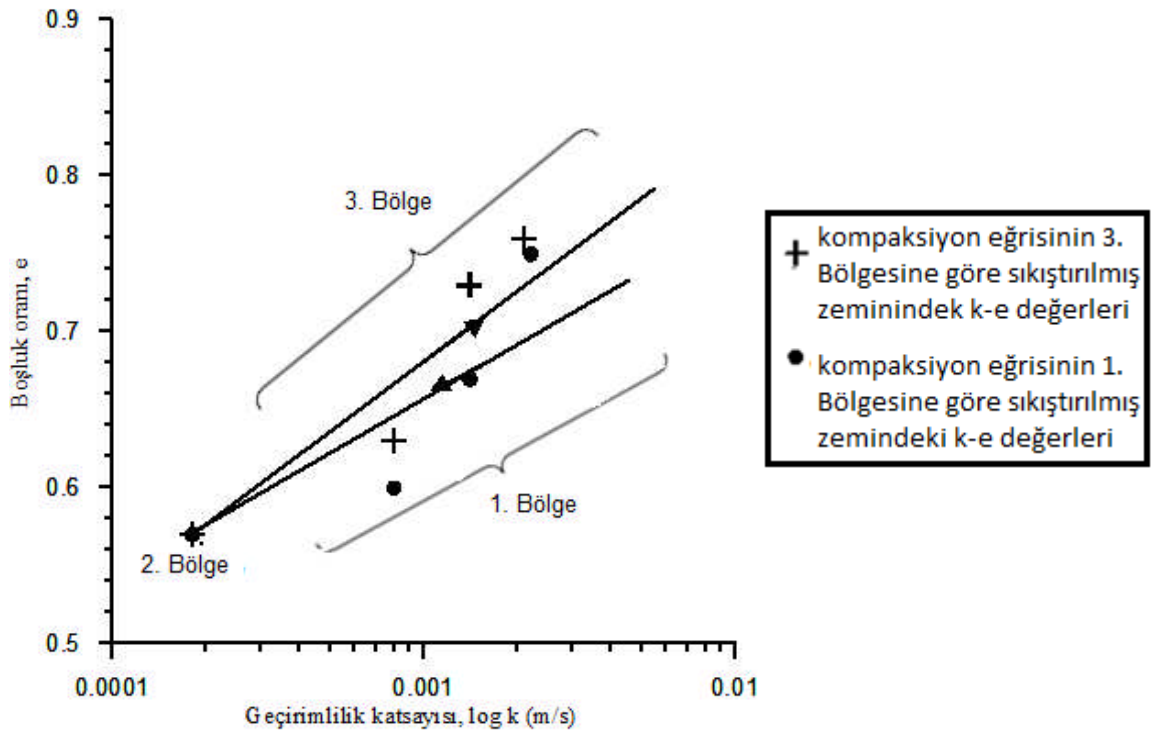
Yapılan düşen düzeyli geçirimsizlik deneyleri sonucunda elde edilen boşluk oranı (e) değerlerin geçirimsizlik katsayısı değerleri ile oluşturulan grafikler, Şekil 3.26. – Şekil 3.30'da verilmiştir.



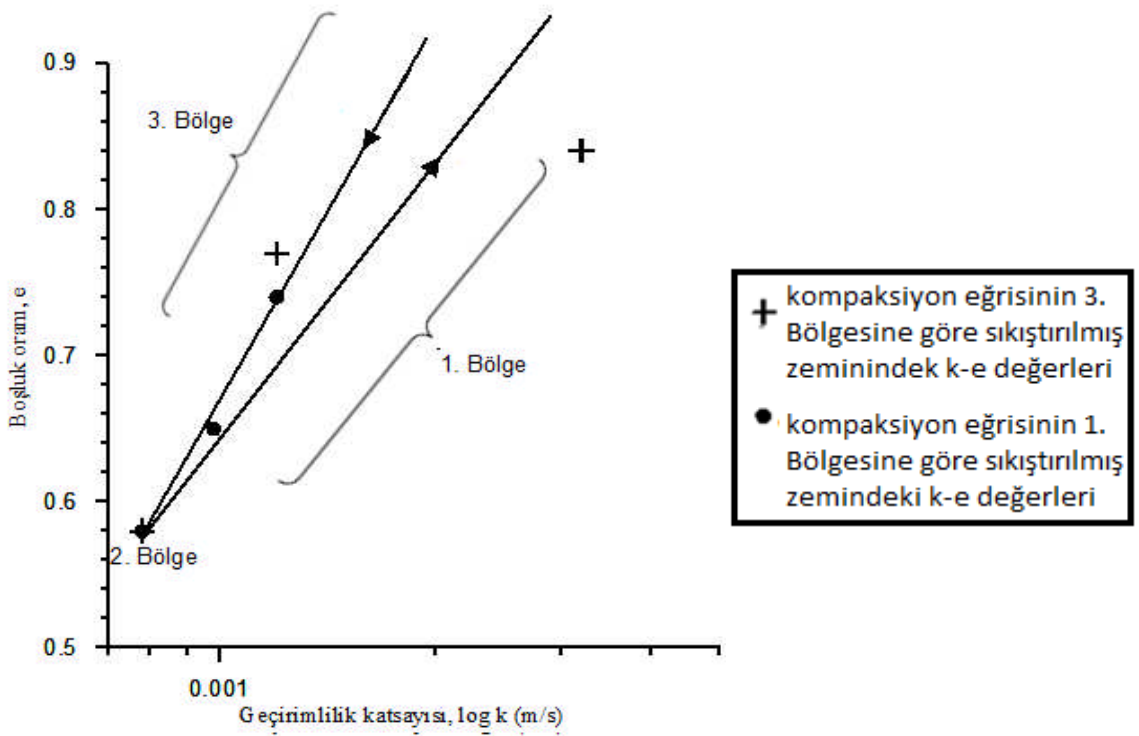
Şekil 3.26. A1 Zemini için k-e grafiği



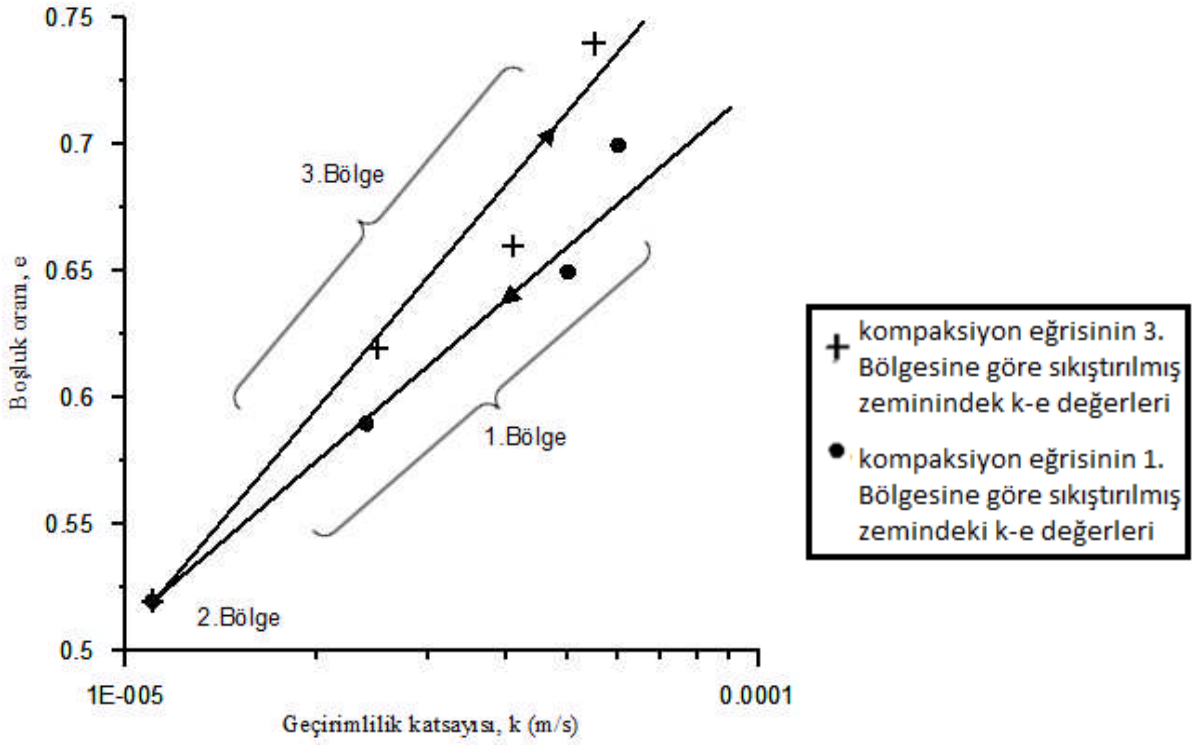
Şekil 3.27. A2 Zemini için k-e grafiği



Şekil 3.28. A3 Zemini için k-e grafiği



Şekil 3.29. A4 Zemini için k-e grafiği



Şekil 3.30. A5 Zemini için k-e grafiği

Yukarıdaki grafiklerden elde edilen bilgilere göre, boşluk oranı değerlerinin, geçirimsizlik katsayısının artmasına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen log k - e grafikleri (Şekil 3.26 – 3.30.) üzerinde gösterilen 1. Bölge, boşluk oranının (e) azalmasına paralel olarak geçirimsizlik katsayısının (k) da azaldığı bölgedir. Geçirimsizlik katsayısının ve boşluk oranının minimum değer aldığı bölgeye 2.Bölge adı verilmiş olup son olarak geçirimsizlik katsayısı değerinin boşluk oranı değerine paralel olarak artmaya başladığı bölgeye de 3.Bölge adı verilmiştir. Sonuç olarak çizilen log k - e grafiklerinin literatür bilgisine uygun şekilde log k - e ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen log k - e grafiklerinde iki farklı lineer doğru çıkartılmıştır. Bu doğruların farklı olmasını nedeni standart kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen $w - \rho_k$ grafiklerinin iki ucunun simetrik olmamasıdır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma kapsamında beş ayrı zemin örneği üzerinde zemin sınıflandırma deneyleri (ıslak analiz, elek analizi, özgül yoğunluk deneyi, likit limit ve plastik limit deneyleri), standart kompaksiyon deneyi ve düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri uygulanmıştır. Yapılan sınıflandırma deneyleri sonucunda örneklerin Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi USCS 'ne göre zemin sınıfları belirlenmiştir. Standart Kompaksiyon Deneyi ve düşen düzeyli geçirimsizlik deneyi sonucunda, zeminin standart kompaksiyon enerjisi ile artan su içeriklerinde sıkıştırılması sonucu ortaya çıkan su içeriği – kuru yoğunluk ($w - \rho_k$) ve su içeriği – geçirimsizlik katsayısı ($w - k$) grafikleri incelenmiş, zeminin geçirimsizlik katsayısının (k), boşluk oranı (e) ile olan ilişkisi irdelenmiştir.

- Elde edilen zemin numuneleri üzerinde yapılan standart kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen $w - \rho_k$ ilişkisi (Şekil 3.11 – 3.15.) literatürde belirtilen biçimde, artan su içeriğiyle birlikte 1. Bölgede kuru yoğunluk (ρ_k) artış göstermekte, 2. Bölgede kuru yoğunluk (ρ_k) maksimum değer almakta ve son olarak 3. Bölgede kuru yoğunluk değeri azalmaya başlamaktadır.
- Yapılan geçirimsizlik deneylerinden elde edilen su içeriği – geçirimsizlik katsayısı grafiklerinde (Şekil 3.16. – 3. 20.), geçirimsizlik katsayısı (k) değerlerin literatüre uygun olarak, 1. Bölgede artan su içeriği değeri ile belirli bir noktaya kadar azaldığı, 2. Bölge adı verilen bir noktada minimum değer aldığı ve artan su içeriği (w) değeri ile birlikte 3. Bölgede geçirimsizlik kat sayısının (k) artmaya başladığı görülmüştür.
- Şekil 3.21. – 3.25. 'de görülen grafiklerde su içeriği – kuru yoğunluk ($w-\rho_k$) ilişkisindeki maksimum kuru yoğunluk değerindeki su içeriği ile su içeriği - geçirimsizlik katsayısı ($w-k$) grafiklerinde minimum geçirimsizlik değerlerine denk gelen su içeriği değerleri beklendiği şekilde aynı düşey hizadadır.
- Geçirimsizlik ve kompaksiyon deneylerinden türetilerek elde edilen $e - \log k$ grafiğinde literatürde belirtilen şekilde boşluk oranı (e) ile geçirimsizlik katsayısının (k) arasındaki ilişkinin ($e - \log k$) doğrusal özellik gösterdiği anlaşılmıştır.

- Sınırlı zaman nedeniyle 5 çeşit zeminde yapılan bu deneyler ve arazi deneyleri, tüm bölgeyi kapsayacak şekilde ve daha sık zemin örnekleri alınarak çeşitli kompaksiyon enerjilerinde yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. and Chapuis, R.P., 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 1104–1122.
- Aytekin, M., 2004. *Deneysel Zemin Mekaniği*, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
- Bjerrum, L., and Huder, J., 1957. Measurement of the permeability of compacted clays. In *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 1, 6–10.
- Bowles, J. E., 1986. *Engineer Properties of Soils and Their Measurement*. McGraw-Hill, New York, 624.
- Cabot, L., and Le Bihan, J.-P., 1993. Quelques propriétés d'une argile sur la « ligne optimale de compactage ». *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 1033–1040.
- Cernica, J.N., 1995. *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*, John Wiley, USA.
- Chapuis, R.P. and Aubertin, M., 2003. On the use of the Kozeny–Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 616–628.
- Cubrinovski, M. and Ishihara, K., 2002. “Maximum and Minimum Void Ratio Characteristics of Sands”, *Soils and Foundations*, 42, 6, 65–78.
- D'Appolonia, D.J., Witman, R.V., and D'Appolonia, E.D., 1969. Sand Compaction with Vibratory Rollers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 95, 263-284.
- Daniel, D.E. and Benson, C.H., 1990. Water content – density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116, 1811–1830.
- Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y.-J. and Howat, M.D., 1996. Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 150–158.
- Dodds, J.S., 2003. “Particle Shape and Stiffness – Effects on Soil Behavior”, M.Sc. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, N.J.

- Garcia-Bengochea, I., Lovell, C.W. and Altschaeffl, A.G., 1979. Pore distribution and permeability of silty clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, 7, 839–856.
- Hazen, A., 1911. Discussion of “Dams on sand formations,” by A.C. Koenig. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 73, 199–203.
- Houpeurt, A., 1974. Mécanique des fluides dans les milieux poreux — Critiques et recherches. Editions Technip, Paris.
- Işık, F., Kuruoğlu, M. ve Özden, G., 2010. The Effects of Gravel Shape and Roughness on Compaction Characteristics of Gravelly Soils, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul.
- Kenney, T.C., Lau, D., and Ofoegbu, G.I., 1984. Permeability of Compacted Granular Materials, Canadian Geotechnical Journal, 21, 4, 726-72.
- Kozeny, J., 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsberichte Wiener Akademie, 136, 2, 271–306.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969. Soil mechanics. Wiley, New York.
- Lee, P.Y., and Suedkamp, R.J., 1972. Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils, Highway Research Record No. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1-9.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R.P. and Bussière, B., 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. Geotechnical and Geological Engineering, 20, 235–259.
- McCarthy, D.F., 2010. Zemin Mekaniğinin Esasları ve Temeller, OYTEV, İstanbul.
- Mitchell, J.K., Hooper, D.R. and Campanella, R.G., 1965. Permeability of compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 91, 4, 41–65.
- Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S., 1997. “Physical Characteristics of Sands with Different Primary Properties”, Soils and Foundation, 37, 3, 53-64.
- Muskat, M., 1937. The Flow of Homogenous Fluids Through Porous Media, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- NAVFAC., 1974. Soil mechanics, foundations, and earth structures. Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) design manual DM7. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Önalp, A., 2007. Geoteknik Bilgisi-1 Zeminler ve Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Poulos, S.J., 1988. "Compaction Control and the Index Unit Weight", Geotechnical Testing Journal, 11, 2, 100-108.
- Prapaharan, S., White, D.M. and Altschaeffl, A.G., 1991. Fabric of field- and laboratory-compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, 12, 1934–1940.
- Proctor, R.R., 1933. The Design and Construction of Rolled Earth Dams, Engng., News record, 26, 111.
- Samarasinghe, A.M., Huang, Y.H. and Drnevich, V.P. 2002. Permeability and Consolidation of Normallay Consolidated Soils, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, 6, 835-850.
- Santamarina, J.C. and Cho, G.C., 2004. "Soil Behavior: The Role of Particle Shape", *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*, R.J. Jardine, D.M. Potts, and K.G. Higgins, eds., 1, Thomas Telford, London, 604-617.
- Scheidegger, A.E., 1953. Theoretical models of porous matter. *Producers Monthly*, 10, 17, 17–23.
- Scheidegger, A.E., 1954. Statistical hydrodynamics in porous media. *Journal of Applied Physics*, 25, 994–1001.
- Scheidegger, A.E., 1974. *The physics of flow through porous media*. 3rd ed. University of Toronto Press, Toronto, Ont.
- Seelheim, F., 1880. Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. *Zeitschrift für analytische Chemie*, 19, 387–402.
- Sridharan, A.A.G. and Diamond S., 1971. Pore Size Distribution Studies, *ASCE j. Soil Mech. Found. Div.*, 97, 5, 8151.
- Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1948. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York.
- TS 1900, 2006. *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri-1*.
- Uzuner, B.A., 2007. *Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği*, Derya Kitapevi, Trabzon.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E., 1999. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Géotechnique*, 49, 2, 143–159.

Vukovi, M. and Soro, A., 1992. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition. Water Resources Publications, Littleton, Colo.

Watabe Y., Leroueil S. and Le Bihan P., 2000. Influences of Compaction Conditions on Pore- Size Distribution and Saturated Hydrolic Conductivity of Glacial Till, Canadian Geotechnical Journal.

Yetimoğlu, T., Çiçek, E. ve Güler, E., 2001. Effects of Geosynthetics on Compressibility of Soils.

Youd, T.L., 1973. "Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands", ASTM Special Technical Publication, 98-112.

6. EKLER

Ek 1. A1 Zemini için ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deney formu

Deney Adı									
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU							
Deney Tarihi									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geçen Zaman (dk.)	Hidrometre okuması (R)	Hidrometre Okuma Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okumaları	Su Sıcaklığı T °C	T °C'deki suyun özg. yoğunluğu	T °C'deki suyun Viskozitesi (kNs/m ²)	Efektif derinlik L (mm)	Tane Çapı, D (mm)	Yüzde Geçen (%P')
0,25	27	0,5	26,5	21	0,99799	0,00984	9,2	0,0794	82,7
0,5	25	0,5	24,5	21	0,99799	0,00984	9,7	0,0576	76,5
1	23	0,5	22,5	21	0,99799	0,00984	10,2	0,0418	70,3
2	19	0,5	18,5	21	0,99799	0,00984	11,3	0,0311	57,8
5	15	0,5	14,5	21	0,99799	0,00984	12,3	0,0205	45,3
10	13	0,5	12,5	21	0,99799	0,00984	12,9	0,0148	39,0
15	12	0,5	11,5	21	0,99799	0,00984	13,1	0,0122	35,9
30	10	0,5	9,5	21	0,99799	0,00984	13,7	0,0088	29,7
60	9	0,5	8,5	21	0,99799	0,00984	13,9	0,0063	26,5
240	6	0,5	5,5	23	0,99754	0,00938	14,7	0,0031	17,2
1440	2	0,5	1,5	26	0,99678	0,00875	15,8	0,0013	4,7

Ek.2. A2 Zemini için ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deney formu

Deney Adı									
Deneyi Yapan		H.Alper KAMİLOĞLU							
Deney Tarihi									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geçen Zaman (dk.)	Hidrometre okuması (R)	Hidrometre Okuma Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okumaları	Su Sıcaklığı T ⁰ C	T ⁰ C'deki suyun Öz. Yoğunluğu	T ⁰ C'deki suyun Viskozitesi (kNs/m ²)	Efektif derinlik L(cm)	Tane Çapı, D(mm)	Yüzde Geçen (%P')
0,25	27	0	27	21	0,997992	9,84	9,2	0,0805	85,2
0,5	25	0	25	21	0,997992	9,84	9,7	0,0584	78,8
1	23	0	23	21	0,997992	9,84	10,2	0,0424	72,5
2	19	0	19	21	0,997992	9,84	11,3	0,0315	59,9
5	15	0	15	21	0,997992	9,84	12,3	0,0209	47,3
10	13	0	13	21	0,997992	9,84	12,9	0,0151	41
15	12	0	12	21	0,997992	9,84	13,1	0,0124	37,8
30	10	0	10	21	0,997992	9,84	13,7	0,009	31,5
60	9	0	9	21	0,997992	9,84	13,9	0,0064	28,4
240	6	0	6	23	0,997512	9,38	14,7	0,0032	18,9
1440	2	0	2	26	0,996783	8,75	15,8	0,0013	6,3

Ek.3. A3 Zemin için ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deney formu

Deney Adı									
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU							
Deney Tarihi									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geçen Zaman (dk.)	Hidrometre okuması (R)	Hidrometre Okuma Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okumaları	Su Sıcaklığı T °C	T °C'deki suyun Özg. Yoğunluğu	T °C'deki suyun Viskozitesi, (kNs/m ²)	Efektif derinlik L (mm)	Tane Çapı, D (mm)	Yüzde Geçen (%P')
0,25	27,5	0	27,5	25	0,997044	0,00895	9,05	0,07616	86,65
0,5	27	0	27	25	0,997044	0,00895	9,2	0,05430	85,07
1	27	0	27	25	0,997044	0,00895	9,2	0,03839	85,07
2	26	0	26	25	0,997044	0,00895	9,4	0,02744	81,92
5	24	0	24	25	0,997044	0,00895	10	0,01790	75,62
10	23	0	23	25	0,997044	0,00895	10,2	0,01278	72,47
15	22	0	22	25	0,997044	0,00895	10,5	0,01059	69,32
30	16	0	16	25	0,997044	0,00895	12,1	0,00803	50,41
60	2	0	2	25	0,997044	0,00895	15,8	0,00649	6,3
240	1,5	0	1,5	25	0,997044	0,00895	15,9	0,00325	4,73
1440	1	0	1	25	0,997044	0,00895	16	0,00133	3,15

Ek. 4. A4 Zemin için ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deney formu

Deney Adı									
Deneyi Yapan		H.Alper KAMİLOĞLU							
Deney Tarihi									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geçen Zaman (dk.)	Hidrometre okuması (R)	Hidrometre Okuma Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okumaları	Su Sıcaklığı T °C	T °C'deki suyun Öz. Yoğunluğu	T °C'deki suyun Viskozitesi (kNs/m ²)	Efektif derinlik L (mm)	Tane Çapı, D (mm)	Yüzde Geçen (%P')
0,25	43	0	43	24	0,997296	0,00916	9,2	0,0783	98,2
0,5	42,5	0	42,5	24	0,997296	0,00916	9,3	0,0556	96,6
1	42	0	42	24	0,997296	0,00916	9,4	0,0395	95,1
2	41	0	41	24	0,997296	0,00916	9,6	0,0282	92,0
5	37,5	0	37,5	24	0,997296	0,00916	10,5	0,0187	85,9
10	34	0	34	24	0,997296	0,00916	10,7	0,0133	79,8
15	30	0	30	24	0,997296	0,00916	11,4	0,0112	70,5
30	15	0	15	24	0,997296	0,00916	13,8	0,0087	36,8
60	1,5	0	1,5	24	0,997296	0,00916	16,2	0,0067	6,1
240	1,5	0	1,5	24	0,997296	0,00916	16,2	0,0033	3,1
1440	1	0	1	24	0,997296	0,00916	16,3	0,0013	3,1

Ek.5. A5Zemini için ıslak analiz (hidrometre yöntemi) deney formu

Deney Adı		“							
Deneyi Yapan		H.Alper KAMİLOĞLU							
Deney Tarihi									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Geçen Zaman (dk.)	Hidrometre okuması (R)	Hidrometre Okuma Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okumaları	Su Sıcaklığı T °C	T °C'deki suyun Özg. Yoğunluğu	T °C'deki suyun Viskozitesi (kNs/m ²)	Efektif derinlik L (mm)	Tane Çapı, D (mm)	Yüzde Geçen (%P')
0,25	32	0	32	24	0,997296	0,00916	7,8	0,07210	100
0,5	31,5	0	31,5	24	0,997296	0,00916	8,2	0,05227	99,9
1	31	0	31	24	0,997296	0,00916	8,1	0,03674	98,3
2	30	0	30	24	0,997296	0,00916	8,4	0,02645	95,1
5	28	0	28	24	0,997296	0,00916	8,9	0,01722	88,8
10	26	0	26	24	0,997296	0,00916	9,4	0,01251	82,4
15	23	0	23	24	0,997296	0,00916	10,2	0,01064	72,9
30	12	0	12	24	0,997296	0,00916	13,1	0,00853	38,0
60	2	0	2	24	0,997296	0,00916	15,8	0,00662	6,3
240	1	0	1	24	0,997296	0,00916	16	0,00333	3,2
1440	1	0	1	24	0,997296	0,00916	16	0,00136	3,2

Ek.6. A1 Zemini için elek analizi deney formu

Zeminin Tanımı				
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU		
Deney Tarihi				
1	2	3	4	5
Elek No	Elek Çapı	Elek Üstünde Kalan	Elekten Geçen	Elekten Geçen Yüzde
	(mm)	(g)	(g)	(%)
(3/8) ^u	9,53	0	1000	100
4	4,75	142,82	857,18	85,7
10	2	221,11	636,07	63,6
25	0,75	258,09	377,98	37,8
40	0,42	46,42	331,56	33,2
60	0,25	73,46	258,1	25,8
100	0,15	54,02	204,08	20,4
200	0,075	16,93	187,15	18,7
Toplam		812,85		
Toplam malzeme		1000		

Ek.7. A2 Zemini için elek analizi formu

Zeminin Tanımı				
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU		
Deney Tarihi				
1	2	3	4	
Elek No	Elek Çapı	Elek Üstünde Kalan	Elekten Geçen	Elekten Geçen Yüzde
	(mm)	(g)	(g)	(%)
(3/8)"	9,53	0	1000	100
4	4,75	131,79	868,21	86,8
10	2	216,53	651,68	65,2
25	0,75	212,3	439,38	43,9
40	0,42	75,32	364,06	36,4
60	0,25	67,52	296,54	29,6
100	0,15	41,36	255,18	25,5
200	0,075	30,04	225,14	22,5
Toplam		774,86		
Toplam malzeme		1000		

Ek.8. A3 Zemini için elek analizi formu

Zeminin Tanımı				
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU		
Deney Tarihi				
1	2	3	4	5
Elek No	Elek Çapı	Elek Üstünde Kalan	Elekten Geçen	Elekten Geçen Yüzde
	(mm)	(g)	(g)	(%)
(3/8)"	9,53	0	1000	100
4	4,75	64,23	935,77	93,6
10	2	105,12	830,65	83,1
25	0,75	191,71	638,94	63,9
40	0,42	59,58	579,36	57,9
60	0,25	111,56	467,8	46,8
100	0,15	52,05	415,75	41,6
200	0,075	13,36	402,39	40,2
Toplam		597,61		
Toplam malzeme		1000		

Ek.9. A4 Zemini için elek analizi formu

Zeminin Tanımı				
Deneyi Yapan		H.Alper KAMILOĞLU		
Deney Tarihi				
1	2	3	4	5
Elek No	Elek Çapı	Elek Üstünde Kalan	Elekten Geçen	Elekten Geçen Yüzde
	(mm)	(g)	(g)	(%)
(3/8)"	9,53	0	1000	100
4	4,75	122,04	877,66	87,8
10	2	196,28	681,68	68,2
25	0,75	197,66	484,02	48,4
40	0,42	36,11	447,91	44,8
60	0,25	35,89	412,02	41,2
100	0,15	29,11	382,91	38,3
200	0,075	8,1	374,81	37,5
Toplam		625,19		
Toplam malzeme		1000		

Ek.10. A5 Zemini için elek analizi formu

Deneyi Yapan		H. Alper KAMILOĞLU		
Deney Tarihi				
1	2	3	4	5
Elek No	Elek Çapı	Elek Üstünde Kalan	Elekten Geçen	Elekten Geçen Yüzde
	(mm)	(g)	(g)	(%)
(3/8)"	9,53	0	1000	100
4	4,75	75,2	924,8	92,4
10	2	102,22	822,58	82,3
25	0,75	137,91	684,67	68,5
40	0,42	35,37	649,3	64,9
60	0,25	26,96	622,34	62,2
100	0,15	18,58	603,76	60,4
200	0,075	23,53	580,23	58,0
Toplam		419,77		
Toplam malzeme		1000		

Ek.11.A1 Zemini için kompaksiyon deney formu

Deneyi Yapan: H.Alper KAMİLOĞLU		Deney Tarihi:					
Numunenin Özgül Yoğunluğu: 2,75		Kompaksiyon Kabının Hacmi:1000 ml					
		Kompaksiyon Kabının Kütlesi: 2194 g					
Kuru Yoğunluğun Belirlenmesi							
Deney No	1	2	3	4	5	6	7
Kompaksiyon kabı + sıkıştırılmış zemin (g)	3893	4016,5	4123,5	4264,5	4218	4172	4105
Kompaksiyon kabının boş kütlesi (g)	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5
Sıkıştırılmış zeminin kütlesi (g)	1698,5	1822	1929	2070	2023,5	1977,5	1910,5
Islak yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_n	1,7	1,82	1,93	2,07	2,02	1,98	1,91
Kuru Yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_k	1,58	1,65	1,72	1,78	1,71	1,61	1,53
Boşluk oranı,e, (%)	0,75	0,68	0,67	0,64	0,67	0,7	0,73
Su İçeriğinin Belirlenmesi							
Deney No	1	2	3	4	5	6	7
Islak zemin + dara (g)	208,86	195,65	275,57	279,99	252,91	271,2	272,75
Kuru zemin + dara (g)	198,17	183,57	251,87	249,38	222,41	231,84	232,45
Su kütlesi (g)	10,69	12,08	23,7	30,61	30,5	39,36	40,3
Dara (g)	59,33	65,95	56,15	60,18	58,7	57,13	68,47
Kuru Zemin kütlesi (g)	138,84	117,62	195,72	189,2	163,71	174,71	163,98
Su içeriği, w, (%)	7,7	10,3	12,1	16,2	18,6	22,5	24,6
Sıfır Hava Boşluğu Çizgisi (Doygunluk Derecesi Çizgisi) nin							
Optimum su içeriği (%), w_{opt}: 15,5							
Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m^3):1,78							

Ek.12. A2 Zemini için kompaksiyon deneyi formu

Deneyi Yapan: H.Alper KAMİLOĞLU	Deney Tarihi:				
Numunenin Özgül Yoğunluğu: 2,73	Kompaksiyon Kabının Hacmi: 1000 ml				
	Kompaksiyon Kabının Kütlesi: 2194 g				
Kuru Yoğunluğun Belirlenmesi					
Deney No	1	2	3	4	5
Kompaksiyon kabı + sıkıştırılmış zemin (g)	3912,5	4001	4108	4220,5	4210
Kompaksiyon kabının boş kütlesi (g)	2194	2194	2194	2194	2194
Sıkıştırılmış zeminin kütlesi (g)	1718,5	1807	1914	2026,5	2016
Islak yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_n	1,72	1,81	1,91	2,02	2,01
Kuru Yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_k	1,59	1,63	1,7	1,77	1,7
Boşluk oranı, e, (%)	0,77	0,7	0,69	0,62	0,66
Deney No	1	2	3	4	5
Islak zemin + dara (g)	170,81	216,75	181,18	252,95	205,58
Kuru zemin + dara (g)	162,44	202,37	167,23	228,54	205,58
Su kütlesi (g)	8,37	14,38	13,95	24,41	26,15
Dara (g)	59,97	68,47	56,05	58,57	65,95
Kuru Zemin kütlesi (g)	102,47	133,9	111,18	169,97	139,63
Su içeriği, w, (%)	8,2	10,7	12,5	14,4	18,7
Optimum su içeriği (%), w_{opt} : 15					
Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m^3): 1,77					

Ek.13. A3 Zeminin için kompaksiyon deneyi formu

Deneyi Yapan: H.Alper KAMİLOĞLU	Deney Tarihi:				
Numunenin Özgül Yoğunluğu: 2,59	Kompaksiyon Kabının Hacmi: 1000 ml				
	Kompaksiyon Kabının Kütlesi:2194,5 g				
Kuru Yoğunluğun Belirlenmesi					
Deney No	1	2	3	4	5
Kompaksiyon kabı + sıkıştırılmış zemin (g)	3872,5	4117,5	4095	4033,5	4002
Kompaksiyon kabının boş kütlesi (g)	2194	2194	2194	2194	2194
Sıkıştırılmış zeminin kütlesi (g)	1678,5	1923,5	1901	1839,5	1808
Islak yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_n	1,68	1,92	1,9	1,84	1,81
Kuru Yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_k	1,48	1,56	1,63	1,46	1,4
Boşluk oranı, e, (%)					
Su İçeriğinin Belirlenmesi					
Deney No	1	2	3	4	5
Islak zemin + dara (g)	192,09	108,05	154,67	133,98	118,29
Kuru zemin + dara (g)	177,81	93,05	139,81	113,65	97,94
Su kütlesi (g)	14,28	15	14,86	20,33	20,35
Dara (g)	68,48	28,91	51,56	35,32	28,66
Kuru Zemin kütlesi (g)	109,33	64,14	88,25	78,33	69,28
Su içeriği, w, (%)	14,28	16	18	19	21
Optimum su içeriği (%), w_{opt}: 18					
Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m^3): 1,63					

Ek.14. A4 Zemini için kompaksiyon deney formu

Denei Yapan: H. Alper KAMILOĞLU	Denei Tarihi:				
Numunenin Özgül Yoğunluğu: 2,68	Kompaksiyon Kabının Hacmi: 1000 ml				
	Kompaksiyon Kabının Kütlesi: 2194,5 g				
Kuru Yoğunluğun Belirlenmesi					
Denei No	1	2	3	4	5
Kompaksiyon kabı + sıkıştırılmış zemin (g)	3778,5	4153	4180	4113,5	4074
Kompaksiyon kabının boş kütlesi (g)	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5	2194,5
Sıkıştırılmış zeminin kütlesi (g)	1583	1958	1984,5	1918	1894,5
Islak yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_n	1,58	1,96	1,98	1,91	1,87
Kuru Yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_k	1,51	1,7	1,65	1,55	1,51
Boşluk oranı, e , (%)	0,75	0,6	0,62	0,7	0,75
Su İçeriğinin Belirlenmesi					
Denei No	1	2	3	4	5
Islak zemin + dara (g)	136,97	163,89	210,13	150,18	140,95
Kuru zemin + dara (g)	133,5	150,3	183,00	131,21	140,95
Su kütlesi (g)	3,42	13,59	27,13	13,67	25,08
Dara (g)	65,95	59,27	51,53	51,53	26,85
Kuru Zemin kütlesi (g)	133,55	150,3	183	150,2	115,87
Su içeriği, w , (%)	5	14,92	20,64	23,8	24,75
Optimum su içeriği (%), w_{opt} : 16,2					
Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m^3): 1,71					

Ek 15. A5 Zemini için kompaksiyon deneyi formu

Deneyi Yapan: H. Alper KAMILOĞLU	Deney Tarihi:				
Numunenin Özgül Yoğunluğu: 2,53	Kompaksiyon Kabının Hacmi: 1000 ml				
	Kompaksiyon Kabının Kütlesi: 2195,5 g				
Kuru Yoğunluğun Belirlenmesi					
Deney No	1	2	3	4	5
Kompaksiyon kabı + sıkıştırılmış zemin (g)	3699	3940	4015,5	3909	3797
Kompaksiyon kabının boş kütlesi (g)	2195,5	2195,5	2195,5	2195,5	2195,5
Sıkıştırılmış zeminin kütlesi (g)	1503,5	1745,5	1821	1714,5	1602,5
Islak yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_n	1,5	1,74	1,82	1,71	1,6
Kuru Yoğunluğu (Mg/m^3), ρ_k	1,3	1,4	1,46	1,26	1,12
Boşluk oranı, e, (%)	0,72	0,65	0,62	0,67	0,75
Su İçeriğinin Belirlenmesi					
Deney No	1	2	3	4	5
Islak zemin + dara (g)	146,21	168,62	197,71	166,54	203,93
Kuru zemin + dara (g)	134,22	141,48	171,86	137,42	160,43
Su kütlesi (g)	11,99	25,85	27,14	29,12	43,5
Dara (gr)	57,09	58,93	68,58	56,07	59,96
Kuru Zemin kütlesi (gr)	77,13	103,28	82,55	81,35	100,47
Su içeriği, w, (%)	11,99	20,1	27,14	35,2	43,5
Optimum su içeriği (%), w_{opt} : 20,5					
Maksimum Kuru Yoğunluk (Mg/m^3): 1,45					

Ek.16. A1 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	31,92
Zemin + Piknometre (g)	48,64
Su + Piknometre (g)	134,29
Su + Zemin + Piknometre (g)	144,92
24 C0 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,997296
Zeminin ağırlığı (g)	12,66
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,74

Ek.17. A1 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,01
Zemin + Piknometre (g)	47,51
Su + Piknometre (g)	134,3
Su + Zemin + Piknometre (g)	144,23
24 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,997296
Zeminin ağırlığı (g)	15,5
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,77

Ek.18. A1 Zemin için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	31,92
Zemin + Piknometre (g)	47,2
Su + Piknometre (g)	133,95
Su + Zemin + Piknometre (g)	143,7
24 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,997296
Zeminin ağırlığı (g)	15,28
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,76

Ek. 19. A2 Zemin için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,2
Zemin + Piknometre (g)	44,86
Su + Piknometre (g)	134,79
Su + Zemin + Piknometre (g)	142,72
24 C0 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	12,66
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,67

Ek. 20. A2 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,23
Zemin + Piknometre (g)	42,16
Su + Piknometre (g)	134,79
Su + Zemin + Piknometre (g)	141,15
2 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	9,93
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	

Ek. 21. A2 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	31,77
Zemin + Piknometre (g)	41,31
Su + Piknometre (g)	134,74
Su + Zemin + Piknometre (g)	140,73
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	9,93
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	

Ek.22. A3 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,4
Zemin + Piknometre (g)	44,55
Su + Piknometre (g)	134,62
Su + Zemin + Piknometre (g)	142,33
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (gr)	12,15
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,73

Ek.23. A3 Zemin için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan :H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,05
Zemin + Piknometre (g)	42,71
Su + Piknometre (g)	135,06
Su + Zemin + Piknometre (g)	141,47
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	10,66
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,50

Ek.24. A3 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	31,77
Zemin + Piknometre (g)	46,16
Su + Piknometre (g)	134,79
Su + Zemin + Piknometre (g)	143,15
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	10,39
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,57

Ek.25. A4 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H. Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	31,96
Zemin + Piknometre (g)	43,77
Su + Piknometre (g)	134,6
Su + Zemin + Piknometre (g)	142,07
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	11,81
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,71

Ek.26. A4 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H. Alper KAMİLOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,25
Zemin + Piknometre (g)	42,54
Su + Piknometre (g)	135,08
Su + Zemin + Piknometre (g)	141,67
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	10,29
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,68

Ek.27. A4 Zemin için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H. Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	33,55
Zemin + Piknometre (g)	45,3
Su + Piknometre (g)	134,08
Su + Zemin + Piknometre (g)	141,5
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	11,75
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,70

Ek. 28. A5 Zemin için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,59
Zemin + Piknometre (g)	42,63
Su + Piknometre (g)	134,6
Su + Zemin + Piknometre (g)	140,65
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	10,04
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,51

Ek. 29. A5 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,21
Zemin + Piknometre (g)	41,81
Su + Piknometre (g)	135,04
Su + Zemin + Piknometre (g)	140,64
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	10,04
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,53

Ek. 30.A5 Zemini için özgül yoğunluk deney formu

Numunenin Tanımı :	
Deneyi Yapan : H.Alper KAMILOĞLU	
Deney Tarihi :	
Deney No :	
Piknometre(g)	32,77
Zemin + Piknometre (g)	45,31
Su + Piknometre (g)	134,74
Su + Zemin + Piknometre (g)	142,4
22 C ⁰ 'de su yoğunluğu (Mg/m ³)	0,99777
Zeminin ağırlığı (g)	12,54
Özgül Yoğunluk (Mg/m ³)	2,56

Ek. 31. A1 Zemini için likit ve plastik limit deney formu

Deneyin Adı	Su İçeriği Deneyi				Plastik Limit Deneyi	
Deney No :	1	2	3	4	1	2
1. Kap No	-	-	-	-	23	-
2. Dara (g)	-	-	-	-	58,6	-
3.Dara+ıslak num.(g)	-	-	-	-	83,93	-
4.Dara+kuru num.(g)	-	-	-	-	78,48	-
5.Su Kütlesi (g)	-	-	-	-	5,45	-
6.Kuru num.(g)	-	-	-	-	19,88	-
7.Su İçeriği (%)	-	-	-	-	27	-
Deneyin Adı	Likit Limit Deneyi					
Deney No	1	2	3	4		
1.Kap No:	12	10	99	9		
2. dara (g)	56,09	59,01	56,99	68,46		
3.Dara + ıslak num.(g)	96,43	96,11	123,86	133,95		
4.Dara + kuru num.(g)	86,38	87,2	110,12	118,82		
5. su Kütlesi (g)	10,05	8,91	13,74	15,13		
6. Kuru num. (g)	30,29	28,19	44,13	50,36		
7.Su İçeriği (%)	33	32	31	30		
8. Vuruş Sayısı , N	18	22	24	30		
Doğal su içeriği (%)	Plastik limit (%)		Likit limit (%)			
	27		31,5			

Ek. 32. A2 Zemini için likit ve plastik limit deney formu

Deneyin adı	Su içeriği deneyi				Plastik Limit Deneyi	
Deney No :	1	2	3	4	1	2
1. Kap No	-	-	-	-	13	-
2. Dara (g)	-	-	-	-	57,09	-
3.Dara+ıslak num.(g)	-	-	-	-	138,72	-
4.Dara+kuru num.(g)	-	-	-	-	121,6	-
5.Su Kütlesi (g)	-	-	-	-	17,12	-
6.Kuru num.(g)	-	-	-	-	64,51	-
7.Su İçeriği (%)	-	-	-	-	26	-
Deneyin adı	Likit limit deneyi					
Deney No	1	2	3	4		
1.Kap No:	7	99	10	12		
2. dara (g)	58,61	65,75	59,98	56,08		
3.Dara + ıslak num.(g)	110,86	117,54	119,75	146,55		
4.Dara + kuru num.(g)	96,88	104,77	105,15	124,94		
5. su Kütlesi (g)	13,98	12,77	14,6	21,61		
6. Kuru num. (g)	38,27	39,02	45,17	68,86		
7.Su İçeriği (%)	37	33	32	31		
8. Vuruş Sayısı , N	10	28	38	68		
Doğal su içeriği (%)	Plastik limit (%)		Likit limit (%)			
	26		33,9			

Ek. 33. A3 Zemini için likit ve plastik limit deney formu

Deneyin Adı	Su içeriği deneyi				Plastik limit deneyi	
	1	2	3	4	1	2
Deney No :						
1. Kap No	-		-	-	24	-
2. Dara (g)	-		-	-	51,53	-
3.Dara+ıslak num.(g)	-		-	-	109,68	-
4.Dara+kuru num.(g)	-		-	-	96,61	-
5.Su Kütlesi (g)	-		-	-	13,07	-
6.Kuru num.(g)	-		-	-	45,08	-
7.Su İçeriği (%)	-		-	-	29	-
Deneyin adı						
			Likit limit deneyi			
Deney No			1	2	3	4
1.Kap No:			12	74	10	9
2. dara (g)			56,07	57,1	60,02	63,45
3.Dara + ıslak num.(g)			171,52	128,1	124,29	116,44
4.Dara + kuru num.(g)			137,74	109,2	107,83	103,97
5. su Kütlesi (g)			33,78	18,9	16,46	12,47
6. Kuru num. (g)			81,67	52,1	47,81	40,52
7.Su İçeriği (%)			41	36	34	31
8. Vuruş Sayısı , N			13	24	59	70
NOT:						
Doğal su içeriği (%)			Plastik limit (%)		Likit limit (%)	
			29		37,2	

Ek. 34. A4 Zemini için likit ve plastik limit deney formu

Deneyin adı	Su içeriği deneyi				Plastik limit deneyi	
	1	2	3	4	1	2
Deney No :						
1. Kap No	-	-	-	-	20	-
2. Dara (g)	-	-	-	-	57,09	-
3.Dara+ıslak num.(g)	-	-	-	-	138,72	-
4.Dara+kuru num.(g)	-	-	-	-	121,6	-
5.Su Kütlesi (g)	-	-	-	-	17,12	-
6.Kuru num.(g)	-	-	-	-	64,51	-
7.Su İçeriği (%)	-	-	-	-	27	-
Deneyin adı						
			Likit limit deneyi			
Deney No						
1.Kap No:	99	10	7	12		
2. dara (g)	66,17	60,22	58,71	56,16		
3.Dara + ıslak num.(g)	183,35	182,99	132,03	166,17		
4.Dara + kuru num.(g)	150,73	150,40	114,36	139,34		
5. su Kütlesi (g)	32,62	32,59	17,67	41,23		
6. Kuru num. (g)	84,56	90,18	55,65	68,78		
7.Su İçeriği (%)	32	36	39	60		
8. Vuruş Sayısı , N	10	21	47	55		
Plastik limit (%)						
27						
Likit limit (%)						
44,5						

Ek. 35. A5 Zemini için likit ve plastik limit deney formu

Deneyin adı	Su içeriği deneyi				Plastik limit deneyi	
	1	2	3	4	1	2
Deney No :						
1. Kap No	-	-	-	-	-	5
2. Dara (g)	-	-	-	-	--	57,09
3.Dara+ıslak num.(g)	-	-	-	-	-	138,72
4.Dara+kuru num.(g)	-	-	-	-	-	121,6
5.Su Kütlesi (g)	-	-	-	-	-	17,12
6.Kuru num.(g)	-	-	-	-	-	64,51
7.Su İçeriği (%)	-	-	-	-	-	27
Deneyin adı						
				Likit limit deneyi		
Deney No	1	2	3	4		
1.Kap No:	150	76	9	12		
2. dara (g)	28,92	57,09	68,47	56,07		
3.Dara + ıslak num.(g)	64,54	113,65	127,72	123,71		
4.Dara + kuru num.(g)	54,17	98,00	111,89	106,53		
5. su Kütlesi (g)	10,37	15,65	15,83	17,18		
6. Kuru num. (g)	25,25	40,91	43,42	50,46		
7.Su İçeriği (%)	41	38	36	34		
8. Vuruş Sayısı , N	10	28	38	60		
Plastik limit (%)						
27						
Likit limit (%)						
37,9						

Ek. 36. A1 Zemini için düşen düzeyli geçirimsizlik deneyi verileri ve su içeriklerine göre geçirimsizlik katsayıları

Zaman (s)	İlk Okuma (m)	Son Okuma (cm)	Geçirimsizlik Katsayısı (m/s)
120	0,95	8,55	0,00445678
120	1,30	1,15	0,00223963
120	1,23	1,01	0,00152564
120	1,30	0,60	0,00030519
90	1,30	0,41	0,00044466
120	1,27	0,75	0,00057082
120	1,30	0,90	0,00106516
Deney borusunun çapı		210 mm	
Numunenin uzunluğu		130 mm	
Numunenin en kesit alanı		$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	

Ek. 37. A2 Zemini için düşen düzeyli geçirimsizlik deneyi verileri ve su içeriklerine göre geçirimsizlik katsayıları

Zaman (s)	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Geçirimsizlik Katsayısı (m/s)
120	1,24	0,93	0,003264306
60	1,30	0,74	0,002388209
60	1,30	1,24	0,001163356
120	1,30	0,87	0,000273747
60	1,20	0,70	0,000833304
120	1,28	0,76	0,001509996
120	1,30	0,57	0,003122529
Deney borusunun çapı		210 mm	
Numunenin uzunluğu		130 mm	
Numunenin taban alanı		$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	

Ek. 38. A3 Zemini için düşen düzeyli geçirimlilik deneyi verileri ve su içeriklerine göre geçirimlilik katsayıları

Zaman (s)	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Geçirimlilik Katsayısı (m/s)
240	0,95	0,875	0,00117507
240	1,21	0,97	0,000985779
120	1,23	0,935	0,00078057
120	1,30	0,925	0,00012408
240	1,22	0,545	0,00032019
120	1,27	0,97	0,00079432
Deney borusunun çapı		210 mm	
Numunenin uzunluğu		130 mm	
Numunenin taban alanı		$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	

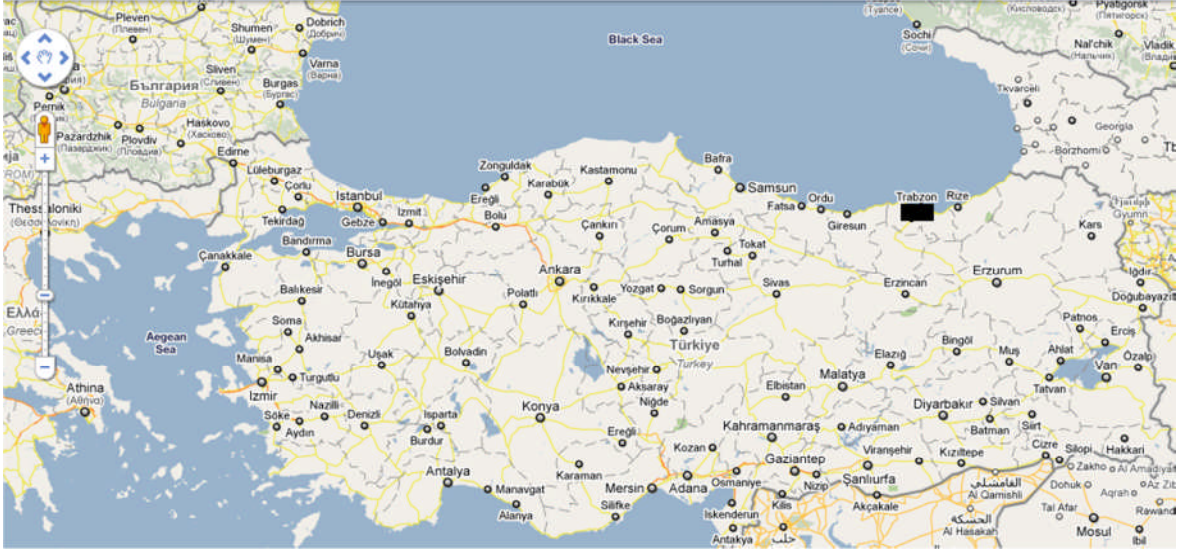
Ek. 39. A4 Zemini için düşen düzeyli geçirimlilik deneyi verileri ve su içeriklerine göre geçirimlilik katsayıları

Zaman (s)	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Geçirimlilik Katsayısı (m/s)
120	1,24	0,95	0,002214198
150	1,30	0,50	0,001434494
60	1,33	1,29	0,000798023
150	1,27	0,90	0,000176906
60	1,20	0,83	0,000771671
120	1,325	0,80	0,001461504
150	1,30	0,70	0,002135679
Deney borusunun çapı		210 mm	
Numunenin uzunluğu		130 mm	
Numunenin taban alanı		$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	

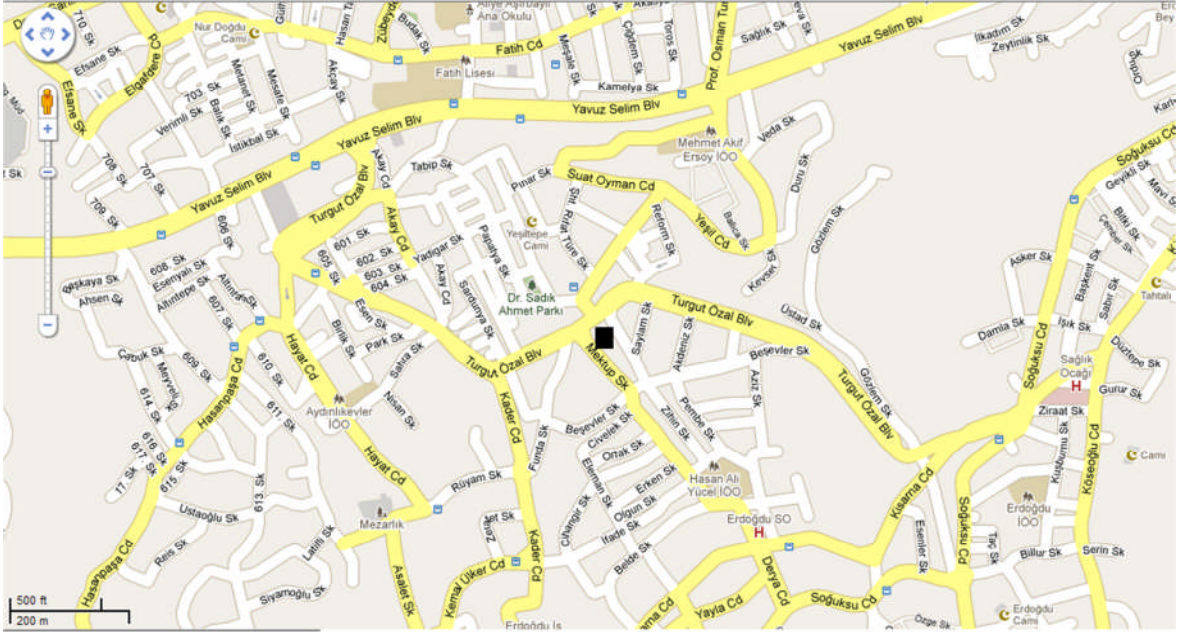
Ek. 40. A5 Zemini için düşen düzeyli geçirimlilik deneyi verileri ve su içeriklerine göre geçirimlilik katsayıları

Zaman (s)	İlk Okuma (m)	Son Okuma (m)	Geçirimlilik Katsayısı (m/s)
420	1,18	1,10	0,0000581
360	1,15	1,095	0,0000473
600	1,20	1,15	0,0000246
780	1,25	1,22	0,0000108
600	1,165	1,06	0,0000255
420	1,32	1,28	0,000041
420	1,24	1,18	0,0000547
Deney borusunun çapı		210 mm	
Numunenin uzunluğu		130 mm	
Numunenin taban alanı		$7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	

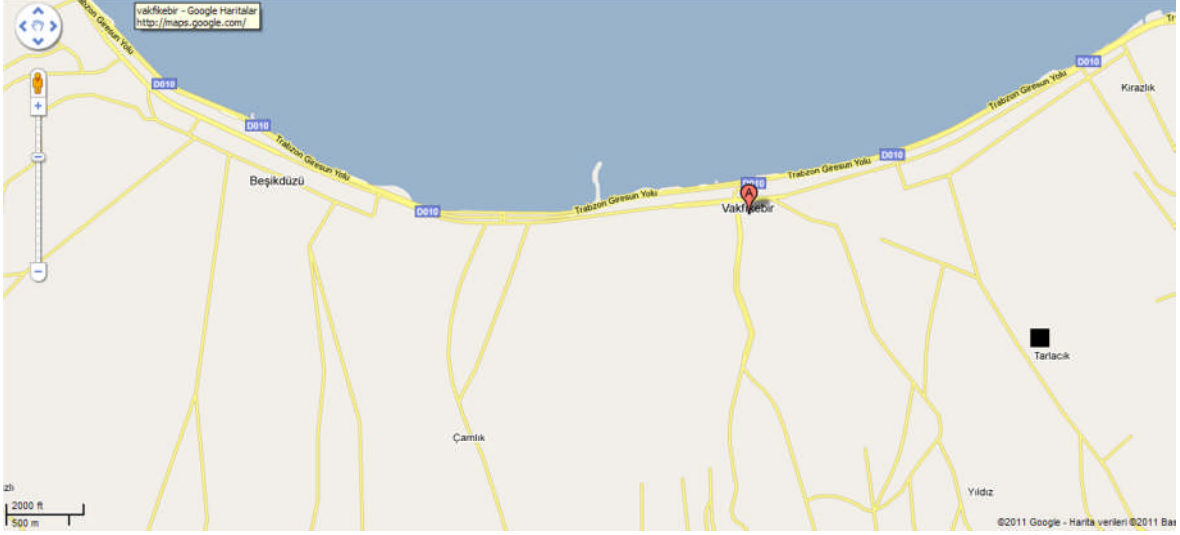
Ek. 41. Deneysel çalışmanın yapıldığı zeminlerin alındığı Trabzon İlinin haritadaki yeri



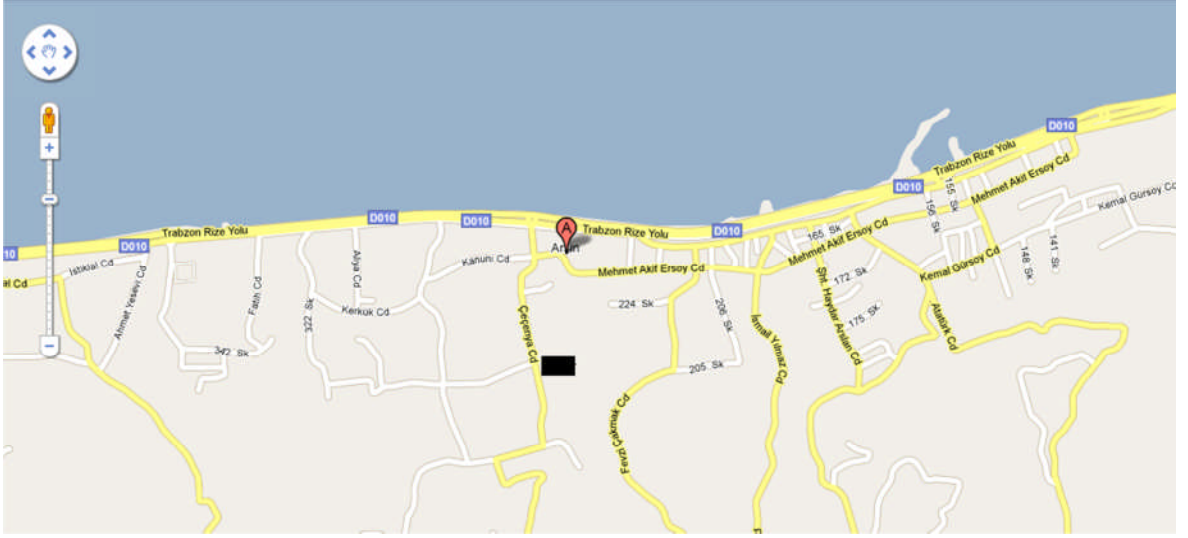
Ek. 42. A5 Zemininin alındığı Trabzon Merkez İlçesine bağlı Yeşiltepe Mahallesi haritada gösterimi



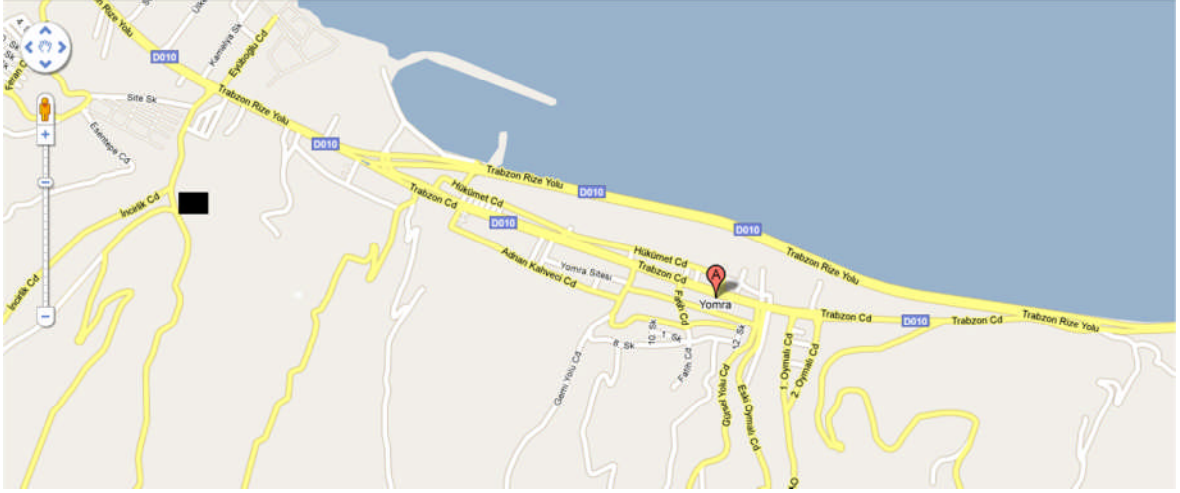
Ek. 43. A1 Zemininin alındığı Vakfıkebir İlçesine bağlı Tarlacık Köyünün haritada gösterimi



Ek. 45 A2 Zemininin alındığı Arsin İlçesine bağlı Çeçenya Sokağın haritada gösterimi



Ek. 46. A3 Zemininin alındığı Yomra İlçesine bağlı İncirlik Caddesinin haritada gösterimi



ÖZGEÇMİŞ

22.11.1984 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. Lisans eğitimini 2003-2007 yılları arasında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde yaptı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. 2009 yılına kadar özel inşaat firmalarında kalite kontrol mühendisi ve şantiye şefi olarak çalıştı, 2009 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yol Bakım – Onarım Müdürlüğünde kontrol mühendisi olarak görev yaptıktan sonra 2010 yılında Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başlayıp ve halen görevine devam etmekte olan KAMİLOĞLU iyi derecede İngilizce bilmektedir.