

66621

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI ATIK DEPOLARINDA TABİİ MALZEMELERDEN
GEÇİRİMSİZ ŞİLTE TEŞKİLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Emre ÇEÇEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ekim 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Ekim 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mete İNCECİK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Remzi ÜLKER

Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY

Uluh 21.11.97
Uluh 21.11.97
Aksoy 21.11.97

ÖNSÖZ

Bu çalışmada katı atık depo tesislerinde kullanılan geçirimsizlik şilte tabakasının bentonit malzemesi katkısıyla hidrolik iletkenlik ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi yönünde yapılan bir seri deney ve sonuçların değerlendirilmesi ve konu ile ilgili çeşitli literatür taraması sunulmuştur.

Yüksek Lisans eğitimim süresinde gerek maddi gerekse manevi katkılarını esirgemeyen Geoteknik Kürsüsü Öğretim Görevlilerine özellikle tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mete İncecik'e, mesleki formasyonuma bulunduğu katkılardan dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca bana her konuda büyük fedakarlıklarla destek veren sayın Dr. Recep İyisan'a, sayın Dr. Temel Yetimoğlu'na, İ.T.Ü. Zemin Mekaniği Laboratuvarı teknisyenleri sayın Semih Viç'e, sayın Serdar Gültürer'e ve İsmail Cantekin'e teşekkür ederim.

Haziran 1997

Emre ÇEÇEN
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 ATIK DEPOLAMA TESİSLERİ VE GEÇİRİMSİZLİK ŞİLTE SİSTEMLERİ	3
2.1 Giriş	3
2.2 Şilte Sistemleri	4
2.3 Depo Tesislerinin Tasarımı	7
2.4 Daha Önceden Yapılan Çalışmalara Genel Bir Bakış	8
BÖLÜM 3 GEÇİRİMSİZLİK MALZEMESİ OLARAK BENTONİT	10
3.1 Giriş	10
3.2 Bentonitlerin oluşumu	11
3.3 Bentonitlerin Özellikleri	11
3.4 Bentonitlerin Kullanım Alanları	13
3.4.1 Seramik Sanayii	13
3.4.2 Döküm Sanayii	13
3.4.3 Sondaj İşlemlerinde	13

	3.4.4 Kağıt Endüstrisinde	13
	3.4.5 Boya Endüstrisinde	13
	3.4.6 Yağların Renklerinin Giderilmesinde	14
	3.4.7 İlaç Sanayiinde	14
	3.4.8 Gübre Yapımında	14
	3.4.9 Kataliz Olarak	14
	3.4.10 Yangın Söndürücülerde	14
	3.4.11 Portland Çimentosu Yapımında	14
	3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri	14
BÖLÜM 4	ZEMİNLERDE HİDROLİK İLETKENLİK (PERMEABİLİTE)	16
	4.1 Giriş	16
	4.2 Zeminlerde Bulunan Su	16
	4.3 Geçirimli Ortamlarda Akış İçin Darcy Kanunu	16
	4.4 Laboratuvar Permeabilite Deneyleri	19
	4.5 Arazide Permeabilite Ölçümü	21
	4.6 Sonuçlar	23
BÖLÜM 5	GEÇİRİMSİZLİK BAKIMINDAN ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ, KOMPAKSİYON	24
	5.1 Genel Tanım	24
	5.2 Laboratuvar Kompaksiyon Deneyleri	24
	5.3 Arazi Kompaksiyon Yöntemleri	26
BÖLÜM 6	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
	6.1 Giriş	27

6.2 Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Özellikleri	27
6.2.1 Elek Analizi	27
6.2.2 Relatif Sıkılık	28
6.2.3 Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s) Tayini	29
6.2.4 Kıvam Limitleri	31
6.3 Kompaksiyon Deneyleri	31
6.4 Permeabilite Deneyleri	33
6.5 Kesme Kutusu Deneyleri	34
6.6 Konsolidasyon Deneyleri	34
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ	43
7.1 Giriş	43
7.2 Çalışmaların Yorumu	44
7.3 Sonuçlar	53
KAYNAKLAR	54
EKLER	56
ÖZGEÇMİŞ	

SEMBOL LİSTESİ

Δh	: hidrolik yükseklik
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
S_t	: Sensitivite
k	: Permeabilite katsayısı
D_{10}	: Efektif dane çapı
D_r	: Relatif sıkılık
e_n	: Zeminin tabii durumdaki boşluk oranı
e_{max}	: Zeminin en gevşek durumdaki boşluk oranı
e_{min}	: Zeminin en sıkı durumdaki boşluk oranı
γ	: Akışkanın birim hacim ağırlığı
μ	: Akışkanın viskozitesi
e	: Boşluk oranı
c	: Şekil faktörü
k_o	: Gerçek akış yolu uzunluğunun zemin kalınlığına oranı ve boşluk şekline bağlı bir faktör
S	: Özgül yüzey alanı
q	: Debi
v	: Akışkanın hızı
n	: Porozite
I	: Hidrolik eğim

D_{10}	: Granülometri eğrisinde % 10'a karşı gelen efektif dane çapı
D_{30}	: Granülometri eğrisinde % 30'a karşı gelen efektif dane çapı
D_{50}	: Kaba daneli tabakanın ortalama dane boyutu
D_{60}	: Granülometri eğrisinde % 60'a karşı gelen efektif dane çapı
D	: Üniform zemin danelerinin çapı
C_v	: Konsolidasyon katsayısı
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlığı
γ_n	: Tabii birim hacim ağırlığı
A	: Yüzey alanı
L	: Numune boyu
a	: Cam borunun enine kesit alanı
h	: tokmak düşüş yüksekliği
h_1	: Deney başı su yükü
h_2	: t süre sonundaki su yükü
W	: Toplam numune ağırlığı, tokmak ağırlığı
C_U	: Üniformluk katsayısı
C_C	: Derecelenme katsayısı
C_t	: Sıcaklık düzeltmesi
C_m	: Menisküs düzeltmesi
C_a	: Ayrıştırıcı madde düzeltmesi
R_h	: Hidrometre okuması
W_k	: Kuru numune ağırlığı

W_L : Likit limit

W_p : Plastik limit

W_s : Rötire limiti

I_p : Plastisite indisi

ω : Su muhtevası



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Katı Atık Depolama Tesisi Kesiti	5
Şekil 2.2 Kullanılan Atık Depo Tipleri	6
Şekil 3.1 Montmorillonit Yapısının Şematik Olarak Gösterilişi	12
Şekil 4.1 Sızma Hızı Şematik Gösterimi	17
Şekil 4.2 Laboratuvar Permeametre Aletleri	20
Şekil 4.3 Kumda Pompalama Deneyi	21
Şekil 5.1 Kompaksiyon Eğrisi	25
Şekil 6.1 Kaba Daneli Zemine Ait Granülometri Eğrisi	30
Şekil 6.2 Tüm Numunelere Ait Kompaksiyon Eğrileri	32
Şekil 6.3 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit A + %5 kil)	35
Şekil 6.4 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit A + %10 kil)	36
Şekil 6.5 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit A + %15 kil)	37
Şekil 6.6 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit B + %5 kil)	38
Şekil 6.7 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit B + %10 kil)	39
Şekil 6.8 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit B + %15 kil)	40
Şekil 6.9 Konsolidasyon Deneyi Sonucu (Bentonit A)	41
Şekil 6.10 Konsolidasyon Deneyi Sonucu (Bentonit B)	42
Şekil 7.1 Permeabilite-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	45
Şekil 7.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	45
Şekil 7.3 Optimum Su Muhtevası-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	46

Şekil 7.4 Maksimum Kayma Gerilmesi-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	47
Şekil 7.5 Kohezyon-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	47
Şekil 7.6 Kayma Mukavemeti Açısı-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	48
Şekil 7.7 Permeabilite-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)	49
Şekil 7.8 Kuru Birim Hacim Ağırlık-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)	50
Şekil 7.9 Optimum Su Muhtevası-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)	50
Şekil 7.10 Maksimum Kayma Gerilmesi-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)	51
Şekil 7.11 Kohezyon-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)	52
Şekil 7.12 Kayma Mukavemeti Açısı-Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)	52
Şekil C1 %3 Bentonit A + %5 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C. 2
Şekil C2 %3 Bentonit A + %10 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C. 4
Şekil C3 %3 Bentonit A + %15 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C. 6
Şekil C4 %3 Bentonit B + %5 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C. 8
Şekil C5 %3 Bentonit B + %10 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C.10
Şekil C6 %3 Bentonit B + %15 Kil ile yapılan Kompaksiyon deneyi	EK C.12

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Sıkıştırılmış Kil Şiltelerde Permeabiliteyi Etkileyen Faktörler	9
Tablo 3.1 Deneylerde Kullanılan Bentonitlerin Teknik Özellikleri	15
Tablo 4.1 Zemin Sınıfına Göre k' 'nın Değişimi	18
Tablo 4.2 Zeminlerin Permeabilite Katsayılarına Göre Sınıflandırılması	19
Tablo 4.3 Hidrolik İletkenlik Deneyleri Sonuçları	22
Tablo 6.1 Zeminlerin Relatif Sıkılıklarına Göre Sınıflandırılması	29
Tablo 7.1 Regresyon Analizi Sonuçları	53
Tablo D.1 %3 Bentonit A + %5 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.1
Tablo D.2 %3 Bentonit A + %10 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.2
Tablo D.3 %3 Bentonit A + %15 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.3
Tablo D.4 %3 Bentonit B + %5 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.4
Tablo D.4 %3 Bentonit B + %10 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.4
Tablo D.6 %3 Bentonit A + %3 Kil ile yapılan Permeabilite Deneyi	EK D.5

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesi çevre kirliliği gibi bir sorunu da beraberinde getirmektedir. Doğal olmayan malzemenin doğa tarafından absorbesi de bir o kadar zor ve uzun bir süreç gerektirmektedir. Özellikle su ile reaksiyona giren zehirli kimyasalların yağmur suyu ile teması ve bunun da insanların kullandığı suyun kaynağı olan akiferlere ulaşması ayrıca büyük bir tehlike içermektedir.

İnsan sağlığını tehdit eden her türlü atığın kontrolsüz olarak istiflenmesi yerine özel amaçla tasarlanan katı atık depo tesislerinde saklanması uzun yıllardır gelişmiş ülkelerde son yıllarda da ülkemizde uygulanmaktadır. Bu tür özel tasarıma sahip depo tesisleri içerdiği atıkların doğa ile etkileşimini engellemek için, tabanda bir şilte tabakasına sahiptir. Zaman içinde şilte tabakası olarak gerek sentetik malzemeler gerekse doğal fakat özel olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmış malzemeler kullanılmıştır.

Ülkemizi, çok sayıda katı atık depo tesislerinin kurulacağı bir memleket olarak düşündüğümüzde prosesi, ekonomiklik ve uygulanabilirlik olarak iki yönden ele almak uygun olacaktır. Bu bakış açısı doğrultusunda şilte tabakası uygulamalarında doğal malzeme seçimi ülkemiz için daha uygundur. Bu noktada nasıl bir malzeme kullanılmalı sorusuna cevap olarak hidrolik iletkenliği (permeabilite) düşük, yeterli taşıma gücü ve sıkışabilirlik özelliklerine sahip bir malzeme verilecektir. Şilte tabakası, uygun bir karışımın gerekli enerji kullanılarak sıkıştırılması sonucu istenen özelliklere sahip duruma getirilecektir.

Son yıllarda kirlilik ile ilgili çalışmalar yalnızca bir meslek disiplininin uygulama alanı olmaktan çıkmış birden fazla disiplinin araştırma alanına girmiştir. Bu bağlamda *Çevre ve Geoteknik, Hidrolik ve Kimya Mühendisliği*'nin birlikte yürüttüğü pek çok araştırma ve uygulamaların varlığından söz edebiliriz.

İstenilen mühendislik özellikleri sahip malzemeleri tabiattan doğrudan elde etmek bilhassa son zamanlarda zorlaşmıştır. Buna çözüm olarak tabii malzemeleri uygun şekilde karıştırılarak kullanılan veya yapay malzeme kullanmak söz konusu olmaktadır. Yapay malzemeler pahalı olabildiği gibi, yeraltı suyuna zarar da verebilmektedir.

Bu çalışmada katı atık tesislerinde şilte malzemesi olarak kullanılmak üzere tabii malzeme karışımlarının uygunluklarının tespiti amacıyla bir dizi ilgili deney yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

SUMMARY

FORMATION OF LINERS BY NATURAL SOILS

By the end of the 20th century various efforts were made in the sake of providing a better and more comfortable environment for the human. However, in all the establishments that were founded for technological improvements, besides the product there is another output which is called as *waste*. During the time it has been understood how hazardous this waste is to the environment (as a result to the health of human) and a lot of studies were made in order to prevent this. One of these precautions is constructing sanitary fills in which waste product is kept away from the environment as much as possible.

Arrangements about industrialisation and consequent pollution have taken place since 1980 by United Nations and World Health Organization. The first official step on this subject was made in 1990 by the establishment of the Ministry Of Environment in our country.

Recently two disciplines, environmental and geotechnical engineering have come together to solve the problem of pollution of the environment. The disciplines examine the problem on the topics such as pollution of the ground water, corruption of the flow of ground water, storing of house and industrial waste in specially designed disposals.

At the beginning of this century nearly all the waste was stored in uncontrolled open areas. By the 2nd World War the first sanitary waste disposals have been used. The aim of a sanitary waste disposal is to prevent the dissipation of material that is hazardous for the environment and not to let it pollute the groundwater. It is suggested to place adequate amounts of impermeable material in the liners. If natural soil does not exist an impermeable fill is constructed (by recently improved geotextiles etc.). Since 1970 the application of a liner at the bottom have taken place.

It is stated that %15-25 of the total wastes of developed countries considered as dangerous. These wastes contain highly toxic organisms that gives harm to the human life.

Although success on storing the waste has been acquired it is obvious that in any case the waste can never disappear. The aim at this point is to store the maximum compacted masses of waste in a disposal with a condition that gives minimum harm to the environment. In the designed waste disposal water containing highly toxic

compounds which is formed at the bottom of the waste must be drained and kept away from ground water.

During the planning of a subsoil liner system, compacted clay liners which are the parts of this system are necessary to match some engineering criterion. The most important criterion is considered to be the permeability. In the last two decades many of the industrialised countries have been regulating the formation, disposal and management of the waste. In the United States the primary emphasis has been on waste disposal rather than waste reduction. In Western European countries governments have played a much bigger role in pollution management. The primary emphasis has been on waste reduction through re-use, recycling, clean-up technology development, etc.

In Turkey, Solid Waste Disposal Instructions (Turkish Environmental Regulations, 1992) says that the lower level of the waste disposal sites must be covered with clay liners which has a thickness not less than 60 cm and hydraulic conductivity must be less than 10^{-8} m/s.

It is required to place the waste disposal away from the aquifers that supply water in order not to let it pollute in case of any negative condition. The base of a soil liner should supply the following conditions;

- adequate bearing capacity
- adequate impermeability
- limited compressibility
- characteristic to serve as barriers to hazardous material
- characteristic no to be affected by hazardous material

The construction steps of a waste disposal can be given as follows:

1. constructing liners
2. constructing sealing foils
3. setting up drainage blanket
4. positioning waste material
5. placing lime basement
6. placing protective layer
7. installing the cover layer

The quality-control program employed during construction can be the most important factor affecting the hydraulic conductivity of a compacted soil liner. Experience has shown that, even if acceptable soil is used (e.g., sufficient clay content, plasticity index, and activity) and sound principles have been employed during construction control may yield liners with high hydraulic conductivity. However, if the design is sufficient and quality control is ensured, the probability is high that low hydraulic conductivity will be achieved.

Sampling and testing is performed as part of quality control. Testing may include hydraulic conductivity, or other soil properties (such as water content, dry unit weight, and plasticity index) that are correlated to hydraulic conductivity.

The use of cut-off slurry walls as containment systems for polluted subsoils has increased considerably. The main backfill materials for this kind of containment barrier in Western European Countries are cement-bentonite mixtures. In addition many types of construction equipment and procedures together with special additives for the cement-bentonite mixtures have been used and patented by specialised contractors in order to obtain the best sealing, deformability, and durability performance for cut-off slurry walls used as containment barriers against pollutant migrations.

The main concern of containment barriers for polluted areas is the check of the actual in-situ effectiveness in terms of hydraulic conductivity, pollutants diffusion and sorption, deformability, and durability. Among the features to be checked, hydraulic conductivity or permeability place a fundamental role.

Compacted fine-grained soils are often used in landfill liner and covers as hydraulic barriers. Because of the inherent risk of ground-water pollution from landfills, statistical methods are being developed to analyse quality of constructions and the reliability of compacted soil liners. Compacted soil liners are used to minimise infiltration of water into buried waste (cover systems) or to control of the release of leachate from the waste (liner systems). To meet these objectives, clay liners must have low hydraulic conductivity for long term stability. In addition, compacted clay liners are expected to attenuate the movement of leachate, to extend the release of chemicals in leachate, and to serve other site-specific functions.

Large-scale field tests are often conducted on test pads or trial sections to assess the field-scale hydraulic conductivity of compacted clay liners. During testing, The effective stress is typically low ($\approx 10\text{kPa}$) and is not necessarily representative of the effective stress that will exist when the actual liner is loaded with waste (50-300 kPa). As a result, the reported hydraulic conductivity that will exist during operation and after closure of the facility.

One method to extrapolate hydraulic conductivities measured in the field to higher levels of effective stress is to apply a reduction factor determined from results of laboratory tests conducted over a range of effective stresses. However, because specimens commonly used for laboratory testing can be too small to adequately represent the network of pores controlling flow at field scale, hydraulic conductivities estimated in this manner may not necessarily be representative of field conditions.

Mineral sealing layers should not be subject to settlement to such an extent that their barrier function is compromised by deformation. Such deformations can cause cracking or shearing mechanisms in mineral sealing layers.

Systems which seal the body fall within the external stability zone. The basal lining and capping system can comprise different materials with varying friction and shear behaviour. This behaviour determines resistance to sliding along the liner elements and/or subgrade contact interfaces.

Waste body deformation (vertical or lateral) must not result in damage to lining systems or other structures within the waste body. In particular, an assessment of differential settlement and spreading deformation is necessary.

Unacceptable stresses or strains on capping systems due to differential settlements have been observed in the following situations:

- Close to the landfill surface wastes with widely differing composition (that means waste of different consistency and settlement potential) have been placed.
- The waste surface forming the subgrade of the capping system exhibits large variations in age or pre-loading.

An unacceptable influence on the barrier function caused by the settlement-induced deformation can be expected when the tensile strength of the mineral sealing material is exceeded and open cracks develop. If deformation action leads to shear mechanisms without open cracks, no significant increase in leakage rates through the liner will occur. In particular, this situation will occur when overburden pressure prevents cracking and under these circumstances sealing performance will not be affected.

Many wastes are mixtures of materials that can be in various states. Any attempt to characterise such materials would be pointless. The wastes range from strong acidic to neutral, and neutral to strongly alkaline. Some wastes are rich in metals while some are rich in organic and some are mixtures that contain both metals and organics.

In this study laboratory tests are performed to achieve an ideal material to be placed as a soil liner system. The aims to be fulfilled are adequate impermeability, adequate bearing strength, incompressibility and adequate long term stability. In order to accomplish the desired values that are expressed in various standards several laboratory tests are done.

Material chosen for testing comprised of sand-gravel mixture plus two different kinds of bentonite (bentonite A, $w_L=270$, $w_P=28$, $I_P=242$, bentonite B, $w_L=570$, $w_P=58$, $I_P=512$). A highly plastic clay ($w_L=75$, $w_P=33$, $I_P=42$) was added in percents of %5, %10, %15 consecutively. The material specifications are given in the appendix sections.

The grain size distribution of the coarse material is calculated and plotted in a log-normal chart. To have a well-graded material a few trials were made and materials having the best grain-size distribution were chosen.

A portion of %3 (by weight) of bentonites (A and B) were added to the coarse material. To the final material %5, %10 and %15 (by weight) of clay was added in consequence. *Standard Proctor Tests* were done in order to estimate the maximum dry unit weight-optimum water content. The specifications for the data are given in the appendix sections.

For the samples at maximum proctor compaction permeability tests were performed. The permeability tests done at the laboratory are falling head tests which are generally performed to test the permeability of the fine grained soils. Details for the tests are given in the *tests* section and data for the calculations are given in the appendix .

Deformation-controlled shear box tests were accomplished for each of the samples in order to calculate the maximum shear strength. The ideal mixture percentages are given in the *conclusions section*.

In order to find the unconfined compression specialities of the samples oedometer consolidation tests were performed for the mixtures containing %10 clay. Further details about the tests can be seen in the *conclusions section*.

In the tests which were performed on the material that comprised bentonite A, the mixture containing %10 clay is considered to be the ideal for permeability and the shear stress.

During the tests which were performed on the material that comprised bentonite B, the region remained somehow narrow. The ideal mixture for permeability, maximum dry unit weight, and shear strength is considered to be the sample containing %15 clay. Further details about the tests can be seen in the *conclusions section*.

It is observed from the applications that no matter how precisely the tests in the laboratory are performed, in-situ tests must also be done in order to get a more reasonable aspect for the durability of the construction.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği (adının da ifade ettiği gibi) inşaat mühendisliğinin zemine ait uygulamaları ile uğraşır. Zeminlerin doğasını çok değişikdir. Bir başka deyişle zemin tabakaları, homojenlikten daha çok heterojen özellik taşırlar. Zeminlerin mühendislik özellikleri yeryüzünün her noktasında farklılık gösterebilir. Burada, deneysel çalışmaların Geoteknik mühendisliğinde çok fazla önem taşıdığı söylenebilir.

Endüstriyel gelişmeler neticesinde ortaya çıkan çevre kirliliği, içinde bulunduğumuz yüzyılda insan ve tabiat sağlığını tehdit eder duruma gelmiştir. Her türde çöplerin (atıkların) tabiattan tecrit edilmesi gerektiği prensibi ile tasarlanmış katı atık depo tesisleri uzun yıllardır batılı ülkelerde, son yıllarda da ülkemizde başarı ile kullanılmaktadır.

Katı atık depo tesislerinin tabanında oluşan suyun zemine karışmasını önlemek amacıyla tesisin altına geçirimsizlik şilte tabakaları serilmektedir. Geçirimsizlik şilte sistemleri, permeabilitesi düşük kil malzeme veya birkaç numunenin karışımının kompaktörlerle sıkıştırılmasından meydana gelirler.

Bentonit malzemesi, inşaat mühendisliğindeki diğer kullanım alanlarının yanında, çok yüksek su emme ve çok düşük geçirimsizlik özellikleri sayesinde, atık depo sahalarının tabanında sızdırmazlık tabakası karışımının bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada bentonit malzemenin bahsedilen özellikleri doğrultusunda kum-çakıl ve yüksek plastisiteli kil malzemeye çeşitli oranlarda karıştırılarak mühendislik açısından ideal bir sızdırmazlık tabakası elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla laboratuvarda yapılan deneylerde iki ayrı çeşit bentonit kullanılmıştır. Bentonit malzemelerin karışımdaki oranı %3 olarak sabit tutulmuş, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde CH sınıfında yer alan yüksek plastisiteli kil malzeme oranları % 5, % 10, % 15 olarak artırılmıştır. Her karışım üzerinde Standart Proktor deneyleri yapılmış, Proktor sıkılığında hazırlanan numunelerin düşen seviyeli permeabilite deneyleri ile permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Malzemenin mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için her karışım yüzdesi için deformasyon kontrollü kesme kutusu, her iki cins bentonite ait %10 killi karışım numunesi için de konsolidasyon (odömetre) deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalar da göz önüne alınarak yorumlanmış, pratikte kullanım için bir değerlendirme yapılmaya çalışılmıştır.

Bölümlerde bahsedilen konular şöyledir;

2. bölümde, atık depolama tesisleri ve geçirimsizlik şilte sistemlerine ait tasarım esasları ve daha önce yapılan çalışmalara genel bir bakış yapılmıştır. 3. bölümde geçirimsizlik malzemesi olarak kullanılan bentonitin yapısı ve özellikleri verilmiştir. 4. bölümde zeminlerde akışkanların hareketi incelenmiş ve arazide ve laboratuvarda permeabilite ölçümleri uygulamalarına ait örnekler verilmiştir. 5. bölümde geçirimsizlik bakımından zemin iyileştirme yöntemlerinden kompaksiyon üzerinde durulmuştur. 6. bölümde tabii malzemelerden geçirimsizlik şiltesi oluşturmak amacıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan bir dizi deneysel çalışmanın bir özeti verilmiştir. 7. ve son bölümde ise yapılan deneylere ait yorumlar verilmiş ve sonuçlara ait regresyon analizi yapılmıştır.

BÖLÜM 2

ATIK DEPOLAMA TESİSLERİ VE GEÇİRİMSİZLİK ŞİLTE SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Teknolojik gelişmeler neticesinde insanın hayatını kolaylaştıran pek çok ürünün ortaya çıktığı bir gerçektir. Bunun yanında endüstriyel gelişmeler, ürettikleri ürünlerin yanında hem ekolojik dengeyi bozarak tabiata zarar veren hem de insan sağlığını tehdit eden atık yan çıktısını da üretmektedirler.

Her ne türlü olursa olsun atıkların doğaya verdikleri zararın engellenmesi gereği açıktır. Atıkların zemini, yeraltı suyunu ve çevreyi kirletmesine mani olmak için özel olarak tasarlanmış çöp depolama tesisleri uzun yıllardır gelişmiş ülkelerde, son yıllarda da ülkemizde inşa olunmaktadır. Tasarımda en önemli faktör atıklar ve çevrenin birbirlerinden tecrit edilmesidir.

Atıklar; evsel atıklar, tehlikeli atıklar, endüstriyel atıklar ve radyoaktif atıklar olarak sınıflandırılabilirler. Evsel atıklar, yerleşim birimlerindeki evler, mağazalar ve ticari diğer işletmelerin ürettikleri atıkları kapsar. Bu tür atıklar katı ya da sıvı fazda bulunabilirler. Tehlikeli atıklar, selenyum, kadmiyum, kurşun, gümüş vb. üzerlerinde işlem yapılması ve ortadan kaldırılmaları gibi konuların kanunlarca düzenlendiği atıklardır. Bu tip atıklar insan sağlığına doğrudan etki ederler. Endüstriyel atıklar, petrokimya endüstrisi atıkları, demir-çelik endüstrisi atıkları gibi toksik etki taşıyan atıklardır (GÜLER ve diğ., 1994).

Düzenli atık depo tesislerinin tabanında çöplerden sızan suyun zemine karışmasını engellemek amacıyla geçirimsizlik şilte tabakaları serilir. Depo tesisi atık ile dolunca üzerleri bir kaplama tabakasıyla örtülür. Atıkların içerisinde oluşması muhtemel gazlar bacalar vasıtasıyla uzaklaştırılırlar.

Sıhhi atık depolama tesisleri sayesinde çöplerden üreyen sinek ve asalakların sayılarında azalma ve halk sağlığını tehdit eden her türlü mikropların üremesi ortadan kalkmıştır. Bunun yanında istenmeyen çöp yığınları yerine estetik açıdan olumlu bir görünüm kazanılmıştır (KAHYA, 1995).

2.2 Şilte Sistemleri

Atık depolama yapılarında temel prensip, atıklardan süzülen kimyasal maddelerin zemine geçmesinin engellenmesi olduğuna göre, katı atık depolarının tabanlarının geçirimsiz bir şilte malzemesi ile kaplanması gerekir. Geleneksel olarak geçirimsizlik amacıyla kullanılan malzeme, çok yüksek emiciliği ve düşük hidrolik geçirimsizliği özelliğinden dolayı kildir. Son yıllarda polimer teknolojisinin gelişmesi ile sentetik malzemelerden (geosentetikler vb.) yapılan geçirimsizlik şilteleri de başarı ile uygulanmaktadır (SHARMA, 1994). Şekil 5.1, tipik bir katı atık depo tesisinin kesitini göstermektedir. Şilte ve kaplama tabakaları doğal kil malzeme ve polimer bazlı sentetik malzemelerin kompozit olarak kullanılmasından meydana gelebilmektedir (GLR, 1993).

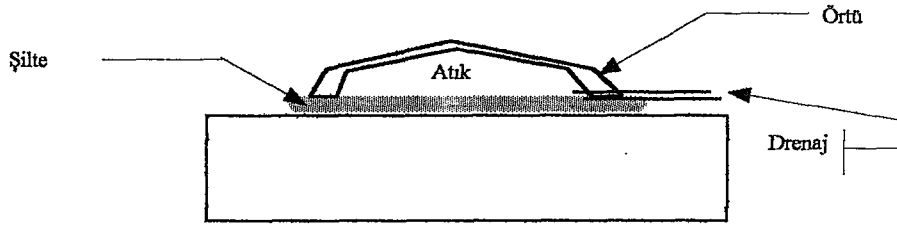
Sıkıştırılmış kil şilte sistemleri, doğal yapıları itibarıyla düşük permeabiliteli malzemelerden oluşmaktadır. Atıklar bu malzemenin içine, üzerine veya hem üzerine hem içine birlikte yerleştirilebilirler. Şekil 2.2, katı atık depo tesislerinin her üç durum için kullanılışını göstermektedir.

Doğal kil şilteler, kirletici taşınmasının yavaşlamasını sağlarlar. Atık depo sahasında kirletici hareketin yavaşlatılması amacıyla yeterli kalınlıkta, düşük permeabiliteli, dane çapı dağılımı olarak iyi derecelenmiş malzeme tercih edilmelidir. Ülkemizdeki

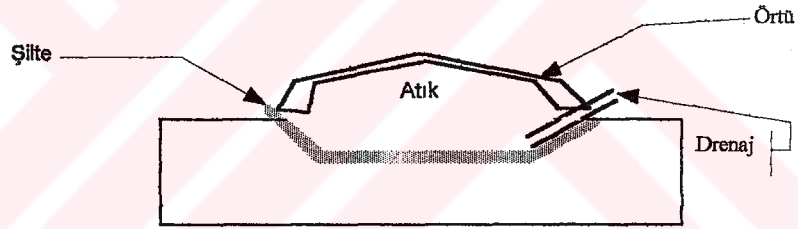
[illegible]

uygulamalarda tabaka kalınlığı 60 cm'den az olmayan ve permeabilitesi en çok 10^{-8} m/s olan şiltelerin kullanılması zorunludur (Katı Atık Depoları ile İlgili Şartname, 1992).

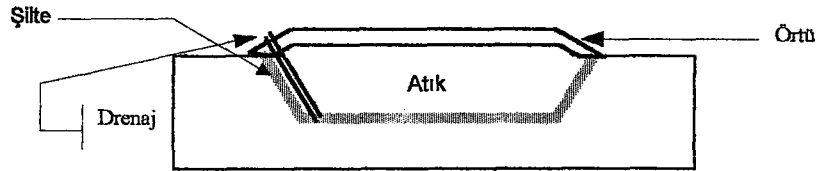
(A) Yer Seviyesi Üstünde Katı Atık Dolgusu



(B) Yer Seviyesi Üstünde ve Altında Katı Atık Dolgusu



(C) Yeraltında Katı Atık Dolgusu



Şekil 2.2 Kullanılan Atık Depo Tipleri

Şiltelerin işlevi, geçirimsizliği sağlamak olmasına rağmen, hiç bir şiltenin atıkların tabanında oluşan kimyasallara karşı tamamen geçirimsiz diye nitelendirilmesi mümkün olamamaktadır. Tesisin içindeki atıkların kimyasal bozulmaları sonucunda serbest kalan kimyasallar, kendilerine engel oluşturmak için teşkil edilen şiltelerden

diffüzyon yolu ile geçmeye çalışmaktadırlar. Bir katı atık depolama tesisinden sonsuz zaman aralığı içinde, bünyesindeki kimyasalların sebep olduğu sızıntıyı geçirmemesi gibi bir amacı gerçekleştirmesi beklenmemelidir (SHARMA, 1994).

Düşük permeabiliteli, uygun zeminlerin olmadığı yerlerde eldeki zemin katkı maddeleri ilavesiyle geliştirilebilir. Bu tip şilte malzemelerine örnek olarak bentonit-kum karışımları, zemin-çimento ve zemin-asfalt karışımları verilebilir. SHICK ve diğerleri (1994) mevcut tabii zeminin geoteknik özelliklerini geliştirmek için yaptıkları çalışmada kum-çakıl malzemeye belli oranlarda bentonit ve kaolin katarak yeni bir malzeme elde etmişlerdir. *Bentokies* adını verdikleri bu malzemenin iyi derecelenmiş bir dane çapı dağılımı, özel bir karışım ve yerleştirme sistemi ile permeabilitesi $5 \times 10^{-10, -11}$ m/s seviyesine düşürülmüştür. Bu çalışmaya da kaynak olan malzeme, teknik yararları ve düşük fiyatları sebebiyle evsel ve endüstriyel atıkların depolandığı tesislerin sızdırmazlık şilte tabakasında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

2.3 Depo Tesislerinin Tasarımı

Atık depolama tesisinin inşasında; atık yönetimi standartları (atıkların miktar ve tipleri), atığın durumu, dolgu için gereken güvenlikle ilgili tüm gereksinimler, sızıntı ve dolguda oluşan gaz için arazi kontrol ölçümlerinin süre ve yayılımı, arazinin düzenlenmesi, depolama yerinin maksimum yüksekliği, restorasyon programı, diğer sınırlamalar gibi noktalara dikkat edilmelidir.

Deneyimli geoteknik uzmanlarca hazırlanması gereken dizayn, dolgunun inşası, işletmesi ve üzerinin örtülmesi için önemli olan faktörleri hesaba katmalıdır. Planlanan yapıya ait tüm tasarım, kriter ve gereksinimleri ve bunların dayandığı emniyet kavramı, tasarım raporunda belirlenmelidir (KAHYA, 1995).

2.4 Daha Önce Yapılan Çalışmalara Genel Bakış

Sıkıştırılmış bir kil zemin şiltelinin inşası aşamasındaki kalite kontrol programı, tabakanın hidrolik iletkenliğini etkileyen en önemli faktördür. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda her ne kadar şartnamelere uygun zemin (yeterli miktarda kil içeriği, plastisite indeksi, aktivite vb.) kullanılmış olsa bile inşaa aşamasındaki yetersiz kalite kontrolü, yüksek oranlarda permeabilite değerlerine sebep olmaktadır. Bunun yanında eğer tasarım yeterli ise ve kalite kontrolü de yapılmışsa, düşük permeabilite değerlerini elde etme olasılığı büyüktür (DANIEL, 1990).

BENSON ve diğerleri (1994), sıkıştırılmış kil şilteler üzerinde kalite kontrol üzerine yapmış oldukları çalışmada seçilecek olan numune özelliklerini (özellikle numune boyutu) incelemişlerdir. Bu amaçla seçilecek olan numunelerin boyutunun arazideki permeabilite özelliklerini yansıtır biçimde olması gerekmektedir. Kullanılan metod bir tablo programı vasıtasıyla uygulanmaktadır. Üzerinde kalite kontrol deneyleri yapılacak olan numune boyutu; zemin özellikleri, dane çapı dağılımı ve şiltelinin tabaka sayısına bağlıdır.

Sıkıştırılmış kil şiltelerin permeabilite dağılımları için BENSON (1991), Kuzey Amerikada 57 adet atık dolgu şilte sistemini incelemiş ve bir olasılık teorisi geliştirmiştir. Ortalama permeabilite değerleri 2.9×10^{-9} ile 1×10^{-5} cm/sn, standart sapma 27 ile 767 ve kurtosis katsayısı da 1.75 ile 58 arasında değişmiştir.

Sıkıştırılmış kil şiltelerde kullanılması öngörülen minimum şilte tabakası kalınlığı farklı şartnamelerde çok değişik değerler almaktadır. Bu kalınlık, A.B.D.'de farklı eyaletlerde 60 cm ile 360 cm arasında değişmektedir. BENSON ve diğerleri (1994a), şilte sistemlerinin minimum tabaka kalınlığı üzerinde yaptıkları çalışmada sıkıştırılmış kil şiltelerde sıvı akışını incelemişlerdir. Bu amaçla iki adet model geliştirmişlerdir. Çalışmaların sonucunda hidrolik iletkenliğin daha çok şilteyi teşkil eden tabakalar arasında meydana geldiği ve buna da tabakanın kalın (bunun sonucu gevrek) olması ve ağır sıkıştırma ekipmanının tabakaları çatlatmasının sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

ELSBURY ve diğerleri (1990), sıkıştırılmış kil şiltelere ait davranış özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında 10.7m × 12.2m boyutlarında bir model sıkıştırılmış kil şilte oluşturmuşlardır. Sıkıştırılmış kil şilte 15cm kalınlığında (sıkıştırılmış kalınlık) iki tabakadan oluşmakta idi. Şiltenin permeabilitesi çift halkalı infiltrometreler ve lysimeter adını verdikleri 4.88m × 4.88m boyutlarındaki yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden yapılan ve sızıntıyı toplamakta kullanılan alet yardımı ile hesaplamışlardır. Akışkan olarak boyalı su kullanmışlar ve sızıntıyı daha net olarak saptamışlardır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Sıkıştırılmış Kil Şiltelerde Permeabiliteyi Etkileyen Önemli Faktörler

Esas Grup	Anahtar Faktörler
(a) Tasarım Aşaması	
Zemin tipi	Çalışılabilirlik Derecelenme Şişme potansiyeli
Diğer faktörler	Sürşarj yükü Şilte kalınlığı Temelin stabilitesi
(b) İnşa Aşaması	
Temel kompaksiyon öngörülleri	Tabakalar arası boşlukların yok edilmesi Danelerin sıkılaştırılması
Gerekli tercihler	Tabaka kalınlığı Zeminin su muhtevası Sıkıştırıcının tipi ve ağırlığı Geçiş sayısı Dane boyutu
Diğer faktörler	Zemin hazırlanması İnşa kalite kontrolü
(c) İnşa Sonrası Aşaması	
Çevresel etkiler	Çatlama Donma

BÖLÜM 3

GEÇİRİMSİZLİK MALZEMESİ OLARAK BENTONİT

3.1 Giriş

Bugün, bentonit adı verilerek kullanılan malzemeler çok eskiden beri faydalanılmakta olan bir kil türüdür. İnsanların ilk kullandıkları hammaddelerden biri killerdir. Temizleme özellikleri, kolay şekillendirilebilmeleri, ısı etkisiyle mukavemet kazanmaları, su geçirmeyen tabakalar oluşturmaları gibi yararları nedeniyle killer, değişik yöresel adlar altında ilk çağlardan beri kullanılagelmıştır.

Bentonit, ilk kez sabun kili olarak 1873’de William Taylor tarafından tanıtılmış, Rock Creek sahasındaki Ford Benton formasyonunun bulunmasıyla *bentonit* adını almıştır. 1874’de aynı özelliğe sahip kil minerali Fransa’nın Montmorillon bölgesinde bulunduğundan bu kil mineraline Montmorillonit adı verilmiştir. Suda hacimli ve jelimsi bir kütle vererek şişmesi ile ayrılan bu yeni kil daha sonra W.C. Knight tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Uygulama alanları hızla arttığından buna paralel olarak da üretimi artmıştır (ÇAKI, 1995).

Bentonit doğal haliyle yumuşak, suda hemen dağılan, el ile temas ettiğinde yağlı bir izlenim veren özelliktedir. Partiküllerinin çok ince ve temas yüzeyinin büyük olması nedeniyle oldukça yüksek su alma gücüne sahiptir. Yağ ve gliserini de kolaylıkla emer.

Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde çok su adsorblaması ve su geçirmeyen bir jel oluşturmaları özelliklerinden yararlanır. Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde;

- Zemin enjeksiyonlarında
- Diyafram duvarlarda
- Sondajlarda
- Düzenli depolama tesislerinin şilte tabakasında
- Baraj inşaatlarında kullanılmaktadır.

Bentonitlerin ve bentonitik killerin montmorillonit mineralinden gelen bir tiksotropi özelliği vardır. Tiksotropik karakterleri, su içerikleri sabit kaldığı halde basınç ve sarsıntı gibi etkenler karşısında plastisitelerini değiştirebilmelerini, yüksek basınç altında akıcı hale gelebilmelerini sağlar. Bentonitler su içinde şişme özelliği gösterirler.

3.2 Bentonitlerin Oluşumu

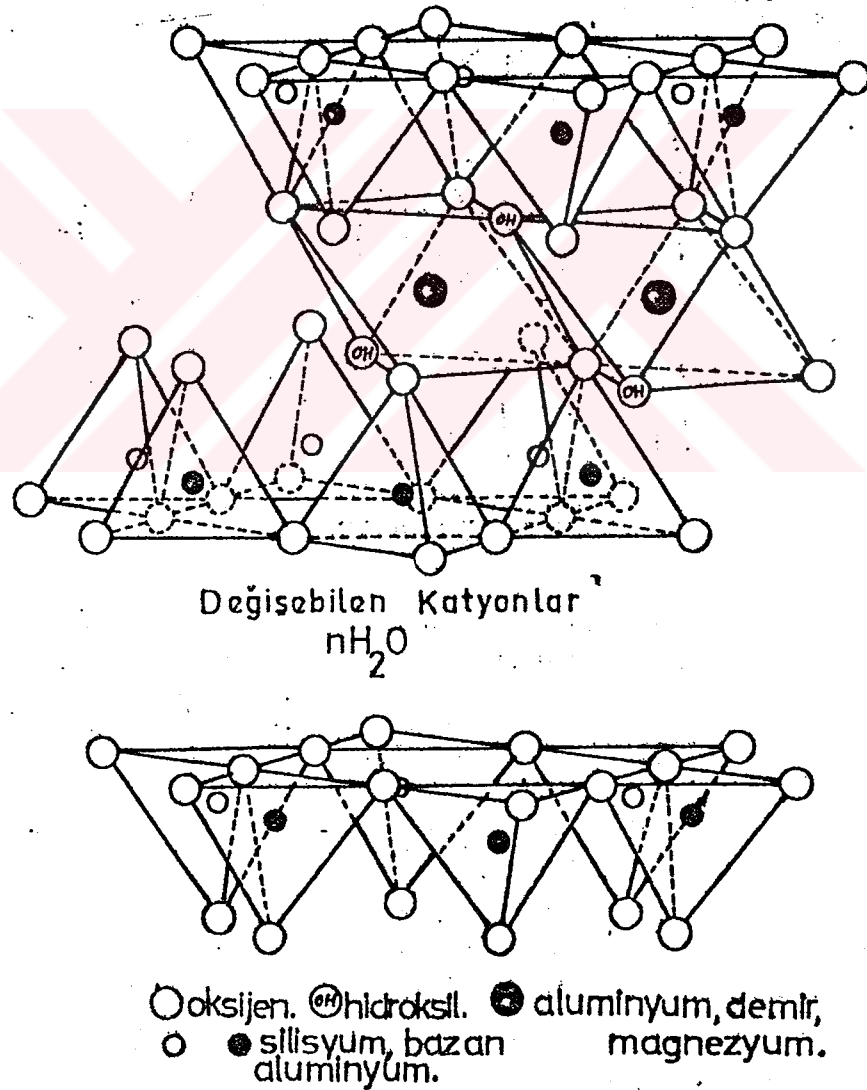
Montmorillonitler farklı bentonitlerde farklı özellik gösterebilmektedir. Değişiklik, montmorillonitin kristal kafesinde olduğu gibi değişen iyonlarında da vardır. Özellikle magnezyum ve demir miktarları ve R_2O_3 / SiO_2 oranı farklı olmaktadır. Şekil 3.1 montmorillonitlere ait yapıyı göstermektedir (ERDİNÇ, 1976).

Jeolojik kesitlerde bentonite dönüşmemiş pek çok volkan külü yatakları bulunur. Külün bentonit haline gelebilmesi ancak suyla temas ettiği durumlarda mümkündür. Formasyonda suyun tuzlu veya tatlı oluşu da önemlidir. Bentonitlerin çoğu marin formasyonları ile ilişkili olduğundan, bu malzemeye dönüşümün deniz suyunda meydana geldiği bir gerçektir (ERDİNÇ, 1976).

3.3 Bentonitlerin Özellikleri

Bentonit killeri beyaz, gri, sarı, kahverengi, koyu pembe, sarımtırak yeşil gibi çok değişik renklerde bulunabilirler. Bu değişikliğe neden olarak montmorillonitin içerdiği Fe iyonunun iki veya üç değerli olması gösterilmektedir. Üç değerli demir içeren bentonitler sarı veya kahverengi olabiliyorken iki değerli bentonitler mavi renktedirler. Yataktaki organik maddeler ve su muhtevası da rengi etkiler. Su muhtevasındaki artış bentonitin rengini koyulaştırır (GÜNGÖR, 1981).

Bentonit killerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri 100-150° C gibi düşük sıcaklıklarda kaybettiği fiziksel sudur. Killerin yüzeyindeki suyun iki mekanizmayla tutulduğu bilinmektedir. Adsorbe su ve değişebilir katyonların hidrasyonundan ileri gelen su. Birincisi TERZAGHI, K.'ya (1948) göre su molekülünün dipol özelliğinden ileri gelir. İkinci neden ise değişebilir katyonların negatif kil yüzeyinden uzaklaşamıyarak suyu çekmeleridir.



Şekil 3.1 Montmorillonit Yapısının Şematik Olarak Gösterilişi, (ERDİNÇ,1976)

3.4 Bentonitin Kullanım Alanları

Bentonit çok eskiden beri değişik amaçlarda kullanılan bir malzemedir. Başlıca kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

3.4.1 Seramik Sanayii:

Bentonit, bu alanda hamurun plastisitesini geliştirdiği için kullanılır. Bentonit içeren karışımda kurumadan ileri gelen çatlamalar azalır, kuru mukavemet artar, piştikten sonra olan kırılma azalır.

3.4.2 Döküm Sanayii:

Döküm sanayii bentonitlerin çok tüketildiği bir endüstri dalıdır. Bağlayıcı ve ince daneli koloidal bentonitler kalıplarda kum danelerini bağlamakta kolaylık ve fazla mukavemet sağlarlar.

3.4.3 Sondaj İşlemlerinde:

Bu alanda suya karşı geçirimsiz, yüksek su adsorpsiyonu olan, tiksotropi gösteren, yüksek jel teşkil edebilen bentonitler kullanılır. Bu alanda bir Türk standardı da vardır (T.S. 977 UDK.622.36).

3.4.4 Kağıt Endüstrisinde

Bu alanda tamamen kuvarzsız, ince daneli, beyaz renkli, topaksız, sabun kayganlığında alkali bentonitler kullanılmaktadır.

3.4.5 Boya Endüstrisinde

Yağlı boyalarda, emayelerde, badanalarda, matbaa mürekkeplerinde renkleri ve boyaları adsorbe özelliğe sahip, devamlı süspansiyon oluşturacak kadar ince daneli alkali bentonitler kullanılır.

3.4.6 Yağların Renklerinin Giderilmesinde

Aktif veya asitle aktiveleştirilen (değişebilen iyonları hidrojenlenmiş) bentonitler bu alanda kullanılır. Doğal olarak aktif olan bentonitler çok olmadığından genellikle HCl veya M_2SO_3 gibi asitlerle aktiveleştirilirler.

3.4.7 İlaç Sanayiinde:

Merhemlerde dolgu maddesi olarak ve kuvvetli ilaçların seyreltilmesinde alkali bentonitler kullanılırlar. Ayrıca diş macunu yapımında ve kozmetik sanayiinde de uygulamaları vardır.

3.4.8 Gübre yapımında

Sıvı gübrelerin veya süspansiyon şeklindeki gübrelerin yapımında stabilize maddesi olarak kullanılır.

3.4.9 Kataliz Olarak:

Ağır petrol fraksiyonlarının katalitik olarak parçalanmasında alkilasyon, dehidrasyon ve izomerizasyon gibi reaksiyonlarda kataliz olarak kullanılır.

3.4.10 Yangın Söndürücülerde.

Bentonitin yapısında çok miktarda su tutabilmesi özelliğinden yararlanır. Süspansiyon haline getirilen bentonit püskürtülerek yanan bölgelerin hava ile ilişkisi kesilir.

3.4.11 Portland Çimentosu Yapımında:

Portland çimentosuna %1 oranında bentonit ilavesi mekanik direnci artırır, donma süresini azaltır.

3.5 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Teknik Özellikleri

Deneylerde teknik özellikleri farklı bentonit malzemesi kullanılmıştır (bentonit A ve bentonit B). Üretici firmadan edinilen teknik özellikler aşağıda belirtilmiştir.

Numuneler İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarında endeks deneylerine tabi tutulmuştur. Bu sonuçlarla ilgili föyler ekler kısmında verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneylerde Kullanılan Bentonitlerin Teknik Özellikleri

BENTONİT A	
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.04
Viskozite (sn)	30 - 32
Rutubet (%)	10 - 12
Kum (%)	1 - 2
Kuru Elek (%) (200 Mesh'den geçen)	97
Yaş Elek (%) (200 Mesh'den geçen)	99

KİMYASAL ANALİZ					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O
% 60	% 15	% 6 max	% 2.5	% 2	% 1

BENTONİT B	
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.04 - 1.05
Viskozite (sn)	38 - 40
Rutubet (%)	7 - 8 max
Kum (%)	0.1 - 2
Kuru Elek (%) (200 Mesh'den geçen)	99
Yaş Elek (%) (200 Mesh'den geçen)	99

KİMYASAL ANALİZ						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
% 56 -64	% 19 - 21	% 4 max	% 2 - 3	% 0.5 - 1	1.5 - 2.8	% 1 - 1.5

BÖLÜM 4

ZEMİNLERDE HİDROLİK İLETKENLİK (PERMEABİLİTE)

4.1 Giriş

Katı atık depoları, içerdikleri atıkların zehirli olması sebebiyle tabiattan izole edilmelidirler. Özellikle atıkların tabanında toplanan ve çevreye çok zararlı olan atık suyunun yeraltı suyuna teması önlenmelidir. Bu amaçla atık tesisinin altına bir şilte tabakası serilmesi öngörülmüştür. Şilte tabakası bileşenleri, şartnamalarda öngörülen permeabilite değerini sağlayacak şekilde seçilirler.

4.2 Zeminlerde Bulunan Su

Her zemin danesi, yüzeyinde bir elektrik yükü taşır ve bununla birlikte toplamda nötr bir durum kazanmak için iyonları yüzeyine çeker. Yüzeyde toplanan bu iyonlar su moleküllerini çekerler. Böylece her zemin danesi bir su filmi tarafından çevrelenmeye meyillidir. Daneler arası çekme ve itme kuvvetleri her dane için geçerli olmakla birlikte ince daneli zeminlerde (dane ağırlığına kıyasla) daha fazla önem taşır.

Zeminlerde su, adsorbe (110° C'de kurumaz), kimyasal bağlı, etüvde kuruyan, drenajla giderilebilen serbest ve kapiler su olarak beş ayrı şekilde bulunabilir.

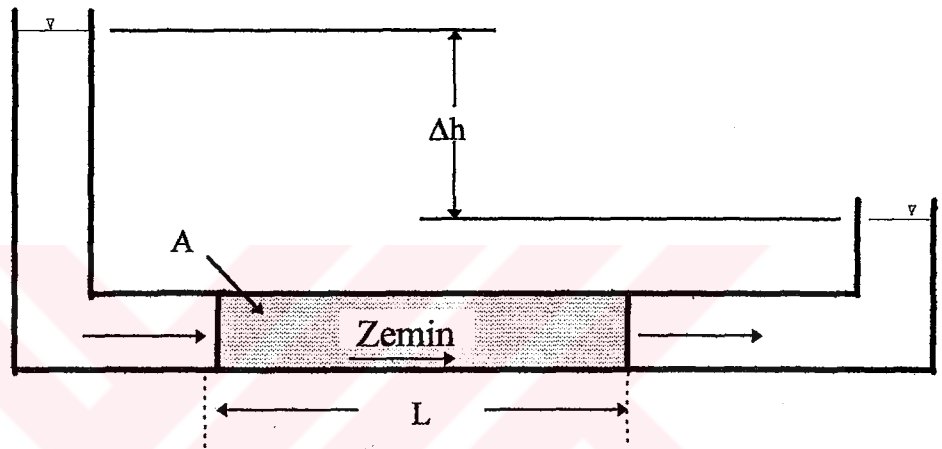
4.3 Geçirimli Ortamlarda Akış İçin Darcy Kanunu

Zemin içindeki boşluklarda suyun akışı laminer olarak kabul edilebilir. Bu durum için Darcy'nin (1856) önerdiği hız denklemi eşitlik (2.1)'deki gibidir.

$$V = k \cdot i \quad (4.1)$$

Denklemdaki i , Darcy'nin tanımladığı hız gradyanıdır. Bu denklem süreklilik denklemi ile geliştirilerek eşitlik (4.2)'ye ulaşılır.

$$q = V \cdot A = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (4.2)$$



Şekil 4.1 Sızma Hızı Şematik Gösterimi

Eşitlik (4.2) deneysel olarak şekil (4.1) düzeneğinden elde edilmiştir. Denklemden V hız, q akışkanın debisi, A enkesit alanı, k ise Darcy permeabilite katsayısıdır.

Permeabilite, zemine ve akışkana bağlı bir özelliktir ve akışkanın zeminde hareket etme özelliğini gösterir. Eşitlik (4.2)'de kullanılan A ifadesi enkesit alanıdır, oysa akışkan sadece boşluklarda hareket etmektedir. Dolayısıyla boşluk oranı ve porozite, permeabilite üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Permeabilite üzerinde etkili olan başka faktörler de vardır. Efektif dane ya da boşluk çapı, boşluk şekli ve akışkanın zemin içinde izlediği akım yolu da permeabilite üzerinde etkilidir (HOLTZ ve KOVACS, 1981).

Laboratuvarda yapılan permeabilite deneylerinde sonucu etkileyen faktörler, test düzeneğinde sıkışan hava kabarcıkları, suya doygunluğun % 100 seviyeye ulaşmaması, ısı değişmesi (zemin ve laboratuvar arası ısı farkı varsa bir viskozite düzeltilmesi yapılmalıdır), kum ve siltlerde yapılan deneylerde ince danelerin hareketi, olarak sıralanabilir (HOLTZ ve KOVACS, 1981).

Permeabilite katsayısı zeminlerin dane çapı dağılımına göre değişiklik gösterir. BOWLES (1988), yaptığı çalışmada değişik zemin sınıflarına ait karakteristik permeabilite katsayılarını elde etmiştir. Tablo (4.1), k katsayısının büyüklüğünün zemin cinsi ile değişimini gösterir.

Tablo 4.1 Zemin Sınıfına Göre k'nın Değişimi (BOWLES, 1988).

k sınır değerleri				
cm/s	10^2	10	10^{-3}	10^{-7}
m/s	10	10^{-2}	10^{-5}	10^{-9}
	Temiz çakıl	Temiz çakıl ve kum karışımları	Kum-silt karışımları	Killer
	GW, GP	GW,GP,GM,SW,SP	SM,SL,SC	

LAMBE ve WHITMAN (1969), permeabilitenin zemine ait olan beş özellikten etkilendiğini göstermişlerdir. Bu özellikler sırasıyla;

- Dane boyutu
- Boşluk oranı
- Dane çapı dağılımı
- Doku
- Doygunluk derecesi

Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması pratikte mühendislik kullanımı için önemlidir. TERZAGHI ve PECK, (1967) zeminleri permeabilite katsayılarına göre sınıflandırmışlardır. Tablo (4.2) zeminlerin permeabilite katsayısına göre sınıflandırılmasını gösterir.

Tablo 4.2 Zeminlerin Permeabilite Katsayılarına Göre Sınıflandırılması, (TERZAGHI ve PECK, 1967).

Permeabilite derecesi	Permeabilite katsayısı, k , (cm/sn)
Yüksek	10^{-1} üzeri
Orta	$10^{-1} - 10^{-3}$
Düşük	$10^{-3} - 10^{-5}$
Çok düşük	$10^{-5} - 10^{-7}$
Pratik olarak geçirimsiz	10^{-7} den az

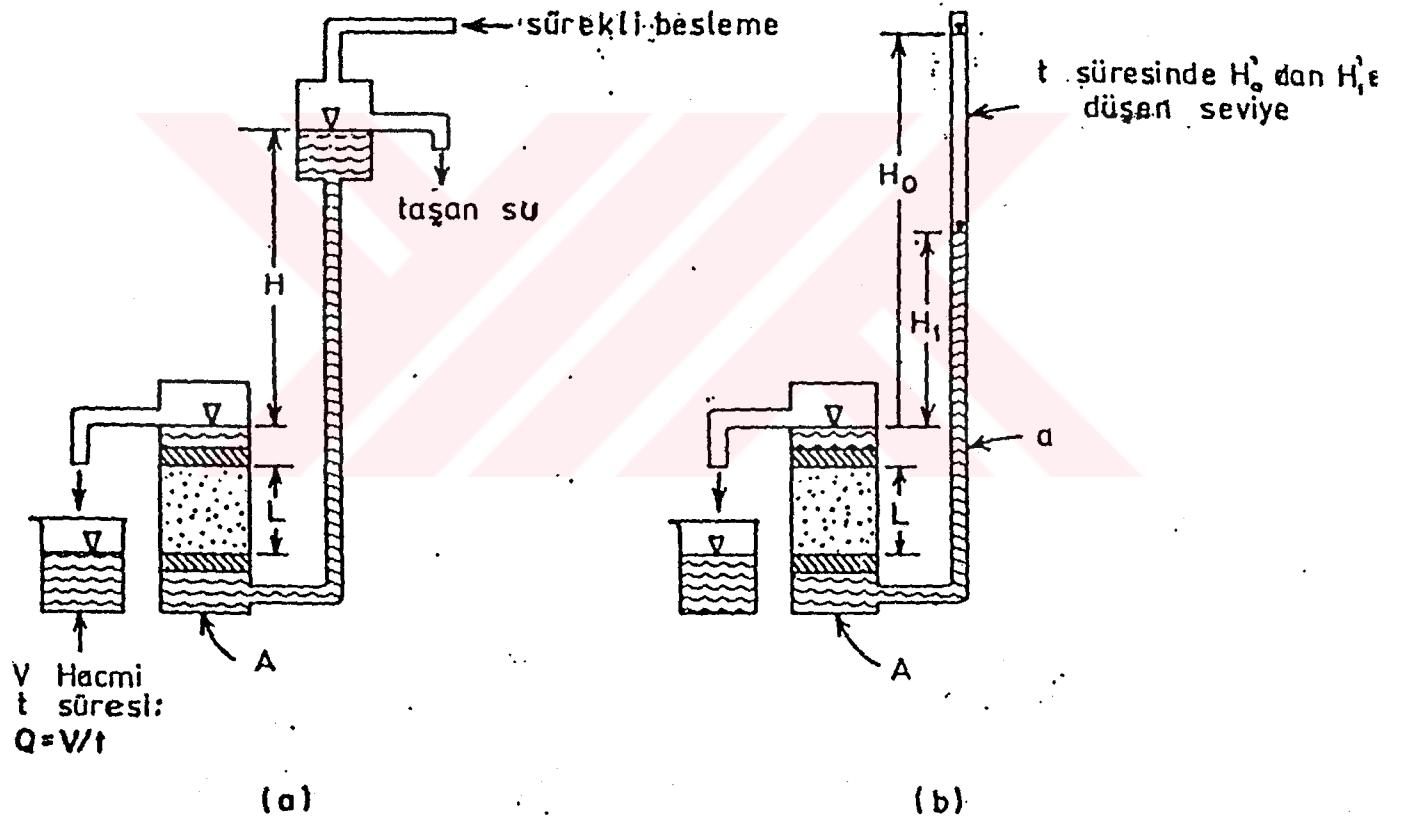
4.4 Laboratuvar Permeabilite Deneyleri

Zeminlerin permeabilite katsayısının tayini için laboratuvarda iki tipte deney yapılmaktadır. Bunlardan *sabit seviyeli permeametre* kullanılarak yapılan deney, kaba daneli zeminler için kullanılmaktadır. Şekil (4.2.) (a)'da *sabit seviyeli permeametre* deneyinin şematik çizimi görülebilir. Burada permeabilite katsayısı eşitlik (4.3)'e göre hesaplanır.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (4.3)$$

Eşitlikte Q , t zamanda kapta toplanan su, A , enkesit alanı, L , zemin boyu, h , hidrolik yüksekliktir.

Düşen seviyeli permeametre aleti ince daneli zeminler için düzenlenmiştir. Şekil (4.2) (b) düşen seviyeli permeametre aletinin şematik gösterimidir. Hesaplarda permeabilite katsayısı için (4.4) eşitliği kullanılır.



Şekil 4.2 Laboratuvar Permeametre Aletleri; (a) Sabit seviyeli permeametre, (b) Düşen seviyeli permeametre.

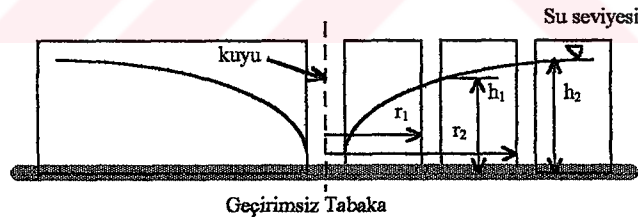
$$k = 2.3 \frac{a.L}{A.\Delta t} \log \frac{H_1}{H_2} \quad (4.4)$$

Eşitlikte a , okumaların alındığı cam tüpün enkesit alanı, L , zemin boyu, A , zemin enkesit alanı, Δt , geçen süre, H_1 ve H_2 deney başı ve sonu hidrolik yüksekliklerdir.

4.5 Arazide Permeabilite Ölçümü

Her ne kadar laboratuvar deneyinin başarılı olarak yapıldığı varsayılsa da, deney arazideki durumu temsil ettiği kabul edilen çok küçük boyuttaki bir numune üzerinde yapılır. Arazideki zemin tabakalarının üniform olmayan yapısı nedeniyle laboratuvar deney sonuçları gerçeği tam olarak yansıtmayabilir, bu nedenle arazi ölçümleri de yapılmalıdır.

Permeabilitenin arazide ölçümü için genellikle pompaj uygulanır. Yöntemin prensibi şekil (4.3)'de görülmektedir.



Şekil 4.3 Kumda Pompalama Deneyi

Burada permeabilite katsayısı eşitlik 4.5 ile elde edilir. Eşitlikteki parametreler şekil üzerinde görülebilir.

$$k = \frac{2.3q \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi \cdot (h_2^2 - h_1^2)} \quad (4.5)$$

Arazide permeabilitenin bir diğer ölçüm metodu da kaplamalı sondaj deliği içine su pompalayarak sabit seviyeli permeabilite deneyi yapmaktır. Bu durumda permeabilite katsayısı (4.6) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$k = \frac{q}{5.5.r.h} \quad (4.6)$$

Eşitlikte q , yeraltı su seviyesi üzerinde su seviyesini sabit tutmak için gerekli su akış hızı, r kaplama borusu yarıçapı, h hidrolik yüküdür.

Arazide permeabilitenin bir diğer ölçüm metodu da infiltrometreler kullanmaktır. TRAST ve BENSON (1995) laboratuvar ve arazi permeabilite ölçüm değerleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çift halkalı infiltrometre (çhi) ile arazide yapılan ölçümlerle tüp numunesi ile laboratuvar (tn) ve blok numune (en az 0.30m çapına sahip, bn) ile laboratuvarda yapılan permeabilite ölçümlerinin 5 ayrı numuneye göre dağılımı tablo 4.3'de görülmektedir.

Tablo 4.3 Hidrolik İletkenlik Deneyleri Sonuçları, (TRAST ve BENSON,1995)

Numune	Çift halkalı infiltrometre ile arazide $K_{\text{çhi}}(\text{m/s})$	Tüp numunesi ile laboratuvar $K_{\text{tn}}(\text{m/s})$	Laboratuvar bok numune $K_{\text{bn}}(\text{m/s})$	$K_{\text{çhi}}/K_{\text{tn}}$	$K_{\text{çhi}}/K_{\text{bn}}$
A	$2 \times 10^{-10} - 8 \times 10^{-10}$	2×10^{-10}	3×10^{-10}	2.0	1.7
B	$1 \times 10^{-10} - 3 \times 10^{-10}$	2.9×10^{-10}	2×10^{-10}	0.6	0.8
C	$1 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-10}$	1.3×10^{-10}	1.5×10^{-10}	0.8	0.8
D	$1 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-10}$	2.5×10^{-10}	1.2×10^{-10}	6.0	0.9
E	$1.5 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-10}$	1.5×10^{-10}	3.5×10^{-10}	3.6	0.8

Tablo 4.3'den de anlaşılacağı gibi arazi deneylerine en yakın sonucu veren laboratuvar deneyi, blok numune ile yapılan deneydir.

ELSBURY ve diğ. (1990) yaptıkları çalışmada bir model arazi şiltesi oluşturmuş, bunun altına permeabiliteyi ölçmek için *lysimeter* adını verdikleri (4.88m x 4.88m) boyutunda ve atmosfer basıncını sağlamak için bir de havalandırma tüpüne sahip olan sızmayı ölçen bir düzenek kurmuşlardır. Bu düzenek bir polietilen tabakadan oluşmaktadır ve sızmayı ölçmek için kullanılmıştır. Boyutları bir hayli büyük olan bu düzenek yardımıyla arazi permeabilite değeri daha kesin bir şekilde hesaplanabilmiştir.

4.6 Sonuçlar

Katı atık depolarında atık suyunun zemin tabakalarına yayılmasını önlemek amacıyla teşkil edilecek olan şilte tabakalarının permeabilite katsayısı kontrol edilmelidir. Atık depolarında kullanılan geçirimsizlik şilteleri şartnamelerde öngörülen minimum permeabilite değerine sahip olmalıdır. Bu değer ülkemizde kullanılan katı atık depo tesislerine ait şarnamede 10^{-7} cm/sn olarak verilmiştir. Bu amaçla teşkil edilecek şilte tabakası bileşenleri üzerinde yapılacak olan laboratuvar permeabilite deneylerinin yanında şilte tabakası serildikten sonra da arazide de permeabilite yapılması gerekmektedir.

BÖLÜM 5

GEÇİRİMSİZLİK BAKIMINDAN ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ, KOMPAKSİYON

5.1 Genel Tanım

Atık depo tesisleri tabanında, minimum permeabilite değerlerini sağlamak için şartnamelerde öngörülen özelliklere sahip bir şilte tabakası serilir. Uygulamada esas bileşenleri kil olan şilte tabakasının mühendislik özelliklerini iyileştirmek için tabakalara kompaksiyon uygulanmaktadır.

İnşaat mühendisliğinde kompaksiyon, mekanik enerji kullanarak zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması, içindeki hava boşluğunun azaltılması, bunun sonucu olarak daha sıkı hale getirilmesi anlamına gelir. Zeminin sıkıştırılması sonucu birim hacim ağırlığı artmakta ve buna bağlı olarak da mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır (ÖZAYDIN, 1989).

Kompaksiyon neticesinde daneli zeminlerde sıkışabilirlik (kompresibilite) azalmakta, kayma mukavemeti artmakta, permeabilite azalmaktadır. Kompaksiyon sonrası daneli zemin daha homojen bir yapıya sahip olmaktadır (İNCECİK, 1996).

5.2 Laboratuvar Kompaksiyon Deneyleri

Kompaksiyon teorisinin temelleri R.R.Proctor tarafından 1930'lu yıllarda atılmıştır. Proctor, o yıllarda Bureau of Waterworks and Supply şirketi adına Los Angeles'de barajlar inşa etmektedir ve geliştirdiği teoriyi *Engineerig News-Record*'da yazdığı bir seri makale ile tanıtmıştır.

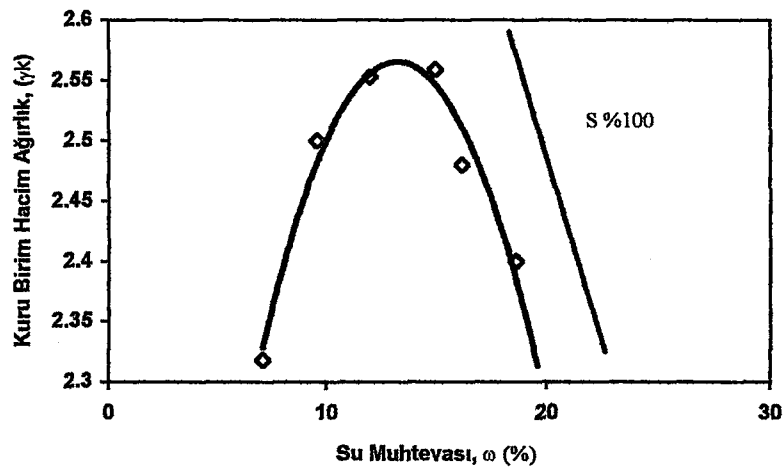
Bugün laboratuvarda yapılan standart kompaksiyon deneyleri onun onuruna *Proctor deneyleri* olarak adlandırılmaktadır (HOLTZ ve KOVACS, 1981).

Proctor teorisine göre kompaksiyon dört değişkenin bir fonksiyonudur. Bunlar;

- Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_k)
- Su Muhtevası (ω)
- Kompaksiyon enerjisi
- Zeminin Tipi (derecelenme, kil içeriği vb.)

Laboratuvar kompaksiyon deneylerinde en yaygın olarak belirli hacime sahip kalıp içindeki zemin numunesine belli ağırlıktaki tokmak belli sayıda belli yükseklikten düşürülür. *Standart Proctor Deneyinde* tokmak ağırlığı 2.5 kg, düşme yüksekliği 30 cm ve 3 sıra halinde serilen 1000 cm³ civarında hacme sahip zemin numunesine 25 kez düşürülür. Daha yüksek kompaksiyon enerjisi sağlayan *modifiye proctor* deneyinde zeminin daha fazla sıkıştırılması amaçlanır.

Laboratuvar kompaksiyon deneylerinde elde edilen her sonuç, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiğinde işaretlenir. Eğrideki her nokta tek bir kompaksiyon deneyini temsil eder (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Kompaksiyon Eğrisi

Böylelikle artan su muhtevalarında yapılan deneyler sonucunda dışbükey bir eğri elde edilir ki eğrinin tepe noktası maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve buna karşı gelen optimum su muhtevasını gösterir.

5.3 Arazi Kompaksiyon Yöntemleri

Gevşek zemini arazide sıkıştırmak için düz silindirler, titreşimli silindirler, keçi ayaklı silindirler, çok tekerlekli sıkıştırıcılar ve ağır araçlar kullanılırlar. Arazide kompaksiyon genelde, ağırlık, geçiş sayısı, geçiş hızı ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonudur.

Daha çok daneli zeminlerde uygulanan derin sıkıştırma yöntemlerinden birisi vibrasyonlu kazık yöntemidir. Yöntemde vibrasyonlu çelik kazık zemine sokulur ve vibrasyon sonucu ortaya çıkan boşluk tekrar zeminle doldurulur (İncecik, 1996). Diğer bir derin sıkıştırma metodu da arazide dinamik kompaksiyon (yada dinamik konsolidasyon) metodudur. Yöntemde büyük ağırlığa sahip tokmak (ton biriminde) vinçlerle kaldırılarak gevşek zemin üzerin düşürülür. D, etki derinliği (m biriminde), W, tokmak ağırlığı (ton biriminde), h, düşüş yüksekliği (m biriminde) olmak üzere aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$D = \mu \sqrt{W \cdot h} \quad (5.1)$$

Başlangıç için μ değerini 1/2 olarak almak gerçekçi bir yaklaşım verir (CHOW ve diğ.,1992). Zeminin üst kısmı tokmanın oluşturduğu örselenme etkisinden dolayı relatif olarak daha gevşek kalır ve ayrıca bir yüzeysel sıkıştırmaya ihtiyaç duyulur.

Laboratuvar proctor sıkılığı bir orandır ve belirli bir enerji seviyesine karşılık kullanılır. Arazide ise projede uygun görülen sıkılık nispetine göre kompaksiyon işlemi tatbik edilir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Giriş

Laboratuvar çalışmalarının amacı katı atık depo tesislerinde şilte tabakası teşkili için hidrolik geçirimsizliği ve mukavemet özellikleri açısından ideal bir malzeme elde etmektir. Bu amaçla belirli granülometri değerlerine sahip kum-çakıl zemine belirli oranlarda kil ve %3 oranında bentonit kili eklenerek hazırlanan numunelerin belli permeabilite ve mukavemet özellikleri elde edilmiştir. Laboratuvarda hazırlanan numuneye kil malzeme, %5, %10, %15 oranlarında eklenerek hidrolik iletkenlik, kayma mukavemeti, konsolidasyon ve kompaksiyon özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

6.2 Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Özellikleri

Daha önce de belirtildiği gibi, şilte tabakası olarak kullanılacak malzeme 3 tip zeminin belli oranlarda karışımından elde edilmiştir. Deneylere başlarken ilk olarak zeminlerin endeks özellikleri tayin edilmiştir.

6.2.1 Elek Analizi

Deneylerde kullanılan yapay (laboratuvarda belirli oranlarda karıştırılan) malzeme üzerinde elek analizleri yapılmıştır. Granülometri eğrisi üzerinde yorumlamalar yapılarak kaba daneli zeminlerin iyi derecelenmiş olması sağlanmıştır.

Granülometri eğrisi yorumlamalarında iki ölçüt kullanılmıştır. *Üniformluk katsayısı* granülometri eğrisini yorumlamak için bir şekil parametresidir ve

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6.1)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Eşitlikte D_{10} , malzemenin ağırlıkça %10'unun, D_{60} da malzemenin ağırlıkça %60'ının geçtiği dane çapıdır. *Dereceleme katsayısı* zemin sınıflandırmasında bir diğer şekil parametresidir.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} \quad (6.2)$$

Eşitlikte D_{30} , malzemenin ağırlıkça %30'unun geçtiği dane çapıdır. Üniformluk katsayısı 15'den büyük ve eğrilik katsayısı 1 ile 3 arasında olan zeminler *Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması* sistemine göre iyi derecelenmiş sayılırlar (Holtz ve Kovacs, 1981).

Kaba daneli numuneye iyi derecelenmiş bir eğriye sahip olması için belli oranlarda kum ve çakıl eklenmiştir. Bu amaçla bir kaç karışım numunesi için granülometri eğrisi çizilmiş ve şilte malzemesi için en uygun olanı üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kum-çakıl malzemeye ait son granülometri eğrisi şekil 6.1'de görülebilir. Elek analizlerine ait föyler ekler kısmında verilmiştir.

6.2.2 Relatif Sıklık

Kum-çakıl malzeme üzerinde relatif sıklık deneyi yapılmıştır. Relatif sıklık hesaplarında

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_n}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (6.3)$$

eşitliği kullanılmıştır. Eşitlikte e_{max} , zeminin en gevşek durumundaki boşluk oranı, e_{min} , zeminin en sıkı durumundaki boşluk oranı, e_n , zeminin tabii durumundaki boşluk oranını gösterir. Relatif sıklık ile zeminin yerleşim sıklığı arasındaki ilişki Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Zeminlerin Relatif Sıklıklarına Göre Sınıflandırılması

D_r	0.00 - 0.15	0.15 - 0.35	0.35 - 0.65	0.65 - 0.85	0.85 - 1.00
Sıklık	Çok Gevşek	Gevşek	Orta	Sıkı	Çok Sıkı

Kaba daneli zeminlerde relatif sıklığa etki eden belli başlı faktörler; dane şekli, dane boyutu, granülometri eğrisinin şekli olarak verilebilir (YOUĞ, 1973).

Maksimum boşluk oranını veren minimum birim hacim ağırlığını elde etmek için numune bir huni içinden sabit yükseklikten kalıba aktararak yerleştirilmiş ve deneyler 3 kez tekrarlanmıştır. Minimum boşluk oranını veren maksimum birim hacim ağırlığını elde etmek için numune, kalıba 3 tabaka halinde serilmiş ve her tabaka için kabın dışına tokmak yardımıyla belirli sayıda vurulmuş ve numune sıkılaştırılmıştır. Deneyde her durum için numune kuru olarak kullanılmıştır. Numunenin relatif sıklığı % 54.3 olarak bulunmuştur. Bu değer tablo 6.1’e göre deneyde kullanılan kum-çakıl malzemenin orta-sıkı olduğunu gösterir.

6.2.3 Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s) Tayini

Kaba daneli (GW-SW) ve ince daneli (CH) zemin numunelerine ait dane birim hacim ağırlığı, piknometre kabı yardımıyla bulunmuştur. Buna göre kum-çakıl malzemenin dane birim hacim ağırlığı 26.3 kN/m^3 ; yüksek plastisiteli kilin birim hacim ağırlığı ise 23.7 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır. Hesaplara ilişkin föyler ekler kısmında verilmiştir.

Şekil 6.1 Kaba Daneli Zemine Ait Granülometri Eğrisi

5.2.4 Kıvam Limitleri

İnce daneli zeminlerin endeks özelliklerini gösteren likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi deneyleri; kil ve iki ayrı bentonit numune için tatbik edilmiştir.

Numune üzerinde yapılan kıvam limitleri deneyleri hesaplarına göre kilin likit limiti % 75, plastik limiti % 33 ve plastisite indisi de % 42 olarak elde edilmiştir. Bentonit A malzemesinin likit limiti % 270, plastik limiti % 28 ve plastisite indisi % 242 olarak elde edilmiştir. Bentonit B malzemesinin likit limiti % 570, plastik limiti % 58 ve plastisite indisi %512 olarak elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre kıvam limitleri hesapları yapılan kil numunenin *Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması* sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer aldığı görülmüştür. Hesaplamalarda kullanılan föyler ekler kısmında yer almaktadır.

6.3 Kompaksiyon Deneyleri :

Kompaksiyon işlemi, mekanik enerji kullanılarak zemin daneleri arasındaki hava boşluklarının azaltılması ve zeminin daha sıkı hale getirilmesidir. Yapılan deneylerde R.R Proctor'un (1930) önerdiği *Standart Proktor* deneyleri kullanılmıştır. Herbir standart proctor deneyi sonrası maksimum sıklıktaki numune ile düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır.

Kum- çakıl numuneye % 3 oranında bentonit A ve bentonit B malzemeleri katılmıştır. Bu karışımlara sırasıyla % 5, % 10, % 15 oranlarında yüksek plastisiteli kil (CH) eklenmiştir. Her bir karışım için ayrı ayrı standart proktor deneyleri yapılmıştır, ve elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevaları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler grafiklere işlenmiştir. Tüm numunelere ait kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir. Hesaplarda kullanılan föyler ve bunlara ilişkin kuru birim hacim ağırlık-optimum su muhtevası grafikleri ekler kısmında verilmiştir.

6.4 Permeabilite Deneyleri

Çalışmalarda esas olan amaç katı atık depolarında tabii malzemelerden ideal şilte malzemesi oluşmaktadır. Burada ideal malzeme tanımı, mukavemeti yüksek, hidrolik geçirimi (permeabilite) düşük anlamına gelmektedir. Depo tesisleri için standartlarda önerilen belirli limit permeabilite değerleri vardır. Kil kaplama ile ilgili A.B.D.'deki şartname hükümlerinden bir tanesi, kil kaplamanın optimum su muhtevasının ıslak tarafında % 90-95 Proctor sıkılığında imal edilmesi ve bu şartlar altında permeabilitesinin $1 \cdot 10^{-7}$ cm/sn'den küçük olmasıdır (US. EPA).

Likit limiti yüksek olan killerde kuruma sırasında oluşan çatlaklar geçirimsizliği olumsuz yönde etkilemektedir. Projelendirme sırasında bu olumsuz durum da göz önünde bulundurulmalıdır.

Deneylerde akışkan olarak su kullanılmaktadır. Halbuki geçirimsizlik perdesi atık suyuna maruzdur ki bu su da killerin mikro yapısını bozabilecek kimyasalları içerebilir. Bu durumda geçirimsiz olan kil şilte geçirimli hale gelebilmektedir.

Deney sırası şöyle gerçekleşmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) ve optimum su muhtevası (ω_{opt}) hesaplanan numune, permeabilite kabına koyulmuş ve suya doygün hale gelmesi için 3 gün süre ile bekletilmiştir. Bu süre sonunda düşen seviyeli permeabilite deneyi uygulanmıştır. Belirli zaman aralıklarında okumalar yapılmıştır. Permeabilite katsayısı (k), eşitlik (5.4)'e göre hesaplanmıştır.

$$k = 2.3 \frac{a \cdot L}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{H_1}{H_2} \quad (6.4)$$

Hesaplara ilişkin föyler eklerde verilmiştir.

6.5 Kesme Kutusu Deneyleri

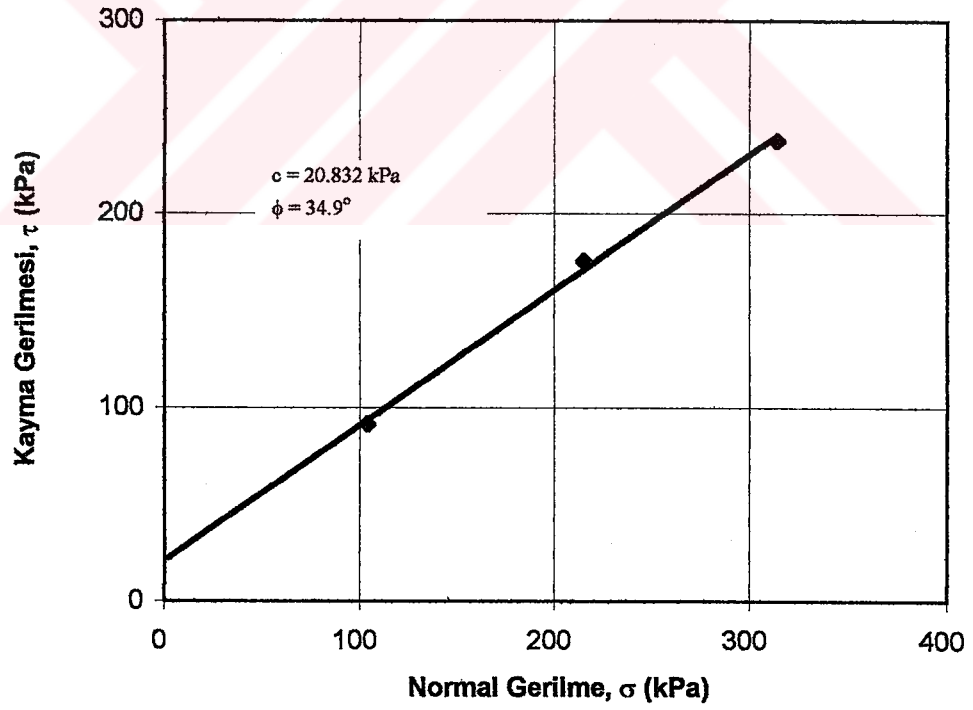
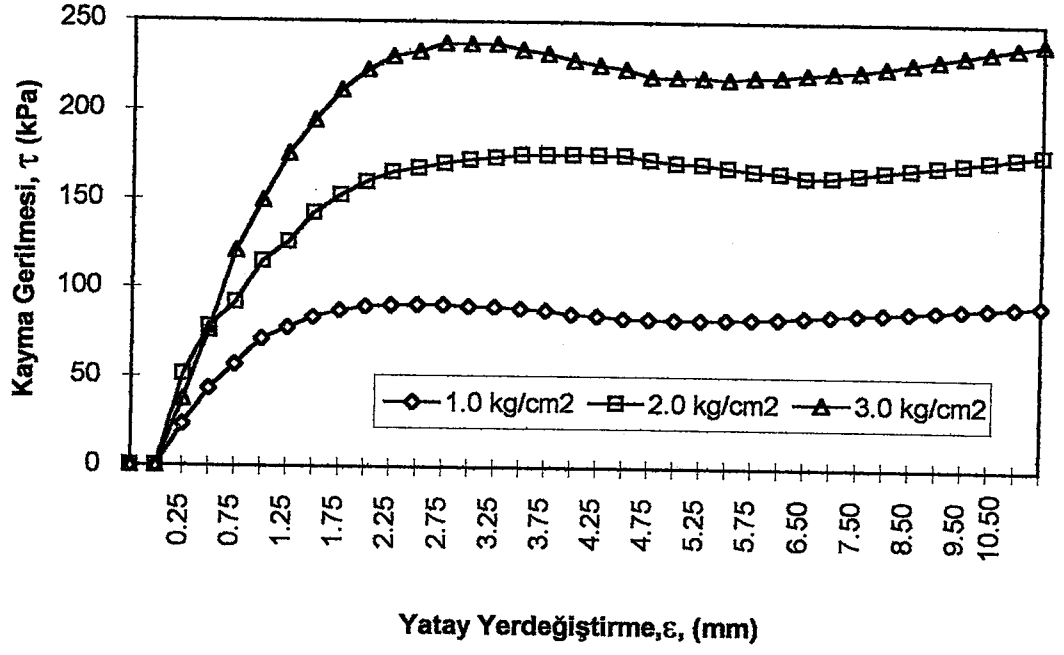
Şilte tabakası için belli karışımlarda hazırlanmış malzemenin kayma mukavemeti özelliklerini belirlemek için deformasyon kontrollü kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlarla kayma gerilmesi - normal gerilme ve kayma gerilmesi - yatay yer değiştirme grafikleri çizilmiştir. İlgili grafikler Şekil 6.3 - 6.8 olarak her kil oranına ait ayrı ayrı elde edilmiştir.

Bentonit A malzemesi içeren numuneye %5 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 20.83 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 34.9° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.3). Numuneye % 10 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 18.736 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 34.83° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.4). Numuneye % 15 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 17.28 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 31.85° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.5).

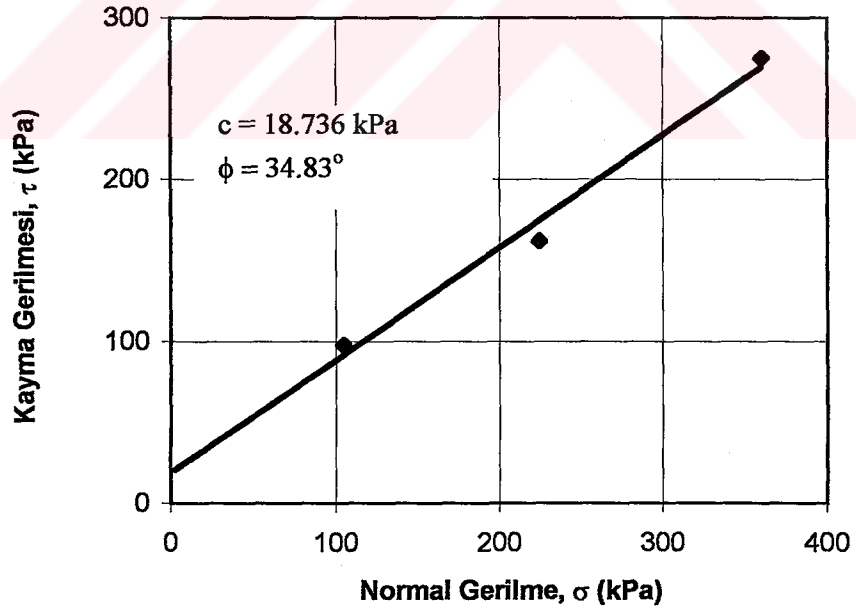
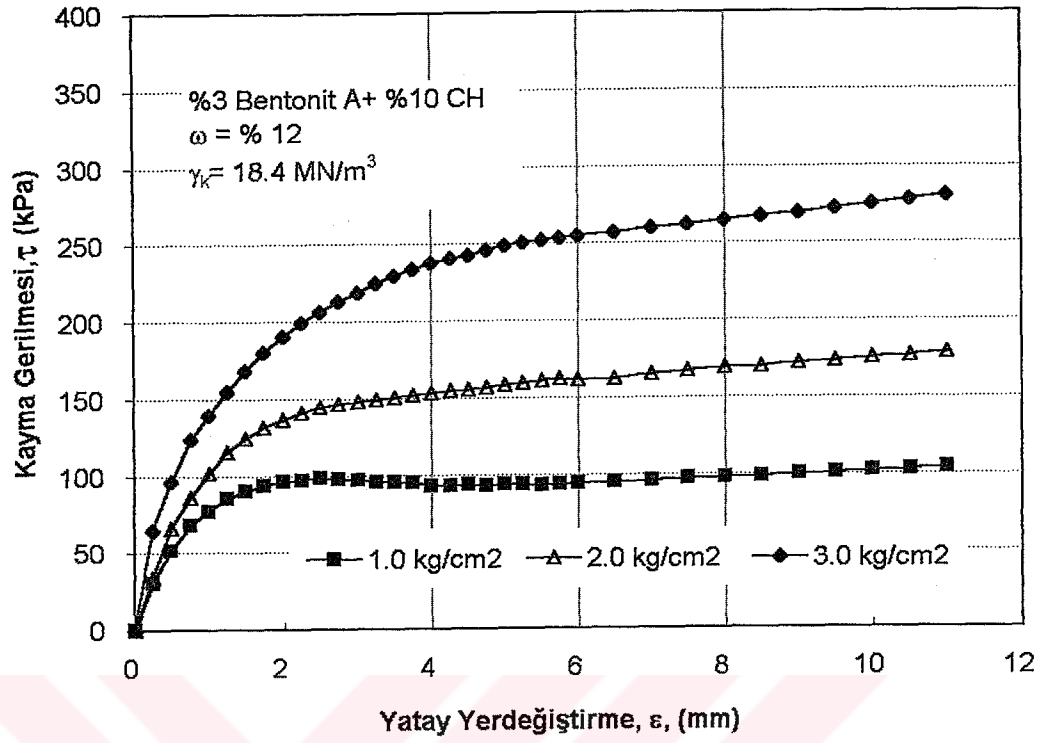
Bentonit B malzemesi içeren numuneye %5 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 10.403 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 33.49° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.6). Numuneye %10 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 50.764 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 26.89° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.7). Numuneye % 15 kil ilavesiyle yapılan deneylerde kohezyon (c) 40.735 kPa ve kayma mukavemeti açısı (ϕ) da 37.18° olarak elde edilmiştir (Şekil 6.8).

6.6 Konsolidasyon Deneyleri

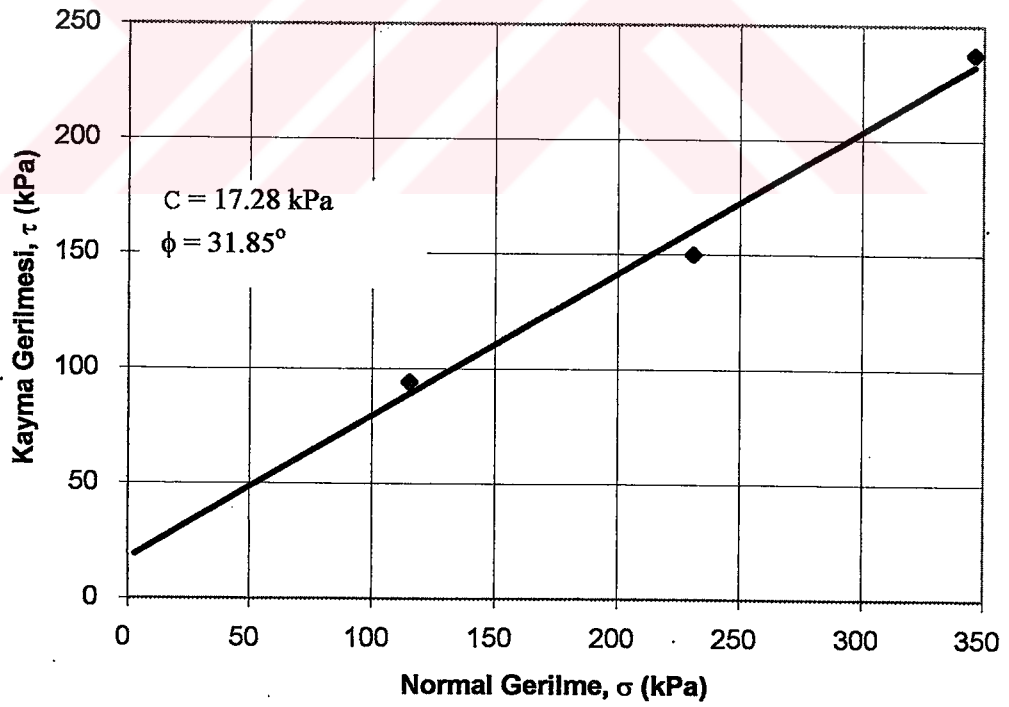
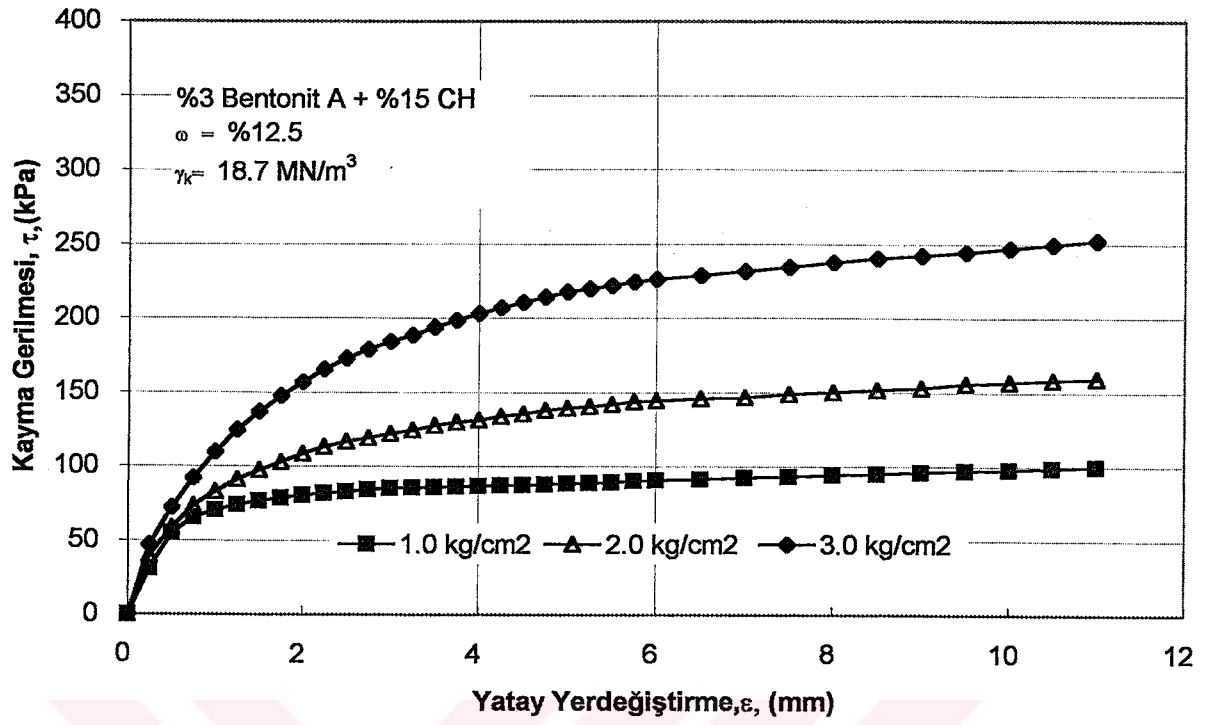
Şilte tabakası malzemesi olarak hazırlanmış numunenin %10 kil içeriğine sahip olanları üzerinde konsolidasyon (odömetre) deneyleri yapılmıştır. Kum-çakıl oranı % 87 olan bu numune, oturma davranışı olarak kum - çakıl özelliği göstermiştir. Numuneler daha çok ani oturma yapmışlardır. Numunelere ait konsolidasyon eğrileri Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da görülebilir. Deneylere ait föyler ekler kısmında verilmiştir.



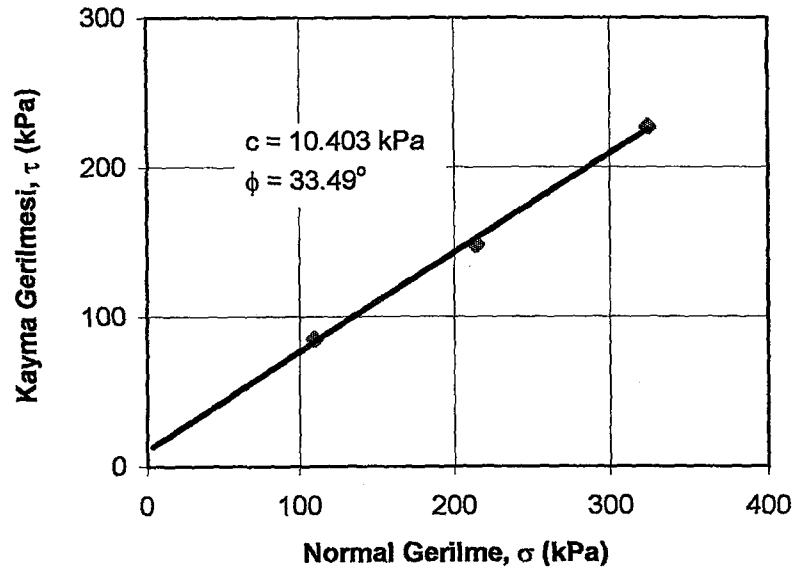
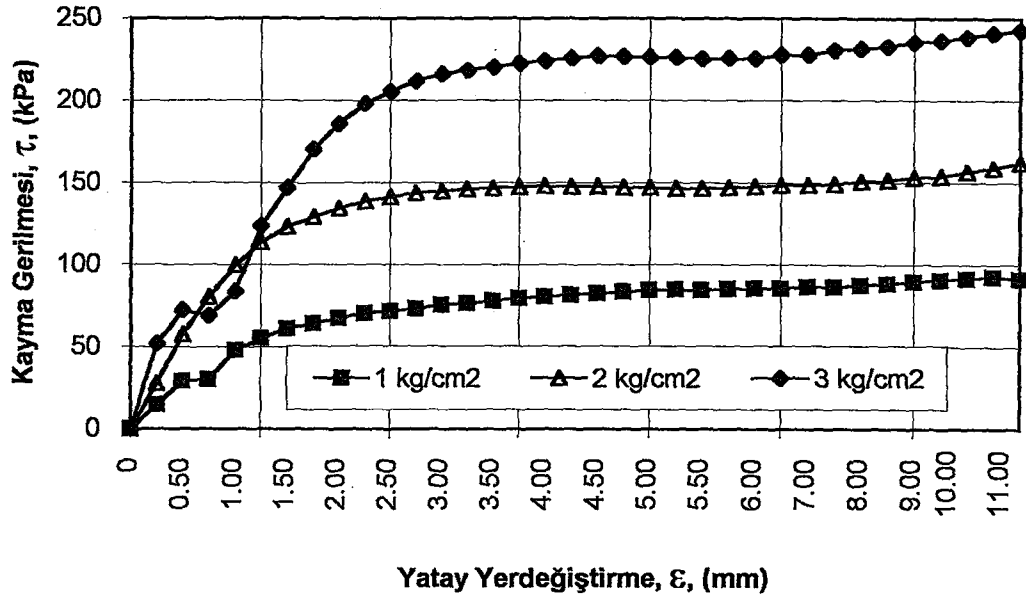
Şekil 6.3 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu (Bentonit A + %5 KİL)



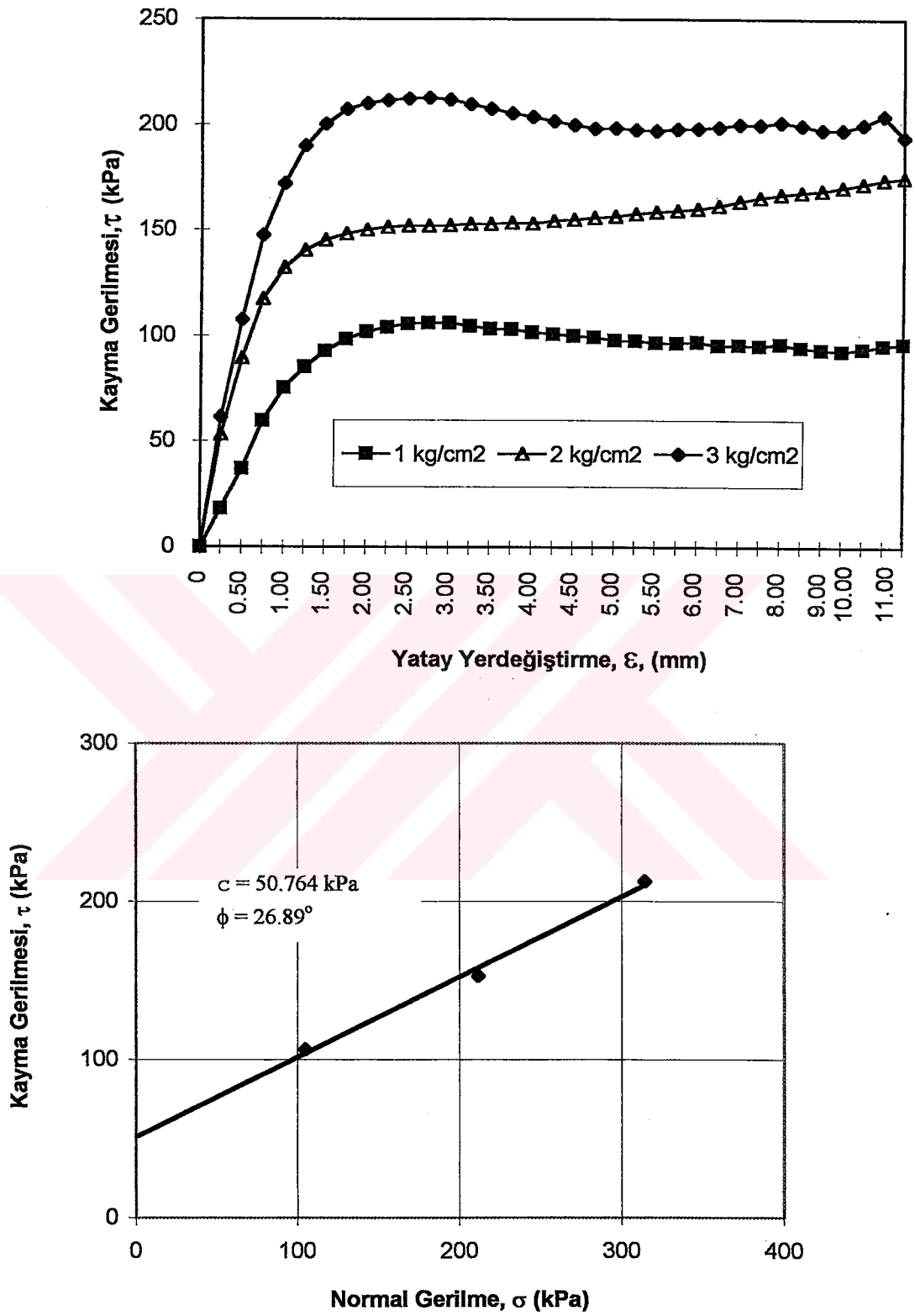
Şekil 6.4 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu
(%3 Bentonit A+ %10KİL)



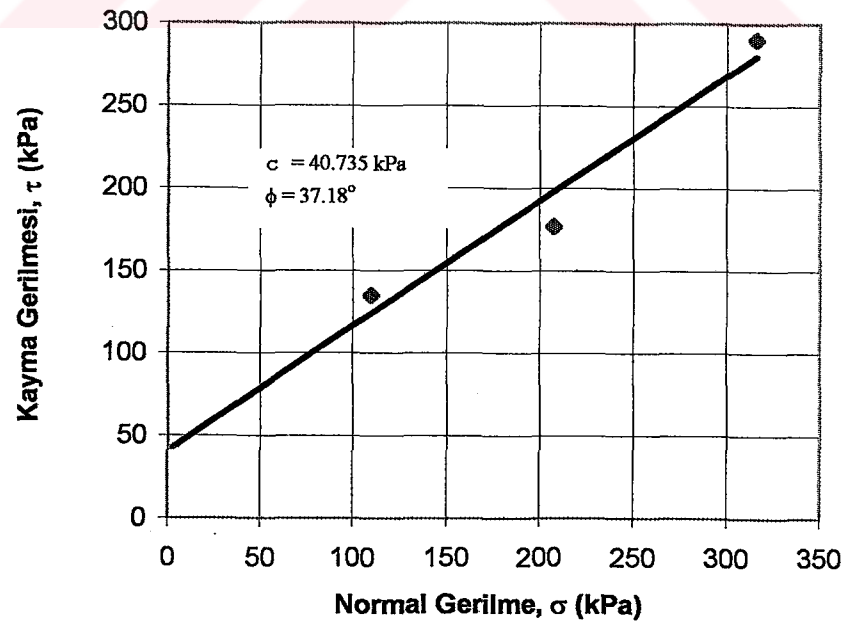
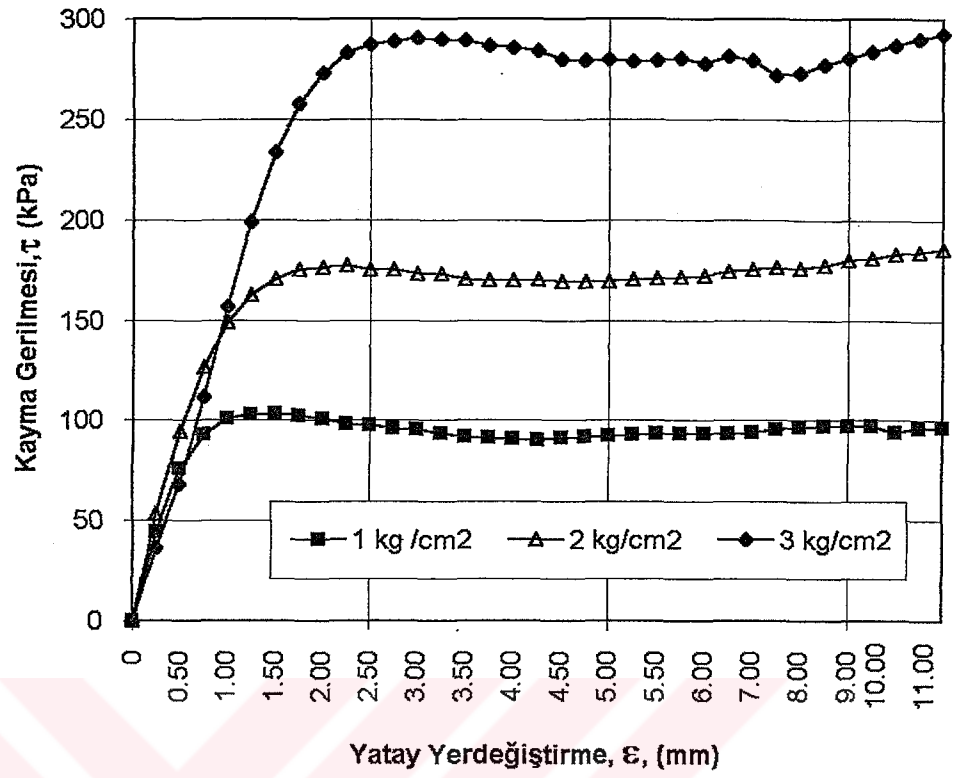
Şekil 6.5 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu
(%3 Bentonit A + %15 KİL)



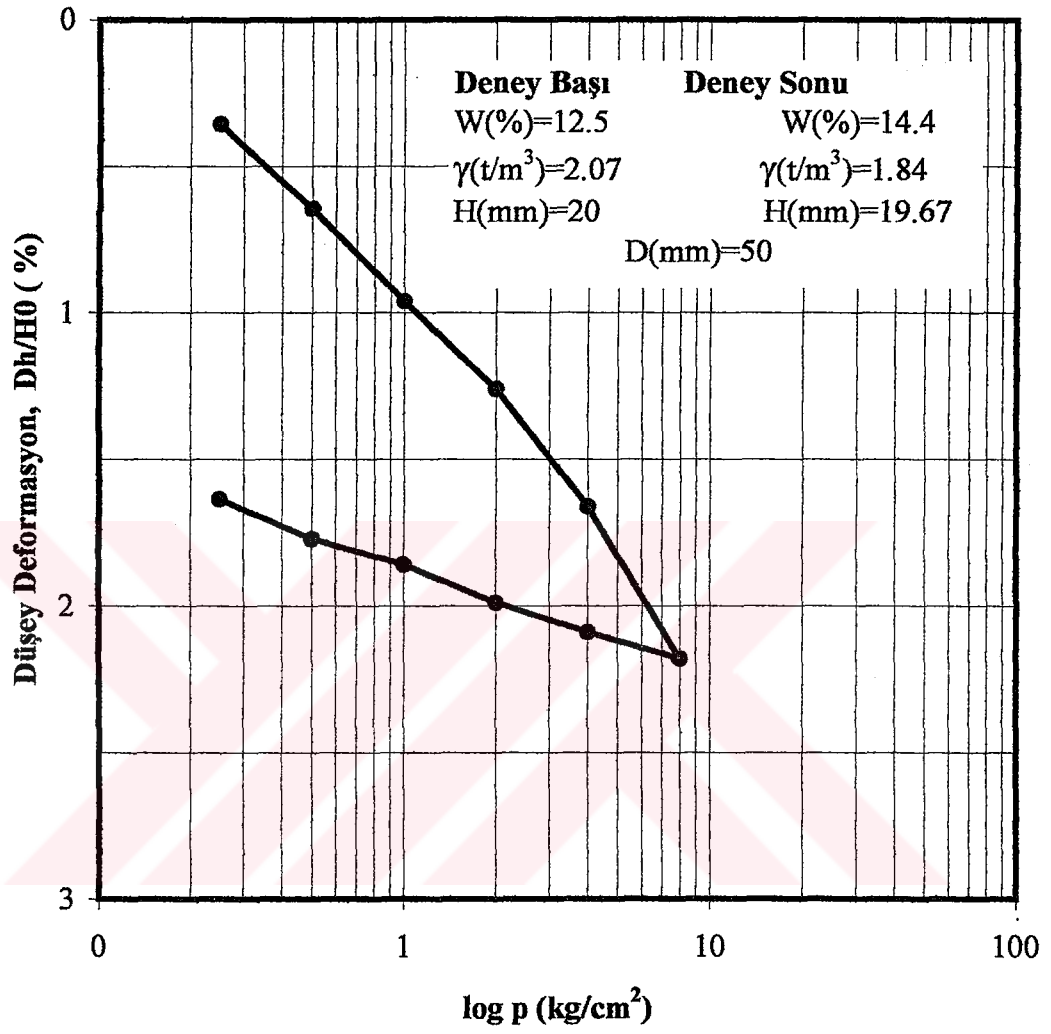
Şekil 6.6 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu
(Bentonit B + %5 KİL)



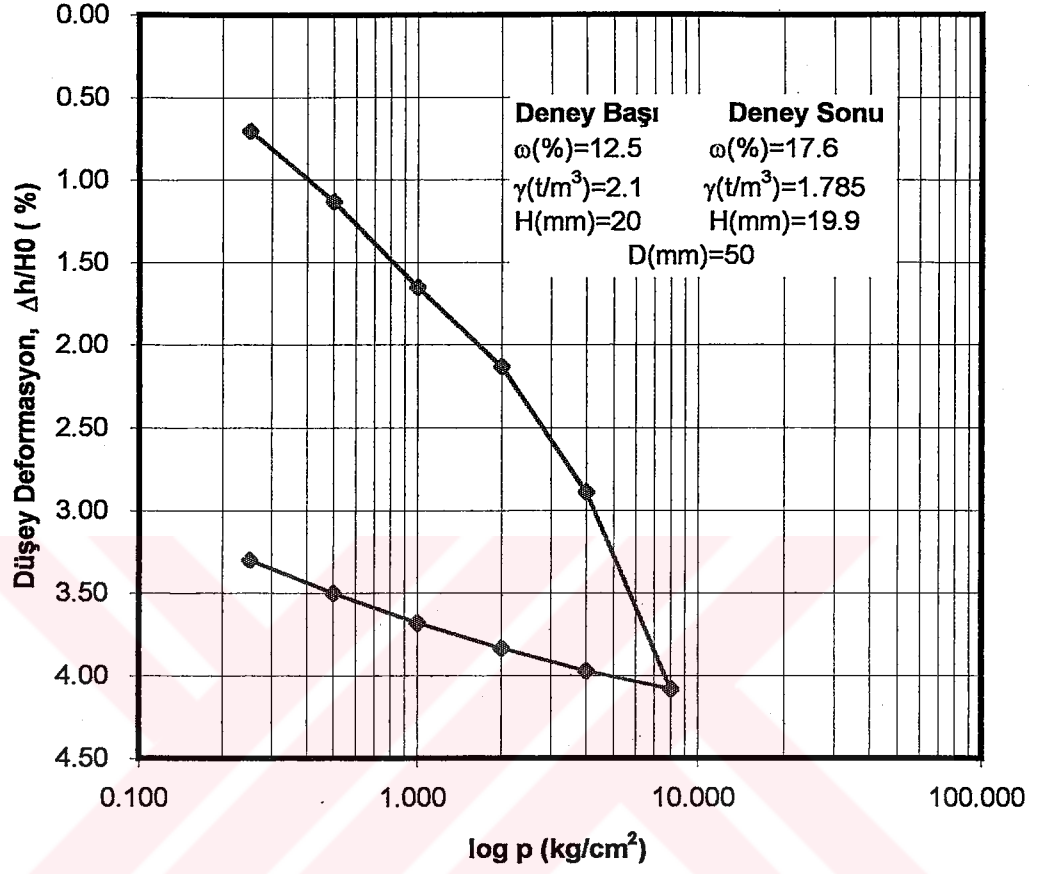
Şekil 6.7 Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları
 (%3 Bentonit B+ %10 KİL)



Şekil 6.8 Kesme Kutusu Deneyi Sonucu
(%3 Bentonit B+ %15 KİL)



Şekil 6.9 Konsolidasyon Deneyi Sonucu (Bentonit A)



Şekil 6.10 Konsolidasyon Deneyi Sonucu (Bentonit B)

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1 Giriş

19. yüzyıldan 20. yüzyılın sonlarına doğru uzanan sanayi devrimi bu süreç boyunca insanların hayatlarını kolaylaştırmayı hedeflemiştir. Teknolojik gelişmeler için kurulmuş her tesiste hammadde ve emek girdileri ile ürün çıktısının yanında bir de atık çıktısı üretilmektedir. Zaman içinde atık çıktısının çevreye verdiği zarar anlaşılmış ve tedbir niteliğinde pek çok çalışmada bulunulmuştur. İşte bu tedbirlerden birisi de gerek evsel, gerekse endüstriyel atıkların istiflendiği düzenli depo (depolin) tesisleridir.

Çöp depolama tesisinin amacı çevreye zararlı madde yayılmasını önlemek, bilhassa yeraltı suyunun kirlenmesine mani olmaktır. Bu amaçla tabanda yeterli kalınlıkta geçirimsiz malzeme bulunması şart koşulur. Eğer tabii bir zemin mevcut değilse, geçirimsiz bir dolgu teşkil edilir (yeni geliştirilen geotextiller vs. de ayrıca ilave edilebilir).

Herhangi olumsuz bir gelişmede çevrenin zarar görmemesi için depolama yerinin yeraltı suyunu besleyen akiferlerden uzak olması gereklidir. Atık depolama tesisinin temel zemininin şu şartları yerine getirmesi gereklidir:

- yeterli taşıma gücü
- yeterli geçirimsizlik
- sınırlı sıkışabilirlik
- zararlı madde tutma özelliği
- zararlı maddeye karşı hassas olmama özelliği (İNCECİK, 1996)

Depo tesisinin inşaa aşaması Şu Şekilde gerçekleŐir:

1. Geçirimsiz taban teşkili
2. Folyo yerleŐtirilmesi
3. Filtre malzemesi dŐenmesi
4. Atıkların konması
5. Kireçli toprak tabası serilmesi
6. Koruyucu tabaka kaplanması
7. Örtü tabakasının serilmesi

Geçirimsizlik tabakasının kalınlığı ile ilgili pek çok Şartname vardır fakat yine de bir konsensüs saėlanabilmiŐ değildir. A.B.D.'de bazı eyaletlerde minimum Şilte tabakası kalınlığı 60cm iken bazılarında bu değer 360cm'e kadar yükselmektedir (BENSON ve diğerleri, 1994).

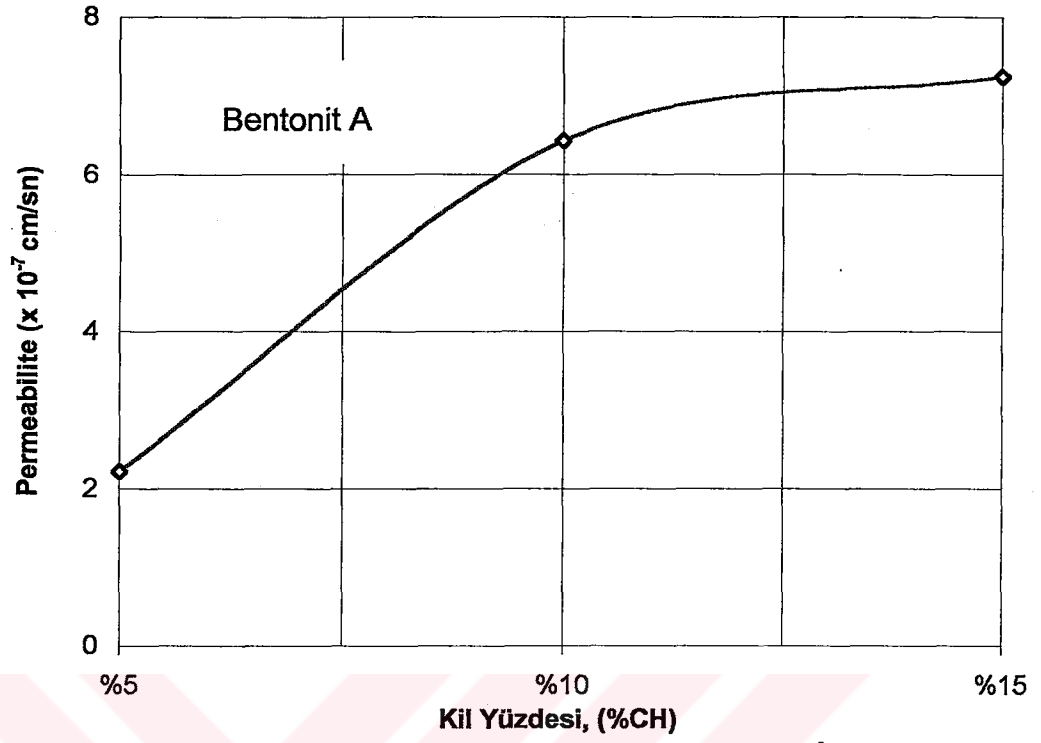
7.2 Çalışmaların Yorumu

Bu çalışmada, yurdumuzda depo tesislerinde kullanılması gerek ekonomiklik, gerekse uygulama kolaylığı açısından uygun olduğu düŐünülen tabii malzemelerin karışımından bir Şilte tabakası teşkil edilmiş ve bu malzeme üzerinde çeşitli geoteknik deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

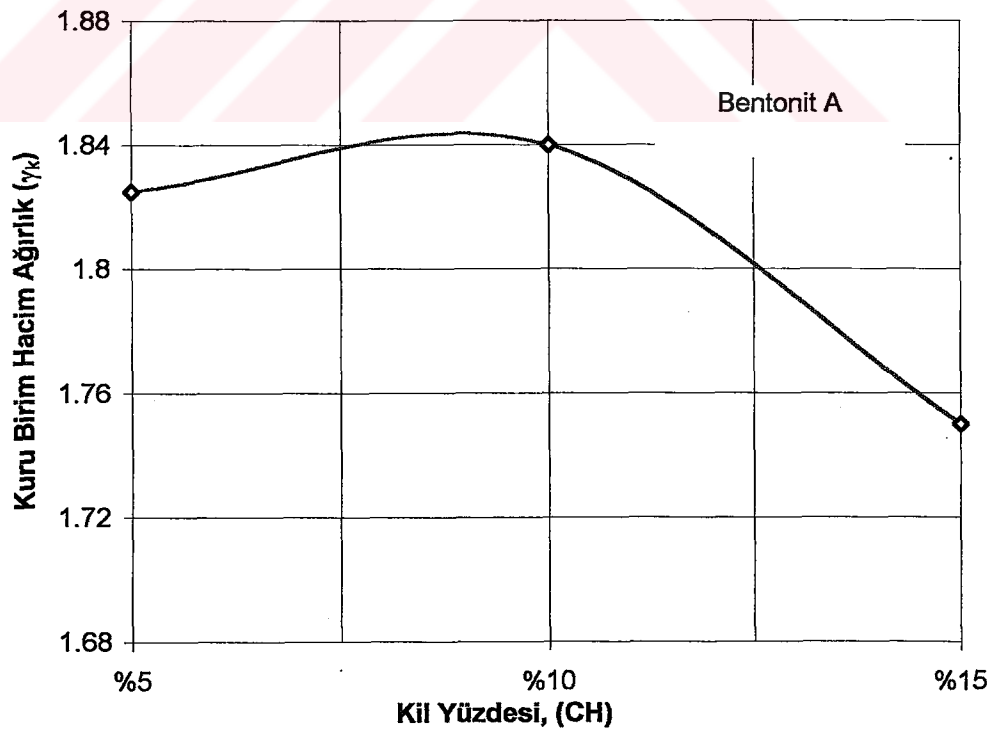
Kum-akıl malzemeye bentonit A ($w_L=270$, $w_p=28$, $I_p=242$) malzemesinin %3 oranında eklenmesi ile elde edilen zemine sırasıyla %5, %10 ve %15 oranında eklenen yüksek plastisiteli kil (CH) ($w_L=75$, $w_p=33$, $I_p=42$) ile önce standart proctor deneyi, daha sonra maksimum kuru birim hacim ağırlığa (optimum su muhtevası) sahip zemin ile düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Her karışım için deformasyon kontrollü kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. %10 oranındaki yüksek plastisiteli kile sahip numune için de odömetre deneyleri yapılmıştır.

Bentonit A malzemesi içeren zeminin çeşitli kil oranlarındaki davranışı Şekil 7.1'de görülmektedir. Burada kil miktarının %5 ve %10 arası değişiminde permeabilitede büyük bir artma olduğu, daha sonra ise bu artıŐın yavaşladığı gözlenmektedir.

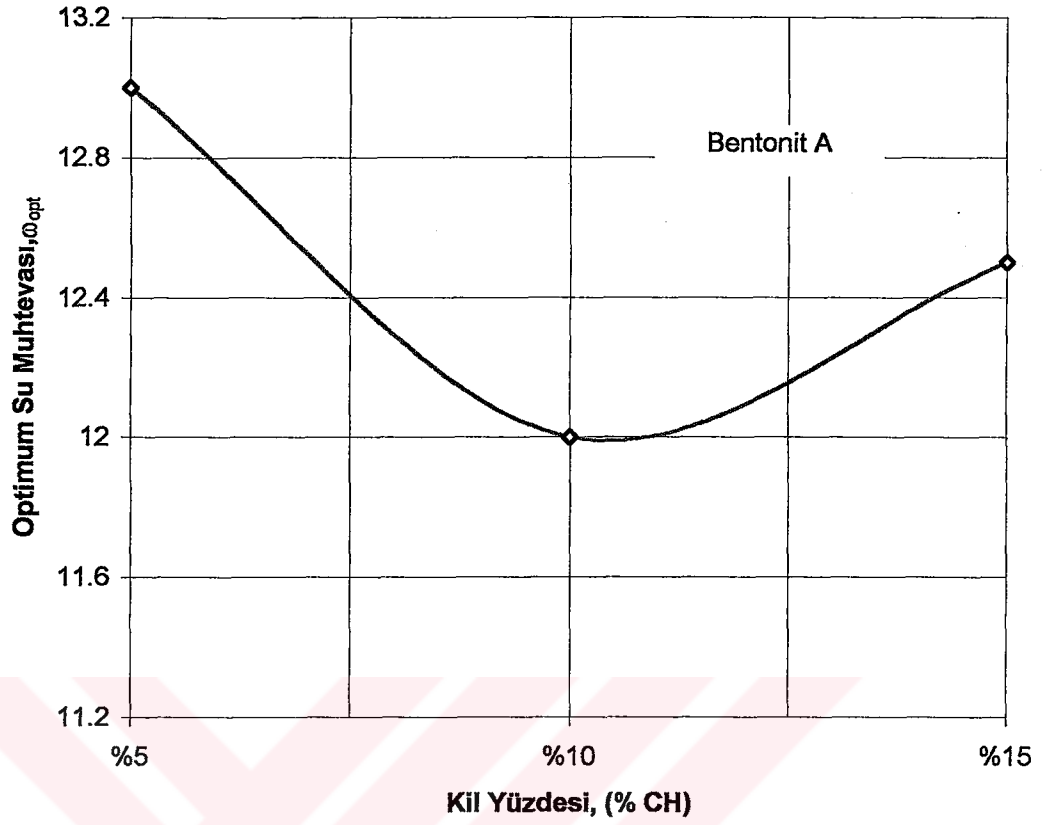
Kil oranındaki artış %10 oranına kadar kuru birim hacim ağırlığını da doğru orantıyla artırmış, oranın daha da artması kuru birim hacim ağırlığını olumsuz yönde etkilemiŐ ve bir düşme meydana getirmiŐtir (Şekil 7.2).



Şekil 7.1 Permeabilite - Kil Yüzdesi İlişkisi
(Bentonit A)



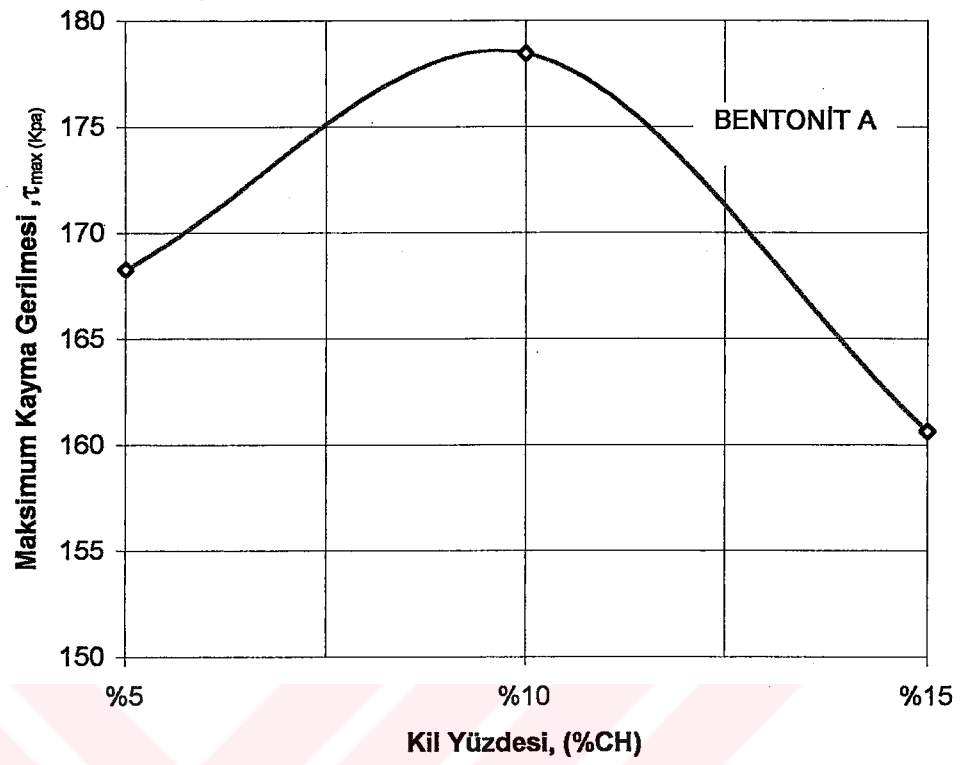
Şekil 7.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)



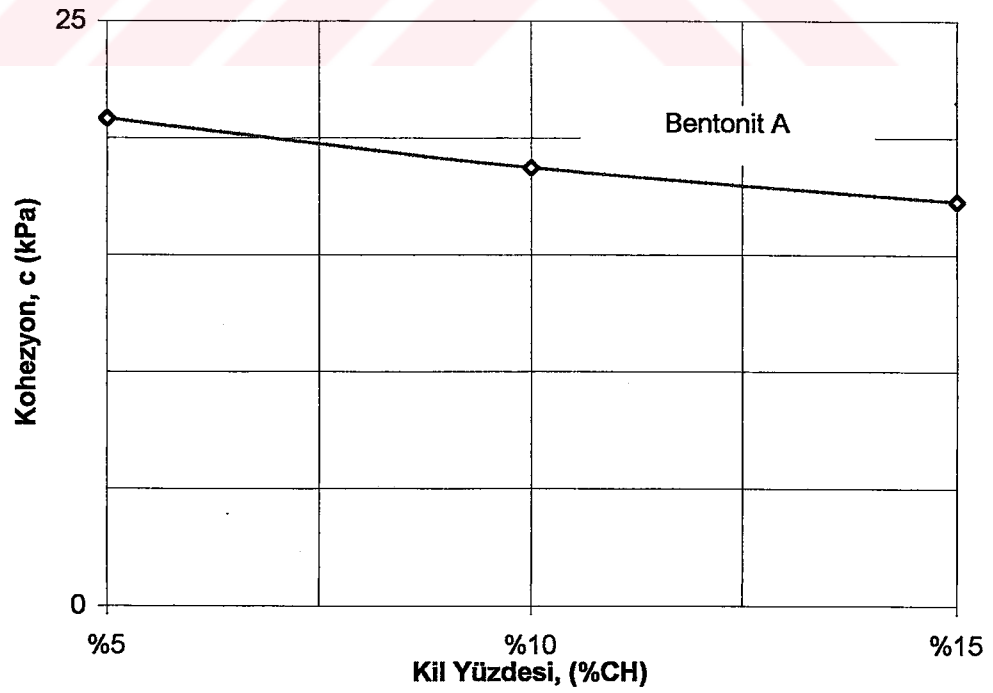
Şekil 7.3 Optimum Su muhtevası - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)

Aynı şekilde kil oranındaki artış (%10'a kadar) optimum su muhtevasını %10'lara kadar düşürmüştü, bu değerden sonra tekrar bir yükselme göstermiştir (şekil 7.3).

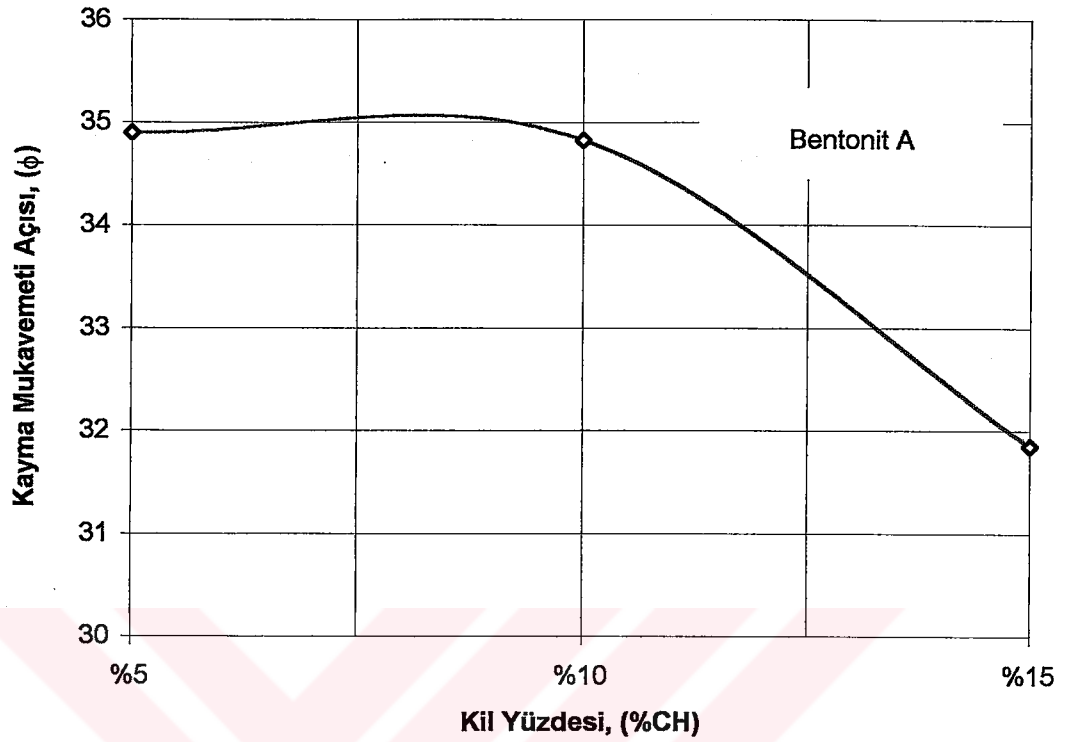
Şekil 7.4'de maksimum kayma gerilmesi (ortalama) ile kil muhtevası ilişkisi görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere %10 oranında kil (CH) içeriği, kayma gerilmesini artırmış, bu oran arttıkça kayma gerilmesinde keskin bir düşüş göstermiştir.



Şekil 7.4 Maksimum Kayma Gerilmesi - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)



Şekil 7.5 Kohezyon (c) - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)



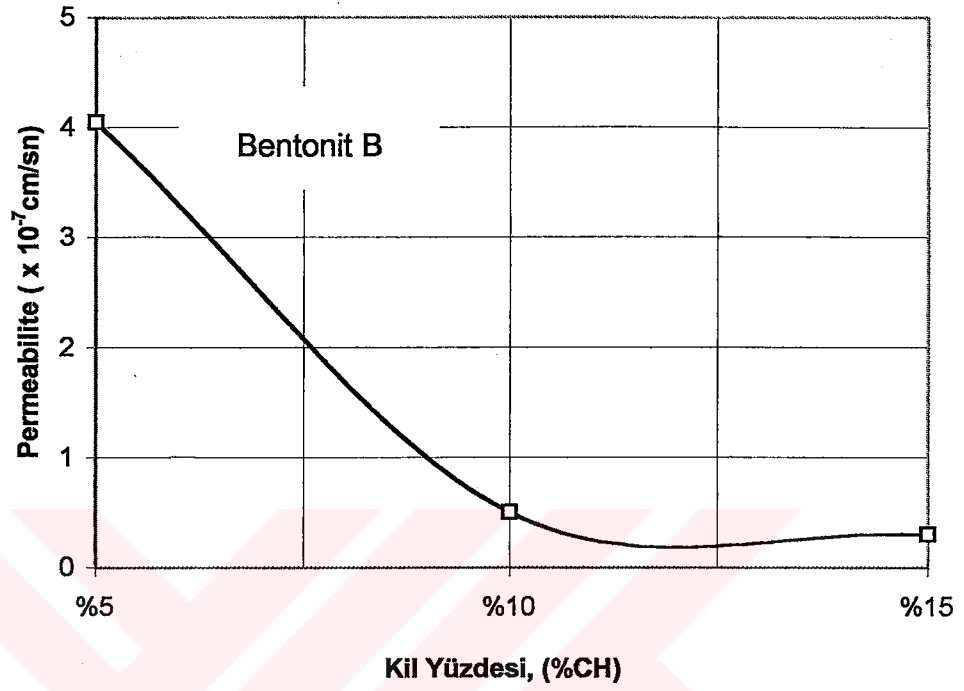
Şekil 7.6 Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ) - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit A)

Kohezyon, kil muhtevası ile lineer bir ilişki göstermiş, kil yüzdesi arttıkça aynı oranda bir düşüş göstermiştir (Şekil 7.5)

Kayma mukavemeti açısı (ϕ), kil muhtevasının %5 ile %10 arası değişiminden fazla etkilenmemiştir. Ancak %15 oranına artınca keskin bir düşüşle 31° civarına düşmüştür (Şekil 7.6)

Bentonit A numunesi ile yapılan karışım için bir değerlendirme yapılırsa, şilte malzemesi için en uygun kil içeriğinin %10'lar civarında olması gerektiği söylenebilir.

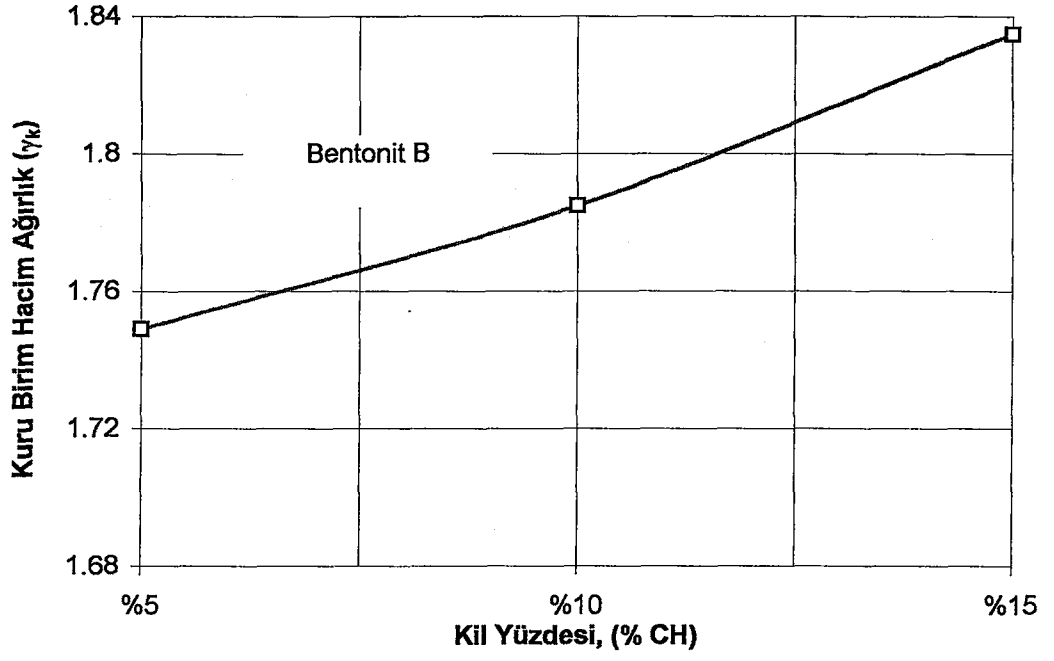
Kum-çakıl numuneye bentonit B malzemesi ($w_L=570$, $w_p=58$, $I_p=512$) eklenerek yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ise şöyledir;



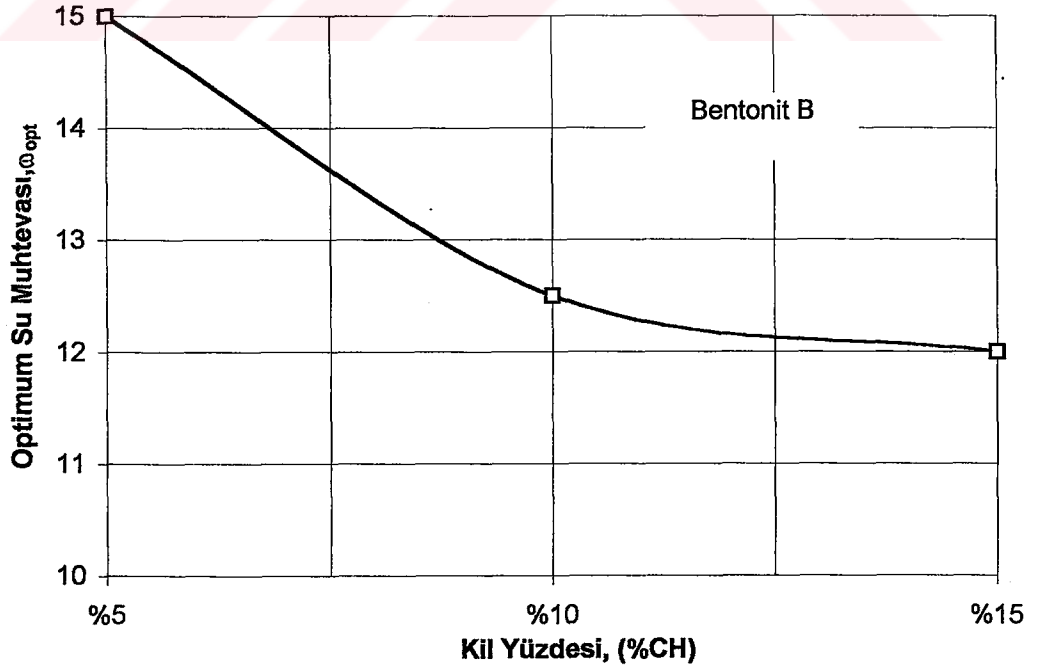
Şekil 7.7 Permeabilite - Kil Yüzdesi ilişkisi (Bentonit B)

Kil yüzdesinin %5 ve %10 arası değişiminde permeabilite çok keskin bir düşüş göstermiştir (şekil 7.7). %10 kil oranına karşılık gelen permeabilite değeri 5.05×10^{-8} cm/sn'dir ki bu da şartnamedeki 1×10^{-7} cm/sn değerinin çok altındadır. Bu değer kil içeriğinin %15'lere artırılmasıyla bir miktar daha düşmüştür ama bu düşüş çok önemli değildir.

Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), Şekil 7.8'de görüldüğü gibi kil yüzdesi ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir. Kil muhtevastındaki artış, maksimum kuru birim hacim ağırlığını ($\gamma_{k_{max}}$) da artırmıştır.

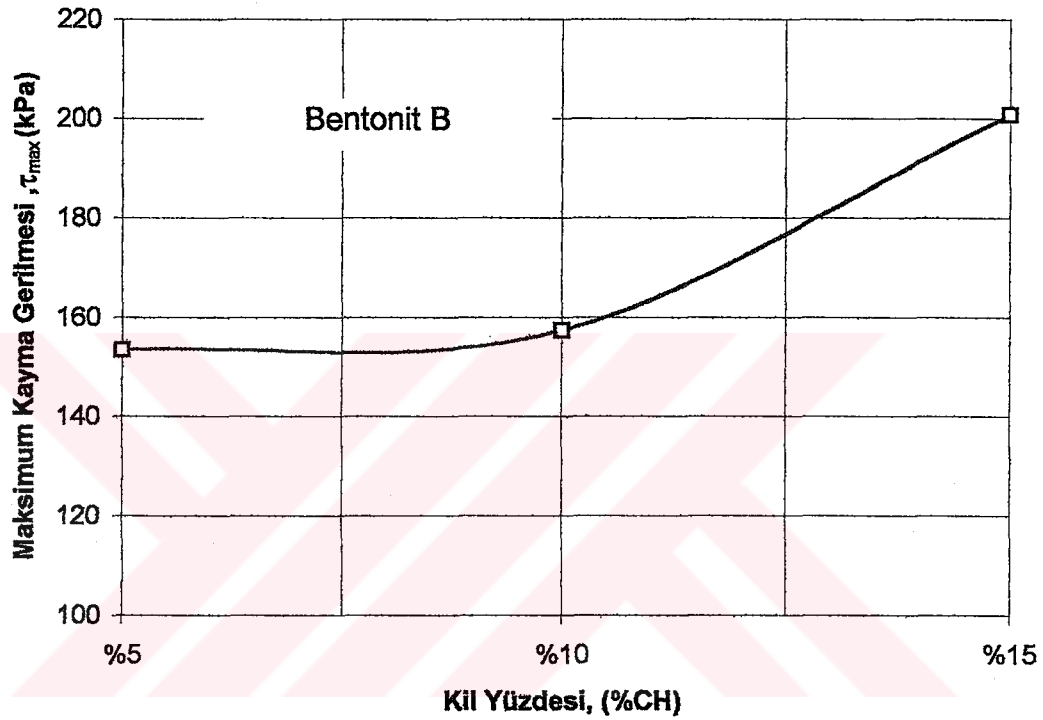


Şekil 7.8 Kuru Birim Hacim Ağırlık - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)



Şekil 7.9 Optimum Su muhtevası - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)

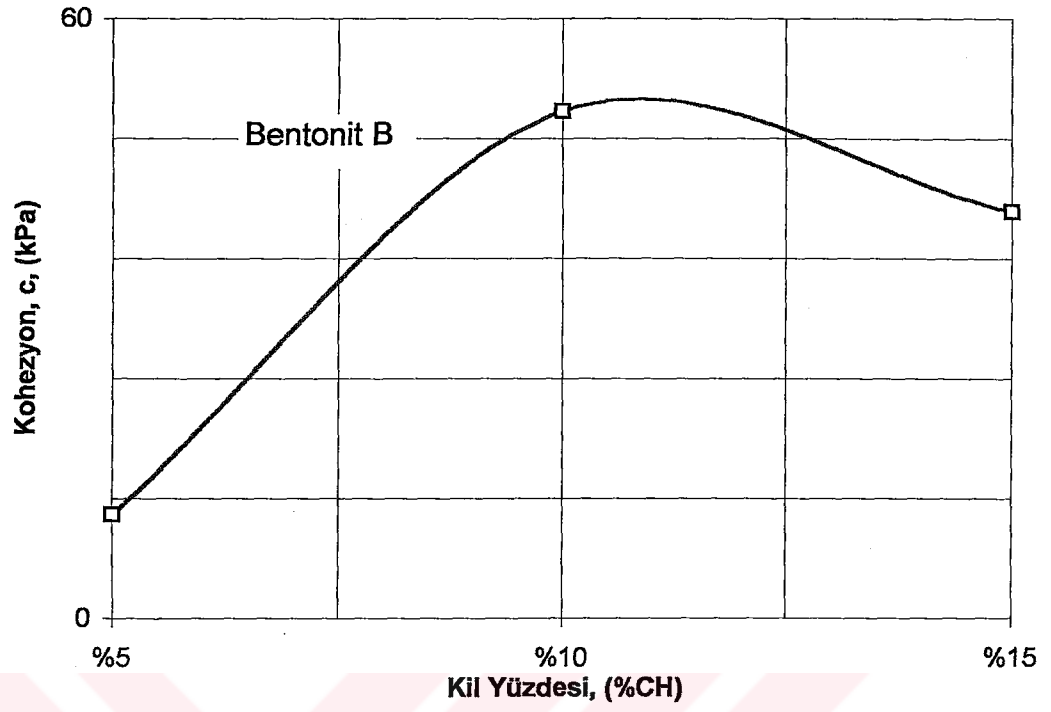
Optimum su muhtevası (w_{opt}), kil yüzdesinin artması ile azalmış; %10 kil oranına karşılık 0.125 değerini ve %15'lik kil oranına karşılık da 0.12 değerini almıştır. Dikkat edilirse ilk %5'lik dilimdeki düşüş, son %5'lik dilime göre daha fazladır (Şekil 7.9).



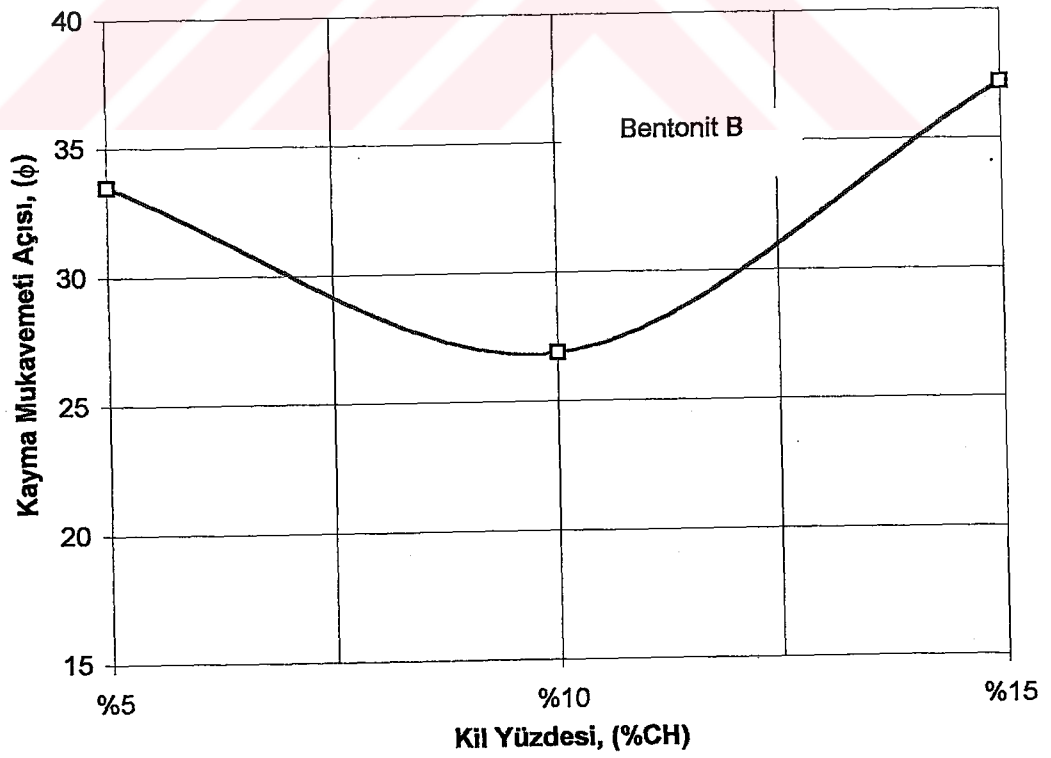
Şekil 7.10 Maksimum Kayma Gerilmesi - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)

Maksimum kayma gerilmesi (ortalama) - kil yüzdesi ilişkisinde (şekil 7.10) %10'luk kil oranı bir eşik gibi davranmış, bu orana kadar kayma gerilmesinde belirli bir artış görülmemiştir. Maksimum kayma gerilmesinde önemli değişim, %10 - %15'lik bölge arasındadır.

Şekil 7.11 kohezyon (c) ile CH yüzdesi arasındaki değişimi göstermektedir. Eğriden de anlaşılacağı gibi %11'ler civarı kil oranı kohezyonda bir maksimum değer (≈ 51 kPa) göstermiştir.



Şekil 7.11 Kohezyon (c) - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)



Şekil 7.12 Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ) - Kil Yüzdesi İlişkisi (Bentonit B)

Kayma mukavemeti açısı (ϕ), kil içeriğinin %10'a kadar artmasıyla azalmış, %10 değerinde minimum değere ulaşmış, bu değerden sonra keskin bir artışla 37.18° değerine ulaşmıştır.

%3 oranında bentonit B malzemesi içeren kum-çakıl numuneye sırasıyla %5, %10 ve %15 oranında yüksek plastisiteli kil (CH) eklenerek yapılan deneylerin sonuçları şekil 7.7-7.12'de gösterilmiştir. Şartnamede öngörülen permeabilite değerine yaklaşık olarak %8 oranında kil eklenmesi ile ulaşılmıştır. Maksimum kayma gerilmesi için ise %10 kil oranı değeri bir eşik oluşturmaktadır.

Tüm sonuçlar ile birlikte regresyon analizleri yapılmış ve sonuçlar tablo 7.1'de gösterilmiştir.

Deneysel çalışmaların uygulama için daha hassas sonuçlar vermesi ancak daha çok veriye sahip olmakla mümkün olmaktadır. Bunun sağlanması da daha fazla laboratuvar deneyi yapılmasıyla olacaktır.

Tablo 7.1 Regresyon Analizi Sonuçları

Numune Cinsi	Bağımsız Değişken	Bağımlı Değişken	Bağıntı	Korel. Kats.
Bentonit A	kil yüzdesi	Permeabilite	$y = 1.4376^{-0.5917x}$	0.9084
Bentonit A	kil yüzdesi	γ_k	$y = 1.8819^{-0.021x}$	0.7799
Bentonit A	kil yüzdesi	W_{opt}	$y = 12.993^{-0.0196x}$	0.4900
Bentonit A	kil yüzdesi	τ_{max}	$y = 177.03^{-0.0233x}$	0.4422
Bentonit A	kil yüzdesi	C	$y = 22.777^{-0.0935x}$	0.9970
Bentonit A	kil yüzdesi	ϕ	$y = 37.069^{-0.0457x}$	0.8755
Bentonit B	kil yüzdesi	Permeabilite	$y = 1E-06^{-1.298x}$	0.9442
Bentonit B	kil yüzdesi	γ_k	$y = 1.7055^{0.024x}$	0.9962
Bentonit B	kil yüzdesi	W_{opt}	$y = 16.38^{-0.1116x}$	0.9390
Bentonit B	kil yüzdesi	τ_{max}	$y = 129.28^{0.1347x}$	0.9057
Bentonit B	kil yüzdesi	C	$y = 7.1026^{0.6825x}$	0.7948
Bentonit B	kil yüzdesi	ϕ	$y = 29.032^{0.0523x}$	0.3161

7.3 Sonuçlar

Sonuç olarak atık depolama tesislerinin tabanında kullanılacak geçirimsizlik Őiltelerini tabii malzemelerden elde etmek için yapılan uygunluk deneylerinde esas olarak kum-çakıl zemine iki cins bentonit %3 oranında katılmıştır. Bu karışımın her birine %5, %10 ve %15 oranlarında yüksek plastisiteli kil ilave edilmiş ve elde edilen malzemenin permeabilite, optimum su muhtevası, maksimum kuru birimhacim ağırlığı ve kayma mukavemeti özellikleri deneylerle saptanmıştır. Karışımların %10 kil ihtiva eden numuneleri üzerinde ayrıca odömetre deneyleri yapılmıştır.

A cinsi bentonit katılan karışımlar üzerinde yapılan deneylerde permeabilite ve kayma mukavemeti açısından %10 kil ihtiva eden karışımın en uygun değerlere sahip olduğu anlaşılmıştır.

B cinsi bentonit katılan karışımlarda kil yüzdesi olarak deney yapılan bölge biraz dar kalmış, burada %15 kil ihtiva eden karışımın diğerlerine göre daha uygun permeabilite, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve kayma mukavemeti değerine sahip olduğu görölmüştür.

KAYNAKLAR

- ANSAL, A.**, (1996), Zeminlerin Mühendislik Özellikleri, Ders Notları, İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi.
- BENSON, C. H., DANIEL, D. E.**, (1994), Minimum Thickness of Compacted Soil, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 129 - 152.
- BENSON, C. H., ZHAI, H., RASHAD, S. M.**, (1994), Statistical Sample Size for Construction of Soil Liners, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 10, pp.1704 - 1724.
- BENSON, C. H.**, (1993), Probability Distributions for Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119, No. 3, pp. 471 - 486, March.
- BOUTWELL, G., RAUSER, C.**, (1990), Clay Liner Construction, Proceedings of Geotechnical Engineering in Today's Environment, ASCE - Pennsylvania Section, Hershy, Pa., 1 -7.
- CHOW, Y. D.**, (1992), Dynamic Compaction of Granular Soils, Soils and Foundations, Vol 32/4.
- ÇAKI, M.**, (1995), Ünye-Karahamza Bentonitlerinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İ. T. Ü. Metalurji Fakültesi.
- ELSBURY, B.R., DANIEL, D. E., SRADERS, G. A., ANDERSON, D. C.**, (1990), Lessons Learned from a Compacted Clay Liner, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 11, pp. 1641 - 1660.
- ERDİNÇ, Ş. Ş.**, (1976), Bentonitlerin Metalurjideki Uygulamaları Yönünden Araştırılması, İ. T. Ü. Maden Fakültesi, Doktora Tezi.
- GLR**, (1993), Geotechnics of Landfill Design and Remedial Works Technical Recommendations, Edited by the German Geotechnical Society for the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

- GÜLER, E., TOĞROL, E., AVCI, C. B.,** (1994), Çevre Geotekniğine Genel Bir Bakış, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ.
- GÜNGÖR, N.,** (1981), Bentonitik Kil Minerallerinin Yapı ve Özellikleri Üzerine Değişebilen Katyonların Etkilerinin Fiziksel Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, İ. T. Ü. Maden Fakültesi.
- HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D.** (1981), An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, New Jersey.
- İNCECİK, M.,** (1996), Zemin Stabilizasyonu ve Zemin Yapıları, Ders Notları, İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi.
- KAHYA, Ş.,** (1995), Geçirimsizlik Perde ve Şilteleri İçin Kullanılan Zeminlerin İyileştirilmesi, İ. T. Ü. , İnşaat Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi.
- KOERNER, R. M.,** (1992), Designing with Geosynthetics, Drexel University
- KUMBASAR, V., KİP, F.,** (1992), Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- ÖZÜDOĞRU, K., TAN, O., AKSOY, İ. H.,** (1988), Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- SHARMA, D. H., LEWIS, S. P.,** (1994), Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills, USA.
- SHICK, P.,** (1994), Deponiebasisdichtungen aus Bentokies, Bautechnik 71, H. 9
- TRAST, J. M., BENSON, C. H.,** (1995), Estimating Field Conductivity of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.
- USEPA,** (1989), Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure, Cincinnati, O. H., U.S.A.
- YOUD, T. L.,** (1973), Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands, ASTM, pp. 98-112, Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils.



EKA

İ.T.Ü İNŞAAT FAKÜLTESİ
ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KONSOLIDASYON DENEYİ

Numune:

Alet No:

H_0 =

D =

V_0 =

Su muhtevası ω_0 =

Su muhtevası ω_{son} =

γ_k =

γ_n =

Ring =

Kuru numune =

Bentonit A (%3) + Kil %10

2

20 mm

5 cm

39.27 cm³

12.5%

14.4%

1.84 Mg/m³

2.07 Mg/m³

73.49 g

70.56 g

Alet No: 2

Sıra No 1	P(kg) 2	$\Sigma P(kg)$ 3	P(kg/cm ²) 4	Tarih 5	Saat 6	t 7	M 8 (1/500 mm)	Not
1	0.25	0.25	0.25	26.2.97	12:00	0"	0.00	
						15"	29	
						30"	30	
						1'	31	
						2'	32	Su verildi
						4'	33	
						8'	34	
						15'	34.5	
						30'	35	
2	0.25	0.50	0.50	27.2.97	12:38	0"	35.5	
						15"	52.5	
						30"	54	
						1'	54.5	
						2'	55.5	
						4'	56.5	
						8'	58	
						15'	59	
						30'	59.5	
						1 ^h	61	
					16:10	-	64.5	
3	0.50	1.00	1.00	28.2.97	16:10	0"	64.5	
						15"	82	
						30"	84	
						1'	85	
						2'	85.5	
						4'	86	
						8'	87.5	
						15'	88	
						30'	89	
					17:25	-	92	
4	1.00	2.00	2.00	1.3.97	11:11	0"	96	
						15"	107	
						30"	118	
						1'	119	
						2'	120	
						4'	121	
						8'	122	
						15'	123	
						30'	124	
						1 ^h	125	
1 =Yükleme Süresi 2 = Konan Yük 3 = Toplam Yük 4 = Toplam Basınç 5 = Tarih 6 = Saat 7 = Geçen Zaman 8 = Sıkışma Taksimat								

Alet No: 2

Sıra No 1	P(kg) 2	$\Sigma P(kg)$ 3	P(kg/cm ²) 4	Tarih 5	Saat 6	t 7	M 8 (1/500 mm)	Not
5	2.00	4.00	4.00	2.3.97	13:28	0 ^h	126	
						15 ^h	155	
						30 ^h	157	
						1 ⁱ	158	
						2 ⁱ	159	
						4 ⁱ	160	
						8 ⁱ	161	
						23 ⁱ	163	
						35 ⁱ	164	
						63 ⁱ	165.5	
						90 ⁱ	166	
6	4.00	8.00	8.00	3.3.97	15.01	0 ^h	166	
						15 ^h	201	
						30 ^h	202	
						1 ⁱ	203	
						2 ⁱ	204	
						4 ⁱ	205	
						8 ⁱ	207	
						15 ⁱ	208	
						30 ⁱ	209.5	
						1 ^h	210.5	
					16:50	-	212	
					17:40	-	212.5	
7		4.00	4.00	4.3.97	10:10	-	218	
					13:20	-	209	
					14:30	-	209	
8		2.00	2.00	4.3.97	14:40	-	209	
					15:25	-	199	
9		1.00	1.00	4.3.97	17:15	-	199	
					17:45	-	188.5	
10		0.5	0.5	5.3.97	8:50	-	186	
					11:00	-	177.5	
					14:00	-	177	
11		0.25	0.25	5.3.97	17:40	-	177	
				6.3.97	11:05	-	167.5	
				6.3.97	14:15	-	167.5	
				12.3.97	13:45	-	163.5	
1 =Yükleme Süresi 2 = Konan Yük 3 = Toplam Yük 4 = Toplam Basınç 5 = Tarih 6 = Saat 7 = Geçen Zaman 8 = Sıkışma Taksimat								

% 3 Bentonit A ve% 10 KİL İÇEREN NUMUNE İLE YAPILAN KONSOLIDASYON DENEYİ

Toplam yük (kg)	$\Delta H/H_0$	BASINÇ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	Numune kalınlığı (mm)	ΔP (kg/cm ²)	KAH (mm)	H_{ort} (mm)	Mv	Mc	de	e_0	ort. e	av	mv	Mc
0.000	0.00	0.00	0.000	20.000	0.00	0.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.402				
0.250	0.36	0.25	0.071	19.929	0.25	0.071	19.965	0.014	70.298	0.005	0.397	0.400	0.020	0.014	70.298
0.500	0.65	0.50	0.129	19.871	0.25	0.058	19.900	0.012	85.776	0.004	0.393	0.395	0.016	0.012	85.776
1.000	0.96	1.00	0.192	19.808	0.50	0.063	19.840	0.006	157.456	0.004	0.389	0.391	0.009	0.006	157.456
2.000	1.26	2.00	0.252	19.748	1.00	0.060	19.778	0.003	329.633	0.004	0.384	0.386	0.004	0.003	329.633
4.000	1.66	4.00	0.332	19.668	2.00	0.080	19.708	0.002	492.700	0.006	0.379	0.382	0.003	0.002	492.700
8.000	2.18	8.00	0.436	19.564	4.00	0.104	19.616	0.001	754.462	0.007	0.371	0.375	0.002	0.001	754.462
4.000	2.09	4.00	0.418	19.582		-0.018				-0.001	0.373	0.372			
2.000	1.99	2.00	0.398	19.602		-0.020				-0.001	0.374	0.373			
1.000	1.86	1.00	0.372	19.628		-0.026				-0.002	0.376	0.375			
0.500	1.77	0.50	0.354	19.646		-0.018				-0.001	0.377	0.377			
0.250	1.64	0.25	0.327	19.673		-0.027				-0.002	0.379	0.378		0.006	315.054

İ.T.Ü İNŞAAT FAKÜLTESİ
ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KONSOLIDASYON DENEYİ

Numune:	Bentonit B (%3) + Kil %10
Alet No:	1
H_0 :	20 mm
D:	5 cm
V_0 :	39.27 cm ³
Su muhtevası ω_0 :	12.5%
Su muhtevası ω_{son} :	17.6%
γ_k :	1.785 Mg/m ³
γ_n :	2.1 Mg/m ³
Ring:	39.50 g
Kuru numune:	68.82 g

Alet No: 1

Sıra No 1	P(kg) 2	$\Sigma P(kg)$ 3	P(kg/cm ²) 4	Tarih 5	Saat 6	t 7	M 8 (1/500 mm)	Not
1	0.25	0.25	0.25	26.2.97	11:55	0"	0.00	
						15"	55	
						30"	57	
						1'	59	
						2'	61	Su verildi
						4'	66	
						8'	68	
						15'	69	
						30'	70	
2	0.25	0.50	0.50	27.2.97	12:36	0"	70	
						15"	97	
						30"	98	
						1'	99.5	
						2'	101	
						4'	103	
						8'	105	
						15'	107	
						30'	108	
						1 ^h	109.5	
					16:10	-	113	
3	0.50	1.00	1.00	28.2.97		0"	113	
						15"	141	
						30"	143	
						1'	144.5	
						2'	146	
						4'	148	
						8'	150	
						15'	152	
						30'	154	
					17:25	-	157	
4	1.00	2.00	2.00	1.3.97	11:10	0"	165	
						15"	195	
						30"	197	
						1'	199	
						2'	200	
						4'	202	
						8'	204	
						15'	204	
						30'	208	
						1 ^h	210	
1 =Yükleme Süresi 2 = Konan Yük 3 = Toplam Yük 4 = Toplam Basınç				5 = Tarih 6 = Saat 7 = Geçen Zaman 8 = Sıkışma Taksimat				

Alet No: 1

Sıra No 1	P(kg) 2	$\Sigma P(kg)$ 3	P(kg/cm ²) 4	Tarih 5	Saat 6	t 7	M 8 (1/500 mm)	Not
5	2.00	4.00	4.00	2.3.97	13:27	0 ^{II}	213	
						15 ^{II}	267	
						30 ^{II}	269.5	
						1 ^I	272	
						2 ^I	275	
						4 ^I	277	
						8 ^I	280	
						23 ^I	284	
						35 ^I	285.5	
						63 ^I	288	
						90 ^I	289	
6	4.00	8.00	8.00	3.3.97	15.00	0 ^{II}	289	
						15 ^{II}	364	
						30 ^{II}	368	
						1 ^I	372	
						2 ^I	375	
						4 ^I	378	
						8 ^I	382	
						15 ^I	385	
						30 ^I	388	
						1 ^h	391.5	
					16:50	-	394	
					17:40	-	396	
7		4.00	4.00	4.3.97	10:10	-	408	
					13:20	-	398	
					14:30	-	397	
8		2.00	2.00	4.3.97	14:40	-	397	
					15:25	-	383.5	
9		1.00	1.00	4.3.97	17:15	-	383	
					17:45	-	368	
10		0.5	0.5	5.3.97	8:50	-	365	
					11:00	-	351	
					14:00	-	350	
11		0.25	0.25	5.3.97	17:40	-	349.5	
				6.3.97	11:05	-	330.5	
				6.3.97	14:15	-	330	
				12.3.97	13:45	-	315	
1 =Yükleme Süresi 2 = Konan Yük 3 = Toplam Yük 4 = Toplam Basınç 5 = Tarih 6 = Saat 7 = Geçen Zaman 8 = Sıkışma Taksimat								

% 3 Bentonit B ve% 10 KİL İÇEREN NUMUNE İLE YAPILAN KONSOLIDASYON DENEYİ

Toplam Yük (kg)	$\Delta H/H_0$	BASINÇ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	Numune Kalınlığı (mm)	ΔP (kg/cm ²)	K _{ΔH} (mm)	H _{ort} (mm)	M _v	M _c	d _e	e ₀	ort. e	a _v	m _v	M _c
0.000	0.00	0.00	0.000	20.000	0.00	0.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.402				
0.250	0.70	0.25	0.140	19.860	0.25	0.140	19.930	0.028	35.589	0.010	0.392	0.397	0.039	0.028	35.589
0.500	1.13	0.50	0.226	19.774	0.25	0.086	19.817	0.017	57.608	0.006	0.386	0.389	0.024	0.017	57.608
1.000	1.65	1.00	0.330	19.670	0.50	0.104	19.722	0.011	94.817	0.007	0.379	0.383	0.015	0.011	94.817
2.000	2.13	2.00	0.426	19.574	1.00	0.096	19.622	0.005	204.396	0.007	0.372	0.376	0.007	0.005	204.396
4.000	2.89	4.00	0.578	19.422	2.00	0.152	19.498	0.004	256.553	0.011	0.361	0.367	0.005	0.004	256.553
8.000	4.08	8.00	0.816	19.184	4.00	0.238	19.303	0.003	324.420	0.017	0.345	0.353	0.004	0.003	324.420
4.000	3.97	4.00	0.794	19.206		-0.022				-0.002	0.346	0.346			
2.000	3.84	2.00	0.767	19.233		-0.027				-0.002	0.348	0.347			
1.000	3.68	1.00	0.736	19.264		-0.031				-0.002	0.350	0.349			
0.500	3.50	0.50	0.700	19.300		-0.036				-0.003	0.353	0.352			
0.250	3.30	0.25	0.660	19.340		-0.040				-0.003	0.356	0.354			



EK B

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %5 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
13.2.97	14:40	0.00
	14:50	18

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_r (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	18	36.00	
25	40		35.85	
50	74		35.70	
75	97		35.55	
100	121	18	35.40	
125	131		35.25	
150	140		35.10	
175	146		34.95	
200	150	1	34.80	
225	150		34.65	
250	149.5		34.50	
275	149		34.35	
300	147	-15	34.20	
325	146		34.05	
350	144		33.90	
375	142		33.75	
400	138	-29	33.60	
425	136		33.45	
450	133		33.30	
475	132		33.15	
500	131	-34	33.00	
525	130		32.85	
550	131		32.70	
575	133		32.55	
600	133	-34	32.40	
650	134		32.10	
700	135	-33	31.80	
750	137		31.50	
800	140	-32.5	31.20	
850	141		30.90	
900	141	-33	30.60	
950	142		30.30	
1000	143	-32.5	30.00	
1050	144		29.70	
1100	144	-34	29.40	
1150	144		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 150.00$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %5 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
13.2.97	15:30	0.00
	15:40	35.00

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	35	36.00	
25	88		35.85	
50	133		35.70	
75	156		35.55	
100	194	36	35.40	
125	212		35.25	
150	238		35.10	
175	254		34.95	
200	265	29	34.80	
225	273		34.65	
250	276		34.50	
275	279		34.35	
300	281	16	34.20	
325	282		34.05	
350	283		33.90	
375	282		33.75	
400	281	5	33.60	
425	280		33.45	
450	278		33.30	
475	273		33.15	
500	269	-4	33.00	
525	267		32.85	
550	263		32.70	
575	259		32.55	
600	256	-9	32.40	
650	250		32.10	
700	248	-10	31.80	
750	249		31.50	
800	250	-10	31.20	
850	252		30.90	
900	253	-9	30.60	
950	256		30.30	
1000	259	-8	30.00	
1050	265		29.70	
1100	267	-7	29.40	
1150	269		29.10	

σ_n (kg/cm²) = 2.00

Yay faktörü (kg/div) = 0.21

Yaş Num (gr) = 150.00

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %5 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
13.2.97	16:30	0.00
	16:40	33

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	33	36.00	
25	64		35.85	
50	130		35.70	
75	205		35.55	
100	252	35	35.40	
125	295		35.25	
150	325		35.10	
175	352		34.95	
200	369	31	34.80	
225	380		34.65	
250	383		34.50	
275	389		34.35	
300	387	20	34.20	
325	385		34.05	
350	378		33.90	
375	373		33.75	
400	366	11	33.60	
425	360		33.45	
450	355		33.30	
475	347		33.15	
500	345	7	33.00	
525	343		32.85	
550	340		32.70	
575	340		32.55	
600	339	6	32.40	
650	339		32.10	
700	340	7	31.80	
750	339		31.50	
800	340	8	31.20	
850	340		30.90	
900	340	10	30.60	
950	342		30.30	
1000	344	11	30.00	
1050	347		29.70	
1100	348	13	29.40	
1150	346		29.10	

$$\sigma_h \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} =$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %10 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
14.2.97	15:05	0.00
	15:15	46

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	46	36.00	
25	52		35.85	
50	88		35.70	
75	115		35.55	
100	130	44	35.40	
125	143		35.25	
150	150		35.10	
175	155		34.95	
200	159	31	34.80	
225	160		34.65	
250	161		34.50	
275	160		34.35	
300	158	16	34.20	
325	155		34.05	
350	154		33.90	
375	152		33.75	
400	149	7	33.60	
425	148		33.45	
450	148		33.30	
475	147		33.15	
500	147	4	33.00	
525	146		32.85	
550	145		32.70	
575	145		32.55	
600	145	3	32.40	
650	145		32.10	
700	145	3.5	31.80	
750	145		31.50	
800	145	3.5	31.20	
850	145		30.90	
900	145	5	30.60	
950	145		30.30	
1000	145	6	30.00	
1050	145		29.70	
1100	145	7	29.40	
1150	145	10	29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %10 Kıl

Konsolidasyon için		
Tarih	Saat	Δh
14.2.97	16:00	0.00
	16:15	37

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_v (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	37	36.00	
25	57		35.85	
50	112		35.70	
75	146		35.55	
100	172	42	35.40	
125	194		35.25	
150	208		35.10	
175	219		34.95	
200	226	42	34.80	
225	232		34.65	
250	237		34.50	
275	240		34.35	
300	241	39	34.20	
325	242		34.05	
350	243		33.90	
375	244		33.75	
400	245	36	33.60	
425	246		33.45	
450	246		33.30	
475	247		33.15	
500	248	33	33.00	
525	249		32.85	
550	250		32.70	
575	251		32.55	
600	249	31	32.40	
650	248		32.10	
700	250	29	31.80	
750	250		31.50	
800	251	28	31.20	
850	250		30.90	
900	250	28	30.60	
950	250		30.30	
1000	250	28	30.00	
1050	250		29.70	
1100	250	28	29.40	
1150	250		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %10 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
14.2.97	16:50	0.00
	17:10	55

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	55	36.00	
25	110		35.85	
50	163		35.70	
75	210		35.55	
100	235	64	35.40	
125	260		35.25	
150	281		35.10	
175	300		34.95	
200	316	69	34.80	
225	329		34.65	
250	339		34.50	
275	348		34.35	
300	356	71	34.20	
325	364		34.05	
350	371		33.90	
375	376		33.75	
400	380	71	33.60	
425	383		33.45	
450	385		33.30	
475	388		33.15	
500	391	69	33.00	
525	392		32.85	
550	393		32.70	
575	393		32.55	
600	393	67	32.40	
650	393		32.10	
700	390	65	31.80	
750	387		31.50	
800	382	65	31.20	
850	381		30.90	
900	379	66	30.60	
950	381		30.30	
1000	385	69	30.00	
1050	390		29.70	
1100	395	72	29.40	
1150	397		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %15 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
17.2.97	15:05	0.00
	16:00	47

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	47	36.00	
25	53		35.85	
50	94		35.70	
75	111		35.55	
100	119	45	35.40	
125	124		35.25	
150	128		35.10	
175	131		34.95	
200	133	39	34.80	
225	135		34.65	
250	136		34.50	
275	138		34.35	
300	139	34	34.20	
325	139		34.05	
350	139		33.90	
375	139		33.75	
400	139	31	33.60	
425	139		33.45	
450	139		33.30	
475	139		33.15	
500	139	29	33.00	
525	139		32.85	
550	139		32.70	
575	140		32.55	
600	140	29	32.40	
650	140		32.10	
700	140	30	31.80	
750	140		31.50	
800	140	30	31.20	
850	140		30.90	
900	140	30	30.60	
140	140		60.30	
1000	140	30	30.00	
1050	140		29.70	
1100	140		29.40	
1150	140		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 152.28$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %15 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
17.2.97	16:40	0.00
	17:40	38

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	38	36.00	
25	68		35.85	
50	100		35.70	
75	125		35.55	
100	140	52	35.40	
125	153		35.25	
150	163		35.10	
175	171		34.95	
200	180	58	34.80	
225	187		34.65	
250	192		34.50	
275	195		34.35	
300	199	61	34.20	
325	202		34.05	
350	206		33.90	
375	209		33.75	
400	210	62	33.60	
425	213		33.45	
450	215		33.30	
475	218		33.15	
500	219	63	33.00	
525	220		32.85	
550	221		32.70	
575	223		32.55	
600	223	63	32.40	
650	223		32.10	
700	222	63	31.80	
750	223		31.50	
800	223	64	31.20	
850	223		30.90	
900	223	65	30.60	
950	225		30.30	
1000	224	67	30.00	
1050	224		29.70	
1100	223	71	29.40	
1150	223		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 152.28$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit A + %15 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
17.2.97	17 :55	0.00
	18:15	84

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_r (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	84	36.00	
25	80		35.85	
50	123		35.70	
75	156		35.55	
100	185	92	35.40	
125	209		35.25	
150	229		35.10	
175	246		34.95	
200	260	101	34.80	
225	273		34.65	
250	284		34.50	
275	293		34.35	
300	300	106	34.20	
325	306		34.05	
350	313		33.90	
375	319		33.75	
400	325	109	33.60	
425	330		33.45	
450	334		33.30	
475	338		33.15	
500	342	110	33.00	
525	344		32.85	
550	346		32.70	
575	348		32.55	
600	349	111	32.40	
650	350		32.10	
700	351	112	31.80	
750	352		31.50	
800	353	114	31.20	
850	354		30.90	
900	353	117	30.60	
950	353		30.30	
1000	353	119	30.00	
1050	353		29.70	
1100	353	122	29.40	
1150	353		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 152.28$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %5 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
19.2.97	14:10	0.00
	14:20	27.00

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	27	36.00	
25	25		35.85	
50	50		35.70	
75	51		35.55	
100	81	48	35.40	
125	93		35.25	
150	102		35.10	
175	107		34.95	
200	112	50	34.80	
225	116		34.65	
250	118		34.50	
275	120		34.35	
300	123	49	34.20	
325	124		34.05	
350	126		33.90	
375	128		33.75	
400	129	47	33.60	
425	130		33.45	
450	131		33.30	
475	132		33.15	
500	133	45	33.00	
525	133		32.85	
550	132		32.70	
575	132		32.55	
600	132	44.5	32.40	
650	131		32.10	
700	131	45	31.80	
750	130		31.50	
800	130	47	31.20	
850	130		30.90	
900	131	48.5	30.60	
950	131		30.30	
1000	131	50	30.00	
1050	131		29.70	
1100	128	53	29.40	
1150	128		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %5 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh (1/100 mm)
13.2.97	14:40	0.00
	14:50	18

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	30	36.00	
25	48		35.85	
50	98		35.70	
75	136		35.55	
100	167	32	35.40	
125	191		35.25	
150	206		35.10	
175	215		34.95	
200	223	29	34.80	
225	229		34.65	
250	232		34.50	
275	235		34.35	
300	236	23	34.20	
325	237		34.05	
350	237		33.90	
375	237		33.75	
400	237	19	33.60	
425	235		33.45	
450	234		33.30	
475	232		33.15	
500	231	17	33.00	
525	229		32.85	
550	228		32.70	
575	228		32.55	
600	228	18	32.40	
650	227		32.10	
700	225	22	31.80	
750	224		31.50	
800	224	25	31.20	
850	223		30.90	
900	223	31	30.60	
950	222		30.30	
1000	224	38	30.00	
1050	225		29.70	
1100	277	43	29.40	
1150			29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %5 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
19.2.97	16:25	0.00
	16:45	30

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	30	36.00	
25	89		35.85	
50	123		35.70	
75	117		35.55	
100	141	33	35.40	
125	208		35.25	
150	246		35.10	
175	284		34.95	
200	308	31	34.80	
225	327		34.65	
250	338		34.50	
275	347		34.35	
300	352	23	34.20	
325	354		34.05	
350	356		33.90	
375	358		33.75	
400	359	17	33.60	
425	360		33.45	
450	360		33.30	
475	358		33.15	
500	356	11	33.00	
525	354		32.85	
550	351		32.70	
575	350		32.55	
600	348	8	32.40	
650	348		32.10	
700	345	7	31.80	
750	346		31.50	
800	344	7	31.20	
850	343		30.90	
900	343	7	30.60	
950	341		30.30	
1000	341	8	30.00	
1050	341		29.70	
1100	340	8	29.40	
1150	344		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %10 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
26.2.97	14:00	0.00
	14:10	29

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düsey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	29	36.00	
25	31		35.85	
50	63		35.70	
75	101		35.55	
100	127	28	35.40	
125	143		35.25	
150	155		35.10	
175	164		34.95	
200	169	13	34.80	
225	172		34.65	
250	174		34.50	
275	174		34.35	
300	173	-7	34.20	
325	170		34.05	
350	167		33.90	
375	166		33.75	
400	163	-21	33.60	
425	161		33.45	
450	159		33.30	
475	157		33.15	
500	154	-27	33.00	
525	153		32.85	
550	151		32.70	
575	150		32.55	
600	150	-30	32.40	
650	146		32.10	
700	145	-31	31.80	
750	143		31.50	
800	143	-31	31.20	
850	139		30.90	
900	136	-30	30.60	
950	134		30.30	
1000	134	-28	30.00	
1050	135		29.70	
1100	135	-26	29.40	
1150			29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %10 Kil

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
26.2.97	16:10	0.00
	16:20	15.00

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_v (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	15	36.00	
25	91		35.85	
50	152		35.70	
75	199		35.55	
100	223	11	35.40	
125	236		35.25	
150	243		35.10	
175	247		34.95	
200	249	-4	34.80	
225	250		34.65	
250	250		34.50	
275	249		34.35	
300	248	-18	34.20	
325	248		34.05	
350	247		33.90	
375	247		33.75	
400	245	-26	33.60	
425	246		33.45	
450	246		33.30	
475	246		33.15	
500	246	-31	33.00	
525	247		32.85	
550	247		32.70	
575	247		32.55	
600	247	-33	32.40	
650	247		32.10	
700	248	-34	31.80	
750	248		31.50	
800	248	-35	31.20	
850	247		30.90	
900	246	-34.5	30.60	
950	246		30.30	
1000	246	-33	30.00	
1050	245		29.70	
1100	245	-31	29.40	
1150	245		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %10 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
26.2.97	17:20	0.00
	17:30	26

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düsey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_v (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	26	36.00	
25	105		35.85	
50	183		35.70	
75	250		35.55	
100	290	25	35.40	
125	319		35.25	
150	335		35.10	
175	345		34.95	
200	348	10	34.80	
225	349		34.65	
250	349		34.50	
275	348		34.35	
300	345	-5	34.20	
325	340		34.05	
350	335		33.90	
375	330		33.75	
400	326	-16	33.60	
425	321		33.45	
450	317		33.30	
475	313		33.15	
500	312	-21	33.00	
525	309		32.85	
550	307		32.70	
575	307		32.55	
600	306	-24	32.40	
650	304		32.10	
700	303	-24	31.80	
750	300		31.50	
800	299	-24	31.20	
850	294		30.90	
900	288	-24	30.60	
950	285		30.30	
1000	286	-23	30.00	
1050	289		29.70	
1100	272	-22	29.40	
1150	282		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 144.72$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %15 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
28.2.97	14:20	0.00
	14:40	19.5

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	19.5	36.00	
25	76		35.85	
50	129		35.70	
75	157		35.55	
100	170	11	35.40	
125	173		35.25	
150	173		35.10	
175	170		34.95	
200	167	-13	34.80	
225	162		34.65	
250	160		34.50	
275	157		34.35	
300	155	-29	34.20	
325	151		34.05	
350	148		33.90	
375	147		33.75	
400	145	-39	33.60	
425	144		33.45	
450	145		33.30	
475	145		33.15	
500	145	-46	33.00	
525	145		32.85	
550	145		32.70	
575	145		32.55	
600	144	-52	32.40	
650	143		32.10	
700	142	-57	31.80	
750	143		31.50	
800	143	-63	31.20	
850	143		30.90	
900	141	-67	30.60	
950	140		30.30	
1000	134	-72	30.00	
1050	136		29.70	
1100	135	-75.5	29.40	
1150	134		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %15 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
28.2.97	15:30	0
	15:40	22

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düşey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	22	36.00	
25	91		35.85	
50	160		35.70	
75	214		35.55	
100	251	21	35.40	
125	273		35.25	
150	285		35.10	
175	291		34.95	
200	292	4	34.80	
225	292		34.65	
250	288		34.50	
275	286		34.35	
300	282	-11	34.20	
325	280		34.05	
350	275		33.90	
375	273		33.75	
400	272	-19	33.60	
425	271		33.45	
450	268		33.30	
475	267		33.15	
500	266	-23	33.00	
525	266		32.85	
550	266		32.70	
575	266		32.55	
600	265	-26	32.40	
650	266		32.10	
700	265	-28	31.80	
750	264		31.50	
800	261	-29	31.20	
850	261		30.90	
900	262	-29	30.60	
950	261		30.30	
1000	261	-29	30.00	
1050	260		29.70	
1100	260	-29	29.40	
1150	260		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$

.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KESME KUTUSU DENEYİ

Numune Cinsi: Kum-çakıl + %3 Bentonit B + %15 Kıl

Konsolidasyon İçin		
Tarih	Saat	Δh
28.2.97	16:30	0.00
	16:40	46.00

Yatay Deplasman ΔL (1/100)	Kuvvet halkası	Düsey Deplasman Δh	Düzeltilmiş Alan A_i (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kg/cm ²)
0	0.00	46	36.00	
25	62		35.85	
50	116		35.70	
75	189		35.55	
100	264	46	35.40	
125	334		35.25	
150	390		35.10	
175	429		34.95	
200	453	36	34.80	
225	467		34.65	
250	472		34.50	
275	473		34.35	
300	473	16	34.20	
325	470		34.05	
350	467		33.90	
375	461		33.75	
400	457	2	33.60	
425	453		33.45	
450	444		33.30	
475	441		33.15	
500	440	-5	33.00	
525	436		32.85	
550	435		32.70	
575	435		32.55	
600	429	-9	32.40	
650	430		32.10	
700	423	-11	31.80	
750	408		31.50	
800	406	-11	31.20	
850	408		30.90	
900	409	-11.5	30.60	
950	409		30.30	
1000	410	-12	30.00	
1050	410		29.70	
1100	410	-13	29.40	
1150	410		29.10	

$$\sigma_n \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 3.00$$

$$\text{Yay faktörü (kg/div)} = 0.21$$

$$\text{Yaş Num (gr)} = 148.32$$



EKC

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %5 Kil + %3 Bentonit A

Kabın Hacmi: 956 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

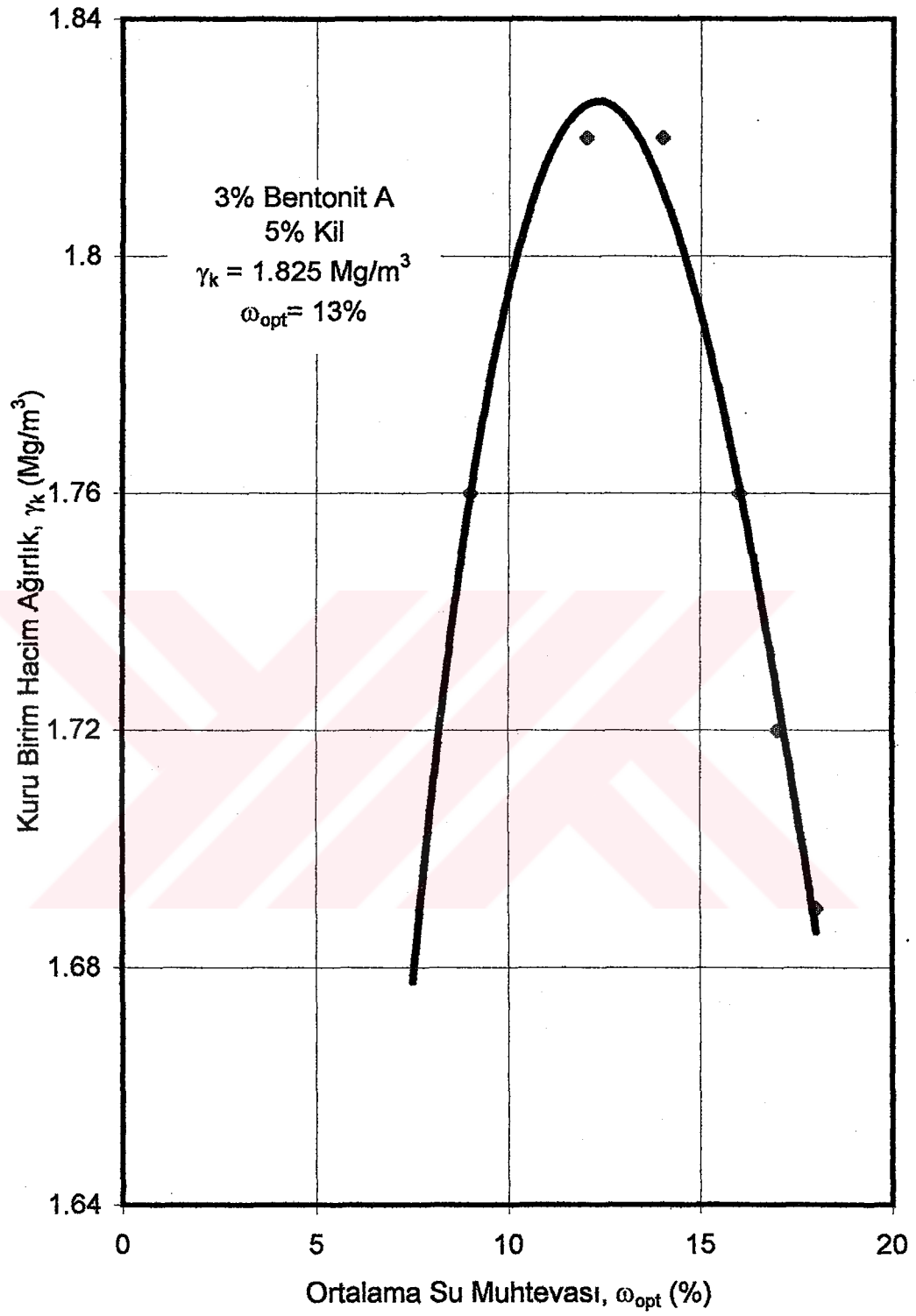
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6225		6360		6390		6360	
Kalıp (gr)	4410		4410		4410		4410	
Islak Numune (gr)	1845		1950		1980		1950	
Birim Hacim Ağ.	1.93		2.04		2.07		2.04	
Kap No	77	53	69	72	100	61	88	30
Islak Num. + Dara (gr)	89.3	84.7	93.3	113.4	99.5	102.5	109.6	124.5
Kuru Num. + Dara (gr)	84.3	80.0	86.5	104.7	91.3	93.4	97.8	112.5
Su Miktarı (gr)	5.0	4.7	6.8	8.7	8.2	9.1	11.8	12.0
Dara (gr)	30.2	29.6	32.6	30.6	33.5	29.7	24.5	34.6
Kuru Numune (gr)	54.1	50.4	53.9	74.1	57.8	63.7	73.3	77.9
Su Muhtevası	9	9	13	12	14	14	16	15
Ortalama Su Muhtevası	9		12		14		16	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.76		1.82		1.82		1.76	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6330		6310					
Kalıp (gr)	4410		4410					
Islak Numune (gr)	1920		1900					
Birim Hacim Ağ.	2.01		1.99					
Kap No	99	79	36	55				
Islak Num. + Dara (gr)	111.2	102.6	95.5	99.7				
Kuru Num. + Dara (gr)	98.6	92.4	85.1	88.7				
Su Miktarı (gr)	12.6	10.2	10.4	11.0				
Dara (gr)	26.6	32.7	28.0	28.8				
Kuru Numune (gr)	72.0	59.7	57.1	59.9				
Su Muhtevası	17.5	17.0	18	18				
Ortalama Su Muhtevası	17		18					
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.72		1.69					

$$\gamma_{k \max} = 1.825 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{\text{opt}} = \% 13$$



Şekil C1 Kompaksiyon Eğrisi

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %10 Kil + %3 Bentonit A

Kabın Hacmi: 956 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

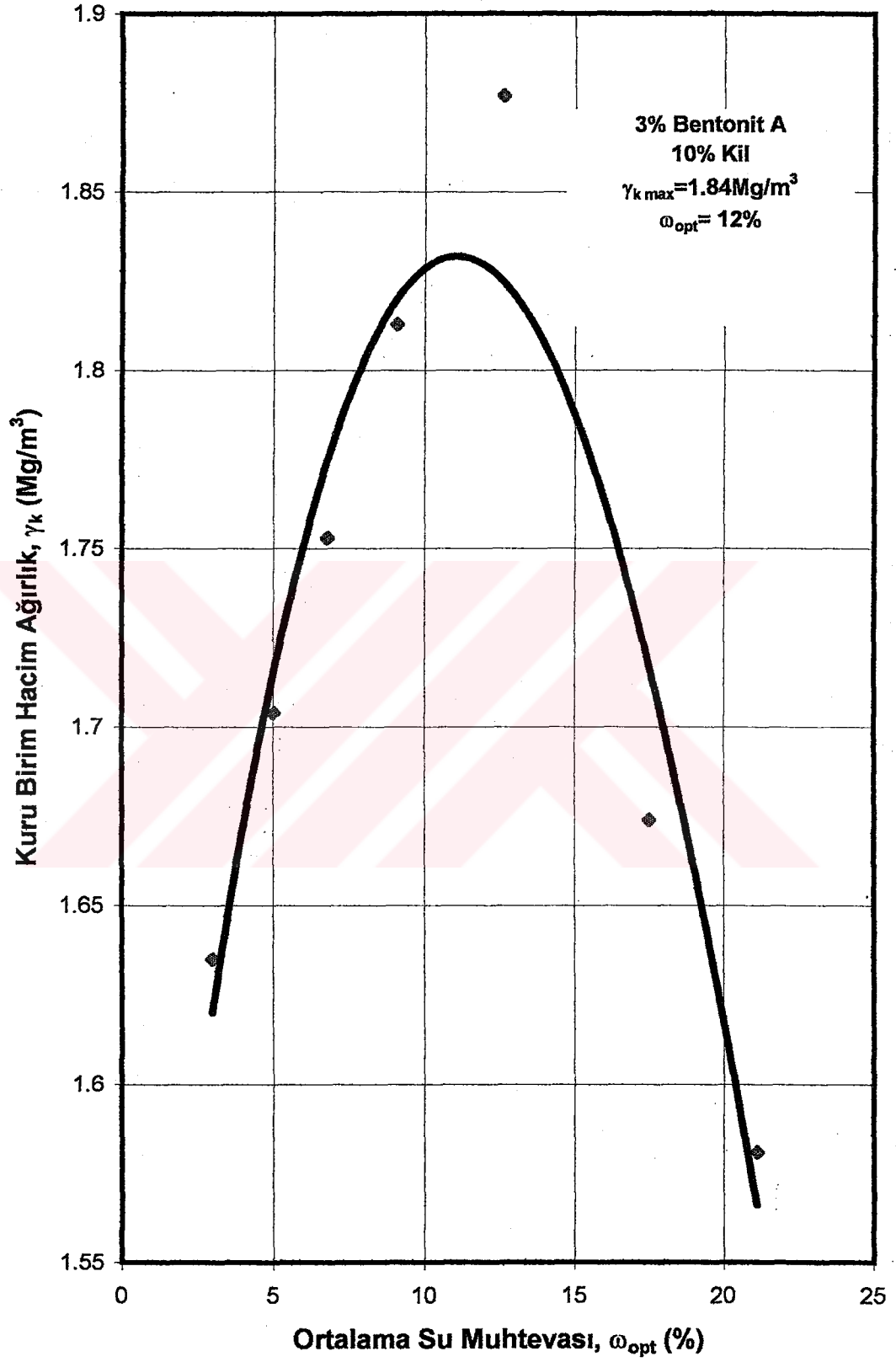
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6020 gr		6120 gr		6200 gr		6300 gr	
Kalıp (gr)	4410		4410		4410		4410	
Islak Numune (gr)	1610		1710		1790		1890	
Birim Hacim Ağ.	1.684		1.789		1.872		1.977	
Kap No	94	61	43	68	69	76	80	85
Islak Num. + Dara (gr)	115.70	111.70	97.91	101.04	88.67	97.16	112.36	111.43
Kuru Num. + Dar (gr)	113.07	109.50	94.62	97.63	85.38	92.66	105.62	104.97
Su Miktarı (gr)	2.63	2.20	3.29	3.41	3.29	4.50	6.74	6.46
Dara (gr)	32.33	29.68	27.46	31.98	32.55	31.08	32.24	32.86
Kuru Numune (gr)	80.74	79.82	67.16	65.65	52.83	61.58	73.38	72.11
Su Muhtevası	3.25	2.75	4.89	5.19	6.22	7.31	9.18	8.96
Ortalama Su Muhtevası	3		5		6.76		9.07	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.635		1.704		1.753		1.813	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6430		6290		6240			
Kalıp (gr)	4410		4410		4410			
Islak Numune (gr)	2020		1880		1830			
Birim Hacim Ağ.	2.113		1.967		1.914			
Kap No	10	9	90	5	73	88		
Islak Num. + Dara (gr)	117.67	118.77	110.18	96.50	98.51	88.35		
Kuru Num. + Dara (gr)	108.29	108.65	98.23	86.34	86.95	77.08		
Su Miktarı	9.38	10.12	11.95	10.16	11.56	11.27		
Dara (gr)	33.36	28.58	29.35	28.69	31.02	24.53		
Kuru Numune (gr)	74.93	80.07	68.88	57.65	55.93	52.55		
Su Muhtevası	12.5	12.6	17.3	17.6	20.7	21.4		
Ortalama Su Muhtevası	12.6		17.5		21.1			
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.877		1.674		1.581			

$$\gamma_{kmax} = 1.84 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{opt} = \% 12$$



Şekil C2 Kompaksiyon Eğrisi

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %15 Kıl + %3 Bentonit A

Kabın Hacmi: 956 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

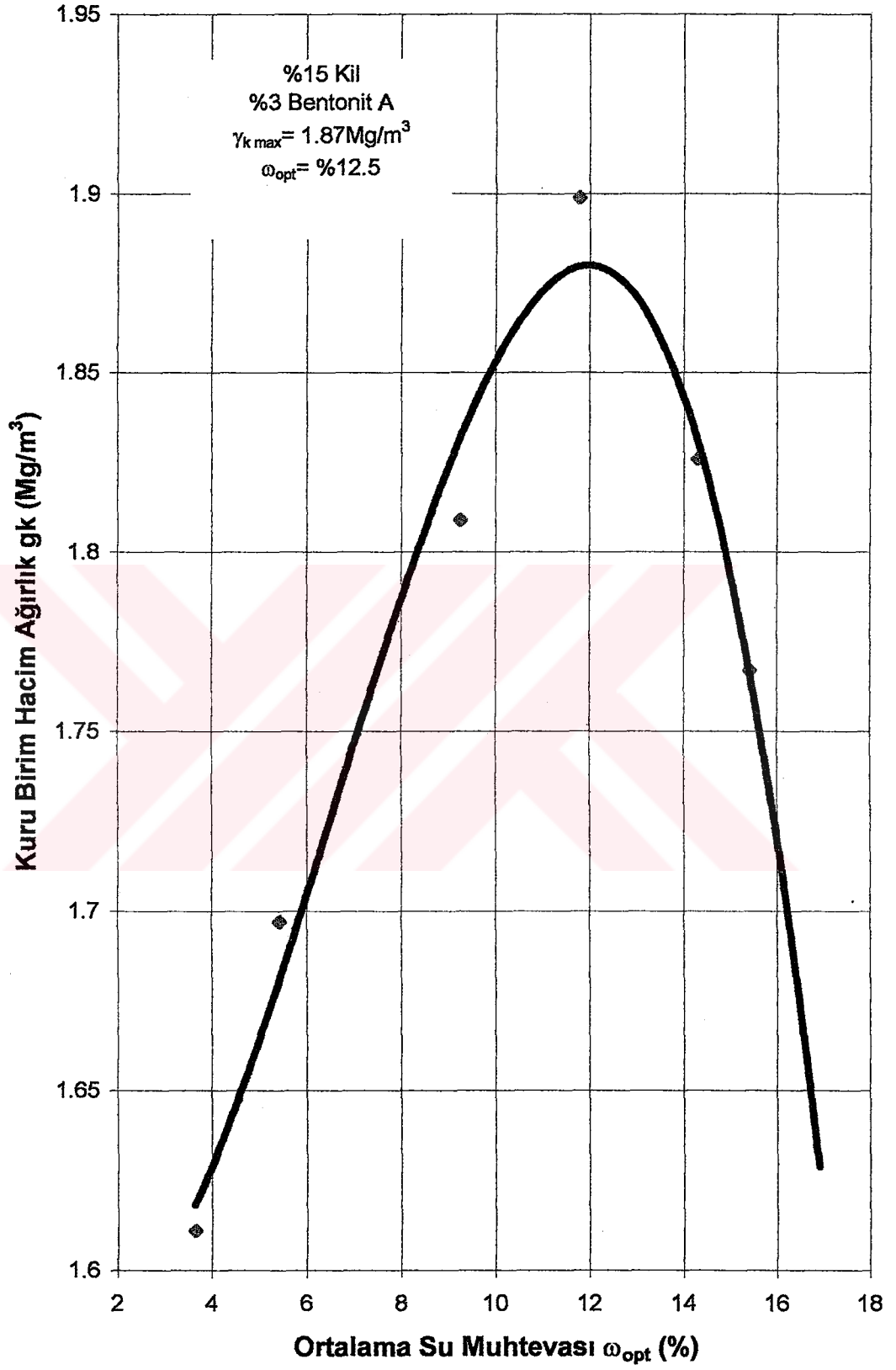
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6050		6.120		6300		6.440	
Kalıp (gr)	4.410		4.410		4.410		4.410	
Islak Numune (gr)	1640		1710		1890		2030	
Birim Hacim Ağ.	1.715		1.789		1.977		2.123	
Kap No	68	25	8	28	99	32	31	90
Islak Num. + Dara (gr)	97.86	107.92	106.27	110.69	126.90	118.54	125.59	108.28
Kuru Num. + Dara (gr)	95.88	105.64	102.34	106.64	118.57	111.09	115.30	100.04
Su Miktarı	1.98	2.28	3.93	4.05	8.33	7.45	10.29	8.24
Dara	31.97	29.86	30.58	31.22	26.81	32.18	28.92	29.32
Kuru Numune (gr)	63.91	75.78	71.76	75.42	91.76	78.91	86.38	70.72
Su Muhtevası (gr)	3.09	3.00	5.48	5.37	9.08	9.45	11.91	11.65
Ortalama Su Muhtevası	3		5.43		9.26		11.78	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.665		1.697		1.809		1.899	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6.405		6.360					
Kalıp (gr)	4.410		4.410		4.410		4.410	
Islak Numune (gr)	1995		1950					
Birim Hacim Ağ.	2.087		2.040					
Kap No	83	22	48	91				
Islak Num. + Dara (gr)	120.97	117.48	137.22	142.27				
Kuru Num. + Dara (gr)	109.39	107.09	122.08	127.54				
Su Miktarı (gr)	11.58	10.39	15.14	14.73				
Dara (gr)	30.52	32.30	24.92	30.99				
Kuru Numune (gr)	78.87	74.79	97.16	96.55				
Su Muhtevası	14.68	13.89	15.58	15.26				
Ortalama Su Muhtevası	14.29		15.42					
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.826		1.767					

$$\gamma_{kmax} = 1.75 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{opt} = \%12.5$$



Şekil C3 Kompaksiyon Eğrisi

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %5 Kil + %3 Bentonit B

Kabın Hacmi: 956 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

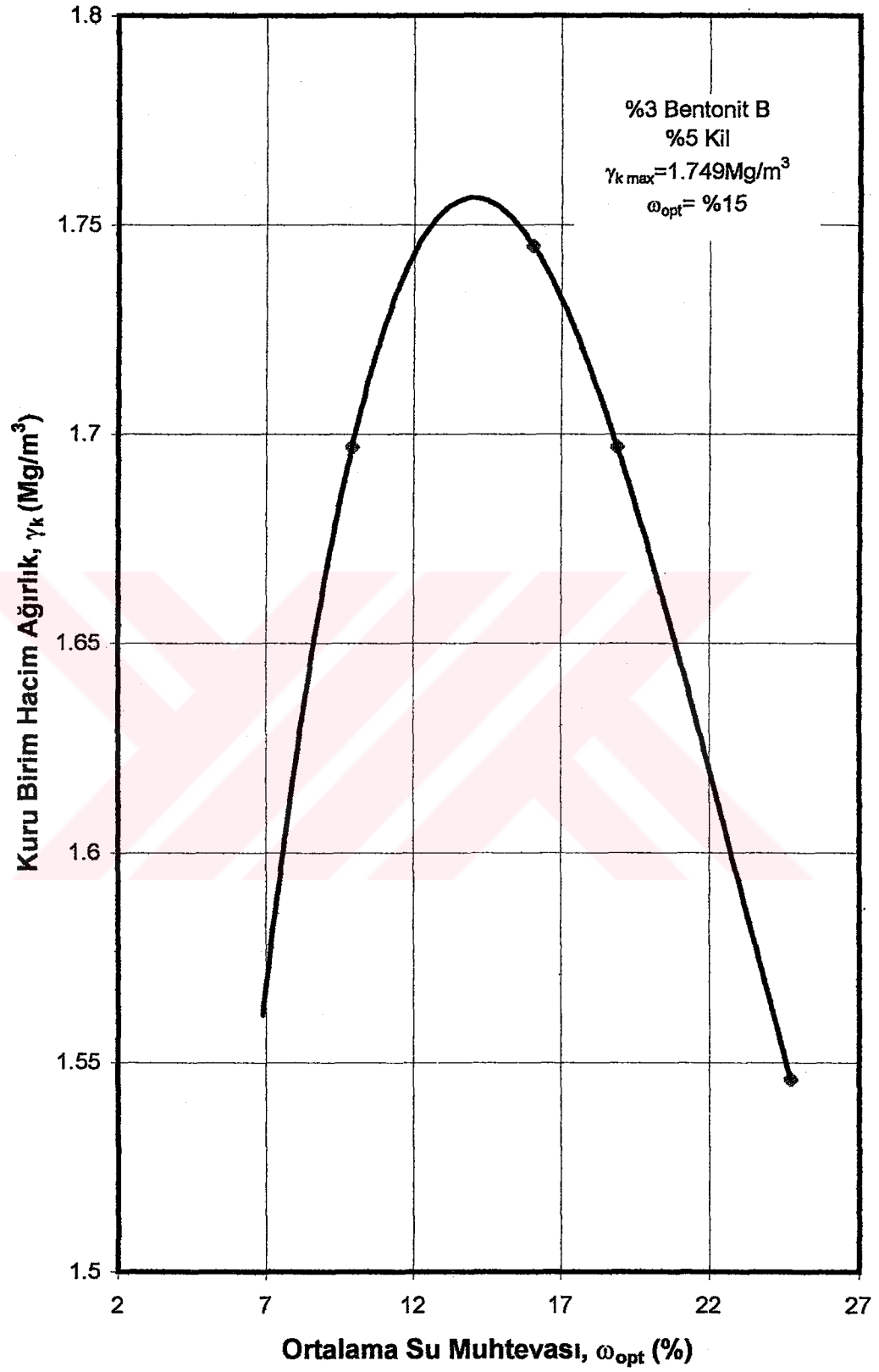
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6280		6450		6430		6355	
Kalıp (gr)	4510		4510		4510		4510	
Islak Numune (gr)	1770		1940		1920		1845	
Birim Hacim Ağ.	1.851		2.029		2.008		1.929	
Kap No	12	36	9	23	15	48	31	40
Islak Num. + Dara (gr)	94.02	90.50	107.33	105.64	108.14	131.68	121.03	129.69
Kuru Num. + Dara (gr)	88.94	85.32	96.38	94.88	96.26	115.29	104.95	105.10
Su Miktarı (gr)	5.08	5.18	10.95	10.76	11.88	16.39	16.08	20.39
Dara (gr)	32.49	28.06	28.55	29.03	31.91	24.94	28.89	32.35
Kuru Numune (gr)	56.45	57.26	67.83	65.85	64.35	90.34	76.06	72.75
Su Muhtevası	8.99	9.05	16.14	16.34	18.46	18.14	21.14	28.30
Ortalama Su Muhtevası	9.02		16.24		18.30		24.72	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.697		1.745		1.697		1.546	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp								
Kalıp								
Islak Numune								
Birim Hacim Ağ.								
Kap No								
Islak Num. + Dara								
Kuru Num. + Dara								
Su Miktarı								
Dara								
Kuru Numune								
Su Muhtevası								
Ortalama Su Muhtevası								
Kuru Birim Hacim Ağ.								

$$\gamma_{kmax} = 1.749 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{opt} = \% 15$$



Şekil C4 Kompaksiyon Eğrisi

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %10 Kil + %3 Bentonit B

Kabın Hacmi: 956 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

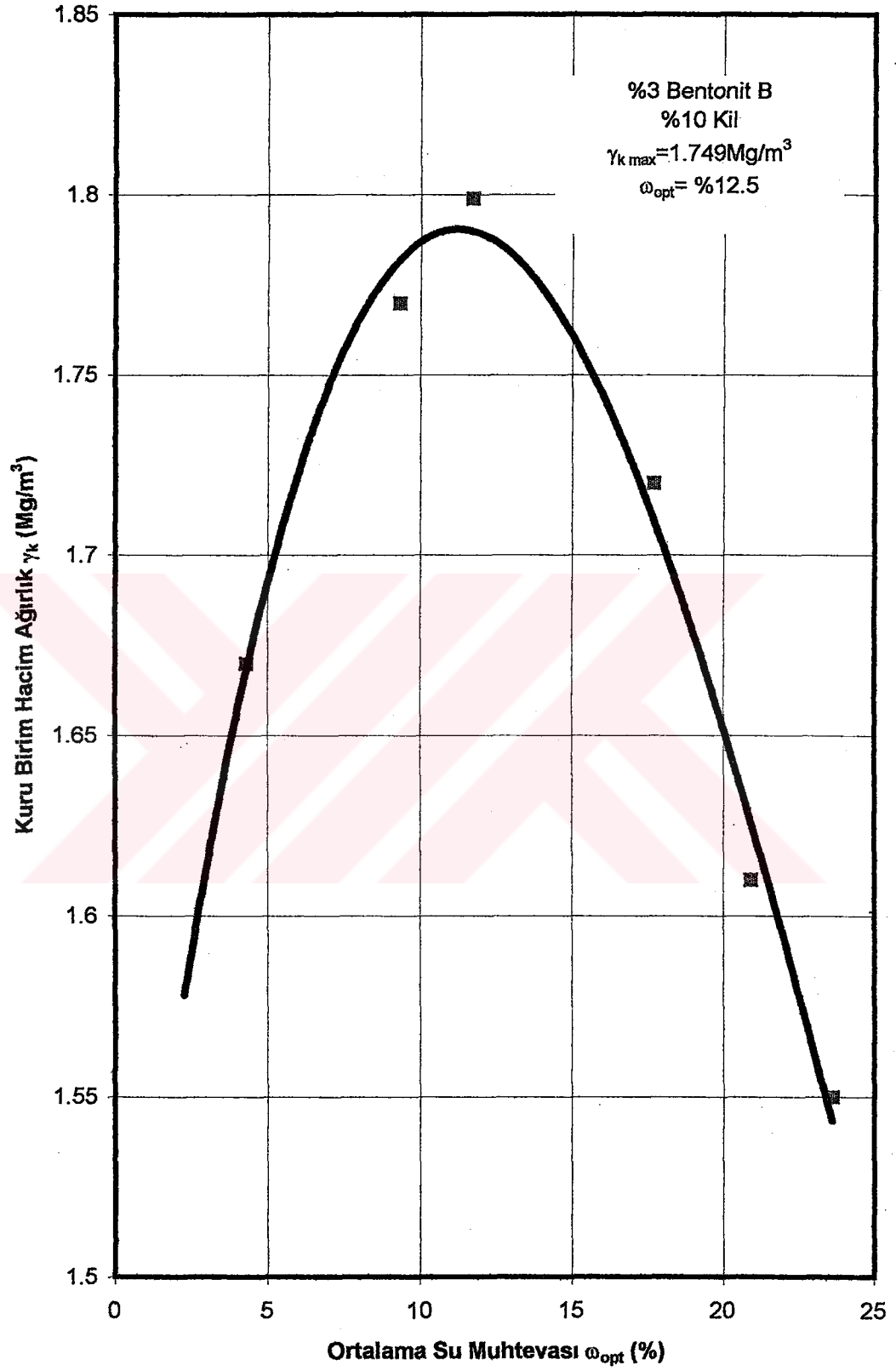
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6190		6370		6450		6465	
Kalıp (gr)	4545		4545		4545		4545	
Islak Numune (gr)	1645		1825		1905		1920	
Birim Hacim Ağ.	1.74		1.93		2.01		2.03	
Kap No	61	68	77	88	69	76	90	100
Islak Num. + Dara (gr)	92.52	104.55	108.75	96.80	118.49	117.37	117.67	99.98
Kuru Num. + Dara (gr)	90.01	101.57	102.04	90.69	109.50	108.43	104.18	90.18
Su Miktarı (gr)	2.51	2.98	6.71	6.11	8.99	8.94	13.49	9.80
Dara (gr)	29.88	31.98	30.16	24.51	32.55	31.06	29.31	33.52
Kuru Numune (gr)	60.13	69.59	71.88	66.18	76.95	77.37	74.87	56.660
Su Muhtevası	4.2	4.3	9.3	9.2	11.7	11.6	18.02	17.3
Ortalama Su Muhtevası	4.3		9.3		11.7		17.7	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.67		1.77		1.799		1.72	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6390 gr		6360 gr					
Kalıp (gr)	4.545		4.545					
Islak Numune (gr)	1845		1815					
Birim Hacim Ağ.	1.95		1.92					
Kap No	23	48	29	86				
Islak Num. + Dara (gr)	123.30	85.46	99.59	103.95				
Kuru Num. + Dara (gr)	107.19	74.84	86.66	90.08				
Su Miktarı (gr)	16.11	10.62	12.93	13.87				
Dara (gr)	29.03	24.93	30.83	32.20				
Kuru Numune (gr)	78.16	49.91	55.83	57.88				
Su Muhtevası	20.6	21.3	23.2	23.9				
Ortalama Su Muhtevası	20.9		23.6					
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.61		1.55					

$$\gamma_{k \max} = 1.785 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{\text{opt}} = \% 12.5$$



Şekil C5 Kompaksiyon Eğrisi

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI

KOMPAKSİYON DENEYİ

Numunenin Cinsi : Kum-Çakıl + %15 Kil + %3 Bentonit B

Kabın Hacmi: 947 cm³

Tabaka Sayısı: 3

Tokmak Ağırlığı: 2.5 kg

Düşüş Yüksekliği: 30 cm

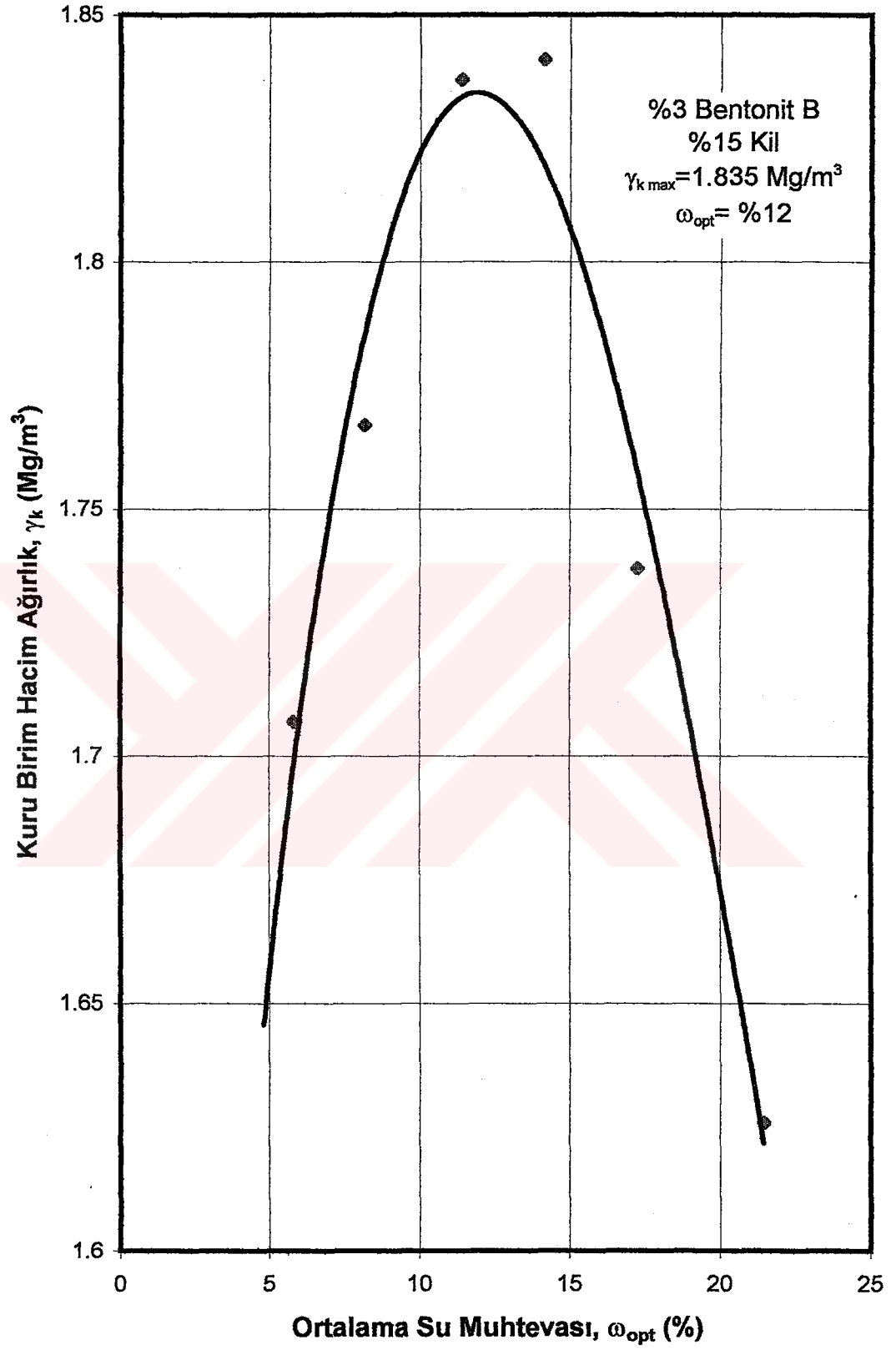
Vuruş Adedi: 25

Deney No	1		2		3		4	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6260		6360		6490		6540	
Kalıp (gr)	4550		4550		4550		4550	
Islak Numune (gr)	1710		1810		1940		1990	
Birim Hacim Ağ.	1.806		1.911		2.046		2.101	
Kap No	10	12	22	25	40	43	72	79
Islak Num. + Dara (gr)	87.59	87.62	79.44	80.27	94.94	81.66	93.71	100.89
Kuru Num. + Dara (gr)	84.77	84.42	75.84	76.51	88.55	76.12	86.14	92.19
Su Miktarı (gr)	2.82	3.2	3.6	3.76	6.39	5.54	7.57	8.7
Dara (gr)	33.34	32.49	32.27	29.84	32.37	27.44	30.62	32.66
Kuru Numune (gr)	51.43	51.94	43.57	46.67	56.18	46.68	55.52	59.53
Su Muhtevası (gr)	5.48	6.16	8.26	8.06	11.37	11.38	13.63	14.61
Ortalama Su Muhtevası	5.82		8.16		11.38		14.12	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.707		1.767		1.837		1.841	

Deney No	5		6		7		8	
Islak Num. + Kalıp (gr)	6480		6420					
Kalıp (gr)	4550		4550					
Islak Numune (gr)	1930		1870					
Birim Hacim Ağ.	2.038		1.975					
Kap No	87	91	15	58				
Islak Num. + Dara (gr)	101.28	94.96	117.76	105.42				
Kuru Num. + Dara (gr)	91.03	85.53	102.44	91.75				
Su Miktarı (gr)	10.25	9.43	15.32	13.67				
Dara (gr)	31.53	30.96	31.90	27.18				
Kuru Numune	59.5	54.57	70.54	64.57				
Su Muhtevası (gr)	17.23	17.28	21.72	21.17				
Ortalama Su Muhtevası	17.25		21.44					
Kuru Birim Hacim Ağ.	1.738		1.626					

$$\gamma_{kmax} = 1.835 \text{ Mg/m}^3$$

$$\omega_{opt} = \% 12$$



Şekil C6 Kompaksiyon Eğrisi



EKD

Tablo D.1 Bentonit A ve %5 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
^{23/8} 9:10	1800	10.00	90.50	3.53E-07
09:40	2400	9.55	89.60	2.98E-07
10:20	1200	9.05	88.60	3.6E-07
10:40	2400	8.75	88.00	2.42E-07
11:20	1800	8.35	87.20	2.85E-07
11:50	1800	8.00	86.50	2.46E-07
12:20	1800	7.70	85.90	2.89E-07
12:50	1200	7.35	85.20	2.5E-07
13:10	2700	7.15	84.80	2.51E-07
13:55	1800	6.70	83.90	2.54E-07
14:25	1800	6.40	83.30	2.98E-07
14:55	1800	6.05	82.60	2.58E-07
15:25	1800	5.75	82.00	2.6E-07
15:55	1800	5.45	81.40	2.62E-07
16:25	1800	5.15	80.80	2.63E-07
16:55	1800	4.85	80.20	2.65E-07
17:25		4.55	79.60	
$k_{average} =$				2.22E-07

%3 Bentonit A + %5 Kil

Tablo D.2 Bentonit A ve %10 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
10/9 10:25	1500	10.00	90.50	6.61E-07
10:50	1200	9.30	89.10	6.59E-07
11:10	1200	8.75	88.00	6.67E-07
11:30	1200	8.20	86.90	6.75E-07
11:50	1200	7.65	85.80	6.84E-07
12:10	1200	7.10	84.70	6.30E-07
12:30	1200	6.60	83.70	6.37E-07
12:50	1200	6.10	82.70	7.10E-07
13:10	1200	5.55	81.60	6.54E-07
13:30	1500	5.05	80.60	6.36E-07
13:55	3300	4.45	79.40	5.67E-07
14:50	1200	3.30	77.10	6.23E-07
15:10	1500	2.85	76.20	5.60E-07
15:35	1200	2.35	75.20	6.38E-07
15:55		1.90	74.30	
Average=				6.43E-07

% 3 Bentonit A + %10 Kil

Tablo D.3 Bentonit A ve %15 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
^{2/10} 9:10	1800	10.00	90.50	9.9E-07
09:40	2400	9.55	88.00	6.71E-07
10:20	1200	9.05	85.80	7.47E-07
10:40	2400	8.75	84.60	6.66E-07
11:20	1800	8.35	82.50	8.24E-07
11:50	1800	8.00	80.60	9.33E-07
12:20	1800	7.70	78.50	8.66E-07
12:50	1200	7.35	76.60	1.62E-06
13:10	2700	7.15	74.30	6.76E-07
13:55	1800	6.70	72.20	8.92E-07
14:25	1800	6.40	70.40	8.64E-07
14:55	1800	6.05	68.70	1.1E-06
15:25	1800	5.75	66.60	9.14E-07
15:55	1800	5.45	64.90	1.11E-06
16:25	1800	5.15	62.90	9.68E-07
16:55	1800	4.85	61.20	6.41E-07
17:25		4.55	60.10	

% 3 Bentonit A + %15 Kil

$k_{average} = 7.24E-07$

Tablo D.4 Bentonit B ve %5 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
20/2 11:10	6600	10.0	90.50	4.27E-08
16:00	1080	9.80	90.10	1.06E-06
21/2 10:00		9.00	88.50	
22/2 17:30	7200	10.00	90.50	1.18E-07
23/2 10:00	4320	9.40	89.30	
$k_{average} =$				4.05E-07

%3 Bentonit B + %5 Kil

Tablo D.5 Bentonit B ve %10 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
26/2 12:15	2700	10.0	90.50	5.21E-08
13:00	3600	9.90	90.30	1.96E-08
14:00	14400	9.85	90.20	4.9E-09
18:00	72600	9.80	90.10	1.37E-08
27/2 14:10	12000	9.10	88.70	2.4E-08
17:30	56280	8.90	88.30	2.2E-08
28/2 9:08	7200	8.05	86.60	1.02E-08
11:08	4320	8.00	86.50	1.7E-08
12:20	4200	7.95	86.40	3.51E-08
13:30	6600	7.85	86.20	1.12E-08
15:20	3900	7.80	86.10	1.9E-08
16:25	4800	7.75	86.00	1.54E-08
17:45	232200	7.70	85.90	2.23E-08
3/3 10:15		4.35	79.20	
3/3 10:15	15300	10.00	90.50	1.84E-08
14:30	65700	9.80	90.10	1.63E-08
4/3 8:45	20940	9.05	88.60	1.03E-08
14:04	12360	8.90	88.30	1.17E-08
17:30	63300	8.80	88.10	1.49E-08
5/3 11:05	78600	8.15	86.80	1.51E-08
6/3 8:55	19920	7.35	85.20	1.5E-08
14:27	65760	7.15	84.80	1.84E-08
7/3 8:43		6.35	83.20	
7/3 8:45	16200	10.00	90.50	8.69E-09
13:15	11700	9.90	90.30	1.81E-08
16:30	239700	9.75	90.00	1.8E-08
10/3 11:05	77400	6.80	84.10	1.48E-08
11/3 8:35		6.05	82.60	
11/3 8:35	25500	10.00	90.50	1.11E-08
15:40	1020	9.80	90.10	9.07E-07
12/3 8:40		9.15	88.80	
$k_{average} =$				5.05E-08

%3 Bentonit B + %10 Kil

Tablo D.6 Bentonit B ve %15 Kil ile Yapılan Permeabilite Deneyi Sonuçları

Tarih/saat	Δt (sn)	Okuma	(cm)	k (cm/sn)
^{21/3} 10:30	6300	10.00	90.50	2.23E-08
12:15	6900	9.90	90.30	5.12E-08
14:10	3600	9.65	89.80	3.94E-08
15:10	20100	9.55	89.60	4.27E-08
20:45	499800	8.95	88.40	3.8E-09
^{27/3} 15:35	79200	7.65	85.80	3.93E-08
^{28/3} 17:35		5.60	81.70	
^{31/3} 10:41	12960	10.00	90.50	3.81E-08
14:17	7080	9.65	89.80	1E-08
16:15	68700	9.60	89.70	3.79E-08
^{1/4} 10:20	18900	7.80	86.10	2.75E-08
15:35	62700	7.45	85.40	3.75E-08
^{2/4} 9:00		5.90	82.30	
^{2/4} 9:02	17040	10.00	90.50	2.48E-08
13:46	11640	9.70	89.90	2.44E-08
17:00	57420	9.50	89.50	4.03E-08
^{3/4} 8:57	10500	7.90	86.30	2.11E-08
11:52	21060	7.75	86.00	3.51E-09
17:43	55020	7.70	85.90	3.55E-08
^{4/4} 9:00	19860	6.40	83.30	2.32E-08
14:31	8340	6.10	82.70	4.63E-08
16:50		5.85	82.20	
^{4/4} 16:50	239100	10.00	90.50	3.55E-08
^{7/4} 11:15		4.35	79.20	
$k_{average} =$				3.02E-08

%3 Bentonit B + %15 Kil



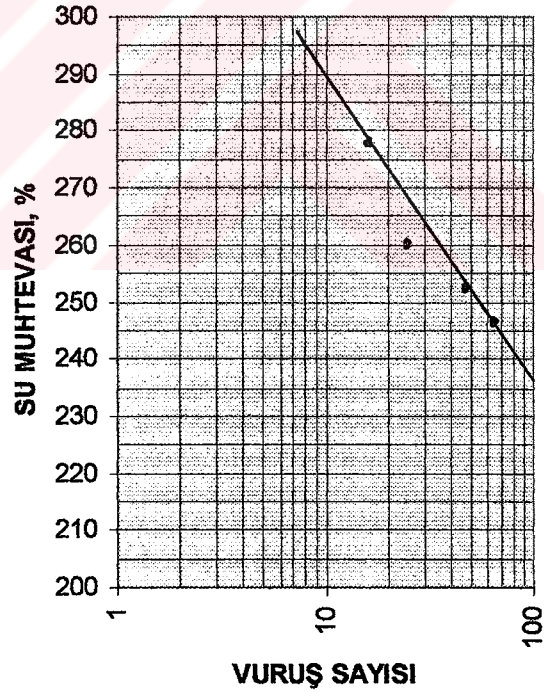
İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

KIVAM LİMİTLERİ

Numunenin cinsi : BENTONİT A

KAP NO	5	90	
ISLAK NUM + DARA	41.7	41.2	
KURU NUM + DARA	38.6	38.6	
SU MİKTARI	3.1	2.6	
DARA	27.5	29.4	
KURU ZEMİN	11.1	9.2	
SU MUHTEVASI	28	28	

KAP NO	28	32	10	12
VURUS SAYISI	64	48	25	18
ISLAK NUM + DARA	53.7	54.8	54.3	58.6
KURU NUM + DARA	37.7	38.6	39.2	39.4
SU MİKTARI	16	16.2	15.1	19.2
DARA	31.2	32.2	33.4	32.5
KURU ZEMİN	6.5	6.4	5.8	6.9
SU MUHTEVASI	246	253	260	278



Plastik Limit	Likit Limit	Plastisite İndisi
% 28	% 270	% 242

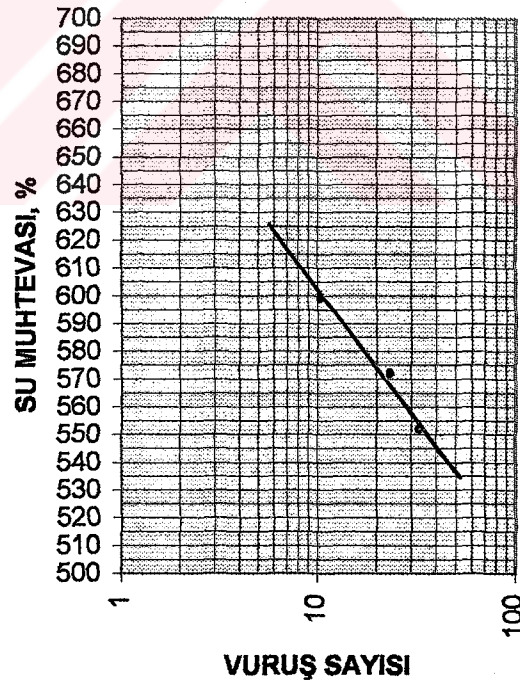
İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

KIVAM LİMİTLERİ

Numunenin cinsi : BENTONİT B

KAP NO	31	91	33
ISLAK NUM + DARA	44.92	45.15	46.00
KURU NUM + DARA	39.01	39.97	40.42
SU MİKTARI	5.91	5.18	5.58
DARA	28.90	30.95	31.09
KURU ZEMİN	10.11	9.02	9.33
SU MUHTEVASI %	58	57	59

KAP NO	2	91	94
VURUŞ SAYISI	32	26	11
ISLAK NUM + DARA	47.03	45.00	45.91
KURU NUM + DARA	32.73	33.07	34.27
SU MİKTARI	14.3	11.93	11.64
DARA	30.14	30.99	32.35
KURU ZEMİN	2.59	2.08	1.94
SU MUHTEVASI %	552	573	600



Plastik Limit %	Likit Limit %	Plastisite İndisi %
58	570	512

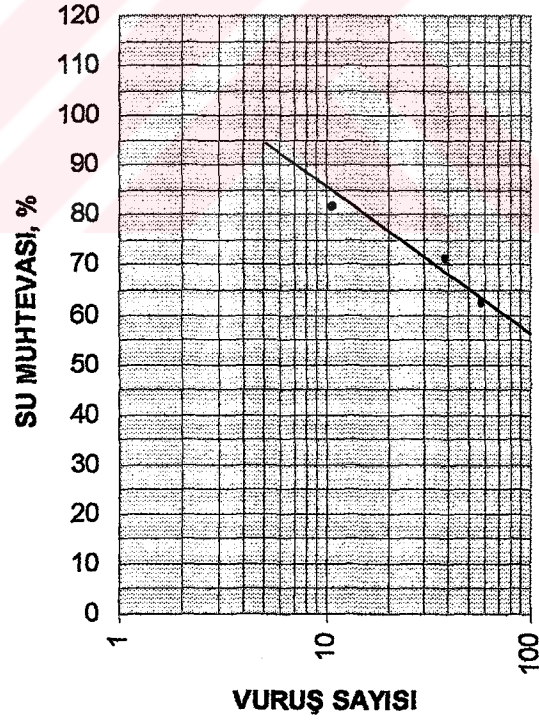
İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

KIVAM LİMITLERİ

Numunenin cinsi : CH

KAP NO	10	28	12
ISLAK NUM + DARA	49.7	47.6	60.5
KURU NUM + DARA	45.7	43.5	53.6
SU MİKTARI	4.00	4.10	6.90
DARA	33.4	31.2	32.5
KURU ZEMİN	12.3	12.3	21.1
SU MUHTEVASI %	32	33	33

KAP NO	40	16	83
VURUŞ SAYISI	59	39	11
ISLAK NUM + DARA	56.7	50.4	57.8
KURU NUM + DARA	47.3	40.7	45.5
SU MİKTARI	9.4	9.7	12.3
DARA	32.4	27.1	30.5
KURU ZEMİN	14.9	13.6	15
SU MUHTEVASI %	63	71	82



Plastik Limit	Likit Limit	Plastisite İndisi
% 33	% 75	% 42

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

HİDROMETRE ANALİZİ

Numunenin Geldiği Yer : (CH)
Dane Özgül Ağırlığı : 2.38 Mg/m³
Alınan Kuru Numune
Ağırlığı : 50 gr

ZAMAN	SICAKLIK	GEÇEN ZAMAN	HİDROMETRE OKUMASI Rh ¹	Rh = Rh ¹ + Cm	Rh ¹	He	$\frac{100 \gamma_s}{W_k(\gamma_s-1)}$	D (mm)	ALINAN NUMUNEYE GÖRE YÜZDE	ANA NUMUNEYE GÖRE YÜZDE
9:40	20°	15"	51.0	52.0	49.65	7.85	3.449	0.080	99.3	
		30"	50.5	51.5	49.15	7.93		0.056	98.3	
		1'	49.5	50.5	48.15	8.09		0.041	96.3	
		2'	48.0	49.0	46.65	8.34		0.029	93.3	
		4'	45.0	46.0	43.65	8.83		0.021	87.3	
		8'	42.5	43.5	41.15	9.23		0.015	82.3	
9:55		15'	40.0	41.0	38.65	9.64		0.011	77.3	
10:10		30'	35.5	36.5	34.15	10.37		0.008	68.3	
10:40		1 ^h	31.0	32.0	29.65	11.10		0.006	59.3	
11:40		2 ^h	27.0	28.0	25.65	11.75		0.004	51.3	
13:40		4 ^h	23.5	24.5	22.15	12.32		0.003	44.3	
17:40		8 ^h	19.0	20.0	17.65	13.05		0.002	35.3	
		24 ^h	11.0	12.5	10.15	14.27		0.001	20.3	

γ_s	$\frac{\gamma_s}{\gamma_s-1}$
2.90	1.526
2.80	1.556
2.75	1.572
2.70	1.588
2.65	1.607
2.60	1.625
2.55	1.645
2.50	1.667
2.40	1.714
2.38	1.725

İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

ELEK ANALİZİ

Numunenin cinsi : Kıl
Numunenin ilk ağırlığı : 1000 gr
Numunenin yıkamadan
sonraki ağırlığı : 1000 gr (yıkandı)

Elek no	Delik Çapı mm.	Eleğin üstünde kalan gr.	Elekten geçen	
			gr.	%
3/4		25.8	971.7	97.17
3/8		250.8	720.9	72.09
4		75.7	645.2	64.52
10		111.3	533.9	53.39
18		40.8	493.1	49.31
36		118.5	374.6	37.46
72		307.8	66.8	6.68
100		37.9	28.9	2.89
200		28.9	0.00	0.00
Alt Katta toplanan				
Yıkamadaki Kayıp				
Alt kap toplamı				
Toplam				

Deney Tarihi : 12 / 8 / 96

I.T.Ü. ZEMİN MEKANIĞI
LABORATUVARI

DANE BİRİM HACİM AĞIRLIĞI

Numune Cinsi : GS

Numune No.				
Piknometre No.	250	250	250	250
Kuru Zemin Ağırlığı (W_1)	50	50	50	50
Su + Piknometre Ağırlığı (W_2)	419.7	419.6	419.8	419.7
$W_1 + W_2$	469.7	469.6	469.8	469.7
Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (W_3)	450.7	450.6	450.7	450.7
$W_1 + W_2 - W_3$	19	19	19.1	19
$\gamma = \frac{W_1}{W_1 + W_2 + W_3}$	2.63	2.63	2.62	2.63
Ortalama γ_s	2.63		2.62	

2.63 Mg/m³

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

DANE BİRİM HACİM AĞIRLIĞI

Numune Cinsi : Kıl

Numune No.				
Piknometre No.	250	250	250	250
Kuru Zemin Ağırlığı (W_1)	50	50	50	50
Su + Piknometre Ağırlığı (W_2)	419.66	419.67	419.7	419.8
$W_1 + W_2$	469.66	469.67	469.7	469.8
Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (W_3)	448.73	448.78	448.60	448.77
$W_1 + W_2 - W_3$	20.93	20.89	21.1	21.03
$\gamma = \frac{W_1}{W_1 + W_2 + W_3}$	2.39	2.39	2.37	2.38
Ortalama γ_s	2.39		2.37	

2.38 Mg/m³

ÖZGEÇMİŞ

Emre Çeçen

29.09.1970 tarihinde İstanbul'da doğmuştur. Orta öğrenimini Kadıköy Anadolu Lisesinde tamamlamış ve 1989 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmiştir. 1994 yılında aynı fakültede Geoteknik Anabilim Dalında Yüksek Lisans programına başlamıştır.

