

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİLLİ ZEMİNLERDE KIVAM LİMİTLERİ VE
KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN ISI İLE
DEĞİŞİMİ

Lale YILMAZ

121376

İNŞAAT ANABİLİM DALI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ERZURUM
2002

Her hakkı saklıdır

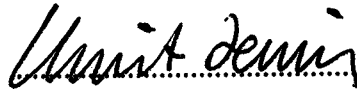
Yrd.Doc.Dr..Özcan TAN danışmanlığında, Lale YILMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma ..26../..09../2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. İnşaat Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Yrd.Doc.Dr..Özcan TAN İmza : 
Üye : Yrd.Doc.Dr..Ali AYDIN İmza : 
Üye : Yrd.Doc.Dr..Mehmet YILMAZ İmza : 
Üye : İmza :
Üye : İmza :

127376

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)


Enstitü Müdürü

ÖZET

Y. Lisans Tezi

KİLLİ ZEMİNLERDE KIVAM LİMİTLERİ VE KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN ISI İLE DEĞİŞİMİ

Lale YILMAZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Özcan TAN

Killi zeminler, gerek tane büyüklüğü gerekse mineralojik yapısı ile diğer zemin gruplarına göre oldukça farklı ve değişken özelliklere sahip zeminlerdir. Killi zeminlerin değişik koşullardaki mühendislik özelliklerini araştırmak sürekli ilgi çeken bir konu olmuştur. Killi zeminlerde; su muhtevasının ya da ısıнын değişimi zeminin bir takım özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Değişik sıcaklıklarda ısıtılması sonucunda mineralojik yapı değişmekte ve buna bağlı olarak geoteknik özelliklerde de farklı davranışlar görülmektedir.

Bu çalışmada, Oltu (Erzurum) bölgesinden getirilen iki farklı kilin tane birim hacim ağırlık, likit limit, plastik limit, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın ısı ile değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde sıcaklıklar; 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000°C olarak seçilmiş ve standartlara uygun olarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda; incelenen parametrelerin sıcaklıkla değişim grafikleri çizilmiş, iki farklı kil örneklerinin ısı altındaki davranışları incelenmiş ve deney sonuçları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Deney sonuçlarından sıcaklık artışı ile likit limit, plastik limit optimum su muhtevası ve tane birim hacim ağırlık azalmıştır. Bununla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık sıcaklığın artması ile artmıştır. 400°C de plastik limit tamamen yok olmuştur. Killerin 400°C de ısıtılması ile iki zemin için likit limit % 49,9-66,0, optimum su muhtevası %36,1-51,1, ve tane birim hacim ağırlık 600°C de %10,1-8,0 oranlarında azalmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ise 400°C de iki zemin için %5,0-41,5 oranlarında artmıştır.

2002, 77 sayfa

Anahtar kelimeler: Killi zeminler, Kompaksiyon, Atterberg limitleri, Tane birim hacim ağırlık, Isıl işlem

ABSTRACT

Master Thesis

VARIATION OF THE CONSISTENCY LIMITS AND COMPACTION PARAMETERS WITH HEAT TREATMENT FOR CLAYEY SOİLS

Lale YILMAZ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department Of Civil Engineer
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Özcan TAN

From the point of view of both the grain size and mineralogical structure, clays are a type of soil. Studying the engineering characteristics of clay under different conditions has been very interesting subject for scientists the change of the water content and the degree of heating results in the change of some characteristics of the clayey soils. At the end of the heat treatment at different temperatures, mineralogical structure of the clayey soil is changed and depending on this process, different behaviors have been observed in geotechnical characteristics as well.

In this study, the variation of some soil properties such as unit volume weight, liquid limit, plastic limit, optimum water content and maximum dry unit volume weight was investigated experimentally for two different clays which are brought from Oltu. Test temperatures were chosen as 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800 and 1000 °C and tests were performed according to standards. The graphs related to the variation of the parameters studied with heat treatment were then drawn, and the behaviors under the heating process were examined for two different clays, changes were compared with each other and the general information concerned with the results of experiments was given. From the experimental results, liquid limits, plastic limits, optimum water contents and specific gravity decreased with increasing temperature. However, maximum dry densities increased with increasing temperature. Plastic limits were completely eliminated at 400° C. Heating the clays decreased at 400°C the liquid limit and optimum water content by 49,9-66,0% 36,1-51,1%, and at 400° C specific gravity by 10,1-8,0 %, respectively, for two soils. Maximum dry density increased by 5,0-41,5% at 400°C for two soils.

2002, 77 pages

Key Words: Clayey soils, Compaction, Atterberg limits, Specific gravity, Heat treatment

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasını yöneten, çalışma boyunca kıymetli fikirlerini ve alakalarını esirgemeyen, deneysel çalışmalar için gerekli olanakları sağlayan yönetici hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Özcan TAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında göstermiş olduğu anlayış ve yardımlarından dolayı Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Hanifi SARAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirlerinden ve yardımlarından beni dolayı Sayın Uzman Şahin ZAIMOĞLU ve Sayın Arş. Gör. Osman Ünsal BAYRAKTAR'a teşekkür ederim.

Deney numunelerinin hazırlanmasında ve fırınlanmasında yaptıkları yardımlardan dolayı İnşaat Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği Bölümleri laboratuvar personeline teşekkür ederim.

Bana sonsuz yardımını ve desteğini esirgemeyen kıymetli AİLEME ve sevgili arkadaşım Ziraat Mühendisi Semra SÜRÜCÜ'ye teşekkür ederim.

Lale Yılmaz

Eylül 2002

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Kapsamı.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Killi Zeminler ve Mineralojik Yapısı.....	4
2.1.1. Killerin oluşumu.....	4
2.1.2. Kil minerallerinin tanımlanması.....	6
2.1.3. Kil minerallerinin özellikleri.....	7
2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Temel Özellikler.....	11
2.3. Zeminlerin Kompaksiyonu.....	16
2.4. Zeminlerin Kıvam Durumları.....	19
2.5. Zeminlerin Isı ile Stabilizasyonu.....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	24
3.2 Deney Programı.....	27
3.3. Deneyde Kullanılan Alet ve Cihazlar.....	27
3.4. Deneylerin Yapılışı.....	29
3.4.1. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın belirlenmesi.....	29
3.4.2. Zeminlerin likit limitinin belirlenmesi.....	31
3.4.3. Zeminlerin plastik limitinin belirlenmesi.....	33
3.4.4. Zeminlerin tane birim hacim ağırlığın belirlenmesi.....	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	35

4.1. Kompaksiyon Deneyleri.....	35
4.2. Likit Limit Deneyleri.....	50
4.3. Plastik Limit Deneyleri.....	64
4.4. Tane Birim Hacim Ağırlık Deneyleri.....	66
4.5. Kil Ağırlığının Isı İle Değişim Deneyleri.....	70
5. SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER DİZİNİ

e	Boşluk oranı
n	Porozite
O	Organik malzeme içeriği
V	Toplam hacmi
V_B	Boşluk hacmi
V_D	Tane hacmi
V_H	Havanın hacmi
V_{su}	Suyun hacmi
ω	Su muhtevası
ω_L	Likit limit
ω_P	Plastik limit
ω_s	Rötre limiti
ω_{opt}	Optimum su muhtevası
W	Toplam ağırlık
W_D	Tane ağırlığı
W_{K100}	100°C deki kil ağırlığı
W_{K400}	400°C deki kil ağırlığı
W_{SU}	Su ağırlığı
γ_A	Zeminin su altındaki birim hacim ağırlığı
γ_d	Zeminin doygun birim hacim ağırlığı
γ_k	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	Zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_n	Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
γ_s	Zeminin tane birim hacim ağırlığı
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kil minerallerinin elektron mikroskobu ile görünüşü.....	6
Şekil 2.2.	Kil kristalleri yapısı	8
Şekil 2.3.	Kaolonite ve montmorillonit kil minerallerinin yapısı.....	10
Şekil 2.4.a.	Kaolinite kilinin yapısı.....	11
Şekil 2.4.b.	Montmorillonite kilinin yapısı.....	11
Şekil 2.5.	Zeminlerde hacim-ağırlık bağıntıları.....	12
Şekil 2.6.	Artan su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi.....	18
Şekil 2.7.	Zeminin kıvam durumları.....	20
Şekil 2.8.	Başlangıçta kuru olan bir kilin doygun hale gelirken geçirmiş olduğu kıvam durumları.....	20
Şekil 2.9.	Kuyu yerleştirme planı.....	23
Şekil 2.10.	Tipik bir ateşleme düzeni.....	23
Şekil 3.1.	1 Nolu kil için yaptırılan normal X-Ray analiz sonuçları.....	25
Şekil 3.2.	2 Nolu kil için yaptırılan normal X-Ray analiz sonuçları.....	26
Şekil 3.3.	Deneylerde kullanılan otomatik zemin kompaktörü.....	30
Şekil 3.4.	Likit limit deneyinin yapılışı.....	32
Şekil 3.5.	Su muhtevası-penetrasyon grafiğinden likit limitin bulunması.....	32
Şekil 3.6.	Plastik limit deneyinin yapılışı.....	33
Şekil 4.1-8.	1 Nolu kil için kompaksiyon grafikleri.....	38
Şekil 4.9-16.	2 Nolu kil için kompaksiyon grafikleri.....	42
Şekil 4.17-20.	1 ve 2 numaralı killer için optimum su muhtevası-sıcaklık, kuru birim hacim ağırlık-sıcaklık (°C) grafikleri.....	47
Şekil 4.21-29.	1 Nolu kil için likit limit grafikleri.....	52
Şekil 4.30-38.	2 Nolu kil için likit limit grafikleri.....	56
Şekil 4.39-40.	1 ve 2 numaralı killer için ω_L (%)—sıcaklık (°C) grafikleri.....	62
Şekil 4.41-42.	1 ve 2 numaralı killer için ω_P (%)—sıcaklık (°C) grafikleri.....	65
Şekil 4.43-44.	Numuneler için tane birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafikleri.....	68
Şekil 4.45.	1 ve 2 nolu kil için sıcaklık-ağırlık değişim grafiği.....	71
Şekil 4.46.	Sıcaklık artışı ile örneklerin renk değişimleri.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Bazı kil minerallerinin özellikleri.....	9
Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan killerin özellikleri.....	24
Çizelge 4.1.	1 Nolu kil için kompaksiyon deney sonuçları.....	36
Çizelge 4.2.	2 Nolu kil için kompaksiyon deney sonuçları.....	37
Çizelge 4.3.	Deneylerde belirlenen γ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri.....	46
Çizelge 4.4.	Kompaksiyon değişim oranları.....	49
Çizelge 4.5.	1 Nolu kil için likit limit deney sonuçları i.....	50
Çizelge 4.6.	2 Nolu kil için likit limit deney sonuçları.....	51
Çizelge 4.7.	Likit limiti ve lineer regresyon analiz sonuçları.....	61
Çizelge 4.8.	Likit limit değişim oranları.....	63
Çizelge 4.9.	Plastik limit deney sonuçları.....	64
Çizelge 4.10.	Plastik limitin değişim oranları.....	66
Çizelge 4.11.	Tane birim hacim ağırlık deney sonuçları.....	67
Çizelge 4.12.	Tane birim hacim ağırlıkların sıcaklıkla değişimi.....	69
Çizelge 4.13.	Ağırlığının sıcaklıkla değişimi.....	70
Çizelge 4.14.	Ağırlığın sıcaklıkla değişim oranları.....	71

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada; ısıtıldığında içerisindeki minerallerin özelliklerine bağlı olarak değişik sıcaklıklarda su kaybetme, yeni kristal oluşumu, faz değişimi, oksitlenme gibi farklı kimyasal reaksiyonlara uğrayarak mekaniksel ve fiziksel özelliklerini değiştiren killi zeminlerin, geoteknik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini incelenmiştir. Bu bağlamda laboratuvar ortamında, iki farklı kil numuneleri 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000°C'lerde 24 saat bekletip, tane birim hacim ağırlık, likit limit, plastik limit, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları belirlenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

Alcocer ve Chowdhury (1993), ham yağ ile killi zeminlerin termal davranışlarını inceledi. Akinmusuru (1994), Yang ve Farouk (1995) ve Ma vd. (1992) gibi diğer araştırmacılar, termal olarak işlenen zemin kalıplarının termal iletkenliğini incelemişlerdir. Bazı araştırmacılar ısı davranışları ile yararlı hale gelen zeminlerin davranışlarını araştırmak için çalışma yapmışlardır. Farag 1993'de çorak dumpslardan sızıntıyla kirlenen zeminleri işlemek için bir yöntem olarak; yakma metoduyla yok etmeyi kullanmıştır. Varlakov (1997), toprağı radyoaktif ve toksin maddelerden arıtmada (800 ve 100°C arasında) ısı davranışlarını incelemiştir.

Bir çok bilim dalında, şişme potansiyelinde azalma ve geçirgenliğin artması gibi birçok zemin özelliğini düzeltmek için zeminler stabilize edilmiştir. Killi zeminlerde çimento ve sönmüş kirecin ilavesi; killi zeminlerin yoğurabilirlik, şişme potansiyeli ve sıkıştırılabilir özelliğinde azalma, geçirgenliğinde de ise artış meydana getirmiştir. Stabilize aracı olarak bitümlü asfaltın kullanılması ise kesme kuvvetinde artış ve şişme potansiyelinde azalma meydana getirmiştir. (Holm ve Valsangler 1995)

İstanbul ve çevresinde, temel zemini olarak kullanılan, atmosfer ve su etkisiyle kolay ayrışabilen, çatlaklı grovak ve killi şistlerde; jeolojik ve fiziksel özelliklerin bulunması, arazi ve laboratuarda geliştirilen yeni bir deney düzeneği yapmıştır (Ülker 1966). Bu düzende; gerilme-deformasyon bağıntılarının araştırılması ve çeşitli durumlarda süreksizlik düzlemlerindeki sürtünme kuvvetlerini etkileyen parametrelerin tayini yapılmıştır.

Zeminlerin tanınması için kullanılan birtakım tarifler ve deneyler verilmiş daha sonra da bu deneylerin sonuçlarının mühendislik açısından değerlendirilmesi ve zeminlerin değişik şartlardaki davranışları anlatılmıştır (Tuğlu vd. 1975).

Joshi vd.(1994) tarafından yapılan çalışmada, kil kalıpları üzerine 300°C den 700°C ye kadar ısı vererek, killi zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine ısıнын etkisi araştırılmıştır. Termik işlemin killi zeminlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirmesinden, diğer zemin iyileştirme metotlarına göre daha çabuk ve iyi sonuç verdiğinden ve termik bir şekilde işlem görmüş zeminlerin ilkel zamanlardan beri inşaat alanlarında kullanılmasından yola çıkılarak yapılan çalışmada; Georgia Arıkil Şirketinden ve tabak endüstrisinden elde edilen altı farklı arı kil, bentonit ve kil karışımları örnekleri 300°C'den 700°C ye kadar termik işleme tabi tutularak; kuvvet (MPa), ağırlık yüzdesi (%), boşluk oranı, thermogravimetrik analiz, genelleştirilmiş zemin parametreleri için araştırmalar yapılmıştır. Kil kalıplarının gücünün sıcaklıkla dereceli olarak arttığını göstermiş, 700°C ısıнын killi toprağın mikro yapısında fiziksel ve kimyasal değişikliklere yol açtığını ve killi zeminlere yapılan termal işlemin değiştirilebilir ve sıkıştırılabilir katyonda azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur.

Majed vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada ise laboratuvar şartları altında, kuzey Ürdün'den alınan üç killi zemin numunesinin üzerinde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Killer 100, 200, 300 ve 400°C gibi dört farklı sıcaklık derecelerinde ısıtılmıştır. Farklı zemin örnekleri ile; Atterberg limitleri, tane büyüklüğü dağılımı, optimum su muhtevası, maksimum kuru yoğunluk, pişme potansiyeli ve serbest basınç mukavemetinin sıcaklıkla değişimi incelenmiştir. 400°C sıcaklıkta plastik limitin sıfır

olduğu belirlenmiştir. Likit limit ve optimum su muhtevası bu sıcaklığa kadar hızla azalırken, maksimum kuru birim hacim ağırlık artmaktadır.

Konya II. Organize Sanayi bölgesinde oldukça geniş bir alanda bulunan yüksek plastisiteli ve şişme özelliği gösteren kil zeminlerin indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapılan çalışmada kilin şişme davranışı incelenmiştir (Acar vd. 2001). Arazide 5m derinlikten örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmış ve bu numuneler üzerinde laboratuarda yapılan deneylerle doğal birim hacim ağırlık, tane birim hacim ağırlık, su muhtevası, zemin sınıflandırması için granulometri eğrisi, plastiklik özelliğinin belirlenmesi için Atterberg limitleri, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın belirlenmesi için Standart Proctor deneyleri yapılmıştır.

Tane çapı aralığı 0,06–0,5 mm olan kum, kuru kum ağırlığının değişik oranlarında (%5, 10, 15, 20, 30, 40) bentonit ile karıştırılarak hazırlanan stabilizasyon malzemesinin bazı fiziksel ve mekaniksel özellikleri incelenmiş, bu amaçla hazırlanan karışım malzemeleri ile kompaksiyon, serbest basınç, ve likit limit deneyleri yapılarak, bentonit oranının bu özelliklere etkisi araştırılmıştır (Karabüyük 2001).

0.06-0.5 mm tane çapı aralığına sahip kum, değişik oranlardaki bentonit, kil, uçucu kül ve silis dumanı ile stabilize edilerek, kayma mukavemeti parametrelerinin, geçirimsizlik katsayılarının ve kompaksiyon parametrelerinin değişimleri incelenmiştir(Esengün 2001). Kompaksiyon deneyleri sonucu karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevaları (ω_{opt}) tespit edilmiştir. Çalışmada, aynı örnekler için optimum su muhtevalarında, 24 saat ve 72 saat bekletilerek kesme kutusu deneyleri yapıp kayma mukavemeti parametreleri ve değişimleri incelenerek optimum karışım oranları Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir.Deney programı Taguchi Deney Tasarımı' na göre yapılmış olup; bentonit, kil, silis dumanı ve uçucu kül faktör ve her faktör de üç seviyeli olarak seçilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Killi Zeminler ve Mineralojik Yapısı

Killer hem tane boyutu hem de mineralojik yapısı nedeniyle çok karmaşık bir yapıya sahip zeminlerdir. Bu karakteristiklerinden dolayı da farklı ortamlarda farklı özellikler gösterirler. Killerin iyi tanımlanması için kil ve kil minerallerinin oluşumunun ve özelliklerinin incelenmesi gereklidir.

2.1.1. Killerin oluşumu

Zeminler; kayaçların çeşitli çevre koşulları etkisi altında veya kimyasal yollarla (kimyasal ayrışma, çatlaklardaki suyun donması, buzullar, bakteriler, bitki kökleri, yağmur ve yer altı suları, akarsu sürüklemesi ve dalgaların etkisi vb.) parçalanması sonucunda taşınarak veya yerinde oluşurlar (Uzuner 2001). Zeminler hem taşıyıcı hem de yapı malzemesi olarak kullanıldıklarından zemin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bunun için zeminler benzer özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Genel olarak zeminler tane büyüklüğüne göre iki gruba ayrılırlar. Bunlar;

1. Kohezyonsuz zeminler (İri taneli zeminler): Çakıl, Kum
 2. Kohezyonlu zeminler (İnce taneli zeminler): Silt, Kil
- şeklinde tane boyutuna göre gruplandırılırlar. (Uzuner 2001).

Diğer zemin türleri gibi killerin oluşumunda da ortam önemli rol oynar. Şöyle ki, aynı minerallerin deniz veya gölde çökmesi sonucu oluşan iki kilin mühendislik özellikleri şaşırtıcı ölçüde farklı olmaktadır. Aynı kil değişik gerilmeler aldığı anda da farklı davranışlar gösterebilmektedir.

Yerinde oluşan killer tropik iklim koşullarında özellikle kor kayaçların ayrışması ile oluşurlar. Ilıman iklimlerde rezidüel killer daha çok kil kökenli kayaçların ayrışması ile meydana gelir. Genç vadi yamaçlarındaki sağlam kayaçların ayrışması sert killeri oluşturmaktadır. Ancak bir heyelan sonucu su ile de karıştırıldığında hızla yumuşama olmaktadır. Volkanik küllerin su alarak ayrışması ve kuruması sonucu oluşan tüfler plastik killerin kökenidir.

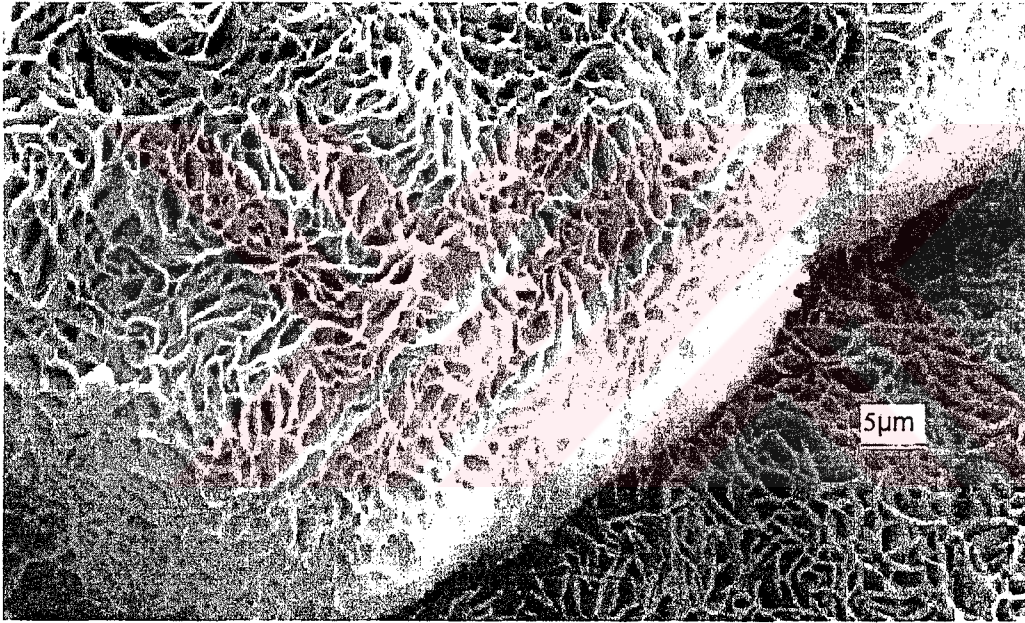
Taşındıktan sonra tatlı ya da tuzlu suda çökelerek oluşan killere tortul adı verilebilir. Bazı durumda tuzlu suda çökeldikten sonra arazi yükselmesi ile yağmurun yıkamasına maruz kalan killer mekanik dirençlerini büyük ölçüde yitirerek hassaslaşmaktadır. Bu tür kiler suda biriktiğinden dolayı oldukça yumuşaktır. Ancak jeolojik olaylar sonucu üzerine yük geldiğinde sıkışarak sertleşmektedirler. Bu tür kile aşırı konsolide olmuş ya da önceden yüklenmiş killer denir ve içerisindeki kil mineralleri oranının fazlalığı oranında yapısında mikro ve makro çatlaklar bulunur (Önalp 1982).

İçinde silt bulunan önceden yüklenmiş killerde çatlaklar çok daha azdır. Bu türün tipik örneklerinden biri de “varlı” kildir. Çökelpenin mevsimsel etkenlerle farklılaştığı ortamda 3mm kadar farklı renk ve tane iriliğinde tabakalar oluşturmasıyla belirir.

Buzul çağı Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika’nın önemli bir bölümünde zeminlerin oluşmasında etkin olmuştur. Buzulların ilerlemesi ve gerilemesi sırasında değişik koşullarda oluşan killer diğer türlere göre önemli farklılıklar göstermişlerdir. Bunların en tipik örneği çakıl kilidir. Çok yumuşak kil matrisi için 75mm ye varan büyüklükte çakıllar içeren bu tür killer sert kil olarak sınıflandırılır. Buzul göllerinde oluşan varlı killer ise genellikle ince kum içerirler. Buzulun erimeden önce biriktirdiği kil ise “Till” kili türüdür. Türkiye’de buzulların etkin olduğu bölgeler çok kısıtlı olduğundan buzul kökenli killer önem taşımazlar. (Önalp 1997)

2.1.2. Kil minerallerinin tanımlanması

Kristal yapıları gözle ya da olağan laboratuvar mikroskopları ile görülmeyen kil minerallerinin tanımlanması x-ışınları, diferansiyel ısı analiz, elektron saçımı, elektron mikroskobu ve kızılötesi ışınları emme yöntemlerinden biri ile yapılabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bunlardan sadece x-ışınları ve diferansiyel termik analiz yöntemleri yaygındır. Nevada 'da Smectite kil numunesinin minerallerinin elektron mikroskobu ile görüntüsü şekil 2.1 de verilmiştir.



(Smectite, Yucca Mointain, Nevada)

Şekil.2.1. Kil minerallerinin elektron mikroskobu ile görüntüsü (Anonymous 2002)

Zemin vb. malzemeler ısıtıldığında içindeki minerallerin özelliklerine bağlı olarak değişik sıcaklıklarda türlü kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyonlar su kaybetme, yeni kristal oluşumu, faz değişimi ve oksitlenmedir.

Hidratlanma suyu (adsorbe su) 100-300°C arasında buharlaşır, sıcaklık düştüğünde kil yüzeyine yeniden birikir. Kristal kafesindeki OH iyonu halindeki suyun çıkması endotermik (ısı emen veya alan) bir reaksiyon olup kil minerallerinin tanımlamasında önemli bir göstergedir. Kristal kafesindeki suyun çıkması mineral yapısını tümüyle değiştirmektedir. Malzeme biraz daha ısıtılırsa yeni kristal oluşumu ekzotermik (dışarı

ısı veren) bir reaksiyonla belirlenmektedir. Bazı kristal yapıları belirli bir sıcaklıkta şekil değiştirmektedirler. Örneğin, kuvars ısı diyagramında 573°C de α dan β formuna belirgin bir endotermik çökme vererek dönüşmektedir. Oksitlenme, ekzotermik reaksiyon olarak organik maddelerin yanması veya demirin Fe^{++} dan Fe^{+++} dönüşmesi ile 250-450°C arasında izlenmektedir.

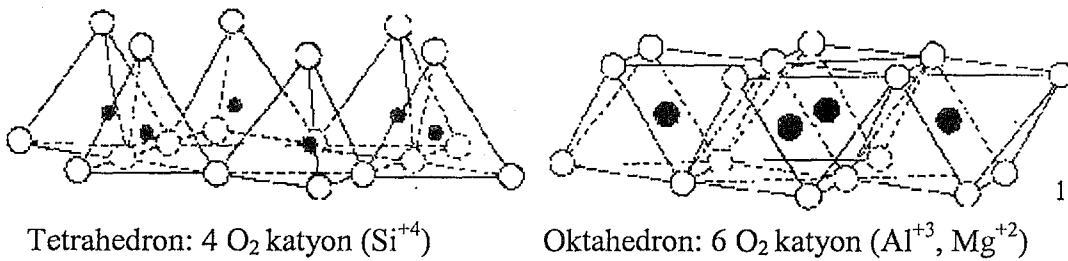
Diferansiyel ısı analiz (DTA), zeminin oda sıcaklığında 1100°C nin üzerinde yaklaşık 10°C/dak hızla ısıtılması sırasında numunenin gösterdiği tepkime özelliklerinden faydalanılarak minerali tanımlayan bir deneydir. Bu deney, laboratuarda nikel bir bloğun içine koyularak ısıtılan örneğin gösterdiği endotermik ve ekzotermik reaksiyonların yansız (inert) malzemeyle kıyaslayarak ölçülmesi ile yapılır. Nikel bloğun bir deliğine 0,5-1 gr kadar incelenecek örnek, diğerine referans malzemesi (alumina) doldurulur ve içlerine termokup yerleştirilir. Isıtma sırasında örneğin sıcaklığı elektronik kaydediciye referans malzemesinin sıcaklığıyla otomatik olarak karşılaştırılarak çizilir. Bulunan eğri eldeki standart eğrilerle karşılaştırılarak mineral tanımlanır. (Önalp 1982)

2.1.3. Kil minerallerinin özellikleri

Kil mineralleri yapısı oldukça karmaşık hidratlanmış alüminyum silikat kristalleridir [$Al_xSi_yO_w(OH)$]. Bu kristallerin yapısına göre üç ana gruba ayrılabilir ve bu gruplarda içerilen türlü killerin kabaca aynı mühendislik özellikleri gösterecekleri söylenebilir. Killerin diğer zemin minarelerine oranla çok farklı özellikler göstermeleri büyük ölçüde tanelerin çok ufak olmalarından kaynaklanmaktadır. Bir mikrondan (10^{-3} mm) küçük kristallerde kenarlardaki molekül sayısı toplam molekül sayısına oranla fazla olduğundan kum ve silt tanelerinde hakim olan yer çekiminin aksine, yüzey kuvvetleri önem kazanır. Ancak tanelerin küçük olması her minarelin kil özelliklerini göstereceği anlamına gelmez. Örneğin, öğütülerek 2 μ luk un haline getirilmiş granit, bazalt su ile karıştırıldığında çamur elde edilmektedir. Dolayısıyla fiziksel özelliklerde kil için öngörülen 2 μ luk üst limit, tarif için konulmuş olup muhakkak kil minerallerinin varlığını belirtmeyebilirler (Genç 1987).

Birbirinden çok farklı iki doğal ortam kil minerallerinin oluşmasını sağlar. Birinci ortam yüzeye yakın, ayrışma ve yıpranmanın etkin olduğu bölgedir. Burada atmosfer basıncı ve normal sıcaklıklar sürdüğünde su genellikle sıvı fazdadır. Bundan çok farklı ikinci ortam ise derinlerde hidrotermal koşulların sürmesi durumudur. Su büyük basınç altında ve buhar olarak bulunmaktadır. Birinci ortamda kilin oluşumu eriyiklerden kristalleşme, kayaçtaki silikat minerallerinin ayrışması, iyon değişimi ve yeniden sertleşme mekanizmaları ile tamamlanır. Hidrotermal ortamda kil oluşumu yukarıdaki koşullara oranla daha azdır.

Kil minerali yapısında iki ana yapı bloğu vardır. Silis tetrahedronunda bir silisyum iyonu dört oksijen atomu ile şekil 2.2 de gösterildiği gibi birleşmiştir. İkinci elemenda alüminyum veya magnezyum iyonu altı hidroksil iyonu ile bağlı olup sekiz yüzlü oktahedron oluşturmuştur. Alüminyum oktahedronlarının oluşturduğu tabakalara “gibsit”, magnezyum oktahedronu oluşturduğu tabakalara ise “brusit” denir. Tetrahedronların oluşturduğu tabakaların kalınlığı $4,63^{\circ}\text{A}$, oktahedronlar ise $5,05^{\circ}\text{A}$ olarak ölçülmüştür.



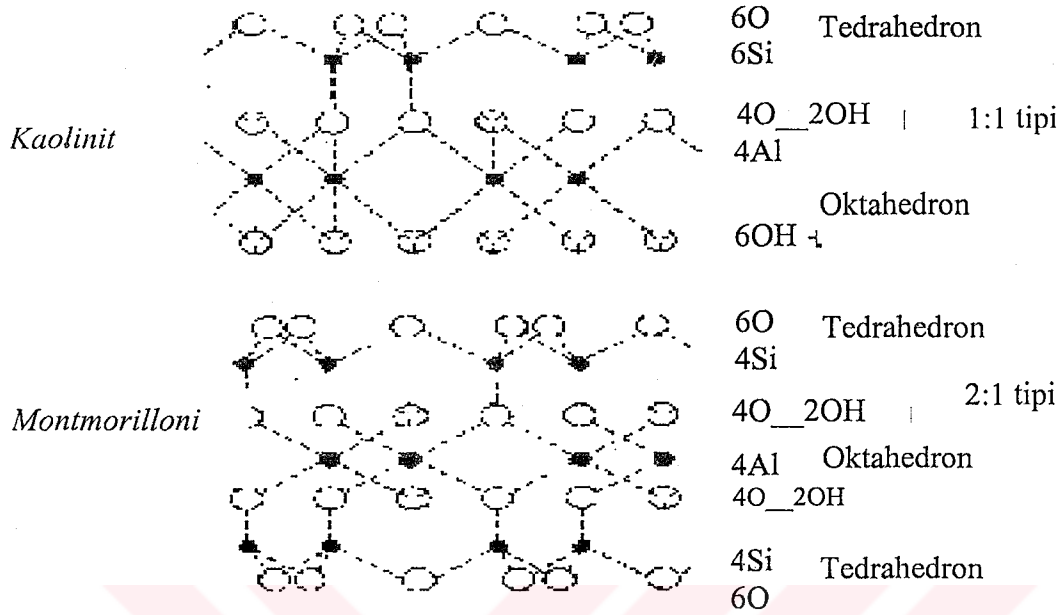
Şekil 2.2. Kil kristalleri yapısı (Grim 1959)

Kil minerallerinin ayrımında; tabaka kalınlığı, tabakanın iyonik özelliği ve tabakaların üst üste diziliş düzeni kriterleri gözetilir.

Doğada en çok görülen kil mineralleri 1:1 tipindeki kaolinitler ve halloysit; 2:1 tipindeki montmorillonitler, illit ve vermikülitler'dir (Şekil 2.3). Esasen diğer gruplar da bu minarellerle benzer özellikler vermektedirler. Değişiklik mineral yapısındaki iyon türü ve aradaki su moleküllerinden ileri gelmektedir. Çizelge 2.1 de çokça karşılaşılan ve özellikleri birbirinden çok farklı olan dört ana kil türünün ayrıntıları özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri (Önalp, 1982)

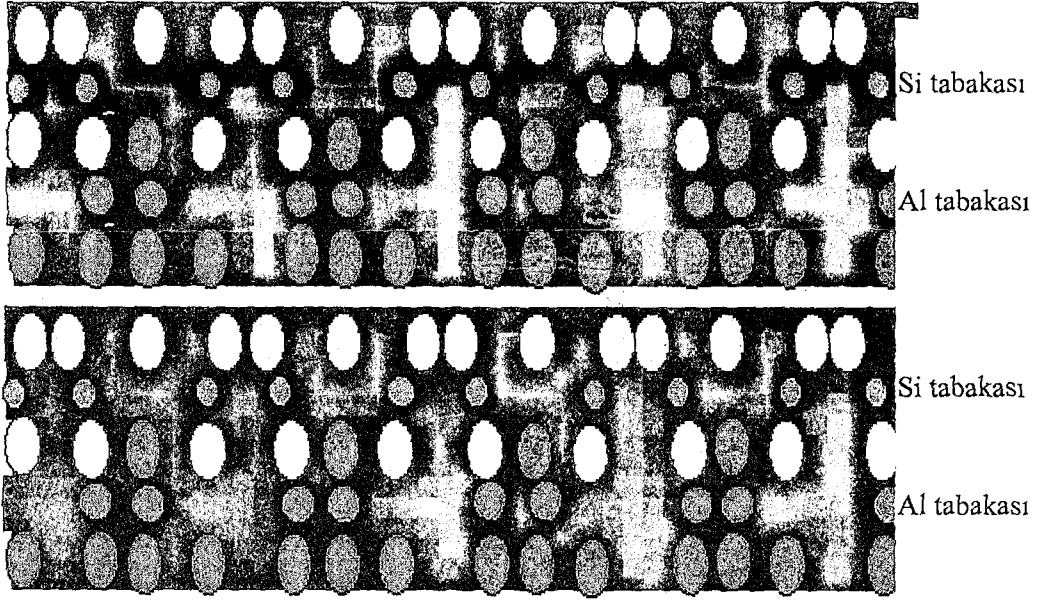
	<i>Montmorilloni</i> <i>t</i>	<i>İllit</i>	<i>Kaolinit</i>
Tane Büyüklüğü	10 A-1	0.1-2	0.1-5
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	Altı köşeli pul
Özgül yüzeyi (m ² /g)	50-800	65-100	10-20
Tane Kalınlığı	10A	30A	0.05-2
Likit Limit	110-710	60-120	30-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Şişme-Büzülme Yeteneği	Yüksek	Orta	Düşük
Özgül Ağırlık	2.35-2.70	2.60-3.00	2.60-2.95



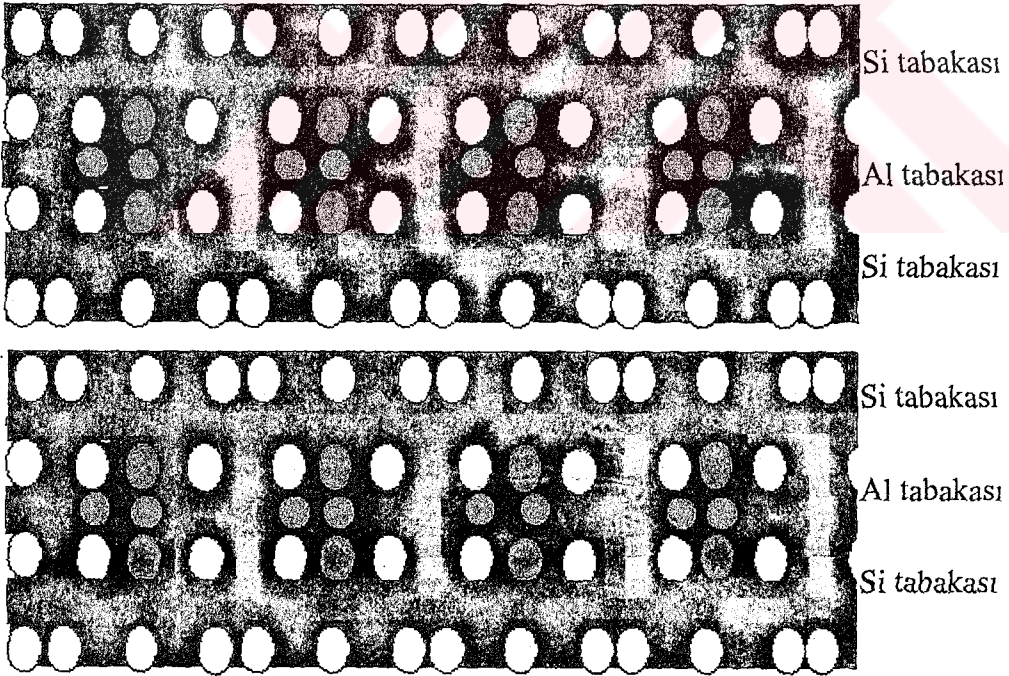
Şekil 2.3. Montmorillonit ve kaolinit kil minerallerinin yapısı (Önalp 1997)

Yapısal formülü $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ olarak verilen Kaolinit kilde, bloklar birbiri üzerine binmiş olup, aradaki hidrojen bağları ve aktif Van der Waals kuvvetleri suyun buraya girip şişme oluşturmamasını önlemektedir (Şekil 2.4.a). Bu nedenle kaolinler su ile karıştıklarında stabilizelerini kaybetmezler. Seramik yapımında kullanılmalarının sebebi de budur. Aynı tipten halloysit, kaolinit alt grubunun ilginç bir örneğidir. İki tür vardır, biri kaoline çok benzer, diğeri hidratlı olup $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ formülündedir. Mikroskop altında içi boş çubuk görünümündedir.

Yapısal formülü $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ olarak verilen montmorillonit kilde, oktahedral tabaka iki silis tabaka arasına sıkışmıştır. Tedrahedronların uçları kristal biriminin ortasına dönüktür. Tabakalar arası bağ, Van der Waals ve katyonlarla sağlandığından çok zayıftır. Su ve polar sıvılar araya girerek bunların ayrılmasına sebep olurlar. Montmorillonitler 20 kata kadar suyu tabaka aralarına alabilmektedir. Kaolinitler ve montmorillonitlerin yapısı şekil 2.4.b de basitçe gösterilmektedir (Das 1997).



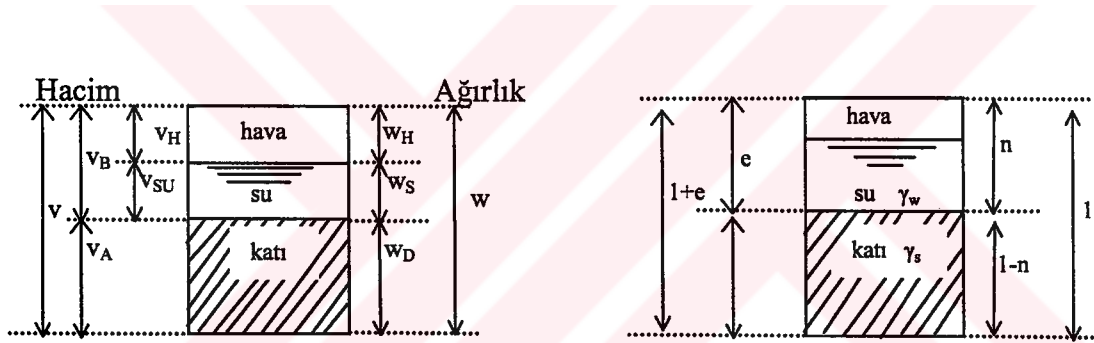
Şekil 2.4.a. Kaolinite kilinin yapısı (Anonymous 2002)



Şekil 2.4.b. Montmorillonit kilinin yapısı(Anonymous 2002)

2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Temel Özellikler

Bir zemin kütesinde belirli bir hacimdeki katı taneler ile bu taneler arasındaki boşluklarda bulunan su ve havanın ağırlık ve hacimler arasındaki bağıntılar, zeminlerin laboratuvar deneyleri ile fiziksel özelliklerinin tayin edilmesinde kullanılan ana bağıntılardır. Bu bağıntıların belirlenebilmesi için şekil 2.5.a-b de gösterilen zemin modellerinin kullanılması büyük kolaylık sağlar. Bu modellerde zemin kütesi içindeki katı tanelerin, suyun ve havanın ayrı ayrı hacimlerde toplandığı düşünülür. Modelin taban alanı birim kabul edildiği için yükseklikler doğrudan doğruya hacmi verir. Ayrıca şekil 2.5.a.'nın sağ tarafında tane, su ve hava ağırlık cinsinden gösterilmiştir (Özaydın 1997).



Şekil 2.5. Zeminlerde hacim-ağırlık bağıntıları (Özaydın 1997)

V_H : Havanın hacmi

V_{SU} : Suyun hacmi

V_D : Tane hacmi

V_B : Boşluk hacmi

V : Toplam hacmi

γ_s : tanelerin birim hacim ağırlığı

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı

W_H : Hava ağırlığı

W_{SU} : Su ağırlığı

W_D : Tane ağırlığı

W : Toplam ağırlık

e : Boşluk oranı

n : Porozite

Buna göre ana tariflere ait aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

Boşluk oranı (e); Belirli bir hacimdeki zemin kütlesinde boşluk hacminin tane hacmine oranıdır.

$$e = \frac{V_B}{V_D} \quad (2.1)$$

Porozite (n); Belirli bir hacimdeki zemin kütlesinde boşluk hacminin bütün hacme oranıdır.

$$n = \frac{V_B}{V} \quad (2.2)$$

Bu iki zemin özelliği şekil 2.5.b de aynı model üzerinde gösterilmiştir. Tariflere uygun olarak (e) nin gösterildiği tarafta tane hacmi birim kabul edilmiş, (n) nin gösterildiği tarafta ise toplam hacim birim olarak alınmıştır. Şekil 2.5.b. den de görüleceği gibi orantıdan, porozite;

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (2.3)$$

olarak bulunur.

Su muhtevası (ω); Belirli bir hacimdeki zemin kütlesindeki su ağırlığının tane ağırlığına oranıdır ve yüzde olarak belirlenir.

$$\omega = \frac{W_{SU}}{W_{TANE}} \quad (2.4)$$

Tane özgül ağırlık (γ_s); Belirli bir hacimdeki zemin kütleindeki tanelerin birim hacminin +4°C deki saf suyun birim ağırlığına oranıdır.

$$\gamma_s = \frac{V_{TANE}}{W_{su}} \quad (2.5)$$

Doygunluk derecesi (S_r); Belirli bir hacimdeki zemin kütleinin boşluklarında bulunan suyun hacminin boşluk hacmine oranıdır.

$$S_r = \frac{V_{SU}}{V_B} \quad (2.6)$$

Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi tamamen suya doymun bir zeminde $S_r = 100$, kuru bir zeminde $S_r = 0$ dır.

Doygunluk derecesine ait tariften giderek daha pratik bir formül elde etmek mümkündür. Şekil 2.5.b. de tane hacmi birim alındığı için bütün hacim $(1 + e)$ dır. Birim hacimde;

$$W_D = \frac{\gamma_s}{1 + e} \quad (2.7)$$

bulunur. Buna göre ;

$$V_{SU} = \frac{\omega \gamma_s}{1 + e} \quad (2.8)$$

$$W_{SU} = \frac{\omega \gamma_s}{(1 + e) \gamma_w} \quad (2.9)$$

$$V_B = \frac{e}{1 + e} \quad (2.10)$$

olduğundan,

$$S_r = \frac{\omega \gamma_s}{e \gamma_w} \quad (2.11)$$

bağıntısı elde edilir.

Doğal birim hacim ağırlık (γ_n); zeminin tamamen doğal haldeki birim hacminin ağırlığıdır. Şekil 2.5.b den

$$\gamma_n = (1 - n) \gamma_s + \omega \gamma_w \quad (2.12)$$

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s + S_r e \gamma_w}{1 + e} = (1 + e)(1 + \omega) \gamma_s \quad (2.13)$$

bulunur.

Kuru birim hacim ağırlık (γ_k); zeminin tamamen kuru olması, yani boşluklarda hiç su bulunmaması halinde birim hacim ağırlıktır.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1 + e} = (1 - n) \gamma_s = \frac{W_D}{V} = \frac{W_D}{W / \gamma_n} = \frac{\gamma_n}{(1 + \omega)} \quad (2.14)$$

Doygun birim hacim ağırlık (γ_d); Zeminin boşluklarının tamamen su ile dolu olması halindeki birim hacim ağırlıktır.

$$\gamma_d = (1 - n) \gamma_s + n \gamma_w \quad (2.15)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s + e}{1 + e} \quad (2.16)$$

Zeminin su altındaki birim hacim ağırlığı (γ_A); zeminin doygun birim hacim ağırlığından, birim hacimdeki su ağırlığının çıkarılmasına eşittir.

$$\gamma_A = \gamma_d - \gamma_w \quad (2.17)$$

2.3. Zeminlerin Kompaksiyonu

Kompaksiyon, zemin tanelerinin çeşitli yöntemlerle, (tabaka serilerek silindirlenme vibrasyon) birbirine yaklaştırılması ve aralarındaki hava boşluklarının azaltılması sonucu daha sıkı bir yerleşime sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemlere verilen addır. Zeminin sıkıştırılması sonucu birim hacim ağırlık artmakta ve buna bağlı olarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Tanelerin birbirine yaklaşabilmesi ve sıkılaşmanın sağlanabilmesi, ancak uygulanan statik ve dinamik yükler altında birbirlerine göre hareket edebilmeleri ile sağlanabilir. Tanelerin birbirine göre hareket edebilme yetenekleri ise, uygulanan yüklerin şiddetinin (kompaksiyon enerjisi) yanında zemin içerisindeki su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Zemin içindeki su miktarının kompaksiyon üzerinde iki değişik etkisi söz konusudur. Su miktarı zeminin doygunluk derecesinin tanelerin birbirine yaklaşmasına engel olacak derecede yüksek olmasına yol açacak mertebede ise kompaksiyonun sağlanması güçleşir yani zeminin su muhtevası yükseldikçe, boşluklardaki havanın bir kısmı hapsedilmekte ve dışarı çıkmamaktadır. Böylece sıkışan hava hacimlerinde basınç artışları meydana gelmekte ve kompaksiyon zorlaşmaktadır. Zeminin tamamen suya doygun olması yani bütün boşlukların suyla dolu olması durumunda ise kompaksiyon mümkün değildir. Çünkü bu durumda uygulanan yükler altında boşluk suyunda basınç artışları meydana gelecek ve bu hidrostatik basınç, tanelerin birbirine yaklaşmasına karşı koyacaktır. (Önalp 1997)

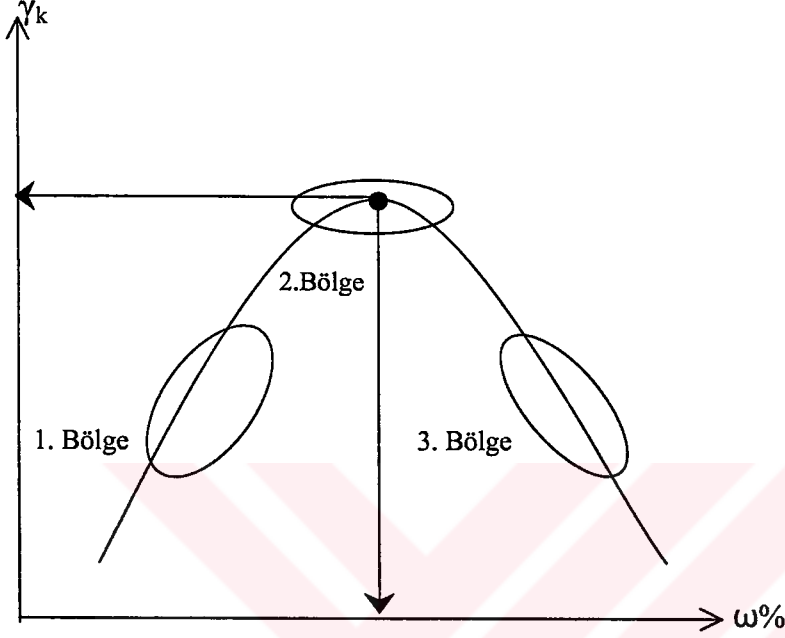
Diğer taraftan zemin içindeki su miktarı aynı zamanda tanelerin birbirine göre hareket edebilmelerini de etkilemektedir. Zemin içerisinde yeterli su bulunduğu zaman (yüksek su muhtevalarında) tanelerin arasındaki sürtünme azalmakta (yağlama etkisi) aynı

zamanda kapiler gerilmeler de azalmakta ve taneler arası elektriksel itki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Zemin içerisinde yeterli su bulunmadığı zaman ise (düşük su muhtevalarında) taneler arası sürtünme ve kapiler gerilmeler artmakta elektriksel kuvvetlerin net etkisi ise çekim kuvvetine dönüşmektedir. Görüldüğü gibi zemin içerisindeki su miktarının kompaksiyon üzerindeki iki etkisi birbirleriyle çelişkilidir. Şöyle ki, su miktarı arttıkça tanelerin birbirine göre hareketi kolaylaşmakta buna karşılık birbirine yaklaşması zorlaşmaktadır. Buna göre her iki etkinin bir arada düşünülmesi ile, en iyi sıkışmanın ancak zemin içinde yeterli miktarda (optimum) su bulunması (ne çok az, ne de çok fazla) durumunda sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır. Zeminin en iyi ve en kolay sıkışabileceği su muhtevasına “optimum su muhtevası” adı verilmektedir. Optimum su muhtevası değişik zeminler için birbirinden farklı olduğu gibi, aynı zemin için kompaksiyon enerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sıkışmanın sağlanabilmesi için gerekli olan tanelerin birbirine göre hareket edebilmesi ve birbirine yaklaşabilmesi, zemin içindeki su miktarı yanında uygulanan statik veya dinamik yüklerin türüne ve şiddetine bağlıdır. Dolayısıyla optimum su muhtevası zeminin endeks özellikleri (örneğin tane birim hacim ağırlığı, likit limit, plastik limit) gibi değişmez bir özelliği değildir. Sadece belli bir kompaksiyon enerjisi altında zeminin sıkışmasının en iyi ve en kolay sağlanabileceği su muhtevasını göstermektedir. Belirli şartlar altında deneysel olarak bulunması gerekir.

Yukarıda verilen su muhtevasının kompaksiyon üzerindeki etkisi kohezyonlu yani siltli ve killi zeminlerde çok açık olarak görülmektedir. Kohezyonsuz yani temiz kum ve çakıllı zeminlerde ise zemin içerisindeki boşluklarda basınç artışlarının meydana gelmemesinden, taneler arası sürtünmenin az olmasından ve taneler arası elektriksel kuvvetlerin, yerçekimi kuvvetlerine göre ihmal edilebilir seviyede olmasından dolayı daha az etkilenmektedir. Ayrıca kuru ve suya doymun durumlarda kapiler gerilmeler olmaması nedeniyle ince kumlarda kompaksiyon nemli durumda, tamamen kuru veya tamamen suya doymun duruma göre daha zor olmaktadır (Capper and Cassie, 1984).

Öyleyse grafik üzerinde kısaca şöyle açıklayabiliriz. Bir zemin, sabit bir kompaksiyon enerjisi ile değişik su muhtevalarında sıkıştırıldığında; Şekil 2.6 da görüleceği üzere

artan su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığı önce artmakta, maksimum bir değere ulaşmakta, sonra da azalmaktadır.



Şekil 2.6. Artan su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi (Uzener 1998)

1. Bölgede: Zeminde yeterli miktarda su bulunmadığı için, tanelerin daha az boşluklu yerleşmek üzere hareket etmeleri, taneler arası sürtünme kuvvetlerinden dolayı zordur.
2. Bölgede: Sıkışma en yüksek değerine ulaşmakta, kuru birim hacim ağırlık maksimum değere ulaşmaktadır.
3. Bölgede: Zeminde fazla su bulunduğundan ve suyun da pratik olarak sıkışmaz olmasından dolayı, yine zeminin boşluk hacmi fazla azaltılmamaktadır. Yani su muhtevası artarken, kuru birim hacim ağırlık azalmaktadır.

Bir zemin için uygulanacak belli bir kompaksiyon enerjisi ile elde edilecek sıklık derecesinin su muhtevasına bağlı olarak değişimi, dolguda kullanılacak zemin için deneysel olarak saptanmalıdır. Bu konuda yapılmış olan ilk bilimsel çalışmalar arasında önemli olan, Proctor (1933) tarafından çalışmadır. Proctor günümüzde birçok ülke ve

kuruluş tarafından standart deney olarak kabul edilen laboratuvar deneyini gerçekleştirmiştir.

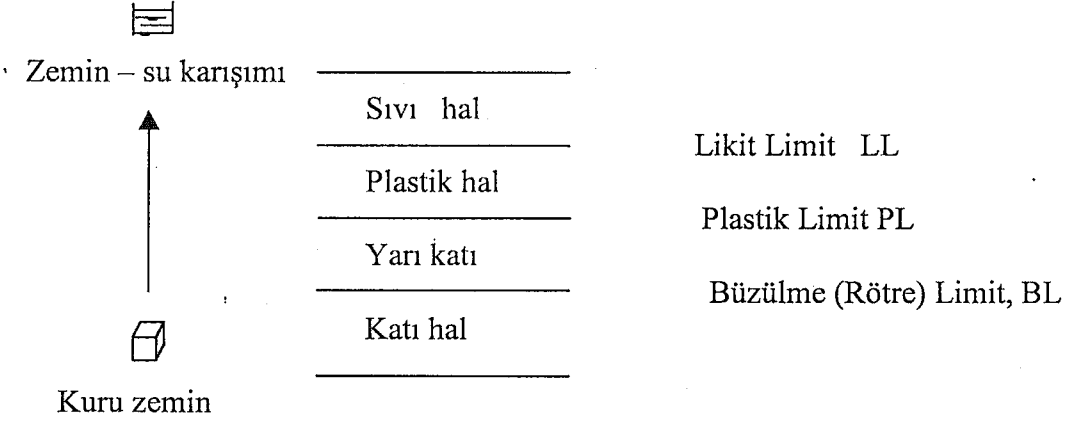
2.4. Zeminlerin Kıvam Durumları

Herhangi bir su muhtevastaki zeminin fiziksel davranışına kıvam denir. Başka bir deyişle zeminin akmaya karşı olan direncidir. Bu yüzden kıvam, zaman-deformasyon davranışının bir göstergesidir. Kıvam; taneler arasındaki çekme kuvvetine bağlıdır. Farklı zeminler, farklı su muhtevastında farklı kıvamlar gösterirler.

İnce taneli zeminlerin kıvamı değiştikçe, zeminin kayma mukavemeti ve taşıma gücü gibi mühendislik özellikleri de değişir. Bundan dolayı mühendislik açısından ince taneli zeminlerin yapısal sınıflandırması yetersiz kalır. Bu yüzden ince taneli zeminlerin hangi kıvamda bulunduğunun da açıklanması gereklidir.

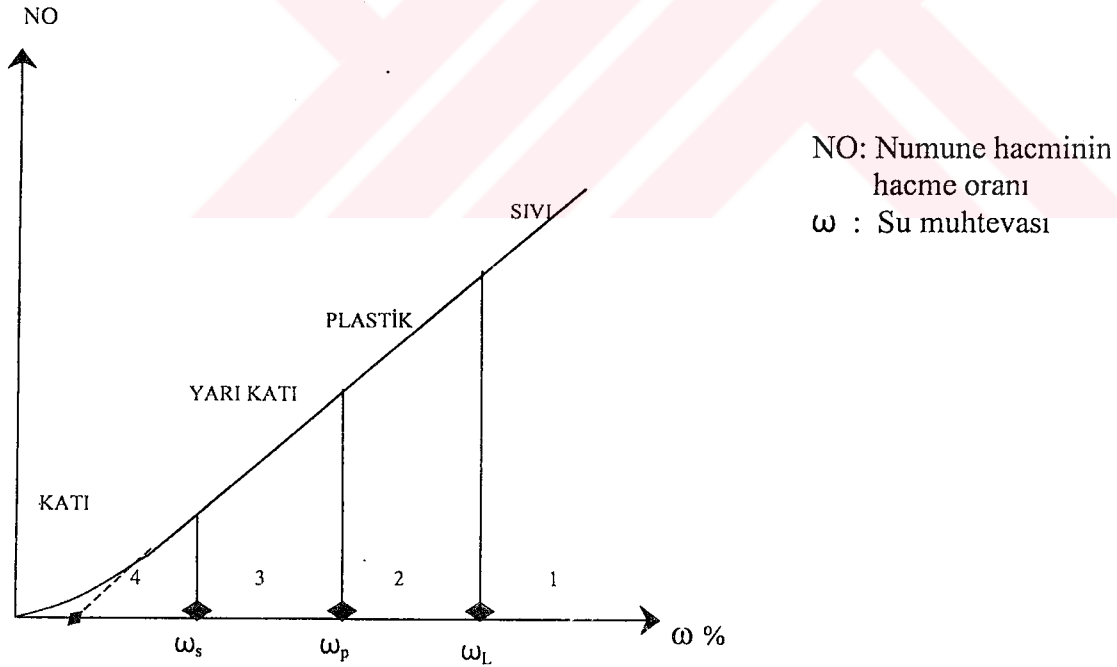
Kıvam, doygunluk derecesi ve su muhtevası ile değiştiği için, genel olarak su muhtevastını kıvamın bir göstergesi olarak almak mümkündür. Bununla beraber, aynı su muhtevastında bazı killer çok yumuşak olduğu halde diğerleri çok sert olabilir. Ayrıca su muhtevastındaki ufak bir değişiklik bazı killeri çok az etkilediği halde, bazılarını sıvı halden katı hale değiştirebilir. Bundan dolayı su muhtevası yalnız başına, zemin mühendisliği açısından kıvamı tam olarak ifade etmez.

Bir zemin numunesinin kıvamını elle hissetmek mümkündür fakat laboratuvar deneyleri ve sınıflandırma yapılmaksızın kesin bir değer verilemez. Kişisel etkenleri ortadan kaldırmak ve ince tane zeminlerde belirli bir sınıflandırma yapabilmek için 1911 yılında, Atterberg (1911) tarafından dört kıvam durumu tespit edilmiştir. Şekil 2.7 de görüldüğü gibi bunlar, sıvı, plastik, yarı katı ve katı haldir. Bu kıvam durumlarını birbirinden ayıran limitlere likit limit, plastik limit ve büzülme limiti denir.



Şekil 2.7. Zeminin kıvam durumları

Ayrıca ince taneli zeminlerde su muhtevası ile toplam hacmin kuru hacme oranı arasındaki genelleştirilmiş bağıntı şekil 2.8 de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Başlangıçta kuru olan bir kilin doygun hale gelirken geçirmiş olduğu kıvam durumları

Sırası ile 1, 2, 3 numaralı noktalar likit limit, plastik limit ve Rötre limitini göstermektedir. Burada su muhtevası-hacim değişimi vasıtasıyla sadece Rötre limiti kesin olarak tarif edilebilir. Rötre limiti, hacim değişiminin, su muhtevasının değişimi

ile doğru orantılı olmaktan saptığı noktadaki su muhtevasıdır. Sıvı haldeki bir ince taneli zeminin su kaybetmesine müsaade edilirse, zemin, şekil 2.7 ve 2.8 deki kıvamlılık durumlarından geçecektir. Şekil 2.8 deki değişim büzülme limitine ulaşınca kadar lineerdir. Bu noktadan sonra, eğrinin doğru kısmının uzantısı, su muhtevası eksenini 4 numaralı noktada keser, bu nokta zeminin toplam büzülmesini gösterir.(Attarberg 1911).

Likit Limit (ω_L); Plastik ve likit durumları birbirinden ayıran sınır su muhtevasıdır. Zeminin kendi ağırlığında akabildiği, plastiklik davranışının sona erdiği en düşük su muhtevasıdır.

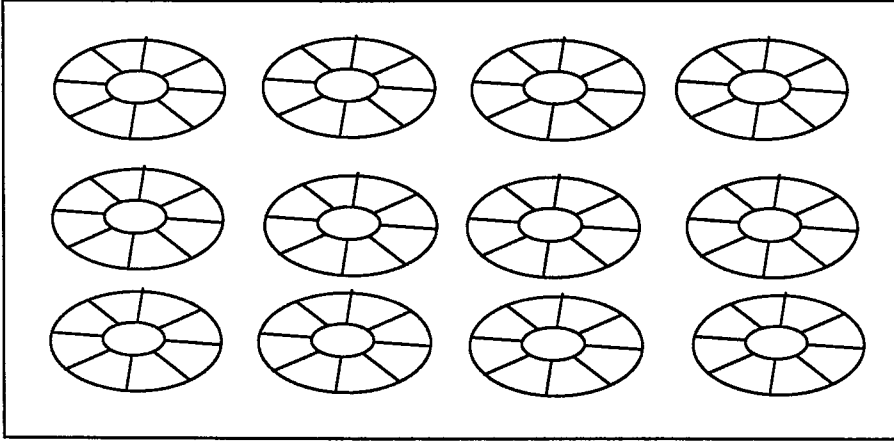
Plastik Limit (ω_P); ince taneli bir zemine, kırılmalara yol açmadan, yoğrularak istenilen şekil verilebiliyorsa o zeminin plastik bir kıvamda olduğu kabul edilmektedir. Zeminin plastik özelliğini koruduğu en düşük su muhtevası ise, plastik limit olarak tanımlanmaktadır. Yani zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevasıdır.

Rötre Limit (ω_S); Zeminin suya tam doygun olabildiği en düşük su muhtevasıdır. Başka bir deyişle zeminin yarı plastik bir malzemeden katı bir malzemeye dönüştüğü su muhtevasıdır (Uzuner 1998).

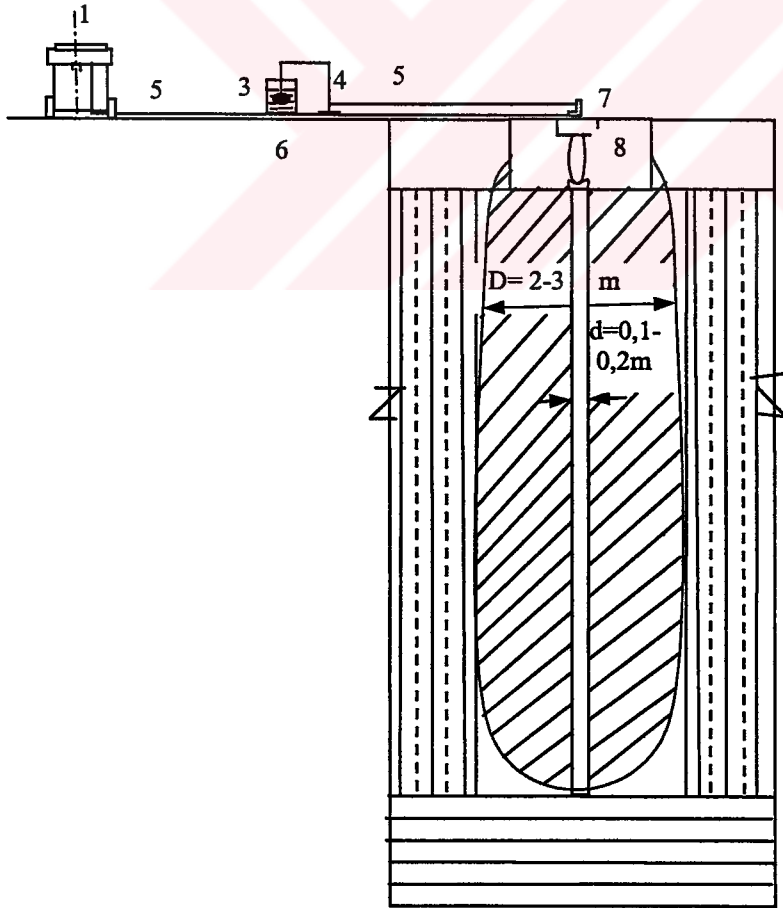
2.5. Zeminlerin Isı ile Stabilizasyonu

İnce taneli zeminlerin stabilizasyon yöntemlerinden birisi de ısı ile stabilizasyon yöntemidir. Löss başta olmak üzere doymun olmayan silt ve killler, ortam sıcaklığının olağan limitler üzerine çıkmasıyla kuvvetlendirilebilir. Yöntemde, iyileştirme yapılacak kohezyonlu zeminin bir planı çıkarılır ve bu plana uygun olarak (kuyu çevresinde 2-3m. çapında silindirler sertleşecek şekilde) belirli aralıklarda stabilizasyon kuyuları açılır (şekil 2.9). 100°C dolaylarında ısıtıldığında zeminin suya karşı isteği bir ölçüde azaldığından geçici uygulama için bir çıkış olarak görülebilir. Öte yandan killler 9000°C de tuğlaya dönüşerek faz değiştirmektedirler. Edinilen deneyim, killerin 400-600°C ısıtıldığında önemsenmeyecek rutubet almayacak kadar değişikliğe uğradığını göstermektedir. (Uzuner 1995)

Isı uygulaması ile stabilizasyon birkaç istisna dışında dolgu bloğu üzerinde kullanılmıştır. Sondaj delikleri açıldıktan sonra burada elektrotlar, ya da benzin alevini radyal olarak saçan borular aracılığı ile yüksek sıcaklık oluşturulur. Bu sırada kayıpların önlenmesi için kuyu ağzı tıkanır. Şekil 2.10 da tipik bir ateşleme düzeni gösterilmektedir. Kompresörden (1) 1,5 atmosfer basınçla gelen hava (2) petrol tankına basılır. Yakıt filtreden süzülüp (6) pompa ve giriş borusu (4,5) ile kuyu içerisine verilir. Tümsek (7) kuyu ağzındaki yanma odasına (8) bağlıdır. Alev sondaj deliği içine yollandığında oluşacak sıcaklık hava-yakıt karışım oranına bağlıdır. Oran 3,5 iken sıcaklık 800°C, 1,0 olduğunda 2800°C olabilir. 1-2m çapında bir öğeyi stabilize etmek için bir haftalık yakım gerekmektedir. Bu işlemler sonucunda nerdeyse pişme durumuna gelen killler değişmeyen ve kalıcı olan özellikler kazanır (Önalp 1983).



Şekil 2.9. Kuyu yerleştirme planı



Şekil 2.10. Tipik bir ateşleme düzeni

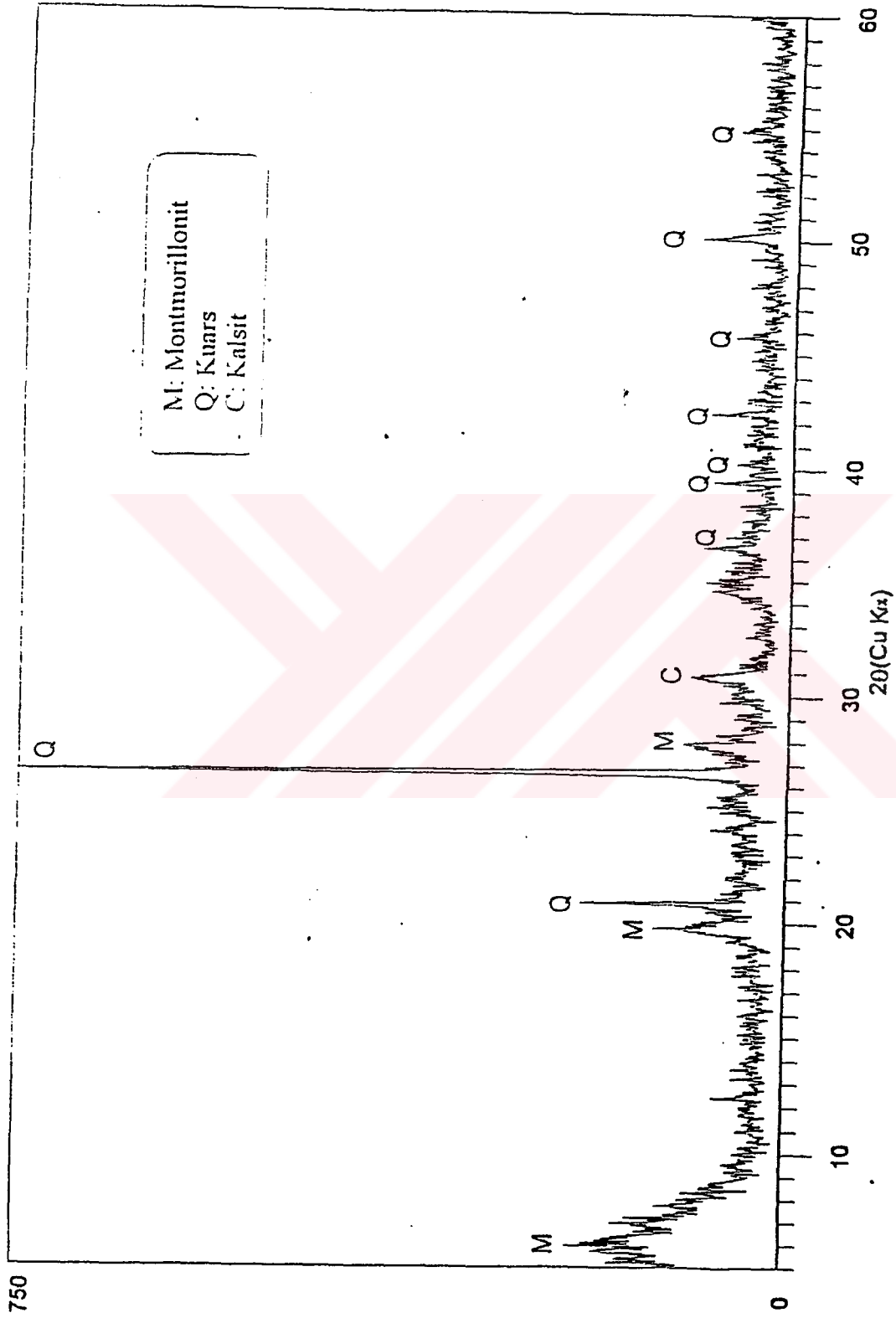
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

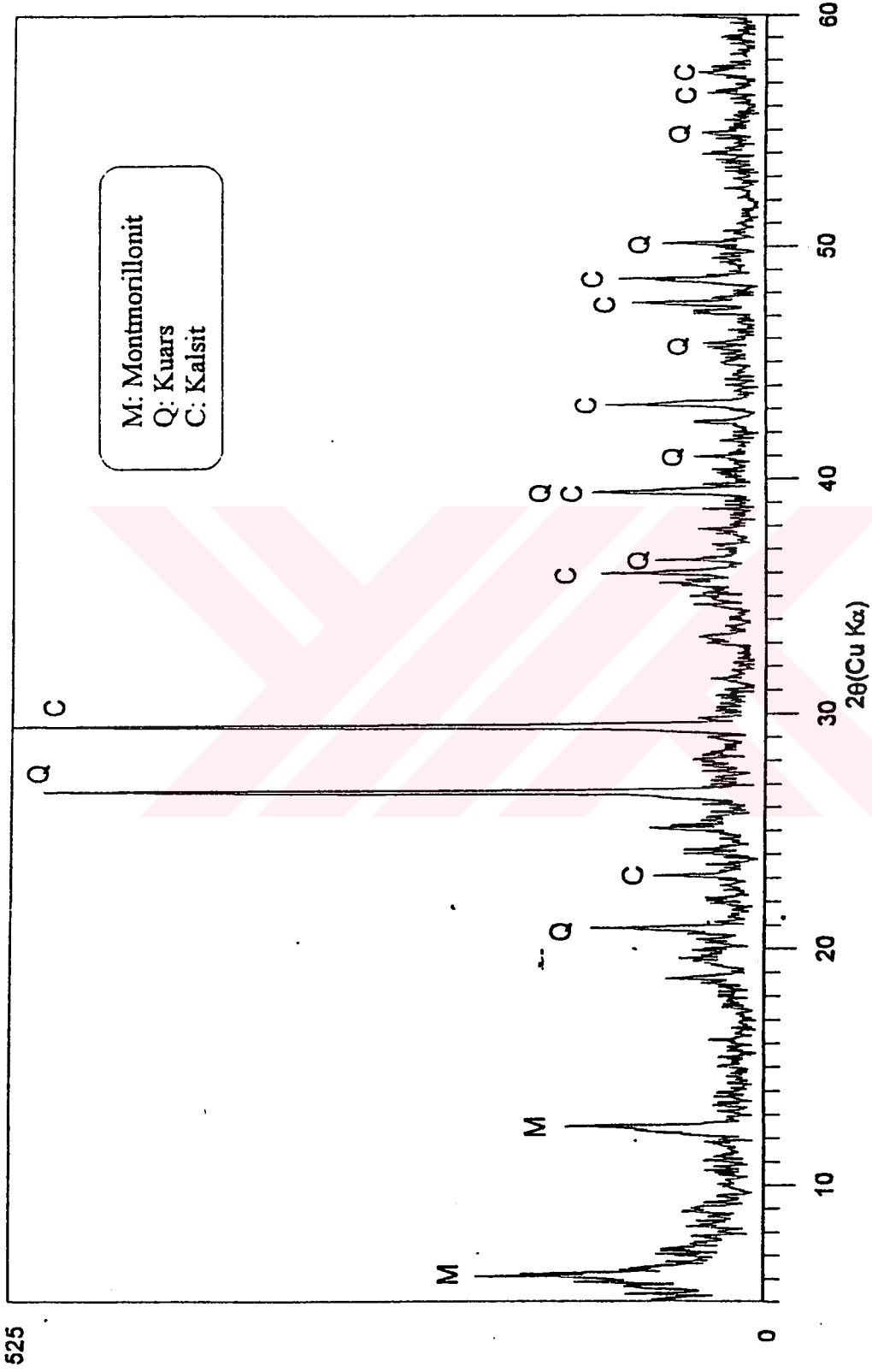
Optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık, tane birim hacim ağırlık, likit limit ve plastik limitin ısı ile değişiminin araştırıldığı bu çalışmada, Oltu (Erzurum) yöresinin farklı iki bölgesinden, yüzeyden 1m derinlikten alınan ve özellikleri çizelge 3.1 de verilen normal konsolide olmuş kil numuneleri kullanılmıştır. Ayrıca her iki kil için de normal x-Ray analizleri yaptırılmış ve sonuçları şekil 3.1-2de verilmiştir

Çizelge 3.1. Deneylerde Kullanılan killerin özellikleri

	γ_s (gr/cm ³)	LL (%)	PL (%)	RENK
1 nolu kil	2,78	53,11	32,7	Gri
2 nolu kil	2,65	71,15	44	Kırmızı



Şekil 3.1. 1 nolu kil için yaptırılan normal X-Ray analiz sonuçları



Şekil 3.2. 2 nolu kil için yaptırılan normal X-Ray analiz sonuçları

3.2. Deney Programı

Yapılan literatür araştırması sonuçları dikkate alınarak, örneklerin fırında bekletileceği sıcaklık dereceleri 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000°C olarak belirlenmiştir. Her bir sıcaklıkta örneklerin 24 saat saklanması ve fırından çıkarılan örneklerin, deney yapılacağı zamana kadar desikatörde saklanmasına karar verilmiştir.. Araştırmada kullanılan her iki kil malzemesi için bütün sıcaklıklarda aşağıda verilen deneylerin ilgili standartlara uygun olarak yapılması ve deneylerde saf su kullanılması planlanmıştır. Deney sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak üzere her deneyin en az üç kez yapılmasına karar verildi.

1. Kompaksiyon deneyleri
2. Likit limit deneyleri
3. Plastik limit deneyleri
4. Tane birim hacim deneyleri
5. Kil ağırlığının ısı ile değişimi deneyleri

3.3. Deneyde Kullanılan Alet Ve Cihazlar

Deneyisel çalışmaların yürütülmesi esnasında aşağıda özellikleri belirtilen alet ve cihazlar kullanılmıştır.

Fırın: Kil örneklerinin 100-1000°C arasında 24 saat süreyle ısıtılması için kullanılmıştır. Fırın $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyete sahiptir.

Etüv: Örneklerin temel özelliklerini belirlemede, kompaksiyon likit ve plastik limit deneylerinde su muhtevasını belirlemede kullanılmıştır. Bu deneyde etüv sıcaklığı 100°C olarak sabit tutulmuştur.

Standart kompaksiyon aleti: Standart kompaksiyon deneylerinin yapılmasında elektrikle çalışan otomatik kompaktör kullanılmıştır. Tokmak ağırlığı 2,5kg, düşme yüksekliği 30,5cm dir.

Standart proktor kalıbı: İç çapı 10,2cm, yüksekliği 11,7cm olan ve üzerine yaka takılabilen metal silindir kap.

Hidrolik numune çıkarma aleti: Proktor kalıbı içerisindeki zemini örselenmeden çıkarabilen hidrolik çalışma esasına dayalı krikö.

Koni penetrasyon aleti: 80gr lık bir konik uç ve bir deformasyon saatinden oluşmuş olup, kap içine konulan zeminin 5sn süre ile batma miktarını ölçer. Likit limitin belirlenmesinde kullanılır.

Piknometre şişesi: 50 ila 100cm³ kapasiteli ve ısıya dayanıklı, kapaklı cam şişelerdir. Tane birim hacim ağırlığı ölçmede kullanılır.

Desikatör: Hava geçirmeyen vakumlu cam kaplara denir. Isıtılan malzemenin nemlenmeden soğumasını sağlar.

Numune kapları: Numunelerin fırında ısıtılması için kullanılan 3,5-4kg kapasiteli büyük kaplar ve yapılan deneylerin sonucunda örneklerin su muhtevalarının belirlenmesi için etüve konulabilecek küçük kaplar.

Teraziler: Tane birim hacim ağırlık ve su muhtevalarının ölçülmesi için 0,01gr hassasiyetli terazi ve içi numune dolu proktor kalıbını tartmak için normal terazi.

Cam plaka: Üzerinde plastik limitin belirlenmesi için kullanılan düz yüzeyli plaka .

Vakum: Tane birim hacim ağırlığı ölçerken piknometre şişesi içerisindeki havayı almak için kullanılan elektrikli alet.

3.4. Deneylerin Yapılışı

3.4.1. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Kompaksiyon deneyleri ASTM (Anonymous, 1994) veya Türk (Anonim, 1987) Standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Proctor kabına, geçici olarak bir yaka eklenir. Deneyde kurutulmuş, tanelenmiş birkaç kg ağırlığında zemin kullanılır. Zemine bir miktar su katılarak iyice karıştırılır. Ve hazırlanan zemin üç tabaka halinde kaba yerleştirilir. Her bir tabaka, 30,5cm.den serbestçe düşen 2,5kg ağırlığındaki bir tokmakla (standart proctor aleti, şekil 3.3) 25 vuruş yaptırılarak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi bitince yaka çıkarılır, fazla zemin kesilerek uzaklaştırılır. Kabin üzeri düzeltilir ve kap tartılır. Buradan ıslak birim hacim ağırlık belirlenir (γ_{nl}). Bu malzemeden bir miktar alınarak su muhtevası belirlenir (ω_1). Islak haldeki zeminden bir miktar alınarak darası alınmış bir kaba konulup tartılır ve etüvde kurutulur, daha sonra etüvden çıkarılıp tekrar tartılır ve bazı matematiksel bağıntılardan hesaplanarak aşağıdaki bağıntıdan kuru birim hacim ağırlık belirlenir (γ_{kl}). (Proctor 1933)

Deney, aynı zemin üzerinde değişik (artan) su muhtevalarında 4-5 kez tekrarlanır. Deney sonuçları γ_k - ω eksen takımında işaretlenerek, ilgili kompaksiyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin tepe noktasından optimum su muhtevası (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) elde edilir.

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s(1 + \omega)}{(1 + e)} \quad (3.1)$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{(1 + e)} \quad (3.2)$$

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_k} \doteq 1 + \omega \rightarrow \gamma_k = \frac{\gamma_n}{(1 + \omega)} \quad (3.3)$$

$\gamma_k - \omega$ eksen takımında sabit bir doygunluk derecesi ($S_r = \text{sabit}$) için teorik olarak çizilen eğrilere, "doygunluk çizgisi" denilir. Ve aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.

$$e = \frac{\gamma_s \theta}{S_r} \quad (3.4)$$

e : Boşluk oranı

S_r : Doymunluk derecesi

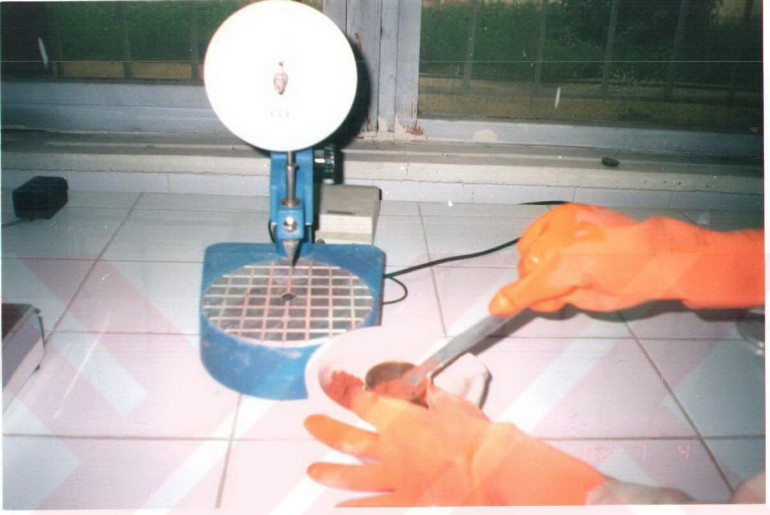


Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan otomatik zemin kompaktörü

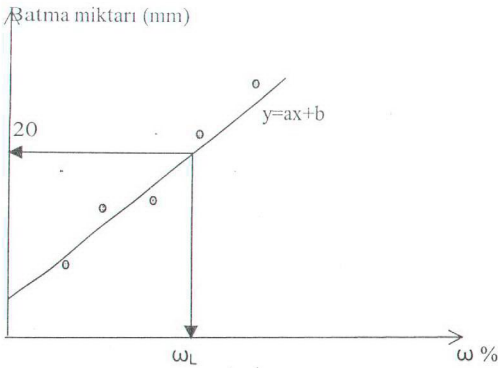
3.4.2. Zeminlerin likit limitinin belirlenmesi

Likit limit, standart koni penetrasyon yöntemi veya casagrande (1932) yöntemi ile ASTM (Anonymous, 1989) veya Türk (Anonim, 1987) Standartlarına uygun olarak yapılabilir. Deneylerde koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. Deneyde, 400 mikronluk elekten geçirilmiş 200gr malzeme, cam plaka üzerine palet bıçakların kullanılmasıyla suyla çamur haline getirilir. Çamur desikatörde 24 saat bekletilir. Numune ertesi gün desikatörden alınarak en az 10 dakika karıştırılır. Bazı ağır killerde yoğurma 40 dakikaya çıkarılabilir. Hazırlanan numune metal deney kabına yerleştirildikten sonra yüzeyi çelik cetvelle tesviye edilir ve penetrometre tabanına koyulur. Koni zeminin yüzünü belirsizce çizecek düzeye indirilir ve mikrometre sıfır okuması alınır. Sonra düğmeye 5 ± 1 saniye süreyle basılır (şekil 3.4). Süre sonunda son mikrometre okuması yapılır. İki okuma arasındaki fark koni penetrasyonudur. Koni kaldırılıp dikkatle temizlenir. Kaba biraz daha çamur eklenerek yüzeyi yine düzeltildikten sonra ondan sonra bir önceki işlem tekrarlanır. Bu ikinci penetrasyon değeri ilkinden 0,5mm den büyük yada 1mm den küçük farkla çıkarsa, bir üçüncü deney yapılır. Değerlerdeki oynama 1mm dolayında kalırsa 10gr kadar bir su muhtevası örneği koni deliği civarından alınır ve su muhtevası belirlenir. Bu su muhtevasına karşılık üç penetrasyon değerinin ortalaması kaydedilir. Eğer fark 1mm den fazla ise örnek, kap dışına alınıp, yeniden karıştırılıp sonra deney bu su muhtevası için tekrarlanır. Bu işlemler numuneye su eklenerek en az üç kez daha değişik su muhtevalarında yapılır. Bu su muhtevaları penetrasyon değerlerinin 1,5 ile 25mm arasında değişeceği biçimde ayarlanmalıdır. Kural olarak deney kurudan ıslak karışıma doğru yapılır ve koniyle deney kabı her denemeden sonra temizlenir.

Deney tamamlandıktan sonra su muhtevası koni penetrasyonu değerleri lineer eksenlere, her okuma için su muhtevası yüzde olarak 'apsis olarak penetrasyon değeri de ordinat olarak noktalar belirlenir. Noktalardan geçirilecek en uygun doğru akma eğrisi karşılığıdır ve 20mm penetrasyona karşılık olan su muhtevası zeminin likit limiti olarak alınır (Şekil3.5).



Şekil 3.4. Likit limit deneyinin yapılışı



Şekil 3.5. Su muhtevası-penetrasyon grafiğinden likit limitin belirlenmesi

3.4.3. Zeminlerde plastik limitin belirlenmesi

Bu limiti belirlemek için, 400 mikron elekten geçen malzemeden 20gr dolayında bir numune alınır. Zeminin 400 mikron elekten geçen yüzdesi kaydedilir. Açıkta kurutulmuş zemin homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alıp plastik olana kadar, cam plaka üzerinde, saf su ile iyice karıştırılıp yoğrulur. Böylece hazırlanmış numune yaklaşık olarak iki eşit parçaya bölünür. Bunlara top şekli verildikten sonra bir yarısı silindirik bir makama şeklini alana değin cam plaka ile el ayası arasında yuvarlanır. Numunenin çapı 3mm ye düştüğü anda çatlama ve kopma belirmemişse zemin tekrar zemin haline yoğrulur ve yeniden yuvarlanır. Çapın tam 3mm ye indiği anda yuvarlanan zemin çatlamayıp dağılmalar görülene değin bu işlem sürdürülür (Şekil 3.6). Dağılan numunenin parçaları toplanıp bir numune kabına konur ve su muhtevası ölçülür. Diğer yarısı ise daha sonra denenmek üzere paslanmaz ve hava geçirmez bir kap içerisine konup, ilk yarıya yapılan işlemler bittikten sonra, bu yarı içinde bu işlemler tekrarlanır ve su muhtevalarının ortalaması alınır. Alınan bu su muhtevası ortalaması zeminin plastik limiti olarak kabul edilir. (Atterberg 1911)



Şekil 3.6. Plastik limit deneyinin yapılışı

3.4.4. Zeminlerde tane birim hacim ağırlığının belirlenmesi

İnce taneli zeminler için piknometre şişesi iri taneli zeminler içinse cam kavanoz kullanılır (Anonim, 1987). Piknometre şişesi saf su ile doldurularak sabit sıcaklıklı su tankı içerisinde şişe içindeki hava kabarcıkları vakumla alınır. Üzerine su ilave edilerek tamamen doldurulur ve ağırlığı tartılır (W_1). Şişe yarıya kadar boşaltılarak içerisine ağırlığı tartılmış (5-20gr) kuru zemin ilave edilir (W_2). Yine sabit sıcaklıklı su banyosu içerisinde vakumla hava kabarcıkları alındıktan sonra hava kalmayacak şekilde su ile doldurulup kapağı kapatılır ve ağırlığı tartılır (W_2). Aşağıdaki bağıntıdan zeminin tane birim hacim ağırlığı belirlenir.

$$\gamma_s = \frac{W_z}{[W_z - (W_2 - W_1)]} \quad (3.5)$$

$$W_1 = W_{\text{şişe}} + W_{\text{su1}} \quad (3.6)$$

$$W_2 = W_{\text{şişe}} + W_z + W_{\text{su2}} \quad (3.7)$$

$$V_1 = W_z - (W_2 - W_1) \quad (3.8)$$

γ_s : Tane birim hacim ağırlık

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Laboratuarda deney programına ve ilgili standartlara uygun olarak yapılan standart kompaksiyon likit limit, plastik limit, tane birim hacim ağırlık ve ağırlık değişimi deneylerine ait araştırma bulguları aşağıda sırası ile verilmiştir.

4.1. Kompaksiyon Deneyleri

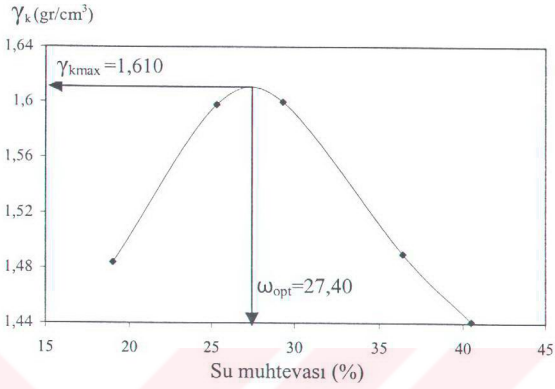
Kompaksiyon deneyleri; iki farklı kil örnekleri için deney programında belirtildiği ve 3.4.1. de anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Seçilen sıcaklık dereceleri için ayrı ayrı yapılan her bir deney; değişik su muhtevaları için en az beş kez tekrarlanmıştır. Her iki kil örnekleri için yapılan kompaksiyon deneyleri ile belirlenen kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevaları ($\gamma_k - \omega$) çizelge 4.1-2 de verilmiştir. Çizelge 4.1-2 deki değerler kullanılarak her bir deney için çizilen kompaksiyon eğrileri şekil 4.1-16 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 1 nolu kil için kompaksiyon deney sonuçları

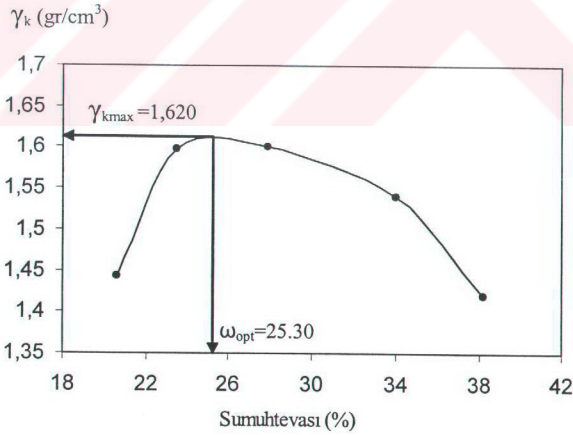
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)		100	200	250	300	400	500	800	1000
Deney 1	γ_k (gr/cm^3)	1,484	1,442	1,452	1,594	1,669	1,610	1,580	1,588
	ω (%)	19,00	20,60	19,50	16,30	15,17	14,50	10,80	12,70
Deney 2	γ_k (gr/cm^3)	1,598	1,598	1,612	1,654	1,705	1,734	1,610	1,681
	ω (%)	25,30	23,50	21,11	19,39	17,09	16,70	12,20	15,40
Deney 3	γ_k (gr/cm^3)	1,600	1,600	1,612	1,660	1,689	1,614	1,640	1,686
	ω (%)	29,30	27,90	25,73	20,88	18,00	23,70	13,60	19,80
Deney 4	γ_k (gr/cm^3)	1,490	1,540	1,472	1,601	1,594	1,586	1,690	1,626
	ω (%)	36,40	34,00	30,20	25,20	23,00	24,50	17,2	24,20
Deney 5	γ_k (gr/cm^3)	1,441	1,420	1,399	1,529	1,536	1,535	1,640	-
	ω (%)	40,500	38,2	33,6	27,4	26,0	27,0	19,8	-

Çizelge 4.2. 2 Nolu kil için kompaksiyon deney sonuçları

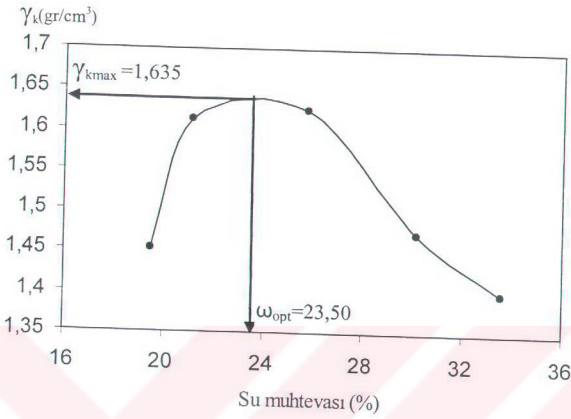
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)		100	200	250	300	400	500	800	1000
Deney 1	γ_k (gr/cm^3)	1,020	1,190	1,315	1,488	1,609	1,621	1,560	1,597
	ω (%)	22,0	25,0	25,0	25,0	13,1	14,0	8	8,5
Deney 2	γ_k (gr/cm^3)	1,100	1,290	1,333	1,550	1,704	1,680	1,605	1,635
	ω (%)	26,4	35,5	26,6	26,1	16,3	16,0	11,2	11,2
Deney 3	γ_k (gr/cm^3)	1,200	1,234	1,335	1,466	1,700	1,680	1,620	1,675
	ω (%)	33,6	38,1	31,0	31,9	19,6	17,0	12,2	13,45
Deney 4	γ_k (gr/cm^3)	1,190	1,163	1,344	1,423	1,629	1,621	1,672	1,685
	ω (%)	40,0	43,9	35,8	34,0	21,8	24,5	15,7	17,47
Deney 5	γ_k (gr/cm^3)	1,110	1,123	1,318	1,341	1,557	1,564	1,672	1,660
	ω (%)	53,5	47,7	37,9	37,7	23,5	26,7	17,0	21,4
Deney 6	γ_k (gr/cm^3)	-	-	-	-	-	1,526	1,571	1,636
	ω (%)	-	-	-	-	-	27,7	24,6	23,8



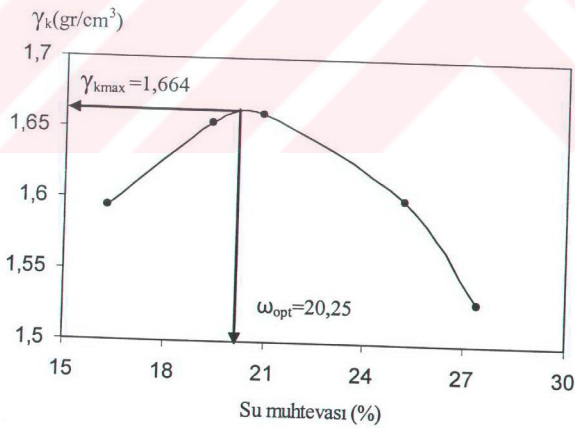
Şekil 4.1. 1 Nolu kilin 100°C'deki kompaksiyon eğrisi



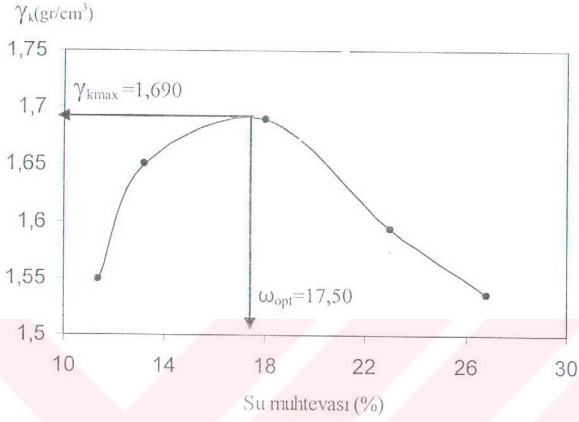
Şekil 4.2. 1 Nolu kilin 200°C'deki kompaksiyon eğrisi



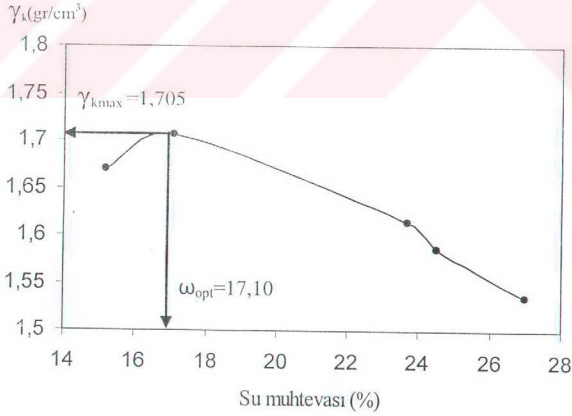
Şekil 4.3. 1 Nolu kilin 250°C 'deki kompaksiyon eğrisi



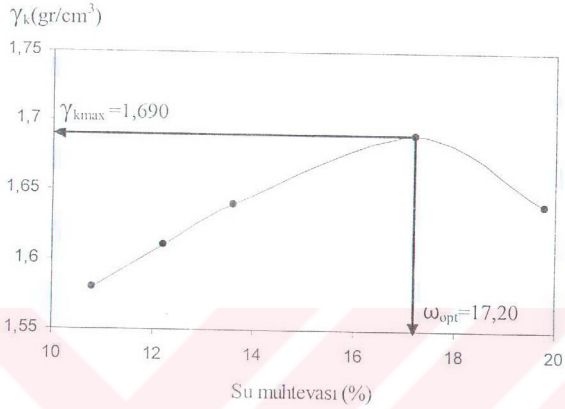
Şekil 4.4. 1 Nolu kilin 300°C 'deki kompaksiyon eğrisi



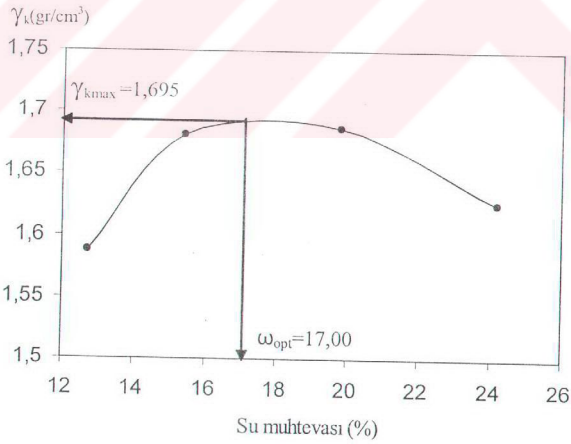
Şekil 4.5. 1 Nolu kilin 400°C 'deki kompaksiyon eğrisi



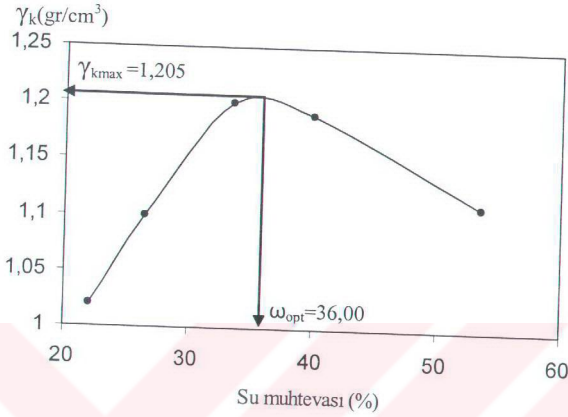
Şekil 4.6. 1 Nolu kilin 500°C 'deki kompaksiyon eğrisi



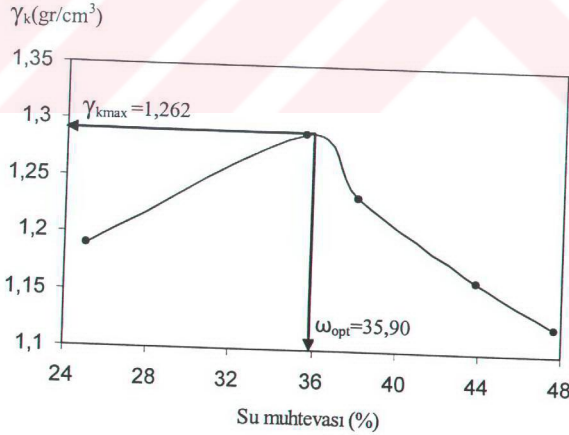
Şekil 4.7. 1 Nolu kiln 800°C 'deki kompaksiyon eğrisi



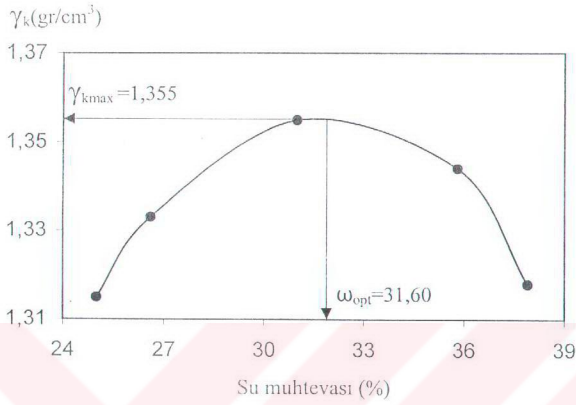
Şekil 4.8. 1 Nolu kilin 1000°C 'deki kompaksiyon eğrisi



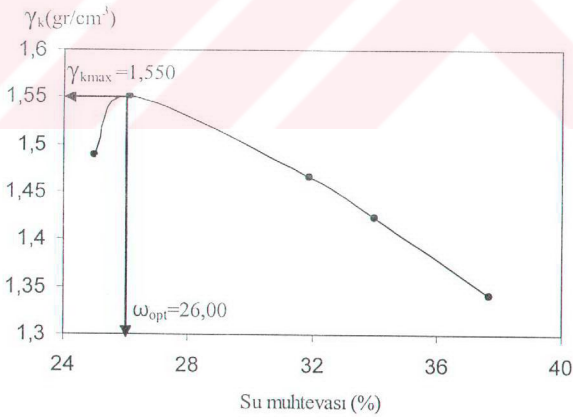
Şekil 4.9. 2 Nolu kilin 100°C'deki kompaksiyon eğrisi



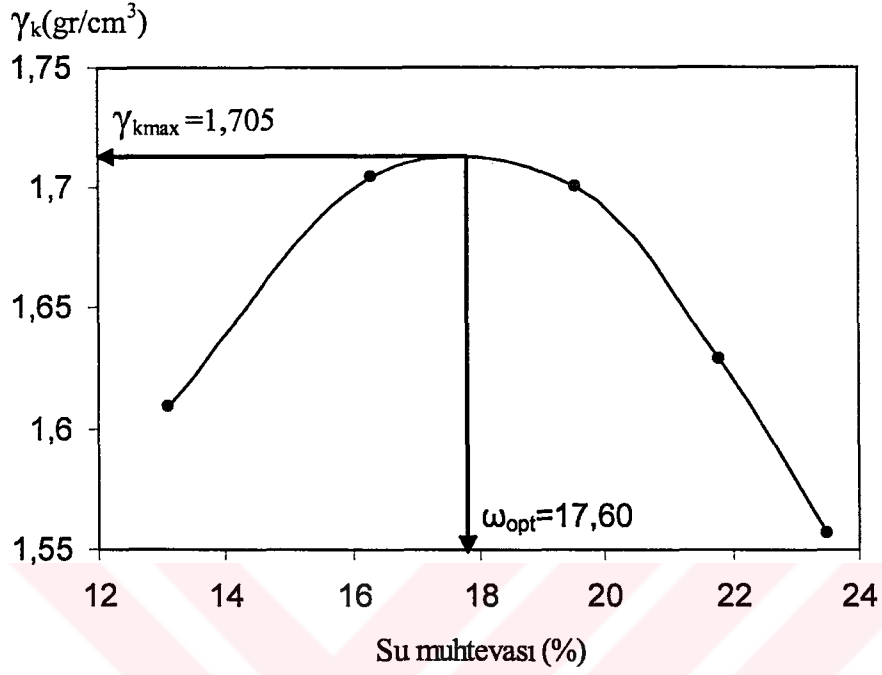
Şekil 4.10. 2 Nolu kilin 200°C'deki kompaksiyon eğrisi



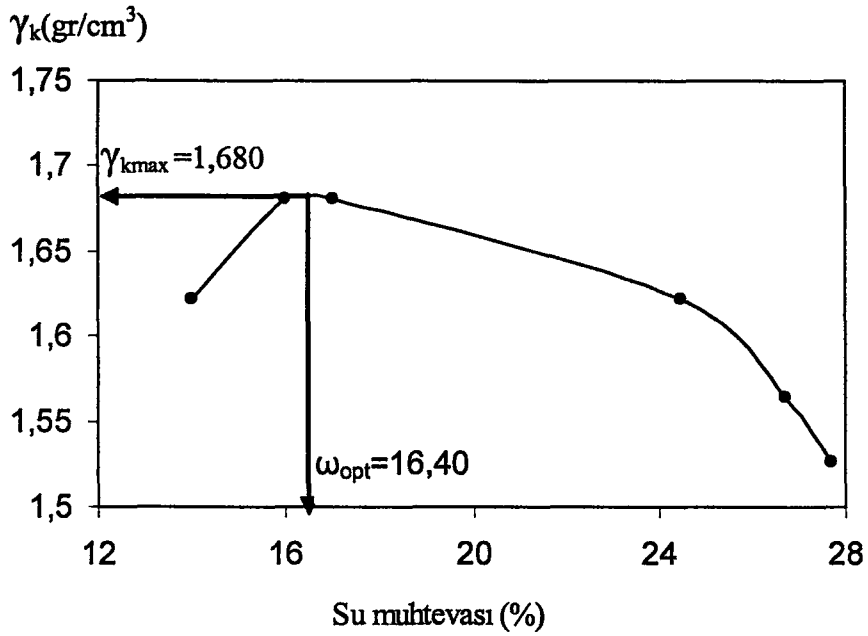
Şekil 4.11. 2 Nolu kilin 250°C'deki kompaksiyon eğrisi



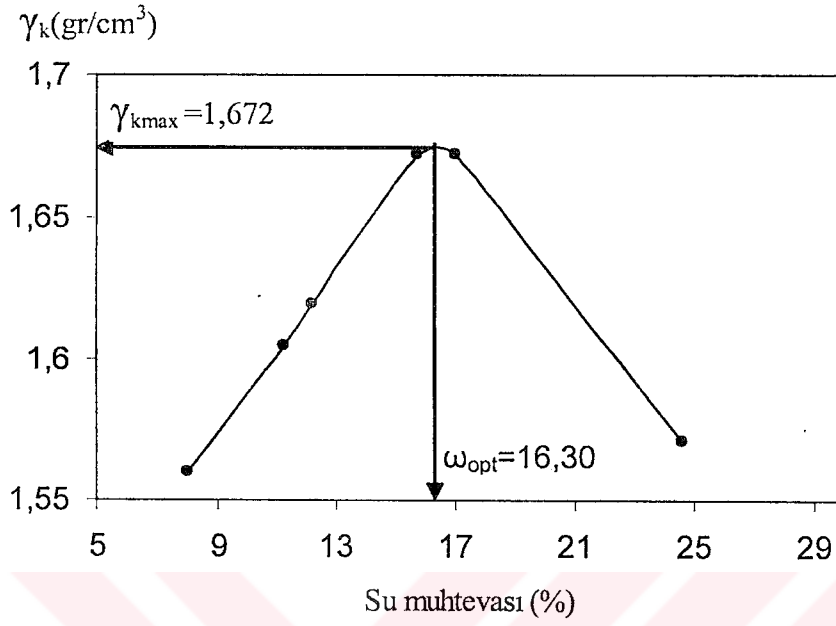
Şekil 4.12. 2 Nolu kilin 300°C'deki kompaksiyon eğrisi



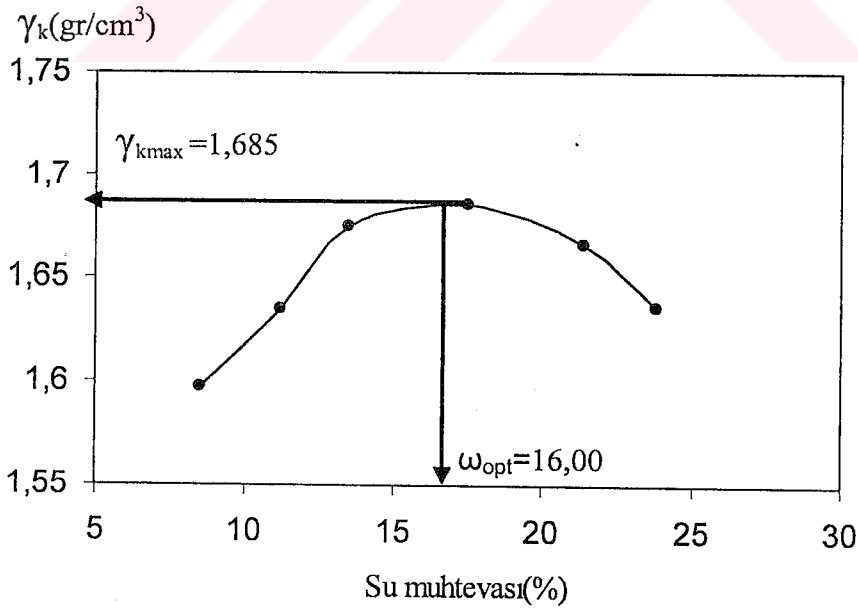
Şekil 4.13. 2 Nolu kilin 400⁰ C'deki kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.14. 2 Nolu kilin 500⁰ C'deki kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.15. 2 nolu kilin 800°C 'deki kompaksiyon eğrisi



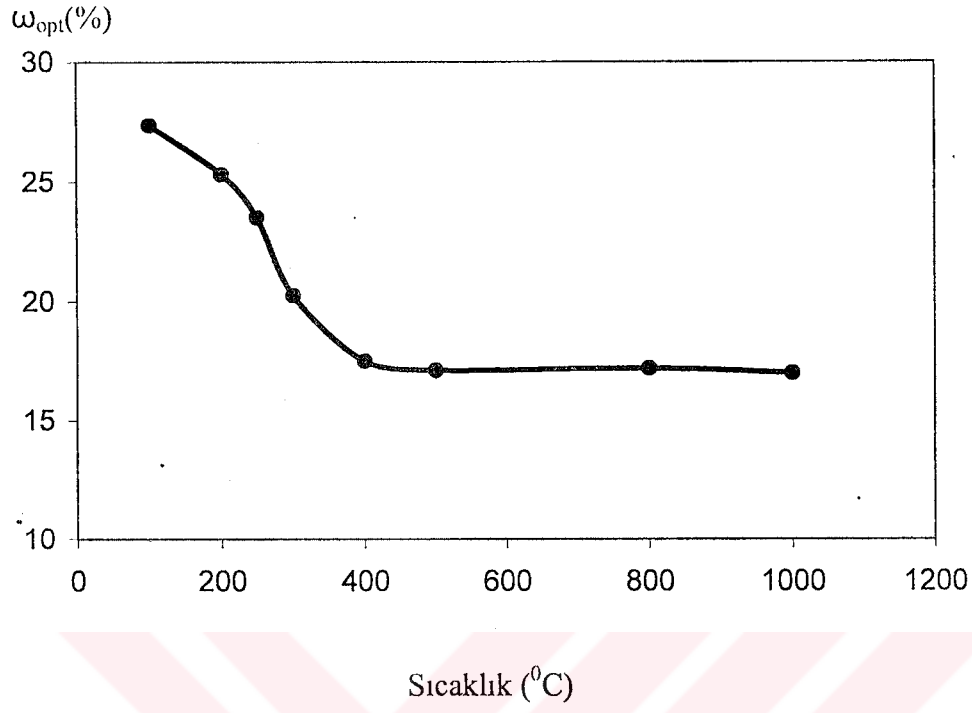
Şekil 4.16. 2 Nolu kilin 1000°C 'deki kompaksiyon eğrisi

Bu eğrilerden maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve optimum su muhtevaları belirlenerek çizelge 4.3 oluşturulmuştur.

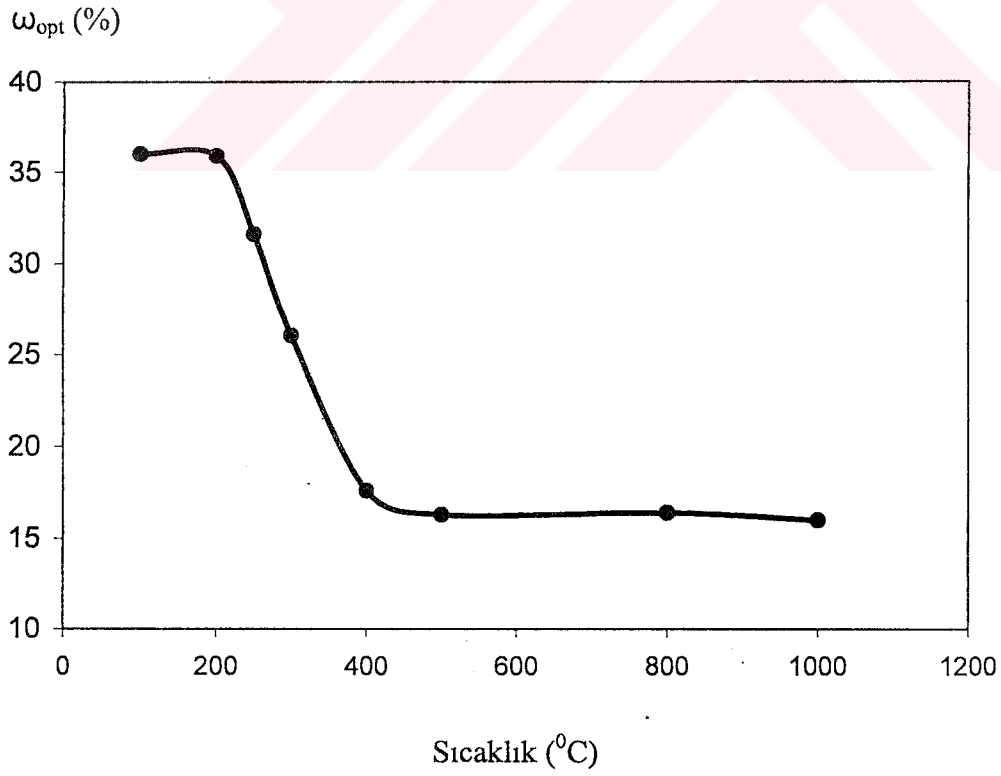
Çizelge 4.3. Deneylerde belirlenen γ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı Kil		2 Numaralı Kil	
	γ_{kmax} (gr/cm ³)	ω_{opt} (%)	γ_{kmax} (gr/cm ³)	ω_{opt} (%)
100	1,610	27,40	1,205	36,00
200	1,620	25,30	1,262	35,90
250	1,635	23,50	1,355	31,60
300	1,664	20,25	1,550	26,00
400	1,690	17,50	1,705	17,60
500	1,705	17,40	1,680	16,40
800	1,690	17,20	1,672	16,30
1000	1,695	17,00	1,68	16,00

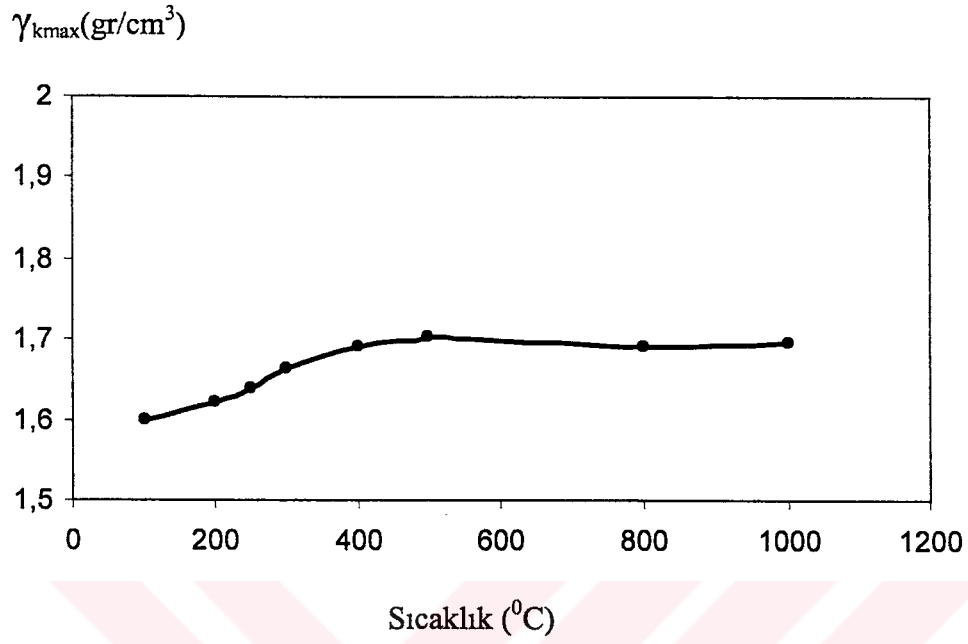
Kompaksiyon deney sonuçlarından belirlenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın sıcaklıkla değişimini belirlemek amacı ile her iki kil çizilen grafikler sırasıyla şekil 4.17-20 de verilmiştir.



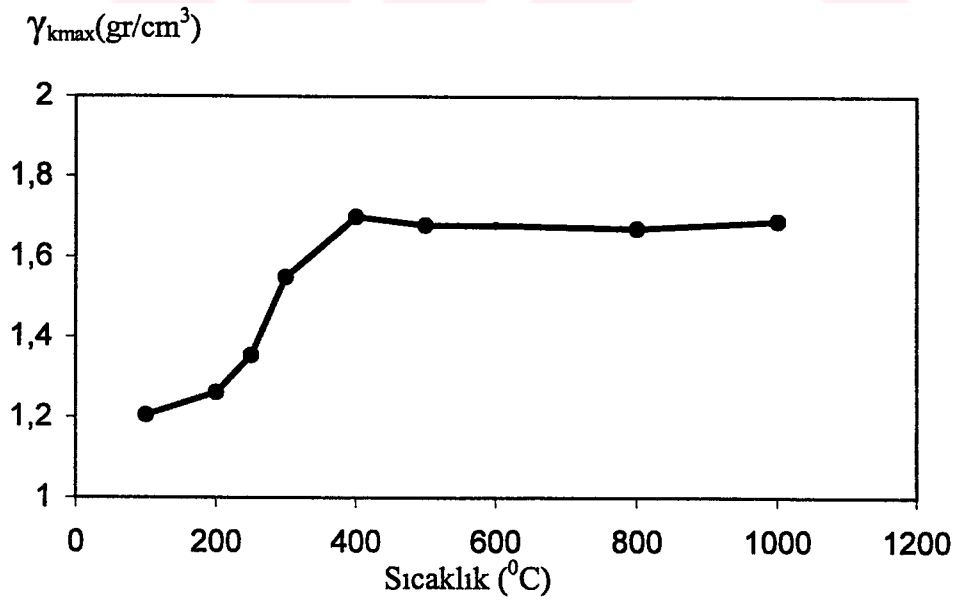
Şekil 4.17. Optimum su muhtevası-sıcaklık değişim grafiği (1 Nolu kil)



Şekil 4.19. Optimum su muhtevası-sıcaklık değişim grafiği (2 Nolu kil)



Şekil 4.18. Maksimum kuru birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafiği (1 Nolu kil)



Şekil 4.20. Maksimum kuru birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafiği (2 Nolu kil)

Bu iki parametrenin 100°C deki değerine göre değişim oranları hesaplanarak Çizelge 4.4. de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kompaksiyon değişim oranları

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı kil		2 Numaralı kil	
	γ_{kmax} (%) Değişim	ω_{opt} (%) Değişim	γ_{kmax} (%) Değişim	ω_{opt} (%) Değişim
100	-	-	-	-
200	+0,62	-7,66	+4,73	-0,28
250	+1,55	-14,2	+12,45	-12,22
300	+3,35	-26,09	+28,63	-27,78
400	+4,97	-36,13	+41,49	-51,11
500	+5,90	-37,59	+39,42	-54,44
800	+4,97	37,23	+38,76	-54,72
1000	+5,28	37,96	+39,42	-55,56

Optimum su muhtevasında sıcaklığın artışı ile her iki zemin içinde 400°C ye kadar hızlı bir azalma görülmektedir. Bu sıcaklıktan sonra önemli bir değişme olmamaktadır. Bu sonuçlar Majed vd.(2001) tarafından yapılan çalışmada verilen sonuçlarla da uyum halindedir. 100 °C deki optimum su muhtevaları birbirinden farklı olan iki kil (%27,40 ve %36) 400°C den sonra %16-17 arasında olduğu ve değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ise optimum su muhtevasının tersine sıcaklıkla artmaktadır. 1 Nolu kilde 300°C ye kadar, 2 nolu kilde ise 400°C ye kadar hızlı bir artış olmakta, bu sıcaklıklardan sonra çok fazla değişmemektedir. 100°C de 1,61 gr/cm³ ve 1,205 gr/cm³ olan maksimum kuru birim hacim ağırlıklar, 400°C den sonra birbirine yaklaşmakta ve 1,67-1,70 gr/cm³ arasında değişmektedir.

4.2. Likit Limit Deneyleri

Likit limit deneyleri iki farklı kil özellikleri için standart konik penetrasyon aleti kullanılarak yapılmıştır seçilen sıcaklık dereceleri için, her bir deney 5 değişik su muhtevalarında yapılmıştır. Deneyler sonucunda belirlenen su muhtevaları ve batma miktarları her iki kil için çizelge 4.5 ve çizelge 4.6 de verilmiştir.

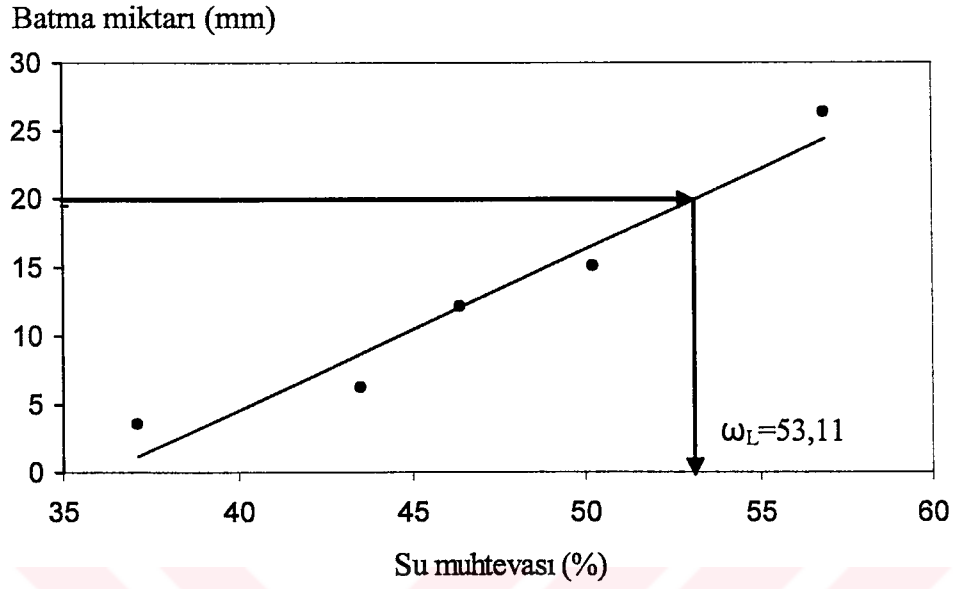
Çizelge 4. 5. 1 Nolu kil için likit limit deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	Deney 1		Deney 2		Deney 3		Deney 4		Deney 5	
	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)
100	3,5	37,15	6,2	43,52	12,0	46,38	15,0	50,19	26,3	56,87
200	0,7	43,0	7,3	45,0	14,8	49,0	19,8	50,0	23,0	52,0
250	3,4	34,68	12,6	39,76	15,1	41,01	19,8	42,26	23,0	44,31
300	5,7	27,0	10,3	28,0	15,0	29,0	19,3	30,0	33,8	33,0
400	3,7	22,0	11,0	24,0	16,0	26,0	23,1	27,6	28,0	28,5
500	2,9	21,0	8,4	22,0	12,0	23,0	19,1	24,5	33,5	27,6
600	3,7	17,3	6,5	18,8	12,5	22,0	21,85	25,0	25,3	27,0
800	3,8	22,9	14,0	23,5	22,0	24,5	25,0	25,0	36,6	25,9
1000	8,0	19,4	11,5	20,8	14,0	21,5	22,0	24,0	28,3	26,0

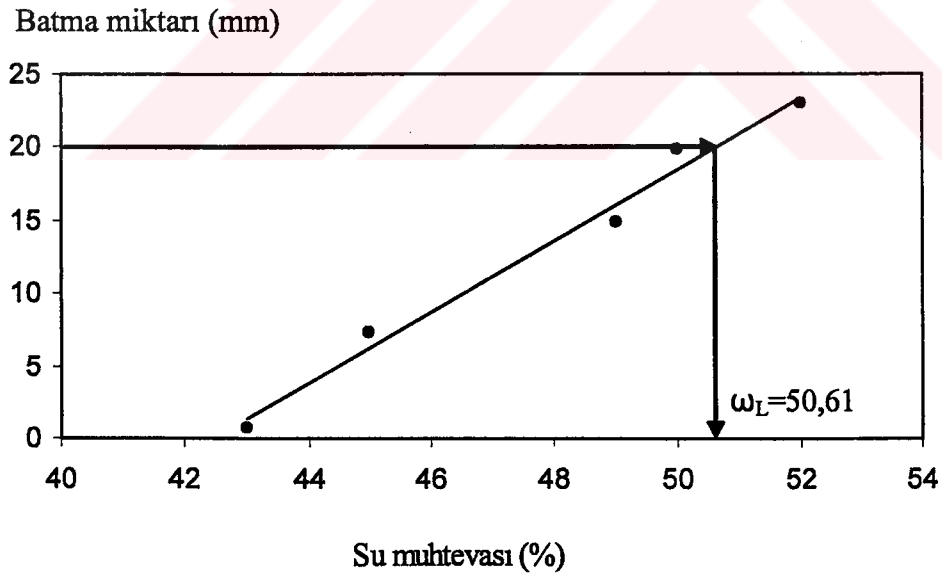
Çizelge 4.6. 2 Nolu kil için likit limit deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	Deney 1		Deney 2		Deney 3		Deney 4		Deney 5	
	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)	H (mm)	ω (%)
100	6,2	53,0	14,7	64,42	18,2	68,27	22,0	73,77	26,8	80,32
200	3,5	38,7	4,5	43,69	8,5	50,07	11,5	55,16	16,5	63,05
250	6,0	38,0	13,8	41,0	17,4	42,0	22,0	44,0	30,8	47,0
300	6,5	23,0	12,0	23,7	15,0	24,3	16,8	25,0	22,0	26,0
400	3,2	22,0	7,2	22,5	11,0	23,0	18,5	24,0	33,3	26,0
500	7,6	13,5	14,0	18,0	18,5	21,5	21,0	25	25,0	27,3
600	8,0	10,0	14,0	18,3	18,5	21,5	21,0	25,0	25,0	26,0
800	4,0	15,0	11,3	17,0	17,6	19,5	24,8	22,7	38,7	27,9
1000	3,4	12,7	7,0	14,0	12,0	18,0	19,2	20,8	26,0	24,0

Deneylerde likit limitin belirlenmesi için en uygun batma doğrularının çizilmesi gerekmektedir. Noktalardan geçen en uygun doğruları (batma doğrularını) çizebilmek için lineer regrasyon analizleri ($Y = Ax + B$) yapılmıştır. Her deney için bu analizler yapıldıktan sonra, doğru üzerinde 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak alınmıştır. Deneylere ait çizilen batma miktarı- su muhtevası grafikleri şekil 4.21-38 de verilmiştir.

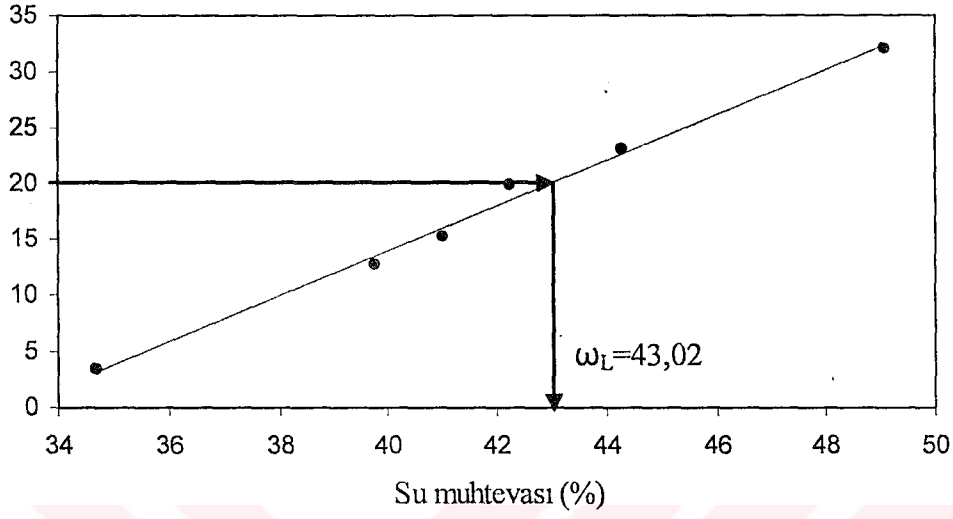


Şekil 4.21 : 1 Nolu kilin 100⁰ C'deki likit limit grafiği



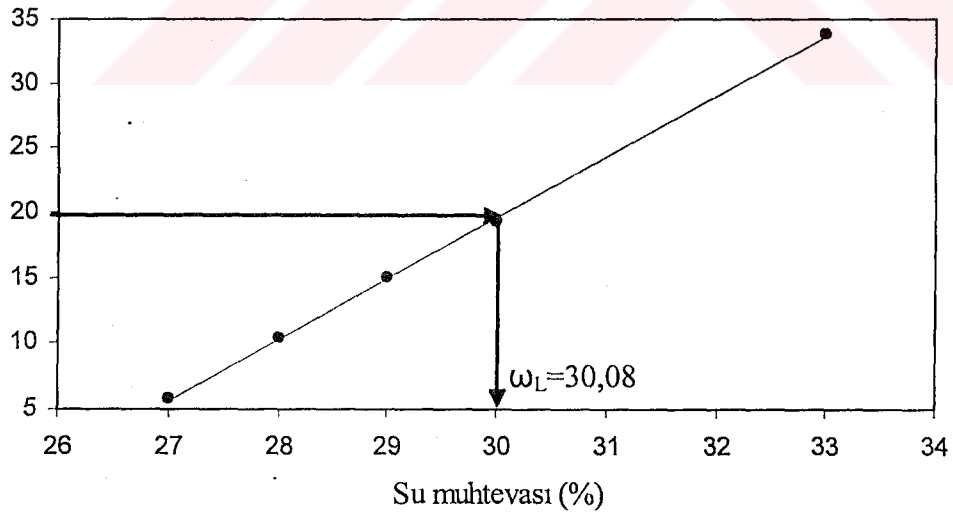
Şekil 4.22. 1 Nolu kilin 200⁰ C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)



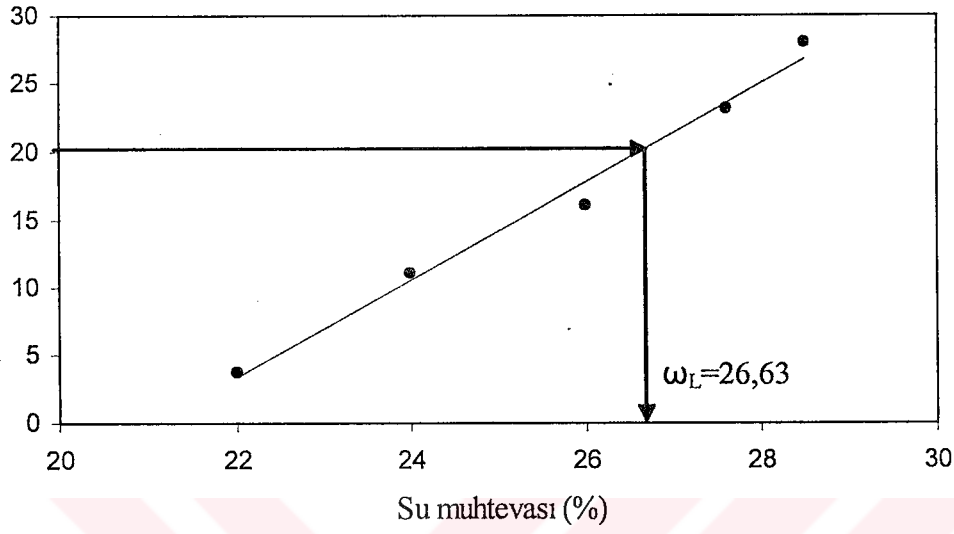
Şekil 4.23. 1 Nolu kilin 250⁰C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)



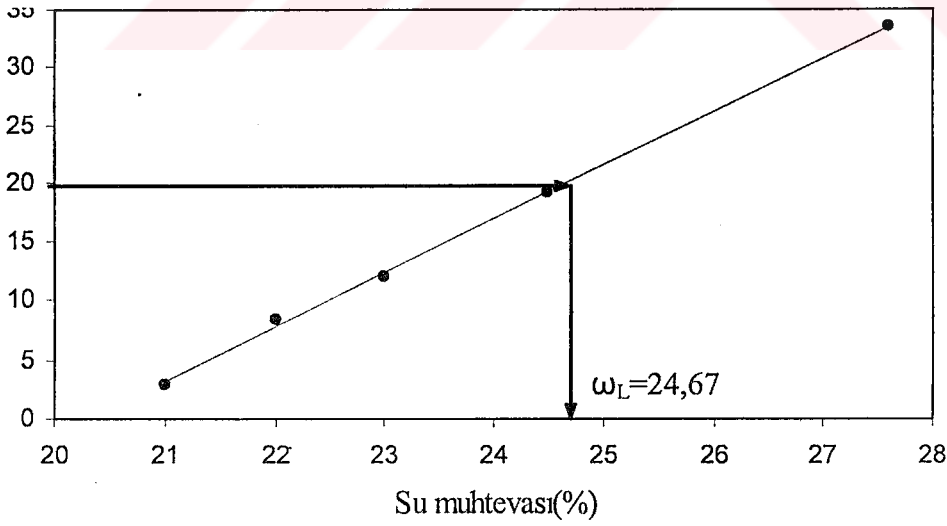
Şekil 4.24. 1 Nolu kilin 300⁰C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)

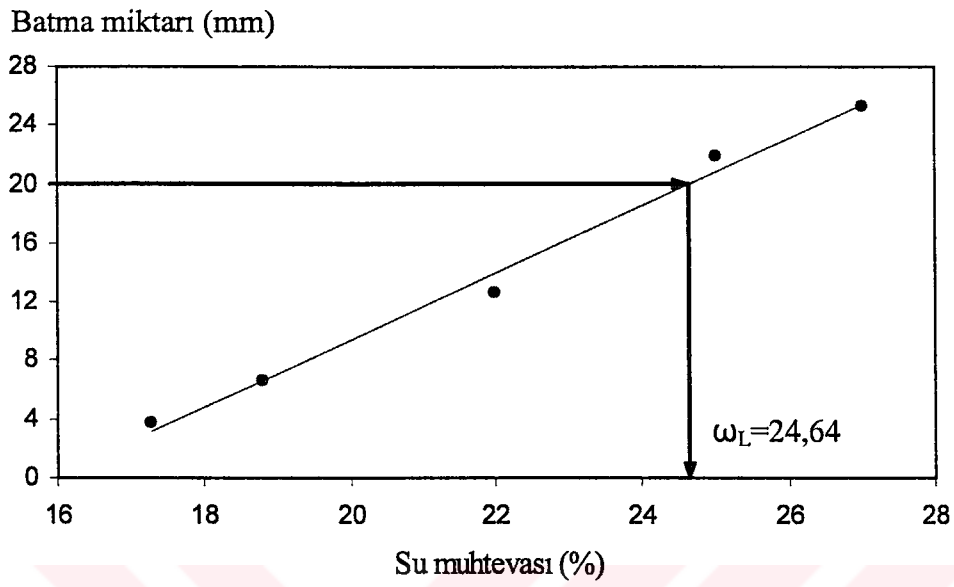


Şekil 4.25. 1 Nolu kilin 400⁰C'deki likit limit Grafiği

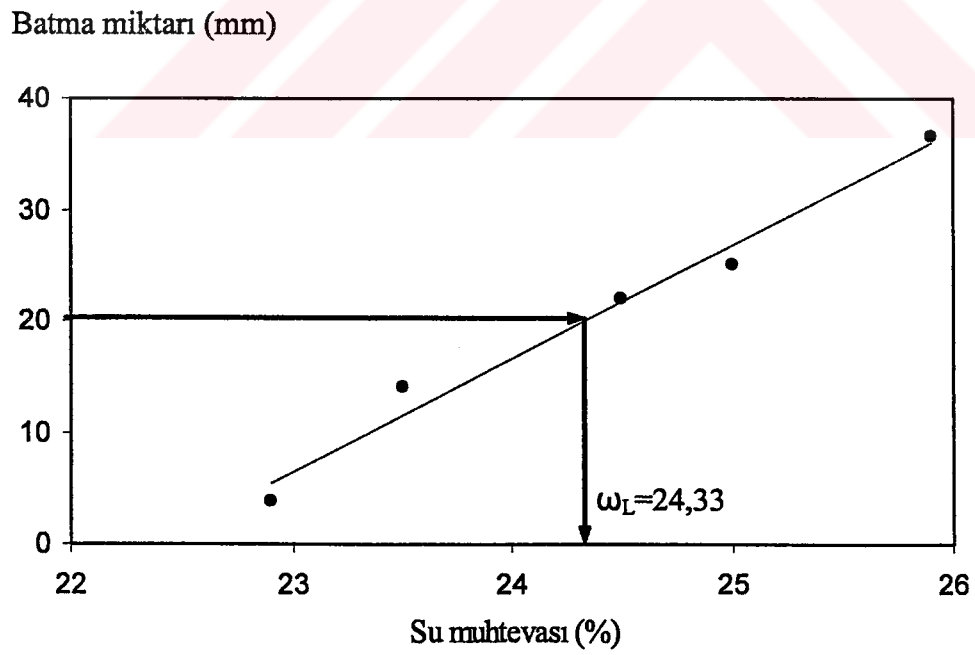
Batma miktarı (mm)



Şekil 4.26. 1 Nolu kilin 500⁰C'deki likit limit grafiği

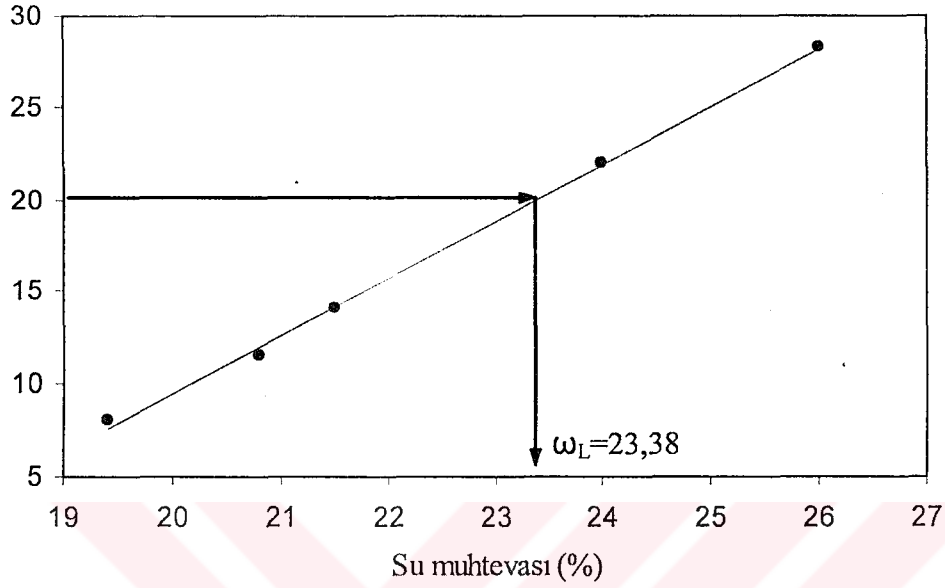


Şekil 4.27. 1 Nolu kılın 600⁰C'deki likit limit grafiği



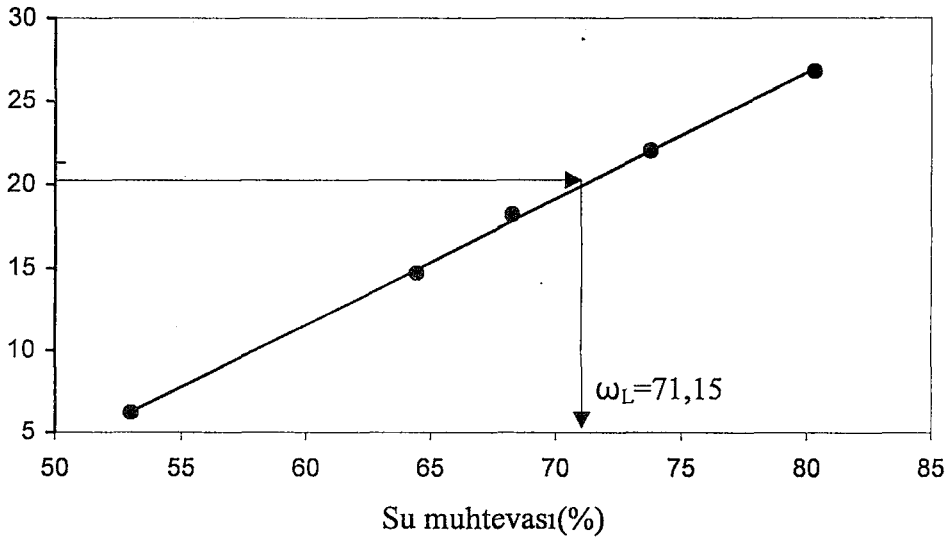
Şekil 4.28 :1 Nolu kılın 800⁰C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)

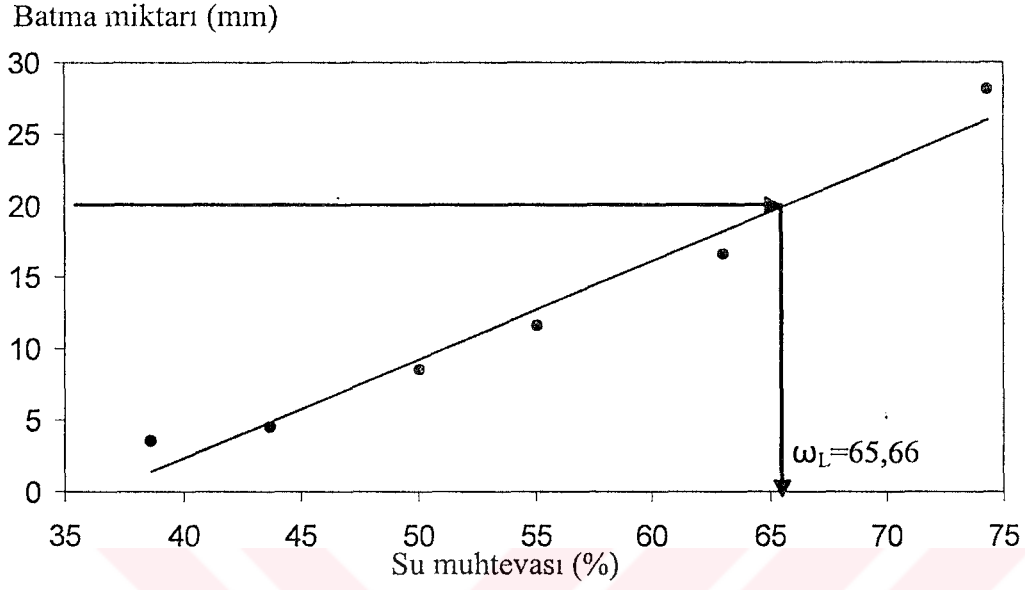


Şekil 4.29. 1 Nolu kilin 1000⁰C'deki likit limit grafiği

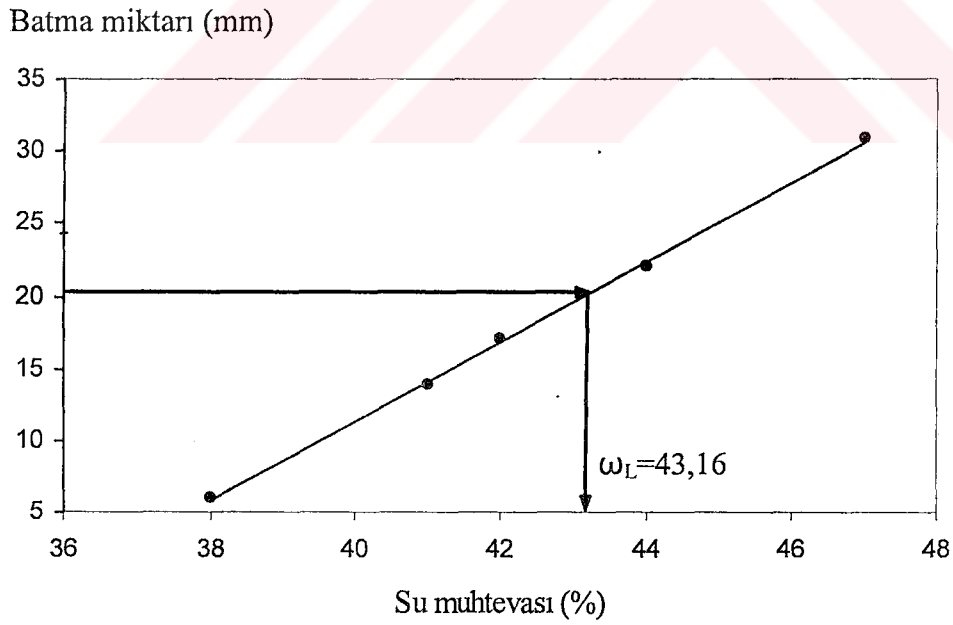
Batma miktarı (mm)



Şekil 4.30. 2 Nolu kilin 100⁰C'deki likit limit grafiği

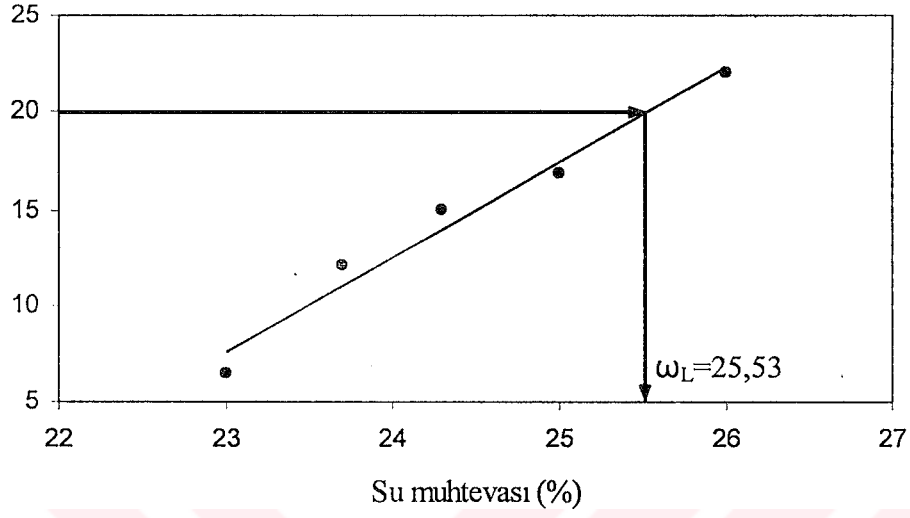


Şekil 4.31. 2 Nolu kilin 200⁰ C'deki likit limit grafiği



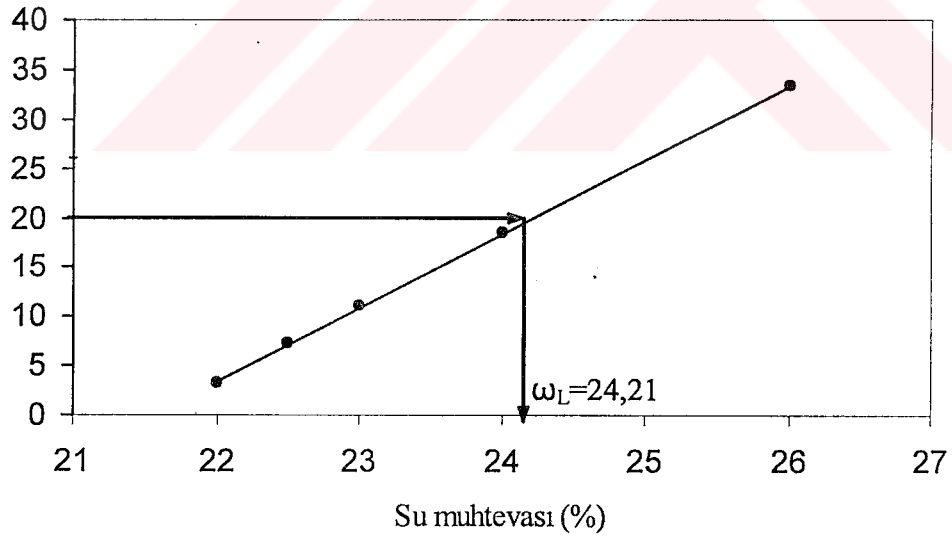
Şekil 4.32. 2 Nolu kilin 250⁰ C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)

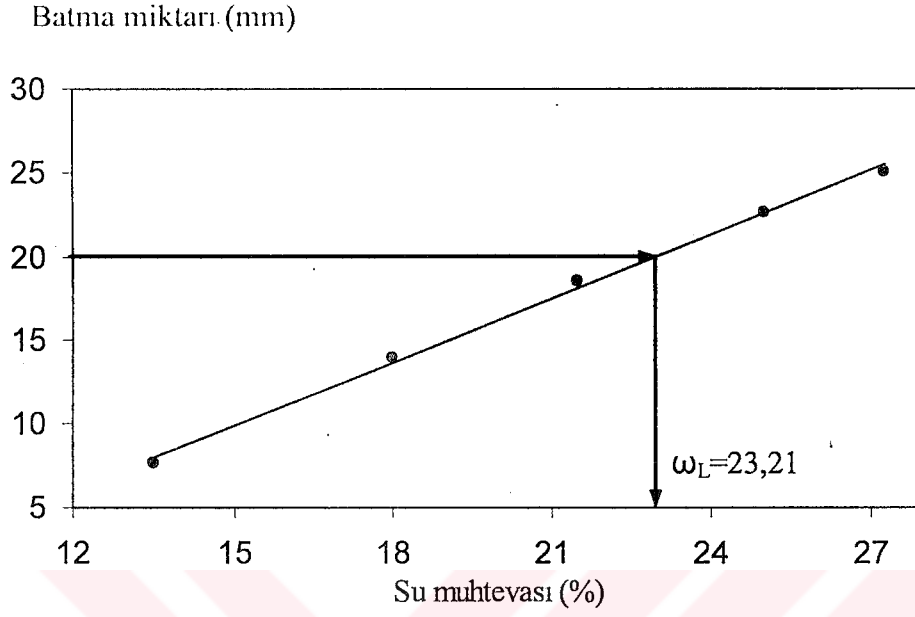


Şekil 4.33 :2 Nolu kilin 300⁰C'deki likit limit grafiği

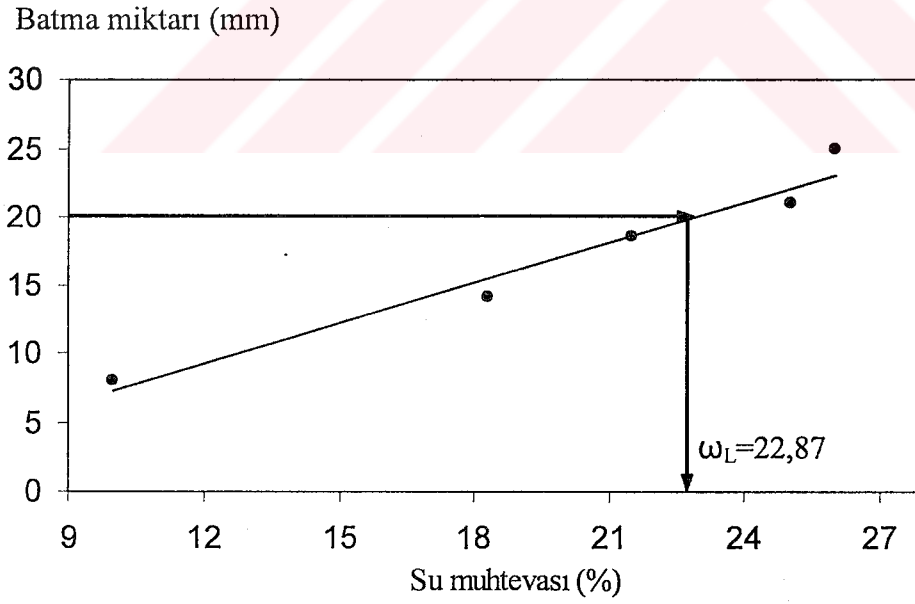
Batma miktarı (mm)



Şekil 4.34. 2 Nolu kilin 400⁰C'deki likit limit grafiği

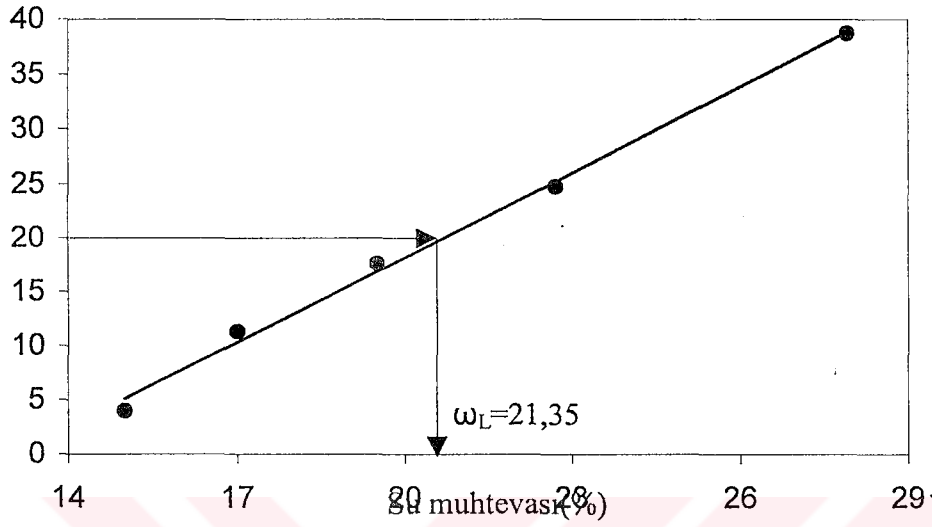


Şekil 4.35. 2 Nolu kilin 500⁰ C'deki likit limit grafiği



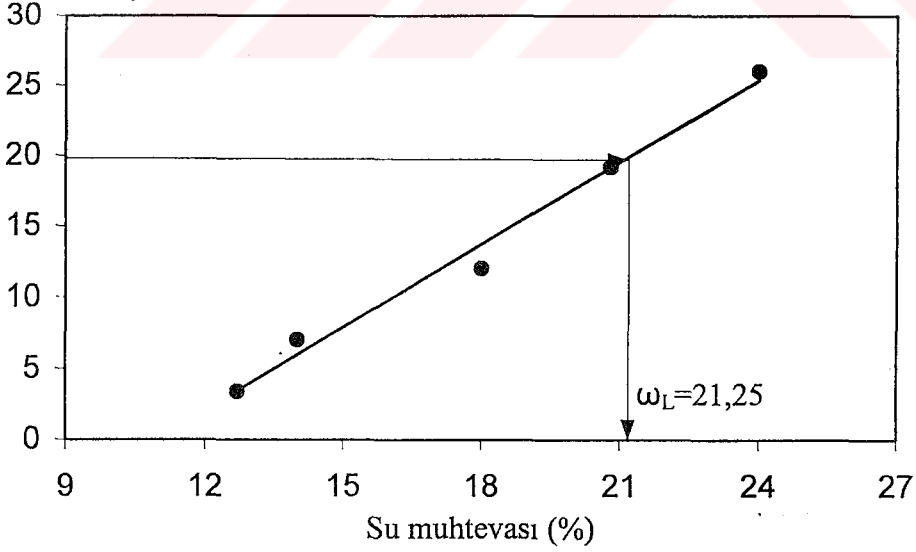
Şekil 4.36. 2 Nolu kilin 600⁰ C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)



Şekil 4.37. 2 Nolu kilin 800°C'deki likit limit grafiği

Batma miktarı (mm)



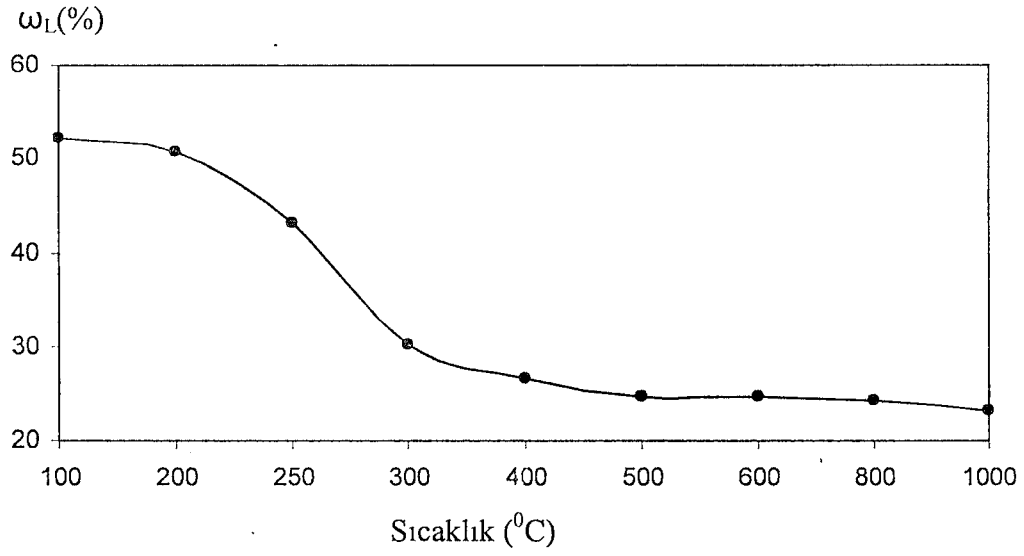
Şekil 4.38. 2 Nolu kilin 1000°C'deki likit limit grafiği

Bu grafiklerden elde edilen likit limiti değerleri ile lineer regresyon analizlerinden belirlenen regrasyon katsayıları (A ve B) ve korelasyon katsayıları (R) çizelge 4.7 de verilmiştir.

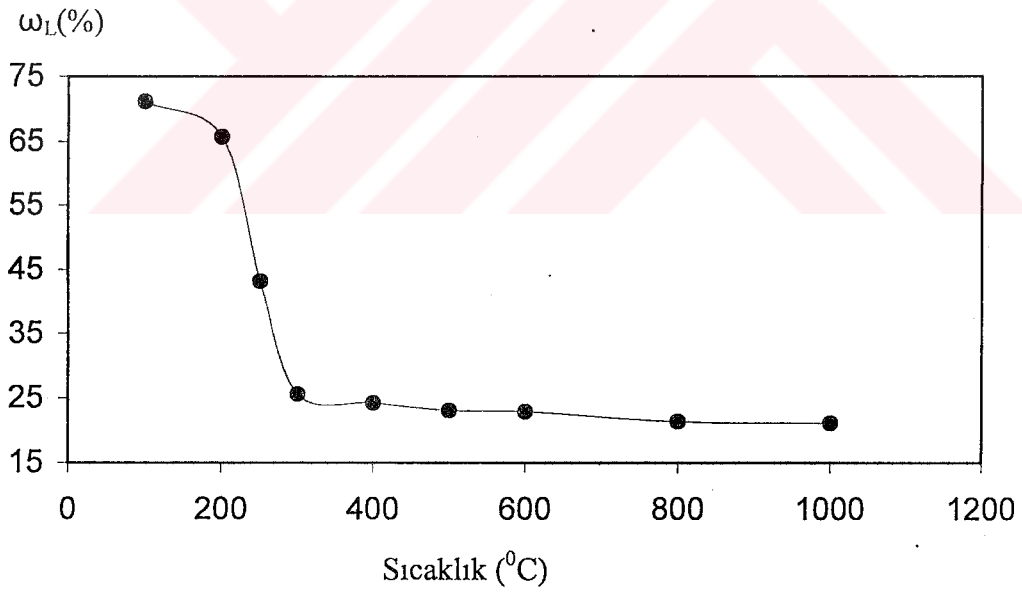
Çizelge 4.7. Likit limiti ve lineer regresyon analiz sonuçları

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı Kil				2 Numaralı Kil			
	$\omega_L(\%)$	A	B	R	$\omega_L(\%)$	A	B	R
100	53,11	1,1761	-42,467	0,9721	71,15	0,7572	-33,878	0,9995
200	50,61	2,4474	-103,87	0,9925	65,66	0,6886	-25,212	0,9835
250	43,02	2,0210	-66,935	0,9963	43,16	2,7513	-98,736	0,9995
300	30,08	4,6774	-120,69	0,9998	25,53	4,8848	-104,73	0,9861
400	26,63	3,6045	-75,988	0,9931	24,21	7,5000	-161,61	0,9999
500	24,67	4,5867	-93,157	0,9994	23,21	1,2617	-9,0323	0,9984
600	24,64	2,2986	-36,646	0,9951	22,87	0,9946	-2,7505	0,9776
800	24,43	10,200	-228,20	0,9896	21,35	2,6148	-34,114	0,9979
1000	23,38	3,1253	-53,059	0,9992	21,25	1,9401	-21,209	0,9931

Çizelge 4.7. deki verilere dayanılarak likit limitin sıcaklıkla değişim grafikleri sırası ile şekil 4,39-40 da verilmiştir.



Şekil 4.39. Likit limit-sıcaklık değişim grafiği (1 Nolu kil)



Şekil 4.40. Likit limit-sıcaklık değişim grafiği (2 Nolu kil)

Değişik sıcaklıklar için belirlenen likit limitin, 100°C deki değere göre değişim oranları hesaplanarak çizelge 4.8. de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Likit limit değişim oranları

Sıcaklık (°C)	1 Nolu kil için $\omega_L(\%)$ değişim	2 Nolu kil için $\omega_L(\%)$ değişim
100	-	-
200	-4,71	-7,72
250	-19,00	-39,34
300	-43,36	-64,12
400	-49,86	-65,97
500	-53,55	-67,38
600	-53,61	-67,86
800	-54,00	-69,99
1000	-55,99	-70,13

Yukarıdaki şekiller ve çizelgeye incelendiğinde;

1. Likit limitin her iki kil içinde sıcaklık artışı ile sürekli olarak azaldığı,
2. 100-300°C arasında likit limitin azalma hızının oldukça fazla olduğu,
3. 300°C den sonra likit limitin sıcaklık artışından daha az etkilendiği,
4. Her iki kil için 400°C den sonra likit limit değerlerinin birbirine yaklaşmakta (%21-25 arasında) olduğu görülmektedir.

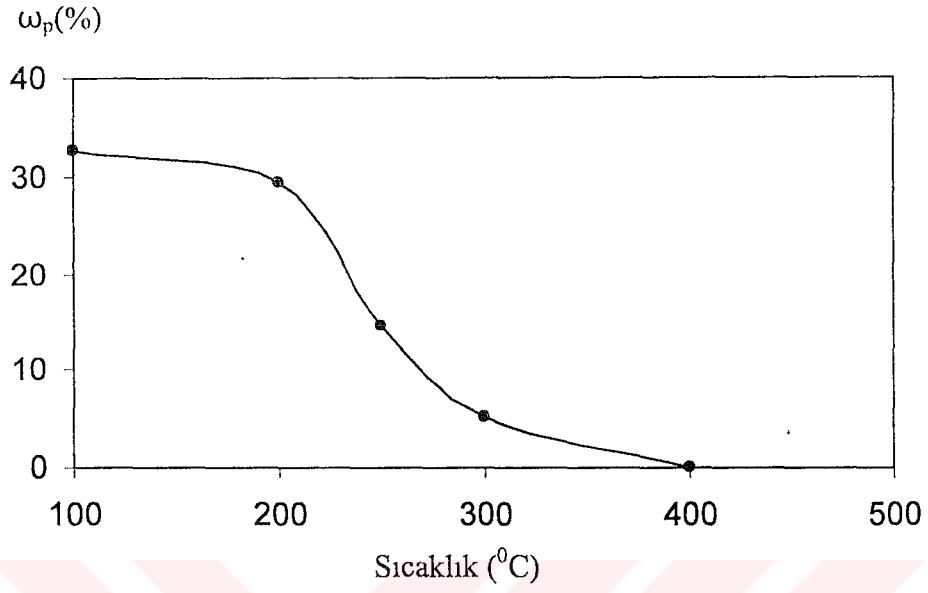
4.3. Plastik Limit Deneyleri

İki farklı kil örnekleri için deney programında belirtildiği ve bölüm 3.4.3. de anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Seçilen sıcaklık dereceleri için ayrı ayrı yapılan her bir deney; değişik su muhtevaları için beş kez tekrarlanarak 3mm çapa karşılık gelen su muhtevası (ω) noktaları belirlenerek, bu noktaların ortalaması alınıp plastik limitler bulunmuştur. Ve her sıcaklık derecesine karşılık gelen plastik limit değerleri bir tablo haline getirilmiştir (çizelge 4.9). 400°C den sonra kil örneklerinin plastik davranış gösterme özellikleri kaybolmuştur.

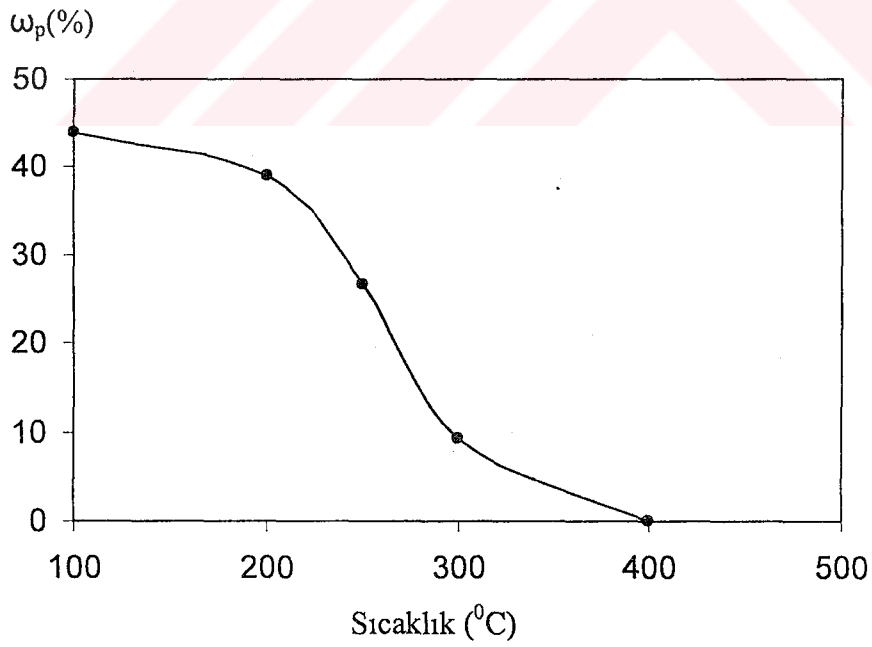
Çizelge 4.9. Plastik limit deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı Kil	2 Numaralı Kil
	Plastik limit (%)	Plastik limit (%)
100	32,70	44,00
200	29,25	39,00
250	14,52	26,50
300	5,20	9,30
400	yok	yok

1 ve 2 numaralı killer için plastik limitin sıcaklıkla değişim grafikleri çizilmiş ve şekil 4.41-42 de verilmiştir.



Şekil 4.41. Plastik limit-sıcaklık değişim grafiği (1 Nolu kil)



Şekil 4.42. Plastik limit-sıcaklık değişim grafiği (2 Nolu kil)

Değişik sıcaklıklar için belirlenen plastik limitin, 100°C deki değere göre değişim oranları hesaplanarak çizelge 4.10. de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Plastik limitin değişim oranları

Sıcaklık (°C)	1 Nolu kil için ω_L (%) değişim	2 Nolu kil için ω_L (%) değişim
100	-	-
200	-10,55	-11,36
250	-55,60	-39,77
300	-84,10	-78,86
400	-100,00	-100,00

Yukarıdaki şekiller ve çizelge incelendiğinde plastik limitin her iki kil içinde sıcaklık artışı ile sürekli olarak azalmakta olduğu, 200-400°C arasında azalma hızının oldukça fazla olduğu ve 400°C den sonra plastiklik özelliğini kaybettiği görülmektedir.

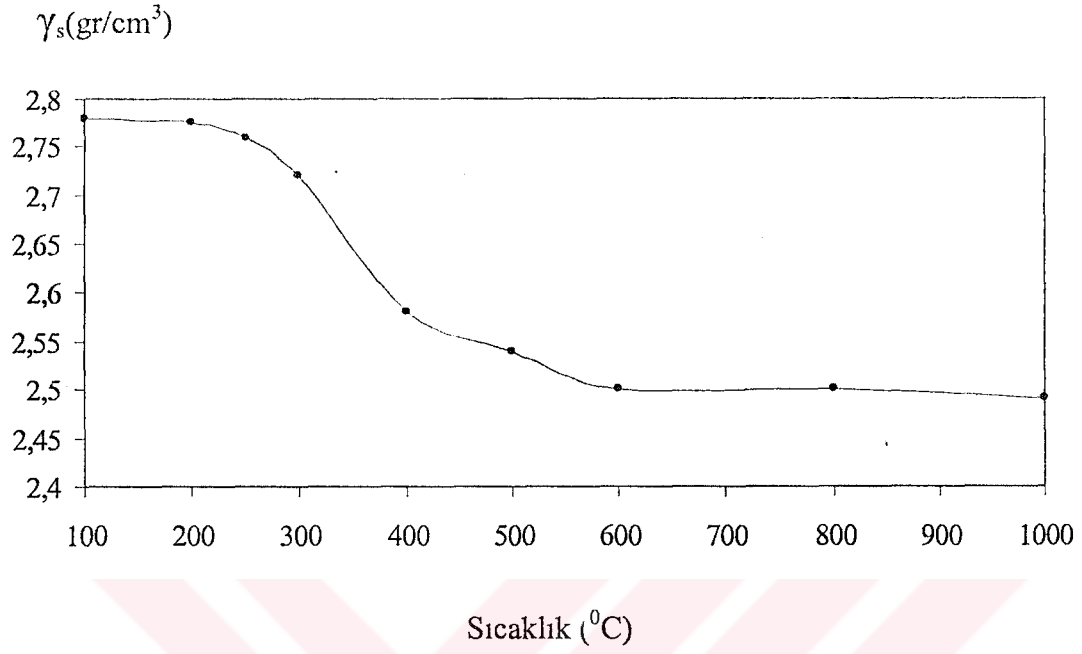
4.4. Tane Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

İki farklı kil örnekleri için deney programında belirtildiği ve bölüm 3.4.4. de anlatıldığı şekilde piknometre şişesi kullanılarak yapılmıştır. Seçilen sıcaklık dereceleri için ayrı ayrı yapılan her bir deney; değişik malzeme miktarları için altı kez tekrarlanıp tane birim hacim ağırlıklar belirlenmiş ve bunların ortalaması alınarak zeminin tane birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Her iki kil için belirlenen tane birim hacim ağırlık değerleri tablo haline getirilmiştir (çizelge 4.11).

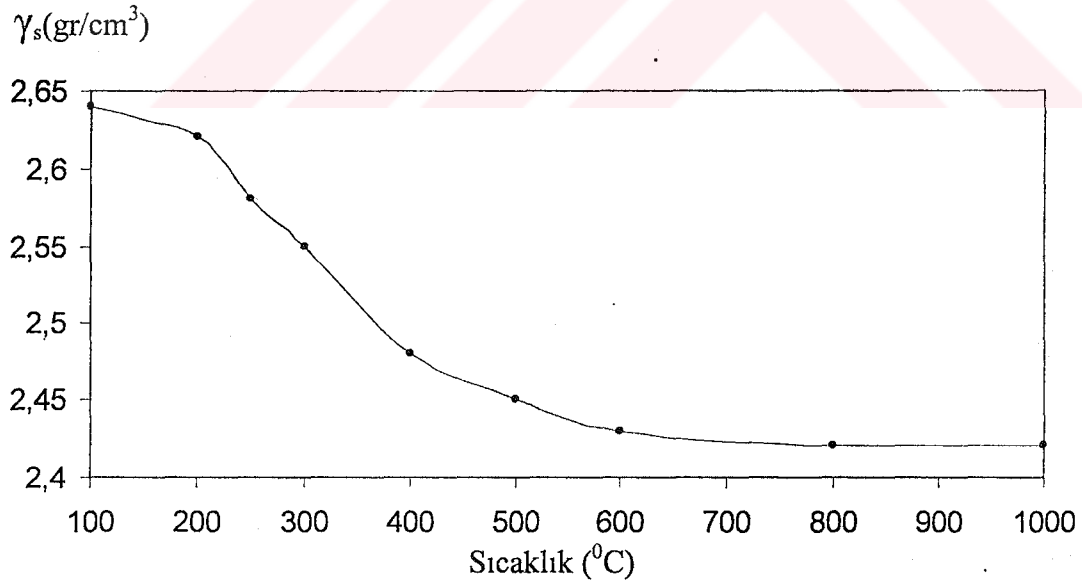
Çizelge 4.11. Tane birim hacim ağırlık deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı Kil	2 Numaralı Kil
	γ_s (gr/cm ³)	γ_s (gr/cm ³)
100	2,78	2,64
200	2,78	2,62
250	2,76	2,58
300	2,72	2,55
400	2,58	2,48
500	2,54	2,45
600	2,50	2,43
800	2,50	2,42
1000	2,49	2,42

1 ve 2 numaralı killer için çizelge 4.4 deki veriler kullanılarak sıcaklık tane birim hacim ağırlığın sıcaklıkla değişim grafikleri çizilmiş ve şekil 4.43-44 de verilmiştir.



Şekil 4.43. Tane birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafiği (1 Nolu kil)



Şekil 4.44. Tane birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafiği (2 Nolu kil)

Değişik sıcaklıklar için belirlenen tane birim hacim ağırlıkların, 100°C deki değere göre değişim oranları hesaplanarak çizelge 4.12. de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Tane birim hacim ağırlıkların sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	1 Nolu kil için γ_s (%) değişim	2 Nolu kil için γ_s (%) değişim
100	-	-
200	0,00	-0,76
250	-0,72	-2,27
300	-2,16	-3,41
400	-7,19	-6,06
500	-8,63	-7,20
600	-10,07	-7,95
800	-10,07	-8,33
1000	-10,43	-8,33

1 ve 2 numaralı kil için tane birim hacim ağırlık-sıcaklık değişim grafikleri ve çizelge 4.12. incelendiğinde tane birim hacim ağırlık değerlerinin 200-400°C arasında hızlı bir düşüş yaptığı, 200-600°C arasında normal bir düşüş yaptığı ve 600°C den sonra düşüşün çok az olduğu neredeyse sabit bir değer olduğu görülmektedir.

4.5. Kil Ağırlığının Isı İle Değişim Deneyleri

Deneyde kullanılan killerin organik malzeme içeriğini belirlemek ve 400°C ye kadar kuru ağırlığın değişimini belirlemek amacı ile; İki farklı kil örnekleri için oda sıcaklığında (20°C) bulunan malzeme tartılmış, daha sonra 100 ve 400°C lerde 24 saat bekletilip desikatörde soğutulduktan sonra tekrar tartılan malzemenin sıcaklıkla ağırlığının değişimi incelenmiştir ve bu değişim çizelge 4.13 de verilmiştir.

Killi zeminlerdeki organik malzeme içeriği (O);

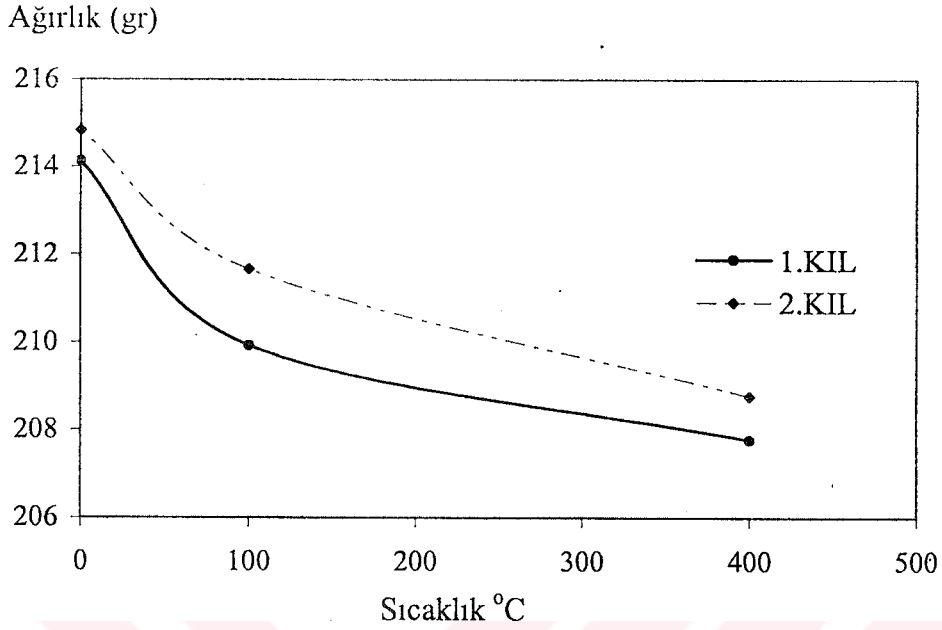
$$O = \frac{W_{K100} - W_{K400}}{W_{K100}} \times 100 \quad (4.1)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir.

Çizelge 4.13. Ağırlığının sıcaklıkla değişimi.

Sıcaklık (°C)	1 Numaralı Kil	2 Numaralı Kil
	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)
20	214,13	214,84
100	209,92	211,66
400	207,77	208,76
O (%)	1,024	1,370

Çizelge 4.13 den faydalanarak ağırlığının sıcaklıkla değişim graf iği çizilmiş, şekil 4.45 de verilmiştir.



Şekil 4.45. 1 ve 2 Nolu kil için ağırlık- sıcaklık değişim grafiği

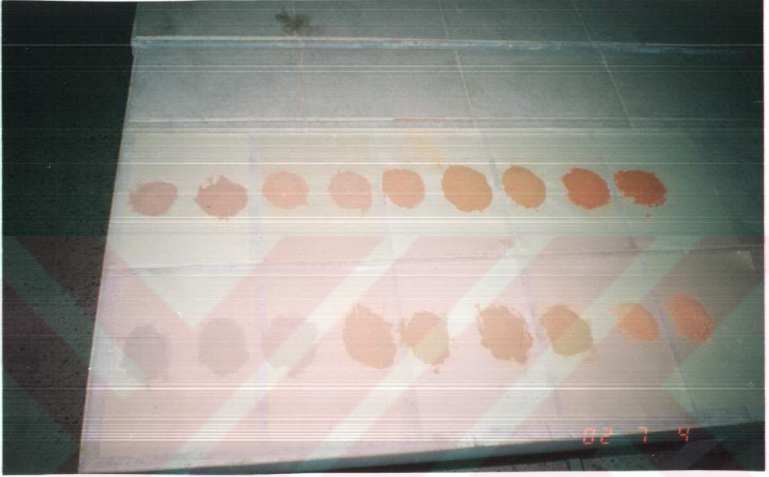
100 ve 400°C için belirlenen likit limitin, 20°C deki değere göre değişim oranları hesaplanarak çizelge 4.8. de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Ağırlığın sıcaklıkla değişim oranları

Sıcaklık (°C)	1 Nolu kil için % ağırlık değişimi	2 Nolu kil için % ağırlık değişimi
20	-	-
100	-1,97	-1,48
400	-2,97	-2,83

1 ve 2 numaralı kil için ağırlık-sıcaklık değişim grafikleri ve çizelge 4.14 incelendiğinde sıcaklık arttıkça ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Ayrıca deneyler yapılırken; killerin 400°C ve üzeri sıcaklıklarda yapışkanlığını kaybettiği (özellikle avuç içerisinde sıkıldığında iz bırakmadığı) ve renklerinin de gittikçe koyulaştığı (şekil 4.46) gözlemlenmiştir



Şekil 4.46. Sıcaklık artışı ile örneklerin renk değişimleri (üst sıra 2 nolu kil, alt sıra 1 nolu kil 100°C den 1000°C ye doğru)

Plastik limit sıcaklık artışı ile her iki kil içinde hızla düşmekte ve 400°C likit limit ve plastik limitlerdeki azalmalar incelendiğinde, killi zeminlerde 400°C den sonra kohezyon ortadan kalkmakta, zemin plastik davranışın olmadığı kohezyonsuz zemin gibi davranmaktadır.

Tane birim hacim ağırlık, her iki kil içinde 600°C ye kadar hızlı bir şekilde, 1 nolu kilde 2,78 gr/cm³ değerinden, 2,50 gr/cm³ değerine, 2 nolu kilde ise 2,64 gr/cm³ değerinden 2,43 gr/cm³ değerine düşmektedir. Isı artışı ile tane birim hacim ağırlıktaki azalma ve kohezyon ortadan kalkması, ısıtılmış killerin çimento gibi bağlayıcılarla birlikte kullanılabilirliğinin değişik yönleri ile araştırılması gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Acar, M., H. Demiröz, A., Maraşlı, Z. ve Uzer, A. U., 2001. Konya II Organize Sanayi Bölgesi Kilinin Geoteknik Özellikleri 10. Ulusal Kil Sempozyumu 19-22 Eylül 2001,403-511, Konya
- Alcoer, C. and Chowdhury, H., 1993. Experimental Study of an Environmental Remediation of Gulf Coast Crude-Oil Contaminated Soil Using Low-Temperature Thermal Treatment. Proceedings of the 1993 Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, 723-724
- Akinmusuru, J., 1994. Thermal Conductivity of Earth Blocks. Journal of Materials in Civil Engineering, 6 (3), 341-351.
- Anonim, 1987. Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, TS 1900, Türk Standartları, 153
- Anonymous, 1994. Standard Test Method for laboratory Compaction Characteristics of Soil. Annual Book of ASTM Standards, ASTM D 1557-91, 118-125
- Anonymous, 1989. Standard Test Methods for Liquid limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards, ASTM D 4138, 279-289
- Anonymous, 2002. The Clay Minerals Society <http://www.cms.lanl.gov>
- Attarberg, A., 1911. Über Die Physikalische Bodenuntersuchung und Über Die Plastizität der Tone, Int. Mitt. für Bodenkunde, Vol. 1, pp.10-43
- Capper, P.L. and Cassie, W. F., 1984. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği. Çağlayan Kitapevi, 350, İstanbul
- Casagrande, A., 1932c The Structure of Clay and Its Importance in Foundation Engineering. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, April; reprinted in Contributions to Soil Mechanics 1925-1940, BSCE, pp. 257-276
- Das, B. M. Advanced soil mechanics. McGraw-Hill book company, 511, Washington
- Esengün, A., 2001 Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü master tezi, 66, Erzurum
- Farag, I., 1993. Simulating Hazardous Waste Incineration. Chemical Engineer, 538, 11-16
- Genç, S., 1987. Mineraller-Kayaçlar, Jeolojik Yapılar ve Saha Jeolojisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi basım evi, 221, Trabzon

- Grim, R. E., 1959. Physiochemical Properties of Soils, Clay Minerals, J.Soil Mech. Found. Div.,ASCE, vol. 85,no.SM2
- Holm, T., and Valsangkar, A. 1993. Lightweight Agregate Soil Mechanisc: Properties and Applications. Transportation Research Record, 1422, 7-13
- Holtz, R. D. and Kovacs, V. D. An Introduction to Geotechnical Engineering.Prentice Hall, Englewood Cliffs, 733, New Jersey,
- Joshi, R. C. Horsfield. D. Nagaraj, T. S. and Achari, G. Effect Of Heat Treatment on Strength of Clays, Journal Of. Geotechnical Engineering. 120 (6), 1080-1088.
- Karabüyük, E.,2001. Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Bentonitin Kullanılmasının Geoteknik Özelliklere Etkisi Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi, 66, Erzurum
- Ma, C. and Hueckel, T., 1992. Effects of Inter-Phase Mass Transfer in Heating Clays, a Mixture Theory, Int. Jour. Of. Eng. Science, 30 (11), 1567-1582.
- Majed, M. Abu-Zereig, Nabil M. Al-Akhras, and Mousa F. Atom, 2001. Influence of heat tireatment on the behavior of clayey soils. Applied Clay Science, 20, 129-135.
- Önalp, A., 1982. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi cilt1. Okan ofset matbaacılık, 593, Trabzon
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi cilt2. Okan ofset matbaacılık, 631, Trabzon
- Önalp, A., 1997 Geoteknik Bilgisi 1, Sakarya Üniversitesi Yayın no:27
- Özaydın, K.,1997. Zemin Mekanığı. Birsen yayınevi, 261, İstanbul
- Özüer, A. B.,1975. Çatlaklı Grovak Ve Killi Şistlerin Mühendisli Özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Doktor Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 115, İstanbul
- Penner, E. 1963. Sensitivity in Leda Clay .Nature, Vol.197, No.4865, pp. 347-348
- Proctor, R.R. 1933. Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering. News-Record, Vol. 111, nos. 9, 10, 12 and 13
- Tuğlu, H., Balkır, T., 1975. Zeminlerin Fiziksel Özellikleri. Karayolları, Araştırma Fen Heyeti Müdürlüğü, 42, Ankara
- Uzuner, B.A., 1995. Temel Mühendisliğine Giriş. Derya kitapevi, 179,Trabzon
- Uzuner, A. B.,2001. Temel Zemin Mekanığı. Teknik yayınevi, 412. Trabzon

- Ülker, R., 1966. İstanbul Boğazı Çevresindeki Killerin Geoteknik Özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Doktor Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi 119, İstanbul
- Varlakov, A. Sobolev, I., Barinov, A, Dimitiriev, S., Karlin, S. and Flit, V. 1997. Method of Treatment of Radioactive Silis and Soils. Proc. Of the 1996 MRS Fall Meeting, Material Research Society, Moskow, Rusia, 591-594.
- Yang, L and Farouk, B., 1995. Modelling of Solid Particles Flow and Heat Transfer in Rotary Kiln Calciners. Prooc.of the 1995 30 th. National Heat Transfer Conf., Portland Oregon, American Society of Mechanical Engineering, New York, NY, 11-19.
- 

ÖZGEÇMİŞ

Erzurum'da 1978 yılında doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1995 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümü'nden 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

