Magnezyum Klorür Solüsyonunun Problemli Kil Zeminin Şişme, Dispersibilite ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi

Aykut Açaz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2011

The Effect of Magnesium Chloride Solution on Swell, Dispersibilite and Strength Characteristics of Problematic Clay Soil

Aykut Açaz

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2011

Magnezyum Klorür Solüsyonunun Problemli Kil Zeminin Şişme, Dispersibilite ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi

Aykut Açaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hasan TOSUN

Ocak 2011

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Aykut Açaz'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Magnezyum Klorür Solüsyonunun Problemli Kil Zeminin Şişme, Dispersibilite ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hasan TOSUN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Hasan TOSUN (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Volkan OKUR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Kireç, uçucu kül, endüstriyel atıklar, potasyum nitrat, kalsiyum klorür ve fosforik asit gibi farklı katkılar kullanılarak, şişen ve dispersif zeminlerin iyileştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar uzun yıllardan beri yapılmaktadır. Kullanılan katkıların performansı yapılan çalışmalarda ya şişme potansiyelinin iyileştirilmesi yönünden ya da dispersibilitenin iyileştirilmesi açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, diğer araştırmalardan farklı olarak, iyileştirme amaçlı kullanılan magnezyum klorür solüsyonunun kil zeminlerin şişme, disperisiblite ve dayanım karakteristikleri üzerindeki etkisi birlikte değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Afyon ilinden alınmış ince taneli zemin üzerinde kuru ağırlıkların farklı oranlarında (% 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13) magnezyum klorür ($MgCl_2$) solüsyonu katkısı ile zemin stabilizasyonu araştırılmıştır. Örnekler üzerinde önce tanımlama ve sınıflama deneyleri (elek analizi, kıvam limiti, özgül ağırlık deneyi ve kompaksiyon deneyi) gerçekleştirilmiştir. Buradan çıkan sonuçlar ışığında numunelere şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyi, dispersibilite özelliğini belirlemek amacıyla iğne deliği ve dağılma deneyi, dayanım karakteristiklerini belirlemek amacıyla da farklı kür süreleri içinde (1 günlük, 7 günlük, 28 günlük) konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksen deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda hazırlanmış numunelere üzerinde mikro yapıyı incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskop deneyi (SEM) ve XRD deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak, $MgCl_2$ solusyonunun ve numunelerde uygulanan kürlerin aynı anda zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda magnezyum klorür solüsyonu katkısıyla zeminin şişme ve dispersibilite karakteristiklerini iyileştirdiği görülmüştür. Dayanım parametrelerinde ise kısa dönemde etkinin çok fazla olmadığı ancak 28 günlük kür süresinde dayanımın önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde magnezyum klorür solüsyonunun problemli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği ve özellikle %7 katkı seviyesinde etkin bir iyileştirme sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kil, şişme, disperisiblite, dayanım, magnezyum klorür solüsyonu

SUMMARY

Comprehensive studies have done for many years for the improvement of swell and dispersive soils by using different additives such as lime, fly ash, industrial wastes, potassium nitrate, calcium chloride and phosphoric acid. In previous studies the performance of used additives evaluated improving the terms of the swelling potential or in terms of improving dispersibility. In this study, the effect was evaluated in terms of magnesium chloride solution used for stabilization on swell, dispersibility and strength characteristics of clay soils.

The scope of this study is investigation of soil stabilization with different ratio of dry weight magnesium chloride solution additives (% 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13) on the fine-grained soil from the province of Afyon. Firstly the identification and classification tests (sieve analysis, consistency limits, specific gravity and compaction tests) were carried out on the samples. The light of these results, swell percentage and swell pressure tests, to determine dispersibility property pinehole and disintegration tests, in different curing time (1 day, 7 day and 28 day) undrained and unconsolidation test to determine characteristics of the strength were applied. At the same time on the prepared samples SEM and XRD tests were applied to examine the micro-structure. Using the obtained data, the effect of the magnesium chloride solution and applying cure to the specimens investigated on the soil stabilization.

As a result, additive of magnesium chloride solution was found that improve the swell and dispersibilty chracteristics of the soil. Effect on the parameters of the strength at short-term is not too much but at 28 day curing time the strength were visibly increased. These results suggest that magnesium chloride solution can be used on stabilization of the problematic soil and especially at 7% contribution level an effective result was achieved.

Keywords: Problematic clay soils, clay, stabilization, Magnesium chloride, swelling, dispersibility

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalısmamın her aşamasında beni yölendiren, değerli görüş ve katkılarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Hasan TOSUN ’a sonsuz şükran ve en derin saygılarımı sunarım.

Yapmış oldukları yardımlardan dolayı Eskisehir Osmangazi Üniversitesi İnsaat Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarından Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ’e, Arş. Gör. Dr. Hasan SAVAŞ’a tesekkür ederim. Yüksek lisans tez çalısmamın her aşamasında bana götermiş oldukları anlayış ve sabırdan dolayı değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……v
SUMMARY…….vi
TESEKKÜR……...vii
SEKİLLER DİZİNİ……..xii
ÇİZELGELER DİZİNİ ……xv

1.GİRİS 1
1.1 Genel.....1
1.2 Amaç.....3
1.3 Kapsam…..…….…..3

2. KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ…….....4
2.1 Kil Zeminlerin Mineral Yapısı….....4
2.2 Kil Minerallerinin Sınıflandırılması……..…….9
2.3 Kil Zemin Yapısına Etki Eden Faktörler.....10
2.4 Kil Minerallerinin Tanımlanması….....14

3. PROBLEMLİ KİL ZEMİNLER……..…….....16
3.1 Dispersif Zeminler…….....16
3.1.1 Dispersiyon mekanizması……..……..……19
3.1.2 Dispersif zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması……..……21
3.1.3 Dispersibiliteyi etkileyen faktörler……..……..……...25
3.1.3.1 Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası..…...…….…27
3.1.3.2 Kilin minerolojik yapısı…….……27
3.1.3.3 Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzlar……....……28
3.1.3.4 Sıkılık ve su muhtevası……29
3.2 Şişen Zeminler.....30
3.2.1 Şişme mekanizması……...……31
3.2.2 Şişme potansiyeli……33

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.1.1 Şişme yüzdesi…….....33
3.2.1.2 Şişme basıncı…….34
3.2.3 Şişme davranışına etki eden faktörler……..35
3.2.4 Şişen zeminlerin sınıflandırılması…….....37

4. PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU……..……..40
4.1. Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu……..40
4.2. Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu……....42
4.2.1. Şişen zeminlerin kazılması ve değiştirilmesi……..42
4.2.2. Sıkışma kontrolu ve sürşarj yükleme……..43
4.2.3. Ön ıslatma……...44
4.2.4. Kimyasal katkılarla stabilizasyon…….....44
4.3. Magnezyum Klorürün Yapısı…….....46
4.3.1. Magnezyum klorürün üretimi ve avantajları…….....47
4.3.2. Kullanım alanları……50
4.3.2.1. Yemeklerde kullanımı…….....51
4.3.2.2. Anti-buz çözücü olarak kullanımı……..…….51
4.3.2.3. Toz kontrol uygulamalarında kullanımı…….....55
4.3.2.4. Hidrojen depolamada kullanımı……..…….....56
4.3.2.5. Tıbbi kullanımı……..……..56
4.3.2.6. Deniz Akvaryumunda kullanımı…….57
4.3.2.7. Toksiloji……...……...57
4.4. Zemin Stabilizasyonunda Magnezyum Klorür Kullanımı……...……..57

5. MALZEME VE YÖNTEM……...……...62
5.1. Malzeme……..……...63
5.1.1. Zemin……..63
5.1.2. Magnezyum klorür solüsyonu……...…….67

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2. Deneysel Çalışma……..…….....67
5.2.1. Elek analizi……69
5.2.2. Kıvam limitleri…….....69
5.2.2.1. Likit limit deneyi……69
5.2.2.2. Plastik limit deneyi…….....70
5.2.3. Özgül gravite deneyi…….....70
5.2.4. Standart proktor kompaksiyon deneyi…….....71
5.2.5. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri……..72
5.2.6. Dispersibilite deneyleri…….....73
5.2.6.1 Dağılma deneyi…….....74
5.2.6.2. İğne deliği deneyi…….....74
5.2.7. Üç eksenli basınç deneyi…….....76
5.2.8. Mikroyapıyı belirleme yönelik yapılan deneyler.....78
5.2.8.1 XRD deneyleri.....78
5.2.8.2 ESEM görüntü analizleri.....78

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA……..…….....79
6.1. Elek Analizi Deney Sonuçları…….....79
6.2. Kıvam Limit Deneyleri Sonuçları…….....81
6.3. Özgül Gravite Deney Sonuçları…….....82
6.4. Kompaksiyon Deney Sonuçları…….....84
6.5. Şişme Deney Sonuçları…….....87
6.5.1. Şişme yüzdesi deney sonuçları…….....87
6.5.2. Şişme basıncı deney sonuçları…….....90
6.6. Dispersibilite Deney Sonuçları…….....93
6.6.1. Dağılma deney sonuçları…….....94
6.6.2. İğne deliği deney sonuçları…….....97
6.7. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları…….....99

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.8. Mikroyapıyı Belirleme Yönelik Yapılan Deney Sonuçları……..102

6.8.1 Taramalı elektron mikroskop analiz (SEM) sonuçları…….....103

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…….....106

KAYNAKLAR…….....110

EKLER

Ek.1. Tanımlama Deney Sonuçları

Ek.2. Örneklerin Kompaksiyon Deney Sonuçları

Ek.3. Örneklerin Üç Eksenli Deney Sonuçları

Ek.4. XRD Deney Sonuçları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi……...6

Şekil 2.2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi…….6

Şekil 2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi……8

Şekil 2.4. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi…….8

Şekil 2.5. Kil-elekrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı…….12

Şekil 2.6. Çift tabakalar üzerinde sistem özelliklerindeki değişikliklerin etkileri katyon konsantrasyonu……...…….…...13

Şekil 3.1. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler……...18

Şekil 3.2. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi…….20

Şekil 3.3. Kalsiyum katyonunun topaklanmış yapı oluşumuna etkisi…….20

Şekil 3.4. Dağılma deneyi değerlendirme kriterleri…….....22

Şekil 3.5. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi……..23

Şekil 3.6. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi……...26

Şekil 3.7. Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler…….29

Şekil 3.8. Şişen zeminlerin neden olduğu zemin hasarı……..31

Şekil 3.9. Kil – su sistemi……32

Şekil 3.10. Zeminlerin şişme potansiyeline göre sınıflandırılması…….39

Şekil 3.11. Hacim değişikliği ve plastisite indeksi ilişkisi hakkında yapılan bazı çalışmaların kıyaslanması……..39

Şekil 4.1. Magnezyum Klorür…….47

Şekil 4.2. Alkim Cihanbeyli Tesisleri Bolluk Gölü- Konya……...48

Şekil 4.3. Magnezyum klorür üretim havuzları……...49

Şekil 4.4. Kaplamaya Yerleştirilen Ağızlıklarla Kimyasal Madde Uygulanması……...52

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. Magnezyum klorür solusyonu ile toz kontrolü uygulaması……56

Şekil 4.6. Magnezyum klorürün toz kontrolünde kullanımı……59

Şekil 4.7. İşlem görmemiş ve işlem görmüş kaplamasız yollar……..61

Şekil 5.1. Kil malzemenin elek analiz sonucu……..……...64

Şekil 5.2. Kil malzemesinin kompaksiyon sonuçları …….……65

Şekil 5.3. Kil malzemenin plastisite kartındaki yeri …….…65

Şekil 5.4. Katkısız kile uygulanan hidrometri analiz sonucu…....……66

Şekil 5.5. Limit deneyleri için hazırlanan numunelerin kür şekli..……70

Şekil 5.6. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması ve tartma işlemi……..…71

Şekil 5.7. Deney için numune hazırlığı ve uygulaması ……..……72

Şekil 5.8. Şişme deney sistemi…….……..73

Şekil 5.9. İğne deliği deney düzeneği……..75

Şekil 5.10. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı……..…75

Şekil 5.11. Üç eksenli basınç deney sistemi……...…77

Şekil 6.1. Değişen $MgCl_2$ oranına göre tane dağılımı……80

Şekil 6.2. Değişen $MgCl_2$ oranına göre limit değer dağılımı……..82

Şekil 6.3. Değişen $MgCl_2$ oranına göre özgül ağırlık değer dağılımı……..83

Şekil 6.4. Değişen $MgCl_2$ oranına göre w_{opt}- γ_{kmaks} grafiği……86

Şekil 6.5. Değişen $MgCl_2$ oranına göre şişme yüzdesi değişimi……88

Şekil 6.6. $MgCl_2$ katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme yüzdesi-zaman eğrileri…..89

Şekil 6.7. Değişen $MgCl_2$ oranına göre şişme basıncı değişimi……..91

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.8. $MgCl_2$ katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme basıncı-zaman eğrileri…...92

Şekil 6.9. Dağılma deneyi sonuçları……95

Şekil 6.10. İğne deliği deneylerinin toplu sonuçları……98

Şekil 6.11. Deney sonucunda oluşan numunelerden bir görünüm……....100

Şekil 6.12. Kür süresi-$MgCl_2$ oranının kohezyon değerine etkisi…….101

Şekil 6.13. Kür süresi-$MgCl_2$ oranının içsel sürtünme açısı değerine etkisi…….101

Şekil 6.14. Katkısız numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları……..104

Şekil 6.15. %7 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları…….……105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri……..7

Çizelge 2.2. Killerin kristal yapılarına göre sınıflandırılması……...……9

Çizelge 2.3. Kil minerallerinin sınıflandırılması…….....10

Çizelge 3.1. Deneylerin genel karşılaştırılması……...24

Çizelge 3.2. Dispersif zeminlerin tanımlanması için sınıflandırma sistemi……25

Çizelge 3.3. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri……..35

Çizelge 3.4. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler…….36

Çizelge 3.5. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi……36

Çizelge 3.6. Şişen koloid miktarı, plastisite indisi ve büzülme limitine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırması……38

Çizelge 3.7. Plastisite İndisine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırması……...….38

Çizelge 3.8. Raman tarafından geliştirilen şişen zemin sınıflandırması……..38

Çizelge 5.1. Malzemenin geoteknik parametreleri……..63

Çizelge 5.2. Kimyasal analiz sonuçları……...64

Çizelge 5.3. Kullanılan $MgCl_2$ solüsyonun özellikleri……67

Çizelge 5.4. Deneysel çalışma programı…….68

Çizelge 5.5. Zemin örneğinin fiziksel dispersibilite deney sonuçları……..74

Çizelge 6.1. Değişen $MgCl_2$ oranına göre tane dağılımı…….80

Çizelge 6.2. Değişen $MgCl_2$ oranına göre limit değer tablosu……81

Çizelge 6.3. Değişen $MgCl_2$ oranına göre özgül ağırlık değer tablosu……...83

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.4. Değişen $MgCl_2$ oranına göre kompaksiyon deney sonuçları……..85

Çizelge 6.5. Değişen $MgCl_2$ oranına göre şişme yüzdesi deney sonuçları……..87

Çizelge 6.6. Değişen $MgCl_2$ oranına Göre şişme basıncı deney sonuçları…….….90

Çizelge 6.7. Katkı miktarı ve kür süresinin kayma parametrelerine olan etkisi……....100

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Genel

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında proje sahalarındaki zeminler bazı durumlarda arzu edilen özellik ve kalitede değildir. Zayıf, şişebilen, dispersif, ileri derecede sıkışabilir nitelikte ve yüksek derecede geçirgen olabilirler. Bu tür durumlarda yapının ya da tesisin yerinin değiştirilmesi, istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin uzaklaştırılarak yerine elverişli zeminlerin getirilmesi düşünülebilir. Ancak yapı ve yapının yerini çoğu zaman sadece geoteknik ölçütler değil, başka koşullar da belirlemekte ve mühendis yapıyı belirlenen yerde tasarlamak durumda kalmaktadır. Bunun için uygun çözümlerden biri, yapının temelini zemindeki geoteknik şartlara göre ayarlamak veya zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektir. Bunlardan ekonomik olan bazen ikinci altarnatif olabilir. Uygun olmayan zeminlerin stabilizasyonunda genel olarak mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal olmak üzere başlıca dört tür iyileştirme metodu kullanılır. Bu yöntemlerin uygulanması ile zayıf zeminin dayanımını artırmak ve oturmaları azaltma olanağı vardır.

Problemli zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadırlar. Toprak yapılarda meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarda oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir.

Dünyanın birçok bölgesinde, özellikle de kurak ve yarı - kurak alanlarda şişen zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Genellikle aktif kil mineralleri ihtiva eden bu zeminler, kapiler yoldan su alarak büyük hacim değişikliklerine uğramakta, bilhassa yol, havaalanı gibi hafif yapılarda büyük hasarlar meydana getirmektedirler. Bu tür

zeminlerin şişme davranışlarının ve bunlara etkiyen faktörlerin önceden belirlenmesi ile meydana gelebilecek zararlar azaltılabilmekte, ya da tamamen önlenebilmektedir. Suya doygun olmayan bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak bünyelerine su alması ve buna bağlı olarak gelişen hacim artışının karşılanması ile ortaya çıkacak aşırı basınç, kilin "şişme" özelliği olarak tanımlanmaktadır. Genellikle yağışın az, buharlaşmanın fazla olduğu bölgelerde görülen bu killer, temel zemini olarak değerlendirildiklerinde, temel tabanında önemli ölçüde kaldırma basınçlarının oluşmasına neden olabilmektedir.

Şişen zemin problemleri ilk defa 1938 yılında ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) mühendisleri Oregan eyaletindeki Owyhee projesinde inşa edilen bir çelik sifon temelinde ters yönde çalışan yer değiştirmelerin oluştuğunu belirlemişlerdir (Chen, 1988). 1940'lı yıllardan sonra zemin üzerine doğrudan oturan beton yapıların inşasındaki hızlı artış, şişen zeminlerin neden olduğu hasarlarda da artışa sebep olmuştur. Bu artışta, temel zemininde yapılması gereken geoteknik çalışma eksikliğinin ve yapılan çalışmaların yetersizliğinin de etkili olduğu belirtilmelidir (D.A. Jones ve K.A. Jones, 1987). Ülkemizde inşa edilen hafif su yapılarında da oluşan bu tip problemler, genellikle projeler kapsamında yer alan sulama yapıları inşaatında yaşanmıştır (Tosun ve Kırmızıtaş, 1993) .

Kil zeminlerin şişme potansiyeli; farklı yöntemlerle azaltılabilmektedir. Önlemler arasında, zeminde inşaat öncesi şişmeyi sağlayacak şekilde ön ıslatma yapılması, sıkıştırma kontrolü ile zemin sıkılığının azaltılması, şişen zeminin şişmeyen zeminle değiştirilmesi, sürşarj uygulanması ve kimyasal katkıların kullanılması sayılabilir. Ayrıca su muhtevasını değiştirmeyecek şekilde gerekli temel izolasyonunun yapılması da, uygulamada başvurulan yöntemlerden birisidir (O' neill ve Poormayed, 1980; Tosun ve Sevinçli , 1994). Yöntem seçimi; verimliliği, ekonomisi ve kolay uygulanabilirliği yönünden değerlendirilmekte ve kullanılmaktadır.

Kil zeminlerde görülen bir diğer problem ise zeminin dispersif özellik göstermesidir. Yapısal olarak stabil olmayan bu zeminler kolayca dağılabilir ve yüksek derecede erozyona uğrayabilir. Dispersif kil zeminlerin su yapıları, dolgu barajlar ve yol dolguları yapımında kullanımı söz konusu ise, iyi tanımlanmalı ve uygun teknikler

ile yapım gerçekleştirilmelidir. Aksi durumda, sonu göçmelere kadar giden ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Kilin dispersibilite özelliğinden kaynaklanan erozyon; kilin minerolojisi, kimyasal yapısı ile zemin boşluklarındaki ve erozyona neden olan suyun içindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliğine ve miktarına bağlıdır.

1.2 Amaç

Bu tez kapsamında, Afyon' dan alınan yüksek şişme potansiyeline ve dispersibilite özelliğine sahip kil zemin üzerinde çalışılmıştır. Zemin üzerinde şişme ve dispersibilite özelliği $MgCl_2$ solusyonu ile iyileştirilmesi konusu incelenmiştir. Kilin farklı miktarlarda $MgCl_2$ solusyonu ile stabilize edilmesi durumunda çeşitli geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak, $MgCl_2$ solusyonunun ve numunelerde uygulanan kürlerin aynı anda zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

1.3 Kapsam

Bu çalışmada, Afyon'dan getirilen kilin $MgCl_2$ solüsyonu ile stabilizasyonu yönünde yapılan deneysel çalışmaları içermektedir. Bu kapsamda çalışmalar 3 aşamada yapılmıştır. İlk olarak zeminin tanımlama deneyleri yapıldı. İkinci aşamada zemin örnekleri üzerinde şişme, dayanım ve dispersibilite deneyleri gerçekleştirildi. Üçüncü aşamada ise zeminin katkısız ve optimum orandaki karışım yüzdesindeki minerolojik değişimler incelendi. Yapılan UU deneyi çerçevesinde $MgCl_2$ ihtiva edilen numuneler 0, 7 ve 28 günlük kür sonunda 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa'lık çevre basıncı altında oluşan değişimler incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda $MgCl_2$ solüsyonunun zeminin şişme, dispersibilite ve dayanım özelliklerinde istenen sonuçları verdiği görülmüştür.

BÖLÜM 2

KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Zemin mekaniğinde zeminler kaba daneli ve ince daneli olmak üzere iki grup altında incelenmektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 0,075 mm dane çapı sınırı kaba ve ince daneli zeminlerin sınırı olup, 200 Nolu (<0,075 mm) eleğin altına geçen kısım ince daneli zeminler olarak adlandırılmaktadır. İnce daneli zeminler ise kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır.

Kil hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir. Dane boyutu 2 mikron veya daha küçük olan kil mineralleri elektriksel kuvvetler dolayısıyla su ile olan etkileşimi sonucu geoteknik mühendisliği uygulamalarında diğer mineral türlerine göre daha fazla önem arz etmektedir. Kil, su ile karıştırıldığında hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahipken, pişirildiğinde büyük dayanım gösterebilen bir katıya dönüşür.

Killer sadece geoteknik mühendisinin ilgilendiği bir ortam olmayıp mühendislik yapılarında, tıpta, seramik endüstrisinde ve tarım alanlarında da bir malzeme olarak karşımıza çıkar. Killer dolgu barajlarda ve atık depolarında geçirimsizliğin sağlanması, göletlerin su tutması için ve kazıldığında kendini tutamayan zeminlere pelteleşebilir bulamaç halinde etkin destek sağlamak amacıyla kullanılır. İri malzemeye küçük oranda katıldığında bağlayıcılık görevi yapar. Ancak genelde kilin varlığı zemin ortamında önemli mühendislik sorunları yarattığından zemin ortamında istenmeyen bir malzemedir.

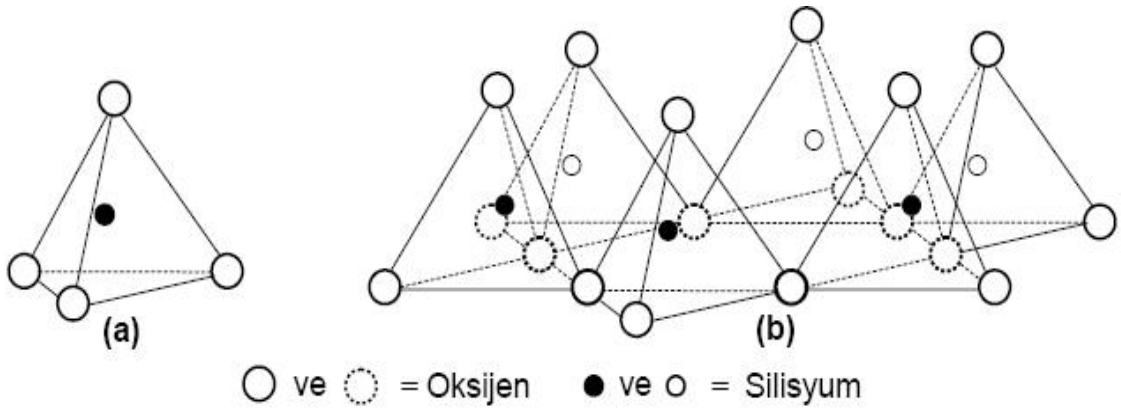
2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı

Kil mineralleri yapısı oldukça karmaşık alüminyum silikat kristalleridir [$Al_xSi_yO_w(OH)$]. Bu kristallerin yapısına göre üç ana gruba ayrılabilir ve bu gruplarda

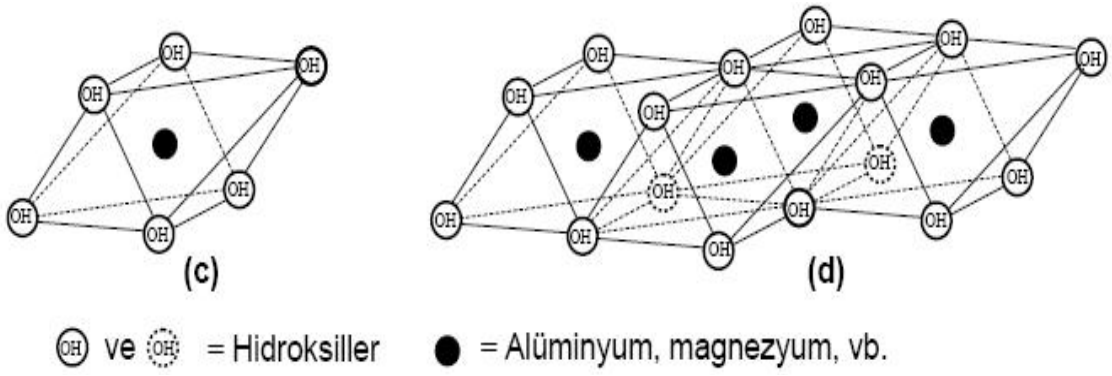
içerilen türlü killerin kabaca aynı mühendislik özellikleri gösterecekleri söylenebilir. Killerin diğer zemin minerallerine oranla çok farklı özellikler göstermeleri büyük ölçüde danelerin ufak olmalarından kaynaklanmaktadır. Bir mikrondan (10^{-3} mm) küçük kristallerde kenarlardaki molekül sayısı toplam molekül sayısına oranla fazla olduğundan kum ve silt danelerinde hakim olan yer çekiminin aksine, yüzey kuvvetleri önem kazanır. Ancak danelerin küçük olması her mineralin kil özelliklerini göstereceği anlamına gelmez. Örneğin, öğütülerek 2μ luk üst limit, tarif için konulmuş olup muhakkak kil minerallerinin varlığını belirtmeyebilirler (Genç, 1987).

Kil minerallerinin oluşmasını birbirinden çok farklı iki doğal ortam sağlar. Birinci ortam yüzeye yakın, ayrışma ve yıpranmanın etkin olduğu bölgedir. Burada atmosfer basıncı ve sıcaklıkları sürdüğünden su genellikle sıvı fazdadır. Bundan çok farklı ikinci ortam ise, derinlerde hidrotermal koşulların oluşturduğu durumdur. Su büyük basınç altında ve buhar olarak tutulmaktadır. Birinci ortamda kilin oluşumu çözeltilerden kristalleşme, kayaçtaki silikat minerallerinin ayrışması, iyon değişimi ve yeniden katılaşma mekanizmaları ile tamamlanır. Hidrotermal ortamda kil oluşumu yukarıdaki koşullara oranla daha azdır (Önalp , 1983).

Kil minerali yapısında iki ana yapı bloğu vardır. Silis tetrahedronunda bir silisyum iyonu dört oksijen atomu ile şekil 2.1' de gösterildiği gibi birleşmiştir. İkinci elemanda alüminyum veya magnezyum iyonu altı hidroksil iyonu ile bağlı olup sekiz yüzlü oktahedron oluşturmuştur (Şekil 2.2). Alüminyum oktahedronlarının oluşturduğu tabakalara "gibsit", magnezyum oktahedronu oluşturduğu tabakalara ise "brusit" denir. Tetrahedronların oluşturduğu tabakaların kalınlığı 4,63^{o}A, oktahedronlar ise 5,05^{o}A olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi (tetrahedron) (Grim, 1959)
a) Tetrahedron b) Tetrahedral tabaka



Şekil 2.2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) (Grim, 1959)
c) Oktahedron d) Oktahedral tabaka

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

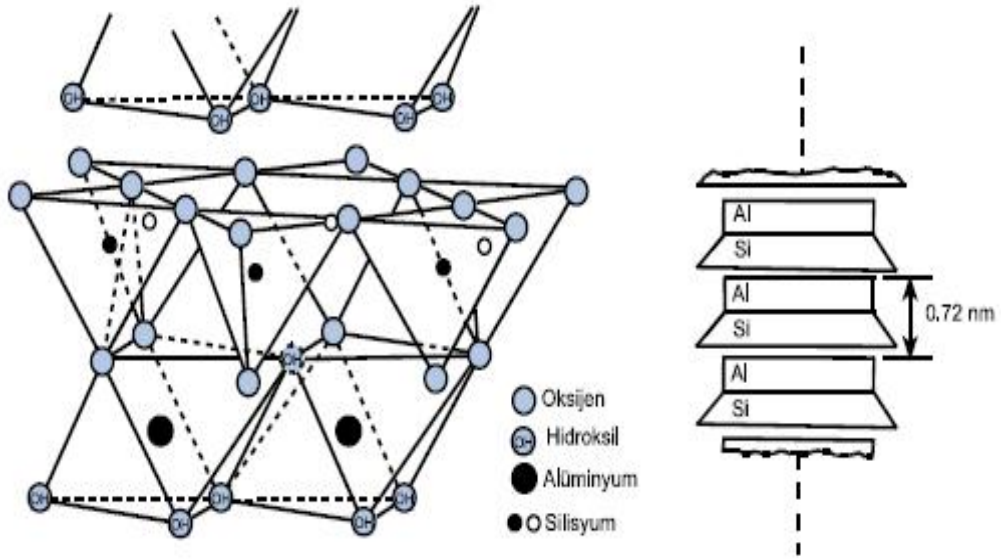
Doğada en çok görülen kil mineralleri 1:1 tipindeki kaolinitler ve halloysit; 2:1 tipindeki montnorillonitler, illit ve vermikülitlerdir. Esasen diğer gruplar da bu minerallerle benzer özellikler vermektedirler. Değişiklik, mineral yapısındaki iyon türü ve aradaki su moleküllerinden ileri gitmektedir. Çizelge 2.1' de sıkça karşılaşılan ve özellikleri birbirinden çok farklı olan dört ana kil türünün ayrıntıları özetlenmiştir.

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

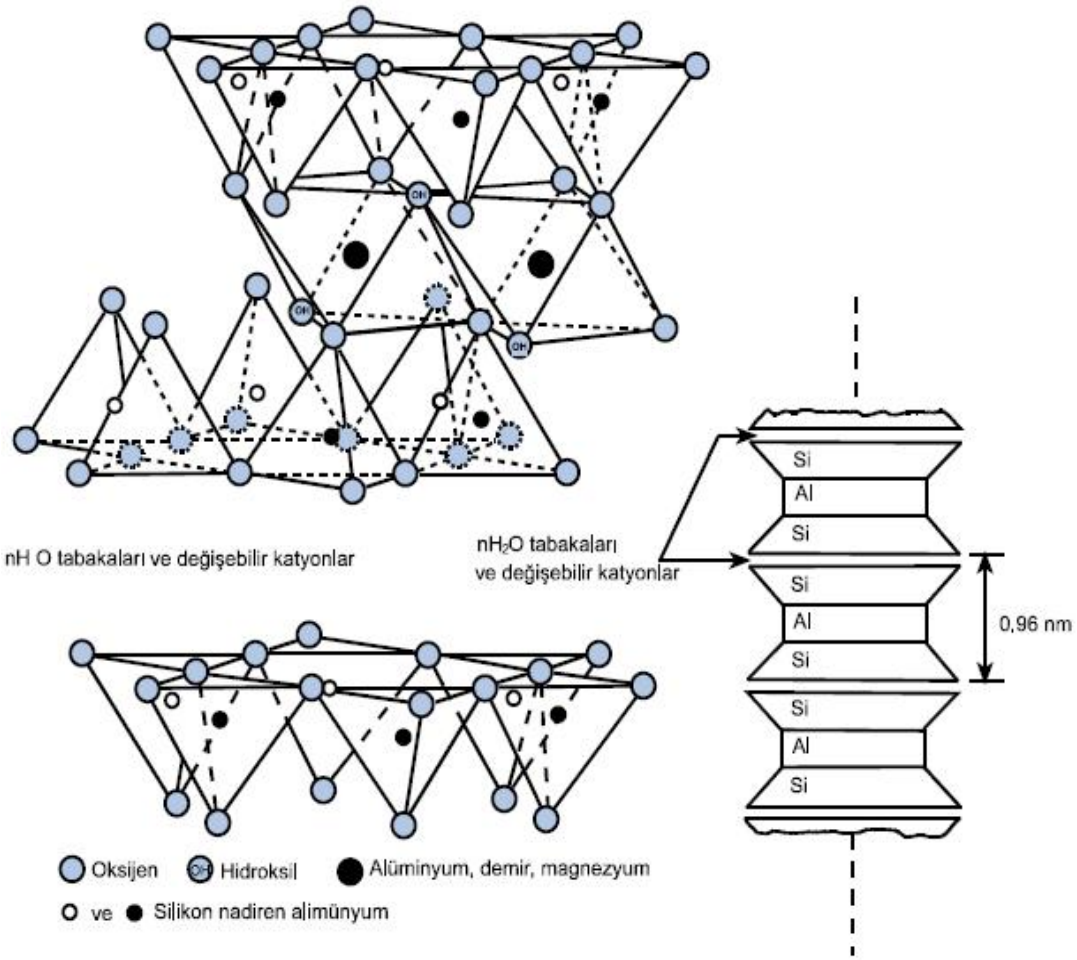
	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Dane Büyüklüğü	10 A-1	0.1-2	0.1-5
Dane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	Altı köşeli pul
Özgül yüzeyi (m_2/g)	50-800	65-100	Eki-20
Dane Kalınlığı	10A	30A	0.05-2
Likit Limit	110-710	60-120	30-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Şişme-Büzülme Yeteneği	Yüksek	Orta	Düşük
Özgül Ağırlık	2.35-2.70	2.60-3.00	2.60-2.95

Yapısal formülü $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ olarak verilen kaolinit kilde, bloklar birbiri üzerine binmiş olup, aradaki hidrojen bağları ve aktif Van der Waals kuvvetleri suyun buraya girip şişme oluşturmasını önlemektedir (Şekil 2.3). 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 $Si_4Al_4O_{10}.4H_2O$ formülündedir. Mikroskop altında içi boş çubuk görünümündedir.

Yapısal formülü $Si_8Al_4O_20(OH)_4.nH_2O$ 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. Montmorillonitlerin yapısı Şekil 2.4'te basitçe gösterilmektedir (Fell et al.,1992).



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



Şekil 2.4. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell et al., 1992)

2.2. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

Pek çok araştımacı tarafından killerin fiziksel, kimyasal ve mineraolojik özellikleri esas alınarak sınıflama türleri geliştirilmiştir. Fakat hala kesin bir sınıflama mümkün değildir. Kil minerallerinin aşağıdaki kriterlere göre sınıflandırıldığı Işık (1996) tarafından bildirilmiştir.

1. Tabaka tipleri,
2. Ara malzeme türü,
3. Tabaka yükleri,
4. Oktahedral tabakadaki katyon içerikleri

Killer, kimyasal özelliklerine göre çeşitli sınıflara ayrılmıştır. Killer, silikat minerali olup, özelliklerine göre de çeşitli sınıflara ayrılırlar (Çizelge 2.2). Bu özelliklerin başında kristal yapıları gelmektedir.

Çizelge 2.2. Killerin kristal yapılarına göre sınıflandırılması

Tabaka	**Grup**	**Cins**
2 Tabakalı olanlar	Kaolinit Grubu a) Eş boyutlu olanlar b) Bir yönde uzanmış olanlar	Kaolinit, Dikit Halloysit
3 Tabakalı olanlar	Smektit Grubu İllit Grubu Vermikülit Grubu	Montmorillonit Bediellit, İllit Vermikülit
4 Tabakalı olanlar	Klorit Grubu	Klorit
Zincir yapısı olanlar	Sepiyolit Grubu	Sepiyolit Atapulgit Paligorskit

Çizelge 2.3. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995)

Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit, Serpantinit	Kaolinit Halloysit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_4nH_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(Mg,Fe^2)[Si_{>}Al_8O_{20}](OH)_4nH_2O$
Simektit	Montmorillonit	$M^+_{x+y}(Al_yFe^{2+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Beidellit	$M_xAl_4[(S\dot{I}_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Notronit	$(M^+_xMg^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4H_2O$
	Saponit	$(M^+_xMg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4H_2O$
Profillit ve Talk	Profillit Talk	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$ $Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Donbassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit, Sepiyolit	Paligorskit Sepiyolit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_44H_2O$ $Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

2.3. Kil Zemin Yapısına Etki Eden Faktörler

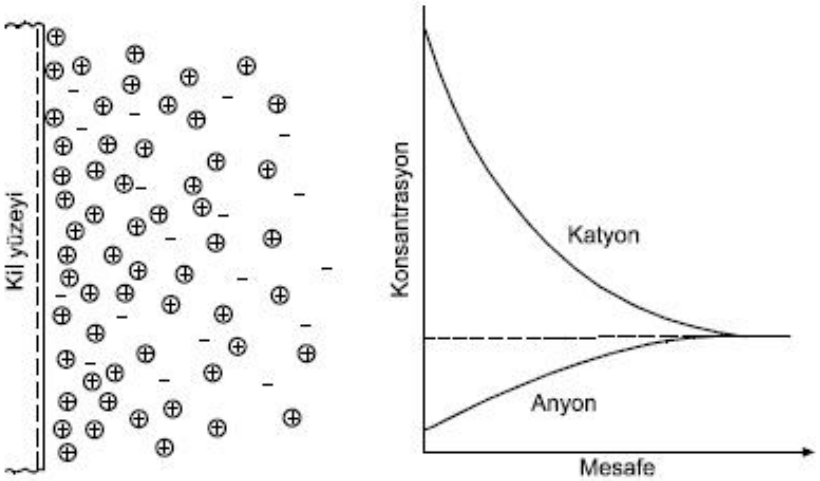
Kil minerallerinin birlikteliği ve adsorpladıkları su tabakası zemin yapısı için gerekli fiziksel temeli oluşturmaktadır. Münferit kil partikülleri adsorbe ettikleri su tabakası ile etkileşim halindedirler. Killer suyun varlığında kimyasal değişikliklere karşı oldukça hassastırlar. Örneğin kil danecikleri arasında bulunan boşluk sıvısı birleşiminin değişmesi killerin mikro yapısının değişmesine ve dolayısıyla mühendislik davranışının değişmesine yol açmaktadır.

Killer genellikle yassı ve levha şeklindedir. Killerin yüzeyi negatif yüklüdür ve bu negatif yüzeyler sistemdeki katyonlar tarafından dengelenir. Bununla birlikte

killerin çevresindeki değişiklikler killerin mikro yapısını direkt olarak etkilemektedir. Bu değişiklikler çevredeki şartlara bağlı olarak killerde meydana gelen yumaklanma ve dağılma olaylarıdır. Çevre şartlarına bağlı olarak bir kil danesinin çevresinde uzaklıkla değişen itme ve çekme kuvvetleri oluşur. Eğer iki kil danesi arasında meydana gelen net kuvvet çekme ise daneler birbirine yaklaşır ve yapışırlar. Bu olaya yumaklanma (floklanma) denir. Eğer iki kil danesi arasındaki net kuvvet itme ise, daneler bir birinden uzaklaşır; buna da dağılma (dispersiyon) denmektedir. İtici kuvvetler büyük ölçüde sistemin özelliklerine bağlı iken, yani çiftli tabakadan etkilenirken, çekme kuvvetleri maddenin özünden kaynaklandığından önemli bir değişim göstermezler. Flokülasyon olayını etkileyen başlıca faktörler şöyledir:

1) Katyon konsantrasyonu: Boşluk sıvısındaki katyonların konsantrasyonu killerin elektriksel potansiyelini etkiler. Eğer katyon konsantrasyonu artarsa kilin elektriksel potansiyeli azalır. Bu şu anlama gelmektedir; katyon konsantrasyonunun artması floklanmaya neden olmaktadır veya katyon konsantrasyonunun azalması kilin dispers bir yapıya girmesine neden olmaktadır (Gouy-Chapman modeline göre (Stern, 1924)).
2) Katyon adsorpsiyonu: Bazı katyonlar kil yüzeyindeki negatif yükler tarafından kuvvetlice çekilirler ve kilin hemen kenarında katyonlarla dolu sıkı bir tabakanın oluşmasını sağlarlar. Bu sıkıştırılmış tabaka Stern (sert) tabaka olarak adlandırılır (Şekil 2.5). Bundan sonraki tabaka iyonları, kil parçacığının yüzeyinin dışında serbestçe dağınık vaziyettedir. Daha öncede ifade edildiği gibi bu tabakaların her ikisi birden elektriksel diffüz çift tabaka olarak adlandırılır. Coulomb teorisine göre bu iyon tabakalarının potansiyel enerjisi aralarındaki uzaklıkla ters orantılıdır. Bu nedenle, Stern tabakasındaki katyonlar diffüz tabakadakilerden daha kuvvetlice çekilirler. Eğer boşluk sıvısı içindeki katyonların konsantrasyonu artarsa, bütün adsorbe yüzeyleri katyonlarla dolana kadar Stern tabakadaki katyon miktarı da artacaktır. Bir süre sonra Stern tabakada artık daha fazla katyon tutulamayacaktır. Böylece katyon adsorpsiyonu artışından dolayı diffüz çift tabaka sıkışması meydana gelecek ve floklanmış (yumaklanma) bir yapı oluşacaktır.

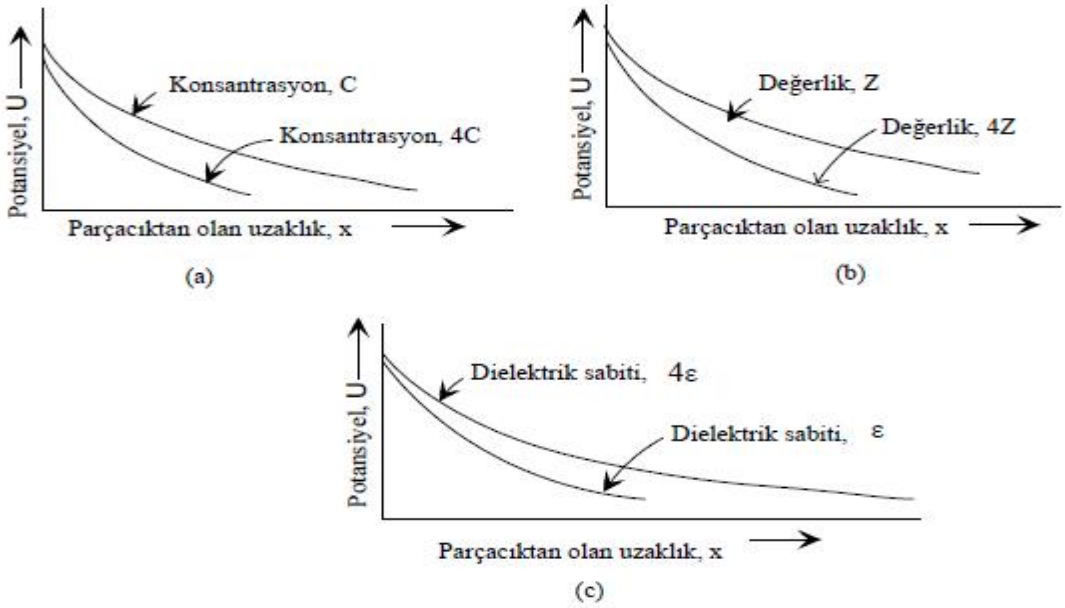
3) Katyon değerliği: Katyonların değerliği de diffüz çift tabakanın kalınlığı üzerinde etkilidir. Eğer katyon değerliği artarsa, killerin potansiyel enerjisi artacak ve yine parçacıkların flokülasyonu ile sonuçlanacaktır. Üç değerlikli katyonlar kil yüzeyine iki değerlikli katyonlardan daha çok çekilecekler ve iki değerlikli katyonlar da kil yüzeyine tek değerlikli katyonlardan daha iyi çekileceklerdir. Bu da demektir ki eğer boşluk sıvısındaki katyonların değerliği artarsa parçacıklar daha düşük değerlikli katyonların bulunduğu ortama göre diğer parçacıkları daha kuvvetlice çekeceklerdir. Bu da kil parçacıklarının floklanmasına neden olacaktır.



Şekil 2.5. Kil-elekrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı (Mitchell, 1976)

4) Dielektrik sabiti: Elektrikçe yüklü bir cismin başkası üzerine olan etkisini, bunların arasına girerek azaltma gücünün ölçüsüne dielektrik sabiti denir. En kuvvetli elektrik kuvvetleri vakumda (dielektrik sabiti 1 birim) bulunan iki yüklü cisim arasındadır. Örneğin suyun dielektrik sabiti 81'dir demek iyonlar arasındaki çekme vakumdakinin 1/81'i kadar olacak demektir (Keskin, 1967). Kil parçacıkları arasındaki boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması parçacıklar arasındaki çekim kuvvetini artıracak ve böylece daha fazla floklanmış kil partikülleri oluşacaktır. Diğer taraftan boşluk sıvısının di elektrik sabitinin artması kil parçacıklarının dispers bir yapıda şekillenmesini sağlayacaktır.

5) Hidratlanan iyon çapı : Hidratlanan iyon çapının diffüz çift tabaka üzerindeki etkisi iki ve üç değerlikli katyonlardan ziyade tek değerlikli katyonların iyon çapları üzerinde daha etkilidir (Gouy-Chapman). Hidratlanan iyon çapının küçük olması yüzeye daha fazla katyon çekilmesi ve kil tabakası etrafında daha fazla sıkışmış bir tabaka oluşması demektir.
6) pH değeri : Boşluk sıvısının pH değerinin azalması kil parçacıklarının floklanmasına neden olmaktadır. Boşluk sıvısının pH değerinin azalmasıyla hidrojen iyonları miktarı artmakta, kil parçacıkları yüzeylerine bu katyonları çekmektedir. Böylece kil parçacıkları floklanma özelliği gösterme eğilimine girmektedir.



Şekil 2.6. Çift tabakalar üzerinde sistem özelliklerindeki değişikliklerin etkileri a) katyon konsantrasyonu b) katyon değerliği c) di elektrik sabiti (Lambe ve Whitman, 1979)

Daneciklerin bir araya getirilmesi (flokülasyon) üç ayrı mekanizmayla yapılabilmektedir:

1) Daneciklerin polielektrolitler kullanılarak zeta potansiyellerinin düşürülmesi ve Van der Waals çekim kuvvetleriyle daneciklerin bir araya getirilmesinin sağlanması.
2) Danecik yüzeyinde, yüzeye zıt kısımların oluşturulması ve bu kısımların diğer bir daneciği çekmesi ile daneciklerin bir araya getirilmesinin sağlanması.
3) Daneciklerin polimer köprüleriyle bir araya getirilmesinin sağlanması.

2.4 Kil Minerallerinin Tanımlanması

Herhangi bir zeminin özellikleri zeminin fabrik yapısına, dane düzenine, çevre faktörlerine, mineralojik ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Geoteknik mühendisliğinde bir kilin içerdiği minerallerin türü ve bunların oranlarının bulunması mekanik davranışının anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Zemin birleşiminin ve zemin danelerinin araştırılmasında kullanılan yöntemler ve teknikler şöyledir:

1- Dane dağılımı ve danelerin sınıflandırılması,
2- Mineralojik analizler öncesi ön davranış incelemesi,
3- Serbest oksijen, hidroksit, amorf bileşenler ve organik malzemelerin belirlenmesi için kimyasal analizler,
4- Silt ve kum danelerinin petrografik mikroskopla analizi,
5- Kil fazının elektron mikroskobuyla araştırılması,
6- Kristalli minerallerin X-ray analizi ile tanımlanması,
7- Bileşenlerin termal analizlerle belirlenmesi,
8- Spesifik yüzey alanının belirlenmesi,
9- Katyon değişim kapasitesi, pH ve çözülebilir tuz için analizlerin yapılması.

X- ışını kırılma deneyi zemindeki ince danelerin mineralojik tanımlaması için en çok kullanılan yöntemdir. Deneyde kristal içinde atomların dizildiği düzlemler arasındaki uzaklıklar ve X- ışınlarının bu düzlemlerden yansıma şiddeti ölçülür. X ışını difraktometresinde dalga uzunlukları 0.71-1.54-2.29 A^{o}'a ayarlanmış ışınlar çok ince öğütülmüş örneğin üzerine yollanır. Kil kristallerinde atomik düzlem aralıkları 1 angstrom civarında olduğundan ışınlarla uyum sağlandığında düzenli olarak yansıyan

ışınlar bir fotoğraf kağıdına yansıtılarak veya sayaçta ölçülür. Her kristalin atom yapısı farklı olduğundan emilen ve yansıyan ışın yoğunluğu aynı değildir. Kil minerallerinin tanımlanmasında son derece elverişli olan X- ışını yönteminde değişik kil minerallerinin tanımlanması için standart kartları kullanılır (Yılmaz, 1987; Önalp, 1997).

Kil minerallerinin karışımından oluşan zeminler, organik madde içeren zeminler, kilden başka mineral içeren zeminler ve karışık tabakalı kil minerali içeren zeminlerde bu açıdan birtakım sorunlar bulunmaktadır. Genellikle ayrıntılı bir nicel analiz imkânsızdır. Bu konuda söylenebilecek tek şey zeminde hangi minerallerin kabaca hangi oranlarda bulunduğudur (Kayabalı, 2002).

Kil minerallerinin teşhisinde kullanılan bir diğer teknik de diferansiyel termal analizdir (DTA). Bileşimi bilinmeyen bir zemin örneği bir asal kontrol maddesi ile birlikte etüv içerisinde birkaç yüz dereceye kadar ısıtılır ve kil minerallerinin özel yapılarından dolayı ısılarda belirli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler belirli mineraller için belirli ısılarda meydana gelir ve bu değişikliklere ait kayıtlar bilenen mineraller ile karşılaştırılır (Kayabalı, 2002).

Taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi de bir zemindeki kil minerallerinin tanınmasında kullanılmaktadır.

Casagrande'nin plasitisite diyagramının kullanımı mühendislik bakış açısından gelişmiş difraksiyon veya DTA analizlerin verdiği kadar bilgi verebilir (Kayabalı, 2002).

Kimyasal maddelerle boyama yöntemiyle kil mineralleri tanımlanmaktadır. Mineraller benzidin, sairanin ve malachite yeşili gibi kimyasal maddelerle boyanır ve aldıkları renklerle birbirinden ayırt edilmeye çalışılır (Yılmaz, 1987).

BÖLÜM 3

PROBLEMLİ KİL ZEMİNLER

Problemli zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadırlar. Toprak yapılarda meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarda oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir.

3.1 Dispersif Zeminler

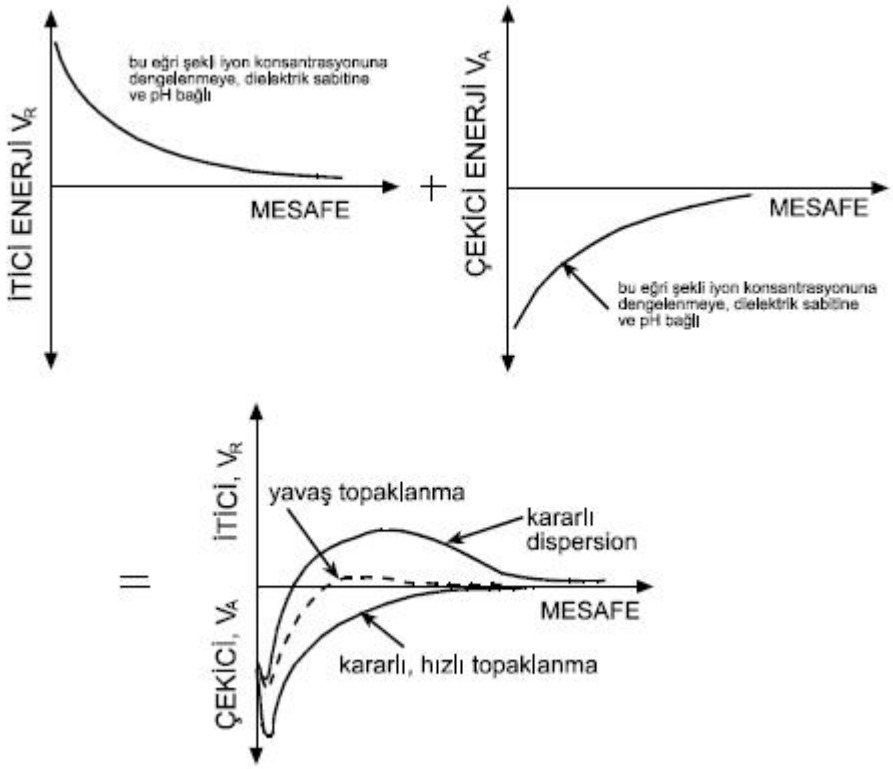
Su içinde kendiliğinden dağılma eğilimi gösteren bazı zeminler, erozyon ve borulanma açısından "şüpheli zeminler" olarak değerlendirilir. Bu zeminler, zemin mekaniği biliminde "dispersif kil veya dispersif zemin" olarak bilinirler. Yapısal olarak stabil olmayan bu zeminler kolayca dağılabilir ve yüksek derecede erozyona uğrayabilir. Dispersif kil zeminlerin su yapıları, dolgu barajlar ve yol dolguları yapımında kullanımı söz konusu ise, iyi tanımlanmalı ve uygun teknikler ile yapım gerçekleştirilmelidir. Aksi durumda, sonu göçmelere kadar giden ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Kilin dispersibilite özelliğinden kaynaklanan erozyon; kilin minerolojisi, kimyasal yapısı ile zemin boşluklarındaki ve erozyona neden olan suyun içindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliğine ve miktarına bağlıdır.

Dispersif kil ifadesinin ilk olarak ortaya atılması, bundan yüz yıl kadar öncelerde olmasına rağmen, 50-60 yıl öncesine kadar zemin araştırmacıları ve ziraat mühendisleri tarafından bu killerin temel yapısı yeterince anlaşılmış değildi. Ancak dispersif kil konusunun inşaat mühendisliği pratiğinde tanımlanması, 1960'lı yılların başlarında olmuştur. Avustralya'da killerin dispersif özelliğinden kaynaklanan toprak barajlardaki borulanma göçmelerinde yapılan araştırmalar sonucunda, konu açık olarak ortaya

konulmuştur. Ülkemizde konu, ilk defa DSİ tarafından düzenlenen bir kongrede dile getirilmiştir (Tuncer, 1995). Konu ile ilgili bir TÜBİTAK projesi, Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından yapılmış ve sonuçları rapor edilmiştir (Tosun vd., 2001). Bu çalışmada, 10 ayrı baraj projesinden alınmış 27 adet numunenin farklı yöntemler ile dispersif özelliği belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak ilgili deneysel yöntemlerin duyarlılığı araştırılmıştır. Sonraki yıllarda dispersif killer, toprak dolgu barajlar açısından daha detaylı incelenmiş ve konu ile ilgili olarak kilin bu özelliğinin belirlenmesi doğrultusunda nitel ve nicel sonuçlar veren deneysel yöntemler geliştirilmiştir.

Kil partikülleri içindeki adsorplanan sodyum katyonlarının, polivalant katyonlarına oranı; dispersiyon borulanmasına neden olan önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Sodyum, kil minerallerini sararak çift tabaka kalınlığını arttırmakta ve kil partikülleri arasındaki çekim kuvvetlerini azaltmaktadır (Tosun, 1994). Bu durumda, kil partikülleri su içinde daha kolay hareket edebilmekte ve içsel erozyona neden olacak şekilde taşınmaktadır. Dispersiyon borulanmasını kontrol eden ikinci önemli etken ise, rezervuar veya kanal suyundaki çözünmüş tuz içerikleridir. Avustralya'da tuzlu bir zemin üzerine inşa edilmiş bir baraj, temelinde sızma olmasına rağmen yüksek iyonik tuz konsantrasyonlu rezervuar suyu ile uzun yıllar hizmet vermiştir. Ancak baraj rezervuarına düşük iyonik tuz konsantrasyonuna sahip bir nehirden derivasyon yapılmasından üç gün sonra baraj göçmüştür (Knodel, 1991).

Dispersiyon, zemin tanelerinin su içinde dağılma işlemidir. İki kil partikülü birbirine yaklaştığında potansiyel çekim alanlarının çatışması gerçekleşir. Eğer partiküller oldukça yakınsa, bu itici kuvvetlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu itici kuvvetlere Van der Walls çekici kuvvetleri tarafından karşı konulacaktır. Eğer itici kuvvetler çekici kuvvetlerden büyükse zemin dispersif olacaktır (Şekil 3.1). Bu durumda bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer (Tosun, 1994). Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütlesinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur. Dispersiyon, fiziko-kimyasal bir olaydır ve esas olarak kil minerolojisi ile boşluklardaki ve erozyona neden olan suyun kimyasından etkilenir (Mitchell, 1976).



Şekil 3.1. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Mitchell, 1976)

Dispersif erozyonun oluşması için kilin mineralojisi ve kimyasal yapısı ile birlikte, dolgu içerisindeki boşluk suyu ve rezervuarın içerisindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliği ve miktarı da etkilidir. Dispersif bir malzeme suya batırıldığında kil mineralleri diğer minerallerden farklı olarak diğer zemin daneleri ile aralarındaki elektrokimyasal bağı yitirirler ve koloidal hale geçerler. Baraj rezervuarlarındaki gibi, yüksek hidrolik yük altında taşınarak ayrışma ve dağılmalar oluştururlar. Bu şekilde oluşacak içsel erozyonun başlaması için gövdede küçük bir çatlak veya fisürün oluşması yeterlidir. Özellikle zemin kuru olarak yerleştirilip iyi sıkıştırılmazsa böyle bir oturma kaçınılmaz olmaktadır. Dolgu içerisinde freatik hattın (sızma hattının) altında oluşan oturma ve üzerinde oluşan kemerlenme çatlak oluşmasına neden olmaktadır. Bu içsel erozyon olayına, barajların memba tarafından başlayıp 10^{-6} cm/s kadar küçük bir geçirgenliğe sahip zeminlerde bile rastlanabilmektedir (Mitchell, 1976).

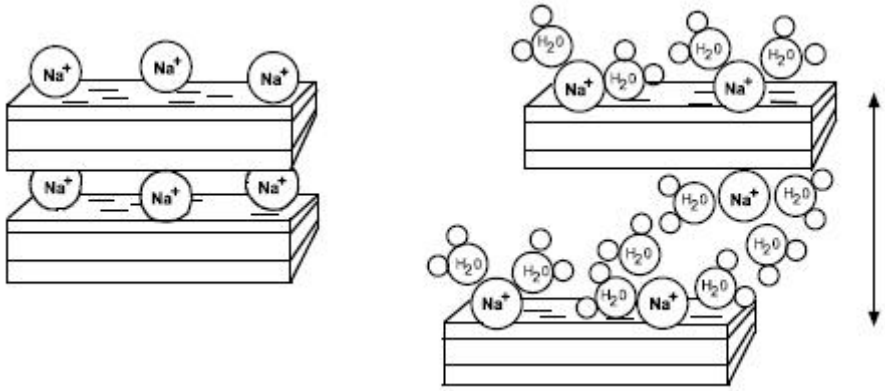
Gövde içerisindeki dispersif kilin ayrışmasında boşluk suyunda bulunan sodyum iyonunun (Na^+) önemi büyüktür ve iyonun +1 yükü ile yakından ilişkilidir. Aynı

negatif elektrik yüküne sahip bir kil partikülü için gereken nötrleştirici pozitif iyon sayısı, iyonun sodyum olması durumunda, kalsiyum (Ca^{+2}) veya magnezyum (Mg^{+2}) iyonun olması durumuna göre iki mislidir. Ozmotik potansiyel, kil partikülü çift tabakasındaki iyon sayısı ile doğru orantılı olduğu için sodyumlu sistemlerde daha fazladır. Bu şekilde, daha çok iyon içeren çift tabakanın kalınlığı artar ve kil parçacıkları arasındaki çekim kuvveti azalır. Ayrıca tek bağlı sodyum iyonunun kil parçacığı yüzeyine Coulomb cinsinden tutunma kuvveti çok bağlı iyonlardan çok daha azdır. Killerde dispersif potansiyel, genellikle kil içeriğinin montmorillonit gibi ağırlıkça 2/1 minerolojik yapıya sahip olduğu durumlar için geçerlidir. İllitlerin bazıları da yüksek dispersif özellik gösterirler. Kaolin tipi killer ise çok nadir dispersibilite problemi sergilerler.

3.1.1 Dispersiyon mekanizması

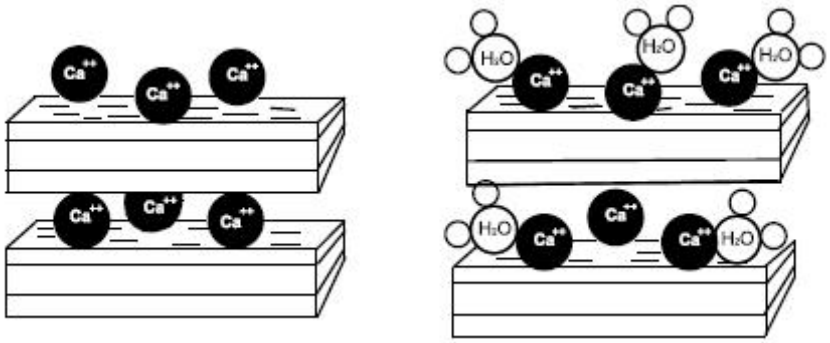
Dispersiyon, zeminlerin yavaş hareket eden su içinde hızla erozyona uğradığı bir olay olarak bilinir. Bu durumda koloidal kil mineralleri, diğer normal killerden farklı olarak, su içinde solüsyona dönüşür. Su içinde bulunan kil parçacıkları arasındaki elektriksel yüzey kuvvetleri çekim kuvvetlerini aşıyorsa, bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer. Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütlesinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur (Tosun, 1994).

Dispersiyon borulanmasını kontrol eden özelliklerden biri, kil partikülleri içindeki adsorb edilen iyonlarının polivalent katyonlara (kalsiyum, magnezyum ve potasyum) oranıdır. Katyonlar bünyelerine su alarak hidratlanır. Hidratlanmış Na+ katyonunda hidrat dağılımı oldukça yüksek olmasına rağmen, Na+ ‘un yükü sadece +1 dir. Bu nedenle bu +1 yükü oldukça geniş bir yüzeye dağıtılmalıdır. Bundan dolayı Na+ katyonunun hidratasyon çapı, Ca++ ve Mg++ katyonlarına göre oldukça büyüktür. Hidrat çapının artması, dağınık çift tabaka kalınlığını arttıracaktır. Bu durumda, kolloidler dispersiyon sonucunda bir diğerine itilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi (Kenzie, 1998)

Ancak kil partikülleri içinde adsorbe edilen katyonların yüksek değerlikli olması (Ca++, Mg++, Al++) durumunda, oluşacak dağınık çift tabaka kalınlığı düşer. Bu halde oluşacak itici kuvvetler azalacaktır. Bu durumda, dispersiyonun aksine kolloidler birbirine yaklaşacak ve topaklanmış yapı oluşmasını sağlayacaktır (Şekil 3.3). Sodyum gibi tek değerlikli değişebilir iyonlar, aynı zamanda zeminlerin şişmesine de neden olmaktadır. Bu durum, dağılmış iyon tabakasının kalınlığının artmasıyla açıklanmaktadır (Yong and Warkentin, 1996).



Şekil 3.3. Kalsiyum katyonunun topaklanmış yapı oluşumuna etkisi (Kenzie, 1998)

Kil kütlelerinin dispersiyon borulanmasını kontrol eden ikinci faktör ise, rezervuar veya kanal suyundaki çözünmüş tuzların toplam miktarıdır. Rezervuar veya kanal suyundaki çözünmüş tuzların düşük olması, dispersiyon oluşumu için kilin sodyum doygunluğunu artırır. Yüksek elektrolit konsantrasyonunda dağınık çift tabaka

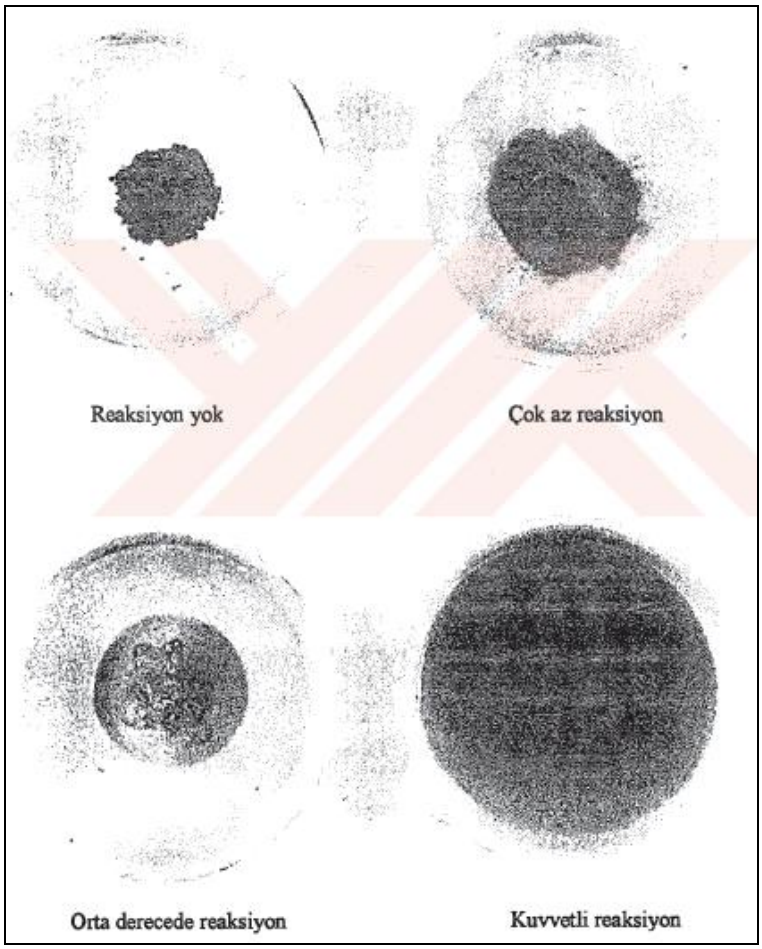
kalınlığı azalır. Kil yüzeyinde negatif yüklerin azalması, yüzey-köşe atraksiyonunu arttırırken, yüzey-yüzey itmesini azaltır. Ancak düşük iyon konsantrasyonunda, çekici kuvvetler, itici kuvvetlerden daha düşük durumdadır. Bunun sonucunda, parçalar birbirinden ayrılır ve dispersif davranış gerçekleşir (Atkinson et al., 1990; Ouhadi and Goodarzi, 2006).

Tosun (1994); dispersif killerden inşa edilen bir dolgu içinde kaçak su olduğu zaman, gelişecek mekanizmayı iki ayrı durum şeklinde özetlemiştir: (1) Eğer sızım hızı düşük ise, akış kanalının çevreleyen kil şişebilir ve zamanla kaçak önlenir ve (2) Eğer suyun başlangıçtaki hızı yeterince yüksek ise, ayrışan kil parçacıkları uzaklara taşınır. Kilin şişme hızından daha yüksek bir hızdaki akım, kanalı genişletir ve sonuç olarak borulanma göçmesine neden olur. Herhangi bir sismik aktiviteye maruz kalmış dolguda meydana gelen çatlakların davranışı için de bu iki durum geçerlidir.

3.1.2 Dispersif zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması

Dispersif killerin belirlenmesi için beş ayrı laboratuvar deneyi önerilmiştir. Bunlar; dağılma, çifte hidrometri, iğne deliği ve indeks özeliklerinin belirlenmesine yönelik fiziksel deneyler ile boşluk suyundaki çözünen tuz ve değişebilir sodyum yüzdesi kimyasal deneyleridir. İlk dört deney, ABD'de yaygın olarak benimsenmiştir. Son kimyasal deney ise Avustralya'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise, çoğunlukla fiziksel deney sonuçlarına itibar edilmektedir (Tosun ve Savaş, 2001).

Dağılma deneyi, 15 mm kenar uzunluğuna sahip tabii su içeriğinde hazırlanmış örneklerin saf su içindeki reaksiyonu dikkate alınarak önerilmiştir. Bu deney sonucunda zemin ile saf su arasında oluşan reaksiyon, nitel olarak değerlendirilir ve zeminin dispersibilite sınıfı bulunur (Şekil 3.4). Çifte hidrometri yönteminde ise, standart yöntem ile mekanik karıştırıcı olmaksızın ve kimyasal ayrıştırıcı kullanmaksızın yapılan deneyler dikkate alınmaktadır. Elde edilen iki ayrı dane dağılım eğrisinden, 0.005 mm'ye karşılık gelen, geçen yüzde miktarlarının oranı "dispersiyon derecesi" olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.6). Her iki deney için de standart yöntemler oluşturulmuştur (USBR 5400-89 et. al.).

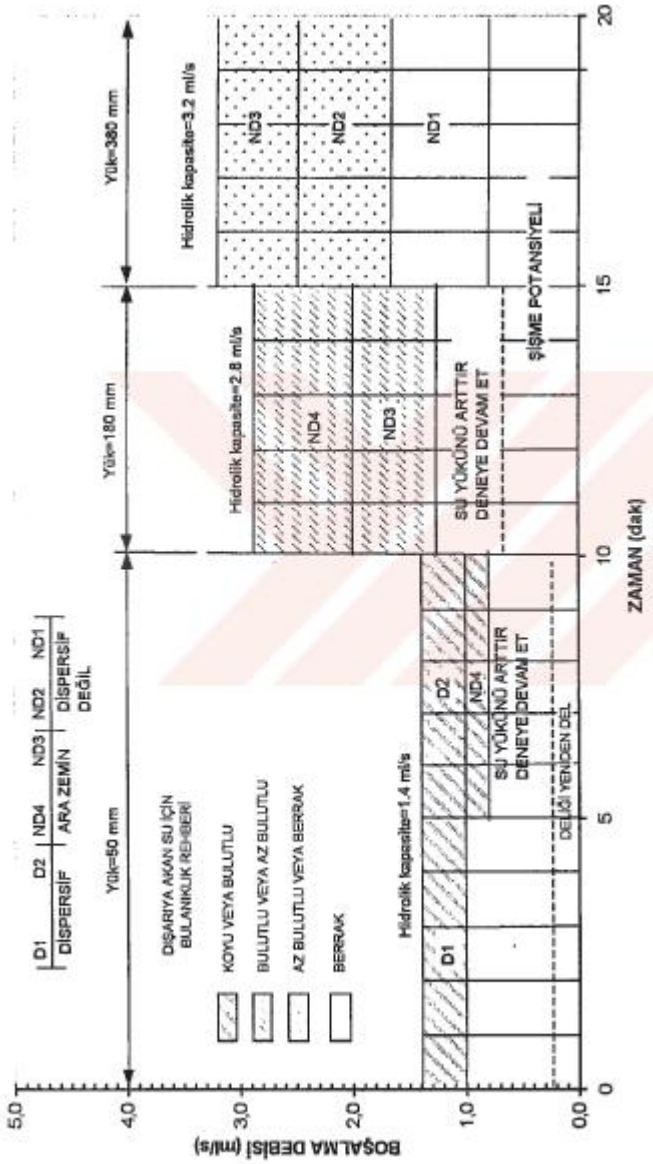


Şekil 3.4. Dağılma deneyi değerlendirme kriterleri (USBR 5400, 1989).

Zeminlerin dispersibilite özelliğini belirlemek amacıyla kullanılan en hassas yöntem, iğne deliği deneyidir. Konu ile ilgili standart yöntemler geliştirilmiştir (ASTM D 4647-93, USBR 5410-89). İlgili standart yönteme göre hazırlanan örnek içinde açılan 1 mm çaplı delikten farklı hidrolik yükler altında geçen suyun debisi ölçülmekte ve bulanıklığı nitel olarak değerlendirilmektedir (Şekil 3.5). Bu verilere göre zeminler, dispersibilite yönünden üç ana ve altı alt gruba ayrılmıştır (USBR 5410-89, ASTM D 4221-90).

İğne deliği deneyi basit fiziksel bir deney olmakla beraber içsel erozyon olayını direkt olarak gözleme olanağı sağladığından önemlidir. Çifte hidrometri deneyi çoğunlukla başarılı sonuçlar vermekle birlikte elde edilen sonuçlar tek başına

kullanıldığı takdirde yanıltıcı yorumlara neden olmaktadır. Dağılma deneyi, kalitatif bir deney olarak dispersibilite hakkında fikir vermekle birlikte yardımcı bir deney sınıfı olarak kabul edilmektedir. ESP deneyi Avustralya'da, bunun haricindeki deneyler ise



Şekil 3.5. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi (Savaş, 2000)

ABD de yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı deneyler arasında, sonuçları açısından zaman zaman bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Dispersiflik durumunu tayin açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların değerlendirilmesi

aşamasında hangi yolların izleneceği konusunda, bazı araştırmacılar tarafından halen çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Ülkemizde ve diğer ülkelerdeki genel uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik testleri yaptırmak suretiyle bunların birlikte değerlendirilmesidir. Çizelge 3.1'de deneye dayalı yöntemlerin birbirine göre genel bir karşılaştırılması görülmektedir (Aydın ve Aydın, 2006).

Çizelge 3.1. Deneylerin genel karşılaştırılması (Aydın ve Aydın, 2006)

DENEY	AVANTAJI	DEZAVANTAJI
Çifte Hidrometri Deneyi	Diğer fiziksel deneylere göre daha kesin sonuçlar verir.	Uzun ve hassas işlem gerektirir.
Dağılma Deneyi	Çok hızlı ve pratik çekilde zemin hakkında bir fikir verir.	Yardımcı deney olarak görülür tek başına güvenilir değildir.
İğne Deliği Deneyi	Hızlı ve basit olması ayrıca küçük ölçekteli bir iç erozyon modelini gözlemleme imkanı vermesi	Tek başına günenilirliği tartışılmaktadır.
Kimyasal Deneyler	Fiziksel deneyelere göre oldukça güvenilir sonuçlar vermesi	Uzun ve hassas ölçüm işlemleri gerektirmektedir.

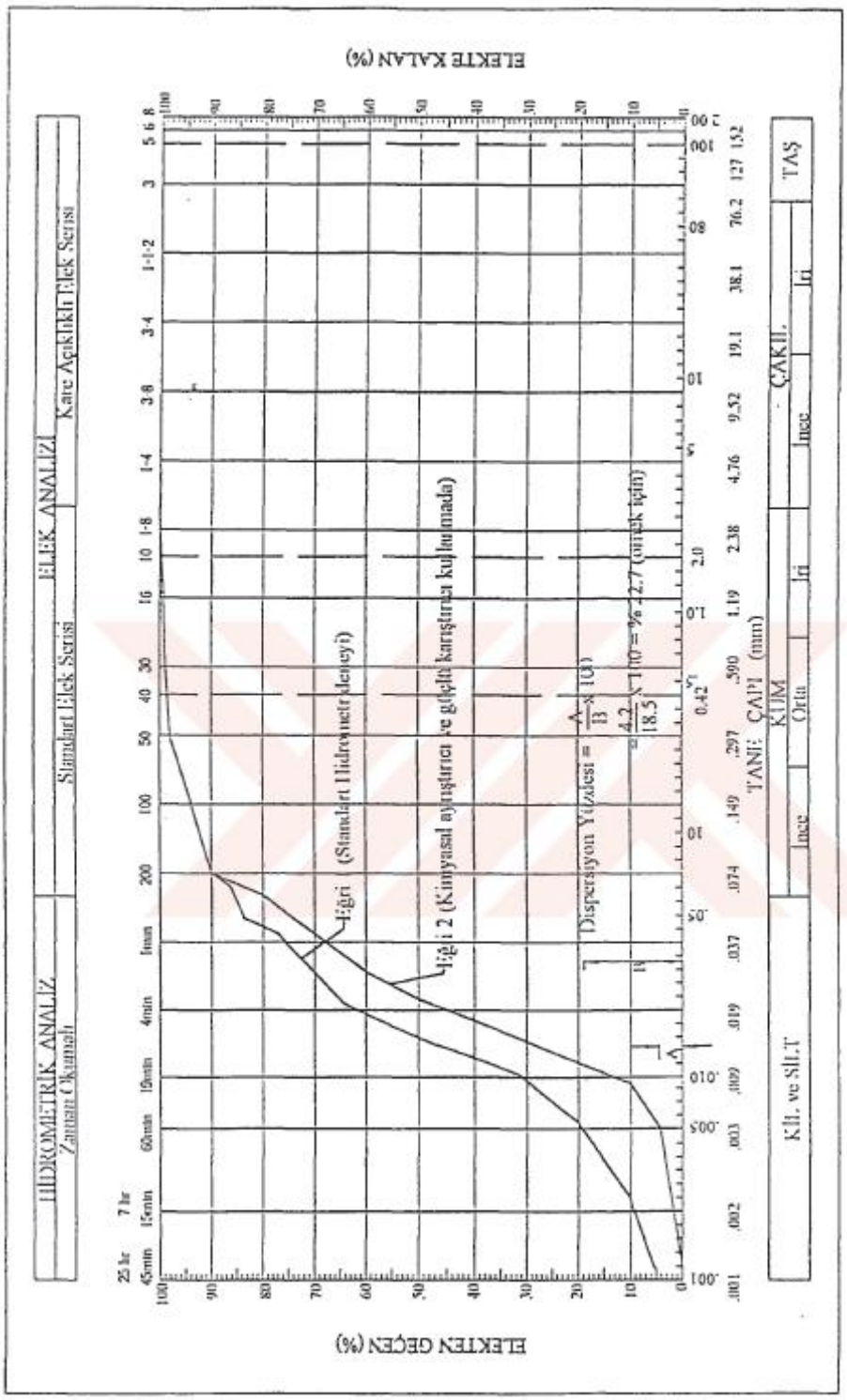
Bell and Maud (1994) önerdiği sınıflama sisteminde, numunelere deney sonuçlarına göre puanlar verilir. Bu puanların toplanması ile elde edilen toplam puanla da zeminin dispersibilite grubu belirlenir. Bu sınıflama sisteminde önerilen deneyler ve deney sonuçlarına göre verilen puanlar Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Dispersif zeminlerin tanımlanması için sınıflandırma sistemi

Fiziksel deneyler	İğne deliği Deneyi	Sınıf Puan	DI 5	D2 3	ND3-ND4 1	ND1-ND2 0
	Dağılma Deneyi	Sınıf Puan	Güçlü reaksiyon 3	Orta reaksiyon 2	Az reaksiyon 1	Reaksiyon yok 0
Kimyasal Deneyler	CEC-ESP	Sınıf Puan	Yüksek Dispersif 4	Dispersif 3	Marjinal 2	Dispersif Değil 0
	SAR	Sınıf Puan	2<22	1.5-2 1		>1.5 0
	TDS-Na	Sınıf Puan	Dispersif 2	Geçiş 1		Dispersif Değil 0
Değerlendirme toplam puanı			≥12 Yüksek Dispersif	8-11 Orta Dispersif	5-7 Az Dispersif	≤4 Dispersif Değil

3.1.3 Dispersibiliteyi etkileyen faktörler

Killerin dispersibilite karakteristiklerini etkileyen değişik faktörler vardır. Bu faktörlerin etki derecesi değişik zamanlarda farklı şekilde değerlendirilmiştir. Ancak killerin dispersif özellikleri üzerinde kilin kimyası ve mineralojik yapısı, fiziksel özellikleri, aşındırıcı su ve boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar ile dolgu barajlarda kullanılan kilin sıkılığı ve dolgu içindeki suyun miktarı, önemli etkiler olarak tanımlanmıştır. Bu etkiler, kısaca aşağıda değerlendirilmektedir.



Şekil 3.6. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi (Savaş, 2008)

3.1.3.1 Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası

Daha önce yapılan çalışmalarda zemin plastisitesi ile dispersiyon borulanması arasında bir ilişki tanımlanmıştı. Sherard et al. (1972); verilen bir kil zeminin kıvam limitleri ile dispersif ve dispersif olmayan killerin ayırt edilemeyeceğini ifade etmiştir. Bu durum, çoğu bilim adamı tarafından belirtilmiş olmasına rağmen, konu ile ilgili bazı temel yaklaşımlarda bulunulmuştur. Zeminin plastisite indisi dört'ten küçük (PI<4) olması halinde zeminin dispersif olmayacağı ve dispersif olan numunelerin hiçbirinin "yüksek plastisiteli silt" olmadığı görülmüştür. Daha sonraki yıllarda ülkemiz barajlarında kullanılan kil zeminler üzerinde yapılan çalışmalardan da kıvam limitlerinin dispersibilite yönünden ayırt edici bir özellik taşımadığı görülmüştür (Tosun, 1997). Dispersif killerin tanınmasında, yaklaşık bir yöntem olarak tanımlanan Skempton Aktivite Katsayısı'nın da etkili olmadığı belirtilmelidir. DSİ çalışmalarında bu katsayının bir ayırt edici kriter olmadığı ortaya konulmuştur (Tosun, 1995, 1997).

Kil içeriğinin dispersif karakteristiklerinin belirlenmesinde etkili olup olmadığının ortaya konulması amacıyla değişik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan kil içeriğinin ayırt edici bir özellik olmadığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalar sonucunda, "% 10'dan daha az kil ihtiva eden zeminlerin dispersif borulanmanın oluşması için gerekli koloidal yapıya sahip olmadıkları" tespiti yapılmıştır (Ryker,1977; Sherard et al., 1972).

3.1.3.2 Kilin mineralojik yapısı

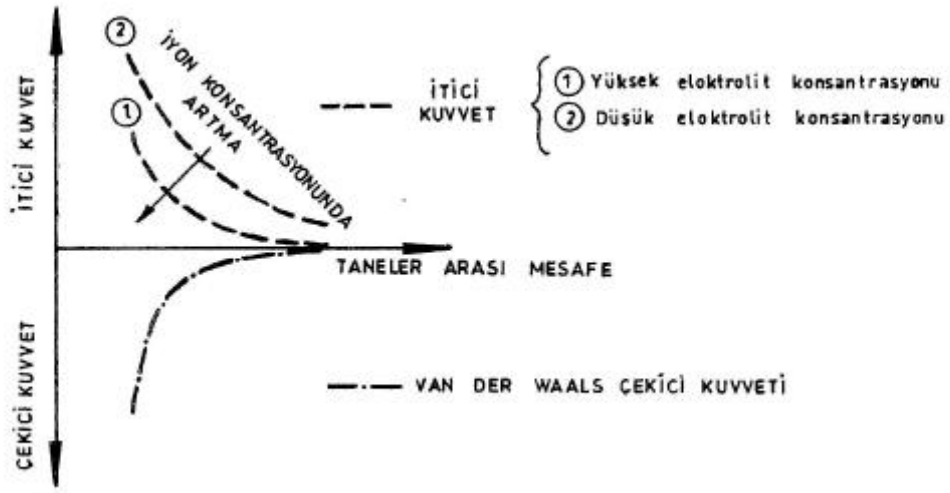
Avustralyalı araştırmacılar; daha iddialı bir şekilde "dispersiyon göçmesine, montmorillonit tipi kilin varlığının önemli ölçüde etkili olduğunu" belirtmişlerdir (Stapledon and Casinader, 1972). Sherard et al. (1976); deneye tabi tutulan ve dispersif bulunan çoğu numunenin önemli ölçüde montmorillonit ihtiva ettiğini belirtmişlerdir. Ouhadi and Goodarzi (2006), montmorillonit tipi killerdeki dispersiyonun etkisini vurgulamışlardır. Kil minerallerin değişik fraksiyonlarının dispersif karakteristikleri, kimyasal çevre tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenledir ki; kil minerrlojisi ve kilin kimyasal komposizasyonu, Avustralya'daki killerin dispersif

karakteristiklerinin tanımlanmasında önemle dikkate alınmaktadır. Yüksek ESP (Değişebilir Sodyum Yüzdesi) değerleri, çoğunluğu monmorillonit ve diğer 2:1 tabakalı kil minerallerinden oluşan killerde vardır. Bazı illitler, yüksek dispersif kil özeliği taşımaktadır. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. Ancak kaolinit içeren granit kökenli zeminlerde dispersif davranış gözlenmiştir (Bell and Walker, 2000).

3.1.3.3 Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzlar

Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzların miktarı, zeminlerin dispersibilitesine etkiyen önemli bir değişkendir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki; erozyona neden olan suyun düşük iyon konsantrasyonu, erozyona karşı düşük bir direncin oluşmasına neden olur. Çünkü itici kuvvetlerin büyüklüğü boşluk suyu içerisindeki iyon konsantrasyonuna bağlıdır. İtici kuvvetler, iyon konsantrasyonun artmasıyla azalmaktadır (Şekil 3.7). Halbuki Vander Walls çekme kuvvetleri iyonların konsantrasyonundan bağımsızdır (Resendiz, 1977). Erozyona neden olan suyun içindeki iyonların konsantrasyonu, boşluk suyu konsantrasyonuna eşit veya büyük olduğunda erozyon beklenmemektedir. Eğer erozyona neden olan suyun içindeki tuz konsantrasyonu, boşluk suyunun tuz konsantrasyonundan düşük ise, su osmos hareketi ile kil taneleri yüzeyine doğru hareket edebilir ve tabakanın şişmesine neden olur. Bir başka ifade ile, taneler arasındaki bağ zayıflar. Sonuç olarak erozyona neden olan suyun tuz konsantrasyonu düşük ise, borulanma açısından yüksek bir şüphe oluşmaktadır.

Bir başka önemli nokta, erozyona neden olan suyun içindeki iyonların tipidir. Bu faktör, zemin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Erozyona neden olan su içindeki iyonların düşük değerliliğe sahip olması, borulanma şüphesini arttırmaktadır. Dispersif killerde oluşan borulanma, genellikle barajın ilk dolumu esnasında gelişmektedir. Ancak bunun aykırı örnekleri de vardır. Örneğin Avustralya'da tuzlu bir alana inşa edilen baraj, yüksek iyonik konsantrasyona sahip bir rezervuar suyu (26 meq/L) ile sürekli sızma kaçağı olmasına rağmen uzun yıllar hizmet vermiştir. Ancak



Şekil 3.7. Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Resendiz, 1977)

sonradan rezervuara 32 km'lik bir boru hattı ile düşük iyonik konstrasyonlu (1.2 meq/L) su derivasyonu yapılmıştır. Baraj, bu işlemden üç gün sonra göçmüştür (Knodel, 1991).

3.1.3.4 Sıkılık ve su muhtevası

Dolguların, özellikle toprak dolgu barajların geçirimsiz zonunun, yeterli enerjiyle ve uygun su muhtevasıyla sıkıştırılması, dolgu stabilitesi açısından önem arz etmektedir. Dispersif olmayan zeminler açısından bile, bu iki faktör önemle dikkate alınmalıdır. Sıkıştırılmış dispersif killerin erozyonu üzerinde dolgunun kuru yoğunluğu ve başlangıç su muhtevası değişik zamanlarda araştırılmıştır. Bunlardan birinde, en düşük erozyonun optimum su muhtevasının % 2-3 ıslak yönünde oluştuğu görülmüştür (Lewis and Schmit, 1977; Wan and Fell, 2004). Aynı araştırmacılar; aynı su muhtevasında oluşan erozyonun, kuru yoğunluğunun artmasıyla azalma eğilimini gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

DSİ uygulamalarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zeminin yoğunluğunun artmasıyla dispersibilite sınıfının değiştiği gözlenmiştir. Ancak burada mekanik erozyon ile dispersif erozyon ayrımı yapılmamıştır. Yoğunluğun ve su muhtevası kontrolünün, tek başına erozyonun oluşmasının önlenmesi yönünden yeterli olmadığı görülmesine rağmen, dikkatli kontrol ve optimum su muhtevası üzerinde

sağlanan sıkıştırma işlemi, zemin kütlesinin esnek davranışının gelişmesine neden olmaktadır. Bu şekilde farklı oturma çatlaklarının ve hidrolik çatlamaların oluşması önlenmektedir.

Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında, sıkılık derecesinin borulanma üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma yürütülmüş ve sonuçları yayınlanmıştır (Tosun vd., 2002). Bu çalışmada, sıkılık derecesinin erozyonun hızı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sırasında görülmüştür ki; dispersif zeminler uygun koşullarda sıkıştırılmış olsalar bile, yine benzer içsel erozyona maruz kalmaktadırlar.

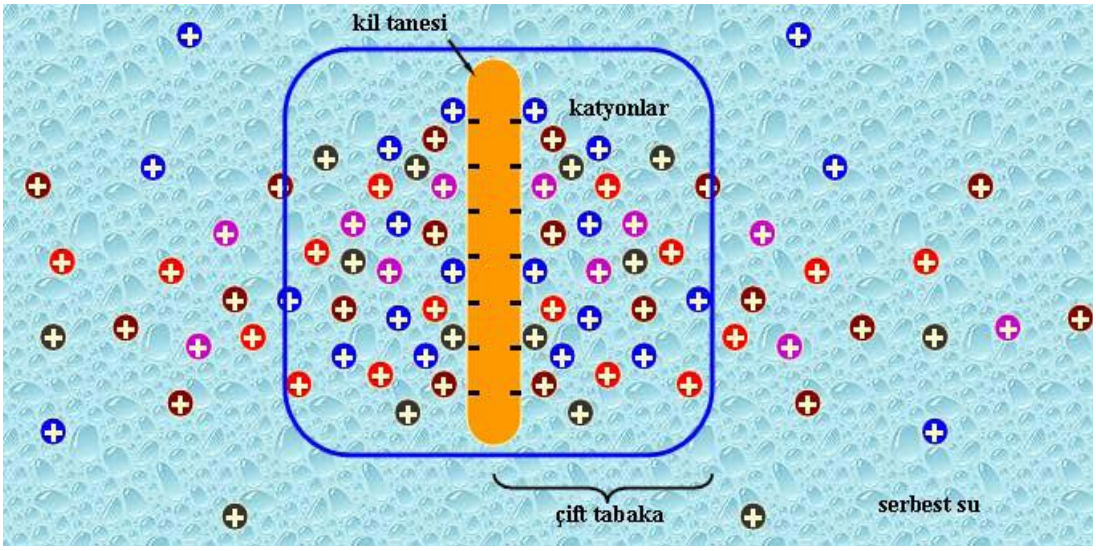
3.2 Şişen Zeminler

Yeryüzündeki zeminlerin bir bölümünü teşkil eden "şişen zeminler", geoteknik mühendisliğinde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yıllık yağışın yıllık buharlaşmadan daha az olduğu, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bu tür zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Suya doygun olmayan bazı killi zeminlerin su emerek hacminin artması "şişme", bu hacim artışını engellemek için uygulanan ek basınç ise "şişme basıncı" olarak tanımlanabilir. Şişen zeminler üzerinde gerekli önlemler alınmadan inşa edilen binalar, karayolu, demiryolu ve havaalanı kaplamaları, sulama kanalları, barajlar, istinat duvarları gibi yapılarda önemli boyutlarda hasarlar oluşmaktadır. Dünyanın bir çok ülkesinde her yıl şişen zeminlerden dolayı milyarlarca dolarlık zarar meydana gelmektedir. Bu zararlar sel, kasırga ve deprem gibi doğal afetlerin oluşturduğu zararları dahi aşabilir. Şekil 3.8'de şişen zeminlerin neden olduğu hasar görülmektedir.

Şekil 3.8. Şişen zeminlerin neden olduğu zemin hasarı

3.2.1 Şişme mekanizması

Kilin şişmesi esas olarak; kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olayıdır (Mc Bride, 1989). Kil taneleri, yüzeylerinde negatif elektrik yükü olan, pozitif yüklü köşelere sahip plakacıklardır. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Şişme, zemin-su sisteminde (Şekil 3.9) içsel gerilme dengesini bozan bir takım değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvı miktarının veya kimyasal bileşimin değişmesi sonucunda, zemin su kimyası değişmekte ve bu durum iç kuvvetleri etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, zemin suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde hacim değişikliği (şişme – büzülme) meydana gelmektedir (Nelson ve Miller, 1992).



Şekil 3.9. Kil – su sistemi (Sivakugan, 2001)

İç kuvvetler, kil – su sisteminde ortaya çıkan itme ve çekim kuvvetleridir. Çekim kuvvetleri; London – van der Waals kuvvetleri, negatif ve pozitif yüklü yüzeyler arasındaki Coulomb kuvvetleri, tane – katyon – tane bağları, hidrojen bağları ve çimentolanma bağlarından ileri gelmektedir. Coulomb kuvvetleri, levhalar arasındaki mesafenin karesiyle; van der Waals kuvvetleri ise mesafenin küpüyle ters orantılı olarak değişmektedir. Çekim kuvvetleri, zemin boşluklarındaki ortamdan da (dielektrik sabiti) etkilenmektedir. İtme kuvvetleri ise, adsorbe su iyonları ve su molekülleri arasındaki çift tabaka etkileşimleri ile tane yüzeyleri ve tabakalar arasındaki katyonların hidrasyonu sırasında meydana gelen hidrasyon enerjilerinden kaynaklanmaktadır. Hidrasyon kuvvetleri, moleküler düzeydeki mesafelerde etkili olmaktadır. İtme kuvvetleri, kil mineralinin yüzeyindeki değişebilir katyonların boyutundan, değerliğinden ve zemin boşluklarındaki ortamdan (dielektrik sabiti ve boşluk suyunun elektrolit konsantrasyonu) etkilenmektedir (Olphen, 1963; Mesri ve Olson, 1971; Sridharan vd., 1986).

Kil mineralinin levhaları arasında bulunan adsorbe su ile kil mineralleri arasındaki etkileşim, aşağıda belirtilen birkaç farklı mekanizmayla gerçekleşmektedir (Keren ve Shainberg, 1975; Dakshanamurthy, 1978; Sposito ve Prost, 1982; Low, 1992; Komine ve Ogata, 1994,1996).

- Su, kil minerallerinin negatif yüklü silikat yüzeyleriyle etkileşir ve silikat oksijenleri ile oksijen bağları meydana gelir.
- Su, negatif yüklü kil yüzeylerine çekilen katyonlarla etkileşir. Silikat yüzeylerindeki katyonların hidrasyonu sonucunda suyun serbest enerjisi azalır. Bu suyun aktivitesi veya kimyasal potansiyeli, serbest suyunkine eşit olana kadar, su adsorbsiyonuna ve şişmeye neden olan bir itme kuvveti oluşur.
- Negatif yüklü kil yüzeylerine yaklaşıldıkça, katyon konsantrasyonu artmaktadır. Elektrostatik çekimin bir sonucu olarak, iyonların difüzyonundaki sınırlanma ve artan konsantrasyon nedeniyle, su molekülleri konsantrasyonu dengelemek için yüzeye yayılır. Suyun bu şekildeki ozmotik hareketi, bazen çift tabaka şişmesi olarak da isimlendirilmektedir.

3.2.2 Şişme potansiyeli

Zemin ortamında, su muhtevası ve gerilme koşullarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkan hacim artışı, şişme olarak tanımlanmaktadır. Şişme potansiyeli, genel olarak, zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavram olarak kullanılmaktadır. Literatürde, şişme potansiyelinin belirlenmesi ve tanımlanması açısından tam bir fikir birliği bulunmamaktadır. Bununla birlikte, şişme potansiyeli; genellikle, zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir (Sridharan vd.1986; Shuai, 1996).

3.2.2.1 Şişme yüzdesi

Şişme yüzdesi, örselenmemiş veya istenilen herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak hazırlanan zemin numunesinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir. Zemin numunesinin ıslanması (su altında bırakılması) sonrasında, yanal deformasyonların engellenmesi durumunda (bir boyutlu ödometre koşullarında) meydana gelen düşey boy değişimi veya eksenel deformasyonların engellenmesi durumunda (üç eksenli

koşullarında) meydana gelen yanal çap değişimi şeklinde belirlenebilmektedir (Keskin vd., 1992).

Bir boyutlu ödometre koşullarında, numunenin kesit alanı sabit tutulduğu için, şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$S = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100\%$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi,

H_0 - Numunenin başlangıç yüksekliği,

H_1 - Şişme sonrasındaki numune yüksekliğidir.

Üç eksenli koşullarında numunenin yüksekliğinin sabit tutulması durumunda, yanal çap değişimi cinsinden şişme yüzdesi ise eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$S = \frac{D^2{}_1 - D^2{}_0}{D^2{}_0} \times 100\%$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi,

D_0 - Numunenin başlangıç çapı,

D_1 - Şişme sonrasındaki numune çapıdır.

3.2.2.2 Şişme basıncı

Şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir. Sridharan ve Choudhury (2002) şişme basıncını, kilin su veya elektrolit adsorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil – su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlamışlardır. Zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapının ağırlığından daha büyük olduğu ve yapının farklı zemin tabakaları üzerine oturduğu durumlarda,

mühendislik yapılarında önemli hasarlar meydana gelmektedir. Şişen zeminler üzerinde yapılmış olan, karayolu ve havaalanı kaplamaları, hafif binalar, istinat yapıları, bahçe duvarları, boru hatları vb. yapılarda, yüksek şişme basınçları nedeniyle önemli zorlanmalar, çatlaklar, kırılmalar meydana gelebilmektedir. Wooltorton (1954) çalışmasında, Nijerya'da 1100 kPa (110 t/m^2) büyüklüğünde şişme basınçları ölçtüğünü belirtmiştir (Shuai, 1996).

3.2.3 Şişme davranışına etki eden faktörler

Bir zeminin şişme davranışını etkileyen faktörler, esasen üç farklı grupta ele alınmaktadır. Bunlar, içsel kuvvet alanının esas doğasına etki eden zemin özellikleri, içsel kuvvet sisteminde meydana gelen değişimlere etki eden çevresel faktörler ve gerilme durumu olarak sıralanabilir. Nelson ve Miller (1992) zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde etkili olan bu faktörleri, Çizelge 3.3, 3.4 ve 3.5'de görüldüğü şekilde özetlemişlerdir.

Çizelge 3.3. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	Tanım
Kil mineralojisi	Zemin hacim değişikliklerine neden olan mineraller, genellikle, montmorillonitler, vermikülitler vb. minerallerdir. İllit ve kalonitler genellikle, tane boyutlarının çok küçük olduğu durumlarda şişebilirler.
Zemin su kimyası	Artan katyon konsantrasyonu ve değerliği, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg^{+2} katyonları , Na^{+} katyonlarından daha az şişmeye neden olur.
Zemin strüktürü ve fabrik	Flokülleşmiş killer ayrık killerden daha fazla şişme eğilimindedir. Çimentolaşma şişmeyi azaltır. Yüksek su muhtevasında sıkıştırma veya yoğurma sonucunda fabrik ve strüktür değişir. Yoğurarak sıkıştırma, düşük su muhtevasında statik olarak sıkıştırmadan daha düşük şişme potansiyeli ile ayrık strüktürler oluşturduğu göstermiştir.

Zemin emmesi	Zemin emmesi, doymamaış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir. Doygunluk, yer çekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmesi, zemin tanelerinin elektriksel ve kimyasal karakteristikleri ve suya bağlıdır.
Plastisite	Genel olarak geniş bir su muhtevası aralığında plastik davranış gösteren ve yüksek likit limite sahip zeminler daha yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahiptir
Kuru birim hacim ağırlık	Yüksek birim hacim ağırlıklar, tanelerin birbirine yaklaştığını gösterir ki bu da taneler arasında daha büyük itki kuvvetleri ve daha yüksek şişme potansiyeli anlamına gelir.

Çizelge 3.4. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	**Tanım**
Başlangıç nem durumu	Kurumuş şişebilen bir zeminin suya eğilimi veya emmesi, yüksek su muhtevasındaki aynı zeminden daha fazladır.
Nem değişimleri	Nemdeki değişiklikler, esas olarak iklim, yer altı su seviyesi, drenaj ve yapay su kaynakları, bitkiler, permeabilite ve sıcaklıktan etkilenir.

Çizelge 3.5. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	**Tanım**
Gerilme tarihçesi	Aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslanma-kuruma ve yaşlanmanın, şişme üzerinde önemli etkileri vardır.
Arazi şartları ve zemin profili	Bir zemindeki başlangıç gerilme durumunun, şişme potansiyeline sahip tabaların yeri ve kalınlığının, zeminin şişmesi üzerinde önemli etkileri vardır.
Yükleme	Sürşarj yükü, taneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişmeyi azaltır.

3.2.4 Şişen zeminlerin sınıflandırılması

Şişen zeminleri tanımlamaya yönelik parametreler bir arada değerlendirilerek farklı sınıflandırma yöntemleri geliştirilmiştir. Şişme potansiyelini tanımlamaya yönelik standart bir metodun mevcut olmaması sebebiyle bu konuda birtakım karışıklıklar yaşanmaktadır. Seed ve diğ. (1962) şişme potansiyelini, optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında olacak şekilde sıkıştırılmış bir numunede 6.9 kPa'lık basınç altında oluşan hacim artışı olarak tanımlamaktadır. Snethen (1979) ise potansiyel şişme miktarını, herhangi bir su muhtevası ve tabii birim hacim ağırlığa sahip bir zemin numunesinin boyunda, arazide maruz kalacağı efektif gerilme altında oluşacak artış olarak tanımlamıştır.

Kıvam limitlerinin şişen zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılması oldukça popüler bir yöntemdir. Holtz ve Gibbs (1956) tarafından geliştirilen şişen zemin sınıflandırma tablosu oluşturmuşlardır (Çizelge 3.6). Chen (1988) sadece plastisite indisini kullanarak bir sınıflandırma yapmaktadır (Çizelge 3.7).

Raman (1967) şişme derecesini plastisite indisi ve büzülme indisine bağlı olarak tanımlamaktadır (Çizelge 3.8). Seed ve diğ. (1962)'de sıkıştırılmış zeminlerin şişme özellikleri üzerinde çok kapsamlı bir çalışma yapmışlar, aktivite ve kil yüzdesini kullanarak bir sınıflandırma grafiği oluşturmuşlardır. Artan aktivite ile birlikte şişme potansiyelinde artış görülmektedir. Bu grafik Şekil 3.10'da görülmektedir.

Çizelge 3.6. Şişen koloid miktarı, plastisite indisi ve büzülme limitine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırması (Holtz ve Gibbs, 1956)

İndeks değerleri			Beklenen şişme (% toplam hacim artışı)	Şişme derecesi
Koloid miktarı (0,001 mm'den küçük dane çapı)	Plastisite indisi	Büzülme limiti		
>28	>35	<11	>30	Ç ok yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

*6.9 kPa'lık bir gerilme altında

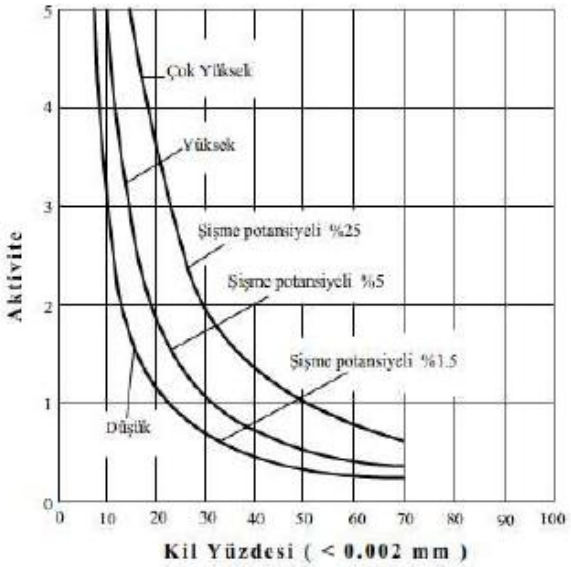
Çizelge 3.7. Plastisite İndisine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırması (Chen, 1988)

Şişme Potansiyeli	Plastisite indisi
Düşük	0-15
Orta	10-35
Yüksek	20-55
Çok yüksek	>35

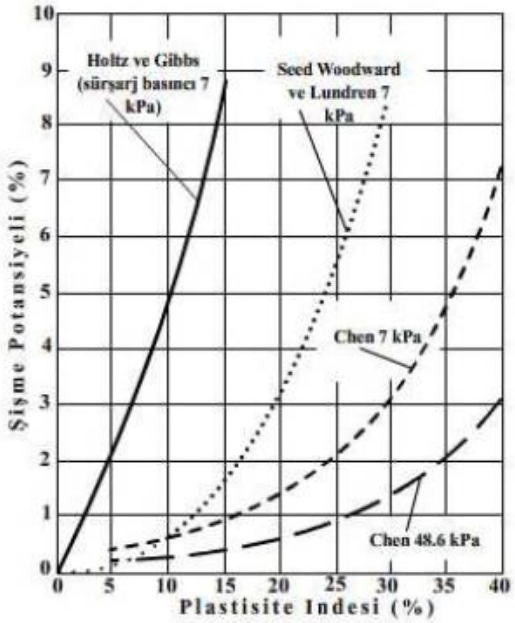
Çizelge 3.8. Raman (1967) tarafından geliştirilen şişen zemin sınıflandırması

Plastisite indisi	Büzülme indisi	Şişme derecesi
<12	<15	Düşük
<12-23	15-30	Orta
23-32	30-40	Yüksek
>32	>40	Çok yüksek

Şekil 3.11 ise yukarıda sözü edilen tüm sınıflandırma sistemlerini bir arada değerlendirmektedir. Şekilde görüldüğü gibi farklı yöntemler ile yapılan sınıflandırmalarda farklı sonuçlar elde edilmektedir. Örneğin %15 plastisite indisine sahip bir zemin için farklı miktarlarda hacim değişikliği tahmini yapılabilmektedir. Bunun nedeni, zemin numunelerinin hazırlandığı ve test edildiği şartların farklı olmasıdır.



Şekil 3.10. Zeminlerin şişme potansiyeline göre sınıflandırılması (Seed et al., 1961)



Şekil 3.11. Hacim değişikliği ve plastisite indeksi ilişkisi hakkında yapılan bazı çalışmaların kıyaslanması (Chen, 1988)

BÖLÜM 4

PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

Şişme ve dispersif özelliğine sahip problemli kil zeminler bir çok inşaat mühendisliği yapılarında ciddi problemlere nedne olmaktadır. Kil zeminlerin istenmeyen bu özelliklerinin iyileştirilmesi mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir.

Stabilizasyon zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesidir. Yer, yapıların oturtulduğu düzlemdir ve inşaat yatırımı sağlam bir zemin üzerine yapılmak istenir. Zaman içinde, güvenli inşaat yapılabilecek sağlam yerler azalmış ve/veya her tür özelliğe sahip zemin üzerine inşaat yapma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeplerden zeminlerin iyileştirilmesi (stabilizasyon) geoteknik biliminin ilgilendiği geniş kapsamlı bir konudur (Cömert, 2005).

4.1 Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu

Dispersif killer, yavaş hareket eden su ile kolayca erozyona uğrayabilir. Dispersif kil zemin su içerisine batırıldığı zaman, zemin içindeki kil fraksiyonu tek taneli partikül gibi davranır. Bir başka ifade ile, kil partikülleri düşük elektro-kimyasal çekim kuvvetlere sahip olduğundan, zeminin diğer partikülleri ile olan bağları zayıflar. Sonuç olarak dispersif kil zeminler, bağımsız kil plakalarına ayrıldığı ve bu plakalar uzağa taşındığı zaman erozyona uğrar. Bu erozyon; kuruma, oturma ve hidrolik çatlaklarda veya zemin kütlesi içinde nispi olarak yüksek permeabilitenin oluştuğu bölgelerde oluşabilir.

Son yıllarda dispersif killerin tanımlanması ve özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla değişik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar çerçevesinde en çok kullanılan yöntemin kimyasal katkı malzemesi kullanımı olduğu açıkça görülmektedir.

Baraj mühendisliği uygulamalarında geçirimsiz malzeme olarak kullanılan kilin dispersif karakter taşıdığı tespit edilirse ve ekonomik mesafeler içerisinde dispersif karakterde olmayan malzeme varsa, dispersif zeminin kullanılmasından vazgeçmek veya mümkünse yapının yerini değiştirmek gerekir. Bu konuda, DSİ V. Bölge Müdürlüğü tarafından planlama çalışması yaptırılan Koyunbaba barajında olduğu gibi, dispersif olan kil, çekirdeğin iç kısımlarında dispersif olmayan kil ise dış kısımlarında kullanılarak, yani dispersif kil dispersif olmayan kil tarafından bir zarf içerisine alınarak malzemenin ekonomik olarak kullanılabileceği bir tip önerisi yapılmıştır (Şahin, 2004).

Pratikte çok kullanılan yollardan biri ise kimyasal katkı malzemeleri kullanarak dispersif zemin özelliklerini değiştirmektir. Özellikle en geçerli tedbir, zeminin Na^+ katyonu muhtevasını düşürmektir. Bunun için sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) kullanılması durumunda Ca^{++} katyonu, Na^+ katyonunun yerine geçerek zemindeki Na^+ katyonu muhtevasının azalmasına ve dispersif karakterin değişmesine neden olmaktadır (Forbes vd., 1980). Zeminin kuru ağırlığına göre %1,0–2,0 oranında sönmüş kireç ilavesinin dispersif zeminleri tamamen değiştirerek dispersif olmayan karaktere dönüştürdüğü görülmüştür. Bu yöntem pratikte birçok baraj inşaatında başarı ile uygulanmıştır (Logani, 1979; Forbes vd., 1980). Dispersif killerin erozyonunu önleyen diğer bir kimyasal katkı malzemesi ise alüminyum sülfattır ($Al_2(SO_4)_3$). Zeminin kuru ağırlığına göre %0,5–2,0 oranında alüminyum sülfat ilavesi, dispersif karakteri bertaraf etmektedir (Landau ve Altschaeffl, 1977). Alüminyum sülfatın zemine tatbiki, kolay eriyebilir olması nedeniyle, kireçten daha ucuz ve daha az tehlikelidir. Bu tür katkıların kile ilavesi; baraj gövdesi üzerinde olabileceği gibi, kilin temin edildiği ocakta da gerçekleştirilebilir. Ancak bu tür uygulamaların bir dezavantajı, işleme tabi tutulacak malzeme hacminin çok büyük olması durumunda ekonomik olmamasıdır. Bu durumda zeminle etkileşime geçen rezervuar suyuna kimyasal madde katılması daha ekonomik olmaktadır. Kimyasal işlemin, su veya zeminden hangisine yapılması gerektiğine karar vermek için mutlaka ekonomik mukayese yapılmalıdır. Bu yönteme dayalı

uygulamalarda başarılı sonuçlar alınamadığını rapor eden araştırmacılar olduğu gibi (Ingles, 1972), Avustralya'da rezervuar suyunun alçı ($CaSO_4$) ile muamelesi sonucu başarılı olmuş uygulamalara ait raporlar da mevcuttur (Grant vd., 1977).

Çokça ve Toktaş (2002), dispersif bir zeminin C tipi uçucu kül ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Uçucu kül ilavesinin genellikle numunenin mukavemetini arttırdığını ve sıkışabilirliğini azalttığını göstermiştir. Ayrıca uçucu kül ilavesi ile zemin dispersif durumdan dispersif olmayan duruma geçmiştir. %13 uçucu kül ilavesi ile numune dispersif durumdan dispersif olmayan duruma geçmiştir. Stabilize edilmiş dispersif zeminleri toprak dolgu barajlarda ve seddelerde kullanabildiğimizde hem muhtemel kil kaynaklarının miktarını arttırabileceğiz hem de termik santrallerin depolamak zorunda oldukları, bir atık malzeme olarak görülen uçucu kül değerlendirilmiş olacaktır. Uçucu külün nakliye masraflarını da göz önüne aldığımızda, uçucu küllerin elde edildiği termik santrallerin yakınında görülen dispersif killerin stabilize edilmesinde kullanımının mümkün olabileceği düşünülmektedir.

4.2 Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu

Problemli kil zeminlerde oluşan en büyük sorunlardan birisi zeminde meydana gelecek şişme olayıdır. Eğer temel zemini, şişme potansiyeli gösteriyorsa bir takım önlemlerin alınması gerekir. Örneğin, temel altındaki şişen zeminin kaldırılması, şişen zeminlerin yapısını değiştiren işlemler yapılması, inşaat sonrasında yapı altındaki zeminin su içeriğinin kontrol altına alınması alınabilecek önlemler arasındadır. Şişen zeminlerin yapısı kompaksiyon ile değiştirebilir. Ayrıca önnemlendirme yapılarak önceden şişmesi sağlanabilir. Şişen killerin kimyasal yöntemlerle stabilizasyonu da çok kullanılan yöntemlerden birisidir.

4.2.1 Şişen Zeminlerin Kazılması ve Değiştirilmesi

Şişen zeminlerin kazılması ve stabil zeminlerle yer değiştirilmesi; stabil temel malzemesini sağlayan basit ve kullanılan yöntemlerden birisidir. Yapılan çalışmalar; yüksek şişme potansiyeline sahip zemin üzerinde, kalınlığı 1,5 m'den büyük daneli

zemin bulunuyorsa, yapı altında temel zeminin şişme potansiyelinden kaynaklanan tehlikeli bit temel hareketi oluşturmayacaktır (Chen, 1988). Üstteki daneli zeminler içinden şişen zemin içine süzülen suyun yolu ve mekanizması açıklığa kavuşmamıştır. Sızan su, şişen zemine ulaşmıyor olabilir veya alttaki şişen zeminin kabarması uniform oluşur ki; bu hareket yapıyı etkilemez. Aynı durum, sıkıştırılarak oluşturulmuş dolgular için geçerli değildir. Seçilmiş dolgu kalınlığı ile ilgili standart değer yoktur. Ancak hafif yapılar için en düşük 90-100 cm olması uygun görülebilir (Chen, 1988).

Zemin değiştirme işleminde dikkate alınacak önemli bir nokta, yerleştirilecek zeminin şişme özelliği göstermemesidir. Birleştirilmiş Sınıflama Sisteminde tanımlanan tüm taneli zeminler (GW'den SC'ye kadar), bu amaç için uygundur. Ancak GW ve SP givi temiz zeminlerde, yüzey suyu zemin içinde serbest hareket ederek alttaki şişen zeminlerin ıslanmasına neden olmaktadır. Bu yöntemle yapılan uygulamaların bazı dezavantajları vardır. Şişmeyen ve tercih edilen geçirimsiz bir dolgu malzemesi bulunmalıdır ki, bu tip malzemenin proje sahasına yakın bir ocakta bulunmaması nedeniyle, çoğu zaman yüksek bir maliyet oluşturmaktadır (Coduto, 2006).

4.2.2 Sıkışma Kontrolu ve Sürşarj Yükleme

Şişen zeminlerin şişme potansiyeli, kuru yoğunluğun azalması azalmaktadır. Düşük yoğunlukta ve optimum değerin üzerinde bir su muhtevasında yapılan sıkıştırma, yüksek yoğunlukta ve düşük su muhtevasında yapılan sıkıştırmadan daha az şişme potansiyeline sahiptir. Şişme potansiyelinin en iyi kontrolü, zeminin düşük yoğunlukta, optimum veya üstündeki bir su muhtevası değerinde sıkıştırılarak sağlanır. Bu durumda, şişme basıncı en düşük seviyede oluşacaktır (Chen, 1988). Gerçekte optimum su muhtevası üzerinde bir değerde zemini aşırı sıkıştırmak zordur. Aynı zamanda katı kilin, optimum su muhtevasının %4 ile %5'inden daha fazla bir su muhtevasında sıkıştırılması daha da zorlukla yapılmaktadır (Nelson and Debora, 1992).

Şişen killerde şişme basıncı değerine yakın değerlerde bir sürşarj yüklemesi yapılarak şişme engellenebilir. Bu yöntem ancak düşük-orta derecede şişme

potansiyeline sahip zeminlerde pratik olarak kullanılabilmektedir. Şişme değerleri ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin nonlineer olması şişme basıncının artması durumunda yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir.

4.2.3 Ön Islatma

Şişen killerin iyileştirilmesi ile ilgili bilinen en basit ve en etkili yöntem; ön ıslatmadır. Kapiler etkilerden dolayı zemin içindeki su, orta derinlikteki su tablasından ist seviyelere doğru hareket eder. Aynı zamanda su hareketi; termo-osmos ve diğer mekanizmalarla yüksek sıcaklıklı alanlardan düşük sıcaklıklı alanlara doğru olur. Normal olarak hareket eden su, yüzeyde buharlaşır ve bu şekilde zeminin nem dengesi sağlanır (Chen, 1988). Ön ıslatma teorisi; su muhtevası yüksek olan zeminlerin daha düşük şişme göstereceği ilkesine dayanır. Eğer zemin yeterince yüksek su muhtevasına sahip ise önemli bir hacim değişimi olmayacağı kabul edilebilir. Ancak bu yöntemin kullanımını sınırlandıran önemli dezavantajlar mevcuttur. Şişen zeminler genellikle çok düşük permeabilite değerine sahiptirler bu yüzden zemini yeterince ıslatmak uzun zaman alabilir. Ayrıca zeminin su muhtevası arttırıldığında zemin dayanımının ve şev stabilitesinin önemli ölçüde azalabileceği unutulmamalıdır.

4.2.4 Kimyasal Katkılarla Stabilizasyon

İnce daneli zeminlerde kireç karıstırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına, ayrıca kil mineralleri ile kireç arasında ortaya çıkan puzzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen bir çesit çimentolanma nedeni ile zeminin mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Söz konusu kimyasal reaksiyonlar çevre kosullarının etkisi (nemlilik ve ısı gibi) altında zamana baglı olarak gelistigi için zeminin mukavemeti de zamanla artmaktadır. Kireç ile stabilizasyon yöntemi özellikle karayolları ve hava meydanları alt yapıları için uzun zamandır basarı ile uygulanmaktadır. Toprak dolgular, kayan sevler, köprü ve istinat duvarları arka dolguları ve temel altı zemin iyilestirmesi içinde yaygın olarak kullanılan bu uygulamanın basarı derecesini belirleyen etkenlerin en önemlileri; zeminin mineralojik yapısı, ortamın ısı ve nemlilik derecesi, ilave edilecek baglayıcı malzemenin tipi ve miktarı, uygulama yöntemi, ortamın ısısı ve nemlilik

derecesi, katkı malzemesi tip ve oranları, kür süreleri ve ekonomik kaygılar olarak sıralanabilir (Özaydın, 1989). Şişen killerin stabilizasyonu için gereken kireç miktarının; ağırlıkça %2-8 arasında değiştiği ifade edilmektedir (Chen, 1988).

Zeminin pH derecesi, organik madde miktarı, drenaj koşulları ve su muhtevası gibi birçok faktör; zemin-kireç reaksiyonunu etkilemektedir. Asidik olmayan zeminlerde (pH>7), kireç ile daha iyi reaksiyon elde edilmektedir (T.W. Lambe, 1962).

Çimento içinde mevcut silika, stabilizasyon için gerekli puzzolanik maddeyi oluşturmaktadır. Dolayısıyla içinde puzzolanik malzeme içermeyen – kil mineralleri olmayan – zeminler içinde etkili olmaktadır. Zemine, kuru ağırlığının %5-15'i kadar çimento karıştırılarak kompaksiyon uygulanır. Kohezyonlu ve organik zeminler dışındaki zeminler, bu yöntem için uygundur (Uzuner, 2000). Portland çimentosunun hidratasyonu; değişik bileşik ve jeller oluşturan karmaşık bir puzolonik reaksiyondur. Kil ile çimento karışımının sonuçları; kireç stabilizasyonu sonuçları ile benzer sonuçlar göstermektedir. Bu uygulama ile likit limit, plasitisite indisi, zeminin hacim değişikliği potansiyeli azaltılır ve rötre limiti ile kayma dayanımı arttırılır (Chen, 1988).

Kalsiyum klorit ($CaCl_2$) ve sodyum klorit (NaCl) gibi tuzlar yollarda toz kontrol, rutubetin sağlanması, yüzeyden kaba danelerin kopmasının önlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Ayrıca diğer kloritler (örneğin $MgCl_2$) yoğunluk ve stabilitenin artmasına neden olduğu gibi zeminin PI ve LL değerinin düşmesine neden olmaktadır. Zeminin permeabilitesini artırarak kapilarite duyarlılığını azaltmakta ve böylece don kabarmalarını da önlemektedir. Ancak suyla eriyerek zeminden uzaklaşmasının önlenmesi oldukça güç olduğundan dolayı kullanımı sınırlıdır. Bilindiği gibi zeminler büyük oranda kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}), sodyum (Na^{+}), potasyum (K^{+}) gibi katyonlardan ve sülfat (SO_4^{-2}), klorit (Cl^{-}), fosfat (PO_4^{-3}), nitrat (NO^{-3}) anyonlardan oluşur. Özellikle şişebilen zeminlerde tuzların katılması ile iyon dengesi sağlandığından şişme basınçları ve şişme basıncı değerleri de azaltılabilmektedir.

Tuzların zemin üzerindeki etkisi zemin özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Genelleme yapmak gerekirse; özellikle yüksek limit değerine sahip

olan zeminlerde etkili olmaktadırlar. Zeminlerin su muhtevalarını korunmasını, büzülme limitinin ve kayma dayanımının artmasını sağlarlar. Suyun donma derecesini düşürdükleri için donmadan kaynaklanan şişme probleminin çözümünde başarılı olarak kullanılmışlardır. Ancak zaman içerisinde zeminden ayrılmaları problem teşkil etmektedir. Bu nedenle stabilizasyon belirli sürelerde tekrarlanması gerekmektedir. Bu da ekonomik olmamasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada ise magnezyum klorür solüsyonu ile zemin stabilizasyonu ele alınmış olup, öncelikli olarak malzemenin genel özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

4.3 Magnezyum Klorürün Yapısı

Magnezyum klorür ($MgCl_2$)'ün kaynagı tuzlu su gölleridir. Kar ve buz kontrolü için katı ve sıvı halde kullanılabilir. Optimum %21,6 konsantrasyonda etkili olmaktadır ve buz eritme sıcaklıgı – 33^0 C'ye kadar düşürmektedir. Kalsiyum klorürden %40 daha fazla buz eritme kapasitesine sahiptir. Su içerisinde hızlı ve kolay erimektedir (FHWA, 1996).

Sulu magnezyum klorür salamura veya deniz suyundan elde edilebilir. Doğal mineralli bişofit olarak magnezyum klorür Kuzey Batı Avrupa' daki Zechstein deniz yatağı ya da ABD' nin orta kesimlerindeki Permiyen dönemi deniz yatakları gibi eski deniz yataklarından çıkartılır.

Şekil 4.1. Magnezyum Klorür

Oktahedral Mg' ye benzeyen $MgCl_2$, kadmium klorür motifi içerisinde kristalleşir. Çeşitli hidratlar $MgCl_2(H_2O)x$ formülasyonu ile bilinirler ve sıcaklık artışıyla su kaybederler. Hekzahidrat olarak, Mg^{+2} oktahedral kalır ancak 6 su ligandlar için koordine edilir (Holleman; Wiberg, 2001) . $MgCl_2(H_2O)x$ (x = 6, 12) hidratlarının termal dehidratasyonu açıkça oluşmaz (Wells, 1984). Bazı hidratların oluşumu sonucuyla önerildiği gibi, susuz $MgCl_2$ nispeten güçsüz olmasına rağmen bir Lewis asididir (Bales et al., 1988).

Dow metotunda, $MgCl_2$ hidroklorik asit kullanılarak magnezyum hidroksitten oluşturulur:

$$Mg(OH)_2(s) + 2\ HCl \rightarrow MgCl_2(aq) + 2\ H_2O(l)$$

4.3.1 Magnezyum Klorürün Üretimi ve Avantajları

Kış aylarındaki kar ve buzun varlığı, karayollarında, köprülerde, viyadüklerde, caddelerde ve yaya kaldırımlarında çeşitli kazalara ve günlük aktivitelerin kısıtlanmasına sebep olmaktadır. Havaalanlarında ise pistlerin buzlanması hava trafiğinin tamamen durmasına yol açmaktadır. Bu nedenle daha güvenli trafik koşullarının sağlanması, gecikmelerin ve kazaların azaltılması ve yaya güveliğinin arttırılması amacıyla kar ve buzun giderilmesi konusunda çeşitli uygulamalar yapılmaktadır.

Ülkemizde bu amaçla her sene ciddi harcanmalar yapılmasına rağmen, çok eski yıllardan kalan alışkanlıkla hala yollara ham tuz ve kaya tuzu serpilerek, gelişmiş ülkelerin yaklaşık 20 yıl önce terk ettikleri bu demode ve verimsiz uygulamalarla araçların paslanmasına ve korozyonuna yol açılmakta, yol sathı ve asfalt ciddi zarar görmekte, tuz belli bir sıcaklığın altında (-12 ^oC) buzlanma ile mücadele görevini tam olarak yerine getiremediği için kar ve buzla mücadele bütün bu harcamalara, uğranılan zararlara rağmen tam anlamıyla sağlanamamaktadır.

Gelişen dünyamızda kış aylarında kar ve buzlanmayla modern mücadelede araçlarda paslanma ve korozyona yol açmayan, betona ve asfaltta zarar vermeyen,

bitkiler ve canlılar açısından hiçbir zararlı unsur içermeyen kimyasal maddeler uygulanmaktadır. Bu kimyasal maddelerden en etkili ve en avantajlı olan magnezyum klorür solüsyonu, Amerika, İskandinavya, Kanada ve Avrupa gibi sert kış aylarına maruz kalan gelişmiş modern ülkelerde yolların buzlanmaya karşı korunması amacıyla çok uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Bugüne kadar ülkemize ithalat yoluyla ve çok yüksek maliyetle sağlanılan magnezyum klorür Alkim işletmelerinde yapılan çalışmalar sonucu, doğal yöntemlerle solüsyon halde üretilmeye başlanmıştır.

Şekil 4.2. Alkim Cihanbeyli Tesisleri Bolluk Gölü- Konya

Şekil 4.3. Magnezyum klorür üretim havuzları

Magnezyum klorür solüsyonu kullanımının getirdiği avantajları şöyle sıralayabiliriz:

- -44°C'ye kadar etkinliğini sürdürür.

- Normal ham tuzun – kaya tuzunun etkinliği azami -12°C'dir. Bilindiği gibi Anadolu'da geceleri kış aylarında sıcaklık kolayca -12°C altına inebilmektedir. Gündüz sıcaklığı ile gece sıcaklığı arasındaki farklar daima dikkate alınmalıdır. Buzlanma nedeniyle oluşan kazaların çok büyük bir bölümü gece saatlerinde ve sabaha karşı olan kazalardır.
- Doğru uygulanması koşulu ile hava şartları ve trafiğe bağlı olarak 24 – 48 saat arasında etkilidir. Böylece klasik ham tuz – kaya tuzu uygulamalarına göre etkinliğini daha uzun sürelerde muhafaza eder.
- Çevre dostudur. İnsan sağlığına, bitkilere ve hiçbir canlıya zarar vermez.
- Korozif etkisi yoktur. Araçlara zarar vermez.
- Yol yüzeyine, betona ve asfalta hiçbir olumsuz etkisi yoktur.
- Yol yüzeyinde sürtünme katsayısını olumsuz etkilemez.
- Yüzeyde oluşan buz tabakasını eritirken, yeni buz oluşumunu da engeller. Bu da trafik kazalarının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır.
- İşçilik ve ekipman konusunda çok büyük uygulama kolaylığı ve maliyet avantajı sağlar.

4.3.2 Kullanım Alanları

Magnezyum klorür, diğer magnezyum bileşiklerine (çökelme ile) öncü olmaya yardım eder.

$$MgCl_2(aq) + Ca(OH)_2(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + CaCl_2(aq)$$

Ayrıca magnezyum metali oluşturmak için elektroliz olabilir (Hill, Petrucci, McCreary, Perry). Bu yöntem önemli derecedeki uygulamalarda kullanılır :

$$MgCl_2(l) \rightarrow Mg(l) + Cl_2(g)$$

Magnezyum klorür, magnezyum üretiminin yanında diğer çeşitli uygulamalarda da kullanılır: Tekstil ürünleri imalatı, kağıt, yangın tüpleri, çimento ve soğutma salamuralarında, toz ve erozyon kontrolünde kullanılır. Sulu magnezyum oksit karşımıyla magnezyum klorür sert bir malzeme olarak adlandırılan sorel çimentosu biçimini alır.

Magnezyum iyonu Mg^{+2} (genellikle klorür olarak eklenen) poimeraz zincir reaksiyonunda önemli bir bileşendir, DNA parçalarını yükseltmek için kullanılan bir yöntemdir. Mg^{+2} biyolojide, ATP gibi, nükleotidler için gerekli ortak iyon olduğundan genellikle RNA, DNA ve enzimleri olduklarında deneysel biyolojide vitro işlevinde kullanılır.

Magnezyum klorür ayrıca tıbbi ve güncel (cilt ile ilgili olan) uygulamalarda kullanılır. Magnezyum kaynağı olarak haplarda kullanılır. Magnezyum sülfat gibi laksitive olmayan bir çözünen bileşik olarak hizmet vermektedir ve çözünebilir Mg^{+2} iyonu üretmek için mide asiti gerektirmediğinden magnezyum hidroksit ve magnezyum oksitten daha fazla biyolojik kullanıma elverişlidir. Aynı zamanda efalopodlar için etkili bir anestezik olarak kullanılabilir, kabukluların bazı türleri ve istiridye dahil çift kabuklu birkaç tür (Culloty et al., 1992).

4.3.2.. Yemeklerde kullanımı

Magnezyum klorür, soya sütü tozu hazırlanmasında kullanılan önemli bir pıhtılaştırıcı maddedir (Food Standard Agency, 22 Mart 2010). Japonya' da nigari (acı için Japon kelimesinden türetilmiş) olarak satılır, sodyum klorür çıkarıldıktan sonra deniz suyundan üretilen beyaz toz Çin' de iushiu olarak adlandırılır. Nigari ve ya iushui çoğunlukla magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve diğer kalıntı elementlerden meydana gelmektedir. Aynı zamanda bebek sütünün bir maddesidir.

4.3.2.2 Anti-Buz çözücü olarak kullanımı

Kar ve buz mücadelesinde kullanılan kimyasallar sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür ($MgCl_2$), kalsiyum klorür ($CaCl_2$), kalsiyum magnezyum asetat (CMA) ve potasyum asetat (KAc)'tır. Uygulanacak kimyasalın çeşidi ve miktarı; kar veya buz miktarına, ortam sıcaklığına ve uygulama bölgesine göre değişmektedir. Havaalanlarında ve köprülerde sodyum klorür (NaCl) ve kalsiyum klorür ($CaCl_2$) içerikli kimyasallar çevreye, alt yapıya ve metal parçalara verdiği zararlardan dolayı hareket sahalarında kullanılmamaktadır (Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2006; Caggiano, 1998; Lee, 2000).

Su içinde hızlı ve kolay bir şekilde eriyen $CaCl_2$ ve $MgCl_2$, -29^oC'ye kadar düşük sıcaklıkta uygulanabilmektedir. Bütün buz eritici tuzlar iyonlarına ayrışarak kar ve buzu eritmektedir. $CaCl_2$ ve $MgCl_2$, bir Ca ve Mg iyonuna karşılık iki Cl iyonu serbest bırakarak kar ve buzun daha hızlı ve etkili bir şekilde erimesini sağlamakta fakat ortaya çıkan Cl iyonu genel olarak çevreye ve betona zarar vermektedir. Ayrıca $CaCl_2$ ve $MgCl_2$'nin uygulandıktan sonra yol yüzeyinde temizlenmesi zor ve kaygan bir kalıntı bıraktıkları bilinmektedir (Kuloğlu ve Kök, 2005).

Yukarıda sözü edilen bu kimyasallar katı halde uygulanabildikleri gibi solüsyon halinde de kullanılabilmektedir. Bunların sıvı olarak uygulanabilmesi, yüzeye oldukça hızlı ve üniform olarak serilebilmeleri ve kar ile buzun erime işlemini hızlandırma açısından avantaj sağlamaktadır.

Leggett (1999)' in yaptığı bir çalışmada, çeşitli sıvı kimyasal maddeler uygulandıktan sonra elde edilen sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. NaCl (0,394) ve CMA (0,368) için bulunan değerlerin $CaCl_2$ (0,275) ve $MgCl_2$ (0,269) 'ün değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.4. Kaplamaya yerleştirilen ağızlıklarla kimyasal madde uygulanması.

Akem Kimya tarafından üretilen magnezyum klorür solüsyonu içerikli kimyasal ile ilgili bilgiler detaylı olarak aşağıda verilmiştir:

PLAS ICE® (Kar ve Buz Çözücü) (www.akemkimya.net)

- Yol üzerinde buz oluşumunu ve karın yol yüzeyine yapışmasını engelleyen kimyasal bir sıvıdır.
- Kar ve/veya buzlanmadan önce ve sonra uygulanabilir.
- Antifiriz etkisi yaparak buz oluşumunu önler.
- Oluşturduğu film tabakası sayesinde yağan karın erimesini sağlayarak yola yapışmasını engeller.
- Nem tutucudur, ağır trafik şartlarında dahi yüzeyde kalır.
- Çevre dostudur, bitkilere gübre etkisi yapar.
- Uzun süre etkilidir. Çok hızlı uygulanır. İşçilik ve zamandan tasarruf sağlar.
- Aşındırıcı (korozif) olmadığından; asfalt, beton, metal aksamlara zarar vermez .
- Çok düşük ısılarda da iyi sonuç verir. (Donma noktası isteğe göre -30 ile - 70 ° C arasında ayarlanabilir.)

PLAS ICE® (Kar ve Buz Çözücü) Avantajları ;

- ABD'de yapılan istatistiklere göre bu tür uygulamalarda;
- Kazalarda %85
- İşçilikte %68
- Malzeme kullanımında %83 azalma gözlenmiştir.

Özellikleri:

- Su bazlı, doymuş, dengeli mineral karışımıdır.
- Ekolojik ve çevre dostudur.
- Donma noktası -30 ile -70 ° C arasındadır.
- Glikol ve türevlerini içermez, aktif maddeleri uçucu değildir.
- Yanıcı değildir.
- İnsan, hayvan ve bitki sağlığı için zararlı değildir.
- Renksiz ve kokusuzdur.
- Antibakteriyeldir.

Kullanım Alanları:

- Yola, araçlara, asfalta, köprüye zarar vermeden buz ve karı eritmede,
- Yollarda, otoyollarda, havalimanlarında, benzin istasyonlarında, bina girişlerinde, stadyumlarda, v.b.,
- Binaların yangın söndürme amaçlı su depoları, kış koşullarında suyun donması nedeni ile oluşacak zararı önlemek için,
- Seralarda bitkilerin donmasını engellemek amaçlı,
- Otomobillerin ön camlarını yıkama suyuna anti friz olarak,
- Otomobillerin ön camlarında ışık yansımasını önler, yağmurlu havalarda daha iyi görüş ve daha emniyetli sürüş sağlamak amaçlı,
- Fren balatalarının, otomobil kilitlerinin ve camların donmasını önlemek için,

- Bakteri, küf ve akar (mite) önleyici özelliği nedeniyle otomobillerin iç kısımlarında,
- Yoğun kar birikiminde çatı çökmelerini önlemek için kullanılır.

Uzun Süreli Etki :

- Hava koşullarında ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak 24 – 48 saat etkilidir. Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarında yapılan analiz sonuçlarına göre magnezyum klorür solüsyonu yola uygulandıktan sonra 48 saat süreyle tuza (NaCl) oranla 4 kat daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir.

Güvenli Kullanım :

Magnezyum klorür solüsyonu, tuzlu suyun aksine asfalta ve araçlara zarar vermez. Tuzlu su kaplama kenarlarında veya oluşan çatlaklarda farklı donma kabarmalarına neden olarak asflat kaplamayı hasara uğratabilir. Ayrıca paslandırıcı etkisi fazla olduğundan, metal aksamlı köprülerde kullanılması sakıncalıdır.

Yapılan araştırmalar, magnezyum klorür kullanıldığı yerlerde kaza ve işçilik anlamında ciddi oranda azalmalar olduğunu göstermektedir.

Yol şubeleri ve özel sektör toprak yollarda toz ve erozyon kontrolü için sıvı ve ya toz magnezyum klorür uygularlar. Hygroscopysi özelliği nedeniyle havadan nemi adsorbe eder, havalanmış küçük parçacıkların sayısını kontrol eder. Magnezyum klorür elektriklenmiş hidrojen atomlarını büyütmesiyle hidroklorik bileşeni nedeniyle asidiktir. Kapalı alanlarda (örneğin binicilik) kum ve ya diğer zemin malzemelerinde toz kontrolü için magnezyum klorür uygulanabilir (www.akemkimya.net).

Kanada'da yapılan bir çalışmada, buzlanmanın önlenmesi stratejisinin uygulanmasıyla aşındırıcıların kullanımında önemli bir azalma sağlanmış ve beraberinde malzeme ve bakım maliyetlerini azalttığı görülmüştür. Ayrıca trafik

kazalarında %40 azalma meydana gelmiş, bunun yaklaşık 4 milyon dolar kazanca karşılık geldiği tahmin edilmiştir. Kanada'da yapılan başka bir çalışmada, sıvı magnezyum klorür kullanılarak yapılan buzlanmanın önlenmesi çalışmalarının sonucu olarak kış bakım maliyetlerinde %34 azalma sağlanmıştır (Environment Canada's Road Salts Web Site Reports).

4.3.2.3 Toz kontrol uygulamalarında kullanımı

Sıcaklıktan bağımsız olarak %32 bağıl nemde havadan su adsorblamaya başlar. Çok sert bir yol yüzeyinde yüzey gerilimini artırmada $CaCl_2$'den daha etkilidir. Uygulama yapılmış yol; nem ve yoğunluk kaybı durumunda az bir çalışma ile tekrar sıkılaştırılabilir (Fişne ve Ökten, 2002).

Havadan nem adsorblaması için, nem oranının minimum seviyede olması gerekmektedir. Kurak iklimlerde kullanılması daha uygundur. Yoğun çözeltileri çelik için çok aşındırıcıdır. Havadan nemi çektiği için aşındırma süresi uzar. Uygulama yapılmış yol malzemesinde yüksek miktarda ince tanecik varsa, yağmurlu dönemlerde yol yüzeyi kaygan olabilir. Çözeltinin derişimi %20'den daha az olduğu zaman su ile benzer etkiye sahiptir (Fişne ve Ökten, 2002).

Genellikle her mevsimde 1-2 defa uygulama yapılır, ilk uygulama için çözelti derişimi %28 - 35 ve uygulama oram 1.4 - 2.3 İt/m^2 arasında değişmektedir. Tipik uygulama ise %30'luk seyreltilmemiş konsantre ve 2.3 It/m^2 'dir. Daha sonraki çalışmalarda ilk uygulamadaki oranların 1/2'si kullanılır (Fişne ve Ökten, 2002).

4.3.2.4 Hidrojen depolamada kullanımı

Magnezyum klorür hidrojen için bir depolama malzemesi olarak gösterilmiştir. Ammonia, hidrojen atomlarınca zengin, bir ara depolama malzemesi olarak kullanılır. Ammonia, $Mg(NH_3)6Cl_2$ olarak formüllenen, katı magnezyum klorür üstüne etkili adsorblanabilir. Ammonia hafif ısıda serbest kalır ve daha sonra hidrojen gazı vermek için katalizöre doğru geçirilir.

Şekil 4.5. Magnezyum klorür solusyonu ile toz kontrolü uygulaması

4.3.2.5 Tıbbi kullanımı

$MgCl_2$ yaygın olarak magnezyum klorür olarak bilinir. Pierre Delbet One 1989'daki bir veteriner çalışmasında bir yem olarak kullanıldığında tümörlere karşı bazı etkilerde bulunduğunu işaret etmiştir (Veterinary Medical Research Institute, 1989).

4.3.2.6 Deniz akvaryumunda kullanımı

Doğal deniz suyu magnezyum değerleri 1250 mg/L-1350 mg/L arasındadır. Magnezyum kalsiyum, alkalinite ve pH değerlerinin doğru dağılımı dengeler. Magnezyumun ciddi düşük değerleri düşük pH değerlerine neden olur ve uygun alkalinity ve kalsiyum değerlerini korumak için yeterisizdir. Eğer magnezyum düzeyleri çok düşük olursa mercan büyümesi durur ve mercan sağlığı düşüş izler. Kalsiyum ve karbonat mercan, karolin alg, istiridye ve omurgasızların tümünün gelişimi için geçerlidir. Doğru magnezyum değerlerini korumak çok önemlidir ve doğru kalsiyum, alkalinity ve ph değerlerini korunması mercan ve deniz yosununun gelişimini mümkün kılmaktan sorumludur. Magnezyum mangrov bitkiler ve aşırı kireçli su kullanımı ile ya da doğal kalsiyum, alkalinite ve pH değerleri aşarak tükenmiş olabilir.

4.3.2.7 Toksiloji

Magnezyum toksisitesi normal bir diyet ile sağlıklı bireylerde nadirdir çünkü aşırı magnezyum kolayca böbrekler tarafından idrarla atılır.

4.4. Zemin Stabilizasyonunda Magnezyum Klorür Kullanımı

Bu zamana kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde, magnezyum klorürün kullanım açısından zemin stabilizasyonu haricinde yollarda toz kontrolü, rutubetin sağlanması, yüzeyden kaba danelerin kopmasının önlenmesi ayrıca yine yollarda kar ve büz çözücü olarak daha yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak magnezyum klorürün kullanımın yaygınlaşmasıyla problemli zeminlerin geoteknik özelliklerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda da kullanımının artması beklenmektedir.

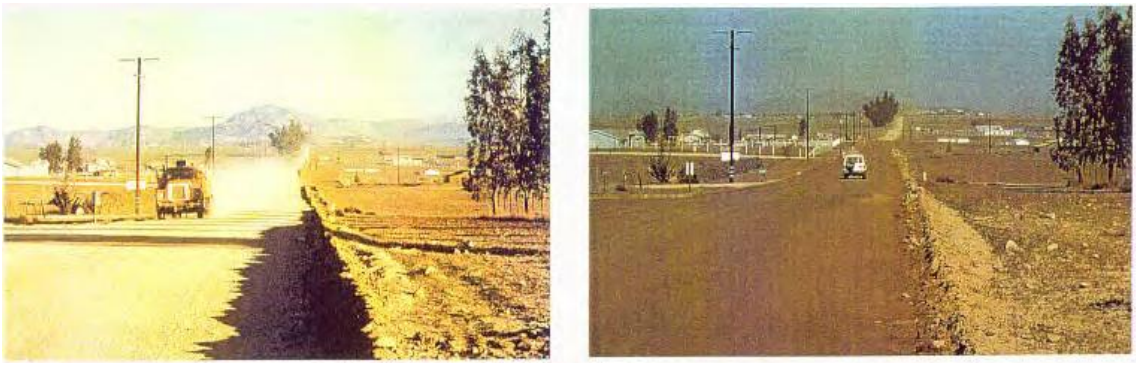
Zemin stabilizasyon katkı maddeleri daha az arzu edilen kötü zeminlerin özelliklerini geliştirmede kullanılır. Bu stabilizasyon ürünleri kullanıldığında, zeminin su içeriğini arttırabilir ve koruyabilir, zemin parçacıklarının kohezyonunu arttırabilir ve çimentolama ve su geçirimsiz malzeme olarak iş görebilirler (Addo et al, 2004).

Abood, et al., (2007) yaptıkları çalışmada siltli killi zeminlerin mühendislik özelikleri üzerinde klorür bileşimleri (NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$) katkısının etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan zemin Irak' ın güneyinden getirilmiştir. Zemine likit limit, plastik limit, kuru birim ağırlık, su muhtevası ve kayma mukavemeti üzerine deneyler yapılmıştır. Her bir klorür bileşiğinin eklenmesiyle zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri azalma göstermiştir. Tuz yüzdesinin artmasıyla kuru yoğunluk artmış, su muhtevası azalmıştır. Zeminin kayma mukavemeti artan tuz yüzdesiyle artmıştır. Bu, zemin mukavemeti ve diğer özelliklerinin gelişimine yardımcı olur.

Yol tasarımını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de alt tabakanın belirlenmesidir. Alt tabakanın dayanımı ve sıkışabilirliği yol çalışmasını belirlemek için gözden geçirilmelidir. Bu parametreler tane büyüklüğü, plastik limit, su muhtevası ve özgül ağırlık gibi temel parametrelerle ilişki içerisindedir. Bazı yol şartnamelerinde

tuz solüsyonların zemin özelliklerine negatif etkilerinden dolayı kullanımı yasaklı olmasına rağmen, eğer deneylerde zemin özelliklerinde önemsiz azalmalar varsa, bazı durumlarda yol projelerinde tuz solüsyonların kullanılması projelerin maliyetini düşürmek için eknomik bir yoldur. Bazı çalışmalarda kilin plasitk limit ve kompaksiyon karakteristikleri üzerine tuzlu solüsyonların etkilerini incelemişlerdir çünkü belirli optimum su içeriği ile kabul edilebilir maksimum kuru yoğunluğa ulaşan karayolu projelerinde ana amaçlarından biridir. Aynı zamanda zeminin likit limit ve plastik limiti permeabilite, büzülme ve şişme davranışı, kayma mukavemeti ve zeminin sıkışabilirliği gibi çeşitli geoteknik özellikleriyle ilişkilidir (Sharma ve Lewis, 1994; Abdullah et al, 1999). Deneylerde kullanılan tuz solüsyonları, konsantrasyonun artmasıyla likit limit ve plastik limit genelde azaltmıştır. Katyon değerliğinin artması plastik limitin azalması sonucunu verir çünkü net itme kuvveti artış gösterir. Dolayısıyla kil partiküllerinin flokülasyonuna neden olur (Ghatei ve Lorestani).

Kloritler (örneğin $MgCl_2$) yoğunluk ve stabilitenin artmasına neden olduğu gibi zeminin PI ve LL değerinin düşmesine neden olmaktadır. Zeminin permeabilitesini artırarak kapilarite duyarlılığını azaltmakta ve böylece don kabarmalarını da önlemektedir. Ancak suyla eriyerek zeminden uzaklaşmasının önlenmesi oldukça güç



Önce Sonra

Şekil 4.6. Magnezyum klorürün toz kontrolünde kullanımı

olduğundan dolayı kullanımı sınırlıdır. Bilindiği gibi zeminler büyük oranda kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}), sodyum (Na^{+}), potasyum (K^{+}) gibi katyonlardan ve sülfat (SO_4^{-2}), klorit(Cl^{-}), fosfat (PO_4^{-3}), nitrat (NO_3^{-}) anyonlardan oluşur. Özellikle şişebilen

zeminlerde tuzların katılması ile iyon dengesi sağlandığından şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri de azaltılabilmektedir (Tumluer, 2006).

Magnezyum klorür ($MgCl_2$), kalsiyum klorür ($CaCl_2$) ve ligno sulfatlar Kuzey Amerika'da baskın toz kontrolü ve yol stabilizasyon ürünleridir. Bu ürünler çevresel sorunlar üzerinde mükemmel performans sağlarlar. Sıcaklık, nem seviyesi, yağış, özellikle toprak / agrega türü /gradasyon gibi faktörler ürünün başarısı ya da başarısızlığını etkiler. Kanada Taşımacılık Derneği (TAC) maliyet etkin kullanımı ve toz azaltma uygulanması için kendi talimatları kalsiyum klorürün higroskopikliği (havadan nem emme yeteneği) bağıl nemin azalmasıyla kaybettiğini ileri sürmektedir. Kalsiyum klorür eğer beklenen nem oranı düşük olması durumunda dikkatli kullanılmalıdır. Onlar magnezyum klorürün, kalsiyum klorürden çok daha yüksek sıcaklıkta ve daha düşük bağıl nemde olduğu gibi kaldığını bundan dolayı kuru iklimlerde kullanımı daha uygun olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca magnezyum klorürün kalsiyum klorürden daha az aşındırıcı olduğunu tespit etmişlerdir (www.desertmtncorp.com).

Magnezyum klorür ($MgCl_2$) tabanlı toz tutma ürünler toz tutma ve yol stabilzasyon amaçları için bahar ve yaz aylarında kaplamasız yollarda uygulanır. Klorür bazlı toz tutucular erozyon ve kaçak toz kontrolünde kullanılır ve zemin stabilizasyonuyla kaplamasız yollarda bakım maliyetini azaltır ve yol yüzeyinin nemini korumak için atmosferdeki nemi çeker (Addo, 2004; Piechota, 2004).

Magnezyum Klorür ve Kalsiyum Klorür gibi higroskopik tuzlar özellikle geçen yüzyıldan beri asfaltsız yol yüzeylerinin tedavisinde kullanılmaktadır. Onların higroskopik özellikleri nedeniyle sıcak günler boyunca yol yüzeyinden sadece buharlaşmayı geciktirmez. Kalsiyum klorür ile magnezyum klorürü karşılaştıran bir çalışmanın sonuçları her iki ürünün de aynı mekanizmayla çalıştığını göstermektedir, performans ve verimlilik etkisi gibi özelliklerde aralarında bazı farklılıklar vardır. Bu toz kontrol ürünleri hakkında bir karara varmak için önemli bir kriter ise yüksek çevre, yol yüzeyi sıcaklığı ve düşük nem gibi olumsuz koşullar altında tuzlu su üretme yeteneğidir. Bu koşullarda en kötü trafik tozu oluşur ve bu olumsuz koşullar altında

kalsiyum klorür özelliklerinin magnezyum klorürden daha uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir (Larkin Laboratory, 1986).

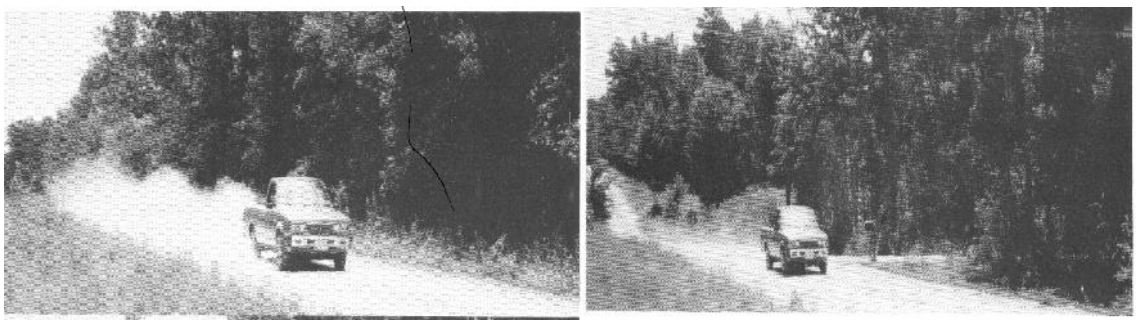
Kalsiyum klorür çözünürlüğü magnezyum klorüre göre sıcaklık arttıkça daha hızlı artar. İsveç Teknoloji Kraliyet Enstitüsü' nde yapılan bir araştırmada; gerçek çakıl yollarda iki toz kontrol ürünü arasındaki fark ölçülmüş ve kalsiyum klorürün magnezyum klorüre oranla %18 daha etkili olduğu bulunmuştur (Reyier, 1972).

Magnezyum klorür ($MgCl_2$), kalsiyum klorür ($CaCl_2$) ve sülfonatlı lignin Kuzey Amerika'nın taneli yüzeyleri için birincil toz bastırıcı ve stabilizasyon ürünleridir. Bu ürünler çok çeşitli iklim koşullarına bağlı doğal zorluklar nedeniyle verimlidirler.

Magnezyum klorür bütün resim göz önüne alındığında en düşük maliyetli alternatiftir. Tuz ve katkısız kalsiyum klorür gibi kar ve buz kontrolünde kullanılan daha ucuz kimyasal maddeler vardır. Ancak bu alternatifler araçlar, köprü ve çevre için zararlı olabilirler. Magnezyum klorür iyi bir alternatiftir çünkü diğer kimyasallara göre daha az aşındırıcıdır ve daha iyi çalışır. Çevresel etkiyi, köprü korozyonunu ve araç hasarlarını azaltır (İdoha Transportation Department).

Magnezyum klorür ($MgCl_2$) ve kalsiyum klorür ($CaCl_2$) ağırlıklı olarak kullanılan toz önleme ürünlerdir. Sodyum klorür ($NaCl_2$) de sınırlı olarak kullanılır. Bu tuzların kombinasyonlarında kullanılan tescilli ürünler ve diğer katkı maddeleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Klorür bileşiklerinin özellikleri onlara atmosferdeki nemi emmek ve çekmeleri için izin verir ve uzun süre saklamalarını sağlar (Compendium 12, 1980). %30 ile %40 arasında değişen bağıl nem $MgCl_2$ ve $CaCl_2$' nin atmosferdeki nemin emilmesini kestiği bildirilmiştir (Compendium 12, 1980). Bağıl nem yüksek ve sıcaklık düşük olduğunda, bu kimyasallar toz önleyici olarak kullanıldığında özellikle sabahın erken saatlerinde yol yüzeyinin nemini korur. Özellikle öğleden sonra düşük bağıl nem ve daha yüksek sıcaklıklarda atmosferdeki nemi emmekte çok etkili olmazlar. Ancak, yol yüzeyindeki nemin buharlaşmasını önemli ölçüde azaltırlar bu da onları toz önlemde daha etkili kılar (Addo et al., 2004).

Woods (1960)' un yaptığı araştırmaya göre, klorür bileşikler tarafından sergilenen bir diğer önemli özellik ise sulu ortamda kendi konsantrasyonuna bağlı olarak düşük donma noktasına sahip olmalarıdır. %30 $CaCl_2$ çözeltisi -60 ^oF 'ta donmakta, %22 $MgCl_2$ çözeltisi -27 ^oF 'ta donarken, %25 $NaCl_2$ çözeltisi -6 ^oF 'da donmaktadır. Toz önleyici olarak kullanıldıklarında zayıf kaplamasız yollardaki don kabarmasını minimize ederler ve donma-çözülme çevrimini azaltırlar. Ancak, sulu çözelti olmalarının dezavantajına sahiptirler bundan dolayı ıslak havalarda yıkanabilirler. Ayrıca aşındırıcıdırlar.



Şekil 4.7. İşlem görmemiş ve işlem görmüş kaplamasız yollar

BÖLÜM 5

MALZEME VE YÖNTEM

Kireç, uçucu kül, endüstriyel atıklar, potasyum nitrat, kalsiyum klorür ve fosforik asit gibi farklı katkılar kullanılarak, şişen ve dispersif zeminlerin iyileştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar uzun yıllardan beri yapılmaktadır. Buna karşın, bu tip zeminlerin katkılarla iyileştirilmesine yönelik literatürde her bir zemin tipi için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Diğer bir ifade ile kullanılan katkıların performansı ya şişme potansiyelinin iyileştirilmesi yönünden ya da dispersibilitenin iyileştirilmesi açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, diğer araştırmalardan farklı olarak, iyileştirme amaçlı kullanılan magnezyum klorür solüsyonunun kil zeminlerin şişme, disperisiblite ve dayanım karakteristikleri üzerindeki etkisi birlikte değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında Afyon ilinden alınmış ince taneli zemin üzerinde kuru ağırlıkların farklı oranlarında (% 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13) magnezyum klorür ($MgCl_2$) solüsyonu katkısı ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Örnekler üzerinde önce tanımlama ve sınıflama deneyleri (elek analizi, kıvam limiti, özgül ağırlık deneyi ve kompaksiyon deneyi) gerçekleştirilmiştir. Buradan çıkan sonuçlar ışığında numunelere şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyi, dispersibilite özelliğini belirlemek amacıyla iğne deliği ve dağılma deneyi, drenajsız-konsolidasyonsuz üç eksen deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında katkısız ve optimum iyileşme sağlanan katkı oranındaki numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Bunun için XRD ve SEM deneyleri yapılmıştır. Örneklerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ilgili standart yöntemlere uyulmuştur (TS 1900-1, TS 1900-2). Zeminin dispersif ve şişme özellikleri bellirlenmiş ve bu özelliklerin iyileştirilmesi için farklı oranlarda $MgCl_2$ solüsyonu katkısı zeminin kuru ağırlığı göz önüne alınarak kullanılmıştır.

5.1 Malzeme

5.1.1 Zemin

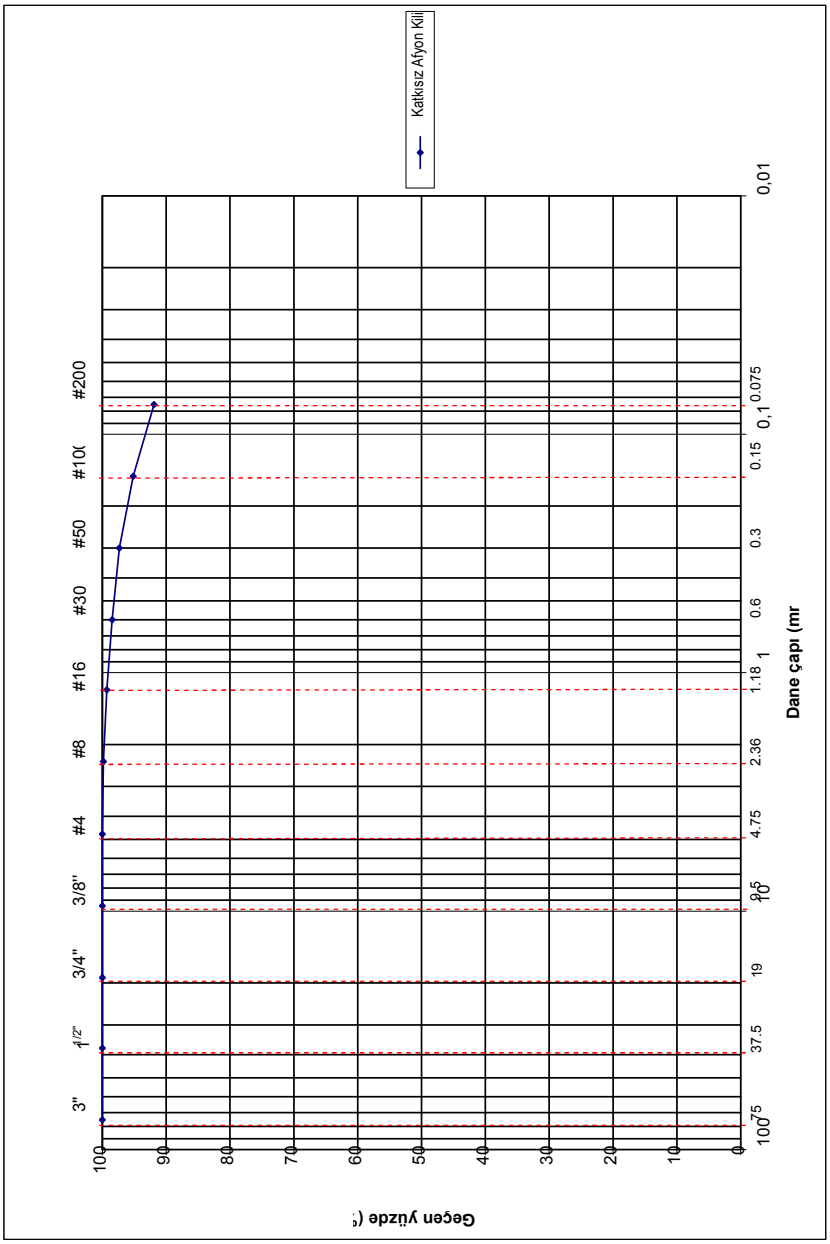
Doğal zemininin özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limiti, özgül gravite, kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin örneği, Afyon ilinden getirilmiştir. Bu kil üzerinde yapılan çalışmalarda ortalama ince miktarının %92, kum miktarının ise %8 olduğu tespit edilmişir. Kıvam limiti esası yönünden yapılan çalışmalarda ise likit limitin % 68, plastisite indisinin ise %35 olarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre bu zemin yüksek plastisiteli kil (CH) olarak tanımlanmaktadır. Zemin ile ilgili detaylı özellikler çizelge 5.1 'de ve kimyasal deney sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Zemine ait granülometre eğrisi, kompaksiyon karakteristiği ve plastisite kartındaki yeri sırasıyla şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmiştir. Ayrıca zseminin kil yüzdesini belirlemek amacıyla yapılan hidrometri analizi sonucu da şekil 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Zeminin geoteknik parametreleri

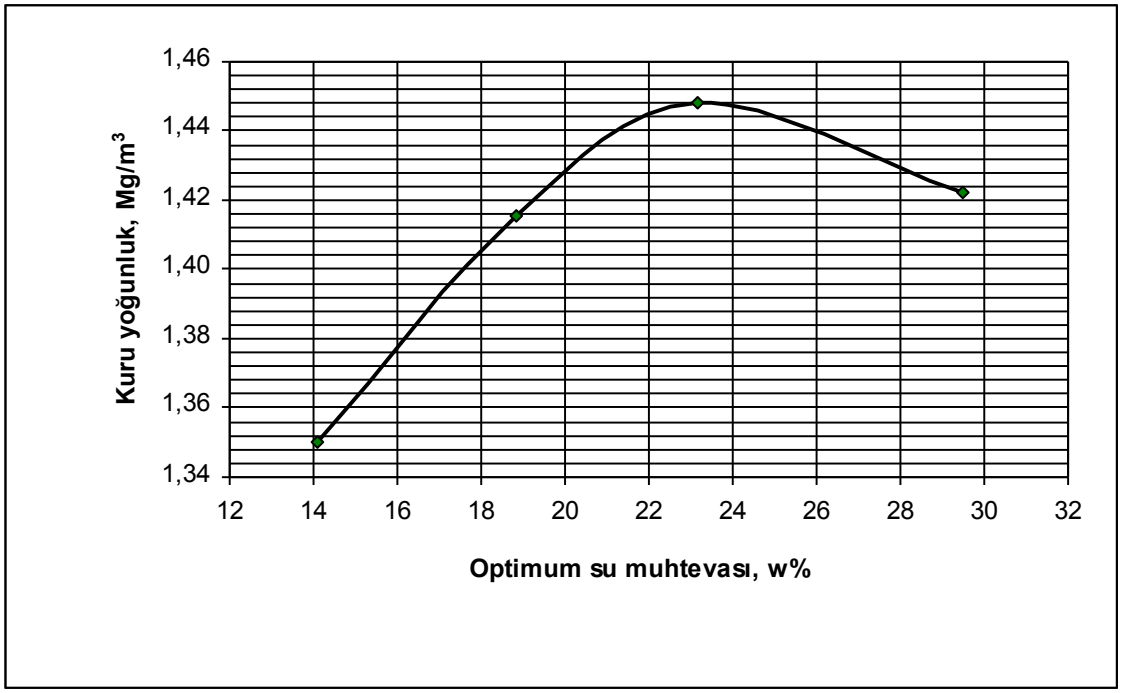
Parametre	Değer
ρ_{dmaks} (Mg/m^3)	1,448
w_{opt} (%)	23,2
ince malzeme (%)	92
Kum (%)	8
Çakıl (%)	0
Kil (%)	33
LL (%)	68
PL (%)	33
PI (%)	35
Zemin Sınıfı	CH
Gs	2,73
pH	8,55

Çizelge 5.2. Kimyasal Analiz Sonuçları

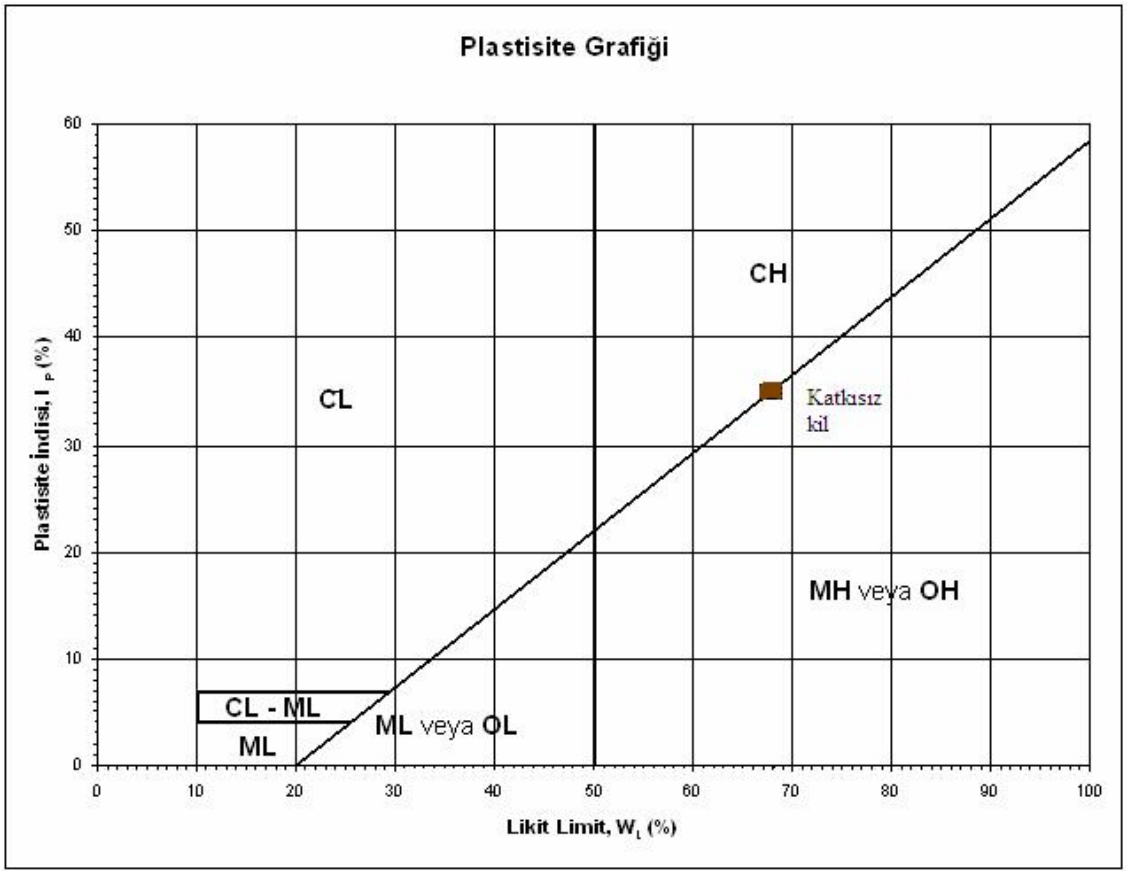
İletkenlik (mmhos/cm)	pH	TDS(*) (meg/L)	Na (%)	SAR	ESP (%)
20.600	8.55	143.19	92.30	56.36	33.85
TDS:Toplam Çözünen Tuz , Na:Sodyum yüzdesi , SAR:Sodyum Adsorbsiyon Oranı, ESP:Değişebilir Sodyum Yüzdesi.					



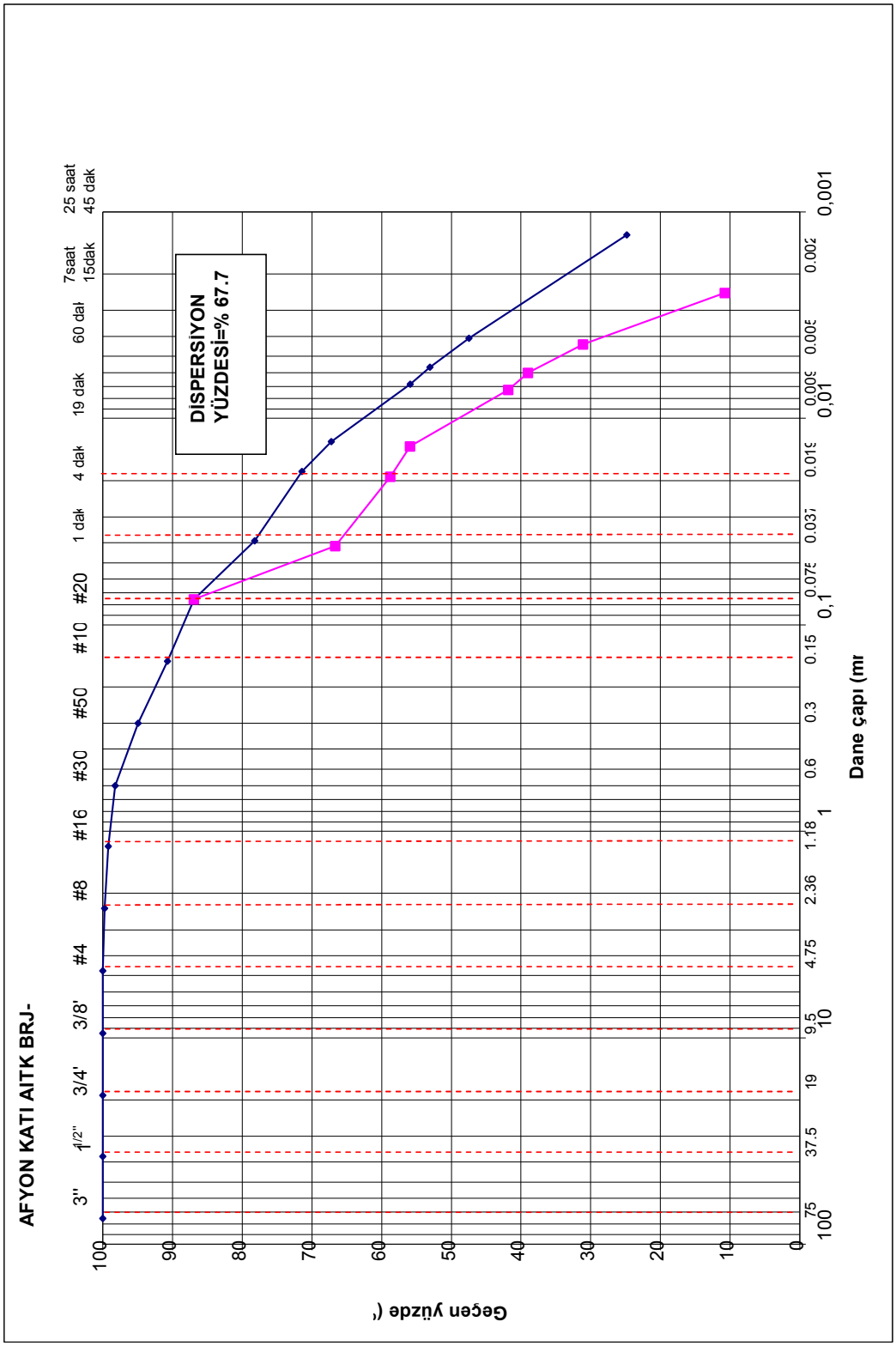
Şekil 5.1. Kil malzemenin elek analizi sonucu



Şekil 5.2. Kil malzemesinin kompaksiyon sonuçları



Şekil 5.3. Kil malzemenin plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.4. Katkısız kile uygulanan hidrometri analiz sonucu

5.1.2 Magnezyum Klorür Solüsyonu ($MgCl_2$)

Gelişen dünyamızda kış aylarında kar ve buzlanmayla modern mücadelede araçlarda paslanma ve korozyona yol açmayan, betona ve asfaltta zarar vermeyen, bitkiler ve canlılar açısından hiçbir zararlı unsur içermeyen kimyasal maddeler uygulanmaktadır. Bu kimyasal maddelerden en etkili ve en avantajlı olan magnezyum klorür solüsyonu, Amerika, İskandinavya, Kanada ve Avrupa gibi sert kış aylarına maruz kalan gelişmiş modern ülkelerde yolların buzlanmaya karşı korunması amacıyla çok uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Bugüne kadar ülkemize ithalat yoluyla ve çok yüksek maliyetle sağlanılan magnezyum klorür ülkemizde de doğal yöntemlerle solüsyon halde üretilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan $MgCl_2$ solüsyonu Alkim Alkali Kimya A.Ş. 'nden alınmış olup genel özellikleri çizelge 5.3'de verilmiştir. Farklı katkı seviyelerindeki numuneler hazırlanırken magnezyum klorür katkısı içerisindeki su ve katı malzeme içeriği dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Çizelge 5.3. Kullanılan $MgCl_2$ solüsyonun özellikleri

Renk Görünüm	Amber/ sıvı, berrak
Konsantrasyon (Bé)	35,50 (Min)
Yoğunluk (Kg/Lt)	1,320 (Min)
H_2O (%)	1,0-3,0 (Min)
Katı Madde (%)	57,00 (Min)
Katı Maddedeki ($MgCl_2$) (%)	94,00 (Min)
pH (%1'lik Solüsyonda)	9,00-10,00 Aralığında

5.2 Deneysel Çalışma

Çalışma kapsamında Afyon ilinden getirilmiş olan örnekler üzerinde önce tanımlama ve sınıflama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her bir örnek için elek analizi, kıvam limitleri, özgül gravite ve kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mühendislik özeliklerinin belirlenmesi amacıyla örselenmemiş örnekler üzerinde şişme yüzdesi, şişme basıncı ve üç eksenli basınç deneyi, dispersibilite özeliklerinin belirlenmesi için ise önce dağılma deneyi daha sonra iğne deliği deneyi yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında katkısız ve optimum

iyileşme sağlanan katkı oranındaki numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Bunun için XRD ve SEM deneyleri yapılmıştır. Örneklerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ilgili standart yöntemlere uyulmuştur (TS 1900-1, TS 1900-2, USBR 5400, 1989; USBR 5405, 1989; USBR 5410, 1989). Tez kapsamında zeminde elek analizi, kıvam limitleri, kompaksiyon karakteristikleri, özgül ağırlık, şişme basıncı ve şişme yüzdesi, üç eksenli basınç deneyi (konsolidasyonsuz-drenajsız- UU) ile kayma mukavemeti parametreleri, dağılma ve iğne deliği deneyleriyle de dispersibilite davranışı, X-Ray ve SEM deneyleri farklı oranlarda $MgCl_2$ solüsyonu kullanılarak (%1-3-5-7-9-11-13) değişimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışma programı, Çizelge 5.4'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.4. Deneysel çalışma programı

<table>
<tr><th></th><th>Deney</th><th colspan="3">Numune sayısı</th></tr>
<tr><td rowspan="8">Tanımlama ve Sınıflama Deneyleri</td><td>Tane dağılımı</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>-Elek analizi</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>Kıvam limitleri</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>-Likit limit</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>-Plastik limit</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>Özgül gravite</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>Kompaksiyon karakteristikleri</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>-Standart proctor</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Şişme Deneyleri</td><td>Şişme yüzdesi</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>Şişme basıncı</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Dispersibilite Deneyleri</td><td>Dağılma deneyi</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td>İğne deliği deneyi</td><td colspan="3">7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Dayanım Deneyleri</td><td rowspan="3">Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli deneyi (UU)</td><td colspan="3">Kür süresi</td></tr>
<tr><td>1 gün</td><td>7 gün</td><td>28 gün</td></tr>
<tr><td>7*3=21</td><td>6*3=18</td><td>6*3=18</td></tr>
<tr><td>SEM Analizleri</td><td>Taramalı elektron mikroskop analizleri</td><td colspan="3">2</td></tr>
<tr><td>XRD</td><td>X ışınımı kırımımı deneyi</td><td colspan="3">2</td></tr>
<tr><td></td><td>TOPLAM</td><td colspan="3">124</td></tr>
</table>

5.2.1 Elek Analizi

Elek analizi deneyinde, zeminin kuru ağırlığının daha önceden belirlenmiş oranlarında (% 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13) magnezyum klorür solüsyonu kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde uygulanmıştır. Her elekten geçen miktarlar bulunmuş ve artan katkı malzemesi oranı ile değişim incelenmiştir. Deneyde TS 1900-2 ve BS 1377 standardı göz önüne alınarak uygulama yapılmıştır.

5.2.2 Kıvam Limitleri

Kıvam, kohezyonlu zeminlerin sertlik-yumuşaklık durumunun ölçüsüdür. Plastiklik veya plastisite ise ince taneli zeminlerde kırılmadan şekil verilebilmeyi ifade eder. Likit kıvamda zemin kendi ağırlığı altında yavaşça akabilir. Plastik durumda zemine istenilen şekil kolayca verilebilir. Yarı katı durumda zemine istenilen şekil zorlukla verilir, zeminde çatlamalar oluşur. Katı durumda ise zemine şekil verilemez. Atterberg (1911), tarafından bu kıvamları ayıran sınır su muhtevaları tamamlanmıştır. Ayrıca magnezyum klorür solüsyonu ile hazırlanan numuneler 24 saat boyunca küre tabi tutulmuştur. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 4318 standardı uygulanmıştır.

5.2.2.1 Likit limit deneyi

Kullanacağımız kil malzeme öncelikle 40 nolu elekten geçirilerek, 150-200 gr. Zemin saf su ile homojenleştirilerek Casagrande aletine yerleştirildi. Aletin özel bıçağı ile zemin tabanında göz kararı ile 2mm. genişliğinde oyuk açıldı. Casagrande aletine yerleştirilen numune 1 cm. yükseğe çıkıp yüzeye düşmektedir. Alet yaklaşık 2 devir/sn hızla çevirilmelidir. Bu işlem ortadaki oyuk birleşinceye kadar devam eder. Bu andaki vuruş sayısı ve numunenin su muhtevası deney föyüne kaydedilmiştir. 25 vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevası numunenin likit kıvamdaki su muhtevasıdır. Deney tüm karkı seviyelerinde tekrarlanmıştır.

Şekil 5.5. Limit deneyleri için hazırlanan numunelerin kür şekli

5.2.2.2 Plastik limit deneyi

24 saat etüvde kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenerek belirli karkı seviyelerinde hazırlanan numuneler homojen olacak şekilde saf su ile karıştırılarak plastik kıvama getirilir. Daha sonra cam levha üzerine konarak avuç içiyle göz kararı 3 mm çaplı silindirler oluşturulmuştur. Kopma ve çatlamaların başladığı andaki su muhtevası plastik limit kıvamını vermiştir.

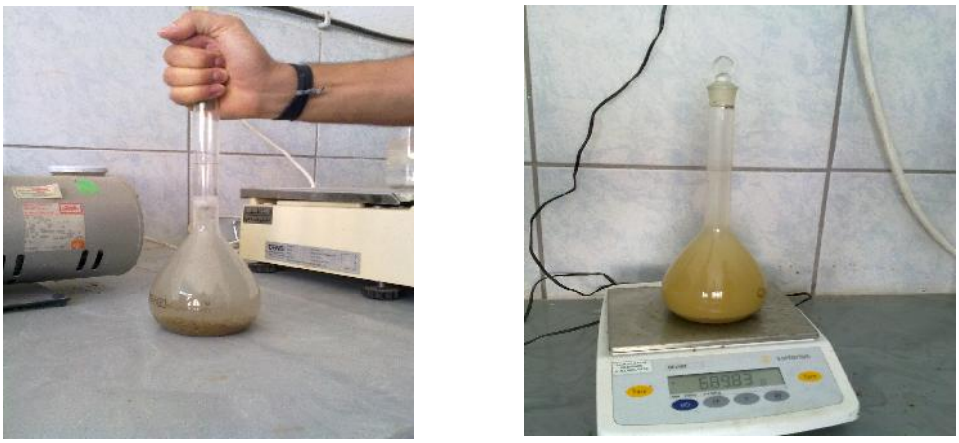
5.2.3 Özgül Gravite Deneyi

Özgül ağırlık, malzemenin birim hacmindeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Zeminlerin dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilmesi için gereklidir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 422-63 standardı uygulanmış ve her katkı seviyesinde tekrarlanmıştır.

Numunelerin özgül ağırlığı (Gs) bir piknometre ve vakum cihazı yardımıyla tayin edilmiştir. Piknometre şişesi kapağı ile beraber etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır (W_1). Etüvde kurutulmuş 50 gr kadar zemin numunesi piknometre şişesine

doldurulur ve tartılır (W_2). Piknometre şişesi üç aşamada doldurulacak şekilde havası alınmış saf su ilave edilerek içerideki hava vakum uygulanarak dışarıya atılmış ve tekrar tartılmıştır (W_3).

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{50 - W_{3+}W_2}$$



Şekil 5.6. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması ve tartma işlemi.

5.2.4 Standart Proktor Kompaksiyon Deneyi

Deneyin kullanılmasındaki amaç optimum su muhtevasının tespitidir. Deney her bir değişik magnezyum klorür ($MgCl_2$) solüsyonu oranında tekrarlanmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat kürde bırakılmıştır. Deneyde kullanılacak zemin numunesi (kuru ağırlıkğı üzerinden hesaplanır) üç tabaka halinde serilir ve her bir tabaka 30,5 cm den serbest düşen 2,5 kg. ağırlığındaki bir tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılmıştır. Kullanılan tokmak ve vuruş sayılarının standart olması sebebiyle zemine sıkıştırma yolu ile verilen enerji de standarttır. Kullanılan moldun içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlenmiştir. Sıkıştırılmış zeminin su muhtevasının belirlenmesi için, alttan ve üstten olmak üzere iki yerden numune alınmıştır ve bu iki değerin ortalaması hesaplarda esas olmuştur. Bulunan su muhtevası değeri (ω) kullanılarak, kuru birim hacim ağırlığı (ρ_{dmaks}) bulunmuştur. Ayrıca deney değişik su muhtevaları için hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlanmak suretiyle proktor eğrisi, dolayısıyla da optimum su içeriğiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıklar elde

edilmiştir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 1557 - ASTM D 698 göz önüne alınmıştır.

Şekil 5.7. Deney için numune hazırlığı ve uygulaması

5.2.5 Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncı Deneyleri

Şişme yüzdesi; bir zemin numunesinin yatay yönlerde hacim değiştirmesi engellendiği durumda, sabit bir sürşarj yüklemesi altında su altına bırakılması durumunda tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimi olarak tanımlanmaktadır.

Şişme basıncı ise; bir zemin numunesinin yatay yönde hacim değiştirmesi engellendiğinde, su altında bırakıldığında tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimini engellemek için uygulanması gereken düşey basınçtır.

Standart proktor deneyinden her bir magnezyum klorür solüsyon oranı için (%0, 3, 5, 7, 9, 11, 13) elde edilmiş optimum su muhtevası değerlerinde belirli kuru ağırlıklarda numuneler hazırlanmış ve su kaybını önlemek amacıyla koruma altına alınmıştır. Bu hazırlık sonunda kontrol örnekleri alınıp etüve bırakılmıştır. 24 saat sonunda kontrol örnekleri alınıp su muhtevasının optimumda olup olmadığı belirlenmiştir. Su muhtevası düşen numunelere gerektiği ölçüde su ilave edilmiş, fazla

görünen numuneler ise havalandırmaya bırakılmıştır. Bu kapsamda yapılan şişme deneyleri; standart şişme kalıbının boyutları belli olduğundan (D=70 mm ve H=20 mm) kalıba yerleştirilecek malzememiktarı belli olup 3 tabakada sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi sonrasında, numuneler ekipmana yerleştirildi ve suya doygun hale getirilmiştir. Şişme yüzdesi için belli zaman aralıklarında eksenel değişimi ölçülmüş, şişme basıncı içinse, numune basınç almayacak şekle gelene kadar belli zaman aralıklarında değerler okunmuştur. Deneyde TS 1900-2 ve ASTM D 2435 uygulanmıştır.

a) b)

Şekil 5.8. a) şişme basıncı, b) şişme yüzdesi

5.2.6 Dispersibilite Deneyleri

Dispersif killer, inşaat mühendisliği pratiğinde sıkça kullanılan, elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon gibi klasik laboratuar indeks deneyleri ile tanımlanamamaktadır. Bu yüzden özel deney prosedürleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında hem katkısız hem de katkılı numunelere iğne deliği deneyi ve dağılma deneyi uygulanmıştır.

5.2.6.1 Dağılma deneyleri

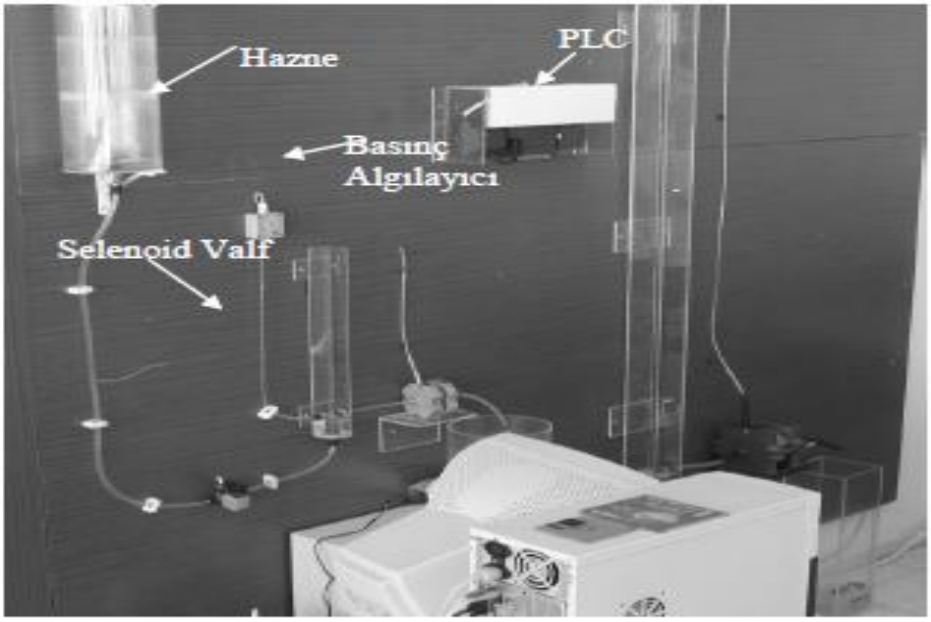
Bu deneyde, bir kenarı 15 mm ebadında küp şeklinde bir zemin numunesi 250 ml saf suyun içerisine dikkatlice yerleştirilir. Malzemenin su ile yaptığı reaksiyon ve kolloidal kil parçacıklarının su içerisinde süspansiyon oluşturup oluşturmadığı 5-10 dk süre ile gözlenir. Oluşan bulanıklık derecesine göre zemin; bulanıklık yok denecek kadar az ise "Dispersif Değil", az ise "Ara Zemin", orta derecede ise "Dispersif" ve yüksek bulanıklıkta "Çok Yüksek Dispersif" olarak tanımlanır. Kullanılan zemin örneğinin fiziksel dispersibilite deney sonuçları çezelge 5.5'de verilmektedir.

Çizelge 5.5. Zemin örneğinin fiziksel dispersibilite deney sonuçları

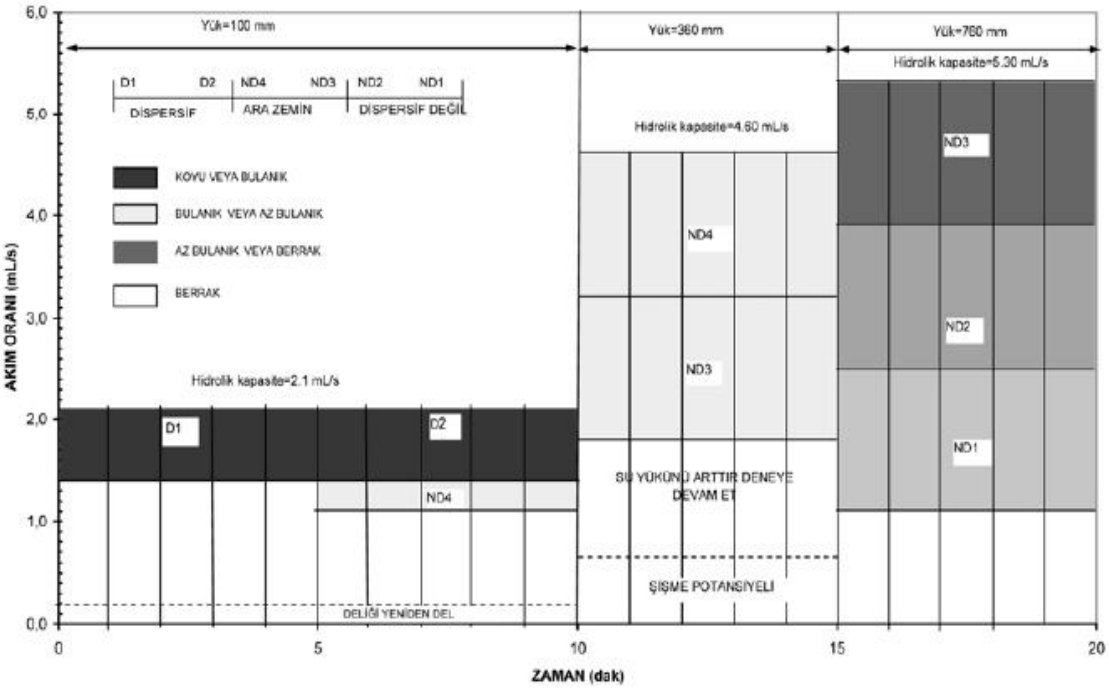
Numune	Dağılma sınıfı	Dispersiyon yüzdesi	İğne deliği sınıfı
Katkısız	K3	67.7	D2

5.2.6.2 İğne deliği deneyi

Deneyde, kullanılacak zeminden optimum su muhtevasında sıkıştırılmış 38 mm uzunluğunda silindirik bir numune hazırlanmıştır. Numune ortasında 1 mm çapında bir delik açılarak bu delikten 50, 180, 380 ve 1020 mm düşülerde saf su geçirildi ve deşarj olan suyun akış hızı, bulanıklılığı ile deliğin ne kadar genişlediği kaydedilmiştir. Deney sonucunda malzeme 50 mm su yükü altında hızla dağılıyorsa "dispersif", 50 veya 180 mm yük altında yavaşça erozyona uğruyorsa "ara zemin", 380 veya 1020 mm yük altında erozyon gözlenmiyorsa "dispersif değil" olarak rapor edilir. Numune içinde açılan bu delikle, dolgu barajların geçirimsiz çekirdeğinde oluşabilecek bir çatlak ya da kaçak kanalının küçük ölçekte simülasyonu hedeflenmiştir. Deney ülkemizde ODTÜ ve DSİ laboratuarlarında yapılmaktadır. Kullanılan deney düzeneği ve deney abağı şekil 5.9 ve şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9. İğne deliği deney düzeneği



Şekil 5.10. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı

5.2.7 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için laboratuvar deney yöntemleri arasında en gelişmiş olan yöntemdir. Bu deney ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemeti gerçek koşullara en yakın olarak belirlenmektedir. Üç eksenli basınç deneyleri çoğunlukla kil, silt ve killi siltler üzerine uygulanmaktadır.

Deneylerde kullanılacak olan numuneler yükseklik / çap oranı 2 olacak şekilde (H=76mm ve D=38mm) pasalanmaz çelik tüplerden çıkarılmış ayrıce kalıp boyutları belli olup kullanılan malzeme miktarı her katkı seviyesnde bellidir ve kür sürelerine uygun şekilde deneye tabi tutulmuşlardır. Bu oran seçildiği zaman düşey eksen boyunca belirebilecek eşit olmayan birim deformasyonlar (ε_z) etkileri minimuma indirilebilmektedir (Önalp, 2007). Uygulanan kür süreleri 0, 7 ve 28 günden oluşmaktadır. Böylece hem katkı malzemesinin hem de kür süresinin katkı seviyesiyle beraber mukavemet değerlerindeki değişim incelenmiştir. Ayrıca tüplerde sıkıştırılarak oluşturulan numuneler daha sonra iki kat stretch filmle kaplanmış ve havası alınmış desikatörlerde küre bırakılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin yumuşak kıvamda olması sebebiyle çevre basınçları 100-200-300 kPa olarak seçilmiştir. Deneylerde çevre basınçları sabit tutulurken; 1mm/dk sabit bir yükleme hızı ile uygulanan düşey bir hareket vasıtasıyla numune kırılmıştır. Deneyler genel olarak %20 birim deformasyon değerine ulaşıncaya kadar veya kırılma gerçekleşmişse daha düşük deformasyonlarda sonlandırılmıştır. Deneyde çevre (hücre) basıncı uygulandıktan hemen sonra deviatör gerilme artırılarak numunenin kesilmesi sağlanmıştır. Deviatör gerilmenin hızlı bir şekilde uygulanması ile deney süresince numunedeki suyun drenajına müsaade edilmemektedir. Bu deneyin doygun haldeki kil numunelerle yapılması halinde içsel sürtünme açısı (Ø=0) daima sıfır olmaktadır. Deney sonunda zeminin kohezyonu (c) elde edilmektedir. Şekil 5.11 laboratuarda deneyler esnasında kullanılan üç eksenli basınç deney düzeneğini göstermektedir. Deneyde TS 1900-2 ASTM D 2850 standardı uygulanmıştır.

Şekil 5.11. Üç eksenli basınç deney sistemi

Yumuşak killerde en önemli sorunlardan biri çok hızlı yapılan yüklemenin getirdiği kritik durumlardır. Bir dolgunun normal konsolide killer üzerine çok hızlı bir şekilde inşa edilmesi, bir barajın yüksek plastisiteli çekirdeğinin hızla yükseltilmesi, ya da yumuşak kil üzerine oturtulan bir temelin aşırı hızlı yüklenmesi konsolidasyonsuz-drenajsız koşulları oluşturmaktadır. Bu durumda hızla artan gerilmeler sonucu kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistem dışına çıkamadan zemin kayma gerilmeleri aldığından ani yenilmeler oluşmaktadır. Teorik olarak konsolidasyonsuz-drenajsız deneylerde deviatör gerilmedeki artışlar tümüyle boşluk suyu basıncında meydana gelen artışla karşılanacak ve dolayısıyla çevre basıncındaki bir artışla kayma direncinde bir artış olmayacaktır. Daha basit bir ifadeyle kayma direnci aslında çevre basıncından bağımsızdır ve elde edilen Mohr dairelerinin çapları aynı olmalıdır. Yalnız teorik olarak saf killer için belirtilen bu husus, deneylerde kullanılan killerin saf kil olmaması ve silt de içermesi ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu etkisiyle yapının silt-ince kum formuna doğru bir değişim göstermesi dolayısıyla tam olarak elde edilmemektedir (Olgun, 2008).

5.2.8 Mikroyapıyı Belirleme Yönelik Yapılan Deneyler

Bu çalışma kapsamında numunelerin mikroyapısının incelenmesine yönelik deneyler de yapılmıştır. Bu deneyler XRD, SEM Görüntü analizleri deneyleridir.

5.2.8.1. XRD deneyleri

X ışınları kırınımı deneyleri ince daneli zeminlerde mineral tayini ve kristal yapısının incelenmesi için en çok kullanılan deneylerden birisidir. X-Işınları Kırınımı, X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışınları kırınımı günümüzde malzeme karakterizasyonu için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarında; fizik, kimya, biyoloji, biyokimya, malzeme ve metalürji, jeoloji, madencilik, çimento, seramik ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla, Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Laboratuarı'nda bulunan X-ray Difraktometresi kullanılmıştır.

5.2.8.2 Taramalı elektron mikroskop analizleri (SEM)

Modern elektron mikroskobuyla 100 Å'den daha küçük boyutları görerek küçük kil danelerini dahi inceleyebilmek mümkündür. Elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yapısının yüzeyinin bir nüshasına odaklanmaktadır. SEM aletinin ışık mikroskobuna nazaran büyütmesi 20~150000 kez, derinlik incelemesi 300 kez daha büyüktür. Bu sayede zemindeki kil daneleri ve çatlak yüzeyleri doğrudan görülebilmektedir. Bu nedenle, SEM kullanım alanı günden güne artmaktadır. ESEM aletinde elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yüzeyine odaklanırken bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk olarak görülmektedir (Yüksel, 2007). Analizlerde Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde bulunan ZEISS marka SUPRA 50 VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

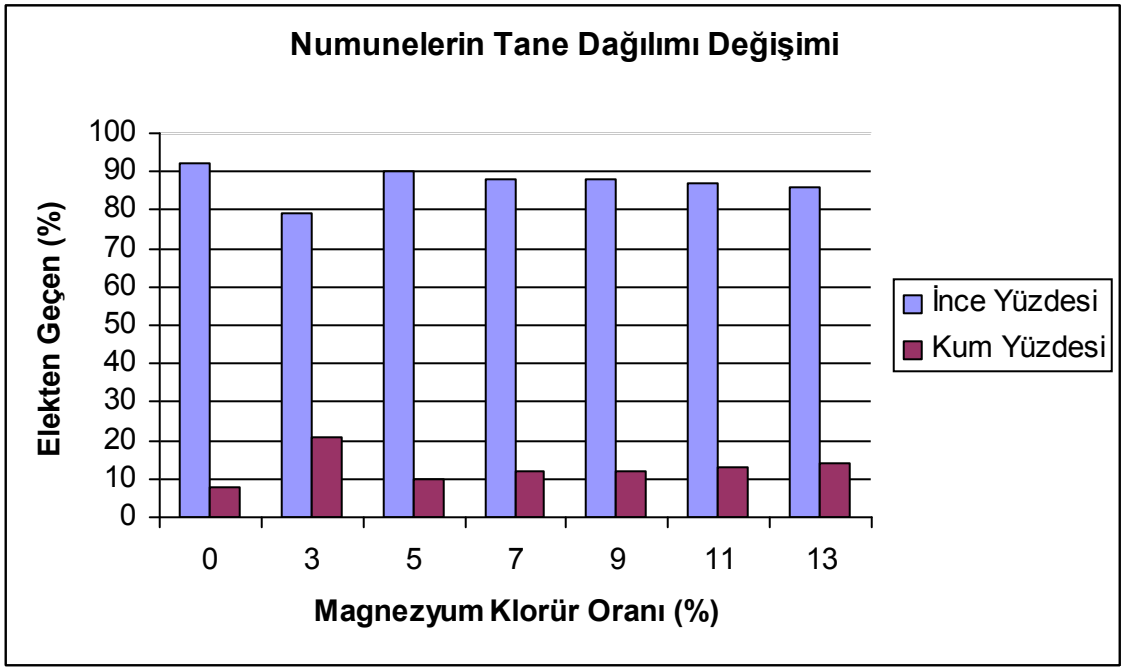
Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar; öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri üzerinde yoğunlaştırılmış; daha sonra, çalışmanın amacına yönelik olarak şişme deneyleri, dispersibilite deneyleri ve dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Örneklerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılması bir önceki bölümde değinilmiştir. Deney sonuçları ana başlıklar halinde değerlendirilecektir.

6.1 Elek Analizi Deney Sonuçları

Karışımların dane çapı dağılımı için, sabit sıcaklıktaki etüvde kurutulup önceden belirlenen oranlarda magnezyum klorür solüsyonu ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Deney sonuçları çizelge 6.1'de ve şekil 6.1'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre; magnezyum klorür solüsyonu ilavesi zeminin dane çapı dağılımını değiştirmektedir. Magnezyum klorür katkısı zeminin dane çapını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak kil boyutundaki numune yüzdesi giderek azalmaktadır. Özellikle %7 katkı seviyesine kadar tane boyutu artarken, bu orandan sonra değişiklik gözlenmemiştir. %3 katkı seviyesindeki kum yüzdesindeki ani artışın nedeni olarak, numune hazırlanırken kil ve $MgCl_2$ solüsyonu karma işlemi sırasında bazı yerlerde yeteri kadar karıştırılmaması nedeniyle topaklanma oluşması gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Tane Dağılımı

Katkı Oranı (%)	Kum Yüzdesi (%)	İnce yüzdesi (%)
Katkısız	8	92
%3 $MgCl_2$	21	79
%5 $MgCl_2$	10	90
%7 $MgCl_2$	12	88
%9 $MgCl_2$	12	88
%11 $MgCl_2$	13	87
%13 $MgCl_2$	14	86



Şekil 6.1. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Tane Dağılımı

6.2 Kıvam Limit Deneyleri Sonuçları

Çalışma kapsamında farklı oranlarda (%3, %5, %7, %9, %11, %13) magnezyum klorür solüsyonu katkısı ile hazırlanan numunelere, daha önce belirtilen standartlara

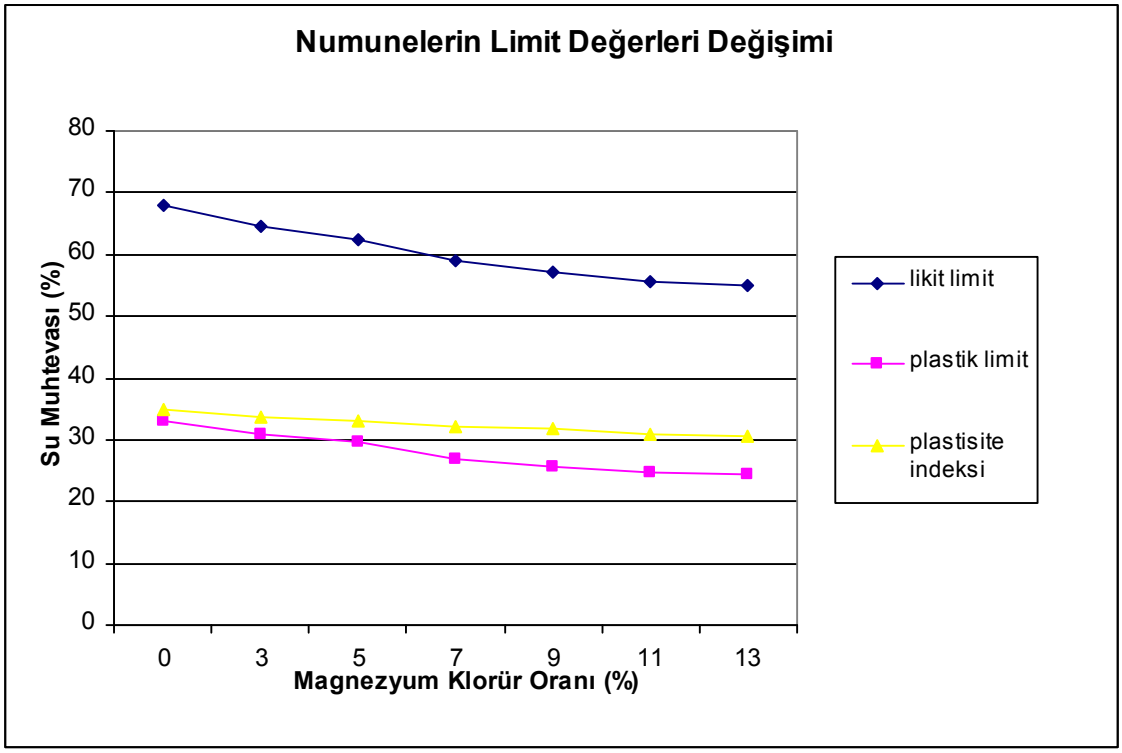
uygun olarak likit limit ve plastik limit deneyleri uygulanmıştır. Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ile magnezyum klorür katkısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Çizelge 6.2'de ve Şekil 6.2'de deney sonuçları verilmektedir.

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi $MgCl_2$ solusyonu katkı oranı arttıkça numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite değerlerinde de azalma gözlenmiştir. Bu değişikliklerin sonucunda, plastisite indisindeki değişiklikler zemin sınıfının değişmesine neden olmuştur. Bu davranışın nedeni, tuz içeriği arttıkça yaygın çift tabaka kalınlığının azalmasıdır (Venkatabor, 1977).

Çizelge 6.2. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Limit Değer Değişimi

Katkı Oranı (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
Katkısız	68	33	35
%3 $MgCl_2$	64,6	31	33,6
%5 $MgCl_2$	62,4	29,5	32,9
%7 $MgCl_2$	59	26,8	32,2
%9 $MgCl_2$	57,2	25,5	31,7
%11 $MgCl_2$	55,6	24,8	30,8
%13 $MgCl_2$	54,9	24,4	30,5

Üç deniz kili üzerinde yapılan bir çalışmada İsahaya kilinin likit limit değeri artan iyon konsantrasyonuyla artarken, diğer iki kilin likit limit değerleri artan iyon konsantrasyonuyla azaldığı ifade edilmişitir (Sridharan et al., 2002). Bu da killerin plastisite limiti değerinde tuz solüsyonlarının etkisi ile ilgili genel bir görüş birliği olmadığını göstermektedir. Bu farklı davranış araştırmacılar tarafından, kalonit kilinin (şişmeyen) flokülasyon mekanizmasıyla ve çift tabaka dağılım teorisi (DDL) ile açıklanmıştır. Artan iyon konsantrasyonu ve katyon değeri, plastisite limitinin azalmasına neden olur çünkü net itme kuveti azalır bundan dolayı da kil partikülleri floküle olur.



Şekil 6.2. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Limit Değer Dağılımı

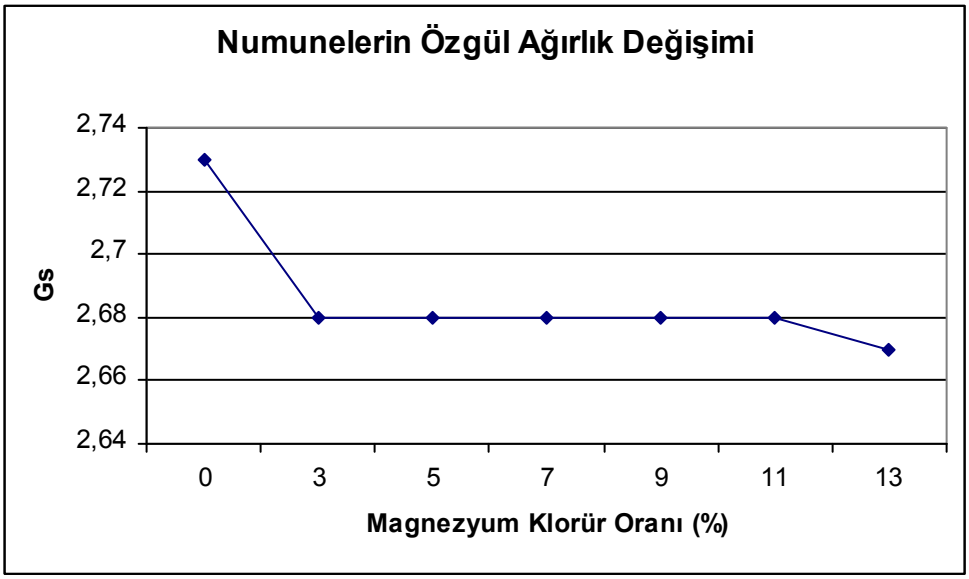
6.3 Özgül Gravite Deney Sonuçları

Daha önceden hazırlanan katkısız ve belli oranlarda magnezyum klorür solüsyonu ile hazırlanan numunelerle yapılan özgül gravite deneyinin sonuçları çizelge 6.3 ve şekil 6.3'de görülmektedir. Çizelge ve şekilden anlaşılacağı gibi %3 katkı seviyesi sonucunda özgül gravite değeri düşüş gösterirken, katkı seviyesi arttırıldığında zemin üzerindeki etkisi ortadan kalkmıştır.

Çizelge 6.3. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Özgül Gravite Değer Tablosu

Katkı Oranı	Özgül Ağırlık (Gs)
Katkısız	2,73
%3 $MgCl_2$	2,68
%5 $MgCl_2$	2,68
%7 $MgCl_2$	2,68
%9 $MgCl_2$	2,68
%11 $MgCl_2$	2,68
%13 $MgCl_2$	2,67

Zeminlerin özgül gravitesi, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilmesi için gereklidir. Katkı malzemesinin etkisiyle ortaya çıkan tane büyüklüğü artışı özgül gravite değerinin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 6.3. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Özgül Gravite Değer Dağılımı

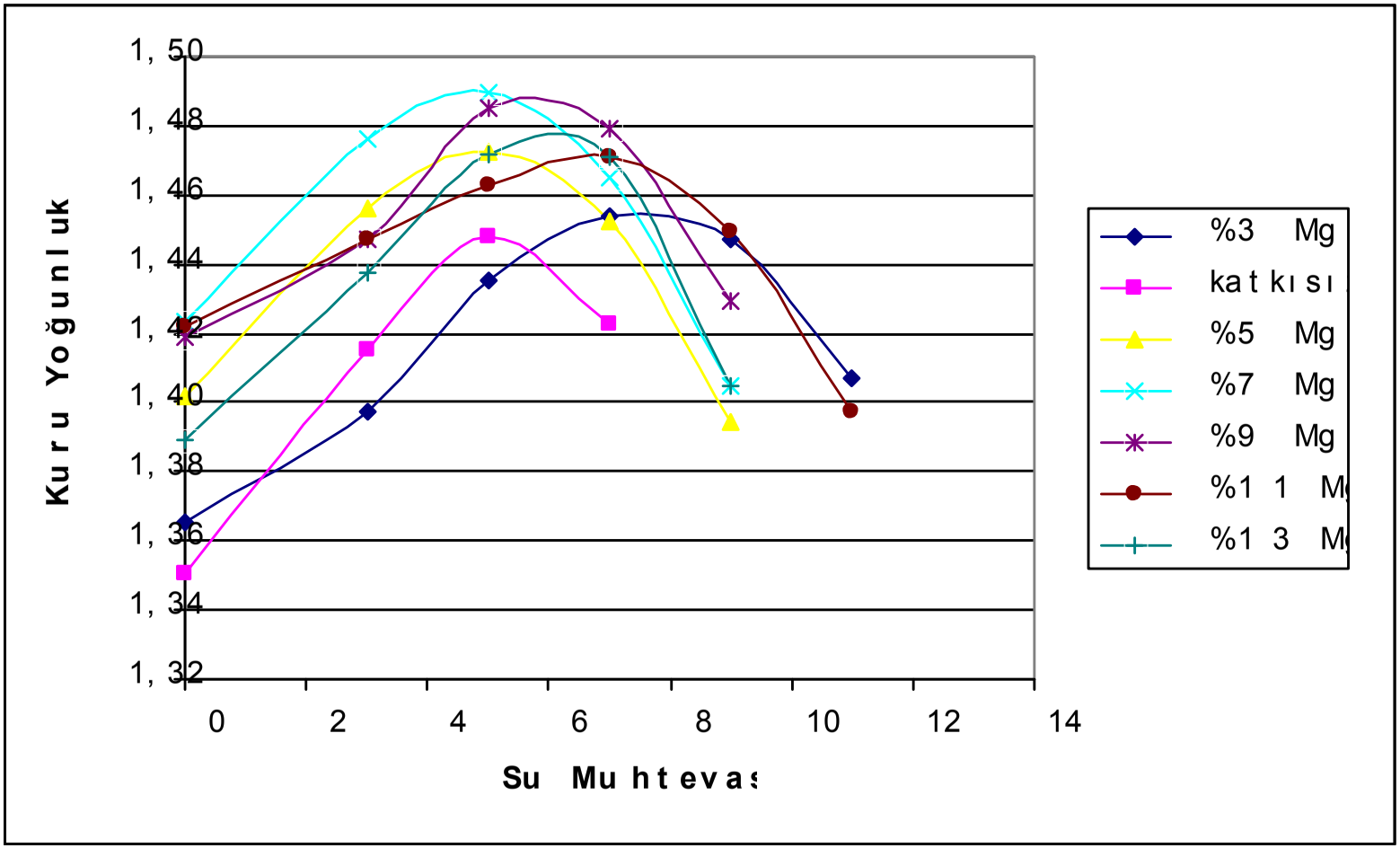
6.4 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Doğal zemine daha önceden belirlenmiş oranlarda $MgCl_2$ solüsyonu ilave edilerek hazırlanan numuneler öncelikle bir gün boyunca küre bırakılmıştır. Daha sonra standart proktor metoduyla kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyle birlikte numunelere ait optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk değerleri (ρ_{dmaks}) değerleri elde edilmiştir (Çizelge 6.4 ve Şekil 6.4). Sonuçlar incelendiğinde ilave edilen $MgCl_2$ solüsyonu ile optimum su muhtevasında (w_{opt}) azalma olurken, maksimum kuru yoğunluk değerinde (ρ_{dmaks}) ise artış gözlemlenmiştir. Özellikle %7 katkı seviyesinde kompaksiyon eğrisi oldukça düzgün bir şekil almıştır. %7 katkı oranına kadar, artan katkı oranıyla beraber kuru yoğunluk değeri belirgin bir artış gösterirken, katkı oranının daha da arttırılması kuru yoğunluk değerini düşürmeye başlamıştır. Bunun nedeni magnezyum klorür solüsyonu katkısının fazla arttırılması sonucunda flokülasyon nedeni ile aynı enerji altında daha az sıkıştırma elde edilmiş ve kuru yoğunluk değeri azalmıştır.

Kompaksiyon deneyi sonuçları literatürle uyum içerisindedir. Yapılan çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde; zemine $MgCl_2$ solüsyonu katkısı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini arttırmakta, optimum su muhtevasında ise azalma meydana getirmektedir. Kuru birim hacim ağırlığı artan kompaksiyon enerjisi ile arttırılabilmektedir. Kuru birim hacim ağırlığı ne kadar büyükse, zemin o derece iyi sıkışacaktır. Kuru birim hacim ağırlığının en büyük değerine karşılık gelen su muhtevasına optimum su muhtevası denir ve bu değerde en iyi sıkışma elde edilir. Frydam ve Wood yaptıkları çalışmada, bu davranışın düşük su muhtevasındaki zemin yapısının (kompaksiyondan önce) artan tuz konsantrasyonuyla, flokülasyonun yüzey-yüzey olan şeklinin (tuz flokülasyonu) kenar-yüzey olarak değişim eğilimine bağlamaktadırlar.

Çizelge 6.4. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Kompaksiyon Deney Sonuçları

Katkı Oranı (%)	**W_{opt} (%)**	**ρ_{dmaks} (Mg/m^3)**
Katkısız	23,2	1,448
%3 $MgCl_2$	24	1,455
%5 $MgCl_2$	23,3	1,473
%7 $MgCl_2$	22,6	1,49
%9 $MgCl_2$	23,5	1,488
%11 $MgCl_2$	23,8	1,473
%13 $MgCl_2$	25,4	1,476



Şekil 6.4. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre w_{opt}- γ_{dmaks} Grafiği

6.5 Şişme Deney Sonuçları

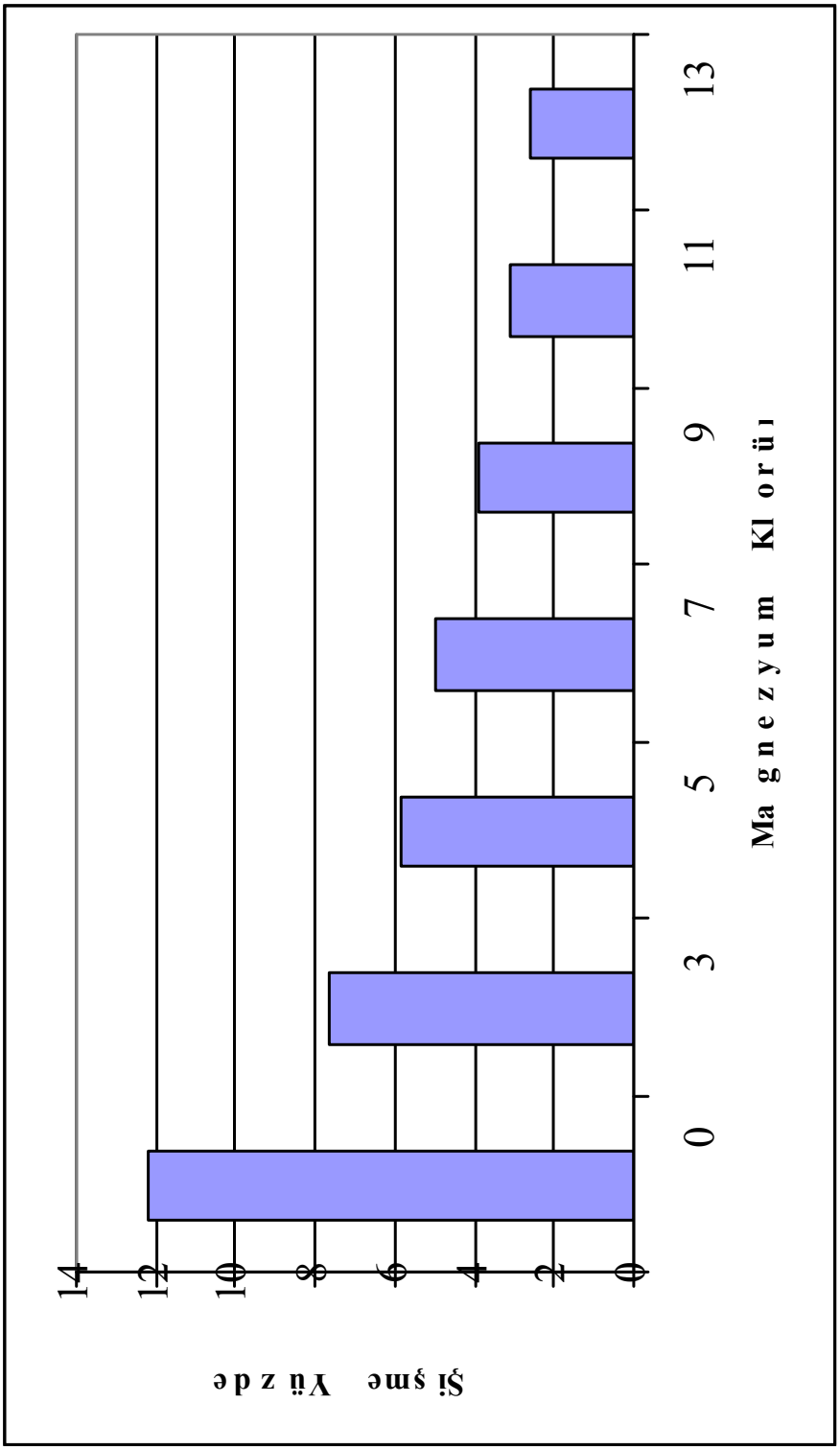
Şişen zeminlerin davranışını kontrol eden en önemli faktör, kilin minerolojik kompozisyonudur. Bu nedenle kil tipi, şişme potansiyeli yönünden önemlidir. Bu bölümde şişme deneylerine ait sonuçlar verilmektedir. Şişme deneyleri, kil zemin ve farklı oranlarda $MgCl_2$ solüsyonu katkısı ile hazırlanmış numuneler üzerinde şişme yüzdesi ve şişme basıncı ölçümü amacıyla yapılmıştır.

6.5.1 Şişme yüzdesi deney sonuçları

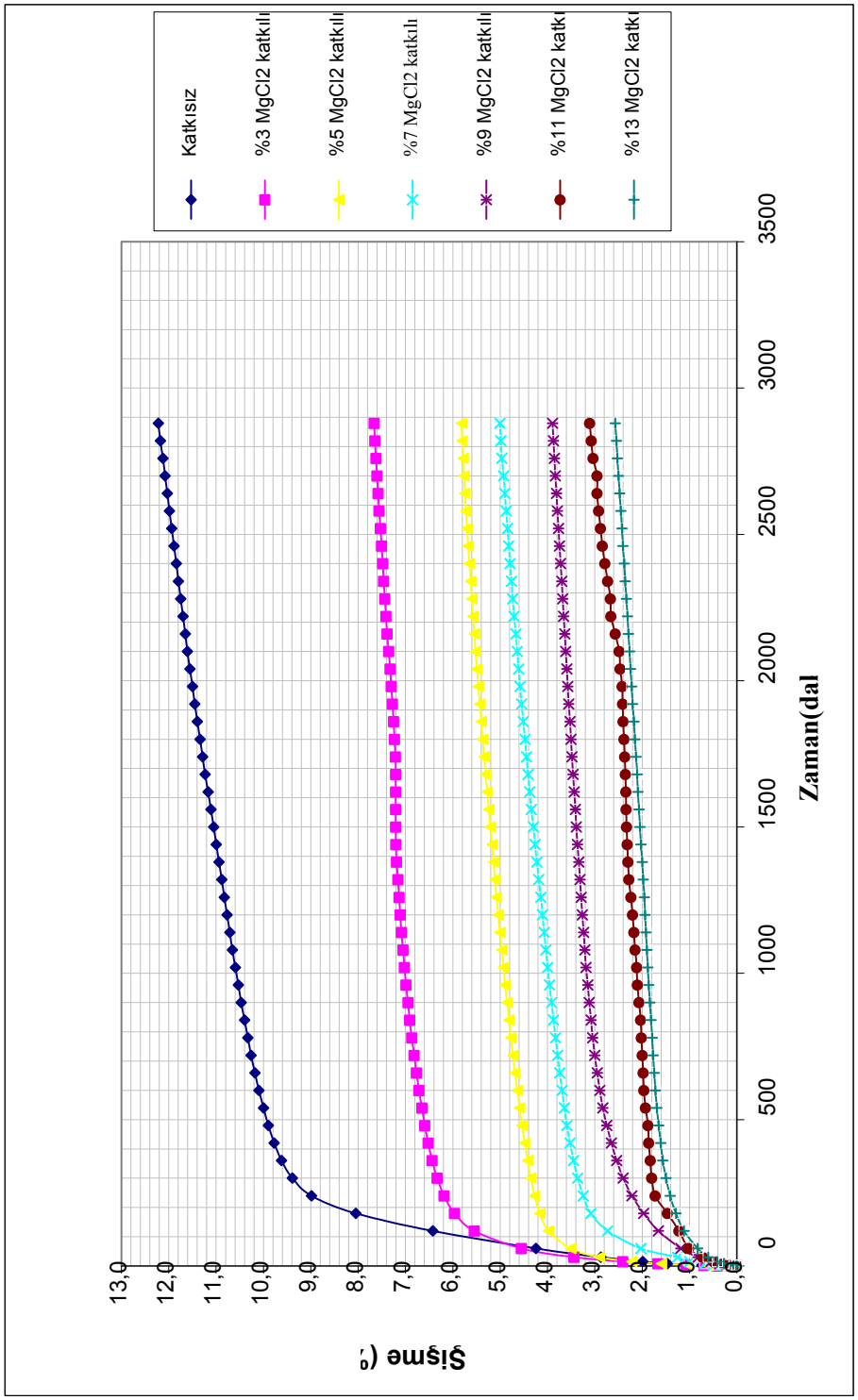
Deneyden elde edilen sonuçlar çizelge 6.5'de verilmiştir. Şekil 6.5'de artan $MgCl_2$ solüsyonu oranına göre şişme yüzdesi değişiminin grafiksel görünümü, 6.6'da ise $MgCl_2$ solüsyonu oranlarındaki değişimin toplu görünümü mevcuttur. Sonuçlar incelendiğinde artan katkı oranıyla beraber şişme yüzdesinde azalma ortaya çıktığı gözükmektedir. Özellikle katkısız kilde oluşan şişme yüzdesinin, %7 $MgCl_2$ katkı seviyesine kadar belirgin bir şekilde azaldığı ortaya konmuştur. Ayrıca diğer katkı seviyelerinde de şişme yüzdesindeki azalma devam etmekte ancak %7 katkı oranına kadar oluşan düşüş kadar yüksek olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.5. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Şişme Yüzdesi Deney Sonuçları

Katkı Oranı (%)	**Şişme Yüzdesi (%)**
Katkısız Kil	12,220
%3 $MgCl_2$	7,660
%5 $Mgcl_2$	5,820
%7 $MgCl_2$	5,005
%9 $MgCl_2$	3,895
%11 $MgCl_2$	3,110
%13 $MgCl_2$	2,570



Şekil 6.5. Değişen $MgCl_2$ oranına göre şişme yüzdesi değişimi



Şekil 6.6. $MgCl_2$ katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme yüzdesi-zaman eğrileri.

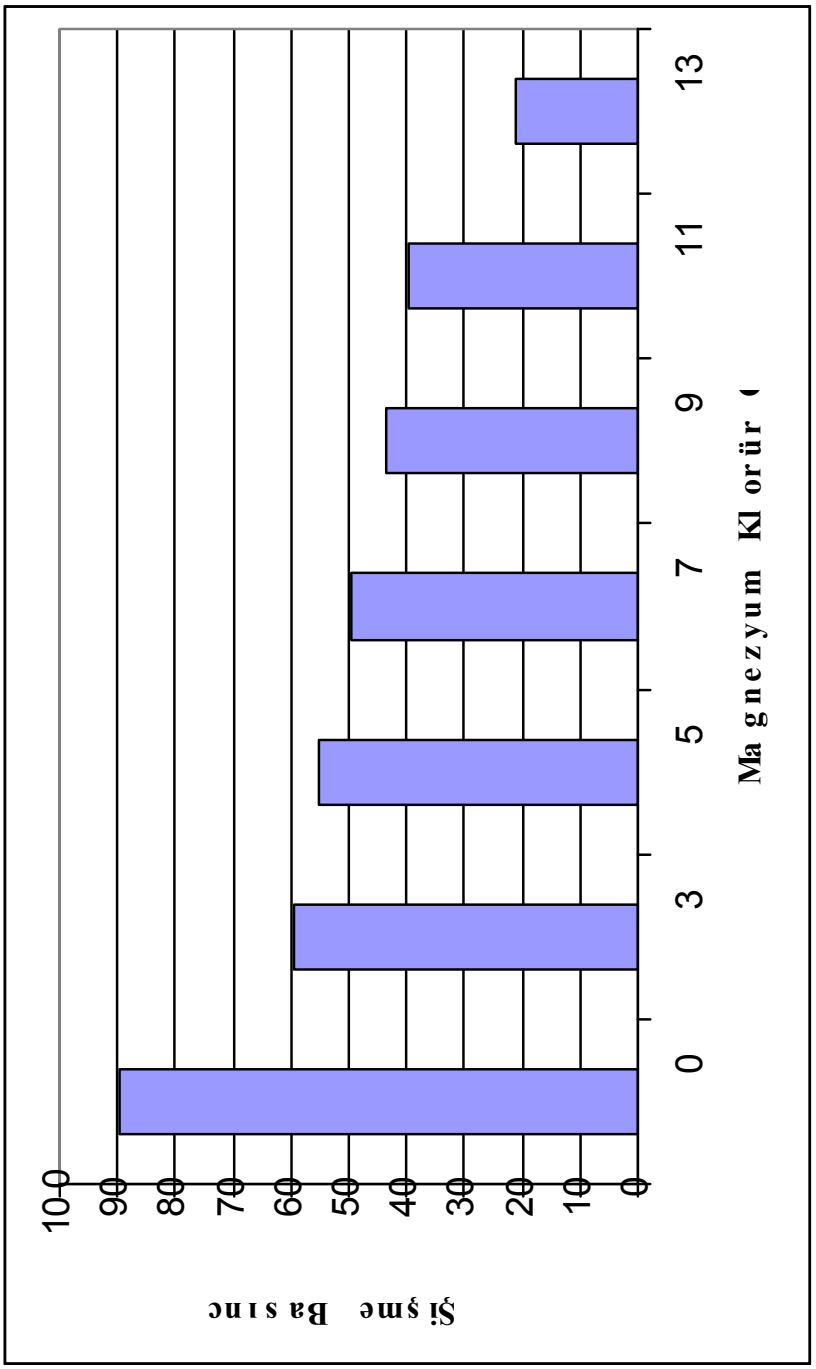
Özellikle katkısız haldeki yüksek şişme değerleri, magnezyum klorür solüsyonu katkısının serbest şişme yüzdesinin kontrolünde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde %7 katkı oranında katkısız numuneye oranla daha kısa zamanda ulaşılmıştır. Benzer değerlendirme diğer katkı seviyeleri için de yapılabilir. Kısa sürede stabilizasyonun sağlanması özellikle uygulama yönünden büyük bir avantaj sağladığına inanılmaktadır.

6.5.2 Şişme basıncı deney sonuçları

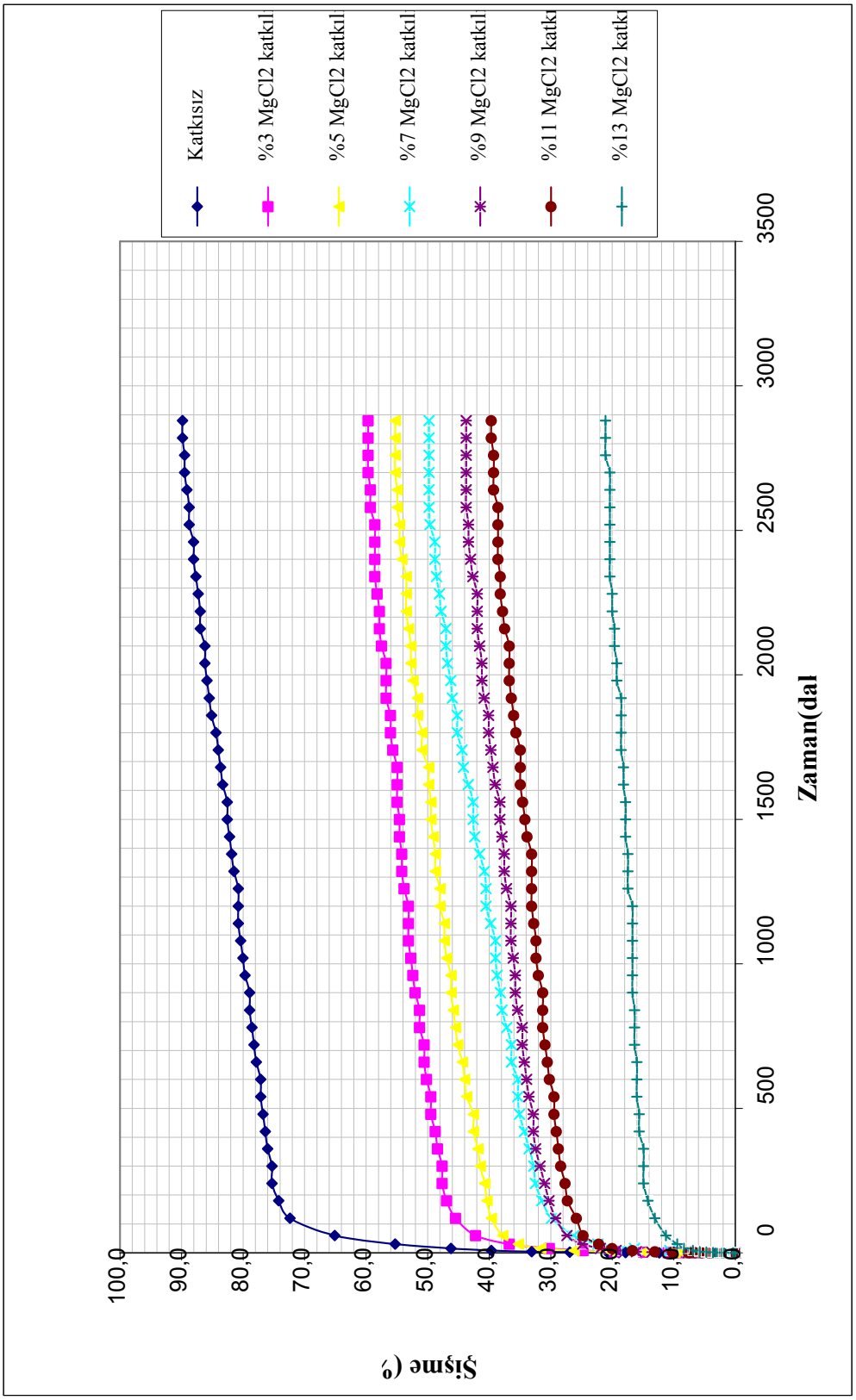
Deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6' da verilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlara göre artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde belirgin azalma sağlanmıştır. Bu da kullanılan katkı malzemesinin şişme basıncı üzerindeki iyileştirme özelliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 6. 6. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Şişme Basıncı Deney Sonuçları

Katkı Oranı (%)	**Şişme Basıncı (kPa)**
Katkısız Kil	89,854
%3 $MgCl_2$	59,660
%5 $Mgcl_2$	55,295
%7 $MgCl_2$	49,760
%9 $MgCl_2$	43,744
%11 $MgCl_2$	39,652
%13 $MgCl_2$	21,099



Şekil 6.7. Değişen $MgCl_2$ Oranına Göre Şişme Basıncı Değişimi



Şekil 6.8. $MgCl_2$ katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme basıncı-zaman eğrileri.

Elde edilen sonuçlar ışığında, özellikle %7 katkı seviyesinde ortaya çıkan iyileşme oranının %50 seviyesine kadar çıktığı gözükmektedir. Bu seviyeden sonra ki sonuçlarda ise artan katkı oranıyla iyileşme devam etmekte ancak oran azalmaktadır.

Kil-su sistemindeki değişebilen katyonlar kil üzerinde yer almayıp, yüzeyden farklı uzaklıklarda bulunurlar. Pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü kil yüzeyi arasındaki elektriksel kuvvet, katyonları yüzeye çeker, fakat termal enerjileri onları yüzeyden uzağa dağıtır. Elektriksel çekme ve termal dağıtma, arasındaki denge yüzeydeki, yüksek konsantrasyonlu ve yüzeyden düşük uzaklıktaki katyonları dağıtmayı sağlar. Bitişik tanelerin dağılmış iyon tabakalarının birbirleri ile etkileşimi, şişme özeliğini açıklayıcı bilgi verir. Negatif yüklü yüzeydeki iyonların teorik dağılımı Gouy ve Chapman tarafındandan hesaplanmıştır (Sridharan et al., 1986).

Boşluk suyunda tuz konsantrasyonun artması sonucunda, taneler hızla topaklanmakta ve dolayısıyla tane boyutu artmaktadır. Topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve bunun sonucunda absorbe edilen su miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla şişme potansiyeli azalmaktadır. Ayrıca, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyunda bulunan katyonlar arasında katyon değişimi meydana gelmektedir. Bu durum levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olmaktadır (Mowafy et al., 1985). Artan katyon konsantrasyonu ve katyon değerliği, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg^{+2} katyonları, Na^{+} katyonlarından daha az şişmeye neden olur.

Bu araştırma sonuçları ve yapılan deneylerle $MgCl_2$'nin şişme davranışını iyileştirme özelliği olduğu ortaya koymaktadır.

6.6 Dispersibilite Deney Sonuçları

Tüm fiziksel ve kimyasal deneylerde, zemin numunelerinin tabii su muhtevasında deneye tabi tutulmaları ve su muhtevasında değişiklik olmasını önlemek amacıyla izole edilmiş kaplar içinde laboratuvara getirilmeleri gereklidir. Deney öncesi numunelerin etüvde kurutulması yoluna kesinlikle gidilmemelidir. Çünkü etüvde

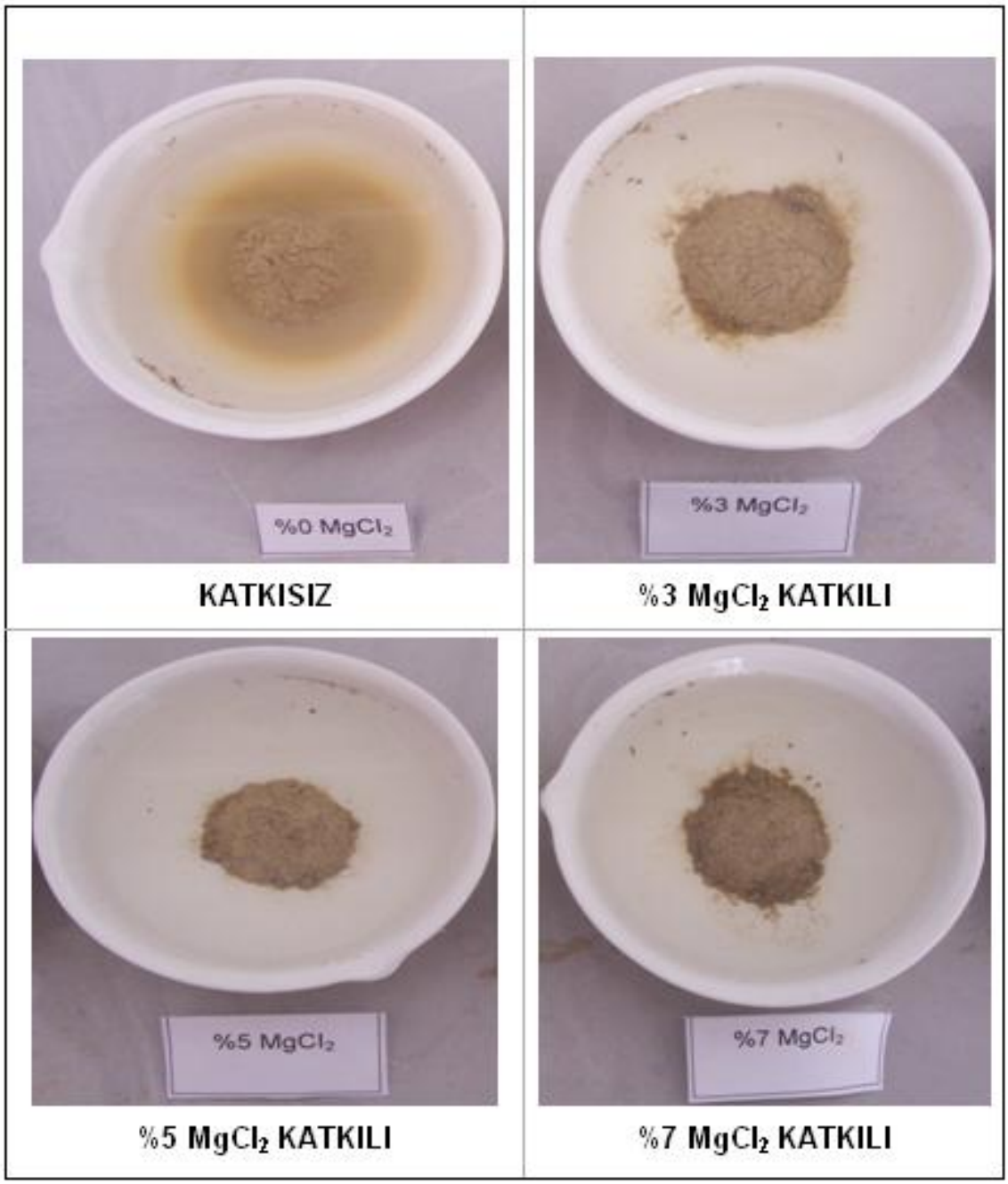
kurutmanın malzemenin dispersiflik durumu üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Zaman zaman farklı deneyler arasında, verdikleri sonuçlar açısından bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Bu durumda önüne gelen laboratuvar sonuçlarına göre karar verme durumunda olan mühendisin sıkıntı yaşaması doğal olmaktadır. Halen bazı araştırmacılar tarafından dispersiflik durumunun tayini açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların bir arada değerlendirilmesi sırasında nasıl bir yol izlenebileceği hususunda çalışmalar sürdürülmektedir. Gerek ülkemizde gerek diğer ülkelerde yaygın uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik deneylerini yaptırmak ve bunları bir arada değerlendirirken ihtiyatlı olmak şeklindedir.

6.6.1 Dağılma deney sonuçları

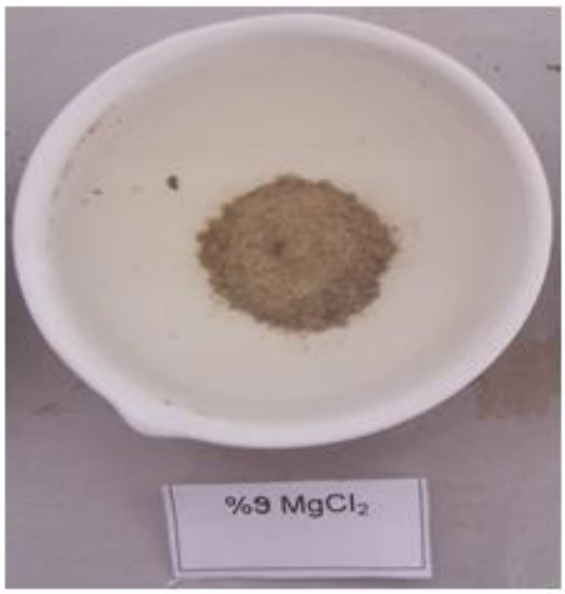
Dağılma deney sonuçları Şekil 6.9'da toplu olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde katkı malzemesi olarak kullanılan $MgCl_2$ solüsyonunun zeminin dispersibilite davranışını olumlu yönde etkilediği açık olarak görülmektedir. Katkısız zemin numunesinin etrafını kolloidal bir bulutlanma kaplamışken, artan katkı seviyesi ile beraber bu bulutlanma giderek azalım göstermiştir. Bu da zeminin dispersif davranışının azaldığını göstermektedir.

Sonuçlar katkı seviyesi boyutunda incelendiğinde; katkısız numunede oluşan bulutlanma zeminin dispersif özellik gösterdiğini açıkça ortaya koymuştur. %3 katkı seviyesinde bulutlanma bir miktar azalsa da numune dispersif özelliğini tamamen kaybetmemektedir. Ancak diğer katkı oranlarında bulutlanma ve kolloidal yapı ortadan kalktığı gözükmektedir. Özellikle %7 katkı seviyesiyle beraber numunelerin dispersif özelliklerini yitirdikleri ortaya çıkmıştır.

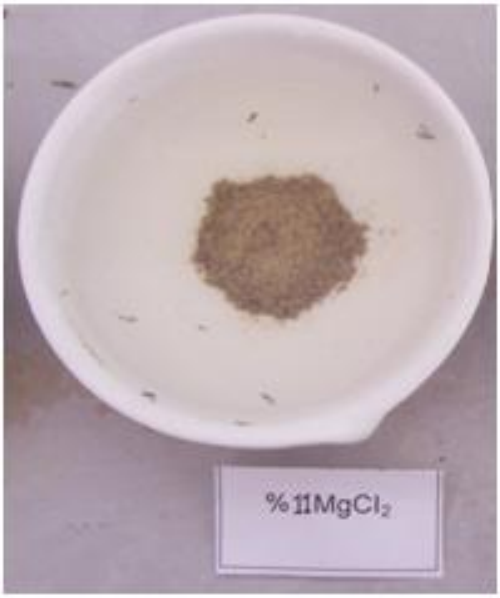
Kolloidal terimini açmak gerekirse; su içinde şeker ya da tuz gibi maddeler çözülerek hazırlanan gerçek bir çözelti içinde çözünen partiküller iyon ya da molekül halindedir. Diğer taraftan süspansiyon adı verilen sıvı-katı karışımındaki partiküller gözle ya da en azından ışıklı mikroskopla görülebilir. İki uç olarak kabul edilen çözelti ve süspansiyonlar arasında kalan kolloidler bir maddenin diğeri içerisinde dağılmasına verilen addır.



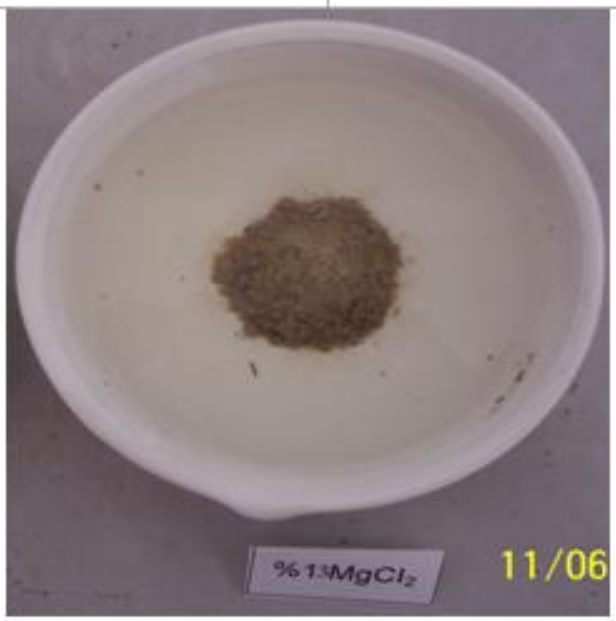
Şekil 6.9. Dağılma deneyi sonuçları



%9 $MgCl_2$ KATKILI



%11 $MgCl_2$ KATKILI



%13 $MgCl_2$ KATKILI

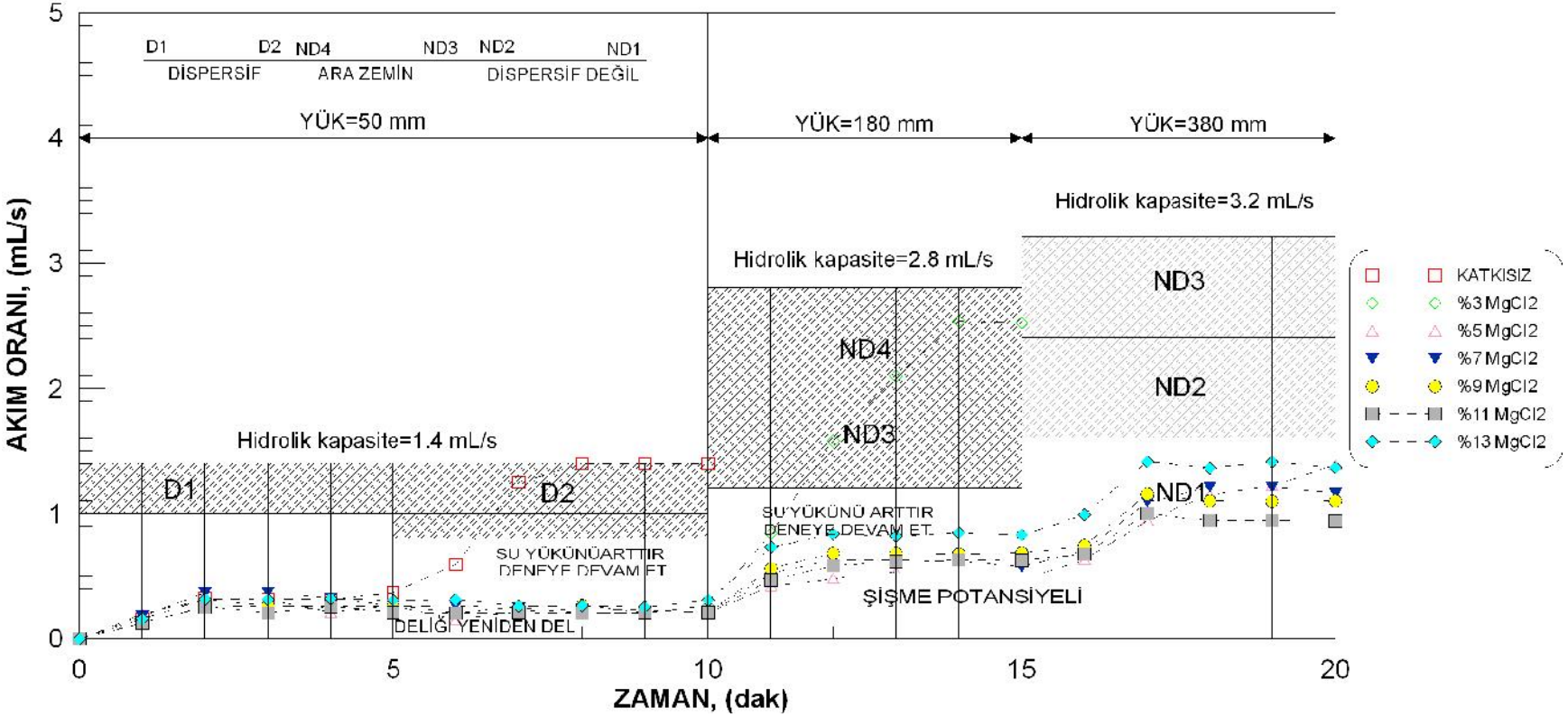
Şekil 6.9 devamı

6.6.2 İğne deliği deney sonuçları

İğne deliği deney sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir. Deney sonuçları dikkate alındığında, katkısız zemin D2 (dispersif), %3 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin ND4 (ara zemin), %5 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin, %7 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin, %9 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin, %11 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin ve %13 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı zemin ND1 (disperisf değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine $MgCl_2$ solüsyonu ilavesiyle beraber dispersif olan zemin özelliği %3 katkı seviyesiyle ara zemin daha sonraki katkı seviyelerinde ise dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Dispersif örneklerde akım oranları zamana bağlı olarak artarak ekipman kapasitesine ulaşmakta ve sabit yük kademesi altında aynı akım oranı değeri ile devam etmektedir. Çünkü bu durumda akım oranı değerini nipelin çapı kontrol etmektedir. %3 katkı seviyesindeki numune bu yüzden "dispersif" olarak tanımlanmıştır. Oysa dispersif olmayan örneklerde başlangıçta akım oranı küçük bir artıştan sonra belli bir değere ulaşmakta ve bu değerde sabit olarak devam etmektedir.

Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için $MgCl_2$ solüsyonunun dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi kesinleşmiştir. Zemindeki dispersif özelliğin ortadan kalkmasının nedeni; katkıdaki magnezyumun +2 değerlikte bir iyon olması ve zeminde adsorbe edilen sodyumla yer değişebilir özellikte olmasıdır.

İğne deliği deneyinde değerlendirme, standart bir delikten geçen akımın büyüklüğüne ve akım oranının gelişim eğilimine bağlı olarak yapılmaktadır. Dispersif örneklerde akım oranı değeri, gelişen delik çapına bağlı olarak ilgili yük kademesinde ekipmanın hidrolik kapasitesine kadar artarak devam etmekte ve kapasite değerinde sabit kalmaktadır. Dispersif olmayan örneklerde de başlangıçta akım oranı küçük bir artıştan sonra belli bir değere ulaşmakta ve bu değerde sabit olarak devam etmektedir. Benzer sonuçlar, bu çalışma kapsamında geliştirilen daha büyük örneklerin kullanıldığı ekipmanlar içinde geçerli olmuştur (Savaş ve Tosun, 2009)



Şekil 6.10. İğne deliği deneylerinin toplu sonuçları

6.7 Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

Yumuşak killerde en önemli sorunlardan biri çok hızlı yapılan yüklemenin getirdiği kritik durumlardır. Bir dolgunun normal konsolide killer üzerine çok hızlı bir şekilde inşa edilmesi, bir barajın yüksek plastisiteli çekirdeğinin hızla yükseltilmesi, ya da yumuşak kil üzerine oturtulan bir temelin aşırı hızlı yüklenmesi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşulları oluşturmaktadır. Bu durumda hızla artan gerilmeler sonucu kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistem dışına çıkamadan zemin kayma gerilmeleri aldığından ani yenilmeler oluşmaktadır. Teorik olarak konsolidasyonsuz-drenajsız deneylerde deviatör gerilmedeki artışlar tümüyle boşluk suyu basıncında meydana gelen artışla karşılanacak ve dolayısıyla çevre basıncındaki bir artışla kayma direncinde bir artış olmayacaktır. Daha basit bir ifadeyle kayma direnci aslında çevre basıncından bağımsızdır ve elde edilen Mohr dairelerinin çapları aynı olmalıdır. Yalnız teorik olarak saf killer için belirtilen bu husus, deneylerde kullanılan killerin saf kil olmaması ve silt de içermesi ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu etkisiyle yapının silt-ince kum formuna doğru bir değişim göstermesi dolayısıyla tam olarak elde edilmemektedir.

Laboratuarda yapılan deneylerde tam yatay olmayan bir kırılma zarfı elde edilmektedir. Aynı zamanda her iki kilde de artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte doğrunun yataydan sapması daha fazla olmaktadır. Bu durumu şu şekilde izah edebiliriz; teorik olarak elde edilen sonuçlar tam saf şekilde hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardır. Fakat tez çalışmasında laboratuarda yapılan deneylerde kullanılan killer tam olarak saf olmayıp içerisinde silt ve çok azda olsa ince kum boyutunda malzeme olduğu için killer için elde edilen sonuçlar literatürdekinden az da olsa farklılık göstermektedir. Aynı zamanda artan kimyasal sıvı konsantrasyonları ile killerin flokülasyonu ile yapının aşırı konsolide kil davranışı gösteren bir yapıya veya silt-ince kum formuna dönüşmesiyle elde edilen sonuçlar biraz daha değişmektedir.

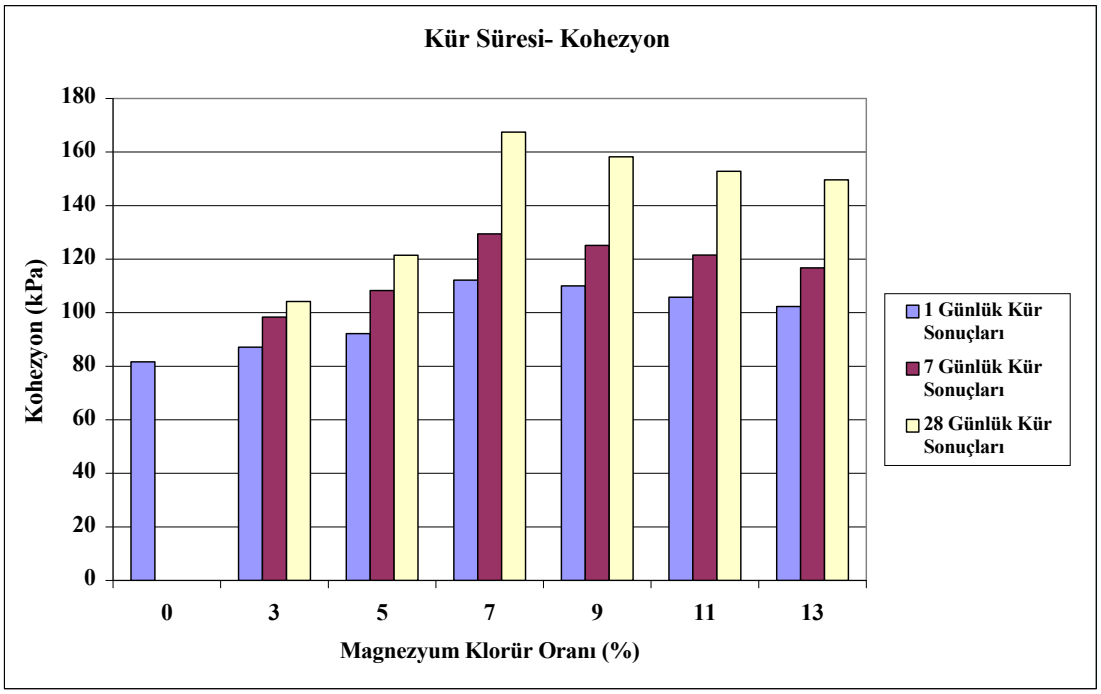
Hazırlanan katkılı ve katkısız numuneler öncelikli 1, 7, 28 günlük kürlere bırakılmış ve 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa çevre basınçları altında deney

gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kayma dayanım parametreleri (c,Ø) Çizelge 6.7.'de verilmiştir. Deneyde çevre (hücre) basıncı uygulandıktan hemen sonra deviatör gerilme artırılarak numunenin kesilmesi sağlanmıştır. Numunelerin çoğunluğunda gözlenen olay, deformasyonların kırılma olarak değil fıçılaşma biçiminde ortaya çıkmasıdır (Şekil 6.11). Ayrıca Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te farklı kür süreleriyle, değişen $MgCl_2$ oranının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerine etkisi gösterilmiştir.

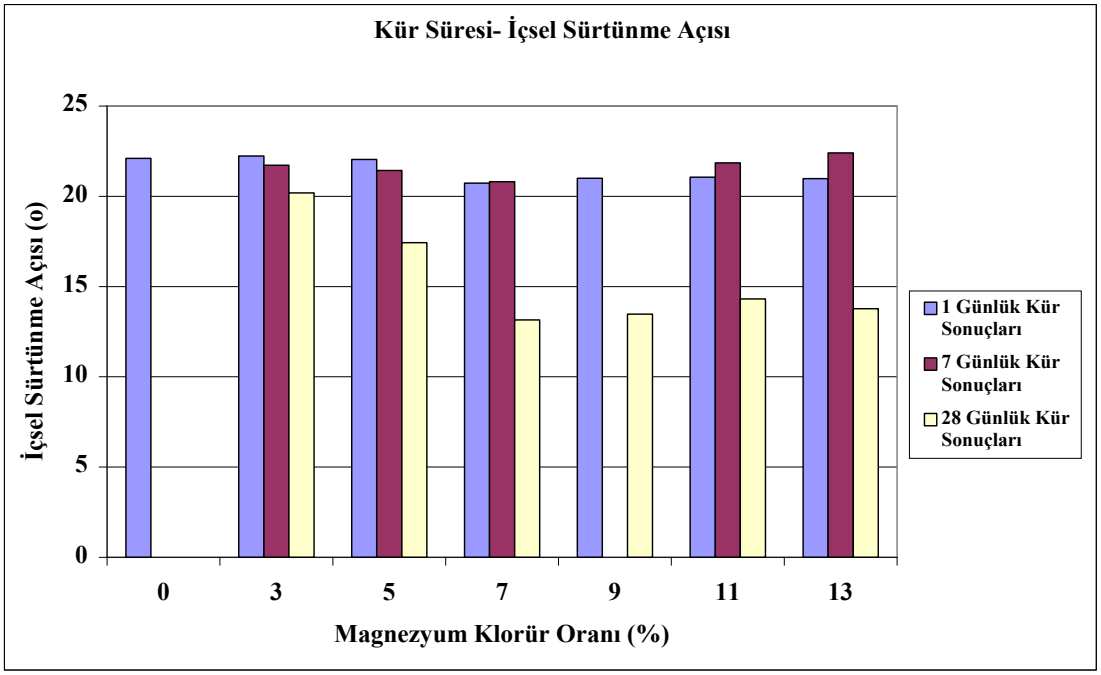
Çizelge 6.7. Katkı miktarı ve kür süresinin dayanım parametrelerine olan etkisi.

Katkı Oranı	**1. gün**		**7. gün**		**28. gün**	
	c(g/cm^2)	**Φ(°)**	**c(g/cm^2)**	**Φ(°)**	**c(g/cm^2)**	**Φ(°)**
Katkısız zemin	81,67	22,1	-	-	-	-
% 3 $MgCl_2$	87,15	22,23	98,35	21,72	104,21	20,19
% 5 $MgCl_2$	92,16	22,04	108,26	21,43	121,48	17,43
% 7 $MgCl_2$	112,19	20,73	129,42	20,81	167,44	13,15
% 9 $MgCl_2$	110,04	21,00	125,15	20.74	158,23	13,47
% 11 $MgCl_2$	105,8	21,06	121,53	21,85	152,83	14,31
% 13 $MgCl_2$	102,29	20,98	116,76	22,4	149,59	13,77

Şekil 6.11. Deney sonucunda oluşan numunelerden bir görünüm.



Şekil 6.12. Kür Süresi-$MgCl_2$ oranının Kohezyon Değerine Etkisi



Şekil 6.13. Kür Süresi-$MgCl_2$ oranının İçsel Sürtünme Açısı Değerine Etkisi

Numunelerde ortaya çıkan fıçılaşmanın nedeni, uygulanan çevre basıncı numuneyi dengede tutmaya çalışırken, eksenel yükleme numuneyi kırmaya çalışır. Bu iki yük sonucunda numune deforme olur. Malzemedeki yükseklik azaldıkça fıçılaşma artar ve yan yüzeylerde çatlakların oluşmasına neden olur. Çatlak oluşmasına, fıçılaşan yüzeydeki şekil değiştirme sonucunda doğan çekme gerilmeleri neden olur.

Deney sonuçları incelendiğinde, ortaya çıkan kayma parametrelerine kür süresinin ve katkı malzemesi oranının etkisi açıkça gözükmektedir. Mukavemet değerindeki artış 1 ve 7 günlük kür sürelerinde çok fazla olmamakla beraber 28 günlük kür sonucunda artış daha yüksek seviyeye çıkmıştır. $MgCl_2$ solüsyonu oranı %7 seviyesine kadar arttırıldığında kohezyon (c) değerinde belirgin bir artış ve içsel sürtünme açısında (Ø) ise azalma ortaya çıkmıştır. %7 seviyesinden sonra ise oran arttıkça bu etki tersine dönmüştür. %9, %11 ve %13 seviyelerinde kohezyonda azalma, içsel sürtünme açısında artış görülmüştür. Kayma mukavemeti arttışında kohezyondaki artma daha etkindir. Bu değişim bütün kür seviyelerinde aynı etkiyi yaratmıştır. Ayrıca kür süresi de kayma parametrelerinde olumlu yönde etki yapmıştır.

Magnezyum klorür solüsyonu kullanılması zemin partikülleri ile su molekülleri arasındaki yüzey gerilimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Artan boşluk suyu yüzey gerilimi kohezyonlu zeminin dayanım kazancının artmasına neden olmuştur. Zemin stabilizasyonunu etkileyen bir çok farktör vardır. En önemli faktör ise zeminin ve kimyasal katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Bir kimyasal katkının zemin stabilizasyon etkisi zemin-kimyasal katkı karışımının kayma dayanımındaki artışı açısından ölçülür. Az miktarda tuz katkı maddesi uygulaması bazı zemin minerallerinin çözünürlüğüne etki edebilir, böylece kayma dayanımına neden olan konsolidasyon ve sementasyonu arttırır.

6.8 Mikroyapıyı Belirleme Yönelik Yapılan Deney Sonuçları

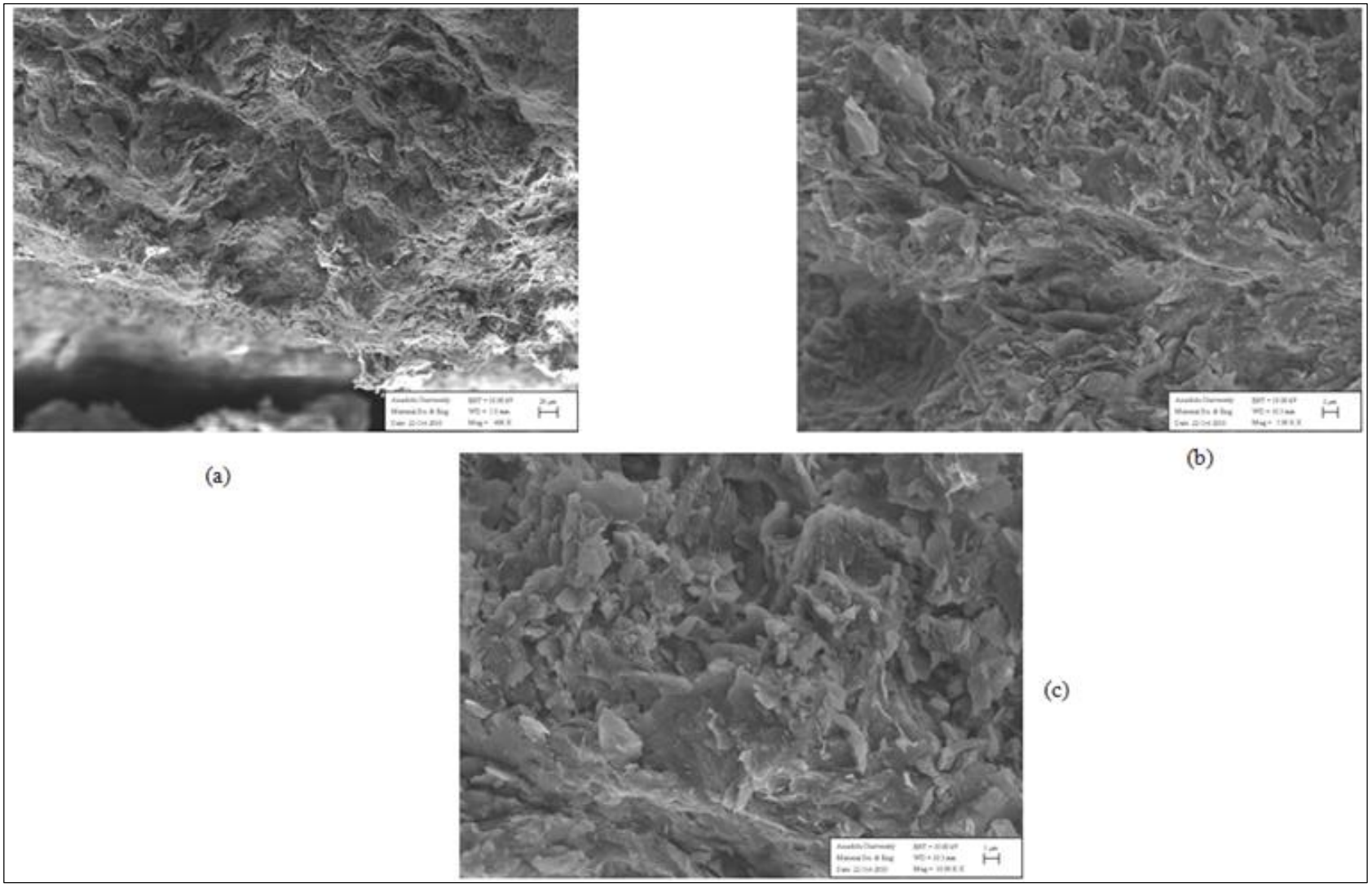
Bu tez kapsamında mikroyapının değişimini belirlemek amacıyla katkısız numune ve %7 magnezyum klorür solüsyonu katkılı numune üzerinde ESEM ve XRD deneyleri gerçekleştirilmiştir. %7 katkı seviyesinin seçilmesinin nedeni, yapılan

tanımlama ve sınıflama, şişme, dispersibilite ve dayanım deneylerinden elde edilen sonuçların, bu katkı seviyesinde optimum sonuçları vermesidir.

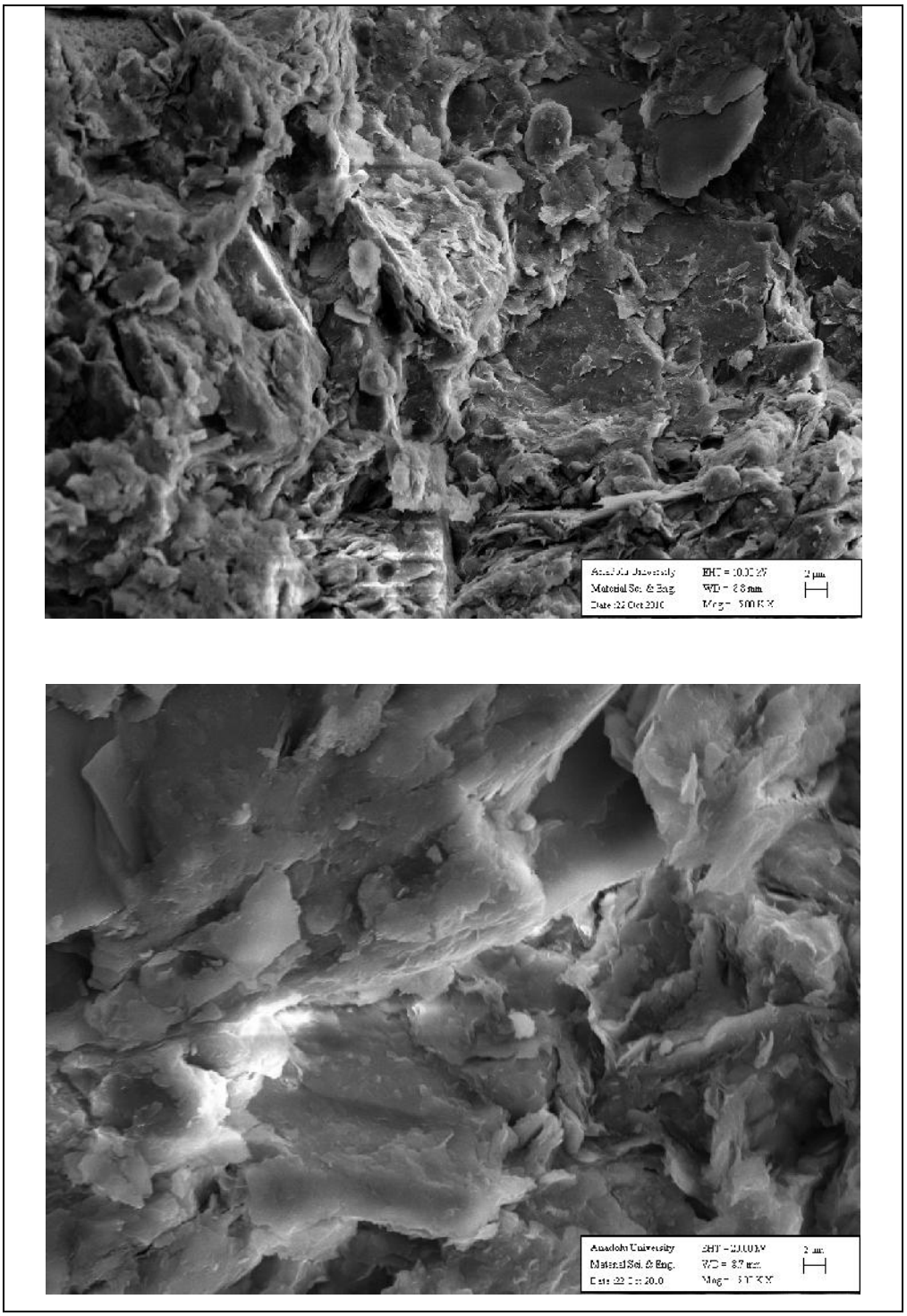
6.8.1 Taramalı elektron mikroskop analiz (SEM) sonuçları

Çalışmada kullanılan dispersif ve şişme özelliği gösteren problemli zemin numunesi farklı yüzdelerde eklenen magnezyum klorür solüsyonu ile iyileştirilmeye çalışılmış ve katkılarının şişme, dispersibilite ve dayanım üzerindeki etkileri ayrı ayrı mühendislik parametreleri esasında değerlendirilmiştir.

Analizlerden elde edilen görüntüler; katkısız ve %7 magnezyum klorür solüsyonu katkılı numuneler için sırasıyla Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de verilmektedir. Katkısız numunelere ait görüntülerde daha dağınık ve yoğun bir yapı gözükmektedir. %7 magnezyum klorür solüsyonu katkılı numunede daha kümeleşmiş ve boşluklu bir yapı gözükmektedir. Bu durum magnezyum klorür solüsyonu katkısı ile tuz konsantrasyonunun artması ile tanelerin hızla topaklanması dolayısıyla tane boyutunun artması ile açıklanabilir. İlave olarak katkı ilavesinin zeminin mikro yapısal özelliklerini değiştirdiği ve bundan dolayı da geoteknik özelliklerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Bunun en güzel örneği artan yapı bütünlüğü ve boyutuna bağlı olarak %7 magnezyum klorür solüsyonu katkı seviyesinde en yüksek dayanım değerleri elde edilmesidir.



Şekil 6.14. Katkısız numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları a) 600 kat, b) 5000 kat, c) 10000 kat



Şekil 6.15. %7 $MgCl_2$ solüsyonu katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dispersif ve şişme özelliklerine sahip zeminlerin kuru ağırlıklarının farklı oranlarında $MgCl_2$ solüsyonu ilave edilerek zeminin geoteknik özelliklerindeki değişimi incelenmiştir. Bu tez kapsamında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

i. Çalışmada kullanılan zemin hem şişme hem de dispersif özellik göstermektedir. Bu durum özellikle yüksek plastisiteye sahip dispersif zeminlerin aynı zamanda yüksek şişme potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir

ii. Hazırlanan malzemelere uygulanan $MgCl_2$ solüsyonu ilavesiyle tane boyutundaki değişim de incelenmiştir. Sonuçta artan katkı oranıyla numunelerdeki ince malzeme yüzdesinin aşamalı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da katkı malzemesinin tane boyutunu arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Boşluk suyunda tuz konsantrasyonun artması sonucunda, taneler hızla topaklanmakta ve dolayısıyla tane boyutu artmaktadır.

iii. Katkısız zemine $MgCl_2$ solüsyonu ilavesiyle likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Plastisite indisindeki azalma hem zeminin işlenebilirliğini arttırmakta hem de zemin sınıfını değiştirmektedir. Ayrıca zeminin kıvam karakteristikleri, dispersif mekanizmanın tanımlanmasında ayırt edici bir etki yaratmezken, zeminin şişme potansiyelinin belirlenmesinde etkili bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

iv. Yapılan özgül ağırlık deneyi sonucuna göre; katkısız zemine göre %3 katkı ilavesiyle G_s değerinde azalma meydana gelmiştir. Ancak artan katkı seviyelerinde bu değerde gözle görülür bir etki olmamıştır.

v. Kompaksiyon karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde; zemine %7 oranında $MgCl_2$ solüsyonu ilavesine kadar maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış, optimum su muhtevasında azalma meydana gelmiştir. %9, %11, %13 seviyelerindeki katkılarda ise maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalma, optimum su muhtevasında artış meydana gelmiştir. Artan tuz konsantrasyonuyla yüzey-yüzey flokülasyonun kenar-yüzey flokülasyonununa dönüştüğü düşünülmektedir. Bu sonuçlar neticesinde en etkin sonucun %7 katkı seviyesinde olduğu saptanmıştır.

vi. Katkısız kil ile hazırlanan numunelerde şişme yüzdesi %12,20 olarak hesaplanmıştır. $MgCl_2$ solüsyonu ile hazırlanan numunelerde ise katkı oranının artmasıyla şişme yüzdesinde belirgin derecede azalma ortaya çıkmıştır. %7 oranındaki katkı seviyesine kadar şişme yüzdesi değerinde önemli bir azalma olurken, artan katkı seviyesinde beklenen etki görülmemiştir. Sonuçta katkı maddesi şişme yüzdesi değerinde olumlu etki yaratmıştır.

vii. Şişme yüzdesine benzer sonuçlar şişme basıncında da ortaya çıkmıştır. Katkısız numunede ki değer 89,85 kPa olarak belirlenmişken, kademeli olarak arttırılan katkıyla beraber şişme basıncında belirgin iyileşme ortaya çıkmıştır. Özellikle %7 katkı seviyesinde 49,760 kPa elde edilen şişme basıncı değeri, katkısız numunye oranla %50'ye yakın bir iyileşme sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Artan katkı seviyesiyle beraber iyileşme devam etmekte ancak oran azalım göstermektedir.

viii. Şişme deneyleri sonucunda; $MgCl_2$ solüsyonunun zeminin şişme özelliklerini azaltıcı yönde etki yaptığı belirlenmiştir. Topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve bunun sonucunda absorbe edilen su miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla şişme potansiyeli azalmaktadır. Ayrıca, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyunda bulunan katyonlar arasında katyon değişimi meydana gelmektedir. Bu durum tabakalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olmaktadır

ix. Zeminin katkısız durumda yüksek oranda dispersif özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapılan iğne deliği ve dağılma deneyleri birbiriyle

uyumluluk gösteren sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Her iki deneyde de dispersif zemin, ara zemin ve dispersif olmayan zemin sınıflandırılmaları aynı katkı seviyelerinde aynı sonuçları vermiştir. Özellikle %7 katkı seviyesiyle beraber numunelerde oluşan dispersif özelliği iyileştirdiği iki deney sonucuyla desteklenmektedir. Zemindeki dispersif özelliğin ortadan kalkmasının nedeni; katkıdaki magnezyumun +2 değerlikte bir iyon olması ve zeminde adsorbe edilen sodyumla yer değişebilir özellikte olmasıdır.

x. Farklı katkı seviyelerinde ve farklı kür sürelerinde (1, 7 ve 28 günlük) yapılan üç eksenli deney sonuçları incelendiğinde; $MgCl_2$ solüsyonu katkısının %7 katkı seviyesine kadar malzemenin içsel sürtünme açısını azalttığı (Ø), kohezyon (c) değerini ise arttırdığı sonucuna varılmıştır. Özellikle %7 katkı seviyesinde oluşan dayanım parametrelerindeki etki diğer seviyelere oranla daha yüksektir. Dayanım parametrelerini etkileyen bir diğer etken ise kür süresidir. Esas alınan 1 ve 7 günlük kür sürelerinde dayanımda oluşan artış düşük iken, kür süresinin artmasıyla beraber dayanımda gözle görülür bir artış ortaya çıkmıştır.

xi. SEM analizleri sonucunda; katkısız kil ile hazırlanan numuneye ait görüntülerde boşluksuz bir doku net olarak görülmektedir. Magnezyum klorür solüsyonu katkısı zeminde boşluklu bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Bu durum katkı ilavesi ile kilin topaklanması ile tane boyutunun artması ile açıklanmıştır. Oluşan mikro yapı değişikliği ile zeminin geoteknik özelliklerinde değişimler gözlemlenmiştir.

Tüm bu yapılan deneyler sonucunda, çalışılmış olan $MgCl_2$ solüsyonu zeminin geoteknik parametreleri üzerinde pozitif yönde etkilerde bulunduğu tespit edilmiştir. Özellikle dispersibilite ve şişme özelliklerini başarı ile iyileştirilebileceği görülmüştür. Çalışmanın ana amacı olarak görülen problemli kil zeminlerdeki şişme ve dispersibilite gibi olumsuzlukların ortadan kaldırılabileceği ve zemine dayanım kazandırılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gelişmiş ülkelerin yaklaşık 20 yıl önce terk ettikleri demode ve verimsiz uygulamaların getirdiği, beklenen performansların sağlanamaması ve boşa yapılan harcamaların önüne geçmişlerdir. Gelişen dünyamızda özellikle kış aylarında kar ve buzlanmayla mücadelede ve zemin stabilizasyonu konusunda, araçlara, betona, asfalta, zemin yapısına hiçbir zararı olmayan, bitkiler ve canlılar açısından hiçbir tehlikeli unsur içermeyen kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Bugüne kadar ülkemize ithalat yoluyla ve çok yüksek maliyetle sağlanan magnezyum klorür ülkemizde yapılan çalışmalar sonucunda doğal yöntemlerle solüsyon halde üretilmeye başlanmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, zemin tipinin değiştirilmesi, kullanılan magnezyum klorür solüsyonu miktarının arttırılması, numunelere uygulanacak kür sürelerinin arttırılması ve kazandıracağı ekonomik kazanç ile ilgili çeşitli araştırmalar yapmak mümkündür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Addo, J.Q., T.G. Sanders, and M. Chenard. 2004. Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety, and the Environment Phases 1–3. www.ndsu.nodak.edu/ndsu/ugpti/MPC_Pubs/html/MPC04-156/index.html (accessed 5/1/2005).

ASTM D 4647-93, "Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer" American Society for Testing and Materials, V.04.08.

ASTM D 4221-90, "Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test", American Society for Testing and Materials,V.04.08.

Atkinson, J.H., Charles, J.A. and Mhach, H.K., 1990, Examination of erosion resistance of clays in embankment dams, Quarterly Journal of Engineering Geology, V.23, p.103-108.

Aydın M. C., Aydın S., 2006. Dispersif killerin dolgu baraj yapımı açısından önemi, Kibited 1(1) (2006) 49–54.

Bell, F. G. and Walker, D.J., 2000, A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.33, p.187-1999.

Caggiano, M. F. and Bentley, M. (1998), Route 130 Bridge Snowfree installation electrical analysis and recommendations- final report, FHWA 1998 – 008, pp. 11.

Chen, F. H. (1981). Foundations on Expansive Soils. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

Chen, F.H. “Foundation on Expansive Soils”, American Elsevier Science Publication, New York, 1988.

Coduto, P., 2006, (Çev. Mollamahmutoğlu, M.,) Geotaknik mühendisliği ilkeler ve uygulamalar, s: 39-80, s: 600-680.

Cömert A.T., Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi,1-43 S., Sakarya, 2005.

Culloty, S.C. & Mukahy, M.F. 1992. An evaluation of anaesthetics for Ostrea edulis (L.). Aquaculture. 107: 249-252.

ÇOKÇA, E., ve TOKTAŞ, F., 2002, Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu: Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Sh:659 – 668, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Dakshanamurty, V., 1978. A new method to predict swelling using a hyperbolic equation, Geotechnical Engineering, 9 (1), 29-38.

Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (2006), Hava alanları kar mücadele yönergesi, Yönerge no:11, 18 s.

D.A. Jones, and K.A. Jones, “Treating Expansive Soils", Civil Engineering, V.57, N.8, ASCE, 1987.

E.R. Tuncer, ” Toprak Dolgu Barajlarda İçsel Erozyon” Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri, DSİ Genel Müdürlüğü, 1995, Adana, ss.27-15.

Environment Canada’s Road Salts Web Site Reports, “Success In Road Salts Management”, (www.ec.gc.ca/nopp/roadsalt/success/en/index.cfm).

Federal Highway Administration Office of Highway Information Management 1996.

Fell, R., Macgregor, P. and Stapledon, D., 1992, Geotechnical engineering of embankment dams, Balkema, Rotterdam, 675p.

Fişne A. ve Gündüz Ökten, 2002. Açık işletme taşıma yollarında nakliyet kaynaklı toz oluşumu ve toz bastırma yöntemleri.

Food Standard Agency. "Current EU approved additives and their E Numbers". http://www.food.gov.uk/safereating/chemsafe/additivesbranch/enumberlist. Retrieved 22 March 2010.

Forbes, P.J., Chase, A.S. ve Birrell, J. (1980) Control of dispersion in the Mnjoli Dam, Water Power Dam Construction, 32(12), 23- 28.

Frydman, I. R. & Ehrenreich, T. (1977). Stabilization of heavy clay with potassium chloride. Journal of Geotechnical Engineering, 8, 95-107.

Genç, S., Mineraller-Kayaçlar, Jeolojik Yapılar ve Saha Jeoılojisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi basın evi, 221, Trabzon.

Göksan TS. Killi zeminlerde emme kapasitesi ve şişme basıncı ilişkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.

Grim, R. E., 1959. Physiochemical Properties of Soils, Clay Minerals, J.Aoil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 85,no.SM2 Suppressants: Avoiding Another Times Beach: An Expert Panel Summary, Las Vegas, NV, May 30–31, 2002. 79 pp.

Hill, Petrucci, McCreary, Perry, "General Chemistry", 4th ed., Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Holleman, A. F.; Wiberg, E. "Inorganic Chemistry" Academic Press: San Diego, 2001. ISBN 0-12-352651-5.

Jonathan Q. Addo, PE Thomas G. Sanders, Ph.D., PE Melanie Chenard, E.I.T., Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety and the Environment Phases 1-3, May 2004.

Jonathan Q. Addo, Sanders, T. G., Chenard, M. (2004). Road dust suppression : Effect on unpaved Road Stabilization.

Keren, R. and I. Shainberg. 1975. Water vapor isotherms and heat of immersion of Na-Ca montmorillonite systems, I. Homoionic clay, Clays and Clay Minerals, 23, 193-200.

Keskin, S.N., Yıldırım, H., Ansal, M.A., 1992. Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, 14-30.

Knodel, P.C., 1991, Characteristics and problems of dispersive clay soils, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Materials engineering Branch, Denver, USA, R91-09, p.17.

Komine, H., Ogata, N., 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 31, 478-490.

Komine, H., Ogata, N., 1996. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33, 11-22.

Kuloğlu N. ve Kök B. V. (2005), Karayollarında kar ve buz mücadelesinde kullanılantuzun beton asfalt kaplamaya etkisi, F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (1), s. 87 – 96.

Landau, H.G. ve Altschaeffl, A.G. (1977) Conditions Causing Piping in Compacted Clay, Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projets, ASTM, STP 623, 240-259.

Lee, H., Cody, R. D., Cody, A. M. and Spry P.G., (2000), Effects of various deicing chemicals on pavement concrete deterioration, Mıd-Contınent Transportatıon Symposıum Proceedıngs, pp. 151-155.

Leggett, T.S; "Temperature And Humidity Effects On The Co-efficient Of Friction Value After Application Of Liquid Anti-icing Chemicals", Final Report, Forensic Dynamics Inc., Kamloops, 1999.

Lewis, D.A. and Schmit, N.O., 1977, Erosion of unsaturated clay in pinhole test, ASTM STP 623, p.260-273.

Logani, K.L. (1979) Dispersive Soil Chosen for Ullum Core, World Water, 2(8), 21-32.

Low, P.F., 1992. Interparticle forces in clay suspensions: flocculation, viscous flow and swelling, Proceedings of the 1989 Clay Minerals Society Workshop on the Rheology of Clay/Water Systems.

McBride, M.B. 1989. Surface chemistry of soil minerals, Minerals in soil environments, 2nd ed, Soil Sci. Soc. Am. Book Ser, No. 1, Madison, WI. 35- 88.

Mc Kenzie, D. C., 1998, Soilpak-cotton growers, NSW Department of Primary Industries, State of New South Wales, V. E3-E4, Australia.

Mesri, G., and Olson, R.E., 1971. Mechanisms controlling the permeability of clays, Clays and Clay Minerals, 19, 151 - 158.

Mitchell, J.K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York, USA.

$MgCl_2$ brochblue, İdoha Transportation Department.

Mowafy, Y.M., Bauer, G.E., 1985. Prediction of swelling pressure and factors affecting the swell behavior of an expansive soil, Transportation Research Record, 1032, 23-28.

Nelson, J.D and Debora, 1992, Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering, J. Willey and Sons, New york, p259.

Olgun M., Farklı Konsantrasyonlardaki Kimyasallarla Konsolide Edilmiş Kil Zeminlerin Kayma Mukavemeti ve Konsolidasyon Davranışlarının İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı doktora tezi, 2008.

O'Neil M. W. and Poormoayed, N., 1980» Methodology for foundations on expansive, clays., Journal of Geotechnical Engineering, Division,, American Society of Civil Engineers» Vol. 106,,, No. GT12, p. 1345-1367.

Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R., 2006, Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum, Engineering Geology, V.85, p.91-101.

Önalp A, İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi; cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon, 1983.

Özaydın, K., 1989, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Önalp, A., 2007, “Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği”, İstanbul.

P.C. Knodel, “Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils”, Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, R-91-09,17p. 1991.

Piechota, T., J. van Ea, J. Batista, K. Stave, and D. James (Eds.). 2004. United States Environmental Protection Agency. EPA 600/R-04/031. Potential Environmental Impacts of Dust.

R. D.; Bales, S. E.; Hudnall, P. M.; Burns, T. P.; Poindexter, G S. "Highly Reactive Magnesium for the Preparation of Grignard Reagents: 1-Norbornane Acid" Organic Syntheses, Collected Volume 6, p.845 (1988)

Reyier, J.W., A Comparison Between Calcium Chloride and Magnesium Chloride as Dust-Binding Agents on Gravel Roads. Royal Institute of Technology. Tack 70 S-10044, Stockholm, Sweden, 1972.

Resendiz, D., 1977, Relevance of Atterberg Limits in evaluating piping and breaching potential, ASTM STP 623, p.341-353.

Ryker, N.L., 1977, Encountering dispersive clays on soil conservation service projects in Oklohoma, ASTM STP 625, p.370-389.

Savaş, H., 2008. Dolgu Barajlar İçin Dispersif Killerin Tanımlanmasında Kullanılan İğne Deliği Deneyindeki Gelişmeler ve Karşılaştırmalı Analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalında Doktora Tezi.

Savaş H. , Tosun H., 2009. Dispersif Killerinin Tanımlanması için Kullanılan İğne Deliği Deneyinin Geliştirilmesi ve Karşılaştırılmalı Analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2, 2009.

Sharma, H.D. ve Lewis, S.P, "Waste Containment systems, Waste Stabilization, ve Landfills: Design and evaluation",

Sherard, J.L., Decker, R.S. and Ryker, N.L., 1972, Piping in earth dams of dispersive clay, Proceeding Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, V.1, p.589-626.

Shuai, F. 1996. Simulation of swelling pressure. measurements on expansive soils, Ph.D. Disertation, University of Saskatchewan, Canada.

Sivakugan, N., 2001. Clay Minaralogy, http://www.geoengineer.org/files/Clay Mineralogy-Sivakugan.ppt.

Sposito, G., Prost, R., 1982. Structure of water adsorbed on smectites, Chem. Rev. 82, 553–573.

Sridharan, A., Rao, A. S., Sivapullaiah, P. V., 1986. Swelling pressure of clays, Geotechnical Testing Journal, 9 (1), 24-33.

Sridharan, A., Choudhury, D., 2002. Swelling pressure of sodium montmorillonites, Geotechnique, 52 (6), 459-462.

Sridharan. A., Rao,, A., S. and SivapuUaiah, P.. V..,, 1986,, Swelling pressure- of clays., Geotechnical Testing Journal, American. Society for Testing and. Materials, Vol. 9» No. I, p.. 24-33.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976a, Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol:102, n.GT2, p.287-301.

Stapledon, D.H. and Casinader, R.J., 1972, Dispersive soils at Sugarloaf Dam Site, near Melbourne, Australia, ASTM STP 623, p.432-466.

Tamadher T. Abood, Anuar Bın Kasa, Zamrı Bın Chık, 2007. Stabilization of sılty clay soil using chloride compounds, Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2, No. 1 (2007) 102-110.

T.W. Lambe, “Soil Stabilization” Chapter Four of Foundation Engineering, G.A. Leonards (ed), McGraw-Hill, New York, 1962.

Tosun H., “Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi”, DSİ Teknik Bülteni, 1994, sayı:80, ss.51-60.

Tosun, H., 1995, Importance of dispersive soils for earthfill dams an a research on control tests adopted in Turkey, Symposium on Research and Development in the Field of Dams, Crass-Montana- Switzerland, p.133-144

Tosun, H., 1997, Comparative study on physical tests of dispersibility of soils used for earthfill dams in Turkey, ASTM Geotechnical Testing Journal, GTSODS, Vol.20, 2, p.242-251.

Tosun H. ve Kırmızıtaş H., "Harran Killerinin Şişme Potansiyeli ve Bölgede İnşa Edilecek Su Yapıları İçin Önemi", Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, 20-25 Eylül 1993, Gümüldür, Bildiri kitabı, s:313-327.

Tosun H., Savaş H. Düşük plastisiteli zeminlerde dispersibilite özeliğinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi, Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIV, S.2, 2001.

Tosun H., Zorluer İ., Tozluk H., Savaş H., “Toprak Dolgu Barajlarda Dispersif Killerin Kullanımı ve Tasarım ve Kontrol Kriterlerinin Araştırılması” TÜBİTAK Projesi, P. No: İNTAG-719, 2001.

Tosun H., “Dolgu Barajlar Yönünden Dispersif Killer ve DSİ Çalışmaları” 5. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, 20-21 Ekim 1994, Ankara, ss. 98-110.

Tosun H., 1994a, Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi: DSİ Teknik bülteni, sayı:80, 51-60.

Tosun H., Savaş H. ve Bitkova, N., 2002, Dispersif ve ara zemin örneklerinde sıkıştırma enerjisinin zeminin borulanma davranışı üzerine etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, s.34-44.

TS 1900, "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri" , TSE, Mart 2006.

Tumluer, G 2006. Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, 89.

USBR 5400-89, " Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method", Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 414-418.

USBR 5405-89, "Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Double Hydrometer Test Method", Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 419-424.

USBR 5410-89, "Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method", Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 425-437.

Uzuner, B.A., 2000, Temel Mühendisliğine Giriş, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Venkatabor Rad, G. (1977). Physico-chemical mechanism governing the plasticity behaviours of soils. Journal of İndian Geotechnical. 7, 261-262.

Van Olphen, H., 1977. An Introduction to Clay Colloid Chemistry, 2nd ed., Wiley Interscience, New York.

Veterinary Medical Research Institute, Iowa State University.

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

Wells, A. F. (1984) Structural Inorganic Chemistry, Oxford: Clarendon Press. ISBN 0-19-855370-6.

Woods, K.B. Highway Engineering Handbook, First Edition McGraw-Hill. 1960.

Wooltoton, F.L.D., 1954. The scientific basis of road design. Edward Arnold Publishers Ltd. London.

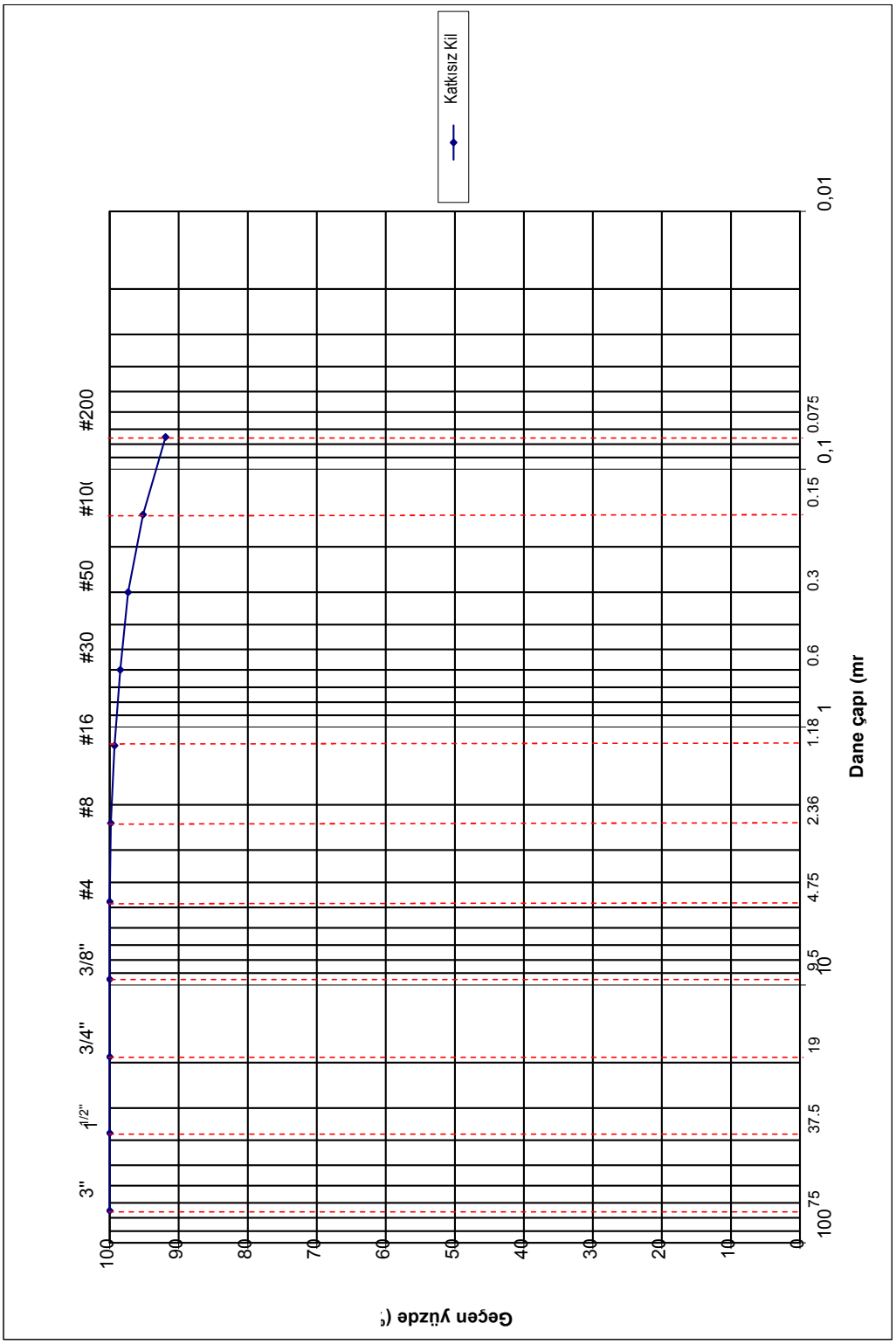
Yong and Warkentin, B.P., 1996, Introduction to soil behavior, Chapter 7, Macmillan, New York, p.151-175.

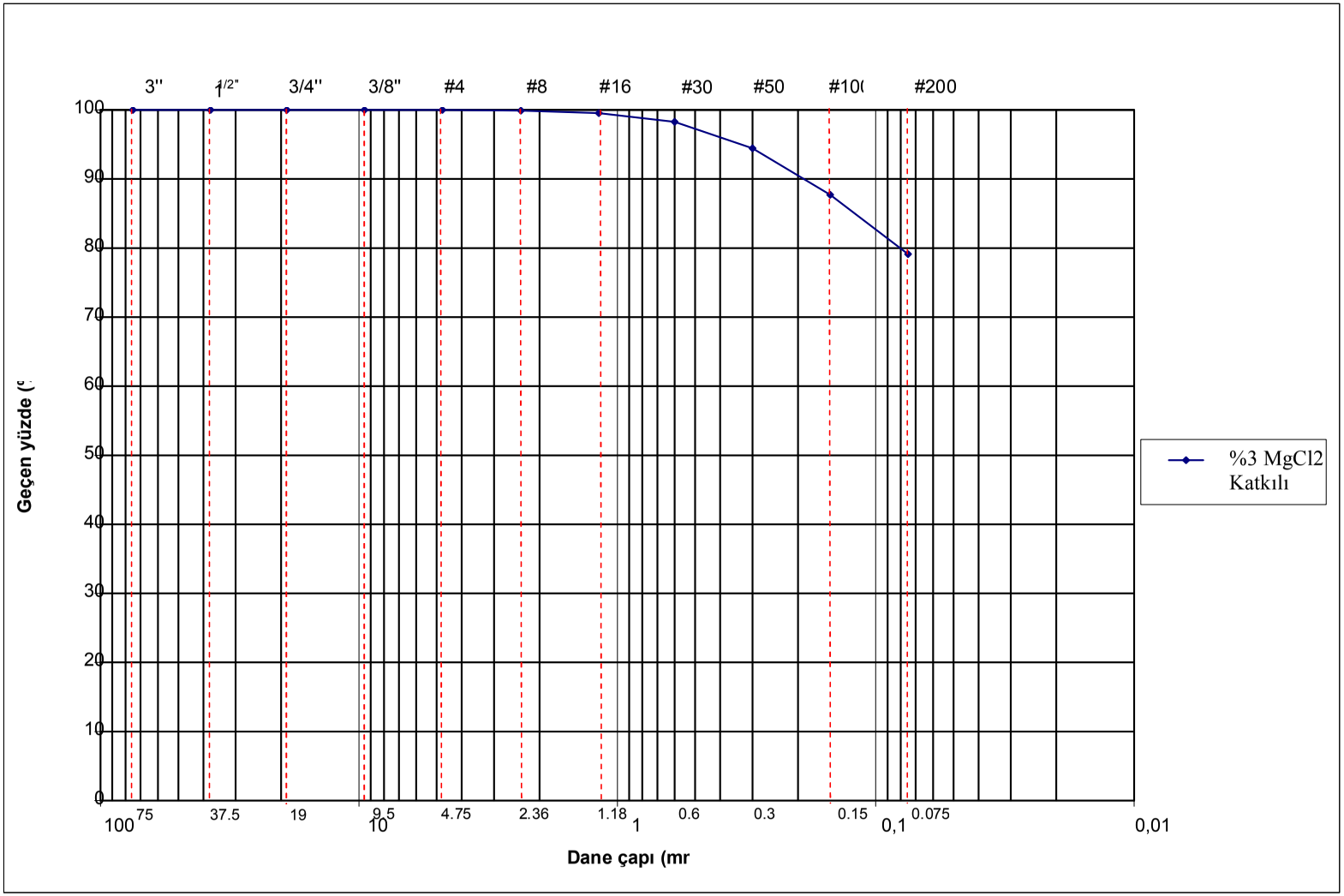
Yüksel, B., 2007. Konsolidasyon Süresince Kil Yapısındaki Değişimin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü İstanbul.

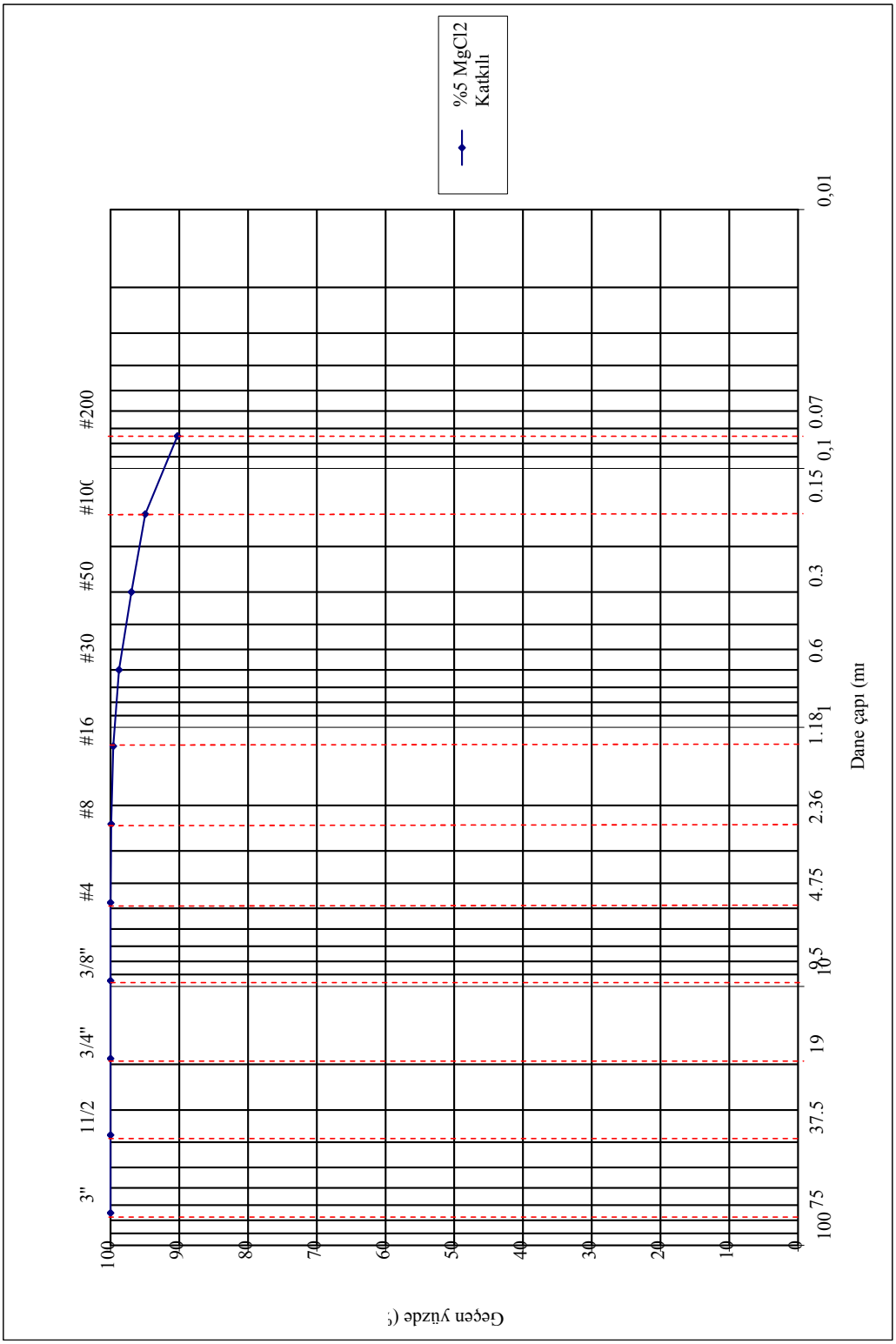
Ek 1:

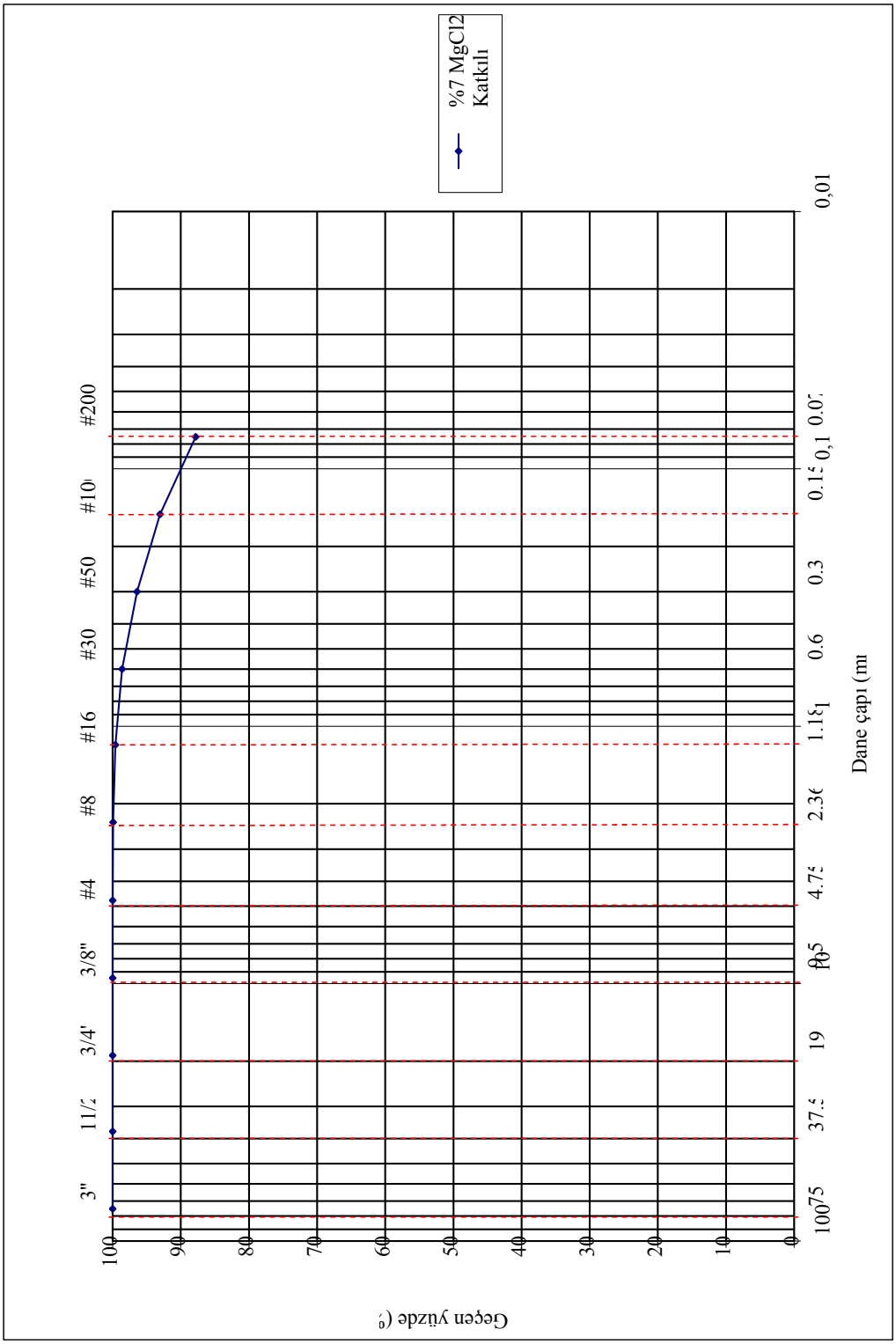
ÖRNEKLERİN TANIMLAMA DENEY SONUÇLARI

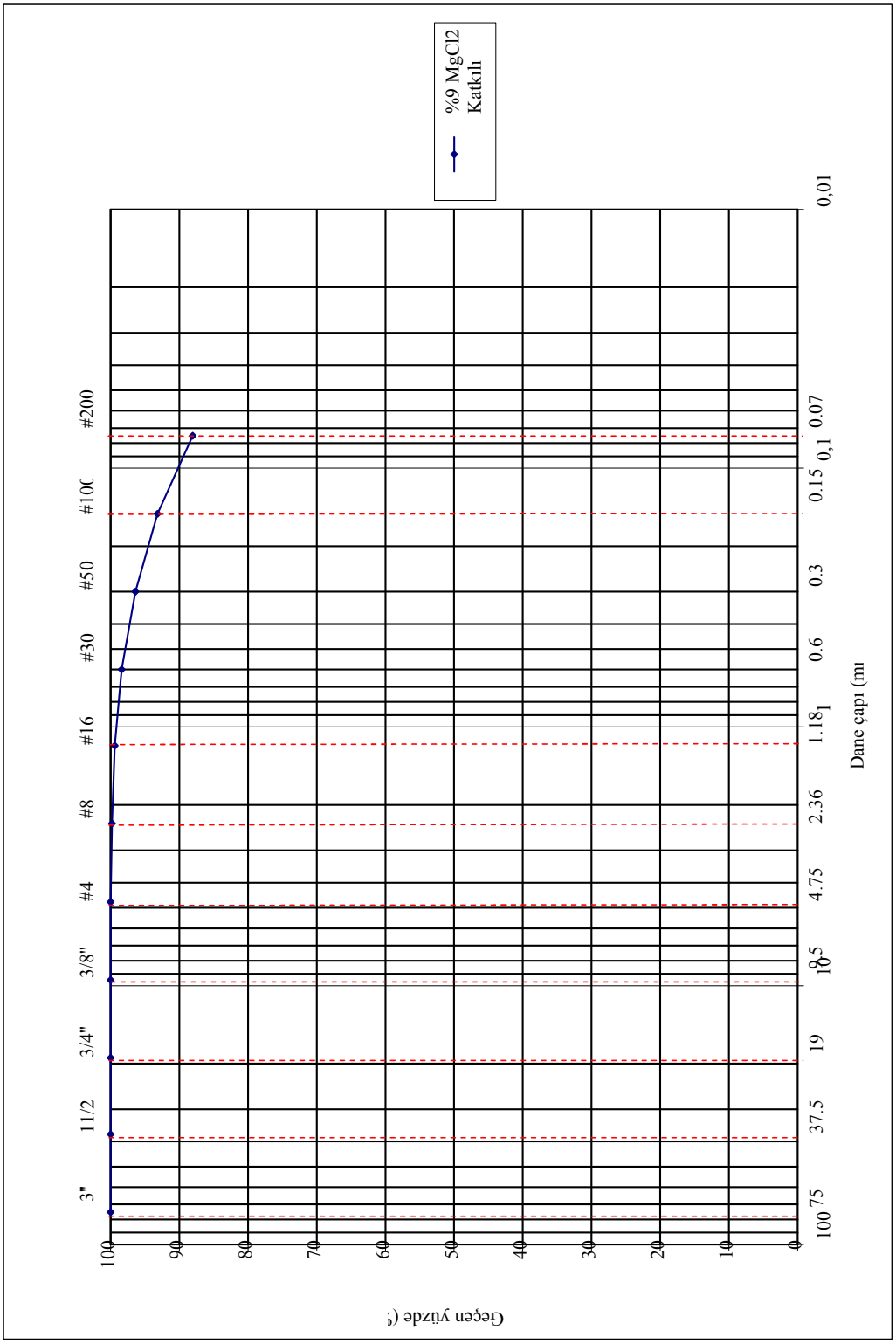
EK 1.1 Elek Analizi Deney Sonuçları

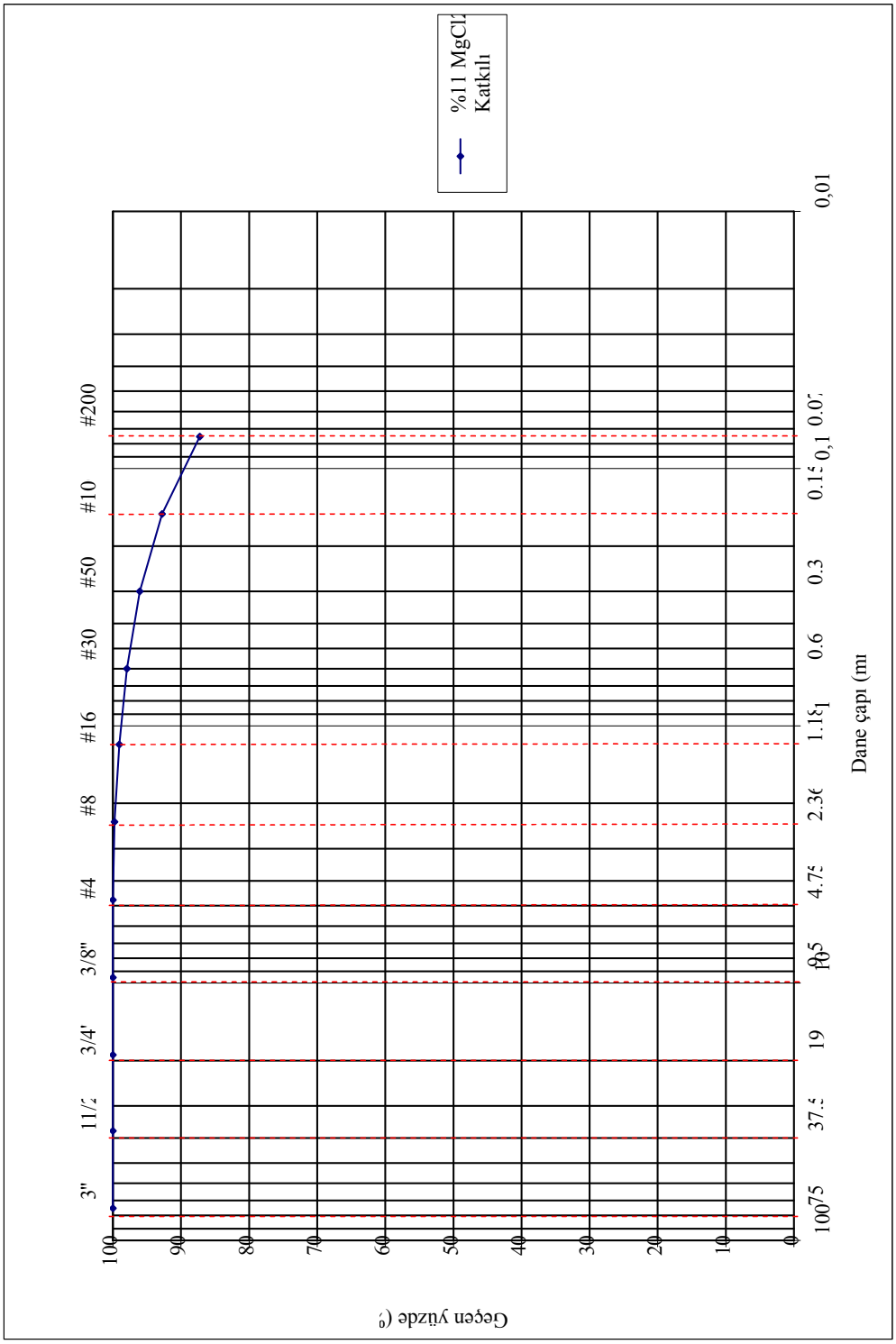


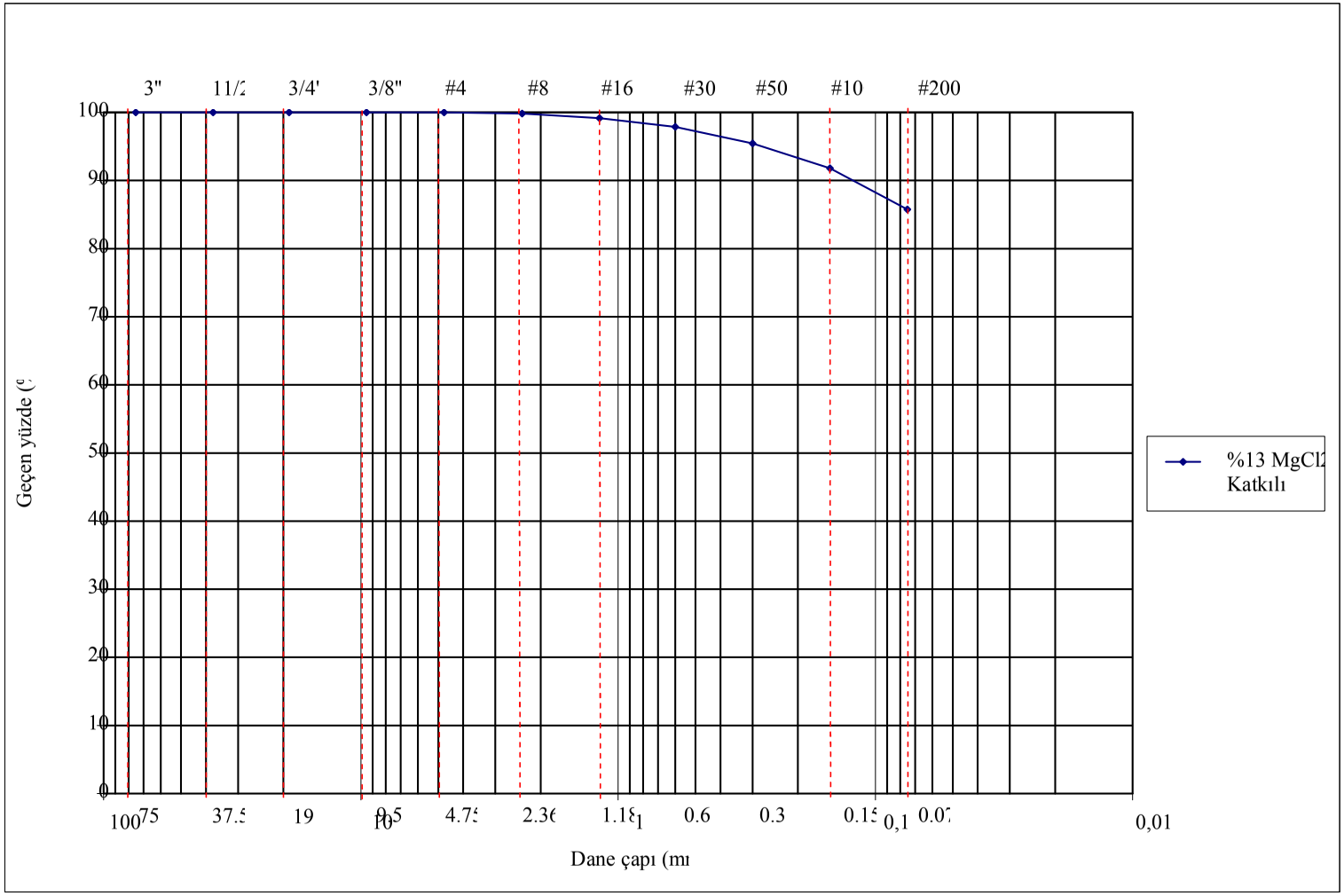

3''
1 1/2"
3/4''
3/8''
#4
#8
#16
#30
#50
#100
#200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Geçen yüzde (%
100
75
37.5
19
10
9.5
4.75
2.36
1.18
1
0.6
0.3
0.15
0,1
0.075
0,01
Dane çapı (mr
%3 MgCl2 Katkılı


%5 MgCl2 Katkılı
Geçen yüzde (%
Dane çapı (mm
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
3"
11/2
3/4"
3/8"
#4
#8
#16
#30
#50
#100
#200
100
75
37.5
19
10
9.5
4.75
2.36
1.18
0.6
0.3
0.15
0.07
0,1
0,01


%7 MgCl2 Katkılı
Geçen yüzde (%
Dane çapı (mm
3"
3/4"
3/8"
#4
#8
#16
#30
#50
#200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,01


%9 MgCl2 Katkılı
Geçen yüzde (%
Dane çapı (mm
3"
11/2
3/4"
3/8"
#4
#8
#16
#30
#50
#100
#200
100
75
37.5
19
9.5
4.75
2.36
1.18
0.6
0.3
0.15
0.1
0.07
0.01
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

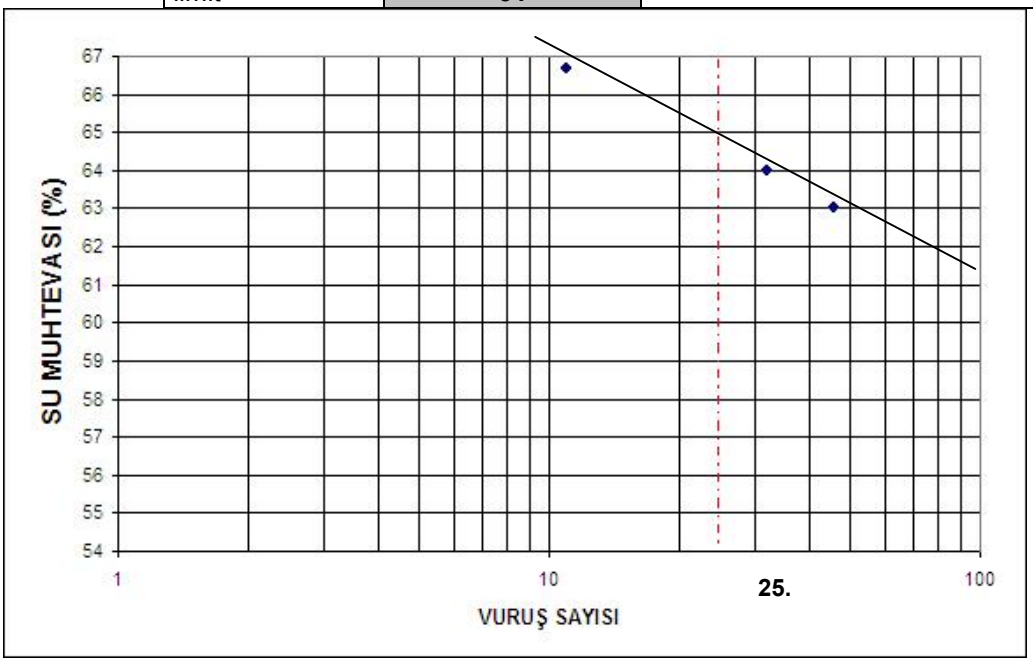

Geçen yüzde (%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
3"
11/2
3/4'
3/8"
#4
#8
#16
#30
#50
#10
#200
100
75
37.5
19
9.5
4.75
2.36
1.18
0.6
0.3
0.15
0.1
0.07
0,01
Dane çapı (mı
%11 MgCl2
Katkılı


3"
11/2
3/4'
3/8"
#4
#8
#16
#30
#50
#10
#200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Geçen yüzde (%
100
75
37.5
19
10
9.5
4.75
2.36
1.18
1
0.6
0.3
0.15
0,1
0.07
0,01
Dane çapı (mı
%13 MgCl2
Katkılı

EK 1.2 Örneklerin Limit Deney Sonuçları

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
Proje: **%3 MGCL$_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1**.50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

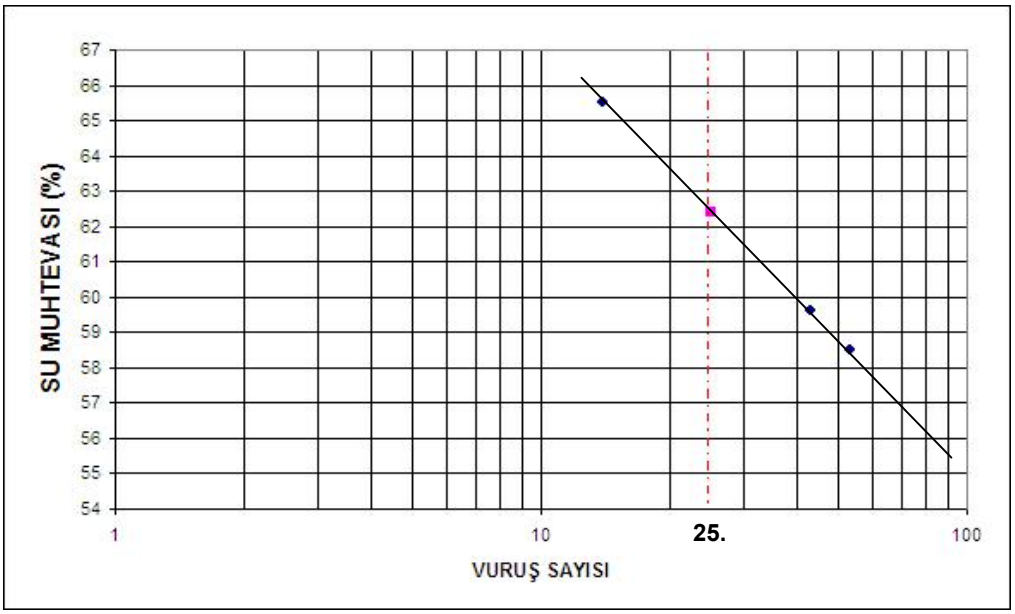
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	20	11	14	16	17	
Vuruş sayısı			**46**	**32**	**11**	
Kap+yaş zemin (g)	12,87	12,1	25,87	24,04	31,77	
Kap+kuru zemin (g)	12,14	11,4	21,62	20,12	24,60	
Kap ağırlığı (g)	9,87	9,3	14,33	13,78	13,85	
Su kütlesi (g)	0,73	0,68	4,25	3,92	7,17	
Kuru zemin kütlesi (g)	2,27	2,09	7,29	6,34	10,75	
Su muhtevası (%)	31,00	31,54	**63**	**64**	**67**	
Ortalama plastik limit	**31**					



Likit Limit (LL)	**64,60**	Plastik Limit (PL)	**31**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**33,60**

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
Proje: **%5 MGCL$_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1**.50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

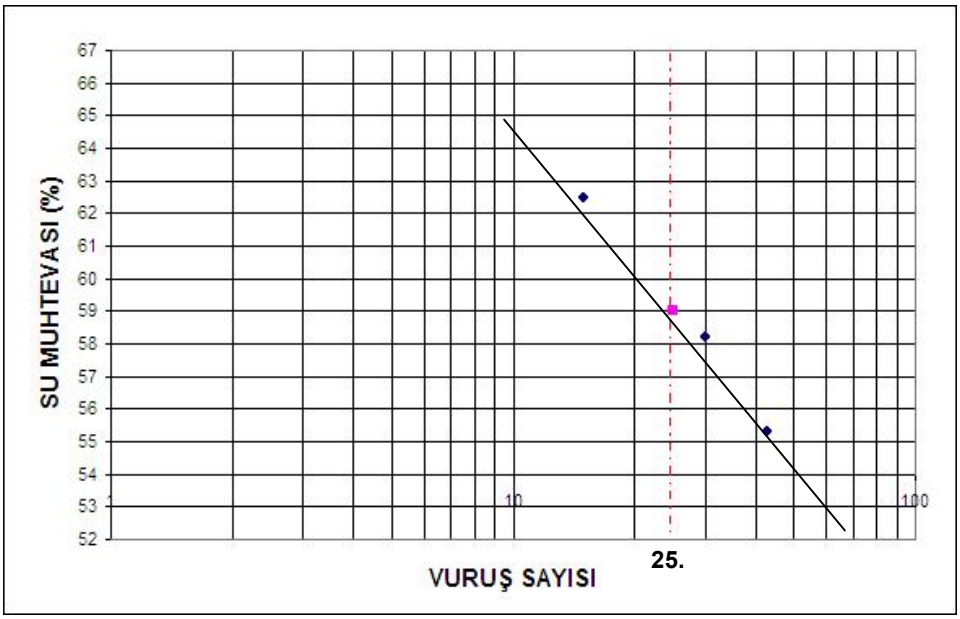
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	14	13	24	15	17	
Vuruş sayısı			**53**	**43**	**25**	**14**
Kap+yaş zemin (g)	8,70	8,5	22,35	22,14	25,12	26,65
Kap+kuru zemin (g)	8,11	8,0	19,47	19,19	21,10	21,78
Kap ağırlığı (g)	6,45	6,5	14,43	14,11	14,43	14,12
Su kütlesi (g)	0,59	0,50	2,88	2,95	4,02	4,87
Kuru zemin kütlesi (g)	1,66	1,42	5,04	5,08	6,67	7,66
Su muhtevası (%)	35,54	35,21	**58,50**	**59,60**	**62,40**	**65,50**
Ortalama plastik limit	**35**					



Likit Limit (LL)	**62,40**	Plastik Limit (PL)	**29,50**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**32,90**

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
"Proje: **%7 $MGCL_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1**.50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

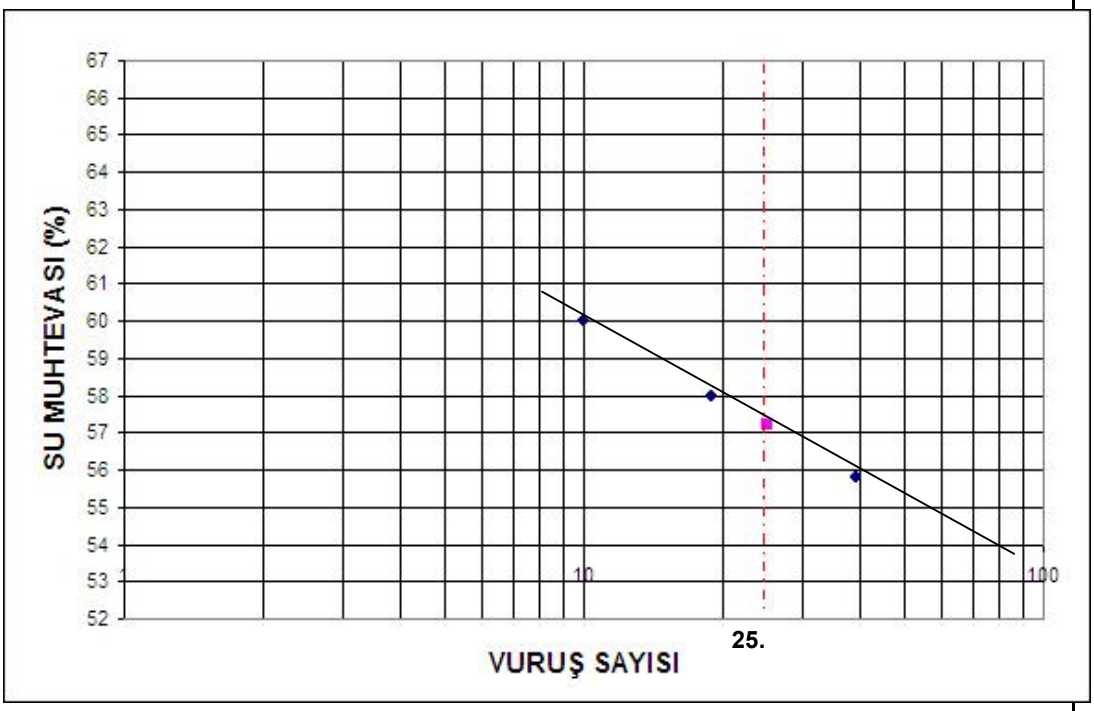
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	2	8	23	27	28	
Vuruş sayısı			**43**	**30**	**15**	
Kap+yaş zemin (g)	11,60	11,8	25,42	25,48	25,24	
Kap+kuru zemin (g)	11,09	11,3	21,57	21,43	21,22	
Kap ağırlığı (g)	9,43	9,5	14,37	14,11	14,45	
Su kütlesi (g)	0,51	0,57	3,85	4,05	4,02	
Kuru zemin kütlesi (g)	1,66	1,77	7,20	7,32	6,77	
Su muhtevası (%)	30,72	32,20	**55,30**	**58,20**	**62,50**	
Ortalama plastik limit	**31**					



Likit Limit (LL)	**59**	Plastik Limit (PL)	**31**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**28**

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
Proje: **%9 MGCL$_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1.**50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

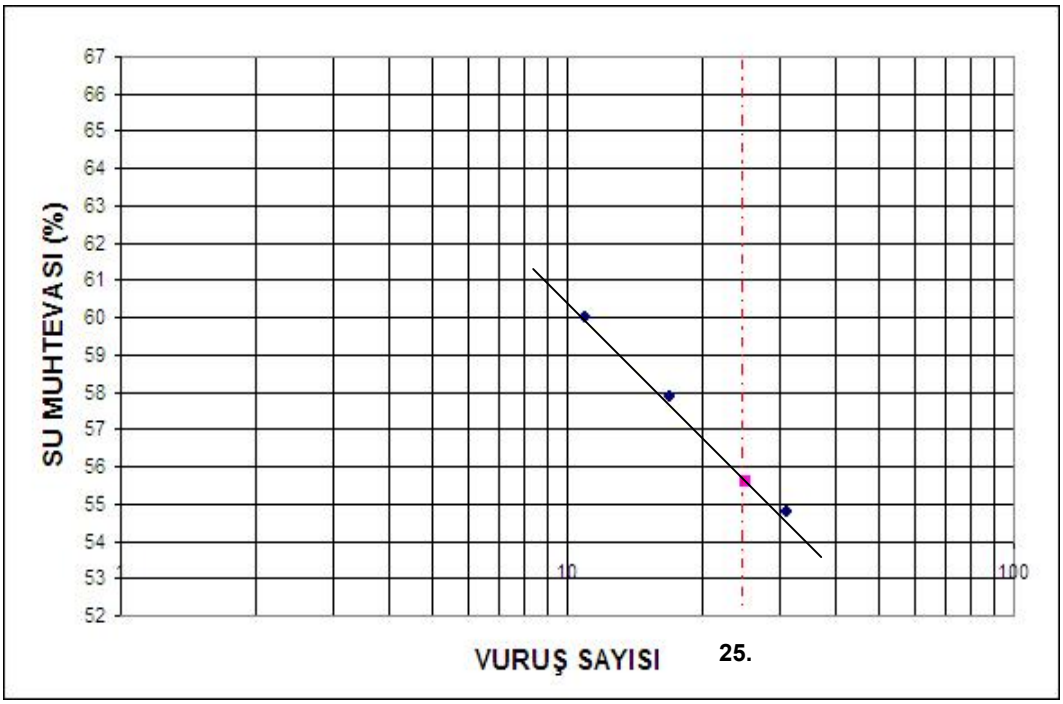
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	26	19	6	5	19	
Vuruş sayısı			**39**	**19**	**10**	
Kap+yaş zemin (g)	11,62	12,4	26,73	24,80	28,06	
Kap+kuru zemin (g)	11,06	11,7	22,18	20,98	22,84	
Kap ağırlığı (g)	9,30	9,5	14,11	14,69	14,54	
Su kütlesi (g)	0,56	0,68	4,55	3,82	5,22	
Kuru zemin kütlesi (g)	1,76	2,18	8,07	6,29	8,30	
Su muhtevası (%)	31,82	31,19	**55,80**	**58,00**	**60,00**	
Ortalama plastik limit	**32**					



Likit Limit (LL)	**57**	Plastik Limit (PL)	**32**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**26**

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
Proje: **%11 MGCL$_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1**.50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

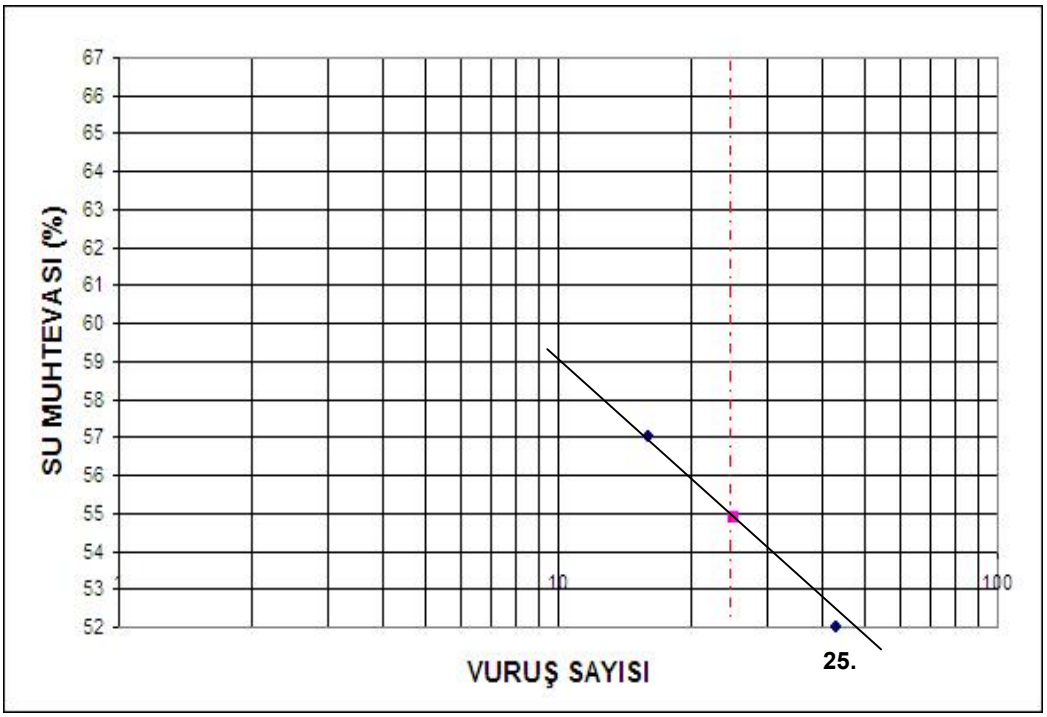
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	3	5	21	9	20	
Vuruş sayısı			**31**	**17**	**11**	
Kap+yaş zemin (g)	9,99	9,2	24,78	26,84	31,25	
Kap+kuru zemin (g)	9,15	8,5	20,91	22,28	24,83	
Kap ağırlığı (g)	6,55	6,4	13,93	14,45	14,33	
Su kütlesi (g)	0,84	0,68	3,87	4,56	6,42	
Kuru zemin kütlesi (g)	2,60	2,08	6,98	7,83	10,50	
Su muhtevası (%)	32,31	32,69	**54,80**	**57,90**	**60,00**	
Ortalama plastik limit	**33**					



Likit Limit (LL)	**55,60**	Plastik Limit (PL)	**33**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**23**

OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ	**KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ**	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI
Proje: **%13 MGCL$_2$_KIVAM**		Detay:
Numune no:	Sondaj/Kuyu no:	Derinlik(m): 1**.50-2.00**
Havada kurutulan Etüvde kurutulan Doğal	Deneyi yapan: Hesaplayan: Kontrol:	Tarih: Tarih: Tarih:

	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	11	8	22	10	55	
Vuruş sayısı			**43**	**25**	**16**	
Kap+yaş zemin (g)	11,92	12,4	25,07	24,23	26,20	
Kap+kuru zemin (g)	11,26	11,7	21,26	20,69	21,48	
Kap ağırlığı (g)	9,31	9,3	14,53	14,67	13,80	
Su kütlesi (g)	0,66	0,77	3,81	3,54	4,72	
Kuru zemin kütlesi (g)	1,95	2,35	6,73	6,02	7,68	
Su muhtevası (%)	33,85	32,77	**52,00**	**54,90**	**57,00**	
Ortalama plastik limit	**33**					



Likit Limit (LL)	**54,90**	Plastik Limit (PL)	**33**	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	**22**

Ek.2:

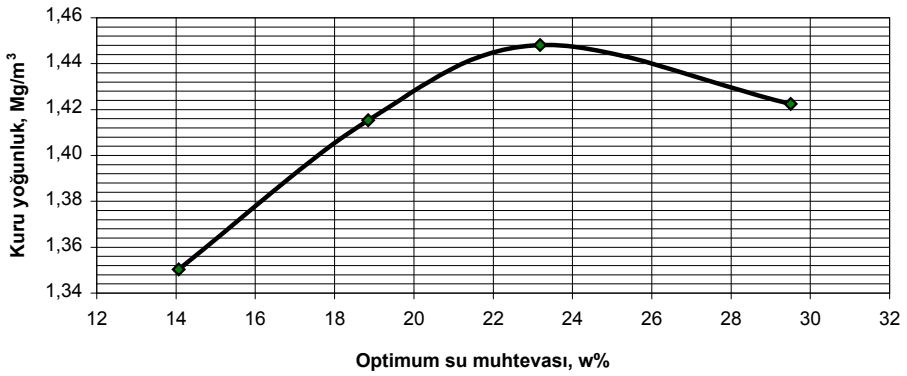
ÖRNEKLERİN KOMPAKSİYON DENEY SONUÇLARI

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **Katkısız**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	5820	5954	6050	6105		
Mold	(g)	4366	4366	4366	4366		
Islak numune	(g)	1454	1588	1684	1739		
Islak yoğunluk	(g)	1,540	1,68	1,78	1,84		
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	231,22		287,83		222,34	
Kap + kuru numune	(g)	203,85		243,75		182,30	
Kap	(g)	9,32		9,91		9,59	
Su	(g)	27,37		44,08		40,04	
Kuru numune	(g)	194,53		233,84		172,71	
Su muhtevası	(%)	14,07		18,85		23,18	
	ort	***14,07***		***18,85***		***23,18***	
Kap No.		4	4	5	5		
Kap + ıslak numune	(g)	242,20					
Kap + kuru numune	(g)	189,12					
Kap	(g)	9,23					
Su	(g)	53,08					
Kuru numune	(g)	179,89					
Su muhtevası	(%)	29,51					
	ort	***29,51***					
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,350***	***1,415***	***1,448***	***1,422***		
Su muhtevası	(%)	***14,07***	***18,85***	***23,18***	***29,51***		



$g/cm^3 = Mg/m^3$

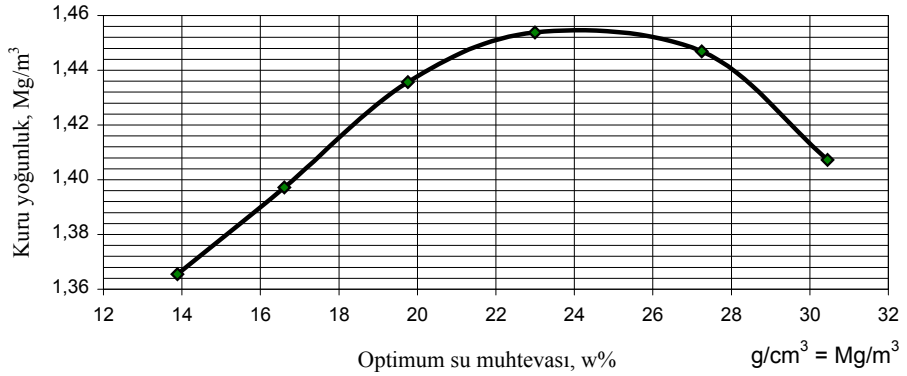
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,448** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **23,2**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%3 $MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	6
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6640	6710	6795	6860	6910	6905
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	5172
Islak numune	(g)	1468	1538	1623	1688	1738	1733
Islak yoğunluk	(g)	1,555	1,63	1,72	1,79	1,84	1,84
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	123,57	106,97	122,91	83,27	73,91	83,23
Kap + kuru numune	(g)	109,64	95,06	106,72	72,82	62,78	70,58
Kap	(g)	9,28	9,29	9,32	9,86	6,56	6,43
Su	(g)	13,93	11,91	16,19	10,45	11,13	12,65
Kuru numune	(g)	100,36	85,77	97,40	62,96	56,22	64,15
Su muhtevası	(%)	13,88	13,89	16,62	16,60	19,80	19,72
	ort	***13,88***		***16,61***		***19,76***	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune	(g)	112,80	120,56	83,69	97,05	97,41	76,44
Kap + kuru numune	(g)	93,70	99,63	67,19	77,70	76,12	60,18
Kap	(g)	9,93	9,36	6,65	6,65	6,55	6,52
Su	(g)	19,10	20,93	16,50	19,35	21,29	16,26
Kuru numune	(g)	83,77	90,27	60,54	71,05	69,57	53,66
Su muhtevası	(%)	22,80	23,19	27,25	27,23	30,60	30,30
	ort	***22,99***		***27,24***		***30,45***	
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,366***	***1,397***	***1,436***	***1,454***	***1,447***	***1,407***
Su muhtevası	(%)	***13,88***	***16,61***	***19,76***	***22,99***	***27,24***	***30,45***



$g/cm^3 = Mg/m^3$

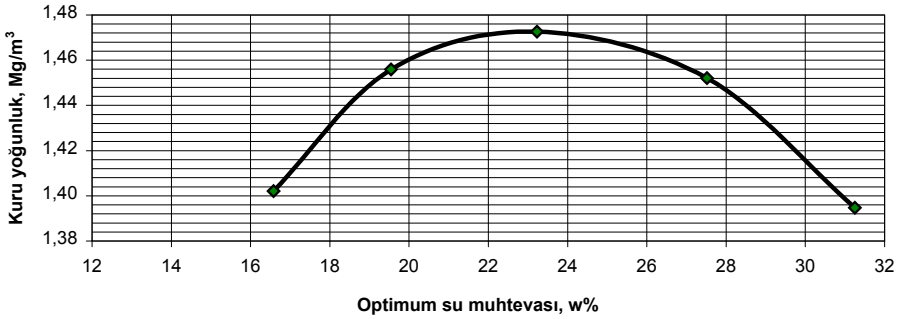
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,455** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **24,0**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%5 $MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6715	6815	6885	6920	6900	
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune	(g)	1543	1643	1713	1748	1728	
Islak yoğunluk	(g)	1,635	1,74	1,81	1,85	1,83	
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	286,00	300,70	324,64	280,48	223,76	254,80
Kap + kuru numune	(g)	267,01	278,63	296,00	258,68	208,38	235,34
Kap	(g)	152,30	145,77	149,96	146,76	141,49	152,38
Su	(g)	18,99	22,07	28,64	21,80	15,38	19,46
Kuru numune	(g)	114,71	132,86	146,04	111,92	66,89	82,96
Su muhtevası	(%)	16,55	16,61	19,61	19,48	22,99	23,46
	ort	***16,58***		***19,54***		***23,23***	
Kap No.		4	4	5	5		
Kap + ıslak numune	(g)	109,92	73,15	120,56	100,48		
Kap + kuru numune	(g)	87,56	58,80	93,90	78,94		
Kap	(g)	6,44	6,57	9,30	9,42		
Su	(g)	22,36	14,35	26,66	21,54		
Kuru numune	(g)	81,12	52,23	84,60	69,52		
Su muhtevası	(%)	27,56	27,47	31,51	30,98		
	ort	***27,52***		***31,25***			
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,402***	***1,456***	***1,473***	***1,452***	***1,395***	
Su muhtevası	(%)	***16,58***	***19,54***	***23,23***	***27,52***	***31,25***	



$g/cm^3 = Mg/m^3$

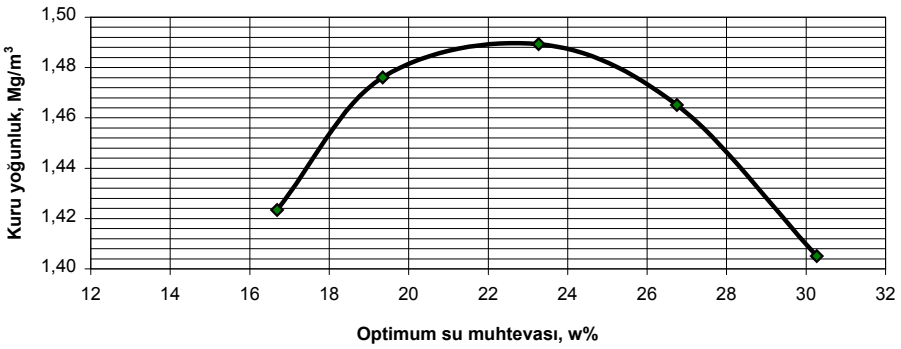
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,473** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **23,3**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%7 $MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6740	6835	6905	6925	6900	
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune	(g)	1568	1663	1733	1753	1728	
Islak yoğunluk	(g)	1,661	1,76	1,84	1,86	1,83	
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	273,88	281,65	283,26	295,50	255,72	279,84
Kap + kuru numune	(g)	256,51	262,19	261,62	271,42	233,97	255,99
Kap	(g)	152,30	145,75	149,96	146,77	141,49	152,36
Su	(g)	17,37	19,46	21,64	24,08	21,75	23,85
Kuru numune	(g)	104,21	116,44	111,66	124,65	92,48	103,63
Su muhtevası	(%)	16,67	16,71	19,38	19,32	23,52	23,01
	ort	***16,69***		***19,35***		***23,27***	
Kap No.		4	4	5	5		
Kap + ıslak numune	(g)	113,68	89,81	127,42	106,24		
Kap + kuru numune	(g)	91,60	72,89	100,02	83,73		
Kap	(g)	9,44	9,32	9,35	9,50		
Su	(g)	22,08	16,92	27,40	22,51		
Kuru numune	(g)	82,16	63,57	90,67	74,23		
Su muhtevası	(%)	26,87	26,62	30,22	30,32		
	ort	***26,75***		***30,27***			
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,423***	***1,476***	***1,489***	***1,465***	***1,405***	
Su muhtevası	(%)	***16,69***	***19,35***	***23,27***	***26,75***	***30,27***	



$g/cm^3 = Mg/m^3$

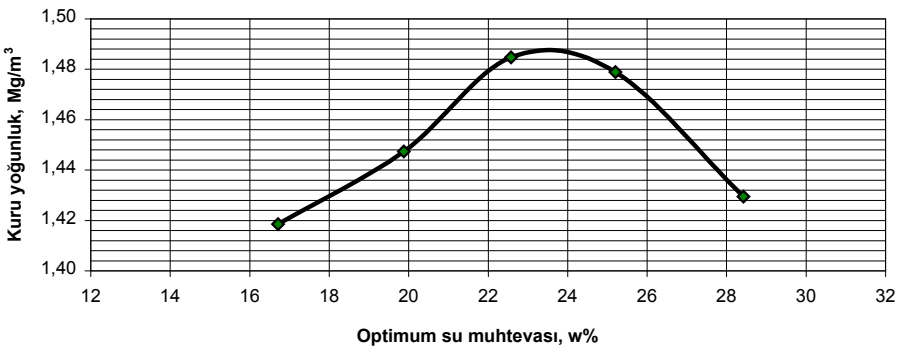
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,490** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **22,6**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%9 $MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6735	6810	6890	6920	6905	
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune	(g)	1563	1638	1718	1748	1733	
Islak yoğunluk	(g)	1,656	1,74	1,82	1,85	1,84	
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	83,48	85,26	72,72	147,83	119,91	90,47
Kap + kuru numune	(g)	72,83	74,49	61,90	125,65	99,36	75,66
Kap	(g)	9,87	9,27	9,35	9,93	9,32	9,31
Su	(g)	10,65	10,77	10,82	22,18	20,55	14,81
Kuru numune	(g)	62,96	65,22	52,55	115,72	90,04	66,35
Su muhtevası	(%)	16,92	16,51	20,59	19,17	22,82	22,32
	ort	***16,71***		***19,88***		***22,57***	
Kap No.		4	4	5	5		
Kap + ıslak numune	(g)	104,84	85,50	120,57	120,91		
Kap + kuru numune	(g)	85,65	70,17	95,72	96,57		
Kap	(g)	9,31	9,50	9,40	9,81		
Su	(g)	19,19	15,33	24,85	24,34		
Kuru numune	(g)	76,34	60,67	86,32	86,76		
Su muhtevası	(%)	25,14	25,27	28,79	28,05		
	ort	***25,20***		***28,42***			
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,419***	***1,447***	***1,485***	***1,479***	***1,430***	
Su muhtevası	(%)	***16,71***	***19,88***	***22,57***	***25,20***	***28,42***	



$g/cm^3 = Mg/m^3$

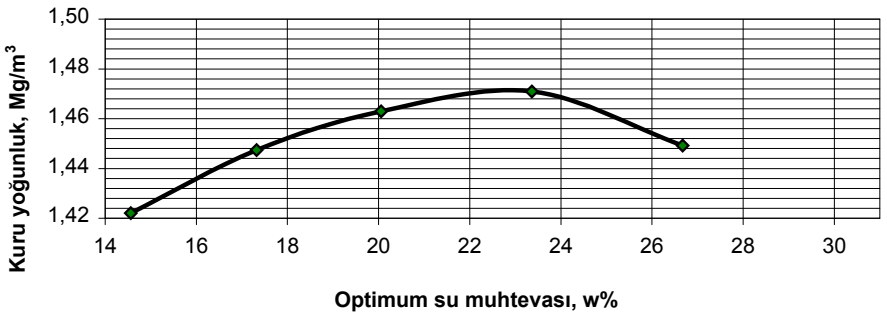
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,488** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **23,5**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%11 $MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH 01/06/10

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	6
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6795	6850	6925	6930	6880	
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune	(g)	1623	1678	1753	1758	1708	
Islak yoğunluk	(g)	1,719	1,78	1,86	1,86	1,81	
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	89,03	73,72	85,24	93,42	262,79	268,44
Kap + kuru numune	(g)	76,99	64,15	72,44	79,28	241,21	244,59
Kap	(g)	9,31	9,49	9,33	9,29	152,30	145,70
Su	(g)	12,04	9,57	12,80	14,14	21,58	23,85
Kuru numune	(g)	67,68	54,66	63,11	69,99	88,91	98,89
Su muhtevası	(%)	17,79	17,51	20,28	20,20	24,27	24,12
	ort	***17,65***		***20,24***		***24,19***	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune	(g)	318,72	242,39	247,18	286,71		
Kap + kuru numune	(g)	281,84	223,11	224,40	253,93		
Kap	(g)	141,50	152,37	150,00	146,81		
Su	(g)	36,88	19,28	22,78	32,78		
Kuru numune	(g)	140,34	70,74	74,40	107,12		
Su muhtevası	(%)	26,28	27,25	30,62	30,60		
	ort	***26,77***		***30,61***			
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,422***	***1,447***	***1,463***	***1,471***	***1,449***	
Su muhtevası	(%)	***14,56***	***17,32***	***20,05***	***23,36***	***26,67***	



$g/cm^3 = Mg/m^3$

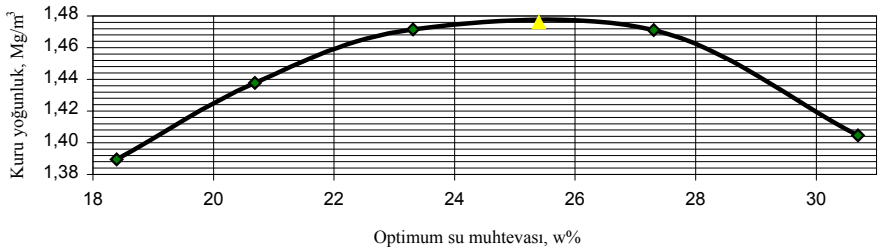
Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,473** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **23,8**

Osmangazi Üniversitesi	LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ	Dizayn USBR 5500
NUMUNE NO. **%13_$MgCl_2$ Katkılı**	PROJE	AMAÇ
TEST TARİH	HESAP TARİH	KONTROL TARİH

Vuruş Sayısı : 25 Tabaka Sayısı : 3 Düşme Yüksekliği : 30,5 cm

Tokmak Ağırlığı : 2,5 kg Mold Hacmi : **944** **cm^3**

Numune No.		1	2	3	4	5	
				Islak yoğunluk hesaplamaları			
Eklenenen su	(g veya ml)						
Mold + ıslak numune	(g)	6660	6790	6870	6925	6905	
Mold	(g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune	(g)	1488	1618	1698	1753	1733	
Islak yoğunluk	(g)	1,576	1,71	1,80	1,86	1.84	
				Su muhtevası hesaplamaları			
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune	(g)	106,46	76,29	113,65	81,31	117,79	104,26
Kap + kuru numune	(g)	92,10	66,34	95,94	69,65	97,62	86,38
Kap	(g)	9,32	9,31	9,34	9,27	9,59	9,86
Su	(g)	14,36	9,95	17,71	11,66	20,17	17,88
Kuru numune	(g)	82,78	57,03	86,60	60,38	88,03	76,52
Su muhtevası	(%)	18,35	18,50	20,45	20,85	22,91	23,40
	ort	***18,40***		***20,69***		***23,31***	
Kap No.		**4**	**4**	**5**	**5**		
Kap + ıslak numune	(g)	115,33	122,08	315,71	410,83		
Kap + kuru numune	(g)	93,53	98,98	277,75	353,32		
Kap	(g)	9,41	9,94	146,77	152,39		
Su	(g)	21,80	23.1	37,96	57,51		
Kuru numune	(g)	84,12	89,04	130,98	200,93		
Su muhtevası	(%)	27,25	27,35	30,80	30,60		
	ort	***27,30***		***30,69***			
				Kuru yoğunluk hesaplamaları			
Kuru yoğunluk	(g/cm3)	***1,390***	***1,438***	***1,472***	***1,471***	***1,405***	
Su muhtevası	(%)	***18,40***	***20,69***	***23,31***	***27,30***	***30,69***	



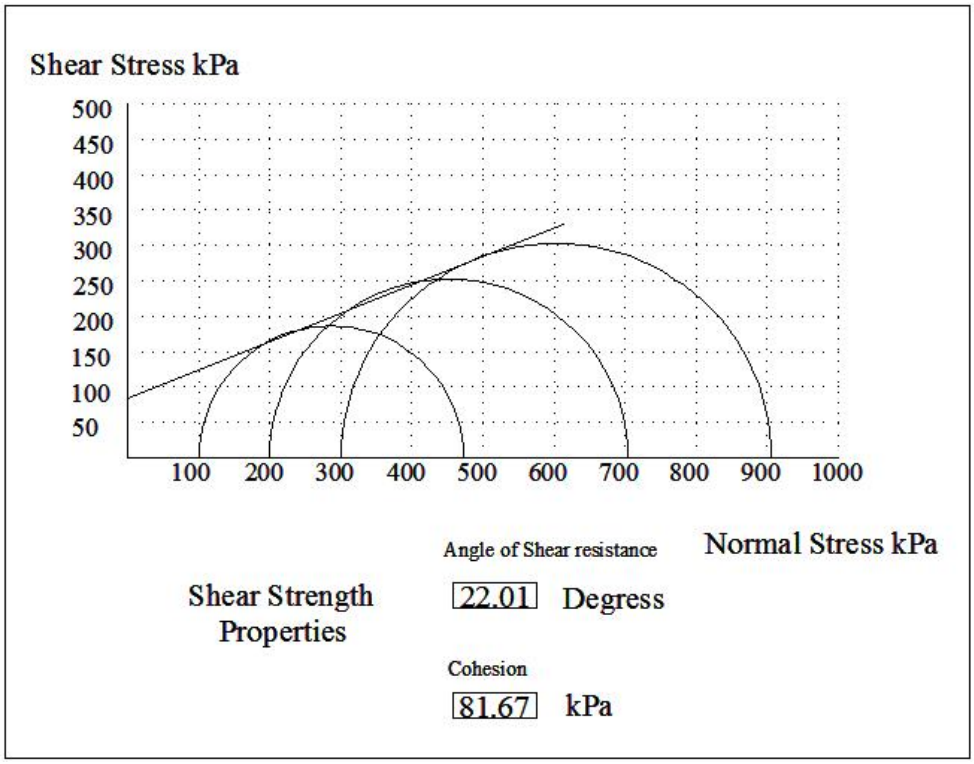
$g/cm^3 = Mg/m^3$

Maksimum kuru yoğunluk = ... **1,476** Mg/m^3 Optimum su muhtevası = (%) **25,4**

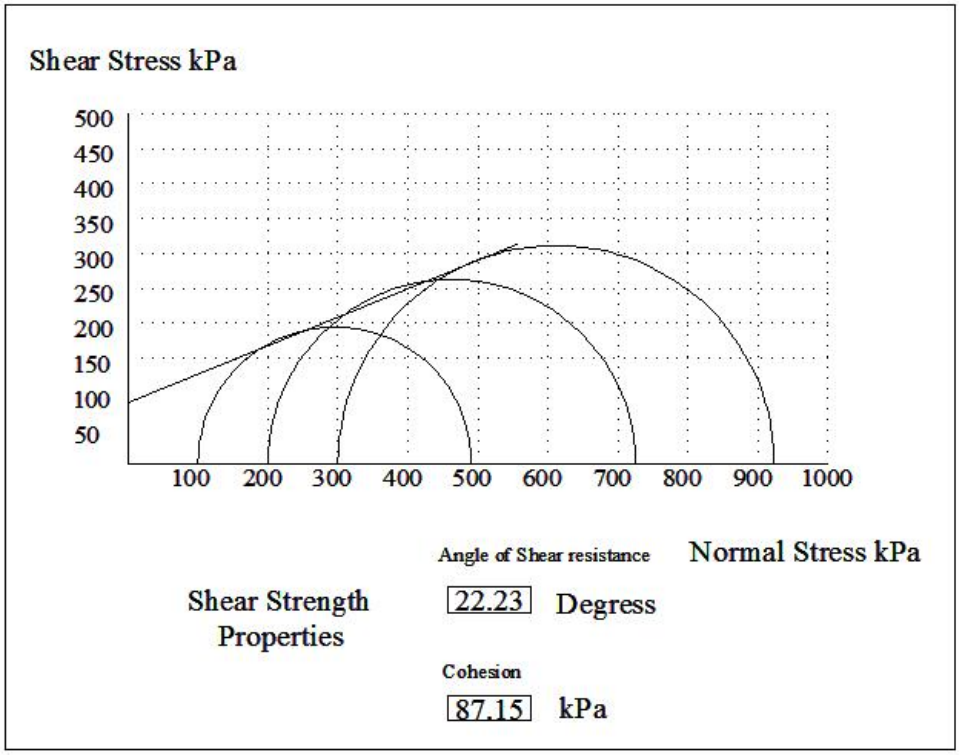
Ek.3:

ÖRNEKLERİN ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI

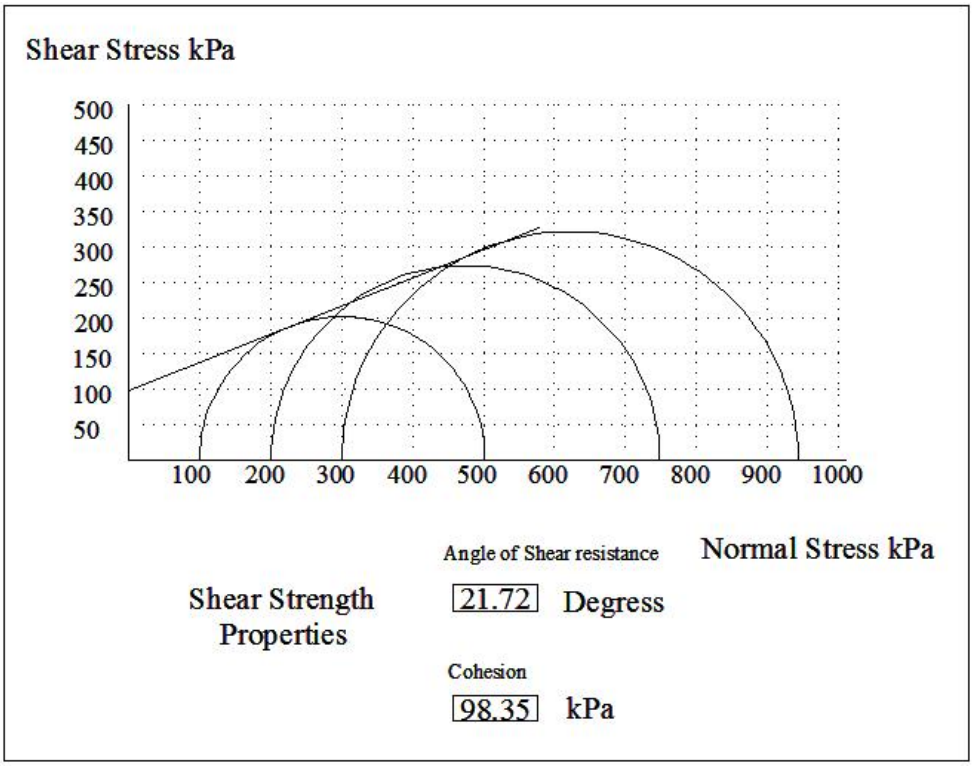
Ek 3.1. Katkısız Kil UU Deney Verileri



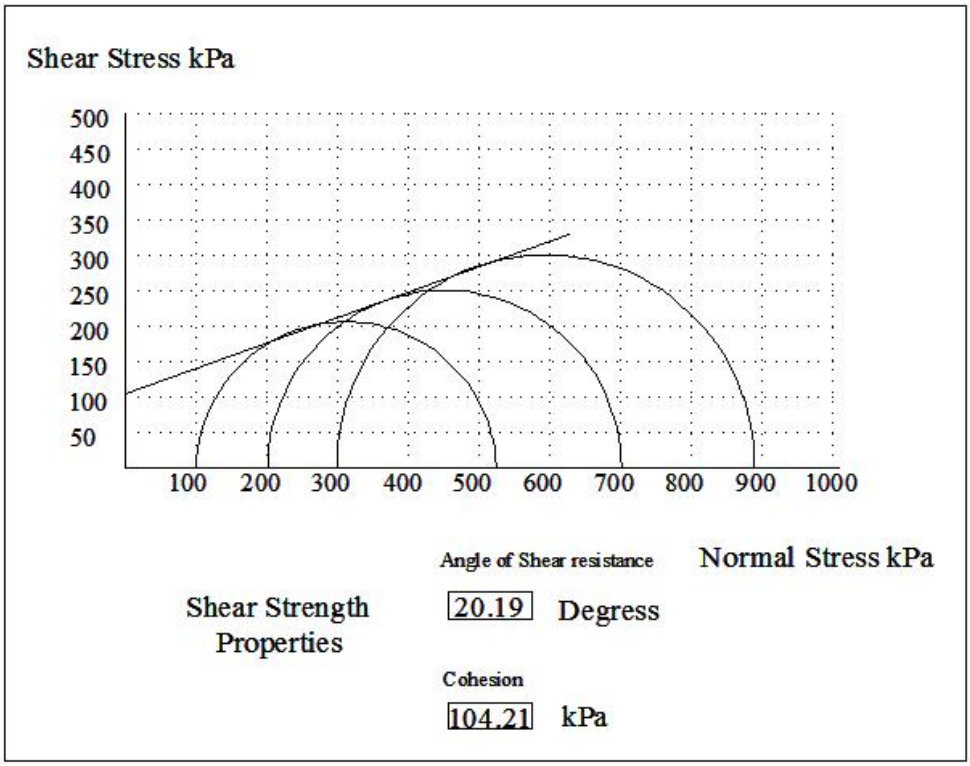
Ek 3.2. %3 $MgCl_2$ Katkılı UU Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

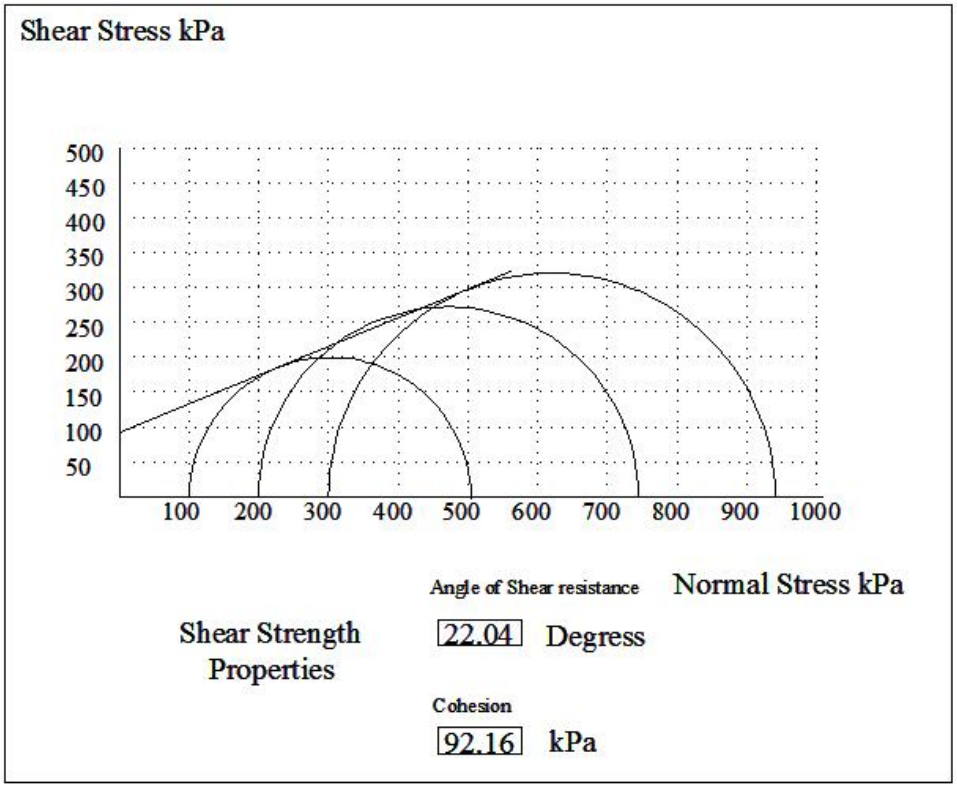


7 Günlük Kür Sonucu

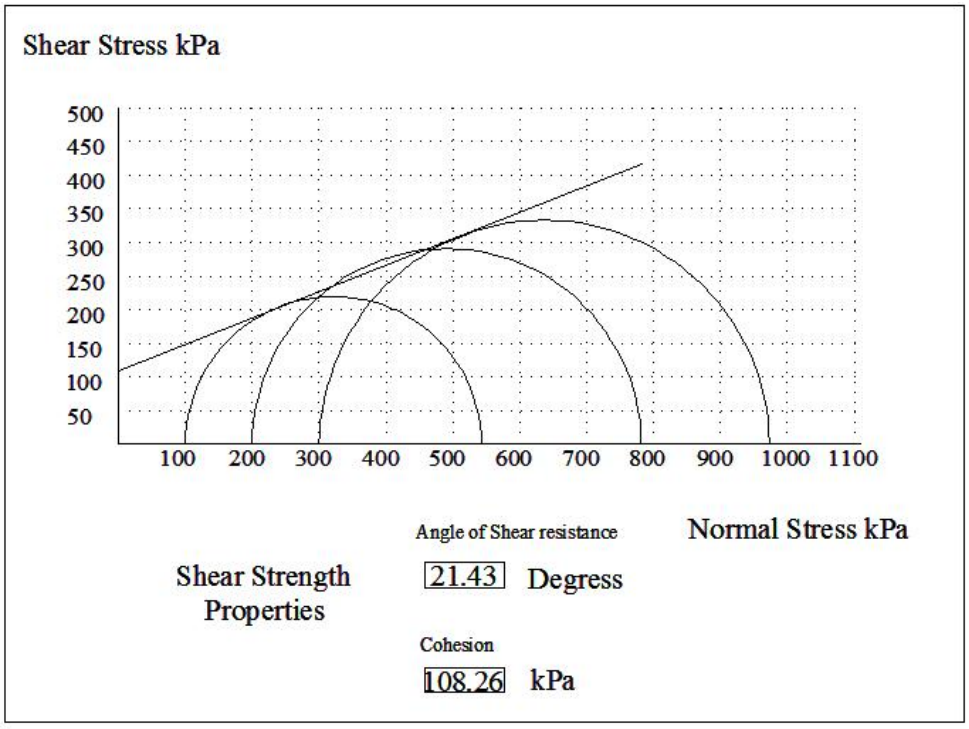


28 Günlük Kür Sonucu

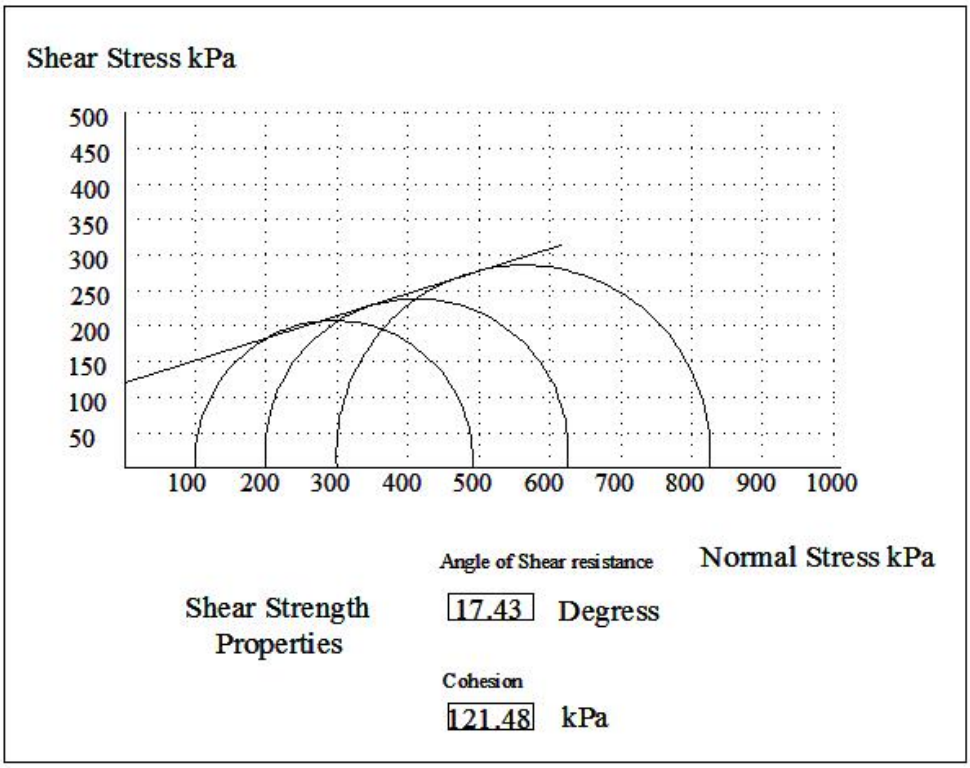
Ek 3.3. %5 $MgCl_2$ Katkılı UU Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

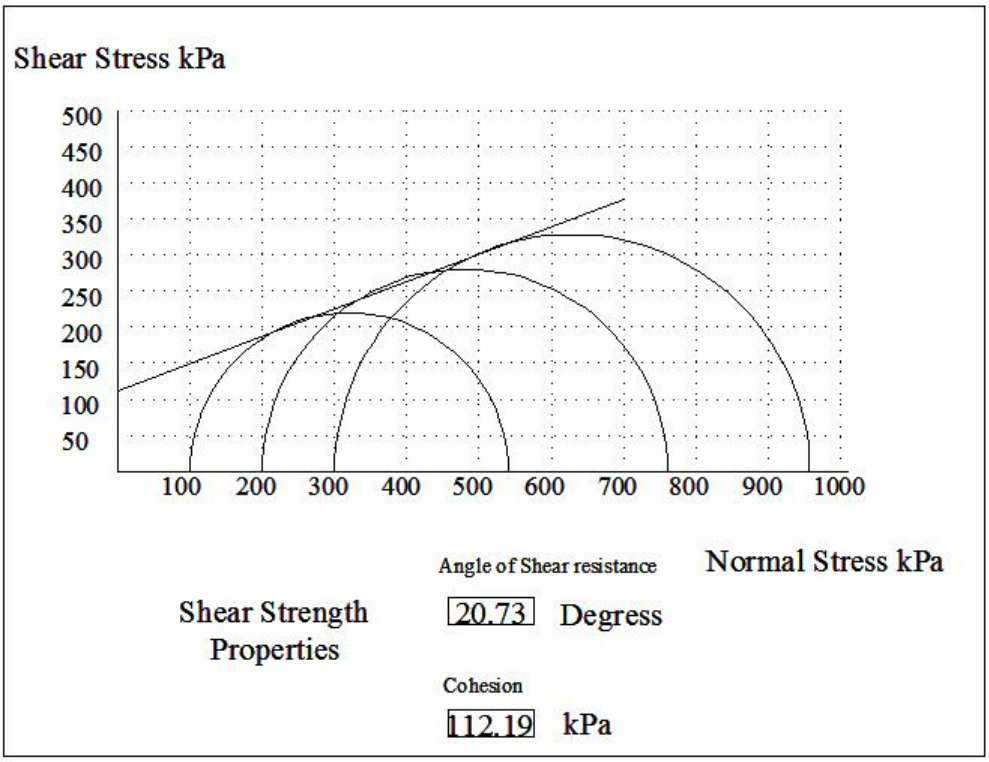


7 Günlük Kür Sonucu

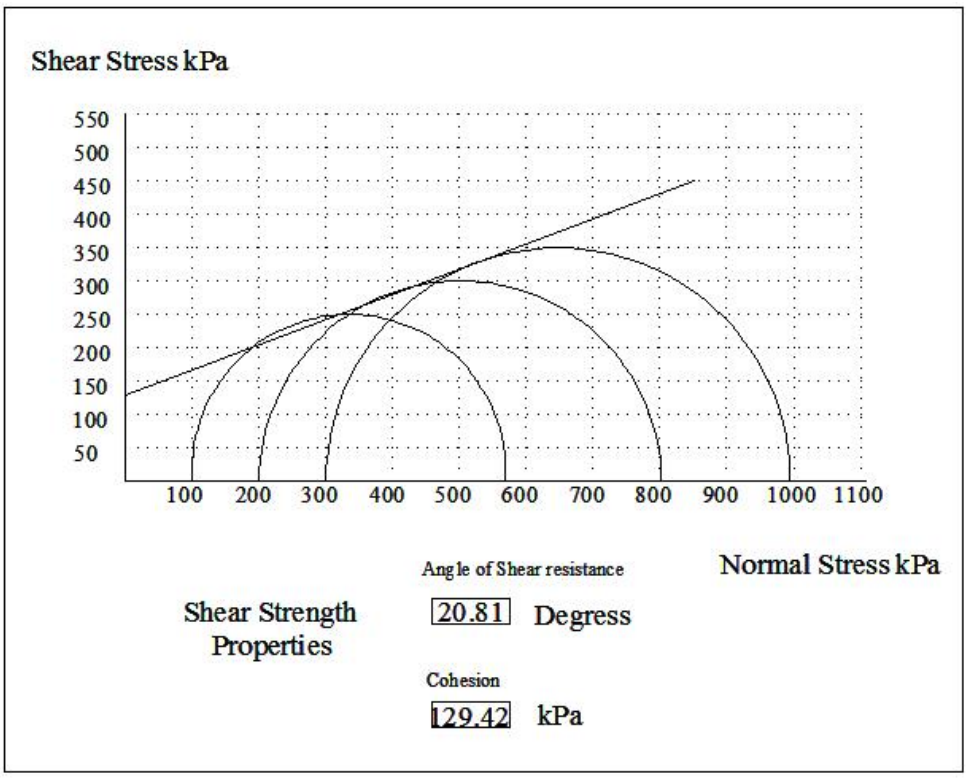


28 Günlük Kür Sonucu

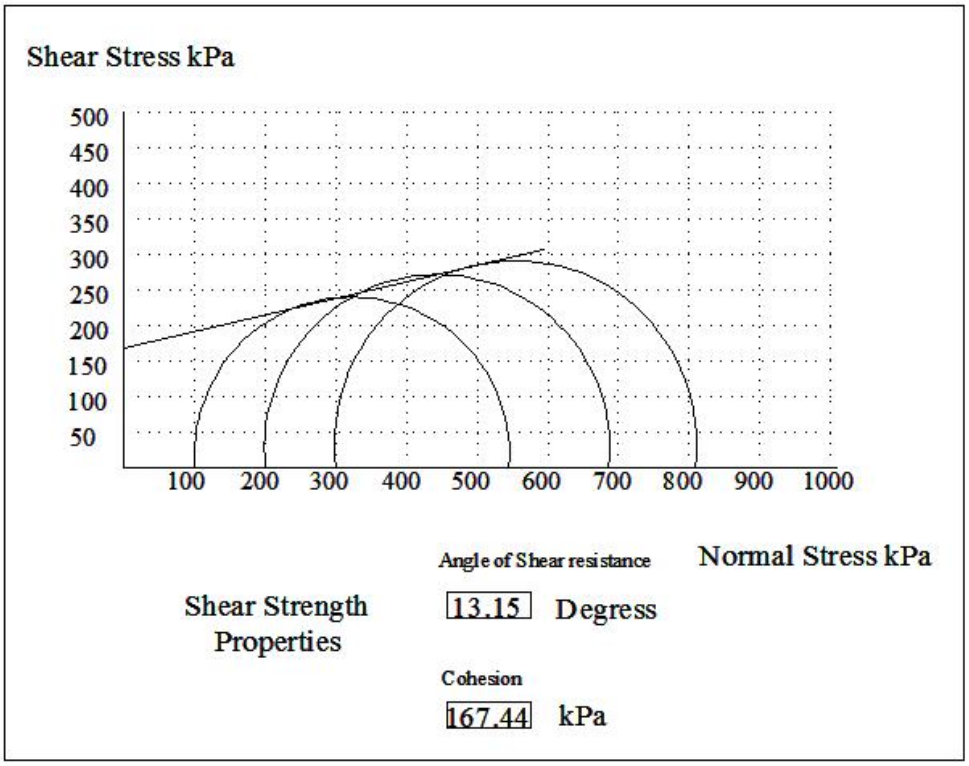
Ek 3.4. %7 $MgCl_2$ Katkılı UU Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

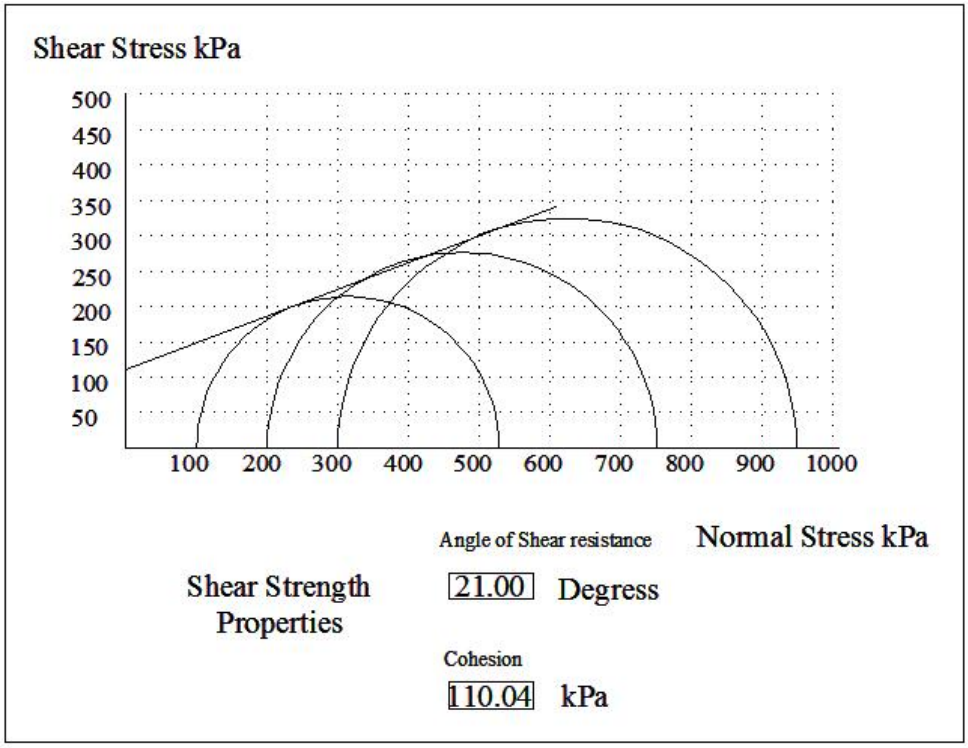


7 Günlük Kür Sonucu

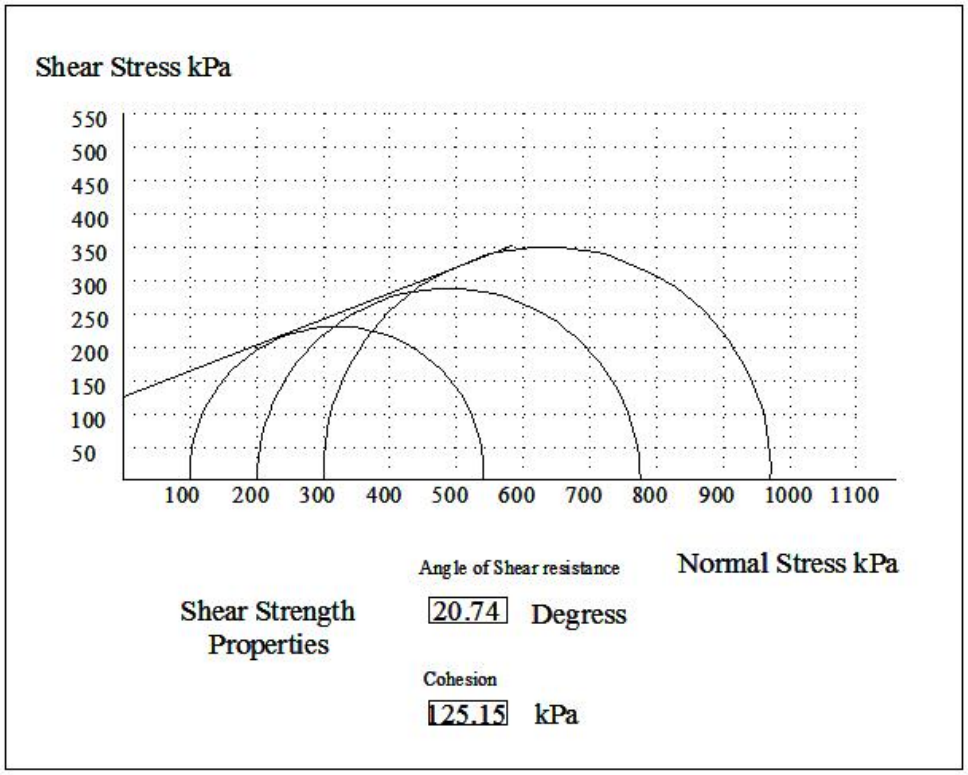


28 Günlük Kür Sonucu

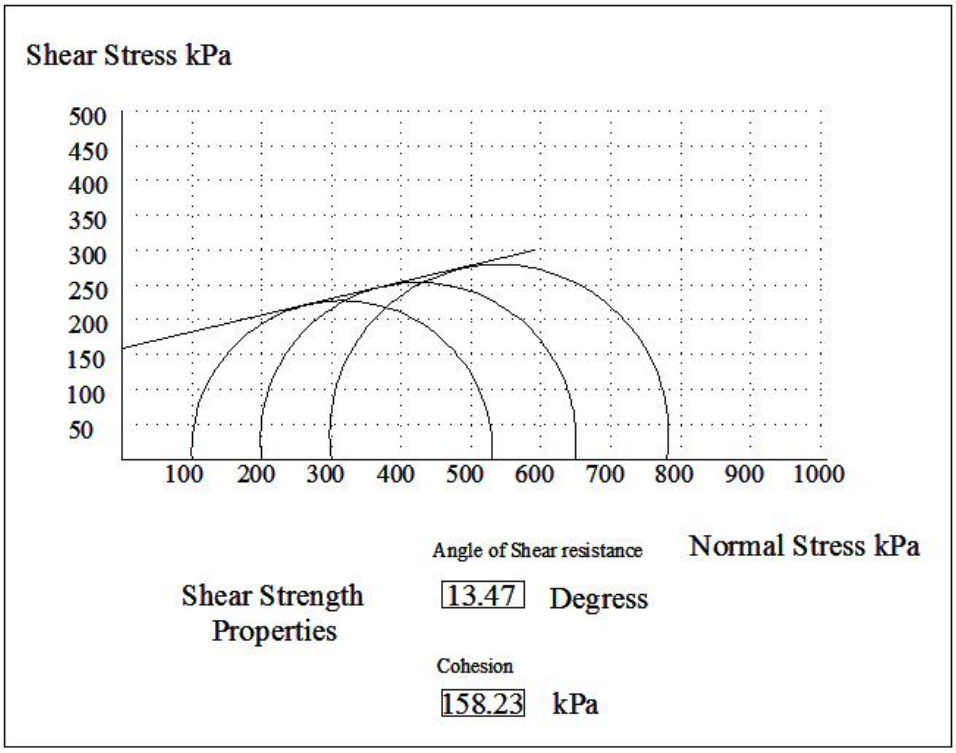
Ek 3.5. %9 $MgCl_2$ Katkılı UU Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

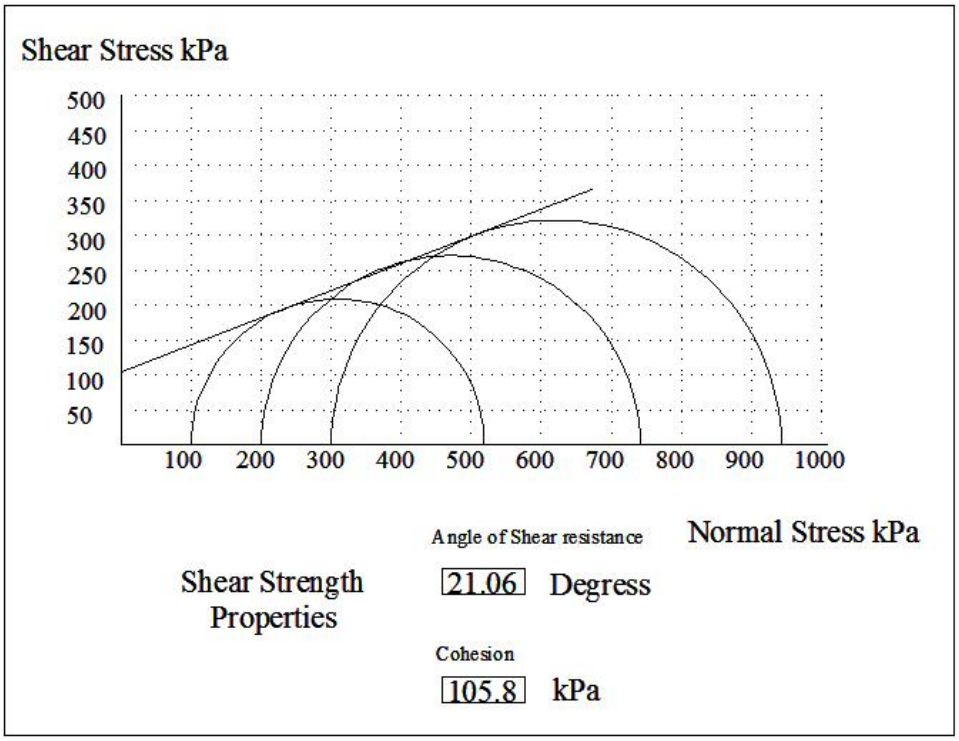


7 Günlük Kür Sonucu

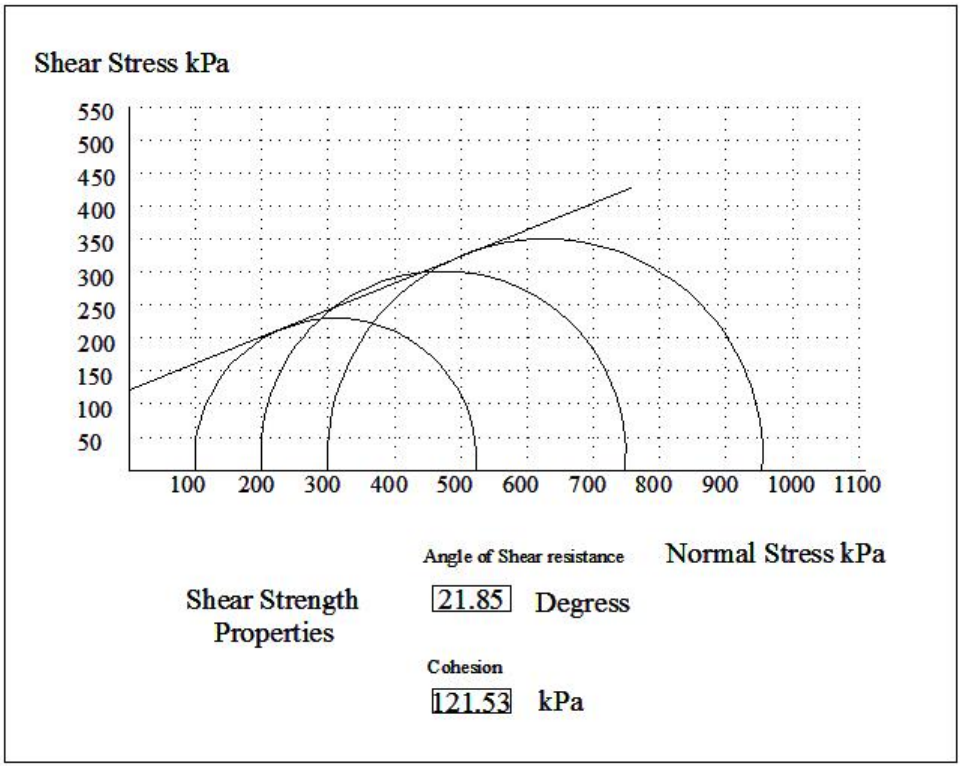


28 Günlük Kür Sonucu

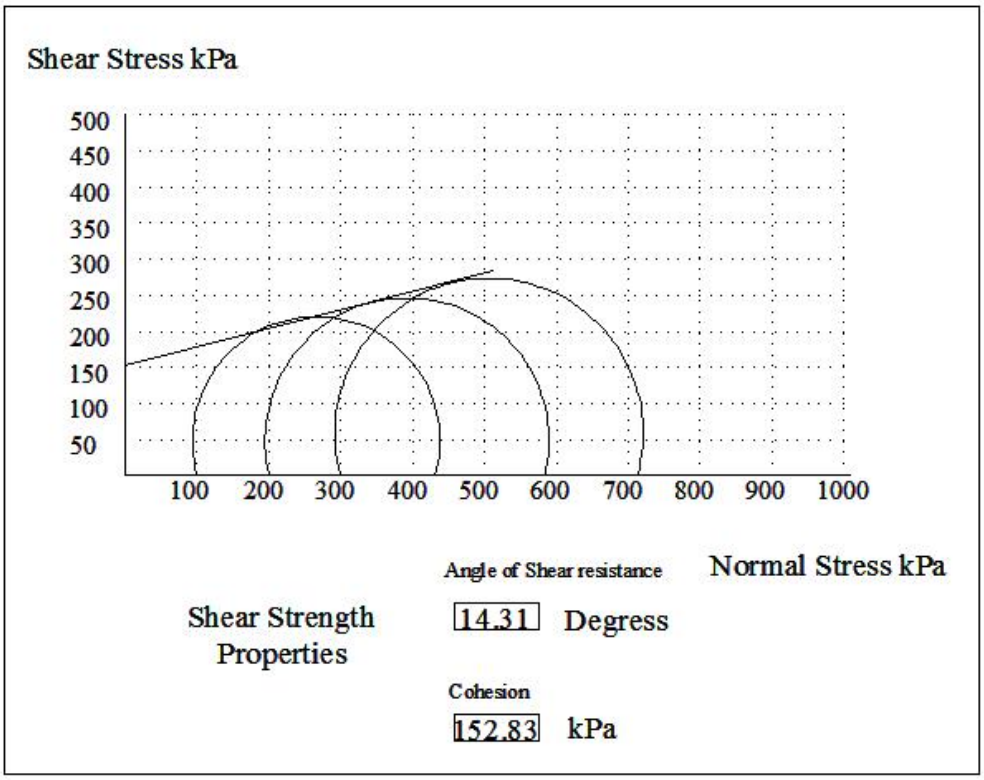
Ek 3.6. %11 $MgCl_2$ Katkılı UU Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu



7 Günlük Kür Sonucu

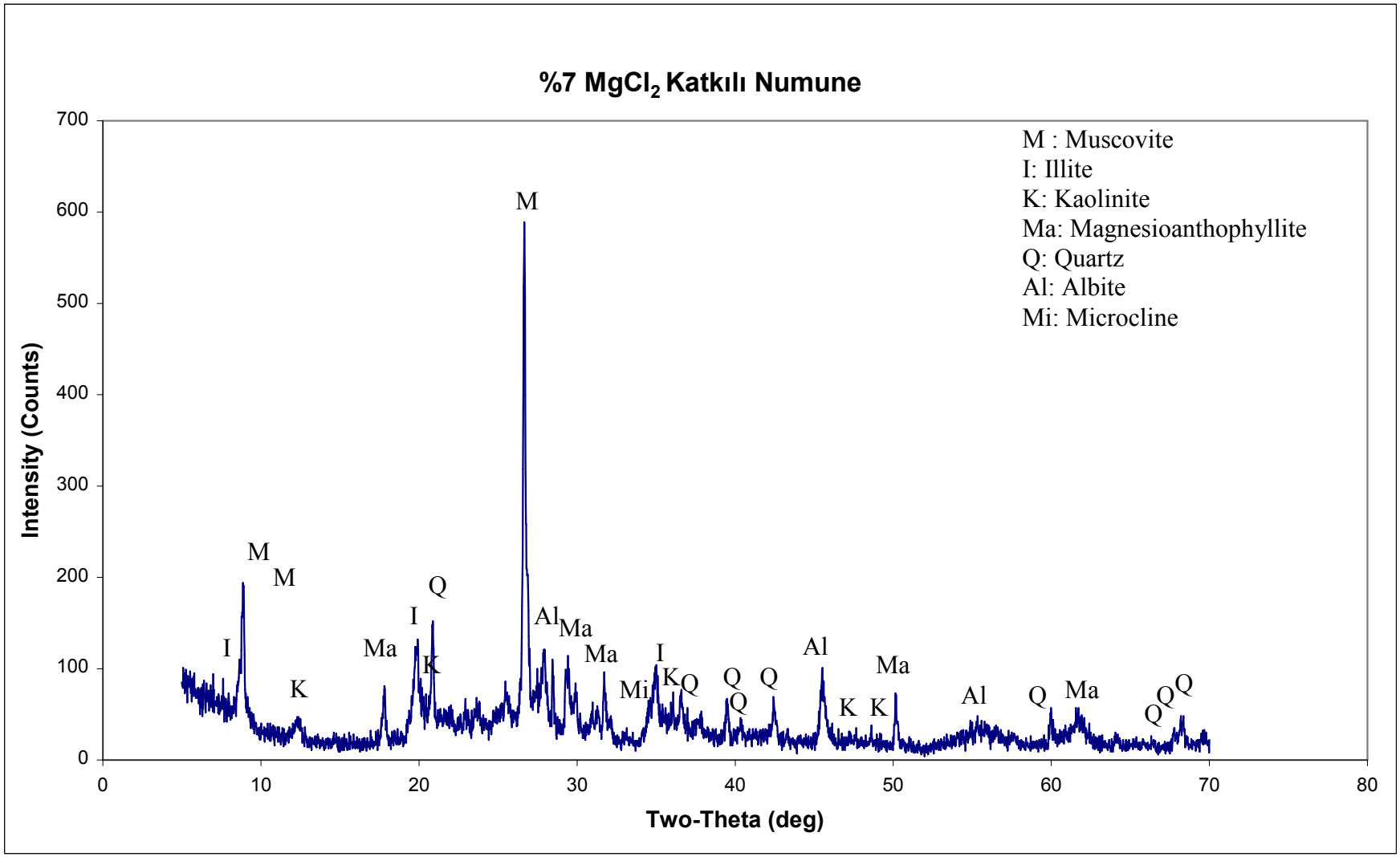


28 Günlük Kür Sonucu

Ek.4:

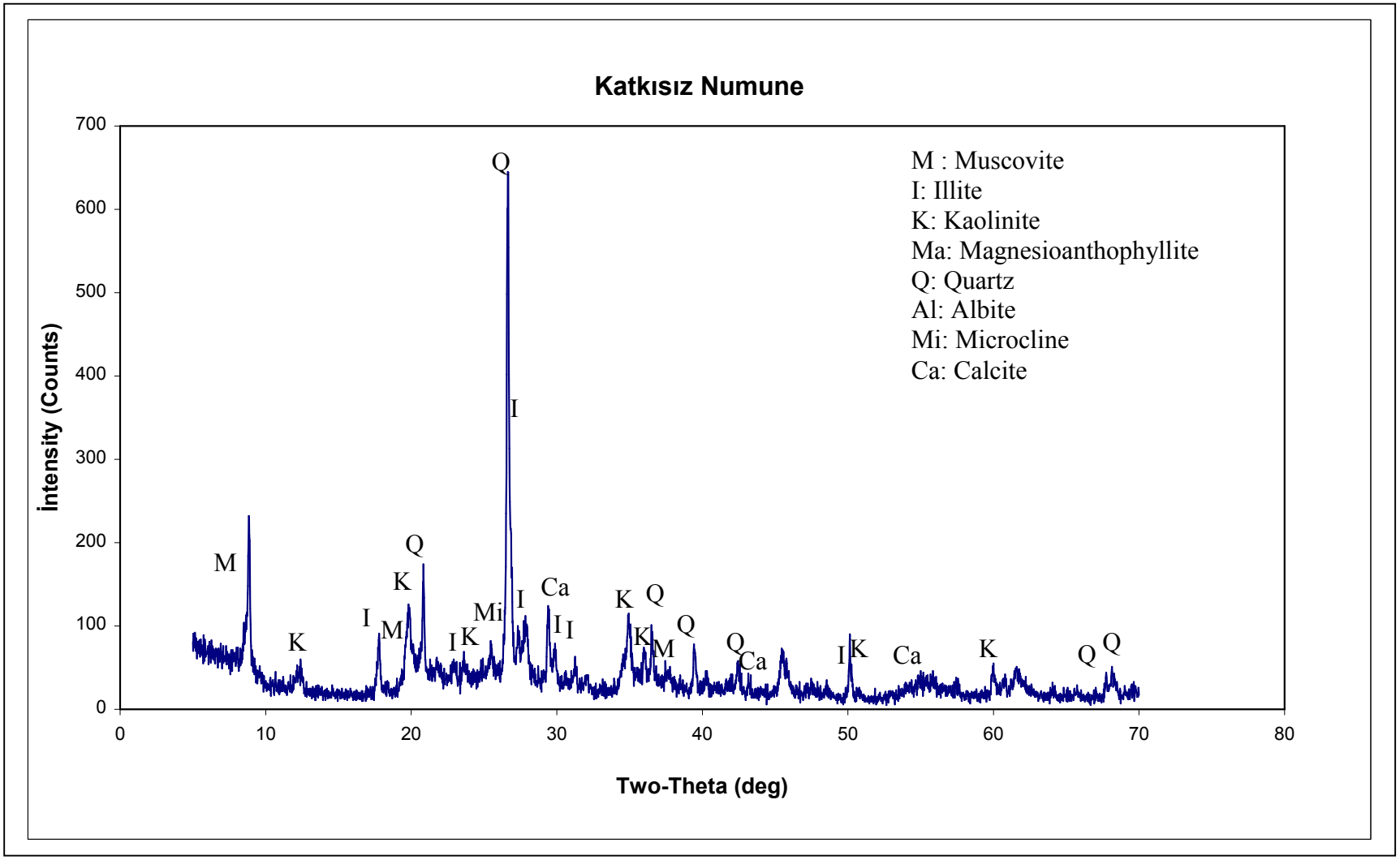
ÖRNEKLERİN XRD DENEY SONUÇLARI

“



Şekil %7 MgCl2 katkılı numunenin XRD SONUÇLARI

“



Şekil Katkısız numunenin XRD sonuçları