T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ KİMYASALLARLA KONSOLİDE EDİLMİŞ KİL ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ VE KONSOLİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat OLGUN
DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konya, 2008

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ KİMYASALLARLA KONSOLİDE EDİLMİŞ KİL ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ VE KONSOLİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat OLGUN
DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 25.06.2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mete İNCECİK – İ.T.Ü. (Jüri Başkanı)

Doç. Dr. Özcan TAN – S.Ü. (T.İ.K. Üyesi)

Doç. Dr. O. Nuri ÇELİK – S.Ü. (Üye)

Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIZ – S.Ü. (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Adnan ÖZDEMİR – S.Ü. (T.İ.K. Üyesi)

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ KİMYASALLARLA KONSOLİDE EDİLMİŞ KİL ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ VE KONSOLİDASYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat OLGUN
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIZ
2008, 340 sayfa

Jüri: Prof. Dr. Mete İNCECİK
Doç. Dr. Özcan TAN
Doç. Dr. O. Nuri Çelik
Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIZ
Yrd. Doç. Dr. Adnan ÖZDEMİR

Bu çalışmada, değişik kimyasal ortamlarda çökelen kil tabakalarının mukavemet ve konsolidasyon davranışlarında meydana gelen değişimin boşluk sıvısının dielektrik sabitine bağlı olarak belirlenmesi için bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla iki farklı ucu temsil etmesi açısından biri kaolinit diğeri ise montmorillonit ağırlıklı olan iki kil türü seçilmiştir. Kimyasal sıvılar olarak ise dielektrik sabiti değişiminin geniş bir aralığını yansıtması amacıyla 4 farklı sıvı (methanol, ethanol, izo-propil alkol ve asetik asit) kullanılmıştır. Bu sıvıların değişik konsantrasyonları (%20, %40, %60 ve %80) kullanılarak Atterberg limit deneyleri

yapılmış, elde edilen likit limit değerlerinin iki katı su muhtevasında olacak şekilde hazırlanan karışımlar 100 kPa ön konsolide basıncı altında konsolide edilmiştir. Ön konsolide edilen bu karışımdan alınan numuneler üzerinde ise serbest basınç, üç eksenli basınç, kesme kutusu, vane (kanatlı kesme) ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kimyasal sıvılar varlığında tanecikler arasındaki etkileşimin doğasını anlamak amacıyla killerin optik mikroskop (OM) görüntüleri alınmıştır.

Laboratuar şartlarında yapılan deneyler sonucunda killerin kayma mukavemeti ve sıkışma davranışlarının tanecikler arasındaki boşluk sıvılarının değişimi ve buna bağlı olarak fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişiminden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte bazı özel durumlar haricinde her iki kil türünde de mukavemet artışları gerçekleşmiş, sıkışma ve şişme indisi değerleri ise azalmıştır. Kaolinitin davranışı üzerinde Van der Walls çekim kuvvetleri etkili olurken, montmorillonitik ağırlıklı Aksaray kilinin davranışı diffüz çift tabaka itme kuvvetleri tarafından kontrol edilmiştir. Optik mikroskopla elde edilen ve taneciklerin flokülasyonunu net bir şekilde gösteren fotoğraf görüntüleri, bulunan mukavemet ve konsolidasyon deney sonuçlarıyla örtüşmüştür. Ayrıca literatürde değişik araştırmacılarca yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların tez çalışmasının deneysel sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Kimyasal sıvılar, kaolinit, montmorillonit, Van der Walls çekim kuvveti, diffüz çift tabaka itme kuvveti, flokülasyon, dielektrik sabiti, konsolidasyon, kayma mukavemeti.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF SHEAR STRENGTH AND CONSOLIDATION BEHAVIOURS OF CLAY SOILS CONSOLIDATED WITH CHEMICALS OF VARIOUS CONCENTRATIONS

Murat OLGUN
Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Asist. Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
2008, 340 pages

Jury: Prof. Dr. Mete İNCECİK
Assoc. Prof. Dr. Özcan TAN
Assoc. Prof. Dr. O. Nuri Çelik
Asist. Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Asist. Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR

This study is an investigation conducted on determining the strength and the consolidation behaviors of the clay layers settled under various chemical conditions in which the dielectric constant of the pore liquid was varying. For this objective, two different clay types are chosen, one of which was kaolinite and the other mostly montmorillonite to represent the two different extreme ends of clays. Four different liquids (methanol, ethanol, iso-propyl alcohol and acidic acid) were used as the chemical liquids to represent the wide variation interval of the dielectric constant. Atterberg limit tests were performed with various concentrations of these liquids (20%, 40%, 60% and 80%), and the mixtures were prepared with the water content

of two times of the obtained liquid limit which were consolidated under 100 kPa pre-consolidation pressure. Then, the pre-consolidated specimens were subjected to free compression, triaxial compression, shear box, vane shear and consolidation tests. Additionally, the optical microscope (OM) views of the clays were taken to determine the nature of the interaction between the grains subjected to chemical liquids.

At the end of the tests performed under laboratory conditions, the shear strength and the compression behaviors of the clays were found to be considerably affected from the variation of the pore liquids between the grains which cause to have changes in physico-chemical forces. The increase in strength values and the decrease in compression and swelling indexes were observed for both of the clay types under the condition of decreasing dielectric constant and increasing chemical liquid concentration except some special conditions. Van der Walls attraction forces influenced the behavior of kaolinite and the behavior of the mostly montmorillonite Aksaray clay was controlled by the repulsive forces of the diffused dual-layer. The optical microscope views clearly displaying the flocculation of the grains overlapped with the results obtained in the strength and consolidation tests that were also in accordance with the results determined by former researches of the literature.

KEY WORDS: Chemicals fluids, kaolinite, montmorillonite, Van der Walls attraction force, diffuse double layer repulsive force, flocculation, dielectric constant, consolidation, shear strength.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın her aşamasında, gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı, tez yöneticim ve danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIZ'a en içten teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmamın yürütülmesindeki yardımlarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Özcan TAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Adnan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmam esnasındaki laboratuar çalışmalarında gerektiği zaman yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Atila DEMİRÖZ, Arş. Gör. İ. Hakkı ERKAN, Arş. Gör. Ali Sinan SOĞANCI, Tekniker Yüksel ÇİFTÇİ ve Faruk SAĞDIŞ, ayrıca yine çalışmalarım esnasında her türlü fikirsel katkıyı sağlayan Kimya Müh. Bölümü'nden Sayın Doç. Dr. Ahmet GÜLCE ve Yrd. Doç. Dr. Abdullah CEYLAN ile Çevre Müh. Bölümü'nden Arş. Gör. Ahmet AYGÜN'e teşekkür ederim.

Deneylerde kullanmış olduğum malzeme ve aletlerin temin edilmesindeki katkılarından dolayı Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Koordinatörlüğü'ne, killerin temin edilmesindeki katkılarından dolayı Eczacıbaşı Esan AŞ. ve Aksaray Şeker Fabrikası yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında benden her türlü destek ve özveriyi esirgemeyen aileme içtenlikle teşekkür ederim.

ÇALIŞMAYI DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

Bu doktora tez çalışmasına, S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü 07101004 Nolu Doktora Tez Projesi kapsamında 25.000 YTL maddi destek sağlamıştır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÇALIŞMAYI DESTEKLEYEN KURULUŞLAR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KULLANILAN SEMBOLLER	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Organik Kimyasal Sıvıların Killerin Yapısal Özellikleri ve İndeks Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar	7
2.2. Organik Kimyasal Sıvıların Killerin Mukavemet, Sıkışabilirlilik ve Hidrolik Geçirgenlik Davranışları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi İle İlgili Çalışmalar	18
3. MATERYAL VE METOT	36
3.1. Kilin Tanımı ve Önemi	36
3.2. Kil Mineralleri ve Yapıları	37
3.2.1. Kaolinit	39
3.2.2. Montmorillonit	41
3.2.3. İllit	43
3.2.4. Sepiyolit	44
3.2.5. Kil mineralleri ile beraber bulunabilen diğer bazı mineraller	45
3.3. Kil Minerallerinin Özellikleri	46
3.3.1. Spesifik (özgül) yüzey alanı	46
3.3.2. Katyon değiştirme kapasitesi (CEC)	48
3.3.3. Kil minerallerinin boyutları	49
3.3.4. Kil minerallerinin aktiviteleri	49
3.3.5. İzomorf yer değiştirme	50
3.4. Killerin Mühendislik Davranışını Etkileyen Faktörler	51

3.4.1. Kil-su etkileşimi 51
3.4.2. Kil parçacıkları arasındaki kuvvetler ve flokülasyon 55
3.5. Killi Zeminlerde Doku ve Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkileri 60
3.6. Kil Minerallerinin Tanınması 65
3.6.1. X-Ray difraksiyon analizi (X-Rd) 65
3.6.2. Optik mikroskopla analiz 67
3.6.3. Atterberg limitleri ile analiz 67
3.7. Zemin-Boşluk Sıvısı Sistemi Özellikleri 69
3.8. Kil Parçacıkları Arasındaki Fiziko-kimyasal Kuvvetlerin Analizi 71
3.8.1. Kil parçacıkları arasındaki çift tabaka itme kuvveti 72
3.8.2. Kil parçacıkları arasındaki çekme kuvveti 74
3.9. Farklı Kimyasal Sıvılar İçerisindeki Killerin Hamaker Sabitleri (A) 76
3.10. Paralel İki Parçacık Arasındaki Fiziko-kimyasal Kuvvetler Üzerinde Kil Karakteristiklerinin Etkisi 77
4. DENEYSEL ÇALIŞMA 81
4.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Zeminler ve Özellikleri 81
4.1.1. Kaolinit 81
4.1.2. Aksaray kili 84
4.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kimyasal Sıvılar ve Özellikleri 87
4.2.1. Methanol kimyasal sıvısı 88
4.2.2. Ethanol kimyasal sıvısı 88
4.2.3. İzo-propil alkol kimyasal sıvısı 89
4.2.4. Asetik asit kimyasal sıvısı 89
4.3. Deneysel Program 90
4.3.1. Killerin indeks ve fiziksel özelliklerinin bulunması 90
4.3.1.1. Killerin tane çapı dağılımının belirlenmesi 90
4.3.1.2. Killerin özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesi 91
4.3.1.3. Killerin spesifik yüzey alanlarının belirlenmesi 91
4.3.1.4. Atterberg limitlerinin belirlenmesi 92
4.3.2. Mukavemet ve konsolidasyon deneylerinin yapılması 93
4.3.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması 93
4.3.2.2. Üç eksenli basınç deneyleri 98
4.3.2.3. Serbest basınç deneyleri 99

4.3.2.4. Kesme kutusu deneyleri 101
4.3.2.5. Vane (kanatlı kesme) deneyleri 102
4.3.2.6. Konsolidasyon deneyleri 103
4.3.3. Optik mikroskop görüntülerinin alınması 105
5. DENEYSEL SONUÇLAR 107
5.1. Atterberg Limitleri Deney Sonuçları 107
5.1.1. Kaolinit için Atterberg limitleri deney sonuçları 108
5.1.2. Aksaray kili için Atterberg limitleri deney sonuçları 119
5.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deney Sonuçları 132
5.2.1. Kaolinit için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları 132
5.2.2. Aksaray kili için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları 137
5.3. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları 144
5.3.1. Kaolinit için üç eksenli basınç deney sonuçları 145
5.3.2. Aksaray kili için üç eksenli basınç deney sonuçları 157
5.4. Kesme Kutusu Deney Sonuçları 169
5.4.1. Kaolinit için kesme kutusu deney sonuçları 169
5.4.2. Aksaray kili için kesme kutusu deney sonuçları 178
5.5. Vane (Kanatlı Kesme) Deney Sonuçları 189
5.5.1. Kaolinit için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları 189
5.5.2. Aksaray kili için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları 191
5.6. Cep Penetrometresi İle Elde Edilen Mukavemet Değerleri 193
5.7. Konsolidasyon Deney Sonuçları 195
5.7.1. Kaolinit için konsolidasyon deney sonuçları 195
5.7.2. Aksaray kili için konsolidasyon deney sonuçları 217
5.8. Kimyasal Sıvılar Varlığında Taneciklerin Flokülasyonunun Fotoğraflarla Gösterilmesi 237
5.8.1. Kaolinitte flokülasyon olayının fotoğraflarla gösterilmesi 237
5.8.2. Aksaray kilinde flokülasyon olayının fotoğraflarla gösterilmesi 248
6. TARTIŞMA 260
6.1. Atterberg Limitleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 260
6.2. Serbest Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 272
6.3. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 283
6.4. Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 294

6.5. Vane (Kanatlı Kesme) Deneyleri ve Cep Penetrometresi İle Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi 299
6.6. Konsolidasyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 301
6.7. Optik Mikroskop Fotoğraf Görüntüleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi 316
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 320
8. KAYNAKLAR 331

KULLANILAN SEMBOLLER

A_H : Hamaker sabiti

A_c : Kilin aktivitesi

A_{att} : Elektriksel çekim kuvveti

A_s veya S : Spesifik yüzey alanı (cm^2/gr)

A_v : Avagadro sayısı ($6{,}02 \times 10^{23}/mol$)

A_{MB} : Bir metilen mavisi molekülü tarafından kaplanan alan (genellikle $130A^0$)

a_v : Konsolidasyon olayında sıkışma katsayısı

B : Brusit tabakası

BET-N_2 : Azot adsorbsiyonu metodu

c : Zeminin kohezyonu (kPa)

c_u : Drenajsız kohezyon

Cc : Konsolidasyon deneyinde sıkışma indisi

Cs : Konsolidasyon deneyinde şişme indisi

C_0 : Denge çözeltisi konsantrasyonu (mol/cm^3)

CEC : Katyon değiştirme kapasitesi (meq /100gr)

CD : Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi

CU : Konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç deneyi

CH : Yüksek plastisiteli kil

CL : Düşük plastisiteli kil

D : Vane deneyinde kanatlı kesicinin çapı (mm)

d : Kristalde atom tabakaları arası mesafe

d_{50} : Ortalama dane çapı (μm)

D_{10} : Parçacıkların dielektrik sabitleri

D_{30} : Boşluk sıvısının dielektrik sabiti

D_v : Kil mineralleri arasındaki mesafe (nm)

e : : Boşluk oranı

E : Yüklü yüzeyden x mesafede elektrik potansiyeli

EGME : Etilen glikol monoetil eter

E_{rep} : İki kil minerali arasındaki itme enerjisi

E_{att} : İki kil minerali arasındaki Van der Walls çekme enerjisi

E_{tot} : İki kil minerali arasındaki toplam etkileşim enerjisi

f : İki parçacık arasındaki elektrostatik kuvvet

F_g : Yerçekimi kuvveti

F_{att} : İki kil parçacığı arasındaki çekme kuvveti

F_{rep} : İki kil parçacığı arasındaki itme kuvveti

F_{tot} : İki kil parçacığı arasındaki toplam kuvvet

E : Elastisite modülü, MPa

G : Gibsit tabakası

Gs : Özgül ağırlık

H : Vane deneyinde kanatlı kesicinin yüksekliği (mm)

h : Planck sabiti

I : Temas basıncı

I_p : Plastisite indisi (PI)

K : Boltzman sabiti ($1{,}38 \times 10^{-16}$ erg/^{0}K)

k : Permeabilite katsayısı (cm/sn)

l : Kil parçacık uzunlukları

LL : Likit limit değeri (%)

M : Vane deneyinde uygulanan toplam moment

M_1 : Vane deneyinde yan yüzeyi kesmek için uygulanan moment

M_2 : Vane deneyinde alt ve üst yüzleri kesmek için uygulanan moment

MH : Yüksek plastisiteli silt

ML : Düşük plastisiteli silt

MM : Metilen mavisi metodu

m_v : Konsolidasyon deneyinde hacimsel sıkışma katsayısı

m_i : Işıkta ortamın kırılma indisi

m_p : Piknometre darası

m_{pw} : Piknometre + saf su ağırlığı

m_s : Kuru zemin ağırlığı

m_{pws} : Piknometre + saf su + kuru zemin ağırlığı

N : Zemin+su karışımına eklenen 0,5 mL metilen mavisi artırımlarının sayısı

NC : Normal konsolide olmuş zemin

n_0 : İyon konsantrasyonu

n^+ : Katyonların sayısı

n_0^+ : Birim hacimdeki katyonların sayısı

n^- : Anyonların sayısı

n_0^- : Birim hacimdeki anyonların sayısı

nN : Nano Newton

O_2 : Oksijen molekülü

OC : Aşırı konsolide olmuş zemin

OH : Hidroksil iyonu

OM : Optik mikroskop

ÖYA : Özgül yüzey alan (Spesifik yüzey alan) (m^2/gr)

P : Eksenel kuvvet

P_{max} : Kırılma anındaki eksenel kuvvet

PI : Plastisite indisi (%)

PL : Plastik limit (%)

pN : Piko Newton

q : Parçacıkların yükü

q_{peak} : Pik mukavemet değeri

q_u : Serbest basınç mukavemeti

r : İki parçacık arasındaki mesafe

R : Elektriksel itme kuvveti

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

SM : Siltli kum

SP : Zayıf derecelenmiş kum

s_u : Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)

T : Mutlak sıcaklık (Kelvin)

T_h : Diffüz çift tabaka kalınlığı

T_{max} : Kesme anındaki maksimum kesme kuvveti

USCS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

UU : Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi

V_a : Parçacıklar arası çekme enerjisi

V_r : Parçacıklar arası itme enerjisi

V_{res} : Parçacıklar arası net enerji

ν : İyonun valansı

ν^+ : Katyonların değerliği

ν^- : Anyonların değerliği

v_e : ultraviyole ışıkta (UV) temel elektronik adsorpsiyon frekansı

w : Zeminin su muhtevası (%)

x : Katyon ve anyonların yüklü yüzeye olan mesafesi

X-Rd : Yarınicel mineralojik analiz

τ : Kayma mukavemeti (kPa)

μ : Mikron

Δh : Numune boyunda meydana gelen değişim miktarı (mm)

δ : Yatay deplasman, mm

σ : Düşey gerilme (kPa)

σ' : Parçacıklar arası temas gerilmesi

σ_3 : Üç eksenli basınç deneyinde çevre basıncı

σ_1 : Üç eksenli basınç deneyinde toplam düşey gerilme

ζ : Zeta potansiyeli

ε : Boşluk sıvısının dielektrik sabiti

ε_z : Birim deformasyonlar (%)

Φ : (D_{10}/D_{30}) oranına karşılık bulunan bir katsayı

ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı (^{0})

%C : Kil yüzdesi

ψ_0 : Yüzey potansiyeli

γ : Zeminin doğal birim hacim ağırlığı

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1.	Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta 1995)	39
Çizelge 3.2.	İnce taneli zeminlerin başlıca kil minerali bileşenlerinin spesifik yüzey alanları (Mitchell 1993)	47
Çizelge 3.3.	Tipik kil minerallerinin pH=7'de belirlenmiş CEC değerleri (Çokça 1993 ve Breck 1974).	48
Çizelge 3.4.	Yaygın kil minerallerinin göreceli boyutları, kalınlıkları ve spesifik yüzey alanları (Yong ve Warkentin 1975).	49
Çizelge 3.5.	Değişik kil minerallerinin aktiviteleri (Skempton 1953 ve Mitchell 1976)	50
Çizelge 3.6.	Ortalama Yüzey Yük Yoğunlukları (Yong ve Warkentin 1966)	51
Çizelge 3.7.	9 Farklı organik kimyasal sıvı içerisindeki üç farklı kil için Hamaker sabiti değerleri (Chen 1996).	76
Çizelge 3.8.	Kaolinit, illit ve montmorillonitin karakteristik özellikleri (Chen 1996)	78
Çizelge 4.1.	Deneylerde kullanılan kaolinitin kimyasal ve X-RD yarı mineralojik analiz sonuçları	82
Çizelge 4.2.	Deneylerde kullanılan kaolinitin granülometrik ve bazı geotekniksel özellikleri	82
Çizelge 4.3.	Deneylerde kullanılan Aksaray kilinin kimyasal ve X-RD yarı mineralojik analiz sonuçları	85
Çizelge 4.4.	Deneylerde kullanılan Aksaray kilinin granülometrik ve bazı geotekniksel özellikleri	85
Çizelge 4.5.	Deneylerde kullanılan kimyasal sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Lide 1994)	87
Çizelge 5.1.	Kaolinit için su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları	108
Çizelge 5.2.	Kaolinit için su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonlarında Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları	109
Çizelge 5.3.	Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları	119
Çizelge 5.4.	Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları	120
Çizelge 5.5.	Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları	132
Çizelge 5.6.	Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları	138
Çizelge 5.7.	Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneyi (UU) sonuçları	145

Çizelge 5.8. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneylerinde (UU) elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø). 146
Çizelge 5.9. Aksaray kili ile su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneyi (UU) sonuçları 158
Çizelge 5.10. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø). 158
Çizelge 5.11. Kaolinitte ile su ve kimyasal sıvılar için kesme kutusu deneyi sonuçları 170
Çizelge 5.12. Kaolinitte su ve kimyasal sıvılar için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø). 170
Çizelge 5.13. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deney sonuçları 179
Çizelge 5.14. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneyinde elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø) 179
Çizelge 5.15. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları 190
Çizelge 5.16. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları 192
Çizelge 5.17. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için cep penetrometresi ile elde edilen uç mukavemet ($q_{uç}$) değerleri 194
Çizelge 5.18. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için cep penetrometresi ile elde edilen uç mukavemet ($q_{uç}$) değerleri 194
Çizelge 5.19. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen sıkışma indisi (C_c) değerleri 196
Çizelge 5.20. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri 197
Çizelge 5.21. Kaolinit için su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerde konsolidasyon deney sonuçları 203
Çizelge 5.22. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen sıkışma indisi (C_c) değerleri 218
Çizelge 5.23. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi parametreleri 219
Çizelge 5.24. Aksaray kili için su ve kimyasal sıvıların değişik

	konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerde konsolidasyon deney sonuçları	223
Çizelge 6.1.	Kaolinit üzerindeAtterberg limit deneyleri (Zhao 1996)	261
Çizelge 6.2.	Kaolinit üzerinde Atterberg limit deneyleri (Moore 1968, Uppot ve Stephenson 1989)	262
Çizelge 6.3.	Farklı boşluk sıvıları içinde iki silika tabakası arasında normalize edilmiş itme ve çekme kuvvetleri (Kaya ve Fang, 2000).	268
Çizelge 6.4.	Killerin serbest basınç mukavemetine göre ayrımı (Önalp 2007)	276
Çizelge 6.5.	Kaolinit üzerinde yapılan üç eksenli basınç deney sonuçları (Anandarajah ve Zhao 2000)	284
Çizelge 6.6.	Kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre farklı zeminler için içsel sürtünme açısının tipik değerleri (Aytekin 2005)	298
Çizelge 6.7.	Kaolinitte organik kimyasal sıvılarla sıkışma deney sonuçları (Chen ve ark. 2000)	306

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi (tetrahedron) (Grim 1959) a) Tetrahedron b) Tetrahedral tabaka	37
Şekil 3.2.	Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) (Grim 1959) c) Oktahedron d) Oktahedral tabaka	37
Şekil 3.3.	Kaolinit yapısının şematik gösterimi (Lambe 1953)	40
Şekil 3.4.	Kaolinitin Atomik Yapısı (Mitchell 1993)	40
Şekil 3.5.	Montmorillonit yapısının şematik diyagramı (Lambe 1953)	41
Şekil 3.6.	Montmorillonitin atomik yapısı (Grim 1959)	42
Şekil 3.7.	İllitin şematik diyagramı (Lambe 1953)	43
Şekil 3.8.	a) Diffüz çift tabaka b) Kil yüzeyinde katyon konsantrasyonu (Das 2002)	52
Şekil 3.9.	a)Suyun dipolar karakteri b)Diffüz çift tabakada dipolar moleküllerin çekimi (Das 2002).	53
Şekil 3.10.	Tipik bir montmorillonit ve kaolinit parçacığı üzerinde adsorbe su ve çift tabaka suyu (Lambe 1958).	54
Şekil 3.11.	Negatif yüklü kil parçacıkları yüzeyinde elektriksel alan a) Stern tabakası (gölgeli alan) b) İyonların sayısı c) Stern potansiyeli (Meunier 2005)	57
Şekil 3.12.	Çift tabakalar üzerinde sistem özelliklerindeki değişikliklerin etkileri a) katyon konsantrasyonu b) katyon değerliği c) di elektrik sabiti (Lambe ve Whitman 1979)	59
Şekil 3.13.	a) Dispers yapı b) Floküle yapı (Cernica 1995)	61
Şekil 3.14.	Bir su-kil süspansiyonunda doku (Van Olphen 1977). a) Dağınık ve ayrık yapı b) Ayrık ve kümelenmiş yapı c) Kenar-yüz floklanmış ve dağınık yapı d) Kenar-kenara floklanmış ve dağınık yapı e) Kenar-yüz floklanmış ve kümelenmiş yapı f) Kenar-kenar floklanmış ve kümelenmiş yapı g) Kenar-yüz ve kenar-kenar floklanmış ve kümelenmiş yapı	63
Şekil 3.15.	Zeminde Dokular (Collins ve McGown 1974). a) Münferit kil levhacığı etkileşimi b) Münferit silt veya kum partikülü etkileşimi c) Kil levhacıklarının grup etkileşimi d) Kille kaplanmış silt ve kum dizilimi e) Kısmen ayırt edilebilir partikül etkileşimi.	63
Şekil 3.16.	Zeminlerde sıkça karşılaşılan minerallerin X-ışını grafikleri	66
Şekil 3.17.	Casagrande'nin plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonu (Casagrande 1948'den geliştirilmiş; veriler Mitchell 1976)	68
Şekil 3.18.	Parçacıklar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak enerji etkileşimi (Van Olphen 1977)	71
Şekil 3.19.	(D_{10}/D_{30}) oranına karşılık elde edilen Φ değeri (Zhao 1996)	75
Şekil 3.20.	Farklı mesafelerde ayrılmış paralel iki kil parçacığı arasındaki itme ve çekme kuvvetleri üzerinde kil tipinin etkisi (Chen 1996)	79
Şekil 3.21.	Farklı mesafelerde ayrılmış paralel iki kil parçacığı arasındaki net fiziko-kimyasal kuvvetler üzerinde kil tipinin etkisi (Chen	80

1996)
Şekil 4.1. Kullanılan kaolinitte X-RD yarınicel mineralojik analizi için tüm kayaç analizi 83
Şekil 4.2. Kullanılan kaolinitte X-RD yarınicel mineralojik analizi için kil fraksiyonu analizi 83
Şekil 4.3. Kullanılan Aksaray kilinde X-RD yarınicel mineralojik analizi için tüm kayaç analizi 86
Şekil 4.4. Kullanılan Aksaray kilinde X-RD yarınicel mineralojik analizi için kil fraksiyonu analizi 86
Şekil 4.5. Bulamaçların bir elektrikli mikser yardımıyla hazırlanması işlemi 94
Şekil 4.6. Ön konsolide işleminin yapıldığı özel konsolidasyon deney seti sistemleri 94
Şekil 4.7. Ön konsolidasyon işleminde kullanılan bir haznenin üstten görünümü 95
Şekil 4.8. Ön konsolidasyon işleminde kullanılan üst plaka ve alt plaka 96
Şekil 4.9. Ön konsolide edilen numunelerin kriko yatımıyla tüpten çıkarılması 97
Şekil 4.10. Üç eksenli basınç deney düzeneği 99
Şekil 4.11. Serbest basınç deney düzeneği ve kırılmış bir numune 100
Şekil 4.12. Kesme kutusu deney cihazı ile yapılan bir deney 101
Şekil 4.13. Laboratuar Vane deney aleti 103
Şekil 4.14 Konsolidasyon deneyleri sonucu elde edilen tipik basınç-boşluk oranı (σ – e) grafiği 104
Şekil 4.15. Deneysel çalışmada kullanılan optik mikroskop 106
Şekil 5.1. Kaolinitte methanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 111
Şekil 5.2. Kaolinitte ethanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 112
Şekil 5.3. Kaolinitte izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 112
Şekil 5.4. Kaolinitte asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 112
Şekil 5.5. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 114
Şekil 5.6. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 114
Şekil 5.7. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 115
Şekil 5.8. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 115
Şekil 5.9. Kaolinitte su ve methanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 117
Şekil 5.10. Kaolinitte su ve ethanolün değişik konsantrasyonları ile

hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 117
Şekil 5.11. Kaolinitte su ve izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 118
Şekil 5.12. Kaolinitte su ve asetik asitin değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 118
Şekil 5.13. Aksaray kilinde methanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 122
Şekil 5.14. Aksaray kilinde ethanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 122
Şekil 5.15. Aksaray kilinde izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 123
Şekil 5.16. Aksaray kilinde asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları 123
Şekil 5.17. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 125
Şekil 5.18. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 126
Şekil 5.19. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 126
Şekil 5.20. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi 127
Şekil 5.21. Aksaray kilinde su ve methanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 130
Şekil 5.22. Aksaray kilinde su ve ethanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 130
Şekil 5.23. Aksaray kilinde su ve izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 131
Şekil 5.24. Aksaray kilinde su ve asetik asitin değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri 131
Şekil 5.25. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için ortalama serbest basınç mukavemetleri değerleri değişimi 133
Şekil 5.26. Kaolinitte asetik asitin %60 konsantrasyonu ile hazırlanmış bir numune üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonrası numunenin görünümü 134
Şekil 5.27. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri 135
Şekil 5.28. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri 136
Şekil 5.29. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri 136
Şekil 5.30. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri 137
Şekil 5.31. Aksaray kilinde 4 farklı kimyasal sıvının değişik

konsantrasyonları için ortalama serbest basınç mukavemetleri değerleri 139
Şekil 5.32. Aksaray kilinde methanolün %80 konsantrasyonuyla hazırlanan karışımda serbest basınç deneyi için numune alma işlemi 140
Şekil 5.33. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 142
Şekil 5.34. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 142
Şekil 5.35. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 143
Şekil 5.36. Aksaray kilinde %60 izo-propil alkol ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan bir serbest basınç deneyinde numunede meydana gelen gevrek kırılma 143
Şekil 5.37. Kaolinitte saf su için üç eksenli basınç deney sonuçları 146
Şekil 5.38. Kaolinitte methanolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 147
Şekil 5.39. Kaolinitte ethanolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 147
Şekil 5.40. Kaolinitte izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 148
Şekil 5.41. Kaolinitte asetik asitin %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 148
Şekil 5.42. Kaolinitte 50 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 151
Şekil 5.43. Kaolinitte 100 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 152
Şekil 5.44. Kaolinitte 200 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 152
Şekil 5.45. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri 153
Şekil 5.46. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açıları (^{0}) 153
Şekil 5.47. Kaolinitte saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 154
Şekil 5.48. Kaolinitte methanolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 155
Şekil 5.49. Kaolinit ethanolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 155
Şekil 5.50. Kaolinitte izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde

edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 156
Şekil 5.51. Kaolinitte asetik asitin %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 156
Şekil 5.52. Saf su ile hazırlanan bir kaolinit numunesi üzerinde yapılan üç eksenli deney sonrası numunenin görünümü 157
Şekil 5.53. Aksaray kilinde saf su için üç eksenli basınç deney sonuçları 159
Şekil 5.54. Aksaray kilinde methanolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 159
Şekil 5.55. Aksaray kilinde ethanolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 160
Şekil 5.56. Aksaray kilinde izo-propil alkolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 160
Şekil 5.57. Aksaray kilinde asetik asitin %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları 161
Şekil 5.58. Aksaray kilinde 50 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 163
Şekil 5.59. Aksaray kilinde 100 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 163
Şekil 5.60. Aksaray kilinde 200 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 164
Şekil 5.61. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri 164
Şekil 5.62. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açıları (^{0}) 165
Şekil 5.63. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 166
Şekil 5.64. Aksaray kilinde methanolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 166
Şekil 5.65. Aksaray kilinde ethanolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 167
Şekil 5.66. Aksaray kilinde izo-propil alkolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 167
Şekil 5.67. Aksaray kilinde asetik asitin %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 168
Şekil 5.68. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan bir numune üzerinde yapılan üç eksenli deneyi sonrasında numunenin görünümü 168

Şekil 5.69. Kaolinitte saf su ve kimyasalların %20 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 172
Şekil 5.70. Kaolinitte saf su ve kimyasalların %40 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 173
Şekil 5.71. Kaolinitte saf su ve değişik kimyasalların %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 173
Şekil 5.72. Kaolinitte saf su ve değişik kimyasalların %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 174
Şekil 5.73. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri değişimi 174
Şekil 5.74. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri (Ø) 175
Şekil 5.75. Kaolinitte saf su için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 176
Şekil 5.76. Kaolinitte %80 methanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 176
Şekil 5.77. Kaolinitte %80 ethanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 177
Şekil 5.78. Kaolinitte %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 177
Şekil 5.79. Kaolinitte %80 asetik asit konsantrasyonundaki sıvı ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 178
Şekil 5.80. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %20 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 183
Şekil 5.81. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %40 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 183
Şekil 5.82. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 184
Şekil 5.83. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları 184
Şekil 5.84. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri değişimi 185
Şekil 5.85. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri (Ø) 185
Şekil 5.86. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde

yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 186
Şekil 5.87. Aksaray kilinde %80 methanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 187
Şekil 5.88. Aksaray kilinde %80 ethanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 187
Şekil 5.89. Aksaray kilinde %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 188
Şekil 5.90. Aksaray kilinde %80 asetik asit konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri 188
Şekil 5.91. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deneyinde elde edilen ortalama kohezyon (c_{ort}) değerleri 191
Şekil 5.92. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deneyinde elde edilen ortalama kohezyon (c_{ort}) değerleri 193
Şekil 5.93. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri (C_c) değişimi 198
Şekil 5.94. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş şişme indisi değerleri (C_s) değişimi 198
Şekil 5.95. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin(C_c) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi 199
Şekil 5.96. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş şişme indisi değerlerinin(C_s) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi 199
Şekil 5.97. Kaolinitte methanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 208
Şekil 5.98. Kaolinitte ethanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 209
Şekil 5.99. Kaolinitte izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 209
Şekil 5.100. Kaolinitte asetik asitin değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 210
Şekil 5.101. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 210
Şekil 5.102. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvılarının %40 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 211
Şekil 5.103. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 211
Şekil 5.104. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 212

Şekil 5.105. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için başlangıç boşluk oranlarının (0 kPa) dielektrik sabiti ile değişimi 214
Şekil 5.106. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 25 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 214
Şekil 5.107. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 50 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 215
Şekil 5.108. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 100 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 215
Şekil 5.109. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 200 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 216
Şekil 5.110. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 400 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 216
Şekil 5.111. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri (C_c) değişimi 220
Şekil 5.112. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş şişme indisi değerleri (C_s) değişimi 221
Şekil 5.113. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin(C_c) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi 221
Şekil 5.114. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş şişme indisi değerlerinin(C_s) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi 222
Şekil 5.115. Aksaray kilinde methanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 229
Şekil 5.116. Aksaray kilinde ethanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 229
Şekil 5.117. Aksaray kilinde izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 230
Şekil 5.118. Aksaray kilinde asetik asitin değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 230
Şekil 5.119. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 231
Şekil 5.120. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %40 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 231
Şekil 5.121. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen 232

e-logP grafikleri
Şekil 5.122. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri 232
Şekil 5.123. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için başlangıç boşluk oranlarının (0 kPa) dielektrik sabiti ile değişimi 234
Şekil 5.124. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 25 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 234
Şekil 5.125. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 50 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 235
Şekil 5.126. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 100 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 235
Şekil 5.127. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için 200 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 236
Şekil 5.128. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 400 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi 236
Şekil 5.129. Kaolinitte saf su varlığında taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 238
Şekil 5.130. Kaolinitte % 20 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 238
Şekil 5.131. Kaolinitte % 40 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 239
Şekil 5.132. Kaolinitte % 60 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 239
Şekil 5.133. Kaolinitte % 80 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 240
Şekil 5.134. Kaolinitte % 20 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 241
Şekil 5.135. Kaolinitte % 40 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 241
Şekil 5.136. Kaolinitte % 60 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 242
Şekil 5.137. Kaolinitte % 80 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 242
Şekil 5.138. Kaolinitte % 20 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 243
Şekil 5.139. Kaolinitte % 40 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 244
Şekil 5.140. Kaolinitte % 60 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 244
Şekil 5.141. Kaolinitte % 80 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 245

Şekil 5.142. Kaolinitte % 20 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 246
Şekil 5.143. Kaolinitte % 40 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 246
Şekil 5.144. Kaolinitte % 60 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 247
Şekil 5.145. Kaolinitte % 80 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 247
Şekil 5.146. Aksaray kilinde saf su varlığında taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 249
Şekil 5.147. Aksaray kilinde % 20 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 249
Şekil 5.148. Aksaray kilinde % 40 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 250
Şekil 5.149. Aksaray kilinde % 60 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 250
Şekil 5.150. Aksaray kilinde % 80 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 251
Şekil 5.151. Aksaray kilinde % 20 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 252
Şekil 5.152. Aksaray kilinde % 40 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 252
Şekil 5.153. Aksaray kilinde % 60 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 253
Şekil 5.154. Aksaray kilinde % 80 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 253
Şekil 5.155. Aksaray kilinde % 20 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 254
Şekil 5.156. Aksaray kilinde % 40 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 255
Şekil 5.157. Aksaray kilinde % 60 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 255
Şekil 5.158. Aksaray kilinde % 80 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 256
Şekil 5.159. Aksaray kilinde % 20 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 257
Şekil 5.160. Aksaray kilinde % 40 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 257
Şekil 5.161. Aksaray kilinde % 60 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 258
Şekil 5.162. Aksaray kilinde % 80 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü 258
Şekil 6.1. Kaolinitte parçacıklar arası mesafenin 0,003μm olması durumu için fiziko-kimyasal kuvvetlerin dielektrik sabiti ile değişimi (Zhao 1996) 274
Şekil 6.2. Kaolinitte parçacıklar arası mesafenin 0,001μm olması durumu için fiziko-kimyasal kuvvetlerin dielektrik sabiti ile değişimi (Zhao 1996) 274

Şekil 6.3. Kalsit ($CaCO_3$) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda kalsiyum asetat ($Ca(CH_3CO_2)_2$) oluşumunun açık yapısal gösterimi 281
Şekil 6.4. Dolomit $MgCa(CO_3)$ ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda magnezyum asetat ($Mg(CH_3CO_2)_2$) oluşumunun açık yapısal gösterimi 282
Şekil 6.5. Demir-oksit (Fe_2O_3) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda oluşan açık yapının gösterimi 282
Şekil 6.6. Alüminyum-oksit (Al_2O_3) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda oluşan açık yapının gösterimi 282
Şekil 6.7. Kaolinitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitinin kuvvet bariyeri üzerindeki etkileri 288
Şekil 6.8. Boşluk sıvılarının dielektrik sabiti değişimi ile birlikte montmorillonitin etkileşim enerjisi değişimi (Chen 1996) 290
Şekil 6.9. Farklı kimyasal sıvılar bulunması durumunda kaolinit için Hamaker sabiti değişimi 302
Şekil 6.10. Boşluk sıvılarının dielektrik sabiti değişimi ile birlikte kaolinitin etkileşim enerjisi değişimi (Chen 1996) 304
Şekil 6.11. Farklı kimyasal sıvılar bulunması durumunda montmorillonit için Hamaker sabiti (A) değişimi 312
Şekil 6.12. Montmorillonitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitinin kuvvet bariyeri üzerindeki etkileri (Chen 1996) 314

1.GİRİŞ

Günümüzün gelişen teknolojisi ile birçok alanda değişik gelişmeler yaşanmaktadır. Artan nüfus ve şehirleşme oranına bağlı olarak değişik kimyasallarla kirletilmiş, kullanıma uygun olmayan, problemli olabilecek pek çok alan yerleşim yeri haline getirilmektedir. Ayrıca çeşitli amaçlarla yapılmış dolgular ve katı atık depolama tesislerindeki kil bariyerleri, depo içerisindeki atıkların bozuşmasından oluşan organik kimyasal sıvılar etkisinde kalabilmektedir. Yine endüstri kuruluşlarının bulunduğu sahalarda çeşitli nedenlerle kimyasal malzemelerin zemine sızıp suyla karışarak killerin davranışını değiştirmesi söz konusudur. Bu yüzden herhangi bir kimyasalın etkisi altında kalma ihtimali olan zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi o bölgelerde sanayi tesisi, konutlar, su yapıları, su altı yapıları ve otoyollar gibi mühendislik yapıları yapıldığında zeminlerin nasıl bir davranış sergileyeceği hakkında fikir vermesi açısından önemlidir.

Kimyasal sıvılarla karşılaşılan alanlardan en önemlileri katı atık depoları ve toplama havuzlarının taban şilteleri, maden işleme havuzları, Örneğin; altın işlemek için arsenik kullanımı ve bu suların biriktirildiği toplama havuzları gibi alanlardır. Buralarda sıkıştırılmış kil tabakaları, tehlikeli ve diğer sıvı atık maddelerin çevreye yayılmasını önlemek için geçirimsizlik tabakası olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Depolama alanlarındaki katı atıklar zamanla fiziksel, kimyasal ve biyolojiksel reaksiyonlar sayesinde sıvı bir çözelti haline gelebilmektedir. Bu çözeltiler içerilerinde bulunan su miktarına bağlı olarak çeşitli konsantrasyonlarda olabilmektedirler. Oluşan bu kimyasal çözeltiler çok küçük hidrolik eğimler altında bile kil tabakaları içerisine nüfuz edebilmekte temel altı zeminine ve yer altı suyuna karışabilmektedir. Böylelikle temel altı zemininde bulunan kil tabakalarının yapısını ve mühendislik davranışlarını da değiştirmektedirler. Birçok araştırmacı, organik kimyasal sıvıların sıkıştırılmış kil şilteleri etkilediğini, örtü malzemesinin bariyerlik (geçirimsizlik) özelliğini yok ettiğini söylemiştir. Kimyasal sıvılarla temasta olan sıkıştırılmış kil tabakalarının özelliklerini koruması önemli bir konudur. Bu sebeple kil ve kimyasal sıvı arasındaki kimyasal reaksiyonun kilin sıkışma ve mukavemetindeki değişime olan etkisinin incelenmesi önem kazanmıştır.

Çevreye zararlı birçok endüstri kuruluşu ve fabrika herhangi bir önlem alınmaksızın zeminler üzerine inşa edilmektedir. İnşa edilen bu fabrikalardan zamanla bilinçli veya bilinçsiz olarak bir kısım kimyasal atıklar mevcut yapı altındaki zemine sızabilmektedir. Zemine sızan bu kimyasal sıvılar boşluklardaki su ile yer değiştirmekte veya suya karışmaktadır. Kimyasal sıvıların etkisiyle mevcut zeminin permeabilite başta olmak üzere sıkışma ve mukavemet gibi özelliklerinde birtakım değişimler olmaktadır. Böylelikle zemin başlangıçta göstermiş olduğu davranıştan daha farklı bir davranış sergilemeye başlamaktadır. Özellikle aynı yapı altında zeminin bir kısmının kimyasal sıvıya maruz kalması bir kısmının ise kalmaması gibi bir durum gerçekleşmişse aynı yapı altında farklı davranış sergileyen iki değişik zemin yapısı ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise zeminde farklı oturma ve farklı taşıma gücü durumlarının ortaya çıkmasına, dolayısıyla da üst yapının zarar görmesine sebep olacaktır. Bu nedenle zemine kimyasal sıvıların sızma ihtimalinin olduğu yerlerde, bu sıvıların varlığında özellikle killi zeminin mühendislik ve indeks özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi önemlidir. Bugün için önemi yeterince bilinmeyen bu konu gelecekte belki de önemli bir problem olarak karşımıza çıkacaktır.

Bir başka önemli konu ise, kimyasal sıvıların etkisi ile kirlenmiş bir killi zeminin nasıl bir yapısal değişikliğe uğradığı ve bu haliyle yeniden dolgu ve inşa malzemesi olarak kullanıldığında ortaya koyacağı davranışın araştırılmasıdır. Böylelikle kirlenmiş zeminlerin yeniden kullanılabilir hale getirilip getirilemeyeceği konusu önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Doğadaki zeminleri meydana getiren elemanlar arasında üzerinde en fazla durulması gerekeni killerdir. Killi zeminler parçacık yüzey kuvvetleri dolayısıyla kohezyonsuz zeminlerden farklı davranış sergilemektedirler. Boşluk sıvısı tipi kohezyonsuz kum zeminlerin davranışı üzerinde hemen hemen hiçbir etkiye sahip değilken, kil zeminlerin mühendislik özellikleri boşluk sıvılarının fiziko-kimyasal karakteristikleri ile yakından alakalıdır. Tanecik boyutunun azalması ile birlikte, spesifik yüzey alanları artmakta ve böylece yüzey kuvvetleri etkili olmaktadır. Kil zeminlerin mühendislik davranışı üç faktör tarafından kontrol edilmektedir:

1- Kil mineralinin yapısal karakteristikleri, negatif yüzey yük yoğunluğu, spesifik yüzey alanı ve parçacıkların uzunluk ve kalınlıkları.

2- Boşluk sıvısının yapısal karakteristikleri, dielektrik sabiti değişimleri veya elektrolit değerliği ve konsantrasyonu.
3- Parçacıkların düzeni veya zemin dokusu.

Kil mineralleri kimyasal yapılarından dolayı yüzeylerinde negatif, kenarlarında ise pozitif yükler taşırlar. Kil mineralleri yüzeyindeki negatif yükün etkisiyle zemin boşluklarında bulunan zemin suyu içerisindeki katyonlar kil yüzeyine doğru çekilirler. Bu katyonlar kil yüzeyine sıkıca yapışmazlar boşluk sıvısının karakteri değiştiği zaman kolayca başka sıvılarla yer değiştirebilirler.

Killi zeminlerin davranışını etkileyen fiziko-kimyasal kuvvetler; diffüz çift tabaka itme kuvvetleri ve Van der Walls çekme kuvvetleridir. İki kil minerali yan yana geldiği zaman çift tabakadaki benzer yüklerden dolayı bir itme kuvveti, aynı zamanda Van der Walls kuvvetlerinden dolayı bir çekme kuvveti oluşur. Bu her iki itme ve çekme kuvvetleri tanecikler arasındaki mesafe azaldıkça değişen oranlarda artarlar. Kil tanecikleri arasındaki mesafe çok küçük olduğu zaman çekme kuvveti itme kuvvetinden fazla olmaktadır. İki kil taneciği birbirine çok yakınsa uçlardaki pozitif yükler ile yüzeydeki negatif yükler bir çekme oluştururlar.

Zemin ile kimyasal sıvı arasındaki elektriksel çekim dolayısıyla aralarındaki etkileşimi belirleyen önemli faktörlerden biri sıvının dielektrik sabitidir. Suyun dielektrik sabiti 80,4'tür. Düşük dielektrik sabitine sahip sıvılar, kil tanecikleri etrafındaki çift tabaka kalınlığının azalmasına veya yok olmasına sebep olmaktadır. Kil tanecikleri etrafındaki çift tabakanın azalmasından dolayı sıvının geçtiği boşluk hacminde bir artış, tanecikler arasındaki itici kuvvetlerde de bir azalma meydana gelmektedir. Bunun sonucunda da tanecikler birbirine daha fazla yaklaşmakta yani flokülasyona uğramaktadır. Flokülasyona uğrayan bu taneciklerin arasındaki boşlukların artması ile permeabilite değerleri aşırı şekilde artmakta ve dış basınç altındaki zeminler ani bir oturma göstermektedirler. Kimyasal sıvılar varlığında adeta kohezyonsuz zemin gibi ani oturma davranışı gösteren zeminler konsolidasyona tabii tutulduklarında ise daha az sıkışma göstermektedirler.

Zeminlerle temas halinde bulunan değişik kimyasal sıvıların en önemli etkilerinden biri de zeminlerin mukavemet davranışlarında meydana getirdikleri değişikliklerdir. Kimyasal sıvıların etkisiyle dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak kil parçacıkları arasındaki itme ve çekme kuvvetleri büyüklüklerinde değişiklikler

meydana gelmektedir. Eğer bir sıvı itme bariyerlerindeki kuvveti azaltırsa verilen bir dış basınç altında parçacıklar arasında mekaniksel bir temas kurulacaktır. Böylece sistemdeki mekaniksel temasların toplam sayısı artacak ve bu artış mevcut basınçtan daha büyük olan ön konsolidasyon basıncının neden olduğu mekaniksel kontaktların sayısındaki artışa benzeyecektir. Yani değişik kimyasal sıvılar numunelerin aşırı konsolide olmuş gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu durumda numunelerin kayma mukavemeti değerleri de artacaktır. Kimyasal sıvıların varlığında artan konsantrasyona bağlı olarak kayma mukavemeti üzerinde kohezyon yerine içsel sürtünme açısı daha belirleyici bir rol oynamaktadır. Yani killer sanki kohezyonsuz bir zemin gibi davranmaktadırlar.

Günümüze kadar pek çok araştırmacı kimyasal sıvıların etkisi ile kil zeminlerin davranışları üzerinde meydana gelen değişikliklerle ilgili çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak kimyasal sıvıların etkisi ile killerin permeabilitelerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesi şeklinde başlamış olup, son zamanlarda ise tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerin araştırılması, killerin sıkışma ve mukavemet davranışlarının araştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Zemin-sıvı sistemlerinde kil taneciklerin yapısının ve geometrisinin çok değişken, boşluk sıvılarının özelliklerinin çok farklı, numune hazırlama sistemlerinin sonuçlar üzerinde çok etkili olması gibi sebeplerle elde edilen sonuçlar da farklılıklar göstermektedir. Teorik olarak özellikle diffüz çift tabaka itme kuvvetleri ve Van der Walls çekme kuvvetleri ilkeleri üzerine oturtulan temeller, deneysel çalışmalar açısından yukarıda bahsedilen değişkenler yüzünden hala açık olarak anlaşılamamıştır ve bazı durumlarda tartışmalıdır.

Bu tez çalışmasının amacı; kimyasal sıvılar varlığında kil tanecikleri arasında oluşan fiziko-kimyasal kuvvetlerin etkisi ile zeminlerin kayma mukavemeti ve konsolidasyon davranışlarında nasıl bir değişikliğin meydana geldiğinin araştırılmasıdır. Bu konuda literatürde çok kapsamlı bir çalışma yapılmamış olup, yapılan çalışmalar ise sadece saf kimyasal sıvıların etkisini gözlemlemek için olmuştur. Bu amaçla farklı mineralojiye sahip iki kil türü seçilmiş, dielektrik sabitleri farklı 4 adet kimyasal sıvı seçilerek bunların değişik konsantrasyonları için bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında sabit yük altında (100 kPa) farklı iki kil zeminin değişik konsantrasyonlardaki kimyasallarla konsolide edilmesi suretiyle

hazırlanan numunelerden örnekler alınmıştır. Alınan bu örnekler üzerinde kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere üç eksenli, serbest basınç, kesme kutusu ve Vane (kanatlı kesme) deneyleri yapılarak kimyasal sıvıların zeminlerin kayma mukavemetinde ve dolayısıyla taşıma gücünde nasıl bir değişiklik meydana getirdiği araştırılmıştır. Zeminlerin sıkışma davranışlarını belirleyebilmek için ise konsolide edilmiş numunelerden alınan örnekler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Tez çalışması 7 bölüm olup, ilk bölümü Giriş ve son bölümü de Sonuçlar ve Öneriler şeklinde düzenlenmiş olup, 2. bölümde geçmişte diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların bir özeti verilmiştir. Bu özetler a) kimyasal sıvıların killerin yapısal ve indeks özellikleri üzerindeki etkileri b) kimyasal sıvıların mukavemet, sıkışma ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkileri olmak üzere iki kısım altında incelenmiştir.

Tez çalışmasının 3. bölümünde deneysel çalışmalara temel teşkil eden teorik bilgiler verilmiştir. Zeminlerde bulunan kil minerallerinin çeşitleri, davranışları ve özellikleri bu bölümde anlatılmıştır. Kil minerallerinin su ile olan etkileşimleri ve boşluk sıvısı su yerine başka bir kimyasal sıvı olduğu zaman bu etkileşimin nasıl değiştiği üzerinde durulmuştur. Kil tanecikleri arasında boşluk sıvısına bağlı olarak tanecikler arasında oluşan diffüz çift tabaka itme kuvvetleri ve Van der Walls çekme kuvvetleri değişimi bu bölümde anlatılmıştır. Yine bu bölümde daha önceki araştırmacılarca bulunan ve tanecikler arasındaki kuvvetlerin değişimini gösteren grafiksel sonuçlar verilmiş olup tez çalışması kapsamında bulunan sonuçlar bu grafiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4. bölümde deneysel çalışmada kullanılan iki farklı kil tipi ve 4 farklı kimyasal malzemenin özellikleri verildikten sonra, deneysel çalışma için numunelerin hazırlanmasında laboratuarda kullanılan ve sanayi destekli olarak hazırlatılan ön konsolidasyon cihazları anlatılmıştır. Daha sonra ise deneysel yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır.

5. bölümde deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir. İlk olarak her iki kil türü için farklı iki yöntem (Casagrande ve düşen koni penetrasyon) kullanılarak bulunan Atterberg limit deney sonuçları karşılaştırmalı olarak grafiklerle verilmiştir. Daha sonra ise kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere

yapılan serbest basınç, üç eksenli basınç, kesme kutusu ve vane deney sonuçları ve sıkışma sonuçlarını göstermek üzere konsolidasyon deney sonuçları kapsamlı olarak verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar 3. bölümde açıklanan teorik sonuçlarla kıyaslanarak yorumlanmıştır. Bu bölümün sonunda ise kayma mukavemeti ve konsolidasyon deney sonuçlarının teorik olarak yorumlanmasında bir ön fikir vermesi amacıyla süspansiyon şeklinde hazırlanan numuneler kullanılarak optik mikroskopla elde edilen fotoğraf görüntüleri verilmiştir.

Tez çalışmasının 6. bölümünde ise deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar kısım kısım değerlendirilerek sonuçlar tartışılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar teorik olarak açıklanmış, literatürdeki çeşitli çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bulunan deneysel çalışma sonuçlarına göre; kaolinitte (düşük plastisiteli) Atterberg limitleri kimyasal sıvıların etkisi ile artış gösterirken, Aksaray kilinde (yüksek plastisiteli) kimyasal sıvıların etkisi ile diffüz çift tabakanın göçmesi dolayısıyla Atterberg limiti değerleri azalmıştır. Genel olarak her iki kilde de kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ve azalan dielektrik sabiti ile birlikte mukavemet değerlerinde bir artış olmuştur. Bu artış kaolinitte asetik asit varlığında ve Aksaray kilinde methanol varlığında beklenen değerlerden farklı bulunmuştur. Ön konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde sıkışma miktarının ve sıkışma indisi değerlerinin azaldığı bulunmuştur. Bu değişim Aksaray kilinde kaolinite göre daha belirgindir. Yüksek plastisiteli Aksaray kili içerisinde bulunan montmorillonit ve sepiyolit minerallerinin kilin davranışı üzerinde etkili olduğu ve bundan dolayı boşluk sıvısının değişimi ile killerde meydana gelen davranış değişimlerinin kaolinite göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Numunelerin optik mikroskopla elde edilen görüntüleri de kimyasal sıvıların varlığında tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimini ve taneciklerin flokülasyonunu göstermesi açısından önemli olmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Geoteknik mühendisliğinde kil-kimyasal sıvı etkileşiminde kil zeminlerin nasıl bir davranış sergileyeceği ile ilgili yapılan çalışma ve araştırmalar literatürde genellikle iki farklı başlık altında incelenmektedir. Yapılan deneysel çalışmaların bir kısmında özellikle farklı dielektrik sabitine sahip değişik kimyasal sıvıların ve farklı molaritede hazırlanmış tuz çözeltilerinin etkisi altında kil taneciklerinin yapısında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Bu sıvıların etkisi ile kil tanecikleri arasında itme ve çekme kuvvetleri ile indeks özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Deneysel çalışmaların diğer bir kısmı ise değişik organik kimyasal sıvılar ve tuz çözeltilerinin etkisi altında zeminlerin mukavemet, sıkışabilirlik ve hidrolik geçirgenlik gibi davranışlarının değişiminin incelenmesi şeklinde olmuştur. İlk olarak özellikle geçirimsizlik şiltelerinde kullanılan killerin kimyasal sıvılardan nasıl etkilendiğinin belirlenmesi şeklinde başlayan araştırmalar daha sonraları bu sıvıların etkisi altındaki killerin mukavemet, sıkışabilirlilik ve yapısal değişikliklerinin incelenmesi şeklinde devam etmiştir.

Daha önceki araştırmacılarca yapılan çalışmalar tez çalışması kapsamında organik kimyasal sıvıların killerin indeks ve yapısal özellikleri üzerindeki etkileri ve mukavemet, sıkışabililik, geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkileri olmak üzere iki başlık altında özetlenerek sunulacaktır.

2.1. Organik Kimyasal Sıvıların Killerin Yapısal ve İndeks Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar

Lambe (1958b), sıkıştırılmış zeminlerde yaptığı çalışmalar sonrasında; düşük su muhtevasında kil zerreleri arasında çekme kuvvetlerinin baskın durumda olduğunu, pozitif yüklü kenarların negatif yüklü yüzeyleri çekerek kenar – yüzey temaslı bir floküle doku meydana getirdiğini söylemiştir. Su muhtevasını arttırdıkça itici kuvvetlerin baskın duruma geçerek zeminin optimum su muhtevası civarında kil

zerreciklerinin daha paralel bir yönlenme gösterdiği, optimum su muhtevası geçildikten sonra yani ıslak tarafta ise zeminde dispers bir doku oluştuğu ifade edilmiştir.

Michaels (1959), kil kümelerin topaklanmasının mikroyapısal görünümü için iki muhtemel mekanizma üzerinde durmuşlardır;

a) Kümeler ferdi olarak büzülür ve statikçe üniform olarak dağılmış kümeler arasındaki boşluk alanlarında bir genişleme ile sonuçlanır.

b) Ferdi olarak kümecikler büzülür ve lokal olarak yerleşmiş birkaç çatlak oluşur.

Mitchell (1960), kaolinitte çift tabaka teorisinin önemli olmayışının sebebini kaolinitin geniş parçacık boyutuna bağlamıştır. Kaolinit parçacıklarının düzensiz ve yüzeye set yapacak şekilde yerleştiği ve Bolt'un teorisindeki parçacıkların birbirine paralel olarak yerleşimi kabulüne uymadığı belirtilmiştir.

Horn ve Deere (1962), farklı sıvılar içerisine batırılan muskovit yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısını ölçmüşler ve su içerisinde bulunan sürtünme katsayısının nonpolar sıvılar içerisinde bulunanlarınkinden göze çarpıcı bir şekilde küçük olduğunu bulmuşlardır. Nonpolar sıvılar içerisinde ölçülen büyük sürtünme katsayılarının sistem içerisindeki büyük Van der Walls çekme kuvvetleri dolayısıyla olduğuna inanmışlardır. Adsorbe sıvı tabakalarının kalınlığının artmasının tanelerin ayrık durmasına ve sürtünmenin azalmasına sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Van Olphen (1964), tuz çözeltili bir sistem üzerinde çalışmıştır. Burada çekme kuvveti büyük ve itme kuvveti küçüktür. Kaolinit parçacıkları kenar-yüzey pozisyonunda (floküle yapı) bir diğeri ile birleşmektedir ve kenar-yüzey çekimi negatif yüklü iki kaolinit parçacığı arasındaki yüzey-yüzey elektro statik itmeyi dengelemektedir. Araştırmacı eğer kenar-yüzey çekme kuvveti küçük ve kenar-kenar itme kuvveti büyükse çift-T düzeninin (matris yapı) bozulacağını ve yüzey-yüzey dağılmış yapısının oluşacağını belirtmiştir.

Olson ve Mesri (1970) ve Sridharan ve Rao (1973), çalışmaları sonucunda bentonitin davranışının fiziko-kimyasal etkiler tarafından, kaolinitin davranışının mekaniksel faktörler ve başlıca zemin yapısı tarafından kontrol edildiğini ve illitin ise arada bir pozisyonda davranış sergilediğini ifade etmişlerdir.

Mesri ve Olson (1971), zemin parçacıkları arasındaki çekme ve itme kuvvetindeki değişiklikler (sonuç olarak çekme kuvvetindeki net artış) ve diffüz çift tabakanın sıkışması nedeniyle zemin parçacıklarının küme formunu almasının makul karşılanabileceğini ve bu etkiler dolayısıyla boşluk sıvısı akım alanının arttığını söylemişlerdir.

Mitchell (1976), ortamın dielektrik sabitinin, sıcaklığının, elektrolit konsantrasyonunun ve katyon değerinin kil minerallerindeki diffüz (yayılmış) çift tabaka kalınlığına olan etkisini araştırmıştır. Dielektrik sabiti 80 den 30'a kadar azaldığı zaman kil üzerindeki net etkileşim kuvveti giderek çekici olur, dielektrik sabiti daha aşağılara indikçe net çekim kuvveti azalır. Yüksek aktiviteli zeminler büyük yüzey yük yoğunlukları olan bir kil içeriğine sahip olduklarından, bu değişimlerden aşırı derece etkilenirler. Bu etkileşim kuvvetlerindeki değişimler ve zeminin mikro yapısındaki değişikliklerden dolayı zeminin tüm geoteknik özelliklerinin de değiştiği belirtilmiştir.

Van Olphen (1977), Zemindeki en belirgin iki fiziko-kimyasal faktörün çift tabaka itme ve Van der Walls çekme kuvvetleri olduğunu ifade etmiştir. Çift tabaka teorisine göre çift tabaka kalınlığının dielektrik sabitinin karekökü ile orantılı olduğunu söylemiştir.

Brown ve Anderson (1983), sıkıştırılmış kilin konsantre kimyasal sıvıların etkisine maruz kaldığında, parçacıkların flokülasyona uğrayarak agrega şeklini aldığını ve bunun da makro gözenek ile büzülme çatlaklarının oluşumuna yol açtığını söylemişlerdir.

Bowders ve ark. (1985), organik sıvıların düşük dielektrik sabitlerinin zemin

parçacıklarının etrafındaki diffüz çift tabakanın daralmasına neden olduğunu, böylelikle de parçacıkların flokülasyonuna yol açtığını söylemişlerdir.

Foreman ve Daniel (1986), organik kimyasal sıvılarla permeabilite deneyine tabii tutulan sıkıştırılmış kilin permeabilitesindeki değişimlerin, kimyasal sıvıların etkileri sonucunda kil parçacıklarını çevreleyen yaygın çift tabakanın (double layer) kalınlığındaki bir azalmadan ve zemin yapısında ortaya çıkan bozulmalardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yazarlar çift tabaka kalınlığındaki değişimlerin aynı zamanda Atterberg limitlerini de etkileyebileceğini belirtmişler, bu amaçla çeşitli zemin ve organik kimyasallarla deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında heptan (ε=1,92) ve methanol (ε=33,6) kullanarak iki farklı kil (Hoytville kili ve Lufkin kili) üzerinde Atterberg limit deneyleri yapmışlardır. Hoytville kili illit, Lufkin kili simektit ağırlıklı olup her iki kil içinde heptan ile yapılan deneylerde ne likit ne de plastik limit değerleri bulunamamıştır. Hoytville kili/methanol karışımında ise saf suya göre likit limit ve plastisite indisi değerleri azalmış ve plastik limit değeri artmıştır. Lufkin kili/methanol karışımında ise kil non-plastik olmuştur.

Wasti ve Bezirci (1986), Casagrande ve düşen koni penetrasyon yöntemlerini kullanarak yapmış oldukları deneylerde sert tabanlı ASTM tipi Casagrande cihazı ve BS tipi koni penetrasyon cihazı (300/80g) kullanmışlardır. Yazarlar Türkiye'nin değişik bölgelerinden alınmış, likit limiti %27 ile %110 arasında değişen 15 adet doğal zemin üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda 13 numunede düşen koni penetrasyon yönteminden elde edilen sonuçların Casagrande yönteminden elde edilen sonuçlara göre %1 -%22 arasında daha yüksek değerler verdiğini ifade etmişlerdir.

Sridharan ve ark. (1986, 1988), diffüz çift tabaka itme kuvvetinin kaolinitik zeminlerde montmorillonitik zeminlere göre minimum düzeyde olduğunu söylemişlerdir.

Brutsaert (1987), daha önceki araştırmacılarca deneylerde kullanılan zemin mineralleri tipinin montmorillonit, illit, kaolinit ve bentonit olduğunu ve bunların

yüksek oranda kil mineralleri içerdiğini ifade etmiştir. Araştırmacı daha düşük kil yüzdesine ve plastisite indisine sahip (%44 kil, %53 silt, PI = %21) doğal deniz kili kullanarak düşen seviyeli permeametre setinde bu kili su, aseton, toulen ve metilen ile permeabilite deneyine tabii tutmuştur. Araştırmacı, bu kimyasallar ile kilin permeasyonu sonrasında, zeminin yapısında gözle görülür bir bozulmanın olmadığını belirtmiştir. Fakat çıkış sıvısındaki Fe, Mn, Al ve Silika gibi iyonların varlığının zeminlerin yapısında bir çözülmenin olduğunun en iyi göstergesi olacağını belirtmiştir.

Bowders ve Daniel (1987), tarafından kaolinit ve illit-klorit içerikli killer üzerinde saf heptan ve TCE ile yapılan deneylerde killer granüler hale gelmişler ve bundan dolayı zeminler için plastik limit değerleri belirlenememiştir. Asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yaptıkları deneylerde ise likit limit değerlerinin değişkenlik gösterdiğini fakat plastisite indisi değerlerinin artan konsantrasyonla birlikte azaldığını bulmuşlardır. Araştırmacılara göre eğer kimyasal sıvılar killerin çift tabaka kalınlığını azaltırsa Atterberg limitleri de değişecektir.

Acar ve Olivieri (1990), likit limit değerinin fiziko-kimyasal faktörlere bağlı olduğunu ve boşluk sıvısı yoğunluğu gibi mekaniksel faktörlerin likit limit değeri üzerinde daha az derecede etkili olduklarını söylemişlerdir.

Wienberg (1990), bulamaç içerisindeki kil parçacıklarının diffüz çift tabaka kalınlığının azalmasının aslında tanecikler arasındaki iç tabaka alanlarının azalmasına neden olduğunu, bunun da flokülasyon ve agregasyon olayıyla sonuçlandığını söylemiştir. Böylelikle parçacık boyutlarının büyüyerek zeminin kilden ziyade daha çok silt gibi davrandığını belirtmiştir.

Pamukçu ve ark. (1990), petrolle kirletilmiş zeminlerin bir yapı malzemesi olarak kullanabilirliliğini araştırmışlardır. Bu malzemelerin otoyol yapıları, yapı dolguları, dolgu baraj gövdesi ve diğer zemin yapılarında temel ya da altyapı malzemesi olarak yeniden kullanımı hakkında bilgi vermişlerdir.

Mitchell ve Jaber (1990) ve Shackelford (1994), kaolinitin bentonit gibi daha yüksek aktiviteye sahip kil mineralleri ile karşılaştırıldığında, daha fazla hidrolik geçirgenliğe sahip olmakla beraber daha büyük kimyasal dirence, daha iyi sıkışabilirliliğe sahip olacağını söylemişlerdir. Aynı zamanda kaolinitin kurumanın neden olduğu çatlama olayına karşı daha az duyarlı olup ve böylece daha iyi uzun dönem performansı göstereceğini söylemişlerdir.

Christaras (1991), Yunanistan'ın Girit bölgesinden alınmış ve likit limiti %27 ile %58 arasında değişen 24 adet marn örneği üzerinde Casagrande (sert tabanlı) ve düşen koni penetrasyon yöntemlerini (60^0/60g) kullanarak deneyler yapmıştır. Bu sonuçlara göre; 3 örnekte her iki yöntemle yapılan deneyler aynı sonucu verirken, 2 örnekte Casagrande yöntemi ile yapılan deneylerde bulunan sonuçlar düşen koni penetrasyon yöntemindekilere göre %1 daha büyük sonuçlar vermiştir. Geriye kalan 19 örnekte ise düşen koni penetrasyon yönteminde bulunan değerler Casagrande yöntemindekilere göre %1 - %6 arasında daha yüksek bulunmuştur.

Moore (1991), kil parçacıklarının herhangi bir sıvı ile temas kurması durumunda elektriksel yük dengesini sağlamak üzere bu parçacıkların yüzeyinde bir iyon tabakası oluştuğunu ve oluşan bu tabakadaki katyonların konsantrasyonunun kil mineral yüzeylerinden uzaklaştıkça azaldığını ifade etmiştir. Bu tabakaların doğasının ve özelliklerinin mineral tipi ve boşluk suyunun kimyasına bağlı olduğunu söylemiştir.

Aynı araştırmacı kil tabakalarının etrafındaki diffüz çift tabakanın killerde var olan plastisite, kohezyon ve şişme olaylarının nedeni olduğunu belirtmiş, çift tabakalar ve şişme nedeniyle mineral ve parçacıklarının arasındaki temasların azalarak kilin sürtünme özelliklerinin düştüğünü ifade etmiştir.

Mitchell (1993), çift tabaka teorileri üzerinde çalışmıştır. Buna göre; akışkanın dielektrik sabitindeki bir azalma çift tabaka kalınlığının azalmasına sebep olmakta ve bu da kil parçacıklarının birbirlerine daha da yaklaşmasını sağlamaktadır. Bu durum zemin yığınlarının büzülmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda

permeabilitenin artışıyla sonuçlanmaktadır. Yine aynı yazar bir açık – floküle yapının dispers yapıdan daha büyük kayma mukavemeti, sıkışabilirlilik ve permeabiliteye sahip olacağını da söylemiştir.

Meegoda ve Ratnaweera (1994), zeminlerin likit limitini kontrol eden mekaniksel ve fiziksel faktörler üzerine çalışmışlardır. Boşluk sıvısının su yerine başka bir organik sıvı olması durumunda boşluk sıvısının viskozite gibi özelliklerinin likit limit üzerinde etkili olabileceğini ifade etmişlerdir. Düşük dielektrik sabiti nedeniyle fiziko-kimyasal faktörlerin kilin granüler bir malzeme gibi davranmasına ve likit limit değerinin azalmasına neden olduğunu söylemişlerdir.

Lide (1995), yaptığı çalışmalar sonucunda organik sıvı ve hava arasındaki içsel çekme kuvvetinin su ve hava arasındakinden daha büyük olduğunu söylemiştir. Bu durumda kuru haldeki kil tanelerinin kimyasal sıvılar içerisinde ıslatılması halinde zemin taneleri içerisinde tutulan hava miktarının, aynı sıkılıktaki kuru kil tanelerinin su içerisinde bulunması durumunda zemin taneleri arasında tutulan hava miktarından büyük olacağını ifade etmiştir.

Yine aynı yazar yaptığı çalışmalar sonucunda organik kimyasal sıvıların dielektrik sabitlerini vermiştir. Non polar sıvılar içerisindeki çift tabaka kalınlıklarının yaklaşık olarak suyun içindekinin %15'i olduğunu söylemiştir. Üstelik non polar sıvılar içerisindeki inorganik tuzların çözünürlüğünün birçok büyüklük diziliminde su içerisindekinden daha küçük olduğunu ifade etmiştir.

Zhao (1996), kaolinit kili üzerinde su içerisinde çözünebilen farklı kimyasal sıvılar varlığında yapmış olduğu deneylerde dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte kaolinit kilinin likit limit değerinin arttığını bulmuştur. Zhao, saf su ile kaolinit kili üzerinde yaptığı likit limit deneyinde likit limit (LL) değerini %58 bulmuştur. Dielektrik sabiti ε=24,3 olan ethanol ile yapmış olduğu deneylerde likit limit değerini %68 bulmuştur.

Araştırmacı ethanol içerisine %5 saf su karıştırarak yapmış olduğu deneyde ise likit limit değerini %73 bulmuştur. Araştırmacı bu artışı şu şekilde izah etmiştir; %5 miktarındaki su hem parçacık yüzeyleri yakınında bulunan iyonlar hem de

tampon bölgede bulunan ethanol tarafından çekilmektedir. Suyun hem iyonlar hem de ethanol tarafından çekilmesinden dolayı parçacık yüzeyindeki iyonlar ve ethanol birbirini itmekte ve su molekülleri tampon çözelti içerisinden parçacık yüzeylerine doğru çekilmektedir. Böylece kaolinit tanecikleri tarfından daha fazla su tutulmakta ve likit limit değeri de artmış olmaktadır.

Kaya ve Fang (2000), organik sıvılar ve kil etkileşiminin doğasını anlamak için organik sıvıların varlığında bentonit, kaolinit ve bir yerel zemin üzerinde yaptıkları deneylerde; kaolinitte, boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile likit limit (LL) değerinin arttığını, plastisite indisi değerinin (PI) hemen hemen aynı kaldığını bulmuşlardır.

Bentonitte organik sıvıların kullanılması ile likit limit değerinde önemli miktarda azalma olmuş, yerel zeminde ise düşük plastisitesi nedeniyle plastik limitinin (PL) belirlenmesi mümkün olmamıştır. Yazarlar, zeminlerin likit limitindeki azalmayı, parçacıklar arasındaki itme kuvvetlerinin önemli miktarda azalması ve dolayısıyla çekme kuvvetlerindeki net artış ile diffüz çift tabakanın göçmesine bağlamışlardır.

Araştırmacılar tüm zeminlerde dielektrik sabitindeki azalma ile katyon değiştirme kapasitesinin (CEC) azaldığını, bu azalmanın etkisinin bentonitte kaolinittekinden daha fazla olduğunu söylemişlerdir.

Araştırmacılar yüzey yük yoğunluğu ve boşluk sıvısının dielektrik sabiti arasında bir doğru orantının olduğunu, dielektrik sabitinin azalmasıyla yüzey yük yoğunluğunun sıfıra yaklaştığını ve zeminin flokülasyona açık hale geldiğini söylemişlerdir.

Araştırmacılar, boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması durumunda zeta potansiyelinin (ζ) sıfıra yaklaştığını, zeta potansiyelindeki bir azalmanın parçacık itme kuvvetleri ve diffüz çift tabaka kalınlığında bir azalmaya, dolayısıyla zemin parçacıklarının flokülasyonuna (=topaklanma) yol açtığını söylemişlerdir.

Yazarlar organik sıvıların varlığında iki silika minerali arasındaki itme ve çekme kuvvetlerinin her ikisinin birden azaldığını, fakat itme kuvvetlerindeki azalmanın çekme kuvvetlerindeki azalmadan daha büyük olduğunu bu yüzden iki silika parçacığı arasında net bir çekme kuvveti oluştuğunu belirtmişlerdir.

Sridharan ve ark. (2000), boşluk sıvısı kimyasının değişimine bağlı olarak kaolinit ve montmorillonit killeri için likit limit ve sedimant hacminin değişimini incelemişlerdir. Araştırmacılar kaolinitte dielektrik sabitindeki artışla likit limit ve sedimen hacminin azaldığını, boşluk ortamındaki iyon konsantrasyonu ve katyon değerliği artışı ile birlikte ise kenar-yüzey floküle yapısının oluşarak likit limit değeri ve sedimant hacminin arttığını belirtmişlerdir. Montmorillonitik zeminlerde ise dielektrik sabitindeki artışla likit limit değeri ve sedimant hacminin arttığını, iyon konsantrasyonu ve katyon değerliğindeki artışla birlikte ise bu değerlerin azaldığını belirtmişlerdir.

Tremblay ve ark. (2002), 13 farklı organik sıvının, %10 çimento katkılı farklı iki zemin üzerindeki etkilerini gözlemlemek için bu organik sıvıları zeminlere ayrı ayrı uygulamışlardır. Deneyde kullanılan kimyasal sıvılardan etilen glikol suda çözünebilen bir alkol olup, kil minerallerinin çift tabakasının göçmesine ve boşluk boyutunun büyümesine neden olmuştur.

Araştırmacılar pek çok hidrokarbonların suda çözünemediğini (gazyağı vb.) fakat xylene ve toluen gibi bazılarının etkilerinin özellikle dikkate değer olduğunu söylemişlerdir. Hidrokarbonların çimento taneciklerini kaplamaya meyilli olduğunu, böylece onların hidrasyonunu ve sonuçta priz süresini ertelediğini, buna rağmen nihai mukavemeti önemli derecede etkilemediğini söylemişlerdir. Etilen glikol gibi bu hidrokarbonların da kilin çift tabakasının göçmesine neden olduğu, böylece organik sıvı ile işleme giren zeminin permeabilitesini artırdığı ifade edilmiştir.

Kaya ve Fang (2005), organik sıvıların varlığında zemin yapısındaki değişiklikleri incelemek için optik mikroskop (OM) kullanmışlardır. Su (ε=80) ile oluşturulan süspansiyonlardan elde edilen fotoğraflar incelendiğinde hem kaolinit hem de bentonit parçacıklarının dağıldığı ve kil parçacıkları arasında hemen hemen görülebilir bir etkileşimin olmadığını, diğer taraftan boşluk sıvısı olarak methanol (ε=33,6) kullanıldığı zaman kaolinit parçacıkları kısmen yumaklandığını ve bentonit parçacıklarının kümelenmiş bir biçim aldığını belirtmişlerdir. Boşluk sıvısı anilin (ε=6,7) olduğu zaman hem kaolinit hem de bentonit parçacıklarının floküle olduğu ve kümelenmiş bir biçim aldığı, bununla birlikte kaolinitte kümelenme ve flokülasyonunun bentonit parçacıklarınınkinden daha az olduğu belirtilmiştir.

Yazarlar elde edilen fotoğraf görüntülerine göre, topaklanma boyutları ve flokülasyon derecesinin organik sıvının dielektrik sabiti ve kil mineralinin cinsine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Aynı yazarlar teorik ve deneysel sonuçlara göre; killi zemindeki boşluk sıvısının bir organik sıvı ile yer değiştirdiği zaman çekme ve itme kuvvetlerinin azaldığını, bununla birlikte net sonuç olarak çekme kuvvetindeki artışın baskın olup zemin parçacıklarının topaklanarak yığın formuna geldiğini, bu durumda killi zeminlerin organik sıvılarla permeasyona tabi tutulduğu zaman ince kum ve aşırı konsolide olmuş killi zemin gibi davranış göstereceğini ifade etmişlerdir.

Wang ve Siu (2006), kaolinitin yüzey yükleri ve yapısal karakterizasyonu üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar yüksek pH değerlerine bağlı olarak kenar yüklerinin parçacıkların içsel kuvvetleri ve fabrik yerleşiminde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. pH değerinin düşük olduğu durumlarda yüzey ve kenar arasında Coulombian çekme kuvvetinin baskın olduğunu ve parçacıkların kenar-yüzey açılımı şeklinde yerleşmiş olup sonuç sedimant hacminin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek pH değerlerinde ise bütün yüzeylerde çift tabaka itme kuvvetlerinin baskın olduğunu, bunun da parçacıkların dispers bir yapıda yerleşimine yol açtığını ve sedimant hacminin daha az olduğunu söylemişlerdir.

Orhan ve ark. (2006), zeminlerin drenajsız kayma dayanımının bir ölçüsü olan likit limit değerinin belirlenmesinde uygulanan Casagrande ve düşen koni penetrasyon yöntemlerinin ölçüm mekanizmalarının birbirinden farklı olduğunu, Casagrande yönteminde viskoz kayma direncinin, koni batma yönteminde ise sürtünmeli kayma direncinin etkili olduğunu söylemişlerdir. Bu etkenlere bağlı olarak değişen likit limit değerlerinin aynı zeminler üzerinde farklı yöntemlerle farklı değerler verdiğini söylemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada Ankara ve Türkiye'nin farklı yerlerinden alınmış likit limit değerleri %100'den küçük olan 13 adet farklı zemin üzerinde hem Casagrande hem de düşen koni penetrasyon yöntemi ile Atterberg limit deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda düşen koni penetrasyon yönteminin Casagrande yöntemine göre %0,2 ile %8,4 arasında daha yüksek likit limit değerleri verdiği görülmüştür.

Yükselen ve Kaya (2006), ince daneli zeminlerin mühendislik özelliklerinin zemini oluşturan kil daneciklerinin özgül yüzey alanı (ÖYA) ile doğrudan ilişkili olduğunu söylemişlerdir. Bu ilişkinin belirlenebilmesi için, araştırmacılar tarafından on altı farklı kil zemin numunesinin özgül yüzey alanı üç farklı metot azot adsorpsiyonu (BET-N_2), etilen glikol monoetil eter (EGME) ve metilen mavisi (MM) ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar değişik kil tiplerine göre karşılaştırılmıştır.

Araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlara göre, özellikle şişme özelliğine sahip killer (montmorillonit) için N_2 metodu kullanılarak elde edilen özgül yüzey alanı değerleri diğer metotlar için elde edilen değerlere göre oldukça düşük çıktığı belirtilmiştir. Bu metot kuru ortamda gerçekleştirildiğinden, N_2 moleküllerinin şişebilen killerin yaprakları arasındaki geniş yüzey alanlarına ulaşamadığı ve killerin sadece dış yüzey alanlarının ölçülebildiği, hâlbuki özellikle şişme özelliğine sahip killerde, dış yüzeylerden çok geniş iç yüzeylerin mühendislik davranışlarını etkilediği ifade edilmiştir. EGME ve MM deneylerinin ıslak ortamda gerçekleştirildiğinde katyonların yapraklar arsına girip, iç yüzeylerde dâhil olmak üzere toplam yüzey alanını verdiğini, bunun yanında, tüm metotların şişme özelliği olmayan kaolinit, klorit gibi killerde birbirine yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yazarlar tarafından metilen mavisi metodunun kolay uygulanabilir olması, çabuk sonuçlar vermesi ve tüm yüzey alanına ulaşabilme özelliği açısından diğer metotlara göre bir üstünlük sağladığı ifade edilmiştir.

Mohammad ve Shahaboddin (2008), killerin organik sıvılara maruz kalması durumunda şişme, indeks özellikleri ve osmotik konsolidasyon davranışının nasıl değiştiği üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar montmorillonitik içerikli Taleqan ve vermikülit-kaolinit içerikli Boin Zahra killerini (İran) ve etilen glikol ile toluen organik sıvılarını kullanmışlardır.

Araştırmacılar tarafından yapılan sedimantasyon deneyleri sonucunda iki kil için de her iki organik sıvının da süspansiyon içindeki zemin parçacıklarını flokülasyona uğrattığı, su ve sodyum hekzametafosfat bulunması durumuna göre çökmenin daha hızlı gerçekleştiğini bulmuşlardır. Araştırmacılar Taleqan kilinde saf toluen (ε=2,4) ve etilen glikol (ε=37,7) ile %75 konsantrasyondaki etilen glikol için, kilin granüler kumlu zemin gibi davranmasından dolayı likit ve plastik limit

deneyleri yapamamışlardır. Etilen glikolün %25 ve %50 konsantrasyonlarında ise kilin plastik limitinin arttığını ve plastisite indisinin belirgin olarak azaldığını bulmuşlardır. Araştırmacılar Boin Zahra kili üzerinde toluen için likit ve plastik limit deneylerini yapamazken, etilen glikolün saf hali ve tüm konsantrasyonları için deneyler yapılabilmiştir. Artan etilen glikol konsantrasyonu ile birlikte plastik limit artarken, likit limit değerinde düzenli bir değişim olmamış ve zeminin plastisite indisi değerleri azalmıştır. Araştırmacılar killerin kıvam limitlerinde meydana gelen bu değişimleri diffüz çift tabakanın kimyasal sıvıların etkisi ile çökmesine, böylece diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinin azalıp tanecikler arasındaki net çekme kuvvetlerinin artarak taneciklerin flokülasyonuna neden olmasına bağlamışlardır.

2.2. Organik Kimyasal Sıvıların Killerin Mukavemet, Sıkışabilirlilik ve Hidrolik Geçirgenlik Davranışları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi İle İlgili Çalışmalar

Uzun yıllardır killerin sıkışabilirliliğinin mekaniksel ve fiziko-kimysal faktörler tarafından etkilendiği bilinmektedir. **Terzaghi (1926),** killerin geniş boşluk oranı ve sıkışabilirliliğini pullu şekildeki mineral parçacıklarının varlığına bağlı olduğunu söylemiştir. Terzaghi, aynı zamanda kil parçacıkları arasındaki itme kuvvetlerinin varlığından bahsetmiş ve bunu da taneleri ayıran adsorbe tabakaların kalınlığındaki artışa bağlamıştır.

Bolt (1956), muhtemelen ilk defa zemin özellikleri üzerinde fiziko-kimyasal etkiler üzerine çalışmış ve sonsuz uzunlukta paralel iki parçacık arasındaki çift tabaka itme kuvveti ile dengelenen üst tabaka basıncı yoluyla killerin sıkışabilirliğinin modellenmesi için bir teori geliştirmiştir. Sıkışma deneyleri çeşitli elektrolit bileşimleri ile su içerisinde hazırlanan bentonit ve illit bulamaçları ile yapılmıştır.

Bentonit için Bolt'un teorik ve deneysel sonuçları arasında makul bir uyum olmakla beraber, illit için önemli bir sapma gözlenmiştir. Bolt'un bu çalışmasını

müteakip aynı konuda pek çok araştırmacı bentonit, illit, kaolinit ve çeşitli kimyasal sıvılarla sıkışma deneyleri yapmışlardır. Diğer araştırmacılar tarafından yapılan deney sonuçları Bolt'un çalışmaları ile uyumlu olup, çalışmalar bentonitin davranışının çift tabaka sonuçlarına uymakta olduğunu göstermiştir. Kaolinit ve illitte boşluk sıvısı kimyası ile beraber boşluk oranı ve sıkışabilirliğin bentonite kıyasla daha az olmasına rağmen değiştiği bulunmuştur. Bununla birlikte bu iki tip kil minerali için bulunan değişiklikler çift tabaka teorisi ile çelişkili olmuştur.

Harr (1962), yaptığı çalışmalar sonucunda killi zeminlerin karakteristik hidrolik geçirgenliğinin 1×10^{-7} cm/sn iken, tipik ince kum-siltin hidrolik geçirgenliğinin 1×10^{-2} cm/sn olduğunu söylemiştir.

Richards ve Hamilton (1967), marine deniz kili sedimanlarının davranışı ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalar sonucunda kilin organik sıvılarla yıkanması sonucu aşırı konsolide (OC) olmuş gibi davrandıklarını söylemişlerdir. Buradaki aşırı konsolide davranışının çimentolanma olayı tarafından meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Sonuçları, yıkanmamış normal konsolide (NC) zeminlerin pik mukavemetleri (q_{peak}) ile aşırı konsolide olmuş zeminlerin pik mukavemetlerinin karşılaştırılması ve yıkanmış numunelerde kesme esnasında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışlarını dikkate alarak yorumlamışlardır.

Olson ve Mesri (1970), saf su, karbon tetraklorit ve ethanol organik sıvıları ile sodyum kaolinit ve kalsiyum kaolinit kullanarak sıkışma deneyleri yapmışlardır. Boşluk sıvısı olarak su kullanıldığında deneyler sodyum kaolinit ve kalsiyum kaolinit üzerinde gerçekleştirilmiş olup kalsiyum kaolinitin sıkışma ve şişme indisi değerleri sodyum kaolinitinkinden küçük çıkmıştır. Dielektrik sabitinin ε=80,4'den ε=24,3'e inmesi ile sıkışma indisi değerinde bir azalmanın meydana geldiği, ancak dielektrik sabiti ε=2,2 olan ve non polar bir sıvı olan karbon tetrakloridle yapılan deneylerde sıkışma indisi değerinin artarak su ile yapılan deneylerde elde edilen değerden daha büyük çıktığı ifade edilmiştir. Yazarlar sıkışma miktarında meydana gelen farklılıkları çift tabaka itme kuvvetlerindeki değişime bağlamışlardır.

Yine aynı araştırmacılar bentonitin davranışının fiziko-kimyasal etkiler

tarafından kontrol edilirken, kaolinitin davranışının geometrik şekil ve boyut, yüzey sürtünmesi ve zemin yapısı gibi mekaniksel faktörler ve özellikle de zemin yapısı tarafından kontrol edildiğini, illitin ise arada bir pozisyonda yer aldığını söylemişlerdir. Yüzey sürtünmesinin fazla olmasının parçacıkların deplasmanını diğerine bağlı olarak engelleyeceği ifade edilmiştir.

Mesri (1973), adsorbe su, mineralojik kompozisyon, ön sıkışma, uzun süreli yükleme ve efektif gerilme oranının (σ_1'/σ_3') ikincil sıkışma davranışını etkileyen en önemli faktörler olduğunu ifade etmiştir. Karbon tetraklorit ve benzen gibi kimyasal sıvılarla doyurularak hazırlanan kil numuneler üzerinde yaptığı çalışmalarda ikincil sıkışmanın olduğu sonucuna varmıştır.

Sridharan ve Rao (1973), boşluk sıvısı olarak su ve 8 organik sıvıyı kullanarak sıkıştırılmış kaolinit ile konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Zemin numunelerini hazırlamak için aynı başlangıç yapısına sahip, kuru kaolinit kilini aynı yoğunlukta sıkıştırmışlar ve daha sonra doygun olana kadar kimyasal sıvılarla ıslatmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar tarafından elde edilen saf organik sıvılı sıkışma eğrileri bir aşırı konsolide davranışı göstermiştir.

Araştırmacılar sıkıştırılmış kuru kaolinit zemini kimyasal sıvılar içine daldırarak zemin numunelerini hazırladıklarından, havanın belirli bir miktarının kaçınılmaz olarak zemin numuneleri içerisinde tutulduğunu ve tutulan bu hava kabarcıklarının zeminlerin sıkışabilmesine büyük katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Organik sıvı ve hava arasındaki içsel çekme kuvveti su ve hava arasındaki çekme kuvvetinden daha büyük olup, organik sıvılar içerisinde ıslatılarak hazırlanan zemin numuneleri içerisinde tutulan hava su içerisine daldırılan numune içindekinden daha büyük olduğu ifade edilmiştir. Bundan dolayı bütün organik sıvılarla yapılan deneylerden elde edilen sıkışma indisi değerlerinin su ile yapılan deneyden elde edilen sıkışma indisi değerinden büyük çıktığı belirtilmiştir.

Araştırmacılar; ethanolde (ε=24,3) bir dönüm noktası ortaya çıktığını, ε<24,3 olduğu durumlarda dielektrik sabitindeki artışla beraber sıkışabilirliliğin azaldığını ve ε>24,3 için ise dielektrik sabitindeki artışla sıkışabilirliliğin arttığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar tarafından yine aynı çalışmanın devamında su ile

doyurulan numuneler karbon tetraklorid ile yıkandıklarında hacimde ve sıkışma indisinde bir artış, karbon tetraklorid ile doyurulan numuneler su ile yıkandıkları zaman ise hacimde ve sıkışma indisinde bir azalma olmuştur.

Moore ve Mitchell (1974), killerin davranışı üzerinde Van der Walls çekme kuvvetinin etkisini araştıran öncü kişilerdir. Araştırmacılar su ve daha sonra su yerine değişik organik sıvılar kullanarak sıkıştırılan bir kaolinit üzerinde bir dizi kayma mukavemeti deneyleri yapmışlardır. Kayma mukavemetinin, çekme kuvvetinin değişimi ile uygunluk gösteren dielektrik sabitiyle anlamlı miktarda değiştiğini söylemişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar yaptıkları çalışmada Lifshitz itme teorisini ihmal etmişler ve bu teorinin ayrık iki parçacık için geçerli olduğunu, bu durumda çekme kuvvetleri hesabında dikkate alınmaması gerektiğini söylemişlerdir.

Araştırmacılar tarafından yapılan deneylere göre minimum sıkışabilirlilik ethanol (ε=24,3) ve methanol (ε=33,6) arasında bir yerde iken minimum kayma mukavemeti di elektrik sabiti ε=3 iken elde edilmiştir. Yazarlar kimyasal sıvılar varlığında çekme kuvvetindeki bir artışın parçacıkların temasıyla kayma direncinde bir artışa neden olduğunu söylemişlerdir.

Anderson (1982), kil tabakalarının organik sıvılar etkisi altında nispi geçirgenliklerini hesaplamak için dört farklı kil örneği üzerinde permeabilite deneyleri yapmıştır. Asetik asit, aseton, methanol ve xylene ile yapmış olduğu deneylerde permeabilitede artışların olduğunu tespit etmiştir. Permeabilitedeki artışları organik sıvıların yüksek dipol momentine ve düşük viskozitesine bağlamakla birlikte, sudan daha düşük viskoziteye ve dipol momentine sahip xylene için bu ifade yeterli olmamıştır.

Fernandez ve Quigley (1985), killi zeminlerin permeabilitesi üzerinde sıvı hidrokarbonların fiziksel ve kimyasal etkilerini incelemek amacıyla 0,8 boşluk oranında saf sıvılarla karıştırılarak hazırlanmış tabii Sarnia killeri kullanmışlardır. Bu killer dielektrik sabitleri (ε) 80'den 2'ye kadar değişen su, suda çözünen ve çözünmeyen değişik hidrokarbonlar ile permeabilite deneyine tabi tutulmuşlardır.

Permeabilite deneyi sonrası kil tanecikleri yüzeyindeki yayılmış çift tabakadaki azalmanın deneylerde kullanılan kimyasal sıvıların dielektrik sabitleri ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, saf su (ε=80) içerisinde tek değerlikli bir kilin çift tabaka kalınlığının 100nm olduğunu ve ε=2 için çift tabaka kalınlığının aşırı azalarak 15nm'ye kadar düşeceğini söylemişlerdir. Sonuçta kil zeminin büzüldüğünü, zemin içinde topaklanma ve pedlerin oluştuğunu ve akabinde makro gözenekler oluşturarak permeabilitede büyük artışların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar tarafından esnek duvar permeametresi kullanılarak yapılan deneyler sonucu boşluk sıvısının sudan cyclobenzene kadar değişmesi sonucu hidrolik geçirgenlik değeri 1×10^{-7}'den 1×10^{-2} cm/sn'ye yükselmiştir. Bir başka ifadeyle cyclobenzen organik sıvısı ile muamele edilen Sarnia kilinin hidrolik geçirgenliği ince kum-silt zeminin permeabilite değerine ulaşmaktadır.

Sridharan ve ark. (1986a), bentonit killeri üzerinde farklı değerlikli organik sıvılar kullanarak sıkıştırılabilirlik davranışını belirlemeye çalışmışlardır. İki değerlikli ve üç değerlikli numunelerin tek değerlikli numunelerden daha hızlı konsolide olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte bu numuneler tek değerlikli numunelerden daha fazla permeabilite özelliği göstermişlerdir. İki değerlikli ve üç değerlikli katyonların kilin flokülasyon davranışı üzerinde tek değerlikli katyonlara göre daha fazla etkili olduğunu söylemişlerdir.

Mitchell ve Madsen (1987), killi zeminlerde boşluk sıvısı ile organik sıvılar yer değiştirdiği zaman hidrolik geçirgenlik miktarının arttığını söylemişlerdir.

Bowders ve Daniel (1987), boşluk sıvısının viskozite ve yoğunluğundaki bir değişiklik nedeniyle sadece permeabilitede bir değişiklik olmadığını aynı zamanda diğer özelliklerinde de değişimlerin olduğunu ve bunun da dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. Aynı araştırmacılar organik sıvılar varlığında eğer killerin sedimantasyon ve Atterberg limit davranışlarında saf sudakine göre bir değişiklik olmazsa, sıkıştırılmış kilin hidrolik geçirgenliğinde de organik sıvıların etkisinin olmayacağını söylemişlerdir. Araştırmacılar killer üzerinde yaptıkları deneylerde organik sıvılara maruz bırakılan killerin daha hızlı bir şekilde çöktüğünü

bulmuşlardır.

Korfiatis ve ark. (1987), sıkıştırılmış zeminlerin kompressibilite ve kayma mukavemetine petrol hidrokarbonlarının etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar deneylerinde 5 tip kil, kumlu silt ve kirletici olarak da 2 Nolu fuel oil ve gaz kullanılmıştır. Tüm killere gaz ve fuel oil ilavesi likit ve plastik limitlerinde azalma meydana getirmiş, gaz ilavesi killerin kayma mukavemeti ve kompressibilite parametrelerini azaltmış, fuel oil ise artırmıştır. Kumlu siltin kayma mukavemeti ise gaz ilavesiyle artmış, fuel oil ilavesiyle azalmıştır.

Sridharan ve Sivapapullaiah (1987), kaolinit ve montmorillonit üzerinde bazı organik sıvılarla bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar zeminlerin hacim değişimi üzerinde boşluk sıvısının dielektrik sabitinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Sridharan ve ark. (1987), montmorillonitik killerin sıkışabilirliği üzerine floruid'in etkisini araştırmışlardır. Floruid parça flokülasyonuna sebep olmuştur. Parçalardaki bu flokülasyon nedeniyle daha fazla sıkışma sağlanmış ve boşluk oranı değeri azalmıştır. Üstelik flouridle muamele edilmiş zemin numuneleri muamele edilmemişe göre daha fazla geçirgenliğe sahip olmuşlardır.

Fernandez ve Quigley (1988), suda çözülebilir organiklerle permeabilite deneyine tabi tutulan killi zeminlerin permeabilitesinde viskozite ve dielektrik sabitinin etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, su ile temasta olan suda çözülebilir organik kimyasalların bu zeminlerin etkili bir şekilde permeabilitelerini arttırdıklarını ve bunların depolama alanlarındaki bariyerlik özelliklerini azalttıklarını belirtmişlerdir. Permeabilitedeki bu artışın öncelikli oluşum sebebinin ise, sabit boşluk oranında çift tabakanın (double layer) büzülmesi ile mevcut boşluk hacminde bir artışın olması ve bunun da permeabiliteyi artırması olduğunu ifade etmişlerdir.

Daniel (1989), zeminde akışta bulunan organik çözeltilerin çeşitli çatlak ve süreksizliklere neden olduğunu söylemiştir. Kimyasal çözücülerin taneler arası

boşluklar boyunca akarken etkileşime girerek önce mikro çatlaklar daha sonra da süreksizlik düzlemleri oluşturarak akım debisini dolayısıyla permeabilite katsayısını artırdığını söylemiştir.

Storey ve Peirle (1989), hazırladıkları doğal illitik killeri %20, %40, %60, %80 ve %100 'lük methanol konsantrasyonlarında permeabilite deneylerine tabi tutmuşlar ve permeabilitede meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Araştırmacılar yüksek methanol konsantrasyonlarında (%80 ve %100) süspansiyon testine tabi tutulan kil taneciklerinin zeta potansiyelinin azaldığını, bu azalmanın kil taneciğini çevreleyen çift tabakanın da azaldığının göstergesi olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçta, yüksek methanol konsantrasyonlarının kil parçacıkları arasında çekimde bir artışa sebep olduğunu, bunun ise taneleri toplulaşmaya yönelttiği ve akabinde permeabilitede artışlara neden olduğu belirtilmiştir.

Barbour ve Fredlund (1989), osmotik hacim değişimi için osmotik konsolidasyon üzerinde çalışmışlar, konsantre tuz çözeltileri için bir çalışma yürütmüşlerdir. Tuz çözeltilerinin kil içerisine taşındığı zaman tanecikler arasındaki itme kuvvetlerinde değişimlerin meydana geleceğini ve bunun da çift tabakanın yok edilerek boşluk oranlarının değişmesine neden olacağını söylemişlerdir.

Uppot ve ark. (1989), magnezyum montmorillonit ve kaolinit killeri üzerinde, organik ve inorganik sıvıların temasıyla kil ve sıvı (permenant) arasında oluşan kimyasal reaksiyonun, kilin permeabilitesindeki değişime olan katkısını araştırmışlardır. Araştırmacılarca asetik asit ile yapılan deneylerde kaolinitin permeabilitesindeki değişimin az olduğu, numunenin hacminde bir azalmanın olmadığı ifade edilmiştir. Magnezyum montmorillonitin permeabilitesinin ise su için bulunan baz değere göre 3 kat daha fazla olduğu ve numunenin hacminde %2,5 'luk bir azalmanın meydana geldiği ifade edilmiştir. Bu testlerde magnezyum montmorillonitte gözlenen 3 kat artışın, kildeki kalsiyum karbonat ile asetik asit arasındaki reaksiyon sonucu oluşan kütle kaybından kaynaklandığına inanılmıştır. Bu kütle kaybından dolayı zeminde porozlu yapının kısmen çöktüğü varsayılmıştır.

Araştırmacılarca methanol ile yapılan testlerde kaolinit ve magnezyum

montmorillonitin permeabilitelerinde başlangıçta bir azalmanın olduğu, daha sonra ise permeabilitenin belirlenen temel permeabilite değerine göre iki kat arttığı ifade edilmiştir. Deney sonu yapılan incelemelerde magnezyum montmorillonitte tanecikler arasında bir toplulaşmanın olduğu görülmüştür. Bu olay kaolinitte belirgin olmamıştır. Magnezyum montmorillonitteki bu değişim, yüksek katyon değiştirme kapasitesine ve çift tabakadaki (double layer) azalmanın fazlalığına bağlanmıştır.

Sridharan ve ark. (1991), montmorillonitik killer üzerinde çeşitli bileşimdeki kimyasal sıvılarla artan yükler altında konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Sonuçlar montmorillonit zemin numuneleri üzerinde çift tabaka etkisinin çok iyi görülebilmesi yönünden olumlu sonuçlar vermiştir.

Tuncan ve ark. (1993), petrol hidrokarbonlarının kaolinit kilinin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar %5, %10 ve %20 oranlarında ham petrol, fuel oil ve gazı kaolinit kiline karıştırarak, petrol hidrokarbonu ile kirletilmiş kilin kıvam limitlerini, spesifik gravitesini, optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin serbest basınç direncini ve konsolidasyon parametrelerini belirlemişlerdir.

Deneyler sonucunda kaolinit kilinin ham petrol ve fuel oil ilavesi ile likit limit, plastik limit ve serbest basınç direncinde bir azalmanın, sıkışma indisinde bir artmanın ve gaz ilavesi ile bunun tersinin olduğunu belirtmişlerdir.

Meegoda ve Ratnaweera (1994), kirlenmiş zeminlerin sıkışma indislerini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Mekaniksel faktörlerin yanı sıra fiziko-kimyasal faktörlerinde zeminlerin davranışını etkilediğini söylemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmaların sonucunda farklı kirlilik dereceleriyle zemin sıkışma indisinde önemli değişimlerin olduğunu ifade etmişlerdir.

Gnanapragasam ve ark. (1995), bentoniti anilin kimyasal sıvısına maruz bırakmışlar ve meydana gelen boşluk büyüklüğü dağılımını suda ki ile karşılaştırmışlardır. Parçacıkların flokülasyonu dolayısıyla oluşan küme şeklindeki yapının zeminlerin hidrolik geçirgenliğindeki çarpıcı artışın nedeni olduğunu, çünkü

bu yapının içindeki boşlukların bir çatlak gibi rol oynadığını belirtmişlerdir. Geniş gözenekli yapılarda hidrolik geçirgenliğin ince gözenekli yapılara göre çarpıcı bir şekilde büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

Cernica (1995), zeminlerin mekanik örselenme neticesinde floküle dokudan disperse dokuya geçtiklerini söylemiştir. Kazıklar zemine girerken zemindeki floküle dokunun bozularak disperse dokuya dönüştüğü, bu sırada zeminin mukavemeti azaldığından kazığın zeminde ilerlemesinn kolay olduğu, sonuçta ise zeminin zamanla mukavemet kazanarak kazığın taşıma kapasitesinin arttığı belirtilmiştir.

Zorluer (1996), %5, %10, %20 oranlarında olacak şekilde su içerisine karıştırılan petrol hidrokarbonlarının normal konsolide kaolinit kil zeminin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Ham petrol, gaz ve fuel oilin ilavesi ile spesifik gravite, likit limit, plastik limit ve karışımların pH değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Ham petrol ve fuel oil ilavesi kaolinitin katyon değiştirme kapasitesini azaltmıştır.

Araştırmacı tarafından yapılan deneylerde ham petrol ve fuel oil ilavesi sıkışma indisi ve permeabilite katsayısını azaltmış, gaz ilavesi ise artırmıştır. Ham petrol ve fuel oil ilavesi, başlangıç ve son boşluk oranları arasındaki farkı karışım oranı arttıkça küçültmektedir. Gaz ilavesi ise, başlangıç ve son boşluk oranı arasındaki farkı karışım oranı arttıkça büyütmektedir. Kohezyon değeri, ham petrol ve fuel oil ilavesiyle azalmış, kayma mukavemeti açısı ise, ham petrol ilavesiyle artmış, fuel oil ve gaz ilavesiyle azalmıştır.

Li ve ark. (1996), kum, bentonit ve organobentonit (HDTMA veya BTEA) karışımı içeren zeminlerde su, nitrobenzen ve heptan varlığında permeabiliteyi incelemişlerdir. Saf heptan varlığında kum – bentonit - organobentonit karışımı için permeabilitede anlamlı bir değişiklik olmazken, kum - bentonit karışımlarında sudan heptana kadar bir değişiklik halinde permeabilitede 100 kata varan değişiklikler olduğunu bulmuşlardır.

Mathew ve Rao (1997), İndia'daki yerel deniz killeri üzerinde konsolidasyon

deneyleri yapmışlardır. Zeminler farklı birleşimdeki kimyasal sıvılarla muamele edilmişlerdir. Üç değerlikli örneklerin iki değerlikli ve tek değerlikli olanlara göre daha fazla sıkıştığı ve konsolide olduğu belirtilmiştir.

Kaya ve Galvao (1997), organik sıvıların zeminin yapısında bir değişiklik yaptığını ve bu değişikliklerden en önemlisinin hidrolik geçirgenlik olduğunu söylemişlerdir. Fakat bu organik sıvıların zeminin mikro yapısında yapmış olduğu değişimlerin henüz tam olarak anlaşılamadığını söylemişlerdir. Test sonuçlarından bulunan hidrolik geçirgenliklerin deney tipine bağlı olduğunu ve doğru etkiyi yansıtmayabileceğini söylemişlerdir.

Hoşcan (1997), katı atık depolarında bulunabilecek maddelerden biri olan asetik asit ile çalışmıştır. Asetik asidin kil numune üzerindeki etkisi oldukça belirgin olmuş; numunenin permeabilite katsayısını en derişik konsantrasyonda 700 kat artırmıştır. Her hangi bir katı atık deposunda saf asetik asidin sızması ve kil zemini etkilemesi pratikte mümkün değildir. Yine de permeabilite katsayısındaki değişimin çok büyük olması konuyu önemli kılmaktadır.

Yıldız (1998), kaolen ve bir yerel kil olmak üzere iki farklı kil numunesi üzerinde yapmış olduğu bir dizi laboratuar deney sonuçlarına göre saf ve reaktif dereceli organik sıvıların killerin yapısını bozduğunu ve killi zeminlerin permeabilitesini etkilediğini söylemiştir. Permeabiliteyi değiştiren mekanizmanın, kil taneciklerini çevreleyen elektriksel çift tabakanın bozulması olduğunu söylemiştir. Organik sıvıların genelde düşük di elektrik sabitine sahip olduğunu ve bir organik sıvının zemindeki orijinal gözenek (boşluk) suyu yerine geçtiği zaman kil parçacığının çift tabakasının büzüldüğünü bunun ise mikro çatlaklar üretip permeabilitede artışlara neden olduğunu söylemiştir.

Yazar asetik asidin ve methanolün değişik konsantrasyonlarında permeabilite testi sonrası alınan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi ve drenajsız üç eksenli (UU) deneyleri yapmıştır. %50 asetik asit konsantrasyonlarına kadar numunelerin özelliklerinde çok önemli bir değişme olmamakla birlikte, %50'nin üzerindeki konsantrasyonlarda (%75 ve %100) kaolen ve yerel kilin yapısında gözle görülür

değişiklikler olmuştur. Asetik asit ile permeasyona tabi tutulan numunelerde ise fissürlü bir yapı oluşmuştur. %75 ve %100 konsantrasyonlarda numunelerin serbest basınç değerlerinde büyük miktarda azalma meydana gelmiştir.

Sridharan ve Prakash (1999), montmorillonit ve kaolinit zeminlerin davranışlarının birbirlerine göre oldukça zıt olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar organik kimyasal sıvıların varlığında kaolinit zeminlerin hacim değişimi davranışını konsolidasyon deneyleri vasıtasıyla, montmorillonit zeminlerin hacim değişimi davranışını ise hem konsolidasyon hem de kayma mukavemetini belirleyen deneyler vasıtasıyla araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde denge çökelti hacminin montmorillonit zeminler için dielektrik sabitindeki artışla arttığını, kaolinit zeminler için ise dielektrik sabitindeki artışla azaldığını bulmuşlardır.

Anandarajah ve Zhao (2000), Georgia kili üzerinde saf su, formamid, ethanol, asetik asit, triethylamine ve heptane olmak üzere toplam 6 çeşit sıvıyı kullanarak, bulamaç halindeki karışımların ön konsolide edilmesiyle hazırladıkları numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Normal konsolide (NC) numunelerde kesmeyi 100, 200 ve 400 kPa izotropik basınçlar altında gerçekleştirmişlerdir. Aşırı konsolide numuneler (OC) 400 kPa'lık bir basınç altında konsolide edilip boşaltılmış ve 100 kPa ya da 200 kPa basınç altında kesilmiştir.

Araştırmacılar asetik asit ve formamid dışındaki diğer kimyasallarda, su ile yapılan deney sonuçlarına göre normal konsolide numunelerin davranışının aşırı konsolide numunelerin davranışına doğru bir yönelim içinde olduğunu, aşırı konsolidasyon oranının boşluk sıvısı sudan heptan'a değiştiği zaman yaklaşık 4,5 kat arttığını söylemişlerdir.

Araştırmacılar yaptıkları çalışmada formamidin normal şartlar altında yüksek dielektrik sabiti dolayısıyla çift-tabaka itme kuvvetinin büyük olması gerektiği ve aşırı konsolide olması beklenmediğini belirtmişlerdir. Ancak formamidteki tuzların çözünürlüğünün daha küçük olması dolayısıyla çok küçük bir itme kuvvetine sahip olduğu, formamidin dielektrik sabitinin farklı doğası sebebiyle kaolinit - formamid sisteminin Hamaker sabitinin (A) daha yüksek olduğu ve sonuçta daha yüksek Van der Walls çekme kuvvetinin meydana geldiğini, bu yüzden de aşırı konsolide

davranışının gözlendiğini söylemişlerdir.

Chen ve ark. (2000), geniş bir aralıkta dielektrik sabitlerine sahip olan su ve 9 farklı organik sıvının kullanılması durumunda kaolinitin sıkışma davranışı üzerinde nasıl bir değişim meydana geldiğini araştırmışlardır. Araştırmacılar deneylerde literatürde sıklıkla adı geçen Gürcistan kaolinitini kullanmışlar ve organik sıvıları kaolinit ile direk olarak karıştırarak süspansiyon oluşturmuşlardır.

Araştırmacılar boşluk sıvısının dielektrik sabiti ile kaolinitin normalize edilmiş sıkışma indisi değişimi için ethanolde bir dönüm noktası oluştuğunu, $\varepsilon<24,3$ için dielektrik sabitindeki artışla beraber sıkışabilirliliğin azaldığını ve $\varepsilon>24,3$ için ise dielektrik sabitindeki bir artışla sıkışabilirliliğin arttığını belirtmişlerdir. Çalışmada kullanılan non polar sıvılar (heptan, benzen ve triethylamine) için elde edilen sıkışma indisi değerleri suyunkinden büyük, su ile non polar sıvılar arasında dielektrik sabitlerine sahip sıvılar (asetik asit, etil asetat, ethanol, ve methanol) için elde edilen sıkışma indisi değerleri ise suyunkinden küçük bulunmuştur. Sıkışabilirlilik büyük dielektrik sabitli sıvılar (ethanol/su karışımı, su ve formamid) için ise hemen hemen aynı çıkmıştır. Yazarlar üst tabaka basıncındaki artışla birlikte fiziko-kimyasal etkilerin azaldığını, 300 kPa üst tabaka basıncı altında boşluk sıvısı özelliklerinin aslında kaolinitin sıkışabilirliği üzerinde etkili olmadığını söylemişlerdir. Araştırmacılar boşluk sıvılarının etkilerini kısaca Van der Walls çekme kuvvetlerine bağlamışlar yalnız çift tabaka itme kuvvetlerinin de az da olsa sıkışabilirliliğe etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

Yazarlar kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki artışla birlikte şişme indisi değerlerinin arttığını, non polar sıvılarda çift tabakaların gelişemediğini, polar sıvılarda ise şişme indisindeki artışın çift tabaka kalınlığındaki artışa bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Schmertmann (2001), daha önce kendisi tarafından farklı zamanlarda yapılan çalışmaların sonuçlarını değerlendirmiştir (Schmertmann 1976, 1981 ve 1991). Yazar sırası ile c″ (kohezyon) bileşenini I ve Ø" (kayma mukavemeti açısı) bileşenini D ile göstermiştir. Yazar yaptığı deneylerde kuru kaolinit kilini sıkıştırmış ve daha sonra değişik sıvılarla doyurmuştur. Yazar tüm numuneleri izotropik olarak

aynı basınç altında konsolide ettikten sonra drenajlı üç eksenli deneyleri yaparak I, D ve deformasyon (S) değerlerini elde etmiştir. Dielektrik sabiti 1'den 80'e kadar değişirken viskozite değerleri 0,02'den 2,10 cp'ye kadar değişmektedir. Azalan viskozite, daha küçük boyutlu sıvı ve azalan dielektrik sabiti ile beraber üç eksenli deneylerde kaolinit numunelerinin daha rijit ve mukavim hale geldiği görülmüştür. Yazar kimyasallarla yaptığı bütün deneylerde rijitliğin ve mukavemetin D'ye bağlı olarak arttığını fakat I'ya bağlı olmadığını bulmuştur. Bundan dolayı yıkama ile meydana gelen efektif gerilme değişimi ve aşırı konsolidasyon davranışının kayma mukavemetinin kohezyon bileşeninden ziyade sürtünme bileşeninden kaynaklandığını ifade etmiştir.

Soule ve Burns (2001), modifiye edilmiş Wyoming bentonitinin mekaniksel özellikleri üzerine dört farklı kuaterner amonyum katyonunun (TMA, DTMA, HDTMA ve BTEA) etkileri üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar organobentonitleri laboratuarda 1,10,16 ve 18 karbon atomuna sahip amonyum katyonlarına doyurarak hazırlamışlardır. Hazırlanan organobentonitler üzerinde özgül ağırlık, Atterberg limitleri, konsolidasyon ve direk kesme kutusu deneyleri yapmışlardır.

Araştırmacılar karbon sayısının artmasıyla organobentonitlerin özgül ağırlığının arttığını, bentonite eklenen organik katyonların bentonitin sıkışabilirliliğini anlamlı olarak azalttığını (yaklaşık 1/10 oranında) belirtmişlerdir. Şişme indisi ise normal bentonite göre 1/25 oranında azalmıştır. Amonyum katyonlarıyla modifiye edilen bentonitlerin içsel sürtünme açısı unmodifiye killere göre 5 kat olup, unmodifiye kilin içsel sürtünme açısı $Ø=7^0$ iken modifiye killerin içsel sürtünme açıları $Ø=34\text{-}37^0$ arasında olmuştur. Kayma mukavemeti parametresinde meydana gelen bu farklılığın sebebinin, numunelerin su muhtevalarının farklı olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Araştırmacılar tarafından saf su ile yapılan deneylerde organik katyonların yer değiştirmesi ile likit limit (LL) değerinde önemli bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan ikinci seri deneylerde ise su yerine methanol kullanılmış ve bentonitin likit limiti %458'den %58'e düşmüştür. Polaritesi suya göre düşük olan methanolün bentonit yüzeylerine kuvvetlice çekilmemesinden dolayı daha az miktarda methanolün zemin parçacıkları tarafından tutulduğu

belirtilmiştir. Atterberg limit deneyleri yapılan organik killerin plastisite kartında A çizgisinin altında organik killer ve siltler aralığında olduğu belirtilmiştir.

Ören (2001), %50 montmorillonit ve %50 kaolin + illit'ten oluşan kil minerali karışımını farklı katyon değerliklerine sahip organik kimyasal sıvılarla muameleye tabii tutmuş ve her bir kil karışımının farklı katyon değerlikleriyle sıkışabilirliliğin de değiştiğini söylemiştir. Al-kil etkileşimi ile meydana gelen sıkışma Na - kil etkileşimi ile meydana gelen sıkışmanın 6 katı olmuştur ve Ca - kil etkileşimi ile meydana gelen sıkışma Na - kil etkileşimi ile meydana gelen sıkışmanın 2 katı olmuştur. Her üç farklı kil karışımında uygulanan yükler aynı olup, Na - kil sıkışması Al - kil ve Ca - kil sıkışmasından daha düşük olmuştur.

Araştırmacı konsolidasyon test verilerinden hidrolik geçirgenlik değerlerini belirlemiştir. Al-kil karışımının hidrolik geçirgenliği Ca - kil ve Na - kil'inkinden daha büyük ve Ca - kil karışımının hidrolik geçirgenliği ile Na - kil karışımının hidrolik geçirgenliğinden daha büyük olarak bulunmuştur. Çünkü katyon değerliği artışı parçacıkların flokülasyonu ile sonuçlanmış, böylece parçalar arasındaki akış alanı artarak daha fazla permeabiliteye sahip olan bir zemin oluşmuştur.

Sridharan ve ark. (2002), kenar-yüzey floküle fabrik yapısının kaolinitik doğal marine killerindeki en yaygın yapı olduğunu, Japonya'daki Ishahaya kilinin bu yapıya sahip olarak bilinenlerden biri olduğunu tuz içeriğinin 1,3'ten 30 g/L'ye yükseldiği zaman drenajsız kayma mukavemetinin 8 kata kadar arttığını belirtmişlerdir. Aynı kilin likit limit değerinin ise tuz içeriğinin 0,87'den 30 g/L'ye değişmesi için %95 - %170 arası arttığını, burada dikkat çeken durumun likit limit ve drenajsız kayma mukavemeti değerinin her ikisinin birlikte artmış olması olduğunu belirtmişlerdir.

Nagaraj (2002), daha önce Chen ve ark. (2000) tarafından kaolinitin boşluk sıvıları etkisi altındaki sıkışma davranışı ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmaya ilave olarak belli bir referans üst gerilme altında (=55 kPa) boşluk oranları değişimi ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. Araştırmacı kaolinit-organik sıvı sistemleri için üst gerilme-basınç eğrilerinin esas olarak bir doğru şeklinde gideceğini belirtmiştir.

Araştırmacı, üst ek gerilmelerin artışı ile konsolidasyon deneyinde temel olarak boşluk boyutlarında bir azalma veya zemin kümecikleri arasındaki mesafelerde bir azalmanın meydana geleceğini ve bu durumda organik sıvıların parçacıkların düzenlenmesinde çok küçük bir değişikliğe neden olacağını söylemiştir.

Erarslan (2003), laboratuarda yapmış olduğu deneylerde siltli kil olarak belirlenmiş olan zemin numunesini damıtık su ve içerisinde kimyasal sıvı bulunan bir sızıntı suyuna 5 - 6 haftalık periyotlarla maruz bırakarak permeabilite sonuçlarını elde etmiştir. Damıtık suya maruz bırakılan numunenin permeabilite katsayısı $k=5,13\times10^{-10}$ olmasına rağmen sızıntı suyuna maruz bırakılan numunenin permeabilite katsayısı $k=7,30\times10^{-10}$ olarak bulunmuştur. Sızıntı suyu ile kirlenmiş olan zeminin permeabilitesi bir miktar artmış ancak bu artış çok yüksek olmamıştır. Yine de permeabilitedeki bu artış sızıntı suyunun, zeminin geçirimsizlik özelliğini bozduğunu açıkça göstermiştir.

Anandarajah (2003), suyla doyurulmuş killi zeminin heptan organik sıvısıyla yıkanması sonucu meydana gelen hidrolik geçirgenlik artışını incelemiştir. Laboratuarda yapılan esnek duvarlı permeabilite deneylerinde Georgia kaoliniti ve sabit duvarlı permeabilite deneylerinde kaolinit - montmorillonit karışımı zeminler kullanılmış olup 100 kPa düşey gerilme altında ön konsolide edilen numuneler daha sonra üç eksenli deney düzeneği içerisinde farklı çevre basınçları altında izotropik olarak konsolide edilmiştir. Araştırmacı killi zeminin heptan kimyasal sıvısıyla yıkanması sonucu permeabilitede artışın meydana geldiğini söylemiş ve bu durumun yıkama işlemi ile yığınların büzülmesiyle meydana gelen bazı mikro çatlaklar ve mevcut zemin hacmi kapsamındaki porozitenin üniform olarak artmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

Trauner ve ark. (2005), yoğrulmuş numuneleri kullanarak doygun kohezyonlu killerin tip, miktar, boyutlarını ve onların su muhtevası ile mekaniksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar seçilen bir su muhtevasında (w) zeminlerin mineralojiksel özelliklerinden drenajsız kayma mukavemetinin (s_u) hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Ratnaweera ve Meegoda (2006), kimyasalların farklı konsantrasyonları için ince taneli zeminlerde serbest basınç mukavemeti deneyleri yapmışlar ve mukavemet değerinin azaldığını bulmuşlardır. Dielektrik sabiti değişimi ve boşluk sıvısının viskozitesini dikkate alarak yaptıkları değerlendirmede numunelerin konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneylerde granüler zeminler için elde edilen davranışa yakın davranış sergilediklerini söylemişlerdir. Yazarlar viskoz boşluk sıvısının tanecikler arasındaki içsel etkileşimi arttırdığını ifade etmişlerdir. Boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalma ve büyük viskoziteli boşluk sıvısının etkisinin azalmasıyla birlikte tanecikler arasındaki içsel etkileşimin azaldığını bununda mukavemet kaybına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Khamehchiyan ve ark. (2007), ham petrolle kirlenmiş killi ve kumlu zeminlerin geotekniksel özellikleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Ham petrolle kirlenmiş alanlardan alınan CL, SM ve SP türündeki üç farklı zemin tipinin kirlenmiş ve kirlenmemiş örnekleri üzerinde Atterberg limitleri, kompaksiyon, kesme kutusu, tek eksenli basınç ve permeabilite deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar zeminlerin içerisine kuru ağırlıklarının %2, %4, %8, %12 ve %16'sı oranında olacak şekilde ham petrol ilave ederek çalışmalarını gerçekleştirmişler ve artan kirletici miktarı ile birlikte zeminlerin mukavemet, permeabilite, maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası ve Atterberg limitlerinin azaldığını bulmuşlardır.

Dolinar ve Trauner (2007), kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti ve su muhtevası arasında non-lineer olan iki parametreye bağlı bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu parametrelerin başlıca zeminlerin içindeki kil minerallerinin tipi ve miktarına, parçacık boyutu ve şekillerine, düzenlemelerine, kil parçacıkları arasındaki kuvvetlere ve boşluk sıvısının kimyasal kompozisyonuna bağlı olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar çift tabakanın kil parçacığının kenar ve yüzeyindeki elektriksel yüklerden kaynaklandığını, diffüz çift tabakalardaki aynı işaretli iyonların etkileşiminin elektrostatik itme kuvvetlerine neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Al-Yaqout ve ark. (2007), dolgu sistemlerinin uzun dönem performanslarını belirlemek için Kuveyt'teki Al-Adan katı atık deposu ile ilgili kapsamlı bir geoteknik araştırma yapmışlardır. Su muhtevasının belirlenmesi, özgül ağırlık, Atterberg limitleri, tane büyüklüğü dağılımı, konsolidasyon, üç eksenli basınç ve direk kesme kutusu deneylerini kapsayan bir dizi çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar boşluk oranı 1 ile 3 arasında değişen kilde sıkışma indisi değerlerini 0,1 – 1,13 arasında bulmuşlardır. Üç eksenli basınç deneylerinde numuneler kohezyon özelliği göstermezken içsel sürtünme açısı değerlerinin 21^0 - 30^0 arasında değiştiğini bulmuşlardır. Araştırmacılar yaptıkları direk kesme kutusu deneylerinde ise efektif içsel sürtünme açısı değerlerinin $26,7^0$ – 50^0 arasında kohezyon değerlerinin ise 7,43 – 35 kPa arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Sridharan ve ark. (2007), kaolinitik zeminlerin fiziksel ve mühendislik davranışlarını kontrol eden mekanizmaların montmorillonitik zeminlerinkinden oldukça farklı olduğunu, bu durumun kaolinitin davranışında çekme kuvvetlerinin baskın olmasından kaynaklandığını söylemişlerdir. Araştırmacılar kaolinitte drenajsız kayma mukavemetinin 0,5 N Nacl ve CCl_4 boşluk sıvıları durumu için saf sudakinin 4 -7 kat arasında arttığını söylemişlerdir. Montmorillonitik zeminlerde ise kaolinittekinin tersi bir durumun mevcut olduğunu, diffüz çift tabaka suyunun viskoz yapısındaki bir artışla drenajsız kayma mukavemetinin arttığını ifade etmişlerdir.

Rehman ve ark. (2007), şişme özelliğine sahip bir kilin geotekniksel davranışı üzerinde ham petrolün etkilerini araştırmışlardır. Ham petrolle kirlenmiş kil kohezyonsuz bir zemin gibi davranmış ve agrega formuna yaklaşmıştır. Ham petrolle kirlenmiş kilin kayma mukavemeti, katyon değiştirme kapasitesi, plastisite özelliği ve şişme özellikleri büyük oranda değişmiştir. Şişme özelliğine sahip kil ham petrolle kirletildikten sonra şişme basıncı 3 kat azalmıştır.

Zhan ve ark. (2008), kentsel katı atık depolarındaki dolguları, dolgu yaşının bir fonksiyonu olarak kayma mukavemeti değişimini laboratuar ve arazi deneyleri yaparak incelemişlerdir. Dolgunun farklı derinliklerinden alınan numuneler üzerinde laboratuarda yapılan üç eksenli basınç deneylerinde dolgunun 1,7 yıllık ve 11 yıllık

olan kısmından numuneler alınmıştır. Yapılan deneylerde, %10 deformasyon seviyesinde kohezyonun 23,3 kPa'dan 0 kPa'a düştüğü, fakat içsel sürtünme açısının ise $9,9^0$'den 26^0'ye yükseldiği bulunmuştur.

Mohammad ve Shahaboddin (2008), montmorillonit ağırlıklı Taleqan kili ve vermikülit-kaolinit ağırlıklı Boin Zahra killeri üzerinde damıtık su, toluen ve etilen glikol ile şişme deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerde her bir sıvı ile yaptıkları deneyler için deney numunelerini hazırlarken kompaksiyon deney sonucu elde ettikleri optimum su muhtevasında, optimum su muhtevasının ıslak tarafında ve optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırarak hazırladıkları numuneler üzerinde şişme yüzdelerini belirlemişlerdir. Her iki kil içinde ıslak taraftan kuru tarafa doğru gidildikçe şişme yüzdeleri artmıştır. Bu artışlar en fazla saf su için olup, toluen varlığında şişme yüzdeleri çok düşük ve artışlarda çok düşük olmuştur. Araştırmacılar şişme yüzdelerindeki değişimin numunelerin başlangıç su muhtevaları ve boşluk sıvısının dielektrik sabiti ile alakalı olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalmasıyla diffüz çift tabakanın çöktüğünü ve böylece şişme yüzdesinin azaldığını söylemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, montmorillonit içeriğinden dolayı Taleqan kilinin Boin Zahra kiline göre daha yüksek şişme yüzdesine sahip olduğunu söylemişlerdir.

Araştırmacılar Boin Zahra kili üzerinde etilen glikol ile 5 ayrı düşey gerilme altında yaptıkları osmotik konsolidasyon deneylerinde; 75 kPa basınç gerilmesi için osmotik konsolidasyon dolayısıyla meydana gelen boşluk oranı değişimi %18 iken, 150, 300, 600 ve 1200 kPa için meydana gelen boşluk oranı değişimleri sırasıyla %16, 14, 2 ve %2 olmuştur. Araştırmacılar 600 kPa basınç kademesine kadar kil tanecikleri arasındaki boşluk sıvısının özelliklerinden kaynaklanan fiziko-kimyasal faktörlerin etkili olduğunu, 1200kPa gerilme kademesinde ise mekaniksel faktörlerin etkili olup osmotik basınçların etkili olmadığını ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmada kullanılan killer içerisinde bulunan farklı minerallere ait özelliklerin ve bunların kimyasal sıvılarla olan etkileşiminin daha iyi anlaşılabilmesi için killerle ilgili genel bilgiler bu kısımda verilmiştir.

3.1. Kilin Tanımı ve Önemi

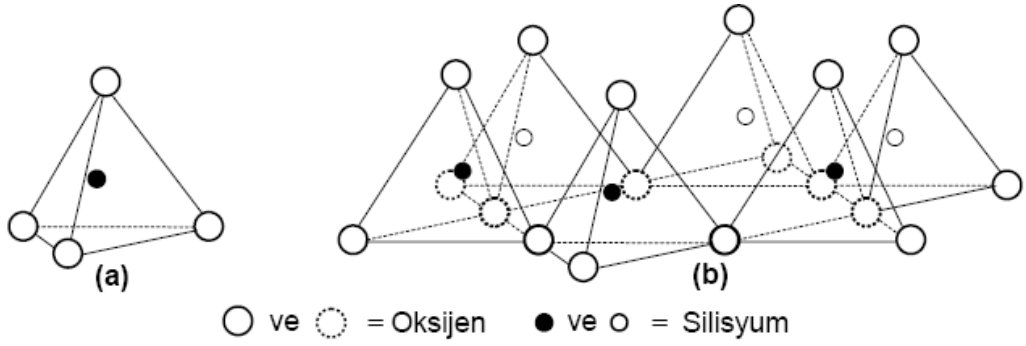
Zemin mekaniğinde zeminler kaba taneli ve ince taneli olmak üzere iki grup altında incelenmektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 75 μm tane çapı sınırı kaba ve ince taneli zeminlerin sınırı olup, 200 Nolu (75 μm) eleğin altına geçen kısım ince taneli zeminler olarak adlandırılmaktadır. İnce taneli zeminler ise kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır.

Bilimsel tarifiyle 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.

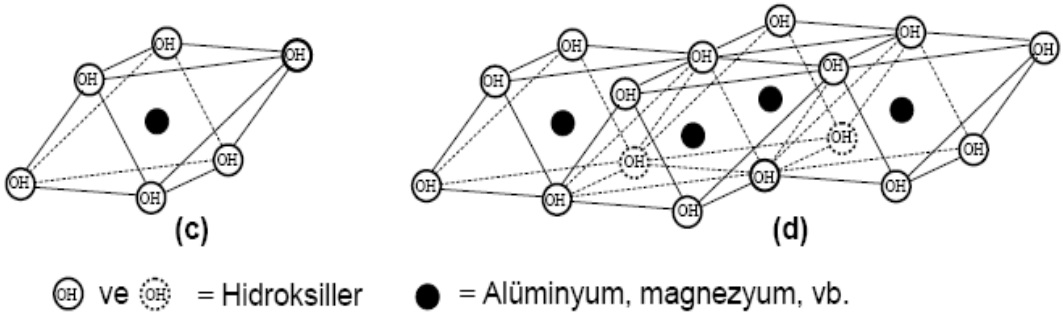
Killer sadece geoteknik mühendisinin ilgilendiği bir ortam olmayıp mühendislik yapılarında, tıpta, seramik endüstrisinde ve tarım alanlarında da bir malzeme olarak karşımıza çıkar. Killer dolgu barajlarda ve atık depolarında geçirimsizliğin sağlanması, göletlerin su tutması için ve kazıldığında kendini 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.

3.2. Kil Mineralleri ve Yapıları

Kil mineralleri, çok küçük boyutlu partiküllerden ibaret, kristalli minerallerdir. Pul veya çok küçük plaka şeklinde olan kil mineralleri, atomik yapıyı tekrarlayan birçok kristal yaprağından oluşurlar. Farklı tabaka yapıları içindeki farklı metalik iyonlar (Mg, Ca, K, Na ve Fe) farklı kil minerallerini oluştururlar. Tüm kil mineralleri 2µm'den küçük olmayıp aynı zamanda 2µm'den küçük danelerin hepsi kil minerali değildir. Kil boyutlu daneler ve kil mineralleri farklı şeylerdir. Kil mineralleri tabakalardan meydana gelmekte ve kendi aralarında çeşitli şekillerde bağlar meydana getirmektedirler. Kil minerallerini meydana getiren iki temel ünite Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi dört düzlemli silika ünitesi (tetrahedron) ve Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi sekiz düzlemli alüminyum ünitesidir (oktahedron).



Şekil 3.1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi (tetrahedron) (Grim 1959)
a) Tetrahedron b) Tetrahedral tabaka



Şekil 3.2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) (Grim 1959)
c) Oktahedron d) Oktahedral tabaka

Kil minerallerinin çoğunluğunda silika dört ayaklıları yan yana gelerek tabakalı bir yapı oluştururlar. Silika ünitesi bir silisyum atomunun çevresinin dört adet oksijen atomu ile çevrilmesiyle oluşmuştur (Lambe ve Whitman, 1979). Bu yapı bir tetrahedral yapı olmaktadır. Oksijenler arası mesafe aynı olup 2,55 A^0 ve tüm tabaka kalınlığı 4,63 A^0'dur. Her tetrahedral yapının tabanındaki oksijen atomları diğer tabakalardakilerle bağlanarak taban düzleminde uçları aynı yöne bakan altıgen bir ağ meydana getirirler. Bu yapı sınırsız olarak tekrarlanabilir.

Sekiz düzlemli alüminyum ünitesi, alüminyum veya magnezyum atomlarından birinin çevresinin altı tane oksijen atomu veya hidroksil iyonu ile çevrilmesiyle oluşmuştur. Oksijenler arası mesafeler 2,6 A^0, hidroksiller arası mesafe 2,94 A^0 ve tüm tabaka kalınlığı 5,05 A^0'dur. Bazı durumlarda Al ve Mg yerine iki değerlikli demir, mangan, nikel; üç değerlikli demir, krom veya dört değerlikli titan iyonları bulunabilir. Eğer katyon üç değerlikli ise mevcut boşlukların yalnızca üçte ikisi doldurulur ve yapı dioktahedral olarak isimlendirilir. Eğer kristal kafesi içindeki katyon iki değerlikli ise katyonlar tüm boşlukları doldurur ve yapı trioktahedral olarak isimlendirilir (Mitchell 1993). Eğer alüminyum iyonu kafes içinde bulunursa $Al_2(OH)_6$ birleşimi söz konusudur ve kilde gibsit tabakası (G) şeklinde bilinen özel yapı oluşur. Eğer kafes içinde magnezyum bulunursa $Mg_3(OH)_6$ birleşimi söz konusu olup brusit tabakası (B) oluşur (Yong ve Warkentin 1975). Silikat, gibsit ve brusit tabakalarının çeşitli şekillerde farklı bağlarla meydana getirdikleri daha büyük oluşumlar değişik kil minerallerini oluştururlar. Killerin sınıflandırılmasında esas alınan özellikler;

a) Bir hücre veya tabakanın kalınlığı,
b) Tabakanın di veya trioktahedral özelliği ve iyon içeriği,
c) Tabakaların dizilişi ve diziliş düzenidir.

Konta (1995), ana yapısal tabaka yapraklarının miktarı ve oranına, oktahedronlar ve tetrahedronlardaki bir diğerinin yerini alan katyonların bulunmasına ve tabaka yükü durumlarına göre kristal haldeki kil minerallerini yedi grup altında sınıflandırmıştır (Çizelge 3.1).

Burada, temel olarak belirli bir katyonu içeren tetrahedral ve oktahedral levhaların değişik şekillerde bir araya gelmeleriyle meydana gelmiş olan ve doğada yaygın olarak bulunan kil mineralleri kısaca açıklanmıştır.

Çizelge 3.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta 1995)

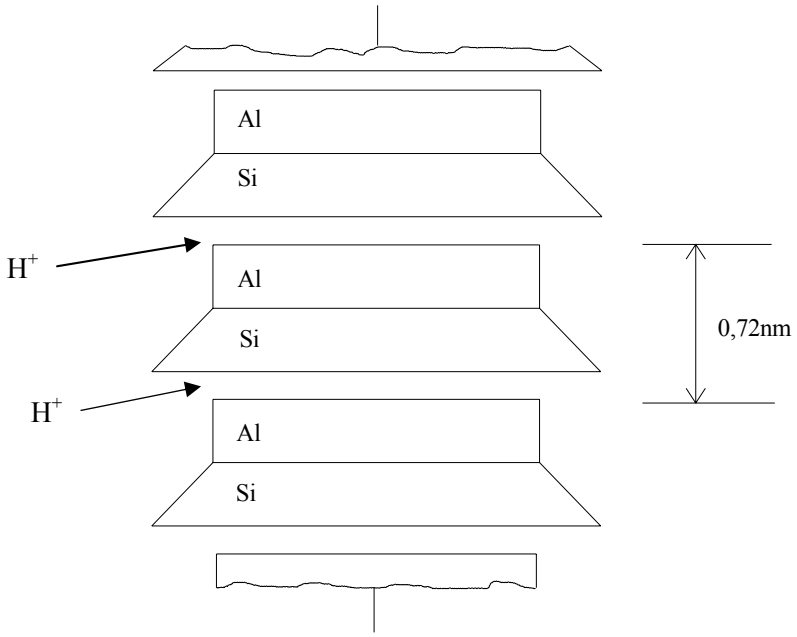
Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit,	Kaolinit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$
Serpantinit	Halloysit	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_4nH_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(Mg,Fe^{2+})[Si_{>}Al_8O_{20}](OH)_4nH_20$
Simektit	Montmorillonit	$M^{+}_{X+Y}(Al,Fe^{2+})_{4-Y}[(Si_{8-X}Al_X)O_{20}]$ $(OH)_4nH_2O$
	Beidellit	$M_XAl_4[(Si_{8-X}Al_X)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Notronit	$(M^{+}_XFe^{3+})_{4-Y}[(Si_{8-X}Al_X)O_{20}](OH)_4\,nH_2O$
	Saponit	$(M^{+}_XMg_6)[(Si_{8-X}Al_X)O_{20}](OH)_4\,nH_2O$
Profiilit ve Talk	Profillit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$
	Talk	$Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Donbassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit,	Paligorskit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_44H_2O$
Sepiyolit	Sepiyolit	$Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

3.2.1. Kaolinit

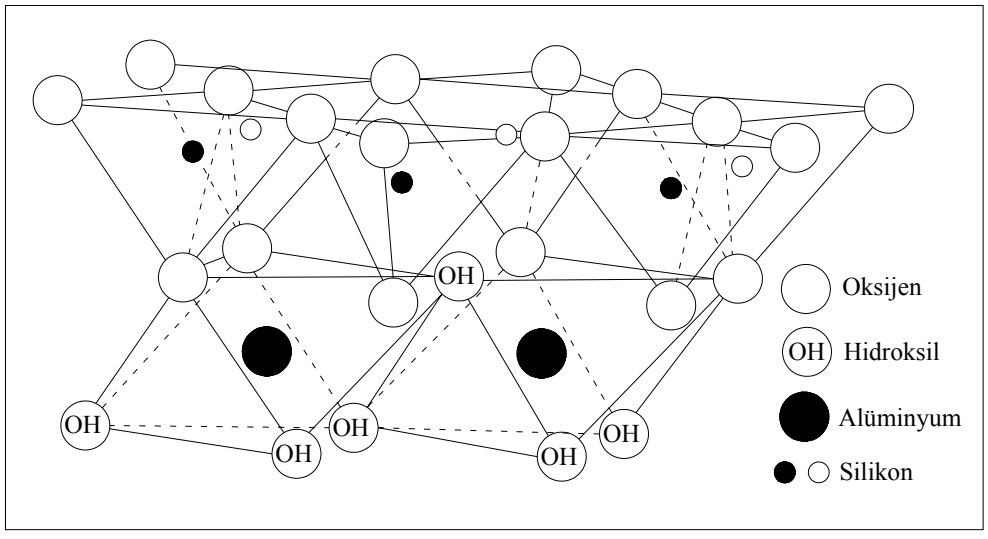
Kaolinit mineralleri, 1:1 silika:alümina minerali olarak adlandırılır. Temel olarak bir tetrahedral (silika) ve bir oktahedral (alümina veya gibsit) levhasının tekrarlanan katmanlarından oluşmuştur. Bir katmanın iki levhanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı kaolinit 1:1 kil minerali şeklinde anılır. Bir katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0,72 nm olup uzanımı diğer iki yönde devam etmektedir. Kaolinit yapısının şematik diyagramı ve atomik yapısı Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'de verilmiştir. Birbirini izleyen bu temel katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağı ile bir arada tutulurlar. Hidrojen bağı çok güçlü bir bağ olduğundan hidrasyonu önler ve katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal oluşturmasını sağlar. Tipik bir kaolin kristalinde 70 ile 100 arasında katman bulunmaktadır (Holtz ve Kovacs 1981).

Tabakalar arasında bulunan güçlü hidrojen bağından dolayı kaolinit şişen bir

kil değildir. Bu kuvvetli bağlanma tabakalar arasına su adsorpsiyonunu sınırlamaktadır. Kaolinitin katyon değiştirme kapasitesi (CEC)=3-15 meq/100 gr değerleri arasında olup, yanal boyutları 0,1-4 μm arasında ve tabaka kalınlığı 0,05-2 μm arasındadır. Kuru kil için spesifik yüzey alanı 10-20 m^2/gr'dır. (Mitchell 1993).



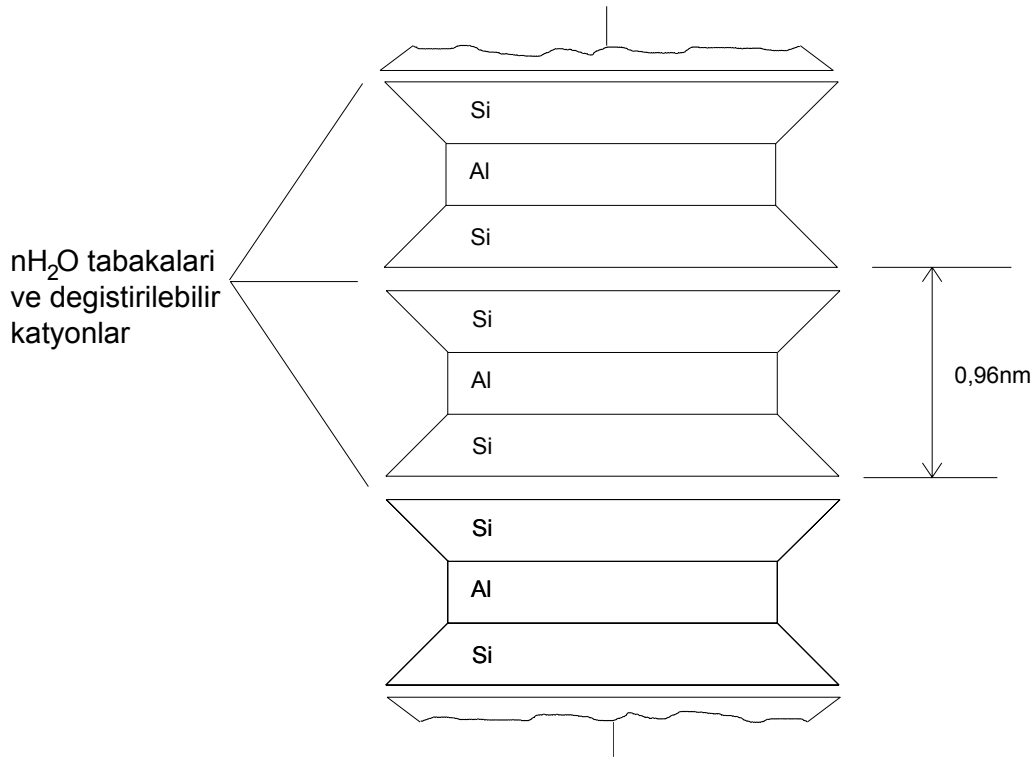
Şekil 3.3. Kaolinit yapısının şematik gösterimi (Lambe 1953)



Şekil 3.4. Kaolinitin Atomik Yapısı (Mitchell 1993)

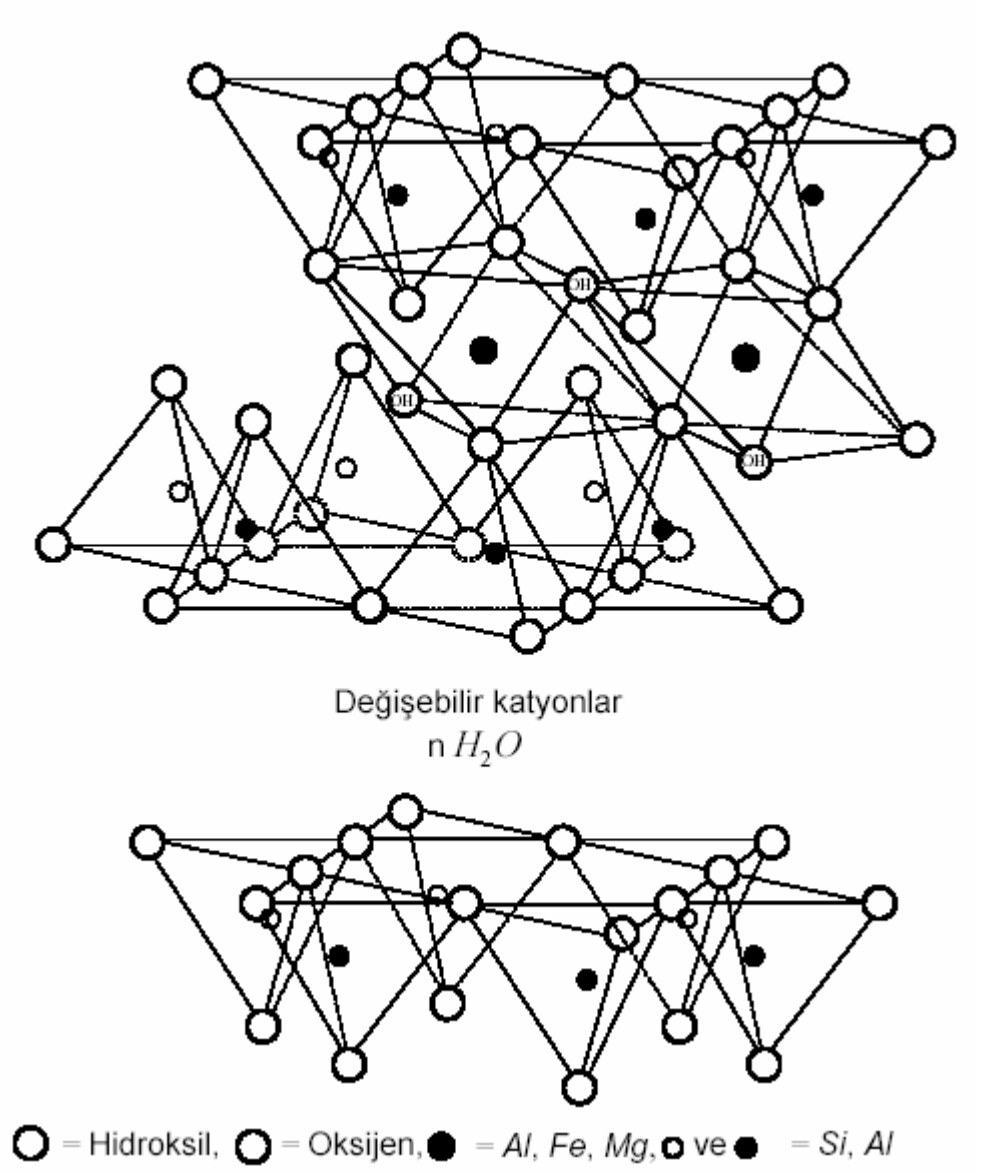
3.2.2. Montmorillonit

Montmorillonit bir 2:1 minerali olup, oktahedral levhası iki silika levhası arasına gelerek bir katman oluşturmaktadır. Burada silika levhasındaki tetrahedronların uçları oktahedral levhanın hidroksilleri ile birleşmektedir. 2:1 katmanının kalınlığı yaklaşık olarak 0,96 nm olup kaolinitte olduğu gibi diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Montmorillonitin şematik diyagramı ve atomik yapısı Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da verilmiştir. Tabakalar Van der Walls kuvvetleri tarafından bağlanmaktadır. Silika levhalarının tepesini bağlayan Van der Walls kuvvetlerinin zayıf olması ve oktahedral levhada da net bir negatif yük boşluğu olmasından dolayı, su, organik sıvılar ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek bunları ayırabilmektedir.



Şekil 3.5. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı (Lambe 1953)

Bu nedenle montmorillonit çok küçük olsa da, aynı zamanda çok yüksek bir su çekim gücüne sahiptir ve yüksek plastisiteli bir kildir. Bu özelliğinden dolayı montmorillonit içeren zeminler özellikle artan su içeriklerinde şişmeye karşı son derece duyarlı olup gelişen şişme basıncı hafif yapılara ve yol kaplamalarına zarar verebilmektedir. Montmorillonitin katyon değiştirme kapasitesi (CEC) yüksek olup 80-150 meq/100 gr'dır. Tabaka kalınlığı 10 A^0'dan genişliğinin 1/100 'üne kadar çıkabilir. Uzun aks buyunca boyutları genellikle 1-2 μm'den azdır ve spesifik yüzey alanı 50-800 m^2/gr'dır (Mitchell 1993).

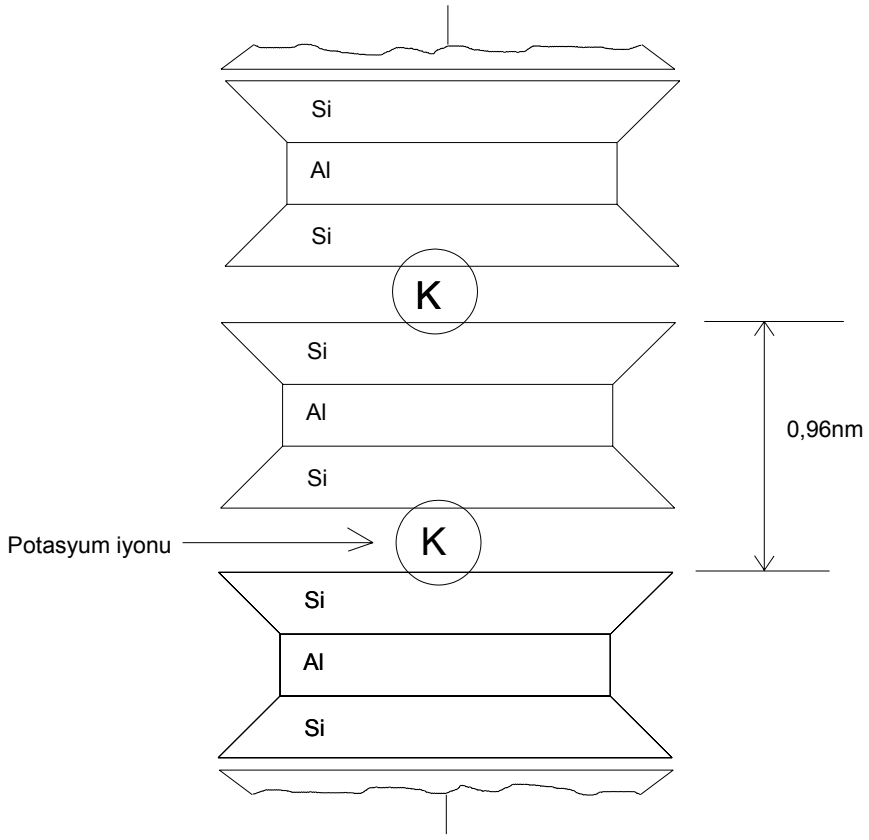


Şekil 3.6. Montmorillonitin atomik yapısı (Grim 1959)

3.2.3. İllit

İllit montmorillonit gibi bir 2:1 minerali olup, Illinouis Üniversitesi profesörlerinden R. E. Grim tarafından keşfedilmiştir. Killi zeminlerde bol miktarda bulunan illitin katmanları arasındaki bağ potasyum iyonu ile sağlanmaktadır. Silika levhasındaki altıgen boşluğun çapı tam tamına bir potasyum iyonu sığacak kadar olup buraya yerleşen potasyum iyonları (K^+) katmanları kuvvetli bir şekilde bir arada tutmaktadır. Ayrıca silika levhasındaki silisyumun alüminyum ile izomorf yer değiştirmesi de söz konusudur. İllitin tabaka kalınlığı 0,96 nm olup (Şekil 3.7.), illit minerali kaolin ve montmorillonit arasında bir davranış ortaya koymaktadır.

İllitin kristal yapısı mika minerallerine benzese de daha az potasyum ve daha az izomorf yer değiştirme söz konusudur. Bu nedenle kimyasal olarak diğer mikalardan çok daha aktiftirler (Holtz ve Kovacs 1981). İllitin katyon değiştirme



Şekil 3.7. İllitin şematik diyagramı (Lambe 1953)

kapasitesi (CEC) simektitlerden daha az olup 10-40 meq/100 gr'dır. Uzun eksen boyunca boyutları 0,1 μm'den birkaç mikrometreye kadar değişmekte olup tabaka kalınlığı 30 A^0 dolayındadır. İllitin spesifik yüzey alanı 65-100 m^2/gr arasındadır (Mitchell 1993).

3.2.4. Sepiyolit

Sepiyolit-paligorskit grubuna ait, magnezyum hidrosilikatten ibaret doğal bir kil mineralidir. Tetrahedral ve oktahedral oksit tabakalarının istiflenmesi sonucu oluşan lifsi bir yapısı vardır ve lif boyunca devam eden kanal boşluklarına sahiptir (Vicente Rodrigez ve ark. 1994).

Sepiyolitin katyon değişim kapasitesi (CEC) ile ilgili literatür verileri oldukça değişkendir:

- Grim (1968) 3-15 meq/100 gr,
- Otsuka ve ark. (1973) 31,6 meq/100 gr,
- Galan (1979) 26,0 meq/100 gr,
- Caillere ve ark. (1982) 20-30 meq/100 gr.

Sedimanter tabakalar halinde çökelen sepiyolitler, genellikle toprağımsı, ince taneli ve kaygan görünümlüdür. Bu tip sepiyolitlerde, sepiyolit minerali, bileşimde %90'ı aşan oranlarda bulunur ve buna eşlik eden mineraller de; genelde dolomit ve simektit grubu killer ile manyezit, paligorskit ve detritik minerallerdir. Dolomitli sepiyolitler çoğunlukla %50 ve daha fazla oranlarda sepiyolit içerirler.

Sepiyolit kendine has yapısı itibariyle son derece yüksek bir sorpsiyon özelliğine sahiptir ve kendi ağırlığının 200-250 katı kadar su tutabilir. Zeolitik su, yapısal zincirlerin kenarlarında magnezyum iyonlarına koordine olmuş su molekülleri ile hidrojen bağları oluşturur. Koordinasyon ve zeolitik su molekülleri, yüksek polariteli küçük moleküller ile yer değiştirebilir. Örneğin kısa zincirli primer alkoller, kanalların içine yayılarak zeolitik su moleküllerinin ve hatta koordinasyon suyu moleküllerinin yerini alabilirler. Daha fazla zincir uzunluğuna sahip alkollerde ise sadece dış yüzeylerdeki açık kanallarda zeolitik su ile ve koordinasyon suyu

molekülleri ile yer değiştirebilirler. Yine katyonik reaktifler grubuna giren uzun hidrokarbon zincirine sahip amin türü organik maddelerle yapılan adsorpsiyon çalışmaları, amin moleküllerinin sadece sepiyolitin dış yüzeylerinde tutunmayıp aynı zamanda kanal boşluklarına da yerleştiğini ve adsorpsiyon olayının, primer aminlerde, amin moleküllerinin oktahedral tabakada yer alan bağıl ve zeolitik su molekülleri arasında hidrojen bağı oluşturarak (Sabah ve ark. 1997): kuvarterner aminlerde ise Mg^{+2} iyonu ile amonyum arasındaki iyon değiştirmeden ve Van der Walls güdümlü zincir-zincir etkileşimlerinden kaynaklandığını göstermiştir (Sabah ve Çelik 1998; Kara ve ark. 1998).

Sepiyolit, genellikle su ve amonyum gibi polar moleküller ile polar olmayan bileşikleri ve nispeten daha az miktarda metil ve etil alkolleri adsorplayabilmektedir. Ancak polar olmayan bileşiklerin adsorpsiyonu dış yüzeylerle sınırlı olup tutulan molekülün boyutuna ve şekline bağlıdır.

Sepiyolitin spesifik yüzey alanı, yaklaşık olarak 800-900 m^2/gr'dır. Teorik olarak bunun 400 m^2/gr'ı dış yüzey, 500 m^2/gr'ı da iç yüzey alanıdır (Alvarez 1984; Serna ve Van Scoyoc 1978).

Elektron mikroskobunda yapılan incelemelerde, sepiyolitin iğne şeklindeki partiküllerinin aglomera yapıda olduğu ve bunların çalı-ot yığınlarına benzer geniş lif kümeleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu lif yığınları, suda veya yüksek-düşük polariteli diğer çözücülerde kolayca dağılarak sıvıyı bünyelerine hapseder ve bu yolla süspansiyonun viskozitesini arttırırlar (Alvarez 1984).

3.2.5. Kil mineralleri ile beraber bulunabilen diğer bazı mineraller

Yerkabuğunda en çok bulunan mineral grubu feldispat olup, bileşimleri esas olarak sodyum, potasyum, kalsiyum ve alüminyum silikattır. Feldispat grubu mineraller ortoklas ve plajioklas olmak üzere iki sınıf altında incelenebilir.

Doğada feldispatlardan sonra en yaygın bulunan mineral kuvars olup, kimyasal bileşimi SiO_2'dir. Kuvars doğada bozunmaya karşı en dayanıklı mineral olup, florür asitten başka hiçbir asitten etkilenmez. Kuvars cam ve seramik sanayinin

hammaddesidir.

Kalsit, karbonat grubu minerallerden birisi olup kimyasal formülü $CaCO_3$'tür. Kalsit kirecin hammaddesidir. Kireçtaşları kalsit mineralinden oluşmuştur. Soğuk ve seyreltik hidroklorik asitte (HCl veya tuz ruhu) şiddetli bir köpürme ile ayrışır. CO_2'li sularda çözünmesiyle $Ca(HCO_3)_2$ oluşur (Eşitlik 3.1.). $CaCO_3$ saf suda hemen hemen hiç çözünmezken oluşan $Ca(HCO_3)_2$ saf suda oldukça kolay çözünür.

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca(HCO_3)_2 \qquad (3.1.)$$

Dolomit, kireçtaşında ($CaCO_3$) , Ca ile Mg'un beraber yer alması ile oluşan bir mineral olup kimyasal bileşimi $CaMg(CO_3)_2$'dir. Hidroklorik asitten az etkilenir. Karbondioksitli (CO_2) sularda çözünmeyle kalsiyum bi karbonat ve magnezyum bi karbonat oluşur (Eşitlik 3.2.). $CaMg(CO_3)_2$ saf suda çözünmezken bi karbonatlar suda çözünür.

$$CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca(HCO_3)_2 + Mg(HCO_3)_2 \qquad (3.2.)$$

Dolomit kireçtaşlarından CaO'un yerini kısmen veya tamamen MgO'un alması ile oluşur. Bu yüzden bileşimi açısından kireçtaşları ile ilişkili olup yanalda ve düşeyde daima kireçtaşları ile geçişlidir.

3.3. Kil Minerallerinin Özellikleri

3.3.1. Spesifik (özgül) yüzey alanı

İnce daneli zeminler yüzeylerindeki elektriksel ve kapiler kuvvetlerin etkisindedirler. Özgül yüzey alanı arttıkça, bu elektriksel ve kapiler kuvvetler artmakta ve bu kuvvetler ince daneli zeminlerin mühendislik davranışlarını çok güçlü bir şekilde etkilemektedirler. Özgül yüzey alanı (ÖYA) birim ağırlıktaki zeminin

yüzey alanı olarak tanımlanmakta ve genellikle m^2/gr cinsinden ifade edilmektedir. Zemin davranışının yüzeysel kuvvetlerin etkisinde olabilmesi için sınır özgül yüzey alan değeri 1m^2/gr olarak kabul edilmektedir (Santamarina ve ark. 2002).

Spesifik yüzey alanı kilin türüne, mineralojisine, organik kompozisyonuna ve tane boyutuna bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir. Yüzey alanı zemin danelerinin boyutuyla ters orantılıdır. Kil daneleri genellikle 2 mikrondan daha küçük boyuttadır. Kaolinit, çapı 0,3 ile 4 μm, kalınlığı 0,05 ile 2 μm arasında değişen tanelere sahiptir. Montmorillonit daneleri ise yaklaşık 0,003 μm kalınlığında 0,1 ile 1 μm aralığında değişen çapta çok ince plakalardır. Örneğin monmorillonit gibi şişme özelliği yüksek olan killerin spesifik yüzey alanı 850 m^2/gr'a kadar çıkabilmekte, bunun yanında şişme özelliği olmayan kaolinit gibi killerin spesifik yüzey alanı genellikle 10-40 m^2/gr arasında değişmektedir. Başlıca kil minerallerinin özgül yüzey alanı Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir.

İnce taneli zeminlerin mühendislik parametreleri ile yüzey alanları arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Farklı yüzey alanına sahip zeminler farklı mühendislik davranışları göstermekte ve mühendislik parametreleri de değişik olmaktadır. Spesifik yüzey alanı tayini için farklı metotlar mevcuttur. Bu metotların çoğu uzun zaman almakta ve yapılabilmesi için her laboratuarda bulunamayacak özellikte pahalı ve donanımlı aletlere ihtiyaç duyulmaktadır. Spesifik yüzey alanı belirlemede yaygın olarak kullanılan yöntemler; azot adsorpsiyonu (BET- N_2), metilen mavisi (MM) ve etilen glikol monoetil eter (EGME) metotlarıdır.

Çizelge 3.2. İnce taneli zeminlerin başlıca kil minerali bileşenlerinin spesifik yüzey alanları (Mitchell 1993)

Kil Minerali	Mineral Yapısı	Dış ÖYA (m^2/gr)	İç ÖYA (m^2/gr)
Halloysit	1:1	10-20	-
Kaolinit	1:1	35-70	-
Simektit (Montmorillonit)	2:1	50-120	700-850
İllit	2:1	65-100	-
Vermikülit	2:1	40-80	800-900
Klorit	2:1:1	10-40	-

3.3.2. Katyon değiştirme kapasitesi (CEC)

İzomorf yer değiştirmeler başta olmak üzere, hidroksil iyonlarının kil yüzeyinden ayrılması, kristal kafesinde katyon eksikliği, yüzeye sonradan bağlanmış anyonlar ve organik molekül içeriği elektriksel yük dengesizliğine neden olmaktadır. Bu dengesizliğin sonucu, kilin su ve ortamdaki katyonlara aşırı istek göstermesidir. Yük dengesizliğini gidermek için gerekli katyon miktarına kilin katyon değiştirme kapasitesi (CEC) denir ve 100 gr kuru kilde mili-eşdeğer türünden ifade edilir. Katyonlar yalnızca kristallerin dış ve iç yüzeylerine zayıf olarak bağlanmışlarsa değiştirilebilirler.

Katyon değiştirme kapasitesini belirlemek için farklı metotlar mevcuttur. Bu metotlar amonyum asetat metodu, strontium klorid metodu, kararsız yükler ve sürekli yükler metotlarıdır. Bütün metotlar, standardı sağlayabilmek için pH=7 ortamında gerçekleştirilmektedir. Karşımıza çıkan tipik kil mineral türleri için hesaplanan katyon değiştirme kapasitesi değerleri (CEC) Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Tipik kil minerallerinin pH=7'de belirlenmiş CEC değerleri (Çokça 1993 ve Breck 1974).

Kil Mineralleri	CEC (meq/100gr)
Montmorillonit (Simektit)	80-150
Vermikülit	100-150
Zeolit	170-260
Sepiyolit-Attapulgit	20-30
Halloysit.$2H_2O$	5-10
Halloysit.$4H_2O$	10-15
İllit	25-40
Klorit	10-40
Kaolinit	3-15

3.3.3. Kil minerallerinin boyutları

Kil minerallerinin spesifik yüzey alanı değerleriyle de bağlantılı olan mineral boyutları, killerin dış çevreyle olan ilişkileri ve davranış özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. En büyük kil minerali olan kaolinitin kalınlığı veya kenar boyutu 1 μm olup en küçük kil minerali olan montmorillonitin kalınlığı sadece birkaç nanometredir. Yaygın olarak bulunan dört kil mineralinin göreceli boyutları ve spesifik yüzey alanları Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Yaygın kil minerallerinin göreceli boyutları, kalınlıkları ve spesifik yüzey alanları (Yong ve Warkentin 1975).

Kenar Görünümü	Tipik Kalınlık (nm)	Tipik Çap (nm)	Spesifik Yüzey Alanı (km^2/kg)
Montmorillonit	3	100-1000	0,8
İllit	30	10000	0,08
Klorit	30	10000	0,08
Kaolinit	50-2000	300-4000	0,015

3.3.4. Kil minerallerinin aktiviteleri

Aktivite bir kilin plastisite indisinin, içerdiği kilin yüzdesine oranıdır (Eşitlik 3.3). Plastisite indisi ve kil yüzdesi arasında doğrusal bir bağıntı olduğu varsayımından çıkılarak tanımlanan bu formülde A_C kilin aktivitesi, I_P plastisite

indisi ve %C kil yüzdesidir. Aktivite ile kil mineralinin türü arasında oldukça iyi bir korelasyon vardır ve Çizelge 3.5.'de değişik kil minerallerinin aktiviteleri görülmektedir. Kil mineralinin aktivitesi dane boyutuna bağımlı olup Çizelge 3.5. ve Çizelge 3.4. ilişkilendirilirse bu daha net olarak görülebilir. Kilin aktivitesi 1,25'ten büyükse kil aktif, 0,75 ile 1,25 arasında ise normal aktif; 0,75'ten küçükse aktif olmayan kil olarak sınıflandırılır ve A_C büyüdükçe zeminin daha problemli olacağı kabul edilir.

$$A_C = \frac{I_P}{\%C} \tag{3.3.}$$

Çizelge 3.5. Değişik kil minerallerinin aktiviteleri (Skempton 1953 ve Mitchell 1976)

Mineral	Aktivite
Na-montmorillonit	4-7
Ca-montmorillonit	1,5
İllit	0,5-1,3
Kaolinit	0,3-0,5
Halloysit (Susuz)	0,5
Halloysit (Sulu)	0,1
Attapulgit	0,5-1,2
Allofan	0,5-1,2
Mika (Muskovit)	0,2
Kalsit	0,2
Kuvars	0

3.3.5. İzomorf yer değiştirme

Kil minerallerinde oktahedral veya tetrahedral tabakada normalde bulunan katyonun yerinin bir başka katyon tarafından alınması olayına izomorf yer değiştirme denmektedir. Ancak burada kullanılan yer değiştirme terimi yapıyı tam

yansıtmamaktadır. Gerçekte yabancı katyonlar sadece boş olan yerleri almaktadırlar. Kaolinit dışında tüm kil mineralleri izomorf yer değiştirme sonucu kristal kenarlarında net negatif yük taşımakta, bu da nötrlüğün sağlanması için yabancı katyonların kenarlara bağlanması sonucunu getirmektedir (Önalp 2007).

3.4. Killerin Mühendislik Davranışını Etkileyen Faktörler

3.4.1. Kil-su etkileşimi

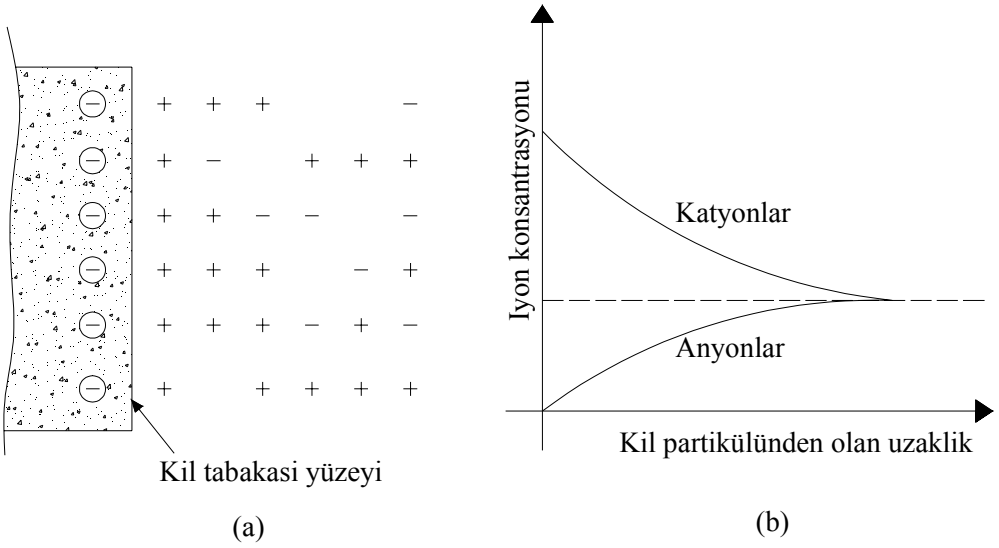
Aralarındaki uzaklığa bağlı olarak, iki cisim arasında karşılıklı itme ve çekme kuvvetlerinin varlığı fiziğin temel kavramlarından biridir. Aynı kavramlar doğal olarak killer içinde geçerlidir. Ancak killerin yüzey alanı boyutu kütlesine oranla öylesine büyüktür ki insanın günlük yaşamında cisimler arasında varlığını fark edemediği bu kuvvetler kil boyutuna inildiğinde, özellikle kilin su ortamında bulunması durumunda, dengeyi tümüyle etkileyebilmektedir. Su içinde bulunan ve özgül ağırlığı suyunkinin üç katına varan kil ve kolloidlerin çok uzun süre dibe çökmeden yüzebilmeleri bu özelliğin basit bir göstergesidir. Kil mineralleri kimyasal yapılarından dolayı yüzeylerinde negatif, kenarlarında ise pozitif yük taşırlar. Daha büyük negatif yükler daha büyük spesifik yüzeylerden dolayı meydana gelmektedir. Yüzeydeki negatif yüklerin karşılığı ortalama yüzey yoğunluğu olup, Çizelge 3.6.'da bazı kil minerallerinin ortalama yüzey yük yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ortalama Yüzey Yük Yoğunlukları (Yong ve Warkentin 1975)

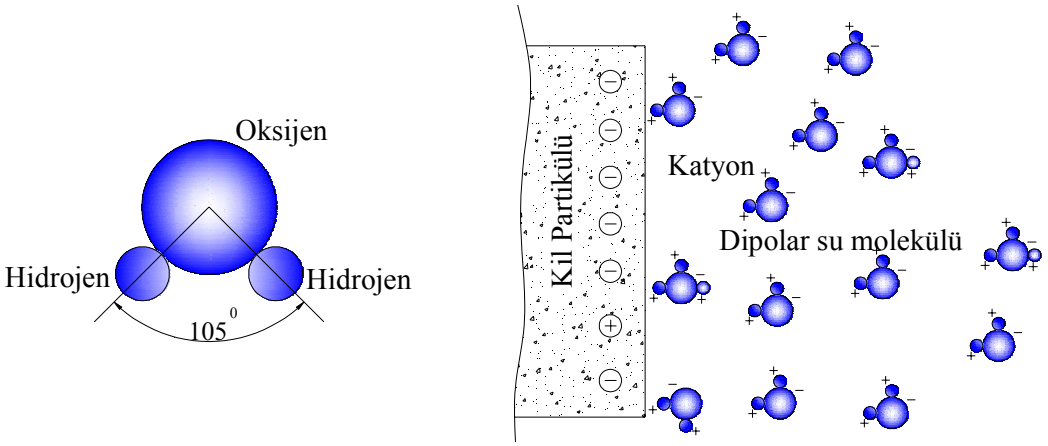
Kil Minerali	Ortalama Yüzey Yük Yoğunluğu ($Å^2$/elektron yükü)
Kaolinit	25
Mika ve Klorit	50
Montmorillonit	100
Vermikülit	75

Kuru killerde negatif yük elektrostatik çekim kuvveti ile parçacıklar tarafından tutulan Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} ve K^{+} gibi değiştirilebilir katyonlar tarafından dengelenmektedir. Kile bir miktar su eklendiğinde ise bu katyonlar ve bir kaç tane anyon kil parçacıklarının etrafında yüzmektedirler. Kil zerrelerinin yüzeyindeki negatif yük tabakası ile katyonların meydana getirdiği pozitif yük tabakası birlikte diffüz çift tabaka diye adlandırılmaktadır (Şekil 3.8a). Katyon konsantrasyonu, kil parçacığının yüzeyine olan uzaklık arttıkça azalır, uzaklık azaldıkça artar (Şekil 3.8b.).

Hidrojen atomları oksijenin etrafında asimetrik olarak değil 105^{0} bir açıyla bağlanmış durumda bulunmaktadırlar (Şekil 3.9a.). Bunun sonucunda bir su molekülü bir yanında pozitif yük ve diğer yanında ise negatif yüke sahiptir. Bu durum dipol karakter olarak tariflenir. Dipolar olan su molekülleri hem kil parçacıkları yüzeyindeki negatif yükler hem de çift tabakadaki katyonlar tarafından çekilirler. Katyonlar zemin parçacıkları tarafından da çekilmektedir. Su tarafından oluşturulan üçüncü mekanizma ise kil parçacıklarının çekimiyle oluşturulan hidrojen bağıdır ki burada su içerisindeki hidrojen atomları kilin yüzeyinde bulunan oksijen atomları ile paylaşılır. Boşluk suyu içerisindeki kısmen hidratlı bazı katyonlar kil parçacıklarının yüzeylerine çekilirler. Yine bu katyonlar çift kutuplu olan su moleküllerini çekerler (Şekil 3.9b.).



Şekil 3.8. a) Diffüz çift tabaka b) Kil yüzeyinde katyon konsantrasyonu (Das 2002)



(a) (b)

Şekil 3.9. a)Suyun dipolar karakteri b)Diffüz çift tabakada dipolar moleküllerin çekimi (Das 2002).

Su ile kil arasındaki çekim kuvveti kil parçacıkları yüzeyinden uzaklaştıkça azalır, yakınlaştıkça artar. Çekme kuvveti ile kil parçacıkları yüzeyinde tutulan tüm suya çift tabaka su adı verilir. Çift tabaka suyun en içteki tabakası kil tarafından daha sıkıca tutulur ki bu su tabakasına adsorbe su denir. Bu su serbest sudan daha viskoz bir yapıya sahiptir. Şekil 3.10 tipik bir montmorillonit ve kaolinit parçacığı üzerindeki adsorbe ve çift tabaka suyunu göstermektedir. Kil parçacıkları çevresindeki suyun durumu kil zeminlerin plastiklik özelliklerini vermektedir.

Kil parçacıkları etrafında oluşan diffüz çift tabakanın kalınlığı Gouy-Chapman teorisine bağlı olarak ifade edilmektedir (Mitchell 1976);

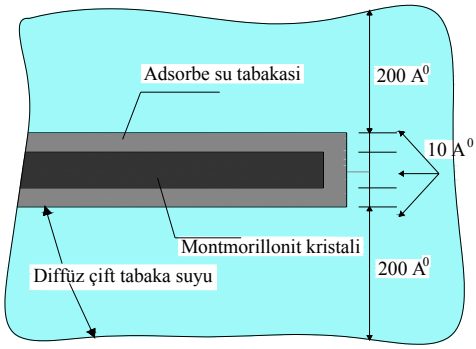
$$T_h = \sqrt{\frac{DKT}{8\pi n_0 \varepsilon^2 \nu^2}} \qquad (3.4.)$$

Burada; T_h : Diffüz çift tabakanın kalınlığı,

D : Dielektrik sabiti,

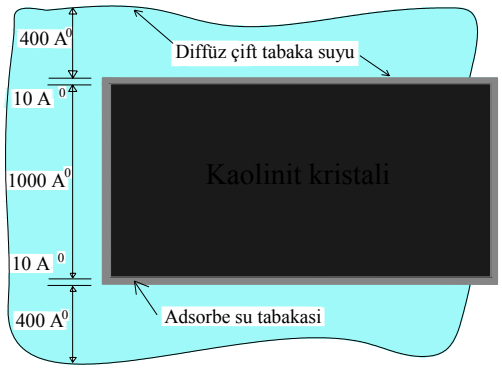
K : Boltzman sabiti,

T : Mutlak sıcaklık (Kelvin),



Tipik montmorillonit parçacigi

(a)



Tipik Kaolinit parçacigi

(b)

Şekil 3.10. Tipik bir montmorillonit ve kaolinit parçacığı üzerinde adsorbe su ve çift tabaka suyu (Lambe 1958).

n_0 : İyon konsantrasyonu,

ε : Birim elektrik yükü,

ν : İyonun valansıdır.

Bu denkleme göre diffüz çift tabaka kalınlığı, iyonun valansı ve iyon konsantrasyonunun karekökü ile ters orantılıdır. Yine kalınlık, dielektrik sabiti ve sıcaklık ile doğru orantılıdır. Bu denklemin parametrik olarak incelemesi şu sonuçları ortaya çıkarmaktadır (Mitchell 1976):

1- Kilin şişme davranışı kısmen çift tabaka içindeki elektrolit konsantrasyonuna bağlıdır.

2- Tek valanslı çift tabaka sistemine iki veya üç valanslı katyonların

eklenmesi (az miktarda) fiziksel özellikleri önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

3- Çift tabaka kalınlığı yumaklaşma eğilimini kontrol etmekte ve killerin şişme basıncını etkilemektedir.

4- Çift tabaka kalınlığındaki bir azalma kilin büzülmesine yol açabilir. Bu, atık atılan sahalar için önem taşımaktadır, çünkü sızıntı sıvısının dielektrik sabiti suyunkinden farklı olacaktır.

5- Isı değişiminin çift tabakaya yaptığı etkinin tahmin edilmesi zordur, çünkü dielektrik sabiti aynı zamanda sıcaklığa da bağımlıdır. Su açısından 0^0C ile 60^0C arasındaki bir ısı değişikliği D×T değerinde fazla bir değişikliğe yol açmamaktadır; bu da bu aralıktaki sıcaklık değişikliğinin çift tabaka kalınlığını fazla etkilemeyeceğini göstermektedir.

Ancak Gouy-Chapman teorisi çift tabaka kalınlığı hesabında; ikincil enerji terimleri, elektrik alanı ve su yapısı gibi özellikleri göz önünde tutmamaktadır. Aynı zamanda kil zeminler faklı kil minerallerinden meydana gelmekte olup her bir kil minerali farklı çift tabaka kalınlıklarına sahiptir. Bu yüzden herhangi bir teori yardımıyla çift tabaka kalınlığını direkt olarak hesaplamak neredeyse imkansızdır. Çünkü mevcut fiziko-kimyasal teoriler yeterli değildir ve ayrıca zemin dokusu ile diğer çevre etkilerinin göz önüne alınmasında zorluklar bulunmaktadır.

3.4.2. Kil parçacıkları arasındaki kuvvetler ve flokülasyon

Kil minerallerinin birlikteliği ve adsorpladıkları su tabakası zemin yapısı için gerekli fiziksel temeli oluşturmaktadır. Münferit kil partikülleri adsorpladıkları su tabakası ile etkileşim halindedirler. Killer suyun varlığında kimyasal değişikliklere karşı oldukça hassastırlar. Örneğin kil tanecikleri 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 nötrleştirilir. 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 tanesinin çevresinde uzaklıkla değişen itme ve çekme kuvvetleri oluşacaktır. Eğer iki kil tanesi arasında meydana gelen net kuvvet çekme ise daneler birbirine yaklaşır ve yapışırlar. Bu olaya yumaklanma (floklanma) denir. Eğer iki kil tanesi 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. Floklanma ve dispersiyon 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), katyonların sayısı (n^+) yüklü yüzeye olan mesafeye (x) göre üstel olarak azalmakta halbuki anyonların sayısı (n^-) ise artmaktadır (Şekil 3.12b).

$$n^- = n_0{}^- \exp^{(v^- e\frac{E}{KT})} \tag{3.5}$$

$$n^+ = n_0{}^+ \exp^{(v^+ e\frac{E}{KT})} \tag{3.6}$$

Burada: $n_0{}^+$ ve $n_0{}^-$: birim hacimdeki katyon ve anyonların sayısı

v^+ ve v^- : katyon ve anyonların değerliği

e : elektron yükü

E : yüklü yüzeyden x mesafede elektrik potansiyeli

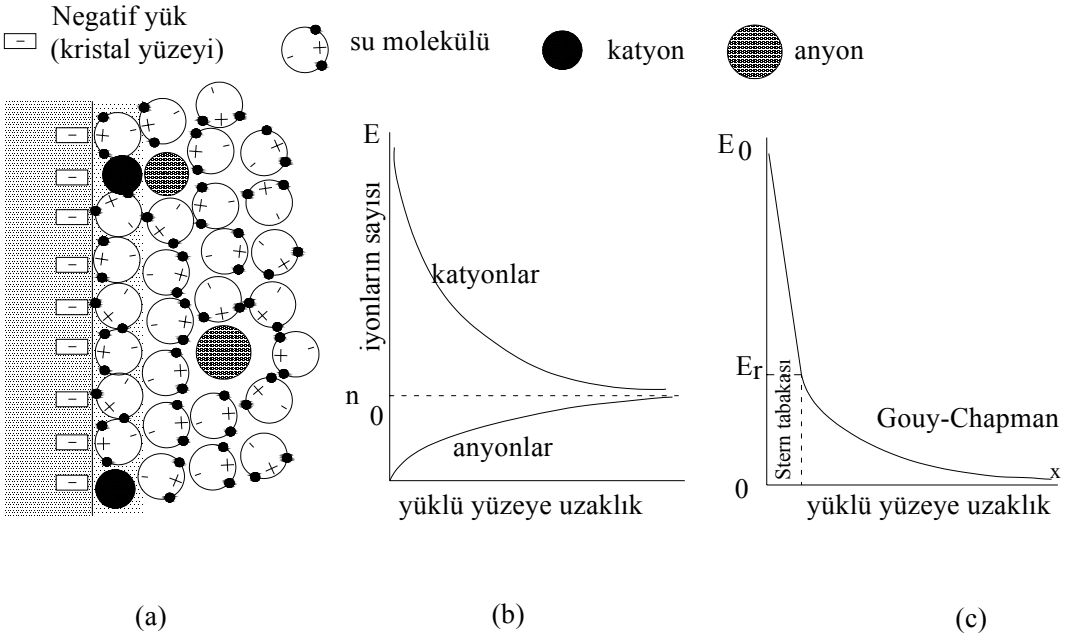
K : Boltzmann sabiti

T : mutlak sıcaklık şeklindedir (Meunier 2005).

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 3.11a). 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



Şekil 3.11. Negatif yüklü kil parçacıkları yüzeyinde elektriksel alan a) Stern tabakası (gölgeli alan) b) İyonların sayısı c) Stern potansiyeli (Meunier 2005)

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.

4- Dielektrik sabiti : Elektrikçe yüklü bir cismin başkası üzerine olan etkisini, bunların arasına girerek azaltma gücünün ölçüsüne dielektrik sabiti denir. Birbirlerinden r mesafede bulunan q_1 ve q_2 yükleri arasındaki elektrostatik kuvvet;

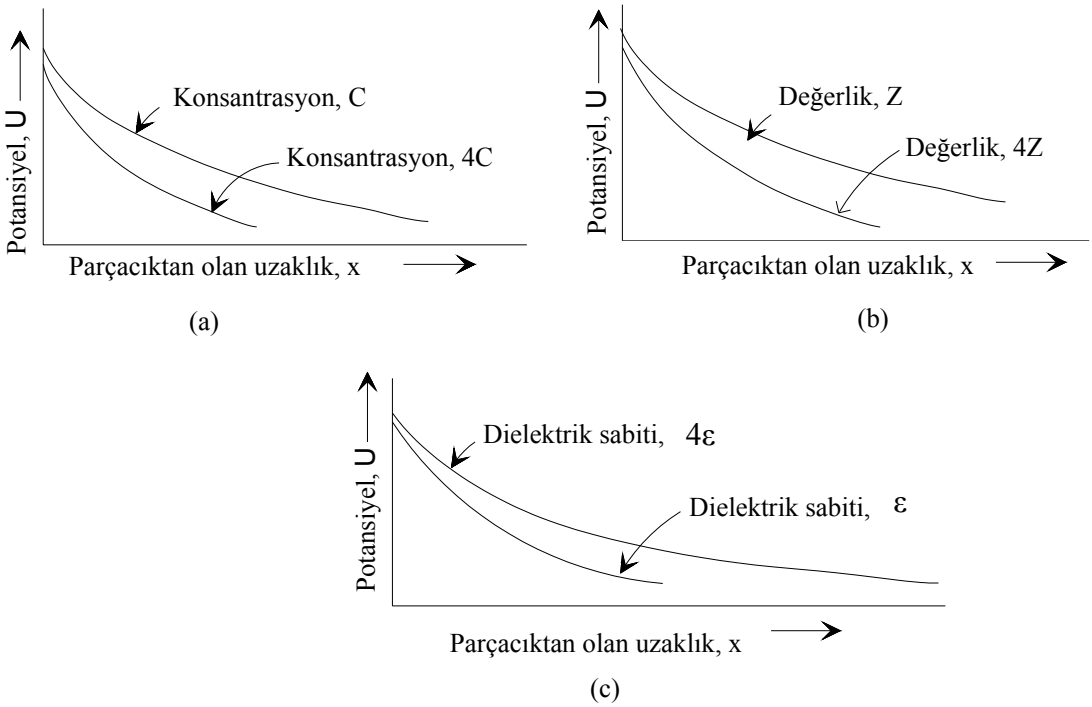
$$f = \frac{q_1 \times q_2}{\varepsilon \times r^2} \tag{3.7.}$$

Burada ε aradaki cismin veya sıvının dielektrik sabitidir. Dielektrik sabiti ne kadar büyük olursa o cisim elektrik kuvvetlerini o derece fazla azaltma özelliğine sahiptir demektir ve cisim veya sıvı o derece fazla polar moleküllerden teşekkül etmiş demektir. 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 parçacıklarının 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. Zemin-sıvı sisteminin özelliklerinin değişiminin diffüz çift tabaka üzerindeki etkileri Şekil 3.12.'de gösterilmektedir. Burada kil parçacığından olan uzaklığa bağlı olarak farklı katyon konsantrasyonu, katyon değerliği ve dielektrik sabiti için elektriksel potansiyel değerleri gösterilmiştir.

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 modeline göre pozitif iyonlar

kil parçacığının etrafındaki tabakanın içinde dağınık durumdadır. Stern modeline göre katyon kil yüzeyine yalnızca kendisinin yarıçapı kadar yaklaşabilmektedir (r) (Şekil 3.11c), böylece daha büyük çapa sahip iyonlar bulunması durumunda Stern tabaka içinde daha az miktarda hidratlanmış iyon bulunmaktadır. Hidratlanan iyonların yüklü yüzeyler tarafından çekilebildiği bu yarıçaptaki kritik potansiyel enerji Stern Potansiyel Enerjisi olarak adlandırılmaktadır (Menuier 2005). 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 3.12. Çift tabakalar üzerinde sistem özelliklerindeki değişikliklerin etkileri a) katyon konsantrasyonu b) katyon değerliği c) di elektrik sabiti (Lambe ve Whitman 1979)

7- Anyon adsorpsiyonun artması da kil parçacıklarının davranışını değiştirmektedir. Kil üzerindeki negatif kuvvetler boşluk sıvısı içindeki anyonları itmektedir. Bu durumda flokülasyonu itici kuvvetler kontrol etmekte ve dispersiyon daha baskın duruma gelmektedir.
8- Boşluk sıvısının sıcaklığı da kilin mikro yapısı, dolayısıyla flokülasyon ve dispersiyon üzerinde etkilidir. Eğer sıcaklık artarsa kil parçacıkları arasında flokülasyon olayı meydana gelmektedir.

Kil minerallerinin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olan faktörlerin değişimi aynı grup killerde dahi dane boyutu, kristallik derecesi, adsorbe katyon tipi, su içindeki serbest elektrolitin tipi ve miktarı gibi özelliklerden etkilenmektedir. Genel olarak bu faktörlerin etkisi şu sırayla azalmaktadır:

kaolinit < hidro mika (illit) < simektit (Mitchell 1976).

3.5. Killi Zeminlerde Doku ve Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkileri

Birçok zeminde genelde birden fazla kil minerali bulunmaktadır. Mineralojik kompozisyon esas olarak zemin danelerinin karakteristiklerini, boyutunu, şeklini ve yüzeyini etkilemektedir. Etkilenen bu özelliklerle beraber zeminin aktivite, plastisite, şişme, mukavemet ve hidrolik iletkenlik gibi davranışları da değişmektedir.

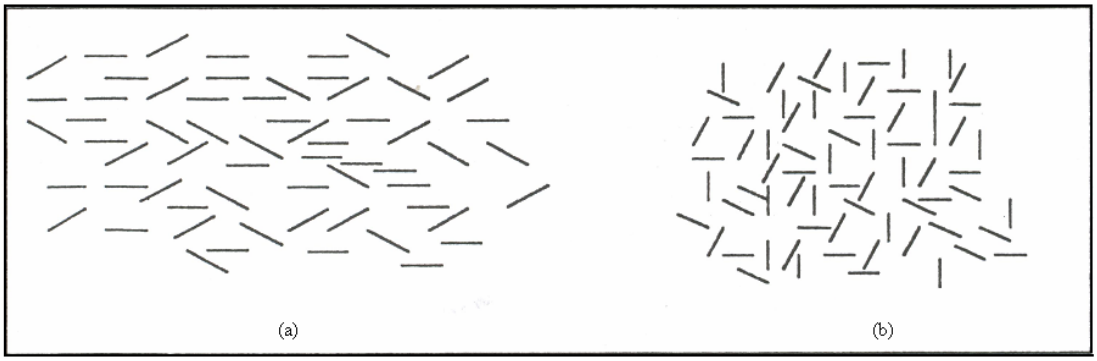
Tanelerin düzeni, tane grupları ve taneler arasındaki boşluklar dokuyu meydana getirirler. Çoğu zaman doku ile yapı birbirleri yerine kullanılırlar. Fakat yapı daha geniş bir anlama sahiptir. Yapı denince zemin dokusu, kimyasal yapı ve taneler arasındaki iç kuvvetler bir bütün olarak düşünülmelidir. Mikro doku optik mikroskoplar yardımıyla incelenen doku anlamında kullanılmaktadır. Makro doku ise çıplak gözle görülen tabakalanma, fissürlenme, boşluklar ve büyük boyutlu heterojenlik gibi stabilite, oturma veya sızma analizlerinde kullanılan nitelikleri ifade etmek için kullanılmaktadır. Floküle ve ayrık yapı aynı anda olabilmektedir. Birçok çökelde, tekil partiküllerin olması seyrek rastlanan bir durumdur, genelde kil plakaları topak yapı şeklinde değişik doku formunda bir araya gelmektedir.

Kohezyonlu zeminlerde dokuyu anlayabilmek için süspansiyon içerisindeki

kil zerreciklerinin arasında etkiyen kuvvetleri tanımlamak gerekir. Süspansiyon içerisindeki iki kil zerreciği yan yana geldiği zaman double layerdeki benzer yüklerden dolayı bir itme kuvveti, aynı zamanda Van der Walls kuvvetlerinden dolayı bir çekme kuvveti oluşur. Her iki kuvvet de zerrecikler arasındaki mesafe azaldıkça değişen oranlarda artarlar. Kil zerrecikleri arasındaki mesafe çok küçük olduğu zaman çekme kuvveti itme kuvvetinden fazla olmaktadır. Kil zerreciklerinin yüzeyi negatif yüklü olmasına rağmen zerreciklerin uçları pozitif yüklerle yüklüdür. İki kil zerreciği birbirine çok yakın ise uçlardaki pozitif yükler ile yüzeydeki negatif yükler bir çekme oluştururlar. Kil süspansiyon içerisinde dağınık vaziyetteyken zerrecikler birbirinden uzakta olduğu için itme kuvveti çekme kuvvetinden fazla olacaktır. Her bir zerre üzerindeki yer çekimi kuvveti ihmal edilebilecek kadar azdır, dolayısıyla her bir kil zerresi süspansiyon içerisinde çok yavaş ve gelişi güzel bir şekilde çökelir veya hareketsiz kalırlar. Aşağı yukarı bütün zerreciklerin birbirine paralel bir şekilde çökelerek oluşturdukları dokuya yüzey-yüzey dispers doku adı verilmektedir. Dispers dokuda kil zerreciklerinin yüzeyleri aşağı yukarı birbirlerine paralel olmasına rağmen zerrecikler arasında bir bağ yoktur ve tamamıyla ayrık durumdadırlar (Şekil 3.13a).

Süspansiyon içerisinde dağınık kil zerrecikleri gelişigüzel hareketlerle birbirlerine yaklaştıkları zaman kenar-yüzey teması oluşturarak kümelenme eğilimi gösterirler.

Bu sırada meydana gelen çekme kuvveti kümeleri bir arada tutar. Böylece meydana gelen dokuya kenar – kenar temaslı floküle doku adı verilir. Eğer kümeler büyürlerse yerçekimi kuvveti etkisi altında çökelirler. Süspansiyon içerisine bir



Şekil 3.13. a) Dispers yapı b) Floküle yapı (Cernica 1995)

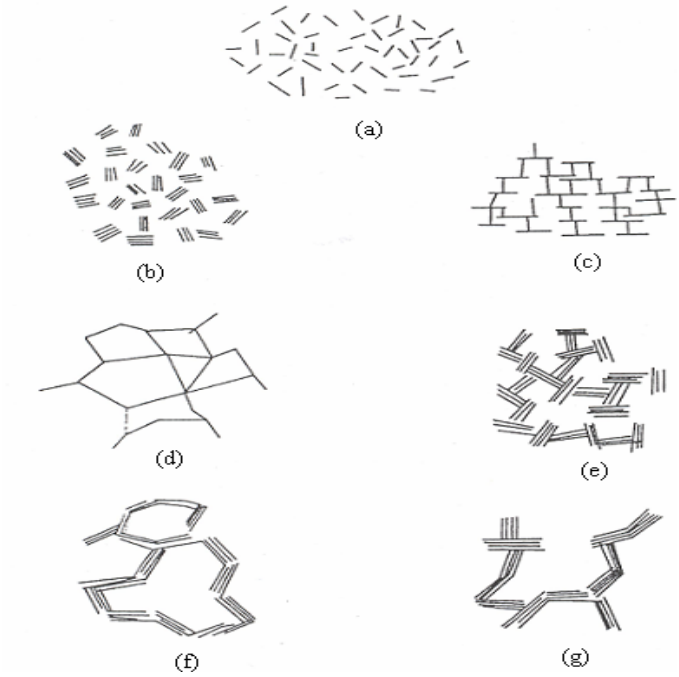
miktar tuz katılınca itme kuvveti azalarak kil zerrecikleri birbirlerini çekerek kümecikler oluşturup azda olsa bir paralellik oluşturacak şekilde çökelirler. Bu şekilde meydana gelen dokuya kenar – yüzey temaslı floküle doku denir (Şekil 3.13b). Bu tür dokuya sahip killer daha hafif ve daha büyük bir boşluk oranına sahiptirler. Laboratuar deneylerinde zemini ayrıştırmak için kullanılan sodyum hexametafosfat ($NaPO_3$) denilen kimyasal floküle dokuyu dispers dokuya dönüştürür (Whitlow 1992).

Kilin doku ve yapısı o kilin bir eriyik içerisinde (süspansiyon) veya çok daha düşük su muhtevasında olması (çamur) koşullarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterir. Bu nedenle kolloid kimyasında modellenmiş olan yapı kavramının, örneğin İnşaat Mühendisliği amaçları için kompaksiyonla sıkıştırılmış bir zeminin yapısından farklı olduğu anlaşılmıştır (Önalp 2007). Su-kil karışımlarında (süspansiyon) danelerin birbirleriyle ilişkileri başlıca dört şekilde tariflenmektedir:

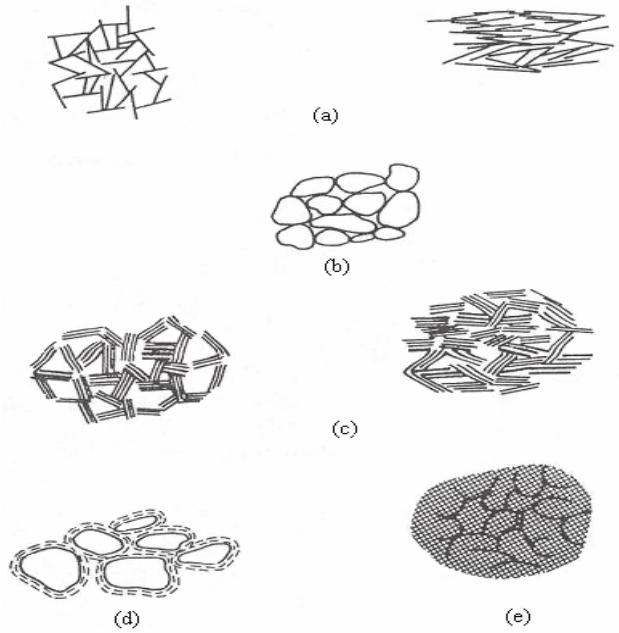
1) Dağınık ve Ayrık yapı (Dispers) : Kil daneleri arasında yüz yüze dokunma yoktur.
2) Kümelenmiş Yapı (aggregated) : Birçok kil danesi arasında yüz yüze dokunma vardır.
3) Floküle Yapı (Flocculated) : Kil kümelerinde, danelerin kenarları diğer danelerin kenarlarına veya yüzeylerine temas edecek şekilde bulunmaktadır.
4) Ayrık, floküle olmayan yapı (Deflocculated) : Daneler kümelenmiş, ancak kümeler arasında bağ yoktur.

Şekil 3.14'de bir su-kil süspansiyonunda doku ve taneciklerin birbirleriyle ilişkisi gösterilmiştir (Van Olphen 1977).

Sistemde su miktarının askı oluşturacak düzeyde olmadığı durum ve ortamlarda ve iri danelerin varlığında dane dizilimleri Şekil 3.14'de verilen modelden farklı olmaktadır. Şekil 3.15'de su oranının plastik limit, likit limit gibi olağan düzeylere indiği durumlarda görülebilecek ideal doku geometrileri verilmiştir. Aradaki fark, azalan su muhtevasından kaynaklanmaktadır. Zemin dokusunda dane dizilimleri, dane kümelenmeleri ve boşluklar olarak üç öğe tanımlanmaktadır. Su muhtevası yeterince düştüğünde dağınık ve yumaklı yapı süspansiyonda olduğu gibi açıkça görülmezse de zeminin özelliklerinde bunu gösteren değişimler ölçülmektedir.



Şekil 3.14. Bir su-kil süspansiyonunda doku (Van Olphen 1977). a) Dağınık ve ayrık yapı b) Ayrık ve kümelenmiş yapı c) Kenar-yüz floklanmış ve dağınık yapı d) Kenar-kenara floklanmış ve dağınık yapı e) Kenar-yüz floklanmış ve kümelenmiş yapı f) Kenar-kenar floklanmış ve kümelenmiş yapı g) Kenar-yüz ve kenar-kenar floklanmış ve kümelenmiş yapı



Şekil 3.15. Zeminde Dokular (Collins ve McGrown 1974). a) Münferit kil levhacığı etkileşimi b) Münferit silt veya kum partikülü etkileşimi c) Kil levhacıklarının grup etkileşimi d) Kille kaplanmış silt ve kum dizilimi e) Kısmen ayırt edilebilir partikül etkileşimi.

Killi zeminlerde doku ile bu dokunun zeminlerin bazı mühendislik özellikleri arasındaki ilişkisini maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz;

1- Belirli bir konsolidasyon basıncı altında floküle yapı, floküle olmayan yapıdan daha az yoğundur (Mitchell 1976).
2- Aynı boşluk oranında, floküle yapıdaki gelişigüzel dizilmiş daneler ve dane grupları, floküle olmayan yapıdan daha rijittir.
3- Ön konsolidasyon basıncından daha büyük basınçta, basınçtaki küçük bir artışla floküle yapıdaki danelerin yeniden dizilimi, floküle olmayan yapıdan daha fazladır.
4- Floküle olmayan yapı veya yoğrulmuş zemindeki ortalama boşluk çapı ve boşluk boyutu aralığı, floküle yapı veya örselenmemiş zeminlerdekinden daha küçüktür.
5- Anizotropik konsolidasyon gerilmeleri, plaka şekilli dane ve dane gruplarını; kendi büyük eksenleri ve büyük asal düzlem boyunca düzenlemeye eğilimlidir.
6- Gerilmeler genelde tüm tane ve tane grupları arasında eşit dağılmaz. Fabrik elemanlarının kemerlenmesi sonucu bazı tane ve tane grupları gerilme almazlar.
7- Yapıdaki bir değişim nedeniyle, drenajın engellendiği suya doygun bir zemin dilatasyona başlarsa, negatif boşluk suyu basıncı oluşur ve efektif gerilme artar.
8- Yapıdaki bir değişim nedeniyle, drenajın engellendiği suya doygun bir zemin, sıkışmaya başlarsa, pozitif boşluksuyu basıncı oluşur ve efektif gerilme azalır.
9- Floküle dokudaki zeminler daha az sıkışma özelliğine sahiptirler (Cernica 1995).
10- Hafif örselenmeler altında floküle dokulu zeminler eşit yoğunlukta ve aynı su muhtevasında dispers dokulu zeminlere göre daha yüksek mukavemet, daha büyük permeabilite gösterirken daha düşük şişme ve büzülme gösterirler. İleri derecelerde meydana gelen örselenmelerde dispers doku zeminin yüksek yoğunluk altında kazanmış olduğu mukavemeti önlemektedir. Buda aşırı derecede sıkışmış bazı zeminlerin

mukavemet kaybetmelerinin sebebidir (Hausmann 1990).

3.6. Kil Minerallerinin Tanınması

Herhangi bir zeminin özellikleri zeminin fabrik yapısına, tane 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 tanelerinin araştırılmasında kullanılan yöntemler ve teknikler şöyledir:

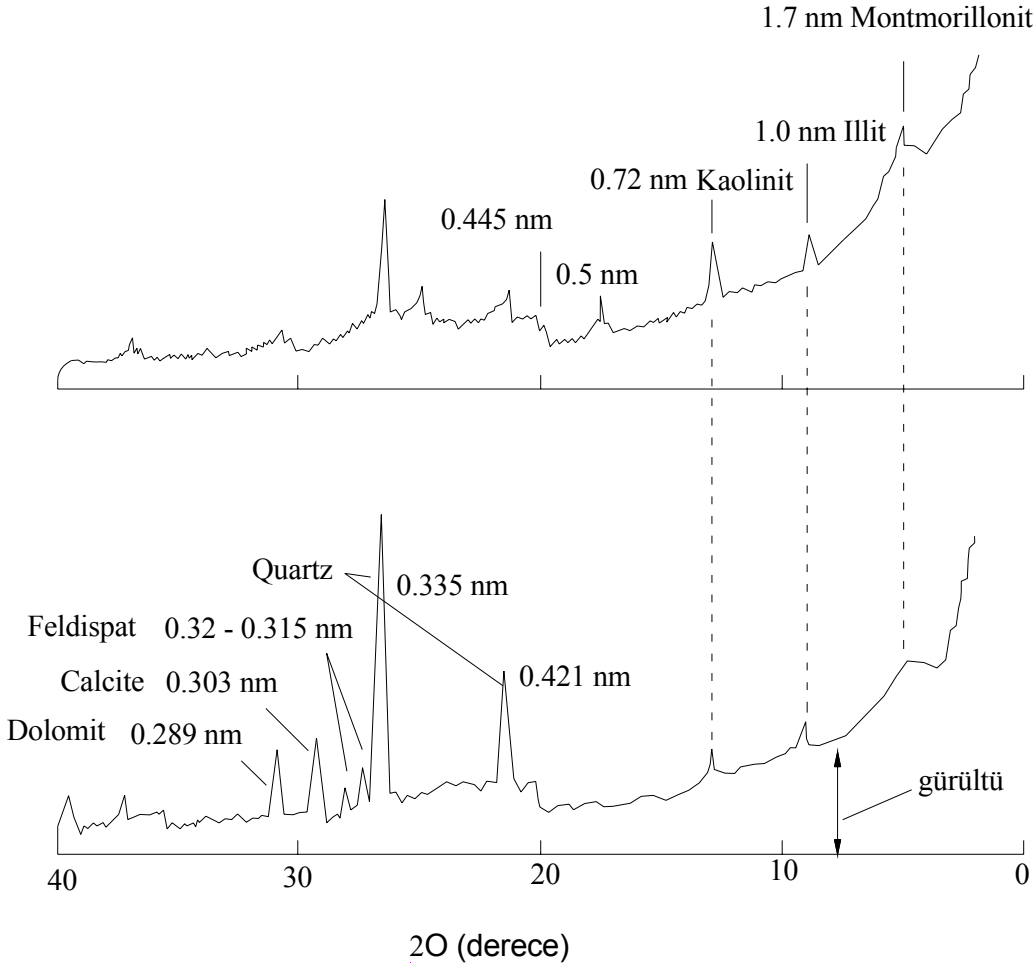
1- Tane dağılımı ve danelerin sınıflandırılması,
2- Mineralojik analizler öncesi ön davranış incelemesi,
3- Serbest oksijen, hidroksit, amorf bileşenler ve organik malzemelerin belirlenmesi için kimyasal analizler,
4- Silt ve kum danelerinin petrografik mikroskopla analizi,
5- Kil fazının elektron mikroskobuyla 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,

3.6.1. X-Ray difraksiyon analizi (X-Rd)

X-Ray difraksiyon analizi, ince taneli zemin mineralleri ve minerallerin kristal yapılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve insanları parmak izlerinden tanıma işlemine benzeyen bir metottur. Bu analiz yönteminde; kristaldeki atom tabakalarının arasındaki uzaklık (d) ve bu tabakalardan yansıyan ışınların şiddeti (I_r) belirlenmektedir. Zemin içindeki kil olmayan diğer minerallerde X-Rd

analizi ile belirlenebilmektedir. Mineralleri tanıma eldeki numune verilerinin standart olarak bilinen değerlerle karşılaştırılmasıyla yapılır. Zeminin içerisinde çoğunlukla birden fazla mineral bulunduğundan tanımada çıkacak sorunları en aza indirmek için numuneler üzerinde ayrıntılı ön hazırlık işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

X dalgaları normal ışığın yansıyıp kırılmasına benzer olarak çarptıkları kristalde emilip yok olmadan kristal yüzeyinden içeriye birkaç atom tabakasını geçerler. Bu sırada atom tabakaları titreşerek ışınları her yöne saçar. Belirli yönlerdeki ışınım uygun fazda olursa bunların çakışmasıyla beliren ışın, fotoğraf filmi üzerine düşürülür veya Geiger-Müller sayacıyla sayılarak şiddeti ve yönü saptanabilir. Şekil 3.16'da zeminlerde sıkça karşılaşılan minerallerin X-ışını grafikleri verilmiştir (Önalp 2007).



Şekil 3.16. Zeminlerde sıkça karşılaşılan minerallerin X-ışını grafikleri .

3.6.2. Optik mikroskopla analiz

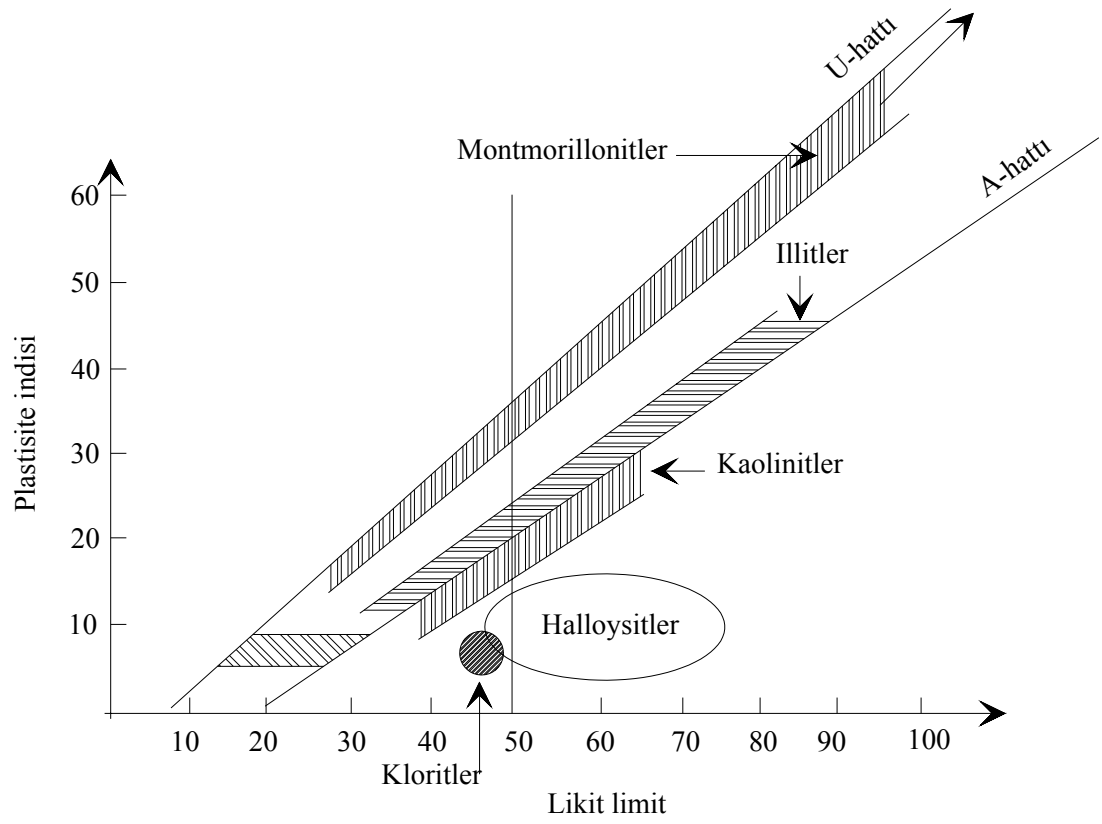
Mikroskop, çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük cisimlerin birkaç mercek yardımıyla büyütülerek görüntüsünün incelenmesini sağlayan bir alet olup, öncelikle isminden de anlaşılacağı üzere, mikro, yani çok küçük hücrelerin incelenmesinin yanı sıra, sanayi, metalürji, genetik, jeoloji, arkeoloji ve adli bilimler (kriminoloji) alanında da büyük hizmetler görmektedir. Mikroskoplar çoğu zaman optik mikroskop olarak da ifade edilirler ve parlatılmış düzgün yüzeylerin veya kesitlerin 1000 kata kadar olan büyütmelerde mikro yapılarının incelenmesi için kullanılırlar. Optik mikroskoplarında çeşitleri olup doku incelemesinde kullanılan, ince kesilmiş bir dokudan ışık geçirmek suretiyle dokuyu inceleyen, parlatılmış yüzey üzerinden yansıyan ışıkla görüntü alan, ışığın polarizasyonu ile yüzey ve dokuda farklı özellikleri görmeye yarayan optik mikroskop gibi çeşitleri vardır. Bunların genel özellikleri çözünürlüklerinin düşük olması ve pratik çalışma limitleri için 1000 büyütme ile sınırlı olmalarıdır.

Optik mikroskopla kil minerallerinin incelenmesi belirli miktardaki kilin seyreltik süspansiyon oluşturacak şekilde sıvı içerisine karıştırılmasıyla, kil parçacıklarının dispers ve floküle yapıda şekillenmelerinin gözlenebilmesi için yapılmaktadır. Süspansiyon şeklinde hazırlanan numuneden 1-2 damla kaygan bir cam üzerine damlatılarak fotoğrafları çekilmekte ve kil daneciklerinin topaklanma-dağılma hareketleri gözlenmektedir.

3.6.3. Atterberg limitleri ile analiz

Casagrande (1948) tarafından önerilen basit bir yaklaşım Atterberg limitlerinin kullanılmasıdır. Casagrande'nin plastiste kartının kullanımı en azından mühendislik bakış açısından gelişmiş difraksiyon analiz yöntemlerinin verdiği kadar bilgi verebilir.

Bu prosedürde Şekil 3.17.'de gösterilen Casagrande Plastisite kartında PI-LL değerlerine göre kilin yerini tespit etmek ve lokasyonunu bilinen minerallerinki ile karşılaştırmaktır. Kilin plastisite diyagramında A hattının çok üstünde ve U hattına yakın bir yere düşmesi numune içerisinde montmorillonit gibi çok miktarda aktif mineral bulunduğunu işaret eder. Zemin sınıfı CL çıksa dahi (mesela kumlu kil gibi) U hattına yakın yere düşüyorsa zeminin kil bileşeni egemen olarak montmorillonitten oluşmaktadır anlamına gelmektedir. ABD ve Kanada'da Göller Bölgesi'nde buzul gölü killeri ve İskandinavya'nın denizel killeri de çoğunlukla illit türünde olup A hattının hemen üzerine düşerler. Nispeten aktif olmayan kaolinitler A hattının hemen altına düşerler. Teknik olarak kil olsalar da ML-MH malzemeleri gibi davranırlar (Holtz ve Kovacs 1981).



Şekil 3.17. Casagrande'nin plastisite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonu (Casagrande 1948'den geliştirilmiş; veriler Mitchell 1976)

3.7. Zemin-Boşluk Sıvısı Sistemi Özellikleri

Kil zeminler parçacık yüzey kuvvetleri nedeniyle kohezyonsuz zeminlerden farklı davranış gösterirler. Boşluk sıvısı kimyasının kumlar üzerinde hemen hemen hiç bir etkisi olmazken killi zeminlerin fiziko-kimyasal karakteristikleri büyük oranda aralarındaki boşluk sıvılarına bağımlıdır. Parçacık boyutunun azalması, spesifik yüzey alanın artması ile birlikte yüzey kuvvetleri de etkili olmaktadır. Parçacık boyutu 1-2 μm veya daha küçük olduğu zaman, yüzey kuvvetleri zeminin davranışı üzerinde önemli bir etki göstermeye başlamaktadır. Zeminin mühendislik davranışını etkileyen faktörler:

1- Kil minerali bileşiminin karakteristikleri, negatif yüzey yük yoğunluğu kapsamı, spesifik yüzey alanı, parçacıkların uzunluk ve kalınlıkları,
2- Boşluk sıvısı bileşiminin karakteristikleri, boşluk sıvısının dielektrik sabiti, elektrolit konsantrasyonu ve değerliği,
3- Parçacıkların yerleşimi ve dokusu.

Bir zeminin boşluğundaki su başka bir organik sıvı ile yer değiştirdiği zaman zeminin mühendislik özellikleri de değişecektir.

Kil parçacıkları arasında, birim alan olarak kabul edilen bir alanda farklı koşullara bağlı olarak değişebilen dört gerilme mevcuttur:

σ' = Parçacıklar arası temas gerilmesi

A_{att} = Elektriksel çekim gerilmesi

R = Elektriksel itme gerilmesi

I = Temas basıncı

Parçacıklar arası gerilmeye efektif gerilme de denir ve uygulanan toplam normal gerilmeden boşluk suyu basıncının çıkarılmasıyla elde edilir. A_{att} olarak simgelenen çekme gerilmesi, temel olarak parçacıklar arasında Van der Walls kuvvetlerinden kaynaklanan ve parçacıklar içerisindeki elektriksel momentlerin varlığından dolayı ortaya çıkan gerilmedir. R olarak simgelenen itme gerilmesi, net olarak negatif yükler taşıyan kil parçacıkları arasındaki elektriksel itme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. I olarak gösterilen temas basıncı, R itme gerilmesine benzer şekilde bir itme gerilmesi olup, yalnızca komşu parçacıklar olduğu zaman rol

oynayan σ', R ve A_{att} net gerilmelerinin dengelenme durumundaki dokunma basıncını ifade eden bir gerilmedir.

Zemin-sıvı sisteminin fiziko-kimyasal karakteristikleri; R, A_{att} ve parçacıklar içi etkileşim mekanizmalarındaki değişimler yoluyla zeminin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Genellikle aynı boşluk oranında, kil zeminin kum zemine göre daha yüksek mukavemete sahip olması, zemin parçacıklarını sıkı olarak bir arada tutan elektriksel çekim kuvvetine (A_{att}) atfedilmektedir. Elektriksel itme kuvvetinin (R), zeminin mukavemeti üzerinde negatif bir etkisinin olduğu hesaba katılmaktadır (Zhao 1996).

Parçacıklar arası mekaniksel etkinin, elektriksel çekme ve itme kuvvetlerine bağlı olarak ifade edilmesi için Lambe (1958) tarafından şu eşitlik verilmiştir:

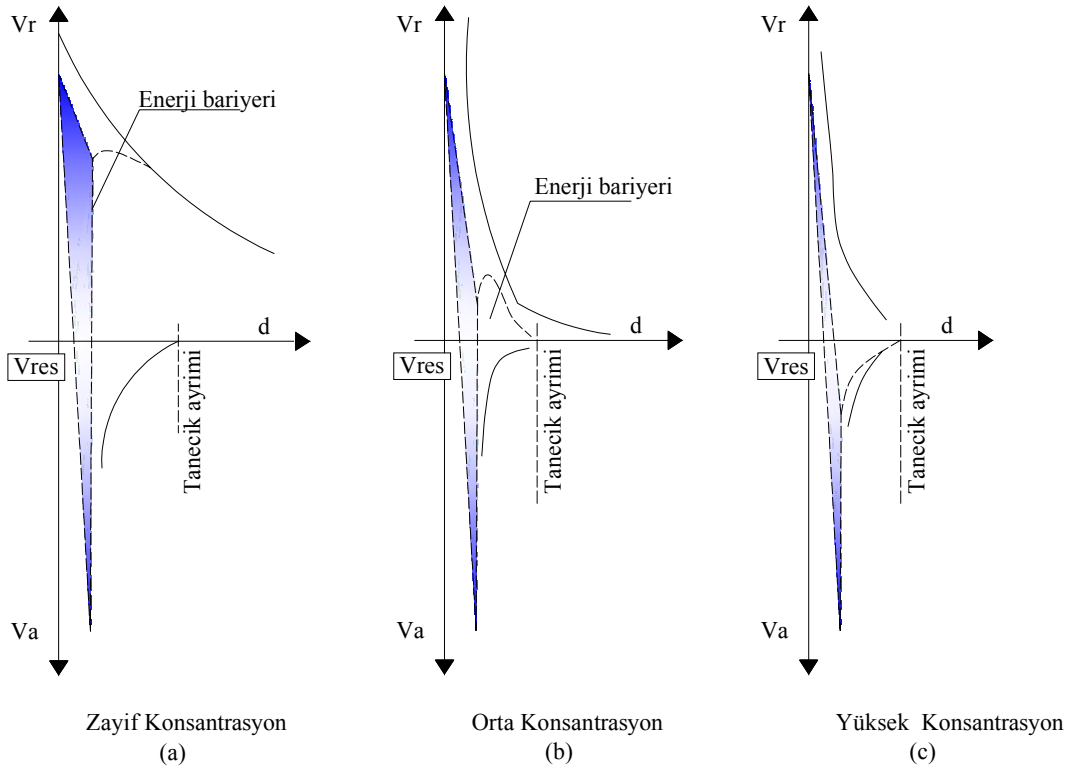
$$I = \sigma' + A_{att} - R \qquad (3.8.)$$

Burada Mohr-Coulomb kırılma kriterine göre mukavemet; temas gerilmesi (I) değeri ile orantılı olup, elektriksel itme kuvveti (R) parçacıklar arası temas mukavemeti üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Sridharan ve Rao (1979), bu kapsamda yapmış oldukları çalışmalar sonucunda; itme kuvvetinin aynı pozitif boşluk suyu basıncı değerinde olduğu gibi kil parçacıklarını birbirinden ayırmaya çalıştığını ve çekme kuvvetinin aynı dıştan uygulanan normal kuvvet de olduğu gibi kil parçacıklarını bir araya getirmeye çalıştığını söylemişlerdir. Lambe'nin yaklaşımı anlaşılması kolaydır ve geniş bir kabul alanı bulmuştur. Fakat yine Lambe kendi yaklaşımının parçacıkların kendi içsel düzeylerinde sınırlı olduğunu söylemiş ve parçacıkların flokülasyonu ve sonucunda meydana gelen kompleks yapı nedeniyle yukarıda verilen kapsamdan oldukça farklı olan global düzeyde bir mekanizma üzerine çalışılması gerektiğini savunmuştur. Bir başka deyişle bir zemin hacminin davranışını yalnızca parçacıklar içerisindeki içsel kuvvetlerle açıklamak yanıltıcı olmaktadır. Geometrik olarak kompleks bir yapıya sahip olan zemin-sıvı sisteminde zeminin mekaniksel özelliklerinin yalnızca parçacıklar içi kuvvetler seviyesinde değil, parçacıkların oluşturduğu kümeler düzeyinde de incelenmesi doğru olacaktır. Daha önce araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmaların sonuçları göstermektedir ki yalnızca parçacık içi mekaniksel etkilerle ifade edilen sonuçlar bazen yanlış yorum

ve tahminlere neden olabilmektedir (Zhao 1996).

3.8. Kil Parçacıkları Arasındaki Fiziko-kimyasal Kuvvetlerin Analizi

Killi bir zemin üzerinde etkili olan kuvvetler; dışardan uygulanan mekaniksel kuvvetler, çift tabaka itme kuvvetleri ve Van der Walls çekme kuvvetleridir. İtme ve çekme kuvvetlerinin büyüklüğü sistem değişkenlerine bağlıdır. Kil parçacıkları arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerin büyüklüğünü etkileyen en önemli değişkenler; kil minerallerinin türü, boşluk sıvısının dielektrik sabiti, elektrolitin konsantrasyonu ve değerliğidir. Diğer taraftan parçacık büyüklüğü, şekli, yerleşimi ve dizilimi de fiziko-kimyasal kuvvetler üzerinde etkili olan geometriksel değişkenlerdir. Şekil 3.18.'de verilen grafikler fiziko-kimyasal kuvvetlerin parçacıklar arası enerji etkileşimine bağlı olarak nasıl bir değişim gösterdiğini anlamak açısından tipik bir örnektir (Van Olphen 1977).



Şekil 3.18. Parçacıklar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak enerji etkileşimi (Van Olphen 1977)

Şekilde; Va: parçacıklar arası çekme enerjisi, Vr: parçacıklar arası itme enerjisi ve Vres: parçacıklar arası net enerjidir. Fiziko-kimyasal kuvvetlerdeki değişimle beraber zemin özelliklerinde de bir değişim olmalıdır. Fakat zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimleri yalnızca fiziko-kimyasal kuvvetlerdeki değişikliklere bağlamak doğru değildir. Fiziko-kimyasal kuvvetlerin büyüklüğü ve konumu bu kuvvetlerin zeminin mühendislik davranışı üzerindeki etkisini anlamak için oldukça önemlidir. Fiziko-kimyasal kuvvetler terimi normalde yalnızca çift-tabaka itme kuvveti ve Van der Walls çekme kuvvetlerini ifade etmek için kullanılır, çünkü bu iki kuvvetin etkisi diğer yüzey kuvvetlerinin etkilerinden daha büyük ve daha belirgindir.

3.8.1. Kil parçacıkları arasındaki çift tabaka itme kuvveti

Kil parçacıkları yüzeylerinde negatif yükler taşımaktadırlar. Negatif yükün varlığı killerin katyon adsorplama özelliğinin olduğunun bir göstergesidir. Yüzey üzerindeki yük şiddeti genellikle birim yüzey alandaki yüklerin sayısı veya yük yoğunluğu yardımıyla karakterize edilir. Yük yoğunluğu kil tipinin bir karakteristiğidir. Örneğin, montmorillonitin yük yoğunluğu illitinkinden, illitinki de kaolinitinkinden büyüktür.

Negatif yüklü parçacıklar bir elektrolit çözeltisi içerisine batırılırsa, elektrostatik etkileşim dolayısıyla kil parçacıkları tarafından çözelti içerisindeki katyonlar çekilecek, anyonlar ise itilecektir. Diğer taraftan çözelti içerisindeki bireysel iyonlar difüzyon ve Brownian hareketi dolayısıyla çözelti içerisinde tekrar dengeye gelmek için bir eğilim içerisindedirler. Negatif yüzey yükleri ve bu yüzey yükleri yakınında dağılmış vaziyette bulunan diğer yüklerin ikisi beraber diffüz çift tabakayı oluşturmaktadırlar. Böylelikle kil parçacığı etrafındaki katyon yoğunluğu daha yüksek, anyon yoğunluğu ise daha düşük olacaktır.

Parçacıklar arasındaki itme kuvvetlerini hesaplayan analitik yöntemlerin çoğu sonsuz uzunlukta paralel iki parçacık arasındaki itme kuvvetlerini hesaplayan yöntemlerdir. Son zamanlarda sonlu uzunlukta aralarında belli bir eğim bulunan iki

kil parçacığı arasındaki itme kuvvetini hesaplamak için sonlu elemanlar sayısal teknikleri üzerine çalışılmıştır (Lu 1990, Anandarajah ve ark. 1991). En ufak kareler tekniği yardımıyla sayısal sonuçlara dayanarak sistem değişkenleri için itme kuvvetinin yerleşimi ve büyüklüğü ile ilgili iki adet ampirik denklem geliştirilmiştir (Lu ve Anandarajah 1992).

Gouy-Chapman'ın diffüz çift tabaka teorisine dayalı olarak, sonsuz uzunlukta paralel iki parçacığın arasındaki itme kuvveti için Van Olphen (1964) tarafından analitik bir çözüm geliştirilmiştir:

$$Th = \sqrt{\frac{8\pi\varepsilon^2\nu^2 n_0}{DKT}} \quad (\text{cm}^{-1}) \tag{3.9.}$$

$$F_{rep} = -T_h d \tag{3.10.}$$

Burada: F_{rep} = Diffüz çift tabaka itme kuvveti

T_h = Diffüz çift tabaka kalınlığı

n_0 = Dış çözeltideki konsantrasyon = $6{,}02 \times 10^{20} \times C_0$ (iyon/cm^3)

C_0 = Denge çözeltisi konsantrasyonu (mol/cm^3)

K = Boltzmann sabiti ($1{,}38 \times 10^{-16}$ erg/^{0}K)

T = Mutlak sıcaklık (^{0}K)

ν = İyonların değerliği

ε = Temel yük = $4{,}77 \times 10^{-10}$ esu

(Not: 1 erg=10^{-7} J, j = 1N.m, 1 esu = $3{,}33 \times 10^{-10}$ coulomb)

D = Statik dielektrik katsayısı (coulomb^2/N/M^2)

d = parçacık yüzeyinden olan uzaklık (cm)

Killerde diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinin değişimi üzerinde killerin katyon değiştirme kapasitesi önemli bir rol oynamakta olup, katyon değiştirme kapasitesinin iki temel kaynağı tarif edilmiştir (Grim 1968). Bunlar izomorf yer değiştirme ve bozulmuş bağlardır.

1- İzomorf yer değiştirmeler kristal yapısında herhangi bir değişiklik olmaksızın oktahedral veya tetrahedral yapıdaki katyonların yerinin bir başka katyon tarafından alınmasıdır.
2- Kil parçacığı kenarları etrafındaki bozulmuş bağlarda eşlenmemiş olarak

bulunan yükler adsorbe katyonlar tarafından dengelenmektedirler. Bozulmuş bağların etkisinin önemi parçacık boyutundaki azalmayla beraber artmaktadır.

3.8.2. Kil parçacıkları arasındaki çekme kuvveti

Flokülasyon ve kohezyon olayları parçacıklar arasındaki çekme kuvvetlerinin varlığını göstermektedir. Maddenin birimleri arasındaki ikinci değer kuvvetleri veya Van der Walls kuvvetleri olarak anılan çekme kuvvetleri birimler içerisindeki elektriksel momentin varlığından doğmaktadır (Pauling 1951). Bu kuvvetler iki kısa mıknatıs arasındaki çekim kuvvetine oldukça benzemektedir.

Hamaker'e (1937) göre iki makro kütle arasındaki Van der Walls çekme kuvveti F(h) şu şekilde tanımlanmıştır.

$$F(h) = \frac{A_H}{6\pi h^3} \tag{3.11.}$$

Burada A_H; Hamaker sabiti ve h; yüzeyler arasındaki en kısa mesafedir.

Daha sonraları geliştirilen Lifshitz teorisi (1956), makroskopik parametreler tarafından karakterize edilen, aslında dielektrik iletkenliğe bağımlı olarak değişen frekansı ve ortamdaki makro yapı etkileşimlerini dikkate alan bir yaklaşımdır. Lifshitz teorisi ile birlikte pek çok maddenin etkisi ve malzeme özellikleri, süreklilik şeklinde her bir madde içerisindeki moleküllerin bir araya getirilmesiyle meydana gelen çekme kuvveti olayına dahil edilir. Teorinin sağlanabilmesi için ortam ve parçacıkların tam olarak dielektrik spektralarının bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu bilgiler ise yalnızca en genel malzemeler ve kimyasallar için literatürde mevcuttur.

Israelachvili (1991) farklı frekanslarda etkileşim olan ortamlardaki dielektrik sabitlerini kullanarak Lifshitz teorisine göre Hamaker sabitini (A_H) tanımlamıştır:

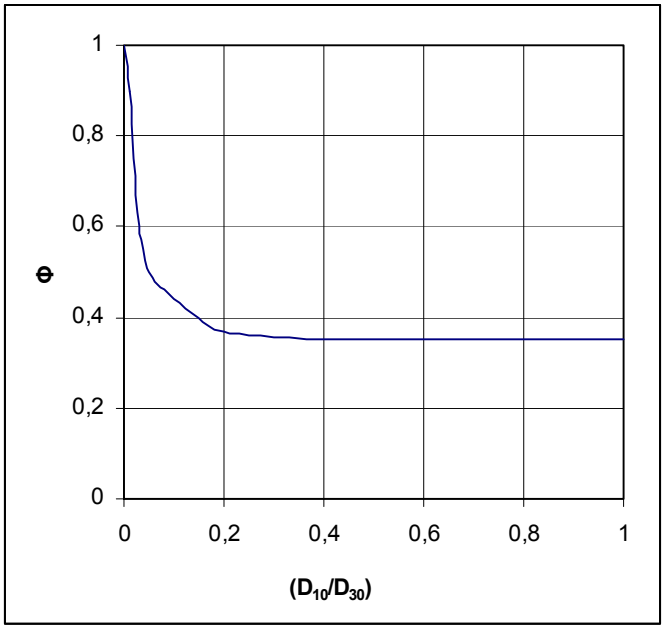
$$A_H = \frac{3}{4} kT \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right) 2 + \frac{3h\nu_e}{16\sqrt{2}} \frac{(m_1^{\,2} - m_2^{\,2})^2}{(m_1^{\,2} + m_2^{\,2})^{\frac{3}{2}}} \tag{3.12.}$$

Burada ε_1 ve ε_2 ortamın dielektrik sabiti, m_1 ve m_2 ışıkta ortamın kırılma indisi, v_e ultraviyole ışıkta (UV) temel elektronik adsorpsiyon frekansı olup 3×10^{15} s^{-1} civarındadır. h Planck sabiti ($6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s), k Boltzmann sabiti ($1{,}38 \times 10^{-23}$ $J.K^{-1}$) ve T mutlak sıcaklıktır (Kelvin).

Parçacıklar arasındaki çekme kuvvetlerini hesaplamak için kuantum elektrodinamiğine dayalı aralarında bir sıvı ile ayrılmış olan iki kütle arasında genel bir çözüm verilmiştir (Dzyaloshinskii ve ark. 1961). Bu yöntemde tüm frekans alanları için kompleks dielektrik sabitleri bilinmelidir. Sonuç denklemleri komplike olmasına rağmen bazı basit kabuller yapılmaktadır. Parçacıkların dielektrik sabitleri D_{10}, boşluk sıvısının dielektrik sabiti D_{30} ve aradaki mesafe dμ (μm) olmak üzere şu eşitlik verilmiştir:

$$F_A = \frac{\pi^2}{240}\frac{hc}{(d_\mu)^4}\frac{1}{\sqrt{D_{30}}}\left(\frac{D_{10}-D_{30}}{D_{10}+D_{30}}\right)^2 \Phi\left(\frac{D_{10}}{D_{30}}\right) \qquad (3.13.)$$

Burada; h, Planck sabiti; c, ışık hızı; Φ, (D_{10}/D_{30}) oranına karşılık Şekil 3.19.'dan bulunan bir değerdir. Bu şekilde kil parçacıkları için D_{10} değeri yaklaşık olarak 4,0 kabul edilmiştir.



Şekil 3.19. (D_{10}/D_{30}) oranına karşılık elde edilen Φ değeri (Dzyaloshinskii ve ark. 1961)

Üzerinde önemle durulması gereken nokta tanecikler arasındaki etkileşimi teoriksel olarak ifade edilen durumla gerçekte mevcut olan zemin-sıvı karışımı sistemleri arasında birçok faklılığın bulunmasıdır. Analizlerde, sabit yüzey potansiyeli, yüzey potansiyelinin spesifik değeri gibi birçok kabuller yapılmaktadır. Örneğin; ortamın pH özelliği ihmal edilmektedir. Parçacık yüzeylerindeki iyon adsorpsiyonu tampon bölge içerisindekilerle aynı kabul edilmektedir. Parçacıkların birbirine paralel olarak yerleştikleri ve sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilmektedir.

3.9. Farklı Kimyasal Sıvılar İçerisindeki Killerin Hamaker Sabitleri (A)

Parçacıkların bulunduğu ortamın dielektrik sabitinin değişimi ile Hamaker sabiti (A) değişmektedir. Hamaker sabitinin değişimi ile parçacıklar arasındaki çekme kuvvetlerindeki değişim birbiriyle paralellik göstermektedir. Bu yüzden Hamaker sabitinin hesaplanması ile parçacıklar arasındaki çekme kuvvetleri değişimi hakkında bir yorum yapılabilmektedir. Doğada en çok karşımıza çıkan kil mineralleri olan kaolinit, illit ve montmorillonitin 9 adet farklı boşluk sıvısı içerisinde bulunması durumundaki Hamaker sabiti değerleri Çizelge 3.7.'de verilmiştir (Chen 1996).

Çizelge 3.7. 9 Farklı organik kimyasal sıvı içerisindeki üç farklı kil için Hamaker sabiti değerleri (Chen 1996).

Kimyasallar	Di elektrik sabiti (ε)	Hamaker sabiti (A)		
		Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Heptan	1,91	9,52	0,323	0,69
Benzen	2,28	8,88	0,48	0,50
Triethylamine	2,42	8,44	0,35	0,60
Asetik asit	6,15	8,19	0,266	0,343
Etil asetat	15,7	7,90	0,424	0,074
Ethanol	24,3	8,67	0,70	0,242
Methanol	33,6	9,42	1,40	0,625
Su	80,4	10,19	1,70	0,870
Formamid	110	11,50	3,09	2,80

Kaolinitte Hamaker sabiti, artan dielektrik sabiti ile ilk önce azalmakta ve etil asetatta minimum bir değere ulaşmaktadır, daha sonra ise artan dielektrik sabiti ile birlikte artmaktadır. İllitte küçük dielektrik sabitleri civarındaki değişim kaolinittekinden daha az olmaktadır. Genellikle boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki artışla birlikte Hamaker sabiti artmaktadır. Montmorillonitin davranışı genel hatlarıyla kaolinite benzemekle beraber, en düşük ve en yüksek değerler arasındaki farkın oranı daha yüksektir.

Genel olarak bir değerlendirilme yapıldığında boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki değişimle birlikte kaolinitin Hamaker sabitindeki değişimin illit ve montmorillonitinkinden daha fazla olduğu görülmektedir. Hamaker sabitindeki bu kompleks değişim nedeniyle parçacıklar arasındaki Van der Walls çekim kuvvetlerindeki değişim de kompleks olmaktadır.

3.10. Paralel İki Parçacık Arasındaki Fiziko-kimyasal Kuvvetler Üzerinde Kil Karakteristiklerinin Etkisi

Doğada yaygın olarak bulunan üç kil minerali kaolinit, illit ve montmorillonit olup, bunlar parçacık boyutlarında olduğu gibi diğer özelliklerinde de farklılıklar göstermektedirler. Farklı kil türleri arasında yük yoğunluğu ve yüzey potansiyeli arasındaki değişiklikler onların itme kuvvetlerinin ve dielektrik özelliklerindeki değişiklikler de Van der Walls çekme kuvvetlerinin farklı olmasına neden olmaktadır. Kil tanecikleri arasındaki fiziko-kimyasal etkileşimler üzerinde etkili olan kil minerallerine ait karakteristik özellikler Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelgenin 2. kolonunda kil minerallerinin katyon değiştirme kapasiteleri (CEC), 3. kolonunda spesifik yüzey alanları ve 4. kolonunda birim yüzey alandaki (birim değerlik için) iyon sayısının birimi için yük yoğunluğu gösterilmiştir. Kolon 5'te yüzey potansiyeli değerleri verilmiş olup, 10^{-4} M konsantrasyondaki NaCl çözeltisi için bulunan değerlerdir. Kolon 5'teki değerler incelendiğinde tüm killer için değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Çizelgenin 6. kolonunda paçacık uzunlukları, 7. kolonunda ise parçacıkların kalınlıkları gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Kaolinit, illit ve montmorillonitin karakteristik özellikleri (Chen 1996)

Kil Tipi	CEC (meq/100g)	S (m^2/g)	σ 10^5 (iyon/μm^2)	ψ_0 (mv)	l (μm)	d (nm)	ε_0
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Kaolinit	3	10-30	0,9	325	0,3-3	24-73	5,5
İllit	25	80-100	10,0	336	0,1-2	7-9	7,0
Montmorillonit	100	800	0,75	301	0,1-1	0,92	15,2

Çizelgenin 8. kolonunda killerin dielektrik sabitleri gösterilmiştir. Killerin dielektrik sabitlerindeki farklılıklar onların iç katmanlarındaki su moleküllerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Bu özelliklerden sadece CEC, S ve l olmak üzere üç parametre bilinirse çift tabaka itme kuvveti ve diğer özellikler bu parametreler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Van der Walls çekme kuvvetini hesaplamak için ise dielektrik sabiti ve kırılma indeksinin bilinmesi gerekmektedir.

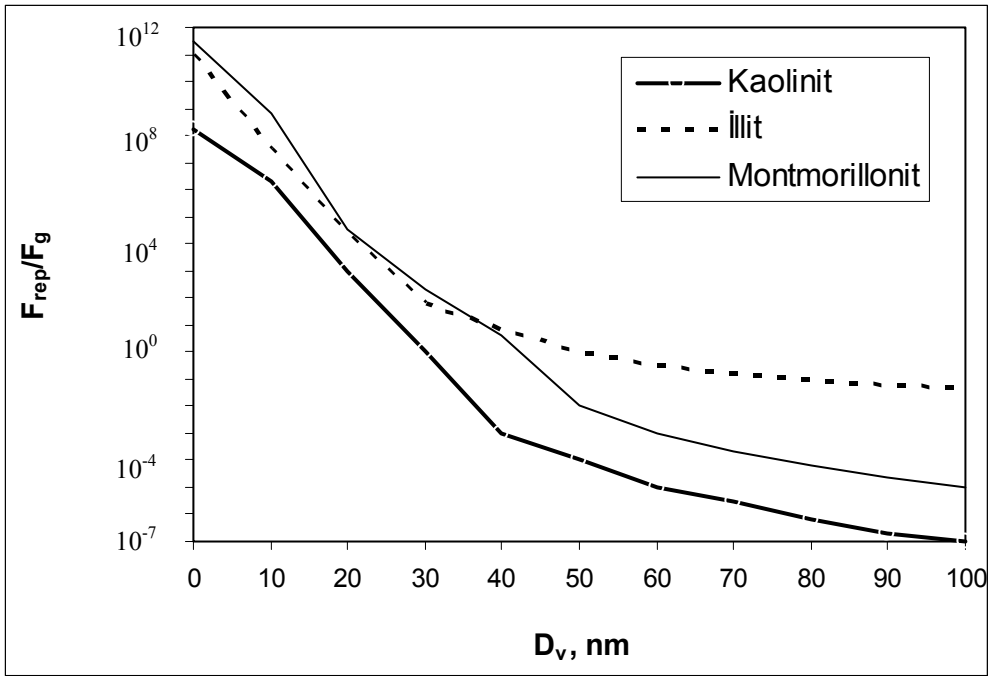
Kaolinit, illit ve montmorillonit için sırasıyla parçacık uzunluğu l = 2, 1, 0,5 μm ve S = 20, 90, 800 m^2/gr olarak kabul edilerek, 5×10^{-2} M NaCl tuzlu çözeltisi içine batırılan iki paralel parçacık için hesaplanan fiziko-kimyasal kuvvetler kil parçacıklarının yerçekimi kuvvetleri ile karşılaştırmalı haliyle Şekil 3.20.'de gösterilmiştir. Yerçekimi kuvveti (F_g) üç kil minerali türü için özgül ağırlığı 2,73 alınarak hesaplanmıştır (Chen 1996).

Yerçekimi kuvvetine oranlanarak verilen itme kuvveti değişiminde, parçacıklar arasındaki mesafe 30-40 nm'den daha küçük olduğu zaman kilin türü önemli olmaktadır. Kaolinitte itme kuvveti büyüklüğü en büyük olmasına rağmen onun geniş parçacık boyutu dolayısıyla normalize edilmiş itme kuvveti diğer iki kil mineralinden daha küçüktür.

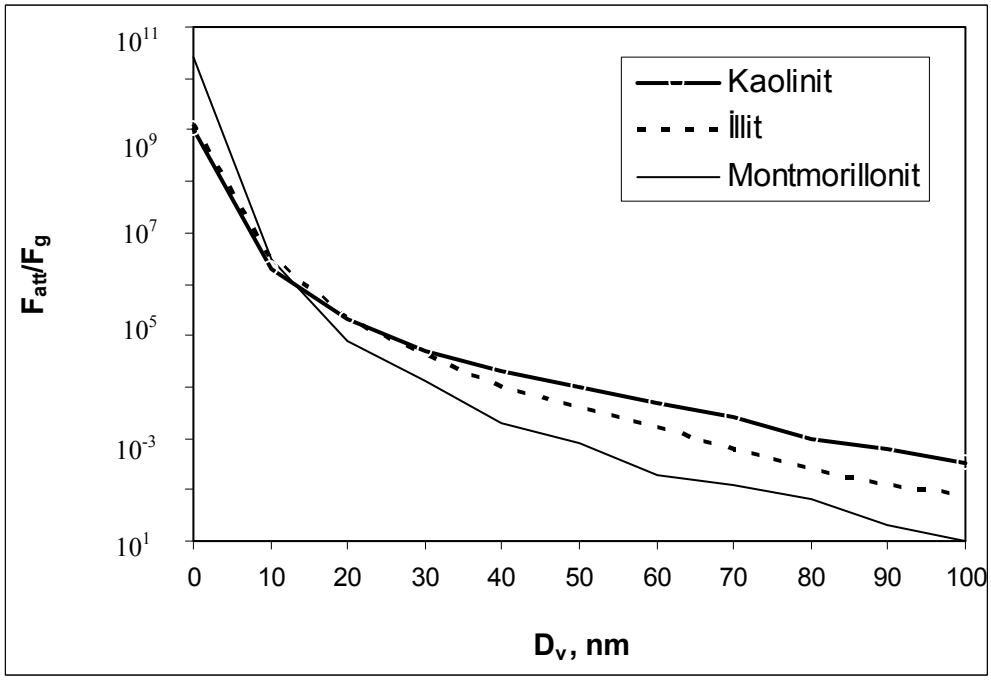
Mesafe 15 nm'den daha az olduğu zaman yerçekimi kuvvetine oranlanarak verilen çekme kuvveti montmorillonit için kaolinit ve illitinkinden daha önemli olmaktadır. Daha geniş aralık mesafeleri için ters bir eğilim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.21.'de ise farklı mesafelerde ayrılmış paralel iki kil parçacığı arasında

itme ve çekme kuvvetlerinin etkisiyle oluşan net fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimi 3 farklı kil minerali için verilmiştir.

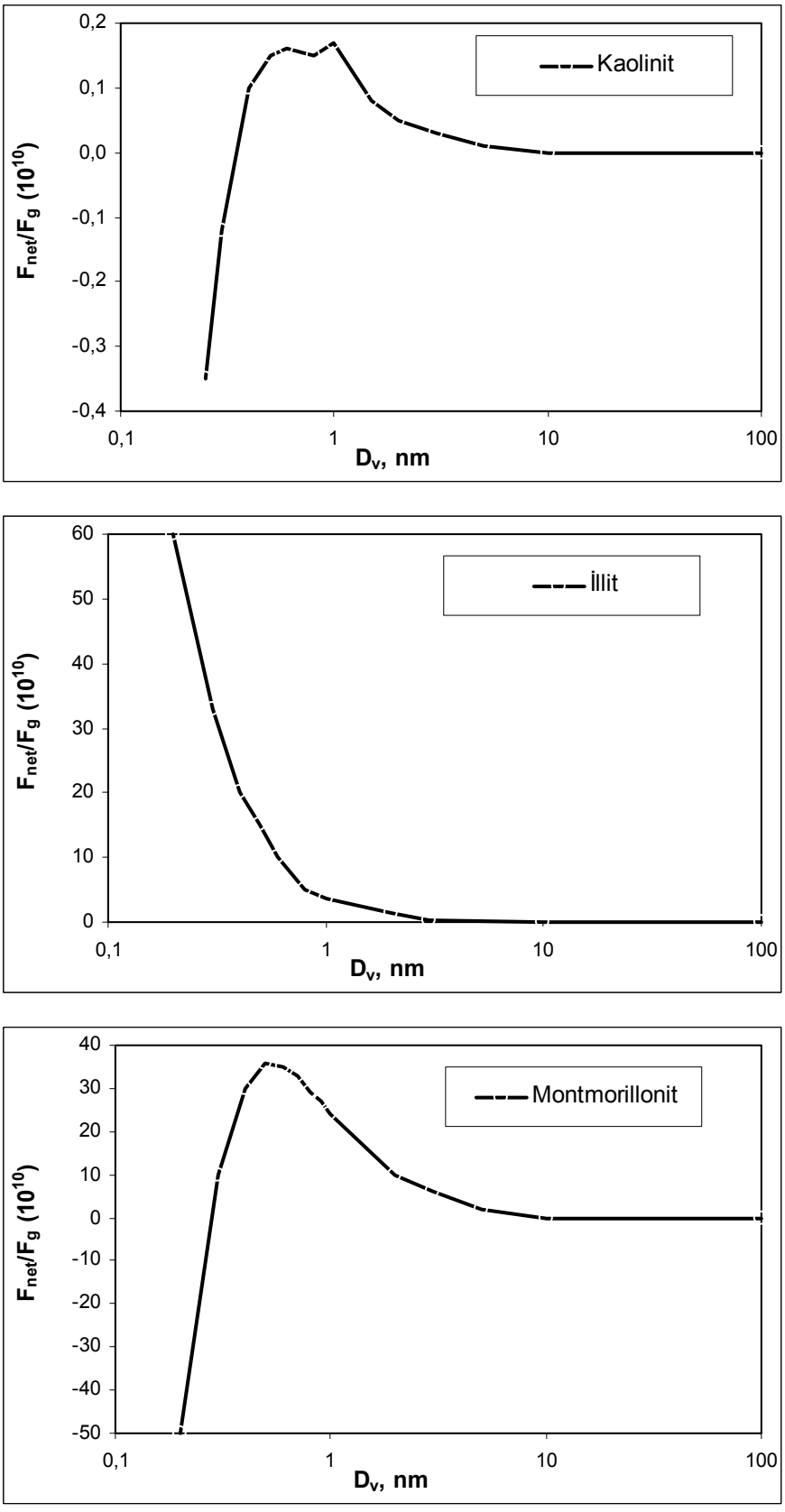


(a)



(b)

Şekil 3.20. Farklı mesafelerde ayrılmış paralel iki kil parçacığı arasındaki itme ve çekme kuvvetleri üzerinde kil tipinin etkisi (Chen 1996)



Şekil 3.21. Farklı mesafelerde ayrılmış paralel iki kil parçacığı arasındaki net fiziko-kimyasal kuvvetler üzerinde kil tipinin etkisi (Chen 1996)

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Zeminler ve Özellikleri

Deneysel çalışmada değişik dielektrik sabitlerine sahip ve farklı konsantrasyonlarda ki kimyasallar ile konsolide edilen farklı iki kil mineralinin mukavemet, konsolidasyon ve indeks özelliklerini karşılaştırabilmek maksadıyla ticari amaçlı olarak üretilmiş olan düşük plastisiteli kaolinit ve Aksaray İli'nden araziden alınmış olan yüksek plastisiteli montmorillonit + sepiyolit ağırlıklı bir yerel kil kullanılmıştır.

4.1.1. Kaolinit

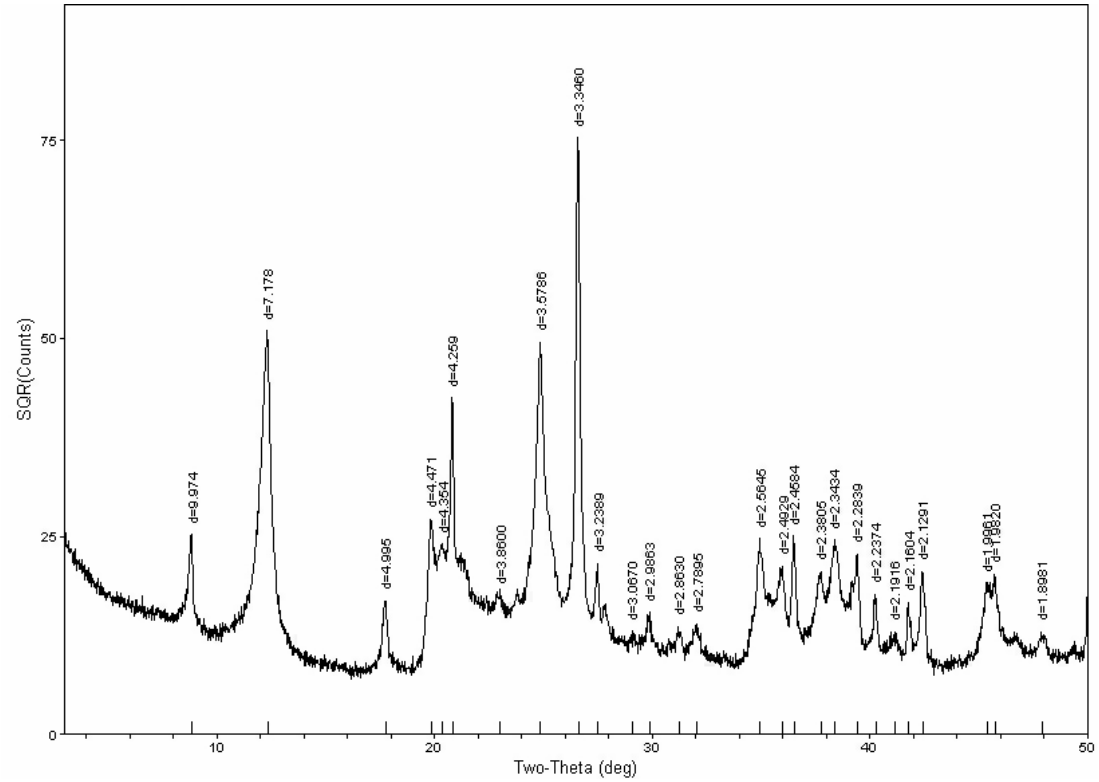
Deneysel çalışmada kullanılan kaolinit ticari amaçlı olarak seramik sanayinde kullanılmakta olup, Eczacıbaşı Esan A.Ş.'nin Bözüyük'teki işletmelerinden temin edilmiştir. Kaolinit kil mineralleri ile ilgili genel bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir. Kaolinitin kimyasal analiz sonuçları malzemenin temin edildiği Eczacıbaşı Esan A.Ş.'den alınmış olup Çizelge 4.1.'de, kaolinitin mineralojik yapısını öğrenmek üzere Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama Merkezi Laboratuarı'nda yaptırılan X-RD yarı nicel mineralojik analiz sonuçları da yine Çizelge 4.1.'de verilmiştir. X-RD yarı nicel mineralojik analizinde hem tüm kayaç analizi hem de kil fraksiyonu için analizler yapılmış olup, analizler sonucu elde edilen difragtomlar Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir. Kaolinit üzerinde yapılan elek analizi ve hidrometre analizi deney sonuçları ile kaolinite ait bazı geotekniksel özellikler de Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Kaolinitin aktivitesi 0,40 olarak hesaplanmış olup, kaolinit inaktif olarak sınıflandırılabilir. Kaolinitin katyon değiştirme kapasitesi (CEC) değeri 11,76 meq/100g olup, bu değer Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Konya Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü laboratuarlarında belirlenmiştir. Kaolinitin spesifik yüzey alanı ise 15,29 m^2/gr'dır.

Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan kaolinitin kimyasal ve X-RD yarı mineralojik analiz sonuçları

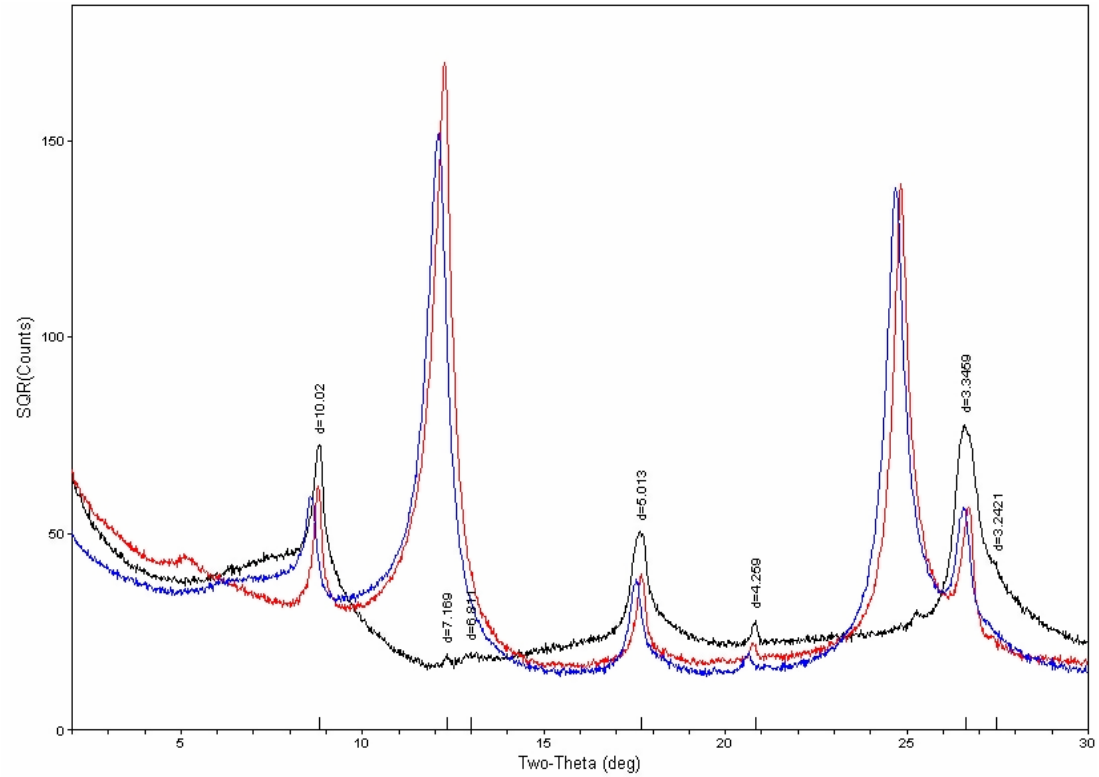
Kimyasal Analiz	
İçerik	**Ağırlıkça %**
SiO_2	54,00
Al_2O_3	29,00
Fe_2O_3	1,70
CaO	0,40
MgO	0,50
SO_3	-
K_2O	1,65
Na_2O	0,30
Ti_2O	1,20
Kızdırma Kaybı	10,50
X-RD Yarı Mineralojik Analiz	
Tüm Kayaç analizi	**(%)**
Kil	80
Kuvars	16
Feldispat	4
Kil Fraksiyonu	**(%)**
Kaolinit	91
İllit	9

Çizelge 4.2. Deneylerde kullanılan kaolinitin granülometrik ve bazı geotekniksel özellikleri

Tane Çapı Dağılımı				Ortalama Tane Çapı (d_{50}) (μm)	Kıvam Limitleri		Özgül Ağırlık (Gs)
Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)		LL (%)	PI (%)	
0	1	45	54	1,50	44,97	21,40	2,59



Şekil 4.1. Kullanılan kaolinitte X-RD yarınicel mineralojik analizi için tüm kayaç analizi



Şekil 4.2. Kullanılan kaolinitte X-RD yarınicel mineralojik analizi için kil fraksiyonu analizi

4.1.2. Aksaray kili

Deneysel çalışmada kullanılan ikinci tip kil numuneleri Aksaray İli'ne yaklaşık 10km mesafedeki Yenice Kasabası sınırları içerisinde kalan bir sahadan alınmıştır ve çalışma içerisinde Aksaray kili olarak isimlendirilmiştir. Sahadan doğal olarak alınıp laboratuara getirilen numuneler ilk olarak etüvde 105^0C'de kurutulmuş ve daha sonra diskli öğütücü vasıtasıyla öğütülerek kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Kilin kimyasal analizleri Konya Çimento Fabrikası A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuarlarında yaptırılmış olup sonuçları Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Kilin mineralojik yapısını öğrenmek için yaptırılan X-RD yarı nicel mineralojik analizleri Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama Merkezi Laboratuarı'nda yaptırılmış olup sonuçları Çizelge 3'de, analizler sonucunda elde edilen tüm kayaç analizi ve kil fraksiyonu difragtomları da Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de verilmiştir.

X-RD yarı mineralojik analiz sonuçlarına göre Aksaray kili içerisinde %30 oranında dolomit ve %24 oranında kalsit bulunmaktadır. Bu mineraller, deneylerde kullanılan kimyasal malzemelerle farklı reaksiyonlara girerek kilin davranışı üzerinde önemli bir rol oynamaktadırlar.

Kil fraksiyonu analizi sonuçlarına göre kil minerali içerisinde %49 oranında montmorillonit bulunmaktadır. Diğer mineraller ise daha küçük yüzdelerde olup kilin davranışının montmorillonit mineralleri tarafından yönlendirildiği düşünülmektedir. Kil hakkında bulunan diğer bir takım veriler de bunu doğrulamaktadır. Bu sebeple araştırmalar montmorillonit kilinin davranışı ile ilişkilendirilerek sürdürülmüştür. Ayrıca yine kil fraksiyonu analiz sonuçları %33 oranında sepiyolit minerali varlığını göstermektedir. Sepiyolit de ince ve lifsi yapısı ile kilin kimyasal malzemelerle olan reaksiyonlarında etkili olmaktadır. Montmorillonit ve sepiyolit mineralleri hakkında daha detaylı bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir.

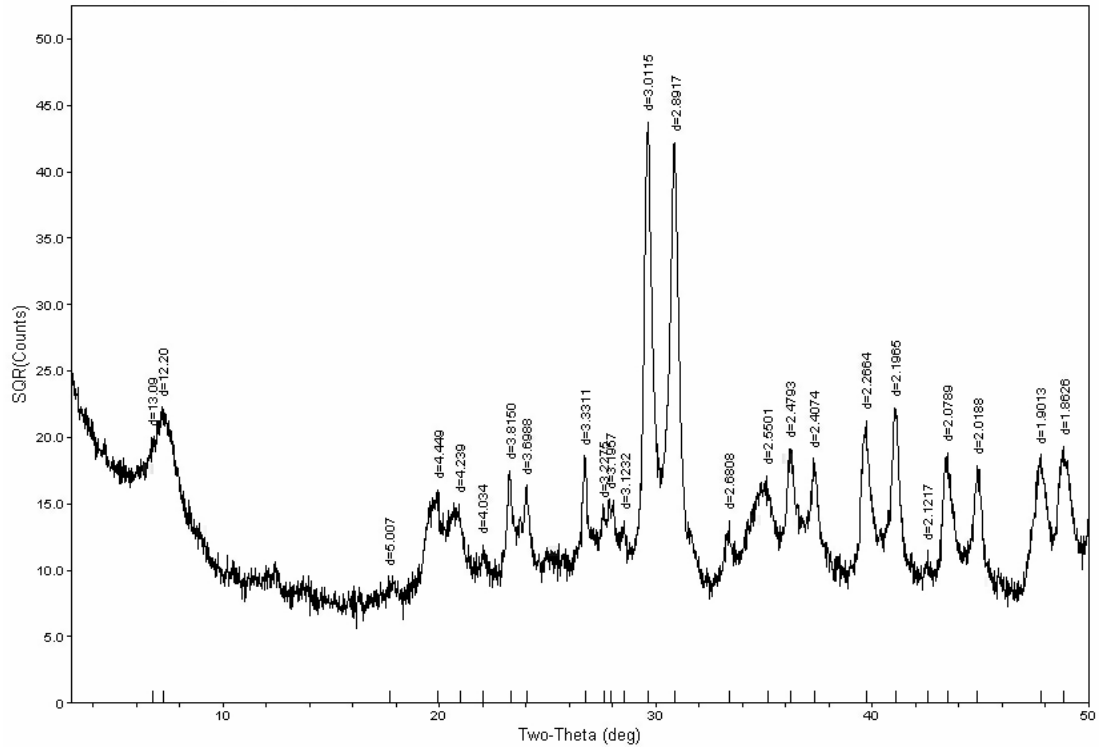
Aksaray kili üzerinde yapılan elek analizi ve hidrometre analizi deney sonuçları ve kilin bazı geotekniksel özellikleri Çizelge 4.4.'de verilmiştir. Aksaray kilinin aktivitesi 1,26 olarak hesaplanmış olup, aktif bir kil olarak sınıflandırılabilir. Aksaray kilinin katyon değiştirme kapasitesi de (CEC) kaolinit için olduğu gibi Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Konya Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü Laboratuarlarında belirlenmiş olup değeri 24,13 meq/100g'dır. Kilin spesifik yüzey alanı ise 206,127 m^2/g olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan Aksaray kilinin kimyasal ve X-RD yarı mineralojik analiz sonuçları

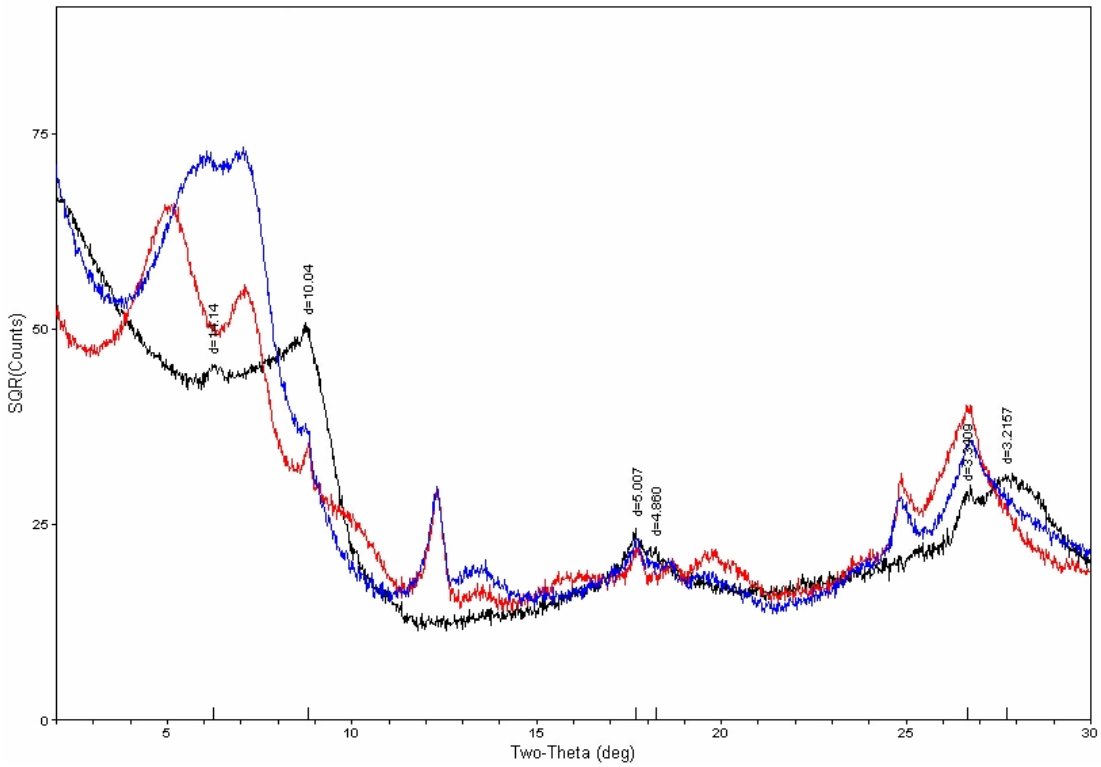
Kimyasal Analiz	
İçerik	**Ağırlıkça %**
SiO_2	22,47
Al_2O_3	1,60
Fe_2O_3	1,30
CaO	26,62
MgO	14,73
SO_3	0,14
K_2O	0,33
Na_2O	0,85
H_2O	3,50
Kızdırma Kaybı	31,95
X-RD Yarı Mineralojik Analiz	
Tüm Kayaç analizi	**(%)**
Kil	41
Dolomit	30
Kalsit	24
Kuvars	2
Feldispat	3
Kil Fraksiyonu	**(%)**
Montmorillonit	49
Sepiyolit	33
Kaolinit	12
İllit	6

Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan Aksaray kilinin granülometrik ve bazı geotekniksel özellikleri

Tane Çapı Dağılımı				Ortalama Tane Çapı (d_{50}) (μm)	Kıvam Limitleri		Özgül Ağırlık (Gs)
Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)		LL (%)	PI (%)	
0	1	43,5	55,5	1,40	106,50	69,79	2,61



Şekil 4.3. Kullanılan Aksaray kilinde X-RD yarınicel mineralojik analizi için tüm kayaç analizi



Şekil 4.4. Kullanılan Aksaray kilinde X-RD yarınicel mineralojik analizi için kil fraksiyonu analizi

4.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kimyasal Sıvılar ve Özellikleri

Kimyasal sıvıların killerin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneysel çalışmada methanol, ethanol, izo-propil alkol ve asetik asit olmak üzere 4 farklı kimyasal sıvı kullanılmıştır. Bu sıvılar dielektrik sabitinin geniş dağılım aralığını yansıtmak için seçilmiştir. Boşluk sıvısı olarak kullanılan kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki değişiklikler dolayısıyla kil tanecikleri arasında oluşan fiziko-kimyasal kuvvetler yani itme ve çekme kuvvetleri değişmektedir. Fiziko-kimyasal kuvvetlerdeki bu değişimler ise kil zeminlerin mukavemet ve sıkışma davranışlarını etkilemektedir. Kimyasal sıvılar herhangi bir zemin ortama karıştığı zaman saf olmaktan ziyade genel olarak belirli bir konsantrasyonda bulunacağı için bu durumu yansıtmak üzere kimyasal sıvıların %20, %40, %60 ve %80 konsantrasyonları şeklinde hazırlanan karışım sıvıları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kimyasal sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan kimyasal sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Lide 1994)

Özellikler	Boşluk Sıvıları				
	Saf Su	Methanol	Ethanol	İzo-propil alkol	Asetik asit
Kimyasal formülü	H_2O	CH_3OH	C_2H_5OH	C_3H_8O	CH_3COOH
Dielektrik sabiti (ε)	80,4	33,6	24,3	18,3	6,2
Molekül Ağ. (gr/mol)	18,01	32,04	46,07	60,10	60,05
Yoğunluğu (gr/cm^3)	0,998	0,7918	0,789	0,785	1,049
Viskozite (mPas)	1,004	0,59	1,200	2,37	1,28
Dipol Mom. (Debyes)	1,87	1,69	1,69	1,66	1,74
Suda Çözünürlük (gr/L)	Çözünür	Çözünür	Çözünür	Çözünür	Çözünür

4.2.1. Methanol kimyasal sıvısı

Methanol polar bir sıvı olup özellikle endüstriyel atıklarda yoğun bir şekilde bulunur. Ayrıca evsel atıkların fermantasyonu sonucu diğer alkoller gibi methanol de oluşur. Methanolün başlıca özellikleri şöylece sıralanabilir;

a) Methanol primer alkollerden olup kısa zincirlidir.
b) Su içerisinde çok rahat çözünebildiği için literatürde çoğu araştırmacı tarafından kullanılmıştır.
c) Dielektrik sabiti ε=33,6 olup suyun dielektrik sabitinden (ε=80,4) küçüktür.
d) Su dakine yakın bir hidrojen bağı oluşturur.
e) Viskozitesi sudan daha düşüktür.
f) Özel durumlar haricinde zemin ile reaksiyona girme eğilimi yoktur.
g) Methanolün dipol momenti sudan daha düşük olup, polaritesi yani kutuplaşabilme özelliği daha azdır.
h) Kullanım sırasında özellikle gözle olan teması engellenmelidir.

4.2.2. Ethanol kimyasal sıvısı

Ethanol polar bir sıvı olup, etil alkol ya da bitkisel alkol olarak da bilinir. Alkollü içeceklerin büyük bir kısmında bulunur. Başlıca özellikleri şöyledir:

a) Primer alkollerden olup methanolden daha uzun zincirli bir yapıya sahiptir.
b) Su içerisinde çözünür bu sebeple methanol gibi literatürde çok fazla kullanılan kimyasallardan bir tanesidir.
c) Dielektrik sabiti ε=24,3 olup methanolden daha düşük dielektrik sabitine sahiptir.
d) Viskozitesi sudan daha büyüktür.
e) Direkt olarak zemin ile reaksiyona girme eğilimi yoktur.
f) Ethanolün de methanol gibi dipol momenti sudan daha düşük olup, polaritesi yani kutuplaşabilme özelliği daha azdır.

4.2.3. İzo-propil alkol kimyasal sıvısı

Di-propanol alkol olarak da bilinen izo-propil alkol endüstride çok kullanılan bir kimyasal sıvı olup, propilenin su ve sülfat asidiyle hidrojenlendirilmesinden elde edilir. Başlıca özellikleri şöyledir;

a) İzo-propil alkol en basit sekonder alkol olarak bilinir.
b) Su içerisinde çok rahat çözünebilir.
c) Dielektrik sabiti ε=18,4 olup ethanol ve methanolden daha düşük dielektrik sabitine sahiptir.
d) Viskozitesi sudan daha büyüktür.
e) Direkt olarak zemin ile reaksiyona girme eğilimi yoktur.
f) İzo-propil alkolünde dipol momenti diğer alkoller gibi sudan daha düşük olup, polaritesi yani kutuplaşabilme özelliği daha azdır.

4.2.4. Asetik asit kimyasal sıvısı

Etanoik asit olarak da bilinen asetik asit organik asitleri yansıtmak için seçilmiştir. Atık depolarında karbonhidratlar ve yağların bozulması sonucu asetik asit meydana gelir (Yıldız 1998). Asetik asitin temel özellikleri şöyle sıralanabilir;

a) Karboksilik asitlerin en küçüklerindendir (En küçük formik asit).
b) Su içerisinde çözünebilir. Literatürde araştırmacılar tarafından çok fazla kullanılan kimyasallardan biridir.
c) Dielektrik sabiti (ε=6,2) çok düşüktür.
d) Viskozitesi sudan daha büyüktür.
e) Zemin ile kimyasal reaksiyonlara girmeye eğilimlidir.
f) Asetik asitin de dipol momenti sudan daha düşük olup, polaritesi yani kutuplaşabilme özelliği daha azdır.
g) Diğer asitlere göre zayıf asit olmasına rağmen killerin yapısında bir bozulma oluşturabilmektedir.

h) Kullanım esnasında göz ve vücudu aşırı tahriş etmesinden dolayı gerekli önlemler alınmalıdır.

4.3. Deneysel Program

4.3.1. Killerin indeks ve fiziksel özelliklerinin bulunması

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında kullanılan killere ait birtakım fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmı S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Laboratuarı'nda yapılırken bir kısım analizler farklı kurumlarda yaptırılmıştır.

Kullanılan killerin mineralojik yapısını öğrenmek için X-RD yarı mineralojik analizleri (tüm kayaç analizi + kil fraksiyonu analizi) ve kimyasal yapısını öğrenmek için kimyasal analizler Bölüm 4.1.'de belirtilen kurumlarda yaptırılmıştır. Yine killerin yük dengesizliklerini gidermek için gerekli katyon miktarını gösteren katyon değiştirme kapasitesi (CEC) Bölüm 4.1.'te bahsedildiği gibi Na metoduyla (Chapman 1965) bir resmi kurum laboratuarında yaptırılmıştır. Resmi kurumlarda yaptırılan bu analizler dışında laboratuarda yapılan ve sonuçları Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.4.'de verilen zeminlerin indeks ve fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

4.3.1.1. Killerin tane çapı dağılımının belirlenmesi

Deneylerde iki tip kil kullanılmış olup her iki kil içinde tane çapı dağılımını belirlemek için elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Elek analizi ASTM / D 422-63'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Elek analizi için numunelerden belirli bir miktar alınmış ve kurutulduktan sonra (105^0C) tartılarak sodyum hexametafosfat $(NaPO_3)_6$

çözeltisi içerisinde bekletilerek tanelerin dağılması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler 200 Nolu (75μm) elekten yıkanmış ve üstte kalan kısım kurutularak eleme işlemine tabii tutulmuştur. 200 Nolu elekten yıkama işlemi sırasında alta geçen ince malzeme bir kapta toplanarak 105^0C'de kurutulmuştur. Kurutulan bu ince malzemeden 50 gr alınarak ASTM / D422'de belirtildiği şekilde hidrometre analizi yapılmıştır.

4.3.1.2. Killerin özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesi

Killerin özgül ağırlığı ASTM / D-854-92'ye uygun olarak belirlenmiştir. Özgül ağırlığın belirlenmesi için 50 ml'lik cam piknometreler kullanılmıştır. İlk olarak piknometrenin darası belirlenmiştir (m_p). Daha sonra piknometre üzerindeki işaretli kısma kadar saf suyla doldurularak tartılmıştır (m_{pw}). Daha sonra piknometre yarısına kadar saf su ile doldurularak içerisine 5g kurutulmuş zeminden (m_s) konularak üzeri, piknometre üzerinde bulunan seviye işaretine kadar suyla doldurulmuştur. Zemin-su karışımı içindeki hava vakumla çıkartılmıştır. Hava kabarcıkları çıkarma esnasında azalan su seviyesi işaretli kısma kadar tamamlanmıştır. Son aşamada ise; piknometre + zemin + su tartılmıştır (m_{pws}). Bulunan bu değerlerden gidilerek özgül ağırlık değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{m_s}{m_{pw} - m_{pws} + m_s} \qquad (4.1.)$$

4.3.1.3. Killerin spesifik yüzey alanlarının belirlenmesi

Killerin spesifik yüzey alanlarının belirlenmesinde spesifik yüzey alanının daha hızlı ve doğru şekilde belirlenebilmesi nedeniyle metilen mavisi (MM) metodu

kullanılmıştır (Yükselen ve Kaya 2006).

Metilen mavisi ile yapılan deneyde 1 g metilen mavisi 200 ml saf su ile karıştırılmıştır. Daha sonra etüvde kurutulmuş ve 200 Nolu (75μm) eleğin altına geçen zeminden 10 g alınarak 30 ml saf su ile karıştırılmıştır. Bu kil-su karışımına metilen mavisi solüsyonundan 0,5 ml eklenerek 1 dakika süreyle manyetik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır. Bir dakika sonunda cam çubuk ile bu karışımdan bir damla alınıp filtre kâğıdının üzerine damlatılmıştır. Filtre kâğıdı üzerindeki bu noktanın etrafında açık mavi halka oluşuncaya kadar 0,5 ml metilen mavisi solüsyonu eklenmeye devam edilmiştir. Zeminin etrafında kil tarafından adsorbe edilemeyen metilen mavisinin oluşturduğu açık mavi halka gözlemlendiğinde deney bitirilmiştir. Adsorbe edilen metilen mavisi miktarından özgül yüzey alanı aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\ddot{O}YA = \frac{1}{319,87}\frac{1}{200}(0,5N)A_v A_{MB}\frac{1}{10} \qquad (4.2.)$$

Yukarıdaki denklemde; N: zemin+su karışımına eklenen 0,5 mL metilen mavisi artırımlarının sayısı, A_v: Avagadro sayısı ($6,02 \times 10^{23}$/mol), ve A_{MB}:bir metilen mavisi molekülü tarafından kaplanan alanı (genellikle $130A^0$) göstermektedir.

4.3.1.4. Atterberg limitlerinin belirlenmesi

Atterberg limitleri, deney sonuçlarını kontrol edilebilmek ve sonuçları karşılaştırılabilmek için hem düşen koni penetrasyon hem de Casagrande yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. ASTM'ye göre düşen koni penetrasyon yöntemi önerilen metot, Casagrande yöntemi ise yardımcı metottur. Deneyler ASTM D-4318'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Yalnızca saf su ile yapılan deneyler değil aynı zamanda kimyasal sıvılarla yapılan deneyler de her iki yöntem kullanılarak yapılmıştır. Atterberg limit deneyleri esnasında kimyasal malzemelerle çalışırken kimyasalların sağlığa vereceği zararlı etkilerden korunmak amacıyla karbonatlı su

emdirilmiş maske ve gözlük kullanılmıştır.

4.3.2. Mukavemet ve konsolidasyon deneylerinin yapılması

4.3.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneylerinde kullanılacak olan deney numuneleri oluşturulan bulamaçların ön konsolide edilmesiyle hazırlanmıştır. Bunun için ilk olarak kaolinit ve Aksaray killeri etüvde 105^0C'de kurutulmuştur. Kurutulan bu numuneler bir diskli öğütücü yardımıyla iyice ufalanmıştır. Daha sonra bu numuneler 40 Nolu (425 μm) elekten elenmiş ve yukarıda bahsedildiği gibi saf su ve her bir kimyasalın farklı konsantrasyonları ile düşen koni penetrasyon ve Casagrande yöntemleri kullanılarak zeminlerin Atterberg limitleri belirlenmiştir.

Atterberg limitlerinin belirlenmesinden sonra ön konsolide edilerek hazırlanacak numuneler için bulamaçlar hazırlanmıştır. Bu bulamaçlar hazırlanırken ilk olarak kullanılacak karışım sıvısı, kimyasal sıvı ile saf su belirli konsantrasyonda (%20, %40,.....) olacak şekilde ağırlıkça karıştırılmıştır. 40 Nolu elekten elenen kil numunelerden belli bir miktar (genel olarak 3000-4000 g arası) alınarak bir elektrikli mikser yardımıyla düşen koni penetrasyon yönteminde belirlenen likit limit (LL) değerinin 2 katı ($w=2w_L$) su muhtevasında olacak şekilde karışım sıvısı ile yaklaşık 8-10 dk civarında karıştırılmıştır (Şekil 4.5). Bu süre karışım sıvısının buharlaşmasını önlemek için daha uzun tutulmamıştır. 2 kademede hazırlanan bulamaçlar vakit kaybetmeden ön konsolide işleminin yapıldığı haznelere aktarılmıştır. Literatürde hazırlanan bulamaçların su muhtevalarının genellikle likit limitin 1,25-2,5 katı su muhtevasında olacak şekilde hazırlandıkları görülmüştür (Zhao 1996, Chen 1996). Burada da ön konsolide işleminin yapıldığı hazne boyutları da dikkate alınarak bu su muhtevası 2 kat seçilmiştir. Hazırlanan bulamaçlar sanayi destekli olarak hazırlatılan toplam 3 adet özel konsolidasyon deney seti sistemi kullanılarak ön konsolide işlemine tabii tutulmuşlardır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.5. Bulamaçların bir elektrikli mikser yardımıyla hazırlanması işlemi.



Şekil 4.6. Ön konsolide işleminin yapıldığı özel konsolidasyon deney seti sistemleri

Ön konsolidasyon işleminin yapıldığı bu sistemler normal konsolidasyon seti baz alınarak tasarlanmıştır. Yalnız hem kayma mukavemeti hem de konsolidasyon deneyleri için çok sayıda numune alınacağı için boyutları büyük tutulmuştur. Ön konsolide işlemi için bulamaçların içerisine yerleştirildiği haznelerin çapı 220 mm ve yüksekliği 200 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 4.7.'de ön konsolidasyonda kullanılan haznelerden bir tanesinin üstten belli bir açı ile görünümü verilmiştir.



Şekil 4.7. Ön konsolidasyon işleminde kullanılan bir haznenin üstten görünümü

Haznenin alt ve üstüne fazla sıvının drene edilebilmesi amacıyla hazne çapına eşit büyüklükte hazırlatılan ve 1 cm kalınlığında büyük poröz taşları da kapsayan plakalar konulmuştur (Şekil 4.8.). Bunlardan alt plaka sabitken üstteki plaka uygulanan yükle birlikte hareket edebilmektedir. Hareket edebilen üst plakanın yanlarından sıvı çıkışını önlemek için "O" ringler kullanılmıştır. Böylelikle hem alttan hem de üstten sıvı çıkışına müsaade edilerek çift yönlü drenaj sağlanmıştır.

Bulamaçların ön konsolide edilmesi kademeli yük artışı ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler sırası ile 12,5 - 25 - 37,5..... şeklinde 8 yükleme kademesi için 100 kPa'a kadar yüklenmiştir. Her yükleme kademesinden bir sonrakine geçiş sıvı çıkışının durması ve deformasyon saatindeki okumaların sabitlenmesinin akabinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ön konsolidasyon işlemleri genellikle 12-15 gün arasında bir süre zarfında sonlanmıştır. Artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile numunelerin silt-ince kum formuna yaklaşmasıyla ön konsolidasyon işleminin süresi kısalmıştır. Ayrıca artan kimyasal sıvı konsantrasyonuyla numunelerde permeabilitenin artması dolayısıyla başlangıçtaki küçük gerilmelerde çok büyük sıkışmalar olmuş daha sonra ise sıkışmalar çok küçük değerlere düşmüştür. Ön konsolidasyon işlemi sırasında numunelerde %40-%55 arasında bir boy kısalması meydana gelmiştir. Ön konsolidasyon işlemi sırasında bünyesinde bulunan fazla sıvı dışarı atılan karışım diğer deneylerin yapılması için hazır hale gelmiştir.



a) Üst plakanın yandan görünümü b) Alt plakanın görünümü

Şekil 4.8. Ön konsolidasyon işleminde kullanılan üst plaka ve alt plaka

Ön konsolidasyon işleminin tamamlanmasından sonra numuneler hemen diğer deneyler için paslanmaz çelikten özel olarak hazırlatılmış tüpler içerisine örselenmeden alınmıştır. Bu tüplerden kriko yardımıyla (Şekil 4.9) hızlı bir şekilde çıkarılan numuneler hemen lastik kılıflara sarılmış ve diğer deneyleri yapmak üzere küre bırakılmıştır. Ön konsolidasyon işlemi sonucu elde edilen numunelerin su muhtevası değerleri genellikle o karışım için elde edilen likit limit değerlerinin %60'ına yakın değerlerde bulunmuştur.



Şekil 4.9. Ön konsolide edilen numunelerin kriko yardımıyla tüpten çıkarılması

4.3.2.2. Üç eksenli basınç deneyleri

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan üç eksenli basınç deneyi doğa koşullarına benzer gerilmeler sağlanması ve getirdiği ek ölçüm olanakları nedeniyle zemin mekaniği laboratuarlarında en çok uygulanan deney olma özelliğini taşımaktadır. Üç eksenli basınç deneyleri çoğunlukla kil, silt ve killi siltler üzerine uygulanmaktadır.

Laboratuar çalışmalarında ASTM D-1883'te belirtildiği şekilde konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak olan numuneler ön konsolide edildikten sonra yükseklik / çap oranı 2 olacak şekilde (H=76mm ve D=38mm) pasalanmaz çelikten tüplerden çıkarılmış ve 1 gün kürde bekletilmiştir. Bu oran seçildiği zaman düşey eksen boyunca belirebilecek eşit olmayan birim deformasyonlar (ε_z) etkileri minimuma indirilebilmektedir (Önalp 2007). Deneylerde kullanılan numunelerin yumuşak kıvamda olması sebebiyle çevre basınçları 50-100-200 kPa olarak seçilmiştir. Daha yüksek çevre basınçları uygulandığı zaman numunelerin homojenliğinin bozulduğu görülmüştür. Deneylerde çevre basınçları sabit tutulurken; 1mm/dk sabit bir yükleme hızı ile uygulanan düşey bir hareket vasıtasıyla numune kırılmıştır. Deneyler genel olarak %15 birim deformasyon değerine ulaşıncaya kadar veya kırılma gerçekleşmişse daha düşük deformasyonlarda sonlandırılmıştır. Şekil 4.10. laboratuarda deneyler esnasında kullanılan üç eksenli basınç deney düzeneğini göstermektedir.

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



Şekil 4.10. Üç eksenli basınç deney düzeneği

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.

4.3.2.3. Serbest basınç deneyleri

Bu deney konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyinin özel bir halidir. Üç eksenli deneyden tek farkı burada çevre basıncı olan σ_3'ün atmosfer basıncına eşit ve sabit olmasıdır. Deneyler TS-1900'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Deneylerde ön konsolide edilerek 1 gün kürde bekletilen, yükseklik / çap

oranı 2 olacak şekilde (H=76mm ve D=38mm) hazırlanılan numuneler kullanılmıştır. Numuneler en fazla 15 dk içinde kırılacak şekilde 1mm/dk hızla yüklenmiştir. Yükleme ya numune kırılıncaya kadar ya da kırılma gözlenmemişse %15 birim deformasyona kadar devam ettirilmiştir (Şekil 4.11.).

Deneyler sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemeti (q_u) ve drenajsız kohezyon değeri (c_u) elde edilmektedir. Deneyden elde edilen parametreler temel tasarımında, ince taneli zeminlerin kısa dönem taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde ve yamaçların kısa dönem analizlerinde kullanılmaktadır (Özdemir 2008). Serbest basınç deneyine yöneltilen en önemli eleştiri, zeminin doğal koşullarda $\sigma = K_0.\gamma.z$ gibi bir yanal gerilme altında olmasına rağmen serbest basınç deneyinde hiçbir yanal basınca tabii tutulmamasıdır. Ancak, doygun haldeki numunede oluşan kılcallık nedeniyle numunenin gerçekteki gibi bir eşdeğer çevre basıncı etkisi altında kaldığı (Terzaghi ve Peck 1967) ve bu nedenle bazı durumlarda serbest basınç deneyinin CU üç eksenli basınç deneyi yerine geçebileceği öne sürülmüştür (Önalp 2007).



Şekil 4.11. Serbest basınç deney düzeneği ve kırılmış bir numune

4.3.2.4. Kesme kutusu deneyleri

Kesme kutusu deneyi kayma direnci parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan en eski deney yöntemidir. Kesme kutusu deney yöntemi diğer kesme deneylerinin uygulamadaki zorluğu nedeniyle özellikle kumlu zeminlerde uygulama alanı bulmuştur. Fakat bu deney killi zeminlerde de uygulanmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan kimyasal sıvıların etkisiyle yapısal olarak silt-ince kum formuna dönüşme eğiliminde olan her iki kilde de kesme kutusu deneylerinde bulunacak kayma mukavemeti parametrelerinin gerçekçi olacağı düşünülmüştür.

Kesme kutusu deney cihazı içine numune konulabilecek kare tabanlı bir prizma, düşey yük uygulama düzeneği, yatay yük uygulama düzeneği, düşey ve yatay deformasyon ölçüm aletleri, yatay yük ölçüm düzeneği, düşey yük yükleme başlığından oluşan ve otomatik olarak çalışan bir cihazdır (Şekil 4.12). Kesme kutusu deneyleri ASTM D-3080 standartlarına göre yapılmıştır. Kesme kutusu deneyleri için kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile ön konsolide edilerek hazırlanan



Şekil 4.12. Kesme kutusu deney cihazı ile yapılan bir deney

numunelerden iç çapı 62,5 mm ve yüksekliği 20 mm olan dairesel kesitli ringlerin içerisine en az 3 adet olmak üzere numuneler alınmıştır. Düşey gerilmeler her bir numune için sırasıyla 32,6 – 65,2 – 130,5 kPa olacak şekilde uygulanmıştır. Numuneler 1mm/dk hızda kesilmiştir.

4.3.2.5. Vane (kanatlı kesme) deneyleri

Vane (kanatlı kesme) deneyi bilhassa yumuşak doygun killi zeminlerde daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu yöntemde deneye tabi tutulacak numuneleri tüplere alma esnasında daha az örselenme olmaktadır. Aşırı pekiştirilmiş killerde fissürlerin varlığı nedeniyle uygulaması tartışılır olmaktadır (Önalp 2007).

Laboratuarda yapılan Vane (kanatlı kesme) deneyleri ASTM D-4648 standartlarına göre yapılmıştır. Deneylerde hazırlanan zeminlerin sertlik ve kıvamına göre 2 veya 3 nolu yaylar kullanılmıştır. Kanatlı kesici olarak yüksekliği 25 mm ve çapı 12,5 mm olan bir kesici kullanılmıştır. Her bir konsantrasyon için ön konsolide edilen numunelerden çelik tüplerin içerisine 3'er adet numune örselenmeden alınmış ve deneyler yapılmıştır (Şekil 4.13.).

Kanatlı kesme deneylerinde kanatlı kesici zemine tam olarak batırılmış, yan yüzeyi kesmek için uygulanan moment M_1, alt ve üst yüzleri kesmek için uygulanan moment M_2 olup uygulanan toplam moment;

$$M = M_1 + M_2 = \pi D^2 c(\frac{H}{2} + \frac{D}{6}) \qquad (4.3.)$$

şeklindedir. Burada D kanatlı kesicinin çapı, c zeminin kohezyonu ve H kanatlı kesicinin yüksekliği olup, toplam moment M deneyler esnasındaki açı değişimleri yoluyla kalibrasyon kartından elde edilmiştir. Tüm bilinen değerlerin Eşitlik 4.3.'de yerine yazılmasıyla zeminin kohezyon (c) değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.13. Laboratuar Vane deney aleti

4.3.2.6. Konsolidasyon deneyleri

Konsolidasyon, tamamen doygun zeminlerde gözenek suyunun bir kısmının drenajından dolayı zemin hacminde meydana gelen azalmadır. Konsolidasyon, gözeneklerdeki suyun zamanla ortamı terk etmesi ile oluştuğundan permeabilitenin konsolidasyon üzerinde oldukça fazla etkisi vardır.

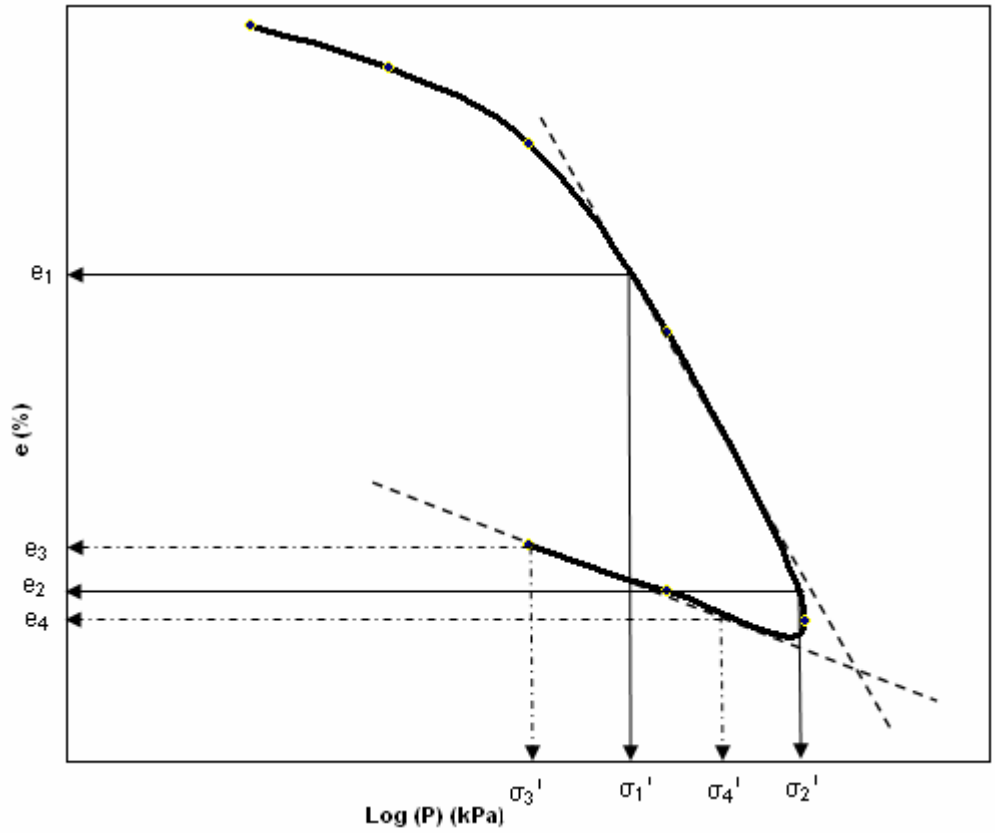
Deneysel çalışmada kimyasal sıvıların her bir konsantrasyonu için 3'er adet deney numunesi üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon deneyleri ASTM D-2435'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Konsolidasyon deneyi yapılacak numuneler 100 kPa ön konsolidasyon basıncı altında ön konsolide edilen zeminden alınmış ve iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan ringler kullanılmıştır.

Konsolidasyon hücresi içerisine doldurulan sıvı ön konsolide edilen zemindeki karışım sıvısı ile aynı olacak şekilde hazırlanmıştır. Hücre içerisindeki sıvının buharlaşmasını önlemek için hücrenin üst yüzeyi bir lastik kılıf ile kapatılmıştır. Hücre sıvısı içerisinde 1 gün süreyle bekletilerek doygun hale getirilen numuneler 400 kPa gerilme kademesine kadar yüklenmiştir. Çünkü bu gerilme kademesinden sonra killerin sıkışma davranışı üzerinde kimyasal sıvılar etkili olmamaktadır.

Konsolidasyon deneyleri sonucunda çoğunlukla zeminlere ait basınç-boşluk oranı (σ – e) eğrileri çizilmekte (Şekil 4.14.), sıkışma indisi (Cc) ve şişme indisi (Cs) değerleri hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.4. ve Eşitlik 4.5.).

$$Cc = \frac{e_1 - e_2}{\log(\sigma_2^{\,1} / \sigma_1^{\,1})} \tag{4.4.}$$

$$Cs = \frac{e_3 - e_4}{\log(\sigma_4^{\,1} / \sigma_3^{\,1})} \tag{4.5.}$$



Şekil 4.14. Konsolidasyon deneyleri sonucu elde edilen tipik basınç-boşluk oranı (σ – e) grafiği

Bu eşitliklerde e_1 ve e_3 yükleme kademesi başı, e_2 ve e_4 yükleme kademesi sonu boşluk oranlarını, σ_1^1 ve σ_3^1 yükleme kademesi başı, σ_2^1 ve σ_4^1 yükleme kademesi sonundaki efektif gerilmeleri ifade etmektedir.

4.3.3. Optik mikroskop görüntülerinin alınması

Laboratuarda yapılan kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneylerinde bulunan sonuçların kimyasal sıvıların etkisi altındaki kil tanecikleri arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerle ilişkisi bulunmaktadır. Bu fiziko-kimyasal kuvvetlerin etkisiyle killerde yapı ve davranış değişiklikleri meydana gelmektedir. Bu yapı ve davranış değişikliklerini belirlemek için kimyasal sıvıların varlığında taneciklerin optik mikroskopta fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Daha önceki araştırmacılar kimyasal sıvılar varlığında zemin yapısında meydana gelen değişiklikleri göstermek için elektron mikroskobu (EM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanmışlardır. EM ve SEM görüntüleri zeminlerin yapısında bazı değişimlerin olduğunu göstermektedir, fakat bu sonuçlar numune hazırlama esnasında numunelerin örselenmesi ve kuruması gibi sebeplerden ötürü eleştirilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada kimyasal sıvıların varlığında zemin yapısında meydana gelen değişiklikleri incelemek için bir optik mikroskop (OM) kullanılmıştır. Bu metot numune hazırlama esnasındaki örselenmeleri bertaraf etmektedir. Optik mikroskobun bir diğer avantajı da boşluk sıvılarının varlığında zeminin kılcal yapısının gözlenebilmesidir.

Deneysel çalışmada S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Kimya Müh. Bölümü'nde bulunan 100X büyütmeli üstten aydınlatmalı bir optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 4.15.). Çalışmada hem kaolinit hem de Aksaray kili için optik mikroskop fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Deneyde kullanılan her iki kil türü de 200 Nolu elekten (75μm) geçirildikten sonra kullanılmıştır. Süspansiyonda kullanılacak karışım sıvıları ise kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanması esnasında kullanılan konsantrasyonlarla aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 4.15. Deneysel çalışmada kullanılan optik mikroskop

Deneyler için hazırlanan süspansiyonların her biri 10ml'lik cam tüpler içerisinde hazırlanmıştır. Süspansiyonlar hem kaolinit hem de Aksaray kilinin ağırlıkça %5 oranında karışım sıvısının içine karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Kil parçacıkları ve karışım sıvıları arasında tam bir etkileşimin sağlanabilmesi için hazırlanan süspansiyonlar tüp içerisinde yaklaşık 2 dk civarında sarsma işlemine tabii tutulmuştur. Bu sarsma işlemini takiben parçacıkların yumaklanarak çökmesini önlemek için çok hızlı bir şekilde hareket edilmiş ve hemen bu süspansiyon askısından plastik bir pipet yardımıyla bir miktar alınmıştır. Daha sonra 1-2 damla sıvı cam bir yüzey üzerine damlatılarak hemen fotoğraf görüntüleri alınmış ve bu görüntüler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Böylelikle kimyasal sıvıların etkisiyle kil tanecikleri arasında meydana gelen fiziko-kimyasal kuvvetler ve bu kuvvetlerin killerin davranışı üzerindeki etkisi gözlemlenerek, bu durumun kayma mukavemeti ve konsolidasyon deney sonuçlarıyla bağlantısı irdelenmeye çalışılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Su ve dört farklı kimyasal sıvı ile konsolide edilmiş kil zeminlerin kayma mukavemeti davranışlarını incelemek için serbest basınç mukavemeti deneyleri, üç eksenli basınç deneyleri, kesme kutusu deneyleri, vane kanatlı kesme deneyleri ve cep penetrometresi ile ölçümler yapılmıştır. Kimyasallar etkisindeki killerin sıkışma davranışlarını belirlemek için ise konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerden önce deney numunelerini hazırlamak için ön konsolide edilecek numunelerin hangi su muhtevasında hazırlanması gerektiğini belirleyebilmek için Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kimyasalların etkisi altında kil zerreciklerinin nasıl bir davranış sergileme eğiliminde olduğunu gözlemleyebilmek için süspansiyon şeklinde hazırlanan numunelerin optik mikroskopla fotoğrafları çekilmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.

5.1. Atterberg Limitleri Deney Sonuçları

Genel olarak geotekniksel çalışmalarda deneysel çalışmalar Atterberg limitlerinin belirlenmesiyle başlamaktadır. Atterberg limitleri bir zeminin mühendislik özellileri hakkında bir ön fikir vermesi ve zeminin tanınması açısından önemlidir. Bu limitlerin belirlenmesi oldukça hızlı ve masrafsızdır. Bu sebeple diğer laboratuar deneylerinden önce yapılması oldukça yararlı olmaktadır.

Atterberg limit deneyleri, deneylerde kullanılan iki farklı kil türü için su ve 4 farklı organik sıvının (asetik asit, izo-propil alkol, ethanol ve methanol) değişik konsantrasyonları için yapılmıştır. Deneyler, sonuçların daha doğru ve kesin olarak değerlendirilebilmesi amacıyla hem Casagrande yöntemi hem de düşen koni penetrasyon yöntemi ile yapılmıştır ve sonuçlar grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karışıklığa neden vermemek için her iki kil türü için sonuçlar ayrı ayrı verilmiştir.

5.1.1. Kaolinit için Atterberg limitleri deney sonuçları

Kaolinit için su ve 4 farklı kimyasal malzemenin (methanol, ethanol, izo-propil alkol ve asetik asit) farklı konsantrasyonlarıyla (%20, %40, %60 ve %80) düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları Çizelge 5.1.'de ve Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kaolinit için su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Atterberg Limitleri Likit Limit (LL) Plastik Limit (PL) Plastisite İndisi (PI)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	LL PL PI	44,97 23,57 21,40	–	–	–	–
Methanol	LL PL PI	–	47,60 23,68 23,92	48,80 22,50 26,30	49,20 23,54 25,66	48,80 24,93 23,87
Ethanol	LL PL PI	–	48,47 23,69 24,78	49,20 25,77 23,43	46,40 25,39 21,01	44,40 28,68 15,72
İzo-propil Alkol	LL PL PI	–	49,30 25,28 24,02	50,50 26,65 23,85	51,50 28,31 23,19	49,80 26,51 23,29
Asetik asit	LL PL PI	–	51,47 26,13 25,34	56,40 27,66 28,74	62,50 27,75 34,75	61,30 30,67 30,63

Çizelge 5.2. Kaolinit için su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonlarında Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Atterberg Limitleri Likit Limit (LL) Plastik Limit (PL) Plastisite İndisi (PI)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	LL PL PI	41,90 23,57 18,33	–	–	–	–
Methanol	LL PL PI	–	47,15 23,68 23,47	46,80 22,50 24,30	47,86 23,54 24,32	44,49 24,93 19,56
Ethanol	LL PL PI	–	47,70 23,69 24,01	48,10 25,77 22,33	44,04 25,39 18,65	40,94 28,68 12,26
İzo-propil Alkol	LL PL PI	–	42,89 25,28 17,61	44,05 26,65 17,4	45,54 28,31 17,23	43,28 26,51 16,77
Asetik asit	LL PL PI	–	47,85 26,13 21,72	52,80 27,66 25,14	57,26 27,75 29,51	58,21 30,67 27,54

Çizelge 5.1. ve Çizelge 5.2.'de verilen sonuçların daha açık bir şekilde yorumlanabilmesi için farklı grafikler çizilmiştir. İlk olarak Şekil 5.1., Şekil 5.4. arasında su ve 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için farklı iki yöntemi (Casagrande ve düşen koni penetrasyon) kullanarak elde edilen likit limit değerleri (LL) ve plastisite indisi (PI) değerleri değişimi gösterilmiştir.

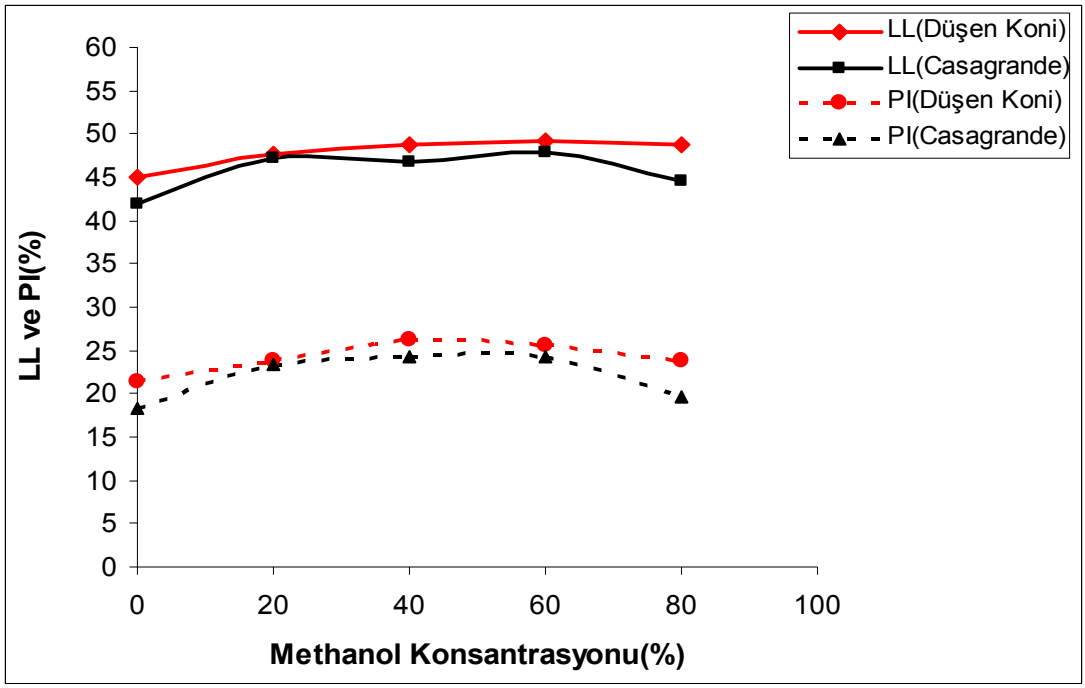
Methanol kimyasal sıvısının değişik konsantrasyonlarının kullanılması ile artan konsantrasyonla kaolinitin hem likit limit hem de plastisite indisi değerinde ilk önce bir artış meydana gelmekte, %40 ile %60 konsantrasyonları arasında maksimum bir değere ulaşmakta ve % 60 konsantrasyondan sonra ise her iki değerde de bir azalma meydana gelmektedir. Her iki yöntemle yapılan deneyler benzer eğilimi göstermektedir. Genel olarak likit limitteki değişimler saf su ile yapılan

deneylerde elde edilen sonuçlara göre %6 - %11,5 arasındaki bir oranda artış şeklinde değişmektedir. Düşen koni penetrasyon yöntemi ile yapılan deneyler sonucu elde edilen likit limit ve plastisite indisi değerleri saf su da dahil olmak üzere tüm konsantrasyonlarda Casagrande yöntemiyle yapılan deneylerden elde edilen değerlerden yüksek çıkmaktadır.

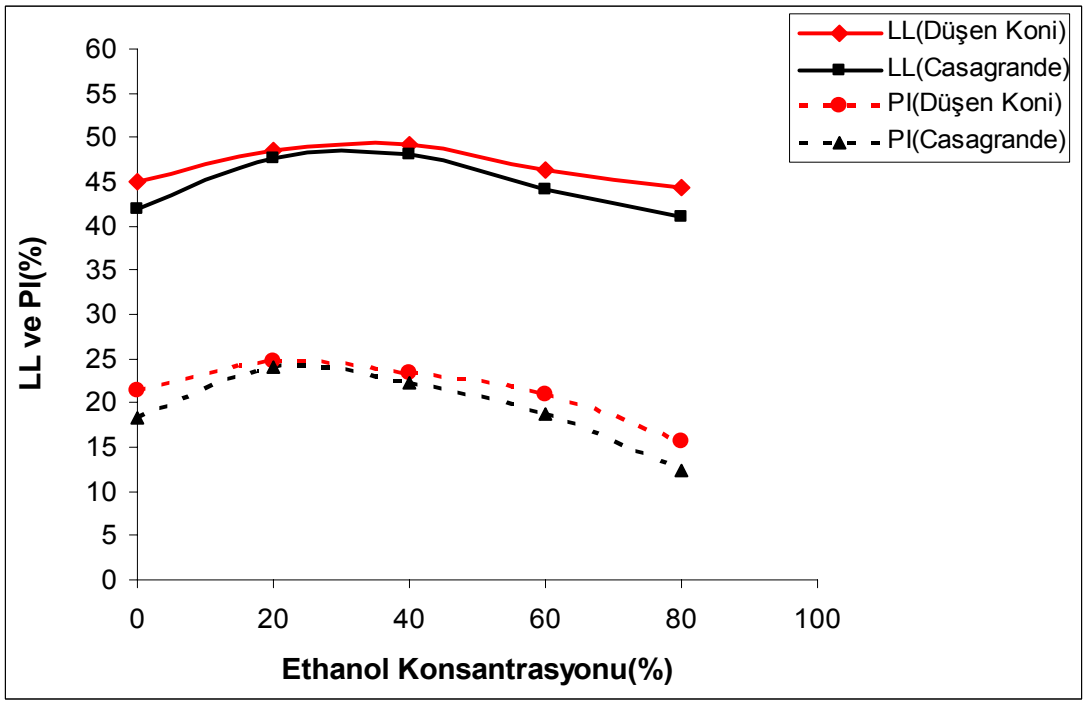
Ethanol kimyasal sıvısının değişik konsantrasyonları için yapılan deneylerde % 40 konsantrasyona kadar likit limit ve plastisite indisi değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu konsantrasyonda likit limit değerindeki artış Casagrande yönteminde %11,5 olmaktadır. %40 konsantrasyondan sonra ise likit limit ve plastisite indisi değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. %60 konsantrasyonda saf su ile yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara yakın değerler bulunurken, % 80 konsantrasyonda elde edilen likit limit ve plastisite indisi değerleri saf sudakinden daha küçük olmaktadır. Hem Casagrande hem de düşen koni penetrasyon yöntemlerinde aynı eğilim görülmektedir.

İzo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için yapılan deneylerde her iki yöntemde de kimyasalın farklı konsantrasyonları için likit limit değerleri saf sudakinden fazla olmakla birlikte, değişik konsantrasyonlarda birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Likit limit değerindeki artışlar %2 - %11,5 arasında değişiklik göstermektedir. Likit limit değerindeki artışlar düşen koni penetrasyon yönteminde Casagrande yöntemindekinden daha fazla olmaktadır. Tüm konsantrasyonlar için elde edilen plastisite indisi değerleri kendi aralarında çok yakın sonuçlar vermiştir. Düşen koni yöntemiyle elde edilen plastisite indisi değerleri saf suyunkinden büyük fakat Casagrande yönteminde elde edilen plastisite indisi değerleri saf suyunkinden küçük olmaktadır.

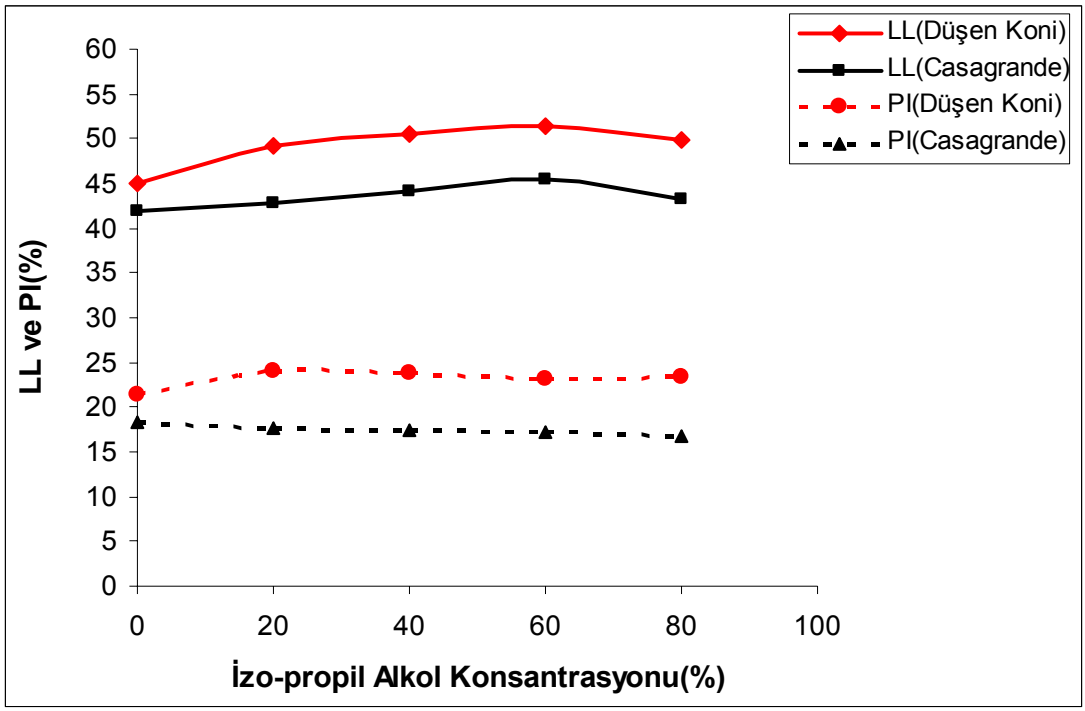
Asetik asitin değişik konsantrasyonları için yapılan deneylerde her iki deney yönteminde de artan konsantrasyonla birlikte likit limit ve plastisite indisi değerlerinde daha belirgin bir artış olmaktadır. Likit limitteki artış oranı % 39 değerine kadar çıkmaktadır. %60 konsantrasyona kadar kademeli olarak aşırı bir artış gösteren likit limit değeri %80 konsantrasyonda düşen koni penetrasyon yönteminde azalırken Casagrande yönteminde artmaktadır. Genel olarak asetik asitin tüm konsantrasyonları için zeminin plastiklik özelliği diğer kimyasallara göre artış göstermiştir.



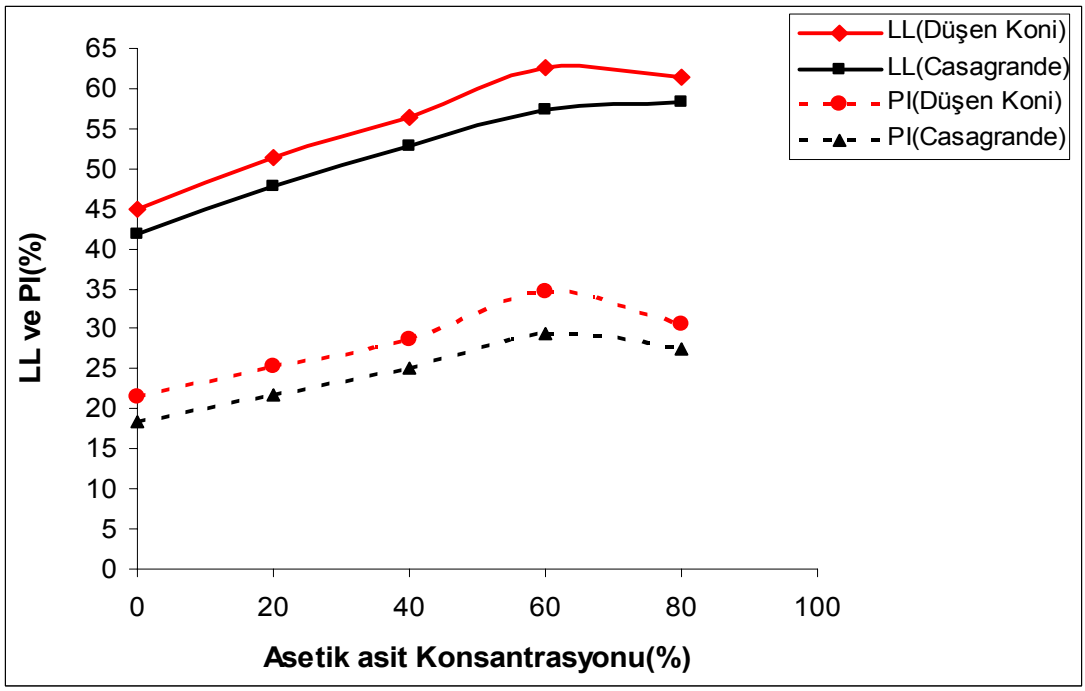
Şekil 5.1. Kaolinitte methanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları



Şekil 5.2. Kaolinitte ethanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları



Şekil 5.3. Kaolinitte izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları

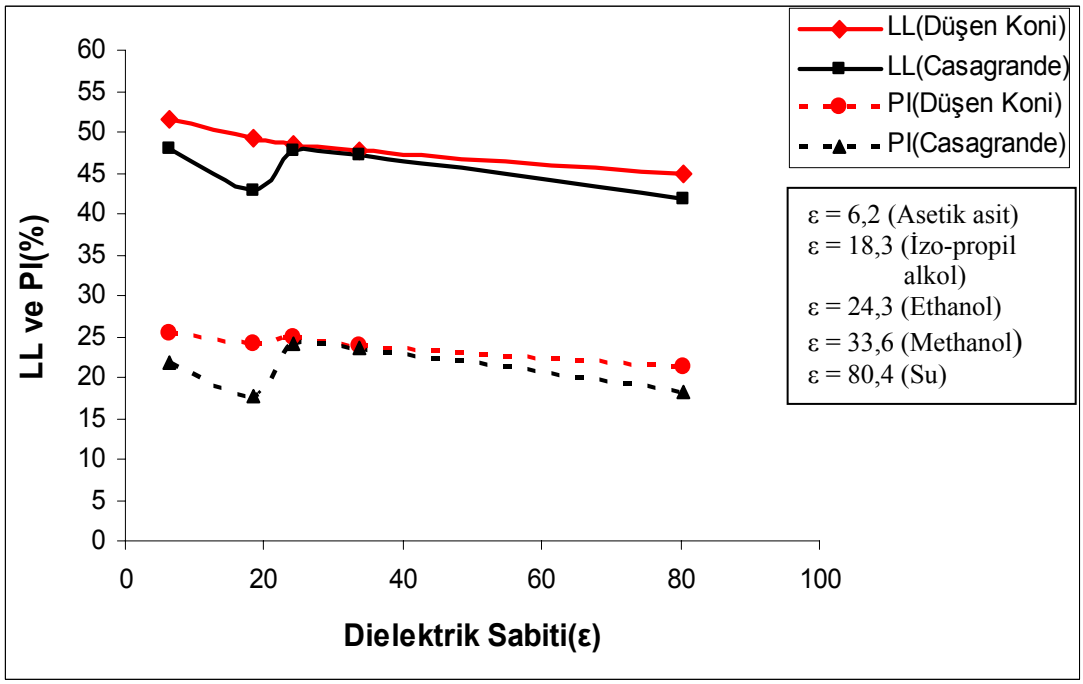


Şekil 5.4. Kaolinitte asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları

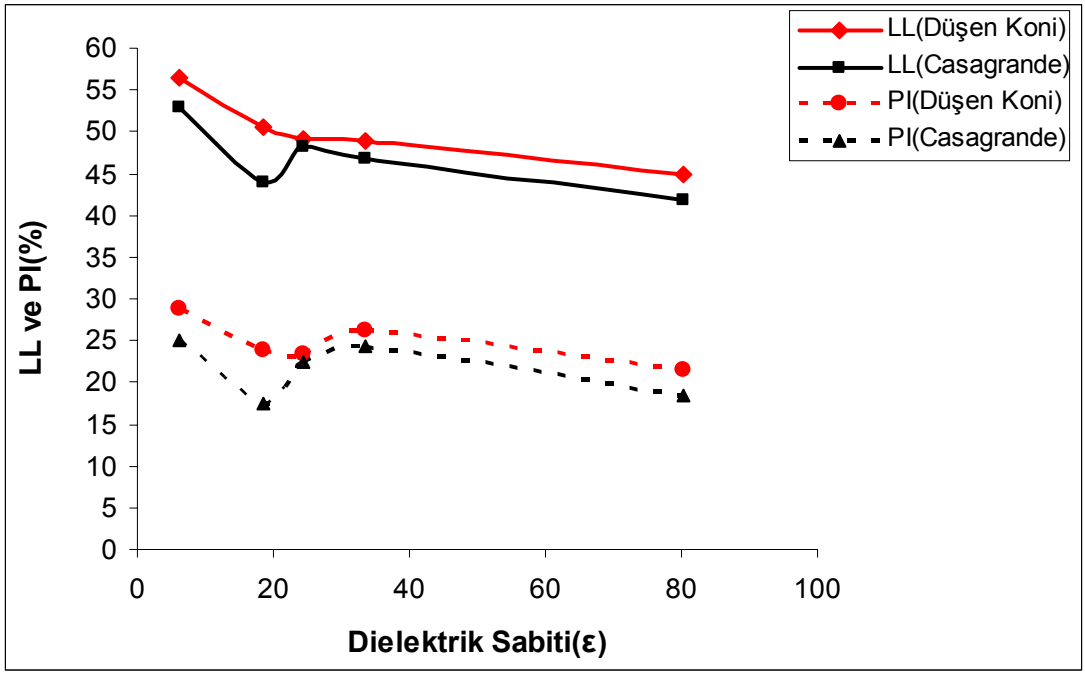
Kullanılan tüm kimyasalların değişik konsantrasyonları için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılabilmiş ve numuneler plastiklik özelliği göstermiştir. Kaolinit üzerinde saf su ile yapılan deneylerde düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit limit değeri %44,97 ve Casagrande yöntemi ile %41,90 bulunmuştur. Tüm sonuçlar dikkate alındığında düşen koni penetrasyon yöntemi ile bulunan likit limit değerleri Casagrande yöntemi ile bulunan değerlerden büyük çıkmaktadır. Genel olarak %60 konsantrasyona kadar likit limit değerlerinde artışlar meydana gelirken %80 konsantrasyon için hafif bir azalma meydana gelmektedir. Kimyasalların %60 konsantrasyonuna kadar tampon bölgede hapsedilen sıvı miktarı kademeli olarak artmakta, bu konsantrasyondan sonra ise hapsedilen sıvı miktarı çok hafif azalmaktadır.

Daha önce literatürde Atterberg limitleri üzerinde kimyasal malzemelerin etkisi genellikle dielektrik sabiti değişimlerine bağlı olarak ifade edilmiştir. Bununla ilgili olarak Şekil 5.5., Şekil 5.8. arasında 4 farklı kimyasal sıvının her bir konsantrasyonu ve saf su için dielektrik sabitine bağlı değişimler gösterilmiştir.

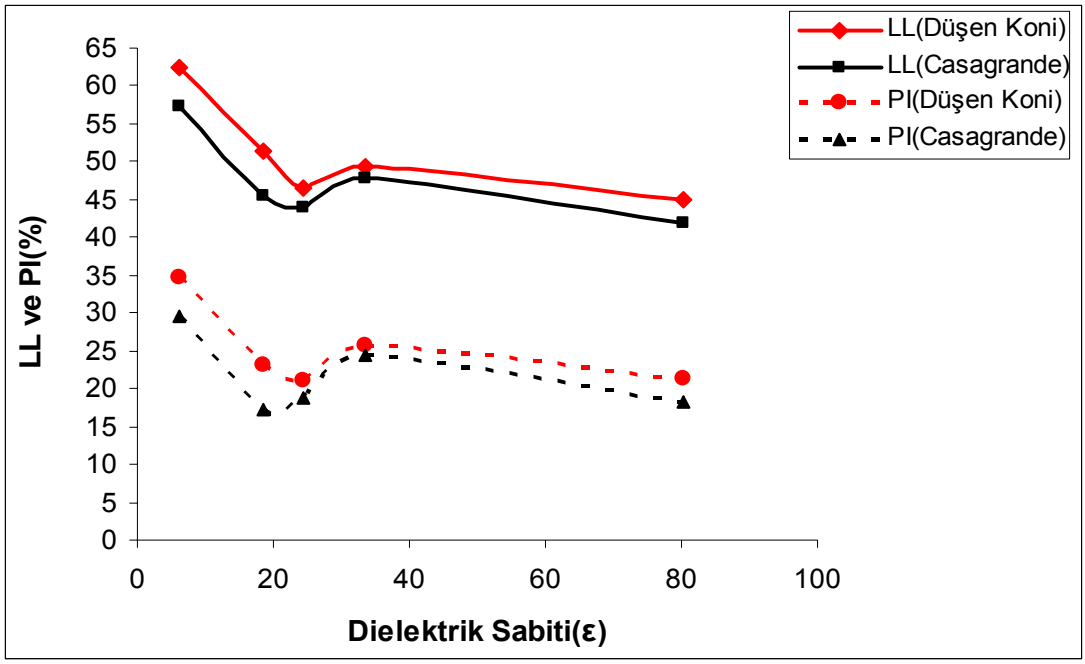
Kimyasalların %20 konsantrasyonuyla yapılan deneylerde düşen koni penetrasyon yönteminde likit limit ve plastisite indisi değerleri dielektrik sabitinin azalmasıyla lineer bir şekilde artmaktadır. Casagrande yönteminde ise dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkol dışında yine benzer bir eğilim vardır. Casagrande yönteminde izo-propil alkol için bulunan likit limit değeri su için bulunan değerden yüksek fakat plastisite indisi değeri suyunkinden küçüktür. %40 konsantrasyon için bulunan sonuçlar %20 konsantrasyondakilerle benzer eğilimde olmakla beraber, özellikle dielektrik sabiti ε=6,2 olan asetik asit varlığında değişim daha belirgindir. %60 konsantrasyonda kimyasal sıvının ethanol (ε=24,3) ve izo-propil alkol (ε=18,4) olması durumunda likit limit değerleri suyunkinden çok fazla bir farklılık göstermezken, özellikle asetik asit varlığında daha büyük değerler elde edilmektedir. %80 konsantrasyonda ethanol için elde edilen likit limit değerleri saf suyunkine yakınken, diğer sıvılar için elde edilen değerler saf suyunkinden büyük çıkmaktadır. Ethanolün %80 konsantrasyonu için artan plastik limit değerine (PL) bağlı olarak plastisite indisi saf suyunkinden düşük olmakta ve plastiklik özelliği azalmaktadır. Methanol ve izo-propil alkolün plastisite indisi değerleri ise saf suyunkine yakın bir değerde bulunmuştur.



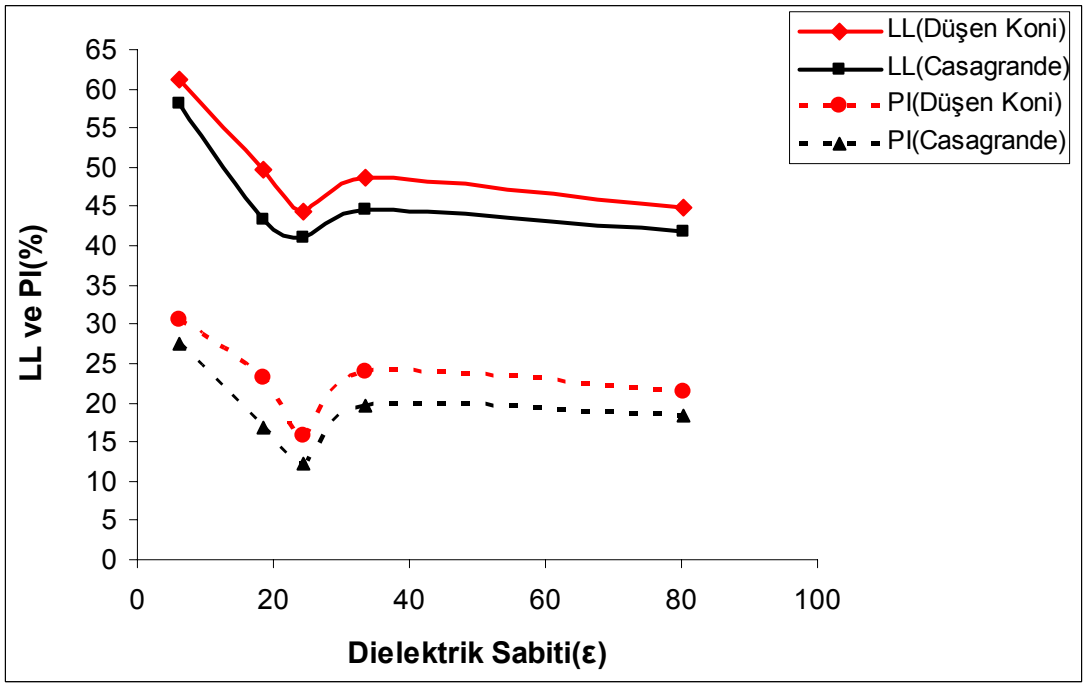
Şekil 5.5. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



Şekil 5.6. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



Şekil 5.7. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



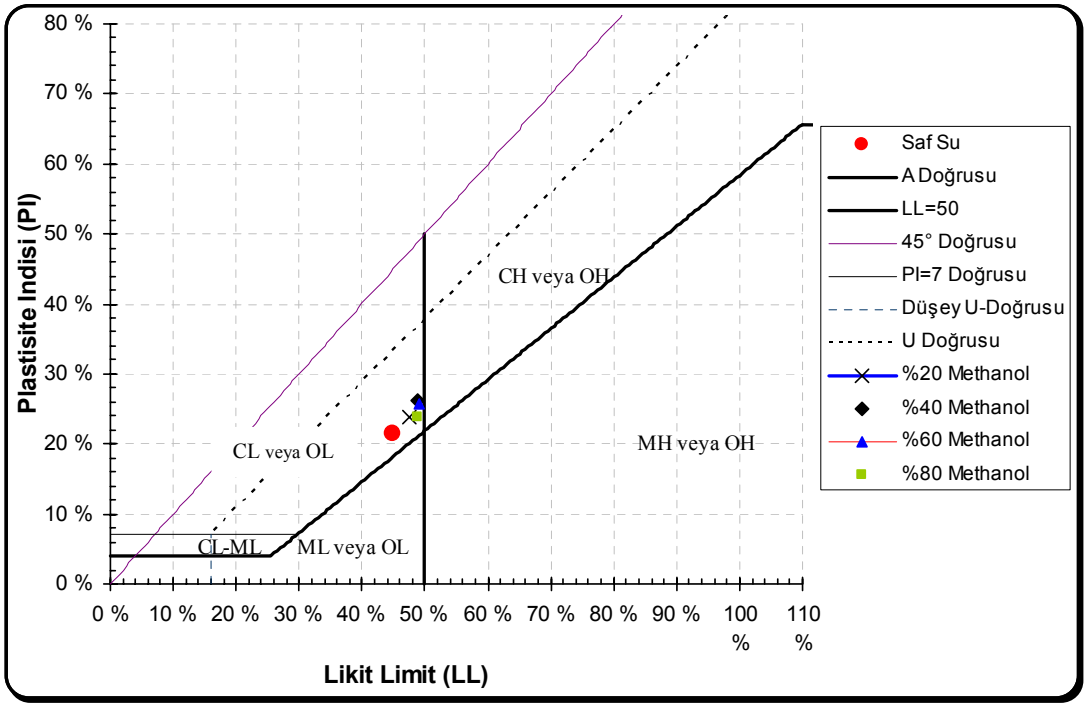
Şekil 5.8. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi

Şekil 5.5., Şekil 5.8. bir bütün olarak incelendiğinde likit limit değerlerinin genel olarak %60 konsantrasyona kadar tüm kimyasallarda arttığı daha sonra ise hafif bir azalma gösterdiği görülmektedir. Likit limitteki en büyük artış ise dielektrik sabiti en küçük olan asetik asitte olmaktadır.

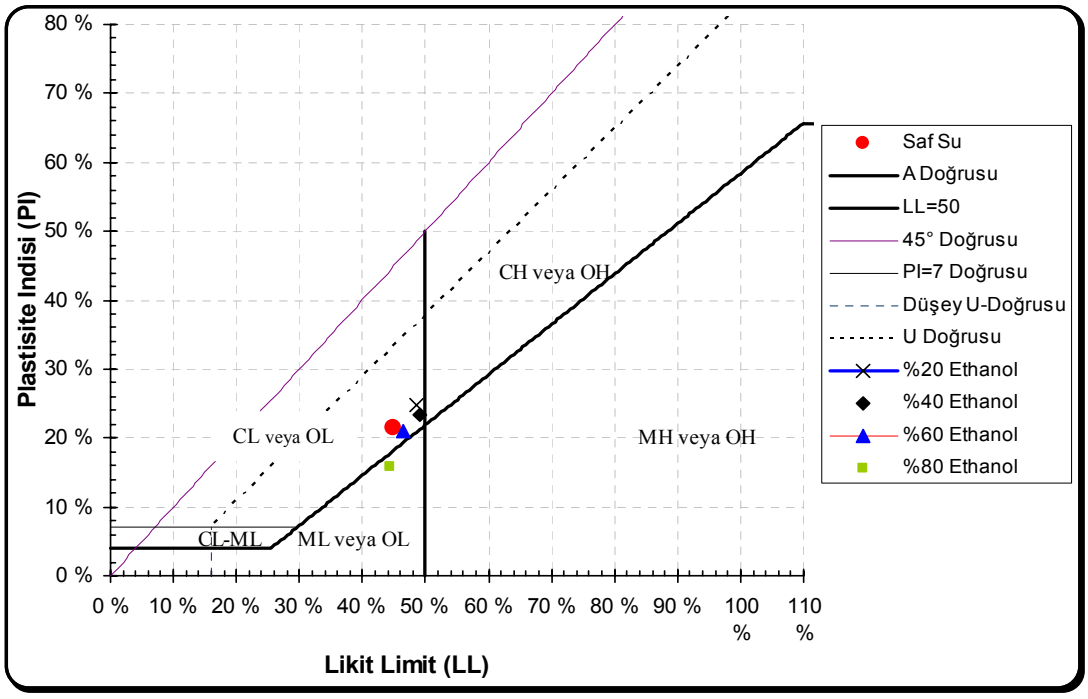
Kaolinitte kimyasal sıvılar ile yapılan deneyler esnasında kil tanecikleri arasında çok aşırı bir topaklanmanın meydana gelmediği görülmüştür. Bu nedenle likit limit ve plastik limit deneyleri saf sudakine benzer şekilde kolaylıkla yapılabilmiş ve saf suyunkine göre pek fazla farklılık göstermemiştir. Asetik asit varlığında zeminin plastisite indisi belirgin olarak artmakta fakat diğer kimyasal sıvıların varlığında meydana gelen değişiklikler çok belirgin olmamaktadır. Yani asetik asit zeminin plastiklik özelliğini arttırırken diğer kimyasallar fazla etkili olmamaktadır. Bu sonuçlar kaolinitin davranışının fiziko-kimyasal kuvvetlerden sınırlı ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Hatta kaolinitin davranışının diffüz çift tabaka teorisi ile zıt bir durum teşkil edebileceği ve davranış üzerinde Van der Walls çekim kuvvetlerinin baskın rol oynadığını göstermektedir.

İnce taneli zeminlerin USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) sistemine göre sınıflandırılması için Casagrande Plastisite kartı kullanılmaktadır. Kaolinit üzerinde kimyasal sıvıların kullanılması durumunda zemin sınıfı üzerinde bu kimyasalların nasıl bir değişikliğe neden olduğu su ve her bir kimyasalın farklı konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemiyle bulunan deney sonuçları dikkate alınarak Şekil 5.9., Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.

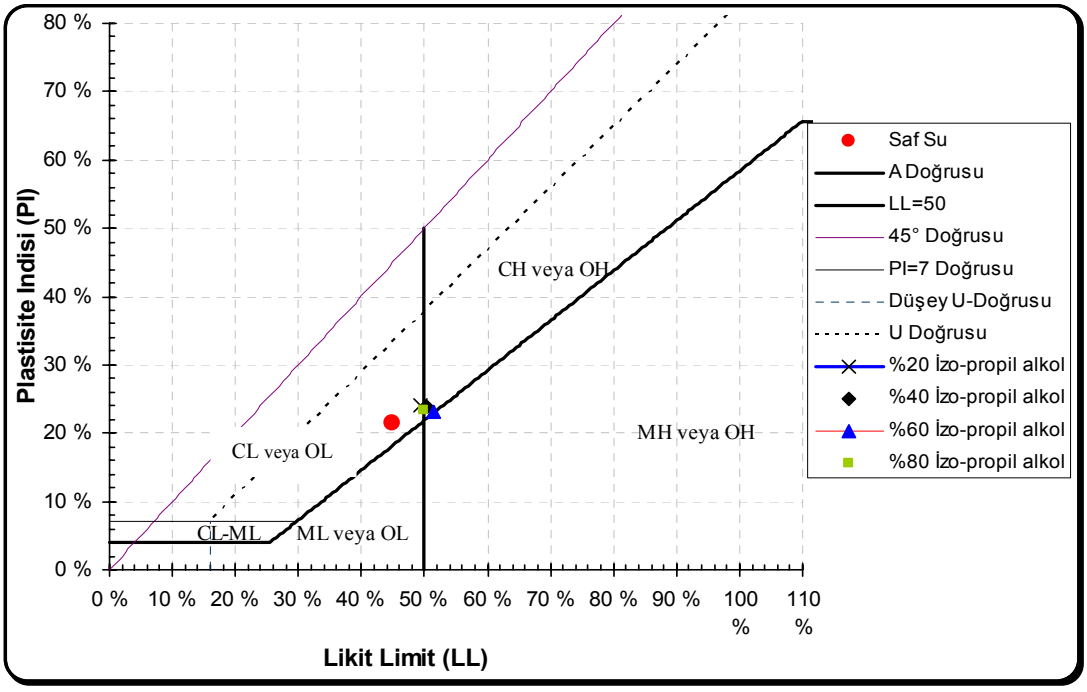
Saf su ile yapılan deneylerde kaolinit CL (düşük plastisiteli kil) zemin sınıfına girmekte, methanolün değişik konsantrasyonları için de zemin sınıfı değişmemekte ve CL olmaktadır. Ethanolde %60 konsantrasyona kadar zemin sınıfı değişmezken %80 konsantrasyon için zemin sınıfı ML (düşük plastisiteli silt) olmaktadır. İzo-propil alkolün tüm konsantrasyonları için kaolinit CL – CH (yüksek plastisiteli kil) ve MH (yüksek plastisiteli silt) sınırları üzerinde bulunmaktadır. Yani kaolinitin plastiklik özelliği artmakta ve azda olsa bir zemin sınıfı değiştirme eğilimi bulunmaktadır. Artan asetik asit konsantrasyonu ile kaolinitin plastiklik özelliği artmakta ve zemin sınıfı tüm konsantrasyonlarda CH grubuna dahil olmaktadır. %80 asetik asit konsantrasyonu için zemin sınıfının MH sınır durumuna çok yaklaştığı ve daha yüksek bir konsantrasyonda bu gruba dahil olabileceği görülmektedir.



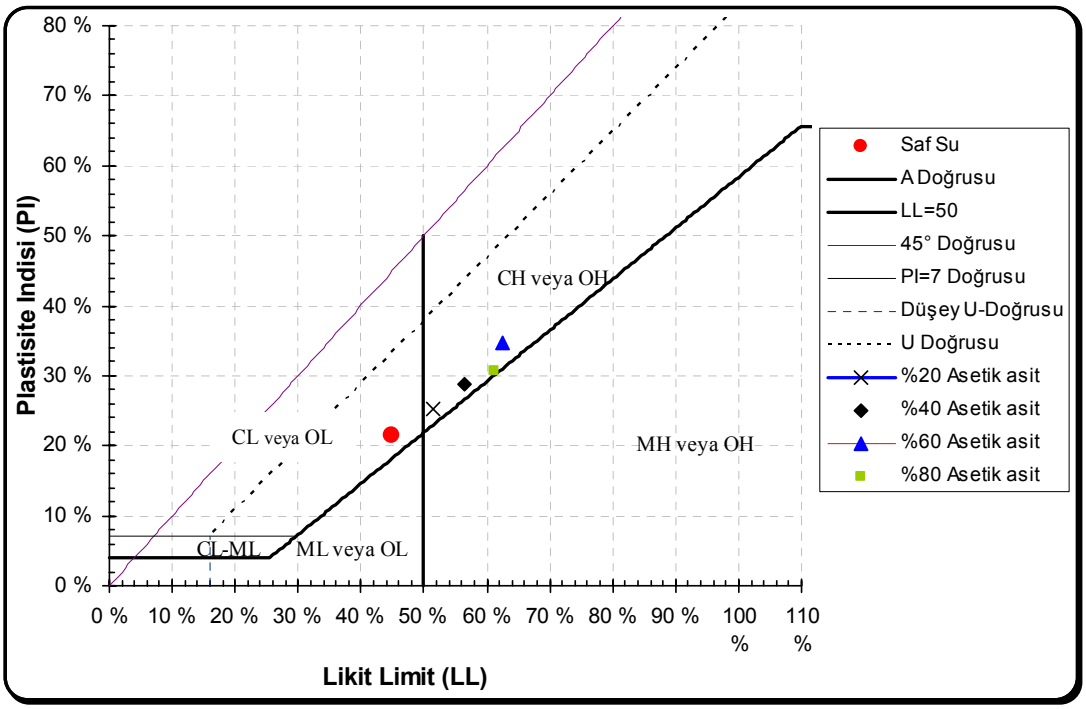
Şekil 5.9. Kaolinitte su ve methanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.10. Kaolinitte su ve ethanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.11. Kaolinitte su ve izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.12. Kaolinitte su ve asetik asitin değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri

5.1.2. Aksaray kili için Atterberg limitleri deney sonuçları

Aksaray kili için saf su ve 4 farklı kimyasal sıvının (methanol, ethanol, izo-propil alkol ve asetik asit) farklı konsantrasyonlarıyla (%20, %40, %60 ve %80) düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları Çizelge 5.3.'de ve Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları Çizelge 5.4.'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Atterberg Limitleri Likit Limit (LL) Plastik Limit (PL) Plastisite İndisi (PI)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	LL PL PI	106,50 36,71 69,79	–	–	–	–
Methanol	LL PL PI	–	88,40 41,35 47,05	82,80 42,08 40,72	71,60 45,10 26,50	49,60 34,77 14,83
Ethanol	LL PL PI	–	101,70 35,67 66,03	87,70 41,96 45,74	76,00 36,41 39,59	62,20 34,68 27,52
İzo-propil Alkol	LL PL PI	–	96,32 40,32 56,00	93,20 40,86 52,34	59,30 40,45 18,85	50,08 36,85 13,23
Asetik asit	LL PL PI	–	76,22 37,02 39,20	54,30 37,83 16,47	45,50 41,21 4,29	45,00 40,77 4,23

Çizelge 5.4. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal malzemenin değişik konsantrasyonları için Casagrande yöntemiyle yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Atterberg Limitleri Likit Limit (LL) Plastik Limit (PL) Plastisite İndisi (PI)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	LL PL PI	125,83 36,71 89,12	–	–	–	–
Methanol	LL PL PI	–	106,08 41,35 64,73	92,29 42,08 50,21	78,62 45,10 33,52	48,68 34,77 13,91
Ethanol	LL PL PI	–	116,50 35,67 80,83	105,00 41,96 63,04	86,32 36,41 49,91	60,68 34,68 26,00
İzo-propil Alkol	LL PL PI	–	110,20 40,32 69,88	99,32 40,86 58,46	57,41 40,45 16,96	46,86 36,85 10,01
Asetik asit	LL PL PI	–	83,72 37,02 46,70	56,80 37,83 18,97	47,66 41,21 6,45	44,97 40,77 4,2

Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4.'de verilen sonuçların daha açık bir şekilde yorumlanabilmesi için Şekil 5.13., Şekil 5.16. arasında deneylerde bulunan likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerlerinin değişimi gösterilmiştir.

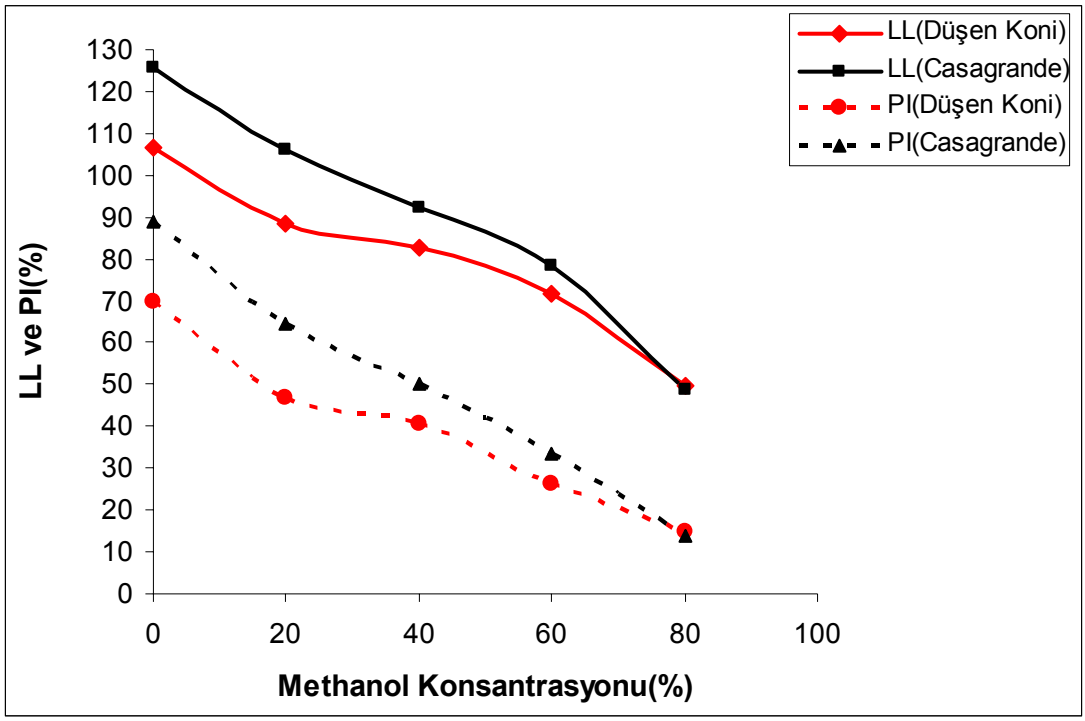
Artan methanol konsantrasyonu ile Aksaray kilinin hem likit limit hem de plastisite indisi değerlerinde çok büyük bir azalma meydana gelmektedir. Her iki yöntemle yapılan deneylerde de benzer eğilimi görülmektedir. Düşen koni penetrasyon yöntemiyle yapılan deneyler sonucunda likit limit değeri saf suda w_L=%106,50 iken %80 methanol konsantrasyonunda likit limit değeri w_L=%49,60 olmaktadır. Bu değer saf suyun likit limit değerinin %46,5'u olmaktadır. Casagrande yönteminde ise likit limit değeri saf su için w_L=%125,83 iken %80 methanol konsantrasyonunda w_L=%48,68 olmaktadır. Bu değer saf suyun likit limit değerinin

%38,7'si olmaktadır. Kaolinitteki durumun tam tersine saf su ve methanol ile yapılan deneylerde Casagrande yöntemiyle bulunan değerler düşen koni penetrasyon yöntemiyle bulunanlardan daha yüksek çıkmaktadır. Yalnız %80 konsantrasyonda düşen koni penetrasyon yöntemi ile yapılan deney sonucu elde edilen değer Casagrande yöntemiyle yapılan deneyden elde edilen değerden büyük çıkmaktadır.

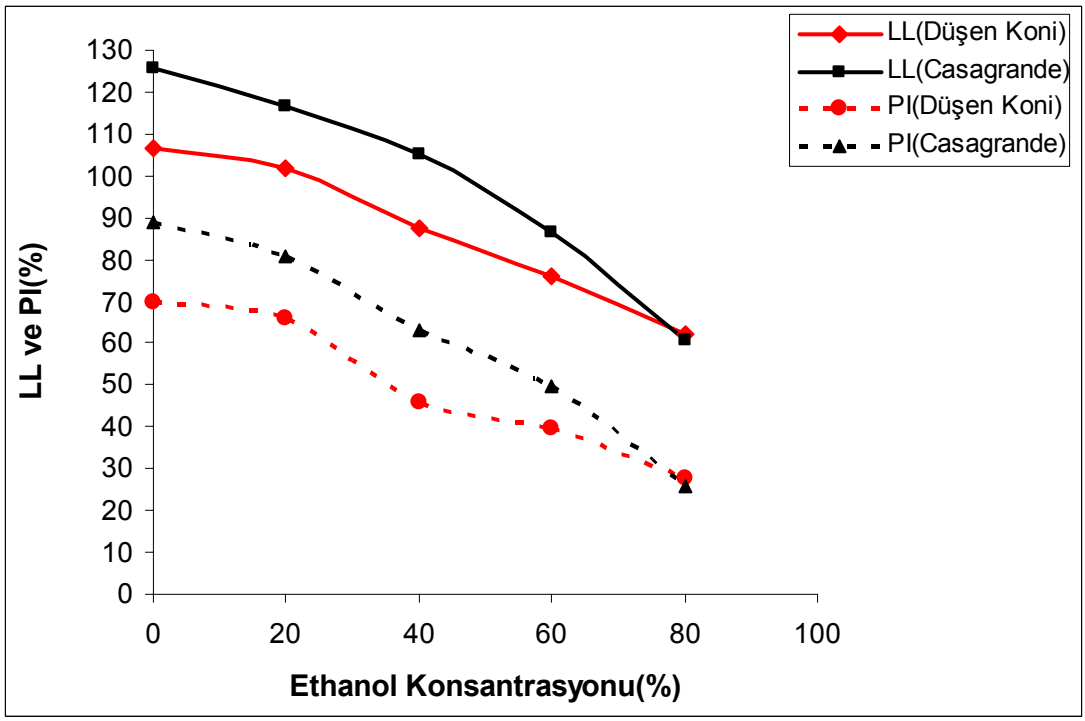
Ethanolde de, methanoldekine benzer şekilde artan konsantrasyonla her iki metotta da likit limit ve plastisite indisi değerleri azalmaktadır. %80 konsantrasyonda düşen koni penetrasyon yönteminde likit limit değeri w_L=%62,20 değerine düşmektedir. Bu değer saf su ile yapılan deneyde bulunan değerin %58,4'ü olmaktadır. Casagrande yönteminde ise kilin likit limit değeri %80 ethanol konsantrasyonu için w_L=% 60,68 olmakta ve bu değer saf su için bulunan değerin %48,2 olmaktadır. Methanoldekine benzer şekilde %80 konsantrasyonda düşen koni penetrasyon deneyinde elde edilen likit limit değeri daha büyüktür.

İzo-propil alkolde %40 konsantrasyona kadar likit limit değerinde daha az bir düşüş varken özellikle %60 konsantrasyonu ile birlikte çok keskin bir düşüş meydana gelmektedir. %80 konsantrasyonda düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit değeri w_L=%50,08 değerine düşmektedir. Bu değer saf su için bulunan likit limit değerinin %47'sidir. Casagrande yönteminde ise kilin likit limit değeri %80 konsantrasyon için w_L=%46,86 olmakta ve bu değer saf su ile yapılan deneyde elde edilen değerin %37,2'si olmaktadır. %20 ve %40 konsantrasyonlarda Casagrande yöntemiyle bulunan likit limit değerleri düşen koni penetrasyon yöntemindekilerden büyük olmakla beraber, %60 ve %80 konsantrasyonlarda tam tersi durum söz konusudur.

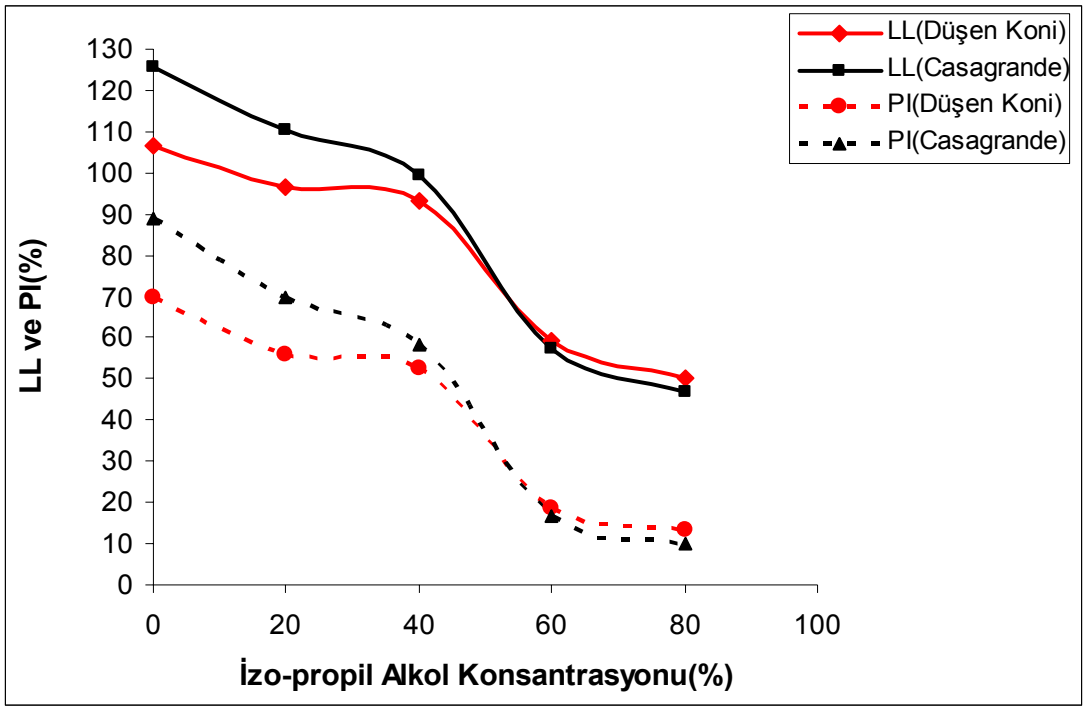
Asetik asit varlığında her iki yöntemde de artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte likit limit ve plastisite indisi değerlerinde diğer kimyasallara göre daha keskin bir azalma meydana gelmektedir. %20 konsantrasyonda dahi asetik asit likit limit değeri üzerinde çok aşırı etkili olmakta ve likit limit değeri w_L=%76,22 değerine düşmektedir. % 80 konsantrasyonda ise likit limit değeri düşen koni penetrasyon yönteminde saf su için bulunan değerin %42,2'si, Casagrande yönteminde %35,7'si olmaktadır. %60 konsantrasyona kadar Casagrande yönteminde elde edilen değerler düşen koni penetrasyon yöntemindekilerden az da olsa büyük olmakla beraber, %80 konsantrasyonda elde edilen değerler eşit olmaktadır.



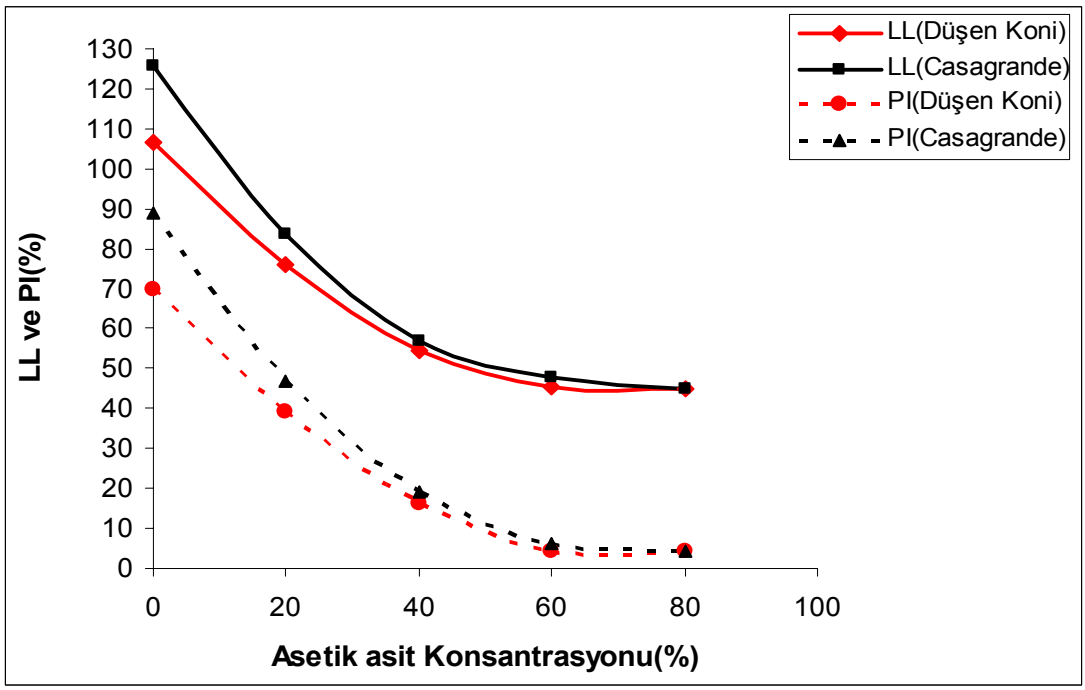
Şekil 5.13. Aksaray kilinde methanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları



Şekil 5.14. Aksaray kilinde ethanolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları



Şekil 5.15. Aksaray kilinde izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları



Şekil 5.16. Aksaray kilinde asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yapılan Attterberg limitleri deney sonuçları

Kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ile birlikte kil, silt-ince kum yapısına yaklaşmakla beraber yine de likit limit ve plastik limit deneyleri yapılabilmiştir.

Aksaray kili üzerinde saf su ile yapılan deneylerde düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit limit değeri w_L=%106,50 ve Casagrande yöntemi ile w_L=%125,83 olarak bulunmuştur. Saf su ve kimyasal sıvılarla yapılan deneylerde montmorillonitik özellik gösteren kilde % 80 konsantrasyona kadar Casagrande yöntemi ile bulunan likit limit değerleri düşen koni penetrasyon yöntemindekilerden daha büyük çıkmaktadır. %80 konsantrasyonlarda değerler çok küçük olmakta ve düşen koni penetrasyon yöntemi ile Casagrande yöntemine göre daha büyük değerler çıkmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle likit limiti yaklaşık olarak %100'den küçük olan zeminlerde (kaolinitik zeminler) düşen koni penetrasyon yöntemi, %100'den büyük olan zeminlerde ise (montmorillonitik zeminler) Casagrande yöntemi daha yüksek değerleri bulunmuştur (Orhan ve ark. 2006). %60 konsantrasyona kadar montmorillonitik zemin olma özelliğini koruyan Aksaray kili bu konsantrasyondan sonra kaolinitik zeminler gibi davranma eğilimine girmekte ve düşen koni penetrasyon yönteminde bulunan sonuçlar daha yüksek çıkmaktadır.

Şekil 5.17., Şekil 5.20. arasında saf su ve 4 farklı kimyasal sıvının her bir konsantrasyonu için dielektrik sabitine bağlı değişimler gösterilmiştir.

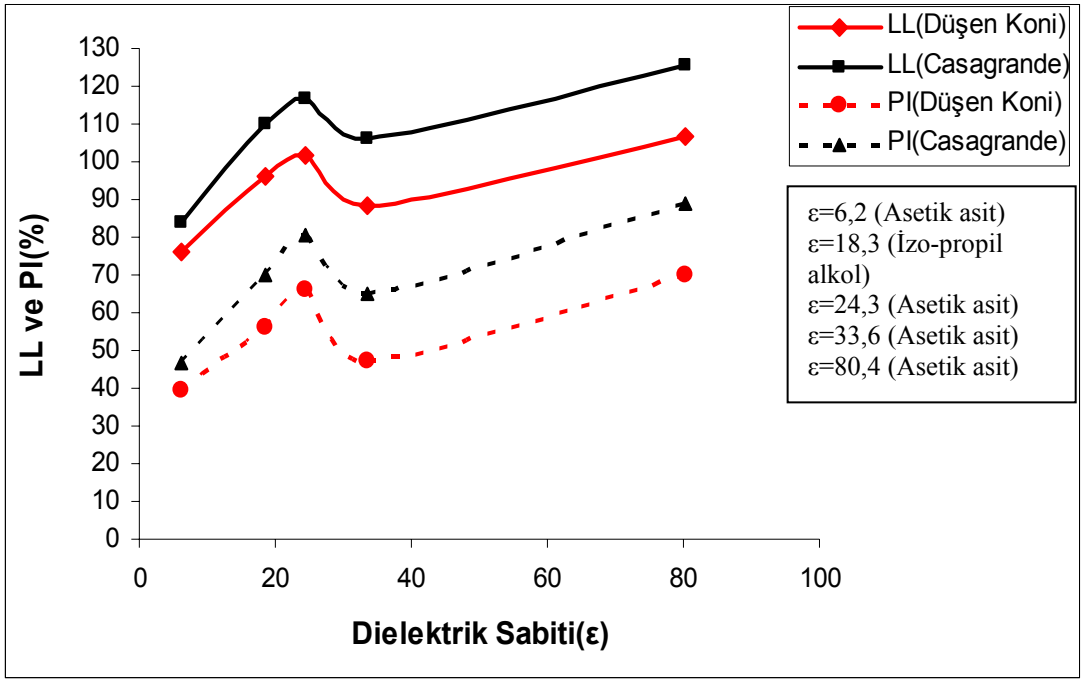
Kimyasalların %20 konsantrasyonuyla yapılan deneylerde her iki yöntemde de likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerleri dielektrik sabitinin azalmasıyla beraber düşmektedir. En büyük düşüş ise dielektrik sabiti en küçük olan (ε=6,2) asetik asit için olmuştur. Bu grafikte farklılık gösteren bir durum ise; dielektrik sabiti ε=33,6 olan methanolde elde edilen likit limit değerinin dielektrik sabiti ε=24,3 olan ethanol ve dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkol için bulunan değerlerden daha düşük olmasıdır.

Kimyasalların %40 konsantrasyonu için bulunan likit limit değerleri %20 konsantrasyonda elde edilen değerlerle benzer eğilimde olmakla beraber, özellikle asetik asitte (ε=6,2) bu değişim daha belirgin olmaktadır. Burada dikkate değer bir durum ise asetik asit (ε=6,2) ve izo-propil alkolde (ε=18,4) düşen koni penetrasyon ve Casagrande yöntemleriyle elde edilen likit limit değerlerinin birbirine çok yakın değerler almasıdır. %20 konsantrasyondakine benzer şekilde %40 konsantrasyon için de methanolle (ε=33,6) yapılan likit limit deneylerinde, ethanol (ε=24,3) ve izo-

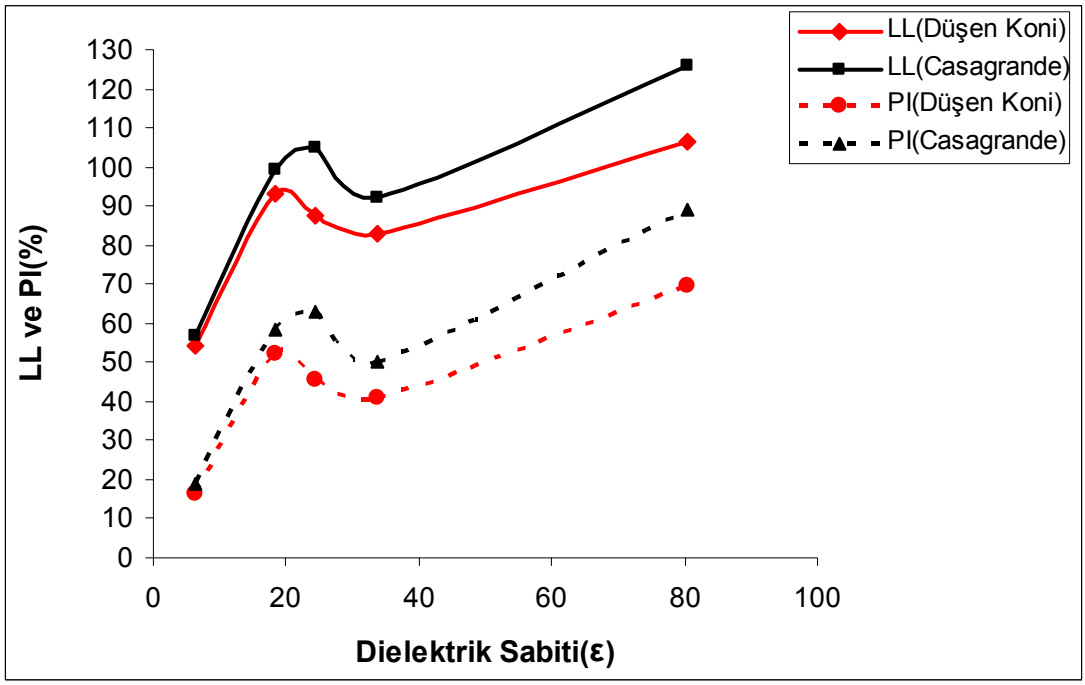
propil alkolle (ε=18,4) yapılan deneylerde elde edilen likit limit değerlerinden daha düşük likit limit değeri bulunmaktadır.

Kimyasalların %60 konsantrasyonu ile yapılan deneylerde de dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte likit limit değerleri azalmaktadır. İzo-propil alkol ve asetik asitin %60 konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon ve Casagrande yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakındır. Ayrıca bu konsantrasyonda asetik asit (ε=6,2) için elde edilen plastisite indisi değeri düşen koni penetrasyon yöntemi için PI=%4,29 gibi çok küçük bir değer olmaktadır.

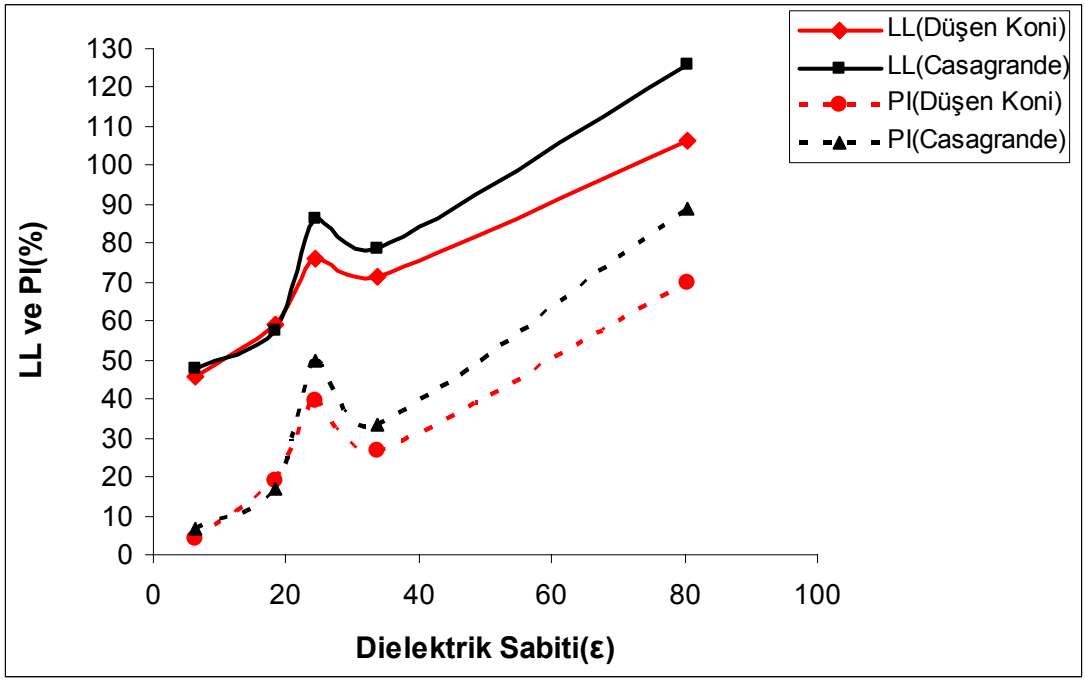
Kimyasalların %80 konsantrasyonu için diğer konsantrasyonlardaki davranışa benzer bir durum söz konusu iken dikkat çeken en önemli nokta bütün kimyasal sıvılar için düşen koni penetrasyon ve Casagrande yöntemlerinden elde edilen sonuçların hemen hemen aynı değerleri almasıdır. Ethanol (ε=24,3) haricindeki tüm kimyasallar için plastisite indisi (PI) değerleri çok küçük olmaktadır. Ayrıca %80 konsantrasyon için methanol (ε=33,6) ve izo-propil alkol (ε=18,4) kimyasal sıvıları için elde edilen likit limit değerleri hemen hemen birbirine eşit olmaktadır.



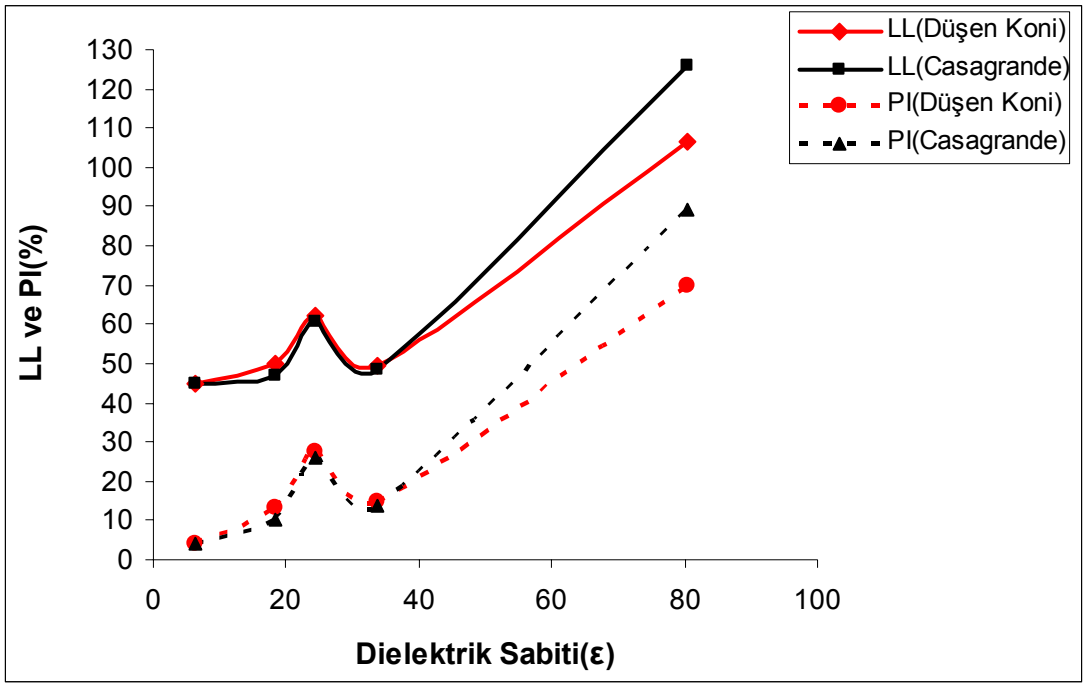
Şekil 5.17. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



Şekil 5.18. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



Şekil 5.19. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi



Şekil 5.20. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Atterberg limitlerinin dielektrik sabiti ile değişimi

Şekil 5.17., Şekil 5.20. bir bütün olarak değerlendirildiğinde Aksaray kili ile yapılan deney sonuçlarına göre boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile elde edilen likit limit değerlerinde saf su ile yapılan deneylerden elde edilen değere göre çok önemli ve ani bir azalma meydana gelmektedir. Zeminlerin kimyasal sıvılar varlığında likit limitlerindeki (LL) azalma parçacıklar arasındaki itme kuvvetlerinin önemli miktarda azalması dolayısıyla çekme kuvvetlerindeki net artış ve diffüz çift tabakanın göçmesine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bir başka ifadeyle boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile zemin parçacıkları arasındaki elektriksel itme kuvvetlerindeki azalma ve çekme kuvvetlerindeki artış nedeniyle zemin parçacıkları topaklanmakta ve silt ince kum gibi bir davranış göstermektedir. Ayrıca kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabiti ile montmorillonitik killerde büyük bir öneme sahip diffüz çift tabaka çökmekte bu da zeminlerin Atterberg limitleri üzerinde etkili olmaktadır.

Tüm grafiklerde dikkat çeken bir diğer durum likit limit değerleri dielektrik sabitindeki azalmayla beraber azalırken dielektrik sabiti ε=33,6 olan methanol için

elde edilen değerler di elektrik sabiti ε=24,3 olan ethanol için elde edilen değerlerden daha küçük ve dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkol için elde edilen değerlere hemen hemen yakındır. Bu durum daha önceki araştırmacılarca (Kaya ve Fang 2000) yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi methanol varlığında iki silika tabakası arasında oluşan net çekim kuvvetinin diğer kimyasal sıvılar ve su varlığında oluşan çekim kuvvetlerinden büyük olması ile ilişkilendirilebilir. Bir başka sebebi ise kil içerisinde bulunan sepiyolitin yapısından dolayı kısa zincirli olan methanolün kilin iç yapısına diğer kimyasallardan daha iyi nüfuz edebilmesi ve daha fazla flokülasyona sebep olmasıdır. Böylelikle methanol için likit limit değeri daha küçük olmaktadır.

Aksaray kilinde artan kimyasal sıvı miktarı ile orantılı olarak kil aniden bütün (=küme) olarak şekillenmekte ve adeta silt gibi davranmaya başlamaktadır. Özellikle %60 ve %80 konsantrasyondaki karışımlarla yapılan deneylerde bu durum daha belirgin olmaktadır. Benzer şekilde kilin bu davranış değişikliğinden dolayı özellikle %80 konsantrasyonlarda kilin plastik limit deneyleri zorlukla yapılabilmektedir. Bu durum parçacıklar arasındaki çekme kuvvetlerinde meydana gelen artış ve zeminlerin flokülasyonu ile ilişkilidir.

Yukarıda bahsedilen kil taneciklerinin flokülasyon (=topaklanma) olayı kimyasal sıvı asetik asit olduğu zaman %40 konsantrasyonda belirginleşmekte ve daha yüksek konsantrasyonlarda nerdeyse ince kuma benzeyen bir yapıya dönüşmektedir. Fakat yine de numuneler viskoz kayma direnci ve sürtünme dirençlerini kaybetmemekte, likit limit ve plastik limit deneyleri yapılabilmektedir.

Aksaray kilinde asetik asit ile yapılan Atterberg limiti deneyleri esnasında numune hazırlama esnasında numuneye piset ile sıvı verilip karıştırıldığı zaman numune kabarmakta, ısınmakta, gaz (CO_2) çıkışı olmakta ve ısınma dolayısıyla bir su (H_2O) çıkışı olmaktadır. Bu durum kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomit minerallerinden kaynaklanmaktadır. Karışım sıvısı içerisinde bulunan asetik asit kalsit ve dolomit ile kimyasal reaksiyonlara girerek kilin diğer kimyasal sıvılar varlığındaki durumdan farklı davranmasına sebebiyet vermektedir.

Aksaray kili üzerinde farklı kimyasal malzemelerin kullanılması durumunda zemin sınıfının Casagrande Plastisite kartı üzerinde nasıl bir değişikliğe uğradığı düşen koni penetrasyon deney sonuçları dikkate alınarak Şekil 5.21., Şekil 5.24.'te gösterilmiştir.

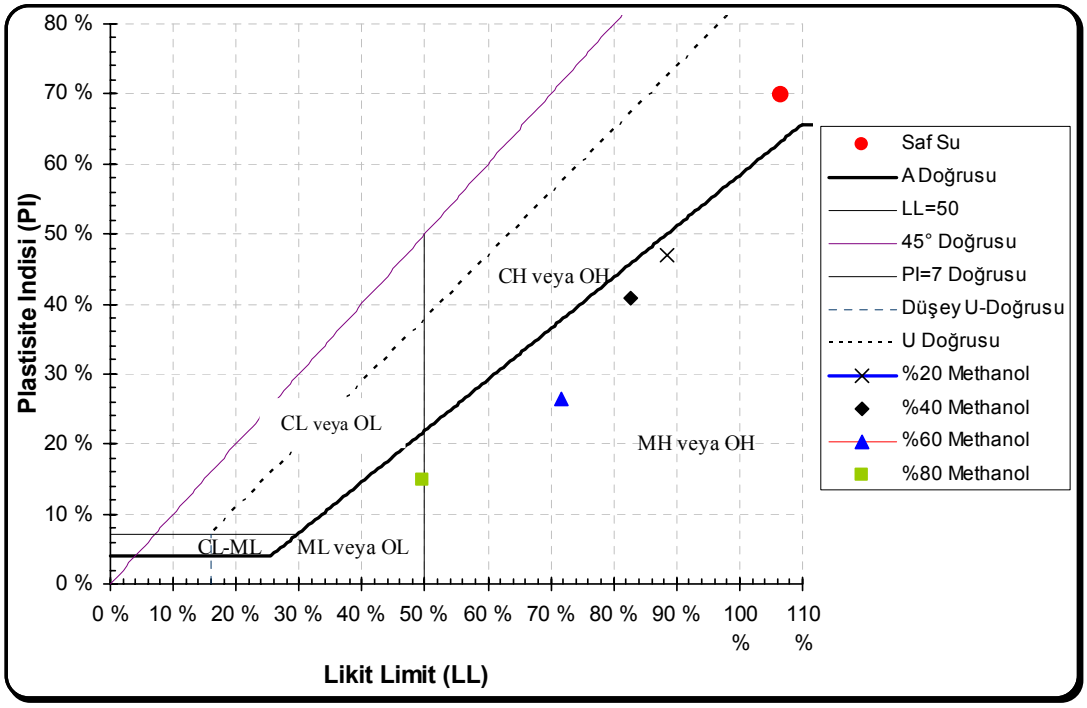
Saf su ile yapılan deneylerde Aksaray kili CH (yüksek plastisiteli kil) zemin sınıfı grubuna girerken, methanolün %20, %40 ve %60 konsantrasyonları için zemin sınıfı değişerek MH (yüksek plastisiteli silt) sınıfına girmekte, %80 konsantrasyonda ise MH ve ML (düşük plastisiteli silt) sınırı üzerinde yer almaktadır.

Ethanol kimyasal sıvısının varlığında zemin sınıfı %20 konsantrasyon için bir değişim göstermemektedir. Artan ethanol konsantrasyonu ile birlikte zeminin likit limit değerinin azalmasından dolayı zeminin sınıfı değişmekte ve zemin sınıfı %40, %60 ve %80 konsantrasyon için MH (yüksek plastisiteli silt) zemin sınıfı grubuna dahil olmaktadır.

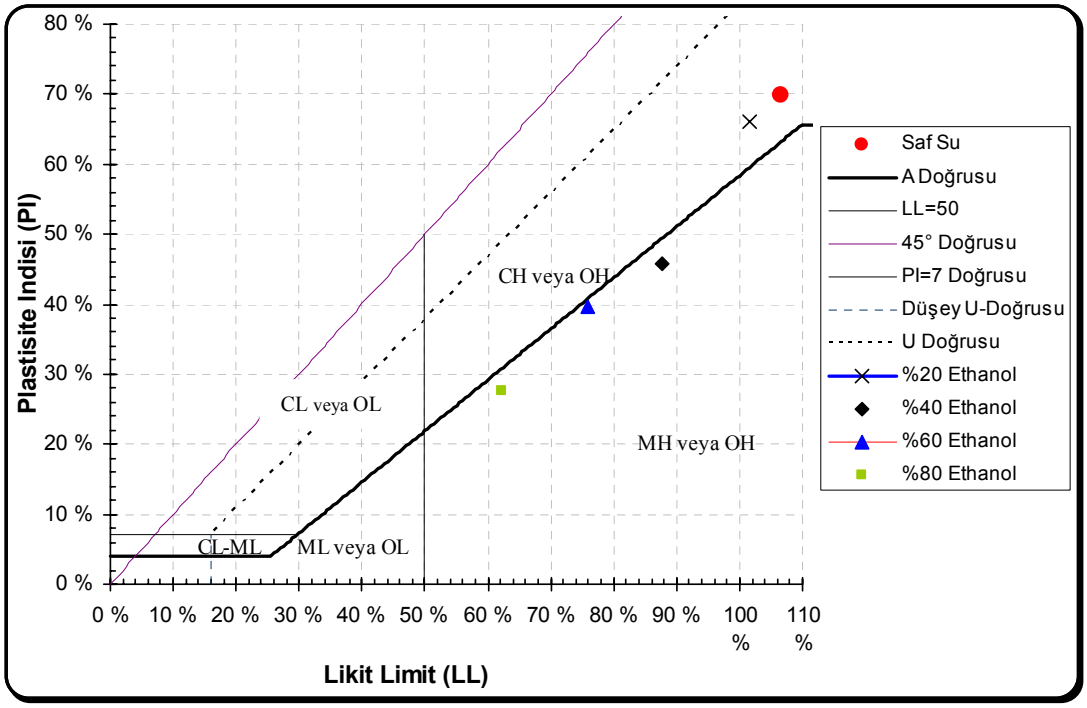
İzo-propil alkolün %20 konsantrasyonu için zemin sınıfını gösteren nokta tam A doğrusunun üzerinde yer almaktadır, yani zemin sınıfı CH veya MH olmaktadır. İzo-propil alkolün %40 konsantrasyonu için ise nokta A doğrusunun hemen altında yer almakta ve zemin sınıfı MH olmaktadır. İzo-propil alkolün %60 ve %80 konsantrasyonları için likit limitteki değişim daha belirgin olup zemin sınıfı %60 konsantrasyon için MH grubuna, %80 konsantrasyon için ise sınır üzerinde bulunup MH veya ML grubuna girmektedir.

%20 ve %40 asetik asit konsantrasyonlarında zemin sınıfı MH olmakta, %60 ve %80 konsantrasyonlarda ise zeminlerin plastisite indisleri birbirine çok yakın ve çok küçük değerlerde olup zemin sınıfı ML (düşük plastisiteli silt) grubuna dahil olmaktadır.

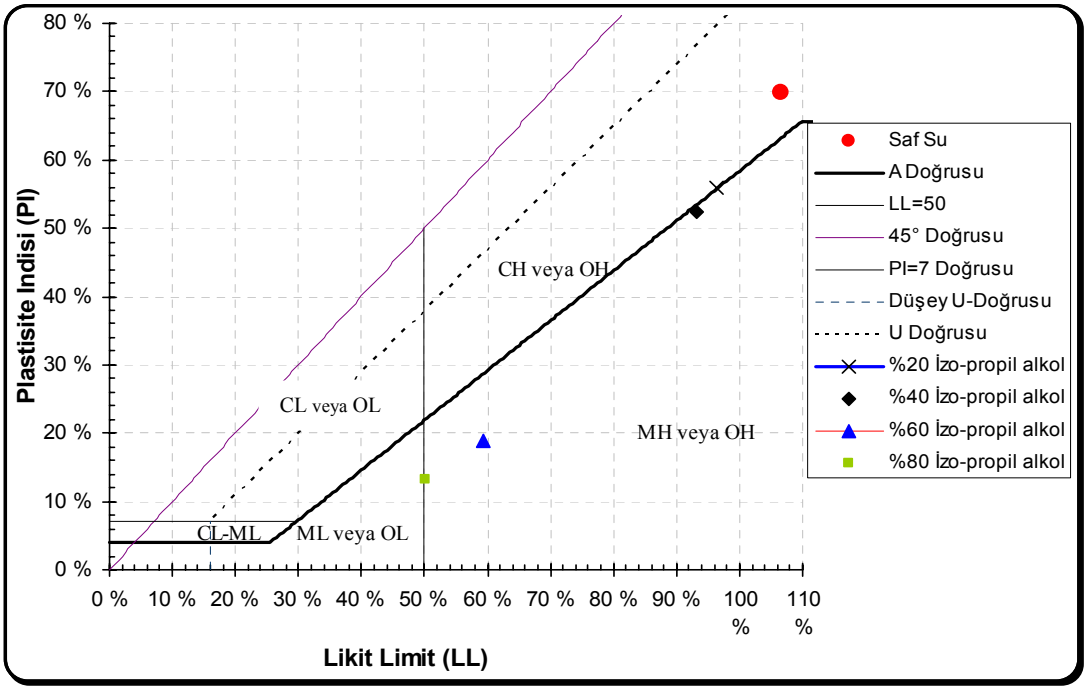
Aksaray kilinin Casagrande Plastisite kartına göre zemin sınıfı saf su kullanılması durumuna göre boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte hızlı bir değişim göstermektedir. Kimyasal sıvıların etkisiyle taneciklerin flokülasyonu ve bir küme şeklini alarak silt formuna dönüşmesi ile ilgili mekanizma yukarıda açıklanmıştır. Artan konsantrasyonla birlikte tüm kimyasal sıvılar için zemin sınıfı değişmekle beraber özellikle asetik asit varlığında bu durum daha belirgin olmaktadır. Bu durum asetik asitin dielektrik sabitinin daha düşük olması ve Aksaray kili içerisindeki kalsit ve dolomitle olan tepkimelerine bağlı olarak açıklanabilir. Methanolün ethanole göre daha belirgin bir değişikliğe sebep olması ise Aksaray kili içerisindeki sepiyolitin varlığı ve methanol varlığında iki silika tabakası arası çekim kuvvetinin artmasıyla açıklanabilir.



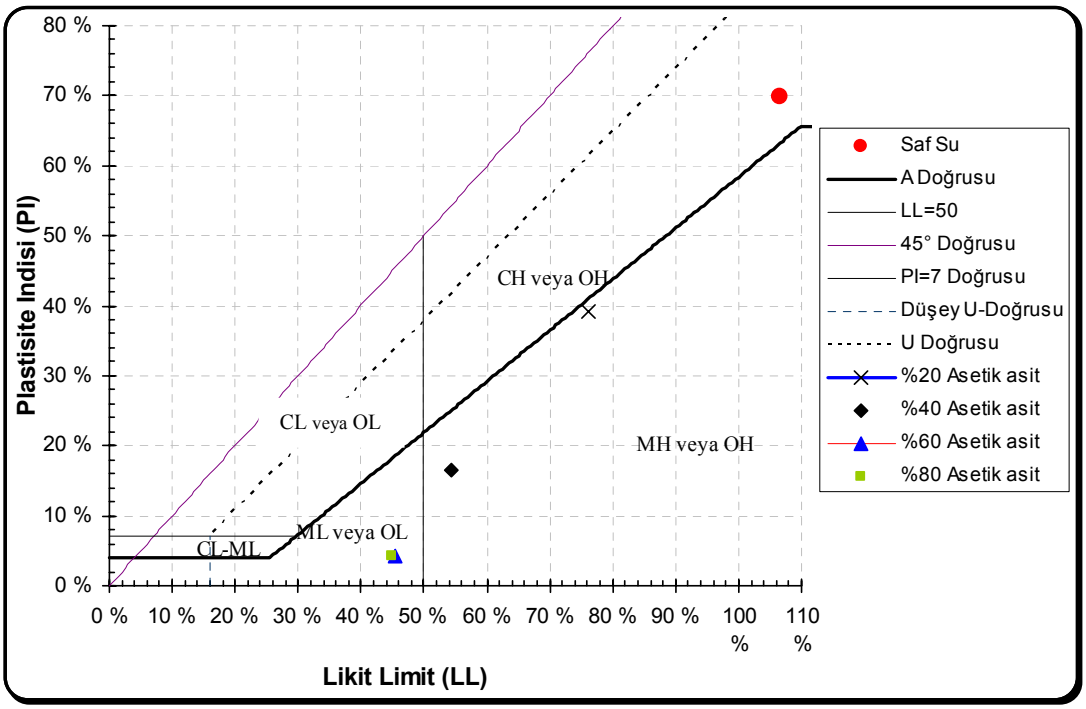
Şekil 5.21. Aksaray kilinde su ve methanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.22. Aksaray kilinde su ve ethanolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.23. Aksaray kilinde su ve izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri



Şekil 5.24. Aksaray kilinde su ve asetik asitin değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yeri

5.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deney Sonuçları

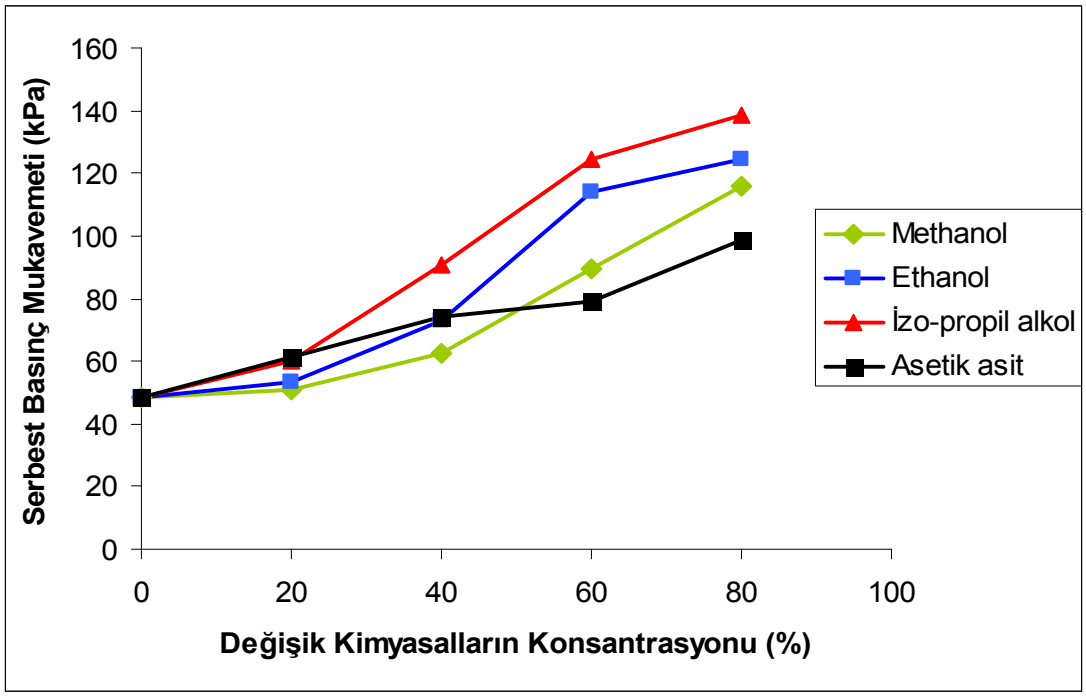
5.2.1. Kaolinit için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

Kaolinit için su ve 4 kimyasal sıvının farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde yapılan Serbest basınç deney sonuçları Çizelge 5.5.'de verilmiştir. Deneylerde yapılabilecek hataları minimize etmek için her kimyasal sıvının her bir konsantrasyonundan 3'er adet numune alınmış ve kırılmıştır.

Çizelge 5.5. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	q_{u1}	44	–	–	–	–
	q_{u2}	50,6				
	q_{u3}	50,3				
	q_{uort}	**48,3**				
Methanol	q_{u1}	–	51,2	55,8	93,8	117,8
	q_{u2}		50,2	63,9	85,1	109,6
	q_{u3}		51,9	67,1	90,3	120,8
	q_{uort}		**51,1**	**62,3**	**89,7**	**116,1**
Ethanol	q_{u1}	–	52,4	70,2	107,1	112,6
	q_{u2}		53,7	76,1	112,2	126
	q_{u3}		54,8	72,7	123,0	134,3
	q_{uort}		**53,6**	**73,0**	**114,1**	**124,3**
İzo-propil alkol	q_{u1}	–	61,5	95,9	134,5	133,8
	q_{u2}		58,4	90,2	117,6	141,5
	q_{u3}		60,2	86,8	121,3	139,6
	q_{uort}		**60,0**	**91,0**	**124,5**	**138,3**
Asetik asit	q_{u1}	–	62,8	75,2	83,8	102,2
	q_{u2}		57,2	70,3	70,2	94,8
	q_{u3}		63,7	77,8	83,6	98,7
	q_{uort}		**61,2**	**74,4**	**79,2**	**98,6**

Şekil 5.25.'te kimyasalların her bir konsantrasyonu için yapılan 3'er adet deneyin ortalaması alınarak elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerlerini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiği zaman methanol, ethanol ve izo-propil alkol sıvıları için elde edilen değerler birbiriyle paralellik göstermekte ve boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabitiyle birlikte mukavemet değerleri artmaktadır. Bu artış azalan dielektrik sabitine bağlı olarak tanecikler arasındaki net çekme kuvvetlerinin artması ve böylelikle taneciklerin flokülasyona uğrayarak daha fazla mukavemet göstermesinden kaynaklanmaktadır. Kimyasalların %20 konsantrasyonu için kaolinitin mukavemet değerleri saf su ile hazırlanan numunelerde elde edilen mukavemet değerlerine göre çok fazla bir değişiklik göstermezken, bundan sonra artan konsantrasyonla orantılı olarak kaolinitin serbest basınç mukavemeti değerleri artmaktadır. Methanol, ethanol ve izo-propil alkolün %80 konsantrasyonlarındaki sıvılarla hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri saf su ile hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri ile karşılaştırıldığında mukavemet artışı sırası ile her bir sıvı için 2,4 kat, 2,7 kat ve 2,86 kat olmuştur.



Şekil 5.25. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için ortalama serbest basınç mukavemetleri değerleri değişimi

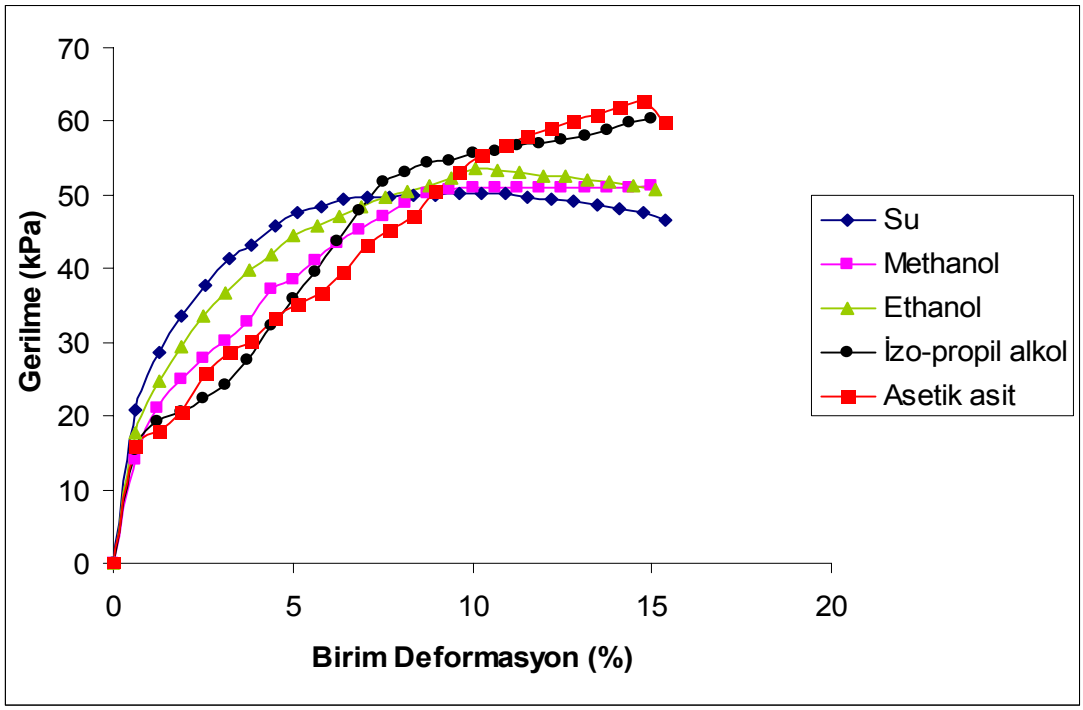
Kullanılan sıvının asetik asit olması durumunda ise %20 konsantrasyon için elde edilen serbest basınç mukavemeti değeri teorik ifadelerle paralellik gösterdiği halde diğer konsantrasyonlarda bir uyumsuzluk vardır. Özellikle %40 asetik asit konsantrasyonundan sonra mukavemet artışı yavaşlamakta, %60 ve %80 asetik asit konsantrasyonunda elde edilen maksimum değerler diğer kimyasallar için elde edilen değerlerden düşük çıkmakta ve bu durumda dielektrik sabitinin azalması ile çekme kuvvetlerinin arttığı ifadesine tam olarak uymamaktadır. Asetik asit kaolinitin yapısını bozmakta ve bir jelleşmeye sebep olmaktadır. Bunun sonucunda ön konsolide edilen numune içerisinde filtrasyon hızı azalmakta sıvı çıkışı zorlaşmaktadır. Böylece deneyler için alınan numuneler daha fazla su muhtevasında ve daha yumuşak kıvamda olmakta ve kaolinitin serbest basınç mukavemeti düşmektedir. %80 asetik asit konsantrasyonu için elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değeri saf su için elde edilen değerin 2,04 katı olmaktadır. Kaolinitte asetik asitin %60 konsantrasyonu ile hazırlanmış bir numune üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 5.26.'da görüldüğü gibidir.



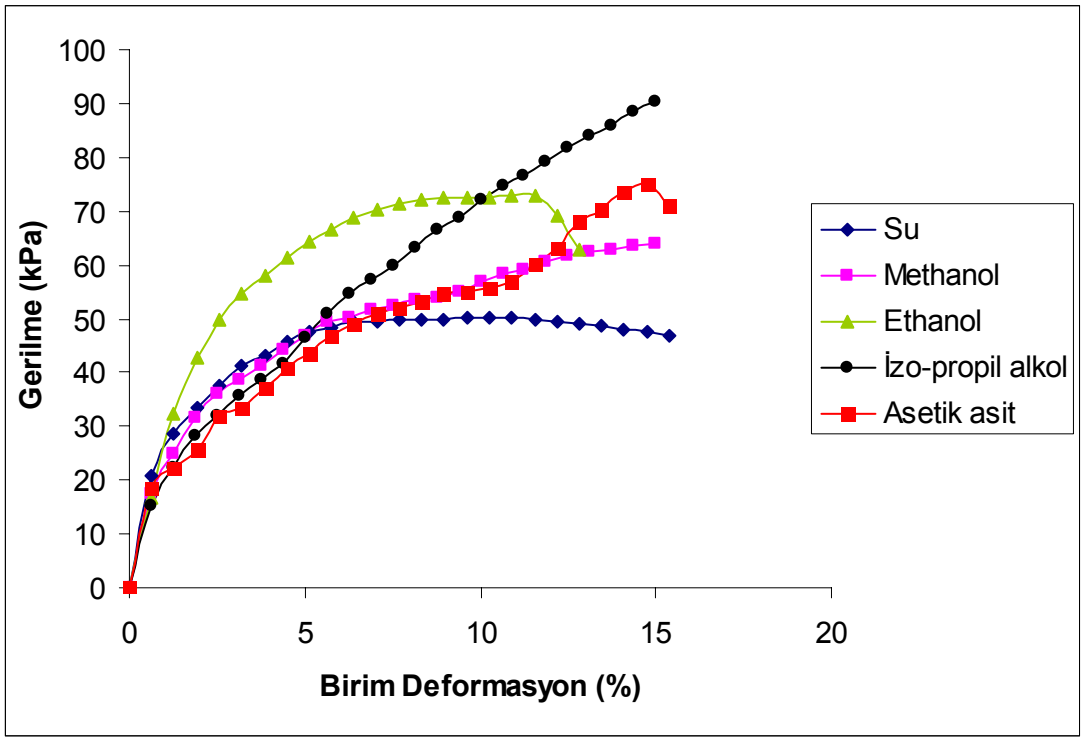
Şekil 5.26. Kaolinitte asetik asitin %60 konsantrasyonu ile hazırlanmış bir numune üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonrası numunenin görünümü

Serbest basınç mukavemeti deneylerinin daha iyi yorumlanabilmesi için genel olarak gerilme - deformasyon (σ – ε) eğrileri çizilir. Bu sebeple kaolinit ile kimyasal sıvılar varlığında hazırlanan numuneler üzerinde her bir konsantrasyon için yapılan 3 adet deneyden elde edilen serbest basınç mukavemeti içerisinden deneyler sonucu elde edilen ortalama serbest basınç mukavemetine en yakın olan deney sonucu dikkate alınarak bu eğriler çizilmiştir (Şekil 5.27., Şekil 5.30.).

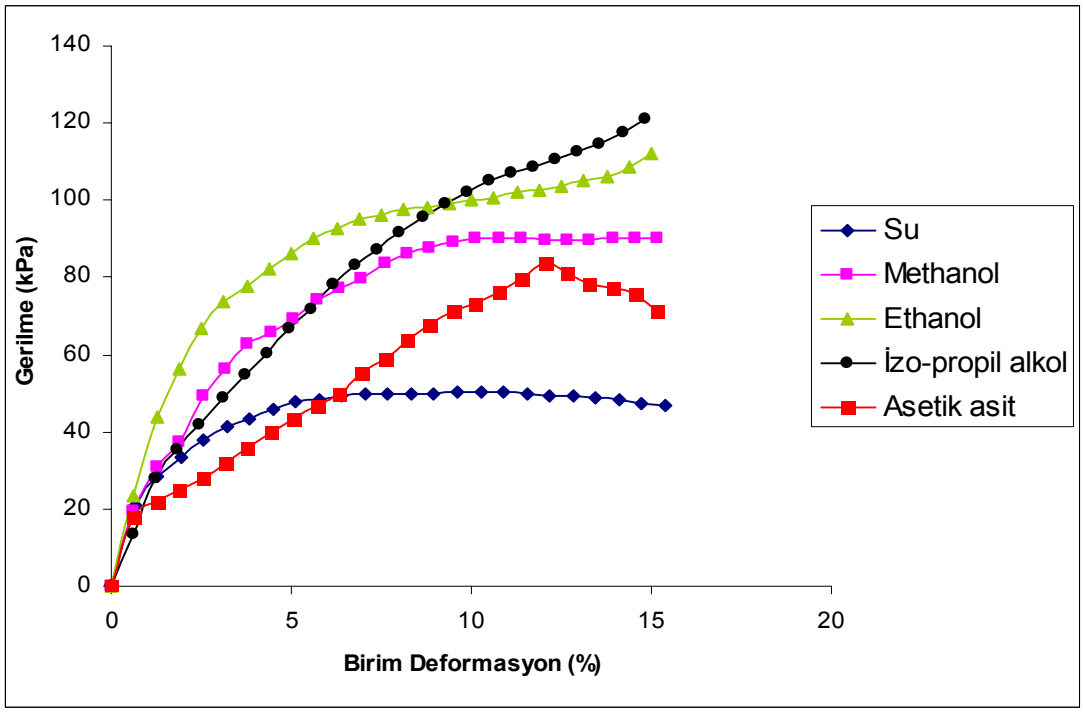
Kimyasalların %20 konsantrasyonu için deneyler %15 birim deformasyon değerine kadar devam ettirilmiş ve maksimum gerilme değeri asetik asitte elde edilmiştir. İzo-propil alkolde ise gerilme artışı hala devam etmektedir. Kimyasalların %60 konsantrasyonunda deneyler %15 birim deformasyona kadar devam ettirilmiş olup asetik asit için verilen grafik diğer kimyasallar için verilenlerden farklı bir davranış göstermiştir. %60 konsantrasyonda maksimum gerilme değeri izo-propil alkolde olup, izo-propil alkol ve ethanolde gerilme artışı hala devam etmektedir. %80 konsantrasyonda ise maksimum gerilme değeri izo-propil alkolde olup, asetik asit dışındaki kimyasallarda gerilme artışı hala devam etmektedir.



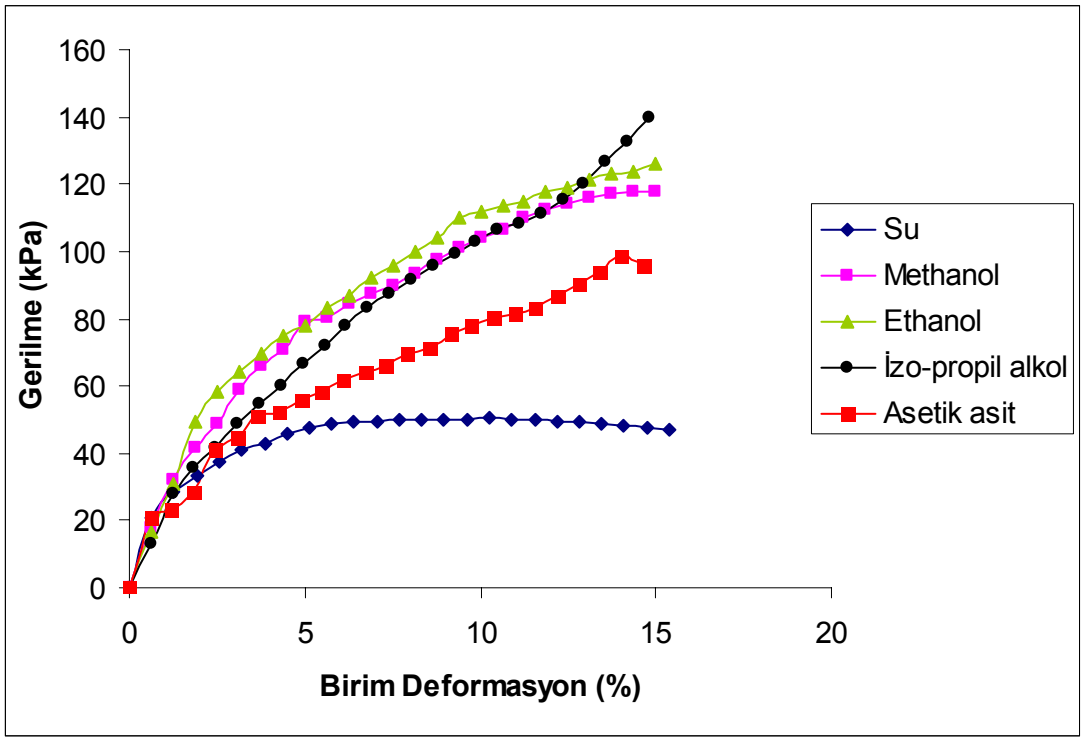
Şekil 5.27. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.28. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.29. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.30. Kaolinitte su ve 4 farklı kimyasal sıvının %80 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri

5.2.2. Aksaray kili için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

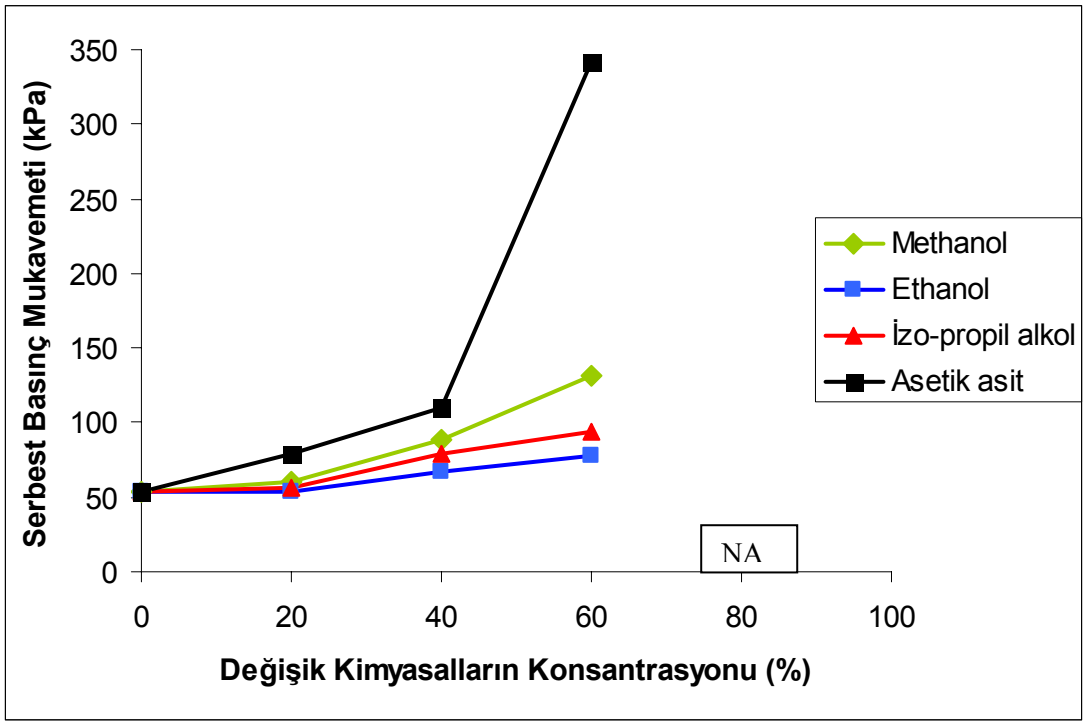
Aksaray kili için saf su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deney sonuçları Çizelge 5.6.'da verilmiştir. Şekil 5.31.'de ise kimyasalların her bir konsantrasyonu için yapılan 3'er adet deneyden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerlerini gösteren grafik verilmiştir.

Şekil 5.31. incelendiği zaman tüm kimyasallar için elde edilen mukavemet değerleri birbiriyle paralellik göstermekte ve artan konsantrasyonla birlikte artmaktadır. En düşük mukavemet değerleri ethanol için elde edilirken kimyasal sıvılar içerisinde en küçük dielektrik sabitine (ε = 33,6) sahip olan methanol için elde edilen değerler hem ethanol hem de izo-propil alkolden büyük olmaktadır. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan sepiyolit varlığından kaynaklanmaktadır. Methanol

Çizelge 5.6. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Serbest Basınç Mukavemetleri (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	q_{u1}	52,6	–	–	–	–
	q_{u2}	61,3				
	q_{u3}	46,5				
	q_{uort}	**53,5**				
Methanol	q_{u1}	–	63,4	86,2	120,0	**NA**
	q_{u2}		57,8	91,5	129,0	
	q_{u3}		60,0	88,5	147,0	
	q_{uort}		**60,4**	**88,7**	**132,0**	
Ethanol	q_{u1}	–	53,9	69,6	65,0	**NA**
	q_{u2}		55,5	62,0	89,0	
	q_{u3}		52,6	67,6	78,0	
	q_{uort}		**54,0**	**66,4**	**77,0**	
İzo-propil Alkol	q_{u1}	–	56,3	81,1	98,0	**NA**
	q_{u2}		51,8	77,5	85,0	
	q_{u3}		59,3	79,0	96,8	
	q_{uort}		**55,8**	**79,2**	**93,0**	
Asetik asit	q_{u1}	–	85,1	103,0	371,1	**NA**
	q_{u2}		75,2	111,2	316,5	
	q_{u3}		77,6	114,2	340,0	
	q_{uort}		**79,3**	**109,5**	**342,5**	

kısa zincir uzunluğu sayesinde iç yapı üzerinde daha fazla etkili olmakta ve daha fazla flokülasyona neden olmaktadır. Daha fazla flokülasyona uğrayan kil ise daha büyük mukavemet değerleri gösterebilmektedir. %40 konsantrasyona kadar methanol ile diğer iki alkol (ethanol ve izo-propil alkol) için bulunan mukavemet değerleri arasında çok aşırı bir fark yokken %60 konsantrasyonda methanol için elde edilen serbest basınç mukavemeti değeri diğer iki alkoldekinden belirgin şekilde fazla çıkmaktadır. Asetik asit için elde edilen mukavemet değerleri ise her konsantrasyon için diğerlerinden belirgin şekilde büyük olurken özellikle %60 konsantrasyonda



Şekil 5.31. Aksaray kilinde 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için ortalama serbest basınç mukavemetleri değerleri

asetik asit tam bir çimento özelliği göstermekte ve mukavemet çok aşırı şekilde artmaktadır. Kil parçacıklarının flokülasyonu sonucu yeni oluşan yapı adeta aşırı konsolide olmuş kil davranışı göstermektedir.

Şekil 5.31.'de görüldüğü gibi asetik asit dışındaki kimyasalların %20 konsantrasyonları için mukavemette saf su için bulunan değerlere göre çok fazla bir değişim olmamıştır. Kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerden serbest basınç deneyi yapmak için gereken numuneler alınamamıştır. Çünkü boşluk sıvılarının dielektrik sabitindeki azalmayla diffüz çift tabaka çökmüş, itme kuvvetleri azalmış ve net çekim kuvveti artmıştır. Bunun sonucunda tanecikler aşırı flokülasyona uğrayarak silt-ince kum davranışı göstermeye başlamışlar ve bir bütün olarak duramamışlardır. Şekil 5.32.'de %80 methanol konsantrasyonu ile hazırlanan karışımdan numune alma işlemi esnasında numunenin bozulmuş durumu açık olarak görülmektedir.

Kimyasalların %60 konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri saf su için elde edilen değerin



Şekil 5.32. Aksaray kilinde methanolün %80 konsantrasyonuyla hazırlanan karışımda serbest basınç deneyi için numune alma işlemi

methanolde 2,47 katı, ethanolde 1,44 katı ve izo-propil alkolde 1,74 katı olmuştur. Kimyasal sıvının asetik asit olması durumunda, %40 asetik asit konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti saf su için bulunan değerin 2,05 katı olurken, bu değer %60 konsantrasyon için 6,40 kata çıkmaktadır.

Aksaray kilinde kimyasal sıvıların kullanımı ile boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabitine bağlı olarak montmorillonit tipi kil minerallerinde davranış üzerinde büyük rol oynayan diffüz çift tabaka göçmekte ve tanecikler arasındaki itme kuvvetlerinin azalması ile net çekim kuvveti artmaktadır. Böylelikle tanecikler flokülasyona uğramakta, adeta kohezyonsuz zemin gibi davranmakta ve dış tepkilere karşı daha fazla direnç gösteren bir yapı oluşmaktadır (Kaya ve Fang 2005).

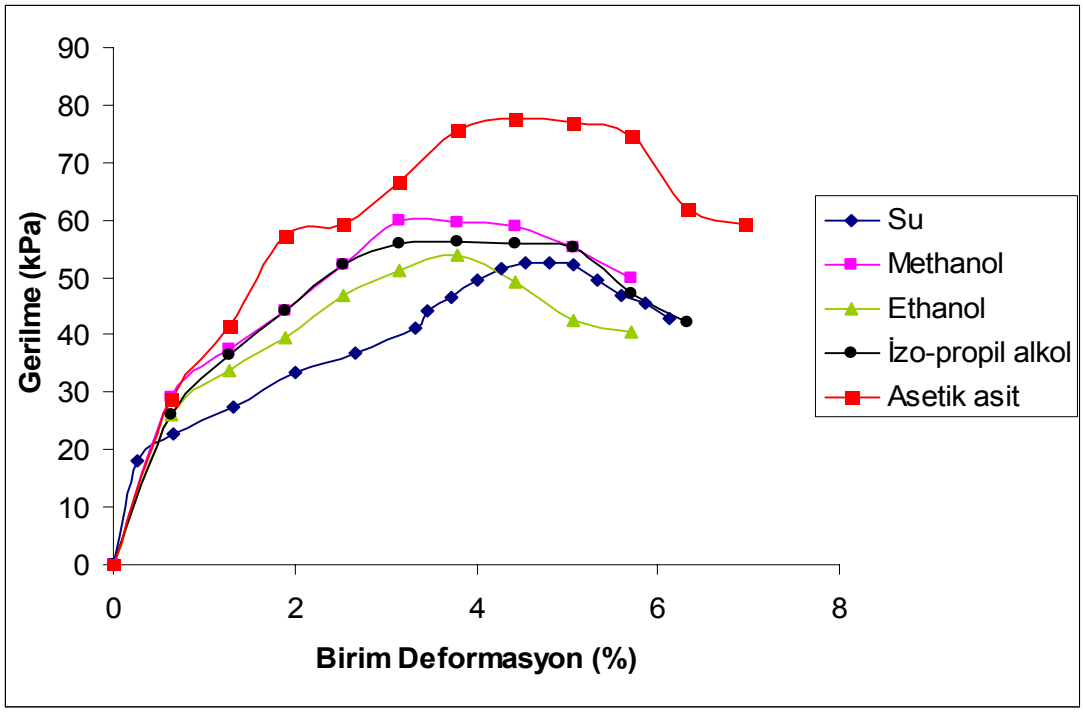
Kimyasal sıvının asetik asit olması durumunda elde edilen mukavemet

değerleri alkollerin varlığında elde edilen değerlerden çok büyük olmaktadır. Bu durum özellikle %60 asetik asit konsantrasyonunda daha belirgin olup, asetik asit adeta bir çimento görevi görmeye başlamaktadır. Bu durum boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmaya bağlı olduğu gibi kilin yapısında bulunan birtakım minerallerin asetik asit ile olan reaksiyonlarına da büyük oranda bağlıdır. Zemin içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonu sonucu kalsiyum asetat ve magnezyum asetat şeklinde bileşikler oluşmaktadır. Oluşan bu bileşiklerin uçlarındaki yük dengesizlikleri nedeniyle boşta olan uçlarına çeşitli katyonlar bağlanmakta ve bu ilişki bir zincir şeklinde devam etmektedir. Sonuçta zincir şeklinde oluşan bu yapı birbirine daha iyi kenetlenmekte ve dış etkilere karşı daha fazla direnç gösterebilen bir yapı oluşmaktadır.

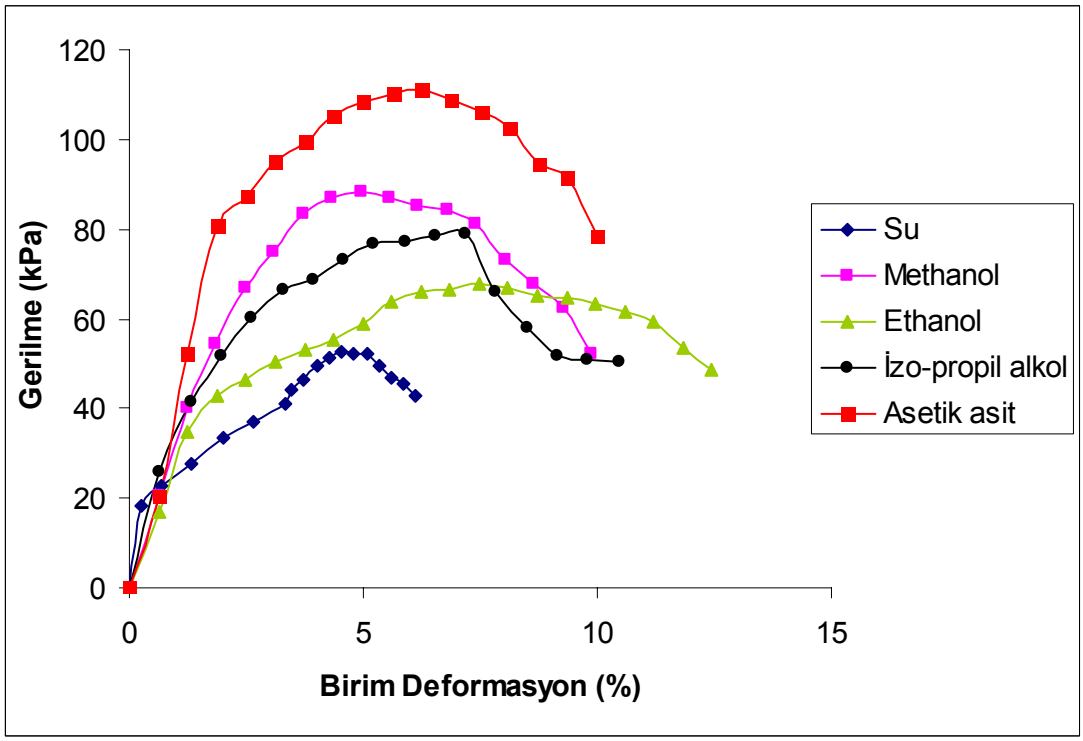
Yukarıda bahsedilen bu reaksiyonlar esnasında bir CO_2 gazı çıkışı olmaktadır. Deney numunelerinin hazırlanması esnasında bu gaz çıkışı net bir şekilde görülebilmektedir. Aksaray kili içerisindeki kalsit ve dolomit mineralleri ile asetik asitin reaksiyonları sonucu karışım içerisindeki sıvıların bir kısmı bu reaksiyonlarda kullanılmakta bir kısmı da reaksiyonlar esnasındaki sıcaklık artışı ile buharlaşarak karışım numunesinden uzaklaşmaktadır. Böylelikle numunenin su muhtevası çok düşmekte ve numuneler sertleşerek hemen mukavemet kazanmaktadır.

Aksaray kilinde kimyasal sıvılar varlığında elde edilen gerilme – deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri Şekil 5.33., Şekil 5.35. arasında verilmiştir. Genel olarak kırılmaların gevrek kırılmalar olması ve çok çabuk gerçekleşmesi dolayısıyla %15 birim deformasyon değerine ulaşılmadan deneyler sonlandırılmıştır. Şekil 5.36.'da %60 izo-propil alkol ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan bir serbest basınç deneyi sonrası numunenin gevrek kırılması gösterilmiştir.

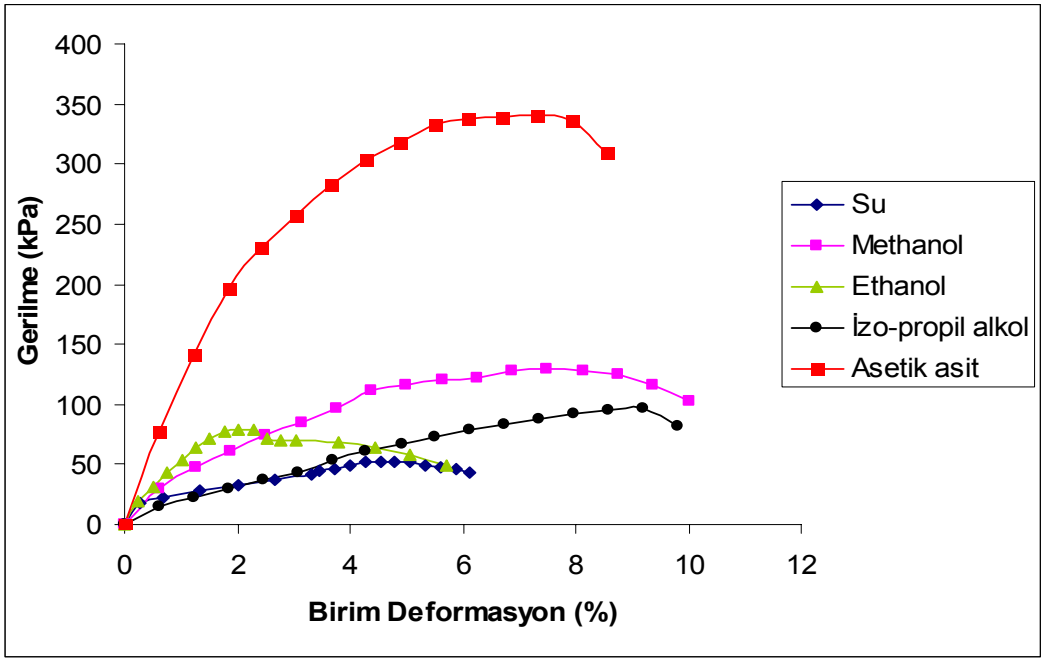
Kimyasalların %20 konsantrasyonu için genel olarak deneyler %6 birim deformasyon değerine kadar devam ettirilmiştir. Alkollerde %4 ve su ile asetik asitte %5 birim deformasyon oranında maksimum kayma direncine ulaşılmıştır. Kimyasalların %40 konsantrasyonu için maksimum kayma dirençlerine %5 - %8 birim deformasyonları arasında ulaşılmış olup ethanol için birim deformasyon %13 oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. Kimyasalların %60 konsantrasyonu için verilen grafiklerde saf su ve ethanolde birim deformasyonlar %6 değerine, diğer kimyasallarda ise %9 - %10 oranına ulaşıncaya kadar deneyler devam ettirilmiştir.



Şekil 5.33. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %20 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.34. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %40 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.35. Aksaray kilinde su ve 4 farklı kimyasal sıvının %60 konsantrasyonu için gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.36. Aksaray kilinde %60 izo-propil alkol konsantrasyonu için yapılan bir serbest basınç deneyinde numunede meydana gelen gevrek kırılma

5.3. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için laboratuarda tüm koşulların en uygun sağlanabildiği deney üç eksenli basınç deneyidir. Bu deney değişik konsolidasyon ve drenaj koşullarında yumuşak killere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Yumuşak killerde en önemli sorunlardan biri çok hızlı yapılan yüklemenin getirdiği kritik durumlardır. Bir dolgunun normal konsolide (NL) killer üzerine çok hızlı inşa edilmesi, bir barajın yüksek plastisiteli çekirdeğinin hızla yükseltilmesi, ya da yumuşak kil üzerine oturtulan bir temelin aşırı hızlı yüklenmesi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşulları yaratmaktadır. Bu durumda, hızla artan gerilmeler sonucu kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistem dışına çıkamadan zemin kayma gerilmeleri aldığından ani yenilmeler gündeme gelebilmektedir. Bu gibi problemlerde analizlerin sadece toplam gerilmelerle yapılması gerçekçi olmaktadır. NL killerde UU koşullarda boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşit olduğundan zeminin kayma direnci esasta çevre basıncından bağımsız olacaktır. Daha da basit bir ifadeyle NL kilde kırılma dairelerinin çaplarının aynı olması gerekmektedir. Buna göre yumuşak kilin drenajsız kayma direnci toplam gerilmelere göre yatay bir kırılma zarfı olacaktır.

Teorik olarak normal konsolide killerde UU deneylerde yatay bir kırılma zarfı elde edilmesi gerekirken 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 değişmekte ve zemin ek bir içsel sürtünme açısı kazanmaktadır.

5.3.1. Kaolinit için üç eksenli basınç deney sonuçları

Kaolinit için yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri (deviatorik gerilme) Çizelge 5.7.'de, deneyler sonucu bulunan kayma mukavemeti parametreleri (c,Ø) ise Çizelge 5.8.'de verilmiştir.

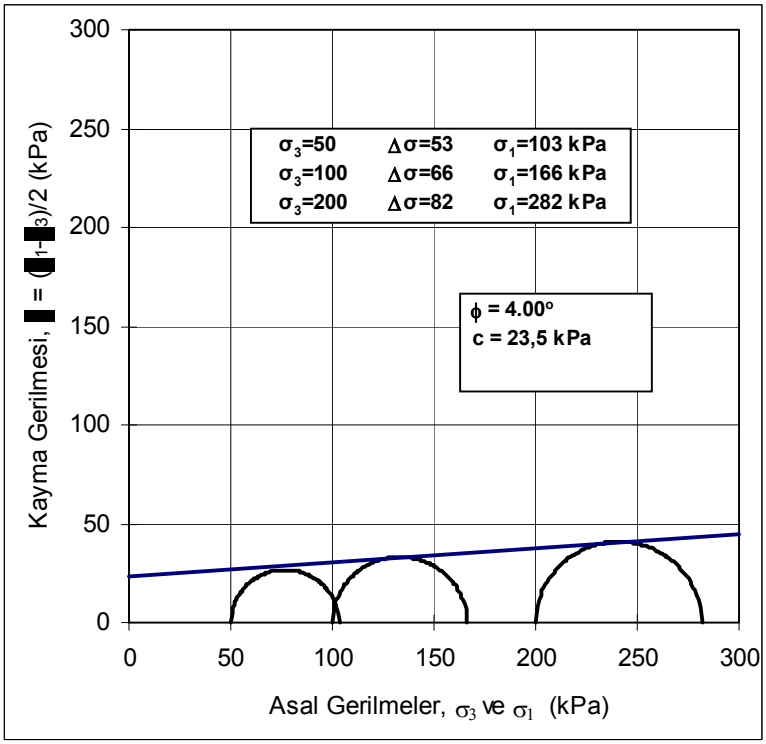
Çizelge 5.7.'de verilen sonuçlara örnek olması açısından Şekil 5.37. – Şekil 5.41. arasında saf su ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonları için yapılan deneylerde elde edilen Mohr daireleri ve bu Mohr daireleri üzerinden geçirilen kırılma zarfını gösteren grafikler çizilmiştir. Grafikler üzerinde çevre basıncı (σ_3), deviatorik gerilme ($\Delta\sigma$), toplam düşey gerilme (σ_1), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Ø) değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneyi (UU) sonuçları

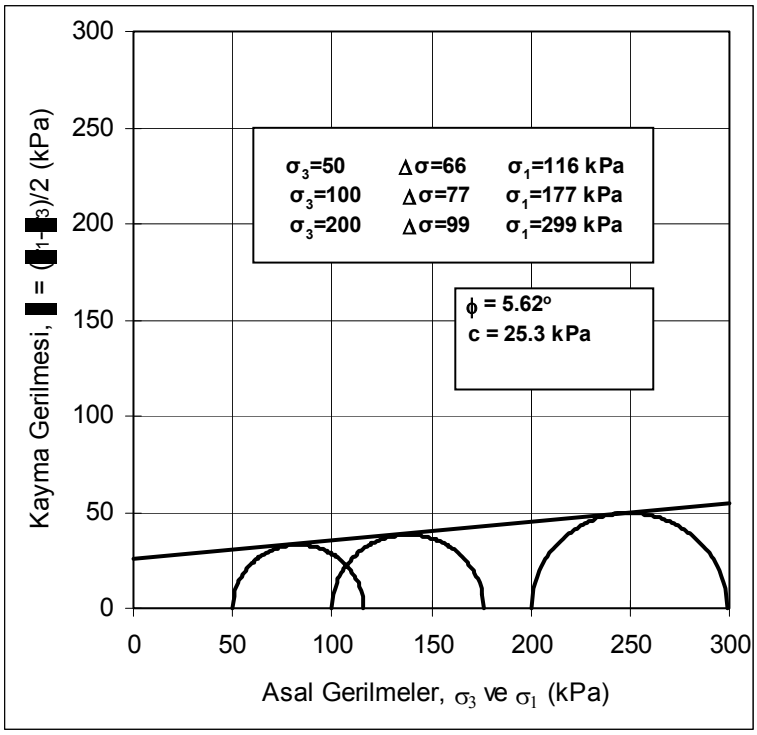
Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Çevre Basınçları, σ_3 (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları İçin Drenajsız Pik Kayma Mukavemeti Değerleri, q_{pik} veya (Deviatorik gerilme, $\sigma_1 - \sigma_3$), (kPa)				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	50	53,0	–	–	–	–
	100	66,0				
	200	82,0				
Methanol	50	–	59,0	59,0	64,0	66,0
	100		65,0	72,0	73,0	77,0
	200		85,0	90,0	95,0	99,0
Ethanol	50	–	58,0	60,0	67,0	67,0
	100		70,0	77,0	79,0	79,0
	200		86,0	97,0	100,0	102,0
İzo-propil Alkol	50	–	60,0	66,0	69,0	71,0
	100		70,0	79,0	83,0	86,0
	200		87,0	97,0	106,0	109,0
Asetik asit	50	–	60,0	63,0	67,0	73,0
	100		71,0	72,0	77,0	84,0
	200		86,0	91,0	95,0	108,0

Çizelge 5.8. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneylerinde (UU) elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø).

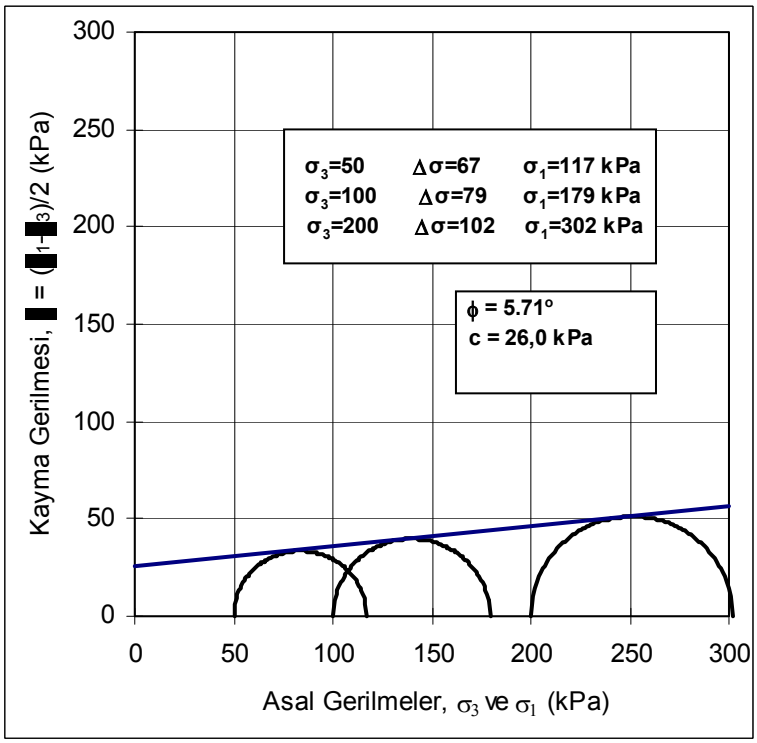
Su ve Kimyasal Sıvılar	Kayma Mukavemeti Parametreleri, c (kPa), Ø (^{0})	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	c	23,5	–	–	–	–
	Ø	4				
Methanol	c	–	23,6	24,1	24,6	25,3
	Ø		4,46	4,93	5,45	5,62
Ethanol	c	–	24,3	25,5	26	26
	Ø		4,52	5,05	5,52	5,71
İzo-propil Alkol	c	–	24,2	26	26,7	26,8
	Ø		4,54	5,33	5,92	6,31
Asetik asit	c	–	25,0	26,7	27,0	27,3
	Ø		4,38	4,44	4,98	6,47



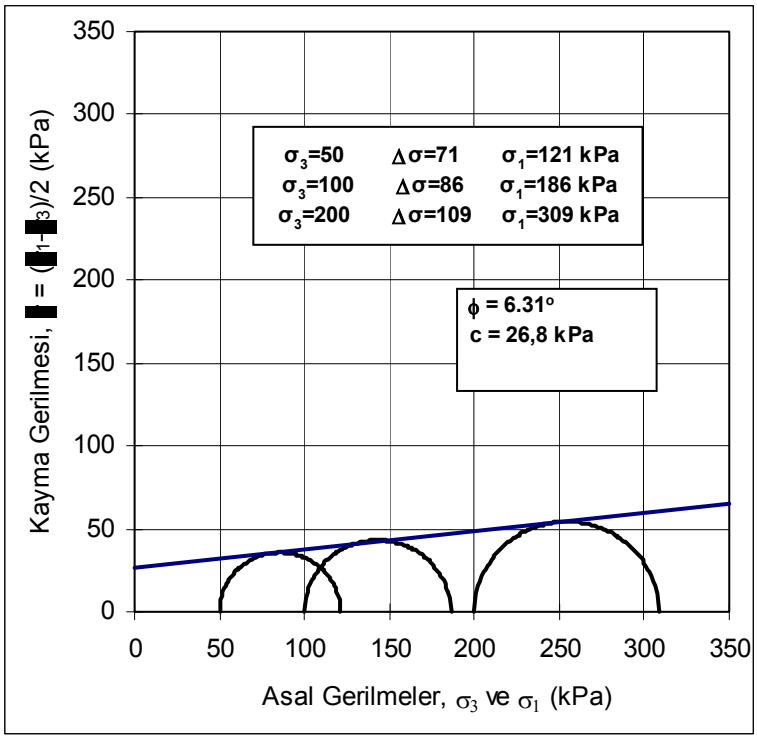
Şekil 5.37. Kaolinitte saf su için üç eksenli basınç deney sonuçları



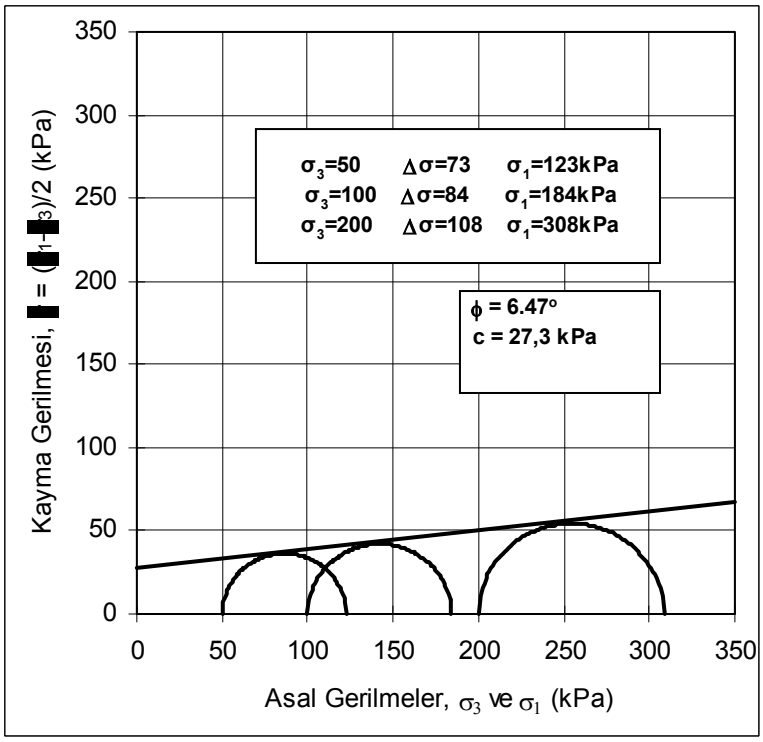
Şekil 5.38. Kaolinitte methanolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.39. Kaolinitte ethanolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.40. Kaolinitte izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.41. Kaolinitte asetik asitin %80 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları

Çizelge 5.7. ve Çizelge 5.8.'de verilen sonuçların daha açık yorumlanabilmesi için kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde her bir farklı çevre basıncı için bulunan deviatorik gerilme grafikleri Şekil 5.42. ve Şekil 5.44. arasında, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değişimleri de Şekil 5.45. ve Şekil 5.46.'da verilmiştir.

Farklı kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 50 kPa çevre basıncı altında methanol, ethanol ve izo-propil alkol sıvıları için elde edilen drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri birbiriyle paralellik göstermekte ve azalan dielektrik sabiti ile birlikte drenajsız pik kayma mukavemeti artmaktadır. Kullanılan sıvının asetik asit olması durumunda ise %20 konsantrasyon için elde edilen serbest basınç mukavemeti değeri teorik ifadelerle paralellik gösterdiği halde diğer konsantrasyonlarda bir uyumsuzluk vardır. %40 ve %60 asetik asit konsantrasyonlarında bulunan pik kayma mukavemeti değerleri methanol ve ethanol için elde edilen değerlerden büyük, izo-propil alkol için elde edilen değerden küçüktür. Fakat %80 asetik asit konsantrasyonu için elde edilen pik değer ise diğer üç kimyasal sıvının aynı konsantrasyonları için elde edilen değerlerden büyüktür. Bu durumda dielektrik sabitinin azalması ile çekme kuvvetlerinin arttığı ifadesine tam olarak uymamaktadır.

100 kPa çevre basıncı altında bulunan drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri, 50 kPa'dakilere benzer şekilde bulunmuştur. Kimyasal sıvının asetik asit olması durumunda %40 konsantrasyon için elde edilen değer ethanol ve izo-propil alkoldekinden küçük, methanoldekiyle aynı olmaktadır. %60 asetik asit konsantrasyonu için ise methanolden büyük olmaktadır. Asetik asitin %80 konsantrasyonu için elde edilen değer methanol ve ethanoldekinden büyük fakat izo-propil alkoldekinden küçük olmaktadır.

200 kPa çevre basıncı altında, %60 konsantrasyona kadar methanol ve asetik asit için elde edilen drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri birbirine yakın, ethanol ve izo-propil alkol için elde edilen değerler ise bu iki kimyasal için elde edilenlerden yüksektir. %80 konsantrasyon da ise asetik asit için elde edilen pik kayma mukavemeti değeri ethanoldekinden büyük olup izo-propil alkoldeki ile hemen hemen aynı değere ulaşmaktadır.

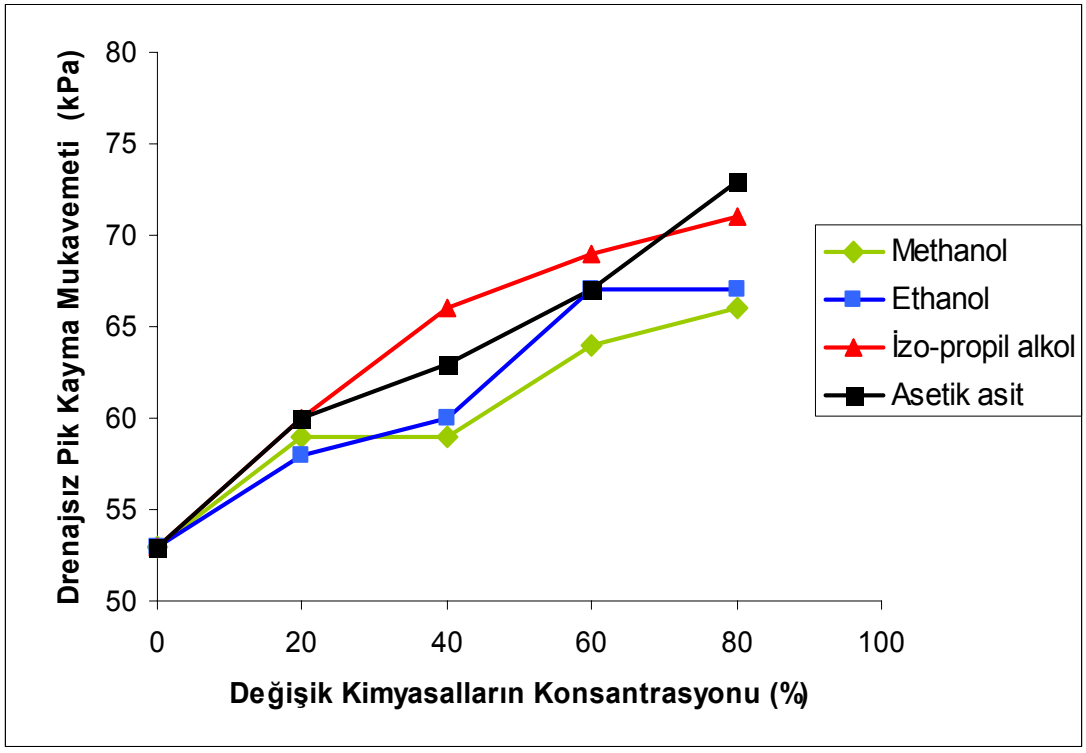
Kimyasal sıvıların farklı çevre basınçları (50,100 ve 200 kPa) altında dielektrik sabitlerindeki azalmayla beraber drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri artmaktadır. Boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve çekim alanı derinleşmektedir (Zhao 1996). Çekim alanının derinleşmesi ile tanecikler kümeleşerek silt-ince kum formuna yaklaşmakta, numune aşırı konsolide olmuş kil davranışı göstermektedir. Böylelikle zemin uygulanan dış kuvvetlere karşı daha fazla direnç göstermeye başlamaktadır. Yalnız asetik asitin %40 ve %60 konsantrasyonları için bu ilişki bozulmakta dielektrik sabiti asetik asitinkinden büyük olan ethanol ve izo-propil için elde edilen kayma mukavemeti değerleri asetik asit varlığında elde edilen değerlerden daha büyük çıkmaktadır. Bu durum asetik asitin özellikle bu konsantrasyonlarda kaolinit kilinin yapısını bozması ve bir jelleşmeye sebep olmasıyla alakalıdır. Kaolinitteki bu jelleşme dolayısıyla tanecikler arasındaki filtrasyon hızı yavaşlamakta ve sıvı çıkışı zorlamaktadır. Bu sebeple üç eksenli basınç deneyleri için alınan numuneler daha fazla su muhtevasına sahip olmakta ve drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri azalmaktadır.

Şekil 5.45.'de kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için bulunan kohezyon değerleri incelendiğinde kimyasal sıvıların dielektrik sabitlerindeki azalmayla ters orantılı ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonları ile doğru orantılı olarak kohezyon değeri artmaktadır. Yalnız bu kohezyon artışları çok fazla değildir. Örneğin saf su için bulunan kohezyon değeri c=23,5 kPa olup kimyasal sıvıların varlığında elde edilen en büyük değer olan ve asetik asitin %80 konsantrasyonu için bulunan değer c=27,3 kPa'dır. Bu değer saf su için elde edilen değerin 1,16 katıdır. Bu artış tanecikler arasındaki boşluk sıvılarının dielektrik sabitindeki değişime bağlı olarak Van der Walls çekme kuvvetinin artması ve taneciklerin birbirine daha iyi kenetlenmesinden kaynaklanmaktadır.

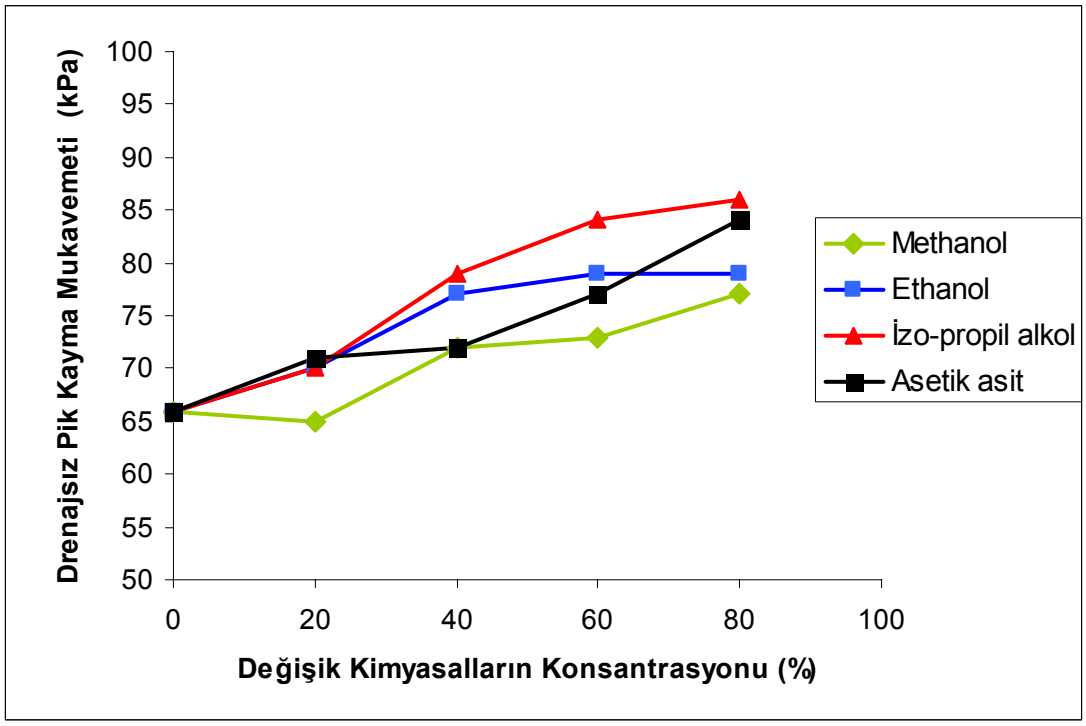
Şekil 5.46.'de kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri incelendiğinde kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki azalmayla ters orantılı ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile doğru orantılı olacak şekilde içsel sürtünme açıları artmaktadır. İçsel sürtünme açısı değişimleri methanol, ethanol ve izo-propil alkol için birbirine paralellik göstermektedir. Asetik asit için %20, %40 ve %60 konsantrasyonda içsel sürtünme açısı değerleri diğer üç kimyasal

sıvı için elde edilen değerlerden küçük, %80 konsantrasyonda ise diğer kimyasal sıvılar için elde edilen içsel sürtünme açısı değerlerinden büyüktür. Saf su için bulunan içsel sürtünme açısı değeri Ø = $4{,}0^0$ ve asetik asitin %80 konsantrasyonu için bulunan içsel sürtünme açısı değeri Ø = $6{,}47^0$ olup bu değer saf su için elde edilen değerin 1,62 katıdır. Diğer kimyasallar için de benzer oranlar elde edilmektedir.

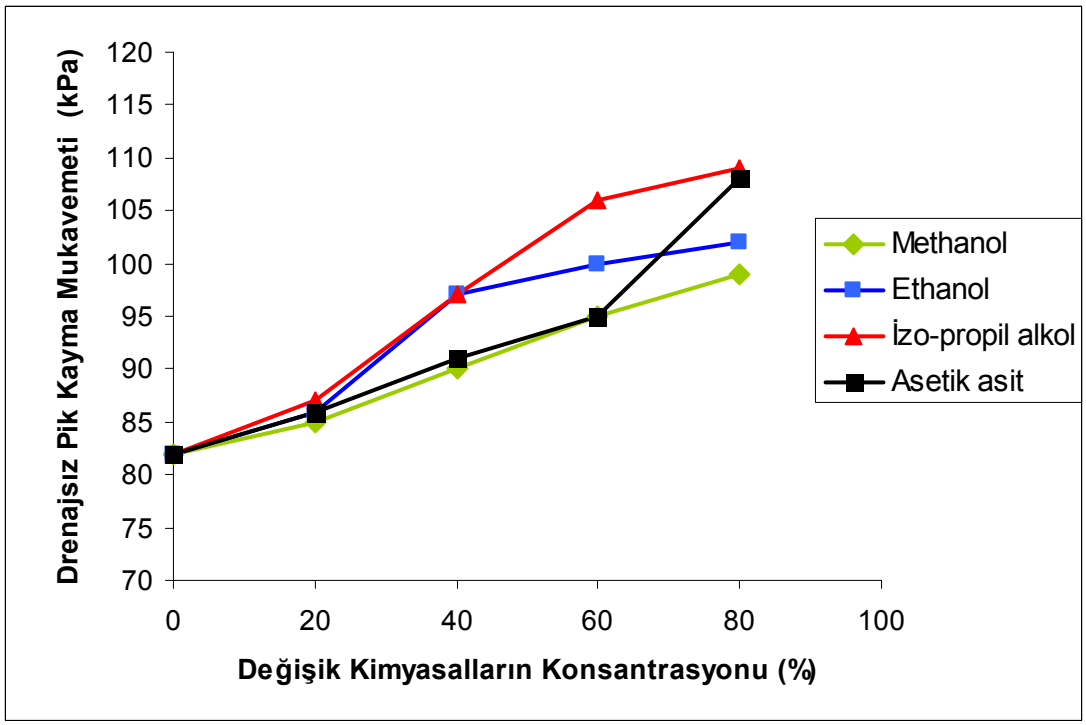
Deneylerde elde edilen sonuçlara göre değişik kimyasalların en derişik konsantrasyonları için kilin kohezyonundaki artış oranı en fazla 1,16 kat iken, içsel sürtünme açısındaki artış oranı 1,62 kat olmaktadır. Bu da göstermektedir ki kaolinitte kimyasal sıvıların kullanılmasıyla kayma mukavemetinde meydana gelen artış kohezyon artışından ziyade içsel sürtünme açısında meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır (Schmertmann 2001). Yani kimyasal sıvıların etkisi ile taneciklerin flokülasyonu sonucu oluşan küme şeklindeki yapıların arasında oluşan sürtünme direnci zeminin kayma mukavemeti kazanmasını sağlamaktadır.



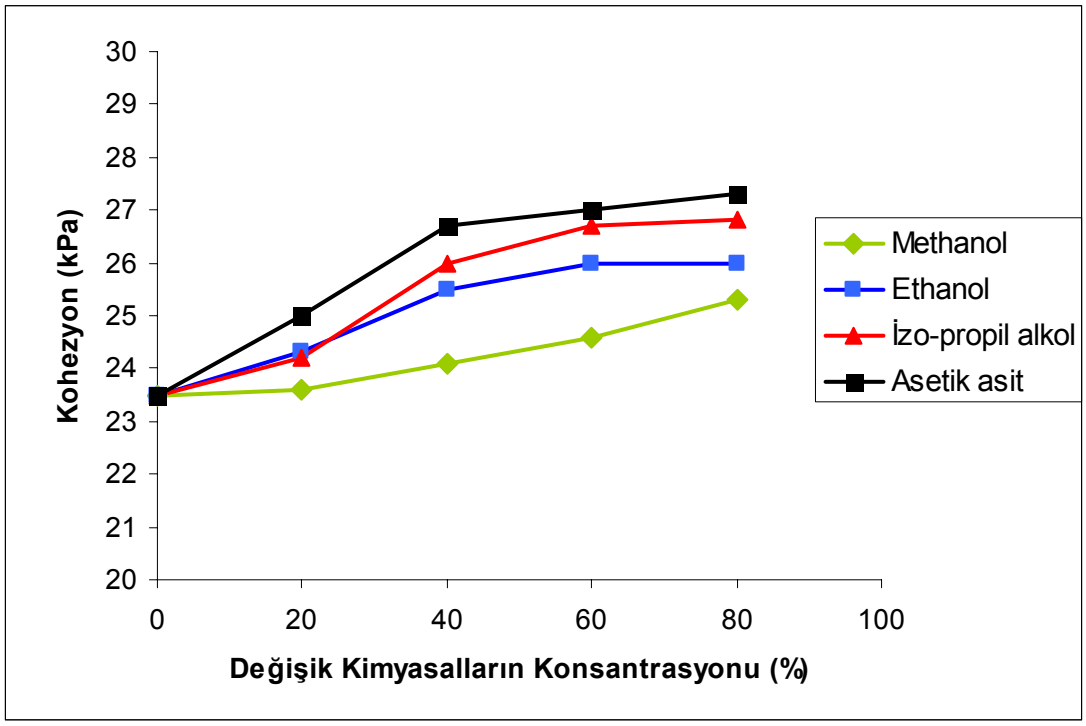
Şekil 5.42. Kaolinitte 50 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



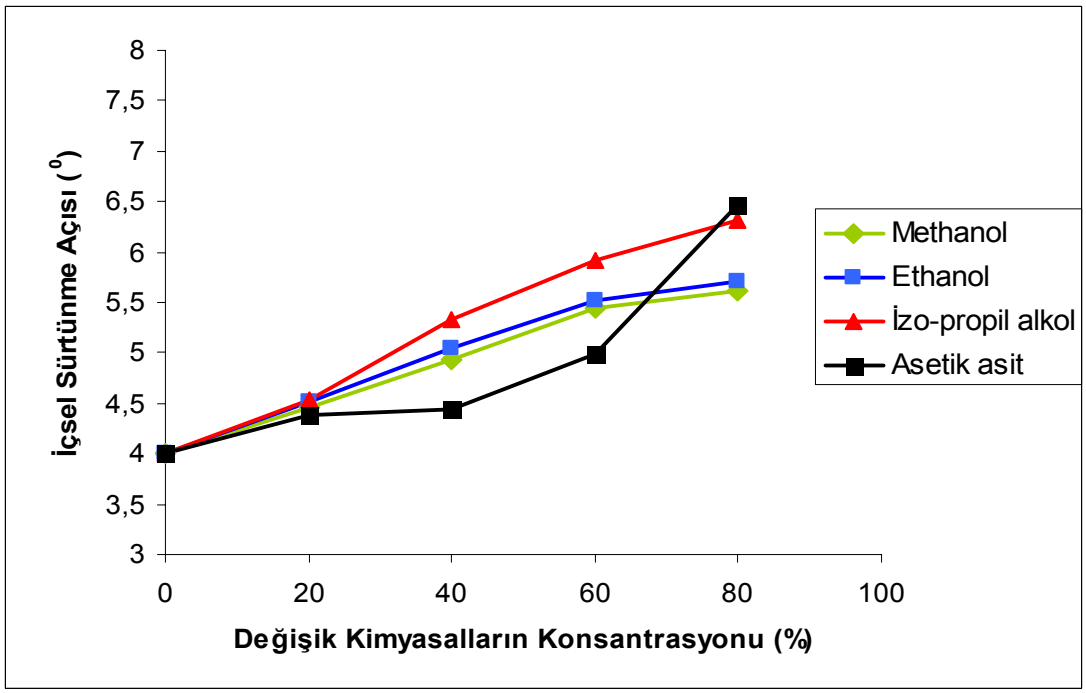
Şekil 5.43. Kaolinitte 100 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



Şekil 5.44. Kaolinitte 200 kPa çevre basıncı altında 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



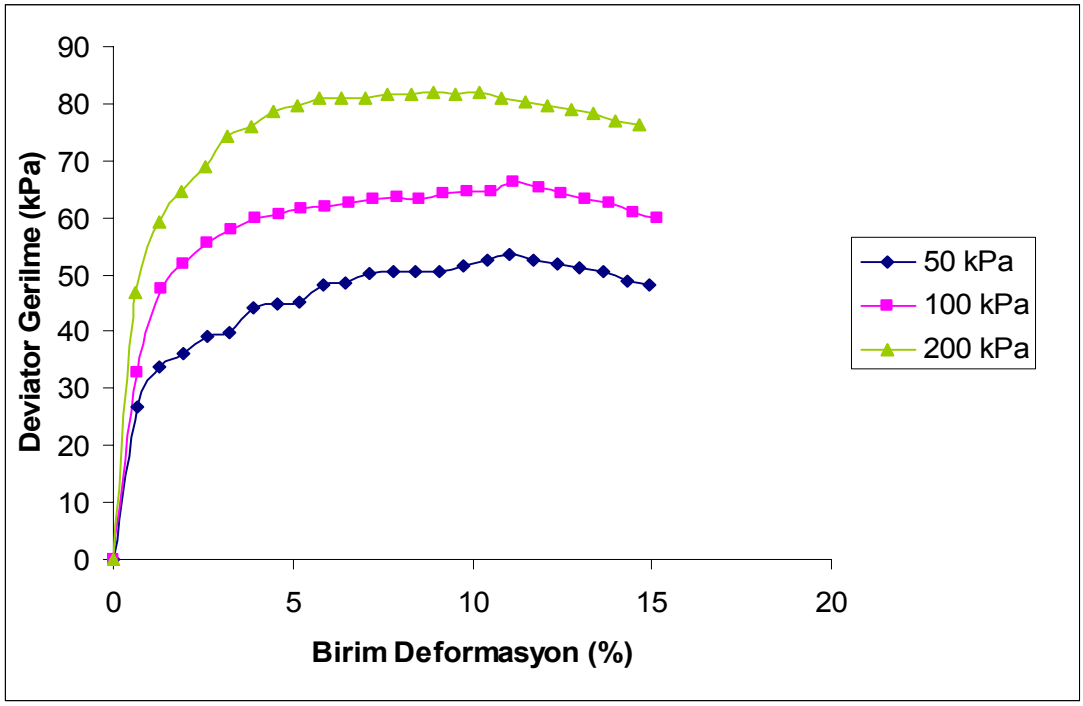
Şekil 5.45. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri



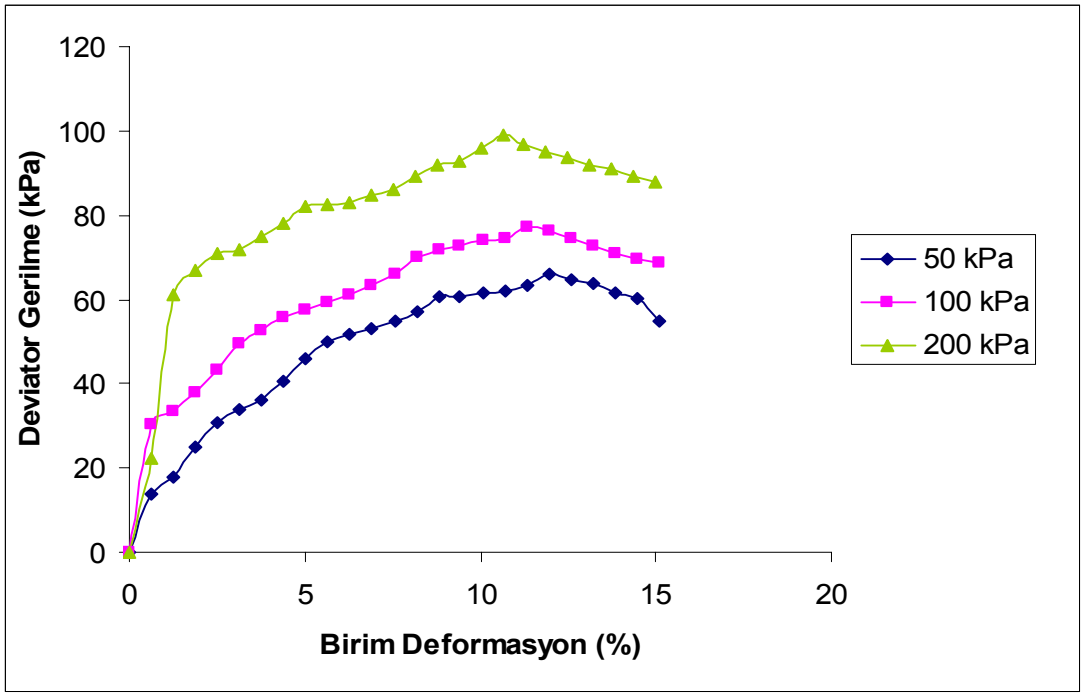
Şekil 5.46. Kaolinitte 4 farklı kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açıları (^{0})

Kaolinitte numunelerin kırılma davranışını gözlemleyebilmek için saf su ve kimyasalların %80 konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde 50,100 ve 200 kPa çevre basıncı altında elde edilen deviatorik gerilme - birim deformasyon ($(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon$) eğrileri Şekil 5.47. ile Şekil 5.51. arasında verilmiştir.

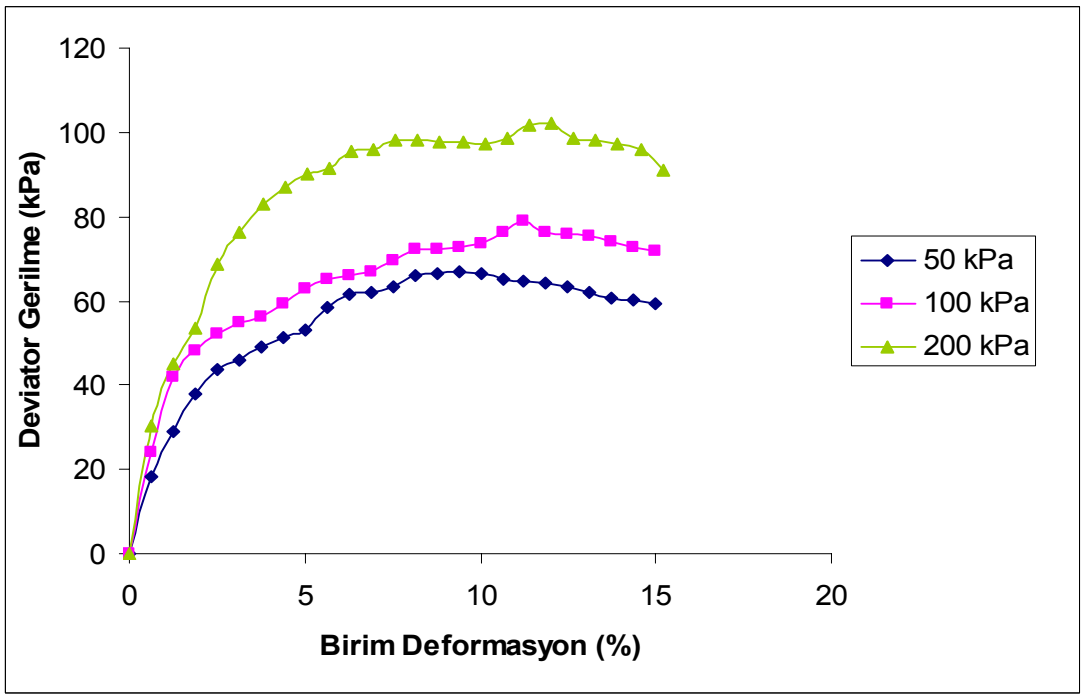
Saf su için deneyler %15 birim deformasyon değerinde sonlandırılmış ve maksimum deviatorik gerilme değerine %10 birim deformasyonda ulaşılmıştır. Methanolün %80 konsantrasyonu için tüm çevre basınçlarında hemen hemen %10 birim deformasyon değerinde maksimum gerilmeye ulaşılmış ve kırılmadan sonra gerilme düşüşü net olarak görülmüştür. Ethanolün %80 konsantrasyonu için tüm çevre basınçlarında genel olarak %10 birim deformasyon değerinde maksimum gerilmeye ulaşılmıştır. İzo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için 50kPa çevre basıncı altında %10, 100 ve 200kPa çevre basınçları altında %12 birim deformasyon değerinde maksimum gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Asetik asitin %80 konsantrasyonu için %13-15 birim deformasyon aralığında maksimum gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 5.52.'de saf su ile hazırlanan kaolinit numunesi üzerinde yapılan bir üç eksenli deneyi sonrası numunenin durumu görülmektedir.



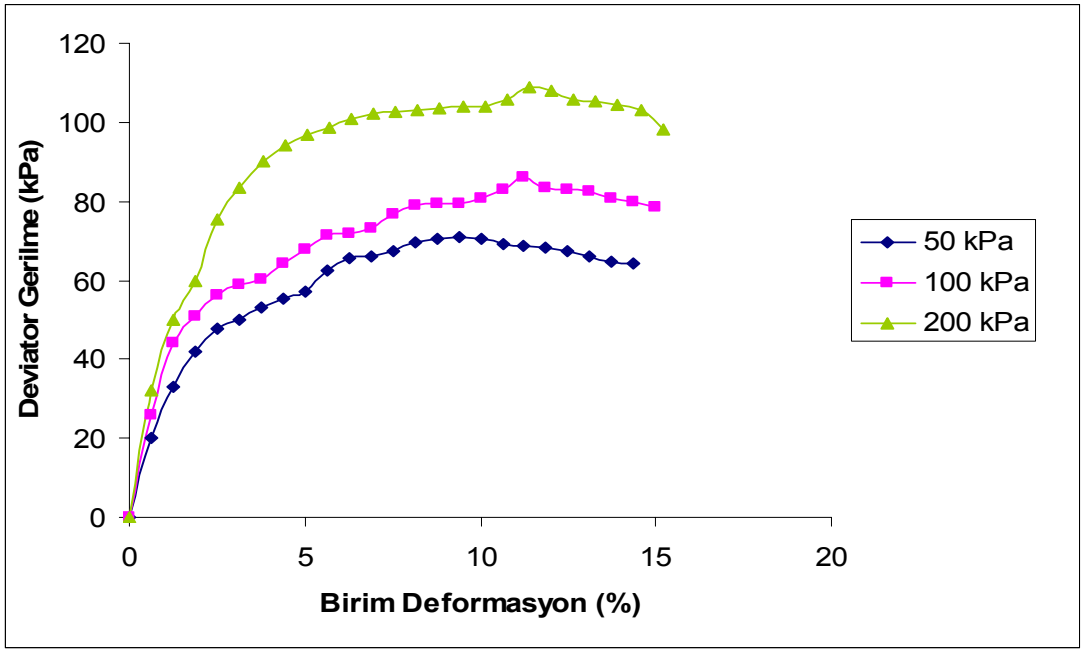
Şekil 5.47. Kaolinitte saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri



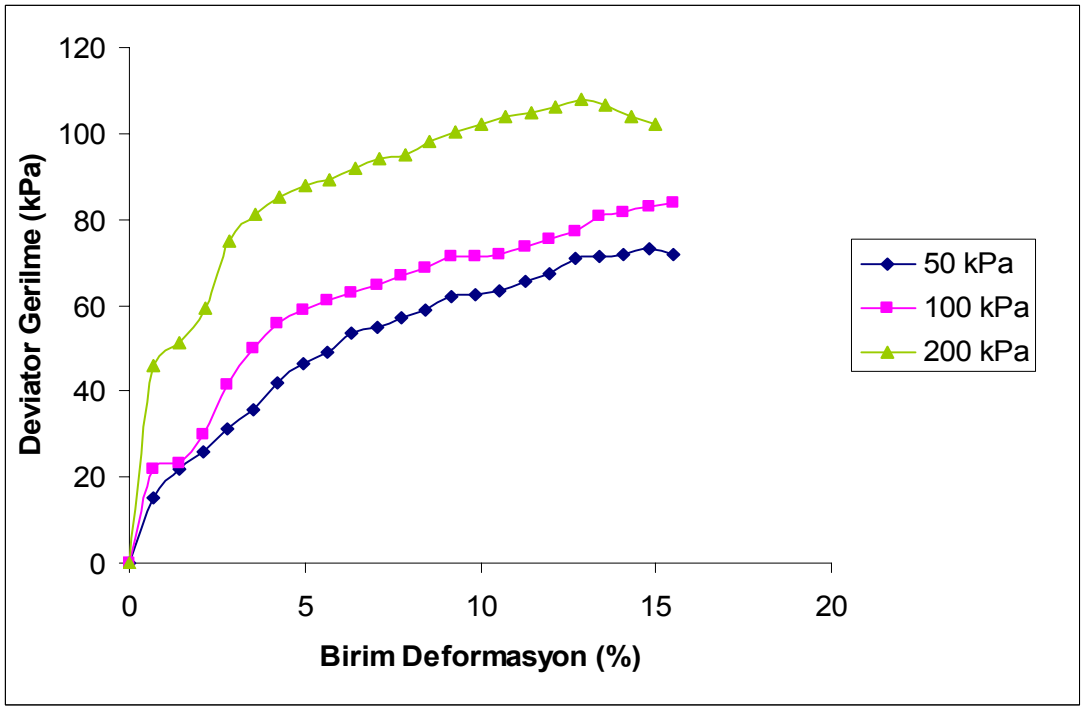
Şekil 5.48. Kaolinitte methanolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.49. Kaolinitte ethanolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.50. Kaolinitte izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.51. Kaolinitte asetik asitin %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.52. Saf su ile hazırlanan bir kaolinit numunesi üzerinde yapılan üç eksenli deney sonrası numunenin görünümü

5.3.2. Aksaray kili için üç eksenli basınç deney sonuçları

Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvılar için farklı çevre basınçları altında elde edilen drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri Çizelge 5.9.'da, kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø) ise Çizelge 5.10.'da verilmiştir. Aksaray kili için taneciklerin aşırı flokülasyonu ve büzülmesinden dolayı %80 konsantrasyonda hiçbir kimyasal sıvının varlığında deney yapmak için numune çıkarılamamış ve deneyler yapılamamıştır.

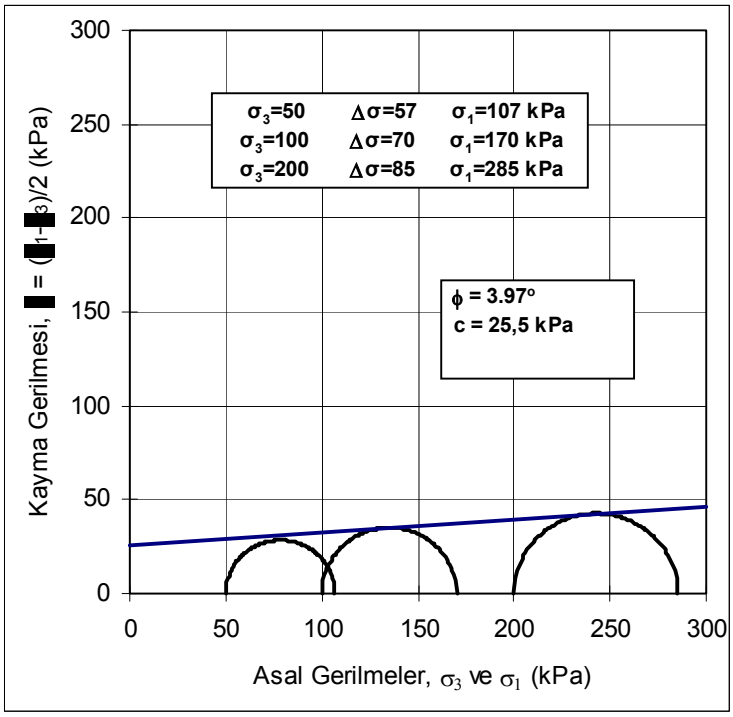
Şekil 5.53., Şekil 5.57. arasında saf su ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonu için yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen Mohr daireleri ve bu Mohr daireleri üzerinden geçirilen kırılma zarfını gösteren grafikler çizilmiştir. Grafikler üzerinde çevre basıncı (σ_3), deviatorik gerilme ($\Delta\sigma$), toplam düşey gerilme (σ_1), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Ø) değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.9. Aksaray kili ile su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için yapılan üç eksenli basınç deneyi (UU) sonuçları

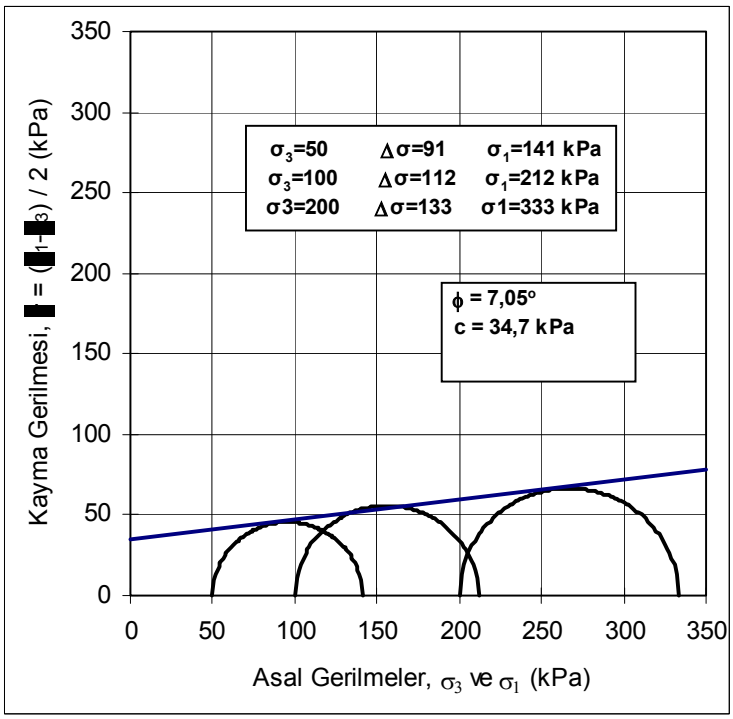
Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Çevre Basınçları, σ_3 (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları İçin Drenajsız Pik Kayma Mukavemeti Değerleri, q_{pik} veya (Deviatorik gerilme, $\sigma_1 - \sigma_3$), (kPa)				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	50 100 200	57,0 70,0 85,0	–	–	–	–
Methanol	50 100 200	–	64,0 78,0 95,0	76,0 95,0 115,0	91,0 112,0 133,0	NA
Ethanol	50 100 200	–	59,0 74,0 93,0	63,0 79,0 101,0	87,0 99,0 129,0	NA
İzo-propil Alkol	50 100 200	–	64,0 79,0 97,0	81,0 103,0 126,0	93,0 113,0 139,0	NA
Asetik asit	50 100 200	–	73,0 88,0 109,0	87,0 113,0 150,0	99,0 135,0 199,0	NA

Çizelge 5.10. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø).

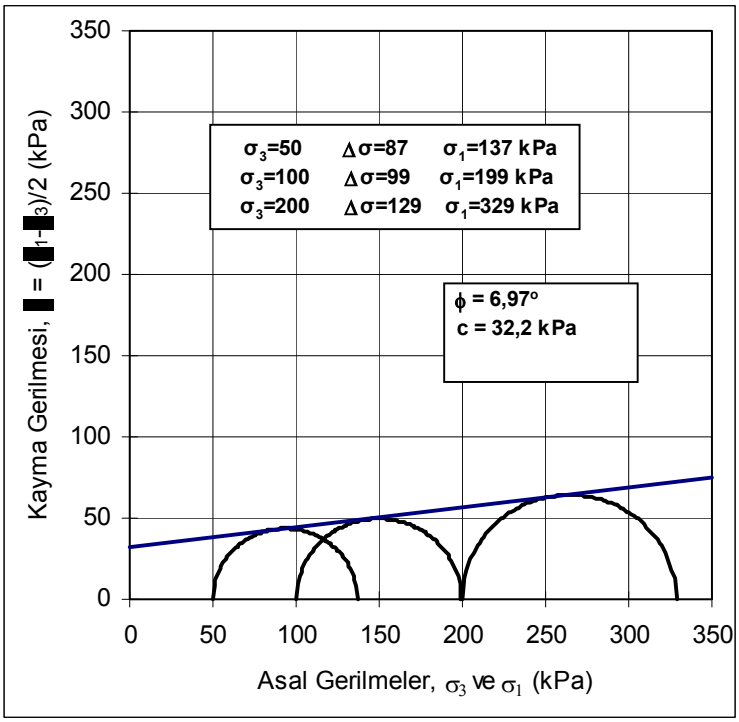
Su ve Kimyasal Sıvılar	Kayma Mukavemeti Parametreleri, c (kPa), Ø (^{0})	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	c Ø	25,5 3,97	–	–	–	–
Methanol	c Ø	–	27,0 4,93	28,9 6,5	34,7 7,05	NA
Ethanol	c Ø	–	25,4 4,88	26,2 5,67	32,2 6,97	NA
İzo-propil Alkol	c Ø	–	25,5 5,22	29 7,33	32,0 7,89	NA
Asetik asit	c Ø	–	26,5 6,44	27,5 9,85	25,0 14,71	NA



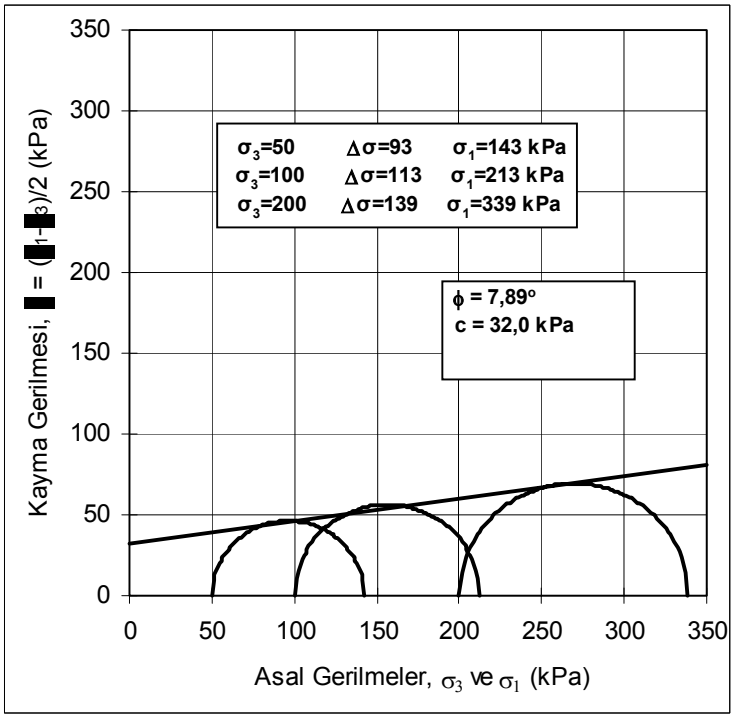
Şekil 5.53. Aksaray kilinde saf su için üç eksenli basınç deney sonuçları



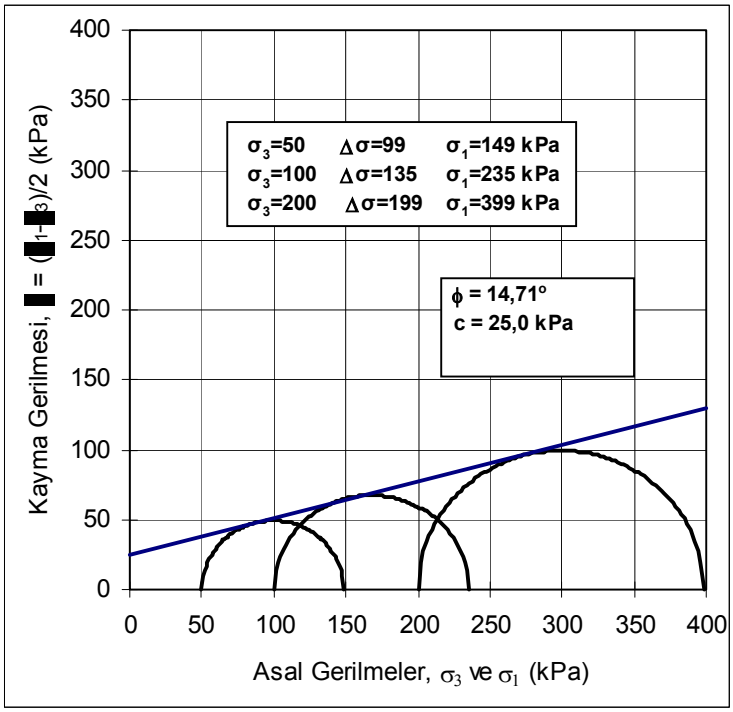
Şekil 5.54. Aksaray kilinde methanolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.55. Aksaray kilinde ethanolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.56. Aksaray kilinde izo-propil alkolün %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları



Şekil 5.57. Aksaray kilinde asetik asitin %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deney sonuçları

Kimyasal sıvılarla hazırlanan numuneler üzerinde farklı çevre basınçları altında bulunan drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin değişimleri Şekil 5.58., Şekil 5.62. arasında verilmiştir.

50 kPa çevre basıncı altında artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri artmakta, en fazla artış asetik asitte en az artış ise ethanolde olmaktadır. Methanol ve izo-propil alkol için elde edilen pik kayma mukavemeti değerleri hemen hemen birbirine yakındır. Asetik asitin %60 konsantrasyonunda bulunan değer saf su için elde edilen değerin 1,74 katıdır.

100 kPa çevre basıncı altındaki drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri 50 kPa için bulunan değerlerle paralellik göstermektedir. Asetik asitin %60 konsantrasyonu için bulunan değer saf su için bulunan değerin 1,93 katıdır.

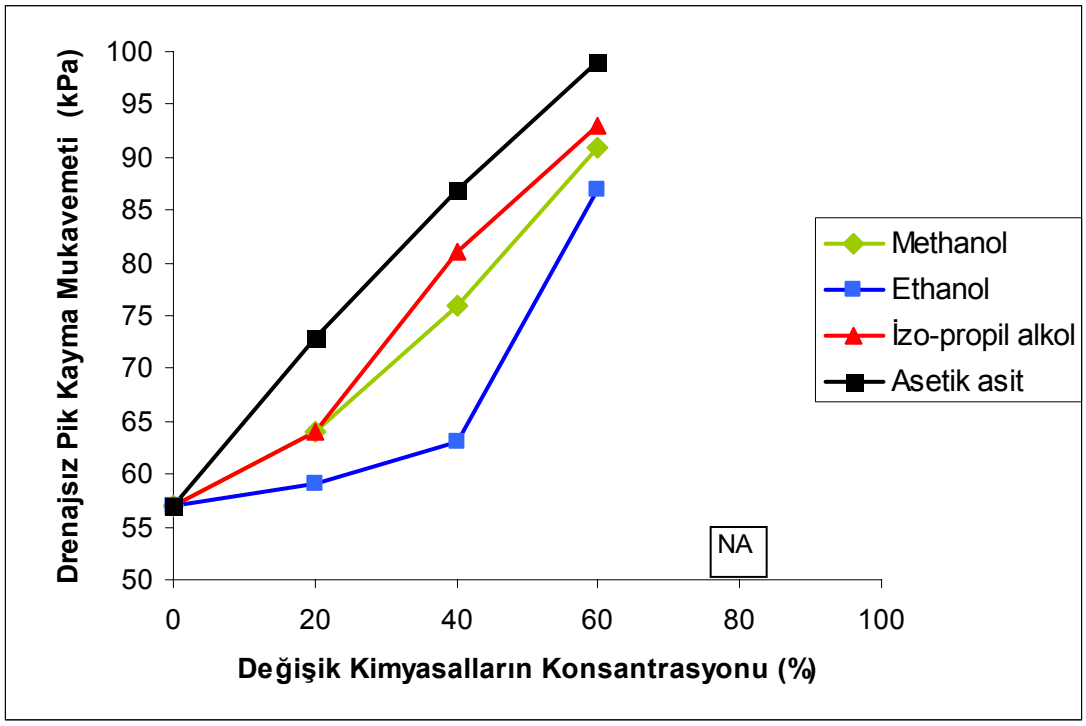
200 kPa çevre basıncı altında elde edilen drenajsız pik kayma mukavemetleri değişimi de 50 ve 100 kPa için bulunan değerlerle paralellik göstermektedir. Yalnız 200 kPa çevre basıncı altında asetik asit için elde edilen değerlerle diğer kimyasallar için elde edilen değerler arasındaki fark daha belirgindir. Asetik asitin %60 konsantrasyonu için elde edilen değer saf su için bulunan değerin 2,34 katıdır.

Farklı çevre basınçları altında bulunan sonuçlara göre; kimyasal sıvının artan konsantrasyon ve azalan dielektrik sabitiyle birlikte pik kayma mukavemeti değerleri artmaktadır. Aksaray kili içerisinde ağırlıklı olarak bulunan montmorillonit mineralleri dolayısıyla diffüz çift tabaka kalınlığı fazladır. Boşluk sıvısının değişmesiyle diffüz çift tabaka göçmekte ve tanecikler arasındaki itme kuvvetleri azalmakta, dolayısıyla tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve açık-floküle bir yapı oluşmaktadır. Böylece kil dış kuvvetlere karşı daha fazla mukavemet gösterebilmekte ve aşırı konsolide olmuş kil gibi bir davranmaktadır.

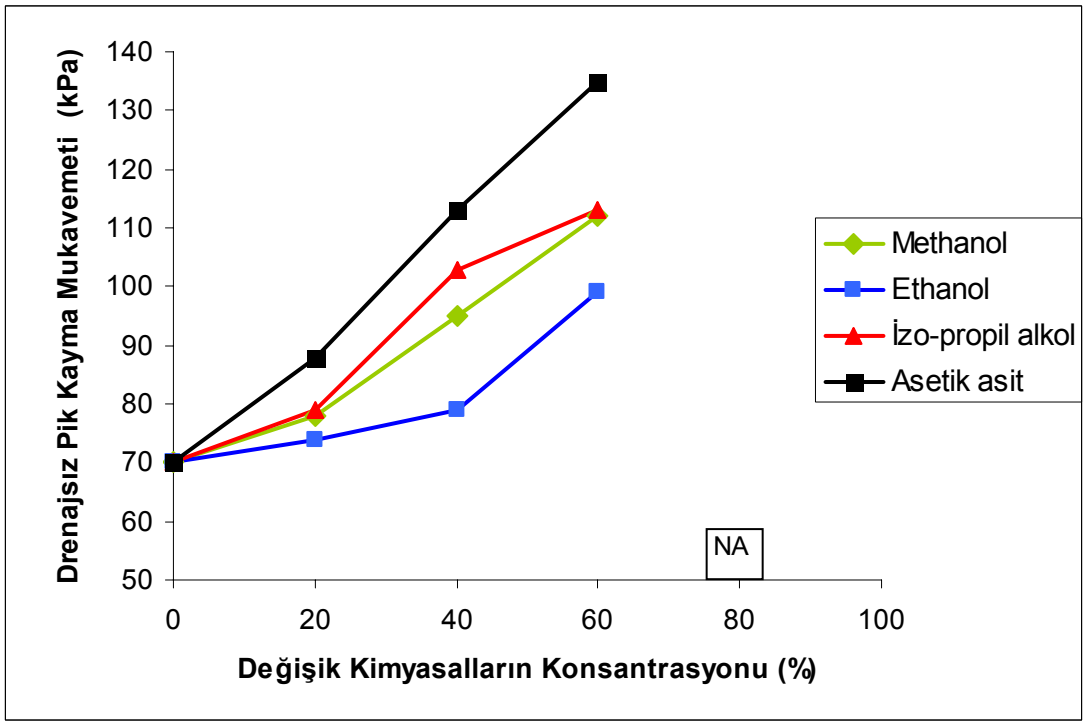
Grafiklerde dikkat çeken bir diğer nokta methanolün dielektrik sabiti (ε = 33,6) ethanolünkinden (ε = 24,3) büyük olduğu halde, methanolde daha büyük mukavemet değerlerine ulaşılmış olmasıdır. Bu durum Aksaray kili içerisinde yer alan sepiyolit varlığından kaynaklanmaktadır. Asetik asitte elde edilen aşırı mukavemet artışı ise dielektrik sabitinin düşük olmasının yanı sıra kil içerisinde bulunan dolomit ve kalsitin asetik asitle olan etkileşimine bağlı olarak açıklanabilir.

Aksaray kilinde asetik asit varlığında %40 konsantrasyona kadar artan kohezyon değeri, %60 konsantrasyon için azalmaktadır. Bu durum asetik asitin özellikle %60 konsantrasyonu için net çekme kuvvetindeki artış nedeniyle aşırı floküle olması ve adeta sıkı kum gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. En büyük kohezyon değerleri methanol için elde edilmiş olup, bu durum Aksaray kili içerisindeki sepiyolitin iç yüzeylerine methanolün daha rahat girebilmesi dolayısıyladır. Methanolün %60 konsantrasyonu için elde edilen kohezyon değeri saf su ile yapılan deneylerde elde edilen kohezyon değerinin 1,36 katı olmaktadır.

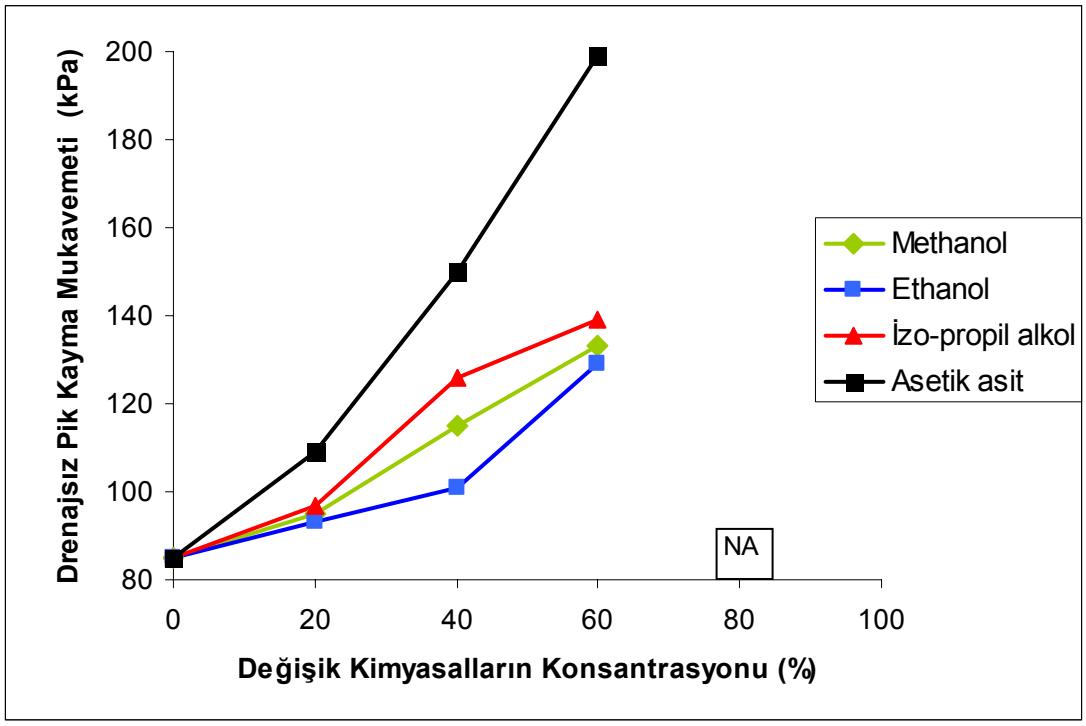
Kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonuyla birlikte zeminin içsel sürtünme açısı artmaktadır. Çünkü kil minerallerindeki diffüz çift tabakanın göçmesi, itme kuvvetlerinin azalması ve net çekim kuvvetinin artması ile birlikte ve tanecikler silt-ince kum formuna yaklaşmaktadır. Asetik asit varlığında ise içsel sürtünme açısında meydana gelen artış diğer kimyasal sıvılarda meydana gelen artıştan aşırı derecede büyük olmuştur. Bu durum hem dielektrik sabitindeki azalma hem de kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonları sonucunda oluşan mukavim yapıdan kaynaklanmaktadır. Asetik asitin %60 konsantrasyonu için bulunan içsel sürtünme açısı saf su için bulunan değerin 3,71 katı iken bu oran izo-propil alkolün %60 konsantarasyonu için 1,99'dur.



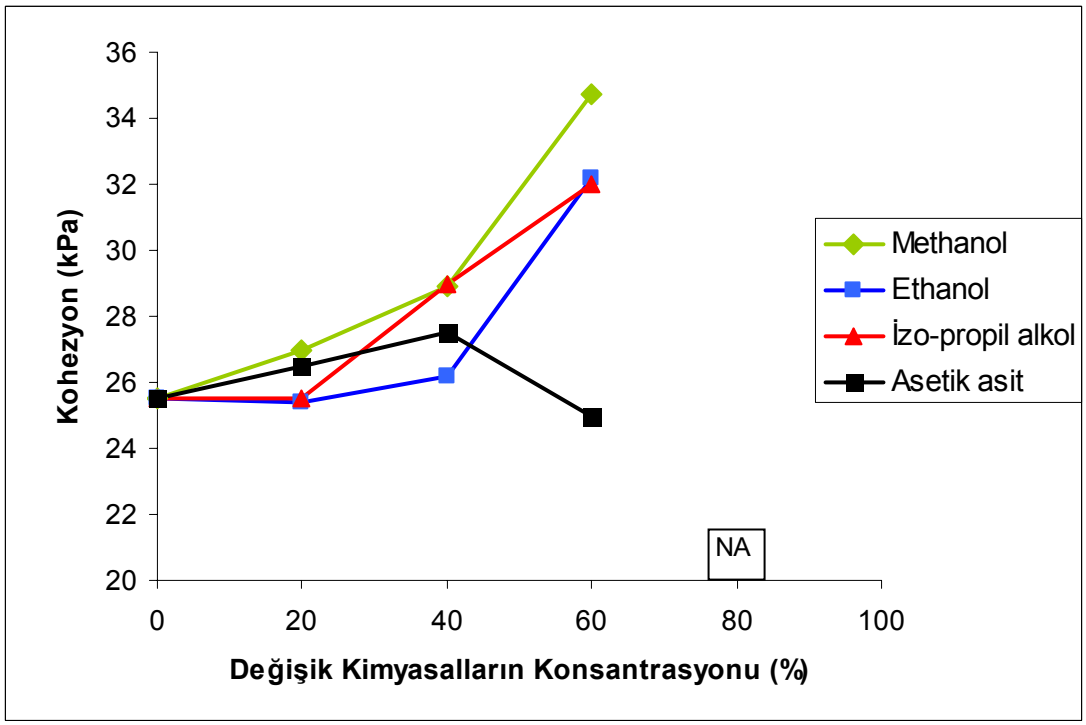
Şekil 5.58. Aksaray kilinde 50 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



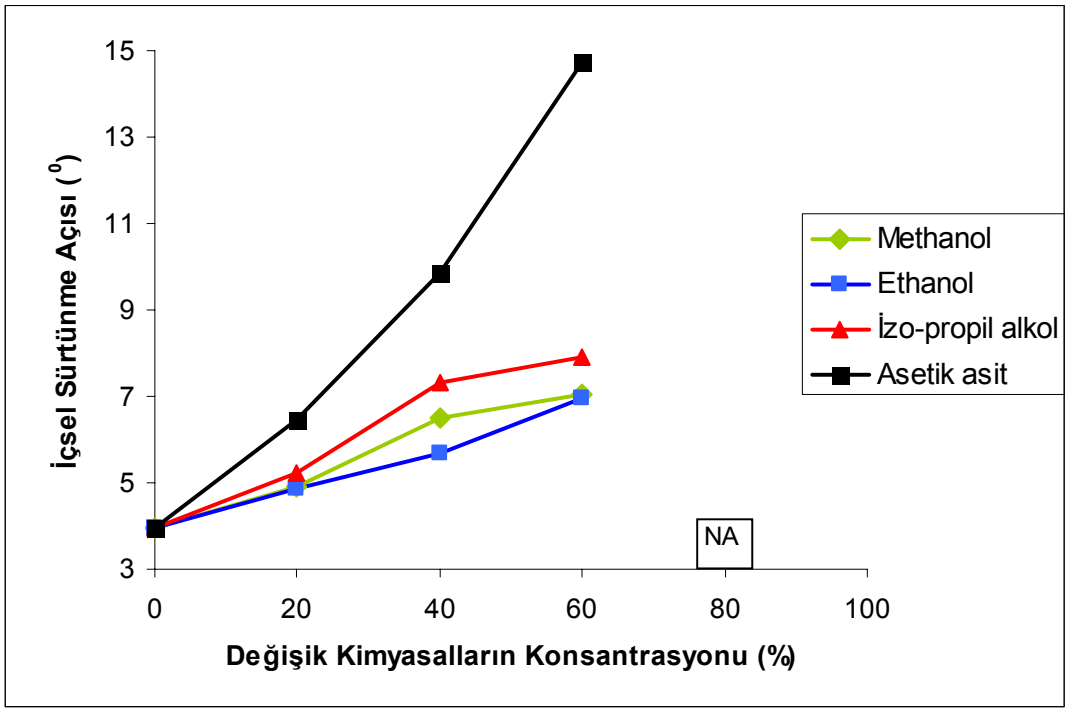
Şekil 5.59. Aksaray kilinde 100 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



Şekil 5.60. Aksaray kilinde 200 kPa çevre basıncı altında kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri



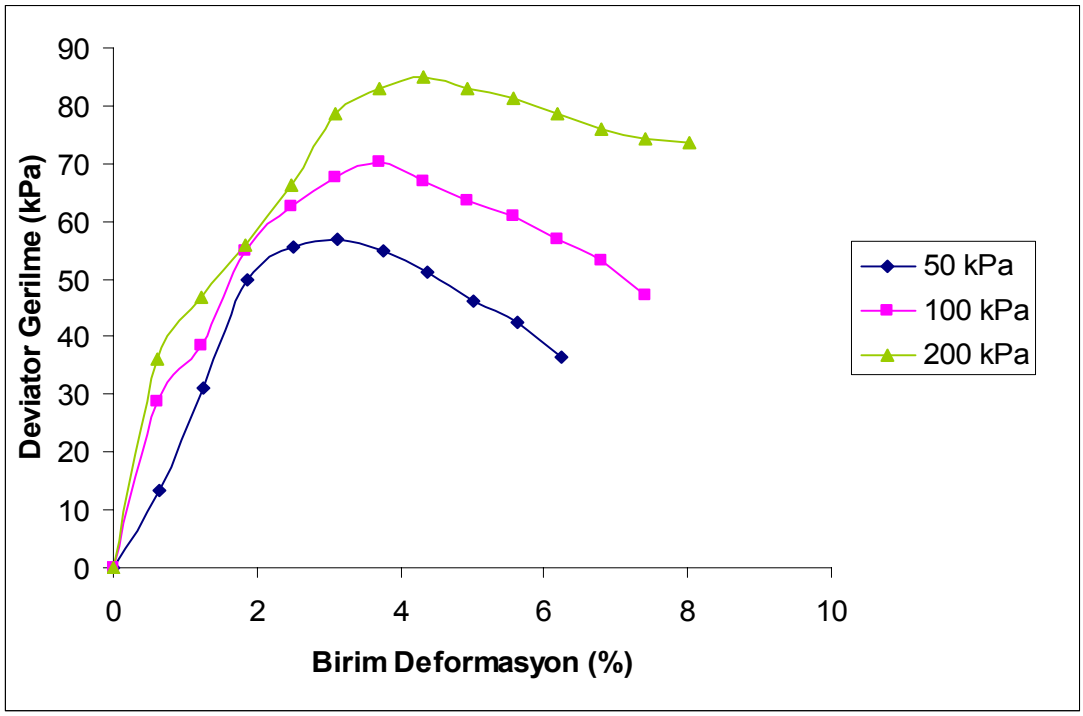
Şekil 5.61. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri



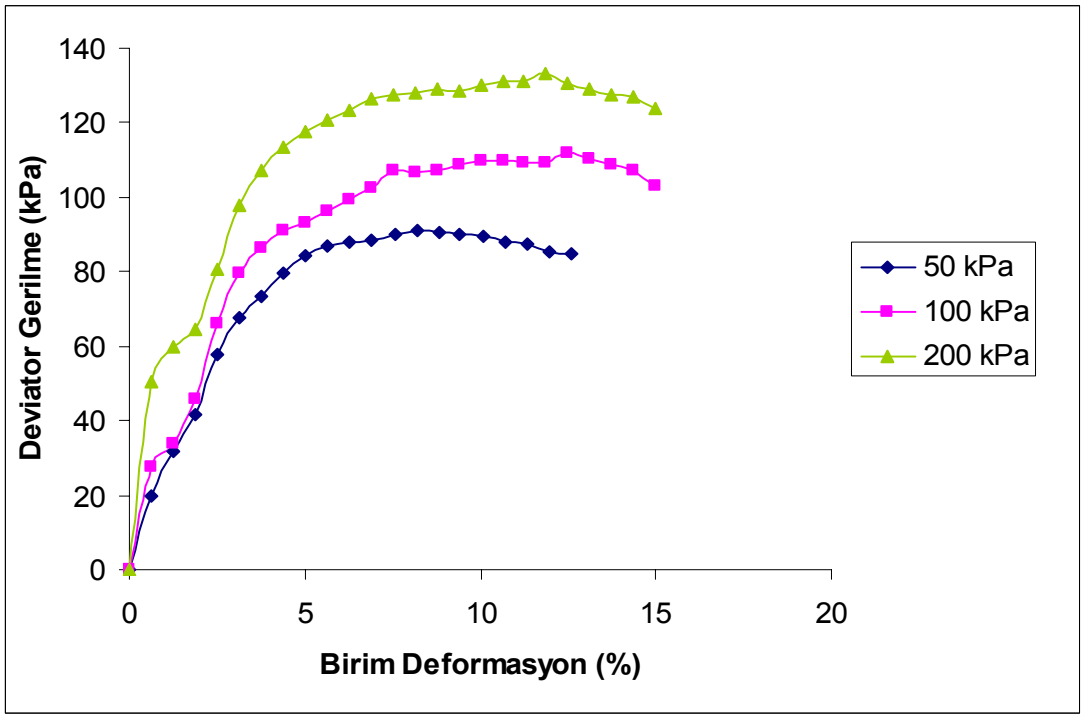
Şekil 5.62. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açıları (^{0})

Aksaray kilinde numunelerin kırılma davranışını gözlemleyebilmek için saf su ve kimyasalların %60 konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde 50,100 ve 200 kPa çevre basıncı altında elde edilen deviatorik gerilme - birim deformasyon ($(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon$) eğrileri Şekil 5.63. ile Şekil 5.67. arasında verilmiştir.

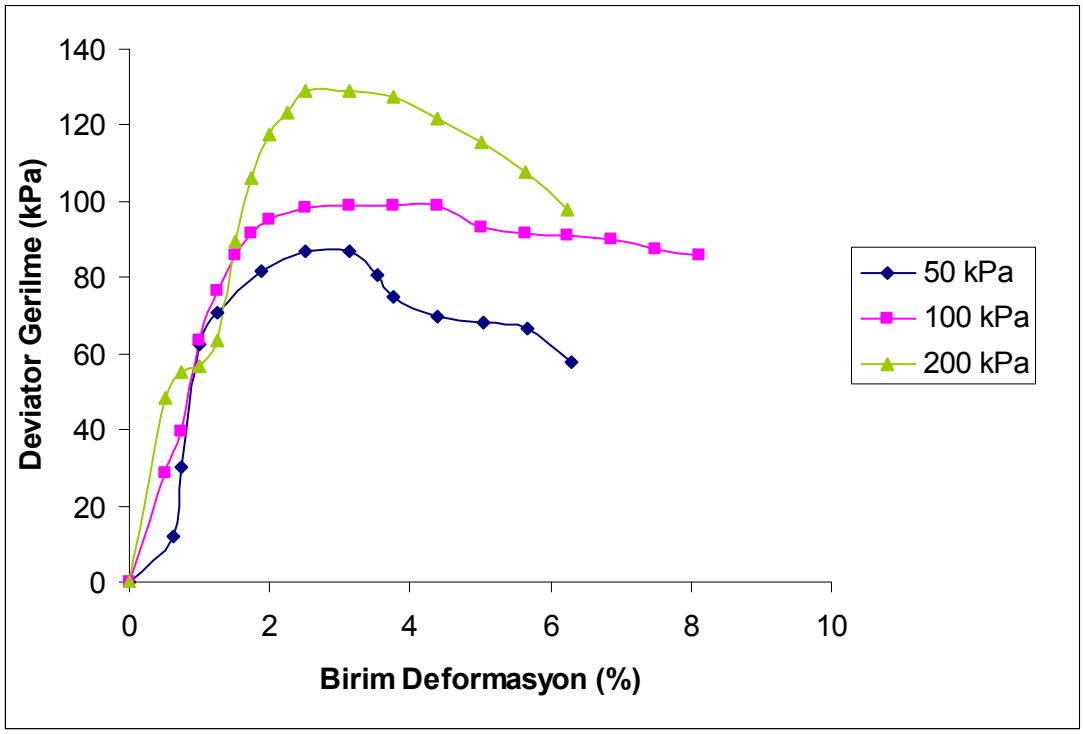
Saf su için yapılan deneylerde; artan çevre basıncı ile numunelerin daha fazla deformasyon yaptıktan sonra kırıldığı görülmüştür. 50 kPa için %3, 100 kPa için %4 ve 200 kPa için %4,5 birim deformasyonda kırılmalar gerçekleşmiştir. Methanolün %60 konsantrasyonu için 50 kPa çevre basıncında kırılma %9, 100 ve 200 kPa çevre basınçlarında ise %12 birim deformasyonlarda meydana gelmektedir. Ethanolde; 50 kPa çevre basıncı için kırılma %3, 100 ve 200 kPa çevre basınçları için %4 birim deformasyon değerlerinde meydana gelmektedir. İzo-propil alkolde; kırılmalar %4 birim deformasyon değeri civarında meydana gelmektedir. Asetik asitte ise, %9 civarında maksimum deviatorik gerilmeye ulaşılmakta, 50 ve 100 kPa için bir gerilme akması meydana gelmekte fakat 200 kPa için ise gevrek bir kırılma gerçekleşmektedir. Şekil 5.68.'de Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan bir numune üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonrası kırılmış numune görülmektedir.



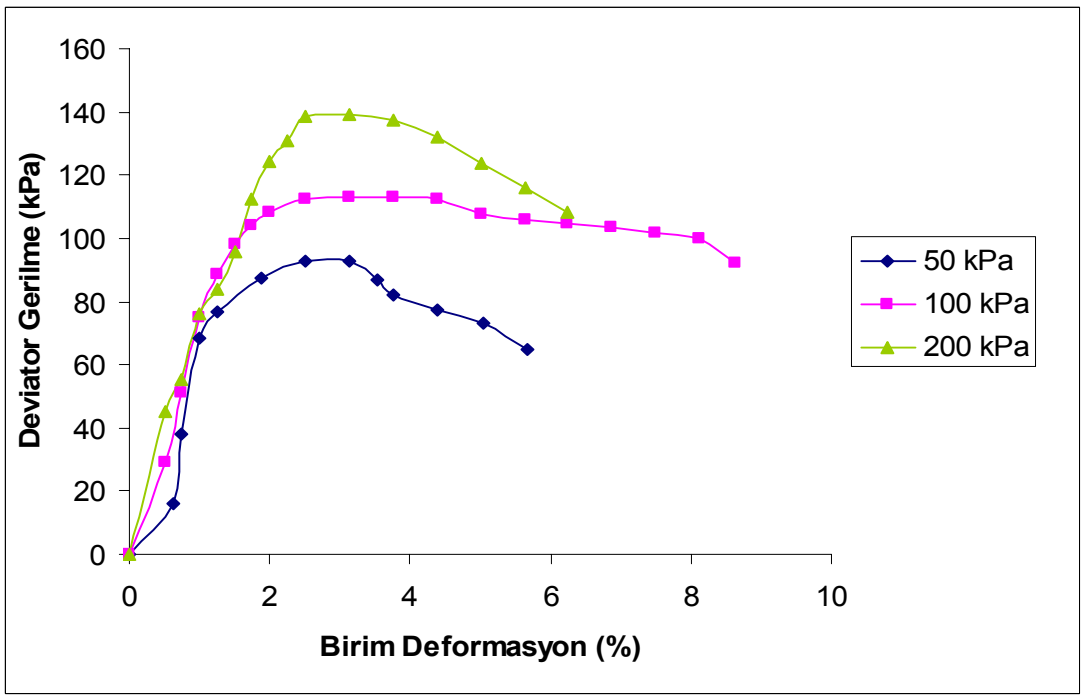
Şekil 5.63. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



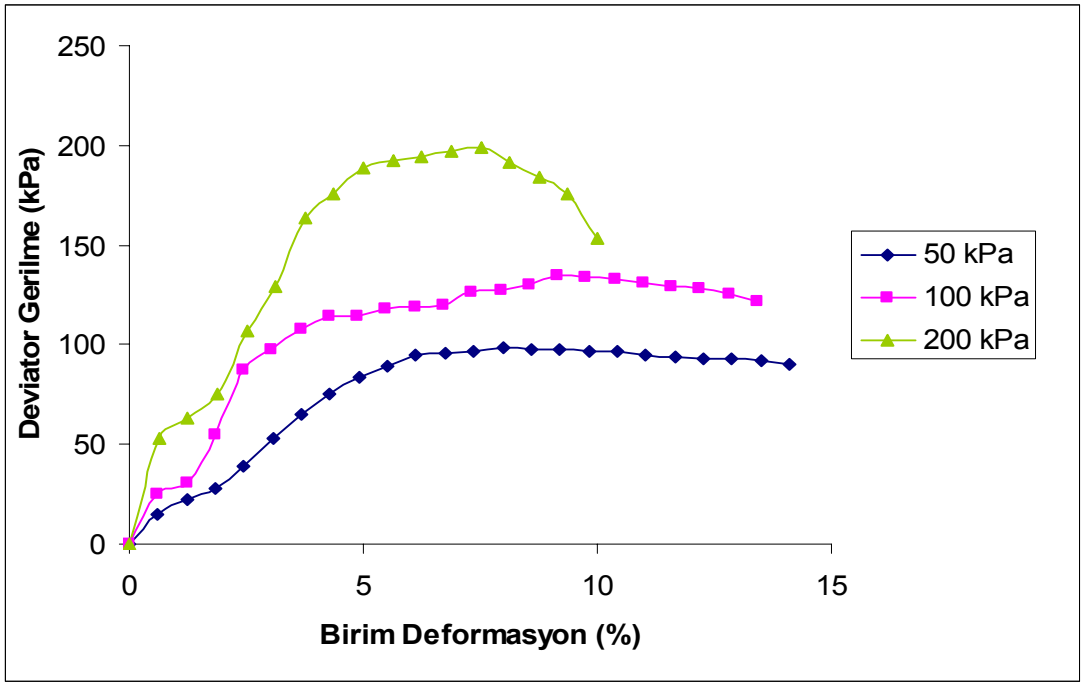
Şekil 5.64. Aksaray kilinde methanolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.65. Aksaray kilinde ethanolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.66. Aksaray kilinde izo-propil alkolün %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.67. Aksaray kilinde asetik asitin %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.68. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan bir numune üzerinde yapılan üç eksenli deneyi sonrasında numunenin görünümü

5.4. Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için laboratuarda yapılan deneylerden olan kesme kutusu deneyi özellikle kumlarda uygulandığı gibi killerde de uygulanabilir. Deneylerde kullanılan kimyasal sıvılar dolayısıyla taneciklerin flokülasyonu sonucu silt-ince kum yapısına doğru bir değişim gösterme eğiliminde olan kil zeminlerin davranışının kesme kutusu deneyleriyle belirlenmesinin gerçekçi olacağı düşünülmüştür. Deneylerde drenaj koşulları kontrol edilmediği için hızlı bir şekilde yükleme yapılmıştır. Bu durumda elde edilen değerler de toplam gerilmeler cinsinden olmaktadır.

Teorik olarak normal konsolide killerde deneylerde yatay bir kırılma zarfı elde edilmesi gerekirken laboratuarda yapılan deneylerde tam yatay olmayan bir kırılma zarfı elde edilmektedir. Aynı zamanda her iki kilde de artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte deneylerde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri (Ø) artmaktadır. Bu durumu şu şekilde izah edebiliriz; artan kimyasal sıvı konsantrasyonları için killerin flokülasyonu ile yapının aşırı konsolide kil davranışı gösteren bir yapıya veya silt-ince kum formuna dönüşmesiyle zemin ek bir içsel sürtünme açısı kazanmaktadır.

Kesme kutusu deneyleri, deneylerde kullanılan iki farklı kil türü için su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için yapılmıştır.

5.4.1. Kaolinit için kesme kutusu deney sonuçları

Kaolinit üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri Çizelge 5.11.'de, kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø) ise Çizelge 5.12.'de verilmiştir. Şekil 5.69., Şekil 5.72. arasında ise deneylerde elde edilen kırılma zarflarını gösteren grafikler çizilmiştir. Grafikler üzerinde düşey eksende toplam gerilmeler cinsinden maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}) ve yatay eksende normal gerilme (σ) verilmiştir. Şekil 5.73. ve Şekil 5.74.'de farklı kimyasal

Çizelge 5.11 Kaolinitte su ve kimyasal sıvılar için kesme kutusu deneyi sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Düşey Gerilme, σ_n (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları İçin Elde Edilen Maksimum Kayma Gerilmesi Değerleri, τ_{max}(kPa)				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	32,6 65,2 130,5	11,5 13,5 17,8	–	–	–	–
Methanol	32,6 65,2 130,5	–	17,1 19,6 24,7	21,7 24,9 31,0	26,1 30,0 36,8	27,6 32,4 41,0
Ethanol	32,6 65,2 130,5	–	16,6 19,3 25,1	21,3 24,7 31,9	24,6 29,1 37,5	27,8 33,0 42,9
İzo-propil Alkol	32,6 65,2 130,5	–	17,5 20,5 26,4	21,3 25,2 32,9	25,4 29,9 38,9	27,2 33,0 43,9
Asetik asit	32,6 65,2 130,5	–	16,5 19,3 24,8	22,8 25,8 32,3	26,2 29,8 36,4	28,5 33,1 42,6

Çizelge 5.12. Kaolinitte su ve kimyasal sıvılar için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø).

Su ve Kimyasal Sıvılar	Kayma Mukavemeti Parametreleri, c (kPa), Ø (^{0})	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	c Ø	9,44 3,66	–	–	–	–
Methanol	c Ø	–	14,53 4,44	18,68 5,48	22,67 6,23	23,27 7,79
Ethanol	c Ø	–	13,68 4,98	17,83 6,14	20,37 7,57	22,82 8,79
İzo-propil Alkol	c Ø	–	14,63 5,19	17,72 6,72	20,9 8,54	21,76 9,74
Asetik asit	c Ø	–	13,53 4,97	19,50 5,59	23,00 5,96	23,72 8,25

sıvılar için elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değişimleri gösterilmiştir.

Kimyasalların %20 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti zarflarının hemen hemen paralel ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti değerleri saf su için elde edilen değerlerin yaklaşık 1,5 katı civarındadır. En yüksek kayma mukavemeti değerleri izo-propil alkol için elde edilmiştir. Kimyasallar için elde edilen kohezyon değerlerinin birbirine yakın ve yaklaşık olarak saf su için bulunan değerin (c = 9,44 kPa) 1,5 katı civarında oldukları görülmektedir.

Kimyasal sıvıların %40 konsantrasyonları için elde edilen zarfların %20 konsantrasyondakilere yakın olduğu görülmektedir. Bu konsantrasyonda elde edilen kayma mukavemeti değerleri saf su için elde edilen değerlerin ortalama 1,85 katıdır. Kimyasallar için kohezyon değerleri birbirine yakın ve saf su için bulunan değerin ortalama 2 katı civarındadır.

Kimyasalların %60 konsantrasyonu için asetik asit ve methanolde elde edilen zarfların ve aynı şekilde ethanol ile izo-propil alkolde elde edilen zarfların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu konsantrasyonda elde edilen kayma mukavemeti değerleri saf su için bulunan değerlerin ortalama 2,3 katıdır. Kimyasallar için elde edilen kohezyon değerleri saf su için elde edilen değerin ortalama 2,2 katıdır.

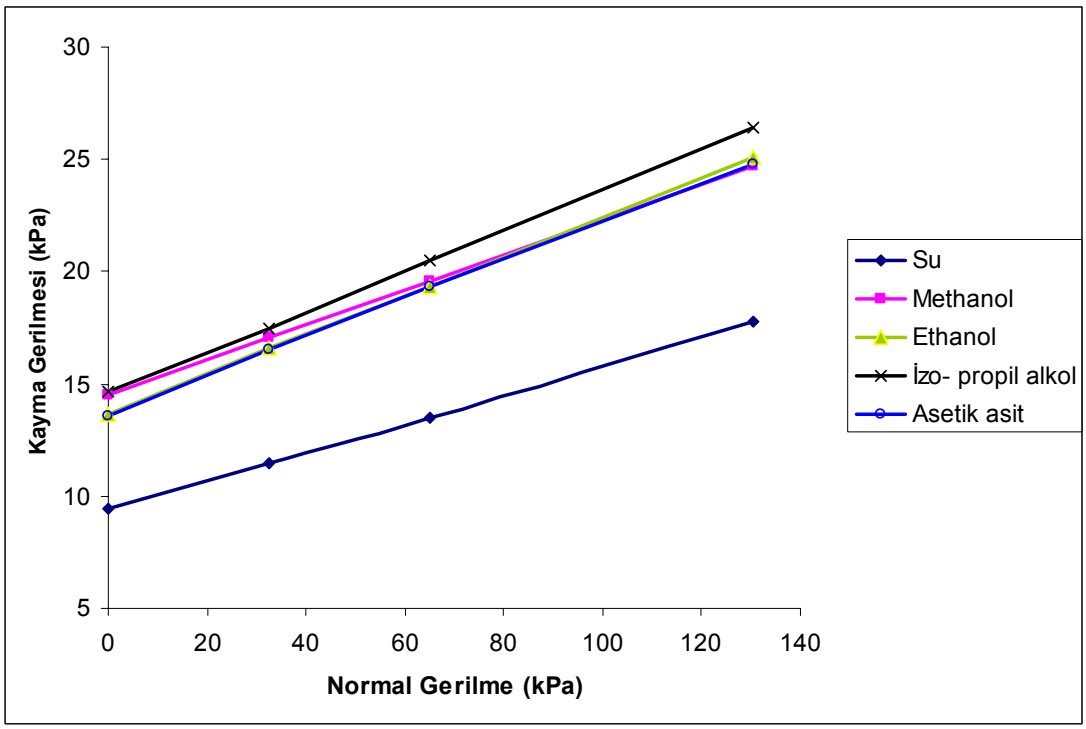
Kimyasalların %80 konsantrasyonu için elde edilen zarflar birbirine yakın olup, kayma mukavemeti değerleri saf su için bulunan değerlerin ortalama 2,45 katıdır. Kohezyon değerleri saf su için bulunan değerin ortalama 2,4 katıdır.

Kimyasal sıvıların kullanılmasıyla kayma mukavemeti gerilmelerinin belirgin oranda artmasını şu şekilde izah edebiliriz; boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalmasıyla tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve taneciklerin flokülasyonu ile tanecikler küme formuna girmekte böylelikle daha fazla mukavemet göstermeye başlamaktadır.

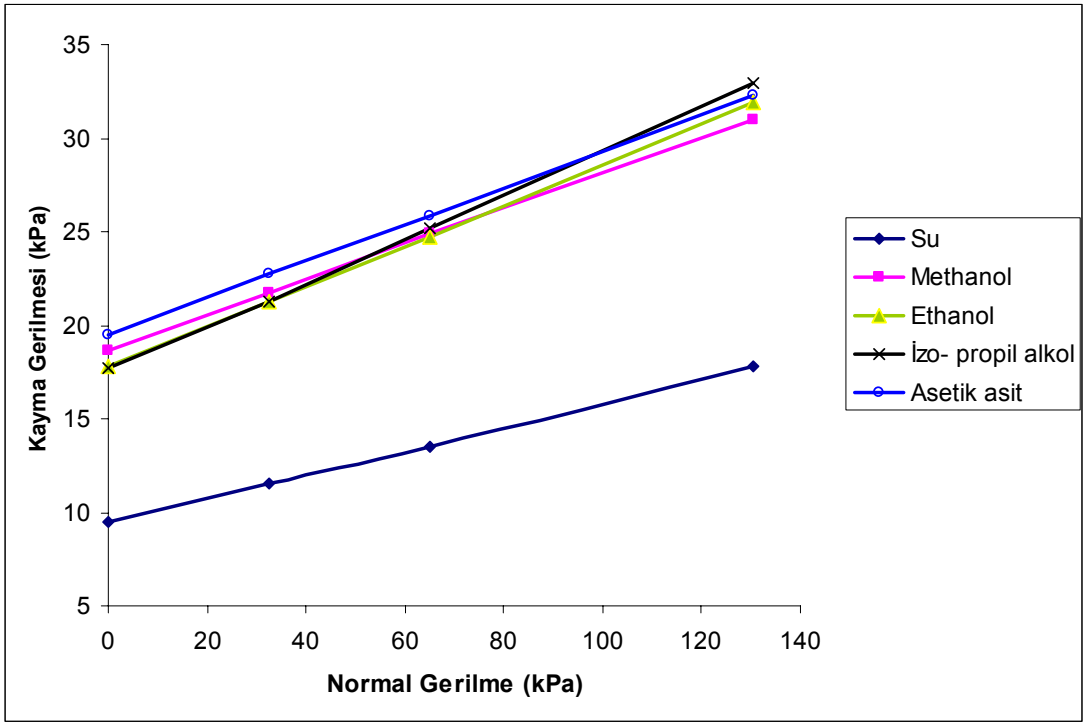
Kimyasal sıvıların dielektrik sabitlerindeki azalma ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile kohezyon değeri artmaktadır. Kohezyon artışları hemen hemen bütün kimyasal sıvılar için birbirine yakındır, fakat ethanol ve izo-propil için elde edilen kohezyon değerleri biraz daha küçüktür. Çünkü bu iki kimyasal varlığında taneler arasında kohezyondan ziyade sürtünme direnci önem kazanmaktadır. En büyük kohezyon değeri asetik asitin %80 konsantrasyonu için olup c = 23,72 kPa'dır.

Kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki azalma ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile içsel sürtünme açıları da artmaktadır. Kohezyonun tam tersine bulunan içsel sürtünme açısı değerleri ethanol ve izo-propil alkol için methanol ve asetik asittekinden daha büyüktür. Saf su için Ø = $3,66^0$, izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için Ø = $9,74^0$ olup bu değer saf su için elde edilen değerin 2,66 katıdır. Kaolinit üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişimler şu şekilde izah edilebilir;

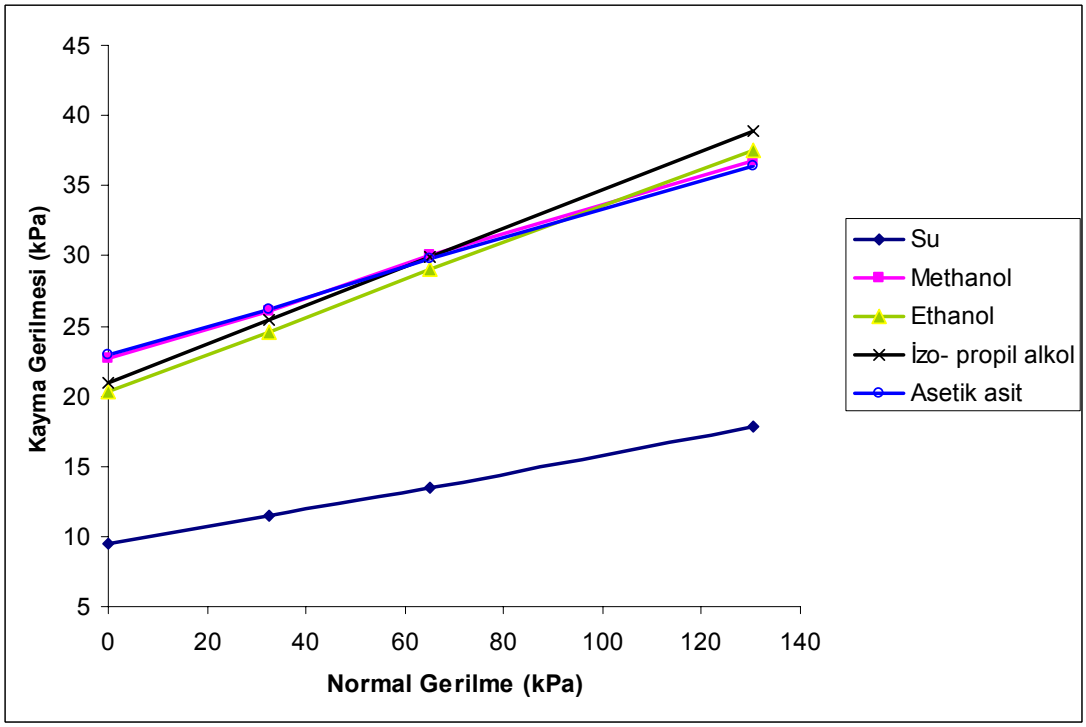
Kimyasal sıvılar varlığında hazırlanan numunelerde, azalan dielektrik sabiti ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte kaolinit tanecikleri arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve çekim alanı derinleşmektedir. Parçacıklar birbirini daha kuvvetli çekmekte ve taneciklerin içsel yapısındaki kohezyon değerleri artmaktadır. Boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ile birlikte itme kuvvetleri azalmaktadır. İtme kuvvetlerinin azalması ile verilen bir dış basınç altında tanecikler arasında kurulan mekaniksel kontakt sayısı artmakta, bu durum ise içsel sürtünme açısı değerlerinde bir artışa ve zeminin aşırı konsolide kil davranışı göstermesine sebep olmaktadır.



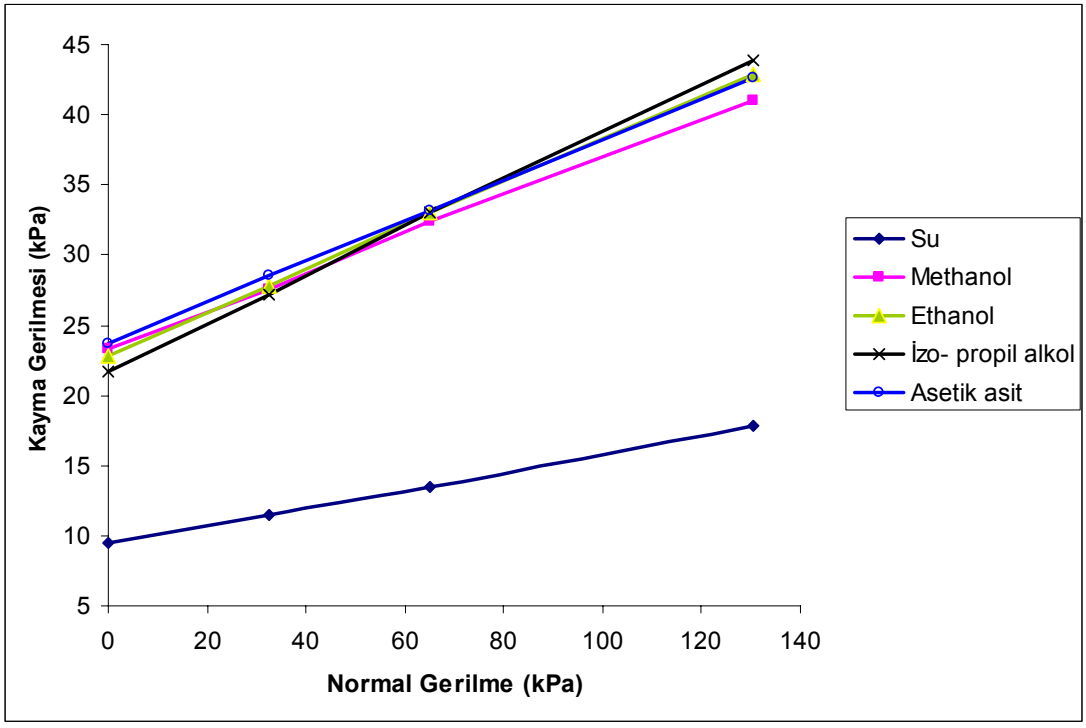
Şekil 5.69. Kaolinitte saf su ve kimyasalların %20 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



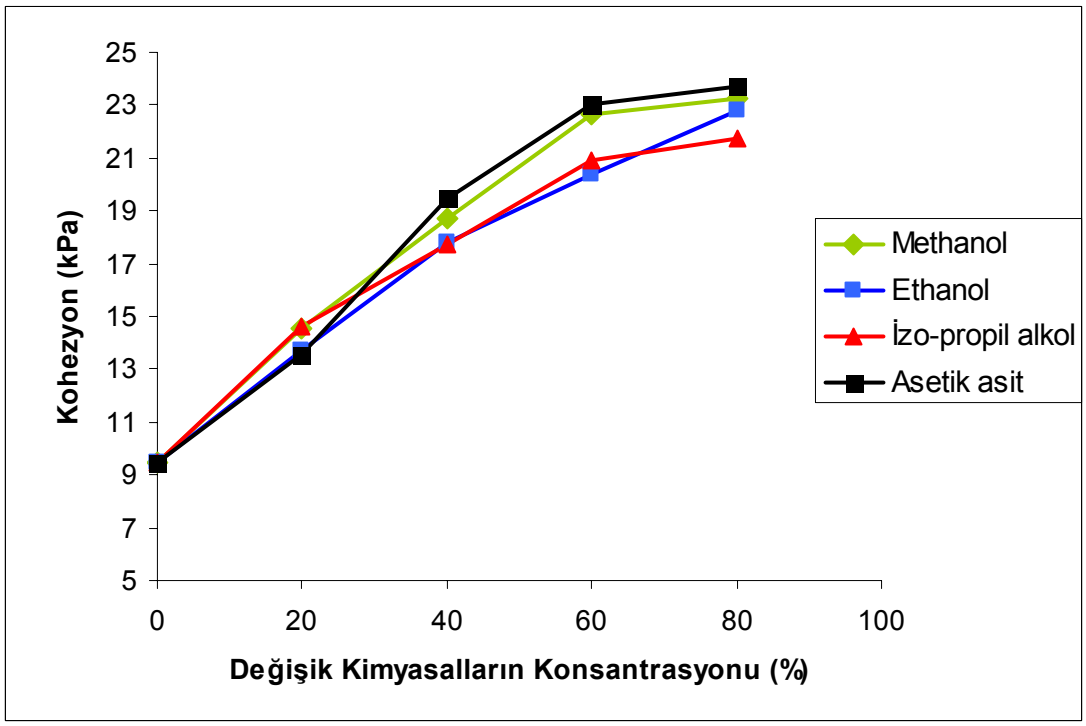
Şekil 5.70. Kaolinitte saf su ve kimyasalların %40 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



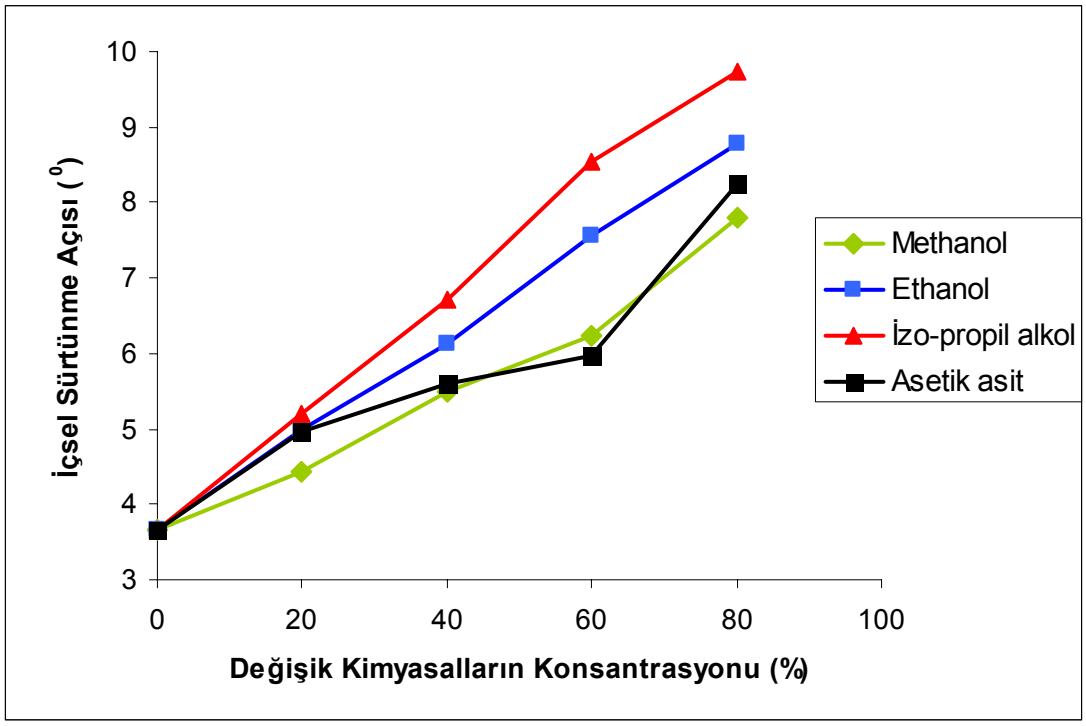
Şekil 5.71. Kaolinitte saf su ve değişik kimyasalların %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 5.72. Kaolinitte saf su ve değişik kimyasalların %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 5.73. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri değişimi

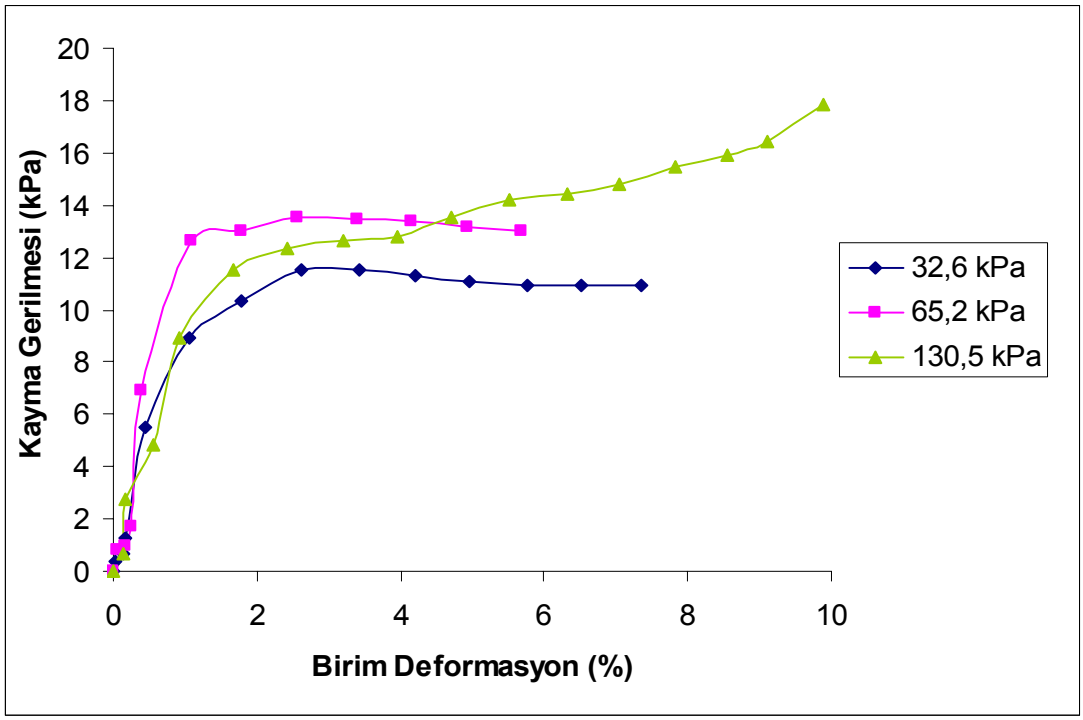


Şekil 5.74. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri (Ø)

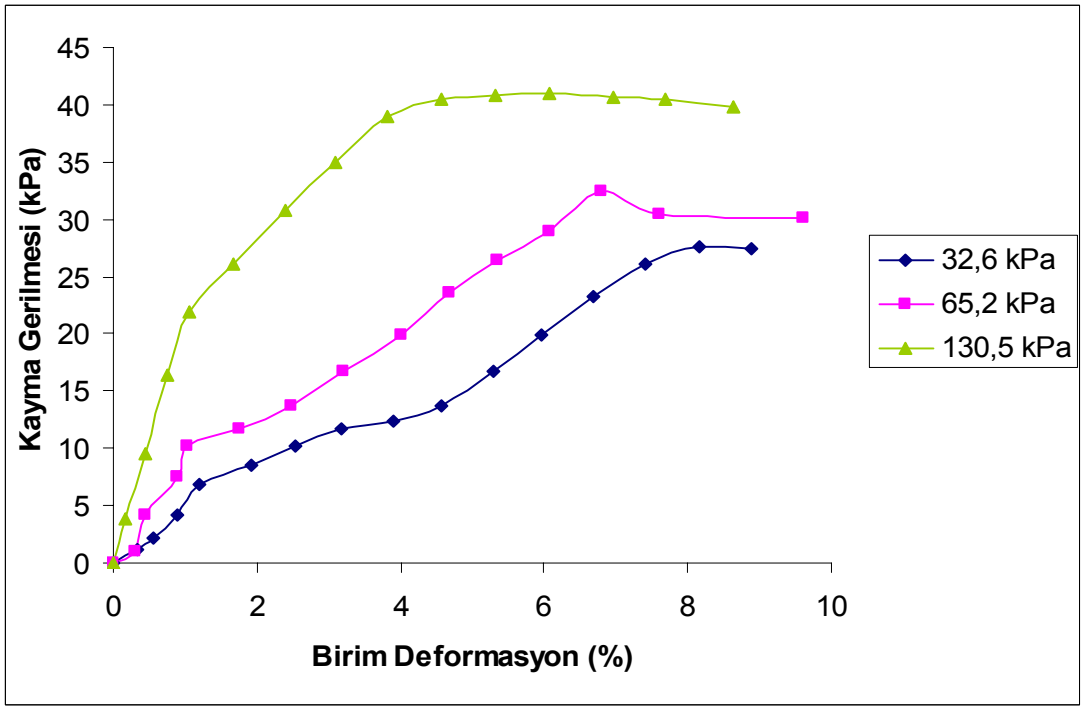
Deneylerin daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla, saf su ve her bir kimyasal sıvının %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde 32,6, 65,2 ve 130,5 kPa düşey gerilmeleri altında elde edilen kayma gerilmesi-birim deformasyon ($\tau - \varepsilon$) eğrileri Şekil 5.75. ile Şekil 5.79. arasında verilmiştir. Kimyasal sıvıların %20, %40 ve %60 konsantrasyonları için elde edilen grafiklerin de %80 konsantrasyon için elde edilen grafiklere benzer olması nedeniyle bu konsantrasyonlar için elde edilen grafikler burada verilmemiştir. Birim deformasyonlar %10 olduğu zaman veya numunede net kesilme gerçekleşmişse deneyler sonlandırılmıştır.

Saf su için yapılan deneylerde 32,6 ve 65,2 kPa için maksimum gerilmelere çok düşük birim deformasyonlarda ulaşılırken, 130,5 kPa için %10 birim deformasyona ulaşıldığında gerilme artışı hala devam etmektedir.

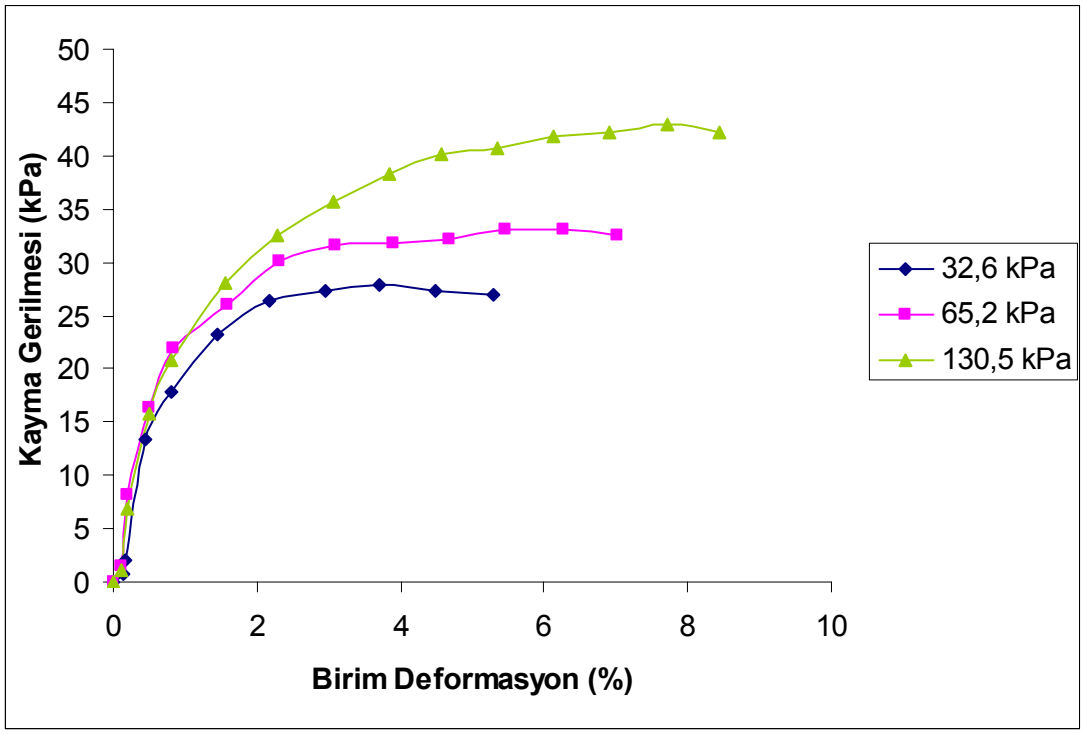
Kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonu için genel olarak %6 - %8 birim deformasyonlarda maksimum kayma gerilmesine ulaşılmakta, 130,5 kPa düşey gerilmesi altında ise genel olarak daha yüksek birim deformasyon değerlerinde maksimum kayma gerilmelerine ulaşılmaktadır.



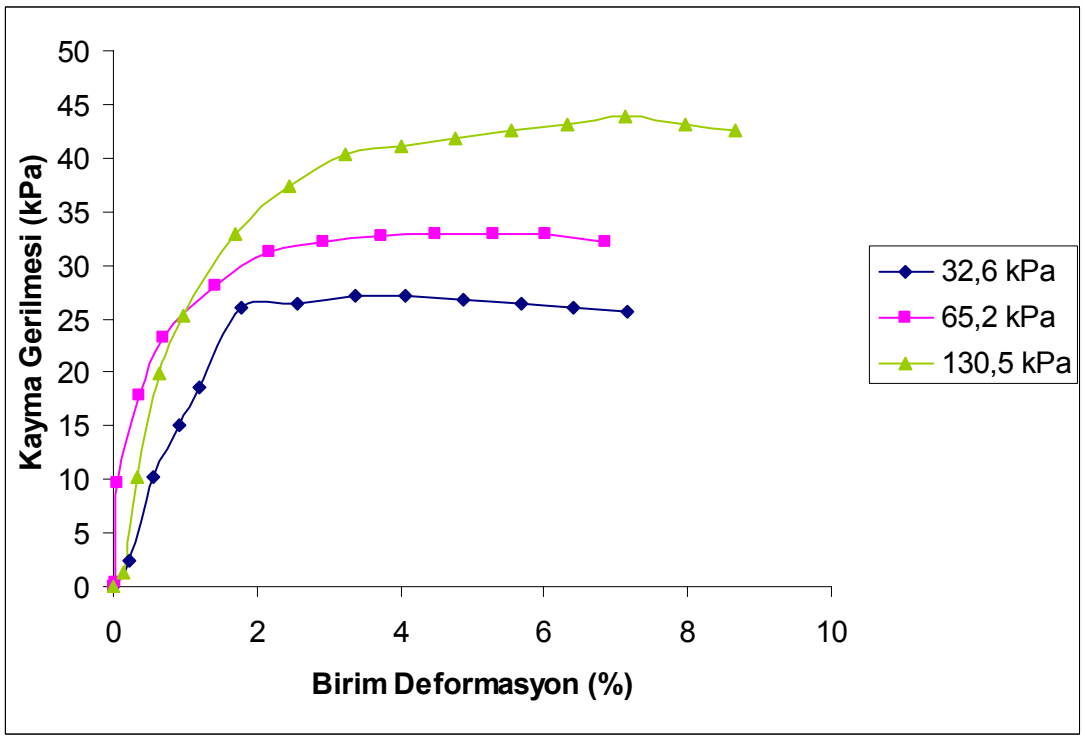
Şekil 5.75. Kaolinitte saf su için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



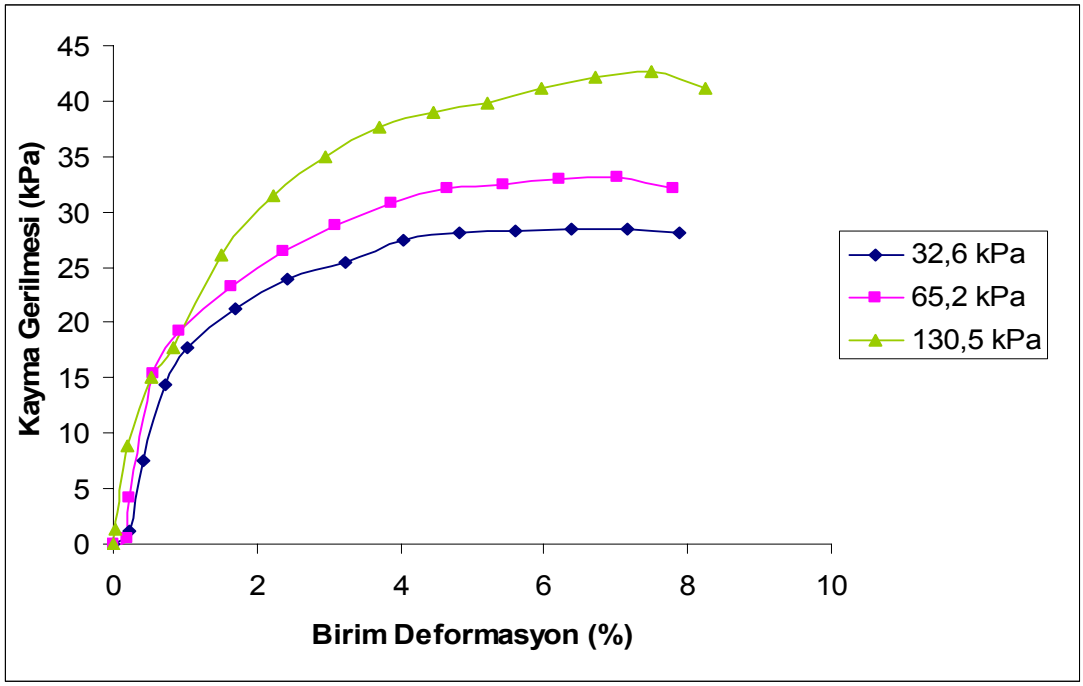
Şekil 5.76. Kaolinitte %80 methanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.77. Kaolinitte %80 ethanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.78. Kaolinitte %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.79. Kaolinitte %80 asetik asit konsantrasyonundaki sıvı ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri

5.4.2. Aksaray kili için kesme kutusu deney sonuçları

Aksaray kili için su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deney sonuçları Çizelge 5.13.'de, deneylerde elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø) ise Çizelge 5.14.'de verilmiştir.

Şekil 5.80., Şekil 5.83. arasında saf su ve kimyasal sıvıların her birinin değişik konsantrasyonları için elde edilen kırılma zarflarını gösteren grafikler, Şekil 5.84. ve Şekil 5.85.'de ise kohezyon ve içsel sürtünme açısı değişimleri gösterilmiştir.

Aksaray kilinde kimyasalların %20 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti zarflarının birbirine paralel olduğu ama aralarında belirgin bir şekilde büyüklük farkları olduğu görülmektedir. Sudan asetik aside doğru dielektrik sabitindeki azalmayla beraber bütün düşey gerilme kademeleri altında elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri artmaktadır. Ancak bu sıralama methanol için

Çizelge 5.13. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Düşey Gerilme, σ_n (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları İçin Elde Edilen Maksimum Kayma Gerilmesi Değerleri, τ_{max}(kPa)				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	32,6 65,2 130,5	23,5 25,0 27,8	–	–	–	–
Methanol	50 100 200	–	26,5 28,8 33,0	27,8 31,0 37,4	31,6 36,5 45,2	34,7 41,7 55,1
Ethanol	50 100 200	–	24,6 26,4 30,0	25,6 28,2 33,8	27,7 32,3 40,1	30,8 35,8 46,7
İzo-propil Alkol	50 100 200	–	25,4 27,4 31,3	27,6 30,8 36,8	29,7 34,5 42,8	32,9 40,1 53,2
Asetik asit	50 100 200	–	27,3 29,7 34,4	32,8 39,4 53,2	41,7 54,2 77,8	44,8 60,6 90,1

Çizelge 5.14. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneyinde elde edilen kayma mukavemeti parametreleri (c, Ø).

Su ve Kimyasal Sıvılar	Kayma Mukavemeti Parametreleri, c (kPa), Ø (^{0})	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları				
		% 0	% 20	% 40	% 60	% 80
Su	c Ø	22,09 2,52	–	–	–	–
Methanol	c Ø	–	24,39 3,83	24,48 5,68	27,47 7,84	27,96 11,81
Ethanol	c Ø	–	22,84 3,16	22,73 4,84	23,67 7,25	25,32 9,31
İzo-propil Alkol	c Ø	–	23,59 3,43	24,58 5,38	25,57 7,65	26,91 11,58
Asetik asit	c Ø	–	25,08 4,15	25,85 11,86	29,67 20,44	30,16 24,84

değişmektedir. En yüksek kayma gerilmesi değerleri asetik asit için elde edilmiş olup saf suda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerlerinin ortalama 1.2 katı civarındadır. Saf su için bulunan kohezyon değeri 22,09 kPa olup %20 konsantrasyonlarda en büyük kohezyon değeri asetik asit için bulunmuştur. Asetik asit için bulunan değer c = 25,08 kPa olup bu değer saf sudakinin 1,14 katıdır.

Kimyasalların %40 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti zarflarında dikkat çeken nokta kimyasal sıvıların varlığında yatayla yapılan açıda meydana gelen artışlardır. Bu artış kullanılan üç alkol için hemen hemen birbirine yakınken özellikle asetik asit için çok daha belirgin olmaktadır. Methanol ve izo-propil alkol için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri birbirlerine çok yakınken, bu değerler ethanol için elde edilen değerlerden büyüktür. En yüksek kayma gerilmesi değerleri asetik asit için elde edilmiş olup; 32,6 kPa için saf suda elde edilen değerin 1,40 katı, 65,2 kPa için 1,58 katı, 130,5 kPa için 1,91 katıdır. %40 konsantrasyon için elde edilen en büyük kohezyon değeri asetik asitte olup bu değer c = 25,85 kPa'dır ve saf sudakinin 1,17 katıdır.

Kimyasalların %60 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti zarfları davranışın %40 konsantrasyondakine benzediği görülmektedir. %60 konsantrasyonda methanol için bulunan maksimum kayma gerilmesi değerleri hem ethanol hem de izo-propil alkoldekinden büyük, asetik asittekinden küçüktür. En yüksek kayma gerilmesi değerleri asetik asit için elde edilmiş olup; 32,6 kPa için saf suda elde edilen değerin 1,77 katı, 65,2 kPa için 2,17 katı, 130,5 kPa için 2,80 katıdır. Bu artış oranları özellikle %60 konsantrasyonda asetik asitin mukavemet üzerine çok büyük etkisinin olduğunu göstermektedir. %60 konsantrasyon için de elde edilen en büyük kohezyon değeri asetik asitte olup bu değer c = 29,67 kPa'dır ve saf sudakinin 1,34 katıdır.

Kimyasalların %80 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti zarflarının %60 konsantrasyondakine benzer şekilde olduğu görülmektedir. En yüksek kayma gerilmesi değerleri asetik asit için elde edilmiş olup; 32,6 kPa için saf suda elde edilen değerin 1,91 katı, 65,2 kPa için 2,42 katı, 130,5 kPa için 3,24 katıdır. %80 konsantrasyon için de elde edilen en büyük kohezyon değeri asetik asitte olup bu değer c = 30,16 kPa'dır ve saf sudakinin 1,37 katıdır.

Aksaray kilinde kimyasal sıvılar varlığında artan konsantrasyon ve azalan

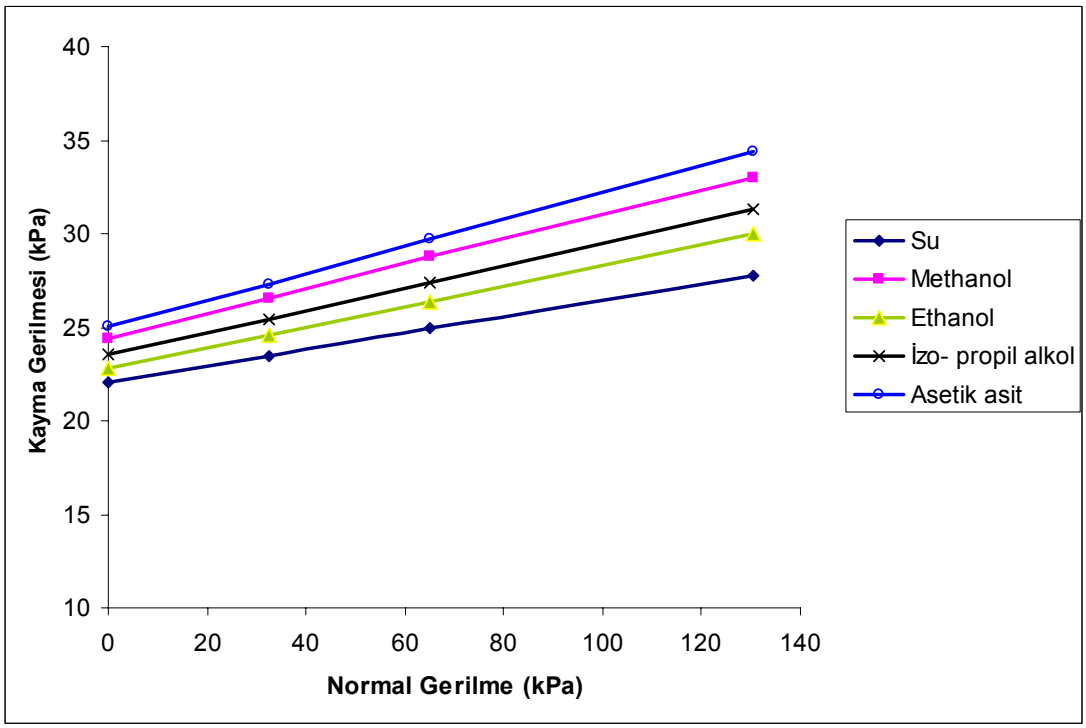
dielektrik sabitiyle birlikte bulunan maksimum kayma gerilmesi değerleri artmaktadır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir; Aksaray kilinin içerisinde kil fraksiyonu büyük oranda montmorillonit mineralinden oluşmaktadır. Bu sebeple bu kilde diffüz çift tabaka kalınlığı ve diffüz çift tabaka itme kuvvetleri büyüktür. Kimyasal sıvıların etkisi altında kilde bulunan bu diffüz çift tabaka çökmekte ve bunun neticesinde parçacıklar arasındaki itme kuvvetleri azalmaktadır. Parçacıklar arasındaki itme kuvvetinin azalmasından dolayı tanecikler arasında meydana gelen net kuvvet çekme kuvveti baskın olacak şekilde artmaktadır. Bu durum kil parçacıklarının birbirlerine daha da yaklaşmasına ve zemin yığınlarının büzülmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda permeabilite de artmaktadır. Permeabilite artışı nedeniyle daha düşük su muhtevasına sahip olan zemin, flokülasyonun etkisiyle adeta silt-ince kum gibi davranmaya başlamaktadır. Ayrıca bu yapı dolayısıyla tanecikler arasındaki mekaniksel kontaktlar daha etkin olmakta ve zemin uygulanan dış kuvvetlere karşı daha fazla mukavemet gösterebilmektedir. Böylece kimyasal sıvıların varlığında artan konsantrasyonla birlikte zeminlerin farklı düşey gerilmelerin etkisi altında ulaşabilecekleri maksimum kayma gerilmesi değerleri artmakta ve zemin aşırı konsolide olmuş kil gibi davranmaya başlamaktadır.

Grafiklerde de görüldüğü gibi asetik asitin varlığında sadece dielektrik sabitindeki azalma ile açıklanamayacak ölçüde mukavemette bir artış meydana gelmektedir. Bu durum Aksaray kili içerisindeki kalsit ve dolomit minerallerinin varlığından kaynaklanmaktadır. Karışım sıvısında değişik konsantrasyonlarda bulunan asetik asit, kalsit ve dolomit ile reaksiyona girmekte ve bunun sonucunda zincir şeklinde dış kuvvetlere karşı dayanımı yüksek olan bir yapı oluşmaktadır. Oluşan bu yapı adeta çimentolanmış bir davranış sergilemekte diğer kimyasallarda ulaşılan kayma gerilmelerine göre çok daha yüksek gerilmelere ulaşılmaktadır. Grafiklerde farklılık gösteren bir başka durum ise dielektrik sabiti ethanol ve izo-propil alkolden küçük olan methanol kimyasal sıvısının değişik konsantrasyonları için elde edilen kayma gerilmesi değerlerinin, ethanol ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerden yüksek çıkmasıdır. Bu durum methanol kimyasal sıvısının kısa zincirli yapısı sayesinde Aksaray kili içerisinde bulunan sepiyolit mineralleri arasına girerek daha iyi bir flokülasyon meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır.

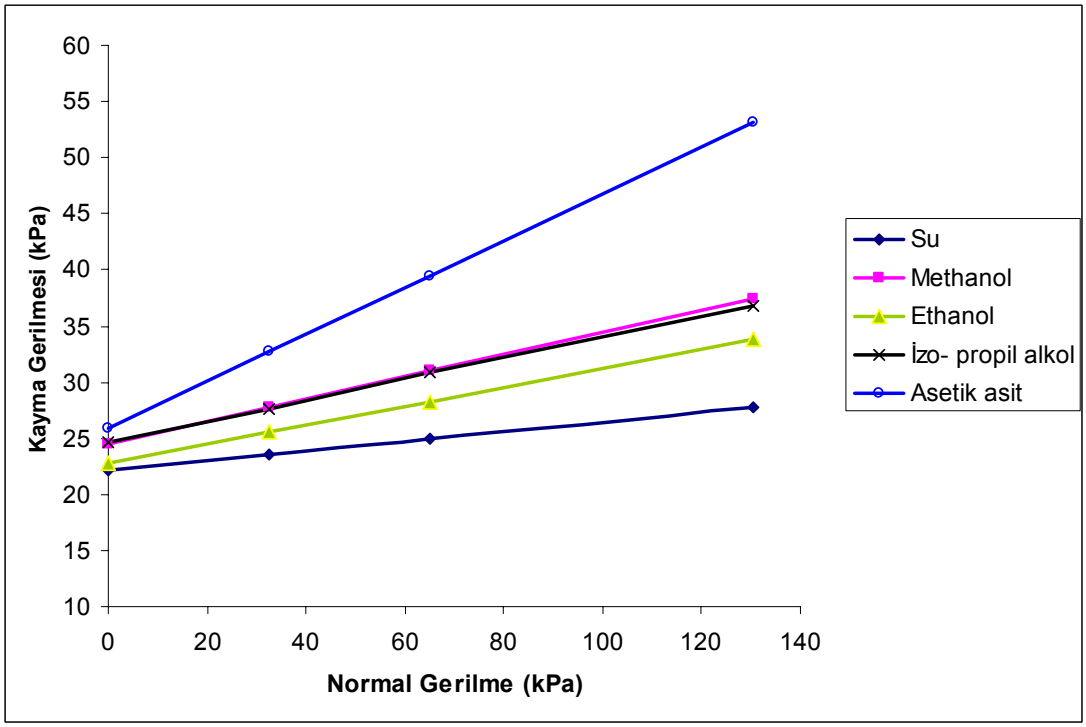
Aksaray kilinde tüm kimyasallarda artan konsantrasyon ile kohezyon

değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artış en fazla asetik asit varlığında olurken en az ethanol bulunması durumunda meydana gelmektedir. Yapılan deneylerde %40 konsantrasyona kadar kohezyonda çok büyük bir artış meydana gelmezken %60 konsantrasyon için daha büyük değerler elde edilmektedir. Methanol için diğer alkollere göre daha büyük kohezyon değerinin elde edilmesi kil içerisinde bulunan %33 miktarındaki sepiyolitten kaynaklanmaktadır. Methanol kısa zincirli olmasından dolayı diğer kimyasallara göre kilin iç yüzeylerine daha rahat nüfuz edebilmektedir. Böylelikle kil tanecikleri arasındaki kohezyonu da arttırmaktadır.

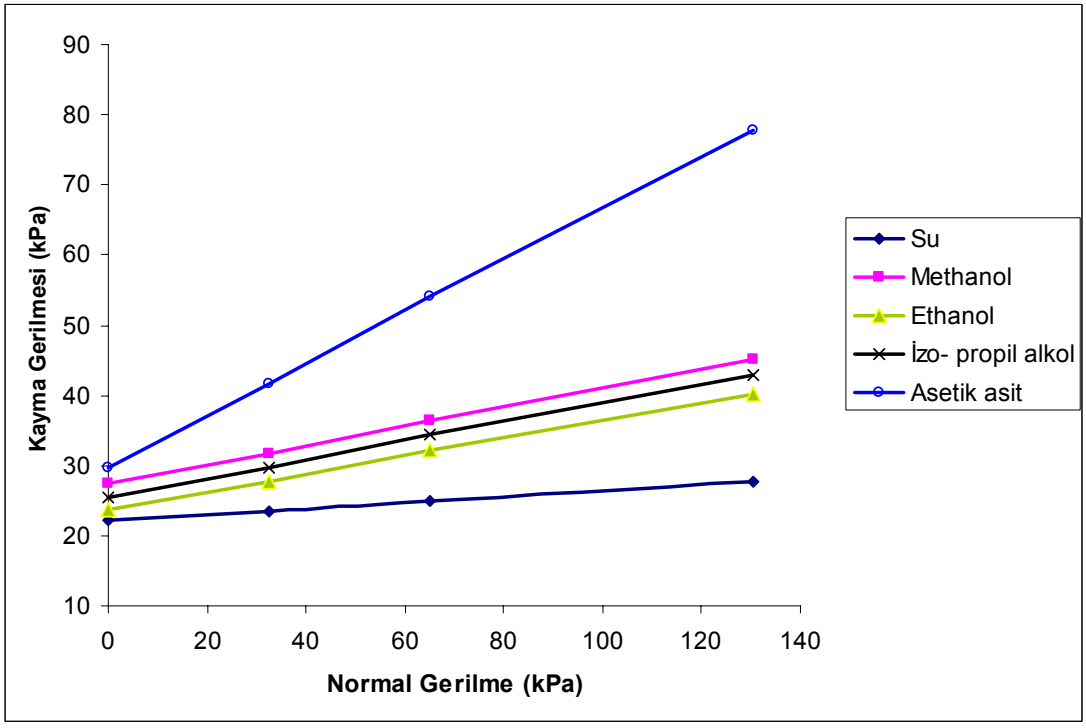
Kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte diffüz çift tabakanın göçmesi ve bununla birlikte itme kuvvetlerindeki azalma ile birlikte net çekim kuvveti artmakta ve tanecikler büzülerek adeta silt-ince kum formuna yaklaşmaktadır. Silt-ince kum formuna yaklaşan taneciklerin davranışı da bu yönde değişmektedir. Tanecikler arasında artan mekaniksel kontakt sayısı ile birlikte uygulanan herhangi bir dış kuvvete karşı oluşan sürtünme direncinde de bir artış olmakta ve zeminlerin bu davranışı ise içsel sürtünme açısındaki bir artış şeklinde ortaya çıkmaktadır. Methanol ve izo-propil alkol için elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri hemen hemen birbirine yakın olup, bu değerler ethanol için elde edilen değerlerden büyük asetik asit için elde edilen değerlerden küçüktür. Methanolde ethanoldekinden daha büyük değerlerin elde edilmesi yukarıda bahsedildiği gibi sepiyolit mineralinin varlığından izo-propil alkol de ise azalan dielektrik sabitinden kaynaklanmaktadır. Burada dikkat çeken bir durum ise asetik asitte içsel sürtünme açısında meydana gelen artışın diğer kimyasal sıvılarda meydana gelen artıştan aşırı derecede büyük olmasıdır. Bu durum dielektrik sabitindeki azalma ile birlikte Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonları sonucunda daha fazla büzülmüş ve sürtünme direnci daha fazla olan bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle %60 ve %80 konsantrasyonlar için deneye tabii tutulan numuneler adeta çimento ile stabilize edilmiş numune davranışı sergilemektedir. Methanolün %80 konsantrasyonu için elde edilen içsel sürtünme açısı ($Ø = 11,81^0$) olup, saf su için elde edilen içsel sürtünme açısı ($Ø = 2,52^0$) değerinin 4,7 katıdır. Asetik asitin %80 konsantrasyonu için $Ø = 24,84^0$ olup, saf su için elde edilen değerin 9,86 katı olmaktadır ki kayma direnci açısından bu değer artışı çok önemlidir.



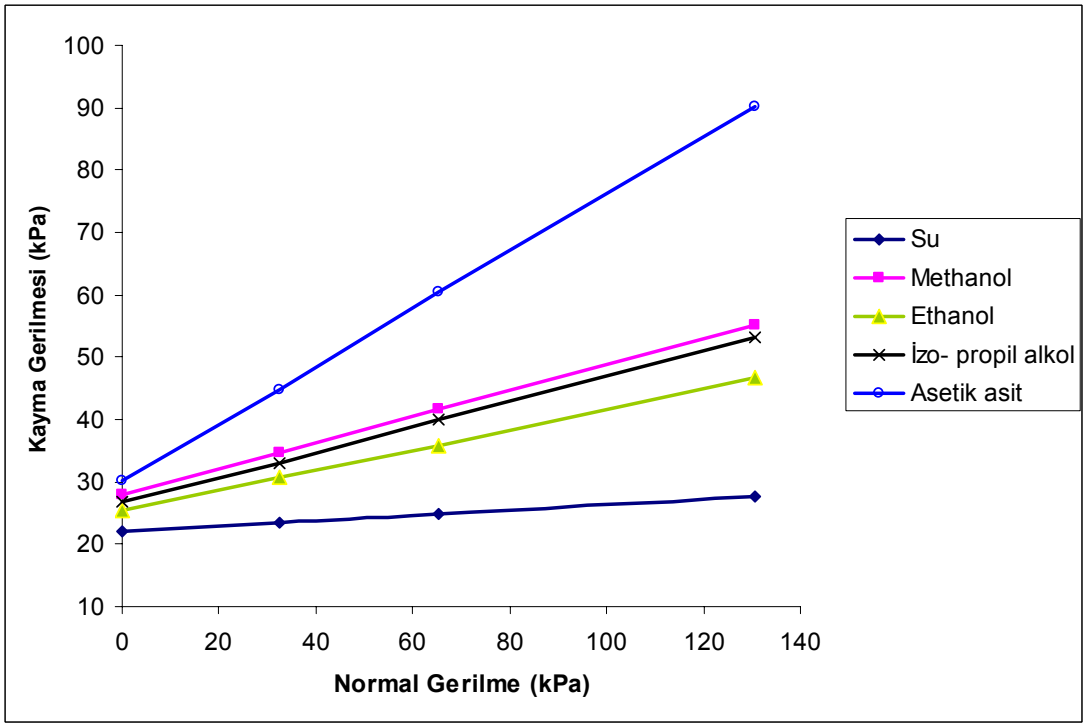
Şekil 5.80. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %20 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



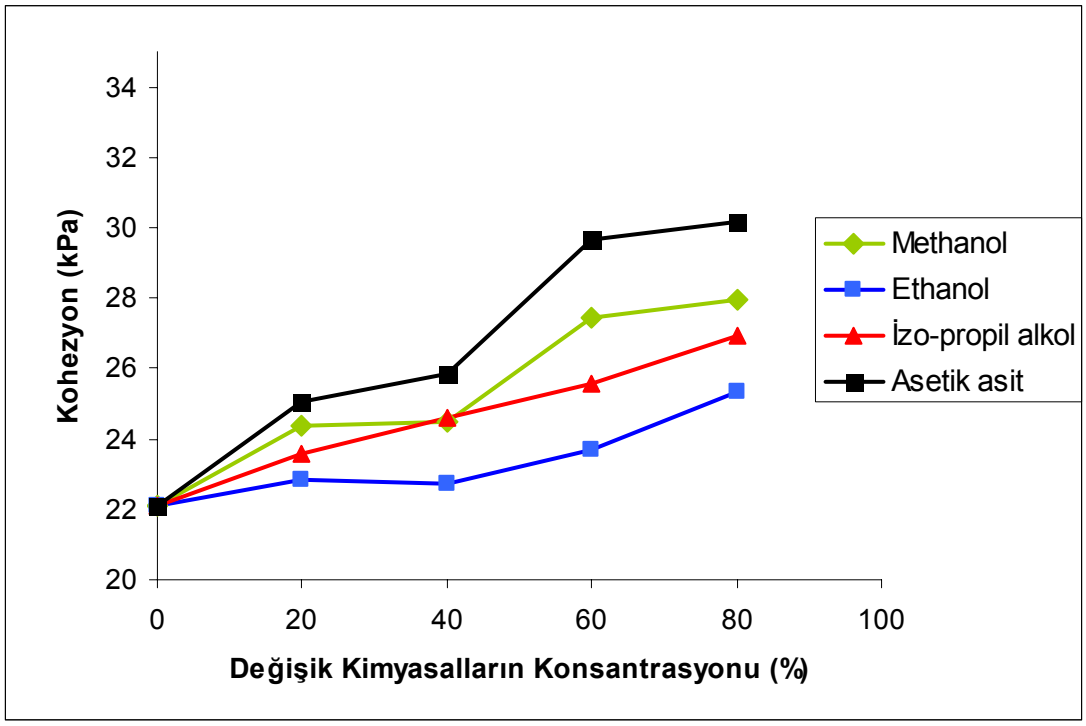
Şekil 5.81. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %40 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



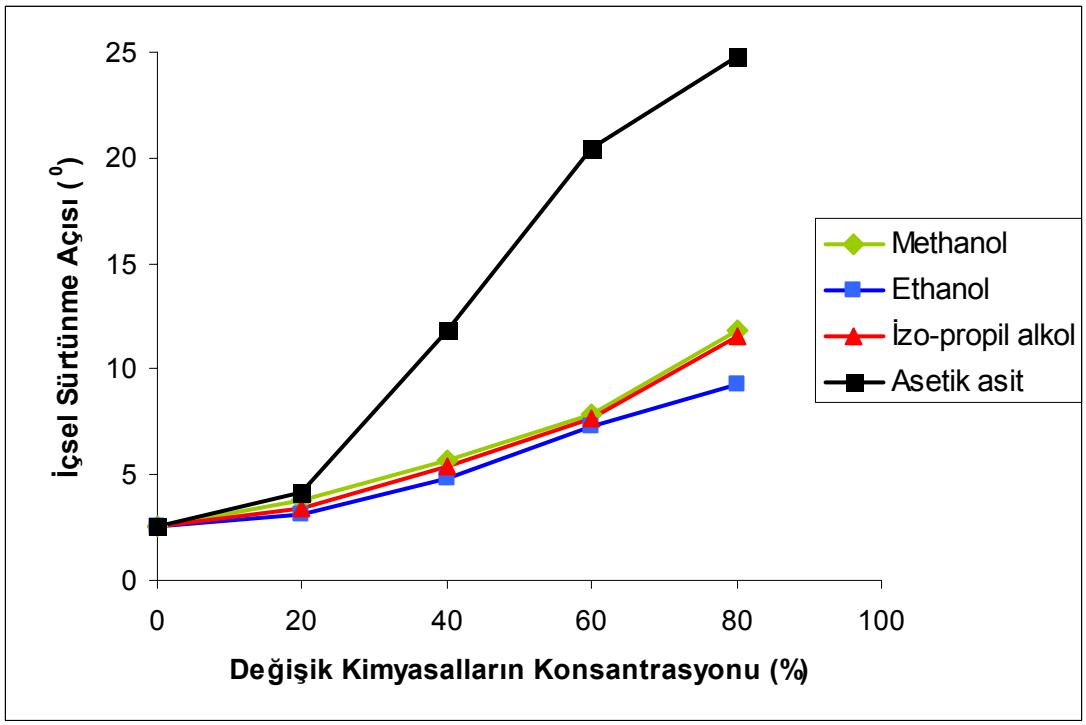
Şekil 5.82. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %60 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 5.83. Aksaray kilinde saf su ve değişik kimyasalların %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 5.84. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kohezyon (c) değerleri değişimi

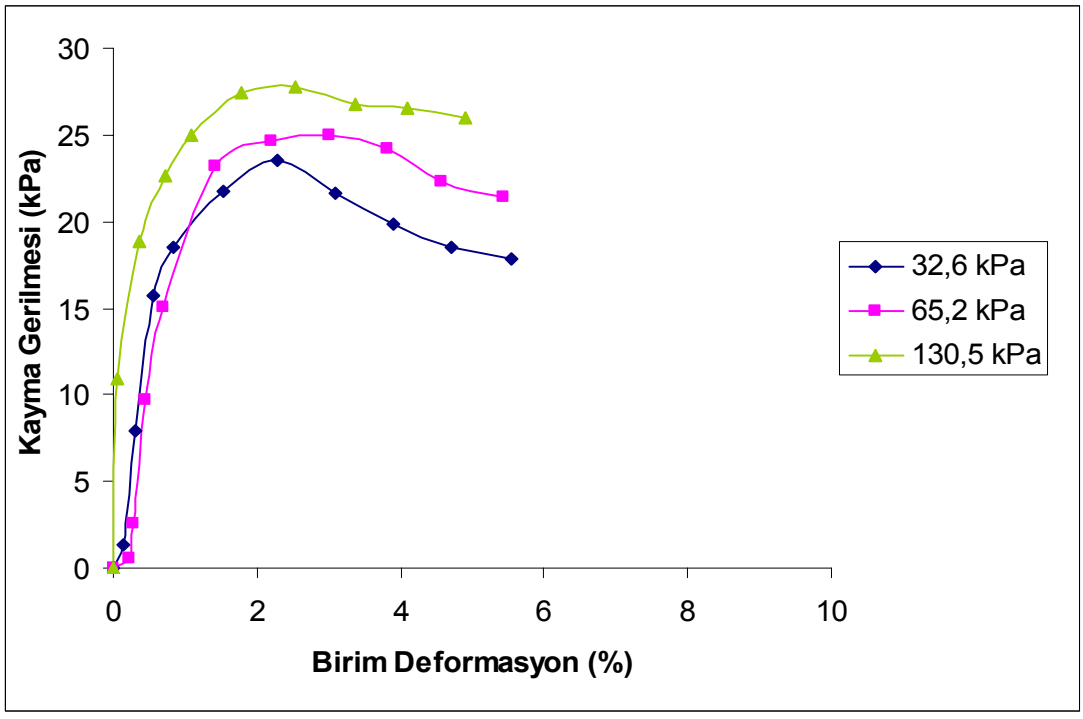


Şekil 5.85. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için kesme kutusu deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri (Ø)

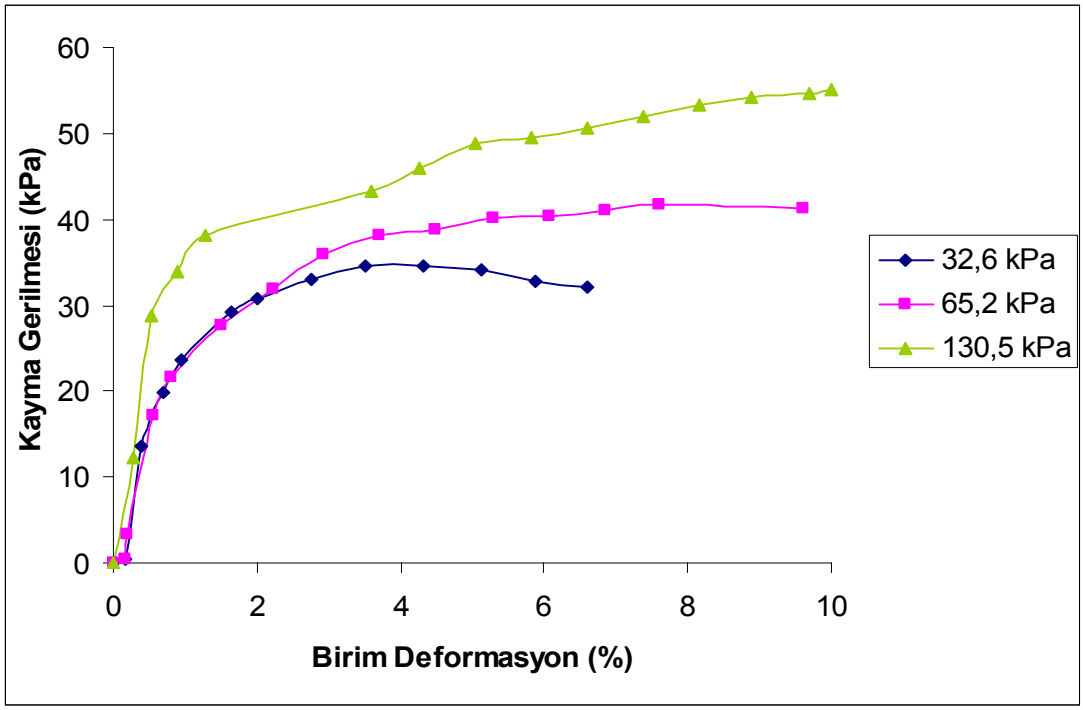
Aksaray kili üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinin daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla, saf su ve her bir kimyasal sıvının %80 konsantrasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde 32,6, 65,2 ve 130,5 kPa düşey gerilmeler altında elde edilen kayma gerilmesi-birim deformasyon ($\tau - \varepsilon$) eğrileri Şekil 5.86 ile Şekil 5.90 arasında verilmiştir. Birim deformasyonlar %10 olduğu zaman veya numunede net kesilme gerçekleşmişse deneyler sonlandırılmıştır.

Saf su için yapılan deneylerde elde edilen eğriler incelendiğinde maksimum gerilmelere tüm düşey gerilmeler için yaklaşık %3 birim deformasyon değerinde ulaşılmış ve %5-%6 birim deformasyon değerlerinde deneyler sonlandırılmıştır.

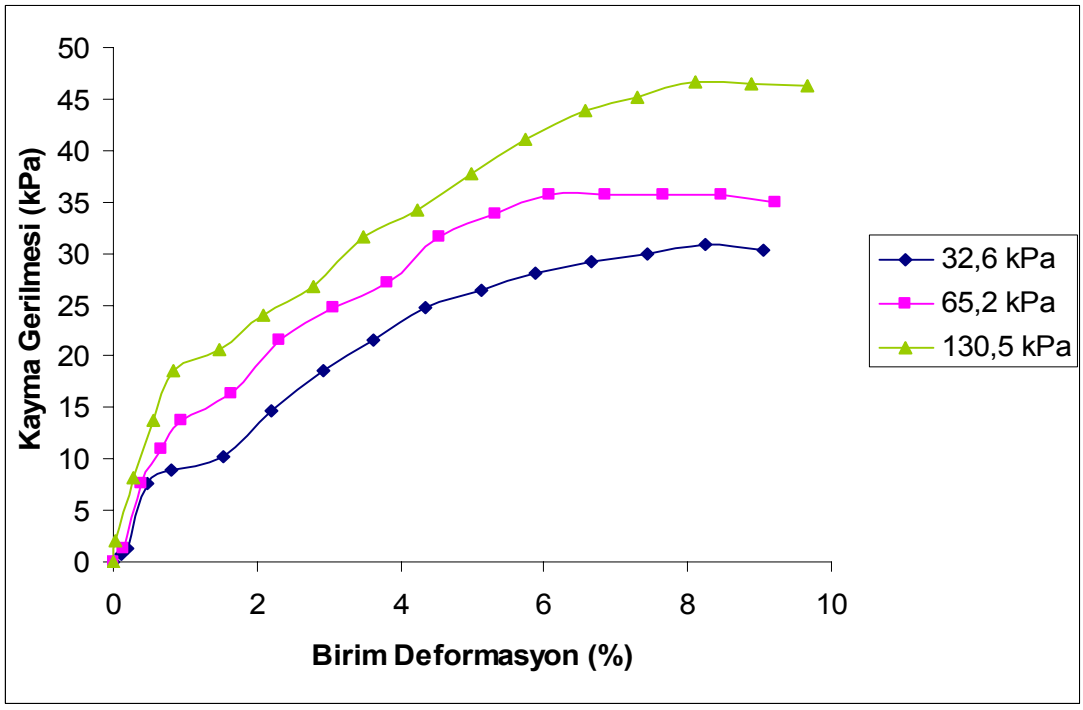
Şekil 5.86. ile Şekil 5.90. arasındaki farklı 4 kimyasal sıvının %80 konsantrasyonu için verilen eğriler incelendiğinde genel olarak %8 - %10 birim deformasyonlarda maksimum kayma gerilmesine ulaşılmış olduğu görülmektedir. 130,5 kPa düşey gerilmesi altında asetik asit haricindeki kimyasal sıvılar için kayma gerilmesi değerlerinin hala artmaya devam ettiği görülmektedir.



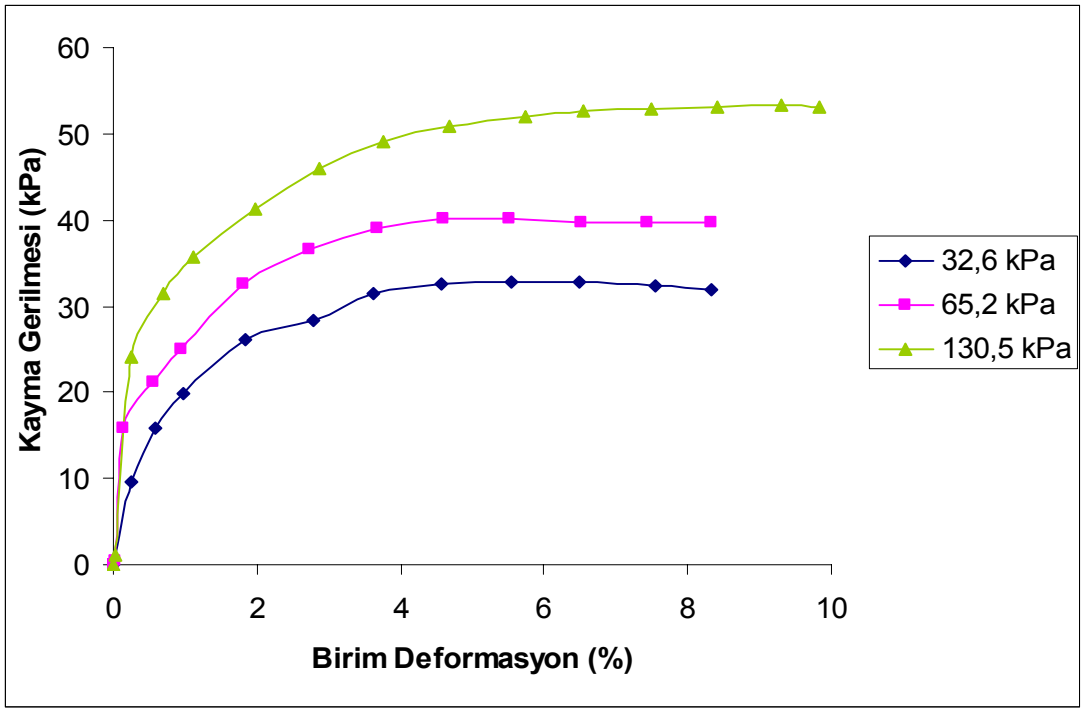
Şekil 5.86. Aksaray kilinde saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri



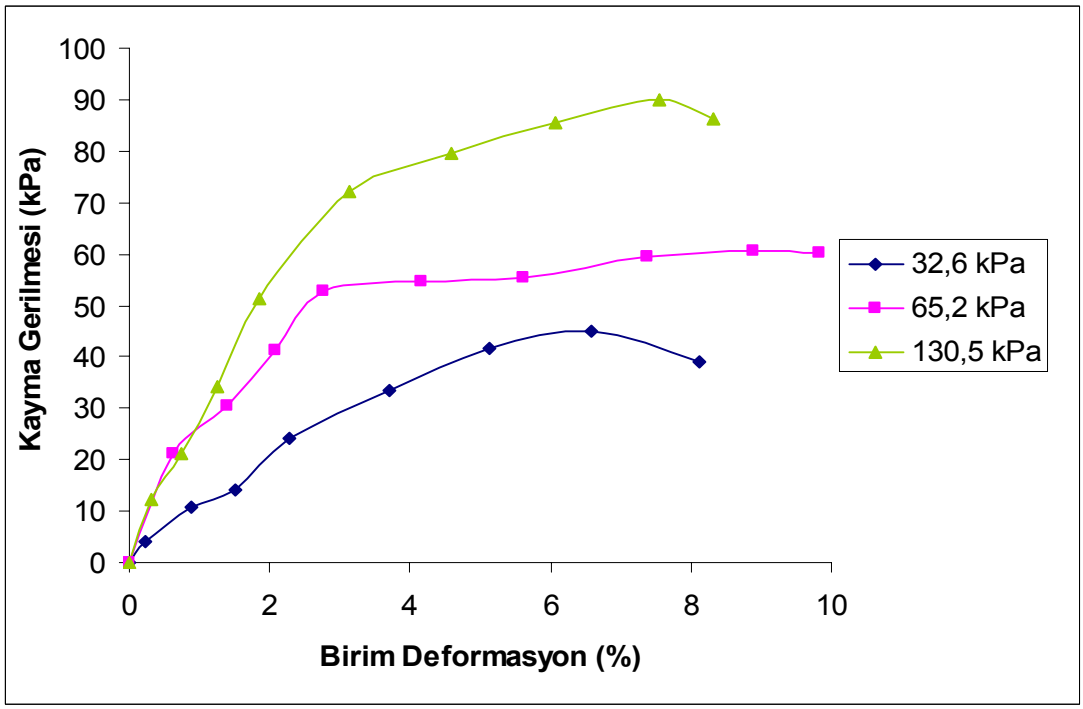
Şekil 5.87. Aksaray kilinde %80 methanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.88. Aksaray kilinde %80 ethanol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.89. Aksaray kilinde %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri



Şekil 5.90. Aksaray kilinde %80 asetik asit konsantrasyonu için kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma gerilmesi - birim deformasyon (σ – ε) eğrileri

5.5. Vane (Kanatlı Kesme) Deney Sonuçları

Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için laboratuarda yapılan deneylerden birisi de Vane kanatlı kesme deneyidir. Özellikle killi zeminlerde bu deney güvenilir sonuçlar vermektedir.

Vane kanatlı kesme deneyleri, deneylerde kullanılan iki farklı kil türü için su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için yapılmıştır. Deneylerde yapılabilecek hataları minimize etmek amacıyla her kimyasal sıvının her bir konsantrasyonu için 3'er adet numune üzerinde deneyler yapılmıştır.

5.5.1. Kaolinit için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları

Kaolinit üzerinde yapılan Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları Çizelge 5.15.'de verilmiştir. Şekil 5.153.'de ise kimyasal sıvıların her bir konsantrasyonu için yapılan 3'er adet deneyde elde edilen kohezyon değerlerinin ortalaması kimyasalların değişik konsantrasyonları için gösterilmiştir.

Kimyasalların %20 konsantrasyonu için kaolinitte kohezyon değerleri saf su ile hazırlanan numunelerde elde edilen kohezyon değerine göre çok fazla bir değişiklik göstermezken, bundan sonra artan kimyasal konsantrasyonu ile orantılı olarak kaolinitin kohezyon değerleri artmaktadır. %80 methanol konsantrasyonundaki sıvı ile hazırlanan numunelerden bulunan ortalama kohezyon değeri saf su için elde edilen ortalama kohezyon değerinin 2,04 katı olmuştur. Diğer kimyasalların % 80 konsantrasyonu için bu oran ethanolde 2,13 kat, izo-propil alkolde 2,20 kat ve asetik asitte 2,28 kat olmaktadır.

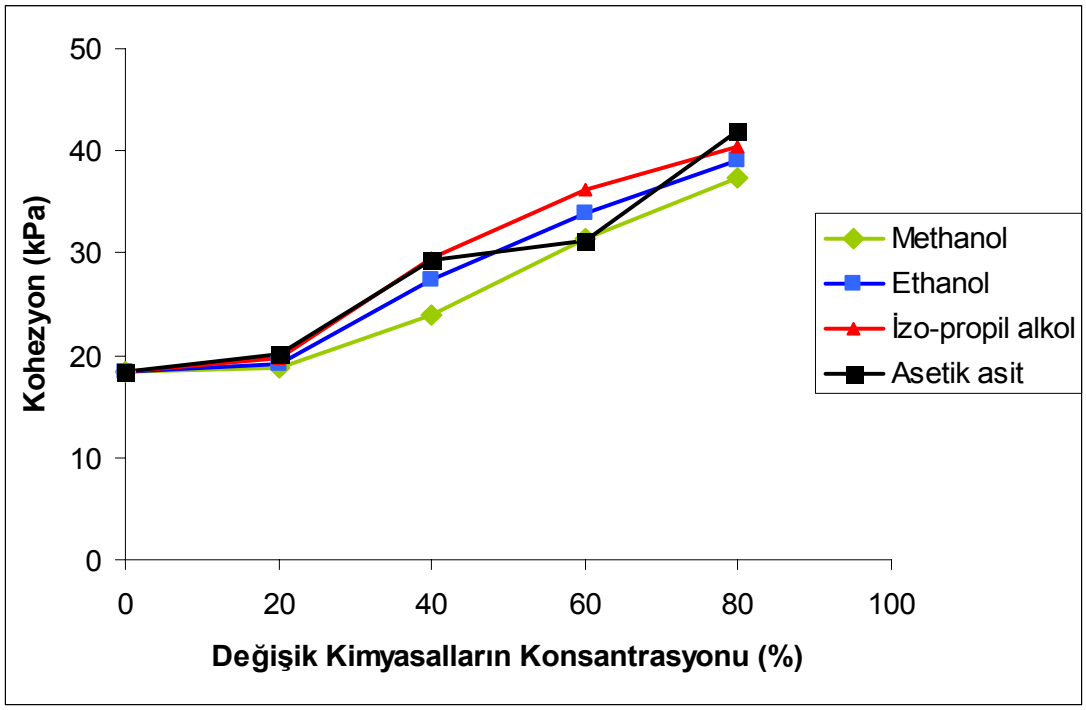
Asetik asit varlığında, asetik asitin %40 ve %60 konsantrasyonlarında bulunan kohezyon değerleri birbirine yakın olmaktadır. %60 konsantrasyon için kohezyonda çok fazla bir artış olmamaktadır. Bu durum asetik asitin etkisiyle kaolinitin yapısında meydana gelen bozulma ve jelleşme olayından kaynaklanmaktadır. Özellikle %60 asetik asit konsantrasyonunda boşluk sıvıları drene edilememekte ve numunelerin su muhtevası yüksek olduğu için kohezyon

Çizelge 5.15. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Kohezyon (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	c_1	18,0	–	–	–	–
	c_2	21,7				
	c_3	15,4				
	c_{ort}	**18,4**				
Methanol	c_1	–	18,2	24,3	31,3	37,9
	c_2		19,1	23,0	31,1	36,2
	c_3		18,9	24,8	32,0	38,1
	c_{ort}		**18,7**	**24,0**	**31,5**	**37,4**
Ethanol	c_1	–	19,0	31,7	38,0	31,6
	c_2		18,9	21,9	33,2	47,1
	c_3		19,6	28,6	30,5	38,5
	c_{ort}		**19,2**	**27,4**	**33,9**	**39,1**
İzo-propil Alkol	c_1	–	20,1	28,5	35,9	41,2
	c_2		19,4	30,3	37,8	39,4
	c_3		19,8	29,5	34,9	40,8
	c_{ort}		**19,8**	**29,4**	**36,2**	**40,5**
Asetik asit	c_1	–	19,1	30,8	33,9	40,3
	c_2		21,2	29,2	28,9	38,6
	c_3		20,2	28,1	30,8	47,0
	c_{ort}		**20,2**	**29,4**	**31,2**	**41,9**

değerlerinde meydana gelen artış daha az olmaktadır.

Kaolinit için elde edilen kohezyon değerleri tanecikler arasında oluşan fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimi ile orantılı olup, boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ve artan konsantrasyonla birlikte tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve taneciklerin flokülasyonu (topaklanma) ile tanecikler küme formuna girmekte böylelikle zemin daha fazla mukavemet göstermeye başlamaktadır.



Şekil 5.91. Kaolinitte kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deneyinde elde edilen ortalama kohezyon (c_{ort}) değerleri

5.5.2. Aksaray kili için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları

Aksaray kili üzerinde yapılan Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları Çizelge 5.16.'da verilmiştir. Şekil 5.92.'de ise kimyasalların farklı konsantrasyonları için yapılan üç adet deneyde bulunan ortalama kohezyon değerlerinin değişimi gösterilmiştir.

Methanolün %20 konsantrasyonu için kilin kohezyon değeri saf su için elde edilen kohezyon değerine göre çok fazla bir değişiklik göstermezken, bundan sonra artan konsantrasyonla birlikte kohezyon değerleri artmaktadır. %80 konsantrasyonda hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama kohezyon değeri saf su için elde edilen ortalama kohezyon değerinin 4,14 katı olmuştur.

Ethanolde de methanoldekine benzer bir kohezyon değişimi eğilimi bulunmakla beraber elde edilen kohezyon değerleri methanolde ki kadar fazla değildir. %80 ethanol konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerden elde edilen ortalama kohezyon değeri saf su için bulunan değerin 3,09 katı olmaktadır.

Çizelge 5.16. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deney sonuçları

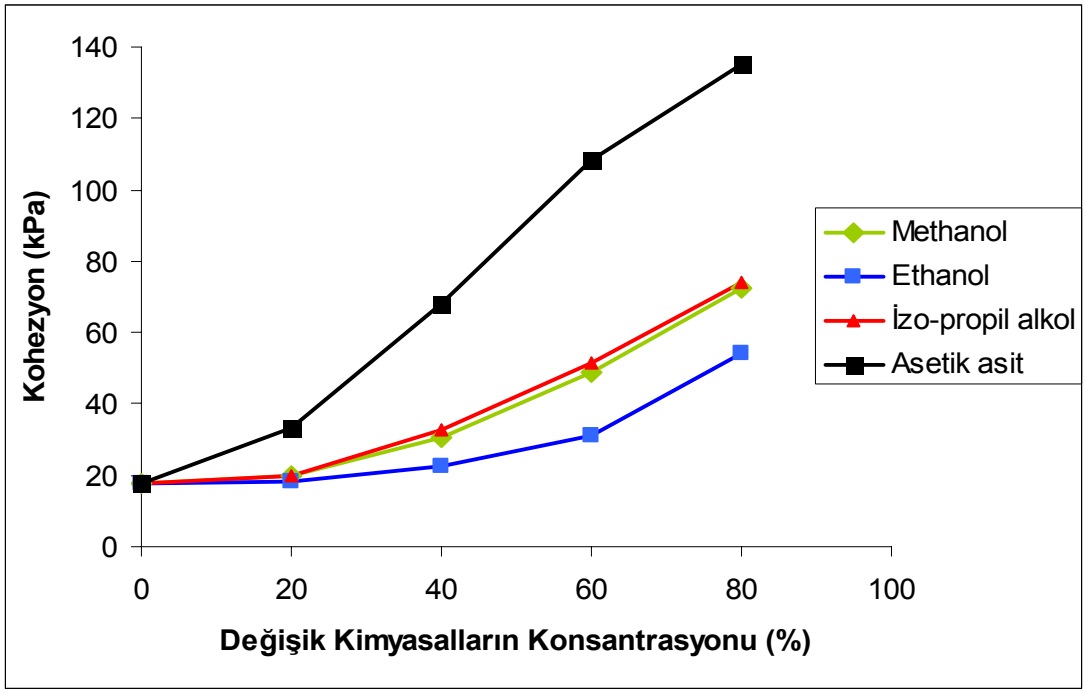
Su ve Kimyasal Sıvılar	Kohezyon (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	c_1	17,7	–	–	–	–
	c_2	17,2				
	c_3	17,5				
	c_{ort}	**17,5**				
Methanol	c_1	–	19,5	31,4	49,2	73,2
	c_2		19,9	29,4	48,8	68,2
	c_3		19,6	30,2	49,2	75,6
	c_{ort}		**19,7**	**30,3**	**49,1**	**72,3**
Ethanol	c_1	–	18,9	22,7	27,4	56,0
	c_2		17,5	21,8	28,1	51,0
	c_3		18,0	22,5	37,9	55,0
	c_{ort}		**18,2**	**22,3**	**31,1**	**54,0**
İzo-propil Alkol	c_1	–	19,8	32,2	49,7	69,5
	c_2		20,3	33,1	53,8	75,2
	c_3		19,2	33,0	50,4	77,0
	c_{ort}		**19,8**	**32,8**	**51,3**	**73,9**
Asetik asit	c_1	–	33,0	67,0	75,0	136,0
	c_2		28,3	71,0	130,2	128,0
	c_3		39,2	66,0	120,0	141,0
	c_{ort}		**33,5**	**68,0**	**108,4**	**135,0**

İzo-propil alkol için bulunan kohezyon değerleri methanol için bulunan değerlerle hemen hemen aynıdır . %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için bulunan ortalama kohezyon değeri saf su için bulunan değerin 4,23 katı olmaktadır.

Asetik asit ile hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneylerde artan konsantrasyonla birlikte kohezyonda meydana gelen artışlar diğer kimyasal sıvılar için elde edilen değerlerden aşırı şekilde büyük olmuştur. Özellikle %60 ve %80 asetik asit konsantrasyonlarında numuneler kireç veya çimento ile stabilize edilmiş gibi sertleşmiş ve 2 ve 3 Nolu yayların numuneleri kesemeyeceği düşünülerek

deneylerde daha fazla tork uygulayabilen 4 Nolu yay kullanılmıştır. %60 asetik asit konsantrasyonu için bulunan ortalama kohezyon değeri saf su için bulunan ortalama kohezyon değerinin 6,20 katı ve %80 konsantrasyon için ise 7,72 katı olmuştur.

Aksaray kili üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için yapılan diğer deneylerdeki sonuçlarla paralellik arz etmekte olup kimyasalların etkisiyle meydana gelen kohezyon artışlarının sebepleri aynı mekanizmalardır.



Şekil 5.92. Aksaray kilinde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için Vane (kanatlı kesme) deneyinde elde edilen ortalama kohezyon (c_{ort}) değerleri

5.6. Cep Penetrometresi İle Elde Edilen Mukavemet Değerleri

Laboratuarda yapılan çalışmalarda numuneler ön konsolidasyon kaplarından çıkarılırken diğer deneyler için bir ön çalışma olması ve fikir vermesi açısından cep penetrometresi ile numunelerin uç mukavemetleri belirlenmiştir. Bulunan uç mukavemeti değerleri kaolinit için Çizelge 5.17.'de, Aksaray kili için Çizelge 5.18.'de verilmiştir. Her iki kilde de bulunan uç mukavemeti değerleri değişimi diğer

kayma mukavemeti deneylerinde elde edilen değerlerle paralellik göstermekte ve genel olarak artan konsantrasyonla birlikte uç mukavemeti değerleri artmaktadır.

Kaolinitte asetik asitin %60 konsantrasyonu için bulunan uç mukavemeti değeri diğer deneylerdeki gibi burada da farklılık göstermektedir.

Aksaray kilinde asetik asit varlığında uç mukavemeti artışları çok belirgin olup %80 konsantrasyon için numune üzerinde cep penetrometresi ile ölçüm yapmak bile mümkün olmamıştır. Asetik asitin %60 konsantrasyonunda ise bulunan uç mukavemeti değeri aletin ölçüm sınır değeri olup 500 kPa'a ulaşılmıştır.

Çizelge 5.17. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için cep penetrometresi ile elde edilen uç mukavemet ($q_{uç}$) değerleri

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uç Mukavemeti (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	qu	26,0	-	-	-	-
Methanol	qu	-	28,0	38,0	57,0	64,0
Ethanol	qu	-	28,0	43,0	60,0	68,0
İzo-propil alkol	qu	-	28,0	45,0	61,0	70,0
Asetik Asit	qu	-	28,0	42,0	50,0	68,0

Çizelge 5.18. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için cep penetrometresi ile elde edilen uç mukavemet ($q_{uç}$) değerleri

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uç Mukavemeti (kPa)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	qu	37,5	-	-	-	-
Methanol	qu	-	46,0	65,0	75,0	83,0
Ethanol	qu	-	45,0	51,0	60,0	67,5
İzo-propil alkol	qu	-	46,5	67,5	75,0	81,0
Asetik Asit	qu	-	75,0	105,0	500,0	ÖY

ÖY :Ölçüm yapılamadı.

5.7. Konsolidasyon Deney Sonuçları

Killerin sıkışma özellikleri üzerinde boşluk sıvısı olarak kimyasal sıvıların çok önemli etkileri vardır. Bu etkilerin belirlenmesi için kimyasal sıvılar varlığında yapılan konsolidasyon deneylerinde konsolidasyon parametreleri ve boşluk oranı değişimleri belirlenmiştir. Konsolidasyon parametrelerinde ve boşluk oranlarında meydana gelen değişimler tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal değişikliklere bağlı olarak açıklanmıştır. Kil tanecikleri arasındaki boşluk sıvısında meydana gelen değişiklikler kil matrisinin davranışında çok önemli oranda farklılaşmaya neden olmaktadır (Tuncan 1993).

Konsolidasyon deneyleri, deneylerde kullanılan iki farklı kil türü ile su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için yapılmıştır. Numuneler ilk önce 100 kPa basınca kadar ön konsolide edilmiş ve daha sonra ringler içerisine 3 adet konsolidasyon deney numunesi alınarak, konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları her iki kil türü için ayrı ayrı verilmiştir.

5.7.1. Kaolinit için konsolidasyon deney sonuçları

Kaolinit üzerinde her bir konsantrasyon için yapılan üçer adet konsolidasyon deneyinden bulunan sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisi (C_s) değerleri Çizelge 5.19.'da verilmiştir. Çizelgede verilen C_{cort} (ortalama sıkışma indisi) ise 3 adet sıkışma indisi değerinin ortalamasını göstermektedir. Çizelgedeki şişme indisi değerleri ise ortalama sıkışma indisine en yakın sıkışma indisinin elde edildiği deneyde bulunan şişme indisi değeridir. Çizelgedeki sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde methanol, ethanol ve izo-propil alkolde artan konsantrasyonla birlikte sıkışma indisi değerleri belirgin bir şekilde azalmakta ve her üçünde de hemen hemen benzer bir değişim meydana gelmektedir. Yalnız asetik asit için elde edilen sıkışma indisi değerlerinin bu üç alkolden farklı olduğu ve saf suya göre çok az değişim gösterdiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.19. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen sıkışma indisi (C_c) değerleri

Su ve Kimyasal Sıvılar	Sıkışma İndisi ve Şişme İndisi Değerleri (C_c) ve (C_s)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	C_{c1}	0,328	–	–	–	–
	C_{c2}	0,323				
	C_{c3}	0,338				
	C_{cort}	**0,329**				
	C_s	0,0682	-	-	-	-
Methanol	C_{c1}	–	0,324	0,290	0,246	0,222
	C_{c2}		0,298	0,281	0,234	0,218
	C_{c3}		0,351	0,295	0,251	0,241
	C_{cort}		**0,324**	**0,289**	**0,244**	**0,227**
	C_s	-	0,0625	0,0565	0,0491	0,0421
Ethanol	C_{c1}	–	0,315	0,283	0,240	0,226
	C_{c2}		0,318	0,291	0,243	0,218
	C_{c3}		0,306	0,276	0,228	0,230
	C_{cort}		**0,313**	**0,283**	**0,237**	**0,225**
	C_s	-	0,0627	0,0528	0,0433	0,0410
İzo-propil Alkol	C_{c1}	–	0,324	0,305	0,251	0,232
	C_{c2}		0,330	0,297	0,240	0,219
	C_{c3}		0,317	0,310	0,259	0,239
	C_{cort}		**0,324**	**0,304**	**0,250**	**0,229**
	C_s	-	0,0594	0,0490	0,0398	0,0390
Asetik asit	C_{c1}	–	0,327	0,316	0,302	0,297
	C_{c2}		0,331	0,318	0,291	0,301
	C_{c3}		0,319	0,309	0,314	0,285
	C_{cort}		**0,326**	**0,314**	**0,302**	**0,294**
	C_s	-	0,0648	0,0612	0,0539	0,0509

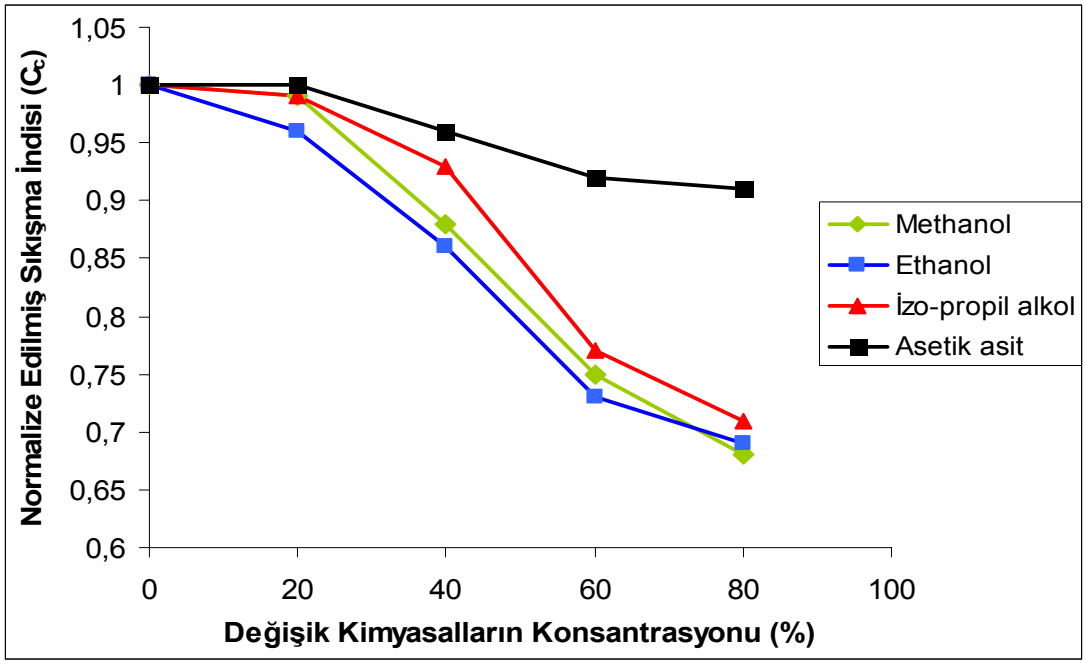
Deney sonuçlarının birbirleriyle daha net olarak karşılaştırılabilmesi için normalize edilmiş sıkışma indisi ve normalize edilmiş şişme indisi değerleri tanımlanmıştır. Bunun için saf suda bulunan sıkışma ve şişme indisi değerleri 1 kabul

edilmiştir. Kimyasalların değişik konsantrasyonları için bu indislerin bulunması ise; kimyasallar için elde edilen sıkışma ve şişme indisi değerlerinin saf su için bulunan sıkışma ve şişme indisi değerlerine oranlanması şeklindedir. Örneğin; saf su için sıkışma indisi değeri C_c = 0,328 ve methanolün %20 konsantrasyonu için sıkışma indisi değeri C_c = 0,324 olup, methanolün %20 konsantrasyonu için elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değeri, C_c = 0,324/0,328 = 0,99'dur.

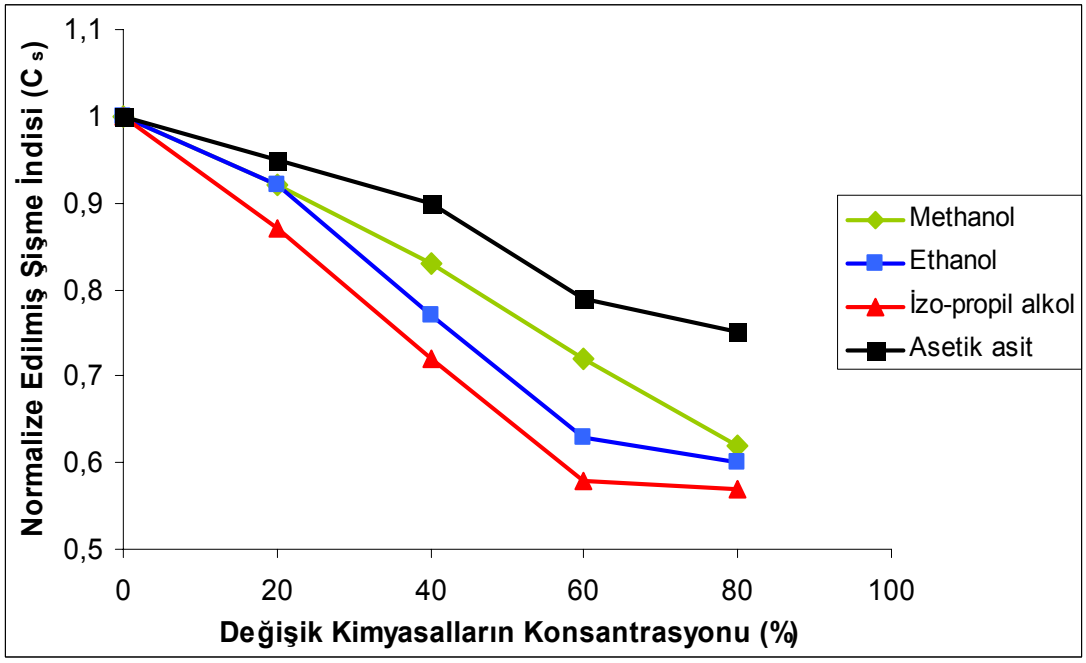
Çizelge 5.20.'de verilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri Şekil 5.93. ve Şekil 5.94.'de kimyasalların değişik konsantrasyonları için ve Şekil 5.95. ve Şekil 5.96.'da ise dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak grafiksel olarak verilmiştir.

Çizelge 5.20. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri

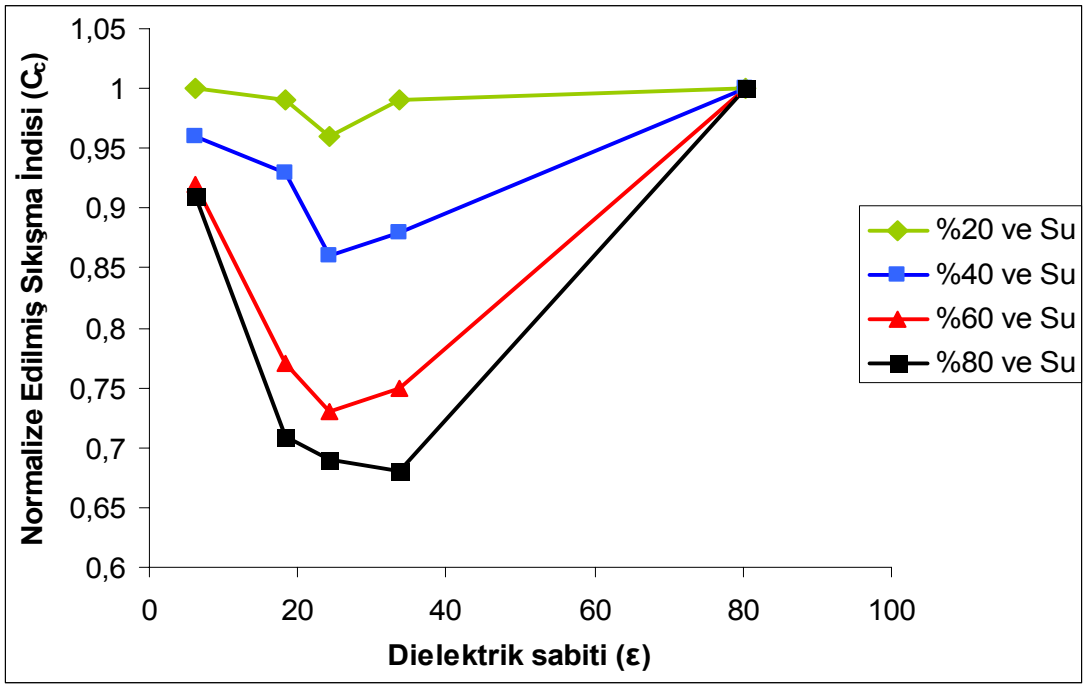
Su ve Kimyasal Sıvılar	Sıkışma İndisi (C_c)	Normalize Edilmiş Sıkışma İndisi (Cc)	Şişme İndisi (Cs)	Normalize Edilmiş Şişme İndisi (Cs)
Su	0,328	1	0,0682	1
%20 Methanol	0,324	0,99	0,0625	0,92
%40 Methanol	0,290	0,88	0,0565	0,83
%60 Methanol	0,246	0,75	0,0491	0,72
%80 Methanol	0,222	0,68	0,0421	0,62
%20 Ethanol	0,315	0,96	0,0627	0,92
%40 Ethanol	0,283	0,86	0,0528	0,77
%60 Ethanol	0,240	0,73	0,0433	0,63
%80 Ethanol	0,226	0,69	0,0410	0,60
%20 İzo-propil alkol	0,325	0,99	0,0594	0,87
%40 İzo-propil alkol	0,306	0,93	0,0490	0,72
%60 İzo-propil alkol	0,251	0,77	0,0398	0,58
%80 İzo-propil alkol	0,232	0,71	0,0390	0,57
%20 Asetik Asit	0,327	1	0,0648	0,95
%40 Asetik Asit	0,316	0,96	0,0612	0,90
%60 Asetik Asit	0,302	0,92	0,0539	0,79
%80 Asetik Asit	0,297	0,91	0,0509	0,75



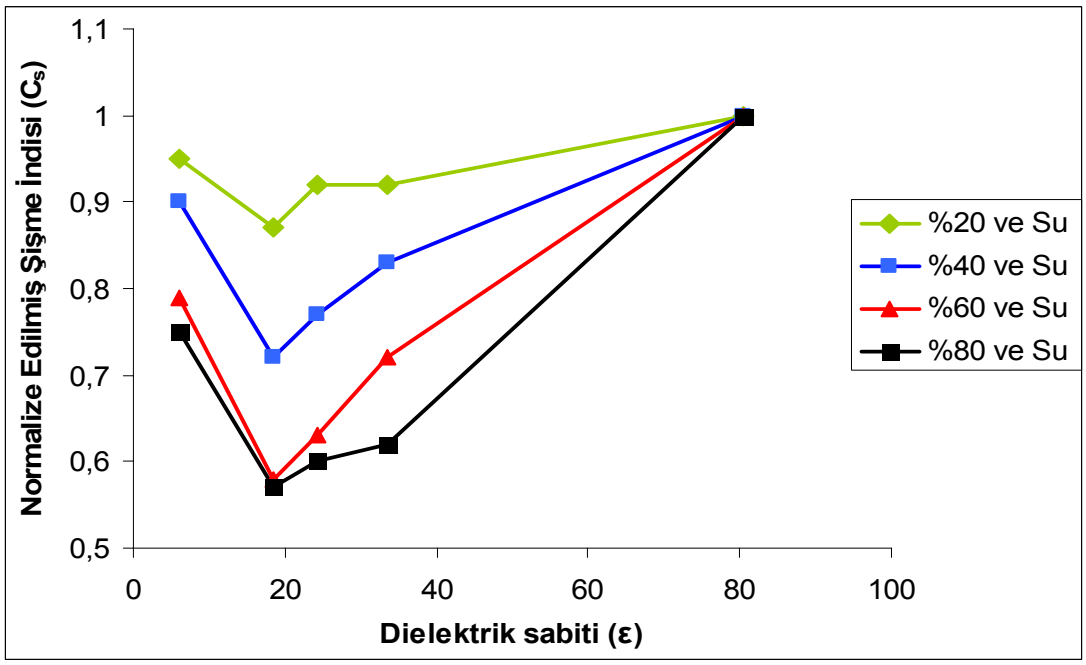
Şekil 5.93. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri (C_c) değişimi



Şekil 5.94. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş şişme indisi değerleri (C_s) değişimi



Şekil 5.95. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin(C_c) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi



Şekil 5.96. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş şişme indisi değerlerinin(C_s) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi

Şekil 5.93. ve Şekil 5.95. beraber incelendiğinde; artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte kaolinitin sıkışma indisi değerlerinin düştüğü ve asetik asitte bu düşüşün diğer kimyasallara göre daha az olduğu görülmektedir. Özellikle %60 ve %80 konsantrasyon için bu değişim daha belirgin olmaktadır. Yine bu grafiklerde dikkat çeken bir diğer nokta %60 konsantrasyona kadar en düşük sıkışma indisi değerleri dielektrik sabiti $\varepsilon = 24,3$ olan ethanol için elde edilirken, %80 konsantrasyon için en düşük sıkışma indisi değeri dielektrik sabiti $\varepsilon = 33,6$ olan methanolde bulunmuştur. Kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonu için methanolde elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi 0,68, ethanolde 0,69 ve izo-propil alkolde ise 0,71 olup hemen hemen birbirine yakındır. Asetik asit için elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değeri ise suyunkine yakın olup 0,91'dir. Asetik asitte sıkışma indisinin büyük değerde olması çekme kuvvetlerinde meydana gelen değişime bağlı olduğu gibi, kaolinit ön konsolide edilirken meydana gelen jelleşmeden dolayı konsolidasyon deneyine tabii tutulacak numunenin başlangıç su muhtevasının yüksek olması ve deney esnasında uygulanan daha büyük gerilmeler altında daha fazla sıkışma özelliği göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.94. ve Şekil 5.96. birlikte incelendiğinde; artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte normalize edilmiş şişme indisi değerleri azalmaktadır. Asetik asitte diğer kimyasallara göre daha büyük şişme indisi değerleri elde edilmektedir. Bütün konsantrasyonlar için en düşük şişme indisi değerleri izo-propil alkolde elde edilmiştir. İzo-propil alkole kadar azalan dielektrik sabiti ile birlikte şişme indisi değerleri düşmekte asetik asitte ise şişme indisi değeri saf suya göre daha düşük diğer kimyasallara göre daha büyük değerler almaktadır. Saf su için normalize edilmiş şişme indisi değeri 1 iken izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için bu değer 0,57 değerine düşmektedir. Aynı konsantrasyon için ethanolde bu değer 0,60, methanolde 0,62 ve asetik asitte ise 0,75 değerlerini almaktadır.

Bir zemindeki deformasyonlar; zemin parçacıklarının sıkışması ve ezilmesi, temas yüzeylerindeki kesme deplasmanları, kil parçacıklarını çevreleyen adsorbe su tabakalarının sıkışması ve zemin parçacıklarının bükülmesinden kaynaklanmaktadır. Şişme genellikle parçacıkların eski haline dönme eğilimi veya çift tabakadaki şişme eğilimine bağlıdır. Böylece sıkışabilirlilik mekaniksel ve fiziko-kimyasal faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Mekaniksel faktörler geometrik şekil ve boyut,

yüzey sürtünmesi ve zemin yapısı gibi mineral parçacıklarının özelliklerini kapsamaktadır. Fiziko-kimyasal faktörler ise tanecikler arasındaki çift tabaka itme kuvvetleri ve Van der Walls çekme kuvvetleridir.

Kil tanecikleri arasında etkiyen fiziko-kimyasal kuvvetlerden biri olan diffüz çift tabaka itme kuvvetleri kil mineralinin cinsi ve boşluk sıvısının özelliklerine göre değişmektedir. Boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki artmayla birlikte itme kuvvetleri artmaktadır. Diffüz çift tabaka kalınlığının küçük olması itme kuvvetlerinin de küçük değerler almasına ve tanecikler arasındaki etkileşimde daha az rol oynamasına sebep olmaktadır. Kaolinit üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sıkışma indisi değerleri diffüz çift tabaka itme kuvvetleri değişimi ile paralellik göstermemektedir. Bu sebeple kaolinitin sıkışma özellikleri üzerinde itme kuvvetleri fazla etkili olmamaktadır.

Kil tanecikleri arasındaki diğer bir fiziko-kimyasal kuvvet olan Van der Walls çekme kuvveti etkileşim halinde olan bütün molekül ve atom çiftleri arasında rol oynayan genel bir kuvvettir. Zeminlerdeki çekme kuvveti kil minerallerinin tipi, yapısı, geometrik şekli, taneciklerin birbirine göre bulunduğu pozisyon, parçacıklar arasındaki mesafe ve de en önemlisi boşluk sıvısının özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Tanecikler arasındaki çekme kuvvetlerini hesaplamak için literatürde iki yaklaşım mevcuttur. Bunlar; Bölüm 3'te verilen iki kütle arasındaki çekme kuvvetini hesaplamada kullanılan Hamaker-De Boer (1937) yaklaşımı ve Lifshitz süreklilik teorisidir (Lifshitz 1956). Birinci yaklaşımda içsel etkileşimin bir katkı olduğu kabul edilir ve parçacıklar içindeki bütün molekül çiftleri arasındaki kuvvetlerin toplanmasıyla iki parçacık arasındaki kuvvet hesaplanır ki bu durumda komşu çiftlerin etkisi ihmal edilir. Bu yaklaşımda aradaki karışım maddesinin özelliklerinin etkisi ve parçacıkların etkileşimi Hamaker sabiti (A) denilen bir sabite dayanmaktadır.

İkinci yaklaşımda ise pek çok maddenin etkisi ve malzeme özellikleri, süreklilik şeklinde her bir madde içerisindeki moleküllerin bir araya getirilmesiyle meydana gelen çekme kuvveti olayına dahil edilir. İki yaklaşımın birlikte kullanılmasıyla elde edilen yeni yaklaşımda Van der Walls çekme kuvveti Hamaker sabiti ile lineer olarak orantılıdır (Chen 1996). Tanecikler arasındaki çekim

kuvvetlerinin artması ile tanecikler daha büyük boşluk oranlı yerleşmek üzere floküle olacaklar ve sonuçta daha fazla sıkışmaya uğrayacaklardır.

Deneysel sonuçlarda dikkat çeken bir başka önemli nokta ise değişik konsantrasyonlar için bulunan sonuçların, karışımda kullanılan saf su oranı ve diğer kimyasalların oranı ile hesaplanarak elde edilen yeni dielektrik sabiti ile bir uyum göstermemiş olmasıdır. Örneğin; asetik asitin %80 konsantrasyonu için elde edilen dielektrik sabiti oransal olarak hesaplandığı zaman $\varepsilon = 21{,}04$ olup sıkışma indisi için minimuma yakın bir değer elde edilmesi gerekirken sıkışma indisi değeri bu şekilde elde edilmemektedir. Sıkışma indisindeki değişim saf kimyasal sıvılar için elde edilen Hamaker sabiti ile bir uyum göstermekte ve farklı konsantrasyonlar için aynı eğilime sahip eğriler elde edilmektedir.

Boşluk sıvılarının dielektrik sabitindeki artışla birlikte normalize edilmiş şişme indisi değerleri asetik asit haricinde diğer kimyasallar için artmaktadır. Daha önce Bölüm 3'te ifade edildiği gibi çift tabaka kalınlığı boşluk sıvısının dielektrik sabitinin karekökü ile orantılıdır. Dielektrik sabitindeki bir artış çift tabaka kalınlığındaki bir artışa, bu da çift tabaka itme kuvvetlerinin artışına sebep olmaktadır. Kaolinitte artan çift tabaka kalınlığı dolayısı ile şişme indisi değerinde de bir artış olmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde şişme indisinde meydana gelen değişimlerin kaolinit için farklı boşluk sıvılarının bulunması durumunda elde edilen Hamaker sabiti değişimi ve dolayısıyla tanecikler arasında meydana gelen çekme kuvvetleri değişimi ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak kaolinitin sıkışma davranışı üzerinde mekaniksel kuvvetlerin yanı sıra rol oynayan en önemli fiziko-kimyasal kuvvetin Van der Walls çekme kuvveti olduğu ortaya çıkmaktadır.

Zeminlerde uygulanan bir üst tabaka gerilmesi ile meydana gelen konsolidasyon miktarının hesaplanmasında kullanılan bir diğer parametre de hacimsel sıkışma katsayısıdır(m_v). Literatürde konsolidasyon olayı incelenirken daha ziyade sıkışma indisi parametresi dikkate alınmasına rağmen burada deneylerde elde edilen sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı değerleri de her bir gerilme kademesi için Çizelge 5.21.'de verilmiştir. Çizelgede her bir gerilme kademesi için boşluk oranı değişimi değerleri ve toplam boşluk oranı değişimi de

verilmiştir. Çizelgedeki değerler Çizelge 5.20.'de normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisleri hesaplanırken dikkate alınan numune için elde edilen değerlerdir.

Çizelge 5.21. Kaolinit için su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerde konsolidasyon deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Basınç P (kPa)	Boşluk Oranı (e)	Sıkışma Katsayısı a_v (cm^2/kg)	Hacimsel Sıkışma Katsayısı m_v (cm^2/kg)
Su	0	1,002	0,000	0,000
	25	0,916	0,344	0,176
	50	0,868	0,192	0,101
	100	0,811	0,113	0,062
	200	0,743	0,068	0,038
	400	0,645	0,049	0,029
	200	0,653	0,004	0,03
	100	0,668	0,015	0,009
		Σe=0,334		
%20 Methanol	0	0,980	0,000	0,000
	25	0,914	0,265	0,136
	50	0,875	0,155	0,082
	100	0,820	0,110	0,059
	200	0,745	0,076	0,042
	400	0,647	0,049	0,029
	200	0,659	0,006	0,004
	100	0,678	0,019	0,011
		Σe=0,302		
%40 Methanol	0	0,973	0,000	0,000
	25	0,948	0,099	0,051
	50	0,919	0,117	0,060
	100	0,862	0,114	0,060
	200	0,790	0,072	0,039
	400	0,703	0,044	0,025
	200	0,714	0,006	0,003
	100	0,733	0,018	0,011
		Σe=0,24		

%60 Methanol	0	0,958	0,000	0,000
	25	0,928	0,118	0,061
	50	0,899	0,116	0,061
	100	0,848	0,103	0,055
	200	0,788	0,060	0,033
	400	0,714	0,037	0,021
	200	0,726	0,006	0,003
	100	0,744	0,018	0,01
		Σe=0,214		
%80 Methanol	0	0,951	0,000	0,000
	25	0,919	0,129	0,067
	50	0,893	0,106	0,055
	100	0,856	0,074	0,040
	200	0,798	0,057	0,032
	400	0,722	0,038	0,022
	200	0,730	0,004	0,002
	100	0,742	0,013	0,007
		Σe=0,209		
%20 Ethanol	0	0,986	0,000	0,000
	25	0,920	0,266	0,136
	50	0,881	0,156	0,082
	100	0,826	0,109	0,059
	200	0,750	0,076	0,042
	400	0,656	0,047	0,028
	200	0,667	0,006	0,004
	100	0,686	0,019	0,011
		Σe=0,300		
%40 Ethanol	0	0,973	0,000	0,000
	25	0,939	0,131	0,067
	50	0,904	0,143	0,075
	100	0,861	0,085	0,045
	200	0,786	0,076	0,041
	400	0,691	0,047	0,027
	200	0,702	0,006	0,003
	100	0,712	0,009	0,006
		Σe=0,261		

	0	0,96	0,000	0,000
	25	0,923	0,127	0,065
	50	0,899	0,114	0,059
	100	0,855	0,089	0,048
	200	0,791	0,064	0,035
%60 Ethanol	400	0,711	0,040	0,023
	200	0,719	0,004	0,002
	100	0,732	0,013	0,008
		Σe=0,228		
	0	0,957	0,000	0,000
	25	0,927	0,121	0,062
	50	0,906	0,085	0,044
	100	0,857	0,097	0,052
%80 Ethanol	200	0,750	0,063	0,034
	400	0,722	0,036	0,021
	200	0,731	0,005	0,003
	100	0,746	0,015	0,009
		Σe=0,211		
	0	0,982	0,000	0,000
	25	0,920	0,249	0,128
	50	0,873	0,189	0,100
%20	100	0,821	0,103	0,056
İzo-propil	200	0,753	0,068	0,038
alkol	400	0,655	0,049	0,029
	200	0,665	0,005	0,003
	100	0,680	0,015	0,009
		Σe=0,302		
	0	0,965	0,000	0,000
	25	0,918	0,179	0,097
	50	0,878	0,159	0,084
%40	100	0,835	0,087	0,047
İzo-propil	200	0,772	0,063	0,035
alkol	400	0,680	0,046	0,027
	200	0,690	0,005	0,003
	100	0,705	0,015	0,009
		Σe=0,260		

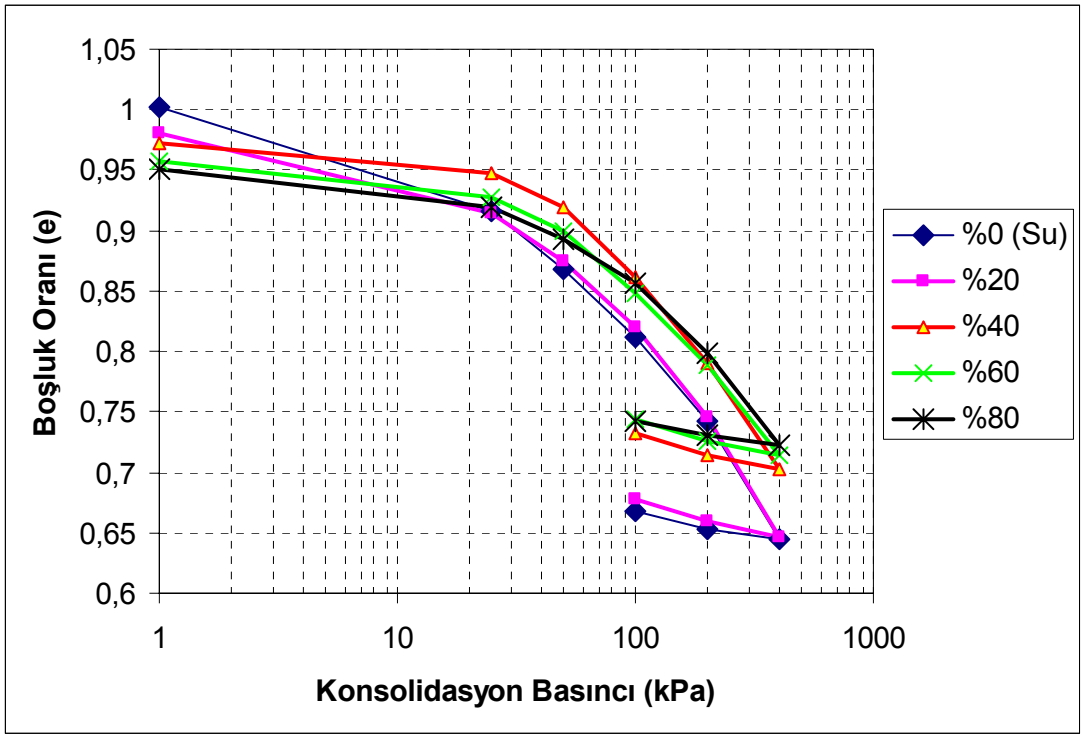
	0	0,958	0,000	0,000
	25	0,920	0,153	0,079
	50	0,890	0,121	0,064
%60	100	0,838	0,104	0,056
İzo-propil	200	0,781	0,057	0,031
alkol	400	0,705	0,037	0,022
	200	0,714	0,004	0,003
	100	0,726	0,011	0,007
		Σe=0,232		
	0	0,959	0,000	0,000
	25	0,921	0,149	0,077
	50	0,884	0,148	0,078
%80	100	0,834	0,100	0,054
İzo-propil	200	0,777	0,056	0,032
alkol	400	0,707	0,035	0,020
	200	0,716	0,004	0,003
	100	0,728	0,011	0,007
		Σe=0,231		
	0	0,990	0,000	0,000
	25	0,934	0,223	0,114
	50	0,894	0,163	0,085
	100	0,824	0,139	0,075
%20 Asetik	200	0,725	0,099	0,056
asit	400	0,627	0,049	0,029
	200	0,640	0,006	0,004
	100	0,661	0,020	0,012
		Σe=0,329		
%40	0	0,972	0,000	0,000
Asetik asit	25	0,931	0,166	0,085
	50	0,891	0,162	0,085
	100	0,821	0,138	0,074
	200	0,725	0,096	0,054
	400	0,631	0,047	0,028
	200	0,645	0,007	0,004
	100	0,665	0,020	0,012
		Σe=0,307		

	0	0,954	0,000	0,000
	25	0,917	0,148	0,076
	50	0,883	0,138	0,073
%60	100	0,820	0,125	0,067
Asetik asit	200	0,733	0,087	0,049
	400	0,639	0,047	0,028
	200	0,647	0,004	0,003
	100	0,663	0,016	0,009
		Σe=0,291		
	0	0,925	0,000	0,000
	25	0,886	0,157	0,082
	50	0,860	0,103	0,055
%80	100	0,799	0,122	0,067
Asetik asit	200	0,715	0,084	0,048
	400	0,621	0,047	0,028
	200	0,643	0,011	0,007
	100	0,651	0,008	0,005
		Σe=0,274		

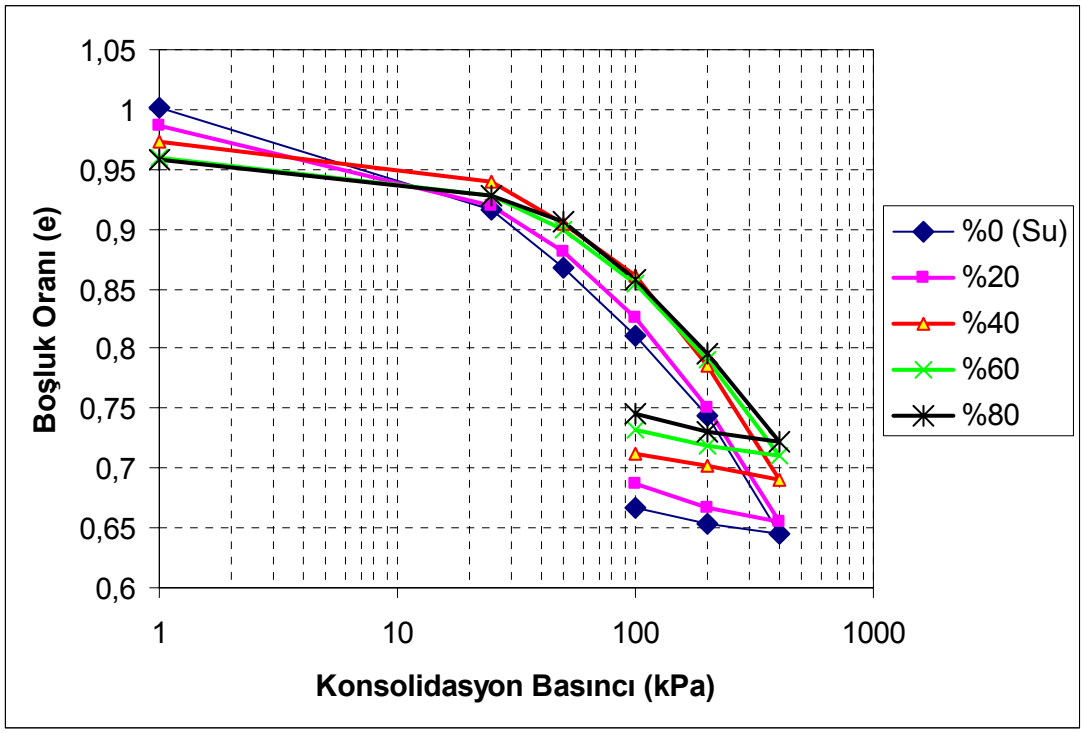
Killerde konsolidasyon olayının sonuçlarını yorumlamanın bir diğer şekli sonuçların, konsolidasyon parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan boşluk oranı değişimi değerlerine göre belirtilmesidir. Bu amaçla Şekil 5.97., Şekil 5.100. arasında saf su ve her bir kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için elde edilen boşluk oranı-konsolidasyon basıncı değişim grafiği ve Şekil 5.101., Şekil 5.104. arasında ise her bir konsantrasyon için farklı sıvılardaki boşluk oranı-konsolidasyon basıncı değişim grafikleri verilmiştir.

Methanol için verilen grafikte de görüldüğü gibi başlangıç boşluk oranı en fazla saf su için olup sıkışma olayı sonrası en küçük boşluk oranı değeri de saf su için elde edilmektedir. %20 konsantrasyon için elde edilen eğri saf suyunkine yakın olup özellikle %60 ve %80 konsantrasyon için elde edilen eğrilerde boşluk oranı değişiminin daha az ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim methanolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 1,60 katıdır. Ethanolde saf sudan

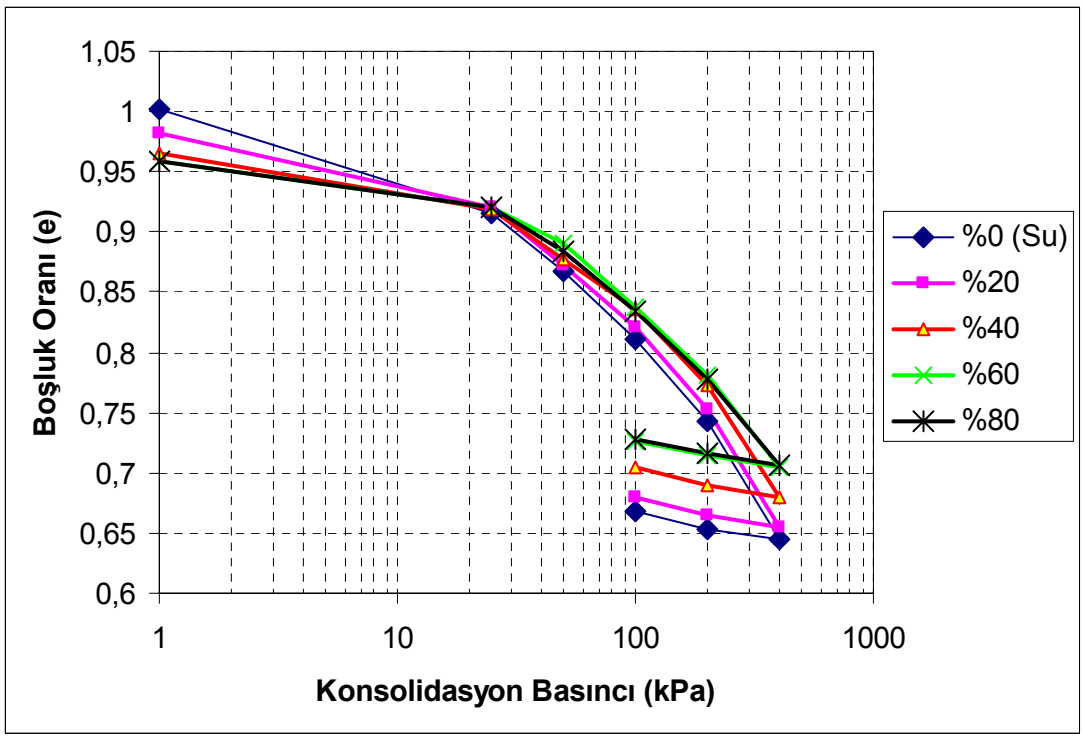
%80 konsantrasyona kadar her bir konsantrasyon için toplam boşluk oranlarında kademeli bir şekilde azalma meydana gelmektedir. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim ethanolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 1,58 katıdır. İzo-propil alkol için saf sudan %60 konsantrasyonuna kadar toplam boşluk oranlarında kademeli bir şekilde azalma meydana gelmekte ve %60 ile %80 konsantrasyonda boşluk oranlarında meydana gelen toplam değişim hemen hemen eşit olmaktadır. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 1,45 katıdır. Asetik asit için konsolidasyon sonrası elde edilen boşluk oranları hemen hemen aynıdır. Saf su için boşluk oranındaki toplam değişim asetik asitin %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 1,22 katıdır. Şekil 5.101., Şekil 5.104. arasındaki saf su ve her bir konsantrasyon için diğer kimyasal sıvılar varlığında elde edilen grafikler incelendiğinde hemen hemen bütün konsantrasyonlar için saf su ve asetik asit varlığında elde edilen eğrilerin birbirine ve diğer üç sıvının davranışlarının da birbirine benzediği açık bir şekilde görülmektedir.



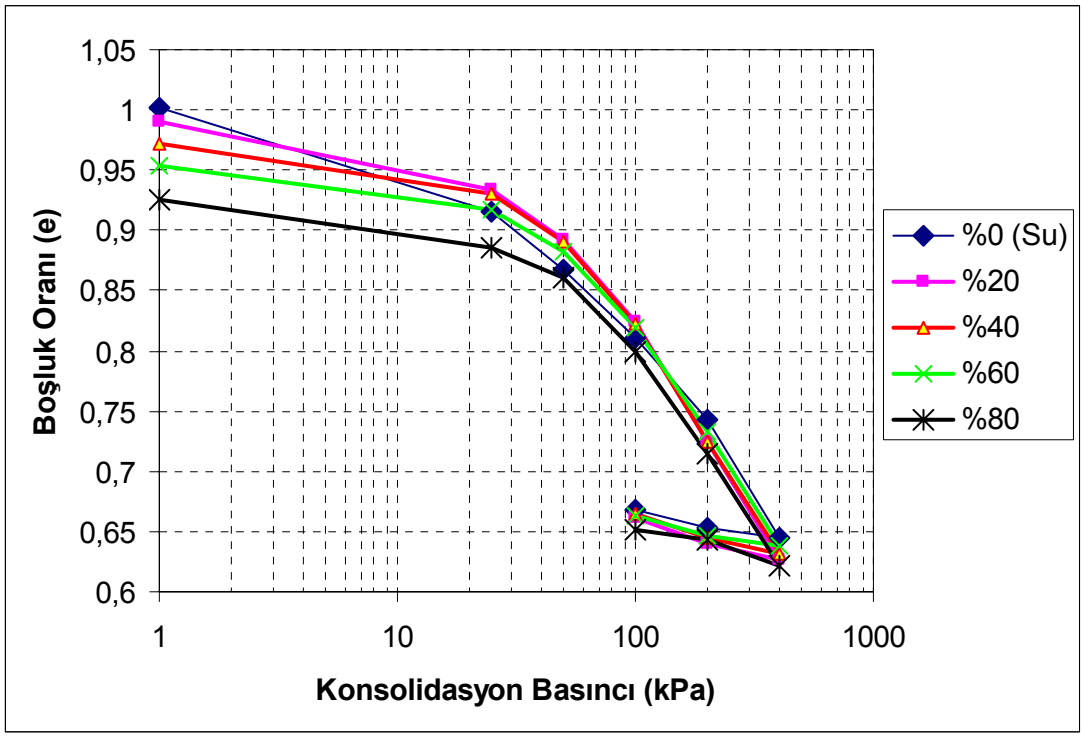
Şekil 5.97. Kaolinitte methanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



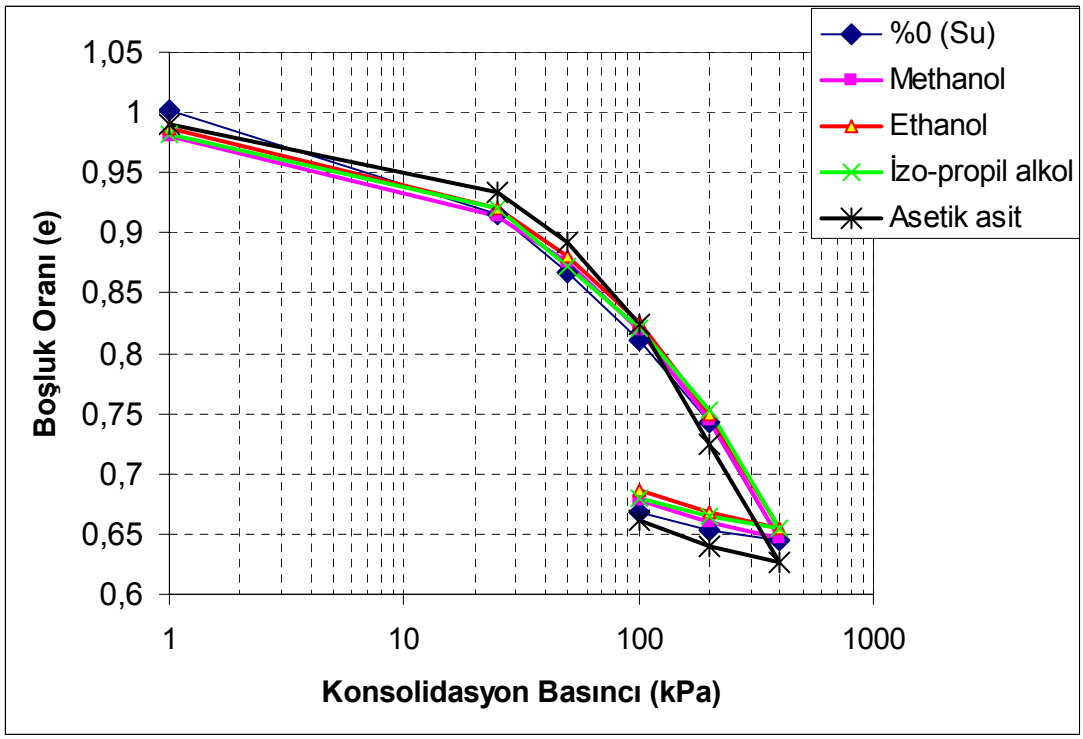
Şekil 5.98. Kaolinitte ethanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



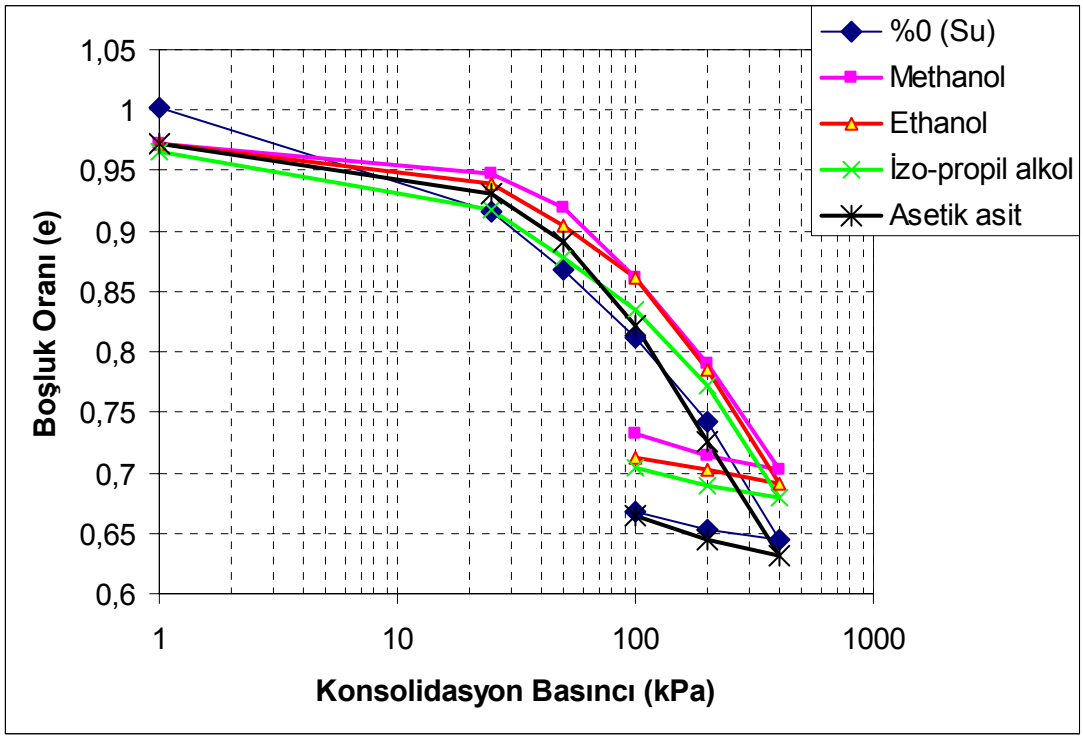
Şekil 5.99. Kaolinitte izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



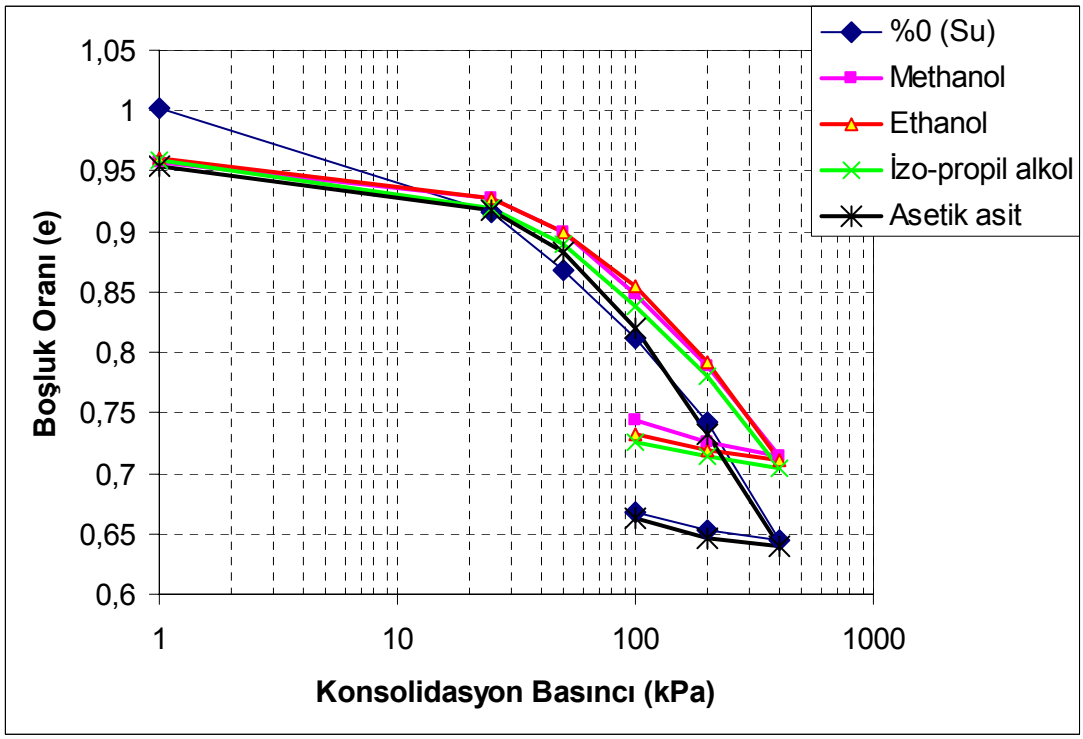
Şekil 5.100. Kaolinitte asetik asitin değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



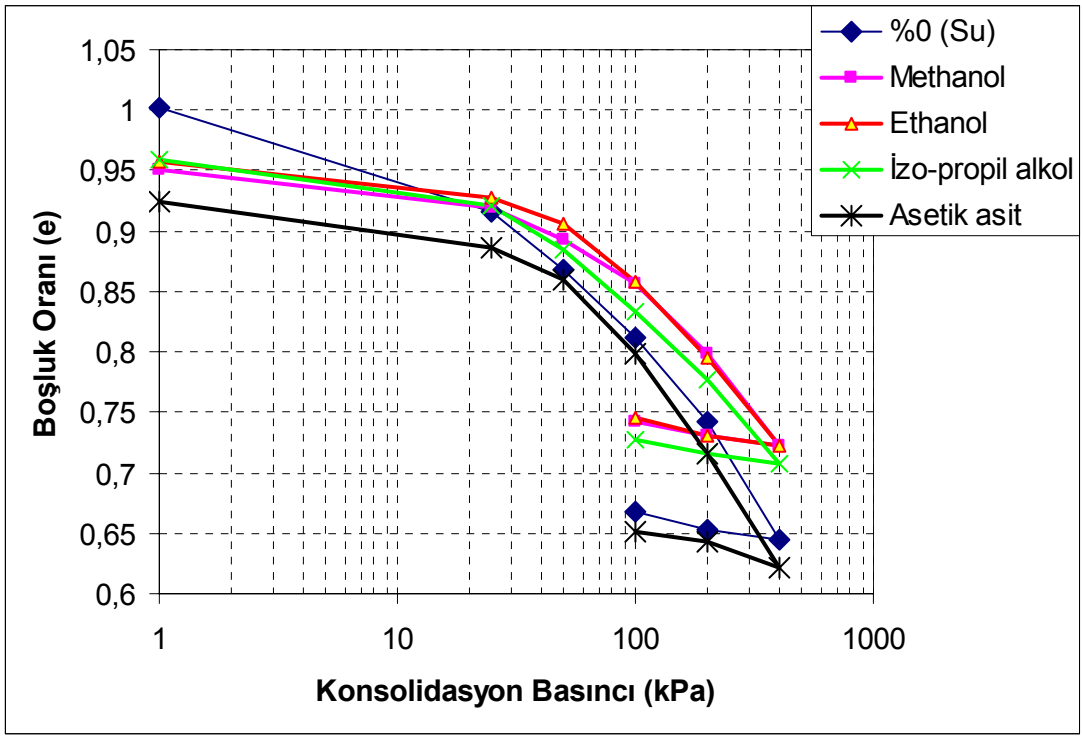
Şekil 5.101. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.102. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvılarının %40 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.103. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.104. Kaolinitte suyun ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri

Kaolinitte kimyasal sıvıların varlığında yapılan konsolidasyon deneylerinde her bir gerilme artış kademesi için bulunan boşluk oranlarının dielektrik sabiti ile değişimi Şekil 5.105., Şekil 5.110. arasındaki grafiklerde verilmiştir.

Konsolidasyon deneyine tabii tutulacak numuneler daha önce farklı kimyasal sıvıların varlığında ön konsolide işlemine tabi tutulduğu için bu numuneler ön konsolidasyon işlemi sırasında da etkili olan fiziko-kimyasal kuvvetler dolayısıyla farklı su muhtevası ve boşluk oranlarına sahip olmaktadırlar. Aynı zamanda karışımlar hazırlanırken kimyasal sıvıların her bir konsantrasyonu için bulunan likit limit değerlerinin 2 katı su muhtevasında hazırlanmaktadır. Bu durumda her karışımın başlangıçtaki su muhtevası da farklı olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı numunelerin başlangıç boşluk oranları farklı olmaktadır. Şekil 5.105.'de de görüldüğü gibi en yüksek başlangıç boşluk oranı saf su için olmakta ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonuyla başlangıç boşluk oranları azalmaktadır. Çünkü ön konsolidasyon işlemi sırasında artan kimyasal sıvı konsantrasyonuyla birlikte daha

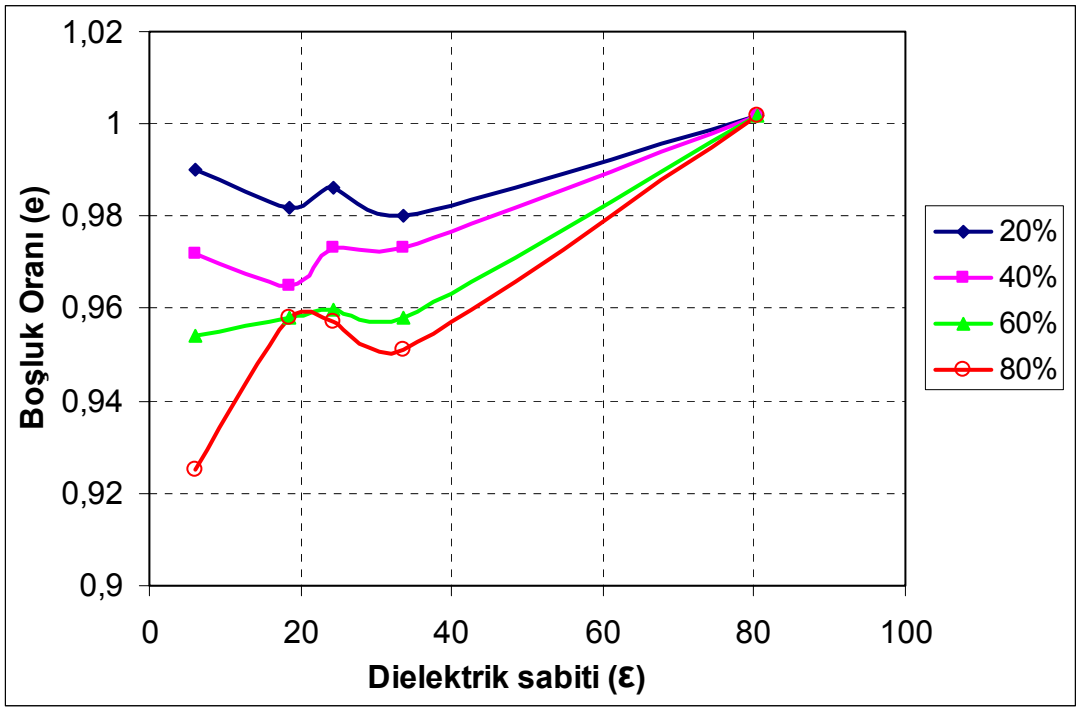
fazla flokülasyon meydana gelmekte, drenaj için daha geniş bir akım alanı oluşmakta ve daha fazla sıvı drene olabilmektedir.

25kPa gerilme kademesi için en büyük boşluk oranı değişimi saf su için olmaktadır. 50 kPa gerilme kademesi için saf sudaki boşluk oranı ve %20 konsantrasyonlardaki boşluk oranlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Diğer konsantrasyonlarda ise ethanol ve methanol için elde boşluk oranları değerlerinin belirgin olarak yüksek olduğu görülmektedir. 100 kPa gerilme kademesinde, saf su ve kimyasalların %20 konsantrasyonları için elde edilen boşluk oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kimyasal sıvılardan asetik asitin hemen hemen bütün konsantrasyonları için saf sudaki boşluk oranına yakın değerler elde edilmektedir.

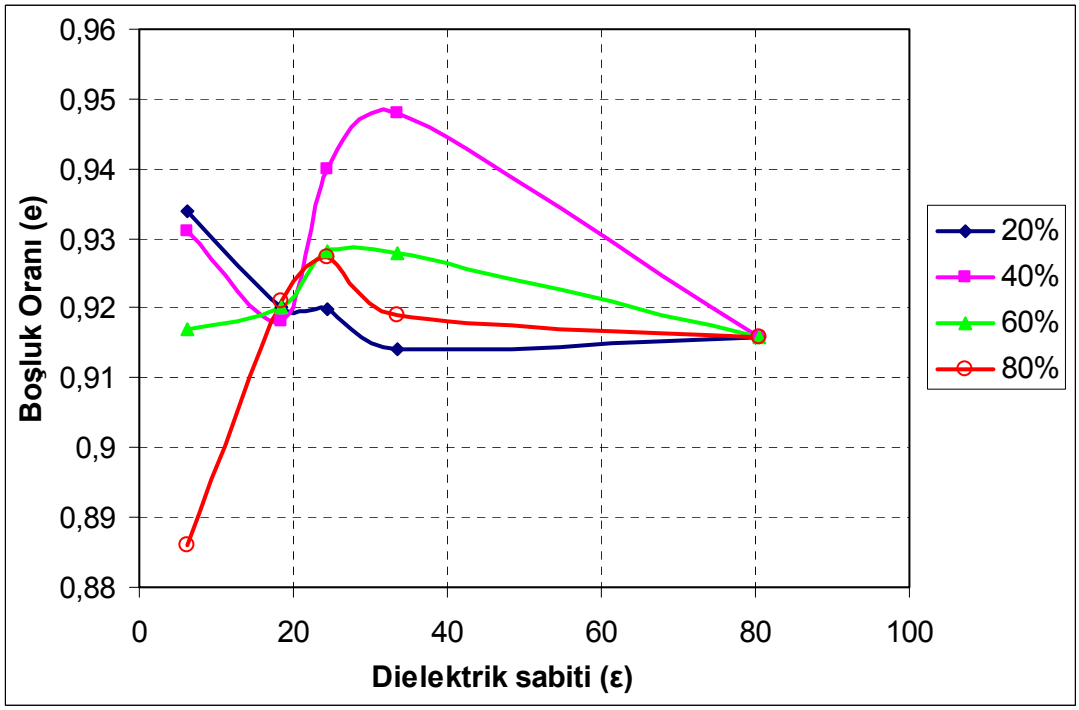
200 kPa gerilme kademesinde, %20 konsantrasyonda tüm sıvılar için saf sudakine yakın boşluk oranı değerleri elde edilirken, diğer konsantrasyonlarda methanol, ethanol ve izo-propil alkol için bulunan boşluk oranı değerleri saf sudakinden belirgin oranda büyük olmaktadır. En büyük boşluk oranı değerleri ise ethanol ve methanol için elde edilmektedir. Bu gerilme kademesinde asetik asitin tüm konsantrasyonları için elde edilen boşluk oranı değerleri saf sudakinden küçük olmaktadır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir; asetik asitin kaolinitin yapısında meydana getirdiği jelleşme dolayısıyla sıvıların filtrasyon hızı yavaşlamaktadır. Bu sebeple başlangıç boşluk oranı saf su ve diğer kimyasallardakine yakın olmakla beraber numune içerisinde daha fazla sıvı içermektedir. Numune içerisinde bulunan ve 100 kPa gerilmeye kadar filtre edilemeyen boşluk sıvıları 200 kPa'lık gerilme altında dışarıya drene edilebilmektedir. Böylelikle bu gerilme kademesi altında daha fazla sıvı dışarı atılmakta ve daha düşük boşluk oranı değeri elde edilmektedir.

400 kPa gerilme kademesinde, elde edilen boşluk oranı değerlerinde belirgin bir azalma olmakla birlikte elde edilen eğriler hemen hemen 200 kPa gerilme kademesinde elde edilen eğrilerle paralellik göstermektedir.

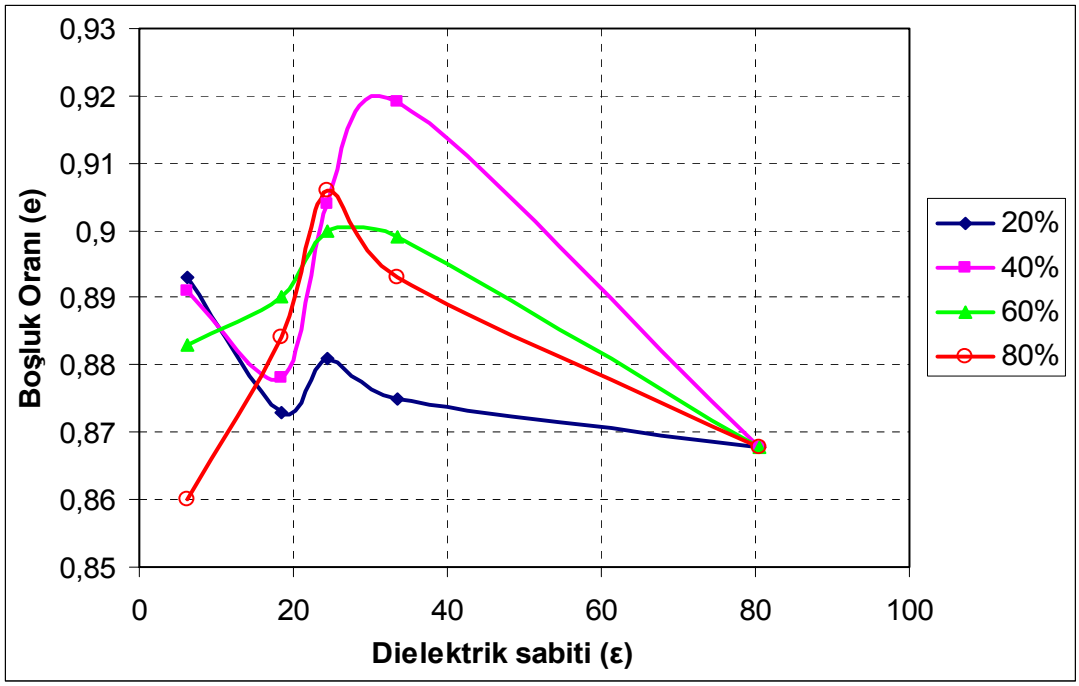
Şekil 5.105., Şekil 5.110. arasındaki grafikler incelendiğinde özellikle methanol, ethanol ve izo-propil alkol varlığında daha büyük boşluk oranlarının elde edildiği görülmektedir. Bu durum kimyasal sıvılar varlığında tanecikler arasındaki çekme kuvvetlerinin artması ve taneciklerin flokülasyona uğrayarak dış kuvvetlere daha fazla direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır.



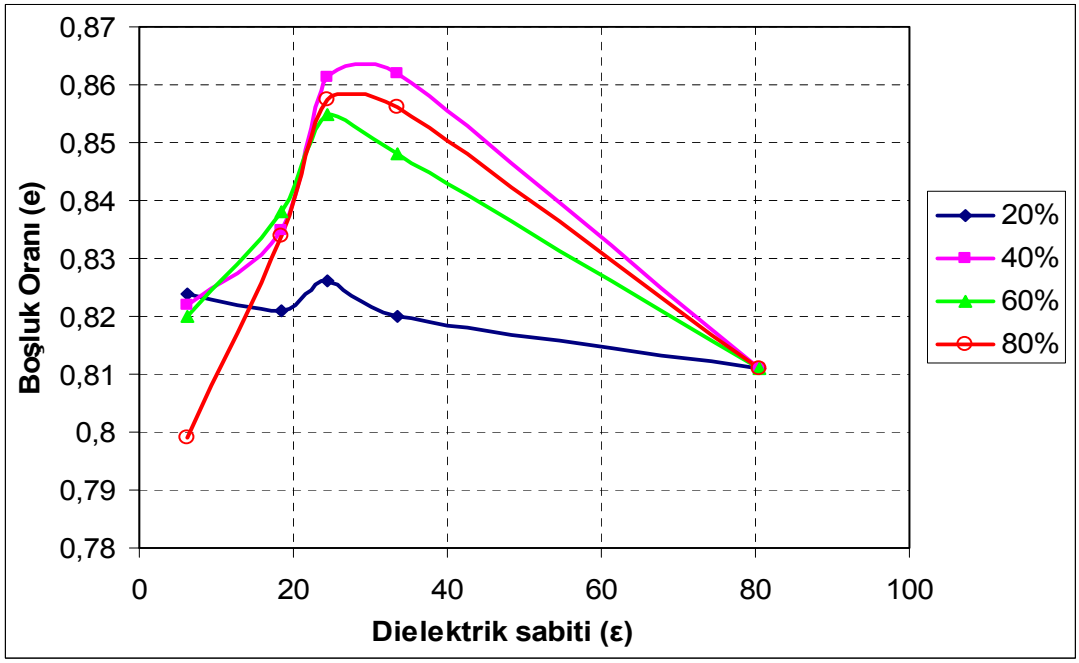
Şekil 5.105. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için başlangıç boşluk oranlarının (0 kPa) dielektrik sabiti ile değişimi



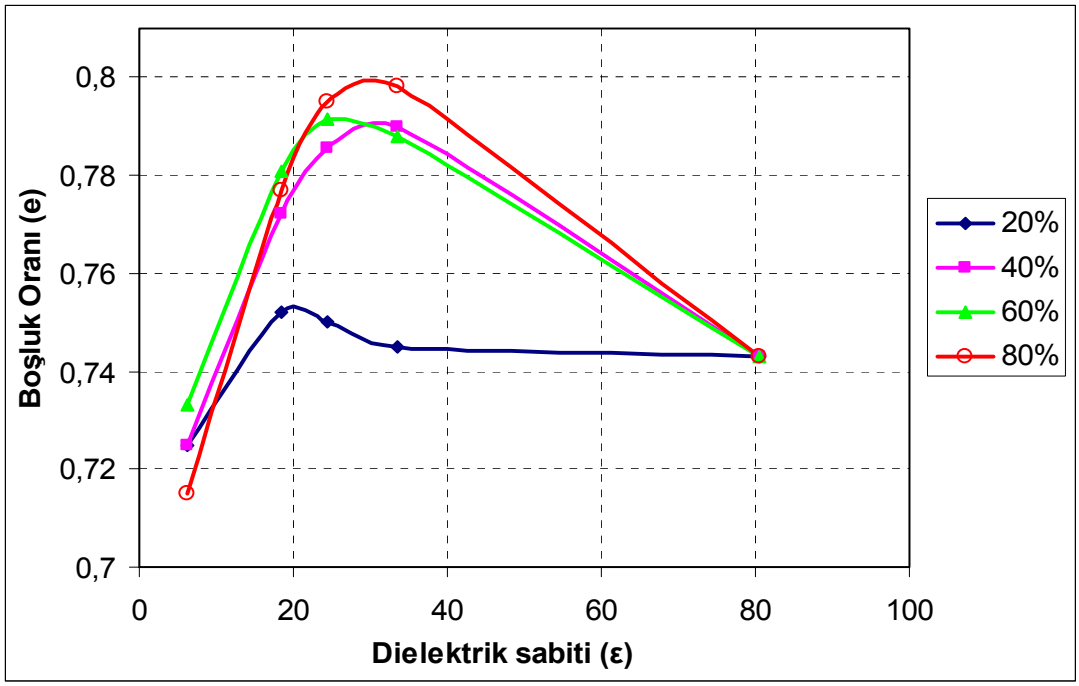
Şekil 5.106. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 25 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



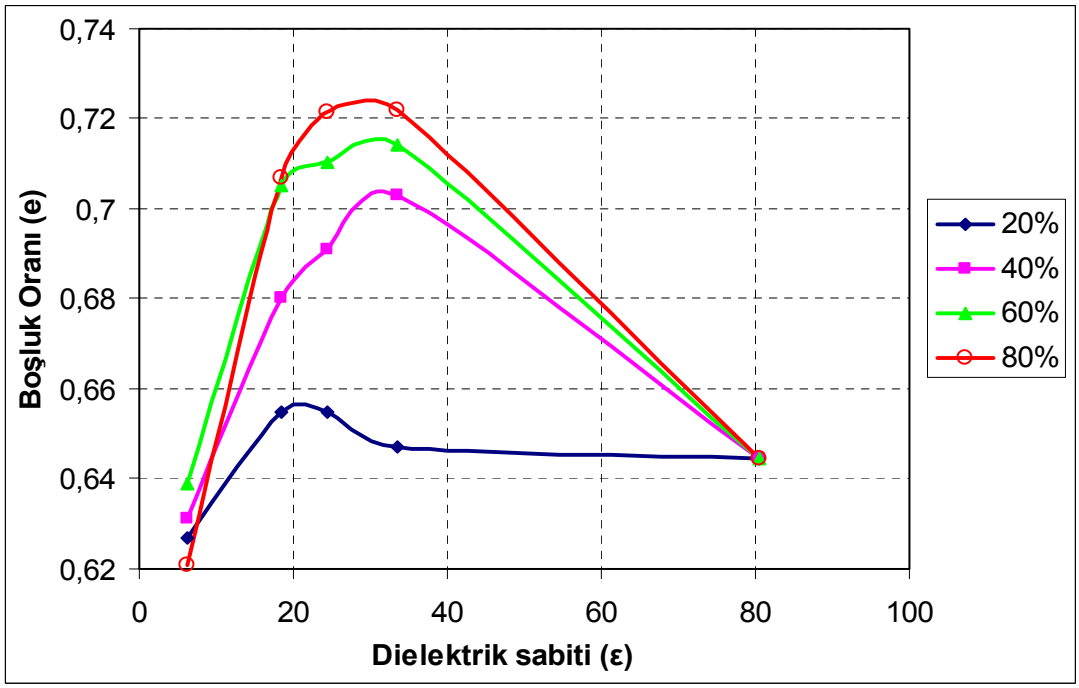
Şekil 5.107. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 50 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.108. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 100 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.109. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 200 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.110. Kaolinitte su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 400 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi

5.7.2. Aksaray kili için konsolidasyon deney sonuçları

Aksaray kili için su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde yapılan üçer adet konsolidasyon deney sonuçları için elde edilen sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisi (C_s) değerleri ve deneylerde elde edilen ortalama sıkışma indisi değerleri (C_{cort}) Çizelge 5.22.'de verilmiştir.

Aksaray kilinde saf su için bulunan sıkışma ve şişme indisi değerleri 1 kabul edilerek diğer kimyasallar için de normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri hesaplanmıştır. Burada bulunan normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri, ortalama sıkışma indisi değerine en yakın sıkışma indisi değerinin elde edildiği deneydeki sonuçlar dikkate alınarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.23.). Çizelge 5.23.'de verilen sonuçlar Şekil 5.111. ve Şekil 5.112.'de kimyasalların değişik konsantrasyonları için ve Şekil 5.113., Şekil 5.114.'de ise dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak grafiksel olarak verilmiştir.

Şekil 5.111. incelendiğinde; artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte Aksaray kili için normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin aşırı şekilde düştüğü görülmektedir. Methanol, ethanol ve izo-propil alkol için normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri birbirleriyle paralellik göstermekte ve yaklaşık olarak saf için elde edilen değerin 1/3'üne kadar düşmektedir. Asetik asitte ise özellikle %40 konsantrasyonla birlikte davranışta bir farklılık meydana gelmekte, %60 ve %80 konsantrasyonlar için elde edilen sıkışma indisi değerleri asetik asitin %40 konsantrasyonu için elde edilen sıkışma indisi değerinden büyük olmaktadır. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile olan reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.112. incelendiğinde; artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte normalize edilmiş şişme indisi değerlerinin de aşırı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Saf su için normalize edilmiş şişme indisi değeri Cs=1 iken kimyasalların %40 konsantrasyonları için şişme indisi değerleri hemen hemen 0,5 civarlarına düşmektedir. En düşük şişme indisi değerlerinin elde edildiği %80 asetik asit ve methanol konsantrasyonu için şişme indisi değerleri Cs=0,36 olmakta yani hemen hemen saf su için elde edilen değerin 1/3'ü olmaktadır.

Çizelge 5.22. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen sıkışma indisi (C_c) değerleri

Su ve Kimyasal Sıvılar	Sıkışma İndisi ve Şişme İndisi Değerleri (C_c) ve (C_s)	Kimyasalların Değişik Konsantrasyonları (Ağırlıkça) (%)				
		0	20	40	60	80
Su	C_{c1}	1,253	–	–	–	–
	C_{c2}	1,184				
	C_{c3}	1,298				
	C_{cort}	**1,245**				
	C_s	0,1655	-	-	-	-
Methanol	C_{c1}	–	1,017	0,826	0,493	0,415
	C_{c2}		0,982	0,802	0,478	0,407
	C_{c3}		1,094	0,831	0,508	0,416
	C_{cort}		**1,031**	**0,820**	**0,493**	**0,413**
	C_s	-	0,1359	0,0878	0,0652	0,0602
Ethanol	C_{c1}	–	1,068	0,835	0,624	0,457
	C_{c2}		1,109	0,808	0,660	0,460
	C_{c3}		1,036	0,876	0,618	0,445
	C_{cort}		**1,071**	**0,839**	**0,634**	**0,454**
	C_s	-	0,1367	0,0936	0,0838	0,0683
İzo-propil Alkol	C_{c1}	–	0,958	0,743	0,476	0,414
	C_{c2}		0,971	0,751	0,481	0,416
	C_{c3}		0,948	0,736	0,474	0,408
	C_{cort}		**0,959**	**0,743**	**0,477**	**0,413**
	C_s	-	0,1350	0,0860	0,0705	0,0631
Asetik asit	C_{c1}	–	0,972	0,874	0,938	0,982
	C_{c2}		0,951	0,862	0,921	0,988
	C_{c3}		0,995	0,890	0,968	0,968
	C_{cort}		**0,973**	**0,876**	**0,942**	**0,979**
	C_s	-	0,1312	0,0820	0,0623	0,0590

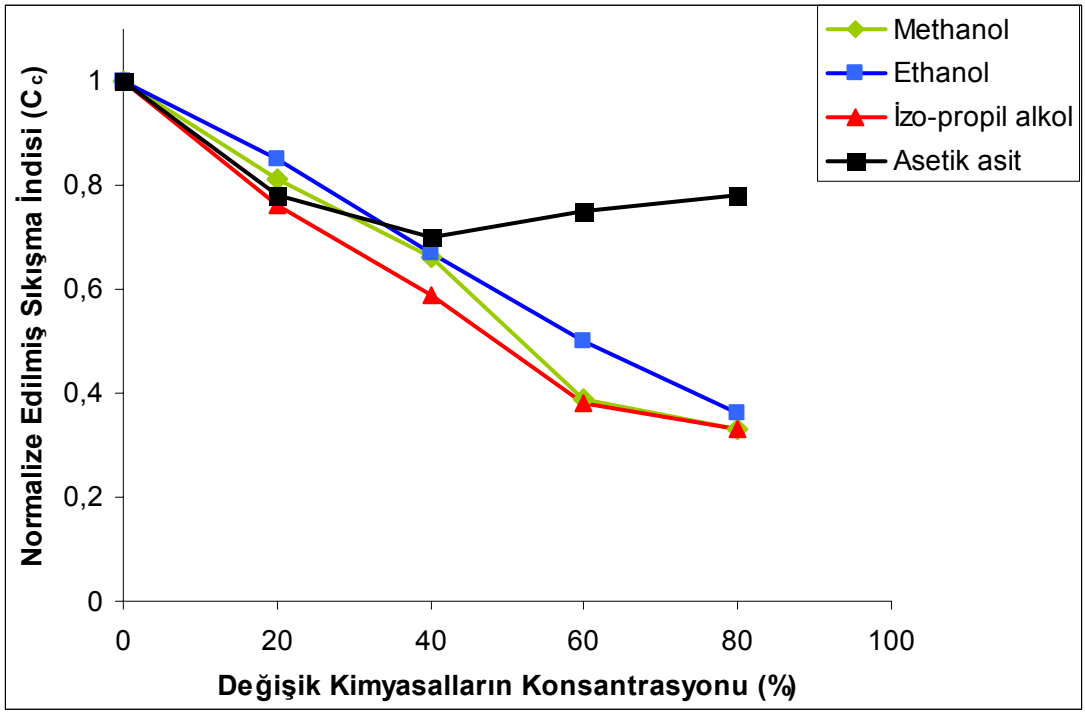
Çizelge 5.23. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi parametreleri

Su ve Kimyasal Sıvılar	Sıkışma İndisi (C_c)	Normalize Edilmiş Sıkışma İndisi (Cc)	Şişme İndisi (Cs)	Normalize Edilmiş Şişme İndisi (Cs)
Su	1,253	1	0,1655	1
%20 Methanol	1,017	0,81	0,1359	0,82
%40 Methanol	0,826	0,66	0,0878	0,53
%60 Methanol	0,493	0,39	0,0652	0,39
%80 Methanol	0,415	0,33	0,0602	0,36
%20 Ethanol	1,068	0,85	0,1367	0,83
%40 Ethanol	0,835	0,67	0,0936	0,57
%60 Ethanol	0,624	0,50	0,0838	0,51
%80 Ethanol	0,457	0,36	0,0683	0,41
%20 İzo-propil alkol	0,958	0,76	0,1350	0,82
%40 İzo-propil alkol	0,743	0,59	0,0860	0,52
%60 İzo-propil alkol	0,476	0,38	0,0705	0,43
%80 İzo-propil alkol	0,414	0,33	0,0631	0,38
%20 Asetik Asit	0,972	0,78	0,1312	0,79
%40 Asetik Asit	0,874	0,70	0,0820	0,50
%60 Asetik Asit	0,938	0,75	0,0623	0,38
%80 Asetik Asit	0,982	0,78	0,0590	0,36

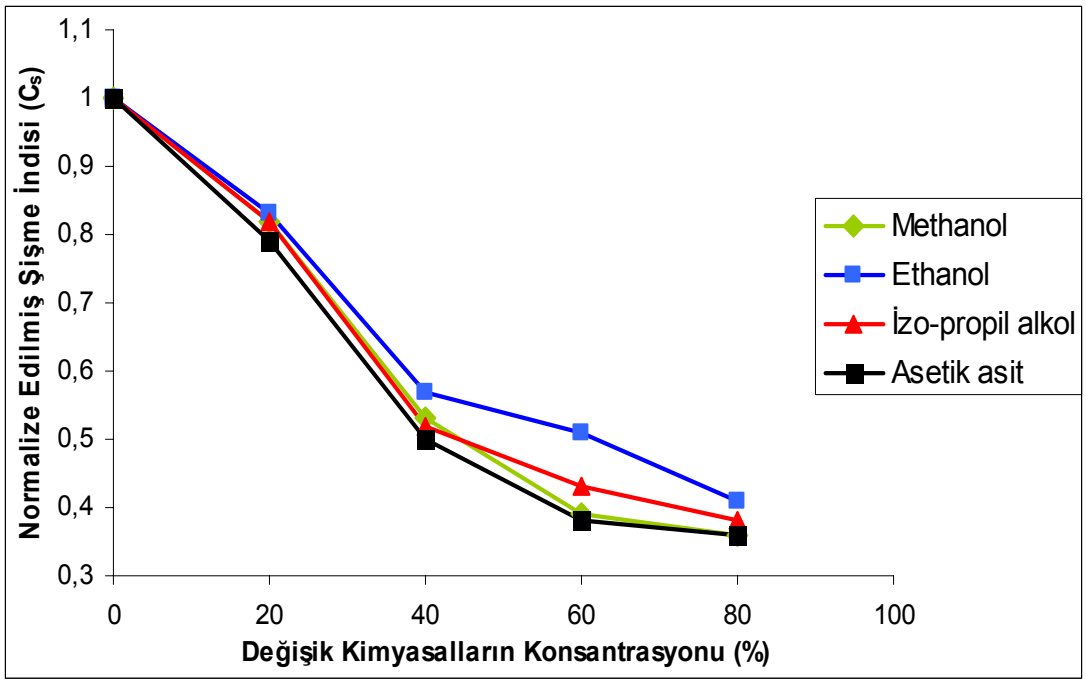
Şekil 5.113. incelendiği zaman, dikkat çeken ilk nokta artan kimyasal sıvı konsantrasyonuyla birlikte normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin asetik asit haricinde diğer tüm sıvılar için aşırı bir düşüş göstermesidir. Bu düşüş özellikle %60 ve %80 konsantrasyon için daha belirgin olmaktadır. Eğrilerde dikkat çeken bir diğer durum ise elde edilen tüm eğrilerin birbiriyle uyum içerisinde olmasıdır. Kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabitine bağlı olarak sıkışma indisi değerleri azalmaktadır. Yalnız methanol kimyasal sıvısının dielektrik sabiti (ε=33,6) ethanolden büyük olduğu halde elde edilen sıkışma indisi değerleri dielektrik sabiti daha küçük olan ethanol (ε=24,3) için elde edilen değerlerden daha küçüktür. Yine dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkolün %60 ve %80 konsantrasyonu için elde edilen değerler

methanol için elde edilenlerle aynıdır. Asetik asitte ise bütün konsantrasyonlar için elde edilen değerler birbirine yakın olup dielektrik sabiti en düşük olmasına rağmen elde edilen sıkışma indisi değerleri diğer kimyasallara göre daha büyük değerler almaktadır. Dielektrik sabiti ε=80,4 olan saf su için normalize edilmiş sıkışma indisi değeri Cc=1 olup methanol (ε=33,6) ve izo-propil alkolün (ε=18,4) %80 konsantrasyonu için bu değer Cc=0,33 olmakta, yani 1/3 değerine düşmektedir.

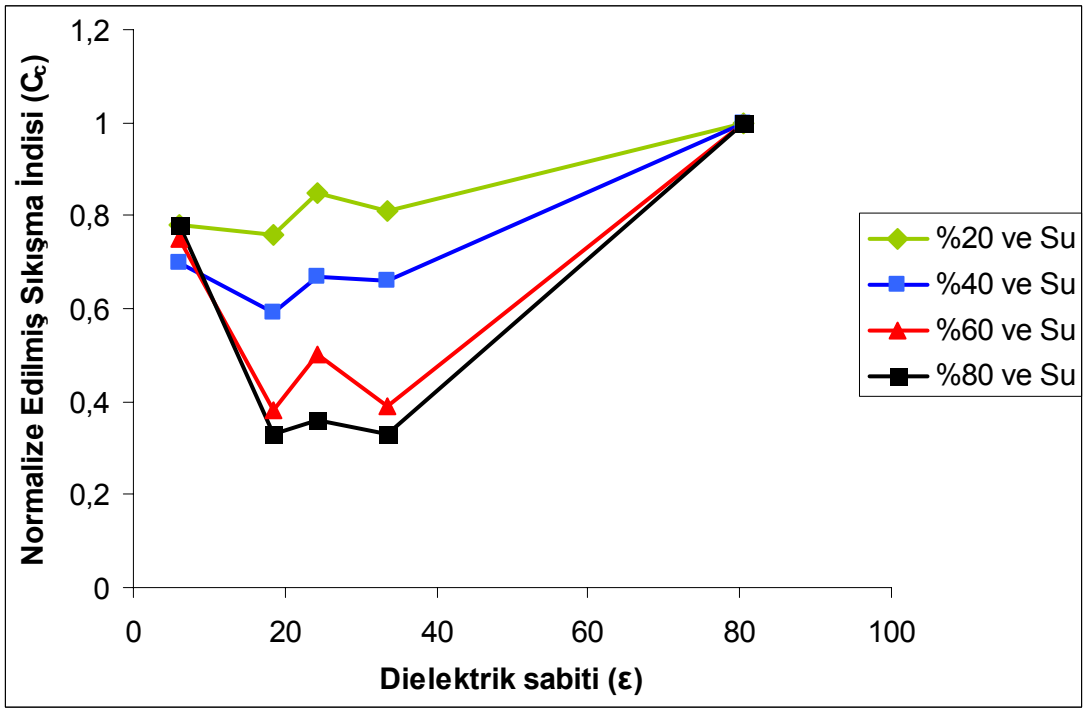
Şekil 5.114. incelendiğinde; azalan dielektrik sabiti ile birlikte şişme indisi değerlerinde çok belirgin bir azalmanın olduğu görülmektedir. Kimyasalların %20 konsantrasyonu için bu değişim daha azken, %40 konsantrasyon ve üzerinde değişim çok belirgin olmaktadır. Yalnız yine burada da dikkat çeken durum dielektrik sabiti ε=33,6 olan methanol için elde edilen şişme indisi değerleri methanole göre daha düşük dielektrik sabitine sahip diğer kimyasallar için bulunan şişme indisi değerlerine ya eşit ya da onlardan küçüktür. Özellikle %80 konsantrasyon için elde edilen şişme indisi değerleri tüm kimyasallar için birbirine yakın değerler almıştır. Kimyasalların %80 konsantrasyonu için elde edilen şişme indisi değerleri ortalama olarak saf su için elde edilen şişme indisi değerlerinin 1/3'ü civarında olmaktadır.



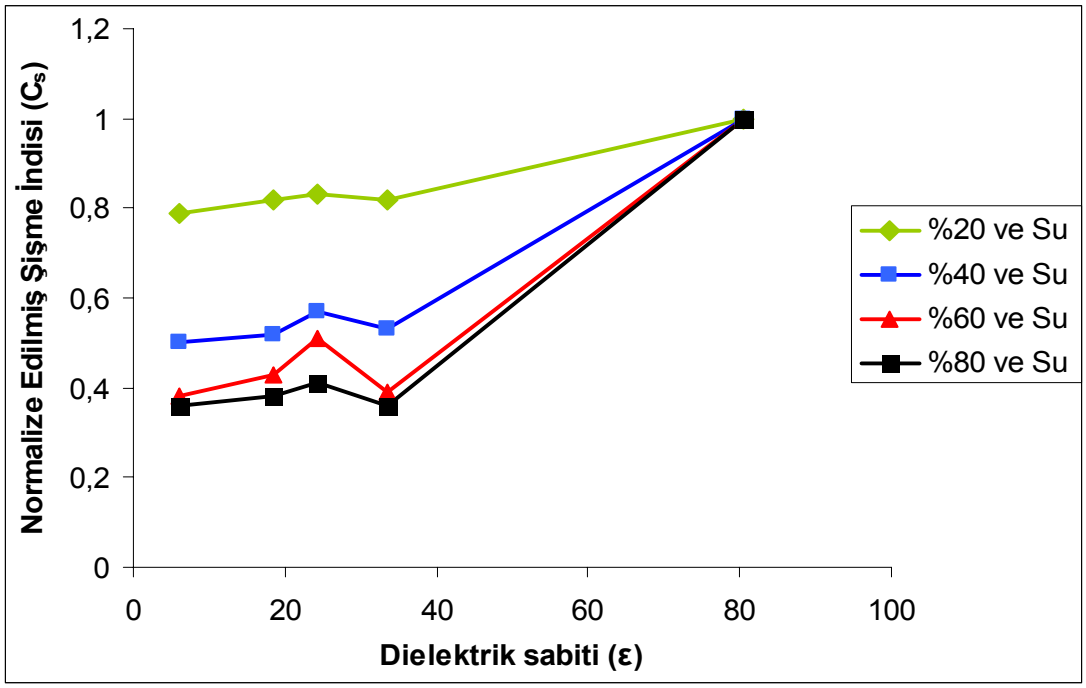
Şekil 5.111. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri (C_c) değişimi



Şekil 5.112. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen normalize edilmiş şişme indisi değerleri (C_s) değişimi



Şekil 5.113. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş sıkışma indisi değerlerinin(C_c) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi



Şekil 5.114. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinde bulunan normalize edilmiş şişme indisi değerlerinin(C_s) dielektrik sabitine (ε) göre değişimi

Deneylerde kullanılan Aksaray kili için yaptırılan tüm kayaç analizlerine göre kilin içerisinde kalsit ve dolomit mineralleri bulunduğu tespit edilmiştir. Numunenin kil fraksiyonunda ise %49 oranında montmorillonit ve %33 oranında sepiyolit minerali bulunmaktadır. Bu durumda Aksaray kilinin sıkışma özellikleri, kil içerisinde bulunan montmorillonit, sepiyolit, kalsit ve dolomitin kimyasal sıvılar etkisindeki davranış biçimlerine göre değişmektedir.

Montmorillonitte diffüz çift tabaka kalınlığı, montmorillonit kilinin kalınlığının yaklaşık 40 katıdır. Bundan dolayı montmorillonit kilinin davranışı üzerinde diffüz çift tabaka kalınlığı ve dolayısıyla diffüz çift tabaka itme kuvvetleri etkilidir. Bu sebeple boşluk sıvısı olarak kimyasal sıvılar kullanıldığı zaman azalan dielektrik sabitine bağlı olarak montmorillonit içerikli Aksaray kilinde diffüz çift tabaka itme kuvvetleri azalmakta ve kilin konsolidasyon davranışı da değişmektedir. Deneyler sonucu bulunan sıkışma ve şişme indisi değerleri de bu durumu doğrulayıcı niteliktedir.

Kil tanecikleri arasındaki diğer bir fiziko-kimyasal kuvvet olan Van der Walls

çekme kuvvetleri kil minerallerinin türü ve boşluk sıvısının özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Boşluk sıvısı özelliklerinin değişimi montmorillonit tipi kil minerallerinde tanecikler arasındaki çekme kuvvetleri değişimi üzerinde çok fazla etkili olmamaktadır. Bu yüzden montmorillonit içerikli Aksaray kilinin sıkışma davranışı çekme kuvvetleri değişiminden çok fazla etkilenmemektedir.

Bahsedilen bu fiziko-kimyasal etkiler zeminlerin 100 kPa gerilme altında ön konsolide edilme işlemi sırasında gerçekleşmektedir ve konsolidasyon deneyi için alınan numunelerin davranış biçimleri de aslında şekillenmiş olmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre de boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ile birlikte zeminler için bulunan sıkışma indisi değerleri azalmakta ve değişim diffüz çift tabaka itme kuvvetleri değişimi ile orantılı olmaktadır.

Şekil 5.113. incelendiğinde methanolün dielektrik sabitinin ethanol ve izo-propil alkolünkinden büyük olmasına rağmen elde edilen sıkışma indisi değerlerinin ethanol için elde edilenlerden küçük ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerle hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan sepiyolitin içyapısına methanolün daha iyi nüfuz ederek daha fazla flokülasyona sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Aksaray kili üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sıkışma katsayısı (a_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerleri ve her bir gerilme kademesindeki boşluk oranı (e) değerleri Çizelge 5.24.'de verilmiştir.

Çizelge 5.24. Aksaray kili için su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanan numunelerde konsolidasyon deney sonuçları

Su ve Kimyasal Sıvılar	Uygulanan Basınç P (kPa)	Boşluk Oranı (e)	Sıkışma Katsayısı a_v (cm^2/kg)	Hacimsel Sıkışma Katsayısı m_v (cm^2/kg)
Su	0	2,214	0,000	0,000
	25	2,174	0,163	0,051
	50	2,127	0,186	0,059
	100	1,998	0,258	0,084
	200	1,641	0,358	0,127
	400	1,244	0,198	0,081
	200	1,264	0,010	0,005
	100	1,314	0,050	0,022
		Σe=0,900		

	0	2,148	0,000	0,000
	25	2,117	0,124	0,040
	50	2,041	0,303	0,098
	100	1,891	0,300	0,101
%20	200	1,594	0,297	0,108
Methanol	400	1,279	0,157	0,065
	200	1,296	0,009	0,004
	100	1,337	0,041	0,018
		Σe=0,811		
	0	1,857		0,000
	25	1,822	0,000	0,049
	50	1,779	0,139	0,062
%40	100	1,666	0,174	0,083
Methanol	200	1,427	0,226	0,094
	400	1,169	0,239	0,056
	200	1,201	0,129	0,007
	100	1,222	0,016	0,009
		Σe=0,635	0,021	
	0	1,451	0,000	0,000
	25	1,429	0,088	0,036
	50	1,411	0,073	0,030
	100	1,356	0,113	0,047
%60	200	1,230	0,125	0,055
Methanol	400	1,058	0,086	0,040
	200	1,073	0,007	0,004
	100	1,097	0,025	0,012
		Σe=0,354		
	0	1,400	0,000	0,000
	25	1,369	0,125	0,052
	50	1,334	0,139	0,059
	100	1,261	0,146	0,064
%80	200	1,152	0,109	0,049
Methanol	400	1,011	0,070	0,034
	200	1,026	0,007	0,004
	100	1,047	0,022	0,011
		Σe=0,353		

%20 Ethanol	0	2,165	0,000	0,000
	25	2,134	0,125	0,040
	50	2,058	0,305	0,098
	100	1,907	0,301	0,101
	200	1,605	0,302	0,110
	400	1,284	0,161	0,066
	200	1,301	0,009	0,004
	100	1,342	0,041	0,018
		Σe=0,823		
%40 Ethanol	0	1,987	0,000	0,000
	25	1,952	0,139	0,047
	50	1,906	0,184	0,063
	100	1,825	0,163	0,057
	200	1,577	0,248	0,092
	400	1,322	0,127	0,052
	200	1,340	0,009	0,004
	100	1,352	0,012	0,005
		Σe=0,635		
%60 Ethanol	0	1,621	0,000	0,000
	25	1,609	0,046	0,018
	50	1,573	0,144	0,055
	100	1,485	0,177	0,070
	200	1,308	0,177	0,074
	400	1,109	0,100	0,045
	200	1,128	0,010	0,004
	100	1,160	0,032	0,015
		Σe=0,461		
%80 Ethanol	0	1,428	0,000	0,000
	25	1,395	0,133	0,055
	50	1,355	0,162	0,068
	100	1,283	0,143	0,062
	200	1,160	0,123	0,055
	400	1,008	0,076	0,036
	200	1,017	0,004	0,002
	100	1,028	0,011	0,005
		Σe=0,400		

	0	2,127	0,000	0,000
	25	2,096	0,123	0,040
	50	2,021	0,301	0,098
%20	100	1,872	0,298	0,101
İzo-propil	200	1,592	0,280	0,102
alkol	400	1,295	0,149	0,061
	200	1,312	0,009	0,004
	100	1,353	0,041	0,017
		Σe=0,774		
	0	1,820	0,000	0,000
	25	1,799	0,085	0,030
	50	1,768	0,125	0,045
%40	100	1,682	0,171	0,063
İzo-propil	200	1,466	0,216	0,084
alkol	400	1,235	0,116	0,049
	200	1,245	0,005	0,002
	100	1,274	0,029	0,013
		Σe=0,546		
	0	1,424	0,000	0,000
	25	1,403	0,082	0,034
	50	1,379	0,097	0,041
%60	100	1,333	0,092	0,039
İzo-propil	200	1,221	0,113	0,049
alkol	400	1,077	0,072	0,033
	200	1,094	0,008	0,004
	100	1,125	0,031	0,015
		Σe=0,299		
	0	1,410	0,000	0,000
	25	1,390	0,082	0,034
	50	1,365	0,097	0,041
%80	100	1,320	0,091	0,039
İzo-propil	200	1,216	0,104	0,046
alkol	400	1,091	0,062	0,029
	200	1,108	0,008	0,004
	100	1,139	0,031	0,015
		Σe=0,271		

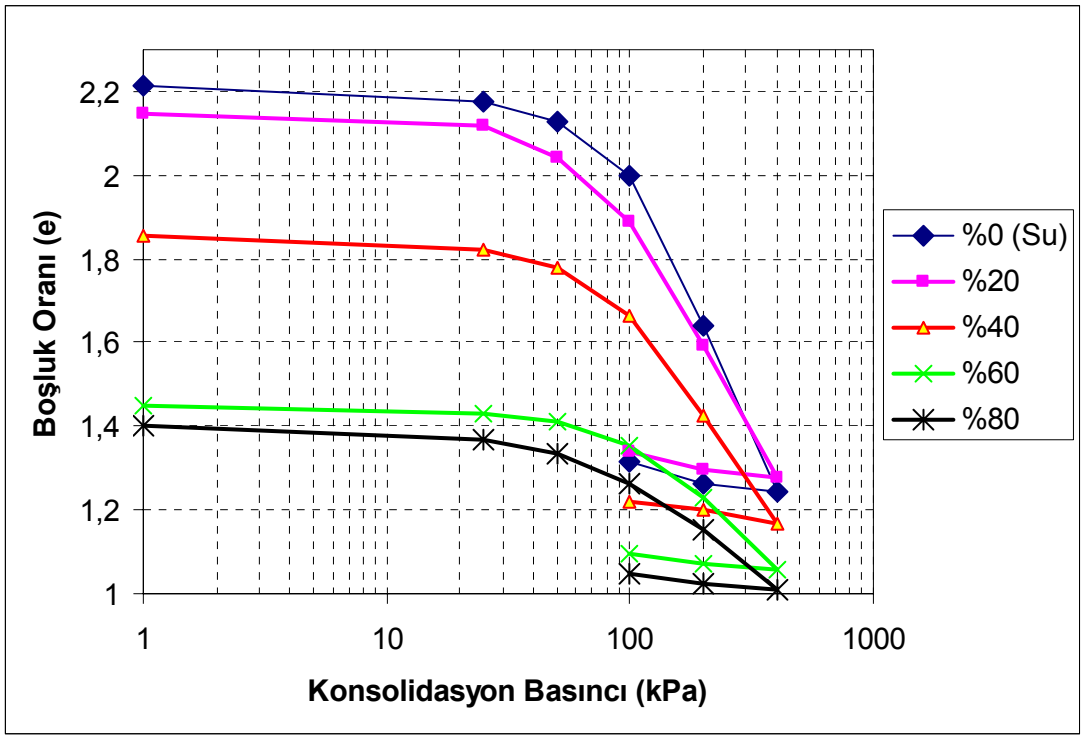
	0	2,250	0,000	0,000
	25	2,119	0,525	0,165
	50	2,030	0,356	0,116
	100	1,855	0,349	0,119
%20	200	1,561	0,294	0,109
Asetik asit	400	1,270	0,146	0,060
	200	1,286	0,008	0,004
	100	1,310	0,024	0,011
		Σe=0,940		
	0	2,290	0,000	0,000
	25	2,160	0,519	0,161
	50	2,072	0,354	0,114
%40	100	1,895	0,353	0,118
Asetik asit	200	1,624	0,271	0,098
	400	1,369	0,128	0,051
	200	1,385	0,008	0,003
	100	1,410	0,025	0,010
		Σe=0,880		
	0	2,349	0,000	0,000
	25	2,313	0,147	0,044
	50	2,246	0,267	0,081
%60	100	2,118	0,256	0,081
Asetik asit	200	1,857	0,261	0,087
	400	1,563	0,147	0,054
	200	1,579	0,008	0,003
	100	1,601	0,022	0,008
		Σe=0,748		
	0	2,381	0,000	0,000
	25	2,340	0,162	0,048
	50	2,270	0,283	0,086
%80	100	2,139	0,262	0,082
Asetik asit	200	1,859	0,280	0,093
	400	1,548	0,156	0,058
	200	1,564	0,008	0,003
	100	1,586	0,022	0,009
		Σe=0,795		

Şekil 5.115., Şekil 5.118. arasında saf su ve her bir kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları elde edilen boşluk oranı-konsolidasyon basıncı değişim grafiği ve Şekil 5.119., Şekil 5.122. arasında ise her bir konsantrasyon için farklı sıvılardaki boşluk oranı-konsolidasyon basıncı değişim grafikleri verilmiştir.

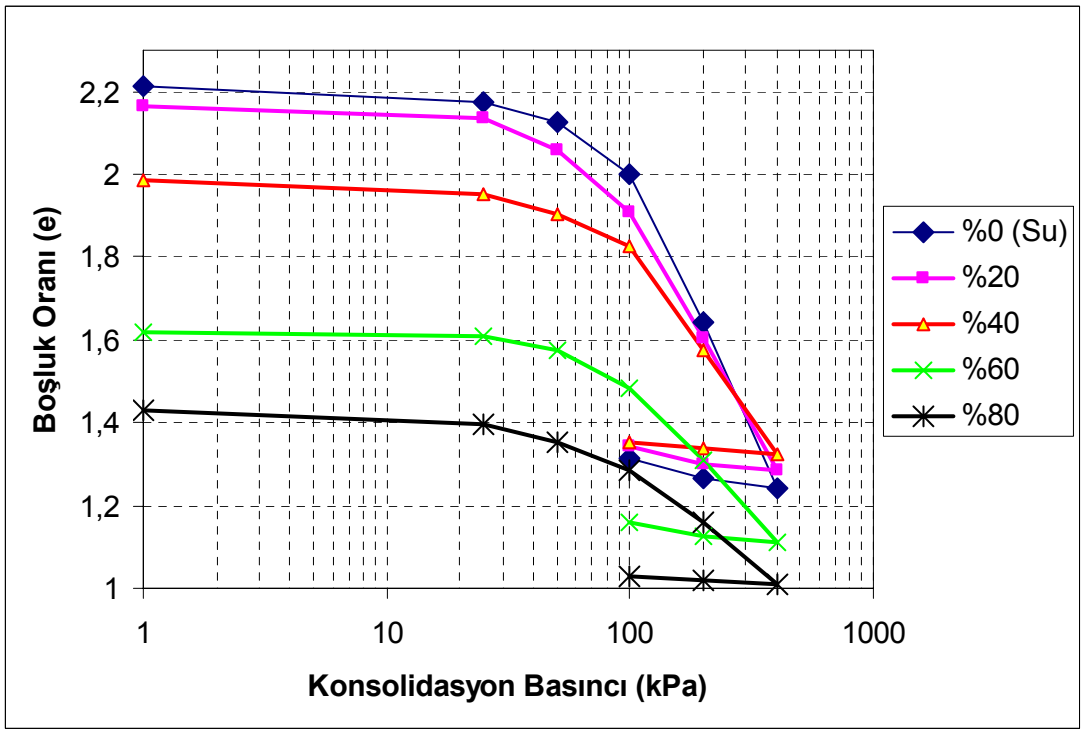
Methanolün %20 konsantrasyonu için elde edilen eğri saf suyunkine yakın olup özellikle %60 ve %80 konsantrasyon için elde edilen eğrilerde boşluk oranı değişiminin daha az ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim methanolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 2,55 katıdır. Ethanol deki değişim methanoldekine benzer eğilimdedir. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim ethanolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 2,25 katıdır. İzo-propil alkol için verilen grafikte dikkat çeken en önemli nokta %60 ile %80 konsantrasyon için elde edilen eğrilerin ve dolayısıyla boşluk oranlarında meydana gelen toplam değişimlerin birbirine yakın olmasıdır. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim izo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişiminin 3,32 katıdır.

Boşluk sıvısının asetik asit olması durumunda, Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonu sonucu su muhtevası düşük, porözlü bir yapıya sahip ve silt-ince kum formunda bir yapının oluşması dolayısıyla başlangıç boşluk oranı değeri de artmaktadır (Şekil 5.118.). Çünkü numuneler suya doygun hale getirilirken bu porözlü yapı sıvı ile dolmakta ve böylece başlangıç boşluk oranları da kısmen saf suyunkinden fazla olmaktadır. %20 ve %40 asetik asit konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişimleri hemen hemen saf suyunkine yakınken, %60 ve %80 konsantrasyon için meydana gelen toplam boşluk oranları değişimi saf suyunkine göre %15 civarında az olmaktadır.

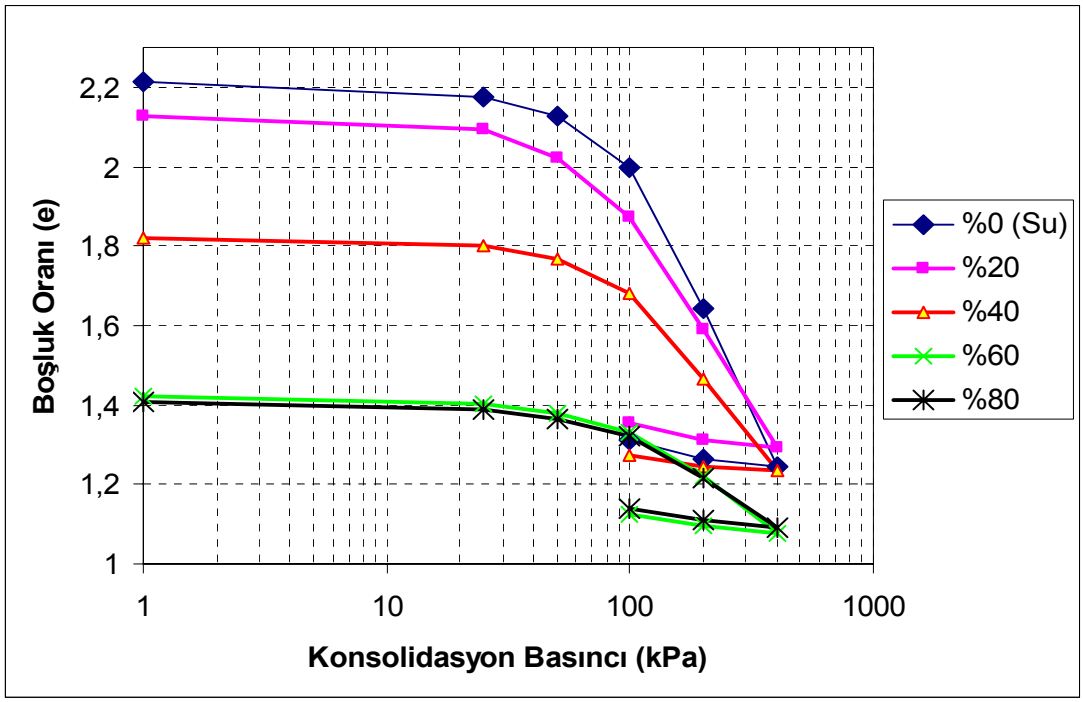
Saf su ve kimyasalların %20 konsantrasyonu için elde edilen bütün eğriler birbirine yakın olup, kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonu Aksaray kilinin konsolidasyon davranışı üzerinde fazla etkili olmamaktadır. Kimyasalların %80 konsantrasyonu için verilen grafiklerde, dikkat çeken en önemli nokta methanol, ethanol ve izo-propil alkol için bulunan başlangıç boşluk oranlarının ve toplam boşluk oranları değişimlerinin saf su ve asetik asit için bulunan değerlerden belirgin şekilde küçük olmasıdır.



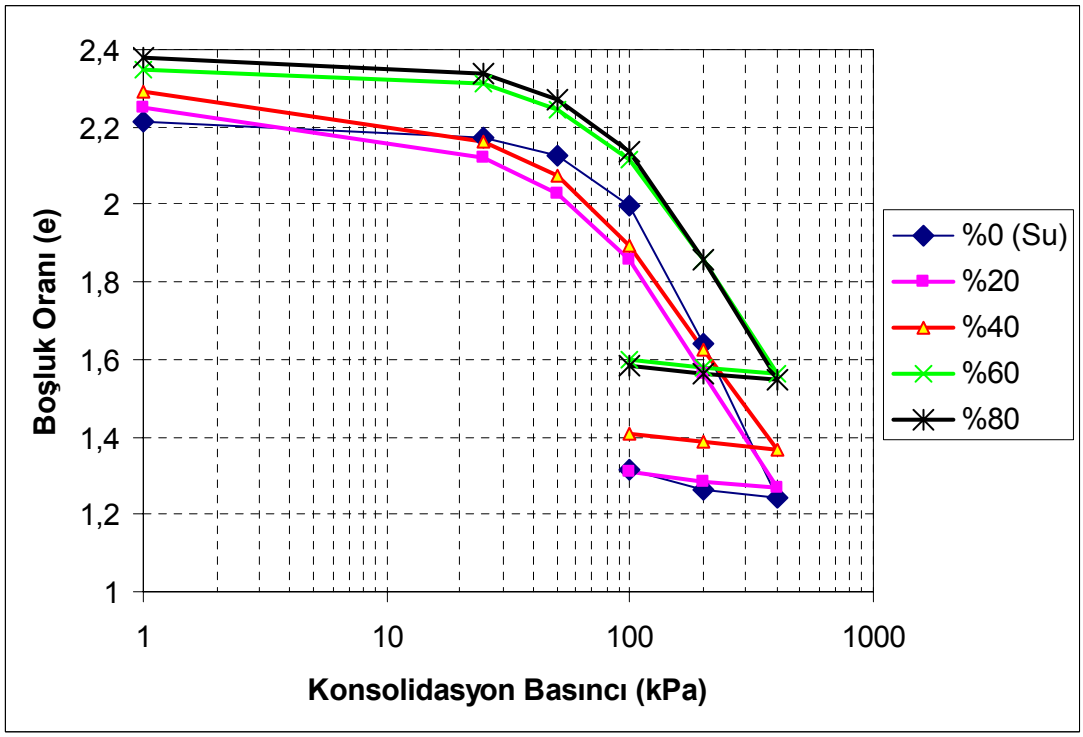
Şekil 5.115. Aksaray kilinde methanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



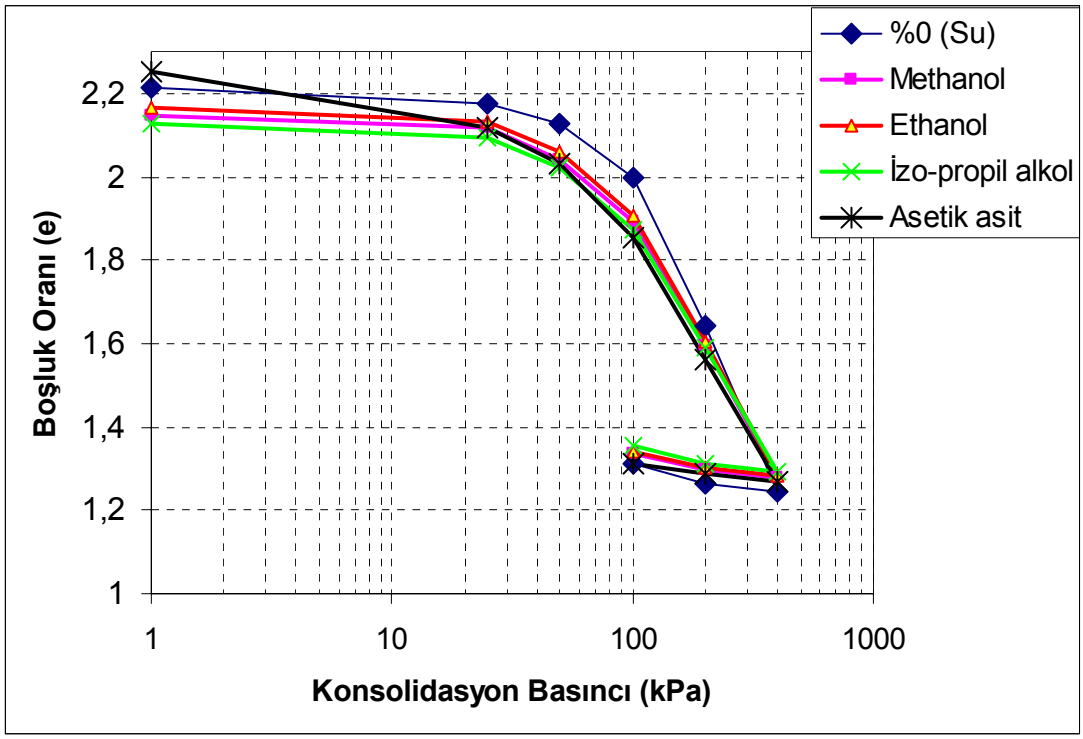
Şekil 5.116. Aksaray kilinde ethanolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



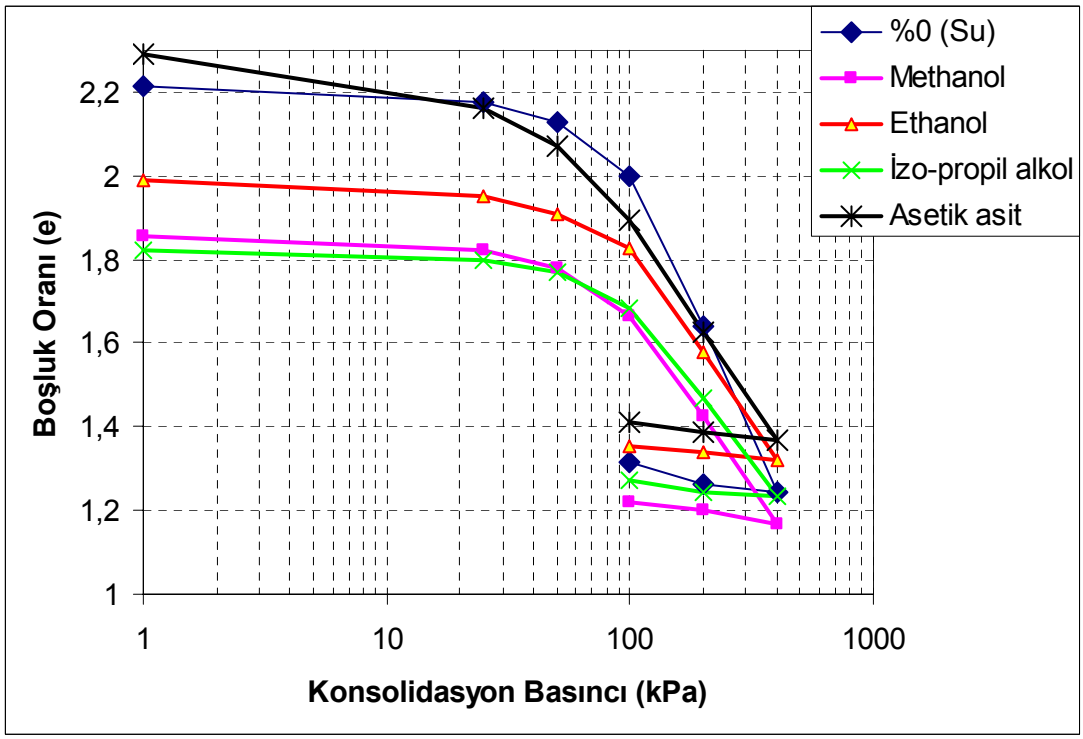
Şekil 5.117. Aksaray kilinde izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



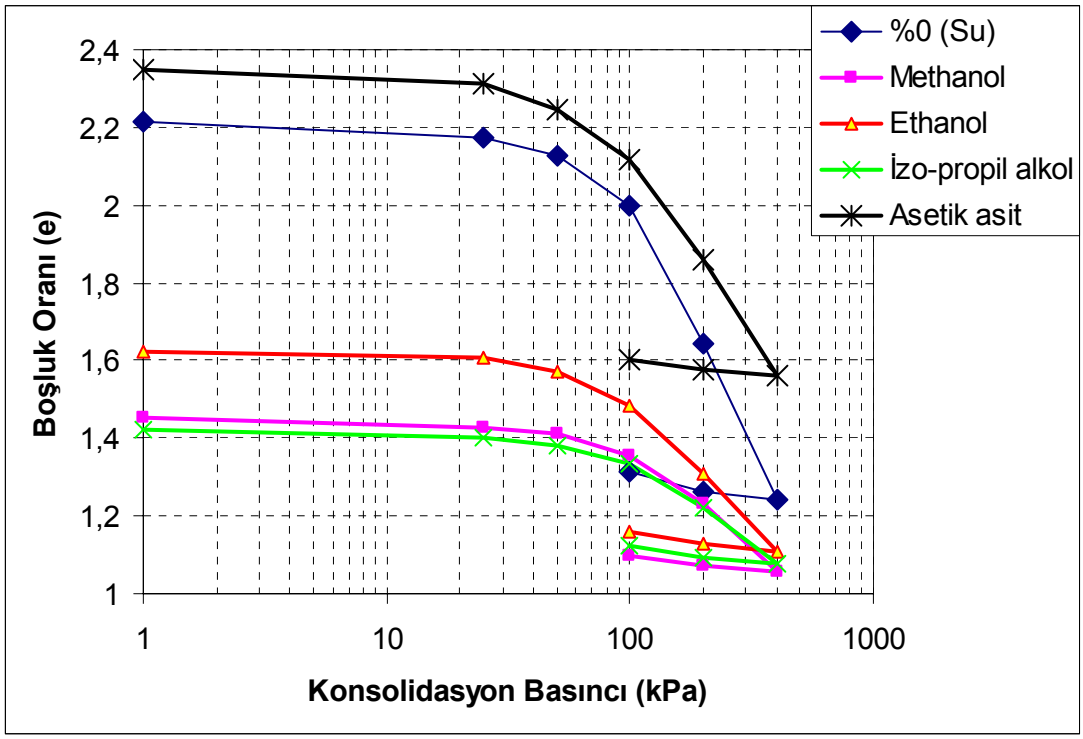
Şekil 5.118. Aksaray kilinde asetik asitin değişik konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



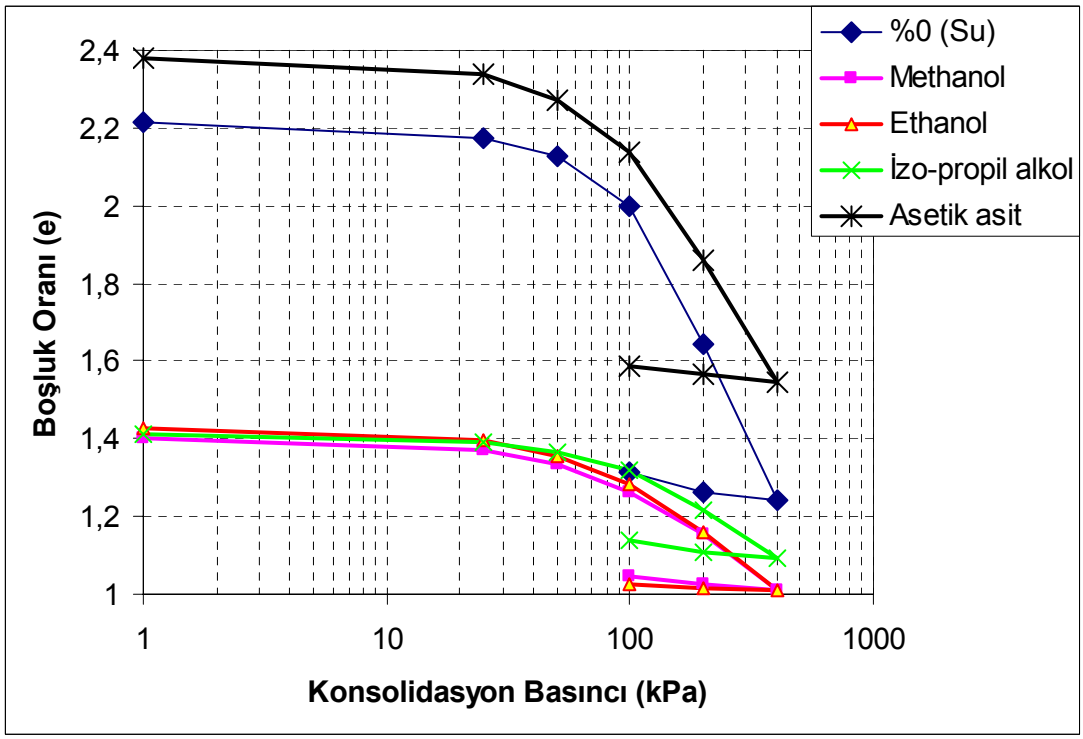
Şekil 5.119. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.120. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %40 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.121. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri



Şekil 5.122. Aksaray kilinde suyun ve kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonları için konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-logP grafikleri

Aksaray kilinde kimyasal sıvıların varlığında yapılan konsolidasyon deneylerinde her bir gerilme artışı kademesi için elde edilen boşluk oranlarının dielektrik sabiti ile değişimini gösteren grafikler Şekil 5.123., Şekil 5.128. arasında verilmiştir.

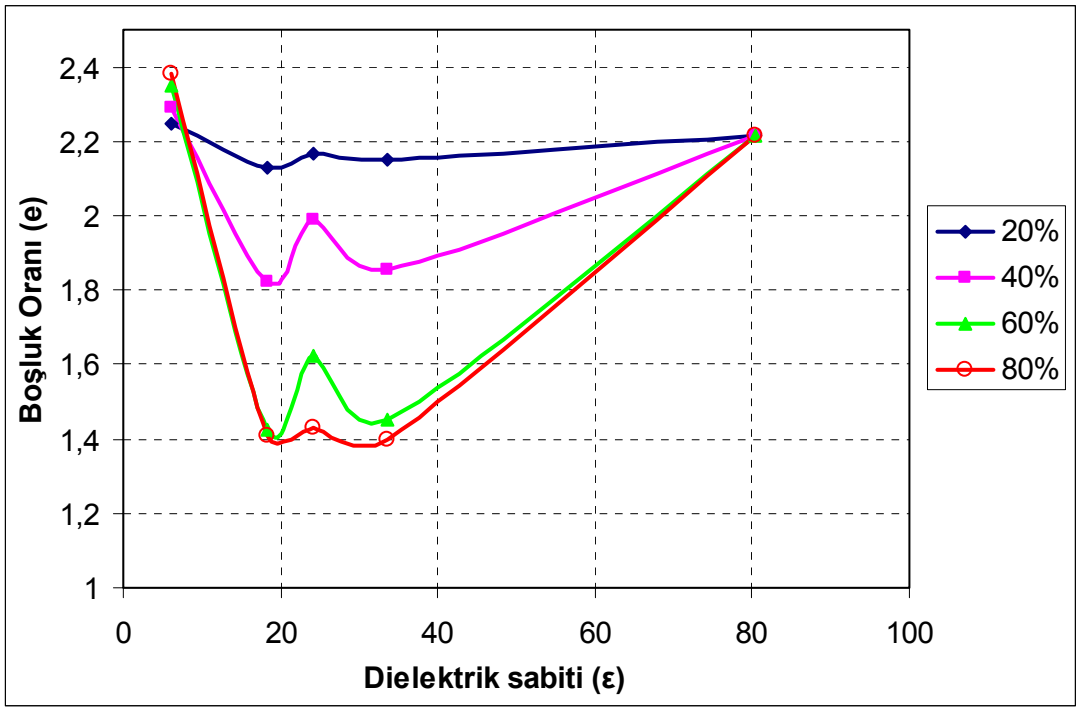
Şekil 5.123.'de ön konsolide edildikten sonra konsolidasyon deneyine tabii tutulacak numunelerin yüklenmeden önceki (0 kPa) durumu için bulunan başlangıç boşluk oranları değerleri saf su ve kimyasal sıvılar için verilmiştir. En yüksek başlangıç boşluk oranı bütün konsantrasyonlar için asetik asit varlığında olmaktadır. Diğer kimyasal sıvılarda ise sıkışma indisi değerleriyle paralellik gösteren bir değişim görülmekte ve özellikle %80 konsantrasyonda elde edilen boşluk oranı değerleri birbirine yakın olmaktadır.

Şekil 5.124.'de 25kPa gerilme kademesi için verilen boşluk oranları değerleri incelendiğinde elde edilen sonuçların 0 kPa gerilme kademesinde elde edilen değerlerle paralellik gösterdiği görülmektedir.

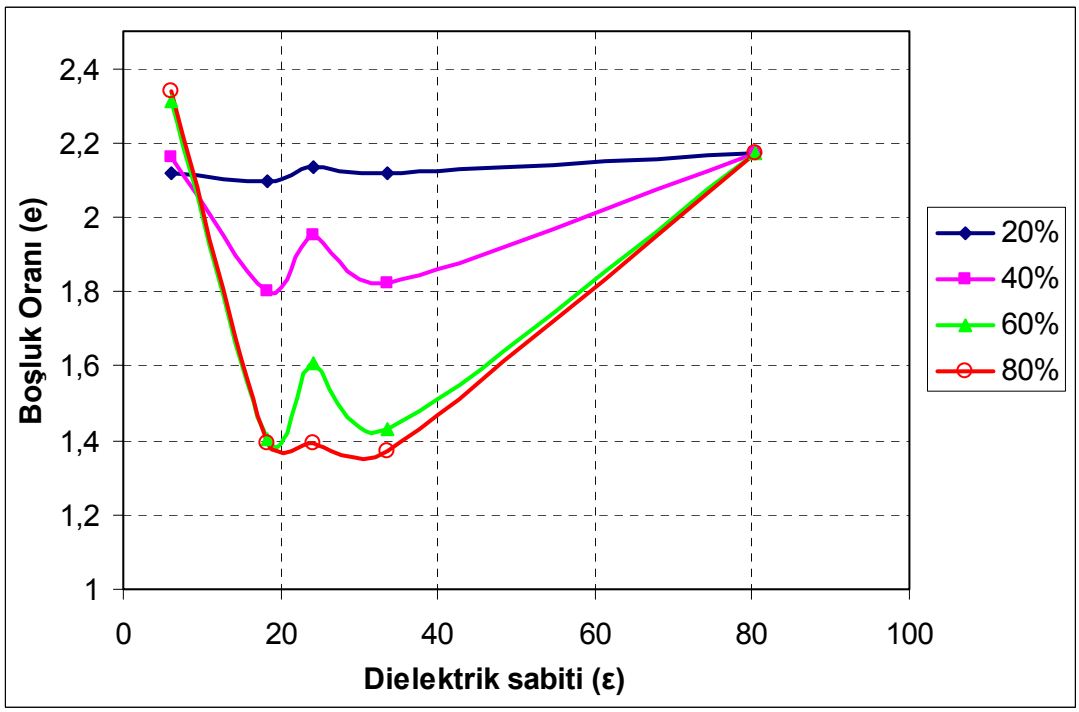
Şekil 5.125.'de 50 kPa gerilme kademesi için verilen boşluk oranları değerleri incelendiğinde sonuçların 0 ve 25 kPa gerilme kademelerinde elde edilen değerlerle paralellik gösterdiği sadece asetik asitin %20 ve %40 konsantrasyonunda elde edilen boşluk oranları değerlerinin saf su için elde edilen boşluk oranı değerinden küçük olduğu görülmektedir.

Şekil 5.126. ve Şekil 5.127.'de 100 ve 200 kPa gerilme kademeleri için elde edilen boşluk oranları değerleri incelendiğinde sonuçların 50 kPa gerilme kademesinde elde edilen boşluk oranı değerleriyle paralellik gösterdiği görülmektedir.

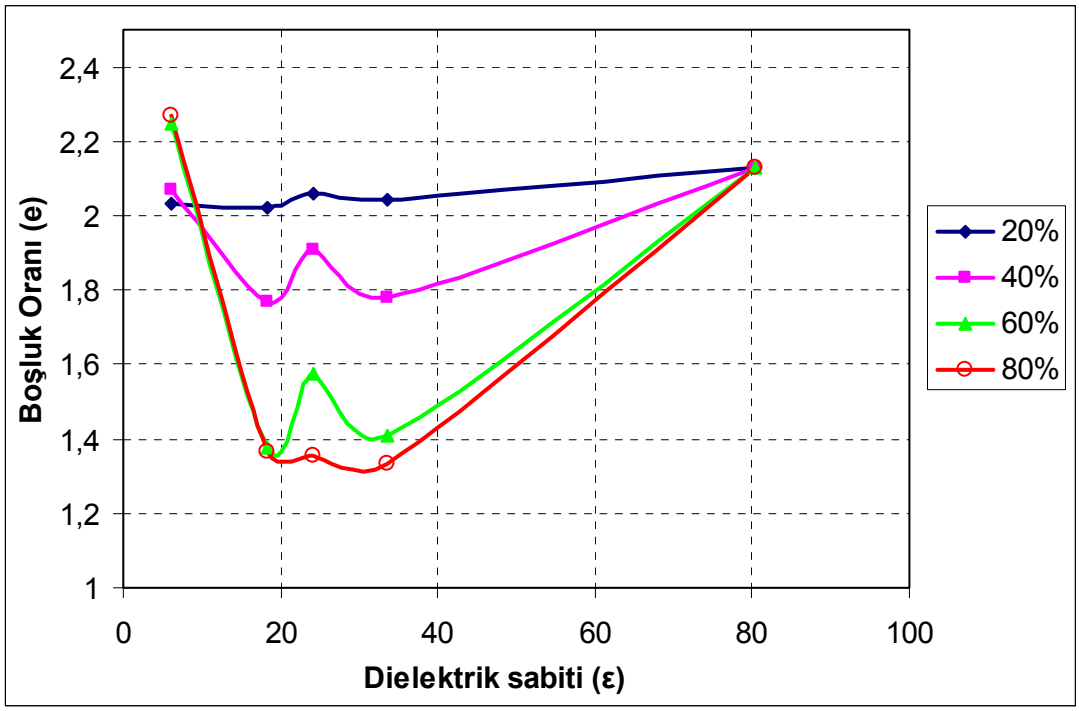
Şekil 5.128.'de 400 kPa gerilme kademesi için verilen boşluk oranları değerleri incelendiğinde; saf su ve diğer kimyasallar için elde edilen boşluk oranı değerlerinin artık birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum aslında 200 kPa gerilme kademesi içinde kısmen geçerli olmaktadır. Bu durum 200 kPa gerilme kademesine kadar zeminin sıkışması üzerinde fiziko-kimyasal faktörlerinin etkili olduğu 200 kPa gerilme kademesinden sonra ise mekaniksel faktörlerin etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum Chen ve ark. (2000) tarafından 300 kPa üst tabaka gerilmesi üzerinde kilin davranışı üzerinde mekaniksel faktörlerin etkili olduğu şeklindeki ifadeleriyle örtüşmektedir.



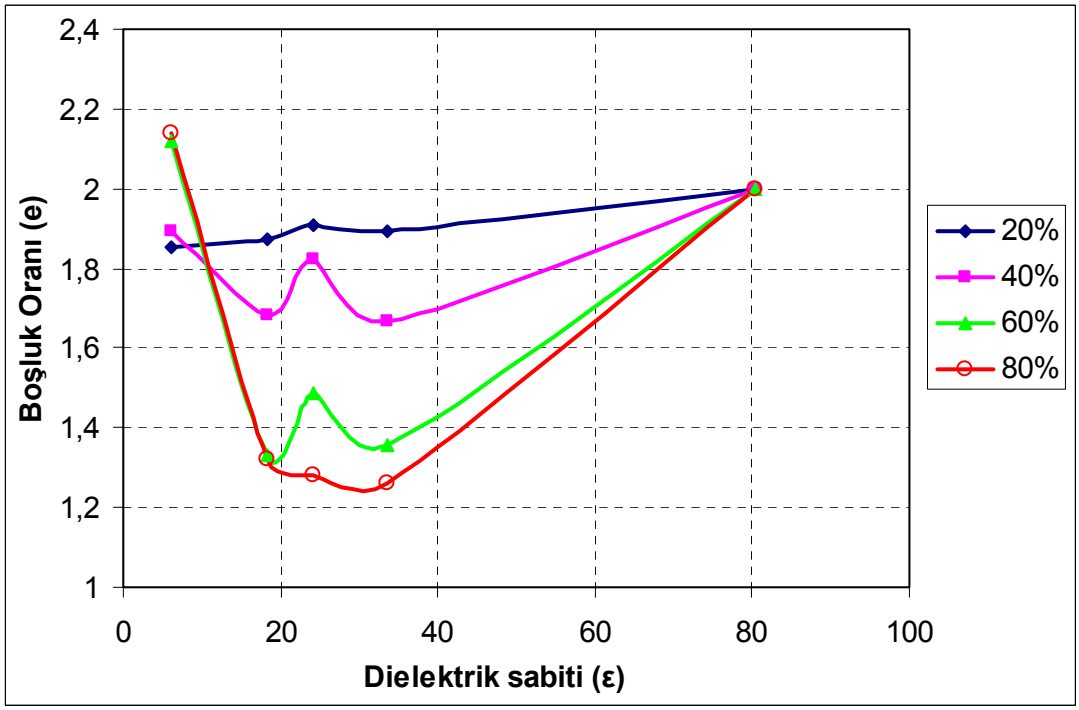
Şekil 5.123. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için başlangıç boşluk oranlarının (0 kPa) dielektrik sabiti ile değişimi



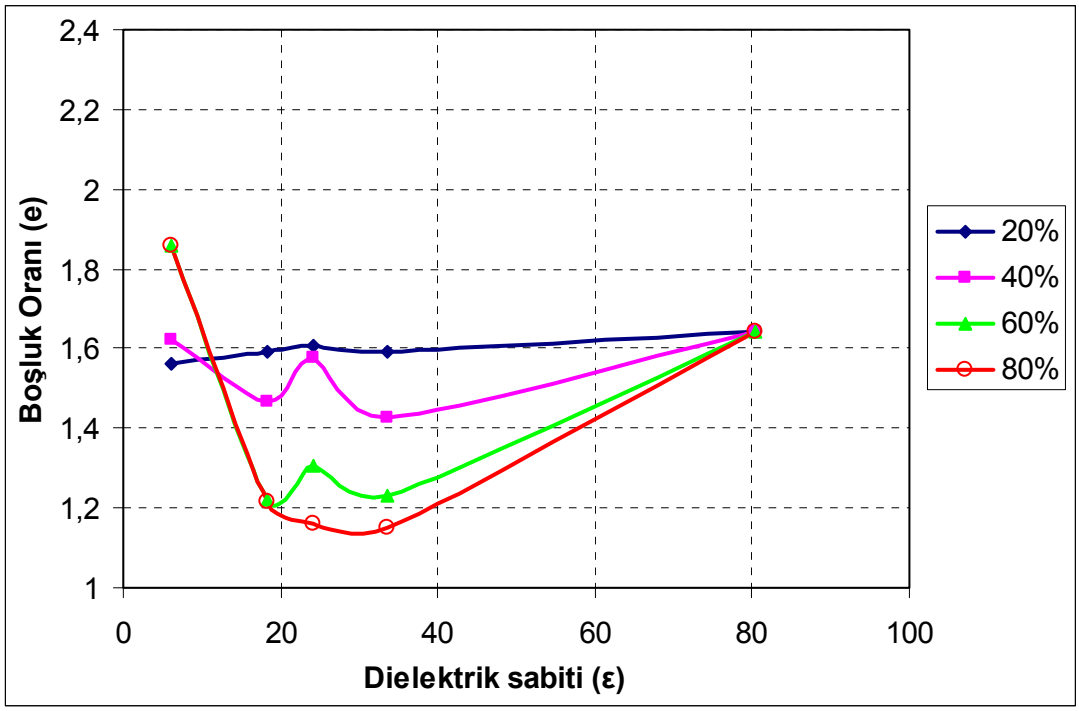
Şekil 5.124. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 25 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



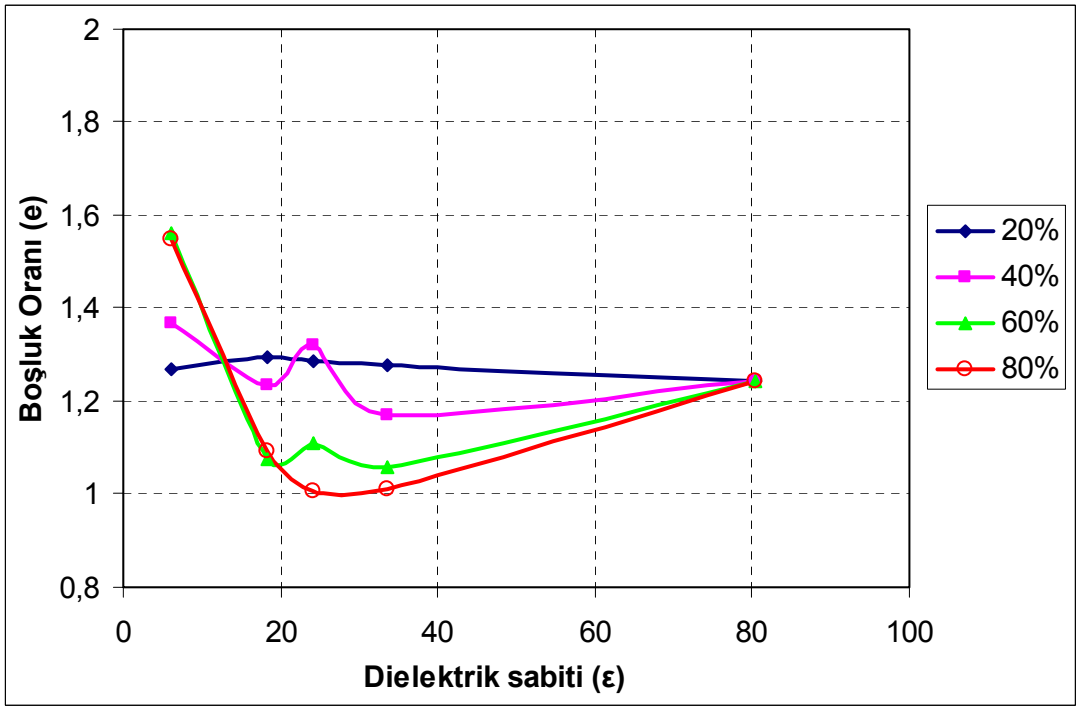
Şekil 5.125. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 50 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.126. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 100 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.127. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvının değişik konsantrasyonları için 200 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi



Şekil 5.128. Aksaray kilinde su ve kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için 400 kPa konsolidasyon basıncı altında boşluk oranı - dielektrik sabiti değişimi

5.8. Kimyasal Sıvılar Varlığında Taneciklerin Flokülasyonunun Fotoğraflarla Gösterilmesi

Killi zeminlerin boşluk suyu kimyasal sıvılarla yer değiştirdiği zaman mühendislik özellikleri anlamlı miktarda değişmekte ve silt-ince kum davranışına yakın bir davranış göstermektedirler. Mühendislik özelliklerindeki bu değişimler parçacıklar arasındaki itme ve çekme kuvvetlerindeki azalma nedeniyle parçacıkların topaklanması temeline dayanmaktadır (Kaya ve Fang 2005). Deneylerde kullanılan kaolinit ve Aksaray kilinde bu fiziko-kimyasal kuvvetlerin etkisi ile parçacıklarının flokülasyonunun deneysel ispatını göstermek amacıyla bir optik mikroskop (OM) kullanılmış ve kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonlarıyla süspansiyon şeklinde hazırlanan numunelerin fotoğrafları çekilmiştir. Optik mikroskopla elde edilen fotoğraf sonuçları zeminin boşluk sıvısı kimyasal sıvılarla yer değiştirdiği zaman zemin parçacıklarının topaklandığını ve kümelenmiş bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Flokülasyonun derecesi ve kümelenme biçiminin boyutu kil minerallerinin cinsi ve organik sıvının karakteristiklerine bağlıdır.

5.8.1. Kaolinitte flokülasyon olayının fotoğraflarla gösterilmesi

Şekil 5.129.'de boşluk sıvısının saf su olması durumunda kaolinit tanecikleri tek tek küçük parçacıklar halinde dağınık vaziyette durmaktadır. Kil parçacıkları arasında hemen hemen görülebilir bir etkileşim yoktur.

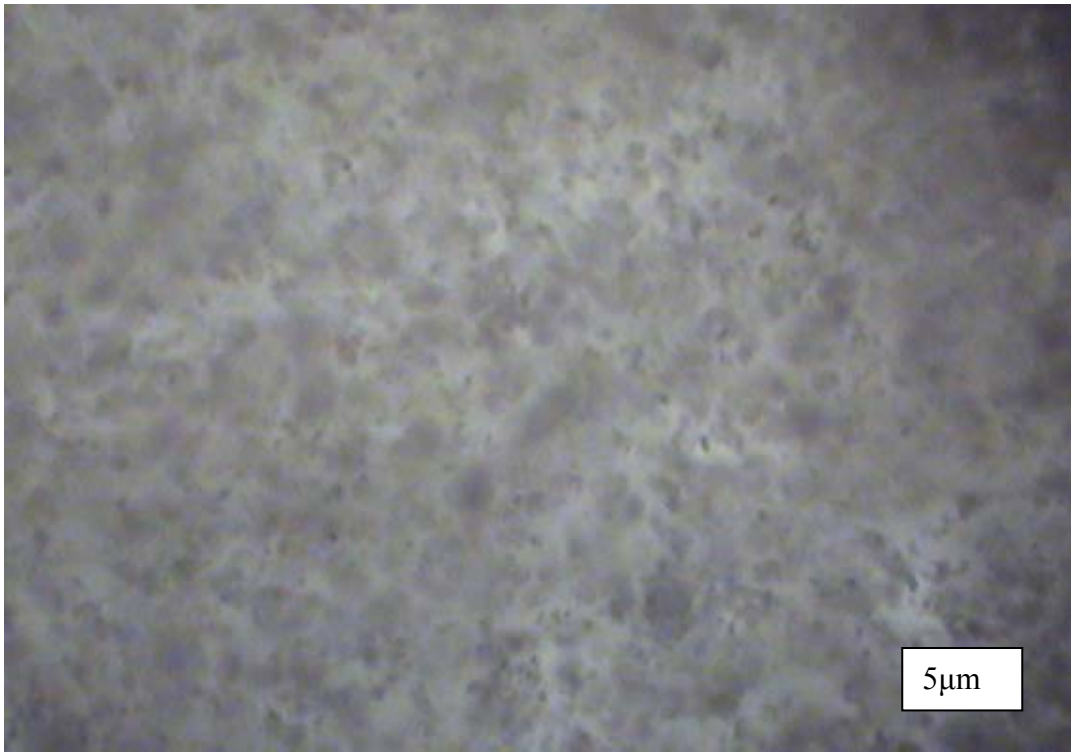
Şekil 5.130., Şekil 5.133. arasında methanol için verilen görüntülerde %20 ve %40 konsantrasyonlar için çok belirgin olmasa da taneciklerin birbirine doğru yaklaşma eğiliminde olduğu ama tam olarak bir kümelenmenin olmadığı görülmektedir. %60 konsantrasyonla birlikte taneciklerin kümelenmesi belirginleşmekte ama tek kalmış kaolinit tanecikleri de dikkat çekmektedir. %80 konsantrasyonda ise taneciklerin küme şeklindeki topaklanmış görüntüleri çok açık bir şekilde görülebilmektedir. Topaklanmış büyük parçacıkların yanında tek gözüken parçacıklar bile kendi içerisinde topaklanmış küçük bir küme oluşturmaktadırlar.



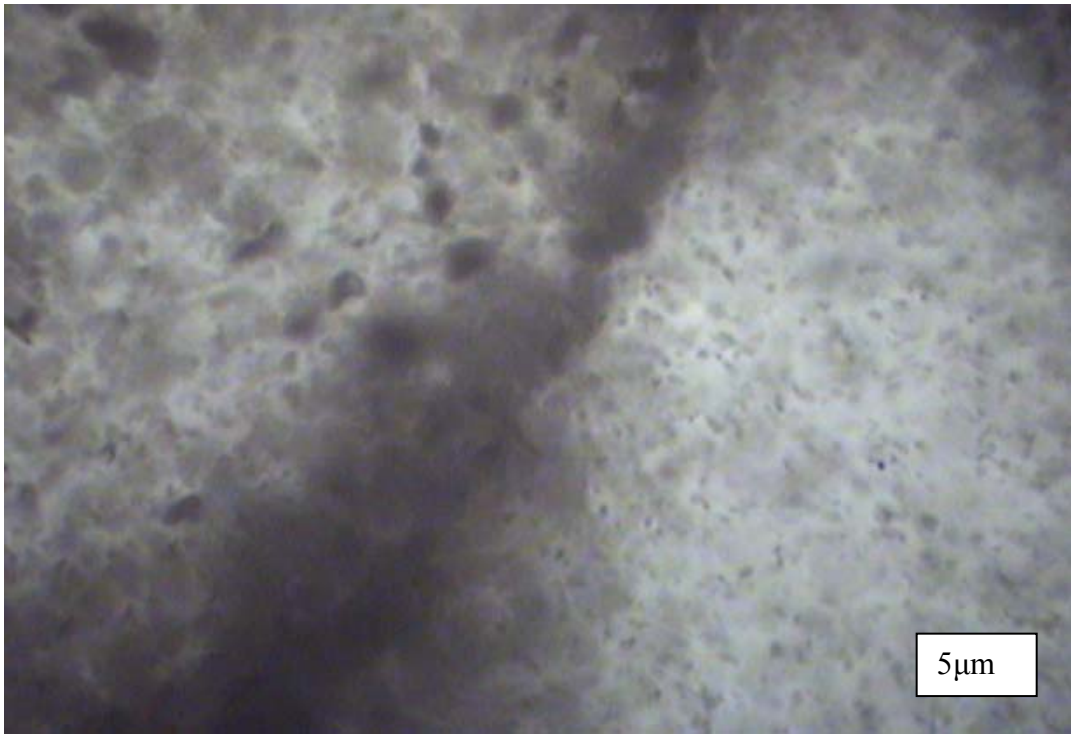
Şekil 5.129. Kaolinitte saf su varlığında taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



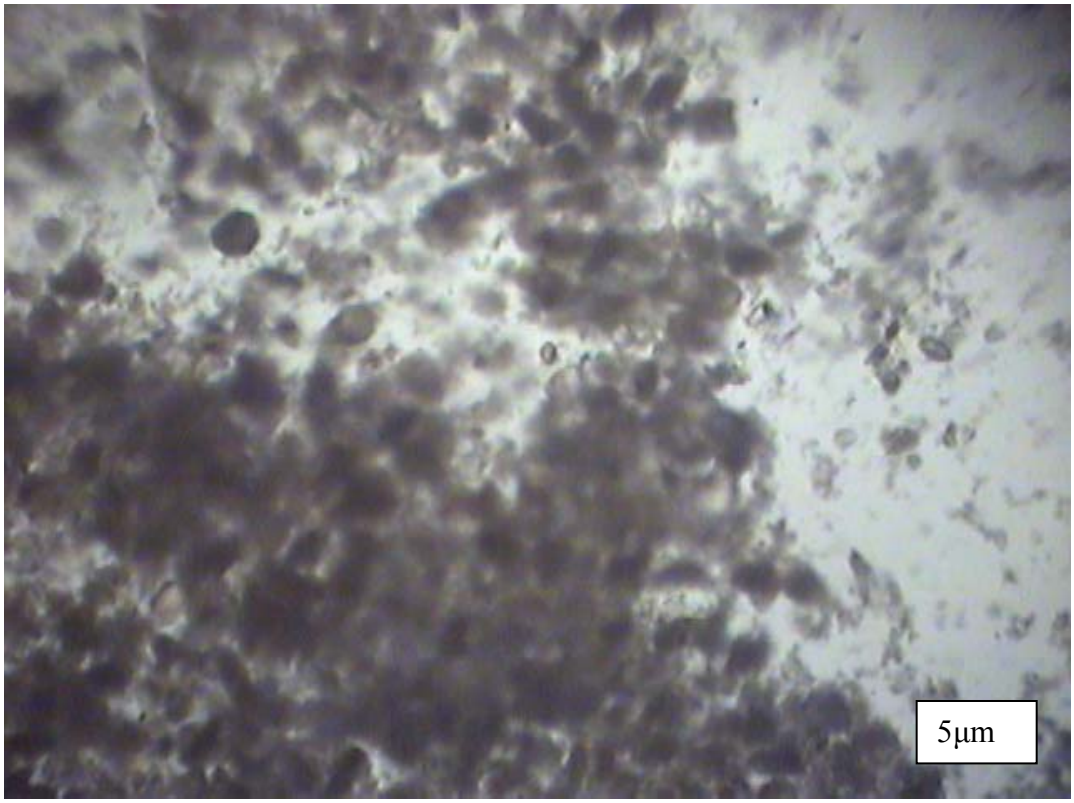
Şekil 5.130. Kaolinitte % 20 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.131. Kaolinitte % 40 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

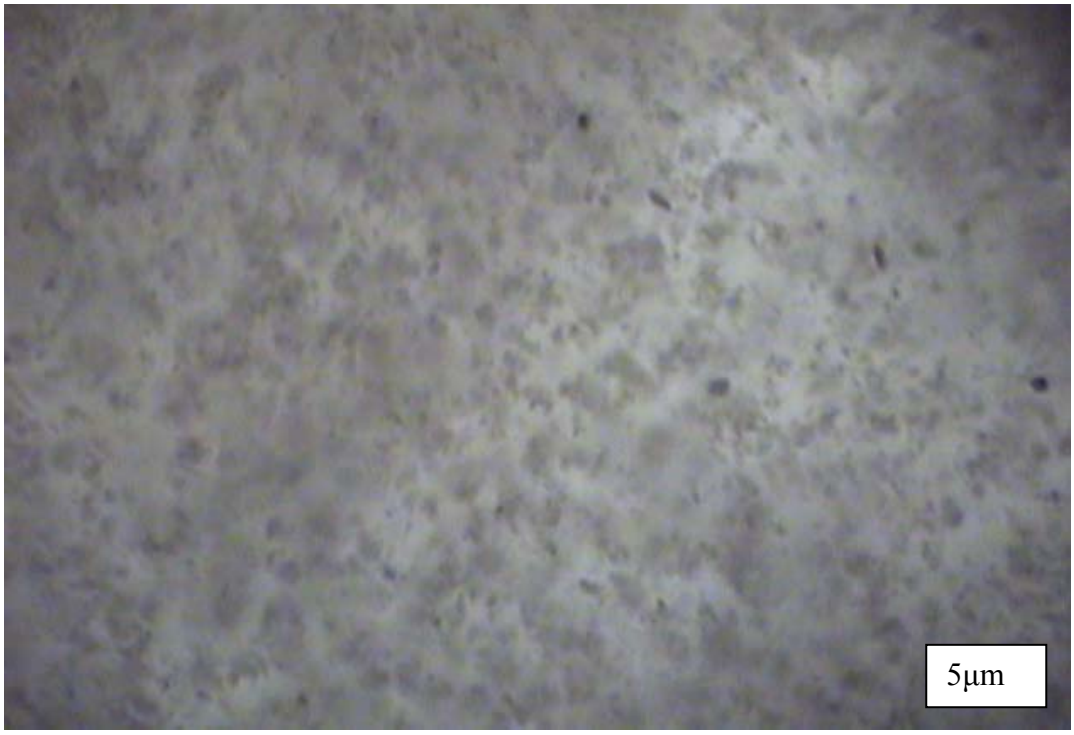


Şekil 5.132. Kaolinitte % 60 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

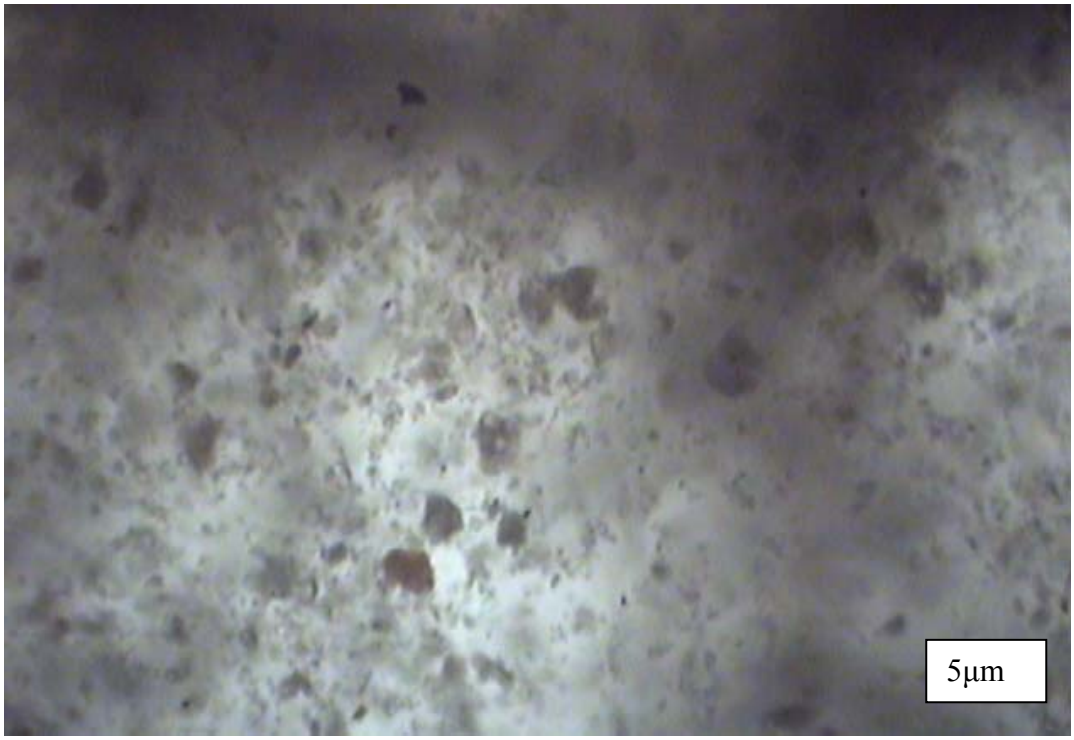


Şekil 5.133. Kaolinitte % 80 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

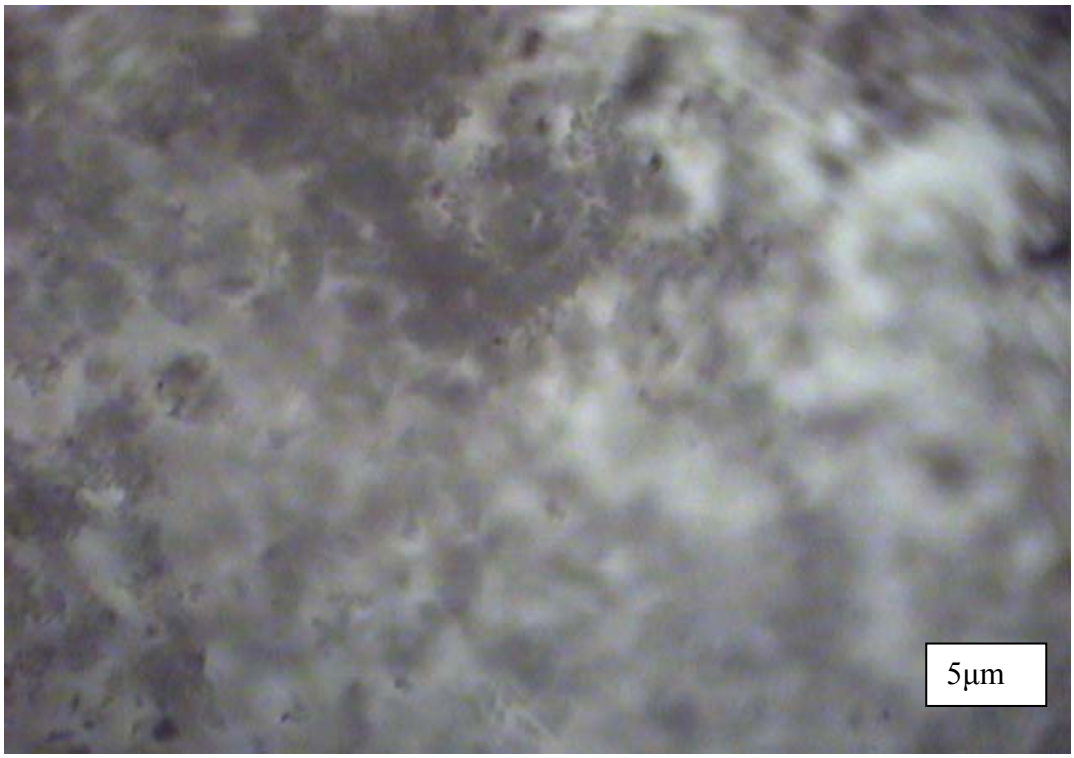
Şekil 5.134., Şekil 5.137. arasında dielektrik sabiti ε=24,3 olan ethanolün değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; ethanolün %20 konsantrasyonu için elde edilen görüntülerin methanolün %20 konsantrasyonu için elde edilen görüntülere yakın olduğu görülmektedir. Görüntülerde tek gözüken parçacıklar mevcuttur. %40 ethanol konsantrasyon için elde edilen görüntülerde taneciklerin birleşme yönünde bir eğiliminin olduğu ve çok küçük gözüken kümeciklerin olduğu görülmektedir. %60 konsantrasyon için kümelenmelerin bulanık bir şekilde ama mevcut olduğu görülmektedir. %80 konsantrasyonda ise oluşan kümecikler çok açık bir şekilde görülmekte olup, kristalize olmuş bir görünümdeki küçük kümeciklerin kendi içerisinde birleşme eğiliminde olduğu bir durum söz konusudur.



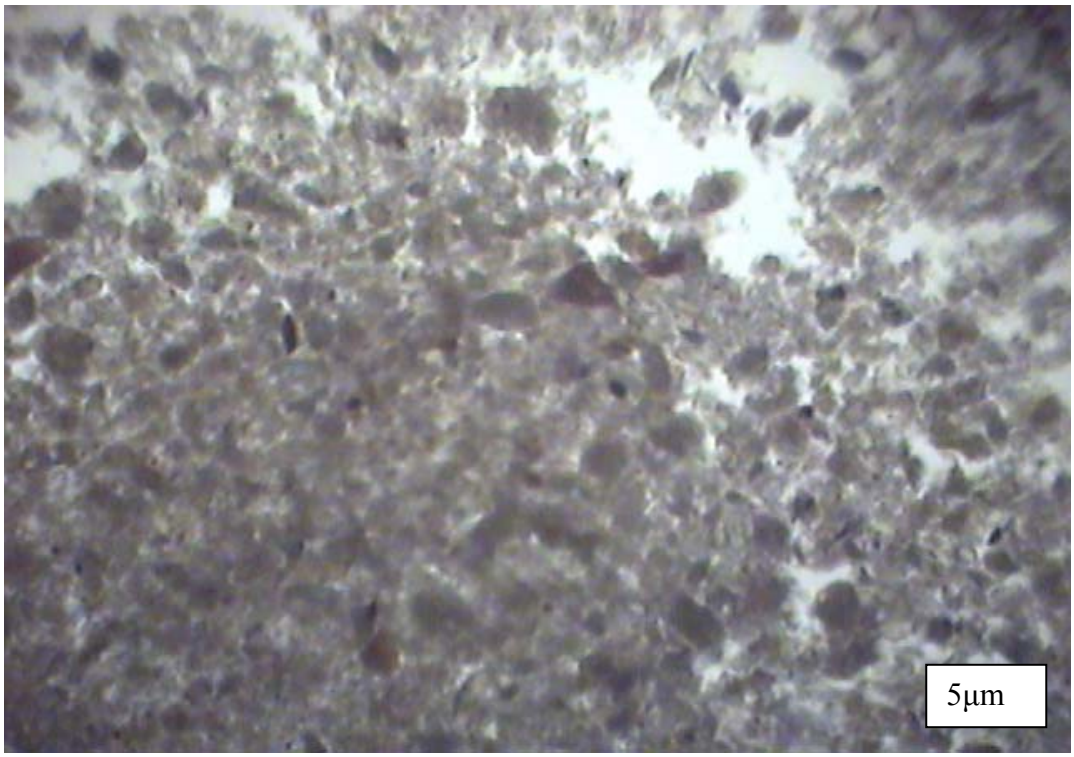
Şekil 5.134. Kaolinitte % 20 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.135. Kaolinitte % 40 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

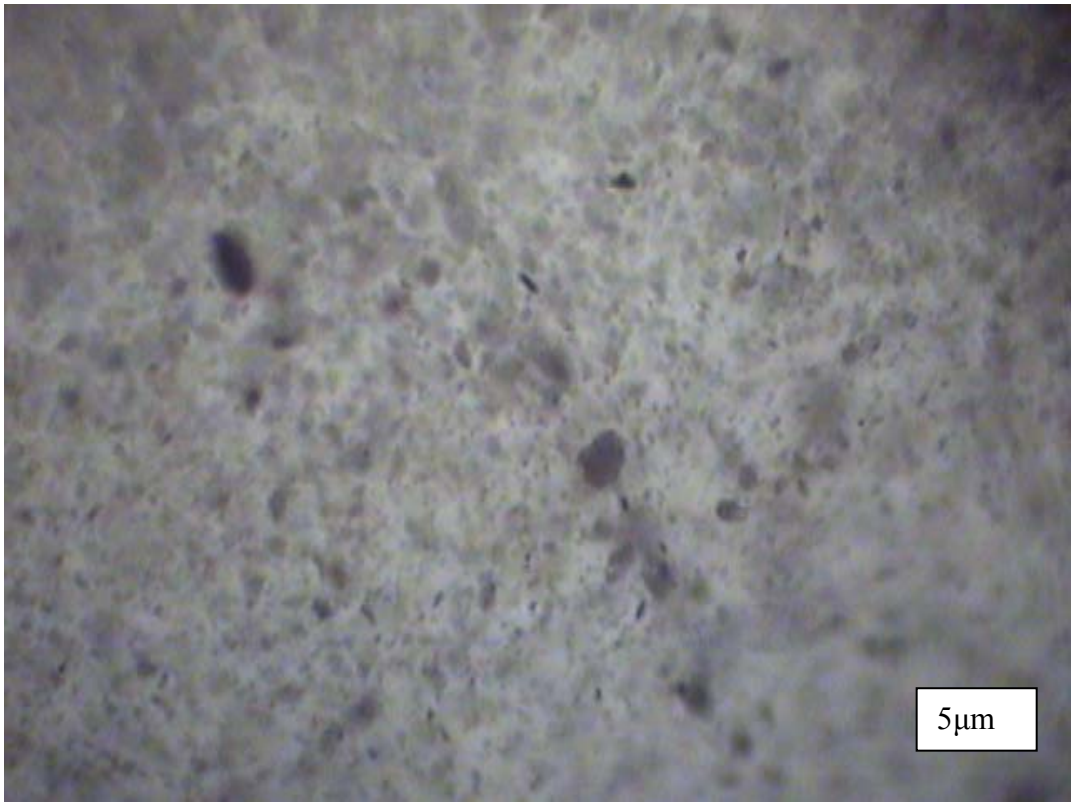


Şekil 5.136. Kaolinitte % 60 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

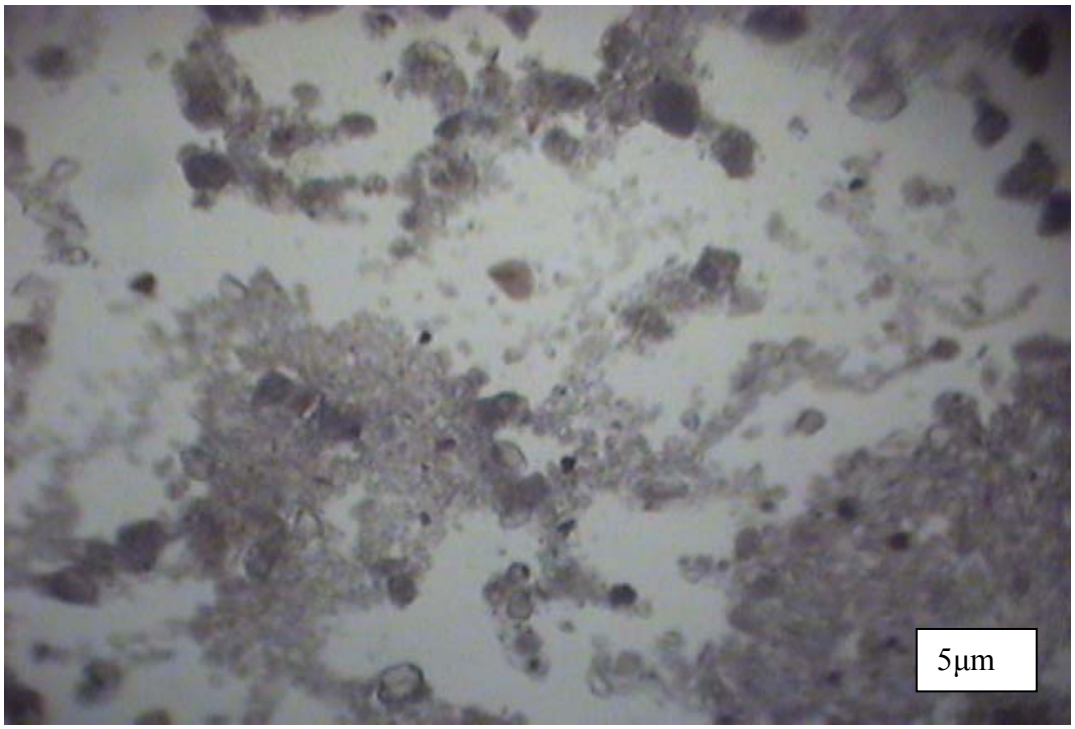


Şekil 5.137. Kaolinitte % 80 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

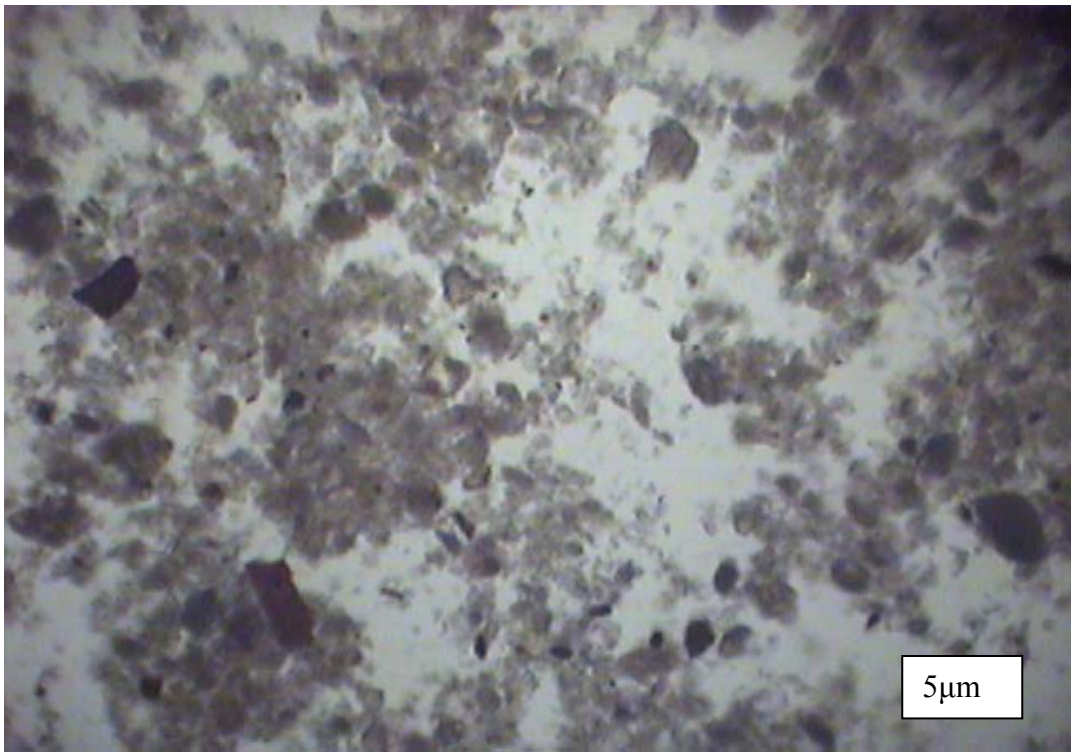
Şekil 5.138., Şekil 5.141. arasında dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; izo-propil alkolün %20 konsantrasyonu için elde edilen görüntülerde tam olarak bir kümelenme gözükmese de parçacıkların birbirlerine doğru yaklaşma eğiliminde olduğu anlaşılmakta olup, methanol ve ethanole göre bu konsantrasyonda kaolinit parçacıkları daha net gözükmektedir. İzo-propil alkolün %40 konsantrasyonu için ise aşırı bir yumaklanma olmasa da taneciklerin zincire benzer bir biçimde oluşum içerisinde olduğu görülmektedir. İzo-propil alkolün %60 konsantrasyonunda zincir şeklindeki yapıların daha fazla birleşme yönünde bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. %80 konsantrasyon için ise adeta kristalize olmuş aralarında küçük gözenekleri olan topaklanmış bir yapı açık ve net olarak görülmekte olup tanecikler adeta ince kum parçacıklarını andırmaktadırlar.



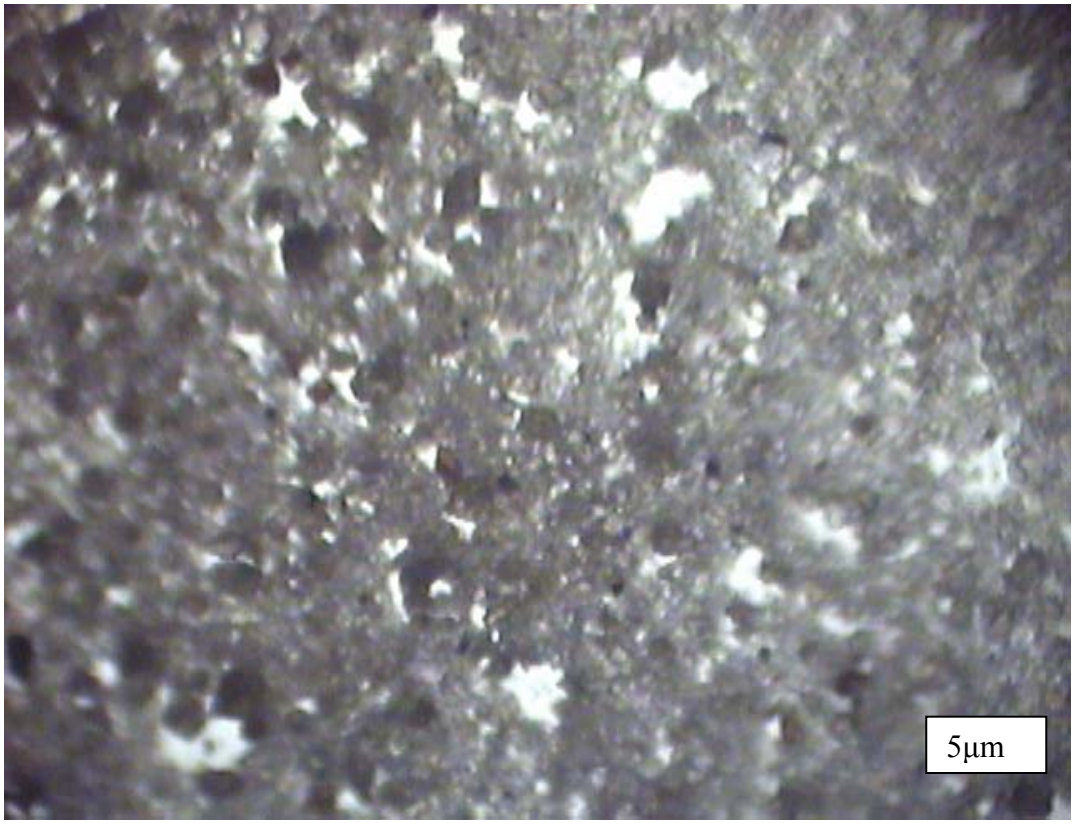
Şekil 5.138. Kaolinitte % 20 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.139. Kaolinitte % 40 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.140. Kaolinitte % 60 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

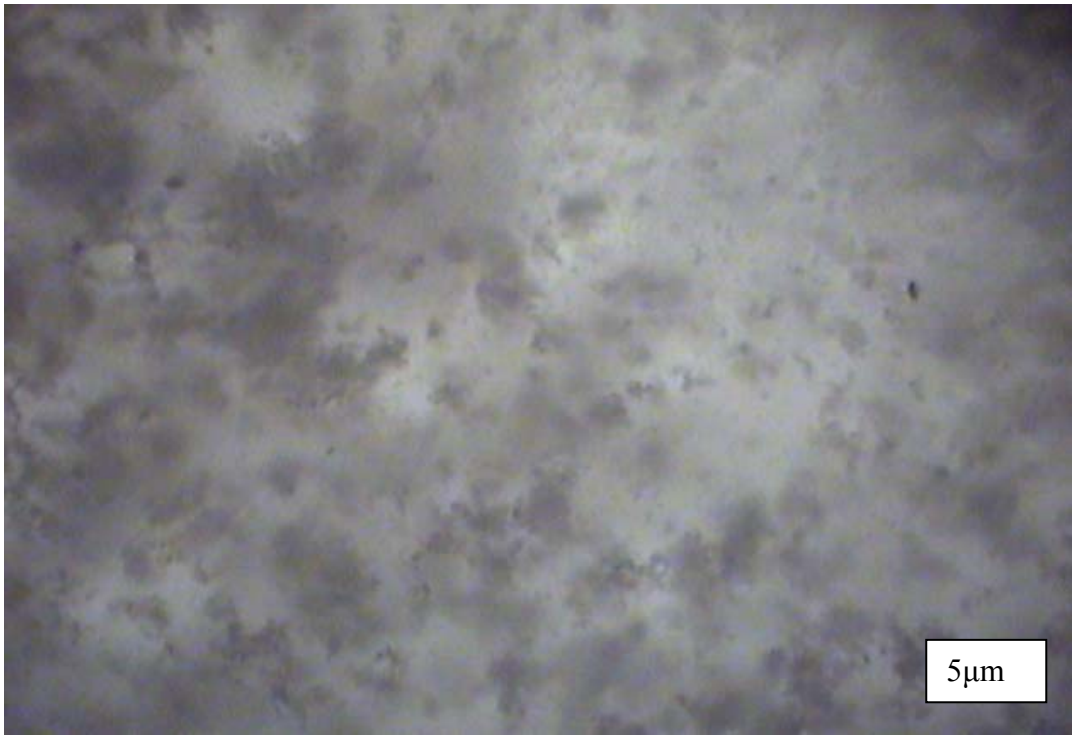


Şekil 5.141. Kaolinitte % 80 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

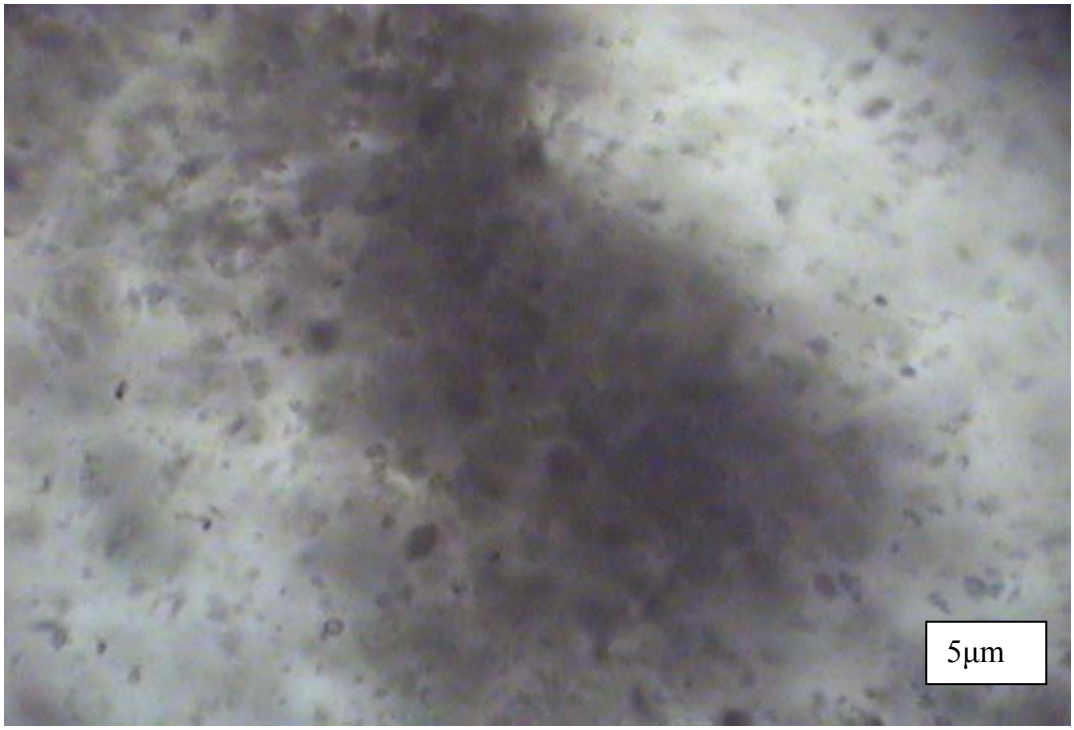
Şekil 5.142., Şekil 5.145. arasında dielektrik sabiti ε=6,2 olan asetik asitin değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; asetik asitin %20 konsantrasyonu için taneciklerin kümelenme yönünde bir eğilimde olduğu görülmektedir. %40 konsantrasyonda ise taneciklerin kümelenmesinin daha net olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

%60 asetik asit konsantrasyonunda ise oluşan küçük kümeciklerin daha belirgin olduğu ve bunların da kendi içerisinde birleşme eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. %80 konsantrasyonda ise daha fazla flokülasyona uğramış, peteksi görünüme sahip büyük bir yığının oluştuğu görülmektedir.

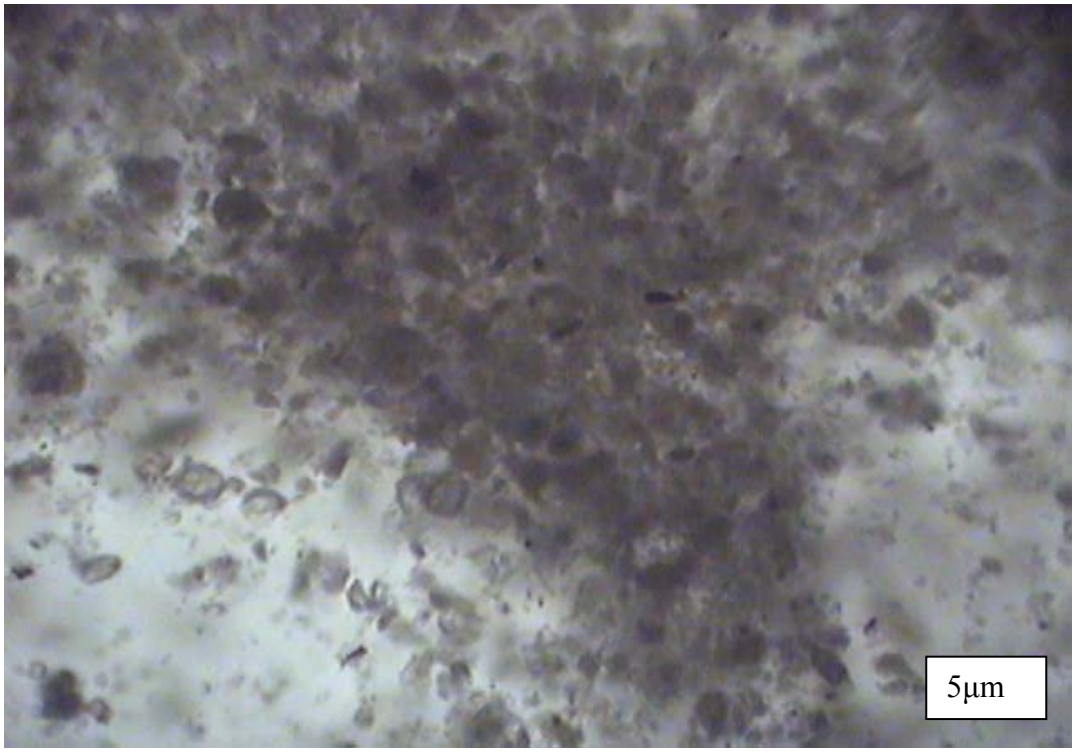
Tüm konsantrasyonlar için elde edilen görüntülerin meydana gelen jelleşmeden dolayı diğer kimyasal sıvılar için elde edilen görüntülere göre bulanık olduğu dikkat çekmektedir.



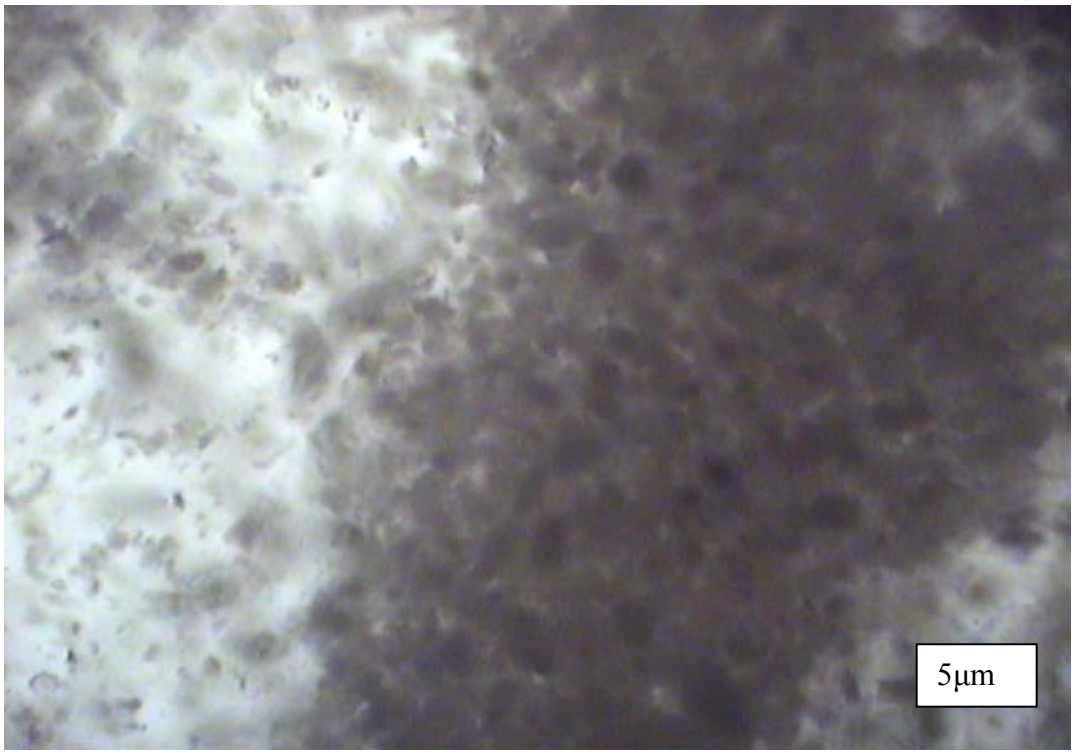
Şekil 5.142. Kaolinitte % 20 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.143. Kaolinitte % 40 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.144. Kaolinitte % 60 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.145. Kaolinitte % 80 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

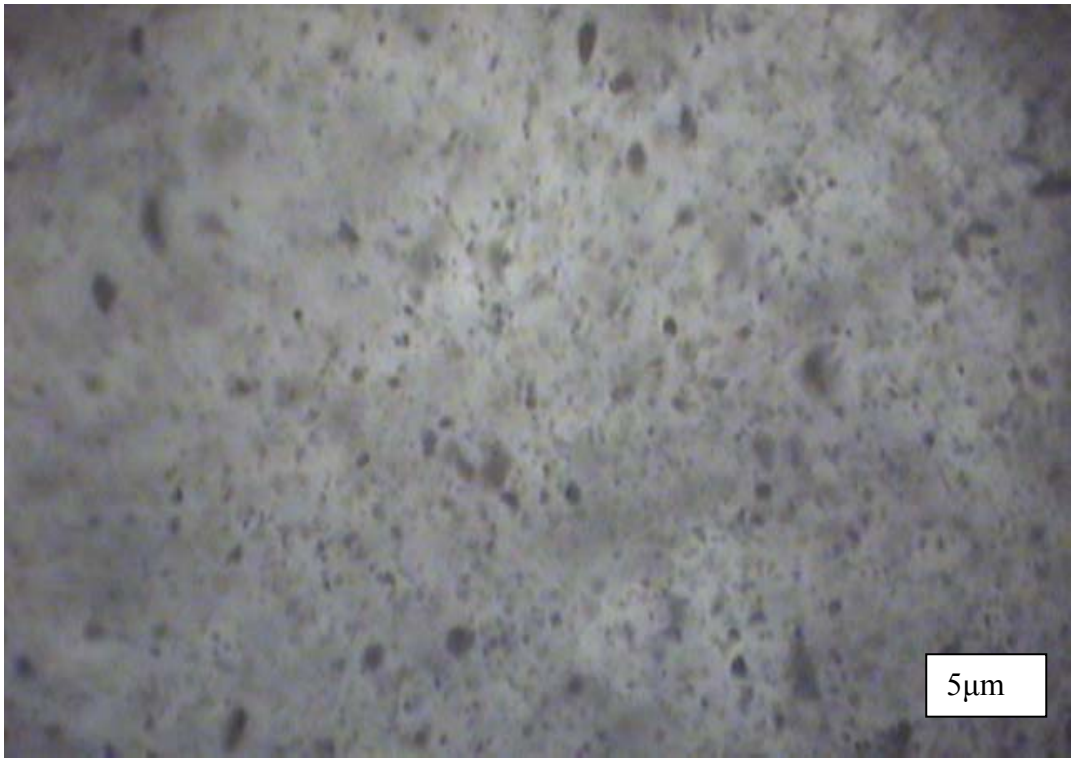
Kaolinit için elde edilen optik mikroskop görüntüleri genel olarak değerlendirildiği zaman; %20 konsantrasyonlar için taneciklerde net bir kümelenme gözükmemesine rağmen bu yönde eğilime sahip oldukları anlaşılabilmektedir. %40 konsantrasyonlarda ise ethanol ve methanol için tam olarak bir kümelenme başlamamasına rağmen, izo-propil alkol ve asetik asitte kümelenme olayı daha belirgin bir şekilde kendisini hissettirmektedir. %60 konsantrasyonlar için bütün kimyasal sıvılarda kümelenme olayı görülebilirken, özellikle %80 konsantrasyon için elde edilen fotoğraflar durumu daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır. %80 konsantrasyon için hemen hemen tüm kimyasallarda elde edilen görüntüler flokülasyon olayını ispatlarken özellikle izo-propil alkol ve ethanol kimyasal sıvısı için daha belirgin görüntüler elde edilmiştir.

Kaolinit kilinde kimyasalların artan konsantrasyonları ile flokülasyon daha belirgin şekilde ortaya çıkmakta, en şeffaf görüntüler ise izo-propil alkolde ortaya çıkmaktadır. Dielektrik sabiti en küçük olan asetik asitte ise elde edilen görüntüler biraz bulanık olup bu bulanıklığın kaolinitin yapısında meydana gelen jelleşme olayına bağlı olduğu düşünülmektedir. Elde edilen görüntülerdeki flokülasyon miktarı dereceleri kimyasal sıvıların varlığında kaolinitte meydana gelen mukavemet artışı değerleri ile örtüşmektedir.

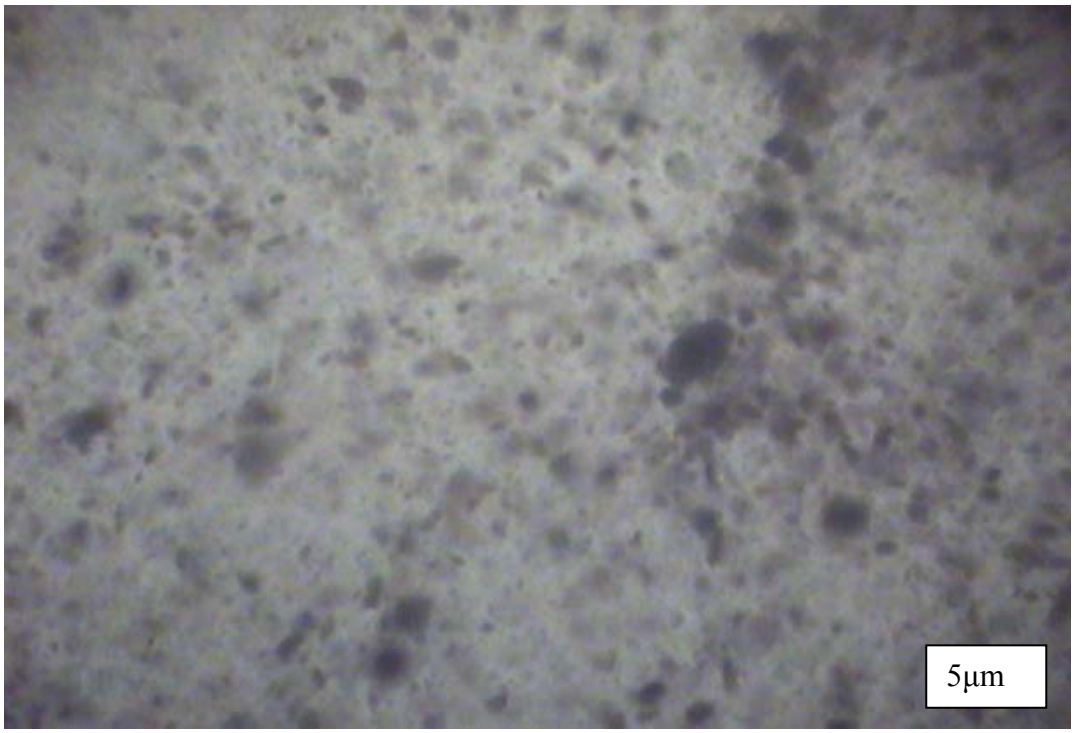
5.8.2. Aksaray kilinde flokülasyon olayının fotoğraflarla gösterilmesi

Şekil 5.146. boşluk sıvısının saf su olması durumunda Aksaray kilinde tanecikler tek tek küçük parçacılar halinde dağınık vaziyette durmaktadır. Kil parçacıkları arasında görülebilir bir etkileşim yoktur.

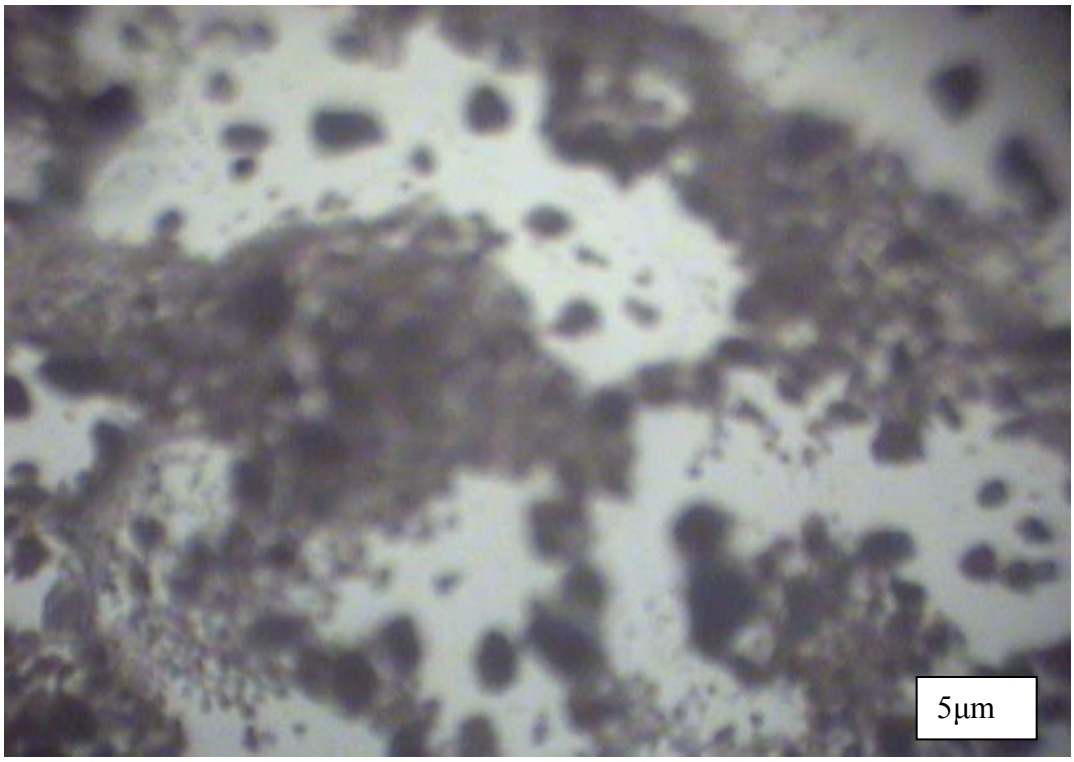
Şekil 5.147., Şekil 5.150. arasında methanolün değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; %20 konsantrasyonda tanecikler arasındaki etkileşimin sonucu ufak kümeciklerin oluştuğu görülmektedir. %40 konsantrasyonda flokülasyon olayı net bir şekilde gözükmekte olup zincir şeklinde oluşan bir kümelenme mevcuttur. %60 konsantrasyon için meydana gelen kümelenme çok net gözükmekte ve %80 konsantrasyonda ise kümelenme hemen hemen tüm yüzeyi kaplamaktadır.



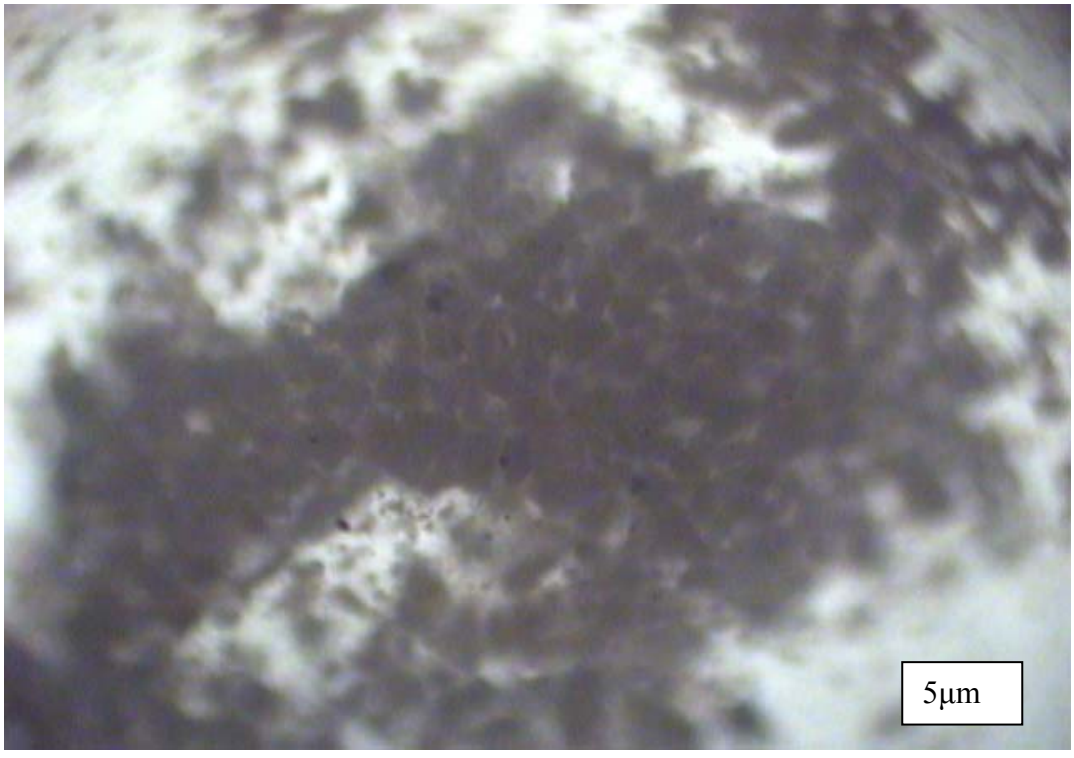
Şekil 5.146. Aksaray kilinde saf su varlığında taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



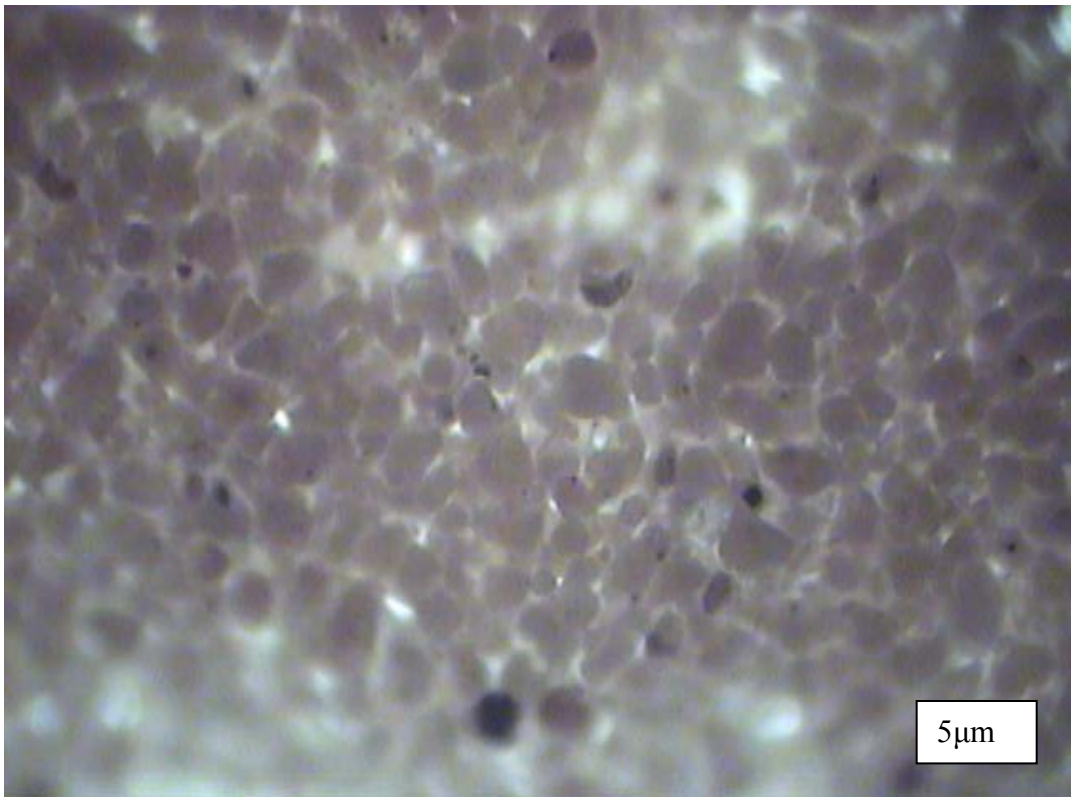
Şekil 5.147. Aksaray kilinde % 20 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.148. Aksaray kilinde % 40 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

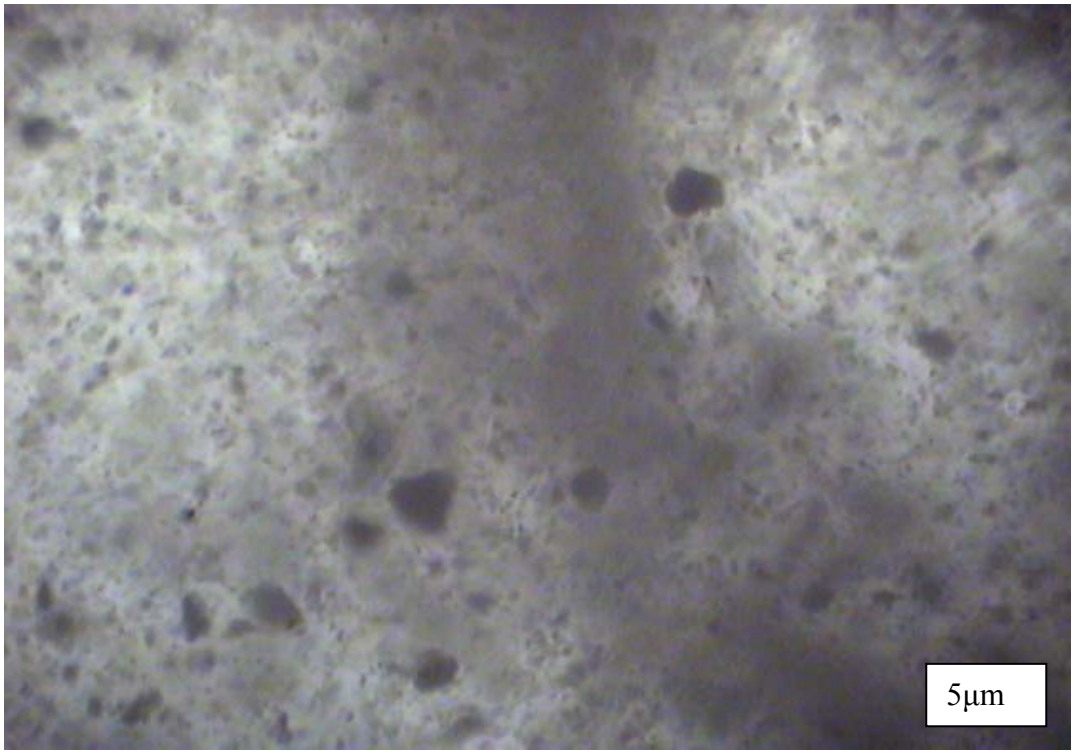


Şekil 5.149. Aksaray kilinde % 60 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

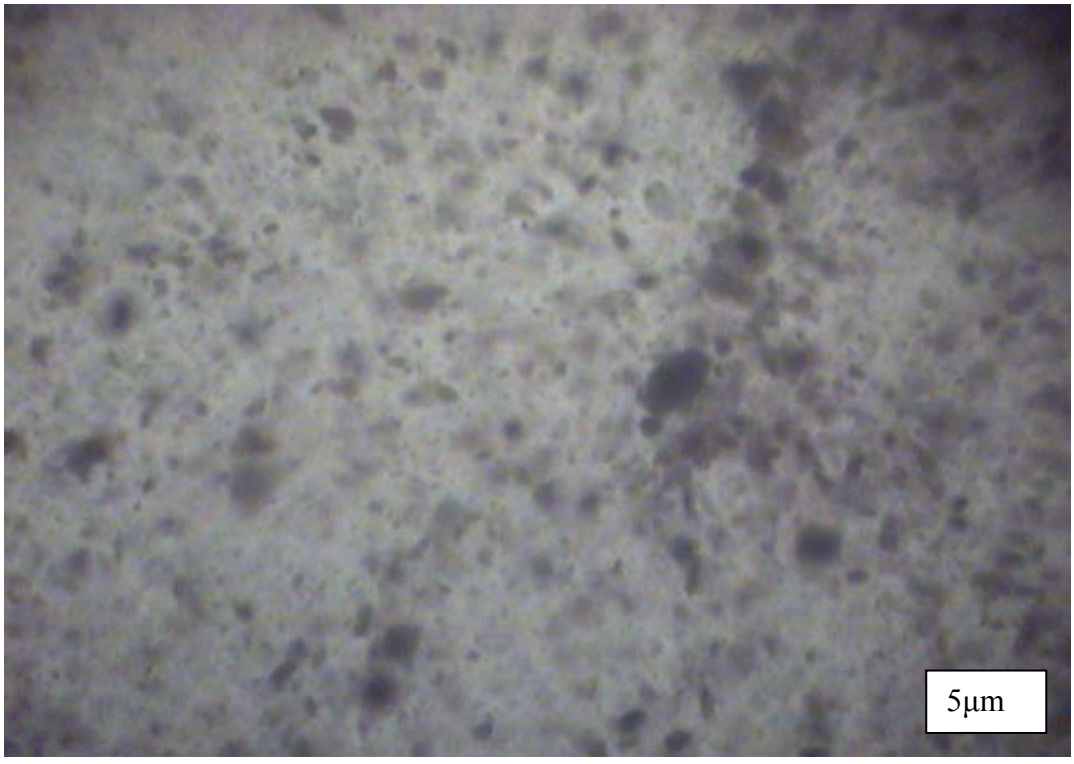


Şekil 5.150. Aksaray kilinde % 80 methanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

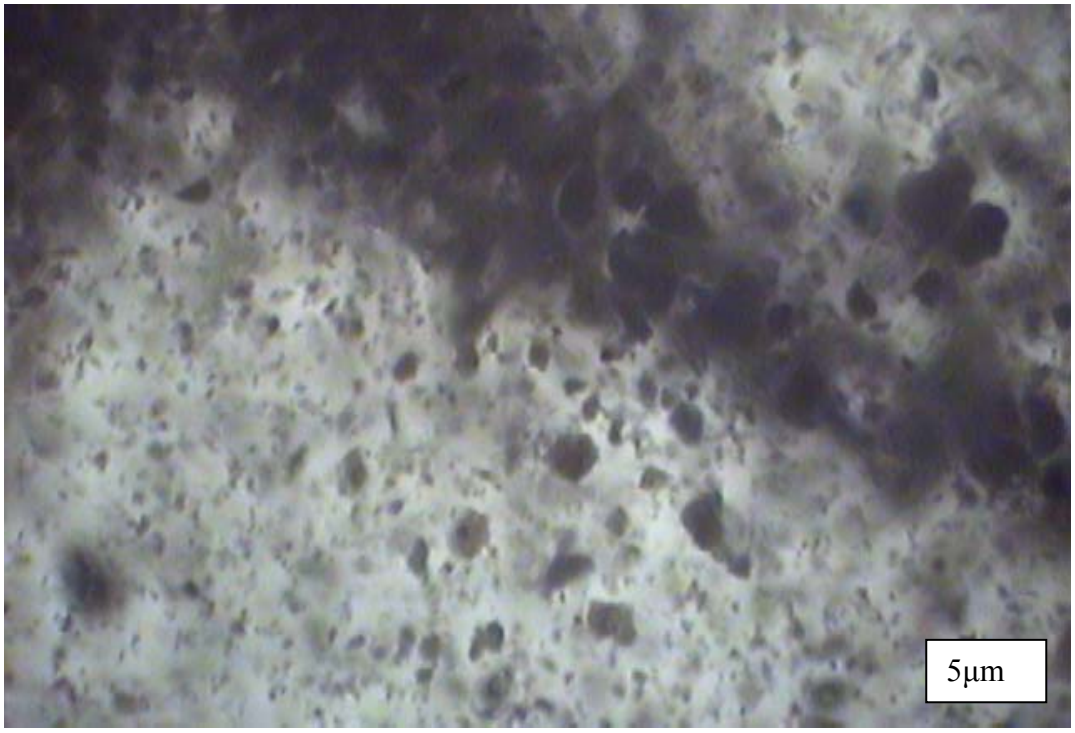
Şekil 5.151., Şekil 5.154. arasında dielektrik sabiti ε=24,3 olan ethanolün değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; %20 konsantrasyonda taneciklerin arasındaki çekim kuvvetinden dolayı, taneciklerin kümelenmek üzere birbirine yaklaşma eğiliminde olduğu görülmektedir. %40 ethanol konsantrasyonunda çok büyük olmamakla birlikte küçük kümeciklerin oluştuğu görülmektedir. %60 konsantrasyonda ise kümelenme olayı çok daha net bir şekilde gözükmekte olup hala tek parça halinde bulunan kil parçacıkları mevcuttur. %80 ethanol konsantrasyonu için flokülasyon miktarının daha fazla arttığı ve çekim kuvvetleri dolayısıyla merkezdeki yumaklanmış yapıya doğru diğer parçacıkların da yönlendiği açık bir şekilde görülmektedir.



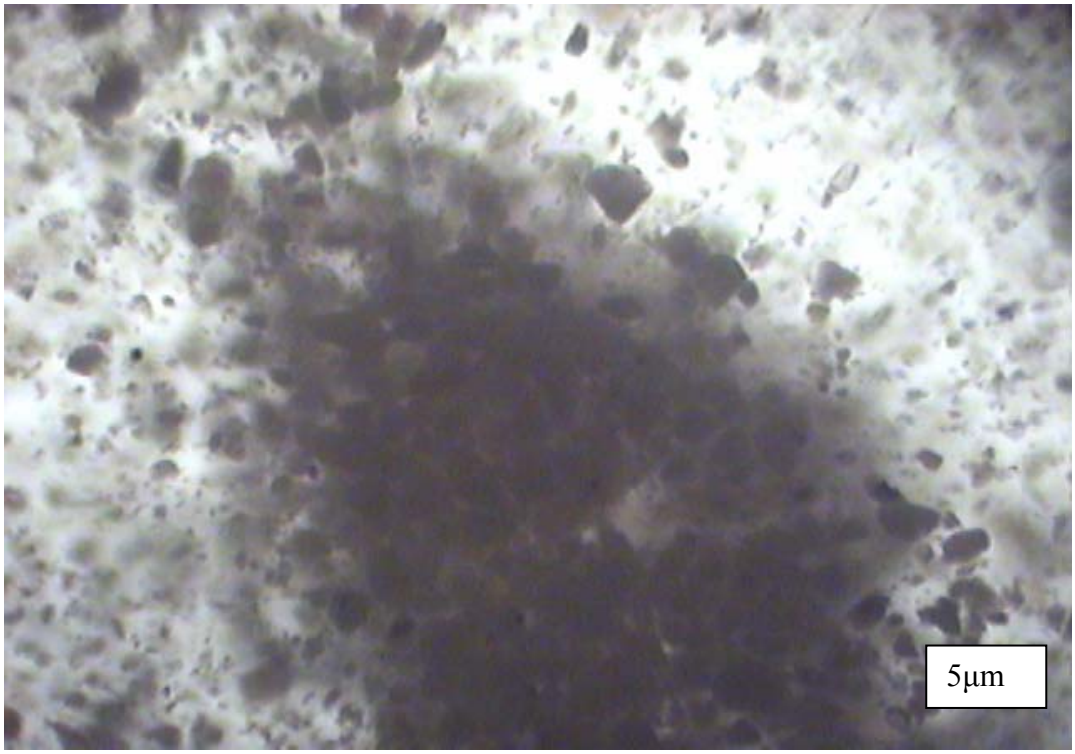
Şekil 5.151. Aksaray kilinde % 20 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.152. Aksaray kilinde % 40 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



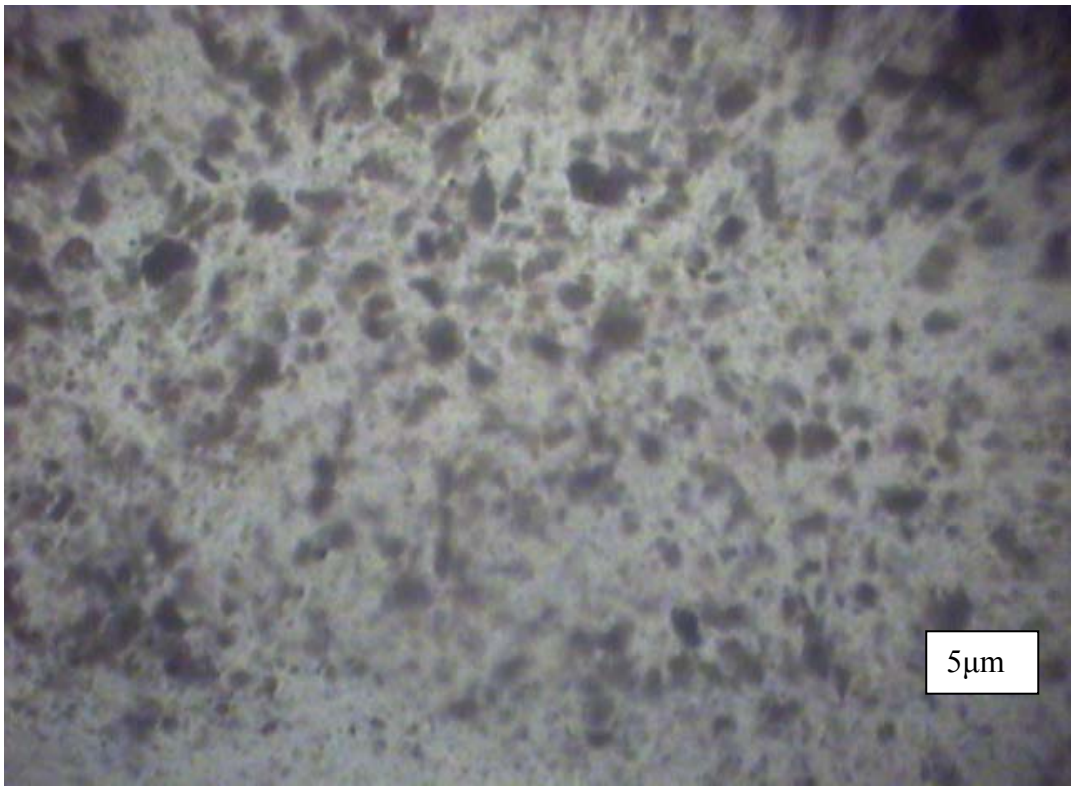
Şekil 5.153. Aksaray kilinde % 60 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



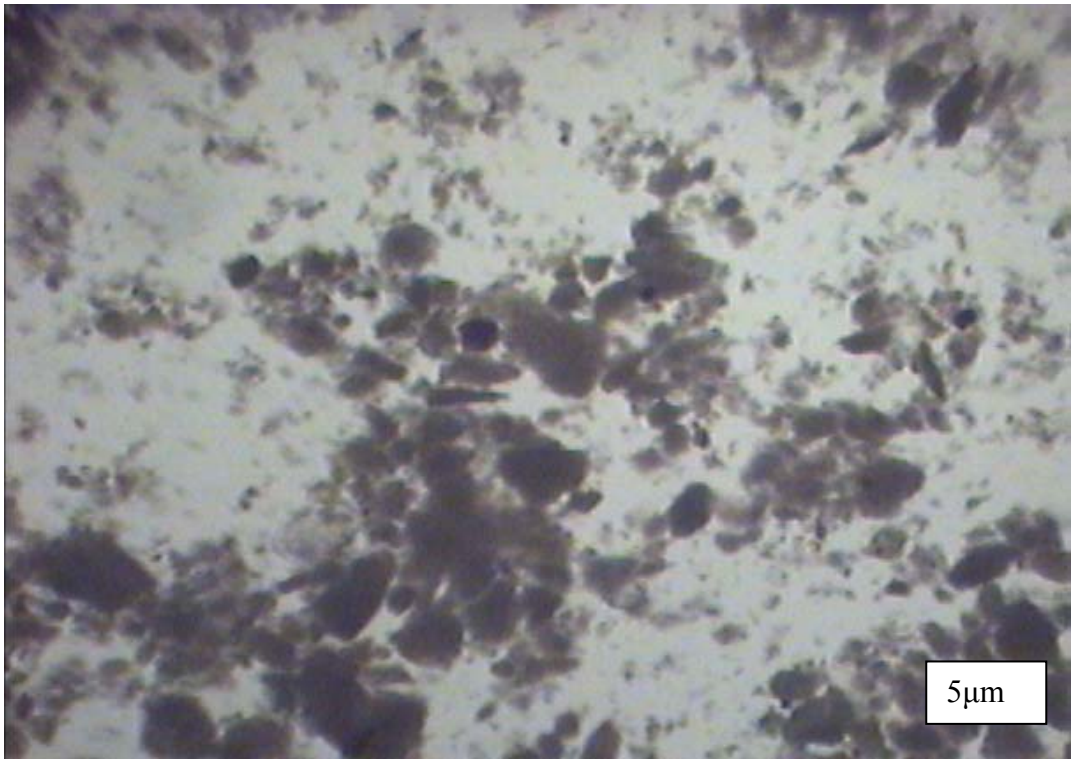
Şekil 5.154. Aksaray kilinde % 80 ethanol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

Şekil 5.155., Şekil 5.158. arasında dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkolün değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; %20 konsantrasyonda tanecikler arasındaki çekim kuvvetinden dolayı küçük kümeciklerin oluştuğu görülmektedir. %40 ve %60 izo-propil alkol konsantrasyonları için taneciklerin kümelenmesi kademeli olarak biraz daha artış göstermektedir.

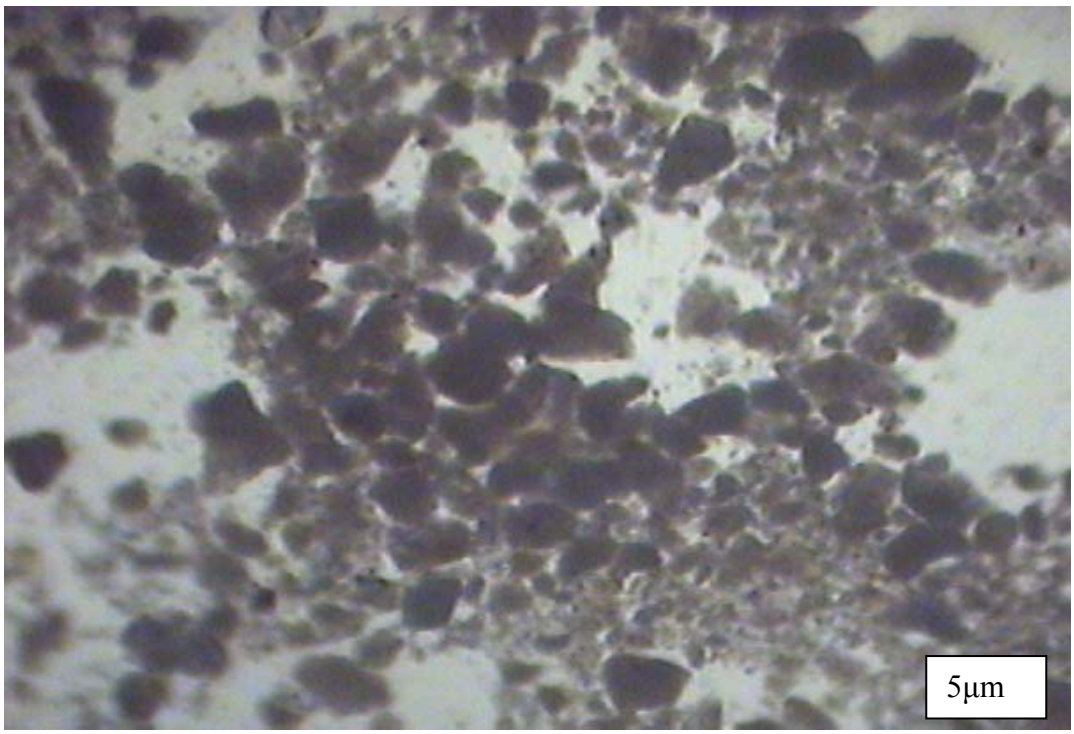
%80 konsantrasyonda ise kümelenme olayı çok daha net bir şekilde gözükmekte olup yumaklanmış peteksi bir yapı görülmektedir. %80 izo-propil alkol konsantrasyonu için merkezdeki yumaklanmış yapıya doğru diğer küçük kümeciklerin ve taneciklerin de yönlendiği açık bir şekilde görülmektedir.



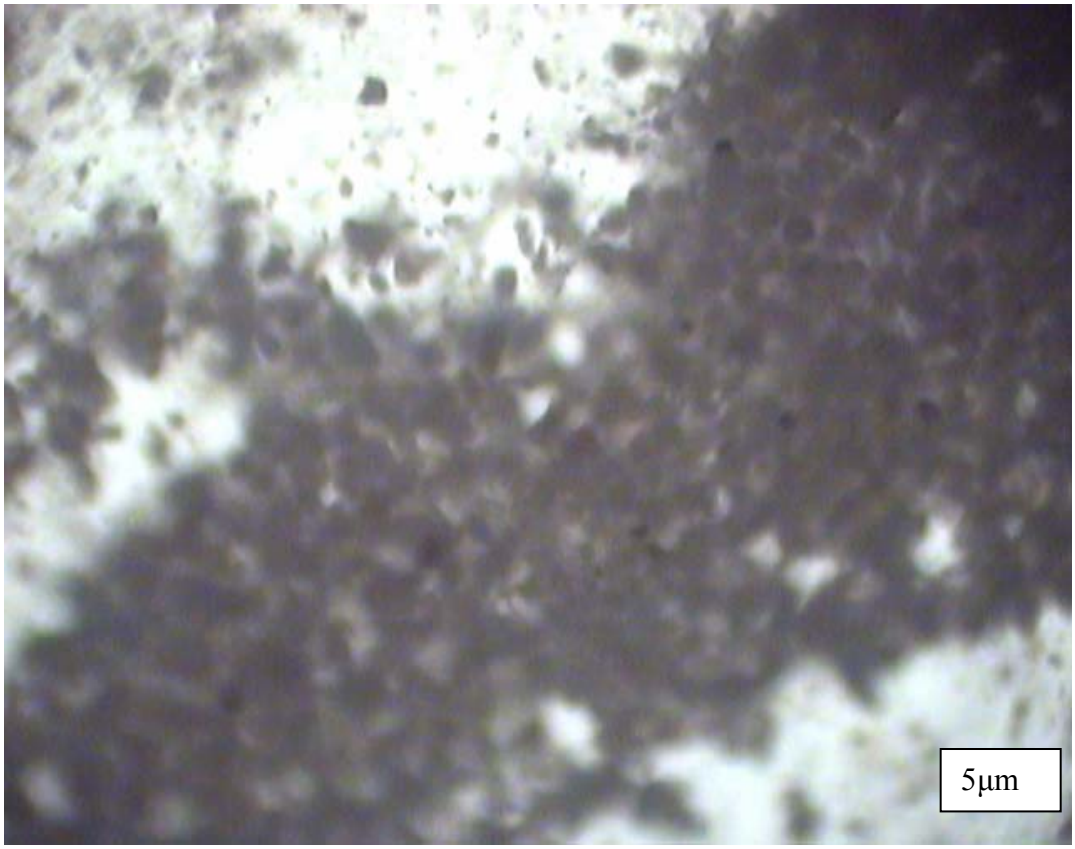
Şekil 5.155. Aksaray kilinde % 20 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.156. Aksaray kilinde % 40 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.157. Aksaray kilinde % 60 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

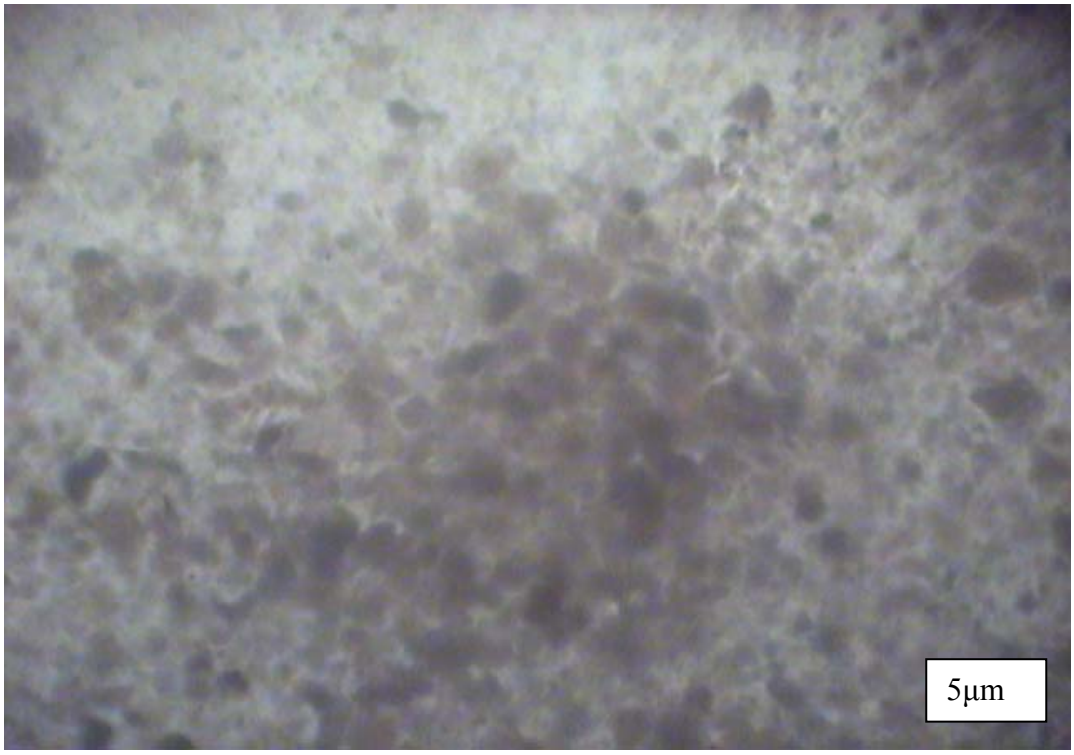


Şekil 5.158. Aksaray kilinde % 80 izo-propil alkol konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

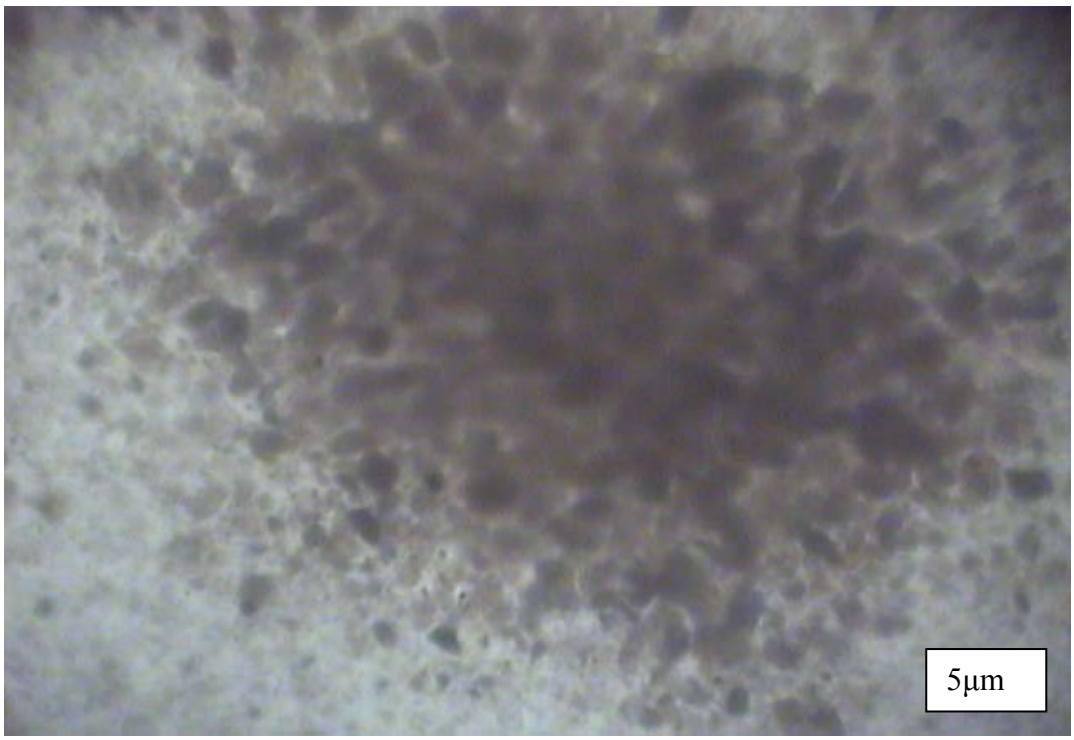
Şekil 5.159. – Şekil 5.162. arasında dielektrik sabiti ε=6,2 olan asetik asitin değişik konsantrasyonları için verilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde; %20 konsantrasyonda taneciklerin kümelenme eğiliminde oldukları açık bir şekilde görülmektedir.

%40 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin kümelenmesinin %20 konsantrasyona göre daha belirgin olduğu, %60 konsantrasyonda ise yumaklanmış bir yapının net olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

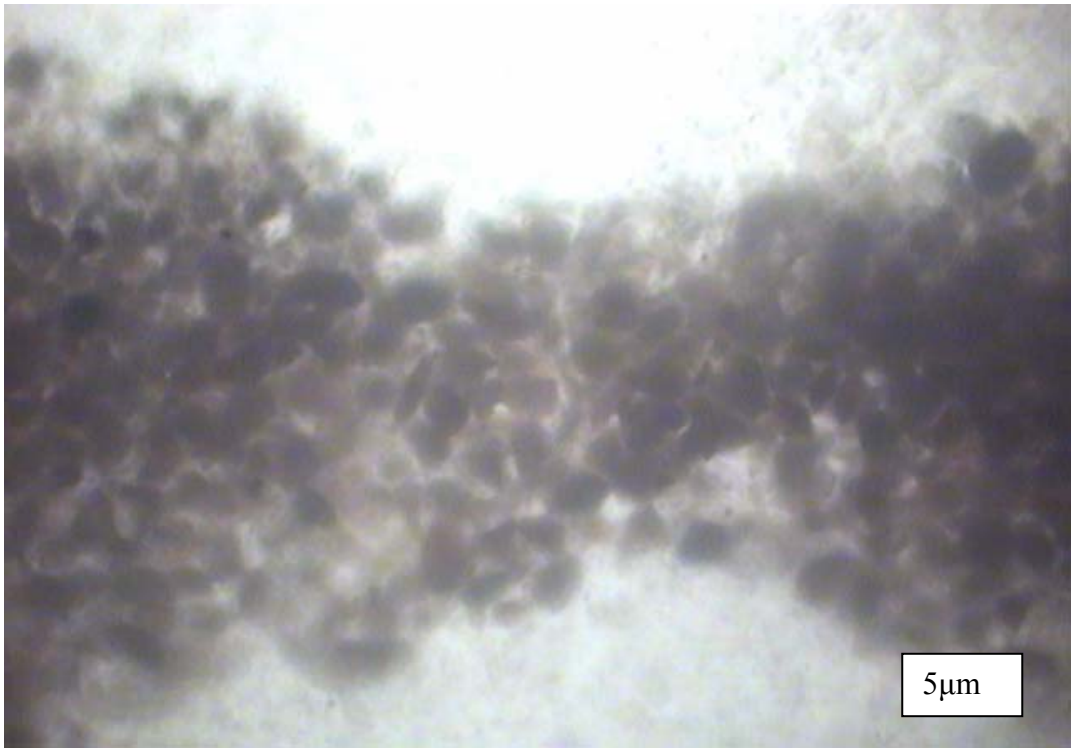
%80 asetik asit konsantrasyonunda ise tanecikler birbirine çok sıkı bir şekilde kenetlenmiş olup adeta bir top şeklinde yumaklanmışlardır.



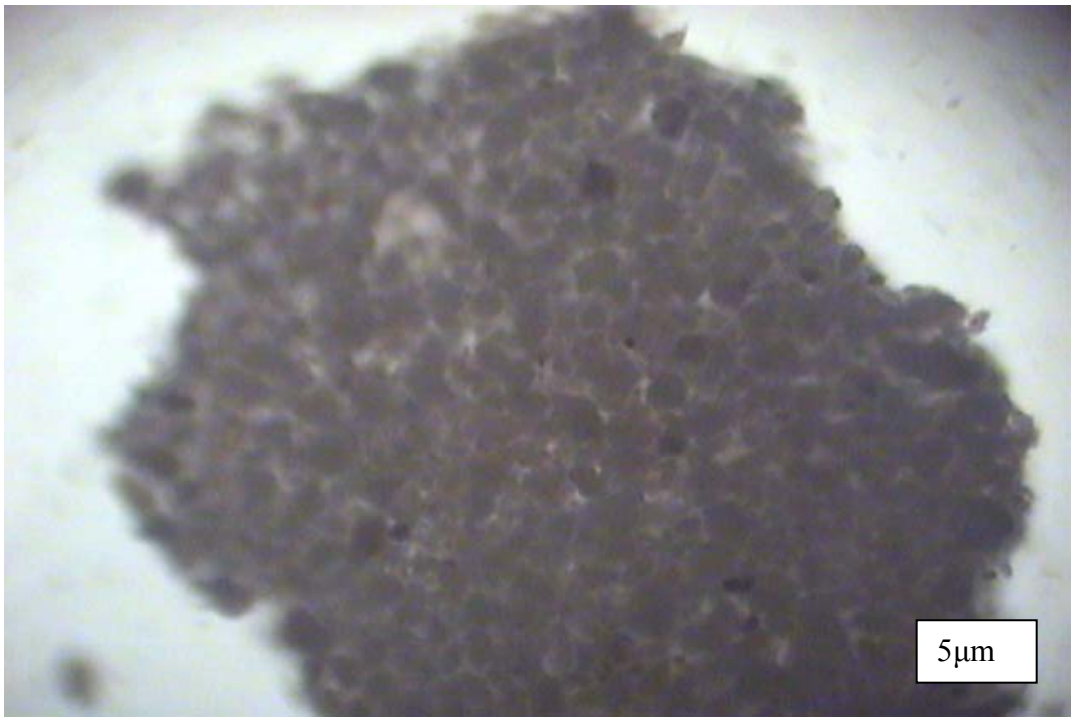
Şekil 5.159. Aksaray kilinde % 20 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.160. Aksaray kilinde % 40 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.161. Aksaray kilinde % 60 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü



Şekil 5.162. Aksaray kilinde % 80 asetik asit konsantrasyonunda taneciklerin optik mikroskoptaki görüntüsü

Şekil 5.129., Şekil 5.162. arasındaki fotoğraf görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde %20 konsantrasyonlarda tam bir kümelenme olmamakla beraber taneciklerin bu yönde bir eğilim içinde oldukları anlaşılmaktadır. %40 ve %60 konsantrasyonlarda ise kil taneciklerinin flokülasyonu kademeli bir şekilde artmakta ve kümelenme olayı belirgin bir şekilde görülebilmektedir. %80 konsantrasyonda hemen hemen bütün kimyasal sıvılar için her iki kilde de yumaklanmış bir yapının tamamen oluştuğu görülmektedir.

Kimyasal sıvılar varlığında her iki kilde de bir takım özel durumlar haricinde azalan dielektrik sabitiyle birlikte daha net görüntülerin elde edildiği ve daha fazla flokülasyonun meydana geldiği anlaşılmaktadır. Özelikle izo-propil alkol için elde edilen görüntülerin diğer kimyasal malzemeler için elde edilenlerden biraz daha şeffaf ve net olduğu açıkça görülmektedir.

Kaolinitte asetik asit varlığında daha bulanık ve az flokülasyonun olduğu görülmektedir. Bu durum asetik asit varlığında kaolinitte meydana gelen jelleşmeye bağlı olarak yorumlanabilir.

Aksaray kili için elde edilen fotoğraf görüntüleri incelendiğinde kümelenme ve flokülasyon olayının en düşük ethanol için elde edildiği, en yüksek flokülasyon derecesinin ise methanol ve asetik asit için elde edildiği görülmektedir. Yani methanol haricinde flokülasyon olayının boyutları azalan dielektrik sabiti ile birlikte artma şeklindedir. Methanol için flokülasyon derecesinin yüksek olması daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Aksaray kili içerisindeki sepiyolit varlığından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak herhangi bir kimyasal sıvı varlığında kil taneciklerinin flokülasyonunu yorumlarken hem kil mineralinin tipi, hem de her kimyasal sıvının kendine has özelliklerinin dikkate alınarak bir değerlendirme yapılması doğru olacaktır.

6. TARTIŞMA

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi her bir çalışma için aşağıda sunulmuştur.

6.1. Atterberg Limitleri Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Herhangi bir kimyasal sıvının etkisi ile kilin mukavemet ve sıkışma özelliklerinde meydana gelen değişimleri oluşturan faktörler muhtemelen kilin Atterberg limitlerinde meydana gelen değişimleri oluşturan faktörlerle ilişkilidir. Bu yüzden değişik konsantrasyonlarda hazırlanan numuneler üzerinde mukavemet ve sıkışma deneyleri yapmadan önce her iki kil ile bu değişik konsantrasyonlar için Atterberg limit deneyleri yapılmış ve bir ön fikir edinilmeye çalışılmıştır.

Kaolinit üzerinde yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan tüm kimyasalların değişik konsantrasyonları için numuneler plastiklik özelliği göstermiştir. Likit limit ve plastik limit deneyleri kolaylıkla yapılabilmiştir.
2- Methanol kimyasal sıvısı ile yapılan deneylerde %60 konsantrasyona kadar likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerleri artmakta, bu konsantrasyondan sonra biraz azalmakta ama yine de saf su için bulunan değerden büyük olmaktadır.
3- Ethanol kimyasal sıvısı ile yapılan deneylerde %40 konsantrasyona kadar likit limit ve plastisite indisi değerleri artmakta, daha sonra ise azalma eğilimine girmektedir. %80 ethanol konsantrasyonu için bulunan değerler saf su için bulunan değerlerden küçük olmaktadır.
4- İzo-propil alkolün tüm konsantrasyonları için likit limit değerleri birbirine yakın değerlerde ama saf suyunkinden büyük değerler alırken, düşen koni penetrasyon yöntemi ve Casagrande yöntemlerinde elde edilen sonuçlar

arasındaki fark daha belirgin olmaktadır. Hatta plastisite indisi değerleri düşen koni penetrasyon yönteminde kimyasalların değişik konsantrasyonları için saf suyunkinden büyük olurken Casagrande yönteminde suyunkinden küçük olmaktadır.

5- Asetik asit için likit limit değerinde meydana gelen artışlar diğer kimyasallara göre daha belirgin olup %60 konsantrasyonda maksimum bir değere çıkmıştır. Literatürde asetik asit ile yapılmış olan benzer çalışmalarda asetik asit varlığında kaolinitin likit limit değerinin kullanılan diğer kimyasallara göre daha fazla arttığı bulunmuştur (Yıldız 1998, Kaya ve Fang 2000, Sridharan 1991). Zhao (1996), Georgia kaoliniti üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda saf su için likit limit değerini %58, methanol için %62, ethanol için %68 ve asetik asit için %80 bulmuştur (Çizelge 6.1). Bu sonuçlar tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir.

6- Asetik asit varlığında kaolinitin plastik limit değerleri artan konsantrasyonla orantılı olarak artmış, plastisite indisi değerleri ise %60 konsantrasyona kadar artmış daha sonra ise azalmıştır (Şekil 5.4.). Bowders ve Daniel (1987), asetik asitin değişik konsantrasyonları ile yaptıkları deneylerde likit limit değerlerinin değişkenlik gösterdiğini fakat plastisite indisi değerlerinin artan konsantrasyonla birlikte azaldığını bulmuşlardır. Asetik asit varlığında zemin diğer kimyasallara göre daha fazla plastiklik özelliği göstermektedir. Zhao (1996), tarafından yapılan çalışmalarda azalan dielektrik sabitiyle plastik limit değerleri artarken, kimyasallar içerisinde en fazla plastiklik özelliğini asetik asit göstermiştir (Çizelge 6.1.)

Çizelge 6.1. Kaolinit üzerindeAtterberg limit deneyleri (Zhao 1996)

Boşluk Sıvısı	Dielektrik sabiti (ε)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Saf su	80	58	38	20
Methanol	33	62	50	12
Ethanol	24	68	54	14
Asetik asit	6,2	80	62	18
Ethanol (%95)	26,7	73	62	11

Çizelge 6.2. Kaolinit üzerinde Atterberg limit deneyleri (Moore 1968, Uppot ve Stephenson 1989)

Boşluk Sıvısı	Dielektrik sabiti (ε)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Formamid*	110	60	37	23
Su*	80	57	34	23
Aseton*	20	82	67	15
Dioxane*	2,1	91	66	25
Su**	80	66	31	35
Methanol**	33	80	46	34

*Moore, **Uppot ve Stephenson

7- Boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabiti ile birlikte genel olarak incelenen örneklerin likit limit değerlerinde bir artış olmaktadır. Benzer şekilde Moore (1968), Uppot ve Stephenson (1989), Zhao (1996) ve Sridharan ve ark. (2000) kaolinit kili üzerinde dielektrik sabiti farklı kimyasal sıvılarla yaptıkları deneyler sonucunda likit limit değerlerinin dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte arttığını bulmuşlardır (Çizelge 6.1. ve Çizelge 6.2.)

8- Kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için düşen koni penetrasyon yöntemi ile yapılan deneylerde elde edilen likit limit değerleri Casagrande yöntemiyle yapılan deneylerde elde edilen değerlerden daha büyük çıkmaktadır. Daha önce literatürde farklı araştırmacılar tarafından bu konuya değinilmiş olup (Orhan ve ark. 2006, Christaras 1991, Wasti ve Bezirci 1986) bulunan sonuçlar literatür çalışmalarıyla uyuşmaktadır. Likit limiti düşük olan zeminlerde (genellikle kaolinitik zeminler) sürtünmeli kayma direnci davranışa hakimdir. Böyle zeminlerde Casagrande yöntemi ile belirlenen likit limit su içeriğinde, zemin henüz viskoz duruma ulaşmadığından koninin zemin içine doğru ilerlemesine direnç göstermekte ve batma miktarı 20 mm'den az olmaktadır. Zemin numunesinin viskoz duruma gelmesi ve 20 mm batmaya ulaşması için su içeriğinin daha yüksek olması gerekmektedir. Bu sebeple deneylerde kullanılan kaolinit zemin üzerinde saf su ve diğer kimyasalların farklı konsantrasyonları ile yapılan likit limit deneylerinde

düşen koni penetrasyon yöntemi ile bulunan değerler Casagrande yöntemi için elde edilenlerden daha büyük çıkmıştır.

9- Genel olarak kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonuna kadar likit limit değerlerinde bir artış, bu konsantrasyondan sonra hafif bir düşüş görülmektedir. Bu durum şu şekilde izah edilebilir: %60 - %80 arasındaki bir konsantrasyona kadar karışım sıvısı içerisindeki su, hem parçacık yüzeyleri yakınında bulunan iyonlar hem de tampon ara bölgede bulunan kimyasal sıvılar tarafından çekilmektedir. Su hem parçacık yüzeylerindeki iyonlar hem de kimyasal sıvı tarafından çekilirken, parçacık yüzeyindeki iyonlar ve tampon bölgedeki kimyasal sıvılar birbirini itmektedir. Böylelikle tampon çözelti içerisinde bulunan su molekülleri parçacık yüzeylerine doğru çekilmekte ve kaolinit kilinin likit limit değeri artmaktadır (Zhao 1996). Bu etkileşim karışımdaki kimyasal sıvının konsantrasyonu %80 değerine yaklaştığı zaman daha az suyun bünyeye çekilmesine olanak vereceği için bu konsantrasyondan sonra likit limit değeri azalmaya başlamaktadır. Kimyasal sıvının asetik asit olması durumunda alkollere göre bu etkileşim daha belirgin olmaktadır. Çünkü asetik asitin yoğunluğu (ρ=1,049 g/cm^3) suyun yoğunluğundan (ρ=0,998 g/cm^3) fazla olup asetik asit suyu taneler arasında hapsetmekte ve suyun hareketini zorlaştırmaktadır. Böylelikle tanecikler yüzeyinde ve arasında daha fazla su tutulmuş olmaktadır. Yoğunlukları suyun yoğunluğundan daha küçük olan alkollerde bu durum daha az etkili olmaktadır. Eğer kimyasal sıvıların saf hali ile Atterberg limit deneyleri yapılacak olursa muhtemelen daha küçük likit limit değerleri elde edilecektir. Zhao (1996) tarafından yapılan çalışmada saf ethanol için LL=%68 ve %95 ethanol konsantrasyonu için LL=%73 bulunmuş olup bu durumu açık olarak göstermektedir (Çizelge 6.1.).

10- Kaolinit ile yapılan deneylerde numunelerde çok aşırı bir topaklanma görülmemiş ve hatta asetik asit ile yapılan deneylerde meydana gelen jelleşmeden dolayı numune daha viskoz bir kıvama gelmiştir.

11- Kaolinitin düşük katyon değiştirme kapasitesi (CEC), diffüz çift tabaka kalınlığının boyutuna göre çok küçük olması ve güçlü hidrojen bağlarından dolayı kaolinit dış etkilerden çok fazla etkilenmemektedir. Kaolinitin

davranışı mekaniksel faktörler ve başlıca zemin yapısı tarafından kontrol edilmektedir (Olson ve Mesri (1970) ve Sridharan ve Rao (1973)). Dolayısı ile kimyasal sıvılar varlığında likit limit değerlerinde çok aşırı bir değişiklik meydana gelmemiştir.

12- Ethanolün %60 konsantrasyonu ve %80 konsantrasyonu ile izo-propil alkolün Casagrande yönteminden elde edilen ve saf suyunkine göre daha düşük olan plastisite indisi değerleri tanelerin flokülasyona uğramış olabileceğine ve Van der Walls çekim kuvvetlerinin varlığına işaret etmektedir.

13- Saf su için düşük plastisiteli kil (CL) grubuna giren kaolinit, methanolün değişik konsantrasyonları için de aynı gruba dahil olmaktadır.

14- Ethanolün %80 konsantrasyonu için zemin sınıfı düşük plastisiteli silt (ML) grubuna girmektedir. Yani ethanolün %80 konsantrasyonu için kil taneleri arasındaki çekim kuvvetlerinden dolayı tanecikler birbirini çekmekte ve bir küme şekline gelme eğilimine girerek flokülasyona uğramaktadır (Kaya ve ark. 2005). Böylece kaolinit kili, CL sınıfından ML sınıfına geçmektedir.

15- İzo-propil alkolün tüm konsantrasyonlarında zemin sınıfı CL-CH-MH sınır noktasına yakın bir konumda yer almaktadır.

16- Asetik asitin tüm konsantrasyonları için kaolinit CH grubuna girmektedir ve sıvı tutma özelliği artmıştır.

Aksaray kili üzerinde yapılan Atterberg limitleri deney sonuçları ise şu şekilde özetlenebilir;

1- Kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ile birlikte kil, silt-ince kum yapısına yaklaşmakla beraber yine de likit limit ve plastik limit deneyleri yapılabilmiştir. Yalnız, özellikle %80 konsantrasyonlarda kilde plastik limit deneyleri zorlukla yapılabilmekte ve neredeyse deneyin yapılması imkânsız hale gelmektedir. Kil tanecikleri plastik limit deneyindeki yuvarlanma esnasında çok kırılgan hale gelmekte ve daha ziyade bir silti anımsatmaktadır. Kaya ve Fang (2000), bentonit üzerinde yaptıkları deneylerde xylene ve anilin gibi düşük dielektrik sabitli kimyasal sıvılar varlığında zeminin plastik limit değerlerini belirleyememişlerdir. Foreman ve Daniel (1986), simektit içerikli bir kil üzerinde methanol ile yaptığı deneylerde kili non-plastik olarak bulmuştur. Mohammad ve Shahaboddin (2008), montmorillonit içerikli

Taleqan kilinde saf toluen ve etilen glikol ile etilen glikolün %75 konsantrasyonu için kilin granüler kumlu zemin gibi davranmasından dolayı likit limit ve plastik limit deneyleri yapamamışlardır.

2- Kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ile birlikte Aksaray kilinin hem likit limit (LL) hem de plastisite indisi (PI) değerlerinde çok büyük bir azalma meydana gelmektedir. %80 methanol konsantrasyonu için bulunan likit limit değeri saf su için bulunan değerin %38,7'si olurken, ethanolde bu değer %48,2 ve izo-propil alkolde %37,2 olmaktadır. Mohammad ve Shahaboddin (2008), montmorillonitik içerikli kil üzerinde yaptıkları çalışmada etilen glikolün %25 ve %50 konsantrasyonları için kilin plastik limitinin arttığını ve plastisite indisinin belirgin oranda azaldığını bulmuşlardır.

3- Asetik asitin tüm konsantrasyonları için likit limit ve plastisite indisi değerlerindeki azalma diğer kimyasallardakinden fazla olmaktadır. %20 asetik asit konsantrasyonunda düşen koni penetrasyon yönteminde likit limit değeri w_L=%76,22'ye kadar düşmüştür. %80 konsantrasyonda Casagrande yöntemiyle elde edilen likit limit değeri saf su için elde edilen değerin %35,7'si olmaktadır.

4- Montmorillonitik zeminlerde aynı numune üzerinde yapılan deneylerde Casagrande yöntemi düşen koni penetrasyon yöntemine göre daha yüksek likit limit değerleri vermektedir (Orhan ve ark. 2006). Aksaray kili üzerinde saf su için Casagrande yöntemiyle yapılan deneylerde likit limit değeri w_L=%125,83 ve düşen koni penetrasyon yöntemiyle ise w_L=%106,5 bulunmuştur. Benzer şekilde, tüm kimyasalların %80 konsantrasyonuna kadar Casagrande yöntemiyle bulunan likit limit değerleri düşen koni penetrasyon yöntemiyle bulunanlardan büyükken, %80 konsantrasyonlarda düşen koni penetrasyon yöntemiyle bulunan değerler daha büyük olmaktadır. Casagrande yönteminde; tasın, tabanlığa çarpma etkisi ile oluğun her iki yanındaki zemin parçası oluğun merkezine doğru akmaktadır. Bu akma viskoz akma şeklinde olduğundan Casagrande deneyinde zeminlerin viskoz kayma direnci etkili olmaktadır. Koni penetrasyon deneyinde ise; koninin zeminin içine doğru ilerlemesi taneler arasındaki sürtünme direnci tarafından kontrol edildiğinden zeminlerin likit limiti üzerinde sürtünmeli kayma direnci hakim olmaktadır.

Deneylerde kullanılan Aksaray kili montmorillonitik özellik göstermekte olup montmorillonitik zeminlerin likit limiti üzerinde, tabakalar arasındaki diffüz çift tabaka suyunun viskoz yapısından dolayı viskoz kayma direnci hakimdir. Viskoz kayma, koninin zeminin içine doğru batmasına direnç gösteremediğinden Casagrande yöntemi ile belirlenen likit limit su içeriğinde koninin batma miktarı 20 mm'den fazla olmaktadır. Bu nedenle zemin tanelerinin arasında sürtünme direncinin oluşması ve koninin batmasına karşı direnç gösterebilmesi için zemin numunesinin su içeriğinin daha az olması gerekmektedir. Sonuç olarak montmorillonitik türü zeminlerde sürtünme direncinin yenilmesi için gereken su muhtevasında viskoz kayma direnci hala yenilememiştir. Bu sebeple Casagrande yönteminden elde edilen likit limit değerleri düşen koni penetrasyon deneyinden elde edilen değerlerden büyük olmaktadır. Deneylerde kullanılan Aksaray kili üzerinde saf su ve diğer kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için yapılan deneyler sonucunda ortalama olarak %60 - %70 değerlerine kadar Casagrande yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri, bu değerlerin altında Düşen koni penetrasyon yönteminden elde edilen değerler daha büyük olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Orhan ve ark. (2006) tarafından bulunan sonuçlarla uyum içindedir.

5- Asetik asitin %60 konsantrasyonu için plastisite indisi PI=4,29 olup neredeyse 0 değerine yaklaşmıştır. Kimyasalların %80 konsantrasyonu için ethanol dışındaki diğer kimyasallarda plastisite indisi 0'a yaklaşmaktadır.

6- Zeminlerin organik kimyasal sıvılar varlığında likit limitlerindeki (LL) azalma parçacıklar etrafındaki diffüz çift tabakanın çökmesi, parçacıklar arasındaki itme kuvvetlerinin önemli miktarda azalması ve sonuçta çekme kuvvetlerindeki net artış dolayısıyla gerçekleşmektedir (Kaya ve Fang 2000). Diğer kil minerallerine göre tabaka kalınlığı küçük olan montmorillonitik kil minerallerinin diffüz çift tabaka kalınlığı oransal olarak çok büyüktür ve tabaka kalınlığının yaklaşık olarak 40 katıdır. Kil parçacıkları etrafındaki diffüz çift tabaka suyu kil zeminlerin plastiklik özelliğini vermektedir (Das 2002). Bu nedenle montmorillonitik içerikli Aksaray kilinde organik kimyasal sıvıların varlığında boşluk sıvısının azalan dielektrik sabitiyle birlikte kil tanecikleri etrafında bulunan diffüz çift tabaka göçmekte,

böylelikle de zeminin tuttuğu su muhtevası değeri, dolayısıyla da zeminin likit limit değeri (LL) çok önemli ölçüde azalmaktadır. Aksaray kilinin likit limit değerlerinin azalmasında bir diğer etmende boşluk sıvısının azalan dielektrik sabitine bağlı olarak kil tanecikleri arasında elektriksel itme kuvvetlerindeki azalma ve çekme kuvvetlerindeki artış nedeniyle zemin parçacıklarının topaklanması ve agrega formunu almasıdır. Parçacıkların flokülasyonu dolayısıyla oluşan küme şeklindeki oluşum zeminlerin hidrolik geçirgenliğinde çarpıcı bir artışa neden olmaktadır. Çünkü bu küme şeklindeki yapı zemin kütlesi içerisinde bir çatlak gibi rol oynamakta ve boşluk sıvısının drene olarak taneciklerin arasından çıkmasına olanak sağlamaktadır. Böylelikle zemin adeta silt-ince kum gibi bir davranış sergilemektedir. Literatürde montmorillonitik killerde boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile kilin likit limitinin azaldığı ve kilin granüler bir malzeme gibi davrandığı pek çok araştırmacı tarafından ifade edilmiştir (Sridharan ve ark. 2002, Meegoda ve Ratnaweera 1994). Soule ve Burns (2001) tarafından bentonit üzerinde yapılan deneylerde su yerine methanol kullanıldığı zaman likit limit değerinin %458'den %58'e düştüğü belirtilmiştir. Araştırmacılar polaritesi suya göre düşük olan methanolün bentonit yüzeylerine kuvvetlice çekilmemesinden dolayı daha az miktarda methanolün zemin parçacıkları tarafından tutulduğunu belirtmişlerdir.

7- Aksaray kilinde likit limit değerleri boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte azalırken dielektrik sabiti ε=33,6 olan methanol için elde edilen likit limit değerleri dielektrik sabiti ε=24,3 olan ethanoldekinden küçük ve dielektrik sabiti ε=18,4 olan izo-propil alkoldeki değerlere yakındır. Bu durum iki şekilde izah edilebilir;

   a) Daha önceki araştırmacılarca kil mineralleri arasındaki itme ve çekme kuvvetleri incelenmiştir (Kaya ve Fang 2000). Bu çalışmalarda kil mineralleri içerisinde bulunan iki silika tabakası arasındaki itme kuvvetleri ve Hamaker sabiti cinsinden çekme kuvvetleri boşluk sıvısının dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak suyunkine göre normalize edilmiş şekliyle verilmiştir (Çizelge 6.3.). Bu çizelgeye göre; izo-propil alkolün dielektrik sabiti methanolün kinden küçük olmasına rağmen iki silika

Çizelge 6.3. Farklı boşluk sıvıları içinde iki silika tabakası arasında normalize edilmiş itme ve çekme kuvvetleri (Kaya ve Fang, 2000).

Boşluk Sıvısı	Di elektrik Sabiti (ε)	Çekme Kuvveti[a]	İtme Kuvveti[a]	Net Kuvvet[b]
Su	80,0	1,0	1,0	0,0
Methanol	33,0	0,95	0,42	0,53
2-propanol	18,0	0,46	0,23	0,23
Anilin	6,7	0,44	0,09	0,35
Xylene	2,3	0,14	0,03	0,11

[a]: Suya göre normalize edilmiş kuvvet
[b]: Normalize edilmiş çekme ve itme kuvveti arası fark

tabakası arasındaki normalize edilmiş net çekim kuvveti methanolde 0,53 iken izo-propil alkolde 0,23 olmaktadır. Yine benzer şekilde dielektrik sabiti asetik asitinkine yakın olan anilin için elde edilen normalize edilmiş net çekim kuvveti 0,35 olmaktadır. Dielektrik sabiti diğer kimyasal sıvılardan (izo-propil alkol, anilin vb....) daha büyük olan methanolde silika tabakaları arasındaki net çekim kuvveti daha fazla olmaktadır. Bu özelliğiyle methanol, taneciklerin daha fazla flokülasyona uğramasına ve zeminin daha küçük likit limit değerine sahip olmasına neden olmaktadır.

b) Aksaray kili içerisinde daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi X-RD yarı nicel mineralojik analiz sonucuna göre %33 oranında sepiyolit minareli bulunmaktadır. Sepiyolit doğal bir kil minerali olup yüksek yüzey alanı, lifsi yapısı, porozitesi, yüksek yüzey aktivitesi, düşük konsantrasyonlarda yüksek viskoziteli duraylı süspansiyonlar oluşturması gibi özellikleri ile göstereceği davranışlar açısından önem kazanmaktadır. Sepiyolitin tetrahedral ve oktahedral oksit tabakalarının istiflenmesi sonucu oluşan lifsi bir yapısı vardır ve lif boyunca devam eden kanal boşluklarına sahiptir. Sepiyolit kendine has yapısı itibarıyla son derece yüksek bir sorpsiyon özelliğine sahiptir. Sepiyolitin içerisindeki zeolitik su, yapısal zincirlerin kenarlarında magnezyum iyonlarına koordine olmuş su molekülleri ile hidrojen bağları oluştururlar. Koordinasyon ve zeolitik

su molekülleri, yüksek polariteli küçük moleküller ile yer değiştirebilir (Sabah ve Çelik 1999). Deneylerde kullanmış olduğumuz methanol kimyasal sıvısı alkollerin en kısa zincirli olanlarından birisi olup, deneylerde kullanılan diğer kimyasal sıvılar olan ethanol, izo-propil alkol ve asetik asit kimyasallarına göre daha kısa bir zincir uzunluğuna sahiptir. Primer bir alkol olan methanol bu kısa zincir uzunluğu sayesinde kanalların içine yayılarak zeolitik su moleküllerinin ve hatta koordinasyon suyu moleküllerinin yerini alabilir. Daha fazla zincir uzunluğuna sahip alkoller ise, sadece dış yüzeylerdeki açık kanallarda zeolitik su ve koordinasyon suyu molekülleri ile yer değiştirebilirler. Methanol, sepiyolitin lifsi yapısı dolayısıyla kanalların içerisine diğer kimyasallara göre daha rahat girebilmekte ve dolayısıyla tanecikler arasında diğer kimyasallara göre daha fazla etkili olabilmektedir. Böylelikle methanol taneciklerin daha fazla topaklanmasını sağlamakta ve kilin daha az sıvı tutmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak methanol ile yapılan deneylerde daha küçük likit limit değerleri elde edilmektedir.

8- Aksaray kili artan kimyasal sıvı miktarı ile orantılı olarak adeta bir silt-ince kum gibi davranmaya başlamaktadır. Parçacıklar arasındaki itme kuvveti çekme kuvveti ile karşılaştırıldığında net kuvvette organik kimyasal sıvıların etkisiyle çekme kuvveti yönünde büyük bir artış meydana gelmekte ve dolayısı ile zeminler flokülasyona (=yumaklanma) uğramakta ve küme şeklinde biçimlenmektedir. Deneyler esnasında kilde gözlenen bu durum Mesri ve Olson'un (1971) ve Fernandez ve Quigley'in (1985) gözlemleriyle uyum içindedir ki bu araştırmacılar boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki bir azalmanın zeminlerde flokülasyon (=topaklanma) ve kanal oluşumuna neden olduğunu söylemişlerdir. Kaya ve Fang (2000), organik sıvılar kullanıldığı zaman ince taneli zeminlerin boşluk büyüklüğü dağılımının dikkate değer bir şekilde değiştiğini söylemişlerdir. Boşluk sıvısı sudan organik sıvılara (methanol ve anilin) değiştiği zaman zemin taneciklerinin flokülasyonu (=yumaklanma) ve kümelenmesi dolayısıyla boşlukların çapında bir artış meydana gelmektedir.

9- Aksaray kili ile yapılan likit limit deneylerinde asetik asit varlığında meydana gelen flokülasyon olayı daha belirgin olmaktadır. Diğer kimyasallar için %80 konsantrasyonda ulaşılan flokülasyon miktarına asetik asitin %40 konsantrasyonu için ulaşılmış olmaktadır. Bu durum asetik asitin küçük dielektrik sabiti sayesinde diffüz çift tabaka kalınlığında meydana gelen azalmadan kaynaklandığı gibi Aksaray kili içerisinde bulunan bir takım farklı minerallerle asetik asitin reaksiyonuyla da alakalıdır.

10- Aksaray kilinde asetik asitle yapılan deneylerde numuneye sıvı verilip karıştırıldığında numune ısınmakta, gaz (CO_2) çıkışı olmakta ve ısınma dolayısıyla muhtemelen buharlaşma ile su (H_2O) çıkışı olmaktadır. Bu durum kilin bünyesinde bulundurduğu kalsit ve dolomit minerallerinden kaynaklanmaktadır. Aksaray kilinin bünyesinde bulundurduğu kalsit mineralinin kimyasal formülü $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) ve dolomitin ki $CaMg(CO_3)_2$ (kalsiyum magnezyum karbonat) şeklindedir. Asetik asitin kimyasal formülü ise CH_3COOH'tür. Kalsit ve dolomit belli bir konsantrasyonda asetik asit içeren boşluk sıvısı ile muameleye tabii tutulduğu zaman ilk olarak kalsit ve dolomitin bünyesindeki karbonat (CO_3^{-2}) asetik asitin 2 hidrojenini alarak karbonik asite (H_2CO_3) dönüşmektedir. Bununla birlikte kalsiyum asetat ($CaCH_3CO_2)_2$ veya magnezyum asetat ($Mg(CH_3CO_2)_2$) bileşikleri de oluşmaktadır. Bu denklemler sırasıyla kalsit ve dolomit için şöyle verilebilir:

$$2\ CH_3COOH + CaCO_3 = H_2CO_3 + Ca(CH_3CO_2)_2 \qquad (6.1.)$$

$$2\ CH_3COOH + MgCO_3 = H_2CO_3 + Mg(CH_3CO_2)_2 \qquad (6.2.)$$

Daha sonraki adımda ise karbonik asit karbondioksit (CO_2) ve suya (H_2O) dönüşmektedir.

$$H_2CO_3 = H_2O + CO_2 \qquad (6.3.)$$

Bu iki aşamalı reaksiyonu tek bir reaksiyon şeklinde ifade etmek gerekirse kalsit ve dolomit için sırasıyla şu şekilde bir sonuç denklemi yazılabilir:

$$2\ CH_3COOH + CaCO_3 = H_2O + CO_2 + Ca(CH_3CO_2)_2 \qquad (6.4.)$$

$$2\ CH_3COOH + MgCO_3 = H_2O + CO_2 + Mg(CH_3CO_2)_2 \qquad (6.5.)$$

Yukarıda belirtildiği gibi su çıkışına ilave olarak, Aksaray kiline içinde farklı konsantrasyonlarda asetik asit bulunan sıvı ilave edildiği zaman bu sıvı içerisinde bulunan asetik asit kirecin hammaddesi olan kalsit minerali ile temasa geçmekte ve bir ısı kaybına yani bizim gözlemlediğimiz şekliyle bir ısınmaya sebebiyet vermektedir. Bu durum ön konsolidasyonla numune hazırlama esnasında bulamaçlar hazırlanırken de ortaya çıkmaktadır.

11- Saf su ile yapılan deneylerde kil CH (yüksek plastisiteli kil) zemin sınıfı grubuna girmektedir. Methanolün değişik konsantrasyonları için ise zemin sınıfı MH (yüksek plastisiteli silt) sınıfına ve hatta %80 konsantrasyonda MH – ML (düşük plastisiteli silt) sınıfına girmektedir.

12- Ethanolün %20 konsantrasyonu için zemin sınıfı CH, diğer konsantrasyonlarda ise MH (yüksek plastisiteli silt) şeklinde olmaktadır.

13- İzo-propil alkolün %20 konsantrasyonu için zemin sınıfı CH – MH sınırı üzerinde olup, %40 ve %60 konsantrasyonlarda ise zemin sınıfı MH olmaktadır. %80 konsantrasyonda kesişim noktası %50 likit limit doğrusu üzerinde olup MH – ML zemin sınıflarına girmektedir.

14- Asetik asitin %20 ve %40 konsantrasyonlarında zemin sınıfı MH, %60 ve %80 konsantrasyonlarında ise ML (düşük plastisiteli silt) olmaktadır.

15- Aksaray kilinde Casagrande Plastisite kartına göre zemin sınıfının değişimi artan konsantrasyonla birlikte tüm kimyasal sıvılar için silt sınıfına girme yönünde bir eğilim içindedir. Bu durum asetik asitin, kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomit mineralleri ile olan etkileşimi sonucu çok daha belirgin olmaktadır.

6.2. Serbest Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kaolinit üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve serbest basınç deneyleri yapılabilmiştir.

2- Methanolün %20 konsantrasyonu için yapılan deneylerde serbest basınç mukavemeti değerleri saf su ile hazırlanan numuneler için elde edilen değerlere çok yakındır. Artan konsantrasyonla mukavemet artmakta ve %80 methanol konsantrasyonunda serbest basınç mukavemeti değeri saf suda bulunan değerin 2,4 katı olmaktadır.

3- Ethanol kimyasal sıvısında da %20 konsantrasyon için mukavemet değerinde saf sudakine göre fazla bir değişiklik olmazken, %80 konsantrasyon için ortalama serbest basınç mukavemeti saf sudakinin 2,7 katı olmaktadır.

4- İzo-propil alkolle yapılan deneylerde de artan konsantrasyonla birlikte serbest basınç mukavemeti değerleri kademeli olarak artmakta, %80 konsantrasyon için bulunan ortalama serbest basınç mukavemeti değeri saf su için elde edilen değerin 2,86 katı olmaktadır.

5- Asetik asit varlığında %40 konsantrasyona kadar serbest basınç mukavemeti değerlerindeki artış diğer kimyasallarla paralellik gösterirken, %40-%60 konsantrasyonları arasında artış çok az olmaktadır. %60 konsantrasyondan sonra ise serbest basınç mukavemeti değeri tekrar artmaktadır. %80 konsantrasyon için elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değeri saf su için elde edilen mukavemet değerinin 2,04 katı olmaktadır.

6- Methanol, ethanol ve izo-propil alkol kimyasal sıvıları için elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri birbiriyle paralellik göstermekte ve artan konsantrasyonla beraber artmaktadır. Aralarındaki büyüklük farkları çok belirgin olmayıp boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabitiyle ters orantılı olarak mukavemet değerleri artmaktadır. Bu ilişki kaolinitte parçacıklar arasındaki mesafe sırasıyla 0,003μm ve 0,001 μm olan iki parçacık arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimini gösteren Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.'de

(Zhao 1996) gösterilen ilişkiye uymaktadır. Burada her iki şekilde de dielektrik sabiti ε=3'ten başlayarak ε=24,3'e kadar net kuvvet çekim kuvveti olacak şekilde artmaktadır. ε=24,3' ten ε=111 değerine kadar ise net kuvvet itme kuvvetine yaklaşacak şekilde bir değişim göstermektedir. Yalnız burada verilen grafikler saf organik sıvılar için geçerli olup deneylerde belirli konsantrasyonlarda kimyasal sıvılar kullanıldığı için dielektrik sabitleri değişmektedir. Örneğin kimyasalların %80 konsantrasyonları için dielektrik sabitlerini hesaplarsak;

Asetik asit : $\varepsilon = 6{,}2 \times 0{,}80 + 80{,}4 \times 0{,}2 = 21{,}04$

İzo-propil alkol : $\varepsilon = 18{,}4 \times 0{,}8 + 80{,}4 \times 0{,}2 = 30{,}72$

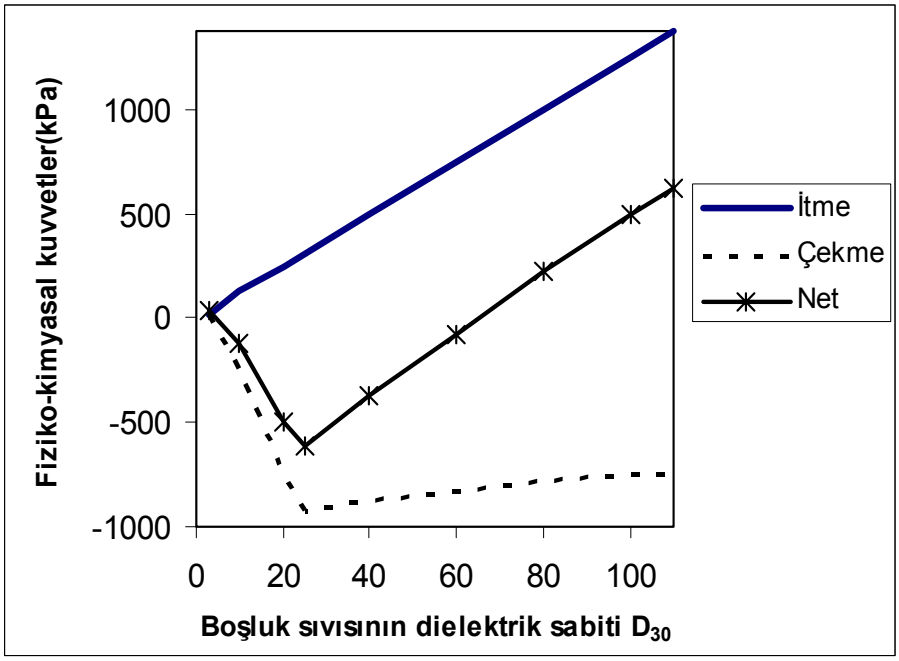
Ethanol : $\varepsilon = 24{,}3 \times 0{,}8 + 80{,}4 \times 0{,}2 = 35{,}44$

Methanol : $\varepsilon = 33{,}6 \times 0{,}8 + 80{,}4 \times 0{,}2 = 42{,}88$

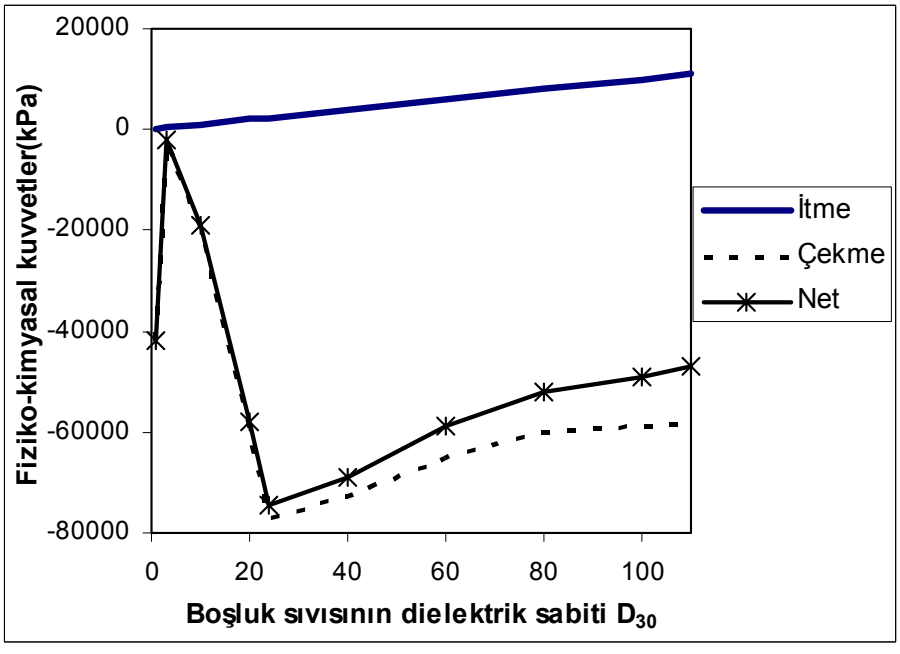
olmaktadır. Bu durumda Şekil 3.23. dikkate alınırsa saf haliyle net çekim kuvveti en büyük ethanolde iken en derişik olan %80 konsantrasyonda net çekim kuvveti için sıralama;

asetik asit >izo-propil alkol >ethanol >methanol > saf su

şeklinde olmaktadır. Diğer konsantrasyonlar içinde benzer sıralama söz konusudur. Kaolinit için elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri asetik asit için bulunan değerler haricinde tanecikler arasında oluşan fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimi ile orantılıdır. Boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalmasıyla iki silika minerali arasındaki itme ve çekme kuvvetlerinin her ikisi birden azalmakta, fakat itme kuvvetlerindeki azalma çekme kuvvetlerindeki azalmadan daha büyük olmakta ve bu yüzden iki silika parçacığı arasında net bir çekme kuvveti oluşmaktadır (Kaya ve Fang 2000). Böylece taneciklerin flokülasyonu (topaklanma) ile tanecikler küme formuna girmekte ve daha fazla mukavemet göstermeye başlamaktadır. Artan konsantrasyonla birlikte dielektrik sabiti daha küçük değerler aldığı için tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve zeminin serbest basınç mukavemeti de artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile artmaktadır.



Şekil 6.1. Kaolinitte parçacıklar arası mesafenin 0,003µm olması durumu için fiziko-kimyasal kuvvetlerin dielektrik sabiti ile değişimi (Zhao 1996)



Şekil 6.2. Kaolinitte parçacıklar arası mesafenin 0,001µm olması durumu için fiziko-kimyasal kuvvetlerin dielektrik sabiti ile değişimi (Zhao 1996)

7- Kaolinit mineralinin kalınlığı etrafındaki diffüz çift tabaka kalınlığı ile karşılaştırıldığında oransal olarak diğer kil minerallerine göre çok küçüktür (Lambe 1958). Kil tanecikleri arasında etkiyen fiziko-kimyasal kuvvetlerden olan çekme kuvvetleri kaolinitin davranışı üzerinde özellikle tanecikler arası mesafe yakınken daha fazla etkilidir (Chen 1996). Deneylerde kullanılan kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen artışlar da tanecikler arasındaki çekme kuvvetleri değişimi ile paralellik göstermektedir. Kaolinitin diffüz çift tabaka kalınlığının az olması nedeniyle davranışı üzerinde diffüz çift tabakanın kimyasal sıvılar etkisiyle çökmesi ve itme kuvvetlerinde meydana gelen değişimler çok fazla etkili olmamaktadır. Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.'deki grafiklerde bu durumu açık bir şekilde göstermektedir (Zhao 1996). Sridharan ve ark. (1986, 1988), diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinin kaolinitik zeminlerde montmorillonitik zeminlere göre minimum düzeyde olduğunu söylemişlerdir.

8- Asetik asitin %40 konsantrasyonundan sonra serbest basınç mukavemeti artışı yavaşlamakta, bulunan değerler diğer kimyasallar için elde edilen değerlerden daha düşük çıkmakta bu durum dielektrik sabitinin azalması ile çekme kuvvetlerinin arttığı ifadesi ile çelişmektedir. Bu durum şu şekilde izah edilebilir:

   Kaolinit mineralleri 1:1 yapısındaki alümina silikat yapılı minerallerdir. Bu mineraller uygun reaksiyon koşullarında asitle reaksiyon vererek bozunur ve sorun oluşturan ürünlere dönüşürler. Deneylerde kullanılan asetik asit diğer asit türlerine (sülfürik asit gibi) göre zayıf bir asit olmasına rağmen kaolinitin davranışını değiştirebilmektedir. Kaolinitin asetik asitle olan reaksiyonu sonucunda jel yapılı silis alüminyum hidroksit oluşumu nedeniyle filtrasyon kademesi zorlaşmakta ve filtrasyon hızı düşmekte, viskozite artmaktadır. Filtrasyon hızının azalması ve viskozitenin artması dolayısıyla ön konsolidasyona tabii tutulan bulamaç içerisindeki fazla sıvının dışarı çıkışı zorlaşmakta ve diğer deneyler için alınan numunelerde başlangıç su muhtevası yüksek olmaktadır. Böylece deneyler sonucunda daha düşük serbest basınç mukavemeti değerleri elde edilmektedir. Mukavemet

kaybındaki bir diğer etkende zayıf bir asit olmasına rağmen asetik asitin alümina silikat yapılı kaoliniti lokal olarak bozunmaya uğratması ve özellikle bozunmaya uğrayan bu lokal bölgelerde deneyler esnasında göçmelerin meydana gelmesidir.

9- Kimyasalların varlığında elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerine göre zeminin kıvamı hakkında bir yorum yapmak gerekirse genel olarak artan kimyasal sıvı konsantrasyonuyla zeminin katı kıvama doğru geçme eğiliminde olduğu görülmektedir (Çizelge 6.4.). Çizelge'ye göre saf su için yumuşak kıvamda olan kaolinit, kimyasalların % 80 konsantrasyonları için katı kıvama geçmektedir.

10- Kaolinitte deneyler genel olarak %15 birim deformasyona ulaşıncaya kadar devam ettirilmiş, bu değerden sonra homojen olmayan deformasyonlar oluştuğu için deneyler sonlandırılmıştır.

Aksaray kili üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların %20, %40 ve %60 konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve deneyler yapılabilmiştir. Kimyasalların %80 konsantrasyonları için numune alınamamış ve serbest basınç deneyleri yapılamamıştır. Çünkü dielektrik sabitinin azalmasıyla tanecikler aşırı flokülasyona uğramış, tamamen küme şeklinde bir yapı oluşmuş ve numuneler adeta bir silt-ince kum davranışı göstermeye başlamıştır. Böylelikle tüpler içerisine alınan numuneleri bir bütün olarak çıkarmak mümkün olmamıştır.

Çizelge 6.4. Killerin serbest basınç mukavemetine göre ayrımı (Önalp 2007)

Kıvam	**q_u (kPa)**
Çok yumuşak	<25
Yumuşak	25-49
Orta katı	50-96
Katı	97-192
Çok Katı	193-383
Sert	>384

2- Methanolün %20 konsantrasyonuyla saf su için bulunan değerlere göre mukavemette çok fazla bir artış olmazken, bu konsantrasyondan sonra serbest basınç mukavemeti artan konsantrasyonla birlikte artmıştır. %60 methanol konsantrasyonu için bulunan ortalama serbest basınç mukavemeti saf su için elde edilen değerin 2,47 katı olmuştur.
3- Ethanoldeki değişim methanoldekine benzer eğilimde olmakla beraber daha az bir mukavemet artışı meydana gelmiştir. %60 ethanol konsantrasyonu için bulunan serbest basınç mukavemeti saf sudakinin 1,44 katı olmuştur.
4- İzo-propil alkol için bulunan değerler methanoldekinden küçük ethanoldekinden büyüktür. %60 izo-propil alkol konsantrasyonu için bulunan serbest basınç mukavemeti saf su için bulunan değerin 1,74 katı olmuştur.
5- Asetik asitin artan konsantrasyonu ile birlikte serbest basınç mukavemetinde aşırı bir artış olmuştur. Özellikle %60 asetik asit konsantrasyonunda numuneler kireç veya çimento ile stabilize edilmiş gibi davranmıştır. %40 konsantrasyonda bulunan ortalama serbest basınç mukavemeti saf su için elde değerin 2,05 katı iken bu oran %60 konsantrasyon için 6,40 kata çıkmaktadır.
6- Aksaray kilinde kimyasallar içinde en düşük mukavemet değerleri ethanolün değişik konsantrasyonları için elde edilirken dielektrik sabiti ($\varepsilon = 33,6$ olan) diğer sıvılara göre daha küçük olan methanol için bulunan mukavemet değerleri hem ethanol hem de izo-propil alkoldekinden büyüktür. Asetik asit için bulunan değerler ise diğer kimyasallar için bulunanlardan aşırı şekilde büyüktür. Aksaray kilinde yapılan serbest basınç mukavemeti deney sonuçları büyüklükleri arasında kullanılan kimyasal sıvının cinsine göre bir sıralama yapmak gerekirse;

asetik asit >methanol >izo-propil alkol >ethanol > saf su

şeklindedir.
7- Aksaray kili içerisinde ağırlıklı olarak montmorillonit tipi kil mineralleri bulunduğu için kilin davranışını daha çok bu kil minerali yönlendirmektedir. Boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile kilin serbest basınç mukavemeti değerlerinde artışlar meydana gelmektedir. Bu artışlar şu şekilde yorumlanabilir;

Bölüm 3'te ifade edildiği gibi kil minerallerinin yüzeylerinde negatif yükler ve kenarlarında da pozitif yükler bulunmaktadır. Kuru killerde negatif yük elektrostatik çekim kuvveti ile parçacıklar tarafından tutulan Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} ve K^{+} gibi değiştirilebilir katyonlar tarafından dengelenmektedir. Kile bir miktar su eklendiğinde ise bu katyonlar ve bir kaç tane anyon kil parçacıklarının etrafında yüzmektedirler. Kil zerrelerinin yüzeyindeki negatif yük tabakası ile katyonların meydana getirdiği pozitif yük tabakası birlikte diffuse double layer (=diffüz çift tabaka) diye adlandırılmaktadır (Das 2002). Özellikle kalınlığı az olan montmorillonit tipi killerde teorik olarak diffüz çift tabaka kalınlığı kil mineralinin kendi kalınlığının 40 katıdır. Bu yüzden diffüz çift tabaka kalınlığındaki herhangi bir değişim kilin davranışını büyük oranda değiştirmektedir. Kimyasal sıvıların boşluk sıvısı olması durumunda diffüz çift tabaka kalınlığı azalmaktadır. Diffüz çift tabaka kalınlığının azalması ile birlikte flokülasyona uğrayan ve silt-ince kum formuna yaklaşan zemin uygulanan bir dış kuvvete karşı daha mukavim hale gelmektedir. Diffüz çift tabaka kalınlığı kaolinit mineraline göre çok daha fazla olan montmorillonit tipi killerde bu etki daha fazla görülmektedir. Mitchell (1976), yüksek aktiviteli zeminlerin büyük yüzey yük yoğunlukları olan bir kil içeriğine sahip oldukları için boşluk sıvısı değişimlerinden aşırı derecede etkilendiklerini ve bundan dolayı zeminin tüm geoteknik özelliklerinin de değiştiğini belirtmiştir.

8- Boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki değişimlere bağlı olarak serbest basınç mukavemetinde meydana gelen artışlar tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimi ile orantılıdır. Kaya ve Fang (2000) tarafından farklı kimyasal sıvılar varlığında iki silika tabakası arasında oluşan çekme ve itme kuvvetlerinin değişimi için verilen çizelgenin (Çizelge 6.3.) sonuçları da göstermektedir ki en düşük çekme ve itme kuvvetleri boşluk sıvısının dielektrik sabiti zemin taneciklerinin dielektrik sabitine yaklaşıldığı zaman oluşmaktadır (Chen 1996). Örneğin asetik asitin %80 konsantrasyonu için dielektrik sabiti $\varepsilon = 20{,}96$ olmakta ve bu değer di elektrik sabiti $\varepsilon = 15{,}3$ olan montmorillonitin dielektrik sabitine yaklaşmaktadır. Bu durumda boşluk sıvısı dolayısıyla hemen hemen hiç çekme veya itme kuvveti meydana

gelmemektedir. Bununla birlikte iki silika tabakası arasında boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte itme kuvvetlerinde meydana gelen azalma çekme kuvvetlerinde meydana gelen azalmadan daha büyük olmaktadır. Kaya ve Fang (2005), ince taneli zeminlerde tanecikler arasındaki efektif gerilmeyi şu şekilde tanımlamışlardır;

$$\sigma' = \sigma_{top} - u_o - (R_{itme} - A_{çekme}) \quad (6.6.)$$

Bu eşitlik tanecikler arasındaki basınç farkını göstermektedir ve klasik geomekaniksel efektif gerilme parçacıklar arasındaki çekme ve itme kuvvetleri arasındaki farktır. Eğer itme gerilmesi çekme gerilmesine eşit veya toplam gerilmeyle karşılaştırıldığında çok küçükse efektif gerilme ve tanecikler arası basınç arasında fark olmayacaktır. Aslında, zemin tanecikleri arasındaki kuvvetlerin azalması ile kohezyonlu ince taneli zeminler kohezyonsuz ve ince taneli zeminlerin (silt ve kum) özelliklerini yansıtmaktadır (Kaya ve Fang 2000). Böylelikle;

- Boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalma çekme ve itme kuvvetlerindeki azalma ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte itme kuvvetlerindeki azalma çekme kuvvetlerindeki azalmadan daha büyüktür. Bu da net kuvvetin çekme gerilmesi olmasına neden olmakta yani itme kuvvetleri elimine edilmiş olmaktadır. İtme kuvvetlerinin elimine edilmesiyle diffüz çift tabaka büzülmekte ve zemin parçacıkları flokülasyona uğrayarak agrega biçiminde şekillenmektedir.
- İnce taneli zeminlerde tanecikler arası itme ve çekme kuvvetleri ne kadar küçükse bu zeminlerin efektif gerilmeleri, kohezyonsuz ince taneli zeminlerin taneler arası basınçlarına o kadar çok benzemektedir.

Bu mekanizmayla ilgili olarak Lambe (1958) ve Bowders ve ark. (1985) diffüz çift tabaka kalınlığındaki bir azalmanın elektriksel itme kuvvetini azaltacağını ve bunun zeminin flokülasyonuna sebep olacağını söylemişlerdir. Wienberg (1990), kil parçacıklarının diffüz çift tabaka kalınlığının azalmasının aslında taneciklerin içsel alanının azalmasına neden olduğunu, bunun da flokülasyon ve agregasyon nedeniyle tanecik

boyutlarının büyümesiyle sonuçlandığını ve zeminin siltli zemin gibi davrandığını söylemiştir. Kil tanecikleri arasında net çekim kuvvetinde meydana gelen artış ve diffüz çift tabakanın göçmesi olayı özellikle montmorillonit tipi kil minerallerinde daha etkili olup Aksaray kili için bu mekanizma geçerli olmaktadır.

9- Aksaray kili için yapılan deneylerde bulunan serbest basınç mukavemeti değerleri azalan dielektrik sabitiyle artarken methanol kimyasal sıvısının varlığında bu durum farklılık göstermektedir. Bu farklılık şu şekilde izah edilebilir; Aksaray kili içerisinde %33 oranında bulunan sepiyolit minareli yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Sepiyolitin aktivitesi büyüktür, lifsi bir yapıya sahiptir ve porozitesi büyüktür. Sepiyolit lifsi yapısı ve taşıdığı uzun kanallar dolayısıyla içerisinde zeolitik suya sahiptir ve yapısal zincirlerin kenarlarındaki magnezyum iyonlarına bağlanmış su molekülleri ile hidrojen bağları oluştururlar (Sabah ve ark 2006). Deneylerde kullanılan ve diğer kimyasallara göre kısa zincirli bir yapıya sahip olan methanol kimyasal sıvısı bu kısa zincirleri sayesinde kanalların içerisinde zeolitik su ve hatta koordinasyon suyunun yerini alabilmektedir. Diğer kimyasallar ise daha uzun bir zincir uzunluğuna sahip olup iç yüzeylere giremez ve sadece dış yüzeylerdeki zeolitik su ve koordinasyon suyu molekülleri ile yer değiştirebilirler. Böylelikle methanol taneciklerin daha fazla flokülasyonunu (topaklanma) ve daha fazla direnç gösterebilen bir yapı oluşturmasını sağlamaktadır. Sonuçta ise, methanol ile hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri diğer kimyasal sıvıların aynı konsantrasyonları (ethanol ve izo-propil alkol) ile hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen mukavemet değerlerinden daha büyük olmaktadır.

10- Aksaray kilinde asetik asit varlığında numunelerin serbest basınç mukavemetinde meydana gelen artış dielektrik sabitindeki azalmaya bağlı olduğu gibi kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomit minerallerinin varlığıyla da bağlantılıdır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir;

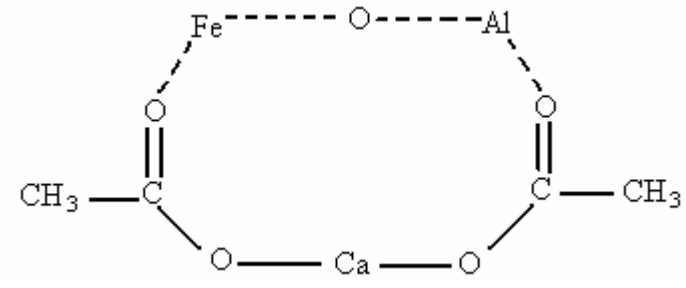
Aksaray kili için yapılan X-RD yarı nicel mineralojik analizinde tüm kayaç analizi sonucuna göre kilin içerisinde %30 oranında dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) ve %24 oranında kalsit ($CaCO_3$) bulunmaktadır. Bu durumda

dolomit ve kalsitin asetik asitle yapmış olduğu reaksiyonların sonucu önem kazanmaktadır. Kalsitin asetik asitle (CH_3CO_2H) muamelesi sonucu kalsiyum asetat ($Ca(CH_3CO_2)_2$), dolomitin asetik asitle muamelesi sonucu ise yine kalsiyum asetat ($Ca(CH_3CO_2)_2$) veya magnezyum asetat ($Mg(CH_3CO_2)_2$) bileşikleri oluşmaktadır. Bu bileşiklerin oluşumu şöyle formülize edilebilir;

$$CaCO_3 + 2\,CH_3COOH = Ca(CH_3CO_2)_2 + H_2O + CO_2 \qquad (6.7.)$$

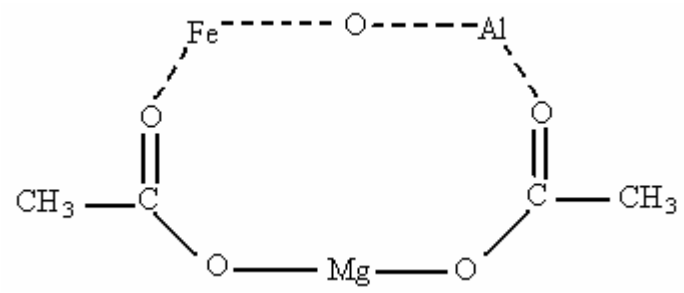
$$MgCO_3 + 2\,CH_3COOH = Mg(CH_3CO_2)_2 + H_2O + CO_2 \qquad (6.8.)$$

Yukarıda förmülize edilmiş şekli verilen bileşiklerin davranışını anlayabilmek için açık yapılarının incelenmesi gereklidir (Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.). Oluşan bu kalsiyum ve magnezyum asetatların açık yapısından da görüldüğü gibi karbon (C) atomuna bağlanan oksijen (O) atomlarının bir ucunda eksi (-) yükler bulunmakta ve boşta kalmaktadır. Boşta kalan oksijen atomlarındaki bu uçlara demir (Fe), alüminyum (Al), sodyum (Na) ve potasyum (K) gibi metaller bağlanmaktadır. Bu ilişki bir zincir şeklinde devam etmektedir. Bu zincirler dolayısıyla dıştan gelen etkilere karşı daha dirençli ve kararlı davranış sergileyebilen bir yapı oluşmaktadır. Oluşan bu yapıyı bozabilmek için daha büyük bir kuvvet uygulanması zorunlu hale gelmektedir ki bu da numunenin mukavemet kazandığını gösterir.

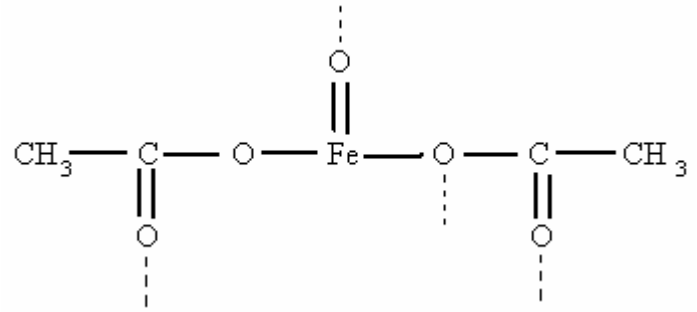


Şekil 6.3. Kalsit ($CaCO_3$) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda kalsiyum asetat ($Ca(CH_3CO_2)_2$) oluşumunun açık yapısal gösterimi

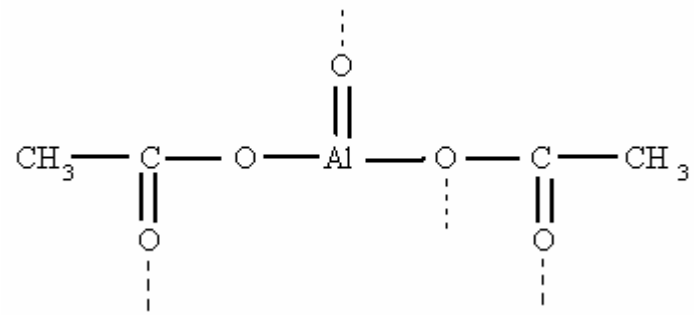
Ca ve Mg'dakine benzer güçlü yapılar zemin içerisinde sırasıyla %1,3 ve %1,6 oranında bulunan demir-oksit (Fe_2O_3) ve alüminyum-oksit (Al_2O_3) içinde meydana gelmektedir (Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.).



Şekil 6.4. Dolomit $MgCa(CO_3)$ ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda magnezyum asetat ($Mg(CH_3CO_2)_2$) oluşumunun açık yapısal gösterimi



Şekil 6.5. Demir-oksit (Fe_2O_3) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda oluşan açık yapının gösterimi



Şekil 6.6. Alüminyum-oksit (Al_2O_3) ve asetik asit (CH_3COOH) arasındaki kimyasal reaksiyonda oluşan açık yapının gösterimi

11- Asetik asit varlığında Aksaray kili için yapılan deneylerde serbest basınç mukavemetinin artmasının bir diğer sebebi de yukarıda meydana gelen reaksiyonlar esnasında karışım içerisindeki sıvıların bir kısmının bu reaksiyonlarda kullanılması bir kısmının da (özellikle su) bu reaksiyonlar esnasında meydana gelen sıcaklık artışı sonrası hemen buharlaşarak karışım numunesini terk etmesidir. Böylelikle numune çok aşırı bir su kaybetmekte ve kısa sürede mukavemet kazanmaktadır. Meydana gelen bu durum numunelerin ön konsolidasyonla hazırlanması esnasında çok açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Ön konsolide edilen numune yaklaşık 2 gün içerisinde ve çok düşük bir gerilme (25 kPa) altında hemen hemen toplam sıkışmasına ulaşmıştır. Ön konsolide edilen numunelerdeki bu olay deney sonrası ölçülen su muhtevası değerlerinden de çok açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

11- Aksaray kilinde deneye tabii tutulan numunelerde genel olarak kırılmaların gevrek kırılmalar olması ve çok çabuk gerçekleşmesi dolayısıyla %15 birim deformasyon değerine kadar ulaşılmadan deneyler sonlandırılmıştır.

12- Aksaray kilinde kimyasalların özellikle %60 konsantrasyonu için numuneler aşırı konsolide olmuş kil davranışı göstermektedirler.

6.3. Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kaolinit üzerinde yapılan üç eksenli basınç deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve üç eksenli basınç deneyleri yapılabilmiştir.

2- 50, 100 ve 200kPa çevre basınçları altında kimyasalların farklı konsantrasyonları için bulunan drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri genel olarak boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabitiyle birlikte artmaktadır. Kimyasalların azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonları ile tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve tanecikler flokülasyona uğramaktadır. Flokülasyona uğrayan tanecikler dış kuvvetlere karşı daha

fazla mukavemet göstermektedirler. Deneyler sonucu elde edilen pik kayma mukavemeti değerlerindeki değişim Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.'de gösterilen tanecikler arasındaki çekme kuvvetlerinde meydana gelen değişimle paralellik göstermektedir. Moore ve Mitchell (1974), su ve su yerine değişik organik sıvılar kullanarak sıkıştırılan bir kaolinit üzerinde bir dizi kayma mukavemeti deneyleri yapmışlardır. Kayma mukavemetinin, çekme kuvvetinin değişimi ile uygunluk gösteren dielektrik sabitiyle anlamlı miktarda değiştiğini söylemişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar yaptıkları çalışmada Lifshitz itme teorisini ihmal etmişler ve bu teorinin ayrık iki parçacık için geçerli olduğunu, bu durumda çekme kuvvetleri hesabında dikkate alınmaması gerektiğini söylemişlerdir. Mitchell (1960), kaolinitte çift tabaka itme teorisinin geçerli olmayışının sebebini kaolinitin geniş parçacık boyutuna bağlamış, kaolinit parçacıklarının düzensiz ve yüzeye set yapacak şekilde yerleştiğini ve Bolt'un teorisindeki parçacıkların birbirine paralel olarak yerleşimi kabulüne uymadığını belirtmiştir. Anandarajah ve Zhao (2000), kimyasal sıvılar varlığında kaolinit numuneleri üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır (Çizelge 6.5.). Araştırmacılar su yerine dielektrik sabiti farklı olan boşluk sıvılarının kullanılmasıyla daha yüksek pik kayma mukavemeti değerleri elde etmişlerdir.

Çizelge 6.5. Kaolinit üzerinde yapılan üç eksenli basınç deney sonuçları (Anandarajah ve Zhao 2000)

Kimyasallar	Dielektrik Sabiti (ε)	Pik Kayma Mukavemeti (q_{peak})		
		100 kPa	200 kPa	400 kPa
Formamid	111	126,8	225,4	- [a]
Su	80	65,0	107,6	205,8
Ethanol	24,2	98,8	141,8	227,8
Asetik asit	6,1	215,4	262,2	- [a]
Triethylamine	2,4	160,6	256,6	- [a]
Heptan	1,9	296,0	372,6	438,8
[a] : Deney Yapılmadı				

Sridharan ve ark. (2007), kaolinitik zeminlerin fiziksel ve mühendislik davranışlarını kontrol eden mekanizmaların montmorillonitik zeminlerinkinden oldukça farklı olduğunu, bu durumun kaolinitin davranışında çekme kuvvetlerinin baskın olmasından kaynaklandığını söylemişlerdir. Araştırmacılar kaolinitte drenajsız kayma mukavemetinin 0,5 N Nacl ve CCl_4 boşluk sıvıları durumu için saf sudakinin 4 -7 kat arasında arttığını söylemişlerdir.

3- Boşluk sıvısının asetik asit olması durumunda %40 ve %60 konsantrasyonlar için bulunan drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri dielektrik sabitleri asetik asidinkinden büyük olan ethanol (ε=24,3) ve izo-propil alkol (ε=18,4) için bulunan değerlerden küçük çıkmaktadır. Bu durumda dielektrik sabitinin azalması ile çekme kuvvetlerinin arttığı ifadesi tam olarak yerine oturmamaktadır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir; Asetik asit kaolinit kilinin yapısı üzerinde bir jelleşme etkisi yapmakta ve jelleşmenin etkisiyle zemin tanecikleri arasındaki sıvının filtrasyon hızı ve oranı azalmaktadır. Bu durumda kil tanecikleri arasından daha az sıvı uzaklaşabilmekte ve belli konsantrasyondaki asetik asit sıvısı ile hazırlanmış ön konsolide edilen numuneler daha yumuşak bir kıvamda olmaktadır. Bu yüzdende özellikle %40 ve %60 asetik asit konsantrasyonundaki sıvı ile hazırlanan numunelerde taneler arasındaki çekme kuvvetlerinde meydana gelen artışa rağmen kıvamının yumuşak olması sebebiyle ethanol ve izo-propil ile hazırlanan numunelere göre daha düşük pik mukavemet değerlerine ulaşılmaktadır. Ön konsolide edilerek kaptan çıkarılan numunelerden alınan su muhtevası değerleri de bu durumu doğrulamaktadır. %40 ve %60 asetik asit konsantrasyonlu sıvılarla hazırlanarak alınan numunelerin su muhtevası saf su, %20 ve %80 konsantrasyonlu sıvılarla hazırlanan numunelere göre deney sonunda %3-4 oranında yüksek çıkmıştır. %20 asetik asit konsantrasyonunda bu durumun farklı olmasının sebebi çok fazla bir jelleşmenin olmaması nedeniyle suyun filtrasyonunun gerçekleşmesi ve fazla sıvının rahatlıkla drene olabilmesidir. %20 asetik asit konsantrasyonu için asetik asitin etkisiyle meydana gelen çekme kuvvetindeki artışlar jelleşme olayının etkisinden daha baskın çıkmaktadır. %80 asetik asit konsantrasyonunda ise taneler arasında

jelleşme olmasına rağmen numuneler arasında tanecik yüzeylerine çekilen ve drene edilemeyen su miktarı oranı maksimum %20 olabileceği için filtrasyona uğrayamayan sıvı miktarı %40 ve %60 konsantrasyondan daha az olmaktadır. Ayrıca %80 asetik asit konsantrasyonu için tanecikler arasındaki çekme kuvvetleri daha baskın olmakta ve bu sebeple elde edilen pik kayma mukavemeti değerleri tekrar artmaktadır.

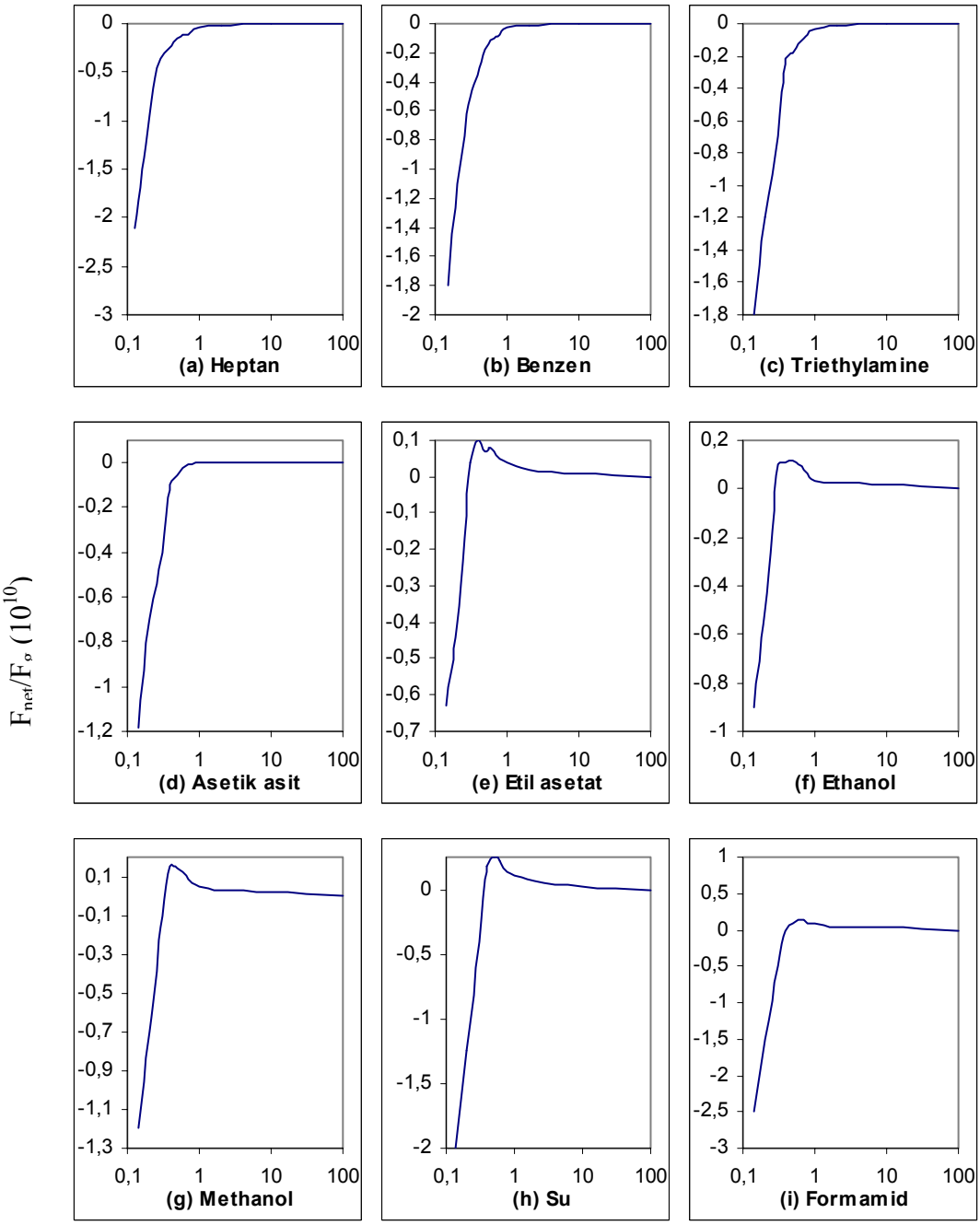
4- Kimyasal sıvıların dielektrik sabitlerindeki azalmayla birlikte çok aşırı olmamakla birlikte kaolinitin kohezyon değerleri artmaktadır. Deneylerde kimyasal sıvıların varlığında en büyük kohezyon değeri asetik asitin %80 konsantrasyonu için elde edilmiş olup (c=27,3 kPa) bu değer saf su için bulunan değerin (c=23,5 kPa) 1,16 katıdır. Burada azalan dielektrik sabiti ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve çekim alanı derinleşmektedir. Parçacıklar birbirini daha kuvvetli çekmeye başlamaktadırlar. Killerdeki kohezyonun temel kaynağı Van der Walls çekim kuvvetleri olup, daha büyük Van der Walls çekim kuvveti demek flokülasyona uğrayan ve kümeleşen zemin yapısı içerisindeki kil taneciklerinin birbirini daha kuvvetli çekmesi demektir. Buda içsel yapıda daha büyük kohezyonunun oluşması ile sonuçlanmaktadır.

5- Kaolinitte yapılan üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre kimyasal sıvıların dielektrik sabitindeki azalmayla ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile içsel sürtünme açıları artmaktadır. Saf su için $Ø = 4{,}0^0$ olan içsel sürtünme açısı, kimyasallarla yapılan deneyler sonucu en fazla asetik asitin %80 konsantrasyonu için bulunmuş olup $Ø = 6{,}47^0$'dir. Bu değer saf su için bulunan değerin 1,62 katıdır.

6- Saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerde numuneler normal konsolide zeminlerin davranışını gösterirken farklı kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları ile hazırlanarak yapılan deneylerde numuneler aşırı konsolide olmuş kil özelliğini gösterme yönünde bir eğilime girmişlerdir. Numuneler yapı olarak da daha çok bir silt-ince kum davranışına doğru yaklaşmışlardır. Anandarajah ve Zhao (2000), normal konsolide ve aşırı konsolide kaolinit numuneleri üzerinde yaptıkları üç eksenli basınç deneyleri sonucuna göre asetik asit ve formamid dışındaki diğer kimyasallar

kullanıldığı zaman, su ile yapılan deney sonuçlarına göre normal konsolide numunelerin davranışının aşırı konsolide numunelerin davranışına doğru bir yönelim içinde olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin daha önce Richards ve Hamilton (1967) tarafından ifade edilen görünür aşırı konsolide özelliği göstermeye başladığını söylemişlerdir. Chen (1996), kaolinitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitindeki değişimin kuvvet bariyerleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır (Şekil 6.7.). Burada kullanılan kimyasal sıvıların dielektrik sabitleri (ε) şekil üzerindeki sıralamaya göre; 1,91-2,28-2,42-6,15-15,7-24,3-33,6-80,4-110 şeklindedir. Şekil 6.7.'de de görüldüğü gibi kaolinitte azalan dielektrik sabiti ile birlikte itme bariyerlerindeki kuvvetler azalmaktadır. İtme bariyerindeki kuvvetlerin azalması ile parçacıklar arasında verilen bir dış basınç altında mekaniksel bir kontakt kurulacaktır. Bu durum sistem içerisindeki mekaniksel kontaktların toplam sayısını ve sürtünme sayısını arttırır. Bu artış mevcut basınçtan daha büyük olan ön konsolidasyon basıncının neden olduğu mekaniksel kontaktların sayısındaki bir artışa benzemektedir. Bu durum ise çeşitli kimyasal sıvılarla hazırlanan numunelerde aşırı konsolidasyon davranışının meydana gelmesini sağlamaktadır.

7- Kaolinitte kimyasal sıvıların varlığında kayma mukavemetinde meydana gelen artış üzerinde kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısında meydana gelen değişiklikler rol oynamaktadır. Kimyasal sıvıların etkisi ile silt-ince kum yapısına dönüşme yönünde bir eğilime giren kaolinite dışardan bir kuvvet uygulandığı zaman tanecikler arasında meydana gelen mekaniksel kontaktlar artmakta ve tanecikler yer değiştirmeye zorlandığı zaman aralarında temastan dolayı oluşacak sürtünme direnci artmaktadır. Bu sürtünme direncinden dolayı kayma mukavemetinde meydana gelecek artış ise içsel sürtünme açısındaki artışla ifade edilmektedir. Schmertmann (2001), daha önce kendisi tarafından yapılan araştırmaların sonucunu değerlendirirken kimyasallarla yaptığı bütün deneylerde rijitlik ve mukavemet artışının kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısına bağlı olduğunu ifade etmiştir.



Şekil 6.7. Kaolinitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitinin kuvvet bariyeri üzerindeki etkileri

8- Kaolinitik zeminler kenar-yüzey floküle yapısına sahip olup, kimyasal sıvıların varlığında genel olarak hem likit limit hem de mukavemet değerleri artmaktadır. Sridharan ve ark. (2002), kaolinitik doğal marina killeri üzerinde

yaptıkları deneylerde boşluk sıvılarının tuz içeriğinin arttırılması ile hem likit limit, hem de drenajsız kayma mukavemetinin arttığını söylemişlerdir.

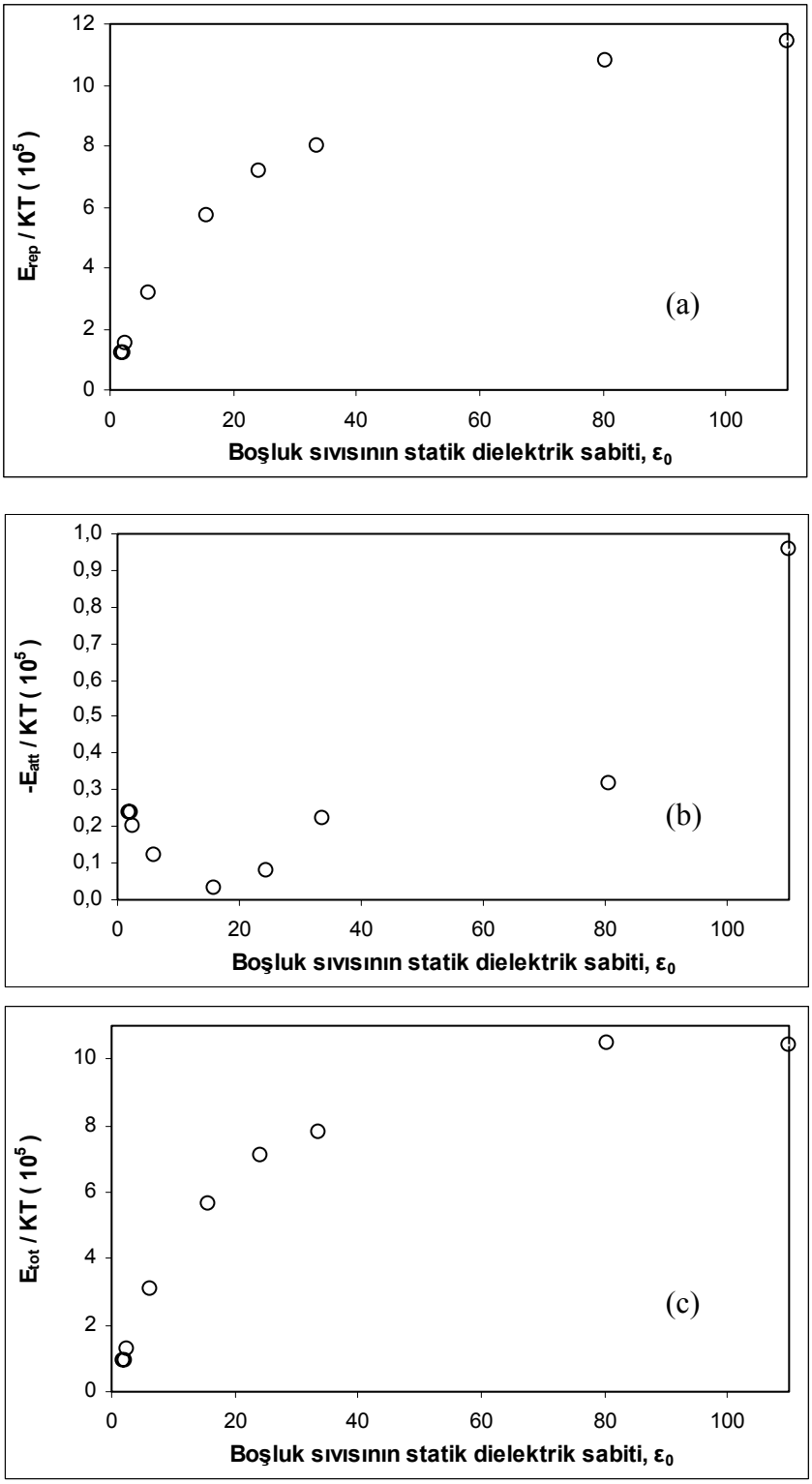
9- Kaolinit üzerinde yapılan üç eksenli deneylerde numuneler genel olarak %10 birim deformasyon oranında kırılmıştır.

Aksaray kili üzerinde yapılan üç eksenli basınç deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların %20, %40 ve %60 konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve üç eksenli basınç deneyleri yapılabilmiştir. Kimyasalların %80 konsantrasyonları için aşırı flokülasyondan dolayı numune alınamamış ve deneyler yapılamamıştır.

2- 50,100 ve 200 kPa çevre basınçları altında artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri artmakta, en fazla artış asetik asitin değişik konsantrasyonlarında olmaktadır. Methanol ve izo-propil alkol için elde edilen pik kayma mukavemeti değerleri hemen hemen birbirine yakındır. 50 kPa çevre basıncı altında asetik asitin %60 konsantrasyonu için elde edilen pik kayma mukavemeti değeri saf su için elde edilen değerin 1,74 katı olurken, bu oran 100 kPa için 1,93 ve 200 kPa için 2,34 olmaktadır.

3- Farklı çevre basınçları altında pik kayma mukavemeti değerleri boşluk sıvısının azalan dielektrik sabitiyle birlikte artmaktadır. Bunun nedeni içerisinde büyük oranda montmorillonit minerali bulunan Aksaray kilinde diffüz çift tabaka kalınlığının fazla olması, kimyasal sıvıların etkisi altında bu diffüz çift tabakanın çökmesi bunun neticesinde ise parçacıkların arasındaki itme kuvvetinin azalmasıdır. Montmorillonit tipi kil minerallerinde tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetler itme kuvvetlerine bağımlı olup, Van der Walls çekme kuvvetlerinden hemen hemen bağımsızdır. Chen (1996) montmorillonit tipi kil minerallerinde tanecikler arasındaki etkileşim enerjisini incelemiştir (Şekil 6.8.). Bu grafikten de görüldüğü gibi tanecikler arasındaki çekme enerjisi çok küçük değerler almakta ve itme enerjisinin yanında hemen hemen önemsiz kalmaktadır. Buradan hareketle boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte parçacıklar arasındaki itme kuvvetinin azalmasından dolayı tanecikler arasında oluşan net kuvvet, çekme



Şekil 6.8. Boşluk sıvılarının dielektrik sabiti değişimi ile birlikte montmorillonitin etkileşim enerjisi değişimi (Chen 1996)

kuvveti baskın olacak şekilde artmaktadır. Bu durum kil parçacıklarının birbirlerine daha da yaklaşmasına ve zemin yığınlarının büzülmesine neden olmakta, aynı zamanda permeabilitenin artışıyla sonuçlanmaktadır. Böylelikle oluşan açık –floküle yapı dispers yapıdan daha büyük kayma mukavemeti, sıkışabilirlilik ve permeabiliteye sahip olmaktadır (Mitchell 1993). Permeabilite artışı ile boşluk sıvısının akım alanından daha rahat drene olabilmesi dolayısıyla zemin yapısı daha düşük su muhtevasına sahip olmaktadır. Zeminin düşük su muhtevası, taneciklerin flokülasyonu sonucu da içsel kohezyonunun artması ve tanecikler arasındaki mekaniksel kontaktların daha etkin olmasından dolayı zemin uygulanan dış kuvvetlere karşı daha fazla mukavemet gösterebilmektedir. Bu yüzdende kimyasal sıvıların varlığında zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti artmakta ve adeta aşırı konsolide olmuş kil gibi (Richards ve Hamilton 1967) davranış sergilemeye başlamaktadır.

4- Azalan dielektrik sabiti ile drenajsız pik kayma mukavemeti değerleri artmakla birlikte dielektrik sabiti ε=33,6 olan methanol için bulunan değerler dielektrik sabiti ε = 24,3 olan ethanoldekinden büyüktür. Bu durum Aksaray kili içerisinde sepiyolit mineralleri arasına kısa zincirli olan methanolün diğer kimyasallara göre daha kolay girebilmesi ve daha fazla flokülasyona sebep olması dolayısıyladır.

5- Asetik asit varlığında drenajsız pik kayma mukavemetlerinde meydana gelen aşırı artış Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomit mineralleri ile asetik asitin yapmış olduğu reaksiyonlar sonucu aşırı mukavim bir yapı oluşması dolayısıyladır.

6- Methanol, ethanol ve izo-propil alkolde artan konsantrasyonla beraber kohezyon değerleri artmaktadır. Asetik asitte ise %40 konsantrasyona kadar artan kohezyon değeri, %60 konsantrasyon için azalmaktadır. Bu durum asetik asitin özellikle %60 konsantrasyonu için numunenin flokülasyonundaki aşırı artış nedeniyle adeta bir sıkı kum gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan deneyler sonucu en büyük kohezyon değerleri methanol için elde edilmiştir. Bu durum da yine Aksaray kili içerisinde kil fraksiyonunda bulunan %33 miktarındaki sepiyolitten kaynaklanmaktadır.

Methanol kısa zincirli olmasından dolayı diğer kimyasallara göre kilin iç yüzeylerine daha rahat nüfuz edebilmektedir. Böylelikle kil tanecikleri arasındaki kohezyonu da arttırmaktadır. Methanolün %60 konsantrasyonu için elde edilen kohezyon değeri saf su ile yapılan deneylerde elde edilen kohezyon değerinin 1,36 katı olmaktadır.

7- Aksaray kilinde kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ile birlikte içsel sürtünme açılarında meydana gelen artışlar kohezyonda meydana gelen artışlara göre çok daha belirgin olmaktadır. Diffüz çift tabakanın göçmesi ve bununla birlikte itme kuvvetlerindeki azalma ile birlikte net çekim kuvveti artmakta ve tanecikler büzülerek adeta silt-ince kum formuna yaklaşmaktadır. Ratnaweera ve Meegoda (2006), killi zeminlerin dielektrik sabiti değişimi ve boşluk sıvısının viskozitesini dikkate alarak yaptıkları değerlendirmede numunelerin konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneylerde granüler zeminler için elde edilen davranışa yakın davranış sergilediklerini söylemişlerdir. Silt-ince kum formuna yaklaşan taneciklerin davranışı da bu yönde değişmektedir. Tanecikler arasında artan mekaniksel kontakt sayısı ile birlikte uygulanan herhangi bir dış kuvvete karşı oluşan sürtünme direncinde de bir artış olmakta ve zeminlerin bu davranışı ise içsel sürtünme açısındaki bir artış şeklinde ortaya çıkmaktadır. İçsel sürtünme açısındaki bu artışlar tüm kimyasal sıvılar için artan konsantrasyonla artmakta ve methanolde ethanoldekine göre elde edilen daha büyük değerler haricinde sıvıların azalan dielektrik sabitiyle beraber bir artış göstermektedir. Methanolde ethanoldekinden daha büyük değerlerin elde edilmesi yukarıda bahsedildiği gibi sepiyolit mineralinin varlığından kaynaklanmaktadır. Zhan ve ark. (2008), kentsel katı atık depolarındaki dolguların kayma mukavemeti değişimini incelemek için dolgunun farklı derinliklerinden alınan numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneylerde, %10 deformasyon seviyesinde kohezyonun 23,3 kPa'dan 0 kPa'a düştüğü, fakat içsel sürtünme açısının ise $9{,}9^0$'den 26^0'ye yükseldiği bulunmuştur. Al-Yaqout ve ark. (2007), dolgu sistemlerinin uzun dönem performanslarını belirlemek için Kuveyt'teki Al-Adan katı atık deposu ile ilgili kapsamlı bir geoteknik araştırma yapmışlardır. Araştırmacıların yaptıkları üç eksenli

basınç deneylerinde numuneler kohezyon özelliği göstermezken içsel sürtünme açısı değerlerinin 21^0 - 30^0 arasında değiştiğini bulmuşlardır.

8- Asetik asit varlığında içsel sürtünme açısında meydana gelen artış diğer kimyasal sıvılarda meydana gelen artıştan aşırı derecede büyüktür. Bu durum dielektrik sabitindeki azalma ile birlikte Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonları sonucunda daha fazla büzülmüş ve sürtünme direnci daha fazla olan bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle %60 konsantrasyon için deneye tabii tutulan numuneler adeta çimento ile stabilize edilmiş numune davranışı sergilemektedir. İzo-propil alkolün %60 konsantrasyonu için elde edilen içsel sürtünme açısı saf su ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerde elde edilen içsel sürtünme açısı değerinin 1,99 katı olurken, asetik asitin %60 konsantrasyonu için bu değer 3,71 kata çıkmaktadır ki kayma direnci açısından bu değer artışı çok önemlidir.

9- Aksaray kilinde değişik kimyasalların farklı konsantrasyonları için elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri dikkate alındığında kilin kayma mukavemeti direnci üzerinde kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum daha önce Schmertmann (2001) tarafından ifade edilen; kimyasal sıvıların varlığında rijitlik ve mukavemet artışının kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısına bağlı olduğu, bundan dolayı killerde yıkama ile meydana gelen efektif gerilme değişimi ve aşırı konsolidasyon davranışının kayma mukavemetinin kohezyon bileşeninden ziyade sürtünme bileşeninden kaynaklandığı şeklindeki açıklamalarıyla örtüşmektedir.

10- Aksaray kilinde numunelerde meydana gelen kırılmalar gevrek kırılma şeklinde olup, artan konsantrasyonla birlikte kırılmalar daha fazla birim deformasyonlarda gerçekleşmiştir. Saf su için farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde kırılmalar %3-%4,5 birim deformasyonlarda, ethanol ve izo-propil alkolde %3-%6 arasında, methanol ve asetik asitte ise %9-%12 arasında gerçekleşmektedir.

6.4. Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kesme kutusu deneyi özellikle kumlarda uygulanan bir deney olmakla birlikte kimyasal sıvıların varlığında silt-ince kum yapısına doğru bir değişim gösterme eğiliminde olan kil zeminler üzerinde yapılan deney sonuçları diğer kayma mukavemeti deneylerinde elde edilen sonuçlarla bir uyum göstermiştir.

Kaolinit üzerinde yapılan kesme kutusu deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve kesme kutusu deneyleri yapılabilmiştir.
2- Kaolinitte farklı kimyasalların %20 konsantrasyonları için tüm kimyasal sıvılarda bulunan kayma mukavemeti zarflarının hepsi birbirine çok yakındır. Saf su için kohezyon değeri c = 9,44 kPa olup diğer tüm kimyasallar için elde edilen kohezyon değerleri bir birine yakındır ve yaklaşık olarak saf su için elde edilen değerin 1,5 katı civarındadırlar.
3- Kaolinitte %40 konsantrasyon için bulunan kayma mukavemeti değerleri saf suyunkilerin yaklaşık 1,85 katıdır. Kimyasallar için bulunan kohezyon değerleri ise saf suyunkinin yaklaşık 2 katı civarındadır.
4- Kaolinitte kimyasal sıvıların %60 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti değerleri saf su için bulunan değerlerin yaklaşık 2,3 katı, kohezyon değerleri ise saf su için bulunan değerin yaklaşık 2,2 katıdır.
5- Kaolinitte kimyasalların %80 konsantrasyonu için elde edilen kayma mukavemeti değerleri saf su için bulunan değerlerin 2,45 katı, kohezyon değerleri ise saf su için bulunan değerin 2,4 katı civarındadır.
6- Kaolinitte boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonla birlikte kohezyon değerleri artmaktadır. En büyük kohezyon değeri asetik asitin %80 konsantrasyonu için bulunmuş olup c=24,02 kPa'dır. Bu değer saf su için bulunan kohezyon değerinin 2,54 katıdır.
7- Kimyasal sıvılarının varlığında artan konsantrasyonla birlikte bulunan içsel sürtünme açısı değerleri artmaktadır. En büyük içsel sürtünme açısı değerleri izo-propil alkol için elde edilmiş olup ($Ø = 9,74^0$) saf su için elde edilen içsel

sürtünme açısı değerinin ($Ø = 3,66^0$) 2,66 katıdır.

8- Kaolinit üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde saf su için elde edilen kohezyon değeri üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon değerine göre çok küçük olup, kimyasalların varlığında oransal olarak meydana gelen artış daha fazladır. Üç eksenli basınç deneyinde kohezyon için elde edilen en büyük artış oranı 1,16 iken, kesme kutusu deneyinde en büyük oran 2,54'tür. Bu durum kesme kutusunun doğası gereğidir. Uygulanan yatay kuvvetle tanecikler birbirinden ayrılmaya zorlanmakta ve zemin bu duruma karşı koymak için birbirlerine daha fazla çekim kuvveti uygulayarak daha fazla direnç gösterebilmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde ise tanecikler ayrılmaya zorlanmaktan ziyade uygulanan bir düşey yüke karşı koymak için belli bir kohezyona sahip olmaktadır.

9- Kohezyondakine benzer şekilde kesme kutusu deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri ile üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri ile karşılaştırıldığında kimyasalların kullanılmasıyla içsel sürtünme açısında elde edilen oransal artışın kesme kutusu deneylerinde daha büyük olduğu görülmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde elde edilen en büyük artış oranı 1,62 iken, kesme kutusu deneyinde elde edilen en büyük artış oranı 2,66'dır. Bu oransal fark kohezyonda bulunan oransal fark kadar fazla olmasa da yine de belirgin bir fark olmaktadır. Kesme kutusu deneyinde uygulanan yatay kuvvetle tanecikler birbirinden ayrılmaya zorlanmakta ve flokülasyon sonucu kümeleşen zemin tanecikleri yatay harekete karşı koymak için daha net bir sürtünme direnci gösterebilmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde ise tanecikler arasındaki sürtünme direnci, tanecikleri birbirleri üzerinden kaydırmaya yönelik bir kuvvet tarafından değil uygulanan bir düşey yüke karşı koyma şeklinde ortaya çıkan bir dirençten ortaya çıkmaktadır.

10- Kaolinit için elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri incelendiğinde methanol asetik asite, ethanol de ve izo-propil alkole daha yakın davranış göstermektedir. Asetik asitin ethanol ve izo-propil alkole göre daha küçük kayma gerilmesi değerleri vermesi asetik asitin kaolinitin yapısında bir jelleşmeye sebebiyet vermesi ve filtrasyon hızının azalması

dolayısıyladır. Sıvı çıkışının zorlaşması ile kaolinit asetik asitin varlığında daha viskoz bir kıvama sahip olmaktadır. Bu sebeple de asetik asitin davranışı methanolinkine yaklaşmakta ve flokülasyon daha düşük oranda kalmaktadır. Ethanol ve izo-propil alkolde ise artan çekim kuvvetleri dolayısıyla daha fazla flokülasyon meydana gelmekte bu yüzdende methanol ve asetik aside göre sürtünme direnci daha büyük olmaktadır.

11- Kaolinitte genel olarak 32,6 ve 65,2 kPa düşey gerilmeleri altında numunelerde kesilme düşük birim deformasyonlarda gerçekleşirken 130,5 kPa düşey gerilmesi altında kesilme daha yüksek birim deformasyonlarda gerçekleşmektedir.

Aksaray kili üzerinde yapılan kesme kutusu deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve kesme kutusu deneyleri yapılabilmiştir.
2- Kimyasalların %20 konsantrasyonu için boşluk sıvısının azalan dielektrik sabitiyle birlikte farklı düşey gerilmeler altında elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri artmaktadır. Ancak methanolde bulunan değerler ethanol ve izo-propil alkol için bulunanlardan büyük çıkmaktadır. En yüksek kayma gerilmesi değerleri asetik asit için elde edilmiş olup saf suda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerlerinin ortalama 1.2 katı civarındadır.
3- Kimyasalların %40 konsantrasyonu için methanol ve izo-propil alkol için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri birbirlerine çok yakındır. Asetik asit varlığında 130,5 kPa düşey gerilmesi altında ulaşılan maksimum kayma gerilmesi değeri saf su için elde edilen değerin 1,91 katı olmaktadır.
4- Kimyasalların %60 ve %80 konsantrasyonlar için bulunan sonuçlar %20 ve %40 konsantrasyonlar için bulunan sonuçlarla paralellik göstermektedir. 130,5 kPa düşey gerilme altında asetik asitin %60 konsantrasyonu için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri saf sudakinin 2,80 katı olurken %80 konsantrasyon için bu değer 3,24 kat olmaktadır.
5- Diğer mukavemet deneylerinde olduğu gibi kesme kutusu deney sonuçları da göstermektedir ki boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve kimyasalların artan konsantrasyonları ile birlikte Aksaray kilinde elde edilen mukavemet

değerleri artmaktadır. Bu durum daha önce açıklandığı gibi montmorillonit ağırlıklı kil minerallerine sahip kilde diffüz çift tabakanın çökmesi, itme kuvvetlerinin azalması ve çekme kuvvetlerinde meydana gelen net artış dolayısıyla taneciklerin flokülasyona uğrayarak aşırı konsolide olmuş kil gibi davranarak dış kuvvetlere karşı daha fazla direnç göstermesi dolayısıyladır. Sridharan ve ark. (2007), montmorillonitik zeminlerde diffüz çift tabaka suyunun viskoz yapısındaki bir artışla drenajsız kayma mukavemetinin arttığını ifade etmişlerdir.

6- Methanol için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri ethanol ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerden büyük çıkmaktadır. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi methanolün kil içerisinde bulunan ve lifsi bir yapıya sahip olan sepiyolit içerisine diğer kimyasallara göre daha fazla nüfuz ederek flokülasyona sebep olmasından kaynaklanmaktadır.

7- Asetik asitin farklı konsantrasyonları için kayma gerilmelerinde meydana gelen aşırı artış dielektrik sabitindeki azalmadan ziyade kil içerisindeki kalsit ve dolomitin asetik asit ile olan reaksiyonları sonucu oluşturduğu güçlü yapıya dayanmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan yapı adeta çimento veya kireç ile stabilize edilmiş bir zemin davranışını andırmaktadır.

8- Kimyasalların artan konsantrasyonu ile birlikte tüm kimyasallarda %40 konsantrasyona kadar kohezyon değerlerinde çok fazla bir artış görülmezken, %60 konsantrasyondan sonra artış daha fazla olmaktadır. Kohezyondaki artış en fazla asetik asitte olmaktadır. Methanol varlığında beklenenden fazla olan kohezyon artışı kilin sepiyolit içeriğinden kaynaklanmaktadır.

9- Aksaray kilinde kimyasalların varlığında kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısında meydana gelen artışlar çok belirgin olmaktadır. Kimyasalların etkisiyle adeta silt-ince kum davranışı gösteren kilde methanol ve izo-propil alkol için elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri hemen hemen birbirine yakındır. Methanolde içsel sürtünme açısında meydana gelen aşırı artış kohezyonda olduğu gibi kil içerisindeki sepiyolitin varlığından kaynaklanmaktadır. Özellikle asetik asitin %60 ve %80 konsantrasyonları için bulunan içsel sürtünme açıları çok büyük olmaktadır. %60 asetik asit konsantrasyonunda içsel sürtünme açısı Ø =

$20,44^0$ olup saf su için ($Ø = 2,52^0$) bulunan değerin 8,1 katı, %80 asetik asit konsantrasyonunda $Ø = 24,84^0$ olup saf su için bulunan değerin 9,86 katı olmaktadır. Elde edilen bu içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 6.6.'ya göre değerlendirildiğinde Aksaray kili asetik asitin %60 konsantrasyonu için gevşek silt veya siltli kum grubuna, %80 konsantrasyon için ise sıkı silt veya siltli kum grubuna girmektedir. Soule ve Burns (2001), amonyum katyonlarıyla işleme tabii tutulan bentonitlerin içsel sürtünme açısının işlem görmeyen killere göre 5 kat olduğunu, işlem görmemiş kilin içsel sürtünme açısı $Ø=7^0$ iken işlem görmüş killerin içsel sürtünme açılarının $Ø=34\text{-}37^0$ arasında olduğunu belirtmişlerdir. Kayma mukavemeti parametresinde meydana gelen bu farklılığın sebebinin, numunelerin su muhtevalarının farklı olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

10- Aksaray kilinin kayma mukavemeti direnci üzerinde kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısı etkili olmaktadır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde en büyük artışın olduğu %80 asetik asit konsantrasyonu için; kohezyon değeri saf su için yapılan deneylerde elde edilen kohezyonun 1,37 katı olurken, içsel sürtünme açısı 9,86 kat olmaktadır. Böylece Schmertmann'ın (2001) kimyasal sıvıların varlığında rijitlik ve mukavemet artışı kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısına bağlıdır teorisi ile bulunan sonuçlar uyuşmaktadır. Al-Yaqout ve ark. (2007), dolgu sistemlerinin uzun dönem performanslarını belirlemek için Kuveyt'teki Al-Adan katı atık deposu ile ilgili yaptıkları geoteknik araştırma kapsamında direk kesme

Çizelge 6.6. Kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre farklı zeminler için içsel sürtünme açısının tipik değerleri (Aytekin 2005)

Zemin Türü	Ø (^{0})
Sıkı, iyi derecelenmiş, iri kum	37-60
Sıkı, üniform derecelenmiş ince kum	33-45
Gevşek kuru kum	28-34
Gevşek silt veya siltli kum	20-22
Sıkı silt veya siltli kum	25-30

kutusu deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda efektif içsel sürtünme açısı değerlerinin $26,7^0 - 50^0$ arasında kohezyon değerlerinin ise 7,43 – 35 kPa arasında değiştiğini bulmuşlardır.

11- Kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon değerleri karşılaştırıldığında kimyasalların kullanılmasıyla kohezyonda meydana gelen artışın oransal olarak birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir.

12- Kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri karşılaştırıldığında kimyasal sıvıların varlığında meydana gelen artışın oransal olarak kesme kutusu deneyinde daha belirgin olduğu görülmektedir. Örneğin; asetik asitin %60 konsantrasyonu için üç eksenli basınç deneyinde içsel sürtünme açısı 3,71 kat artarken, kesme kutusu deneyinde bu oran 8,1 kat olmaktadır.

13- Saf su için maksimum kayma gerilmesine %5-6 birim deformasyonda ulaşılırken, kimyasalların %80 konsantrasyonları için maksimum kayma gerilmesine %8-10 birim deformasyon değerlerinde ulaşılmaktadır.

6.5. Vane (Kanatlı Kesme) Deneyleri ve Cep Penetrometresi İle Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Vane (kanatlı kesme) deneyi laboratuarda yapılan ve özellikle killi zeminler üzerinde güvenilir sonuçlar veren bir deneydir.

Kaolinit üzerinde yapılan Vane (kanatlı kesme) deneyi ve cep penetrometresi ölçüm sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve vane (kanatlı kesme) deneyleri yapılabilmiştir.

2- Kullanılan tüm kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için bulunan kohezyon değerleri saf su için bulunan kohezyon değerlerine yakın olup, boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonla birlikte elde edilen kohezyon değerleri artmaktadır. En büyük kohezyon değeri asetik

asitin %80 konsantrasyonu için bulunmuş olup saf su için bulunan değerin 2,28 katıdır.

3- Kaolinit için cep penetrometresi ile bulunan uç mukavemeti değerleri diğer kayma mukavemeti parametreleri için yapılan deneylerdeki sonuçlarla paralellik göstermektedir. Kimyasalların %20 konsantrasyonu için uç mukavemeti değerleri saf su için bulunanlarla yakınken artan konsantrasyonla uç mukavemeti değerleri de artmaktadır.

Aksaray kili üzerinde yapılan Vane (kanatlı kesme) deneyi ve cep penetrometresi ölçüm sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve Vane (kanatlı kesme) deneyleri yapılabilmiştir.

2- Methanol ve ethanol kimyasal sıvılarının %20 konsantrasyonları için bulunan kohezyon değerleri saf su için bulunan kohezyon değerine yakınken, artan methanol ve ethanol konsantrasyonu ile kohezyon değerleri artmaktadır. %80 methanol konsantrasyonu için bulunan ortalama kohezyon değeri saf su için bulunan ortalama kohezyon değerinin 4,14 katı olurken ethanolde bu oran 3,09 kata düşmektedir.

3- İzo-propil alkol varlığında bulunan kohezyon değerleri methanol için bulunan değerlerle hemen hemen aynıdır.

4- Asetik asitin tüm konsantrasyonları için elde edilen değerler diğer kimyasallar için elde edilen değerlerden belirgin şekilde büyük olmaktadır. %60 ve %80 asetik asit konsantrasyonlarında kesme için 4 Nolu yay kullanılmıştır. %80 konsantrasyon için elde edilen ortalama kohezyon değeri saf su için bulunan ortalama kohezyon değerinin 7,72 katı olmuştur.

5- Aksaray kili üzerinde cep penetrometresi ile alınan ölçüm sonuçları da diğer kayma mukavemeti parametreleri için yapılan deneylerle paralellik göstermekte olup, %80 asetik asit konsantrasyonu için numunelerin çok sert olmasından dolayı cep penetrometresi ile ölçüm yapılamamıştır.

6.6. Konsolidasyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kaolinit üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve konsolidasyon deneyleri yapılabilmiştir.

2- Artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte kaolinitin sıkışma indisi değerleri düşmektedir. Asetik asit varlığında bu düşüş daha az olmaktadır.

3- Artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte normalize edilmiş şişme indisi değerleri azalmakta, kimyasallar içerisinde en büyük şişme indisi değerleri asetik asitte elde edilmektedir.

4- Kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabiti ile birlikte elde edilen sıkışma indisi değerleri de azalmaktadır. Kimyasal sıvıların %80 konsantrasyonu için methanolde elde edilen normalize edilmiş sıkışma indisi 0,68, ethanolde ki 0,69 ve izo-propil alkolde ki 0,71 olup hemen hemen birbirine yakınken, asetik asit için bu değer 0,91'dir. Asetik asit varlığında kaolinit kilinde meydana gelen jelleşmeden dolayı konsolidasyon deneylerine tabii tutulacak numunenin başlangıç su muhtevası yüksek olmakta ve meydana gelen sıkışma da diğer kimyasallar varlığındakinden fazla olmaktadır.

5- Kimyasalların azalan dielektrik sabiti ile birlikte bulunan şişme indisi değerleri düşmektedir. Tüm konsantrasyonlar için en düşük şişme indisi değerleri izo-propil alkolde bulunmuştur. Asetik asit için bulunan değerler ise saf sudakinden küçük ama diğer kimyasallardakinden büyüktür. İzo-propil alkolün %80 konsantrasyonu için şişme indisi 0,57 değerine düşmekte, asetik asitte ise 0,75 değerini almaktadır.

6- Kaolinitin sıkışma davranışı üzerinde etkili olan unsurlardan bir tanesi Van der Walls çekme kuvvetleridir. Tanecikler arasında oluşan Van der Walls çekme kuvvetlerinin değişimi farklı boşluk sıvıları için bulunan Hamaker sabiti (A) değişimi ile lineer olarak orantılıdır. (Chen 1996), farklı kimyasal sıvılar bulunması durumunda kaolinit için Hamaker sabiti değişimini incelemiştir (Şekil 6.9.). Bu şekilden de görüldüğü gibi Hamaker sabiti di elektrik sabiti $\varepsilon = 1,9$'dan $\varepsilon = 15,7$ (etil asetat) olana kadar azalmaktadır, daha

sonra artan di elektrik sabiti ile Hamaker sabiti artmaktadır. Şekil 6.8.'de verilen eğri kaolinit için bulunan sıkışma indisinin dielektrik sabiti ile değişimini gösteren eğriye (Bölüm 5. Şekil 5.95.) çok benzemektedir. Bu durum şu şekilde izah edilebilir; çekme kuvvetindeki bir artış parçacıklar arasında temasla sağlanan kayma direncini artıracak ve böylece büyük boşluk oranlı zemin yapısının flokülasyon ve sıkışabilirliliğinin olanaklı hale gelmesini sağlayacaktır. Yalnız Hamaker sabitinin minimum değeri ε = 15,7'de elde edilirken, tez çalışması kapsamında deneylerde elde edilen minimum sıkışma indisi değerleri dielektrik sabiti ε = 24,3 ve ε = 33,6 olan bir bölgede bulunmaktadır. Bu durum iki sebepten dolayıdır; birincisi teorik hesaplamalarda çok fazla yaklaşımlar olmasından kaynaklanmaktadır. İkincisi ise literatürde verilen sonuçlar saf kimyasal sıvılar içindir. Hâlbuki deneylerde kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonları için hesaplamalar yapılmıştır. Bu durumda elde edilen minimum nokta sağa doğru kaymakta yani daha büyük dielektrik sabitleri için minimum bir değer elde edilmektedir.

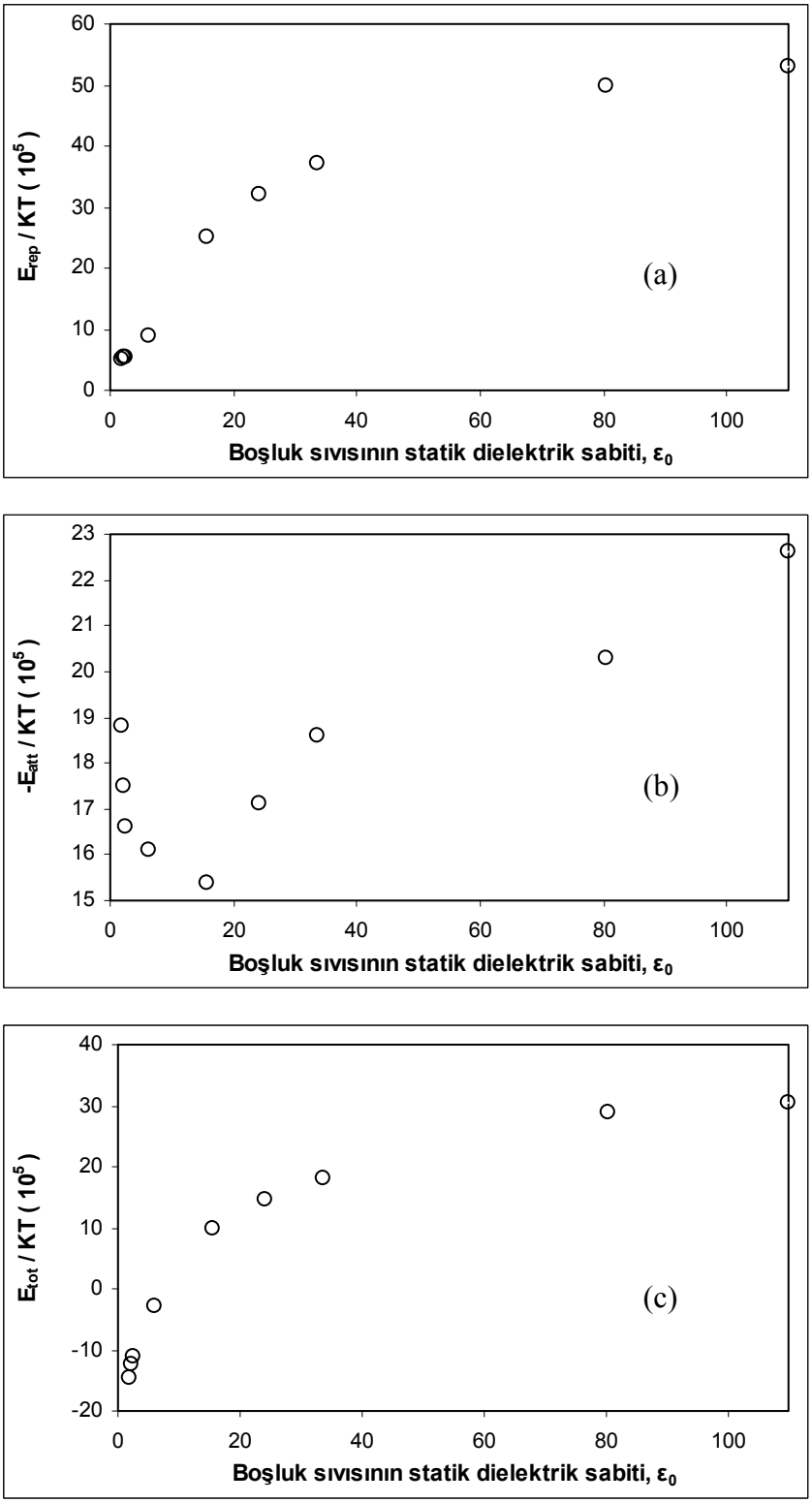


Şekil 6.9. Farklı kimyasal sıvılar bulunması durumunda kaolinit için Hamaker sabiti değişimi

7- Kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları için bulunan sıkışma indisi değerleri değişimi, karışımda kullanılan kimyasal sıvı oranı dikkate alınarak hesaplanan yeni dielektrik sabiti değişimine uymamaktadır. Örneğin; asetik asitin %80 konsantrasyonu için elde edilecek yeni dielektrik sabiti oransal olarak hesaplandığı zaman $\varepsilon = 21{,}04$ olup kaolinitte Hamaker sabiti değişimi dikkate alındığı zaman elde edilen sonuçların değişimi bu eğriye tam uymamaktadır. Sıkışma indislerindeki değişim saf kimyasal sıvılar için elde edilen Hamaker sabiti ile bir uyum göstermekte ve farklı konsantrasyonlar için aynı eğilime sahip eğriler elde edilmektedir.

8- Kaolinitin büyük parçacık boyutu dolayısıyla etrafında oluşan diffüz çift tabaka kalınlığı illit ve özellikle montmorilllonite göre küçük olmaktadır. Diffüz çift tabaka kalınlığının küçük olması itme kuvvetlerinin de küçük değerler almasına ve tanecikler arasındaki etkileşimde daha az rol oynamasına sebep olmaktadır. Kil tanecikleri arasında meydana gelen itme kuvvetlerinin değişimini temsil etmek üzere Şekil 6.10.'da verilen kaolinitteki dielektrik sabiti ile içsel enerji değişimi grafiği (Chen 1996) incelenirse, kaolinit için elde edilen sıkışma indisi değerleriyle tam olarak paralellik göstermediği anlaşılmaktadır. Bu sebeple kaolinit ile yapılan deneylerde killerin sıkışma özellikleri üzerinde çift tabaka itme kuvvetlerinin etkisi sınırlı düzeyde kalmakta ve sıkışma davranışı Van der Walls çekme kuvvetleri tarafından kontrol edilmektedir.

9- Daha önce pek çok araştırmacı farklı kil mineralleri üzerinde kimyasal sıvılarla sıkışma testleri yapmışlar. Bolt (1956) bentonit, illit ve kaolinit üzerinde yaptığı çalışmalarda illit ve kaolinitte boşluk sıvısı kimyası ile beraber boşluk oranı ve sıkışabilirliliğin değiştiğini ancak değişikliklerin çift tabaka teorisi ile çelişkili olduğunu söylemiştir. Mitchell (1960), kaolinitte çift tabaka teorisinin geçerli olmayışını onun geniş parçacık boyutuna bağlamaktadır. Kaolinit parçacıkları düzensiz ve yüzeye set yapacak şekilde yerleşmiştir ve Bolt teorisindeki parçacıkların birbirine paralel olarak yerleşimi kabulüne uymamaktadır. Yine Olson ve Mesri (1970) ve Sridharan ve Rao (1973) kaolinitin davranışının mekaniksel faktörler ve başlıca zemin yapısı tarafından kontrol edildiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 6.10. Boşluk sıvılarının dielektrik sabiti değişimi ile birlikte kaolinitin etkileşim enerjisi değişimi (Chen 1996)

10- Kimyasalların dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte şişme indisi değerleri de azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki artma çift tabaka kalınlığında bir artmaya neden olmaktadır. Çift tabaka kalınlığındaki bir artış ise çift tabaka itme kuvvetlerinin artışına sebep olmaktadır. Kaolinit üzerinde üst tabaka gerilmesinin azalması ile tabaka aralarına daha fazla sıvı girişi olmakta ve dolayısıyla artan çift tabaka kalınlığı dolayısı ile şişme indisi değerinde de bir artış olmaktadır. Tanecikler arasında meydana gelen çekme kuvveti değişiminin Hamaker sabiti değişimi ile aynı eğilime sahip olduğu tezinden yola çıkarak deneyler sonucu elde edilen şişme indisi değerlerinin de bu değişime uyduğu anlaşılmaktadır. Asetik asit için elde edilen şişme indisi değerleri çift tabaka itme kuvvetleri teorisine zıt bir durum teşkil etmektedir. Bu durum tanecikler arasındaki Van der Walls çekim kuvvetlerinin etkisine ve asetik asit dolayısıyla kaolinitin yapısında meydana gelen jelleşme ve boşluklarda daha fazla suyun tutulmasına bağlanmaktadır.

11- Kaolinit üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen normalize edilmiş sıkışma ve şişme indisi değerleri daha önceki araştırmacılar tarafından yapılan sonuçlarla karşılaştırıldığında bir uyum söz konusudur. Chen ve ark. (2000) tarafından 9 adet farklı boşluk sıvısı ile kaolinit üzerinde yapılan çalışmada (Çizelge 6.7.) su için Cc=1 olarak verilen sıkışma indisi değeri, ethanol ve methanol için sırasıyla Cc=0,41 ve Cc=0,40 değerlerini almıştır ve minimum değerlere ulaşmıştır. Asetik asit için ise suyunkine daha yakın bir değer almıştır (Cc=0,93). Araştırmacılar sıkışma indislerindeki bu değişimi Hamaker sabitine bağlı olarak değişim gösteren Van der Walls çekim kuvvetlerine bağlamışlardır. Tez çalışması kapsamında kaolinit üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlarda ise yine su için elde edilen sıkışma indisi değeri Cc=1 olmak üzere en derişik konsantrasyonlar olan %80 konsantrasyon için ethanolde sıkışma indisi Cc=0,69, methanolde Cc=0,68, izo-propil alkolde Cc=0,71 ve asetik asitte Cc=0,91 değerleri elde edilmiş olup bu noktalar üzerinden geçirilen eğrinin davranışı Chen ve ark. (2000) tarafından elde edilen eğriyle paralellik göstermektedir. Yine aynı araştırmacılar tarafından normalize edilmiş şişme indisi değeri su için Cs=1 olmak kaydıyla asetik asitte Cs=0,69, ethanolde Cs=0,77 ve methanolde Cs=

0,92 olarak bulmuşlardır. Araştırmacılar şişme indisindeki değişimleri temel olarak mekaniksel kuvvetlere bağlarken aynı zamanda fiziko-kimyasal kuvvetlerden çift tabaka itme kuvveti ve diffüz çift tabaka ile bağlantısı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada ise su için Cs=1 olmak kaydıyla asetik asit için Cs=0,75, izo-propil alkol için Cs=0,57, ethanol için Cs= 0,60 ve methanol için Cs=0,62 bulunmuştur. Elde edilen bu değerlerde asetik asit haricinde Chen ve ark (2000) tarafından elde edilen değerlerle uyumlu olup, asetik asit için elde edilen farklılık Van der Walls çekme kuvvetleri ve kaolinitin yapısında meydana gelen jelleşme olayı dolayısıyla filtrasyonun azalması ve boşluklarda bir kısım suyun hapsedilmesi sebebiyledir. Bunun sonucunda üst basıncın kalkmasıyla boşluklarda tutulan fazla sıvı şişme basıncının artmasına neden olmaktadır. Yalnız yine Chen (1996) tarafından yapılan çalışmada su, asetik asit, ethanol ve methanol için bulunan şişme indisi değerleri sırasıyla Cs=0,13, Cs=0,11, Cs=0,10 ve Cs=0,10 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak araştırmacı, şişme indisi üzerinde Van der Walls çekme kuvvetlerinin de etkili olduğunu söylemiştir.

Çizelge 6.7. Kaolinitte organik kimyasal sıvılarla sıkışma deney sonuçları (Chen ve ark. 2000)

Kimyasal Sıvılar	Dielektrik Sabiti (ε)	Sıkışma İndisi (Cc)	Normalize Edilmiş Sıkışma İndisi (Cc)	Şişme İndisi (Cs)	Normalize Edilmiş Şişme İndisi (Cs)
Heptan	1,9	2,80	1,55	0,07	0,54
Benzen	2,3	2,52	1,39	0,08	0,62
Triethylamine	2,5	2,25	1,24	0,08	0,62
Asetik asit	6,2	1,68	0,93	0,09	0,69
Etil asetat	15,7	1,16	0,64	0,10	0,77
Ethanol	24,3	0,75	0,41	0,10	0,77
Methanol	33,6	0,73	0,40	0,12	0,92
Ethanol/Su Karışımı	52,4	1,78	0,98	0,12	0,92
Su	80,4	1,81	1,00	0,13	1,00
Formamid	110	1,74	0,96	0,15	1,15

12- Kaolinit üzerinde yapılan sıkışma deneylerinde başlangıç boşluk oranı en fazla saf su için olup sıkışma olayı sonrası en küçük boşluk oranı değeri de saf su ve asetik asit için elde edilmektedir.

13- Tüm kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için kaolinitte meydana gelen boşluk oranı değişimleri saf su için elde edilen değerlerdekine yakın olmaktadır. Kimyasalların artan konsantrasyonu ile birlikte boşluk oranı değişimleri azalmaktadır. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam boşluk oranı değişimi methanolün %80 konsantrasyonu için elde edilen toplam boşluk oranı değişiminin 1,60 katı, ethanolünkinin 1,58 katı, izo-propil alkolünkinin 1,45 katı ve asetik asidinkinin 1,22 katıdır. Boşluk oranları değişimindeki bu oranlar deneylerde elde edilen sıkışma indisi değerleriyle uyumlu sonuçlar vermektedir.

14- Kaolinitte özellikle methanol, ethanol ve izo-propil alkol varlığında daha büyük boşluk oranlarının elde edilmesi kaolinit kilinde tanecikler arasındaki Van der Walls çekme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Çekme kuvvetlerinin etkisi altında flokülasyona uğrayan kil tanecikleri kümelenmekte ve kümelenen bu parçacıklar dışarıdan uygulanan bir kuvvete karşı koyarken aralarında bir sürtünme direnci oluşmaktadır. Kimyasal sıvıların artan konsantrasyonu ile birlikte daha fazla flokülasyon ve daha fazla sürtünme meydana gelecektir. Daha yüksek bir sürtünme, parçacıkların deplasmanını diğerine bağlı olarak engelleyecek ve yüksek boşluk oranına sahip bir yapı oluşturacaktır (Olson ve Mesri 1970).

15- Kaolinit üzerinde yapılan sıkışma deney sonuçları her bir gerilme kademesi için incelendiğinde; ön konsolide edilerek hazırlanan numuneler içerisinde en büyük boşluk oranının saf su için hazırlanan numunelerde olduğu, artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile başlangıç boşluk oranlarının da azaldığı görülmektedir. 400 kPa gerilme kademesi için boşluk oranlarında belirgin bir azalma olmakla birlikte elde edilen eğriler hemen hemen 200 kPa gerilme kademesinde elde edilen değerlerle paralellik göstermektedir. Bu durum kimyasal sıvıların varlığında 200 kPa'a kadar boşluk oranı değişimi ve dolayısıyla sıkışabilirlilik üzerinde fiziko-kimyasal kuvvetlerin varlığının etkili olduğu fakat bu gerilme kademesinden sonra ise aslında boşluk sıvısı

özelliklerinin kaolinitin sıkışabilirliliği üzerinde etkili olmadığını göstermektedir. Bu gerilme kademesinden sonra sıkışabilirlilik üzerinde mekaniksel kuvvetler etkili olmaya başlamaktadır. Daha önce Chen ve ark. (2000) tarafından kaolinit üzerinde 9 adet farklı boşluk sıvısı varlığında yapılan konsolidasyon deney sonuçlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda; üst tabaka basıncındaki artma ile fiziko-kimyasal etkilerin azaldığını, 300 kPa üst tabaka basıncı üzerinde boşluk sıvısı özelliklerinin kaolinitin sıkışabilirliliği üzerinde etkili olmadığını söylemişlerdir. Nagaraj (2002), kaolinit-organik sıvı sistemleri için üst ek gerilmelerin artışı ile konsolidasyon deneyinde temel olarak boşluk boyutlarında bir azalma veya zemin kümecikleri arasındaki mesafelerde bir azalmanın meydana geleceğini ve bu durumda organik sıvıların parçacıkların düzenlenmesinde çok küçük bir değişikliğe neden olacağını söylemiştir. Mohammad ve Shahaboddin (2008), kaolinit-vermikülit ağırlıklı Boin Zahra kili üzerinde etilen glikol ile 5 ayrı düşey gerilme altında yaptıkları osmotik konsolidasyon deneylerinde; 75 kPa basınç gerilmesi için osmotik konsolidasyon dolayısıyla meydana gelen boşluk oranı değişimi %18 iken, 150, 300, 600 ve 1200 kPa için meydana gelen boşluk oranı değişimlerini sırasıyla %16, 14, 2 ve %2 bulmuşlardır. Araştırmacılar 600 kPa basınç kademesine kadar kil tanecikleri arasındaki boşluk sıvısının özelliklerinden kaynaklanan fiziko-kimyasal faktörlerin etkili olduğunu, daha sonra ise mekaniksel faktörlerin etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

16- Asetik asitin boşluk oranının saf sudakinden bile küçük bir değere sahip olması asetik asitin kaolinitin yapısında meydana getirdiği jelleşme dolayısıyla ön konsolide sırasında sıvıların filtre edilememesi ve başlangıç boşluk oranını meydana getiren hacmin büyük kısmının sıvılardan ibaret olması dolayısıyladır. Bu sebepten dolayı özellikle yüksek gerilmeler altında (200 ve 400 kPa) asetik asitin değişik konsantrasyonları içinde sıvı çıkışı fazla olmakta ve sonuç boşluk oranı değerleri düşük çıkmaktadır.

Aksaray kili üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Kullanılan kimyasalların tüm konsantrasyonları için numune alınabilmiş ve

konsolidasyon deneyleri yapılabilmiştir.

2- Artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri aşırı düşmektedir. Methanol, ethanol ve izo-propil alkol için bulunan normalize edilmiş sıkışma indisi değerleri saf suda elde edilen değerlerin 1/3'üne kadar düşmektedir. Genel olarak methanol, ethanol ve izo-propil alkoldeki değişimler birbirine paralellik göstermekte iken asetik asit için bulunan değerler farklılık göstermektedir. Asetik asitte özellikle %40 konsantrasyonla birlikte davranışta bir farklılık meydana gelmekte, %60 ve %80 konsantrasyonlar için elde edilen sıkışma indisi değerleri asetik asitin %40 konsantrasyonu için elde edilen sıkışma indisi değerinden büyük olmaktadır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir;

Özellikle %40 konsantrasyondan sonra, Aksaray kilinin davranışı üzerinde etkili olan diffüz çift tabaka kuvvetinin yanı sıra kil içerisinde %24 oranında bulunan kalsit ve %30 oranında bulunan dolomit mineralleri de davranış üzerinde etkili olmaktadır. Asetik asitin bu minerallerle olan reaksiyonları davranışa hakim olmaya başlamaktadır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi karışım sıvısı olarak asetik asitin farklı konsantrasyonları kullanıldığı zaman kimyasal formülü $CaCO_3$ olan kalsit ve kimyasal formülü $CaMgCO_3$ olan dolomit ile asetik asit reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyonlarda kalsiyum asetat ve magnezyum asetatın yanı sıra bir CO_2 gazı çıkışı ve H_2O çıkışı olmaktadır. Aynı zamanda reaksiyonlar sonucu karışımın sıcaklığı yükselmekte ve bundan dolayı da ekstra bir buharlaşma meydana gelmekte ve su çıkışı olmaktadır. Hem reaksiyonlar sonucu mineral bünyesinden kaybedilen su hem de ısınma sonrası kaybedilen su ön konsolidasyon sonucu elde edilen ve konsolidasyon deneyine tabii tutulacak numunelerin su muhtevasını aşırı bir şekilde düşürmektedir. Yapılan deneylerde konsolidasyon için alınan numunelerin başlangıç su muhtevalarının diğer kimyasalların aynı konsantrasyonları için yapılacak konsolidasyon deneyleri için alınan numunelerin başlangıç su muhtevalarının 2/3'ü olduğu bulunmuştur. Aynı zamanda elde edilen numuneler diğer kimyasallarla hazırlanan numunelere göre daha belirgin bir şekilde silt-ince kum formuna daha yakındır. Bu durumda konsolidasyon deneyinin doğası

gereği ring içerisine yerleştirilip karışım sıvısı içerisinde doygun hale getirilen konsolidasyon numunesi gözeneklerinin içerisine daha fazla sıvı girişi olmaktadır. Silt-ince kum formuna yakın yapısıyla adeta bir lös zemini andıran numuneler tekrar sıvı ile karşılaştığı zaman uygulanan düşey yükler etkisi altında bir çökme özelliği göstermektedir. Bu durumda hem elde edilen toplam sıkışma miktarında hem de elde edilen sıkışma indisi değerlerinde bir artış olmakta ve diğer kimyasallar için elde edilen değerlerden daha büyük değerler elde edilmektedir. Buna mukabil elde edilen sıkışma indisi değerleri yine de su için elde edilen değerlerden düşük olmaktadır. Uppot ve Stephenson (1989), magnezyum montmorillonit üzerinde yaptıkları deneylerde, kildeki kalsiyum karbonat ile asetik asit arasındaki reaksiyon sonucu bir kütle kaybının oluştuğu, oluşan bu kütle kaybından dolayı zeminde porözlü yapının kısmen çöktüğünü söylemişlerdir. Deney sonu yaptıkları incelemelerde taneler arasında bir toplulaşmanın olduğunu görmüşlerdir. Magnezyum montmorillonitteki bu değişim, yüksek katyon değiştirme kapasitesine ve çift tabakadaki (double layer) azalmanın fazlalığına bağlanmıştır.

3- Artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte normalize edilmiş şişme indisi değerleri de çok aşırı bir şekilde azalmaktadır. %80 asetik asit ve methanol konsantrasyonu için şişme indisi değerleri saf su için elde edilen değerin yaklaşık 1/3'ü olmaktadır.

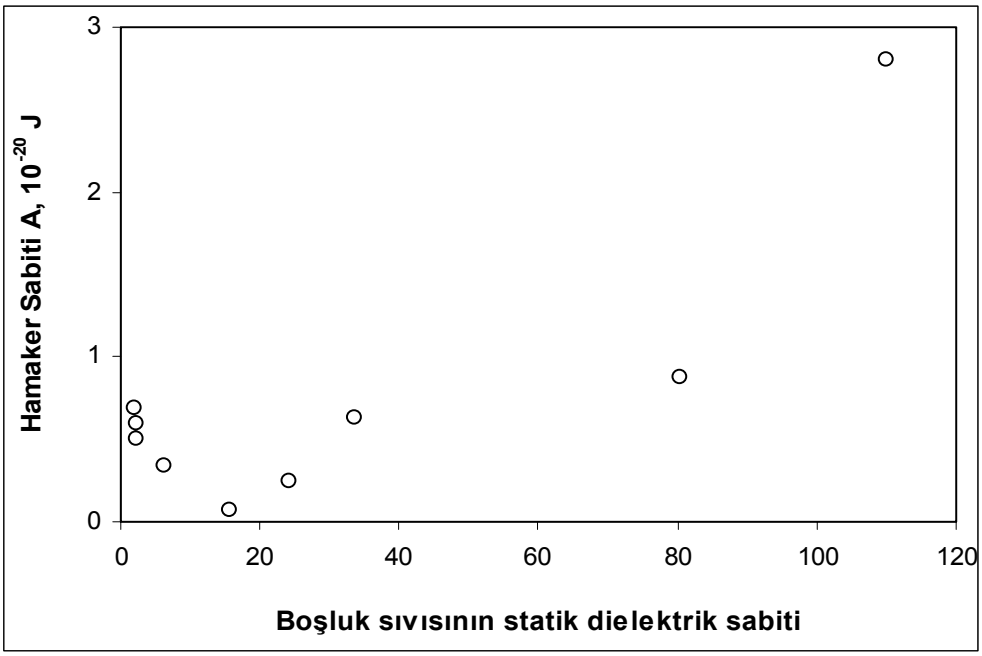
4- Kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabitine bağlı olarak sıkışma indisi değerleri azalmaktadır. Yalnız methanolün dielektrik sabiti (ε=33,6) ethanolden (ε=24,3) büyük olduğu halde elde edilen sıkışma indisi değerleri daha küçük olmaktadır. Asetik asitin dielektrik sabiti en düşük olmasına rağmen elde edilen sıkışma indisi değerleri diğer kimyasallara göre daha büyük değerler almaktadır. Asetik asitin %80 konsantrasyonu için normalize edilmiş sıkışma indisi değeri Cc=0,78 olmaktadır ki bu değer diğer kimyasallara göre belirgin bir şekilde yüksektir ve dielektrik sabiti değişimi ile sıkışma indisinin azaldığı ifadesine tamamen zıt bir durum ortaya çıkmaktadır.

5- Kimyasalların azalan dielektrik sabiti ile birlikte şişme indisi değerlerinde

çok belirgin bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş %40 konsantrasyon ve üzerinde daha belirgin olmaktadır. Burada farklılık gösteren durum methanol kimyasal sıvısının farklı konsantrasyonları içindir. Aksaray kili içerisinde bulunan sepiyolitin varlığından dolayı methanol kimyasal sıvısı küçük molekül yapısı ile tanecikler arasına daha iyi nüfuz edebilmektedir. Bundan dolayı tanecikler arasında daha fazla flokülasyon ve büzülmeye neden olmaktadır. Bu yüzden methanol için elde edilen şişme indisi değerleri de ethanol ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerden daha küçük olmaktadır. Kimyasalların %80 konsantrasyonu için elde edilen şişme indisi değerleri ortalama olarak saf su için elde edilen şişme indisi değerlerinin 1/3'ü civarında olmaktadır. Asetik asit varlığında ise silt-ince kum formuna dönüşüm daha belirgin olduğu için sıkışma indisinin tersine, şişme indisi değerleri diğer kimyasallar için elde edilen değerlerden daha küçük çıkmaktadır.

Aksaray kilinde meydana gelen sıkışma olayı, kil içerisindeki yüksek montmorillonit içeriğinden dolayı tanecikler arasındaki çekme kuvvetleri değişiminden ziyade itme kuvvetlerinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Montmorillonit te diğer kil minerallerine göre daha büyük olan diffüz çift tabaka kalınlığı, ortamın boşluk sıvısının dielektrik sabitinin düşmesi ile azalmaktadır. Bunun sonucunda ise tanecikler arasındaki diffüz çift tabaka itme kuvvetleri de azalmaktadır. Dielektrik sabitinin azalması ile çekme kuvvetlerinde de azalma meydana gelmektedir, fakat itme kuvvetlerindeki azalma, çekme kuvvetlerindeki azalmadan daha büyüktür. Bu yüzden iki kil taneciği arasında net bir çekme kuvveti oluşmaktadır. Bu da kil parçacıklarının birbirlerine daha da yaklaşmasına ve zemin yığınlarının büzülmesine (=topaklanma) neden olmaktadır. Topaklanma derecesi ve oluşan yığın grupları boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla beraber artmaktadır. Büzülen bu parçalar bir küme formunda şekillenmekte ve silt-ince kum gibi davranmaya başlamaktadırlar. Böylece oluşan zemin yığınları arasında meydana gelen akım alanı ve boşluk büyüklüğü çapları artmakta, taneciklerin arasındaki sıvı daha rahat drene olabilmekte yani permeabilite değerleri artmaktadır. Bunun sonucunda ise numunelerin kimyasal sıvılar

varlığında ön konsolidasyonu sırasında zemin tanecikleri arasından sıvı çıkışı artmakta ve numuneler daha az boşluk oranına sahip olmaktadırlar. Sonuçta ise daha küçük sıkışma indisi değerleri elde edilmektedir. Daha önce Bolt (1956) tarafından bentonit üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde bentonitin davranışının çift tabaka teorisine uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Sridharan ve ark. (1991), montmorillonitik killer üzerinde yaptıkları konsolidasyon deneyleri sonuçlarının çift tabaka teorisi ile uyumlu olduğunu söylemişlerdir. Şekil 6.8.'de montmorillonitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitlerine bağlı olarak içsel enerji değişimini gösteren grafik incelendiğinde verilen bütün kimyasal sıvılar için montmorillonitte hakim enerji çeşidinin itme enerjisi olduğu görülmektedir. Hamaker sabiti ile orantılı olarak değişen Van der Walls çekme kuvveti enerjisi çok küçük değerler alıp montmorillonitin davranışı üzerinde hemen hemen etkisi yok gibidir. Kil tanecikleri arasındaki 9 adet farklı boşluk sıvısı için montmorillonit tipi bir kilde Hamaker sabitinin değişimi Şekil 6.11.'de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi elde edilen Hamaker sabitleri daha önce kaolinit için verilen değerlere (Şekil 6.9.) göre çok küçüktür.

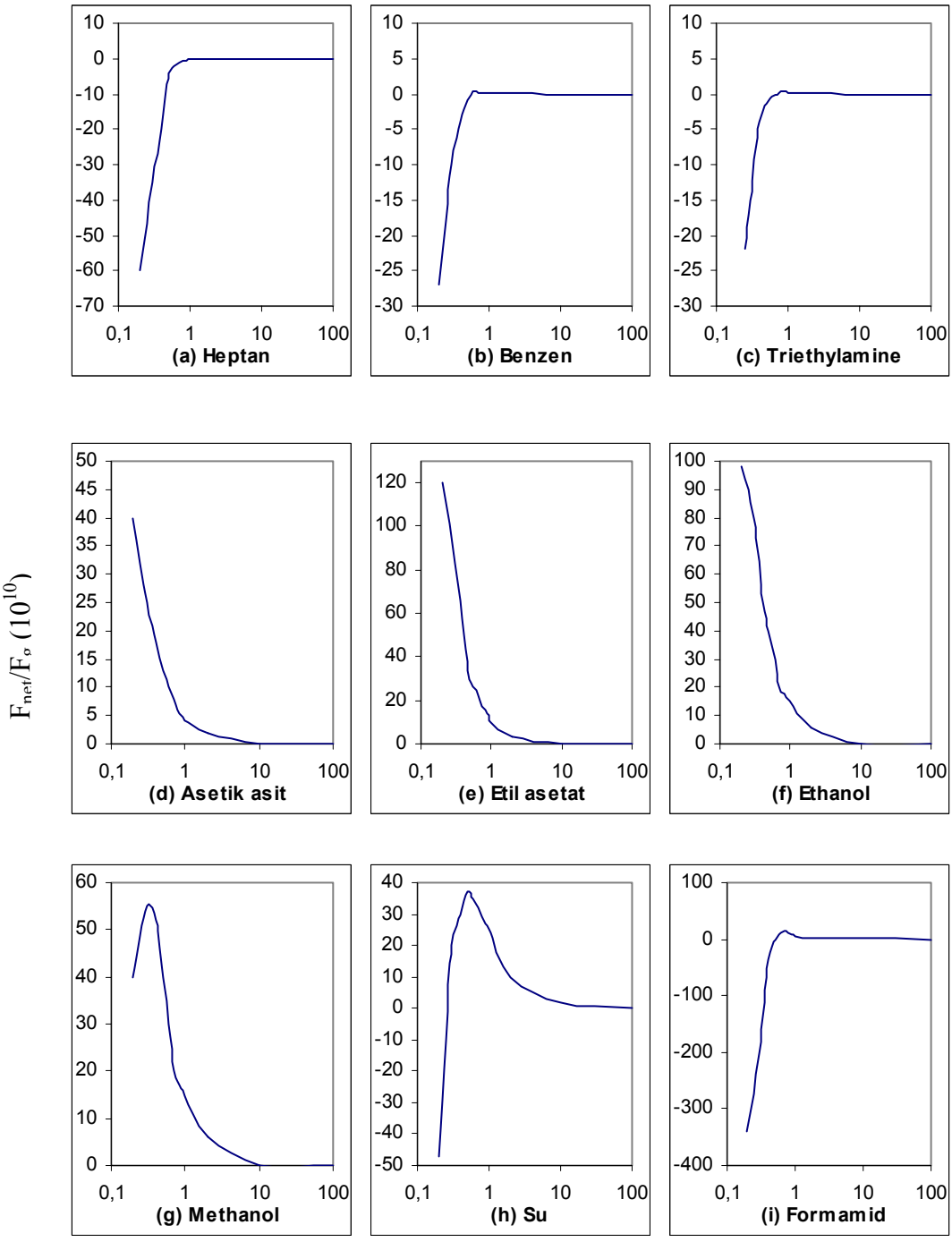


Şekil 6.11. Farklı kimyasal sıvılar bulunması durumunda montmorillonit için Hamaker sabiti (A) değişimi

6- Benzer şekilde montmorillonit kilinde kuvvet bariyerleri üzerinde boşluk sıvılarının değişiminin etkisini gösteren Şekil 6.12. incelendiğinde dielektrik sabiti suyunkinden küçük olan bütün polar sıvılarda davranışa hakim olan kuvvetlerin itme kuvvetleri olduğu azalan dielektrik sabiti ile bu etkinin daha fazla arttığı görülmektedir. Yalnız asetik asit için elde edilen değerlerde itme kuvveti bariyerlerinin dielektrik sabitindeki azalma ile beraber arttığı tezine ters bir durum ortaya çıkmaktadır. Asetik asit için bulunan değerler dielektrik sabiti daha büyük olan sıvılar için elde edilen değerlerden küçük çıkmaktadır. Montmorillonit içerikli Aksaray kili üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen sıkışma ve şişme indisi parametrelerinin genel olarak tanecikler arasındaki itme kuvvetleri değişimi ile paralellik gösterdiği görülmektedir.

7- Yüksek aktiviteli zeminler büyük yüzey yük yoğunlukları olan bir kil içeriğine sahip olduklarından, yüzey yük yoğunluğu değişimi ve boşluk sıvılarının özelliklerindeki değişmelerden aşırı derece etkilenirler (Mitchell 1976). Deneylerde kullanılan Aksaray kili de içerisindeki montmorillonit içeriğinden dolayı yüksek aktiviteli olup büyük bir yüzey yoğunluğuna sahiptir ve boşluk sıvısının dielektrik sabiti değişimlerinden etkilenmektedir. Yüzey yük yoğunluğu ve boşluk sıvısının dielektrik sabiti arasında bir doğru orantı vardır. Dielektrik sabitinin azalmasıyla yüzey yük yoğunluğu sıfıra doğru yaklaşmakta ve zemin flokülasyona açık hale gelmektedir.

8- Methanolün dielektrik sabiti (ε=33,6) ethanol ve izo-propil alkolünkinden büyük olmasına rağmen elde edilen sıkışma indisi değerleri ethanol için elde edilenlerden küçük ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerle hemen hemen aynı olmaktadır. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan sepiyolit minerallerinden kaynaklanmaktadır. Sepiyolitin uzun ve lifsi yapısı sayesinde diğer kimyasallara göre daha kısa zincirli olan methanol molekülleri sepiyolit mineralleri içerisine rahat bir şekilde nüfuz edebilmektedir. Bu durumda kil taneciklerinin sahip olduğu diffüz çift tabaka daha fazla çökmekte, diffüz çift tabaka kalınlığı ve dolayısıyla çift tabaka itme kuvvetleri azalmaktadır. Sonuçta tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmakta ve tanecikler daha fazla flokülasyona uğramaktadır. Taneciklerin flokülasyonundaki bu artış ile



Şekil 6.12. Montmorillonitte boşluk sıvılarının dielektrik sabitinin kuvvet bariyeri üzerindeki etkileri (Chen 1996)

aşırı konsolide olmuş kil davranışına ve silt-ince kum formuna daha fazla yaklaşan numunelerin, permeabilite değerleri de artmaktadır. Böylelikle numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde, methanolün değişik konsantrasyonları için daha düşük sıkışma indisi değerleri elde edilmektedir. Sepiyolit ile methanol arasındaki aynı mekanizmadan dolayı methanol varlığında şişme indisi değerleri de ethanol ve izo-propil alkol için elde edilen değerlerden daha küçük çıkmaktadır.

9- Tüm kimyasal sıvıların %20 konsantrasyonları için Aksaray kilinde meydana gelen boşluk oranı değişimleri saf su için elde edilen değerlerdekine yakın olmaktadır. Kimyasalların artan konsantrasyonu ile birlikte boşluk oranı değişimleri azalmaktadır. Saf su için boşluk oranında meydana gelen toplam değişim methanolün %80 konsantrasyonunda oluşan toplam boşluk oranı değişiminin 2,55 katı, ethanoldekinin 2,25 katı, izo-propil alkoldekinin 3,32 katıdır. Bu durum şu şekilde de izah edilebilir; kimyasal sıvıların varlığında aşırı konsolide olmuş kil gibi davranan veya silt-ince kum formuna doğru yönlenen kil zeminlerde tanecikler arasında daha yüksek bir sürtünme direnci meydana gelecek ve bu sürtünme direnci taneciklerin deplasmanını engelleyecektir (Olson ve Mesri 1970). Bu nedenle de zemin daha büyük bir boşluk oranında daha yüksek üst tabaka gerilmelerine karşı koymak üzere yerleşecektir. Saf su varlığında tanecikler arasında böyle bir sürtünme teşkil edemeyeceği için yüksek gerilmeler altında oluşan boşluk oranı değişimi fazla olmakta ve sonuç boşluk oranı değeri de düşük olmaktadır.

10- Her bir kimyasalın boşluk oranlarında meydana gelen toplam değişimler daha önce elde edilen sıkışma indisi parametreleriyle paralellik göstermektedir. Sıkışma indisi değerleri için meydana gelen değişimlerde boşluk oranlarında meydana gelen bu değişimlere atfedilebilir.

11- Asetik asit varlığında diğer kimyasallardakinin tersine bir durum söz konusudur. Artan asetik asit konsantrasyonuyla birlikte başlangıç boşluk oranı değeri de artmaktadır. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile reaksiyonu sonucu su muhtevası düşük, porözlü bir yapıya sahip ve silt-ince kum formuna yakın bir yapının oluşmasından

kaynaklanmaktadır. Numuneler suya doygun hale getirilirken bu porözlü yapı sıvı ile dolmakta ve böylece başlangıç boşluk oranları da kısmen saf suyunkinden fazla olmaktadır. %20 ve %40 asetik asit konsantrasyonu için meydana gelen toplam boşluk oranı değişimleri saf sudaki ile birbirine yakınken, %60 ve %80 konsantrasyon için meydana gelen toplam boşluk oranları değişimi saf suyunkine göre %15 civarında az olmaktadır.

12- Aksaray kilinde de kaolinitteki gibi 400 kPa gerilme kademesi ile 200 kPa gerilme kademesi için saf su ve diğer kimyasallar için elde edilen boşluk oranı değerleri birbirine çok yakındır. Bu da 200 kPa gerilme kademesine kadar zeminin konsolidasyonu üzerinde fiziko-kimyasal kuvvetler ve zeminin kendi mineral yapısından kaynaklanan birtakım başka kimyasal olaylar etkiliyken, özellikle bu gerilme kademesinden sonra killerin sıkışma özellikleri üzerinde mekaniksel faktörlerin etkin olduğunu göstermektedir.

6.7. Optik Mikroskop Fotoğraf Görüntüleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Killi zeminlerin boşluk suyu organik sıvılarla yer değiştirdiği zaman killi zeminlerin mühendislik özellikleri anlamlı miktarda değişmekte ve silt-ince kum davranışına yakın bir davranış göstermektedir. Mühendislik özelliklerindeki bu değişimler parçacıklar arasındaki itme ve çekme kuvvetlerindeki azalma nedeniyle parçacıkların topaklanması temeline dayanmaktadır (Kaya ve Fang 2005). Deneylerde kullanılan kaolinit ve Aksaray kilinde bu fiziko-kimyasal kuvvetlerin etkisi ile parçacıkların flokülasyonunun deneysel ispatını göstermek amacıyla bir optik mikroskop kullanılarak elde edilen fotoğraf sonuçları göstermektedir ki zeminin boşluk sıvısı kimyasal sıvılarla yer değiştirdiği zaman zemin parçacıkları topaklanmakta ve kümelenmiş bir yapı oluşturmaktadır. Killerde ki flokülasyonun derecesi ve kümelenme biçiminin boyutu kil minerallerinin cinsi ve organik sıvının karakteristiklerine bağlıdır.

Kaolinit üzerinde optik mikroskopla alınan fotoğraf görüntülerinin sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Saf su varlığında kaolinit tanecikleri tek tek küçük parçacıklar halinde dağınık vaziyette olup tanecikler arasında görülebilir bir etkileşim yoktur.
2- Methanolün %20 ve %40 konsantrasyonlarında tanecikler birbirine yaklaşma eğilimindedir, kümelenme belirtileri ancak %60 konsantrasyonda görülebilmektedir. Flokülasyon sonucunda oluşan topaklanmış yapı ancak %80 konsantrasyonda net olarak gözükebilmektedir.
3- Ethanol için elde edilen görüntülerde methanoldekine benzer eğilimde olup, %80 konsantrasyonda kristalize olmuş bir görünümdeki küçük kümeciklerin kendi içerisinde birleşme eğiliminde olduğu görülmektedir.
4- İzo-propil alkolün %20 konsantrasyonu için elde edilen fotoğraf görüntülerinde parçacıkların kümelenme eğilimi içerisine girdiği ethanol ve methanole göre daha net bir şekilde görülmektedir. İzo-propil alkolün artan konsantrasyonu ile birlikte kümelenme olayı açık olarak ortaya çıkmakta ve %80 konsantrasyonda adeta ince kum parçacıklarını andıran topaklanmış yapı net olarak gözükmektedir.
5- Asetik asit için de diğer sıvılardakine benzer bir davranış eğilimi söz konusu olup jelleşmeden dolayı elde edilen görüntüler biraz daha bulanıktır.

Aksaray kili üzerinde optik mikroskopla alınan fotoğraf görüntülerinin sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

1- Aksaray kilinde de kaolinitte olduğu gibi saf su varlığında tanecikler dağınık vaziyette olup tanecikler arasında görülebilir bir etkileşim yoktur. Fakat elde edilen görüntüler biraz daha net olmuştur.
2- %20 methanol konsantrasyonunda taneciklerin kümelenmek için bir eğilime girdiği ve artan methanol konsantrasyonu ile kümelenmenin arttığı ve özellikle %60 - %80 konsantrasyonda bunun çok net olarak ortaya çıktığı görülmektedir.
3- Ethanol varlığında methanole göre daha az bir kümelenmenin olduğu ve özellikle %80 konsantrasyonda bu olayın daha belirgin olduğu görülmektedir.
4- Asetik asit varlığında tanecikler diğer kimyasallara göre daha fazla flokülasyona uğramakta, %40 konsantrasyonda bile kümelenme çok açık bir şekilde gözlenmektedir. %80 konsantrasyonda ise taneciklerin bir top şeklinde ve çok sıkı olarak kenetlendiği görülmektedir.

Kaolinit ve Aksaray kili üzerinde alınan görüntüler birlikte değerlendirilirse sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1- Her iki kilde de genel olarak boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla kümelenme ve flokülasyon olayı daha net görülmektedir.
2- Her iki kilde de izo-propil alkol için elde edilen görüntüler diğer kimyasalların varlığındakinden daha net ve şeffaftır.
3- Her iki kil türü için elde edilen görüntülerden içerisinde montmorillonitik minerallerinin ağırlıkta bulunduğu Aksaray kilinde meydana gelen kümelenme ve flokülasyonun kaolinittekine oranla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin Aksaray kilinde %80 asetik asit konsantrasyonunda top şeklinde ve tamamen yumaklanmış bir yapı elde edilirken, kaolinitte kümelenmiş ama daha bulanık ve hala kümelenme eğiliminde olan parçacıkların bulunduğu anlaşılmaktadır. Diğer kimyasallar için de hemen hemen benzer durum mevcut olup, bu mineral – kimyasal sıvı etkileşimi üzerinde mineral tipinin önemli olduğunu göstermektedir. Kaolinit ve montmorillonit minerallerinin flokülasyonu üzerine çalışıldığı zaman, elektriksel kuvvetlerdeki azalma nedeniyle aynı akışkan içerisindeki kaolinit partiküllerinin montmorillonit partiküllerinden daha küçük kümelendiği ve daha az flokülasyonun olduğu görülmektedir. Buna göre çekme kuvvetlerindeki net artış montmorillonit tipi minerallerde kaolinit tipi minerallerdekinden daha fazladır.
4- Her iki kilde de fotoğraf görüntülerinden bulunan flokülasyon derecesi ve oluşan kümelerin büyüklükleri daha önceki bölümlerde elde edilen kayma mukavemeti değerlerindeki sonuçlarla paralellik göstermektedir. Örneğin Aksaray kilinde methanol varlığında bulunan kayma mukavemeti değerleri ethanoldekinden büyükken, elde edilen optik mikroskop görüntülerinde de methanoldeki kümelenme ve flokülasyonun ethanoldekinden daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum Aksaray kili içerisindeki sepiyolit varlığından kaynaklanmaktadır. Buradan hareketle; killerde kimyasal sıvılar varlığında taneciklerin flokülasyon ve kümelenme derecesindeki değişimlerin

killerin kayma mukavemeti davranışları hakkında bir ön fikir elde edilmesi açısından önemli olduğu söylenebilir.

5- Her iki kil için elde edilen fotoğraf görüntülerinden boşluk sıvısı olarak su ile kimyasal sıvılar yer değiştirdiği zaman kohezyonlu zeminlerin yapışkanlığını (=kohezyon) kaybettiği ve kohezyonsuz gibi davrandığı görülmektedir. Böylelikle zemin taneleri adeta bir silt-ince kum formuna yaklaşarak davranışları da bu yönde değişme eğiliminde olmaktadır. Daha önceki bölümlerde yapılan kayma mukavemeti parametreleri ve konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar bu değişimin olduğunu açıkça göstermektedir. Kimyasal sıvıların varlığında yapılan üç eksenli ve kesme kutusu deneylerinde içsel sürtünme açısı değerlerinde meydana gelen artışlar, konsolidasyon deneyi sonrası elde edilen sıkışma indisi değerlerinde meydana gelen düşüşler bu değişimle ifade edilebilir. Böylelikle; optik mikroskopla elde edilen görüntüler deneylerde elde edilen sonuçları adeta doğrulamaktadır.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Zeminler genel olarak katı tanecikler ve boşluk sıvılarından meydana gelmektedirler. Zeminlerin davranışında genel olarak zemin taneciklerinden kaynaklanan mekaniksel faktörler üzerinde çalışmalar yürütülmekte, boşluk sıvısı özelliklerinin zeminlerin davranışları üzerinde meydana getirdiği değişiklikler genelde ihmal edilmektedir. Fakat gelişen teknolojik koşullar altında özellikle endüstriyel alanlarda, katı atık dolgularında kullanılan geçirimsizlik şiltelerinde ve istenmeyen birtakım kimyasal sızıntıların oluştuğu alanlarda zeminler organik kimyasal sıvıların etkisi altında kalmaktadırlar. Bu tür durumlarda ise özellikle kil zeminlerde zeminin davranışı üzerinde mekaniksel faktörlerin yanı sıra en az onun kadar boşluk sıvısının özellikleri ve kil mineralleri ile etkileşimi de önemli rol oynamaktadır. Bu sıvılar ile etkileşime geçen kil zeminler yeniden şekillenmekte ve yeni bir yapı kazanmaktadır. Ayrıca artan nüfus ve şehirleşme oranına bağlı olarak daha önce kimyasal sıvılar etkisinde kalarak kirlenmiş alanların kullanıma açılması veya da bu alanlardan çıkarılan malzemelerin dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması önem kazanmaktadır. Belirtilen bu amaçlar doğrultusunda kimyasal sıvıların varlığında özellikle kil zeminlerin mukavemet ve sıkışma davranışlarında meydana gelen değişimin araştırılması maksadıyla bir deneysel çalışma yürütülmüştür.

Deneysel çalışmada doğada karşılaşılması mümkün olan ve davranışları birbirine göre uç olan kil türlerini temsil etmesi açısından kaolinit ve montmorillonit ağırlıklı iki kil türü kullanılmıştır. Kimyasal sıvılar ise boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabiti değişiminin geniş bir aralığını temsil etmesi maksadıyla farklı dielektrik sabitine sahip olacak şekilde seçilmiştir. Literatürde daha çok saf kimyasal sıvılarla çalışılmıştır. Bu çalışmada ise herhangi bir kirlenme esnasında suyla karışan bir kimyasalın değişik konsantrasyonlarını temsil etmesi için çalışmalar kimyasal sıvıların %20, %40, %60 ve %80 konsantrasyonları için yürütülmüştür.

Deneysel çalışmaların sonuçları yorumlanırken genellikle kil tanecikleri arasında fiziko-kimyasal faktörler olan Van der Walls çekme kuvvetleri ve diffüz çift tabaka itme kuvvetleri dikkate alınmıştır. Değişen boşluk sıvısı ile kil tanecikleri

arasında oluşan bu kuvvetler değişmekte ve buna bağlı olarak kilin yapısı ve davranışında da farklılıklar meydana gelmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar daha önceki çalışmalarda bu fiziko-kimyasal kuvvetlerin değişimine bağlı olarak bulunan sonuçlarla karşılaştırma yapılarak yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalara göre bulunan genel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Killer üzerinde yapılan Atterberg limiti deneyleri killerin davranışları hakkında bir ön fikir vermesi açısından önemlidir. Genel olarak deneysel çalışmada bulunan likit limit deney sonuçları mukavemet ve sıkışma deney sonuçları ile uyumludur.

Kaolinit üzerinde yapılan likit limit deneylerinde düşen koni penetrasyon yöntemi ile elde edilen değerler Casagrande yöntemiyle elde edilen değerlerden büyük çıkmış olup, düşük plastisiteli killer için bu sonuçlar literatür çalışmalarıyla uyumludur. Kaolinitte genel olarak %60 konsantrasyona kadar likit limit değerlerinde bir artış daha sonra ise hafif azalma gözlenmekle beraber, elde edilen değerler saf su için bulunan değerlerden büyüktür ve sonuçlar literatür çalışmalarıyla örtüşmektedir. Kaolinitte asetik asit varlığında likit limit değeri daha fazla artış göstermiş olup bu asetik asitin etkisiyle kaolinitin yapısında meydana gelen jelleşmenin etkisiyledir. Kaolinit, katyon değiştirme kapasitesinin düşük olması, diffüz çift tabaka kalınlığının boyutuna göre küçük olması ve güçlü hidrojen bağları taşımasından dolayı dış etkilerden çok aşırı etkilenmemektedir. Saf su için CL (düşük plastisiteli kil) grubuna giren kaolinit, artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte ML, CH ve MH grubuna girme yönünde bir eğilim içerisindedir.

Aksaray kili üzerinde yapılan likit limit deneylerinde %60 konsantrasyona kadar Casagrande yöntemiyle elde edilen değerler büyükken bu konsantrasyondan sonra düşen koni penetrasyon yöntemiyle bulunan değerler daha büyük olmaktadır. Bu durum içerisinde montmorillonitik ağırlığı fazla olan kilin artan kimyasal sıvı konsantrasyonu likit limit değerinin aşırı düşmesi ve düşük plastisiteli kil davranışına yaklaşması dolayısıyladır. Aksaray kili, bünyesindeki montmorillonit minerallerinden dolayı büyük diffüz çift tabaka kalınlığına sahiptir. Kimyasal sıvıların azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonu ile birlikte kil etrafındaki bu diffüz çift tabakalar çökmekte ve kil mineralleri çevrelerinde daha az sıvı tutmaktadır. Bundan dolayı da boşluklarda tutulan sıvı miktarı ve dolayısıyla likit

limit değerleri aşırı şekilde düşmektedir. Kimyasalların özellikle %60 konsantrasyonlarından sonra kilde meydana gelen aşırı flokülasyon nedeniyle kil adeta silt-ince kum yapısına yaklaşmıştır ve plastik limit deneyleri güçlükle yapılabilmiştir. Methanol varlığında ethanoldekinden daha düşük ve izo-propil alkoldekine yakın likit limit değerlerinin elde edilmesi kil içerisinde bulunan sepiyolit mineralleri içerisine methanolün daha rahat girebilmesi ve kilin bu yolla daha fazla flokülasyona uğraması sebebiyledir. Likit limit deneyleri esnasında asetik asit için kilde meydana gelen flokülasyon daha belirgin olmaktadır. Bu durum hem asetik asitin düşük dielektrik sabiti hem de kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile olan reaksiyonlarına bağlı olarak açıklanabilir.

Saf su için yapılan deneylerde CH (yüksek plastisiteli kil) grubuna giren Aksaray kili, artan kimyasal sıvı konsantrasyonları ile birlikte genel olarak MH (Yüksek plastisiteli silt) ve hatta ML (düşük plastisiteli silt) grubuna girebilmektedir. Kaolinitin likit limit davranışı üzerinde kimyasal sıvılar sınırlı etkiye sahipken, diffüz çift tabaka kalınlığının fazla olmasından dolayı Aksaray kilinin davranışı üzerinde kimyasal sıvıların etkisi çok daha belirgin olmaktadır.

Killerin kayma mukavemeti davranışını belirlemek üzere yapılan farklı deney yöntemlerinin hepsinde elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup toplu şekilde değerlendirilebilir.

Kaolinitte tüm kimyasal sıvılar için azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonla birlikte mukavemet değerlerinde bir artış olmaktadır. Bu artışlar boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla birlikte tanecikler arasındaki Van der Walls çekim kuvvetlerinin artması ve çekim kuvvetlerinin artması ile birlikte taneciklerin birbirine daha iyi kenetlenerek floküle olmalarından kaynaklanmaktadır. Flokülasyona uğrayan bu tanecikler aşırı konsolide olmuş kil gibi davranmaya başlamakta ve uygulanan dış kuvvetlere karşı daha mukavim bir davranış göstermektedir. Kaolinitin diffüz çift tabaka kalınlığı boyutuna göre küçük olduğu için Aksaray kiline göre dış etkilerden daha az etkilenmekte ve özellikle diffüz çift tabaka kuvvetlerinde meydana gelen değişimler kaolinitin davranışı üzerinde çok fazla etkili olmaktadır.

Kimyasal sıvıların dielektrik sabitlerindeki azalmayla birlikte çok aşırı olmamakla birlikte kaolinitin kohezyon değerleri artmaktadır, fakat kaolinitte

kimyasal sıvılar varlığında mukavemette meydana gelen artışlar daha ziyade içsel sürtünme açısında meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır. Kimyasal sıvıların etkisi ile silt-ince kum yapısına dönüşme yönünde bir eğilime giren kaolinite dışardan bir kuvvet uygulandığı zaman tanecikler arasında meydana gelen mekaniksel kontaktlar artmakta ve tanecikler yer değiştirmeye zorlandığı zaman aralarında temastan dolayı oluşacak sürtünme direnci artmaktadır. Sürtünme direncindeki bu artış ise kayma mukavemetinin içsel sürtünme açısı parametresindeki artışla ifade edilmektedir.

Serbest basınç deneylerinde boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonu ile birlikte kimyasal sıvıların serbest basınç mukavemeti değerleri belirgin oranda artmıştır. Üç eksenli basınç deneylerinde ise numunelerin içsel sürtünme açılarında meydana gelen değişimler kohezyon değerlerinde meydana gelen artışlardan daha belirgin olmuştur. Bu durumda kimyasal sıvıların etkisinde kayma mukavemetinde meydana gelen artış kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısındaki değişime bağlıdır.

Kesme kutusu deneyleri killerden ziyade silt ve kumlarda uygulanan bir deney olmakla beraber kimyasal sıvıların varlığında silt-ince kum davranışına yaklaşan zeminde kesme kutusu deney sonuçlarının doğru sonuçlar vereceği düşünülmüştür ve sonuçlar diğer deneysel yöntemlerdekilerle uyumlu çıkmıştır. Kaolinitte hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısında saf sudakine göre meydana gelen değişimler kesme kutusu deneylerinde üç eksenli basınç deneylerine göre oransal olarak daha fazla ve belirgin olmuştur. Bu durum kesme kutusu deneyinin doğası gereğidir.

Aksaray kili üzerinde yapılan deneylerde boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte mukavemet değerleri belirgin şekilde artmıştır. Kilin bu davranışı içerisinde bulunan montmorillonit minerallerine bağlı olarak açıklanabilir. Diffüz çift tabaka kalınlığı fazla olan montmorillonitte boşluk sıvısının dielektrik sabitinin azalması ile bu tabaka çökmektedir. Bu tabakanın çökmesi ile tanecikler birbirine yaklaşmakta, tanecikler arasındaki diffüz çift tabaka itme kuvvetleri azalmakta ve sonuçta tanecikler arasındaki net çekim kuvveti artmaktadır. Bu durumda tanecikler flokülasyona uğrayarak adeta bir silt-ince kum yapısına yakınlaşmakta ve mukavemet davranışları da bu yönde değişerek,

artmaktadır. Bu durumda kaolinitin tersine Aksaray kilinin davranışını Van der Walls çekim kuvvetinden ziyade diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinin azalması ve sonuçta net çekme kuvvetindeki artış belirlemiş olmaktadır.

Aksaray kili için yapılan deneylerde methanol varlığında elde edilen mukavemet değerlerinin ethanoldekinden büyük ve izo-propil alkol için elde edilen değerlere yakın olması içerisinde %33 oranında bulunan sepiyolitten kaynaklanmaktadır. Methanol kısa zincirleri sayesinde sepiyolitin lifsi yapısı içerisine nüfuz etmekte ve diğer kimyasallara göre daha fazla flokülasyona ve dolayısıyla daha büyük mukavemete sebep olmaktadır. Bu sebeple sepiyolit içerikli zeminlerde methanol gibi kısa zincirli kimyasal sıvılar kullanılarak zeminlerin mukavemetini artırmak ve zeminleri stabilize etmek mümkün olmaktadır.

Aksaray kilinde bir başka farklı durum ise özellikle asetik asitin %40 konsantrasyonuyla birlikte numunelerin adeta çimento veya kireç ile stabilize olmuş gibi davranması ve çok yüksek mukavemet göstermesidir. Örneğin asetik asitin %40 konsantrasyonu için yapılan serbest basınç deneyinde elde edilen mukavemet değeri saf su için bulunan değerin 2,05 katı iken, %60 asetik asit konsantrasyonunda bu oran 6,40 kata çıkmaktadır. Benzer şekilde yapılan kesme kutusu deneylerinde asetik asitin %60 konsantrasyonu için bulunan içsel sürtünme açısı saf su için elde edilen değerin 8,1 katı, %80 konsantrasyonda ise 9,86 katı olmaktadır ve zemin sıkı silt veya siltli kum gibi davranmaktadır. Bu durum Aksaray kili içerisinde bulunan kalsit ve dolomitin asetik asit ile olan reaksiyonları sonucu uzun zincir yapılı ve dıştan gelen etkilere karşı daha dirençli bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Aksaray kilinde asetik asitin mukavemette meydana getirdiği bu aşırı artış ve zemini granüler bir malzeme olma yönünde yapısal değişikliğe uğratması nedeniyle içerisinde kalsit ve dolomit gibi minerallerin bulunduğu bu tür bir zemine asetik asitin özellikle %40 konsantrasyon ve üzerindeki bir oranda ilavesiyle zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği ve asetik asitin adeta çimento veya kireçle stabilizasyondaki rolü üstlendiği ortaya çıkmaktadır.

Aksaray kili üzerinde yapılan deneylerde kohezyonda meydana gelen artışlar hem kesme kutusu hem de üç eksenli basınç deneylerinde birbirine yakın bulunurken, içsel sürtünme açısında meydana gelen değişim kesme kutusu deneyinde daha belirgin olmuştur. Aksaray kilinde de kayma mukavemetinde meydana gelen

değişimler kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısındaki değişikliklerden kaynaklanmakta olup, bu durum daha önce Schmertmann (2001) tarafından ifade edilen; kimyasal sıvıların varlığında rijitlik ve mukavemet artışının kohezyondan ziyade içsel sürtünme açısına bağlı olduğu şeklindeki ifadelerine uymaktadır.

Her iki kilde de genel olarak, özellikle %40 konsantrasyondan sonra mukavemette meydana gelen artışlar belirgin olmuştur. Aksaray kilindeki aşırı flokülasyondan dolayı %80 konsantrasyonlarda deneyler için numune alınamamıştır.

Kaolinit üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonuçlarına göre artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte sıkışma ve şişme indisi değerleri azalmaktadır. Azalma, en az asetik asit varlığında olup, bu durum asetik asitin kaolinitin yapısında meydana getirdiği jelleşmeden kaynaklanmaktadır.

Kaolinitin sıkışma davranışı üzerinde etkili olan unsurlardan en önemlisi parçacıklar arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetlerden olan Van der Walls çekme kuvvetleridir. Kaolinit için elde edilen sıkışma indisi değerlerinin değişimi daha önceki araştırmacılar tarafından verilen Hamaker sabitinin (A) dielektrik sabiti ile değişimini gösteren eğriyle uyum içinde olup bu durum kaolinitin sıkışma davranışının Van der Walls çekme kuvvetleri tarafından belirlendiği tezini doğrulamaktadır.

Kaolinitin büyük parçacık boyutu dolayısıyla etrafında oluşan diffüz çift tabaka kalınlığı küçük olmakta ve sıkışma davranışı üzerinde diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinin etkisi sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Kaolinit üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen en büyük boşluk oranı değişimi saf su için elde edilmiş olup, bu durum bulunan sıkışma indisi değerleriyle uyumludur. Konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı değişim sonuçları göstermektedir ki 200 kPa gerilme kademesine kadar zeminin sıkışma davranışı üzerinde kimyasal sıvılar etkin rol oynarken bu gerilme kademesinden sonra mekaniksel kuvvetler baskın olmaktadır.

Aksaray kili üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonuçlarına göre boşluk sıvısının azalan dielektrik sabiti ve artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte zeminin sıkışma indisi değerleri aşırı şekilde düşmekte ve alkoller için bulunan değerler saf su için bulunan değerlerin ortalama 1/3'ü olmaktadır. Asetik asit varlığında ise bu durum farklılık göstermekte sıkışma indisi değerleri saf su için elde

edilen değerden küçük fakat alkoller için elde edilenlerden büyük çıkmaktadır. Bu durum kil içerisinde bulunan kalsit ve dolomit minerallerinin asetik asit ile olan reaksiyonlarında suyun kullanılması ve bir kısmının da buharlaşması sonucu düşük su muhtevalı bir zeminin oluşması dolayısıyladır. Bu durumda konsolidasyon deneyinden önce numuneler suya doyurulurken bünyelerine daha fazla su almakta ve konsolidasyon deneyinde daha büyük sıkışma indisi değerleri elde edilmektedir. Ayrıca diğer kimyasallardakinden farklı olarak asetik asit varlığında kil, reaksiyonlar sonucunda adata lös yapılı bir zemine dönüşerek sıvı ile temasa geçtiği zaman bir çökme davranışı göstermekte ve sıkışma indisi değeri artmaktadır.

Boşluk sıvılarının azalan dielektrik sabiti ve artan konsantrasyonu ile birlikte şişme indisi değerleri de düşmekte ve %80 konsantrasyonlarda bu oran yaklaşık olarak saf su için elde edilen değerlerin 1/3'ü olmaktadır.

Aksaray kilinde kimyasal sıvıların varlığında sıkışma ve şişme indisi değerlerindeki değişim içerisindeki montmorillonit minerali varlığından kaynaklanmaktadır. Montmorillonit minerali küçük tanecik boyutu ve büyük bir diffüz çift tabakaya sahiptir. Kimyasal sıvıların varlığında montmorillonit mineralleri etrafındaki bu diffüz çift tabaka göçmekte ve çift tabaka itme kuvvetleri de azalmaktadır. Tanecikler arasındaki çekme kuvveti de azalmasına rağmen bu azalma itme kuvvetlerindeki azalmadan küçük olup sonuçta net kuvvet çekme kuvveti olmakta ve tanecikler flokülasyona uğramaktadır. Bunun sonucunda silt-ince kum yapısına yaklaşan zeminde meydana gelen toplam konsolidasyon miktarı, sıkışma ve şişme indisi değerleri azalmaktadır. Bu durumda Aksaray kilinin sıkışma davranışı üzerinde kaolinittekinin tersine Van der Walls çekme kuvvetlerinden ziyade diffüz çift tabaka itme kuvvetlerinde meydana gelen değişim rol oynamaktadır. Sonuç olarak bilhassa montmorillonit içerikli yüksek plastisiteli killerde düşük dielektrik sabitli kimyasal sıvılar bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Methanol ile yapılan deneylerde ise kil içerisindeki sepiyolit varlığından dolayı methanolün sepiyolitin ince ve lifsi yapısı içerisine daha iyi nüfuz edebilmesi dolayısıyla diğer kimyasallara göre daha fazla flokülasyon meydana gelmektedir. Bundan dolayı da daha küçük sıkışma ve şişme indisi değerleri elde edilmektedir. Buradan hareketle içerisinde sepiyolit minerallerinin bulunduğu ve etkin rol oynadığı zeminlerde methanol gibi kısa zincirli kimyasallar kullanılarak zeminin sıkışma ve şişme

özellikleri üzerinde olumlu yönde değişimlerin sağlanması mümkün olmaktadır. Bu haliyle sepiyolit içerikli killerde sıkışma ve şişme özelliklerinin iyileştirilmesinde methanol bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir.

Aksaray kilinde kimyasal sıvıların varlığında yapılan konsolidasyon deneylerinde numunelerde meydana gelen toplam boşluk oranı değişim miktarları artan kimyasal sıvı konsantrasyonu ile birlikte aşırı şekilde düşmektedir. Numunelerin toplam boşluk oranlarında meydana gelen bu değişim miktarları sıkışma indisi değerlerinde meydana gelen azalma miktarları ile örtüşmektedir.

Aksaray kilinde de kaolinitte olduğu gibi 400 kPa gerilme kademesi için verilen boşluk oranları değerleri incelendiğinde; saf su ve diğer kimyasallar için elde edilen boşluk oranı değerlerinin artık birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum aslında 200 kPa gerilme kademesi içinde kısmen geçerli olmaktadır. Böylelikle 200 kPa gerilme kademesine kadar kilin davranışı üzerinde Van der Walls çekim kuvveti ve diffüz çift tabaka itme kuvveti gibi fiziko-kimyasal faktörler etkili olurken bu gerilme kademesinden sonra davranış üzerinde mekaniksel faktörlerin etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç daha önce Chen ve ark. (2000) tarafından 300 kPa gerilme kademesi üzerinde killerin davranışı üzerinde mekaniksel faktörler etkilidir şeklindeki ifadeleriyle örtüşmektedir. Buradan hareketle zeminlerin sıkışma özelliklerinin iyileştirilmesi için kimyasal sıvılar kullanılırken özellikle üzerindeki gerilme 200 kPa'a kadar olan zeminlerde bu yöntemin kullanılması uygun olmaktadır. Kimyasal sıvıların kullanımı ile granüler zemin olma yönünde değişim gösteren zeminlerin boşluk oranı değişimi ve sıkışma indisi değerleri önemli oranda azalmakta böylelikle zeminler oturma açısından stabilize edilmiş olmaktadır.

Kimyasal sıvılar varlığında kil taneciklerinin yapılarında meydana gelen değişimleri gözlemleyebilmek için bir optik mikroskop kullanılarak fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Optik mikroskopla elde edilen fotoğraf sonuçları göstermektedir ki zeminin boşluk sıvısı kimyasal sıvılarla yer değiştirdiği zaman zemin parçacıkları topaklanmakta ve kümelenmiş bir yapı oluşturmaktadır. Fotoğraf görüntüleri ile net bir şekilde gözlenebilen flokülasyon olayı kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneyleri için elde edilen sonuçları doğrulayıcı yönde olmuştur. Buradan hareketle; killerde kimyasal sıvılar varlığında taneciklerin flokülasyon ve

kümelenme derecesindeki değişimlerin killerin kayma mukavemeti davranışları hakkında bir ön fikir elde edilmesi açısından önemli olduğu söylenebilir.

Her iki kilde de genel olarak boşluk sıvısının dielektrik sabitindeki azalmayla kümelenme ve flokülasyon olayı daha net olarak ortaya çıkmaktadır. Elde edilen görüntülerden aynı kimyasal sıvının aynı konsantrasyonları için Aksaray kilinde meydana gelen flokülasyon ve kümelenmenin kaolinittekinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum kil-kimyasal sıvı etkileşimi üzerinde mineral tipinin önemini göstermektedir. Buradan çekme kuvvetlerindeki net artışın montmorillonit tipi minerallerde kaolinit tipi minerallerdekinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Her iki kil için elde edilen fotoğraf görüntülerinden boşluk sıvısı olarak su ile kimyasal sıvılar yer değiştirdiği zaman kohezyonlu zeminlerin kohezyonsuz gibi davrandığı ve adeta bir silt-ince kum formuna girdiği görülmektedir.

Kimyasal sıvıların farklı konsantrasyonları ile ön konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen sonuçlara göre kimyasalların özellikle %40 konsantrasyonundan sonra zeminlerin mukavemet ve sıkışma davranışlarını olumlu yönde değiştirdiği belirlenmiştir. Genel olarak azalan dielektrik sabiti ile birlikte bu değişim artmakta, fakat bazı durumlarda ise zemin ve kimyasal sıvının özel etkileşimlerinden dolayı sonuçlar beklenenlerden farklı çıkabilmektedir. Örneğin; asetik asitin kaolinitin yapısında meydana getirdiği jelleşme dolayısı ile diğer kimyasallara göre mukavemetin biraz düşük çıkması veya asetik asitle Aksaray kili içerisindeki kalsit ve dolomitin reaksiyonu sonrasında mukavemette meydana gelen aşırı artışlar gibi beklenenlerden farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Buradan hareketle içerisinde kalsit ve dolomit bulunan zeminlerde asetik asit, sepiyolit bulunan zeminlerde methanol kimyasal sıvısının stabilizasyon malzemesi olarak kullanılması uygun olmaktadır. Farklı bölgelerden elde edilen ve içerisinde farklı mineraller bulunan zeminlerle kimyasal sıvılar kullanılarak benzer çalışmalar yapılmalı ve sonuçları karşılaştırılmalıdır.

Kimyasal sıvıların kullanılması ile granüler bir zemin olma yönünde değişim gösteren ve mukavemet kazanan killerin, yol dolgu malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağı laboratuar ve arazide yapılacak çalışmalarla araştırılmalıdır.

Killerin çökelme ortamındaki boşluk sıvısına bağlı olarak mukavemet özelliklerinin değişmekte, ortamın boşluk sıvısının dielektrik sabiti düştükçe zemin

aşırı konsolide bir davranış sergilemektedir. Böylelikle zeminlerin aşırı konsolide davranış sergilemelerinde geçmişte maruz kaldıkları jeolojik yükün yanında çökelme ortamınında etkili olduğu söylenebilir.

Kimyasal sıvılar etkisinde elde edilen bu sonuçlar doygun zeminler üzerinde elde edilen sonuçlar olup 1 gün küre bırakılan numuneler kullanılarak elde edilmiştir. Farklı kür süreleri için davranışın nasıl değiştiği araştırılmalıdır.

Kimyasal sıvılarla hazırlanan numuneler donma-çözülme evresine bırakılarak bu durumda gösterecekleri davranışlar araştırılmalıdır.

Kil türlerinde yapılan Atterberg limit deneyleri killerin davranışları ve kil tanecikleri arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetler hakkında bir ön fikir vermesi açısından önemlidir. Bu bakımdan kimyasal sıvılar varlığında killer üzerinde yapılacak Atterberg limit deney sonuçları ile mukavemet deney sonuçları arasında bir korelasyon kurularak, yalnızca Atterberg limit deney sonuçları yapılmak kaydıyla kilin mukavemet davranışının tespit edilebilirliği üzerinde çalışılmalıdır. Böylelikle daha yorucu ve daha masraflı deneylerden de kurtulunmuş olacaktır.

Diffüz çift tabaka teorisi polar sıvılar için geçerli olup, özellikle montmorillonit ağırlıklı Aksaray kilinin davranışı bu teori yoluyla açıklanmaktadır. Nonpolar sıvılar varlığında montmorillonit ağırlıklı kil minerallerinin nasıl bir mukavemet ve sıkışma davranışı göstereceği araştırılmalıdır.

Yapılan mukavemet ve sıkışma deneylerine ilave olarak tanecikler arasındaki fiziko-kimyasal kuvvetleri gözlemleyebilmek için killerin zeta potansiyeli belirlenmelidir. Ayrıca taneciklerin doku ve etkileşimini gözlemleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemler yapılması faydalı olacaktır.

Kimyasal sıvılar varlığında taneciklerin silt-ince kum formuna dönüşme eğiliminde oldukları açıktır. Bu durumu gözlemleyebilmek için kimyasallarla kirletilmiş zeminler üzerinde hidrometre analizleri yapılması uygundur.

Kimyasal sıvılar etkisi altında kil zeminlerde mukavemette çok önemli bir artış ve sıkışma özelliklerinde bir iyileşme meydana gelmektedir. Kimyasal sıvı etkisindeki zemin acaba tekrar su ile muamele edilirse mukavemette ve sıkışma özelliklerinde nasıl bir değişim meydana gelir şeklinde bir araştırma yapılmalıdır.

Killi zeminlerin stabilizasyonunda diffüz çift tabakanın yıkılarak veya azaltılarak kil zeminin daha iyi sıkışmasının sağlanması ve kil taneciğinin kimyasal

olarak su almasının engellenerek şişmesinin önlenmesi ile kalıcı bir stabilizasyonun kimyasal sıvıların etkisi ile mümkün olup olmadığı araştırılmalıdır.

Laboratuarda kil zeminlerin içerisine direk olarak kimyasal sıvılar karıştırılarak mukavemet ve sıkışma özellikleri belirlenmiştir. Mevcut zemine kimyasal sıvıların dışardan enjekte edilmesiyle bilhassa havaalanı ve yol dolguları altında bulunan şişen zeminlerde şişme özelliklerinin azaltılması ile ilgili laboratuar ve arazi ölçekli araştırmalar yapılmalıdır.

Özellikle stabilite probleminin olabileceği şevlerin kimyasal sıvıların etkisine maruz kalması durumunda killi zeminin içsel sürtünme açısında meydana gelen artışla zeminin göçme davranışının nasıl değiştiği araştırılmalıdır.

Laboratuarda yapılan bu çalışmalara ilave olarak kimyasallarla kirlenmiş herhangi bir sahada (arazide) uygun yöntemlerle zeminin mukavemet ve sıkışma davranışının belirlenmesi tavsiye edilir.

Ayrıca yeraltı sularına karıştığı zaman kirlilik yaratmayan kimyasal sıvıların kullanımı için bir araştırma yapılması tavsiye edilir.

Sonuç olarak dielektrik sabiti suyun dielektrik sabitine göre daha küçük olan kimyasal sıvıların değişik konsantrasyonlarda killi zeminlere ilavesi ile kil tanecikleri arasında oluşan fiziko-kimyasal kuvvetlerin büyüklüğü değişmektedir. Hem kaolinit hem de montmorillonit içerikli zeminlerde meydana gelen bu değişikliklerle killi zeminler flokülasyona uğrayarak silt-ince kum davranışı göstermekte, mukavemet kazanmakta ve sıkışma özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır. Aksaray kili içerisinde bulunan farklı mineraller dolayısı ile asetik asit ve methanol varlığında daha olumlu değişimlerde olabilmektedir. Buradan hareketle kimyasal sıvıların yapı altındaki bir zeminin stabilizasyonunda kullanılabileceği, ayrıca granüler özellik kazanmasından dolayı bu tip kimyasallarla kirlenmiş bir alandan alınan malzemenin dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği söylenebilir. Yine bu çalışma, mevcut yapılar altındaki zeminlerin değişik kimyasallarla kirlenmesi durumunda özelliklerinde ve davranışlarında oluşabilecek değişimler ile üst yapıda meydana gelebilecek davranış farklılıklarının tahmin edilmesinde bir fikir vermesi açısından önemli olmuştur. Ayrıca günümüzde önemi gittikçe artan nano teknoloji alanında zemin-kimyasal sıvı etkileşimi ile killerin mineralojik yapısında meydana gelen değişimlerin bilinmesi bu konuda çalışan araştırmacılara bir ön fikir vermesi açısından önemli olacaktır.

9. KAYNAKLAR

Acar, Y.B. and Olivieri, I., 1990, "Pore Fluid Effects on the Fabric and Hydroulic Conductivity of Laboratory Compacted Clay", TRB # 1219, Transportation Research Board, Washington, page 144-159.

Al-Yaqout, A.F., Hamoda, M.F. and Al-Sarawı, M.A., 2007, "Engineering Properties of Soil/Solid Waste at Closed Unlined Landfill – A Case Study", Kuwait Journal of Science and Engineering, Vol. 34, Numb 2B, page 1-16.

Alvarez, A., 1984, "Sepiolite: properties and uses", Palygorskite–Sepiolite. Occurrences, Genesis and UsesDevelopments in Sedimentology Vol. 37**,** Elsevier, Amsterdam.

Anandarajah, A., and Lu, N., 1991, "Numerical Study of the Electric Double Layer Repulsion Between Non-parallel Clay Particles of Finite Length", International Journal of Numerical and analytical Methods in Geomechanics, 15, No. 10.

Anandarajah, A. and Zhao, D., 2000, "Triaxial Behaviour of Kaolinite in Different Pore Fluids", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Enginnering, ASCE, Vol. 126, Page 148-155.

Anandarajah, A., 2003, "Mechanism Controlling Permeability Change in Clays due to Changes in Pore Fluid", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Enginnering, ASCE, Vol. 129, No.2, page 163-172.

Anderson, D.C., 1982, "Does Landfill Leachate Make Clay Liners More Permeable", Civil Engineering, ASCE, 66-69.

Aytekin, M., 2005, "Deneysel Zemin Mekaniği", Trabzon.

Barbour, S.L. and Fredlund, D.G., 1989, "Mechanisms of Osmotic Flow and Volume Change in Clay Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, page 551-562.

Binning G., Quate C.F., Gerber Ch., 1986, ''Atomic Force Microscope'', Physics Review Letters, Volume:56, page 930

Bolt, G.T., 1956, "Physicochemical analysisi of the Copmpressibility of Pure Clays", Geotechnique, London, No. 6(2), page 86-93.

Bowders, J.J., Daniel, D.E., Broderick, G.P. and Liljestrand, H.M., 1985, "Methods for Testing the Compressibility of Clay Liners with Landfill Leachate", ASTM STP 886, Hazardous and Industrial Solid Waste Testing, Fourth Symposium, American Society for Testing Materials, page 233-250.

Bowders, J.J. and Daniel, D.E., 1987, "Hydroulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113,

1432-1448.

Breck, D.W., 1974, “Zeolite Molecular Sieves”, Wiley-Interscience, New-York.

Brown, K.W. and Anderson, D.C., 1983, “Effects of Organic Solvents on the Permeability of Clay Soils”, EPA-600/83-016, Municipal Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, page 153-161.

Brutsaert, F.W., 1987, “Suitability of Marine Clays as Hazardous Waste Site Liners”, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 113, page 1141-1147.

Caillere, S., Henin, S. And Rautureau, M., 1982, “Mineralogie des Argiles”, 2. Classification et Nomenclature Mason, Paris, page 189.

Casagrande, A., 1948, “Classification and Identification of Soils”, Transactions, ASCE, Vol. 113, page 901-930.

Cernica, J., 1995, “Geotechnical Engineering: Soil Mechanics”, Wiley, New York.

Chapman, D.L., 1913, “A Contribution to the Theory of Electro-capillarity”, Philosophical Magazine, Vol. 25, No. 6, page 475-481.

Chapman, H.D., 1965, “Cation Exchange Capacity in Methods of Soil Analysis”, Edited by C.A. Black, page 891-901.

Chen, J., 1996, “Physico-Chemical Analysis of Contaminated Clay”, A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Baltimore, Maryland.

Chen, J., Anandarajah, A., Inyang, H., 2000, “Pore Fluid Properties and Compressibility of Kaolinite”, Journal of Geo. and Geo. Eng., ASCE, Vol. 126, No. 9, 798-807.

Christaras, B., 1991, “A Comparison of the Casagrande and Fall Cone Penetrometer Methods for Liquid Limit Determination in Marls from Crete, Greece”, Engineering Geology, Cilt 31, sayfa 131-142.

Collins, K. and Mcgrown, A., 1974, “The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils”, Geotechnique, Vol. V, No. 2, page 223-254.

Çınar, M. O., Ülgen, Ş. D., Çubukçu E., Koçum İ. C., 2005, ‘‘Design and Construction of Atomic Force Microscopy for Molecular Sensing’’, BİYOMUT, National Symposium on Biomedical Engineering, İstanbul-TURKEY.

Çokça, E., 1993, “Metilen Mavisi Deneyi ile Killerin Katyon Değişim Kapasitelerinin Tespiti”, VI. Ulusal Kil Sempozyumu, 335-344.

Das, B.M., 2002, “Principles of Geotechnical Engineering”, Fifth Edition, USA.

Daniel, D.E., 1984, “Predicting Hydroulic Conductivity of Clay Liners”, Journal of Geotechnical Enginnering, ASCE, 110, 285-300.

Derjaguin, B.V., 1960, “The Force Between Molecules”, Scientific American, Vol. 203, No. 1.

Dolinar, B. and Trauner, L., 2007, “The İmpact of Structure on the Undrained Shear Strength of Cohesive Soils”, Engineering Geology, Volume 92, Issues 1-2, page 88-96.

Dzyaloshinskii, E., Lifshitz, E.M. and Pitaevskii, L.P., 1961, “General Theory of Van der Walls Forces”, Soviet Physics USPEKHI, Vol 73, No. 3-4, page 153.

Fernandez, F. and Quigley, R.M., 1985, “Hiydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Hydrocarbons”, Canadian Geotechnical Journal, Ottowa, 22, 205-215.

Fernandez, F. and Quigley, R.M., 1988, “Viscosity and Dielectric Constant Controls on the Hydroulic Conductivity of Clayly Soils Permeated with Water-Soluable Organics”, Canadian Geotechnical Journal, 25, 582-589.

Foreman, D.E. ve Daniel, D.E., 1986, “Permeation of Compacted Clay with Organic Chemicals”, Journal of Geotechnical Enginnering, ASCE, Vol. 112, page 669-681.

Galan, E., 1979, “The FibVous Clay Minerals in Spain, Eighth Conference on Clay Mineralogy and Petrology, 239-249.

Gnanapragasam, N., Lewis, B.A. and Fino, F.J., 1995, “Micro-structural Changes in Sand-Bentonite Soils When Exposed to Aniline”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121, 119-125

Gouy, G., 1910, “Electric Charge on the Surface of an Electrolyte”, Ann. Phys., Paris, IV, 9, 457-468.

Grim, R.E., 1959, “Physico-Chemical Properties of Soils:Clay Minerals”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85, No.SM2, pp 1-17.

Grim, R.E., 1968, “Clay Mineralogy”, Mc Graw-Hill, New York, page 596.

Hamaker, H.C., 1937, “The London-Van der Walls Attraction Between Spherical Particles”, Physica 4, page 1058.

Harr, M.E., 1962, “Groundwater and Seepage”, McGraw Hill Book Company, New York.

Hausmann, M.R., 1990, "Engineering Principles of Ground Modification", McGraw-Hill Publishing Company, New York.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981, "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs, NJ.

Horn, H.M. and Deere, D.U., (1962), "Frictional Characteristics of Minerals", Geotechnique, Vol. 12, page 319-335.

Hoşcan, C., 1997, "Organik Kimyasal Maddelerin Kil Zeminlerin Permeabilitesi Üzerindeki Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.

Hough, D.B. and White, L.R., 1980, "The Calculation of Hamaker Constants from Lifshitz Theory with Application to wetting Phenomena", Avdan. Colloid Interface Sci. 14, page 3.

Israelachvili, J.N. and McGuiggan, P.M., 1988, "Forces Between Surfaces in Liquids", Science, Vol. 21, page 795-800.

Israelachvili, J., 1991, "Intermolecular and Surface Forces", Academic Pres, London.

Kara, M., Sabah, E., Yüzer, H. and Çelik, M.S., 1998, "Sepiolite as an Adsorbent for Elimination of Mine Wastes", Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Ankara, 717-721.

Kaya A., Galvao, C.B., 1997, ''Hydroulic Conductivity of Fine-Grained Soils with Water-Organic Liquid Mixtures'',In Contaminated and derelict Land: The Proceedings of gren 2: The 2nd International Symposium on Geotechnics Related to the Environment, Krakow, Poland.

Kaya, A. and Fang, H.Y., 2000, "The Effects of Organic Fluids on Physicochemical Parameters of Fine-Grained Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, page 943-950.

Kaya, A. and Fang, H.Y., 2005, "Experimental Evidence of Reduction in Attractive and Repulsive Forces Between Clay Particles Permeated with Organic Fluids", Canadian Geotechnical Journal, Technical Note, Vol. 42, page 632-640.

Keskin, H., 1967, "Temel Kimya Dersleri", İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Konta, J., 1995, "Clay and Man: Clay Raw Materials in the Service of Man", Applied Clay Science 10, page 275–353.

Korfiatis G.P., Rabah N. and Lekmine D., 1987, "Permeability of Compacted Clay Liners in Laboratory Scale Models", Proc. ASCE-GT Specialty Conference, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Ann Arbor, MI

Lambe , T.W., 1953, “The Structure of Inorganic Soil”, Proceedings, ASCE, Vol.79, Seperate No. 315, page 49.

Lambe , T.W., 1958a, “The Structure of Compacted Clay”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, page 1654-1 to 1654-34.

Lambe , T.W., 1958b, “The Engineering Behaviour of Compacted Clay”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, page 1655-1 to 1654-35.

Lambe, T.W. and Whıtman, R.V., 1979, “Soil Mechanics”, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Lide, D.R., 1994, “Handbook of Chemistry and Physics”, CRC Pres, Clevelend, Ohio.

Lide, D.R., 1995, “Handbook of Chemistry and Physics”, 75th Ed., Wiley, New York.

Lifshitz, E.M., 1956, “The Theory of Molecular Attractive Forces Between Solids”, Soviet Physics 73, page 73.

Lu, N., 1990, “Numerical Study of Electric Double Layer Repulsion Between Inclined Clay Particles”, Ph.D. Dissertation submitted to the Johns Hopkins University.

Lu, N. and Anandarjah, A., 1992, “Empirical Estimation of Double Layer Repulsive Force Between Two Inclined Clay Particles of Finite Length”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 118, page 628.

Mathew, P.K. and Rao, S.N., 1997, “ Influence of cations on compressibility behavior of a marine clay” Tech. Note J. Geotech. Geoenviron. Eng., *ASCE* 123 11, pp. 1071–1073

Meegoda N.J. and Ratnaweera P., 1994, “Compressibility of Contaminated Fine Grained Soils”, Geotechnical Testing Journal, 17 (1), page 101–112.

Mesri G. and Olson R.E., 1971, “Mechanisms controlling the permeability of clays”, Clays and Clay Minerals, Vol. **19** (3), page 151–158.

Mesri, G., 1973, “Coefficient of Secondary Compression”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 99, No. 1, page 123-137.

Meunier, A., 2005, ‘‘Clays’’, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.

Michaels, A.S., 1959, “Physico-chemical properties of soils: Soil-water sisytems”, Journal Soil Mechanics Foundations Division, Proceedings American Society

Civil Engineering, Vol. 85, page 91-102.

Mitchell, J.K., 1960, "The application of colloidal theory to the compressibility of clays", Commonwealth Science and Industry Research Organization, Melbourne, Australia, page 2.92–2.97

Mitchell, J.K., 1976, "Fundamentals of Soil Behaviour", John wiley, New York.

Mitchell, J.K. and Madsen, F.T., 1987, "Chemicals Effects on Clay hydroulic Conductivity", Geotechnical Practice for Waste Disposal, 87. Geotechnical Spec. Publ. No. 13, ASCE, New York, 87-116.

Mitchell, J.K. and Jaber, M., 1990, "Factors Controlling the Long-term Properties of Clay Liners", Waste Containment sys.: Constr., regulation and perf., Geotech. Spec. Publ. No. 26, R. Bonaparte, eds., ASCE, New York, Page 84-105.

Mitchell, J.K., 1993, "Fundamentals of Soil Behaviour", 2nd Ed., Wiley, New York.

Mohammad, H.M. and Shahaboddin S.Y., 2008, "Volume Change Behaviour of Compacted Clay due to Organic Liquids as Permeant", Applied Clay Science, Volume 39, Issue 1-2, page 60-71.

Moore, R., (1991), "The Chemical and Mineralogical Controls Upon the Residual Strength of Pure and Natural Clays", Geotechnique, 41(1), page 35-47.

Moore, C.A., 1968, "Mineralogical and Pore Fluid Influences on Deformation Mechanisms in Clay Soils", Ph.D Dissertation, U. Of Calif. At Berkeley.

Moore, C.A. and Mitchell, J.K., 1974, "Electromagnetic Forces and Shear Strength", Geotechnique, London, 24(4), 627-636.

Nagaraj, T.S., 2002, "Discussion of Pore Fluid Properties and Compressibility of Kaolinite by J. Chen, A. Anandarajah and H. Inyang", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, Issue 4, page 360-362.

Olson, R.E., ve Mesri, G., 1970, "Mechanisms Controlling Compressibility of Clays", J. Soil Mech. and Fondations Div., ASCE, 6(11), page 1863-1878.

Orhan, M., Özer, M., Işık, N.S., 2006, "Doğal Zeminlerin Likit Limitinin Belirlenmesinde Casagrande ve Koni Batma Yöntemlerinin Karşılaştırılması", Gazi Ün. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No.4, sayfa 711-720.

Otsuka, R., Mariko, T. and Sakamoto, T., 1973, "Mineralogische Eigenschaften von Meerschaum von", Eskişehir, Türkei, Memoirs of the School of Sciences and Engineeering, Wasseda Univ., 37, page 43-52.

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

Ören, A.H., 2001, “The Effects of Valency on the Compressibility of Clays”, A Thesis fort he Degree of Master of Science in Civil Enginnering, Dokuz Eylül University, İzmir.

Özdemir, A., 2008, “Zemin Mekaniği ve Zemin Mühendisliğine Giriş”, Selçuk Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Konya.

Pamukcu, S., Hijazi, M.H., Fang, H.Y. (1990), "Study of Possible Reuse of Stabilized Petroleum-Contaminated Soils as Construction Material", *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. Vol. 3, Lewis Publ., Co., page.203-14.

Pauling, L., 1951, “The Nature of the Chemical Bond”, Cornell Iniversity Pres.

Pamukcu, S., Hijazi, M.H., Fang, H.Y. (1990), "Study of Possible Reuse of Stabilized Petroleum-Contaminated Soils as Construction Material", *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. Vol. 3, Lewis Publ., Co., page.203-14.

Rehman, H., Abduljauwad, S.N. and Arkam, T., 2007, “Geotechnical Behaviour of Oil-Contaminated Fine-Grained Soils”, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Volume 12, Bundle A.

Ratnaweera, P. And Meegoda, J.N., 2006, “Shear Strength and Stress-Strain Behaviour of Contaminated Soils”, ASTM Geotechnical Testing Journal, 29(2), page 133-140.

Richards, A.F. and Hamilton, E.L., 1967, “Investigation of Deep Sea Sediment Cores, III. Consolidation”, Marine Geotechnique, A.F. Richards, ed., University of Illınois Pres, Urbana, III., 93-117.

Sabah, E., Sağlam, H., Kara, M. and Çelik, M.S., 1997, “Uptake of Cationic Surfactants by Clay Absorbent: Sepiolite”, 5th Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Buenos Aires, Argentina, 277-280.

Sabah, E. ve Çelik, M.S., 1998, “Sepiyolit: Oluşumu, Özellikleri, Kullanım Alanları”, Afyon, sayfa 153.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H. and Prencke, E., 2002, “Spesific Surface: Determination and Relevance”, Canadian Geotechnical Journal, 39, 233-241.

Schmertmann J. H., 1976, ‘‘The Shear Behaviour of Soil with Constant Structure ’’, Norwegian Geotechnical Institute, Laurits, Bjerrum Memorial Volume, Oslo – Norway, page 65-98.

Schmertmann J. H., 1981, ‘‘A General Time-Related Soil Friction İncrease Phenomenon ’’, ASTM STP 740, ASTM, West Conshohocken, Pa., page 456-484.

Schmertmann J. H., 1991, ‘‘The Mechanical Aging of Soils’’, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Volume 117, No. 9, page 1288-1330.

Schmertmann J. H., 2001, ‘‘Triaxial Behaviour of Kaolinite in Different Pore Fluids’’, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Discussion, Volume 134, No. 5, page 463.

Serna, C. and Van Scoyoc, G.E., 1978, “Infrared Study of Sepiolite and Palygoskite Surfaces”, Proc. 1978 Int. Clay Conf. Oxford, Elsevier, 197-206.

Shackelford, C.D., 1994, “Waste-Soil İnteractions that Alter Hydraulic Conductivity”, Hydraulic Conductivity and Waste Containment Transport in Soil, ASTM STP 1142, West Conshohocken, Pa., page 111-168.

Skempton, A.W., 1953, “The Colloidal Activity of Clays”, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, page 57-61.

Soule, N.M. and Burns, S.E., 2001, “Effects of Organic Cation Structure on Behaviour of Organobentonits”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No.4, page 363-370.

Sridharan, A., and Rao, G.V., 1973, “Mechanisms Controlling Volume Change of Saturated Clays”, Geotechnique, London, 23(3), page 359-382.

Sridharan, A., Rao, S. M. and Murty, N.S., 1986a, “Compressibility behaviour of homoionized bentonites”, Geotechnique, Vol. 36, pp. 551-564.

Sridharan, A., Rao, S. M. and Murty, N.S., 1986b, “Liquid Limit of Montmorillonite Soils”, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 9, pp. 156-164.

Sridharan, A., Rao, S. M. And Gajarajan, V.S., 1987, “İnfluence of flouride on the compressibility of montmorillonites, Geotechnique, Vol. 37, pp. 197-206.

Sridharan, A. and Sivapapullaiah, P.V., 1987, “Engineering Behaviour of Soils Contaminated With Different Pollutants”, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks, Balkema, Roterdam, page 165-178.

Sridharan, A., Rao, S. M. and Murty, N.S., 1988, “Liquid Limit of Kaolinitic Soils”, ASTM Geotechnique, Vol. 38, pp. 191-198.

Sridharan, A., 1991, “Engineering behaviour of fine grained soils”, Indian Geotechnical Journal, XXI- 1 , page 1–136.

Sridharan, A. and Prakash, K., 1999, “Influence of Clay Mineralogy and Pore Medium Chemistry on clay Sediment Formation”, Canadian Geotechnical Journal, 36, 961-966.

Sridharan, A., El-Shafei, A. and Miura, N., 2000, "A Study on the Dominating Mechanisms and Parameters Influencing the Physical Properties of Ariake Clay", International Association of Lowland Technology Journal, Vol.2, page 55-70.

Sridharan, A., El-Shafei, A. and Miura, N., 2002, "Mechanisms Controlling Undrained Strength Behaviour of Ariake Marine Clay", Marine Georesources and Geotechnology, Vol.20, page 21-50.

Sridharan, A., Hayashi, S. and Du, Y.J., 2007, "Discussion of Structure Characteristics and Mechanical Properties of Kaolinite Soils. I. Surface Charges and Structural Characterizations", Canadian Geotechnical Journal, Vol.44, page 241-242.

Stern, O., 1924, "Zur Theorie der electrolytischen doppelschicht. Z Elektrochem 30:508-516.

Storey, J.M.E. and Peirle J.J., 1989, "Influence of Changes in Methanol Concentration on Clay Particle İnteractions", Canadian Geotechnical Journal, 26, 57-63.

Terzaghi, K., 1926, "The Mechanisms of Adsorption and of the Swelling of Gells", Colloid Symp. Monograph, Chemical Catalog Co., New York, page 58-78.

Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1967, "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, page 729.

Trauner, L., Dolinar, B. and Misic, M., 2005, "Relationship Between the Undrained Shear Strength, Water Content and Mineralogical Properties of Fine-Grained Soils", İnternational Journal Geomechanics, Vol. 5(4), page 50-55.

Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. and Leroueil, S., 2002, "Influence of the Nature of Organic Compounds on Fine soil Stabilization with Cement", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, page 535-546.

Tuncan, A., Tuncan, M., Özmen, E., 1993, "Petrol Hidrokarbonlarının Kaolen Kilinin Geoteknik Özelliklerine Etkisi", Altıncı Ulusal Kil Sempozyumu, 197-207.

Uppot, O.J. and Stephenson, W.R., 1989, "Permeability of Clays Under Organic Permenants", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115, 115-131.

Van Olphen, H., 1964, "İnternal Mutual Flocculation in Clay Suspensions", J. Collloid Interface Science, Vol. 19, page 313.

Van Olphen, H., 1977, "An İntroduction to Clay Colloid Chemistry", Wiley Interscience, New York.

Verwey, E.J. and Overbeek, J. TH. G., 1948, “Theory of the Stability of Lyoghobic Colloids, Elsevier Publishing Company, Inc..

Vicente Rodrigez M. A., Lopez Gonzalez J. D., and Banares Munoz M. A., 1994, ‘‘Acid Activation of a Spanish Sepiolite, Physicochemical Charakterizatio, free Silica Content and Surface Area of the Solids Obtained’’, Clay Minerals 29, page 361-367.

Wang, Y.H., and Siu, W.K., 2006, “Structure Characteristics and Mechanical Properties of Kaolinite Soils. I. Surface Charges and Structural Characterizations”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, page 587-600.

Wasti, Y. Ve Bezirci, M.H., 1986, “Determination of the Consistency Limits of Soils by the Fall Cone Test”, Canadian Geotechnical Journal, Cilt 23, page 241-246.

Whitlow, R.F., 1992, “Basic Soil Mechanics”, 2nd ed., Longman Scientific and Technical.

Wienberg, R., 1990, “Zum EinfluB Organischer Schadstoffe Auf Deponietone – Teil 1: Unspezifische İnteraktionen, Abfallwirtschaftsjournal, 2(4), 222-230.

Yıldız, M., 1998, “Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.

Yong, R.N. and Warkentin, B.P., 1975, “Soil Properties and Behaviour”, Elsevier Scientific Publishing Co., New York.

Yükselen, Y. ve Kaya, A., 2006, “Farklı Mineralojideki Killerin Özgül Yüzey Alanının Belirlenmesi”, Kil Bilimi ve Teknoloji Dergisi, No 1(2), sayfa 35-42.

Zhan, L.T., Chen, Y.M. and Ling, W.A., 2008, “Shear Strength Characterization of Municipal Solid Waste at the Suzhou Landfill, China”, Engineering Geology, Vol. 97, Issues 3-4, page 97-111.

Zhao, D., 1996, “Experimental Study of Stres-Strain and Shear Strength Behaviour of Contaminated cohesive Soils”, A Dissertation Submitted to The Johns Hopkins University in Conformity with the Requirements fort he Degree of Doctor of Philosophy, Baltimore, Maryland.

Zorluer, İ., 1996, “Petrol Hidrokarbonlarının Normal Konsolide Kaolinit Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Eskişehir.