

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİLLİ ZEMİNLERDE YILLANMA ETKİSİNİN ÇEŞİTLİ
ÇÖZELTİLER VARLIĞINDA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisi Emel ÇAKAR

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Geoteknik

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİLLİ ZEMİNLERDE YILLANMA ETKİSİNİN ÇEŞİTLİ
ÇÖZELTİLER VARLIĞINDA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisi Emel ÇAKAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Haziran 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Temmuz 2013

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yeliz YÜKSELEN AKSOY
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet GÜZEL (CBÜ)
Doç.Dr. İsfendiyar EGELİ (İYTE)

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	x
KISALTMALAR LİSTESİ	xiv
TEŞEKKÜR.....	xv
ÖZET	xvi
İNGİLİZCE ÖZET	xvii
TEZ ORGANİZASYONU	xviii
1.GİRİŞ	1
1.1. Yıllanmanın Katı Atık Depolama Alanlarına Etkisi	2
1.2. Boşluk Suyu Kimyasının Killerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi	3
1.2.1.Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Likit Limite Etkisi.....	3
1.2.2. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Hidrolik İletkenliğe Etkisi	9
1.2.3. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Boşluk Oranı ve Şişme Davranışına Etkisi	14
1.2.4. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Sıkışabilirliğe Etkisi	18
1.2.5. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Kayma Dayanımına Etkisi	21
1.3. Kil Mineralleri.....	24
1.3.1. Kaolin	26
1.3.2. Bentonit	28
2. MALZEME VE YÖNTEM	30
2.1. Malzeme.....	30
2.2. Yöntem	32
2.2.1. Likit Limit Deneyi	33
2.2.2. Plastik Limit Deneyi	34
2.2.3. Konsolidasyon Deneyi	34
2.2.4. Permabilite Deneyi	36

2.2.5. Direk Kesme Deneyi	37
2.2.6. Cıvalı Porozimetri Deneyi	38
2.2.7. Elektron Mikroskop Fotoğraf Analizleri	39
3. DENEYSEL SONUÇLAR	40
3.1. Zeminlerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri	40
3.2. Kıvam Limitleri Sonuçları	40
3.2.1. Likit Limit Deneyi Sonuçları	40
3.2.2. Plastik Limit Deneyi Sonuçları	42
3.3. Sıkışabilirlik Sonuçları.....	43
3.3.1. Yıllanmanın Sıkışma İndisine (C_c) Etkisi	42
3.3.1.1. Kaolinin Sıkışma İndisine (C_c) Yıllanmanın Etkisi	44
3.3.1.2. Bentonitin Sıkışma İndisine (C_c) Yıllanmanın Etkisi	47
3.3.2. Yıllanmanın Şişme İndisine (C_s) Etkisi	50
3.3.2.1. Kaolinin Şişme İndisine (C_s) Yıllanmanın Etkisi	50
3.3.2.2. Bentonitin Şişme İndisine (C_s) Yıllanmanın Etkisi	53
3.3.3. Yıllanmanın Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Etkisi.....	57
3.3.3.1. Kaolinin Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Yıllanmanın Etkisi	57
3.3.3.2. Bentonitin Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Yıllanmanın Etkisi	59
3.4. Permeabilite Sonuçları	61
3.4.1. Kaolinin Permeabilite Katsayısına (k) Yıllanmanın Etkisi	61
3.4.2. Bentonitin Permeabilite Katsayısına (k) Yıllanmanın Etkisi	64
3.5. Kayma Dayanım Sonuçları	67
3.5.1. Kaolinin İçsel Sürtünme Açısı (Φ) Değerine Yıllanmanın Etkisi.....	68
3.5.2. Bentonitin İçsel Sürtünme Açısı (Φ) Değerine Yıllanmanın Etkisi	70
3.6. Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçları	72
3.6.1. Kaolin Numunelerinin Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi Sonuçları	73
3.6.2. Bentonit Numunelerinin Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi Sonuçları	76
3.7. Cıvalı Porozimetri Deneyi Sonuçları	78

4.SONUÇ VE ÖNERİLER	80
5. KAYNAKLAR	83
6. EKLER	88

SEMBOL LİSTESİ

%	: yüzde
°C	: santigrat derece
τ	: kayma gerilmesi
σ	: normal gerilme
$\emptyset$	: içsel sürtünme açısı
γ_d	: doymun birim hacim ağırlık
A	: kesit alanı
A	: aktivite
C_c	: Sıkışma indisi
C_s	: Şişme indisi
c_v	: konsolidasyon katsayısı
$\bar{c}$	: efektif temas gerilme değeri
D	: çap
e	: boşluk oranı
e_0	: başlangıç boşluk oranı
e_L	: likit limitteki boşluk oranı
G_s	: özgül ağırlık
h	: yükseklik
i	: hidrolik eğim
k	: permeabilite katsayısı
l	: boy
N	: darbe sayısı
q-Q	:debi
q_c	: eksenel gerilme
t	: zaman
u	: boşluk suyu basıncı
$\bar{u}_a$	: efektif boşluk hava basıncı
$\bar{u}_w$	: efektif boşluk suyu basıncı
w	: su muhtevası

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Dielektrik sabitinin likit limite etkisi	4
Şekil 1.2. Normal bentonit ve MS bentonitin saf su, NaCl ve CaCl ₂ varlığında	7
likit limit değerleri	
Şekil 1.3. İyon konsantrasyon ve değerliğinin kaolinin zemin dokusu	8
üzerindeki etkisi a) Düşük Na ⁺ ve Ca ²⁺ iyon konsantrasyonunda b) Yüksek Na ⁺ ve Ca ²⁺ iyon konsantrasyonunda	
Şekil 1.4. İyon konsantrasyon ve değerliğinin bentonitin zemin dokusu	9
üzerindeki etkisi a) Düşük Na ⁺ ve Ca ²⁺ iyon konsantrasyonunda b) Yüksek Na ⁺ ve Ca ²⁺ iyon konsantrasyonunda	
Şekil 1.5. Saf su ve NaCl varlığında doğal bentonitin hidrolik.....	11
iletkenlik, numune kalınlığı ve boşluklardan geçen akım hacmi oranındaki değişimler	
Şekil 1.6. Kaolinin çeşitli iyon konsantrasyon ve değerliklerindeki e-logk ilişkisi	12
Şekil 1.7. Bentonitin çeşitli iyon konsantrasyon ve değerliklerindeki e-logk ilişkisi	13
Şekil 1.8. Dielektrik sabitinin şişmeye etkisi	16
Şekil 1.9. Saf su ve NaCl ve CaCl ₂ çözeltiler varlığında bentonitin şişme grafiği	17
Şekil 1.10. Normal bentonit ile MS bentonitin	18
NaCl ve CaCl ₂ varlığında şişme değerlerinin karşılaştırılması	
Şekil 1.11. Kaolinin farklı iyon konsantrasyonu ve değerliklerinde	20
konsolidasyon basıncı-boşluk oranı ilişkisi	
Şekil 1.12. Kaolinin çeşitli iyon konsantrasyonu ve değerliklerinde	20
konsolidasyon basıncı-boşluk oranı ilişkisi	
Şekil 1.13. Kaoline ait gerilme (414 kPa) altındaki, gerilme-deformasyon	23
ve boşluk suyu basıncı-deformasyon eğrileri	
Şekil 1.14. (a) Tek silika tetrahedronu (b) Silika levhası veya tetrahedralin	24
izometrik görünümü (c) Silika levhasının şematik temsili (d) Silika levhasının tepeden görünümü	
Şekil 1.15. Kaolin yapısının şematik diyagramı	26
Şekil 1.16. Kaolinin atomik yapısı	27

Şekil 1.17. Bentonit yapısının şematik diyagramı	29
Şekil 2.1. Kaolin ve bentonite ait dane çapı dağılım grafikleri a) kaolin, b) bentonit	31
Şekil 2.2. a) Konsolidasyon deneyi için hazırlanan numune, ...	35
b) içerisinde çözelti bulunan bekletme kapları	
Şekil 2.3. a) Direk Kesme kutusu b) direk kesme deney düzeneği	38
Şekil 3.1. Kaolin numunesine ait su içeriği ve vuruş sayısı değerleri	41
Şekil 3.2. Bentonit numunesine ait su içeriği ve vuruş sayısı değerleri	41
Şekil 3.3. Kaolin-saf su karışımına ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0)	46
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.4. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait normalize sıkışma indisi	46
(C_c/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.5. Bentonit-saf su karışımına ait normalize sıkışma indisi	49
(C_c/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.6. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait normalize sıkışma	49
indisi (C_c/e_0) değerleri üzerinde yılanma etkisi	
Şekil 3.7. Kaolin-saf su karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0)	52
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.8. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0)	53
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.9. Bentonit-saf su karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0)	56
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.10. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0)	56
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.11. Kaolin-saf su karışımına ait permeabilite katsayısı (k).....	64
değerleri ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.12. Bentonit-saf su karışımına ait permeabilite katsayısı (k).....	67
değerleri ile zamanın ilişkisi	

Şekil 3.13. Kaolin-saf su karışımına ait içsel sürtünme açısı ($\emptyset'$) değerleri	69
ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.14. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait içsel sürtünme açısı ($\emptyset'$) değerleri	70
ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.15. Bentonit-saf su karışımına ait içsel sürtünme açısı ($\emptyset'$) değerleri	72
ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.16. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait içsel sürtünme açısı ($\emptyset'$) değerleri	72
ile zamanın ilişkisi	
Şekil 3.17. Yıllanmanın ve 0.5 M NaCl varlığının kaolinin mikro yapısına	74
etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş kaolin-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M NaCl	
çözeltisi içerisinde bekletilmiş kaolin-saf su karışımı	
Şekil 3.18. Yıllanmanın ve 0.5 M CaCl_2 varlığının kaolinin mikro yapısına	75
etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş kaolin-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M CaCl_2	
çözeltisi içerisinde bekletilmiş kaolin-saf su karışımı	
Şekil 3.19. Yıllanmanın ve 0.5 M NaCl varlığının bentonitin mikro yapısına	77
etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş bentonit-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M NaCl	
çözeltisi içerisinde bekletilmiş bentonit-saf su karışımı	

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Adsorbe katyon değeri ve boyutunun bentonitin özelliklerine etkisi	5
Tablo 1.2. Değişebilir katyon tipi ve boşluk suyu özelliklerinin montmorillonitin	14
permeabilite katsayısına etkisi	
Tablo 1.3. Yaygın bazı kil minerallerinin ortalama büyüklük, kalınlık ve spesifik	27
yüzey değerleri	
Tablo 2.1. Kaolin numunelerinin konsolidasyon ve direk kesme deneyleri için	33
hazırlanma şeması	
Tablo 2.2. Bentonit numunelerinin konsolidasyon ve direk kesme deneyleri için	33
hazırlanma şeması	
Tablo 3.1. Kil numunelerinin fiziko-kimyasal özellikleri	40
Tablo 3.2. 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl ₂ varlığında kaolin ve bentonit numunelerine	42
ait likit limit değerleri	
Tablo 3.3. 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl ₂ varlığında kaolin ve bentonite ait	43
plastik limit değerleri	
Tablo 3.4. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait.....	44
sıkışma indisi (Cc) değerleri	
Tablo 3.5. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	44
normalize sıkışma indisi (Cc/e ₀) değerleri	
Tablo 3.6. 0.5 M CaCl ₂ çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	45
sıkışma indisi (C _c) değerleri	
Tablo 3.7. 0.5 M CaCl ₂ çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	45
normalize sıkışma indisi (Cc/e ₀) değerleri	
Tablo 3.8. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	47
sıkışma indisi (Cc) değerleri	
Tablo 3.9. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	47
normalize sıkışma indisi (Cc/e ₀) değerleri	

Tablo 3.10. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	48
sıkışma indisi (C_c) değerleri	
Tablo 3.11. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	48
normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri	
Tablo 3.12. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	50
şişme indisi (C_s) değerleri	
Tablo 3.13. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	51
normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri	
Tablo 3.14. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	51
şişme indisi (C_s) değerleri	
Tablo 3.15. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	52
normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri	
Tablo 3.16. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	53
şişme indisi (C_s) değerleri	
Tablo 3.17. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	54
normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri	
Tablo 3.18. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	54
şişme indisi (C_s) değerleri	
Tablo 3.19. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	55
normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri	
Tablo 3.20. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	57
konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri	
Tablo 3.21. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	57
normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri	
Tablo 3.22. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	58
sıkışma indisi (c_v) değerleri	
Tablo 3.23. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde beklemiş kaolin numunesine ait	58
normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri	

Tablo 3.24. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	59
konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri	
Tablo 3.25. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	60
normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri	
Tablo 3.26. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	60
sıkışma indisi (c_v) değerleri	
Tablo 3.27. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	61
normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri	
Tablo 3.28. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	62
permeabilite katsayısı (k) değerleri	
Tablo 3.29. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	62
normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri	
Tablo 3.30. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	63
permeabilite katsayısı (k) değerleri	
Tablo 3.31. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	63
normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri	
Tablo 3.32. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	65
permeabilite katsayısı (k) değerleri	
Tablo 3.33. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	65
normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri	
Tablo 3.34. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	66
permeabilite katsayısı (k) değerleri	
Tablo 3.35. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	66
normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri	
Tablo 3.36. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	67
içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri	
Tablo 3.37. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait	69
içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri	

Tablo 3.38. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	70
içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri	
Tablo 3.39. 0.5 M CaCl ₂ çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait	71
içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri	
Tablo 3.40. Yıllanma ve 0.5 M çözelti varlığının kaolinin porozitesine etkisi	78
Tablo 3.41. Yıllanma ve 0.5 M çözelti varlığının bentonitin porozitesine etkisi	79

KISALTMALAR LİSTESİ

μm	: Mikrometre
Ca	: Kalsiyum
CaCl_2	: Kalsiyum klorür
cm	: Santimetre
dk	:Dakika
DPH-GCL	: Sıkı ve nemli geosentetik kil tabakası
FSR	: Şişme kapasitesi
GCL	: Geosentetik kil tabakası
gr	: Gram
kg	: Kilogram
M	: Molar
mm	: Milimetre
MSB	: Çok şişen (multiswellable) bir bentonit tipi
NaCl	: Sodyum klorür
Na	: Sodyum
NB	: Normal bentonit
NC	: Normal konsolide kil
nm	: Nanometre
PVF	: Boşluk hacmi miktarı akım
SEM	: Elektron mikroskobu taraması
sn	: Saniye

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez danışmanlığını yapan, tez çalışmalarım boyunca değerli görüş ve önerileri ile zamanını benden esirgemeyen, çalışmalarla ilgili her konuda bana destek olan hocam Doç. Dr. Yeliz YÜKSELEN AKSOY' a;

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen hocam Araş.Gör. Hasan Fırat PULAT' a;

Tüm bu süreçte yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Emel ÇAKAR

Temmuz 2013

ÖZET

Katı atıkların depolanması ile katı atık depolama sahalarının oluşturulması oldukça özenli bir çalışma gerektirmektedir. Atık maddelerin içindeki kirletici su zamanla altında bulunan tabakaların içine sızarak yapısını etkileyecektir. Bazı durumlarda geçirimsiz kil bariyerlerde geosentetik kil örtüler yerine doğal kil karışımları kullanılmaktadır. Katı atık depolama alanlarındaki atık maddelerin, altındaki dolgu tabakasına uzun vadeli etkilerini tespit edebilmek için ise yılanma etkisini incelemek oldukça önemlidir. Ancak, bu alanda literatürde yapılmış çalışma sayısı çok azdır.

Bu çalışma kapsamında doğal killi zeminler ile çalışılmış olup kaolin ve bentonit killeri tercih edilmiştir. Kullanılan zeminlere Na^+ ve Ca^{2+} iyonlarının etkisi ile bu iyonlar varlığında yılanmanın, bu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikli olarak, kaolin ve bentonit killerinin 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri varlığında kıvam limitleri, konsolidasyon parametreleri, permeabiliteleri ve kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra konsolidasyon ve kayma dayanımı parametreleri ile permeabilite değerleri aynı koşullar altında yaklaşık olarak 60 ve 250 (kayma dayanım parametreleri için 190 gün) günlük süreler sonunda tekrar belirlenmiştir. NaCl çözeltisi içinde bekletilmek üzere hazırlanmış numuneler kaolin-saf su, kaolin-0.5 M NaCl, bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M NaCl olmak üzere 4 set, aynı şekilde CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmek üzere hazırlanmış numuneler de kaolin-saf su, kaolin-0.5 M CaCl_2 , bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M CaCl_2 olmak üzere 4 settir.

Genel olarak sonuçlara bakıldığında, kaolin ve bentonitin likit limiti ve bentonitin plastik limiti NaCl ve CaCl_2 varlığında azalma göstermiştir. NaCl varlığında, kaolinin sıkışma indisi (C_c), şişme indisi (C_s), konsolidasyon katsayısı (c_v), permeabilite katsayısı (k) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) parametrelerinde azalma meydana gelmiştir. Bentonitin ise NaCl varlığında şişme indisi, konsolidasyon katsayısı, permeabilite katsayısı ve içsel sürtünme açısı değerleri artış gösterirken, sıkışma indisi değeri azalmıştır. CaCl_2 varlığında ise kaolinin sıkışma indisi, konsolidasyon katsayısı ve permeabilite katsayısı değerlerinde artış görülürken, şişme indisi ve içsel sürtünme açısı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bentonitte ise durum, sıkışma indisi, şişme indisi, konsolidasyon katsayısı, permeabilite katsayısı ve içsel sürtünme açısı parametrelerinde artış şeklindedir.

Elde edilen bu veriler ışığında, yılanmanın NaCl ve CaCl_2 çözeltileri varlığında killi zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu etkilerin daha uzun dönemler için sürekliliği ya da göstereceği değişimler, katı atık depolama sahaları altındaki dolgu tabakalarının uzun dönem bariyer performanslarını inceleyebilmek adına önem arz etmektedir.

Anahtar kelimeler: Bentonit, boşluk suyu kimyası, geçirimsiz kil bariyerler, kaolin, yılanma etkisi

ABSTRACT

Solid waste storage, in other words creation of landfill liners requires quite attentive working. Contaminants in the leakage water may affect the engineering properties landfill liners with time. In some cases, as impervious landfill liner, natural soil mixtures are used instead of geosynthetic clay liners. Investigation of aging effect is important due to examination of long-term influence of contaminants on landfill liners. However, there are limited number of studies are available in literature on this subject.

In this study, natural kaolin and bentonite clayey samples were chosen. The effect of Na^+ and Ca^{2+} ions on the engineering behavior of soils were examined and the aging effect on engineering properties of these soils in the presence of these ions were observed. In this study, atterberg limits, consolidation parameters, permeability and shear strength parameters of kaolin and bentonite clay samples were determined in the presence of 0.5 M NaCl and 0.5 M CaCl_2 solutions. Then, consolidation and shear strength parameters and permeability values were determined under the same conditions for approximately after 60 and 250 days (for shear strength parameters, 190days). There were four different sample sets, these were kaolin-deionized water, kaolin-0.5 M NaCl, bentonite-deionized water, bentonite-0.5 M NaCl. In the same manner, samples that kept in CaCl_2 solution are four sets ie. kaolin-deionized water, kaolin-0.5 M CaCl_2 , bentonite-deionizedwater, bentonite - 0.5 M CaCl_2 .

The results have shown that, liquid limit of kaolin and bentonite and plastic limit of bentonite decreased in the presence of NaCl and CaCl_2 solutions. In the presence of NaCl solution, compression index (C_c), swelling index (C_s), coefficient of consolidation (c_v), coefficient of permeability (k) and angle of internal friction (Φ) parameters of kaolin decreased. Also the compression index value of bentonite decreased whereas swelling index, coefficient of consolidation, coefficient of permeability and angle of internal friction increased. In the presence of CaCl_2 solution, angle of internal friction and swelling index of kaolin decreased whereas compression index, consolidation coefficient and coefficient of permeability increased. The compression index, swelling index, coefficient of consolidation, coefficient of permeability and angle of internal friction parameters of bentonite increased for CaCl_2 solution case.

In the lighth of these results, aging effect on the engineering properties of clayey soils was examined in the presense of NaCl and CaCl_2 solutions. Long-term consistency or variation of these effects is important for examination of long-term barrier performance of landfill liners.

Keywords: Aging effect, bentonite, impervious clay liners, kaolin, pore fluid chemistry

TEZ ORGANİZASYONU

Birinci bölümde yılanmanın ve çeşitli çözeltilerin varlığının killi zeminlerin likit limit, hidrolik iletkenlik, boşluk oranı ve şişme, sıkışabilirlik ve kayma dayanımına etkilerinden, literatürde bu konularda yapılmış çalışmalardan ve kil minerallerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

İkinci bölümde çalışma kapsamında kullanılan killi zemin numunelerinin özellikleri, numune hazırlama yöntemleri ve deneysel çalışmalarda izlenen yöntemler açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Likit limit, plastik limit, sıkışabilirlik, permeabilite, kayma dayanımı deney sonuçları ve elektron mikroskobu analiz sonuçları verilerek yılanma etkisi ve çeşitli çözeltilerin killi zeminlerin mühendislik davranışına etkileri açıklanmaya çalışılmıştır.

Son bölümde ise bu çalışma sonucunda elde edilen genel sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

1.GİRİŞ

Katı atık depolama sahalarının oluşturulması oldukça özenli bir çalışma gerektirmektedir. Atık maddeler içindeki çeşitli kirleticiler ve katyonlar su ile birlikte zamanla alttaki zemin tabakaları içerisine sızarak bu tabakaların yapısını etkilemekte ve yeraltı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Alt tabakalardaki zeminin ve yeraltı sularının kirlenmesini önlemek amacıyla yapılan dolgularda kil gibi geçirimsiz zeminlerin kullanılması uygun olur. Geçirimsiz tabakalarda, bentonit kili, yüksek yoğunluklu polietilen geomembranla (HPDE) kaplı kil tabakalar vs. kullanılabilir.

Katı atık depolama alanının altındaki geçirimsiz kil bariyerlerde kullanılan zeminlerde zamanla görülen değişiklikler genel olarak:

- Boşluk oranı
- Şişme potansiyeli
- Akma gerilmesi
- Kayma dayanımı
- Kristallilik
- Sıkışabilirlik parametreleri
- Permeabilite

gibi özelliklerde etkisini gösterir.

Bir katı atık depolama alanı dolgusu, tasarlanan sahanın altına döşenmiş az geçirgen ya da geçirimsiz bir bariyer olarak düşünülmektedir. Katı atık depolama sahası bozuluncaya kadar (servis süresi boyunca), dolgu tabakası kirletici suyun zemin içine sızarak yer değiştirmesini ve kirletici suyun zehirli bileşenlerinin, alttaki akiferlere veya yakınlardaki nehirlerle zarar vermesini yavaşlatır. Modern katı atık toplama alanları için genellikle, gereken minimum kalınlık ve maksimum izin verilebilir hidrolik iletkenlikte, yüksek yoğunluklu polietilen geomembranla kaplı bir tabaka halinde kil gerekmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (The United States Environmental Protection Agency, USEPA) katı atık depolama sahalarının binlerce yıldır tehdit oluşturduğunu ve bariyerlerin en nihayetinde işlevini yitireceğini öne sürmüştür (Lee and Jones-Lee, 1996). Yani modern katı atık depolama sahaları tasarımı, zemin ve yüzey sularının kirlenmesini geciktirir, ancak önleyemez diyebiliriz.

1.1. Yıllanmanın Katı Atık Depolama Alanlarına Etkisi

Killi dolgu tabakalarının, atık depolama tesisleri için son derece etkili bariyerler olduğu söylenebilir. Çünkü kil mineralleri, uzun dönemli stabilite, şekil değiştirebilme ve sızdırmazlık gibi özellikleri sağlamaya elverişlidir. Katı atık depolama alanlarının altındaki dolgu tabakasında (doğal killi malzemeden, geomembrandan ya da kompozit bir malzemeden oluşmuş olabilir) atıklardan sızan kirlетici suyun etkisiyle ve geçen zamanla bazı karakteristik özelliklerde ve mikro yapıda değişimler olacaktır. Şişme ve boşluk oranındaki değişimlerden dolayı permeabilite ve konsolidasyon katsayısı gibi özellikleri etkilenebilmektedir.

Zamanla katı atık depolama sahalarında kullanılan geçirimsiz bariyer tabakalarında oluşacak değişikliklerin belirlenmesi son derece önemlidir. Bu zaman etkisinin yani yıllanmanın yoğunluk, su içeriği, sıkışabilirlik ve permeabilite gibi özelliklerine etkisi ile ilgili olarak yapılmış çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu özelliklerin katı atık depolama alanlarının hizmet süresi üzerinde etkisi vardır. Son yıllarda Barber (1956), Nalenzy and Li (1967), Pusch (1982), Graham et al (1989), Delage et al (1998) ve Agus and Schanz (2005) gibi araştırmacılar tarafından büyük derinliklerde, nükleer atıkların bertaraf-izolasyonu için tasarlanmış bariyerlerle ilgili olarak iyi derecede sıkıştırılmış şişen killerin davranışına önem veren çalışmalar yapılmıştır. Gehling (1995) yaptığı çalışmada, sabit bir su içeriği ve kütle yoğunluğunda ($w=15\%$ ve $\gamma_d=16.7 \text{ kN/m}^3$) zamana bağlı olarak sıkıştırılmış şişen bir kilde 3 saat sonunda belirgin bir kabarma (9%) olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışmada ayrıca, yine sabit bir kütle yoğunluğu ve su içeriğinde ($w=15\%$ ve $\gamma_d=12.7 \text{ kN/m}^3$) numuneye bir güç algılayıcı yerleştirilerek 70 kPa 'lık bir şişme basıncının, emme basıncından sonra meydana gelen basınca kıyasla 1000 dakikadan sonra geliştiğini gözlemlemişler ve bu olayı zeminde agregalara ait ve agregalar arasındaki boşluklarda (mikro yapıda) meydana gelen su yer değiştirmeleriyle açıklamışlardır. Sıkıştırılmış şişen killerde yıllanma etkisini gözlemlemek için Subba Rao and Tripathy (2003) çalışmalarında, likit limiti 100% olan sıkıştırılmış şişen bir kil numunesinin 7, 15, 30 ve 90 günlük şişme ve büzülme davranışını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, yıllanma etkisinin killi zemin numunesinin sıkışmaya karşı direncini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca yıllanma etkisi ile şişme potansiyelinde azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yıllanmayı etkileyen faktörlerin su içeriği ve doygunluk derecesi olduğu bu çalışmada belirtilmiştir. Yıllanma süresinde zeminlerin mühendislik özelliklerindeki değişikliklerin danelerin yer değiştirmesi ve daneler arasındaki bağların oluşması nedeniyle meydana geldiğini ve bu durumun şişme esnasında, kil yüzeyindeki su emilimini etkilediğini açıklamışlardır. Yıllanmış numuneler üzerinde uygulanan şişme-büzülme deneyleri ile sonraki periyotlarda numuneler daha fazla büzüldükçe, ilk şişme sırasında meydana gelen düşey deformasyonun ortadan kalktığı görülmüştür. (Subba Rao and Tripathy, 2003). Day (1994)'in

yapmış olduğu çalışmada da buna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kompaksiyonla sıkıştırılmış siltli kil kür edildiğinde, şişme ve büzülme potansiyelinde zamanla azalma gözlemlenmiştir. Yıllanma sırasındaki daneler arasında oluşan bağların uzun süreli şişme potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir.

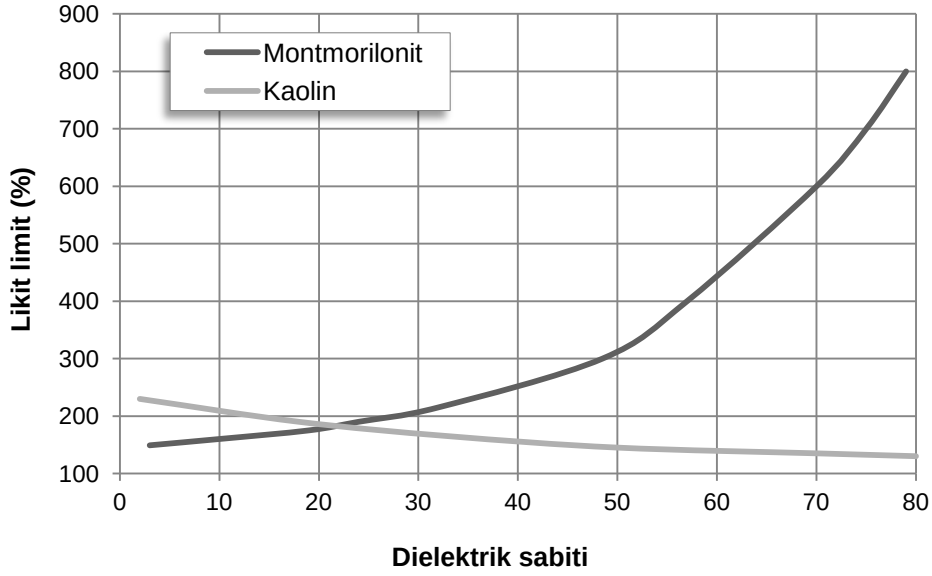
1.2. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Killi Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Boşluk suyu kimyasındaki değişimlerin, kaolin ve bentonit gibi killi zeminlerin mühendislik özelliklerine önemli etkileri bulunmaktadır. Boşluk suyu kimyasındaki değişimin, killi zeminlerin kıvam limiti, permeabilite, sıkışabilirlik parametreleri, boşluk oranı, şişme potansiyeli, kayma dayanımı parametreleri gibi pek çok özelliğine etkisi vardır. Katı atık depolama sahaları altındaki geçirimsiz dolgu tabakalarının bariyer performansını inceleyebilmek için bu etkilerin belirlenmesi son derece önemlidir.

1.2.1. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Likit Limite Etkisi

Likit limit deneyi esasen, likit duruma yaklaşıldıkça, zeminin viskoz dayanımı ve kayma mukavemeti hakkında fikir sahibi olmak için kullanılan bir ölçüdür. Zeminler likit kıvamdayken oldukça küçük bir kayma dayanımına sahiptir. Atterberg limitleri, esasen zemin sınıflandırma ve özellikle kohezyonlu zeminlerin plastik yapısı ile ilgili bilgi sahibi olmak için kullanılmaktadır. Atterberg limitlerini, yüzey alanı, katyon değişim kapasitesi, mineraloji, jeolojik geçmiş, şişme davranışı, sıkışabilirlik, kayma mukavemeti ve kompaksiyon karakteristikleri gibi parametreler ile ilişkilendirebilmek, dolayısıyla zemin davranışını yorumlayabilmek için pek çok çalışma yapılmıştır.

Sridharan and Rao (1975), yaptıkları çalışmada kaolin ve montmorillonit killerinin likit limitini etkileyen mekanizmaları incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları kaolinin likit limit değeri %49, plastik limit değeri %29, montmorillonitin likit limiti değeri %306, plastik limiti değeri %44'tür. Şekil 1.1.' de kaolin ve montmorillonit killerinin likit limit değerlerinin boşluk sıvısının dielektrik sabitine bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Dielektrik sabitinin likit limite etkisi (Sridharan, 1978).

Şekil 1.1.' de görüldüğü gibi kaolin ve montmorillonit killeri, boşluk sıvısındaki değişim bakımından oldukça zıt davranışlar göstermektedir. Kaolinin zemin boşluklarındaki dielektrik sabiti artarken, likit limit değeri azalmaktadır. Montmorillonit için ise durum bunun tam tersidir, likit limit dielektrik sabiti ile artmaktadır.

Likit limit değeri, su-bentonit karışımı için %866 (dielektrik sabiti=80.4) iken bentonit-hekzan karışımı için %149.2 (dielektrik sabiti=1.89)' ye düşmüştür. Kaolin-su karışımının likit limit değeri %127' den kaolin-hekzan karışım durumunda %230'a çıkmıştır (Sridharan, 1978). Eğer elektriksel çekici kuvvetler, killerin likit limitini etkileyen tek faktör olsaydı, her iki kil tipinin, boşluk sıvısının dielektrik sabitinin artması ile aynı trendi göstermesi gerekirdi (Sridharan, 1978).

Gözeneklerdeki dielektrik sabitinin artışının esas olarak iki etkisi vardır:

- Difüz çift tabaka kalınlığını artırır, dolayısıyla likit limit artar.
- Parçacıklar arası çekimi düşürür, dolayısıyla danelerin kümelenme miktarı ve buna bağlı olarak, likit limitte boşluklarda su tutmaya uygun gözenek miktarı azalır.

Pratikte çok düşük iyon yoğunluklarında (örneğin, hekzan ve kalsiyum tetraklorür varlığında) kil daneciklerinin etrafında çift tabaka oluşmaz. Bu sebeple likit limit değeri, esas olarak daneler arası kayma dayanımından etkilenir. Bu tip çözeltiler varlığında, montmorillonite oranla daha fazla kayma dayanımı ve parçacık flokülasyonu olduğu için kaolinin likit limiti daha fazla

olur. Tablo 1.1.' de katyon değeriği ve boyutunun bentonit kilinin özgül ağırlık, likit limit ve plastik limit üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Adsorbe katyon değeriği ve boyutunun bentonitin özelliklerine etkisi (Sridharan, 1978)

Bentonit tipi	Özgöl ağırlık	Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Sulu ortamdaki iyonik yarıçap (Å)
Lityum	2.61	675	49.1	7.30-10.30
Sodyum	2.81	493	49.2	5.60-7.90
Amonyum	2.59	223	55.8	5.37
Potasyum	2.72	233	57.8	3.80-5.32
Magnezyum	2.65	129	49.9	10.80
Kalsiyum	2.65	125	40.6	9.50
Baryum	2.51	103	45.8	8.80
Alüminyum	2.43	108	60.5	-
Demir	2.40	120	63.5	-

Homojenize bentonit örneklerinin özgül ağırlık değeriği katyon değeriği ile oldukça küçük bir değışiklik göstermekte ve bu değeriği katyon değeriği ya da boyutu ile herhangi bir tutarlılık göstermemektedir. Fakat iyonik yarıçap değeri, likit limitte önemli bir değişime sebep olmaktadır. Likit limit genelde sabit bir değeriği için, adsorbe katyonların iyonik yarıçapı arttıkça artmaktadır.

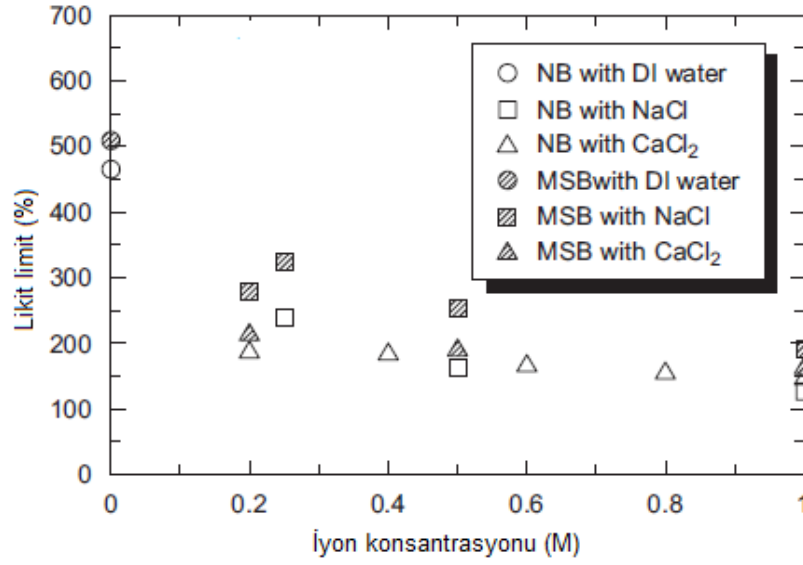
Tek değeriğli bentonitlerin likit limiti, amonyum bentonit < potasyum bentonit < sodyum bentonit < lityum bentonit sırasıyla artmakta ve Gouy-Chapman teorisinden tek bir değeriği elde edilememektedir. Stern çalışmalarında Gouy-Chapman teorisine iki düzeltme önermiştir. Bir katyonun merkezindeki pozitif yükün, parçacığın yüzeyine katyonun yarıçap uzunluğundan daha fazla yaklaşmayacağına ve bazı katyonların özellikle Stern tabaka (diğeri bir deyişle kil yüzeyine bitişik kompakt bir tabaka) tarafından adsorbe edilebileceğine ve çift tabakanın difüze kısmına dahil olmadığına dikkat çekmiştir. Bu şekilde adsorbe olmuş iyonların sayısı, hidratlı iyon çapı azaldıkça artmaktadır (Sridharan, 1978).

Shainberg and Kemper (1966), Stern tabakada bu şekilde adsorbe olmuş iyonların varsayımsal miktarlarını hesaplamışlardır. Buna göre bu oranlar, lityum bentonit için %16, sodyum bentonit için %36, potasyum bentonit için %49 olarak belirlenmiştir. Böyle bir artış, bu

iyonların difüze çift tabakalarının kalınlığında ve buna bağlı olarak likit limitlerinde bir düşüşe sebep olmaktadır. Tablo 1.1.' deki sonuçlara göre çift değerlikli bentonit killerinin iyonik çaplarının likit limit üzerindeki etkisi, tek değerlikli bentonitlere göre daha küçüktür. Sonuç olarak, difüz çift tabaka kalınlığı, likit limit üzerinde en etkili olan faktördür. Ancak, katyon değerliği ve bunun yanında adsorbe katyonların yarıçapı da likit limit üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Sridharan, 1978). Ayrıca iyonların yer değiştirme güçleri birbirinden farklıdır. İyonlar arası yer değiştirme gücü $Li^+ < Na^+ < H^+ < K^+ < NH_4^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Ba^{2+} < Cu^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+} < Th^{4+}$ şeklindedir. Aynı değerliliğe sahip olmasına rağmen K^+ katyonu Na^+ katyonuna göre daha fazla yer değiştirme gücüne sahip olduğundan kil danesindeki Na^+ katyonu ile hemen yer değiştirebilir. Montmorillonitik killerin fiziksel ve kimyasal karakteristiklerine göre; likit limit ile kil yüzdesi arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Sulu bir ortamda, kil daneciklerinin etrafını saran difüz çift tabakanın kalınlığı, bazı bileşimsel faktörlere dayanmaktadır. Bunların arasında; kilin mineral türü, katyon değişim kapasitesi, değişebilir katyon tipi, boşluk suyu özellikleri ve zeminin likit limiti bulunmaktadır. İki değerlikli kalsiyum ve magnezyum iyonları, yüksek değerliklerinden dolayı kil yüzeyi tarafından adsorbe olabilir. Potasyum iyonları, negatif yüklere yaklaştıkça elektrostatik bağlar tarafından sıkı bir şekilde tutulurlar. Potasyum iyonlarının yüksek adsorbsiyon eğilimi ve bunun yanında düşük iyon konsantrasyonu, difüz çift tabaka kalınlığının arttırmasına engel olur. Sodyum iyonları, potasyum iyonlarının tersine, daha küçük olması ve daha büyük hidrasyon enerjisine sahip olması sebebiyle, hareketsiz kalamaz. Sonuç olarak sodyum iyonları, yüzeye zayıf bir şekilde tutunur ve kolaylıkla difüz çift tabakaya dahil olur.

Montmorillonitin aksine, kaolinitik zeminlerin değişebilir sodyum miktarı ile likit limiti arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Bu iki parametrenin yardımı ile de difüz çift tabakanın kaolinin likit limitine katkısı olmadığı yorumu yapılabilir (Sridharan, 1978). Kil danelerinin geometrik dizilimi yani zemin dokusu, kaolinin likit limitini düzene sokar. Partikül kümelenmesi nispeten daha fazla olan zeminler, su tutmak için daha geniş gözenek boşluklarını çevrelemekte ve daha büyük likit limite sahip olmaktadır.

Bentonit kiline ait likit limit değeri ile iyon konsantrasyonu arasındaki ilişki ise Şekil 1.2.' de gösterilmektedir. Burada incelenen normal bentonit ve MS (multiswellable) bentonitin saf su, NaCl ve $CaCl_2$ çözeltileri varlığında likit limit değerlerindeki değişimdir.



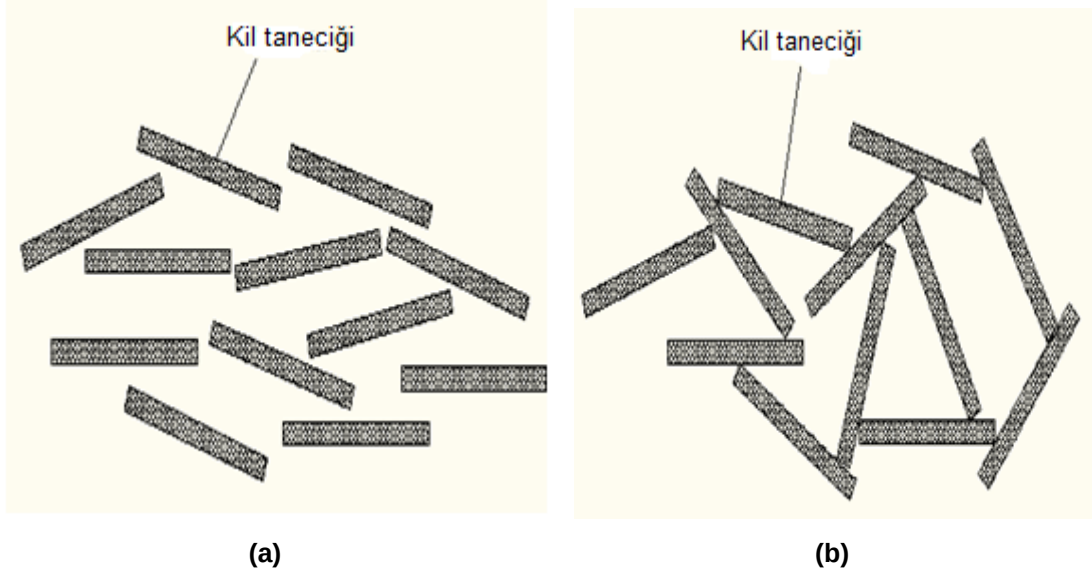
Şekil 1.2. Normal bentonit ve MS bentonitin saf su, NaCl ve CaCl₂ varlığında likit limit değerleri (Katsumi et al, 2008).

Bentonitin likit limiti, kuvvetli bir elektrolitik çözeltiliye maruz kaldıkça düşmektedir. CaCl₂ çözeltisi, MSB ve doğal bentonitin likit limit değerini NaCl çözeltisine göre daha çok düşürmüştür. Bu da tabakalar arasındaki suyun osmotik etkisiyle açıklanabilir. MSB ve doğal bentonit, eşit iyonik kuvvetlerde hemen hemen eşit likit limit değerleri göstermişlerdir (Katsumi et al, 2008).

Likit limit, örselenmiş killerin fiziksel özellikleriyle mühendislik özelliklerini birbiriyle ilişkilendirmek için sıklıkla kullanılan bir parametredir. Horpibulsuk et al (2011) yürüttükleri çalışmalarda, Na-kaolinin likit limit değeri, 0.001 M NaCl çözeltisi içinde %54 iken 0.01 M NaCl içinde %78' e yükseldiğini belirtmişlerdir. Ca-kaolinin likit limit değeri ise, 0.001 M CaCl₂ çözeltisi içinde %59 iken 0.01 M CaCl₂ içinde %81' e yükselmiştir. Boşluk suyunun iyon konsantrasyonu ve değerliğindeki artış kaolin parçacıklarının floküle bir yapı oluşturmaya sebep olur. Bu durum, kayma dayanımı ve likit limitteki artış durumunu açıklar (Sridharan, 1991; Sridharan et al, 1988; Yukselen-Aksoy et al, 2008). İyon konsantrasyonu ve değerliğindeki artış plastik limiti çok az etkiler. Bu nedenle, plastisite indisi bu değerlerin artmasıyla artar. Likit limitteki artış, şişme kapasitesi (FSR) ve aktivite(A) ile de bağlantılıdır (Horpibulsuk et al, 2011). Kaolinin tersine bentonitin likit limiti, iyon konsantrasyonu ve değerliği arttıkça önemli ölçüde azalmaktadır. Horpibulsuk et al (2011), elde ettiği sonuçlara göre, Na-bentonitin likit limit değeri, 0.0001 M NaCl içinde %131 iken 0.001 M NaCl içinde %126' ya düşmüştür. Likit limitteki bu düşüşe difüz çift tabakadaki sıkışma sebep olmuştur

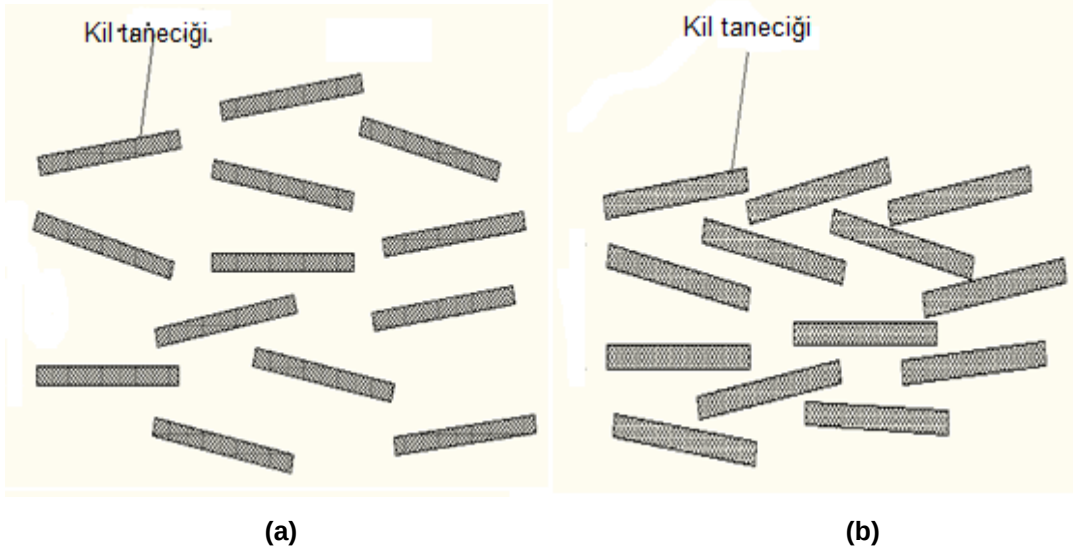
(Horpibulsuk et al, 2011; Sridharan, 1991; Sridharan et al., 1986a, b). Bentonitin dane büyüklüğü, şişme kapasitesi (FSR) ve aktivite değeri, iyon konsantrasyonu ve iyon değerliğinin artması ile azalır (Horpibulsuk et al, 2011).

Kaolin ve bentonit için çeşitli iyon konsantrasyonu ve iyon değerlikleri için olası zemin dokusu Şekil 1.3. ve Şekil 1.4.' de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. İyon konsantrasyon ve değerliğinin kaolinin zemin dokusu üzerindeki etkisi a) Düşük Na^+ ve Ca^{2+} iyon konsantrasyonunda b) Yüksek Na^+ ve Ca^{2+} iyon konsantrasyonunda (Horpibulsuk et al, 2011).

Şekil 1.3.' de görüldüğü üzere yüksek konsantrasyonlu Na^+ ve Ca^{2+} iyonları varlığında kaolin tanecikleri daha floküle bir özellik göstermektedir. Bu floküle yapı içerisinde kaolinin su tutma özelliği, dolayısıyla likit limit değeri artmaktadır (Horpibulsuk et al, 2011).



Şekil 1.4. İyon konsantrasyon ve değerliğinin bentonitin zemin dokusu üzerindeki etkisi a) Düşük Na^+ ve Ca^{2+} iyon konsantrasyonunda b) Yüksek Na^+ ve Ca^{2+} iyon konsantrasyonunda (Horpibulsuk et al, 2011).

Şekil 1.4.' e bakıldığında yüksek konsantrasyonlu Na^+ ve Ca^{2+} iyonları ile bentonit taneciklerinin birbirine yakınlaştığı ve tanecikler arası boşluğun azaldığı görülmektedir. Bu durum, bentonitin yüksek konsantrasyonlu NaCl ve CaCl_2 çözeltileri varlığında, düşük konsantrasyonlu duruma göre daha küçük bir likit limit değerine sahip olmasını açıklamaktadır (Horpibulsuk et al, 2011).

1.2.2. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Hidrolik İletkenliğe Etkisi

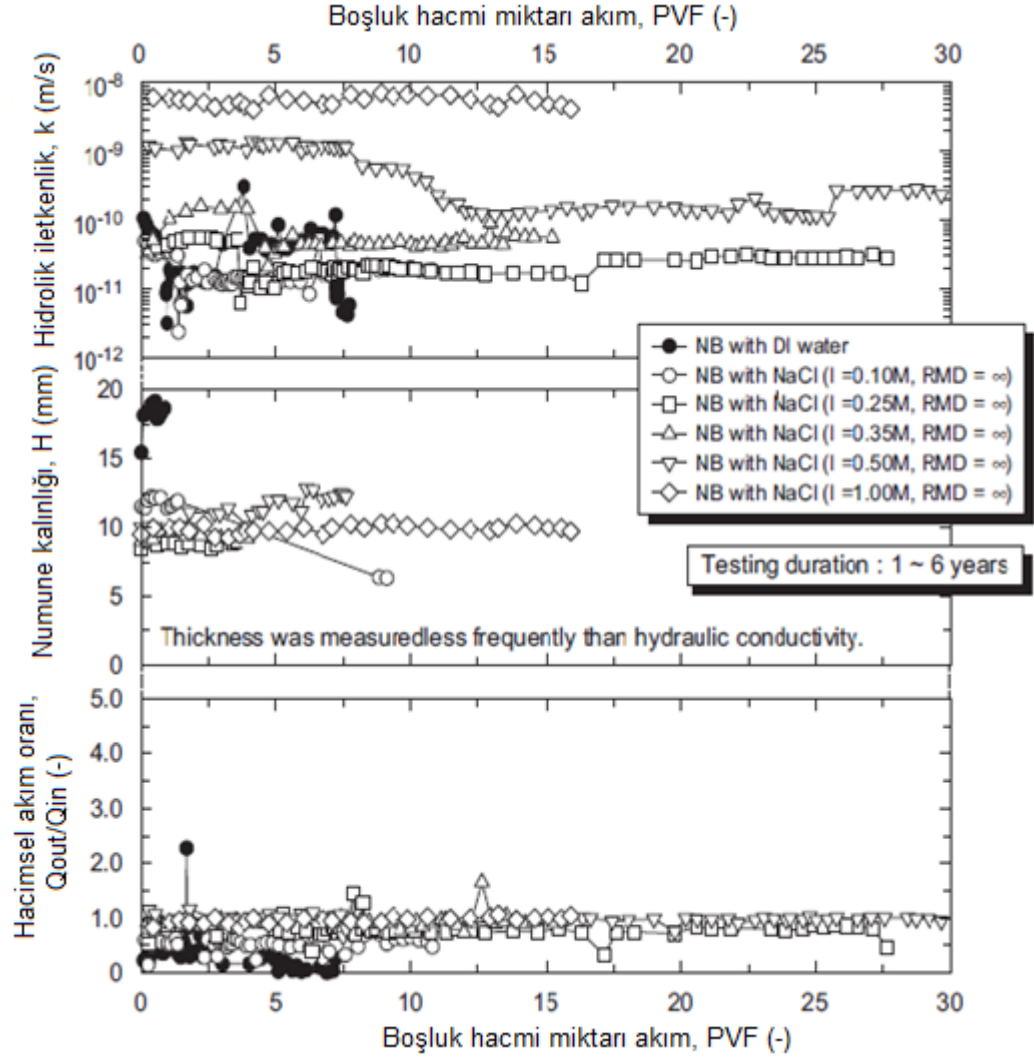
Zeminler daneleri arasında birbirine bağlı boşluklardan oluşan bir yapıya sahiptir. Bu yüzden su, zeminin sahip olduğu bu boşluklarda hareketsiz konumda bulunabileceği gibi bazen de boşluklardan akabilir. Permeabilite (hidrolik iletkenlik katsayısı), doymun bir zeminin belli bir kesitinden belirli bir sürede suyun geçiş hızı olarak tanımlanır. Her ne kadar killi zeminlerin boşluk oranı kumlu zeminlere göre daha fazla ise de kil gibi ince daneli zeminlerde, daneler suyun geçiş yolunu kapatarak suyun geçişine direnç gösterirler ve bu yüzden killi zeminlerin permeabilite katsayıları kumlu ve daha iri daneli zeminlere göre oldukça düşüktür.

Yoğun konsantrasyona sahip elektrolit çözeltileri varlığında killi geçirimsiz bariyerlerin sızdırma olasılığı sebebi ile doğal bentoniti kimyasal uyumluluk açısından geliştirmek adına, pek çok modifiye bentonit çeşidi geliştirilmiştir (Katsumi et al, 2008; Kolstad et al, 2004b; Onikata et al, 1996, 1999a, b). Onikata et al (1996), propilen karbonatın normal bentonit için şişme

aktivatörü olabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada propilen karbonat ve yüksek şişme potansiyeline sahip normal bentonit kompleksi MSB (Multiswellable bentonite- çok şişebilen bir bentonit tipi) olarak adlandırılmıştır. Katsumi et al (2008), çalışmalarında iki adet modifiye edilmiş bentonit tipinin hidrolik iletkenliğini araştırmışlardır. Bunlar, MSB ve DPH-GCL (sıkı ve önceden nemlendirilmiş geosentetik kil tabakası, dense-prehydrated geosentetic clay liner)' dir. Bu çalışmada bu iki bentonitin bariyer malzeme olarak uzun dönem dayanımları ve hangi bentonitin kimyasal çözeltileri sızdırma özelliğinin daha az olduğu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre NaCl çözeltisi varlığında, MS bentonitlerin hidrolik iletkenliklerinin normal bentonitlere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

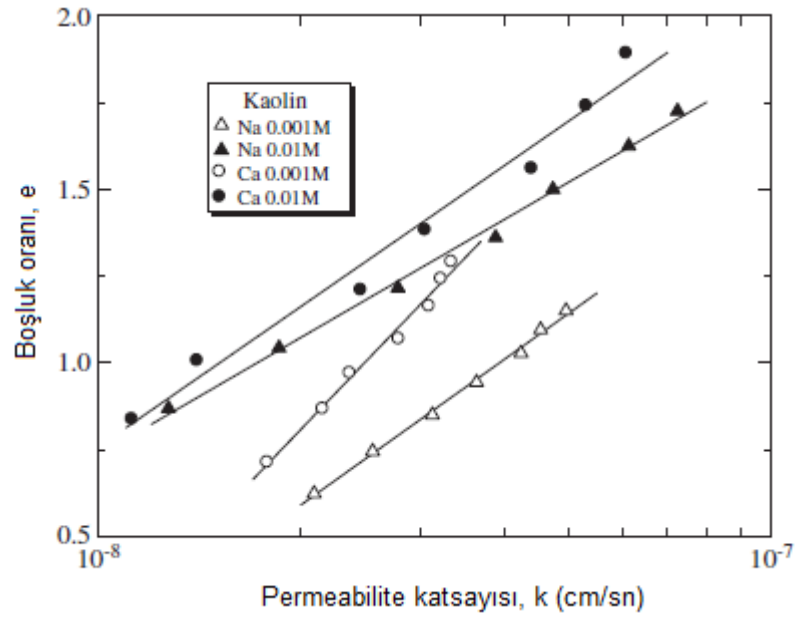
Bentonit ve geosentetik kil tabakalarının bu alanda uygulanabilirliği ve kimyasal uyumluluğu açısından pek çok çalışma yapılmış ve kullanılan kimyasalın tipi ve konsantrasyonun hidrolik iletkenliği etkilediği görülmüştür. Bu etki, elektrolit kimyasal çözeltinin konsantrasyonu arttıkça hidrolik iletkenliğin arttığı yönünde olmuştur (Jo et al, 2001; Katsumi et al, 2008; Petrov and Rowe, 1997; Ruhl and Daniel, 1997; Shackelford et al, 2010; Shan and Lai, 2002; Touze-Foltz et al, 2006). Hidrolik iletkenlik değerlerine göre, MSB ve DPH-GCL' ler katı atık depolama alanlarında bariyer malzeme olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.

Katsumi et al (2008), yaptıkları deneyler sonucunda doğal bentonit ve MSB' nin hidrolik iletkenliğini inceleyebilmek için, permeabilite katsayısı (k), numunenin yüksekliği (H), hacimsel akım oranını ($Q_{dış}/Q_{iç}$) ve zaman içinde boşluklardan geçen akımı (PVF) baz almışlardır. Doğal bentonitin saf su ile karıştırılmış durumdaki hidrolik iletkenliği oldukça düşüktür, $k \approx 1,0 \cdot 10^{-11}$ m/s (Şekil 1.5.), NaCl çözeltisi, bentonitin hidrolik iletkenliğini arttırmıştır. NaCl çözeltisinin molar konsantrasyonu $I=0.1$ M iken $k=1,9 \cdot 10^{-11}$ m/s, $I=1.0$ M iken $k=4,2 \cdot 10^{-9}$ m/s' dir. Ancak, bentonitin şişme kapasitesi ve bariyer performansını gerileten çok güçlü elektrolitik kimyasal çözeltiler, hidrolik iletkenliğini önemli ölçüde düşürmektedir (Katsumi et al, 2008). NaCl çözeltisi varlığında, MSB lerin hidrolik iletkenlikleri normal bentonitlere göre daha düşüktür. MSB nin, NaCl konsantrasyonu $\leq 1.0M$ iken hidrolik iletkenlik değeri, $k \approx 1,0 \cdot 10^{-11}$ m/s' dir. Ancak, NaCl konsantrasyonu $2.0M$ iken MSB ile normal bentonitin hidrolik iletkenlikleri hemen hemen aynıdır. Bentonitin hidrolik iletkenliği büyük ölçüde şişme kapasitesiyle bağlantılıdır. Bentonit, çok iyi bir bariyer performansına sahiptir. Çözeltinin tipi ve konsantrasyonu ile bentonitin tipi önemli olmaksızın, şişme değeri 20ml/2g zemin iken bu değer (k) $1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s' den küçüktür.



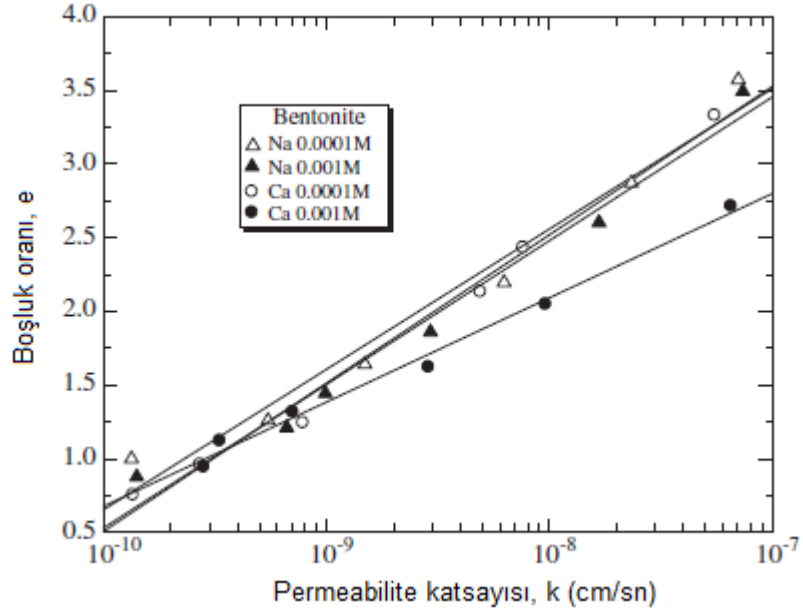
Şekil 1.5. Saf su ve NaCl varlığında doğal bentonitin hidrolik iletkenlik, numune kalınlığı ve boşluklardan geçen akım hacmi oranındaki değişimler (Katsumi et al, 2008).

Kaolinin boşluk oranının iyon konsantrasyonu ile değişimi Şekil 1.6.' da görülmektedir. (Horpibulsuk et al, 2011). Aynı boşluk oranı değerinde, kaolinin permeabilitesi iyon konsantrasyonu ve değeri arttıkça azalmaktadır. Örneğin, boşluk oranı 1.0 iken, iyon konsantrasyonu ve değeri 0.001 M Na^+ den 0.01 M Ca^{+2} ye yükseldiğinde %67 oranında düşmektedir.



Şekil 1.6. Kaolinin çeşitli iyon konsantrasyon ve değerliklerindeki e-logk ilişkisi (Horpibulsuk et al, 2011).

Bentonitin boşluk oranının, Ca^{2+} ve Na^+ iyonları varlığında iyon konsantrasyonu ile değişimi Şekil 1.7.' de gösterilmektedir (Horpibulsuk et al, 2011). Kaolinin tersine bentonitin permeabilitesi, aynı boşluk oranı değerinde, iyon konsantrasyonu ve değerliği arttıkça artmaktadır.



Şekil 1.7. Bentonitin çeşitli iyon konsantrasyon ve değerliklerindeki e-logk ilişkisi (Horpibulsuk et al, 2011).

Değişik boşluk suyu kimyalarında, şişme özelliği gösteren ve göstermeyen killere için, genellenmiş gerilme durumu (e/e_L), permeabilitedeki değişimi tanımlamada önemli bir parametredir. Horpibulsuk et al (2007) ve Nagaraj et al (1993)' in yaptıkları çalışmalara göre, iyon konsantrasyonu ve değerliğindeki değişikliklerle permeabilitede görülen değişim, genellenmiş gerilme durumundaki (e/e_L) değişim ile açıklanabilmektedir. Kaolin gibi şişmeyen killerde, aynı boşluk oranı değerinde iyon konsantrasyonu ve iyon değerliği arttıkça, e_L değerindeki artışa bağlı olarak e/e_L değeri azalmakta bunun sonucunda da permeabilite değeri azalmaktadır. Bentonitte ise, iyon konsantrasyonu ve değerliği arttıkça genellenmiş gerilme durumu (e/e_L), e_L değerinin azalmasına bağlı olarak artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da aynı boşluk oranındaki permeabilite değeri artmaktadır.

Doygun kil içinden geçen sıvı akımını etkileyen faktörler:

- Permeabilite ile ilgili olanlar: viskozite, yoğunluk ve hidrolik eğim
- Zemin özellikleri: boşluk oranı, zemin danelerine tutunmuş su tabakası kalınlığı ve zemin dokusu olarak sınıflandırılabilir (Sridharan, 1978).

Bu faktörlerin pek çoğu birbirinden bağımsız olduğu için, hangisinin daha önemli olduğuna karar vermek zordur. Rao and Sridharan (1979) çalışmalarında daha çok, montmorillonitin hidrolik iletkenliğini etkileyen faktörlerin üzerinde durmuşlardır. Tablo 1.2.'de iyon değeri, katyon tipi ve konsantrasyonunun permeabiliteye etkisi gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Değişebilir katyon tipi ve boşluk suyu özelliklerinin montmorillonitin permeabilite katsayısına etkisi

İyon değeri etkisi	Montmorillonit	$KCa^{+2}/KNa^{+}=28$ (e=2.5)
	Bentonit	$KCa^{+2}/KNa^{+}=28$ (e=2.0)
Konsantrasyonun etkisi	Montmorillonit	$K0.1N NaCl/K0.001N NaCl =10^4$ (e=2.0)

Belli bir boşluk oranı değerinde, kalsiyum iyonlarının değişebilir sodyum iyonlarının yerini alması ile montmorillonitin permeabilite katsayısı, neredeyse 30 kat artmaktadır. Araştırmalar, akım kanallarını sıkıştırıp zemin içinde suyun akabileceği boşlukları azaltması ve ayrılmış kil dokusunu harekete geçirmesi sebebi ile difüz çift tabakanın permeabiliteyi azalttığını göstermiştir. Ayrıca tek değerlikli sodyum iyonları ile kalsiyumun yer değiştirmesi, difüz çift tabakanın kalınlığında etkili bir azalmaya sebep olmaktadır.

1.2.3. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Boşluk Oranı ve Şişme Davranışına Etkisi

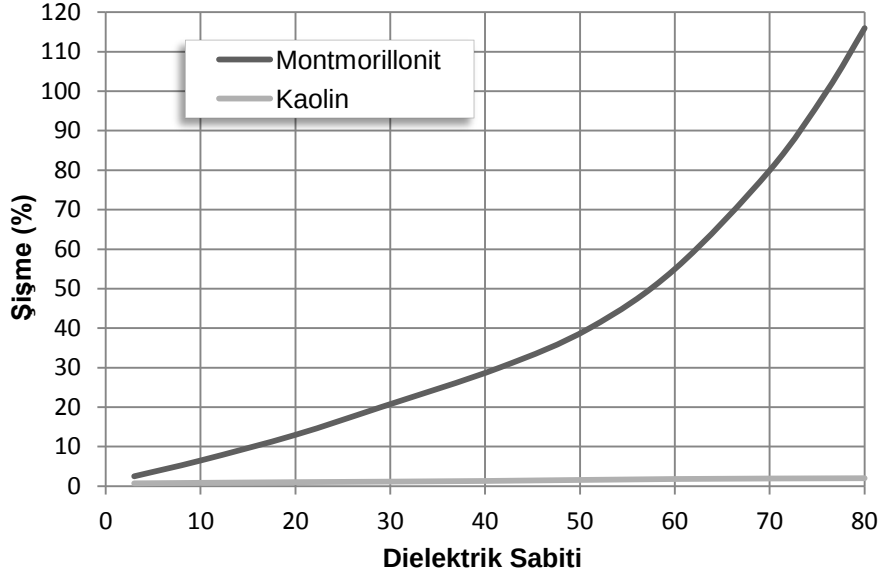
Montmorillonitin yüksek şişme potansiyeline sahip olması ve dolayısıyla düşük hidrolik iletkenliğe sahip olması, osmotik şişme ile ilişkilendirilebilir. Montmorillonit mineralinin kristal iç tabakasında bulunan değişebilir katyonlar, montmorillonitin şişmesinde önemli rol oynamaktadır. Değişebilir kısımlar, Na-montmorillonit gibi tek değerlikli katyonlardan meydana gelmişse, katyonların negatif elektriksel yükü dolu iç tabakalara nüfuz edebilmesi için gereken güç yetersiz kalır ve böylelikle su molekülleri, bu tabakalara kolaylıkla geçebilir (Katsumi et al, 2008; Low, 1987; Norrish and Quirk, 1954; Posner and Quirk, 1964). Montmorillonit kristal iç tabakasındaki boşluklar, su ile sınırsız olarak genişleyebilir ve bentonite bağlı su yoğun bir şekilde artmış olur. Yani osmotik şişme, bentoniti çok iyi bir hidrolik bariyer durumuna getirir. Ancak değişebilir kısımlar, Ca-montmorillonit gibi çok değerlikli katyonlardan meydana gelmişse, su moleküllerinin araya girmesi sınırlanır ve iç tabakalardaki boşluklar azalır. Çünkü, çok değerlikli katyonlar tek değerlikli katyonlara göre iç tabakayı daha çok kendine çeker (Katsumi et al, 2008; Kjellander et al, 1988; Posner and Quirk, 1964). Böylelikle, çok değerlikli katyonlar, kristal iç tabakanın genişlemesini yani bentonitin osmotik şişmesini kısıtlar. Ayrıca,

bentonitten geçen çözeltinin kimyasal bileşimi de şişmeyi ve bariyer performansını etkiler. Çözeltiler içindeki iki ve üç değerlikli katyonlar, hidrolik iletkenliği önemli ölçüde artırır. Bunun yanında, yüksek konsantrasyonlu tek değerlikli katyon barındıran bir çözelti varlığında, bentonitin osmotik şişmesi yine kısıtlanabilir (Alther et al, 1985; Jo et al, 2001; Katsumi et al, 2008; Petrov ve Rowe, 1997).

Çift tabaka teorisi, montmorillonik ya da şişen zeminlerin fiziksel özelliklerini açıklamak adına son derece önemlidir. Montmorillonik zeminlerin likit limit değeri, iyon konsantrasyonu ve değeri arttıkça, difüz çift tabakanın sıkışmasına bağlı olarak düşer. Kaolinitik, yani şişme özelliği göstermeyen zeminlerde iyon konsantrasyonu ve değerliğinin artması ise floküle yapı oluşumunu artırır. Bununla birlikte, kayma dayanımı ve likit limit değerindeki artış floküle yapı oluşumu ile açıklanabilir. Çünkü floküle yapıya sahip bir zemin, dispers bir yapıdaki zemine göre daha büyük bir kayma dayanımı ve su tutma kapasitesine sahiptir (Horpibulsuk et al, 2011; Sridharan, 1991; Sridharan et al, 1988). Daha önce yapılan çalışmalarda kaolin ve bentonitin akış davranışları da araştırılmıştır. Lagaly (1989) kil içindeki pH ve kalsiyum iyonları ile homo-iyonik sodyum iyonları için akış eğrilerinin, bentonit ve kaolin için dağılımının farklı olduğunu belirtmiştir. Asidik ortamda, homo-iyonik sodyum bentonit parçacıkları kart biçiminde (yüzey - köşe) şekil alırken, alkalimli ortamda bant şeklinde (yüzey- yüzey) şekil alır. Bu yüzden, homo-iyonik sodyum bentonitin farklı pH koşullarına maruz kalması ile akış davranışı (akma gerilmesi) değişir.

Dielektrik sabitindeki değişimler, partiküller arası sistemde pek çok değişiklik meydana getirmektedir. Kil parçacıkları, bir elektrolit ile temasa geçtiğinde, her bir danenin etrafında bir difüz çift tabaka şekil almaktadır. Diğer faktörler sabit iken, difüz çift tabakanın kalınlığı gözenek ortamının iyon yoğunluğundaki değişim ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Çift tabakaya belli bir mesafeden sonra, gözenek sıvısı serbest kalır ve yüzey yükünün etki alanından çıkar (Sridharan, 1978).

Şekil 1.8.' de 0.0625 kg/cm^2 lik normal basınç altında, kaolin ve montmorillonitin gözeneklerdeki iyon yoğunluğunun şişmeye etkisi görülmektedir.



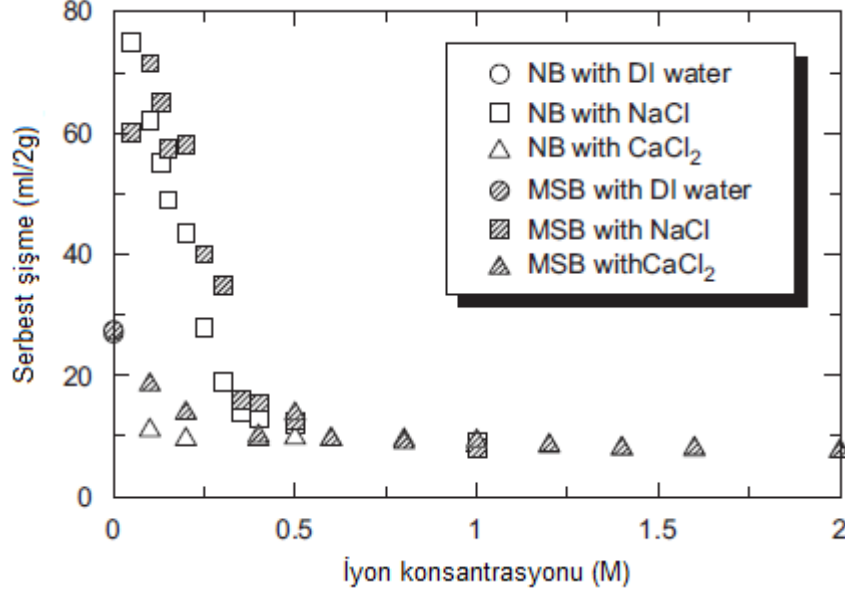
Şekil 1.8. Dielektrik sabitinin şişmeye etkisi (Sridharan, 1978).

Elde edilen sonuçlara göre, montmorillonit önemli ölçüde şişme özelliği gösterirken, kaolin için şişme değeri, iyon yoğunluğunun değişmesinden neredeyse etkilenmemiştir. İyon yoğunluğunun artmasıyla bentonitteki şişmenin büyük oranda artması, çift tabaka kalınlığını oldukça arttırmaktadır.

Kaolinde, dielektrik sabitinin değişmesiyle, çift tabaka kalınlığında kayda değer bir değişim meydana gelmez ancak, dielektrik sabitinin düşmesi daneler arası çekimi artırır. Montmorillonitte ise dielektrik sabitinin difüz çift tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi, kil dokusu üzerindeki etkisine oranla daha belirgindir. Böylelikle, gözeneklerdeki iyon yoğunluğunun artması difüz çift tabaka kalınlığının artmasına sebep olur (Sridharan, 1978).

Delage et al (2006), MX80 bentoniti üzerinde yürüttüğü çalışmaya göre belirli bir su içeriği ve yoğunlukta, sızıntı suyuna maruz kalmış örneklerin ilk günlerde boşluk oranında belirgin bir değişiklik olmadığını, ancak 90 günlük bekleme süresinden sonra boşluk oranının yillanma etkisi ile belirgin bir azalma gösterdiğini ($e=0.649$ ' dan $e=0.461$ 'e) belirtmişlerdir. Bu düşüş ortalama boşluk yarıçapının azalma ($1.9 \mu\text{m}$ ' den $1.5 \mu\text{m}$ ' ye) göstermesi ile teyit edilmiştir. Daha farklı su içeriği ve yoğunluk değerlerinde elde edilen boşluk oranı değeri farklı olacaktır. Ancak zamanın etkisini göstermesi için beklendiğinde (90 gün), sızıntı suyunun etkisi ile zamanla boşluk oranında azalma ve şişmede de artış gözlemlenebilir (Delage et al, 2006).

Katsumi et al (2008), bentonitin serbest şişme parametresini saf su, NaCl ve CaCl_2 çözeltileri varlığında incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar Şekil 1.9.' da gösterilmektedir.

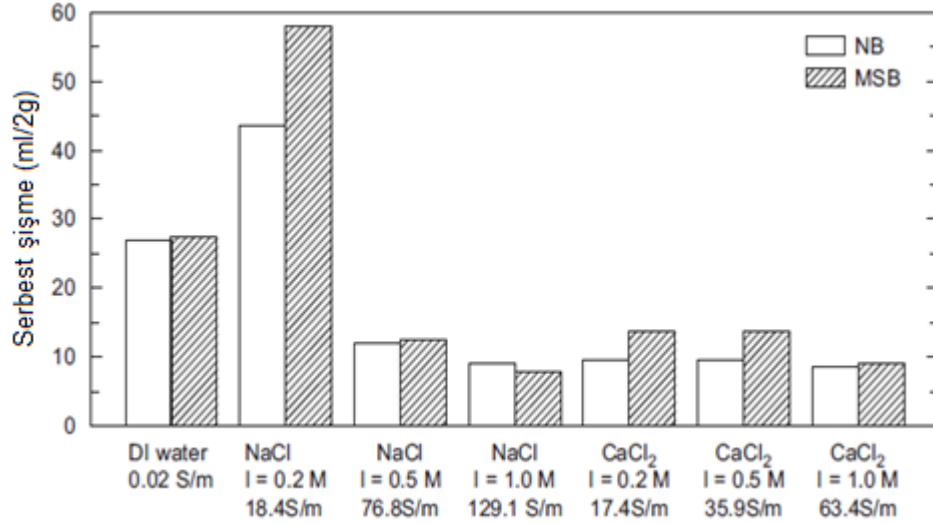


Şekil 1.9. Saf su ve NaCl ve CaCl_2 çözeltileri varlığında bentonitin şişme grafiği (Katsumi et al, 2008).

Bentonitin şişme kapasitesi ve buna bağlı bariyer performansı, yüksek molar konsantrasyona sahip ve çok değerlikli iyon barındıran elektrolitik çözeltiler varlığında genellikle küçüktür. Bentonit için şişme değeri, kimyasal çözeltinin iyonik kuvveti arttıkça üssel olarak düşme göstermiş ve iyonik kuvvet 0.5 M değerini aştığında hemen hemen sabit kalmıştır. CaCl_2 çözeltisi varlığında şişme değeri NaCl çözeltisi varlığında elde edilen şişme değerinden daha düşüktür. Bu da, çift tabaka teorisiyle tutarlı bir sonuçtur (Katsumi et al, 2008; Lambe, 1958).

İnce bir bentonit kil tabakası üzerine yapıştırılmış geomembran ya da geotekstilden oluşmuş bir malzeme olan geosentetik kil tabakaları (GCL) kolay kurulması ve suya karşı iyi bir bariyer olması sebebiyle katı atık depolama alanları için tercih edilen bir materyaldir. Geosentetik kil tabakaları, katı atık depolama alanları için bariyer malzeme olarak kullanıldıklarında ise bozunmaları dikkatli bir şekilde izlenmelidir. Çünkü içerdikleri bentonit tabakası, elektrolit kimyasal çözeltiler varlığında, yetersiz bir şişme özelliği gösterebilir (Katsumi et al, 2008; Norrish, 1954; Rowe et al, 2004; Shackelford et al, 2010). Katsumi et al (2008), normal bentonit ile MS bentonitin NaCl ve CaCl_2 çözeltilerinin serbest şişme değerini çeşitli iyon konsantrasyonlarında kıyaslamışlardır (Şekil 1.10). Bu çalışmada, doğal bentonit, çok şişebilen bir tür bentonit olan MSB ve sıkı bir geosentetik kil tabakası olan DPH-GCL için

yaptıkları deneylerle uzun dönemli hidrolik iletkenlik değerlerini, NaCl ve CaCl₂ kimyasal çözeltileri varlığında incelemiştir. Bu çalışmalara göre; MSB, ≤ 0.5 M kimyasal çözeltiler varlığında yeterli şişmeyi göstermektedir.



Şekil 1.10. Normal bentonit ile MS bentonitin NaCl ve CaCl₂ varlığında şişme değerlerinin karşılaştırılması (Katsumi et al, 2008).

NaCl ve CaCl₂ çözeltilerinin iyonik kuvvetleri eşitken, CaCl₂ çözeltisinin elektriksel iletkenliği NaCl çözeltisine göre daha düşüktür. Ayrıca, CaCl₂ ve NaCl çözeltilerinin iyonik kuvvetleri eşit olsa da, şişme değerleri birbirinden çok farklıdır. Kristal iç tabakadaki katyonlar, tabakalar arası negatif yükleri çekerler. Elektrolitik çözeltinin molar konsantrasyonu ne kadar çok olursa, iç tabakadaki katyonlar tabakalar arasını o kadar kuvvetli çeker. Yani, tabakalar arasındaki boşluk yeterince genişleyemez. Sonuç olarak, bentonitin şişme kapasitesi, konsantrasyonu çok yüksek olan bir çözeltiyle kısıtlanabilir (Katsumi et al, 2008).

1.2.4. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Sıkışabilirliğe Etkisi

Sıkışabilirlik davranışları incelendiğinde kaolin ve montmorillonitin birbirine zıt davranışlar sergilediği bilinmektedir (Sridharan, 1978; Di Maio et al, 2004). Bentonitin dielektrik sabitinin artması ile kayma dayanımı azalmakta ve dışsal basınç altında denge boşluk oranı değeri artmaktadır. Montmorillonitik killer, yüksek iyon yoğunluğu ve yüksek boşluk oranı ile dışsal bir kuvvete karşı koyabilmektedir. Sıkışabilirlik, esas olarak elektriksel itici kuvvetlerden etkilenmektedir. Yani, dışsal bir basınç altındaki sıkışma, çift tabaka itici kuvvetlerine direnç göstermektedir. Ortamın iyon yoğunluğunun artması ile temel itme kuvveti artmaktadır.

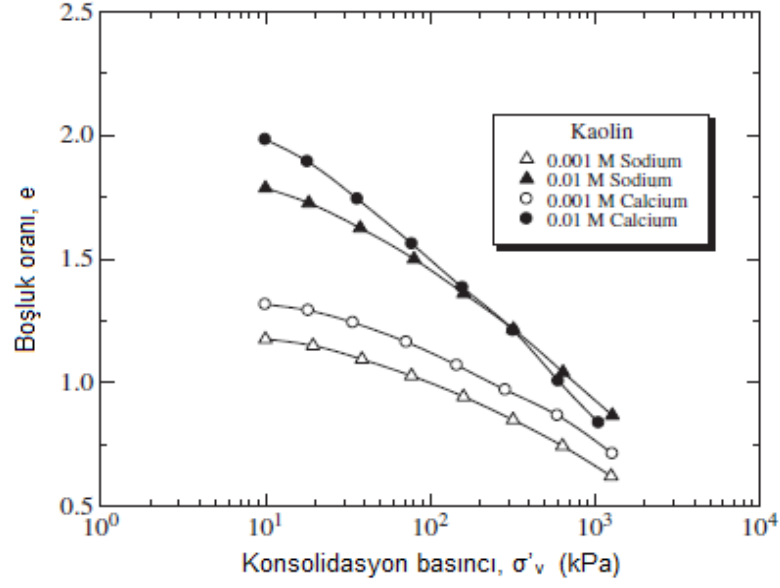
Örselenmiş zeminlerin kayma dayanımı, sıkışma ve permeabilite gibi mühendislik özellikleri kendilerine has olup, doğal killerin davranışlarını incelemede referans olarak kullanılabilir. (Burland, 1990; Horpibulsuk et al, 2007; Horpibulsuk et al, 2011). Örselenmiş zeminlerin temel mühendislik özellikleri esas olarak genellenmiş gerilme durumuna e/e_L dayanmaktadır (Horpibulsuk et al, 2004; Horpibulsuk et al, 2007; Horpibulsuk et al, 2011; Mitchell, 1996; Nagaraj and Miura, 2001; Nagaraj et al, 1993, 1995, 1998). Nagaraj and Murty (1986), çeşitli örselenmiş killerin sıkışma doğrusunu analiz etmişler ve sıkışma doğrusunun likit limitteki boşluk oranı e_L ile normalize edilebileceğini ortaya çıkarmışlardır. Bu normalize edilmiş doğru da ;

$$e/e_L = 1.23 - 0.276 \log \sigma'_v \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. Denklemden e boşluk oranı, σ'_v ise efektif düşey gerilme (kPa) değeridir.

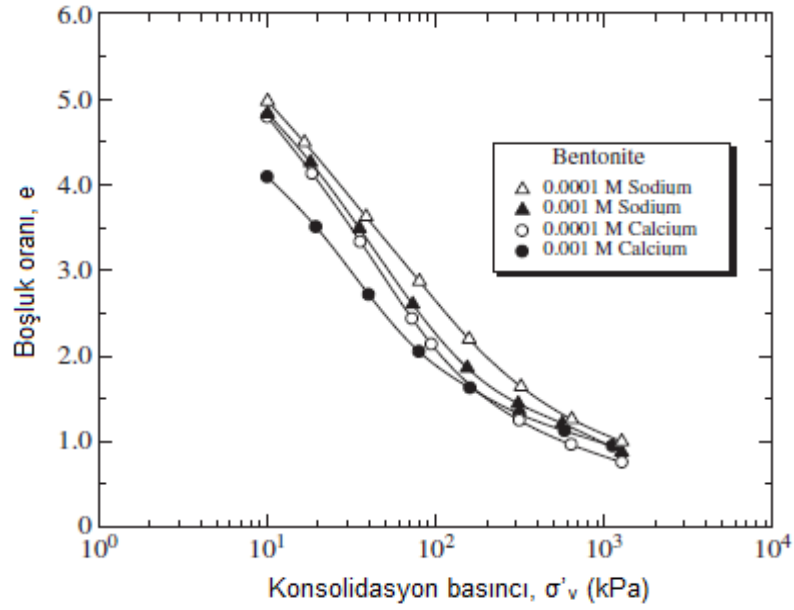
Literatür çalışmalarına göre belirli bir kil için, herhangi bir su içeriğindeki (boşluk oranındaki) kil dokusu likit limitle orantılıdır (Horpibulsuk et al, 2007, 2011). Aynı zamanda, herhangi bir boşluk oranındaki permeabilite değeri, likit limitteki boşluk oranı ile orantılıdır ve herhangi bir kilin permeabilitesi genellenmiş gerilme durumuna (e/e_L) bağlıdır, e/e_L arttıkça permeabilite de artar.

Şekil 1.11.' de kaolinin boşluk oranı ile konsolidasyon basıncı ilişkisi görülmektedir. Buna göre kaolinin, aynı boşluk oranı değerinde, iyon konsantrasyonu ve değeri arttıkça daha yüksek düşey konsolidasyon basıncı gösterdiği söylenebilmektedir (Horpibulsuk et al, 2011).



Şekil 1.11. Kaolinin farklı iyon konsantrasyonu ve değerliklerinde konsolidasyon basıncı-boşluk oranı ilişkisi (Horpibulsuk et al, 2011).

Horpibulsuk et al (2011), aynı incelemeyi bentonit için de yapmış, bu ilişki Şekil 1.12.' de gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Kaolinin çeşitli iyon konsantrasyonu ve değerliklerinde konsolidasyon basıncı-boşluk oranı ilişkisi (Horpibulsuk et al, 2011).

Aynı boşluk oranı değerinde, bentonitin düşey konsolidasyon basıncının, iyon konsantrasyonu ve iyon değeri arttıkça düştüğü görülmektedir (Horpibulsuk et al, 2011). Ayrıca, logaritmik ölçekte boşluk oranı ve düşey konsolidasyon basıncı arasındaki ilişki lineer değildir. Ayrıca Low (1980)'in 35 adet sodyum-bentonit numunesi üzerinde yapmış olduğu çalışmada, elde edilen sonuçların difüz çift tabaka varsayımları ile örtüştüğünü belirtmiştir.

1.2.5. Boşluk Suyu Kimyası ve Yıllanmanın Kayma Dayanımına Etkisi

İnşaat mühendisliğinde, zeminlerin kayma dayanımının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Kayma dayanımının bilinmesi ile tüm stabilite problemleri analiz edilebilir. Diğer materyallerin aksine zeminin kayma dayanımı, bilinen birkaç parametreye dayanarak belirlenemez. Ayrıca, killi zeminlerin kayma esnasındaki davranışı iri daneli zemin davranışından çok daha karmaşıktır. Kilin mineral tipi, su içeriği, boşluk sıvısının içeriği, gerilme geçmişi, kesme sırasındaki drenaj durumu, gerilme izi, zemin dokusu gibi pek çok faktör killerin kayma davranışını etkilemektedir (Sridharan, 1978).

Kil parçacıkları arasında hem itici hem çekici elektriksel kuvvetler meydana gelmektedir. Çekici kuvvetler, boşluk ortamının dielektrik sabiti ile ters orantılı olarak değişirken, itici kuvvetler dielektrik sabiti ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Sridharan, 1978; Sridharan and Rao, 1971). Çekici kuvvetlerdeki artışın daneler arası kayma dayanımını arttırdığı, itici kuvvetlerdeki artışın ise kayma dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Yani, dielektrik sabitindeki bir azalma, beraberinde çekici kuvvetlerde artış, itici kuvvetlerde ise düşüş meydana getirmekte ve tüm bunların etkisi ile kayma dayanımı artmaktadır (Sridharan, 1978). Likit limit değerinde dielektrik sabitini azaltmak, parçacıkların kümelenmesini ve sıvı tutmaya uygun boşluk miktarını artırır. Bu da kilin kayma dayanımını partiküler boyutta etkilemektedir.

Sridharan and Rao (1979), yürüttükleri deneysel ve teorik çalışmalarla killerin kayma davranışını Denklem 1.2. ile açıklamışlardır.

$$\bar{c} = \sigma - \bar{u}_a - \bar{u}_w - R + A \quad (1.2)$$

$\bar{c}$: Efektif temas gerilme değeri

σ : Birim alana uygulanan dışsal basınç

$\bar{u}_w$: Efektif boşluk suyu basıncı

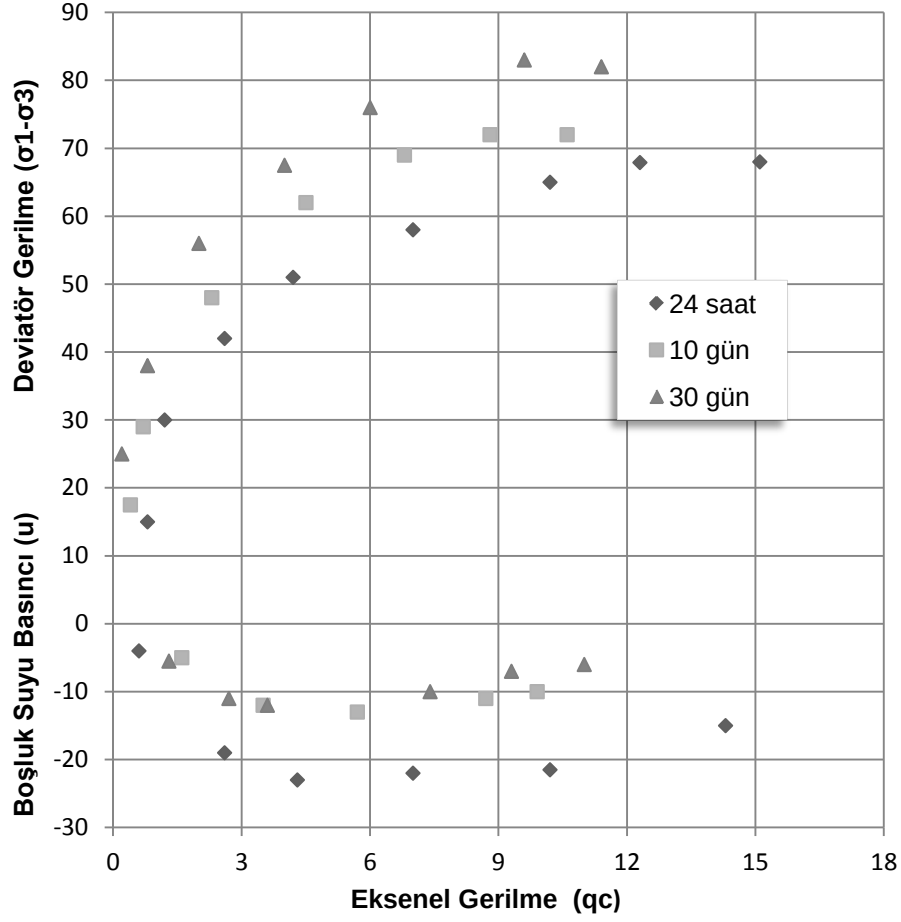
$\bar{u}_a$: Efektif boşluk hava basıncı

Denklem 1.2. efektif gerilmeyi var olan mineral-mineral etkileşimini kabul ederek tanımlamaktadır. Doygun killerin kayma dayanımının, daneler arası sürtünme direnci ya da boşluk sıvısının viskozitesi ile oluştuğu düşünülmüştür. Allam and Sridharan (1984), viskoziteden elde edilen kayma dayanımının, deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerden çok daha küçük olduğunu kanıtlamışlardır. Böylece, kayda değer bir kayma dayanımı elde etmek için zemin sisteminde köşe-yüzey bağlanmasının ya da mineral-mineral etkileşiminin kaçınılmaz olduğu sonucuna varmışlardır (Sridharan, 1978). Denklem 1.2. itici kuvvetlerin, kil danelerini birbirinden ayırmaya meyilli olması, çekici kuvvetlerin kil danelerini bir araya getirmeye yatkın olması sebebi ile bu şekilde formüle edilmiştir. Kil daneleri arasında itici ve çekici kuvvetlere sebep olan pek çok faktör bulunmaktadır. Bugüne kadar bu kuvvetleri nicelik olarak belirleyecek güvenilir bir yöntem bulunamamıştır. Ancak Sridharan ve Rao (1975) yaptıkları çalışmada bu kuvvetlerin yapısını incelemişler ve iki kil danesi arasında itmeye sebep olan başlıca kuvvetin, difüz çift tabakaların etkileşiminden kaynaklandığını ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca, daneler arası uzaklık da dahil olmak üzere tüm faktörler sabit kaldığında itici kuvvet, gözenek ortamının dielektrik sabiti ile orantılıdır.

Kaolinin kayma dayanımı düşük oranlardaki iyon yoğunluğunda, dielektrik sabiti arttıkça azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki bir artış, itici kuvvette azalmaya, çekici kuvvette ise artışa sebep olmaktadır. Ayrıca, efektif gerilmedeki (dielektrik sabitindeki artışın sebep olduğu) herhangi bir düşüş de sistemin kayma dayanımını azaltmaktadır.

Sridharan (1978)' in yürüttüğü çalışmalarda bentonit de kaolin ile benzer bir davranış göstermektedir. Farklı dielektrik sabiti değerlerinde her iki kil tipi de deneylere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre her iki kilin gerilme değerinin, modifiye efektif gerilme değerinden etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışma sonuçlarına göre kaolinle kıyaslandığında, bentonitteki iyon yoğunluğunun değişmesi ile meydana gelen gerilme değişiklik durumu daha azdır. Bunun, kaolin gibi killerin, bentonit gibi ince daneli killere göre daha açık bir yapıya meyilli olmasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. Düşük iyon yoğunluklu çözeltiler varlığında, kaolinin dane dağılımının bentonite kıyasla daha düzensiz bir yapıda olması sebebi ile daha yüksek bir dayanıma sahip olacağı sonucuna varılabilir.

Şekil 1.13.' de Sridharan (1978)' in yürüttüğü çalışmada kaolinin boşluk suyu basıncı ve deformasyon değerlerinin gerilme ile zamana bağlı ilişkisi gösterilmektedir.



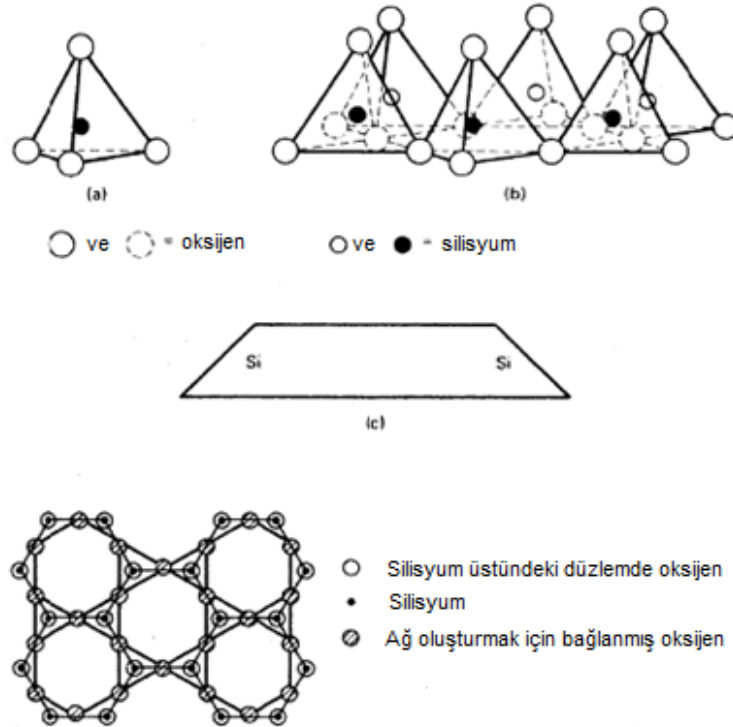
Şekil 1.13. Kaoline ait gerilme (414 kPa) altındaki, gerilme-deformasyon ve boşluk suyu basıncı-deformasyon eğrileri (Sridharan, 1978).

Yıllanma, kayma dayanımı davranışında önemli bir etkiye sahiptir (Allam and Sridharan, 1979; Sridharan, 1978). Şekil 1.13.' e göre, örselenmiş kaolin için, yıllanma etkisiyle, kayma dayanımında bir artış ve kırılma deformasyon eğrisi boyunca daha keskin bir gerilme-deformasyon tepkisi meydana gelmektedir. Kaolin kili, yıllanma etkisiyle yapısal rijitliğin artışıyla beraber gerilme-deformasyon eğrilerindeki tanjant modülünde artış göstermiştir (Sridharan,1978; Sridharan and Rao, 1972). Uygulanan basınç değeri arttıkça, tanjant modülünün tüm zaman dilimleri için lineer olarak arttığı görülmektedir. Bu artış, yıllanma sürecinin ilk periyotlarında daha fazladır. Yıllanma ile tanjant modülünde meydana gelen artış, zemin dokusunun değişmesi ve daneler arası bağların oluşması ile meydana gelen efektif gerilmeden kaynaklanıyor olabilir (Allam and Sridharan, 1979; Sridharan, 1978).

Kaolinin Φ_{cu} ve Φ' değerleri, 1 günden 30 güne olan yaşlanma süresinde %8' lik bir artış göstermiştir. Kayma açısındaki yılanmaya bağlı artış ise, danelerin daha fazla sıkışmasına dayandırılabilir. Kohezyon değeri ise (c_{cu} ve c') genelde, yılanmayla birlikte azalma göstermektedir. Bu da yılanma ile kayma anında, elektriksel çekici kuvvetlerin düştüğüne işaret etmektedir.

1.3. Kil Mineralleri

Kil mineralleri, bazı kayaçların kimyasal bozunmaları sonucunda oluşan çok küçük, kristalsi maddelerdir. Tüm kil mineralleri çok küçük boyda ($1 \mu m$ ' den küçük çaplı) olup sadece elektron mikroskopuyla görülebilirler. Kil kristalleri küçük katmanlardan oluşmaktadır ve XRD (X ışını kırınım) çalışmaları bu katmanların atomik yapısı tekrarlanan çok sayıda kristal levhalardan oluştuğunu göstermiştir. Aslında, tetrahedral veya silika ile oktahedral veya alümina olmak üzere iki çeşit kristal levhası bulunmaktadır. Bu levhaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır (Kayabalı, 2010). Kil mineralleri arasında oluşan çeşitli bağlar Şekil 1.14.' de görülmektedir.



Kil daneleri, küp şeklinde ya da düzensiz şekilli taneciklerden oluşmuş olabilir. Zemin ister küp şeklinde ister düzensiz şekilli tanelerden oluşmuş olsun, büyük parçaların birim hacim başına düşen spesifik yüzeyleri küçük danelerinkinden daha küçüktür. Spesifik yüzey (yüzey alanı/hacim) zeminin tane boyuyla ters orantılıdır. Pratikte zemin yüzey hesapları yapılmamaktadır, ancak spesifik yüzey kavramından hareketle, ince daneli zeminlerin doğal su içeriği (boşluk oranı ve zemin yapısı gibi diğer bütün özellikler eşit olmak şartıyla) iri daneli zeminlerinkinden daha fazladır.

Granüle veya kohezyonsuz zeminlerde partiküller arası kuvvetler çok düşüktür. Ancak, ince daneli kohezyonlu zeminlerde partiküller arası kuvvetler oldukça büyüktür, yani ince daneli bir zeminin yapısı o zeminin mühendislik davranışlarını önemli ölçüde etkiler. İnce daneli (özellikle kil) zeminlerin davranışında tane boyu dağılımının önemli bir etkisi yoktur, ancak suyun varlığından önemli derecede etkilenirler. Su içeriğinin değişimiyle birlikte plastisite de değişir (Atterberg limitiyle ortaya koyulabilir). Kil minerallerinin spesifik yüzeylerinin çok büyük olup çok aktif yüzeylere sahip oldukları düşünülür. Yüzey aktivitesi dane boyuna bağlı olduğu için bentonit kaolinden daha aktiftir.

Suyun kil yüzeyine çekilmesi ise kil yüzeyine yakın bölgelerde çok kuvvetlidir. Yüzeyden uzaklaştıkça bu etki giderek azalmaktadır. Bir kil partikülü etrafında suyun adsorbe olması, su molekülünün kil kristalinin yüzeyi tarafından elektriksel olarak çekilmesiyle, kil kristali tarafından hidrojen bağıyla tutulmasıyla ya da negatif yüklü kil yüzeyinin su içindeki katyonları çekmesiyle olabilir (Kayabalı, 2010). Kil kristalinin yüzeyindeki negatif yükün kaynağı izomorf yer değiştirmeden ve kristal kafesindeki (özellikle yüzeydeki) kusurlardan ileri gelir. Bu kırık kenarlar, dengesiz yük oluşumuna önemli ölçüde etki eder. Göreceli boylarından ve spesifik yüzeylerinden dolayı bentonitin yük dengesizliği oldukça fazladır. Kaoline göre çok daha fazla çekim gücüne sahiptir.

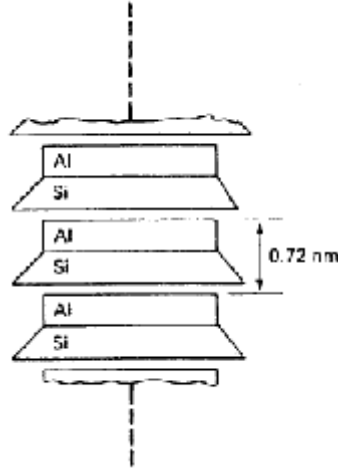
Kil minerallerinin tanınmasında diferansiyel termal analiz (DTA), taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi gibi yöntemler kullanılabilir. Bunun haricinde Atterberg limitlerinden yararlanmak da mümkündür.

Tüm kil mineralleri, belirli bir katyonu içeren tetrahedral veya oktahedral levhaların değişik şekillerde bir araya gelmeleriyle meydana gelir ve temel olarak iki levhadan oluşur. Bunlardan yaygın olan kil mineralleri; illit, kaolinit, zeolit, montmorillonit (bentonit) vs. gibi kil mineralleridir. Bu çalışma kapsamında kaolin ve bentonit kullanılmıştır.

1.3.1. Kaolin

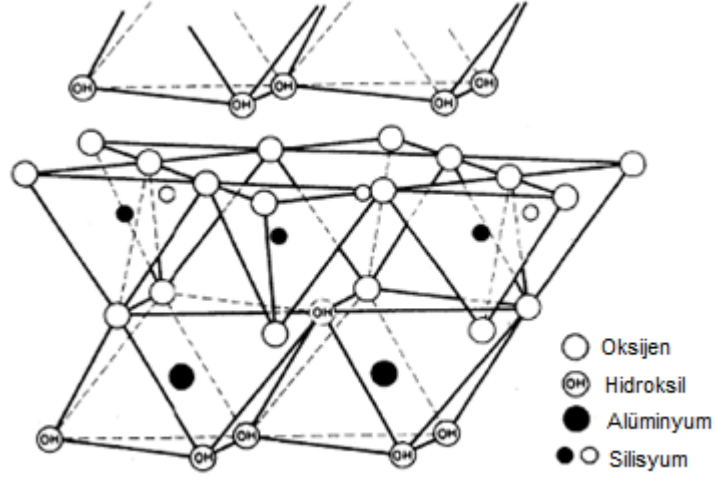
Kaolin, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülüne sahip %39,50 Al_2O_3 , %46,55 SiO_2 , %13,95 H_2O içeren bir mineraldir ve doğada Fe_2O_3 , CaCO_3 , mika gibi maddeleri yapısında bulundurabilir. Mat ve gevşek toprağımsı bir görünümü vardır. Nadiren kristal halinde bulunan kaolinin sertliği 2-3, özgül ağırlığı 2.6' dır. Erime derecesi 1760°C olup refrakter malzeme olarak kullanılmaktadır. Saf olduğunda beyaz renkli, safsızlığına bağlı olarak yeşilimsi ve sarımsı renkte olabilir (Seyhan, 1972).

Kaolin başlıca bir tetrahedral (silika) ve oktahedral (alümina veya gipsit) levhasının tekrarlanan katmanlarından oluşmuştur. Bir katmanın, iki levhanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı 1:1 kil minerali olarak bilinir. Kaolinin şematik diyagramı Şekil 1.15.' de gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Kaolin yapısının şematik diyagramı (Holtz and Kovacs, 1981)

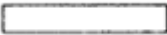
Silika levhasının uçları ile oktahedral levhanın katmanlarından biri tek bir katmanı oluşturur. Bu katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0,72 nm' dir ve diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Yani kaolin kristali temel olarak, birkaç katmanın bir araya gelerek oluşturduğu 0,72 nm kalınlığındaki katmandan oluşur. Birbirini izleyen bu temel katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağı ile bir arada tutulurlar. Hidrojen bağı çok kuvvetli bir bağı olduğundan hidrasyonu önler ve katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal oluşturmasını sağlar. Tipik bir kaolin kristalinde 70 ile 100 arasında katman oluşmaktadır. Kaolinin atomik yapısı Şekil 1.16.' da görülmektedir.



Şekil 1.16. Kaolinin atomik yapısı (Holtz and Kovacs,1981)

Kaolin en büyük kil mineralidir ve kalınlığı ya da kenar boyutu 1 μm ' dir. Bentonitin kenar boyutu sadece birkaç nanometredir. Yüzey aktivitesi de tane boyuna bağlı olduğundan bentonitin kaolinden daha aktif olduğunu söylemek doğru olur (Kayabalı, 2010). Bazı kil minerallerinin boyut ve spesifik yüzey değerleri Tablo 1.3.' de gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Yaygın bazı kil minerallerinin ortalama büyüklük, kalınlık ve spesifik yüzey değerleri (Yong and Warkentin, 1975).

Kesit görünüşü	Karakteristik kalınlık (mm)	Karakteristik çap (mm)	Özgül yüzey (kg/cm^2)
 Montmorillonit	3	100-1000	0.8
 İllit	30	10000	0.08
 Klorit	30	10000	0.08
 Kaolin	50-2000	300-4000	0.015

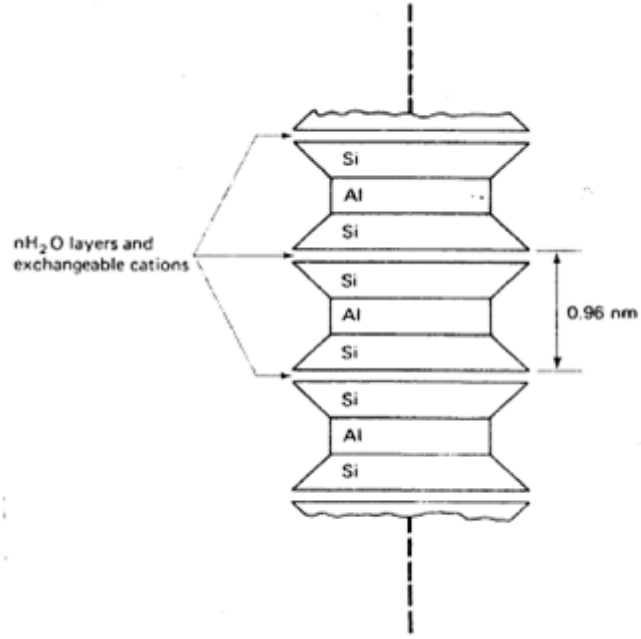
1.3.2. Bentonit

Bentonit terimi, Amerika' daa 19.yy.da Wyoming eyaletinde Ford Benton' da işlenmeye başlanan killere verilen bir ad olarak kullanılmıştır. Aslında bentonit, smektit grubu kil minerallerinin oluşturduğu bir kildir. Bentonit, volkanik külün yerinde ayrışmasıyla oluşan ve büyük ölçüde montmorillonit kil mineralinden oluşan, çokça su emip şişen toprağımsı bir madendir. Formülü $Al_4Si_8O_{20}(OH_4).nH_2O$ ' daur. Volkanik kil veya tuf gibi camsı volkanların kimyasal ayrışmasıyla ve başlıca montmorillonit (smektit) grubu minerallerden oluşan bentonit kısmen kolloidal silisten ibaret, yumuşak, şekillenebilir, açık renkli bir kil taşıdır. Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na) ve Na-Ca montmorillonitlerden oluşmasına göre bentonitin jeolojik özellikleri değişmektedir.

Ham bentonit kaolin kıvamında, yumuşak ve parçaları kırılmaya elverişlidir. Beyaz, gri-beyaz, açık sarı, yeşilimsi sarı, pembemsi bej veya açık pembe renklidir, çok ince danelidir. Su ile temasa geçmesi durumunda beş misli şişebiliyorsa ticari bentonit sınıfına girer. İyi bentonitler 10-20 kat şişer. Ender olarak 25-30 kat şişen bentonitler de bulunur. Bentonitin su ile şişme özelliği 600 °C' den sonra kaybolur. Kuru haldeki yoğunluğu 2,7-2,8 gr/cm³ olmakla birlikte, aynı bentonit toz haline getirilirse yoğunluk belirgin bir şekilde düşerek 1,6-1,8 gr/cm³ civarında bir değer alır (Eruslu, 1993).

Bentonitin fiziksel özellikleriyle tanınması, kimyasal özellikleriyle tanınmasından daha kolay ve pratik bir uygulama sağlamaktadır. Smektitler ve onları ana kil minerali olarak içeren bentonitlerin şişmesi ve dağılması 2:1 tabakaları arasındaki katyonların türü ve miktarı ile yakından ilgilidir (Sarıkaya ve diğerleri, 2001).

Montmorillonit (bentonit) iki silika levhası ile bir alümina levhasından oluşan önemli bir mineraldir. Bu şekildeki diziliminden dolayı 2:1 minerali olarak adlandırılır. Bentonitin şematik diyagramı Şekil 1.17.' de gösterilmektedir. Bentonitte oktahedral levhası iki silika levhası arasına gelerek bir katmanı oluşturmaktadır. Burada silika levhasındaki tetrahedronların uçları oktahedral levhanın hidroksilleri ile birleşmektedir. 2:1 katmanının kalınlığı yaklaşık olarak 0,96 nm olup, kaolinde olduğu gibi diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir.



Şekil 1.17. Bentonit yapısının şematik diyagramı (Holtz and Kovacs, 1981)

Silika levhalarının tepesini bağlayan Van der Waals kuvvetlerinin zayıf olması ve oktahedral levhada da net bir negatif yük boşluğu olmasından dolayı, su ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek bunları ayırabilmektedir. Bu nedenle bir montmorillonit kristali çok küçük olabilmektedir. Bentonit, kristal yapısının son derece küçük ve plastisite indisinin son derece yüksek olmasından dolayı ileri derecede aktiftir. Aynı zamanda çok yüksek su çekim gücüne sahiptir. Bentonit içeren zeminler, özellikle artan su içeriklerinde şişmeye karşı son derece duyarlıdır. Gelişen şişme basıncı hafif yapılara ve yol kaplamalarına zarar verebilmektedir. Buna dayanarak bentonit, sondaj çamurundaki bileşenlerden biridir. Ayrıca sanayi, eczacılık ve çikolata imalatında kullanımı söz konusudur (Kayabalı, 2010).

2. MALZEME VE YÖNTEM

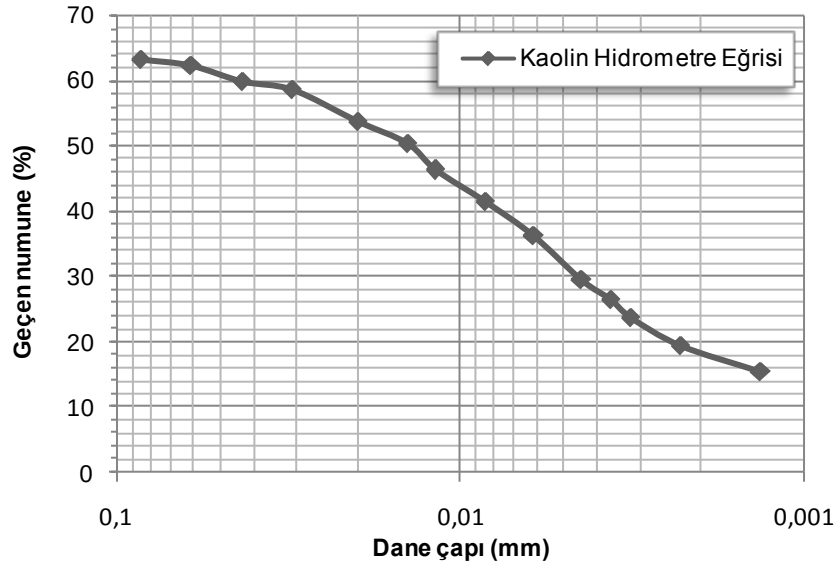
2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan kaolin numunesi Eczacıbaşı A.Ş. firmasından temin edilmiş olup Çanakkale Sarıbeyli yöresi madenlerinden elde edilmiştir. Bentonit numunesi ise Süd-Chemie firmasından temin edilmiştir. Kaolin ve bentonit, doğada en çok bulunan kil minerallerinden olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır. Numuneler ilk olarak etüvde 105 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra çeneli konkasörde kırılmış ve 40 No' lu elekten elenerek çalışma için hazır hale getirilmiştir.

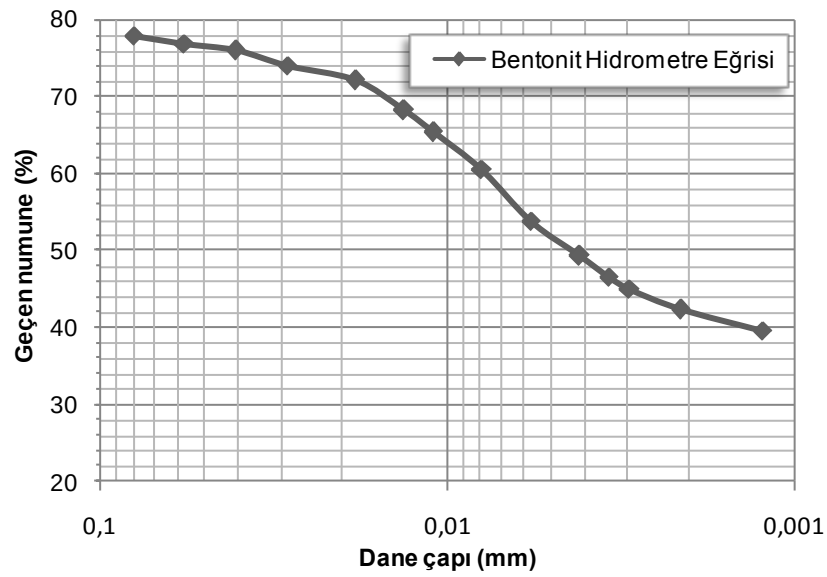
Numunelerin mineralojik analizlerinin belirlenmesi için X-Ray difraksiyon analizleri yapılmıştır. Bu analizler TÜBİTAK-Malzeme Araştırma Merkezi'nde SHIMADZU XRD-6000 cihazı ile Cu X-Işını tüpü (dalga boyu=1.5405 Angstrom) kullanılarak yapılan analiz sonucunda Kaolin numunesi Kuvars (SiO_2) ve Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) içermektedir. Bentonit numunesi ise Montmorillonit ($\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Kalsit (CaCO_3) ve Kuvars (SiO_2) içermektedir.

Çalışmada kullanılan kaolin ve bentonit numunelerinin özgül ağırlıkları ASTM D 854-92 standardına göre belirlenmiş ve sırasıyla 2.696 ve 2.672 olarak bulunmuştur.

Numunelerin dane çapı dağılımlarının belirlenebilmesi için ASTM D 422-63 standardına göre elek analizi ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen dane çapı dağılım grafikleri Şekil 2.1.a ve 2.1.b.' de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.1. Kaolin ve bentonite ait dane çapı dağılım grafikleri a) kaolin, b) bentonit

Zemin numunelerinin likit limit ve plastik limitleri ASTM D 4318-98 standardına göre belirlenmiştir. Kullanılan kaolin numunesinin likit limit değeri %25.5, bentonit numunesinin likit limit değeri ise %94.1 olarak hesaplanmıştır.

2.2. Yöntem

Kaolin ve bentonit zemin numuneleriyle karıştırılmak üzere, katı atık depolama alanlarından altındaki tabakaya sızabilecek çözeltiler olması bakımından kalsiyum klorür (CaCl_2) ve sodyum klorür (NaCl) kullanılmıştır. Her iki çözelti de 0.5 M oranında saf su ile çözündürülerek kaolin ve bentonit ile karıştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında CaCl_2 ve NaCl ' nin kaolin ve bentonitin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri ile yılanma etkisinin belirlenmesine yönelik olarak çalışılmıştır. Bu çerçevede kaolin ve bentonitin saf su, kalsiyum klorür ve sodyum klorür varlığında kıvam limitleri, oturma, hidrolik iletkenlik ve kayma dayanım davranışları incelenmiştir. Kıvam limitleri deneyleri için ASTM D 4318-10 standartları, konsolidasyon deneyleri için ASTM D 2435 standartları, kayma dayanımı deneyleri için ASTM D 3080 standartları baz alınmıştır.

Bu noktada kıvam limitleri deneyleri, zaman etkisi gözetilmeksizin yani numuneler hiç beklemeye bırakılmadan uygulanmıştır. Kıvam limitleri deneylerinde bentonit ve kaolin numuneleri saf su, 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri ile karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Kıvam limitleri için yapılan bu çalışma, kullanılan kil numunelerinin özelliklerini belirlemek ve NaCl ile CaCl_2 varlığında bu değerlerin ne oranda değiştiğini gözlemlemek amacıyla yürütülmüştür.

Konsolidasyon ve kayma dayanımı deneyleri ise kaolin ve bentonit numunelerine sırası ile saf su ve saf suda çözündürülmüş 0.5 M konsantrasyonunda kalsiyum klorür (CaCl_2) ve sodyum klorür (NaCl) çözeltileri eklenerek 0 gün, 60 gün ve 250 gün (direk kesme deneyi için 60 gün ve 190 gün) bu çözeltiler içerisinde bekletilmiş numuneler üzerinde konsolidasyon ve direk kesme deneyleri uygulanmıştır. Numuneler iki ayrı şekilde hazırlanarak bekletilmeye bırakılmıştır. Öncelikle, kaolin ve bentonit numuneleri sadece saf su ile karıştırılmış, diğer sette ise numuneler 0.5 M çözeltiler ile karıştırılarak bekletilmeye bırakılmıştır. Uygulanan deney programı Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.' de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Kaolin numunelerinin konsolidasyon ve direk kesme deneyleri için hazırlanma şeması

Numune/ Çözelti		Kaolin-saf su/ 0.5 M NaCl	Kaolin-0.5 M NaCl/ 0.5 M NaCl	Kaolin-saf su/ 0.5 M CaCl ₂	Kaolin-0.5 M CaCl ₂ / 0.5 M CaCl ₂
Zaman (gün)	0	+	+	+	+
	60	+	+	+	+
	250*	+	+	+	+
	190**	+	+	+	+
	*Konsolidasyon deneyi uygulanacak numunelerin 0.5 M çözelti içinde bekletilme süresi				
	** Direk kesme deneyi uygulanacak numunelerin 0.5 M çözelti içinde bekletilme süresi				

Tablo 2.2. Bentonit numunelerinin konsolidasyon ve direk kesme deneyleri için hazırlanma şeması

Numune/ Çözelti		Bentonit-saf su /0.5 M NaCl	Bentonit-0.5 M NaCl/ 0.5 M NaCl	Bentonit-saf su/ 0.5 M CaCl ₂	Bentonit-0.5 M CaCl ₂ / 0.5 M CaCl ₂
Zaman (gün)	0	+	+	+	+
	60	+	+	+	+
	250	+	+	+	+
	190	+	+	+	+
	*Konsolidasyon deneyi uygulanacak numunelerin 0.5 M çözelti içinde bekletilme süresi				
	** Direk kesme deneyi uygulanacak numunelerin 0.5 M çözelti içinde bekletilme süresi				

2.2.1. Likit Limit Deneyi

Bu çalışmada kil numunelerinin likit limit deneyleri ASTM D 4318-98 standardına göre uygulanmıştır. Bunun için 40 No' lu elekten geçen kaolin ve bentonit numuneleri sırasıyla saf su, 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ ile karıştırılmıştır. Hazırlanan bu karışımlardan alınan en az 100 gram kil numunesi metal kaplar içerisine konmuş ve spatula vasıtası ile homojen bir şekilde iyice karıştırılmıştır. Elde edilen kaolin-CaCl₂, kaolin-NaCl, bentonit-CaCl₂, bentonit-NaCl karışımlarından alınan numuneler Casagrande aletinin kaşığına numunenin yüzeyi tabana paralel olacak şekilde yerleştirilmiş ve oluk açma bıçağı ile oluk açılmıştır. Böylece numunenin ortasında 'V' kesitli bir oluk oluşmuştur. Krank kolu saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilmiş, oluğun iki yanında kalan zeminin birbirine değme uzunluğu, yaklaşık olarak 1 cm' yi bulana kadar kap kaldırılıp düşürülmüştür. Oluktaki bu kapanmayı sağlayan düşüş sayısı kaydedilmiştir. Her deneyde numuneler 105 °C' lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra numunelerin su içeriği hesaplanmıştır. Hesaplanan su içeriği ve darbe sayıları grafik üzerinde

işaretlenmiş ve bu noktalardan elde edilen doğrunun denkleminde her bir karışıma ait likit limit değerleri hesaplanmıştır.

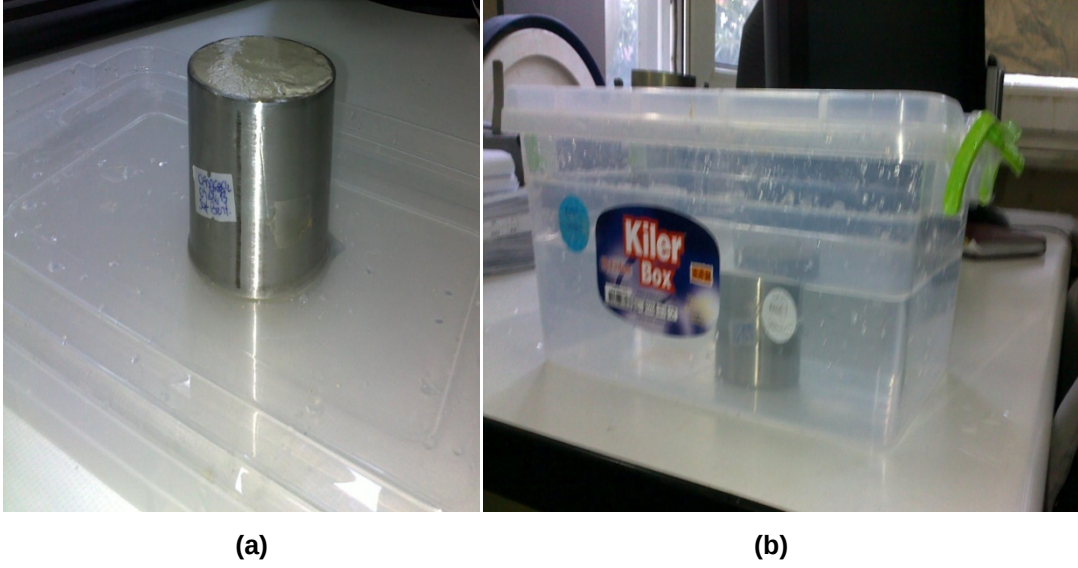
2.2.2. Plastik Limit Deneyi

Bu çalışma kapsamında kullanılan kaolin ve bentonitin plastik limitleri ASTM D 4318-98 standardına göre belirlenmiştir. Bunun için 40 No' lu elekten geçen kil numunelerinden 20-30 gram civarı alınıp metal bir kaba konulmuş ve sonrasında üzerine saf su ve 0.5 M saf suda çözündürülmüş kalsiyum klorür (CaCl_2) ve sodyum klorür (NaCl) çözeltileri eklenmiş, homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Bu karışımdan alınan numuneler düz bir zemin üzerinde el ayası ile yuvarlanarak 3 mm çapında silindirik çubuklar haline getirilmiştir. Numune, 3 mm çapına geldiğinde, yani yüzeyinde rötre çatlakları oluşmaya başladığı anda su içeriğinin belirlenmesi için etüve konmuştur. Bu numuneler 105°C ' lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra su muhtevaları hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve plastik limit değerleri elde edilmiştir.

2.2.3. Konsolidasyon Deneyi

Killi zemin numunelerinin sıkışabilirlik parametreleri ASTM D-2435 standardına göre belirlenmiştir. Bunun için 40 No' lu elekten geçen kaolin ve bentonit numunelerinden en az 100 gram alınmış, metal kaplar içine konulmuştur. Numunelerin içine sırasıyla saf su ve 0.5 M CaCl_2 ve NaCl çözeltileri eklenmiş ve homojen duruma gelene kadar spatula vasıtasıyla homojen bir şekilde karıştırılmıştır.

Yıllanma etkisi için çözelti içerisinde 60 gün ve 250 gün bekletilecek numuneler, 5.5 cm çapında ve 5 cm yüksekliğinde metal kaplar içerisinde hazırlanmıştır. Numunelerin aynı şartlar altında hazırlanmış olması için kaolin 1.9 gr/cm^3 birim hacim ağırlığında, bentonit ise 1.5 gr/cm^3 birim hacim ağırlığında hazırlanarak metal kaplar içerisine yerleştirilmiştir. Metal kaplar içinde hazırlanan bu numunelerin her iki yüzeyi filtre kağıdı ile örtülmüş ve plastik saklama kapları içerisine yerleştirilmiştir. Sonrasında plastik kapların içine 0.5 M NaCl , 0.5 M CaCl_2 çözeltileri doldurulmuş ve beklemeye bırakılmıştır. Hazırlanan numuneler ve içerisinde bekletildiği plastik kaplar Şekil 2.2.' de görülmektedir.



Şekil 2.2. a) Konsolidasyon deneyi için hazırlanan numune, b) içerisinde çözelti bulunan bekletme kapları

Bu çalışma kapsamında yürütülen konsolidasyon deneyleri ile kaolin ve bentonit numunelerinin sıkışma indisi, şişme indisi ve konsolidasyon katsayısı gibi parametrelerinin CaCl_2 ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Deneyler hem kaolin hem bentonit numuneleri için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemeden 0 gün için yürütülen deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 250 gün için tekrar edilmiştir. Uygulanan deney programı Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.' de daha önce gösterilmiştir.

Deney uygulamaya konulmadan önce 5 cm çapında, 2 cm yüksekliğindeki konsolidasyon ringi malzeme ile aşama aşama doldurulmuş, sert bir yüzeye vurularak malzemenin kabın kenarlarına yayılması sağlanmış, aynı zamanda konsolidasyon ringi içinde hava kalması da engellenmiştir. Fazla malzeme konsolidasyon halkasının alt ve üst yüzeyinden spatula vasıtasıyla temizlenmiş, halkanın alt ve üst kısmı filtre kağıdı ile kapatılmıştır. Ring bu halde iken ağırlığı kaydedilmiş ve konsolidasyon hücresi içine yerleştirilmiştir. Hücre saf su ile doldurularak yükleme yapılmıştır.

Her bir numune, birincil konsolidasyon tamamlanana kadar deneye tabi tutulmuştur. Yükleme 0.25 kg/cm^2 den başlanmış ve her bir yükleme bir önceki yüklemenin iki katı, yani yük arttırım oranı 1.0 olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler 8 kg/cm^2 lik yüklemede sonlandırılmıştır.

Yükleme aşaması tamamlandıktan sonra, zeminlerin şişme indislerinin belirlenebilmesi için boşaltma aşamasına geçilmiştir. Bunun için numuneler üzerindeki yüklem, 1/4 oranında iki aşamada azaltılmıştır. En son yüklem 8 kg/cm^2 olduğundan yük, ilk aşamada 2 kg/cm^2 ye, ikinci aşamada 0.5 kg/cm^2 ye düşürülmüştür. Her bir aşamada şişme tamamlanana kadar beklenmiştir.

Yapılan deneylerden her bir numuneye ait sıkışma indisi (C_c), şişme indisi (C_s) ve konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri hesaplanmıştır. Öncelikli olarak, boşluk oranı (e) – düşey efektif gerilme ($\log \sigma'$) grafiği oluşturulmuş ve sıkışma indisi (C_c) Denklem 2.1 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Boşluk suyu basıncının zamanla ne oranda değiştiğini ifade eden konsolidasyon katsayısı (c_v) $\log t$ metoduna göre belirlenmiştir.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} \quad (2.1)$$

Şişme indisi (C_s), grafikten elde edilen şişme eğrisinin eğiminden Denklem 2.2 vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$C_s = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.2)$$

2.2.4. Permeabilite Deneyi

Bu çalışma kapsamında, kaolin ve bentonit numunelerinin permabilite parametresi ASTM D-2435 standardında uygulanan konsolidasyon deneyinden elde edilmiştir. Deneyler hem kaolin hem bentonit numuneleri için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemekten 0 gün için yürütülen deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 250 gün için tekrar edilmiştir. Her bir numune, birincil konsolidasyon tamamlanana kadar deneye tabi tutulmuştur. Yüklemeye 0.25 kg/cm^2 'den başlanmış yük arttırım oranı 1.0 olarak ayarlanmıştır. Deneyler 8 kg/cm^2 lik yüklemde sonlandırılmıştır. Konsolidasyon deneyinden $\log t$ yöntemi ile elde edilen konsolidasyon katsayısı (c_v) ve sıkışma katsayısı (a_v) parametreleri ile her bir numunenin permeabilite katsayısı (k) hesaplanmıştır (Denklem 2.3).

$$k = \frac{c_v \cdot \rho_w \cdot a_v}{1 + e_0} \quad (2.3)$$

Konsolidasyon deneyleri, CaCl_2 ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak 3 aşamalı (0 gün, 60 gün, 250 gün) yürütüldüğünden hidrolik iletkenlik parametresi için de yılanma etkisi incelenebilmiştir.

2.2.5. Direk Kesme Deneyi

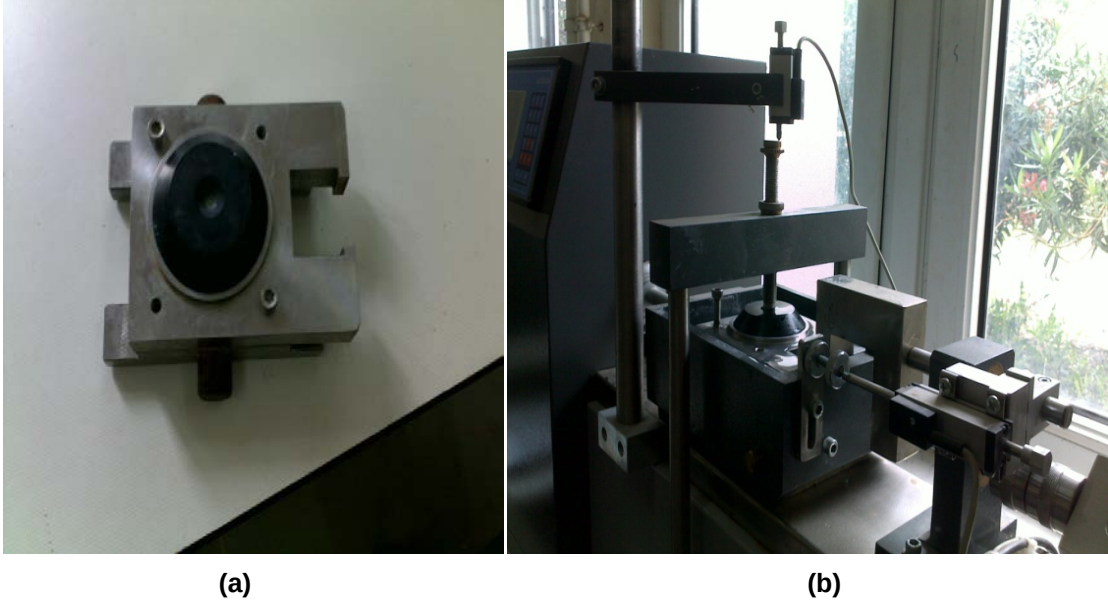
Killi zemin numunelerinin, çözeltiler varlığında ve yılanma etkisi altındaki kayma dayanımı parametreleri ASTM D 3080 / 3080M-11 standardına göre belirlenmiştir. Bunun için 40 No' lu elekten geçen kaolin ve bentonit numunelerinden yeterli miktarda alınmış, metal kaplar içine konulmuştur. Numunelerin içine sırasıyla saf su ve 0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri eklenmiş ve homojen duruma gelene kadar spatula vasıtasıyla karıştırılmıştır.

Zamana göre (60 gün ve 190 gün için) bekletilmeye bırakılacak kaolin ve bentonit numuneler ise 6.8 cm çapında ve 3.5 cm yüksekliğinde metal kaplar içerisinde bekletilmiştir. Kaolin 1.9 gr/cm^3 birim hacim ağırlığında, bentonit ise 1.5 gr/cm^3 birim hacim ağırlığında hazırlanarak metal kaplar içerisine yerleştirilmiştir. Metal kaplar içinde hazırlanan bu numunelerin her iki yüzeyi filtre kağıdı ile örtülmüş ve plastik saklama kapları içerisine yerleştirilmiştir. Sonrasında plastik kapların içi 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri ile doldurulmuş ve numuneler bekletilmeye bırakılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yürütülen direk kesme deneyleri ile kaolin ve bentonit numunelerinin içsel sürtünme açısı parametresinin CaCl_2 ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Deneyler hem kaolin hem bentonit numuneleri için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemeden 0 gün için yürütülen deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 190 gün için tekrar edilmiştir.

Her uygulamada hazırlanan numunelerin altına ve üstüne poroz taşlar yerleştirilerek kesme kutusu hücresine yerleştirilmiştir. Kesme kutusu aletine yerleştirilen hücre sabitlenerek yanal hareket, düşey hareket ve yük halkası okumaları için hazır hale getirilmiş, yükleme yapılmış ve konsolidasyon için kutu saf su ile doldurulmuştur. Normal gerilme 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 , 2 kg/cm^2 olacak şekilde üç yükleme yapılmıştır. Deneyler konsolidasyonlu-drenajlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde öncelikle normal gerilme altında zeminlerin konsolide olmaları beklenmiş, daha sonra drene olacak şekilde yavaş bir hızda deneye devam edilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler yapay yolla hazırlandığından numuneler normal konsolide (NC) olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle kayma dayanımı parametreleri açısından kohezyon

yaklaşık olarak sıfır olacağından, sadece içsel sürtünme açısı parametresi incelenmiştir. Şekil 2.3.a ve 2.3.b.' de deneylerde kullanılan direk kesme kutusu ve deney aleti gösterilmektedir.



Şekil 2.3. a) Direk Kesme kutusu b) direk kesme deney düzeneği

2.2.6. Civalı Porozimetri Analizi

Civalı porozimetri deneyi uygulanmak üzere toplam 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, çözelti içinde bekletilmemiş kaolin-saf su, bentonit saf su, 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri içerisinde 1 yıl (yaklaşık 360 gün) bekletilmiş kaolin-saf su, bentonit-saf su karışımları şeklindedir. Burada aynı özellikler gösteren numuneler hazırlayabilmek adına her bir karışımındaki saf suyun miktarı, killerin likit limit değerinin %75' inde sabit tutulmuştur. Her bir numune çözelti içinde bekletme aşamasından sonra 42 mm çapında 12 mm yüksekliğindeki dairesel rötire kapları içerisine yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi sırasında rötire kapları sert bir zemine vurulmuş böylelikle hazırlanan zemin numuneleri içerisinde hava boşluğu kalmaması sağlanmıştır. Yerleştirme işleminden sonra numuneler açık havada en az 7 gün bekletilerek kurutulmuştur. Hazırlanan numuneler TÜBİTAK Malzeme Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM)' nde civalı porozimetri deneyine tabi tutulmuştur.

Civalı porozimetri deneyi, tepkimeye girmeyen, ıslatımsız bir sıvının yeterli basınç altında uygulanmadıkça küçük gözeneklere giremeyeceği fiziksel prensibine göre çalışmaktadır. Numuneler Civalı porozimetri analizi için gerilme kırılması ile kesilmektedir. Gerilme kırılması, numunenin ortasında gerilme kırılmasına sebep olacak hareketli bir tokmak ile belli belirsiz bir

darbe ile uygulanmaktadır. Bu, kesme ile meydana gelebilecek bir örselenmeye engel olmak içindir. Kurutma işleminden sonra, numuneler hızlı bir şekilde kaba yerleştirilir ve numunelere vakum uygulanır.

2.2.7. Elektron Mikroskobu Fotoğraf Analizleri

Elektron mikroskobu taramaları için, cıvalı porozimetri deneyi için hazırlanan numunelerde olduğu gibi toplam 6 adet numune hazırlanmıştır. 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂   z ltleri içerisinde 360 günlük yılanmaya bırakılan kaolin ve bentonit killeri ile yılanma etkisine maruz bırakılmayan kaolin ve bentonit numuneleri saf su ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Numunelerin içindeki saf su, cıvalı porozimetri örneklerinde olduğu gibi her bir numunenin %75 likit limit değeri kadardır.

SEM (Elektron mikroskop taraması) analizleri için yüksek vakumlu bir hazne gerektiğinden hazırlanan numune kuru olmalıdır. Kurutma metodunda kurutma süreci boyunca küçük yapısal değişiklikler meydana gelmektedir. I lem için kesilen yüzey minimum örselenme ile hazırlanmalıdır. Hazırlanan numune, yüzeysel yükleme ve çözünürlük kaybına engel olmak için vakumlu evaporatör ile ince bir tabaka altın paladyum ile kaplanır. Uygulamadan sonra kaplanmış numuneler özel karbon şeritler yardımıyla soyulur.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Zeminlerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

Kaolin ve bentonit numunelerinin özgül ağırlıkları, kil yüzdeleri, likit limit, plastik limitleri standartlara göre belirlenmiş olup Tablo 3.1.' de gösterilmektedir.

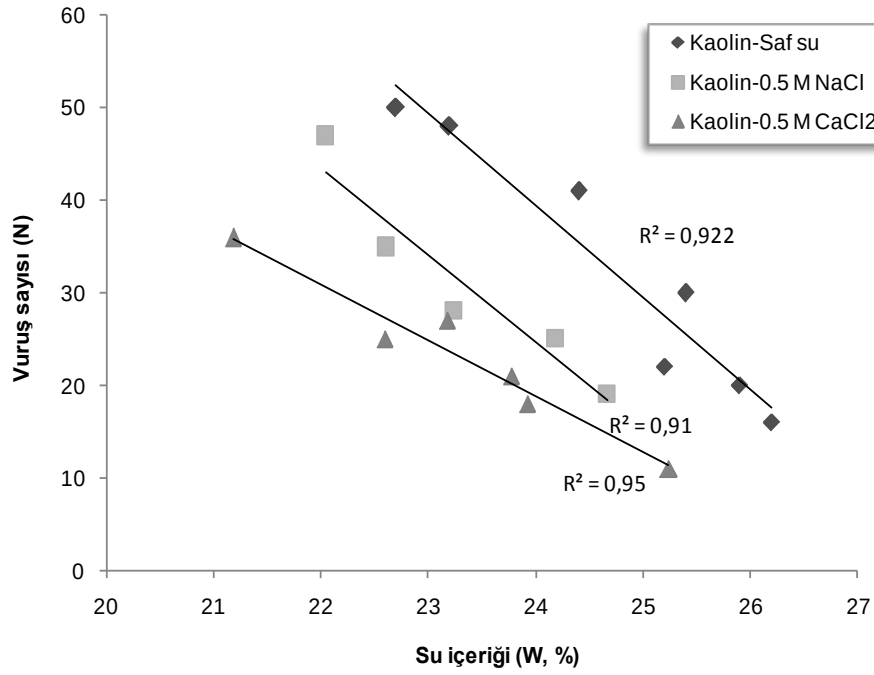
Tablo 3.1. Kil numunelerinin fiziko-kimyasal özellikleri

Parametreler	Kaolin	Bentonit
Likit Limit	25,5	94,1
Plastik Limit	Non-Plastik	50,8
Özgül Ağırlık	2,696	2,672
Kil yüzdesi	%18	%42

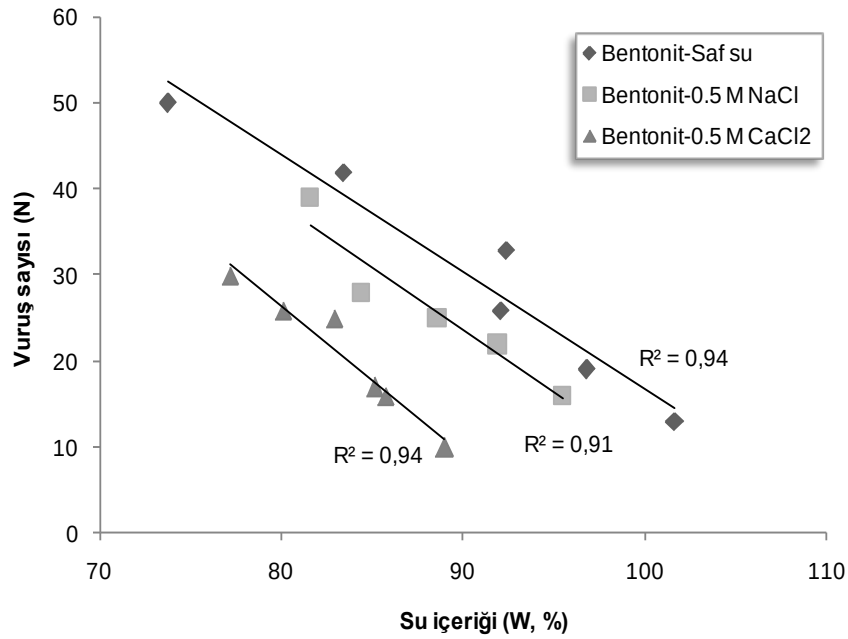
3.2. Kıvam Limiti Sonuçları

3.2.1. Likit Limit Deneyi Sonuçları

Çalışmada kullanılan kaolin ve bentonit numuneleri saf su, 0.5 M CaCl_2 ve 0.5 M NaCl ile karıştırılarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. Elde edilen kaolin- CaCl_2 , kaolin- NaCl , bentonit- CaCl_2 , bentonit- NaCl karışımlarından alınan numunelerin likit limit değeri Casagrande yöntemi ile belirlenmiştir. Deney sonunda hesaplanan su içeriği (w_n) ve vuruş sayısı değerleri grafik üzerinde işaretlenmiştir. Kaolin numunesine ait değerler Şekil 3.1.' de bentonit numunesine ait değerler Şekil 3.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kaolin numunesine ait su içeriği ve vuruş sayısı değerleri



Şekil 3.2. Bentonit numunesine ait su içeriği ve vuruş sayısı değerleri

Elde edilen doğruların denklemlerinde y değeri 25 kabul edilerek (optimum darbe sayısı) x değerleri, yani her bir numuneye ait likit limit değerleri saptanmıştır. Bu değerler Tablo 3.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 varlığında kaolin ve bentonit numunelerine ait likit limit değerleri

Çözelti	Likit Limit, LL (%)	
	Kaolin	Bentonit
Saf su	25.45	94.08
0.5 M NaCl	23.87	89.08
0.5 M CaCl_2	22.98	80.81

Elde edilen sonuçlara göre NaCl ve CaCl_2 varlığında kaolin ve bentonit numunelerinin likit limit değerleri azalmıştır. Suyun dielektrik sabiti NaCl ve CaCl_2 çözeltilerinden daha büyük olduğundan bu çözeltiler varlığında numunelerin dielektrik sabiti azalmaktadır. Kaolin numunesinde Ca^{2+} ve Na^+ iyonlarının varlığı dielektrik sabitindeki bu azalmayla flok bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Bu flok yapı içerisinde hapsolan su miktarı nedeniyle kaolinin likit limit değerlerinde küçük de olsa bir artış beklenmektedir (Sridharan, 1978). Fakat bu çalışmada kaolinin likit limit değeri NaCl ve CaCl_2 varlığında azalmıştır. Ancak saf su ile elde edilen değere göre aradaki fark çok azdır. Dielektrik sabitindeki azalma ile CaCl_2 içerisinde Ca^{2+} iyonları bentonit ve kaolin kil daneleri üzerinde farklı etkiye sahiptir. Bentonitin bünyesindeki Ca^{2+} iyonları diğer katyonlar ile yer değiştirerek difüz tabaka kalınlığını azaltarak likit limitin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarda da buna uygun olarak, bentonit numunesinin likit limit değerleri 0.5 M CaCl_2 varlığında azalmıştır. Bentonit numunesinin likit limitindeki azalma her iki çözelti varlığında da beklenen bir durumdur (Katsumi et al, 2008). Likit limitteki azalma yönündeki bu etki NaCl'e göre CaCl_2 varlığında daha belirgindir.

3.2.2. Plastik Limit Deney Sonuçları

Çalışmada kullanılan kaolin ve bentonit numuneleri saf su ve 0.5 M CaCl_2 ve 0.5 M NaCl ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Elde edilen kaolin- CaCl_2 , kaolin-NaCl, bentonit- CaCl_2 , bentonit-NaCl karışımlarından alınan numunelere plastik limit deneyi uygulanmış, deney sonunda her bir numune için su içeriği hesaplanmış ve aritmetik ortalaması alınarak plastik limit değeri elde edilmiştir. Her iki numuneye ait değerler Tablo 3.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ varlığında kaolin ve bentonite ait plastik limit değerleri

Çözelti	Plastik Limit, PL (%)	
	Kaolin	Bentonit
Saf su	NP	50.79
0.5 M NaCl	-	41.25
0.5 M CaCl ₂	-	26.05

Elde edilen verilere göre kaolin numunesi non-plastik özellik göstermekte, bentonit numunesinin likit limit değeri ise NaCl ve CaCl₂ varlığında azalmaktadır. Bentonitin bünyesindeki Ca²⁺ iyonları diğer katyonlar ile yer değiştirerek difüz tabaka kalınlığını azaltarak plastik limitin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre bentonit numunesinin plastik limit değeri CaCl₂ varlığında yaklaşık olarak %50 oranında azalmıştır.

3.3. Sıkışabilirlik Sonuçları

Bu çalışma kapsamında yürütülen konsolidasyon deneyleri ile kaolin ve bentonit numunelerinin sıkışma indisi, şişme indisi ve konsolidasyon katsayısı parametrelerinin CaCl₂ ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Deneyler, hem kaolin hem bentonit için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemeden 0 gün için yürütülen deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 250 gün için tekrar edilmiştir.

3.3.1. Yıllanmanın Sıkışma İndisine (C_c) Etkisi

Sodyum ve kalsiyum iyonları varlığının kaolin ve bentonitin konsolidasyon parametrelerine etkisi üç zaman aşamalı olarak incelenmiş olup baz alınan süreler 0 gün, 60 gün ve 250 gündür. Zaman etkisini incelemek için hazırlanan numuneler, 0.5 M çözelti içinde beklemeye bırakılmıştır. Kaolin ve bentonit numuneleri saf su ve 0.5 M çözelti ile karıştırılarak hazırlanmış ve yine 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ çözeltileri içeren plastik kaplar içerisinde beklemeye bırakılmıştır. Deneylerden elde edilen boşluk oranı ve her bir yüklemede uygulanmış olan gerilme değeri bir grafik üzerinde işaretlenmiş, elde edilen doğrunun eğiminden o numuneye ait sıkışma indisi elde edilmiştir.

3.3.1.1. Kaolinin Sıkışma İndisine (C_c) Yıllanmanın Etkisi

Konsolidasyon deneyi, kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımları ile hazırlanan numunelere zaman etkisi gözetilmeksizin uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M NaCl çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekledikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen sıkışma indisi değerleri Tablo 3.4.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait sıkışma indisi (C_c) değerleri

Numune		Kaolin-Saf su	Kaolin-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,113	0,123
	60 gün	0,111	0,120
	250 gün	0,126	0,118

Tablodaki sıkışma indisi değerleri sırasıyla 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan C_c değerleri numunelerin aynı koşullarda hazırlanmasına rağmen, deney için yerleştirme esnasında oluşabilecek farklılıklar sebebiyle başlangıç boşluk oranı (e_0) değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.5.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri

Numune		Kaolin-Saf su	Kaolin-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,142	0,161
	60 gün	0,124	0,129
	250 gün	0,116	0,126

Kaolin numuneleri için, normalize edilerek hesaplanmış sıkışma indisi değerleri, 0.5 M NaCl çözeltisinde bekletilmiş kaolin-saf su karışımında, 60 gün ve 250 gün için azalma göstermiştir. Aynı durum, 0.5 M NaCl ile karıştırılarak 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş kaolin numunesi için de gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Na^+ iyonlarının varlığının kaolin numunesinin sıkışabilirliğini azalttığını göstermiştir. Yıllanma etkisiyle de bu etkinin daha da arttığı gözlenmiştir. Ayrıca 0.5 M NaCl ile hazırlanan kaolin numunesinin sıkışma indisinin saf

su ile hazırlanana göre daha fazla olduğu diğer bir deyişle sıkışabilirliğinin daha az olduğunu göstermiştir.

Konsolidasyon deneyi CaCl_2 varlığında da saf kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımları ile hazırlanan numunelere zaman etkisi gözlemlenmeksizin uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekledikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen sıkışma indisi değerleri Tablo 3.6.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait sıkışma indisi (C_c) değerleri

Numune		Kaolin-Saf Su	Kaolin-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,113	0,110
	60 gün	0,133	0,130
	250 gün	0,148	0,113

Tablo 3.6.' da ki sıkışma indisi değerleri, numuneleri aynı şartlarda değerlendirebilmek için başlangıç boşluk değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Normalize edilen bu C_c/e_0 değerleri Tablo 3.7.' de gösterilmiştir.

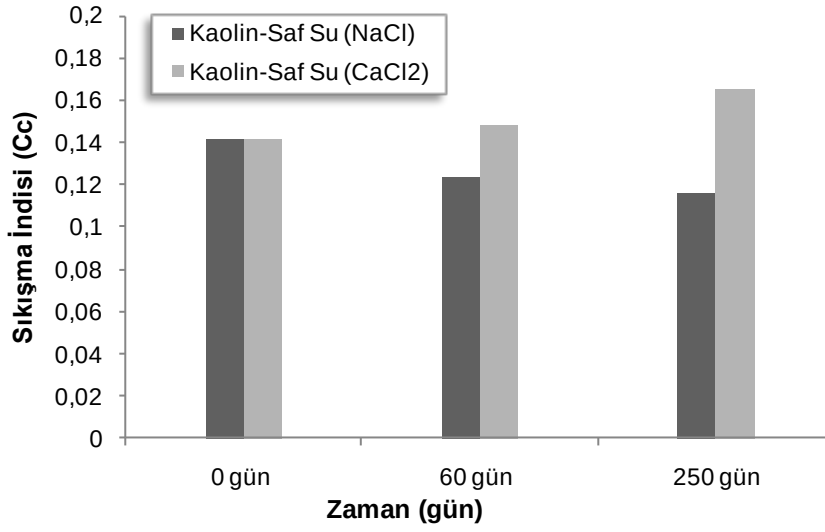
Tablo 3.7. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri

Numune		Kaolin-Saf Su	Kaolin-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,142	0,128
	60 gün	0,148	0,153
	250 gün	0,165	0,141

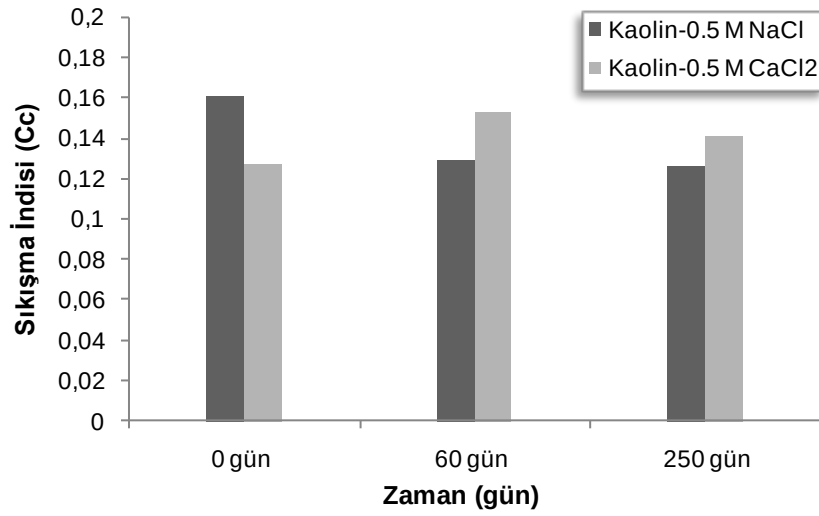
Kalsiyum klorür (CaCl_2) varlığında, hem kaolin-saf su karışımı hem de kaolin- CaCl_2 karışımına ait normalize sıkışma indisi değerleri, zaman geçtikçe artış göstermiştir. Ca^{2+} iyonları varlığında kaolin yapısında flok bir yapı oluşmaktadır. Bu flok yapı arasında daha fazla miktarda su hapsedilmektedir. Bu nedenle kaolin numunesi saf su varlığındaki duruma göre daha fazla sıkışabilirlik gösterir duruma gelmektedir. Bu katı atık depolama sahalarında katyonların etkisi altında kalan kaolinli killi zeminler açısından önem arz eden bir sonuçtur.

Katı atık depolama sahalarındaki atık suda bulunan katyonlar kaolinli zeminlerin zamanla daha fazla oturma yapmasına neden olacaktır.

Şekil 3.3. ve 3.4.' de sırasıyla kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M çözelti karışımlarının 0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri içerisinde bekletilmiş durumlarına ait sıkışma indisi değerleri zamana bağlı olarak kıyaslanmıştır.



Şekil 3.3. Kaolin-saf su karışımına ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.4. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi

3.3.1.2. Bentonitin Sıkışma İndisine (C_c) Yıllanmanın Etkisi

Kaolin numunelerinde olduğu gibi aynı uygulama NaCl varlığında bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M NaCl karışımları için de tekrar edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3.8.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait sıkışma indisi (C_c) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,746	0,764
	60 gün	0,676	0,734
	250 gün	0,802	1,475

Tablo 3.8.' de görülen 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan sıkışma indisi değerleri ve başlangıç boşluk oranı değerine bölünerek normalize edilmiş ve bu normalize değerler (C_c/e_0) Tablo 3.9.' daa gösterilmiştir.

Tablo 3.9. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,283	0,286
	60 gün	0,217	0,258
	250 gün	0,254	0,296

NaCl çözeltisi içinde beklemiş bentonit-saf su karışımı için normalize sıkışma indisi değeri, zaman içinde 0 gündeki (çözelti içinde hiç beklemeyen) değerine göre azalma göstermiştir. Aslında Na^+ iyonları varlığında bentonitin sıkışabilirliğinin, difüz çift tabakadaki genişleme dolayısıyla artması beklenmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre sıkışma indisinde artış yerine saf su ile hazırlanmış numunede azalma gözlenmektedir. Fakat değerlerin birbirine çok yakın olması dolayısıyla deneyden kaynaklanan bir durum olduğu düşünülmektedir. Bentonit-NaCl karışımı için ise bunun tam tersi bir durum söz konusudur, 0 güne kıyasla zaman içinde numunenin, sıkışma indisi değerleri artış göstermiştir.

Konsolidasyon deneyi CaCl_2 varlığında saf bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M CaCl_2 karışımları ile hazırlanan kaolin numunelerinde olduğu gibi öncelikli olarak zaman etkisi gözlemlenmek için uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekledikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen sıkışma indisi değerleri Tablo 3.10.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.10. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait sıkışma indisi (C_c) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,746	0,646
	60 gün	0,774	0,689
	250 gün	1,006	0,734

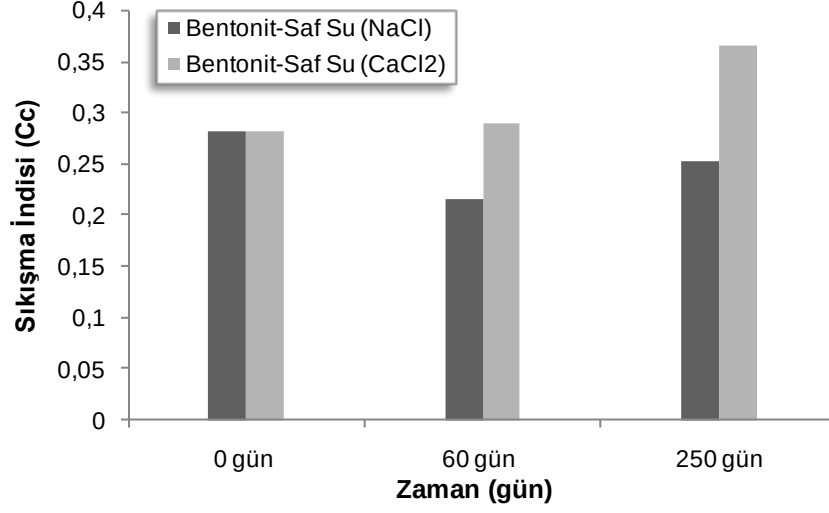
Tablo 3.10.' dan elde edilen sıkışma indisi değerlerinin başlangıç boşluk oranına (e_0) bölünmesi ile hesaplanan C_c/e_0 değerleri Tablo 3.11.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.11. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri

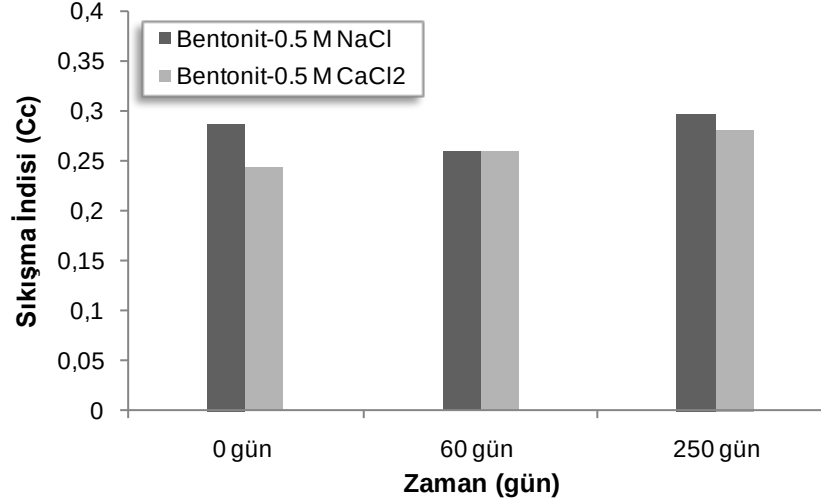
Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,283	0,243
	60 gün	0,290	0,259
	250 gün	0,367	0,281

Kalsiyum klorür (CaCl_2) varlığında, saf su ve 0.5 M CaCl_2 çözeltisiyle karıştırılarak hazırlanmış bentonit numunelerine uygulanan konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlara bakılarak, 60 gün ve 250 günlük sürenin sonunda sıkışma indisi değerlerinin her iki numune için de arttığı görülmektedir. Aslında beklenen davranış, Ca^{2+} iyonları varlığında difüz çift tabakadaki daralma nedeniyle sıkışma indisinde azalma yönündedir. Elde edilen sonuçlar ise bu davranışın tam tersi yönündedir. Bu da zaman etkisinin mekanik davranış üzerinde farklı bir etkisi olduğunu düşündürmektedir. Bu konuda literatürde karşılaştırılabilir sonuçlar bulunamamıştır.

0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri içinde 0 gün, 60 gün ve 250 gün beklemiş, saf su ile karıştırılarak hazırlanmış kaolin ve bentonit numunelerinin normalize sıkışma indisi değerleri, Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.' da daha görsel bir kıyaslama yapılabilmesi açısından bar grafik şeklinde verilmiştir.



Şekil 3.5. Bentonit-saf su karışımına ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.6. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait normalize sıkışma indisi (C_c/e_0) değerleri üzerinde yılanma etkisi

3.3.2. Yıllanmanın Şişme İndisine (C_s) Etkisi

Numunelerin şişme indisleri, konsolidasyon deneyinin yükleme kısmı tamamlandıktan sonra boşaltma yapılarak belirlenmiştir. Boşaltma aşamasından elde edilen boşluk oranı değerleri ve gerilme değerlerini gösteren doğrunun eğiminden her bir numuneye ait şişme indisi değeri elde edilmiştir.

3.3.2.1. Kaolinin Şişme İndisine (C_s) Yıllanmanın Etkisi

Konsolidasyon deneyi, kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımları ile hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M NaCl çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekledikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen şişme indisi değerleri Tablo 3.12.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.12. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait şişme indisi (C_s) değerleri

Numune		Kaolin-Saf su	Kaolin-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,014	0,014
	60 gün	0,012	0,014
	250 gün	0,015	0,010

Tablo 3.12.' deki deney sonuçlarına bakarak, Na^+ iyonlarının varlığının kaolin numuneleri için şişme indisine etkisi, kaolin-saf su karışımı için 60 günde azalma, 250 günde artma şeklindedir. Kaolin-0.5 M NaCl karışımına etkisi ise 250 günde azalma şeklindedir.

Kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımlarına ait şişme indisi değerleri e_0 değerine bölünerek normalize edilmiş ve elde edilen C_s/e_0 değerleri Tablo 3.13.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.13. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri

Numune		Kaolin-Saf su	Kaolin-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,018	0,018
	60 gün	0,013	0,015
	250 gün	0,014	0,011

Tablo 3.13.' deki şişme indisi değerlerine bakarak, genel davranışın her iki karışım için de şişme indisi değerlerinin (normalize edilmiş) zamanla azalması yönünde olduğu söylenebilir. Kaolinin partiküler yapısı, yüksek konsantrasyonlu çözeltiler varlığında flok bir hale gelmektedir. Oluşan bu flok yapı nedeniyle NaCl varlığında, kaolin numunelerinin şişme indisi değerleri yılanma etkisi ile azalma göstermiştir.

Kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımları, CaCl_2 varlığında hazırlanan numunelere NaCl varlığında olduğu gibi öncelikle numune hiç beklemeye bırakılmadan uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekletildikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen şişme indisi değerleri Tablo 3.14.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.14. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait şişme indisi (C_s) değerleri

Numune		Kaolin-saf su	Kaolin-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,014	0,012
	60 gün	0,016	0,012
	250 gün	0,012	0,011

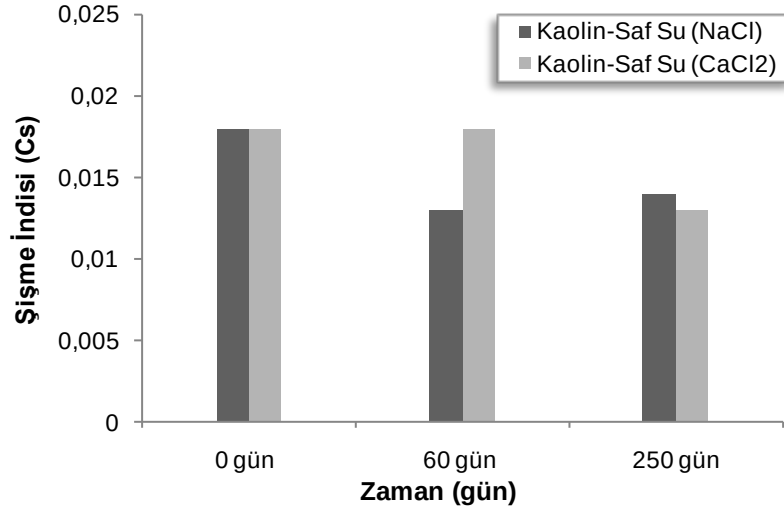
Tablo 3.14.' deki kaolin numunelerine ait 0.5 M CaCl_2 varlığında uygulanan konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar, her bir numuneye ait başlangıç boşluk oranı değerine (e_0) bölünerek normalize edilmiştir. Normalize edilen bu C_s/e_0 değerleri Tablo 3.15.' de gösterilmektedir.

Tablo 3.15. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri

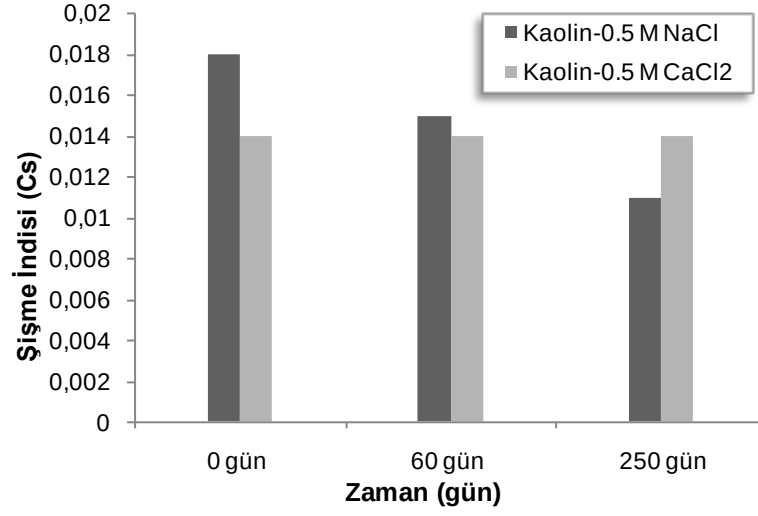
Numune		Kaolin-saf su	Kaolin-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,018	0,014
	60 gün	0,018	0,014
	250 gün	0,013	0,014

Kalsiyum klorür (CaCl_2) varlığında, kaolin-saf su ve kaolin- CaCl_2 karışımlarının normalize şişme indisi değerleri 60 günde herhangi bir değişim göstermezken, 250 günün sonunda azalmıştır. Fakat CaCl_2 ile karıştırılarak hazırlanmış numunede zamanla değişim gözlenmemiştir. Kaolin kilinin yapısında oluşan flok yapı zamanla şişme indisinde azalmaya neden olmuştur.

0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri içinde 0 gün, 60 gün ve 250 gün beklemiş, NaCl ve CaCl_2 çözeltileri ile karıştırılarak hazırlanmış kaolin ve bentonit numunelerinin normalize şişme indisi değerleri Şekil 3.7. ve 3.8.' de kıyaslanmıştır.



Şekil 3.7. Kaolin-saf su karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.8. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi

3.3.2.2. Bentonitin Şişme İndisine (C_s) Yıllanmanın Etkisi

Bentonit numuneleri için de NaCl varlığında bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M NaCl karışımları için tekrar edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3.16.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.16. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait şişme indisi (C_s) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,091	0,094
	60 gün	0,130	0,091
	250 gün	0,122	0,133

Deneyler sonunda hesaplanan normalize şişme indisi parametresi olan C_c/e_0 değerleri Tablo 3.17.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.17. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M NaCl
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
Zaman	0 gün	0,035	0,035
	60 gün	0,042	0,032
	250 gün	0,039	0,044

Bentonit numunelerinde, Na^+ iyonlarının varlığının şişme indisine etkisi, 250 günde belirgin bir artış şeklinde olmuştur. Bentonit kilinin difüz çift tabakasında Na^+ iyonları varlığında bir genişleme oluşmaktadır. Bunun sonucunda bentonit kili daha fazla şişme potansiyeline sahip olmaktadır. Bu etkinin zamanla daha da artış gösterdiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile görülmüştür.

Aynı uygulama $CaCl_2$ varlığında saf bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M $CaCl_2$ karışımları için tekrar edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3.18.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.18. 0.5 M $CaCl_2$ çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait şişme indisi (C_s) değerleri

Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M $CaCl_2$
Çözelti		0.5 M $CaCl_2$	0.5 M $CaCl_2$
Zaman	0 gün	0,091	0,078
	60 gün	0,083	0,072
	250 gün	0,085	0,159

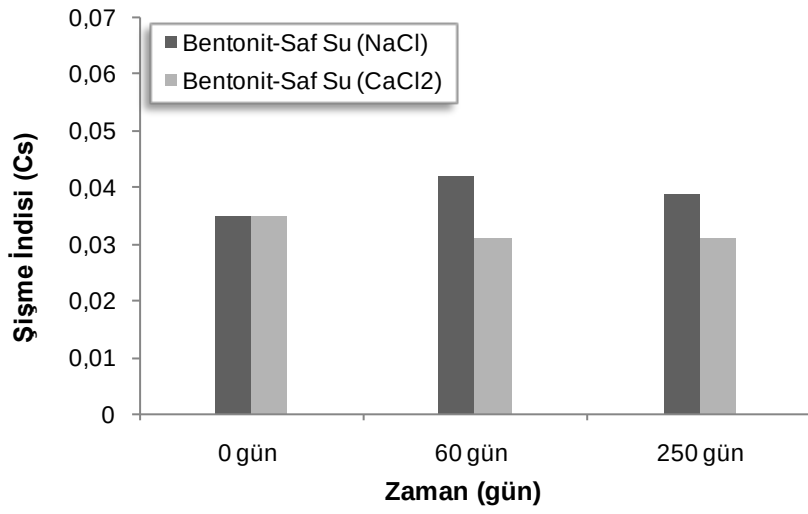
Sırasıyla 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan C_s/e_0 değerleri Tablo 3.19. ' da gösterilmiştir.

Tablo 3.19. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri

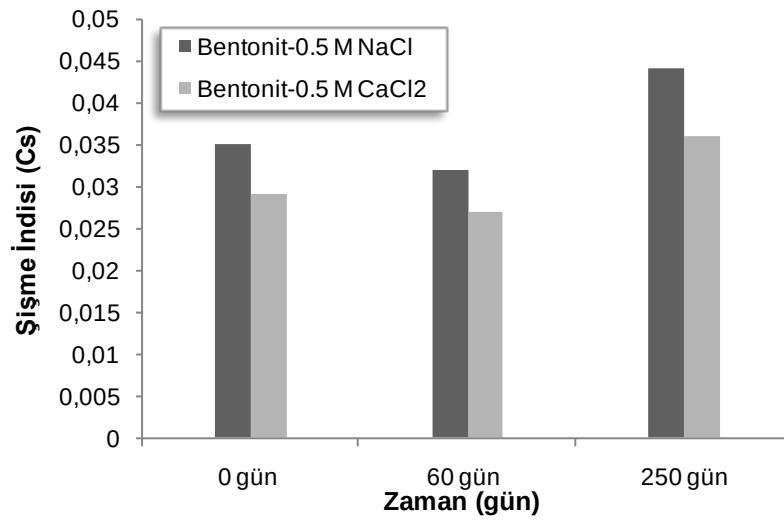
Numune		Bentonit-Saf su	Bentonit-0.5 M CaCl_2
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
Zaman	0 gün	0,035	0,029
	60 gün	0,031	0,027
	250 gün	0,031	0,036

CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş her iki bentonit numunesine ait normalize şişme indisi değeri de, zaman içinde 0 gündeki duruma göre azalma göstermiştir. Fakat CaCl_2 ile hazırlanıp 60 gün bekletilen numunede de azalma gözlenirken, 250 günde artış gözlenmiştir. Fakat genel davranışın azalma olması beklendiğinden dolayı bu 250 gün bekletilmiş bentonit-0.5 M CaCl_2 numunesindeki değerin deneyden kaynaklanan sorunlar dolayısıyla artış yönünde çıktığı düşünülmektedir. Genel olarak, Ca^{2+} iyonları bentonit kilinin şişme potansiyelini azaltmaktadır ve bu etki zamanla pekişmektedir. Bu da katı atık depolama sahalarındaki geçirimsiz bariyerlerde kullanılan bentonit kilinin davranışındaki etkilerin zamanla daha da farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri içinde 0 gün, 60 gün ve 250 gün beklemiş, NaCl ve CaCl_2 çözeltileri ile karıştırılarak hazırlanmış bentonit numunelerinin normalize şişme indisi değerleri Şekil 3.9. ve Şekil 3.10.' da kıyaslanmıştır.



Şekil 3.9. Bentonit-saf su karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.10. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait normalize şişme indisi (C_s/e_0) değerleri ile zamanın ilişkisi

3.3.3. Yıllanmanın Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Etkisi

3.3.3.1. Kaolinin Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Yıllanmanın Etkisi

Konsolidasyon deneyi, kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımları ile hazırlanan numunelere zaman etkisi gözetilmeksizin uygulanmıştır. Aynı karışımlar, 0.5 M NaCl çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekletildikten sonra deney tekrar edilmiştir. Elde edilen konsolidasyon katsayısı değerleri Tablo 3.20. ' da gösterilmiştir.

Tablo 3.20. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/0.5 M NaCl		Kaolin-0.5 M NaCl/0.5 M NaCl	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,365	0,321	0,398	0,436
	60 gün	0,244	0,419	0,304	0,425
	250 gün	0,227	0,298	0,295	0,375

Tablodaki konsolidasyon katsayısı değerleri sırasıyla 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan e_0 değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.21.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.21. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/0.5 M NaCl		Kaolin-0.5 M NaCl/0.5 M NaCl	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,460	0,404	0,520	0,570
	60 gün	0,272	0,467	0,326	0,252
	250 gün	0,209	0,275	0,314	0,399

Kaolin numunelerinin NaCl varlığında konsolidasyon katsayısı değerleri genel olarak, 0 gün ve 250 gün karşılaştırıldığında 0.5 kg/cm² ve 1,0 kg/cm² lik yük kademelerinde azalma

göstermiştir. Bu da yılanma etkisi ile kaolin bünyesine daha çok Na^+ iyonu girmesiyle difüz çift tabakada bir genişleme olduğunu göstermektedir. Fakat bu etki 60 günlük bazı numunelerde değerler uygun olmasa da genel olarak azalma yönündeki trende uygun sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Konsolidasyon deneyi, saf su ve 0.5 M NaCl çözeltisi ile karıştırılarak 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş numunelere uygulanmıştır. Numuneler çözelti içerisinde 60 gün ve 250 gün bekledikten sonra konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen konsolidasyon katsayısı değerleri Tablo 3.22.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.22. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait sıkışma indisi (c_v) değerleri

Numune/Çözelti		Kaolin-Saf su/0.5 M CaCl_2		Kaolin-0.5 M CaCl_2 /0.5 M CaCl_2	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,365	0,321	0,378	0,400
	60 gün	0,378	0,304	0,235	0,579
	250 gün	0,246	0,525	0,139	0,202

Tablo 3.22.' deki konsolidasyon katsayısı değerleri 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan e_0 değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.23.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.23. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri

Numune/Çözelti		Kaolin-Saf su/0.5 M CaCl_2		Kaolin-0.5 M CaCl_2 /0.5 M CaCl_2	
Yükleme		0.5 kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,460	0,404	0,440	0,465
	60 gün	0,421	0,339	0,277	0,683
	250 gün	0,274	0,585	0,174	0,252

Elde edilen sonuçlara göre yılanmanın, kaolin numunelerine ait normalize edilmiş konsolidasyon katsayısı değerlerine etkisi incelendiğinde, genel olarak zaman içerisinde Ca^{2+} katyonları varlığında konsolidasyon katsayılarında azalma gözlenmiştir. Kaolinin yapısı 0.5 M CaCl_2 varlığında flok bir yapıya dönüşmektedir (Horpibulsuk 2011; Sridharan, 1978). Bu nedenle danelerin arasından suyun çıkışı daha uzun bir zaman almaktadır. Dolayısıyla konsolidasyon katsayısında zamanla azalma gözlenmektedir. İlk 0 günlük numuneye göre 250 günlük numunenin konsolidasyon katsayısında yaklaşık %45' lik bir azalma gözlenmektedir.

3.3.3.2. Bentonitin Konsolidasyon Katsayısına (c_v) Yılanmanın Etkisi

Saf su ve 0.5 M NaCl çözeltileri ile karıştırılarak hazırlanıp, yine 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş bentonit numunelerinin konsolidasyon katsayıları Tablo 3.24.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.24. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri

Numune/Çözelti		Bentonit-Saf su/0.5 M NaCl		Bentonit-0.5 M NaCl/0.5 M NaCl	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,006	0,005	0,008	0,007
	60 gün	0,009	0,010	0,026	0,012
	250 gün	0,011	0,012	0,008	0,004

Elde edilen konsolidasyon katsayısı değerleri sırasıyla 0 gün, 60 gün ve 250 günlük deneyler sonunda hesaplanan e_0 değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.25.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.25. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_0) değerleri

Numune/Çözelti		Bentonit-Saf su/0.5 M NaCl		Bentonit-0.5 M NaCl/0.5 M NaCl	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,002	0,002	0,003	0,003
	60 gün	0,003	0,003	0,009	0,004
	250 gün	0,003	0,004	0,003	0,001

Tablo 3.25.' deki deney sonuçlarında, bentonit-saf su karışımının 0.5 kg/cm² ve 1,0 kg/cm² 'lik yüklemelerde 60 gün ve 250 günlük süreçler için konsolidasyon katsayılarında artış meydana gelmiştir. NaCl çözeltisi ile karıştırılarak hazırlanmış bentonit numunesi için ise genel bir trend gözlenememiştir. Yıllanma etkisinin, NaCl çözeltisi içinde beklemiş bentonit numunelerinin normalize edilmiş konsolidasyon katsayısı değerlerine belirgin bir etkisi olmamıştır.

Bentonit numunesi saf su ve 0.5 M CaCl₂ çözeltisi ile karıştırılarak çözelti içerisinde hiç bekletilmeden (0 gün) ve 0.5 M CaCl₂ çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekletilerek konsolidasyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.26.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.26. 0.5 M CaCl₂ çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait sıkışma indisi (c_v) değerleri

Numune/ Çözelti		Bentonit-Saf su/0.5 M CaCl ₂		Bentonit-0.5 M CaCl ₂ /0.5 M CaCl ₂	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,006	0,005	0,014	0,010
	60 gün	0,015	0,012	0,032	0,014
	250 gün	0,012	0,011	0,001	0,012

Daha sonra konsolidasyon katsayısı değerleri e_0 değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.27.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.27. 0.5 M CaCl₂ çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize konsolidasyon katsayısı (c_v/e_o) değerleri

Numune/ Çözelti		Bentonit-Saf su/0.5 M CaCl ₂		Bentonit-0.5 M CaCl ₂ /0.5 M CaCl ₂	
Yükleme		0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²	0.5kg/cm ²	1,0kg/cm ²
c_v (cm ² /dk)					
Zaman	0 gün	0,003	0,002	0,005	0,004
	60 gün	0,005	0,004	0,012	0,005
	250 gün	0,004	0,004	0,004	0,005

Elde edilen sonuçlara göre yılanma etkisinin, saf su ve 0.5 M CaCl₂ çözeltisi ile hazırlanmış olan numunelere ait normalize edilmiş değerleri incelendiğinde, her yük kademesinde belirgin bir trend olmamasına rağmen genel olarak zaman içerisinde konsolidasyon katsayısı artmıştır. Çözelti içerisinde yoğun bir halde bulunan Ca²⁺ iyonları kilin tabakalarındaki diğer iyonlarla yer değiştirerek difüz çift tabakanın daralmasına neden olmaktadır (Sridharan, 1978). Böylelikle su daneler arasında daha hızlı hareket ederek zeminden daha hızlı bir şekilde dışarıya çıkmaktadır. Bu yüzden konsolidasyon katsayısında artış gözlenmektedir.

3.4. Permeabilite Sonuçları

Bu çalışma kapsamında konsolidasyon deneylerinden elde edilen kaolin ve bentonit numunelerinin permeabilite katsayısının (k), 0.5 M CaCl₂ ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Permeabilite deneyi, hem kaolin hem bentonit numuneleri için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemeden 0 gün için yürütülen deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 250 gün için tekrar edilmiştir. Permeabilite değerleri, 1,0 kg/cm² lik gerilme altındaki değerler baz alınarak hesaplanmıştır.

3.4.1. Kaolinin Permeabilite Katsayısına (k) Yılanmanın Etkisi

Tablo 3.28.' de NaCl çözeltisi içinde beklemiş kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımlarına ait permeabilite katsayısı değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.28. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait permeabilite katsayısı (k) değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/ 0.5 M NaCl	Kaolin-0.5 M NaCl/ 0.5 M NaCl
k (*10 ⁸ cm/sn)			
Zaman	0 gün	25,67	16,0
	60 gün	19,56	28,32
	250 gün	16,9	24,39

Kaolin-saf su, kaolin-0.5 M NaCl numunelerinin hazırlanma koşullarında oluşabilecek farklılıklar nedeniyle, her bir deneyden elde edilen permeabilite katsayısı (k) değeri, başlangıç boşluk oranı değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Elde edilen k/e₀ değerleri Tablo 3.29.'da gösterilmektedir.

Tablo 3.29. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde beklemiş kaolin numunesine ait normalize permeabilite katsayısı (k/e₀) değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/ 0.5 M NaCl	Kaolin-0.5 M NaCl/ 0.5 M NaCl
k (*10 ⁸ cm/sn)			
Zaman	0 gün	32,33	20,92
	60 gün	21,81	30,42
	250 gün	15,58	25,97

0.5 M NaCl içerisinde bekletilmiş kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M NaCl karışımlarına ait permeabilite katsayıları, konsolidasyon deneyinden elde edilen c_v ve m_v parametreleri ile hesaplanmıştır. Dolayısı ile c_v değeri trendleri permeabilite katsayısı sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında genel anlamda yılanma ile Na⁺ iyonları varlığında kaolinin permeabilite katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Kaolinde dielektrik sabitinin düşmesi ile (NaCl' nin dielektrik sabitinin suyun dielektrik sabitinden küçüktür.) daneler arası çekim kuvveti artar (Sridharan, 1978). Oluşacak flok yapı ve danelerin birbirini daha kuvvetli çekmesinin etkisi ile permeabilitede bir azalma meydana gelmesi beklenen bir sonuçtur. Yılanma arttıkça bu etkinin pekiştiği elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

Çalışmada, CaCl_2 varlığında, kaolin numunelerine uygulanan deneylerden elde edilen permeabilite katsayısı (k) değerleri Tablo 3.30.' da gösterilmektedir.

Tablo 3.30. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait permeabilite katsayısı (k) değerleri

Numune/		Kaolin-Saf su/	Kaolin-0.5 M CaCl_2 /
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
k (* 10^8 cm/sn)			
Zaman	0 gün	25,67	21,35
	60 gün	32,75	89,73
	250 gün	63,92	6,95

Diğer deneylerde olduğu gibi 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde 60 gün ve 250 gün bekletilmiş kaolin-saf su, kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımları ile bekletilmeye bırakılmamış kaolin-saf su, kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımlarına ait permeabilite katsayısı (k) değerleri, başlangıç boşluk oranı değeri olan e_0 ' a bölünerek normalize edilmiştir. Elde edilen k/e_0 değerleri Tablo 3.31.' da görülmektedir.

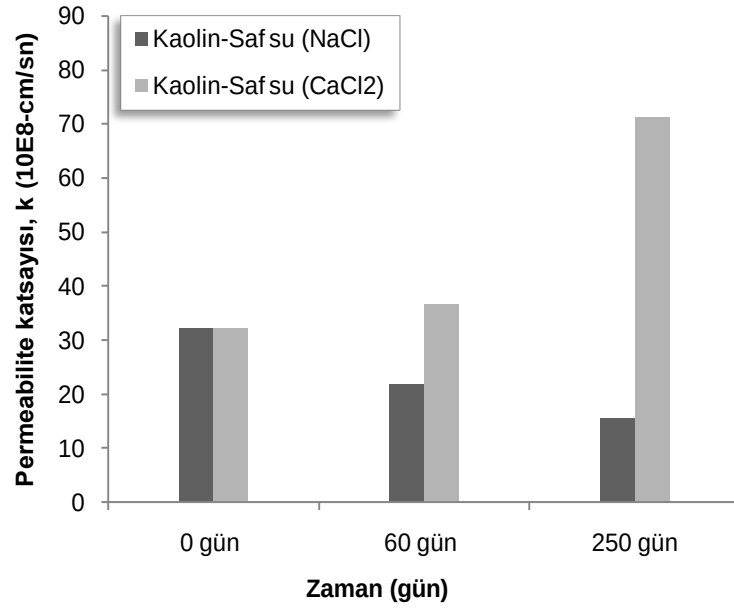
Tablo 3.31. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri

Numune/		Kaolin-Saf su/	Kaolin-0.5 M CaCl_2 /
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
k (* 10^8 cm/sn)			
Zaman	0 gün	32,33	24,83
	60 gün	36,51	105,81
	250 gün	71,26	8,68

Tablo 3.31.' de 0.5 M CaCl_2 çözeltisi varlığında kaolin-saf su ve kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımlarına ait normalize permeabilite katsayısı değerleri görülmektedir. Kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımının c_v değerlerinin belirli bir trendte olmamasından dolayı permeabilite katsayısı değerleri yılanma ile belirli bir trend göstermemiştir. Bu nedenle saf su ile karıştırılarak hazırlanmış numuneye ait sonuçlara göre yorum yapmak daha doğru olacaktır. Bekletilmemiş 0 güne ait sonuçlara bakılacak olursa, 0.5 M CaCl_2 ile karıştırılarak hazırlanmış kaolinin normalize permeabilite katsayısı değerinin, saf su ile karıştırılarak hazırlanmış kaolin

numunesine göre azaldığı görülmektedir. Ca^{+2} iyonları varlığında kaolinde oluşacak flok yapısı nedeniyle hidrolik iletkenlikteki azalma beklenen bir sonuçtur. Ancak, saf su ile karıştırılarak hazırlanmış numuneye ait sonuçlara bakıldığında yılanma ile tam tersi bir etkinin, yani permeabilite katsayısında bir artışın meydana geldiğini görülmektedir.

Saf su ile karıştırılarak hazırlanmış ve 0.5 M NaCl ile 0.5 M CaCl_2 içerisinde bekletilmiş kaolin örneklerine ait normalize permeabilite katsayısı değerleri Şekil 3.11.' de bar grafikte gösterilmiştir. Böylelikle daha görsel bir kıyaslama imkanı elde edilmiştir.



Şekil 3.11. Kaolin-saf su karışımına ait permeabilite katsayısı (k)değerleri ile zamanın ilişkisi

3.4.2. Bentonitin Permeabilite Katsayısına (k) Yılanmanın Etkisi

Tablo 3.32.' de NaCl çözeltisi içinde beklemiş bentonit-saf su ve bentonit-0.5 M NaCl karışımlarına ait permeabilite katsayısı değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.32. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait permeabilite katsayısı (k) değerleri

Numune/		Bentonit-Saf su/	Bentonit-0.5 M NaCl/
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
k (*10 ⁸ cm/sn)			
Zaman	0 gün	1,15	1,43
	60 gün	2,42	28,32
	250 gün	2,07	1,08

Kaolin numunelerinde olduğu gibi bentonit numunelerine ait permeabilite katsayısı değerleri başlangıç boşluk oranına (e_0) bölünmüştür. Böylelikle numunenin ring içerisine yerleşim farklılıkları ortadan kaldırılarak sonuçlar normalize edilmiştir. Tablo 3.33.' de NaCl varlığında bentonit örneklerine ait normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 3.33. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri

Numune/		Bentonit-Saf su/	Bentonit-0.5 M NaCl/
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
k (*10 ⁸ cm/sn)			
Zaman	0 gün	0,44	0,54
	60 gün	0,78	9,95
	250 gün	0,66	0,36

Tablo 3.33.' deki sonuçlara bakılarak 0.5 M NaCl ile karıştırılıp yine 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş bentonitin normalize permeabilite katsayısı değerlerinde belirli bir trend elde edilemediği görülmektedir. Bu durum o numunenin c_v değerlerinin genel olarak belirli bir trendte olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle NaCl varlığında bentonitin permeabilite katsayısı parametresini değerlendirebilmek için bentonit-saf su karışımına ait sonuçlara bakmak yararlı olacaktır. Bu numuneye ait sonuçlara bakıldığında genel olarak yılanma etkisi ile Na^+ iyonları varlığında permeabilite katsayısının arttığı görülmektedir. Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş 0 gündeki sonuca göre 250 günlük permeabilite katsayısının artış oranı %33 civarındadır.

Tablo 3.34. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait permeabilite katsayısı (k) değerleri

Numune/		Bentonit-Saf su/	Bentonit-0.5 M CaCl_2 /
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
k (* 10^8 cm/sn)			
Zaman	0 gün	1,15	3,02
	60 gün	2,76	3,47
	250 gün	2,85	2,84

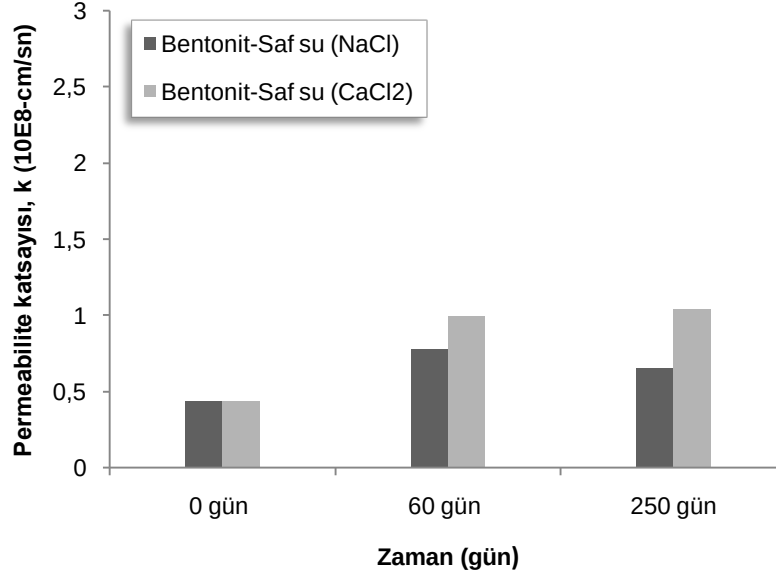
Tablo 3.34.' deki sonuçlar her bir numuneye ait başlangıç boşluk oranı değerine (e_0) bölünerek normalize edilmiştir. Bu sonuçlar Tablo 3.35.' de gösterilmektedir.

Tablo 3.35. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait normalize permeabilite katsayısı (k/e_0) değerleri

Numune/		Bentonit-Saf su/	Bentonit-0.5 M CaCl_2 /
Çözelti		0.5 M CaCl_2	0.5 M CaCl_2
k (* 10^8 cm/sn)			
Zaman	0 gün	0,44	1,14
	60 gün	1,0	1,3
	250 gün	1,04	1,09

Tablo 3.35.' deki bentonit-saf su karışımına uygulanan konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilite katsayısı sonuçlarına bakılarak kıyaslama yapılacak olursa, bentonit kilinde Ca^{2+} iyonlarının varlığında yılanma ile bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, bentonite nüfuz eden Ca^{2+} iyonlarının difüz çift tabakaya dahil olup +1 değerlikli iyonları difüz çift tabakanın dışına çıkarması ile açıklanabilir. Ca^{2+} iyonları ile daralan çift tabaka ile bentonit tabakaları arasındaki boşluk miktarı artacak böylelikle numune daha geçirgen bir hale gelecektir. Artış yönündeki bu etki yılanma ile pekiştirilmiştir.

Saf su ile karıştırılarak hazırlanmış ve 0.5 M NaCl ile 0.5 M CaCl_2 içerisinde bekletilmiş kaolin örneklerine ait normalize permeabilite katsayısı değerleri Şekil 3.12.' de kıyaslanmıştır.



Şekil 3.12. Bentonit-saf su karışımına ait permeabilite katsayısı (k) değerleri ile zamanın ilişkisi

Genel olarak sonuçlara bakıldığında, yıllanma etkisi ile permeabilite, hem kaolin hem bentonit numuneleri için artmaktadır. Bu davranış geçirimsiz kil bariyerler açısından son derece önemlidir. Zamanla çeşitli çözeltiler varlığında kilin yapısında oluşacak değişiklikler nedeniyle permeabilite değerinde meydana gelecek artış geçirimsiz kil bariyerin işlevini yitirmesine ve ekonomik kayıplar ile yeraltı sularının kirlenmesine neden olacaktır.

3.5. Kayma Dayanımı Sonuçları

Bu çalışma kapsamında yürütülen direk kesme deneyleri ile kaolin ve bentonit numunelerinin içsel sürtünme açısının 0.5 M CaCl_2 ve NaCl varlığında, zamana bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Direk kesme deneyleri konsolidasyonlu-drenajlı olarak yapılmıştır. Öncelikle numunenin gerilme artında konsolide olması için beklenilmiş, daha sonra kayma gerilmeleri aşırı boşluk suyu basıncı oluşturmayacak şekilde yavaş bir şekilde uygulanmıştır. Hazırlanan numunelere her deneyde 0.5, 1.0 ve 2.0 kg/cm^2 lik artan yüklemeler uygulanmıştır. Deneyler, hem kaolin hem bentonit için üç aşamalı olarak yürütülmüştür. Öncelikli olarak çözelti içinde beklemeden 0 gün için yapılan deneyler, aynı şartlar altında 60 gün ve 190 gün için tekrar edilmiştir.

3.5.1. Kaolinin Efektif İçsel Sürtünme Açısı (Φ') Değerine Yıllanmanın Etkisi

Saf su ve 0.5 M NaCl çözeltisi ile karıştırılarak hazırlanmış numuneler, öncelikle zaman etkisi gözetilmeksizin 0 gün olarak adlandırılan direk kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. Aynı şekilde hazırlanan numuneler, 0.5 M NaCl çözeltisi içinde 60 gün ve 190 gün (yaklaşık 6 ay) bekletildikten sonra direk kesme deneyi bu numunelere de uygulanmıştır. Elde edilen içsel sürtünme açısı (Φ') değerleri Tablo 3.36.' da gösterilmiştir.

Tablo 3.36. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait CD deneylerden elde edilen efektif içsel sürtünme açısı (Φ') değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/ 0.5 M NaCl	Kaolin-0.5 M NaCl/ 0.5 M NaCl
İçsel sürtünme açısı, Φ' (°)			
Zaman	0 gün	34,14	33,52
	60 gün	31,37	30,96
	190 gün	29,74	28,61

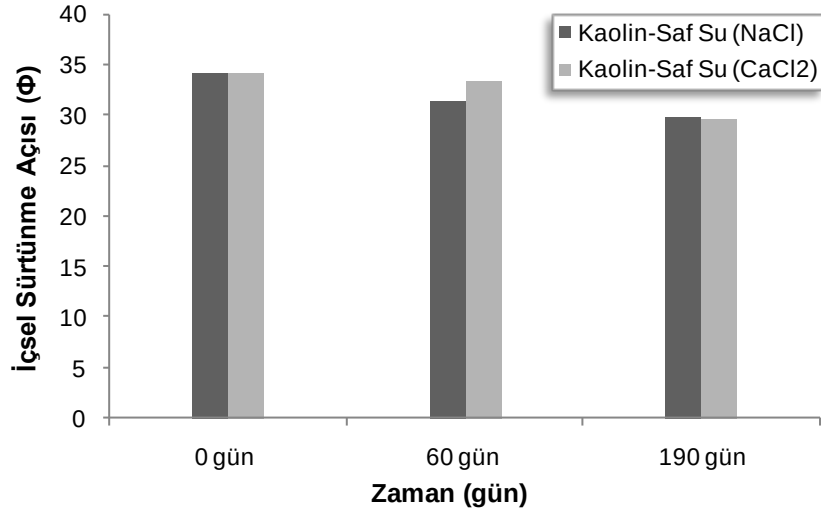
Direk kesme deneyinden elde edilen efektif içsel sürtünme açısı değerlerine bakıldığında, yıllanma etkisiyle 0.5 M NaCl varlığında azalma meydana geldiği görülmektedir. Başka bir deyişle, zaman içerisinde kaolinin kayma dayanımında düşüş gözlenmektedir. Fakat bu düşüş %10-15 arasında değişim göstermektedir. Allam and Sridharan (1979) yaptıkları çalışmada kaolinin kayma dayanımı üzerinde “aging” (yıllanma) etkisini incelemişlerdir. Fakat kaolini herhangi bir çözelti içerisinde değil, saf su içerisinde bekletmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre yıllanma etkisi ile kaolinin tanjant elastisite modülünde 30 gün sonunda artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat bu çalışmada numuneler, çözelti içerisinde bekletildiğinden kayma dayanımında azalma olduğu ortaya çıkmıştır. Çözelti içerisinde bulunan Na^+ iyonları kaolinin difüz çift tabakasında genişleme meydana getirdiğinden, daneler arası sürtünme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. Böylelikle kayma dayanımı parametrelerinde düşüş ortaya çıkmaktadır. Bu düşüşün oranı %10-15 ile sınırlı kalmıştır.

Saf halde ve 0.5 M CaCl_2 çözeltisi ile karıştırılarak hazırlanan ve 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içerisinde bekletilen kaolin numunelerine ait efektif içsel sürtünme açısı (Φ') değerleri Tablo 3.37.' de gösterilmiştir.

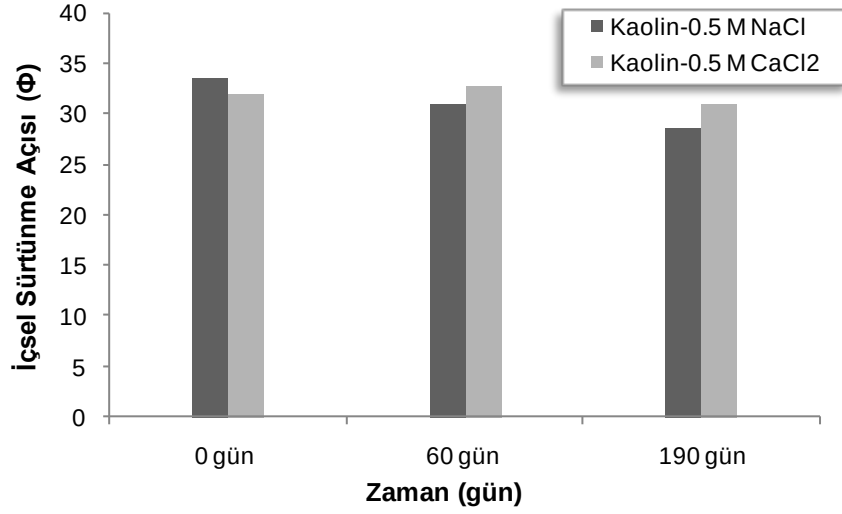
Tablo 3.37. 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içinde bekletilmiş kaolin numunesine ait CD deneylerinden elde edilen efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') değerleri

Numune/ Çözelti		Kaolin-Saf su/ 0.5 M CaCl_2	Kaolin-0.5 M CaCl_2 / 0.5 M CaCl_2
İçsel sürtünme açısı, ϕ' (°)			
Zaman	0 gün	34,14	32,01
	60 gün	33,42	32,88
	190 gün	29,54	30,96

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, genel olarak yıllanma etkisi ile Ca^{2+} iyonları varlığında efektif içsel sürtünme açısında azalma dolayısıyla kayma dayanımında düşüş gözlenmektedir. Allam and Sridharan (1979)' ın yaptığı çalışmadaki “aging” (yıllanma) etkisi ile kaolinin kayma dayanımındaki artış eğiliminin tersi yönünde bir davranış söz konusudur. Fakat bu çalışmada numuneler çözelti içerisinde beklediklerinden genel davranış kayma dayanımında azalma şeklinde olmuştur.



Şekil 3.13. Kaolin-saf su karışımına ait içsel sürtünme açısı (ϕ') değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.14. Kaolin-0.5 M çözelti karışımına ait içsel sürtünme açısı (Φ') değerleri ile zamanın ilişkisi

3.5.2. Bentonitin İçsel Sürtünme Açısı (Φ') Değerine Yıllanmanın Etkisi

Bentonit numuneleri de kaolin numuneleri ile aynı şekilde hazırlanarak konsolidasyonlu-drenajlı direk kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. NaCl çözeltisi varlığında yürütülen deneylerden elde edilen efektif içsel sürtünme açıları Tablo 3.38.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.38. 0.5 M NaCl çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine CD deneylerinden elde edilen efektif ait içsel sürtünme açısı (Φ') değerleri

Numune/		Bentonit-Saf su/	Bentonit-0.5 M NaCl/
Çözelti		0.5 M NaCl	0.5 M NaCl
İçsel sürtünme açısı, Φ' (°)			
Zaman	0 gün	13,41	14,04
	60 gün	23,43	19,05
	190 gün	30,12	21,43

Bentonit numunesinin 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş haldeki içsel sürtünme açısı değerlerine bakıldığında, zamanla bentonitin içsel sürtünme açısı dolayısıyla kayma dayanımında artış meydana gelmiştir. 0.5 M NaCl çözeltisi varlığında dielektrik sabiti azaldığından çekici elektriksel kuvvetler artacaktır. Bu artış etkisi ile kil daneleri birbirini daha

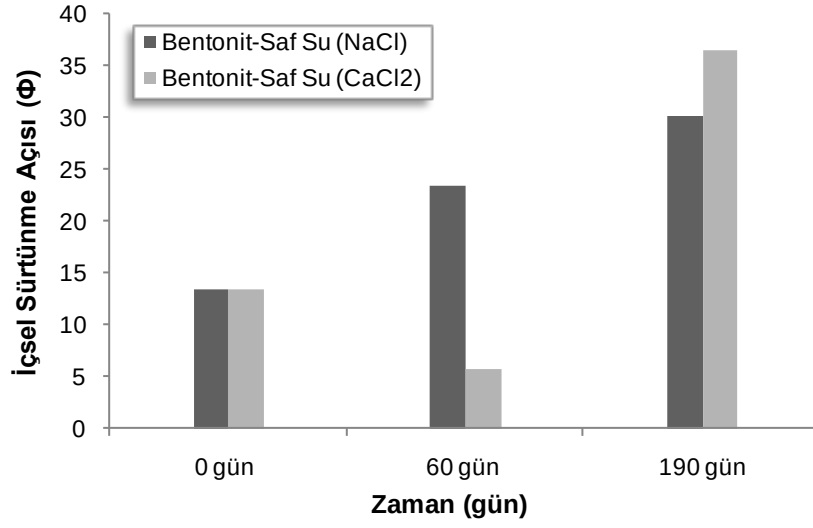
fazla çekmiş, böylelikle bentonitin efektif içsel sürtünme açısında, yani kayma dayanımında bir artış meydana gelmiştir.

CaCl₂ çözeltisi varlığında deneye tabi tutulan bentonit numunelerinin elde edilen efektif içsel sürtünme açıları Tablo 3.39.' da gösterilmektedir.

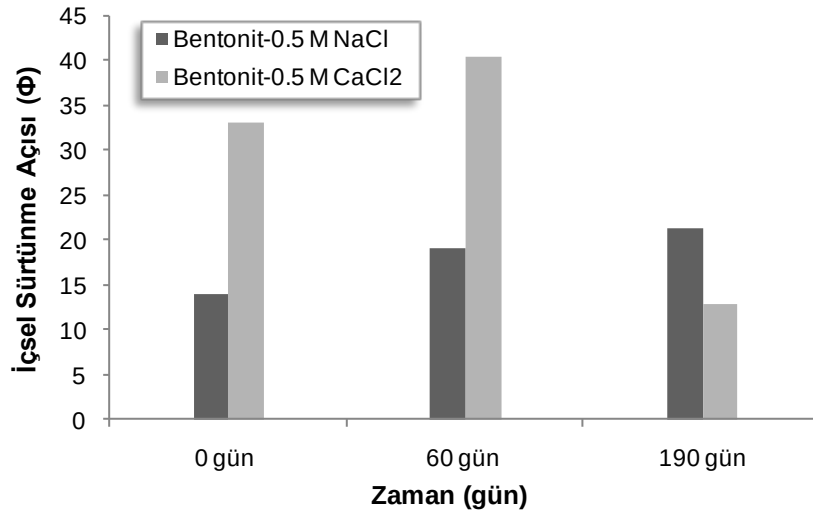
Tablo 3.39. 0.5 M CaCl₂ çözeltisi içinde bekletilmiş bentonit numunesine ait CD deneylerinden elde edilen efektif içsel sürtünme açısı (Ø') değerleri

Numune/ Çözelti		Bentonit-Saf su/ 0.5 M CaCl ₂	Bentonit-0.5 M CaCl ₂ / 0.5 M CaCl ₂
İçsel sürtünme açısı, Ø' (°)			
Zaman	0 gün	13,41	33,16
	60 gün	35,74	40,47
	190 gün	36,5	12,95

Genel olarak, 0.5 M CaCl₂ çözeltisi varlığında içsel sürtünme açısında artış meydana gelmiştir. Bu konuda bentonit ve CaCl₂ çözeltisi ile literatürde karşılaştırılacak herhangi bir sonuca ulaşılamamıştır. Sadece Allam and Sridharan (1979)' ın yaptıkları çalışmada kaolinin kayma dayanımı üzerinde “aging” (yıllanma) etkisini saf su varlığında incelemişler ve zamanla kaolinin kayma dayanımında artış olduğunu belirtmişlerdir. Bentonitin daneleri etrafındaki, difüz çift tabakanın Ca⁺² iyonları varlığında daraldığı ve daneler arası sürtünmenin ve çekim kuvvetlerinin arttığı bilinmektedir (Sridharan, 1978; Yong and Warkentin, 1975). Bu durumda bentonit numunesinin kayma dayanımında artış gözlenir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar zamanla bu etkinin arttığını göstermektedir.



Şekil 3.15. Bentonit-saf su karışımına ait içsel sürtünme açısı (Ø') değerleri ile zamanın ilişkisi



Şekil 3.16. Bentonit-0.5 M çözelti karışımına ait içsel sürtünme açısı (Ø') değerleri ile zamanın ilişkisi

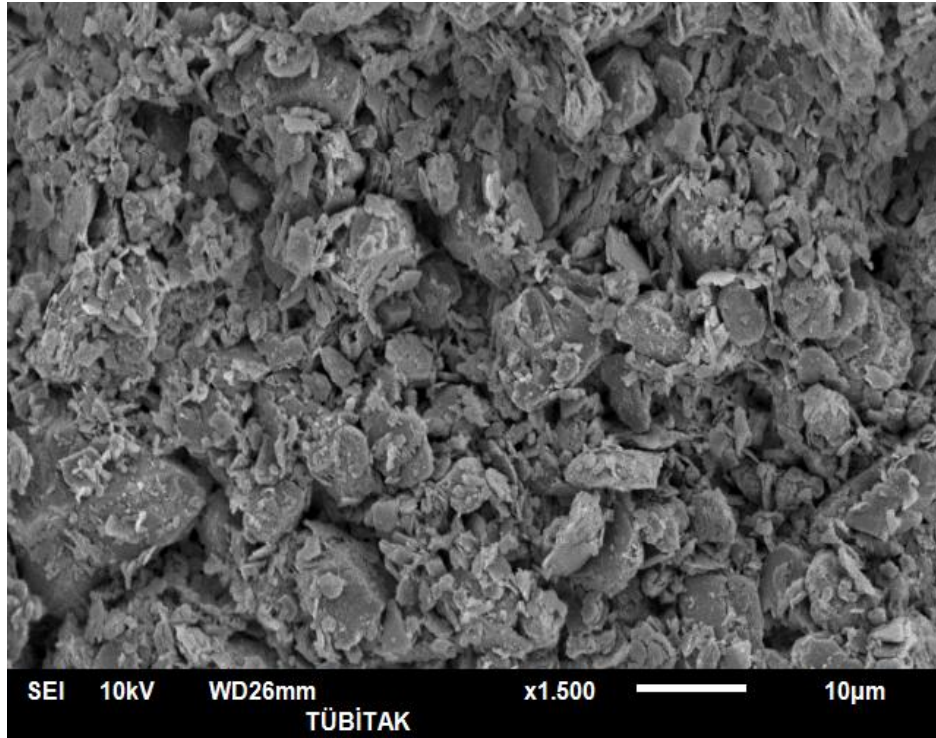
3.6. Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçları

Elektron mikroskobu ile görüntü analizi için 5 farklı numune hazırlanmıştır. Numunelerden ikisi çözelti içerisinde hiç bekletilmeden yani yıllanma etkisine maruz bırakılmadan saf su ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Diğer kaolin ve bentonit numuneleri de 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ çözeltileri içerisinde 1 yıl (360 gün) bekletilerek elektron mikroskobu analizleri için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin su içeriği, her bir numunenin likit limit değerinin %75'i kadardır. Numunelerin analizi TÜBİTAK-Malzeme Araştırma Merkezi'nde yapılmış, numuneler analiz

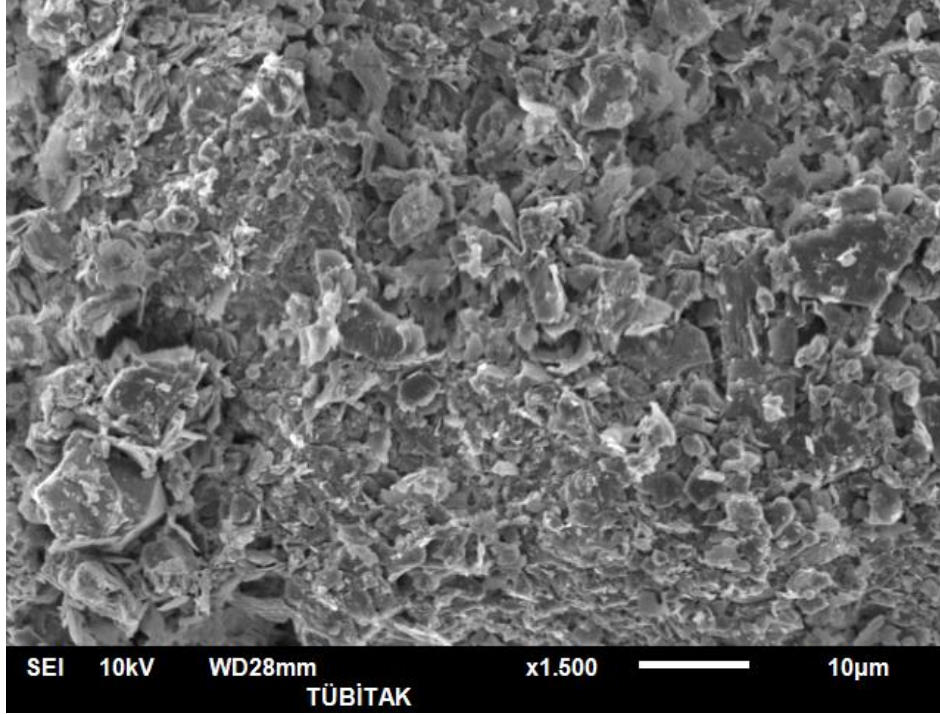
edilmek üzere gönderilmeden önce rötre kapları içerisinde açık havada en az 7 gün bekletilmek suretiyle kurutulmuŗtur. Bu kurutma iŗlemi her ne kadar mikro yapıda b z lmelere neden olsa da tüm numuneler aynı koŗullar altında hazırlandı ından, karŗılaŗtırma açısından herhangi bir problem yaratmamaktadır.

3.6.1. Kaolin Numunelerinin Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi Sonuçları

Elektron mikroskobu analizi için hazırlanan kaolin numunelerinin tamamı, numunelerin likit limit değerinin %75' i oranında saf su ile karŗıtılarak hazırlanmıŗtır. Numuneler, hiç çözelti içinde bekletilmemiŗ kaolin-saf su ve 360 gün süre ile 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl  çözeltileri içerisinde bekletilmiŗ kaolin-saf su karŗımları ŗeklinde, toplam üç adettir. Hazırlanan kaolin numunelerinin 1500 kat b y t lm ŗ analiz fotoğrafları ŗekil 3.17. ve ŗekil 3.18.' de gösterilmektedir.



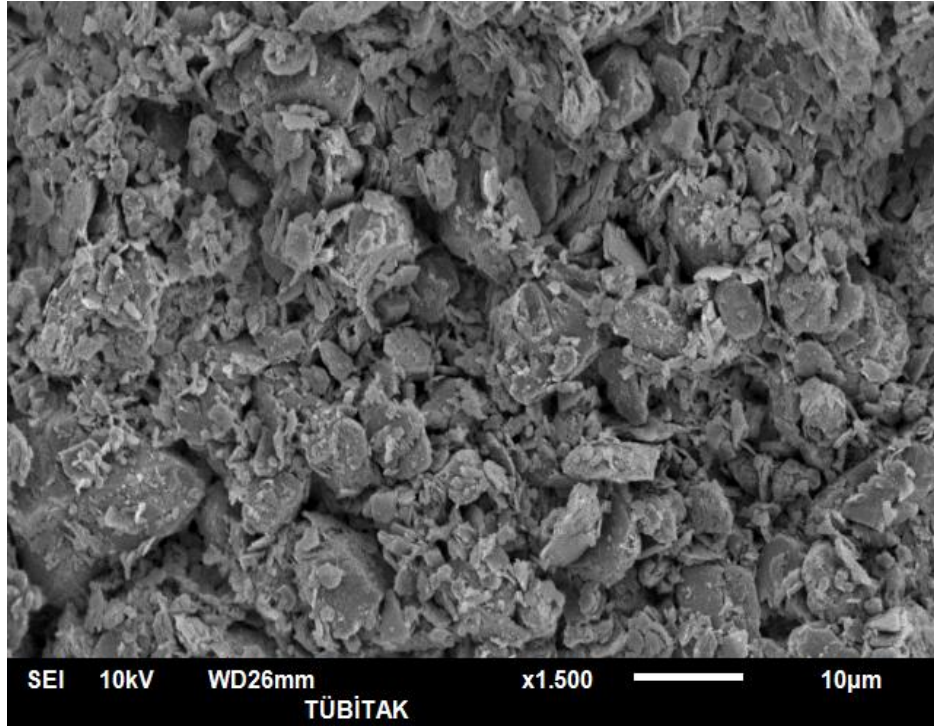
(a)



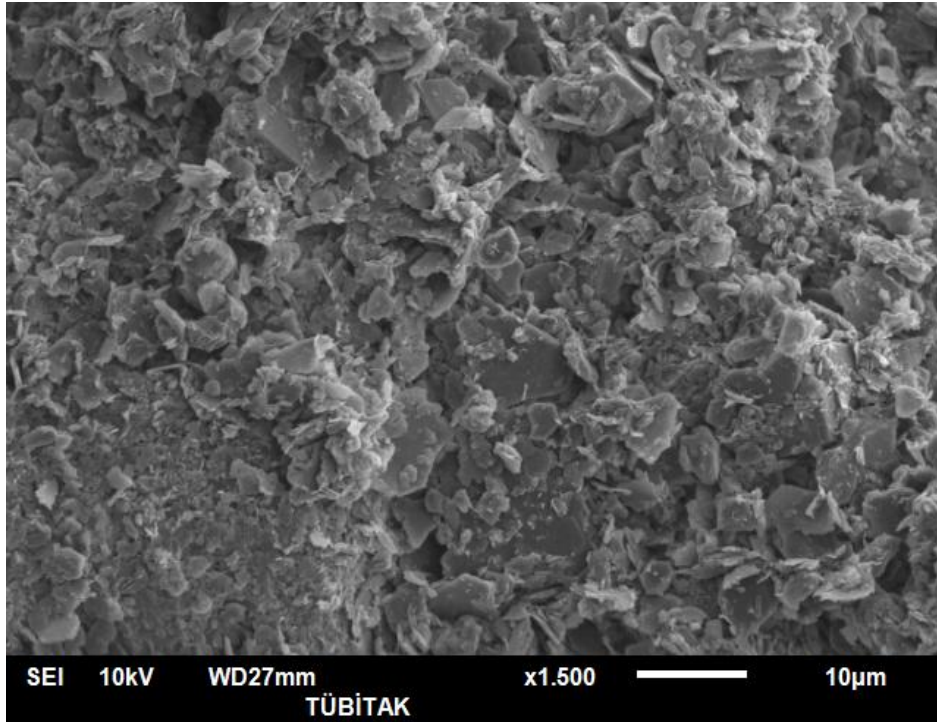
(b)

Şekil 3.17. Yılanmanın ve 0.5 M NaCl çözelti varlığının kaolinin mikro yapısına etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş kaolin-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş kaolin-saf su karışımı

Elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde kaolinin yapısında, 360 gün çözelti içerisinde bekleme sonucunda boşluklardaki azalma açık bir şekilde Şekil 3.17.a. ve Şekil 3.17.b. kıyaslandığında görülmektedir. Kaolinde, dielektrik sabitinin değişmesiyle, çift tabaka kalınlığında kayda değer bir değişim meydana gelmez ancak, dielektrik sabitinin düşmesi daneler arası çekimi artırır (Sridharan, 1978). Suyun dielektrik sabitinin, 0.5 M NaCl çözeltisinin dielektrik sabitinden daha büyük olduğu düşünüldüğünde, 0.5 M NaCl varlığında kaolin daneleri arasındaki çekim kuvveti artmış, böylelikle boşluk oranında bir azalma meydana gelmiştir.



(a)



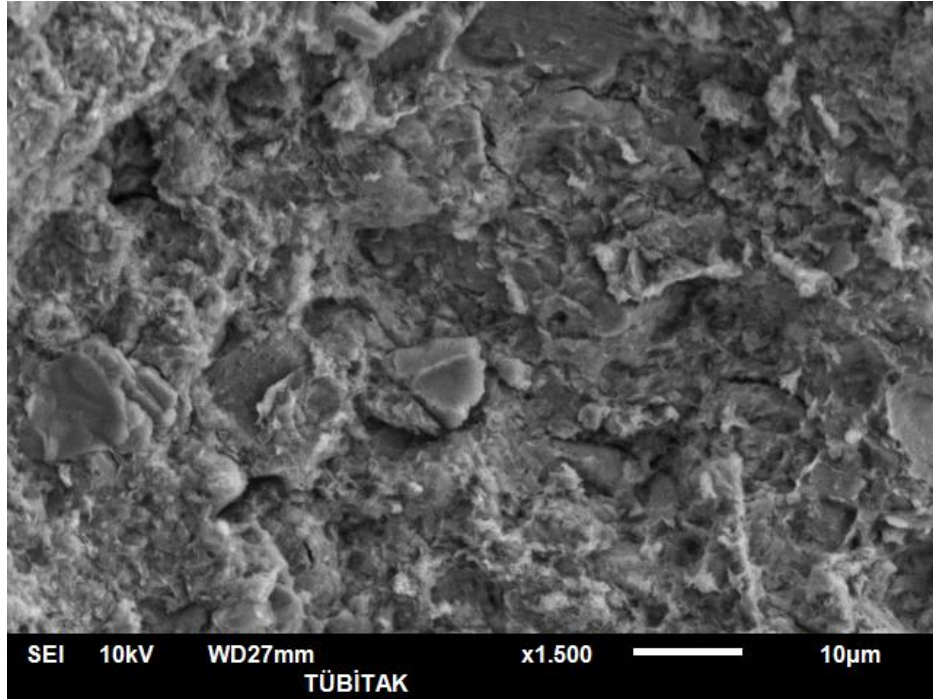
(b)

Şekil 3.18. Yıllanmanın ve 0.5 M CaCl_2 varlığının kaolinin mikro yapısına etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş kaolin-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içerisinde bekletilmiş kaolin-saf su karışımı

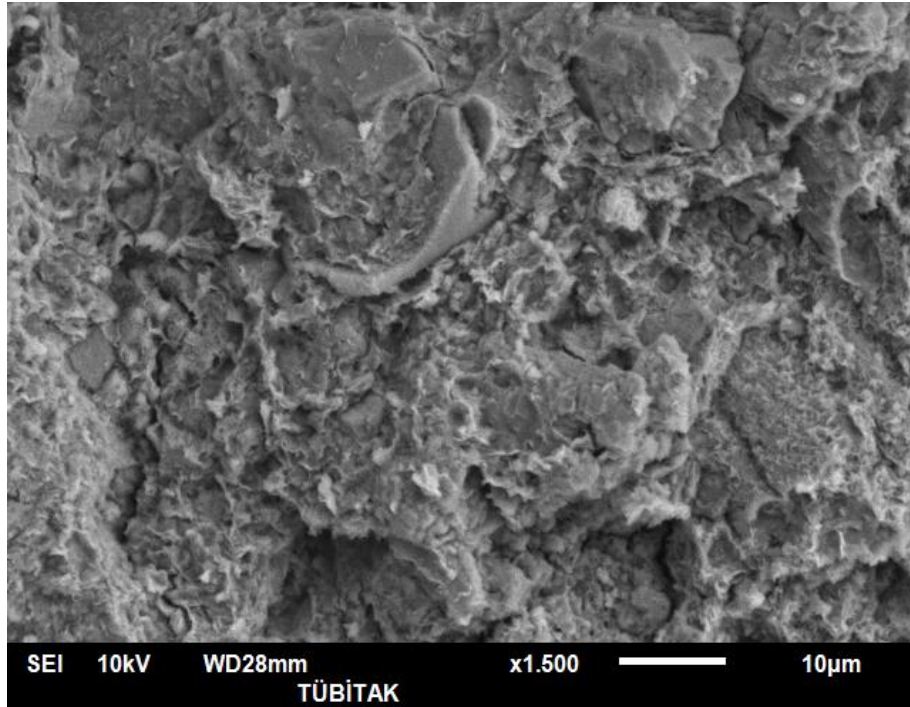
Elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde aynı 0.5 M NaCl varlığında olduğu gibi, kaolinin yapısında 360 gün çözelti içerisinde bekleme sonucunda boşluklardaki azalma açık bir şekilde Şekil 3.18.a. ve Şekil 3.18.b. kıyaslandığında görülmektedir. Boşluklardaki saf su, 0.5 M CaCl_2 çözeltisi ile değiştirildiğinde dielektrik sabiti düşmektedir. Dielektrik sabitinin düşmesi daneler arası çekim kuvvetini arttırdığından, Ca^{2+} iyonları varlığında daneler arası boşluk azalmıştır.

3.6.2. Bentonit Numunelerinin Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi Sonuçları

Elektron mikroskobu analizi yapılmak üzere hazırlanan üç adet bentonit numunesinden 0.5 M CaCl_2 çözeltisi içerisinde 360 gün bekletilmiş bentonit-saf su karışımı TÜBİTAK Malzeme Araştırma Merkezi' ne gönderilmiş ancak numuneye ait analizin fotoğrafları elde edilememiştir. Bu sebeple sadece hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş bentonit-saf su karışımı ile 360 gün 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş bentonit-saf su karışımına ait elektron mikroskop fotoğrafları kıyaslanabilmiştir. Bu numunelere ait elektron mikroskop taraması fotoğrafları Şekil 3.18.' de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.19. Yıllanmanın ve 0.5 M NaCl varlığının bentonitin mikro yapısına etkisi a) Hiç çözelti içerisinde bekletilmemiş bentonit-saf su karışımı b) 360 gün 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş bentonit-saf su karışımı

Bentonit numunesinin, saf su ve 0.5 M NaCl varlığında 360 gün bekletilmiş numunelerinin elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde elde edilen görüntülerden iki numune arasındaki fark çok belirgin bir şekilde görülmemektedir. Na^+ iyonları varlığında bentonit danelerinin çevresindeki difüz çift tabakanın genişmesiyle danelerin arası boşlukların azalması beklenmektedir. Fakat elde edilen görüntülerden bu etki belirlenememiştir.

3.7. Civalı Porozimetri Deneyi Sonuçları

Civalı porozimetri deneyi için 6 farklı numune hazırlanmıştır. Numunelerden ikisi çözelti içerisinde hiç bekletilmeden yani yıllanma etkisine maruz bırakılmadan saf su ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Diğer kaolin ve bentonit numuneleri ise 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri içerisinde 1 yıl (360 gün) bekletilerek civalı porozimetri deneyi için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin su içeriği, diğer deneylerde olduğu gibi her bir numunenin likit limit değerinin %75' i kadardır. Deney, TÜBİTAK-Malzeme Araştırma Merkezi' nde yapılmış, numuneler civalı porozimetri deneyi uygulanmak üzere gönderilmeden önce rötire kapları içerisinde elektron mikroskobu analizi için hazırlanan numunelerde olduğu gibi açık havada en az 7 gün bekletilmek suretiyle kurutulmuştur.

Tablo 3.40. ve Tablo 3.41.' de kaolin ve bentonit numunelerine ait civalı porozimetri deneyinin sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 3.40. Yıllanma ve 0.5 M çözelti varlığının kaolinin porozitesine etkisi

Özellik	Saf su	NaCl/360 gün	CaCl_2 /360 gün
Toplam porozite (%)	4.202	12.078	12.416
İnter daneler arası porozite (%)	1.758	4.445	5.852
İntra daneler arası porozite (%)	2.444	7.633	6.564

Tablo 3.40.' da görüldüğü üzere kaolin numunesinin 360 günlük süre sonuna 0.5 M NaCl ve CaCl_2 çözeltileri varlığında toplam porozite değeri artış göstermiştir. Bu sonuca istinaden aynı etki inter daneler arası porozite ve intra daneler arası porozite değerlerinde de gözlenmektedir. İnter daneler arası ve intra daneler arası porozitedeki artış kaolinde çözeltiler varlığında kümelenme ile oluşacak flok yapının etkisi ile açıklanabilir. Ancak, elektron mikroskobu analizlerinden kaolinin boşluk oranında 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl_2 çözeltileri varlığında

zaman içerisinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Kaolinin porozitesinin yılanma ve boşluk suyu kimyasındaki bu değişimle meydana gelen artması ile bu sonuç örtüşmemektedir.

Bentonit numunesinin yılanma ve 0.5 M çözelti varlığında porozitesindeki değişimi Tablo 3.41.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.41. Yılanma ve 0.5 M çözelti varlığının bentonitin porozitesine etkisi

Özellik	Saf su	NaCl/360 gün	CaCl ₂ /360 gün
Toplam porozite (%)	2.390	0.192	3.958
İnter daneler arası porozite (%)	0.583	0.192	1.697
İntra daneler arası porozite (%)	1.807	0	2.261

Bentonit numunesinin civalı porozimetri deneyi sonuçlarına göre 0.5 M NaCl varlığında 360 günlük sürenin sonunda toplam porozite, inter daneler arası porozite ve intra daneler arası porozite değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Bentonitte Na⁺ iyonları varlığında difüz çift tabakada meydana gelecek genişleme ile porozitenin düşmesi beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar bunun tersi yönündedir. CaCl₂ çözeltisi varlığında ise yılanmanın etkisi ile saf su ile karıştırılmış ve çözelti içerisinde hiç bekletilmemiş numuneye kıyasla bentonitin toplam, inter daneler arası, intra daneler arası porozite değerleri artış göstermiştir. Ca²⁺ iyonları varlığında difüz çift tabakanın genişlemesi ile bentonitin porozitesinin artması beklenebilir. Elde edilen sonuçların bu durumun tersi yönünde olması sebebi ile yılanmanın porozite üzerinde farklı bir etkisinin olduğu düşünülebilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında kaolin ve bentonit killerinin çeşitli çözeltiler varlığında likit limit, plastik limit, sıkışabilirlik, permabilite ve kayma dayanımı gibi mühendislik özelliklerinde yılanma ve çeşitli çözeltiler varlığında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Numunelerin mühendislik özelliklerine iyon değerliğinin etkisinin de gözetilebilmesi için NaCl ve CaCl₂ çözeltileri kullanılmıştır. Numuneler, zaman etkisini inceleyebilmek için 0.5 M iyon konsantrasyonunda hazırlanan çözeltiler içerisinde bekletilmiştir. Elde edilen değerlere bakıldığında bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

1. Genel olarak, kullanılan kaolin ve bentonit numunelerinin likit limit değerleri 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ çözeltileri varlığında azalma göstermiştir. Çözeltilerden CaCl₂ etkisi ele alındığında difüz çift tabakaya +2 değerlikli iyonların dahil olması ile difüz çift tabaka daralmaktadır. Bu etkiye göre bentonitin CaCl₂ varlığında likit limit değerinin azalması beklenen bir sonuçtur. Kaolin için beklenen davranış dielektrik sabitinin azalması sebebi ile NaCl ve CaCl₂ çözeltileri varlığında likit limitte bir artış meydana gelmesidir. Çalışma kapsamında bunun tam tersi yönünde sonuçlar elde edilmiştir. Likit limit üzerinde Ca²⁺ iyonlarının etkisi Na⁺ iyonlarına göre daha belirgin bir şekilde görülmüştür.
2. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin plastik limit değerleri için likit limitte olduğu gibi yılanma etkisi incelenmemiş olup, sadece boşluk suyu kimyasının etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bentonitin plastik limit değerinin 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ çözeltileri varlığında azaldığını göstermiştir. Azalmanın oranı yaklaşık olarak %50' dir. Çalışma kapsamında kullanılan kaolin numunesi plastik özellik göstermemektedir.
3. Kaolin ve bentonit numuneleri için sıkışabilirlik parametreleri incelendiğinde sıkışma indisi (C_c) genel anlamda her iki numune için de artış göstermiştir. Ancak elde edilen sonuçlardan kaolin numunesinin sıkışma indisinin 0.5 M NaCl varlığında azaldığı görülmüştür. Bu etki de Na⁺ iyonları varlığında kaolinin flok bir yapı göstermesi ile açıklanabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 0.5 M CaCl₂ varlığında kaolin ve bentonit numunelerinin sıkışma indisi artış göstermiştir. Bu durum çift tabakaya katılan Ca²⁺ iyonları ile difüz çift tabakanın daralması ve bunun sonucunda kil örneklerinin daha fazla sıkışabilir duruma geçmesi ile açıklanabilmektedir.

4. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre 0.5 M NaCl ve CaCl₂ çözeltileri varlığında kullanılan numunelerin şişme indisinde yılanma ile genel olarak bir azalma meydana gelmiştir. Çözeltiler varlığında kaolinde oluşacak flok yapı ile şişme indisi değerlerinin azalması beklenen bir sonuçtur. Azalma yönünde oluşan bu etkinin yılanma ile pekiştiği görülmüştür. CaCl₂ çözeltisi varlığında, yılanma ile difüz çift tabakada meydana gelen daralma ile her iki numuneye ait şişme indisi değeri de azalma göstermiştir.
5. Sıkışabilirlik sonuçları incelendiğinde genel olarak kaolin numunesinin konsolidasyon katsayısı değerleri, çözeltiler varlığında zaman geçtikçe azalmış, bentonit numunesinin konsolidasyon katsayısı değerleri ise zaman geçtikçe artış göstermiştir. Bu noktada, genel olarak saf su ile karıştırılmış örneklerle göre yorum yapılmıştır. 0.5 M çözelti ile karıştırılarak hazırlanmış numunelerde yılanma etkisi incelendiğinde belirli bir trend elde edilemediği görülmüştür.
6. Kaolin ve bentonit killerinin 0.5 M NaCl ve CaCl₂ çözeltileri varlığında yılanma ile permeabilite katsayısı değerlerinde genel olarak bir artış meydana gelmiştir. Numunelerden yalnızca kaolinin 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde bekletilmiş durumdaki permeabilitesi, yılanma etkisiyle azalma göstermiştir. Bu sonuç, geçirimsiz kil bariyerlerin altındaki dolgu tabakasının ömrünü belirleyebilmek adına önem arz etmektedir.
7. Kayma dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, kaolin numunesinin içsel sürtünme açısı değerleri her iki çözelti varlığında yılanma ile azalma, bentonit numunesinin içsel sürtünme açısı değerleri ise her iki çözelti varlığında yılanma ile artış göstermiştir. Kaolinde numunelerinin içsel sürtünme açısı değerinin çözeltiler varlığında azalması, kaolinin flok bir yapıya geçmesinden dolayı beklenenin tersi yönünde bir sonuçtur. Bu da yılanma etkisinin malzemenin mekanik özelliklerine farklı bir etkisinin bulunduğunu düşündürmektedir.
8. Çalışma kapsamında kullanılan kaolin ve bentonit killeri elektron mikroskobu görüntüleme analizi yapılmak üzere TÜBİTAK Malzeme Araştırma Merkezi' ne gönderilmiştir. Hazırlanan numunelerden bir kaolin bir bentonit örneği hiç çözelti içerisinde bekletilmeden saf su ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Diğer numuneler ise yine saf su ile karıştırılmış ve 360 gün 0.5 M NaCl ve 0.5 M CaCl₂ çözeltisi içerisinde bekletilerek hazırlanmıştır. Kaolin numunelerinden elde edilen görüntü analizlerinden, NaCl ve CaCl₂ varlığında kaolinin boşluk oranında azalma olduğu görülmüştür. Bu

durum dielektrik sabitinin düşmesi, bunun sonucunda daneler arası çekim kuvvetinin artması ile açıklanabilmektedir.

9. Genel olarak bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde yılanmanın killi zeminlerin mühendislik davranışları üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Örneğin, yılanma etkisi ile sıkışma indisi ve permeabilite artış göstermiştir. Bu durum katı atık depolama sahalarında sıkıştırılmış geçirimsiz kil bariyerlerin uzun süreli performansı açısından problem yaratan bir durumdur. Katı atık depolama sahalarının tasarımında bu etkilerin de göz önüne alınması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Agus, S.S. and Schanz T., 2005. Effect of shrinking and swelling on microstructures and fabric of a compacted bentonite-sand mixture. Proceedings of the international conference on problematic soils. Cyprus, 2, 543-550.
2. Alther, G., Evans, J.C., Fang, H.Y., Witmer, K., 1985. Influence of inorganic permeants upon the permeability of bentonite. In: Johnson, A.I., Frobel, R.K., Petterson, C.B. (Eds)., Hydraulic Barriers in Soil and Rock. ASTM STP 874. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 64-73.
3. Allam, M.M. and Sridharan, A., 1979. The influence of the aging on the shear strength behavior of the two fine-grained soils. Canadian Geotechnical J., 16 (2). pp. 391-397.
4. Allam, M.M. and Sridharan, A., 1984. The shearing resistance of saturated clays. Geotechnique, 34 (1). pp. 119-122.
5. American Standard of Testing Materials (ASTM), 1999. Annual book of the ASTM standards. ASTM International, 04-08, PA West Conshohocken.
6. Barber, E.S., 1956. Discussion of 'Engineering properties of expansive clays' by W.G. Holtz and H.J., 1956. Trans. Div. ASCE 121, 669-673.
7. Burland, J.B., 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. Geotechnique 40 (3), 329-378.
8. Day, R., 1994. Swell shrink behavior of compacted clay. J. Geotech. Engrg., 120 (3), 618-623.
9. Delage, P., Howat, M. and Cui, Y.J., 1998. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Engng Geol. 50, No. 1-2, 31-48.
10. Delage, P., Marcial, D., Cui, Y.J. and Ruiz, X., 2006. Aging effects in a compacted bentonite: a microstructure approach. Geotechnique 56, No.5, 291-304.
11. Di Maio, C., Santoli, L. and Schiavone, P., 2004. Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. Mechanics of Materials, Vol. 36, Issue 5-6, 435-451.
12. Eruslu, N., 1993. Türkiye bentonitleri ve döküm kumları araştırma pojesi.
13. Graham, J., Saadat, F., Gray, M.N., Dixon, D.A. and Zhang, Q.Y., 1989. Strength and volume change behavior of a sand bentonite mixture. Can. Geotech. J. 26, No. 2, 292-305.
14. Gehling, W.Y.Y., Alonso, E.E. and Gens, A., 1995. Stress-path testing of expansive compacted soils. Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris, 1, 77-82.
15. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall, New Jersey.

16. Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., Lorenzo, G.A., 2004. Compressibility of cement admixed clays at high water content. *Geotechnique* 54 (2), 151-154.
17. Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K., Katkan, W., 2007. Assessment of engineering properties of Bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal* 44 (2), 173-187.
18. Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A. Du, Y.J., 2011. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science* 52, 150-159.
19. Jo, H.Y., Katsumi, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2001. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127 (7), 557-567.
20. Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M., Fukagawa, R., 2008. Long term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 14-30.
21. Kayabali, K., 2010. *Geoteknik mühendisliğine giriş*.
22. Kjellander, R., Marcelja, S., Quirk, J., 1988. Attractive double layer interactions between calcium clay particles. *Journal of Colloid and Interface Science* 126 (1), 194-211.
23. Kolstad, D.C., Benson, C.H., Edil, T.B., Jo, H.Y., 2004b. Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic solutions. *Geosynthetics International* 11 (3), 233-241.
24. Lagaly, G., 1989. Principles of flow of kaolin and bentonite dispersions. *Applied Clay Science* 4 (2), 105-123.
25. Lambe, T., 1958. The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 84 (2), 1-33.
26. Lee, F.G., Jones-Lee, A., 1996. Superfund site remediation by on-site RCRA landfills: Inadequacies in providing groundwater quality protection. *Proc. Environmental Industry Association's Superfund. Hazwaste Management West Conference, Las Vegas*, pp. 311-329.
27. Low, P.F., 1980. The swelling of clay II. Montmorillonites. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 44: 4: 667-676.
28. Low, P.F., 1987. Structural component of the swelling pressure of clays. *Langmuir* 3 (1), 25-32.
29. Mitchell, J. K., 1996. *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley and Son Inc., New York. 437 pp.
30. Nagaraj, T.S., Miura, N., 2001. *Soft Clay Behaviour: Analysis and Assessment*. Balkema, Rotterdam. 315 pp.

31. Nagaraj, T.S., Miura, N., Prakash Y., Yamadera, A., 1995. Analysis of compressibility and permeability behaviour of soils with induced cementation. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference IGS-95*, 1, pp. 53-56. Bangalore.
32. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R., 1993. Stress state-permeability relationships for fine-grained soils. *Geotechnique* 43 (2), 333-336.
33. Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R., 1998. Compressibility behavior of soft cemented soils. *Geotechnique* 48 (2), 281-287.
34. Nagaraj, T.S., Srinivasa Murty, B.R., 1986. A critical reappraisal of compression index equations. *Geotechnique* 36 (1), 27-32.
35. Nalenzy, C.L. and Li, M.C., 1967. Effect of soil structure and thixotropic hardening on the swelling behavior of compacted clay soils. *Highway Research Rec.*, No. 209, pp. 1-22.
36. Norrish, K., 1954. The swelling of montmorillonites. *Discussions of Faraday Society* 18, 120-134.
37. Norrish, K. and Quirk, J., 1954. Crystalline swelling of montmorillonite, use of electrolytes to control swelling. *Nature* 173, 255-257.
38. Onikata, M., Kondo, M., Kamon, M., 1996. Development and characterization of multiswellable bentonite. In: *Environmental Geotechnics*, A.A., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 587-590.
39. Onikata, M., Kondo, M., Hayashi, N., Yamanaka, S., 1999a. Complex formation of cation-exchanged montmorillonites with propylene carbonate: osmotic swelling in aqueous electrolyte solutions. *Clays and Clay Minerals* 47 (5), 672-677.
40. Onikata, M., Kondo, M., Yamanaka, S., 1999b. Swelling of formamide-montmorillonite complexes in polar liquids. *Clays and Clay Minerals* 47 (5), 678-681.
41. Petrov, R.J., Rowe, R.W., 1997. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal* 34, 863-885.
42. Posner, A., Quirk, J., 1964. Changes in basal spacing of montmorillonite in electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* 19, 798-812.
43. Pusch, R., 1982. Mineral-water interactions and their influence on the physical of highly compacted Na bentonite. *Can. Geotech. J.* 19, No. 3, 381-387.
44. Rowe, R.K., Quigley, R.M., Brachman, R.W.I., Booker, J.R., 2004. *Barrier systems for waste disposal facilities*. Taylor and Francis, London.
45. Ruhl, J.L., Daniel, D.E., 1997. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123 (4), 369-381.

46. Sarıkaya, Y., Önal, M., Alemdaroğlu, T., Noyan, H., 2001. Bir bentonitin katyon değişirme kapasitesi ile şişmesi arasındaki ilişki. 10. Ulusal Kil Sempozyumu, Konya, Türkiye.
47. Shackelford, C.D., Sevik, G.W., Eykholt, G.R., 2010. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, Iss. 2, 149-162.
48. Shaingberg, I. and Kemper, W.D., 1966. Hydration status of adsorbed cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30, 707-713.
49. Shan, H.Y., Lai, Y.J., 2002. Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 20, 19-38.
50. Sridharan, A. and Rao, G.V., 1971. Effective stress theory of shrinkage phenomena. *Canadian Geotech. J.*, 8 : 4: 503-513.
51. Sridharan, A. and Narasimha Rao, S., 1972. Hyperbolic representation of strength, pore pressures and volume changes with axial strain in triaxial tests. *Proc., Symp on Strength and Deformation Behavior of Soils, Bangalore, Vol. I*
52. Sridharan, A. And Rao, G.V., 1975. Mechanisms controlling the liquid limit of clays. *Proc of Istanbul conf. on Soil Mech. and Foundn Engg.*, 1: 75-84.
53. Sridharan, A., 1978. Engineering behavior of fine grained soils. A fundamental approach thirteenth IGS annual lecture, Bombay.
54. Sridharan, A. and Rao, G.V., 1979. Shear strength behavior of saturated clays and the role of the effective stress concept. *Geotechnique*, 29 : 2. 177-193.
55. Sridharan, A., Rao, S.M., Murthy, N.S., 1986a. Compressibility behavior of homoionized bentonites. *Geotechnique* 36 (4), 551-564.
56. Sridharan, A., Rao, S.M., Murthy, N.S., 1986b. Liquid limit of montmorillonite soils. *Geotechnical Testing Journal ASTM* 9 (3), 156-159.
57. Sriharan, A., Rao, S.M., Murthy, N.S., 1988. Liquid limit of kaolinitic soils. *Geotechnique* 38 (2), 191-198.
58. Sridharan, A., 1991. Engineering behavior of fine grained soils - a fundamental approach. *Indian Geotechnical Journal* 21 (1), 1-136.
59. Subba Rao, K.S. and Tripathy, S., 2003. Effect of aging on swelling and swell-shrink behavior of a compacted expansive soil. *ASTM Geotech. Test. J.* 26, No. 1, 36-46.
60. Touze-Foltz, N., Duquennoi, C., Gaget, E., 2006. Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, Iss. 3, 188-197.
61. Yong, R.N. and Warkentin, B.P., 1975. *Soil properties and behavior*. Elsevier scientific publishing co., New York, 449 pp.

62. Yükselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A.H., 2008. Engineering Geology, Vol. 102, Iss. 1-2, 54-61.

6. EKLER

Ek 1. Kaolin numunesinin likit limit deney sonuçları

Tablo E 1. Kaolin numunesinin likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini							
Kap No	1	2	3	4	5	6	7
Kap+Yaş Numune (gr)	26,21	24,34	29,59	25,08	25,50	28,00	25,83
Kap+Kuru Numune (gr)	24,28	22,41	27,11	23,49	23,60	25,83	23,84
Su Ağırlığı (gr)	1,93	1,93	2,48	1,59	1,90	2,17	1,99
Kap Ağırlığı (gr)	16,48	14,96	17,63	16,97	15,25	16,97	15,25
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	7,8	7,45	9,48	6,52	8,35	8,86	8,59
Su Muhtevası w, %	25,4	25,9	26,2	24,4	22,7	25,2	23,2
Darbe Sayısı N	30	20	16	41	50	22	48
Likit Limit (w_L)	%25,45						

Ek 2. Kaolin numunesinin 0.5 M NaCl varlığında likit limit deney sonuçları

Tablo E 2. Kaolin numunesinin 0.5 M NaCl varlığında likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini					
Kap No	1	2	3	4	5
Kap+Yaş Numune (gr)	27,59	24,05	25,40	29,24	32,59
Kap+Kuru Numune (gr)	25,57	22,18	23,32	26,60	29,39
Su Ağırlığı (gr)	2,02	1,87	2,08	2,64	3,2
Kap Ağırlığı (gr)	16,41	14,12	14,12	15,24	16,42
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	6,16	8,06	9,20	11,36	12,97
Su Muhtevası w, %	22,05	23,20	22,61	23,24	24,67
Darbe Sayısı N	47	26	35	28	19
Likit Limit (w_L)	%23,87				

Ek 3. Kaolin numunesinin 0.5 M CaCl₂ varlığında likit limit deney sonuçları**Tablo E 3.** Kaolin numunesinin 0.5 M CaCl₂ varlığında likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini						
Kap No	1	2	3	4	5	6
Kap+Yaş Numune (gr)	26,83	29,28	30,50	28,49	30,06	30,80
Kap+Kuru Numune (gr)	24,38	26,96	27,90	26,42	27,41	28,14
Su Ağırlığı (gr)	2,45	2,32	2,60	2,07	2,65	2,66
Kap Ağırlığı (gr)	14,14	16,95	16,39	16,92	16,91	16,95
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	10,24	10,01	11,51	9,50	10,50	11,19
Su Muhtevası w, %	23,93	23,18	22,59	21,179	25,24	23,77
Darbe Sayısı N	18	27	25	36	11	21
Likit Limit (w _L)	%22,98					

Ek 4. Bentonit numunesinin likit limit deney sonuçları**Tablo E4.** Bentonit numunesinin likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini						
Kap No	1	2	3	4	5	6
Kap+Yaş Numune (gr)	23,70	29,76	27,41	25,77	30,98	30,04
Kap+Kuru Numune (gr)	19,79	22,65	22,08	20,08	23,92	23,94
Su Ağırlığı (gr)	3,91	7,11	5,33	5,69	7,06	6,10
Kap Ağırlığı (gr)	14,57	15,66	16,29	13,26	16,28	17,64
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	5,22	6,99	5,79	6,82	7,64	6,30
Su Muhtevası w, %	73,75	101,7	92,1	83,4	92,4	96,8
Darbe Sayısı N	50	13	26	42	33	19
Likit Limit (w _L)	%94,08					

Ek 5. Bentonit numunesinin 0.5 M NaCl varlığında likit limit deney sonuçları**Tablo E 5.** Bentonit numunesinin 0.5 M NaCl varlığında likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini					
Kap No	1	2	3	4	5
Kap+Yaş Numune (gr)	23,80	23,77	24,95	22,86	30,94
Kap+Kuru Numune (gr)	19,70	19,02	19,37	18,75	24,65
Su Ağırlığı (gr)	4,10	4,75	5,58	4,11	6,29
Kap Ağırlığı (gr)	15,24	14,10	13,26	14,11	16,94
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	4,46	4,92	6,11	4,64	7,71
Su Muhtevası w, %	91,5	96,5	84,4	88,6	81,6
Darbe Sayısı N	22	16	28	25	39
Likit Limit (w_L)	%89,08				

Ek 6. Bentonit numunesinin 0.5 M CaCl₂ varlığında likit limit deney sonuçları**Tablo E 6.** Bentonit numunesinin 0.5 M CaCl₂ varlığında likit limit deneyi verileri

Likit Limit Tayini						
Kap No	1	2	3	4	5	6
Kap+Yaş Numune (gr)	28,77	28,30	26,12	28,09	26,80	23,70
Kap+Kuru Numune (gr)	23,60	22,96	21,63	23,14	20,97	19,86
Su Ağırlığı (gr)	5,17	5,34	4,49	4,95	5,83	3,84
Kap Ağırlığı (gr)	16,90	16,96	16,39	16,96	14,12	15,23
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	6,70	6,0	5,24	6,18	6,85	4,63
Su Muhtevası w, %	77,2	89,0	85,7	80,1	85,1	82,9
Darbe Sayısı N	30	10	16	26	17	25
Likit Limit (w_L)	%80,81					

Ek 7. Bentonit numunesi için plastik limit deneyi sonuçları**Tablo E 7.** Bentonit numunesi için plastik limit deney verileri

Kap No	Plastik Limit Tayini		
	1	2	3
Kap+Yaş Numune (gr)	16,52	17,28	15,42
Kap+Kuru Numune (gr)	15,74	16,80	14,99
Su Ağırlığı (gr)	0,78	0,48	0,43
Kap Ağırlığı (gr)	14,54	15,66	14,04
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	1,20	1,14	0,95
Su Muhtevası w%	65,0	42,1	45,26
Plastik Limit (w_p)	%50,79		

Ek 8. Bentonit numunesi için NaCl varlığında plastik limit deneyi sonuçları**Tablo E 8.** Bentonit numunesi için NaCl varlığında plastik limit deney verileri

Kap No	Plastik Limit Tayini		
	1	2	3
Kap+Yaş Numune (gr)	16,67	18,56	17,76
Kap+Kuru Numune (gr)	16,40	18,29	17,41
Su Ağırlığı (gr)	0,27	0,27	0,35
Kap Ağırlığı (gr)	15,77	17,66	16,49
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	0,63	0,63	0,92
Su Muhtevası w%	42,86	42,86	38,04
Plastik Limit (w_p)	%41,25		

Ek 9. Bentonit numunesi için CaCl_2 varlığında plastik limit deneyi sonuçları**Tablo E 9.** Bentonit numunesi için CaCl_2 varlığında plastik limit deney verileri

Plastik Limit Tayini				
Kap No	1	2	3	4
Kap+Yaş Numune (gr)	16,85	17,34	15,62	16,24
Kap+Kuru Numune (gr)	16,71	17,15	15,37	15,96
Su Ağırlığı (gr)	0,14	0,19	0,25	0,28
Kap Ağırlığı (gr)	16,02	16,39	14,56	14,96
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	0,69	0,76	0,81	1,0
Su Muhtevası w%	20,3	25,0	30,9	28,0
Plastik Limit (w_p)	%26,05			

Ek 10. Kaolin numunesinin 0 gün için konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 10. Kaolin numunesinin 0 gün için konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ			
İşin Adı	(Job Name): kaolin-saf su	Yapan	(Tested By):
Sondaj No	(Boring No):		
Örnek No	(Sample No): 1	Tarih	(Date): 07.01.2012
Derinlik	(Depth):		

Özgül Ağırlık: 2,696
(Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
(Sample Diam.)

Ring No : 1
(Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				143,04		139,01	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				126,59		126,59	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				16,45		12,42	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				59,04		59,04	
Su Muhtevası (Water Content) % :				27,9		21,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5422,0	5207,0	4941,0	4714,0	4625,0	4469,0
10	Saniye (second)	5326,0	5156,0	4770,0	4686,0	4508,0	4279,0
15	Saniye (second)	5314,0	5142,0	4765,0	4678,0	4499,0	4274,0
30	Saniye (second)	5288,0	5119,0	4760,0	4666,0	4490,5	4268,0
1	Dakika(minute)	5257,0	5010,0	4735,0	4658,5	4488,0	4263,5
2	Dakika(minute)	5229,0	4962,0	4728,0	4654,5	4479,5	4260,0
4	Dakika(minute)	5216,0	4952,0	4724,0	4652,0	4476,5	4257,5
8	Dakika(minute)	5213,0	4949,0	4721,5	4649,0	4474,0	4255,0
15	Dakika(minute)	5211,0	4947,0	4719,0	4647,0	4471,5	4252,0
30	Dakika(minute)	5209,0	4945,0	4717,0	4645,0	4469,5	4250,0
1	Saat(hour)	5208,0	4943,0	4715,0	4643,0	4468,0	4248,0
2	Saat(hour)	5206,0	4940,5	4713,0	4641,0	4466,0	4246,0
4	Saat(hour)						
8	Saat(hour) Df						
24	Saat(hour)						
48	Saat(hour)						
72	Saat(hour)						
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0432	0,0533	0,0456	0,0146	0,0318	0,0446
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,957	1,904	1,858	1,843	1,812
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,957	1,904	1,858	1,843	1,812	1,767
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,978	1,930	1,881	1,851	1,827	1,789
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,989	0,965	0,940	0,925	0,914	0,895
H _{dr} ² cm	1,000	0,979	0,931	0,884	0,856	0,835	0,800

Ek 11. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 11. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLIDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-0.5 M NaCl Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 2 Tarih (Date): 07.01.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				144,84		140,81	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				128,47		128,47	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				16,37		12,34	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				60,02		60,02	
Su Muhtevası (Water Content) % :				27,3		20,6	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5666,0	5488,0	5394,0	5290,0	4965,0	4771,0
10	Saniye (second)	5608,0	5438,0	5331,0	5150,0	4810,0	4590,0
15	Saniye (second)	5604,0	5434,0	5326,0	5144,0	4801,0	4587,0
30	Saniye (second)	5591,0	5424,0	5316,0	5125,0	4790,0	4575,0
1	Dakika (minute)	5569,0	5413,0	5308,0	5010,0	4785,0	4569,0
2	Dakika (minute)	5539,0	5404,0	5302,5	4979,5	4782,0	4566,0
4	Dakika (minute)	5505,0	5399,0	5299,5	4971,0	4779,0	4563,0
8	Dakika (minute)	5496,0	5396,5	5297,0	4969,0	4777,0	4560,0
15	Dakika (minute)	5493,5	5395,0	5295,0	4968,0	4775,0	4558,0
30	Dakika (minute)	5491,0	5394,0	5294,0	4966,0	4772,0	4555,0
1	Saat (hour)	5488,0	5394,0	5289,0	4964,5	4770,0	4552,5
2	Saat (hour)	5486,0	5392,0	5287,0	4964,0	4768,0	4549,0
4	Saat (hour)						
8	Saat (hour)						
24	Saat (hour)						
48	Saat (hour)						
72	Saat (hour)						
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0360	0,0192	0,0214	0,0652	0,0394	0,0444
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,964	1,945	1,923	1,858	1,819
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,964	1,945	1,923	1,858	1,819	1,774
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,982	1,954	1,934	1,891	1,839	1,797
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,991	0,977	0,967	0,945	0,919	0,898
H _{dr} ² cm	1,000	0,982	0,955	0,935	0,894	0,845	0,807

Ek 12. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 12. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLIDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin+0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 3 Tarih (Date): 07.01.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
(Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
(Sample Diam.)

Ring No : 1
(Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				143,01		136,43	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				124,49		124,49	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				18,52		11,94	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				56,94		56,94	
Su Muhtevası (Water Content) % :				32,5		21,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	4253,0	4026,0	3924,0	3774,0	3567,0	3407,0
10	Saniye (second)	4153,0	3974,0	3833,0	3630,0	3453,0	3255,0
15	Saniye (second)	4143,0	3969,0	3826,0	3619,0	3445,0	3249,0
30	Saniye (second)	4121,0	3959,5	3814,0	3603,5	3433,5	3240,5
1	Dakika(minute)	4092,0	3947,0	3802,0	3593,0	3427,0	3236,0
2	Dakika(minute)	4061,5	3939,5	3795,0	3587,0	3423,0	3232,0
4	Dakika(minute)	4040,0	3935,0	3789,0	3583,0	3419,5	3229,0
8	Dakika(minute)	4031,5	3931,0	3785,0	3579,0	3416,0	3226,0
15	Dakika(minute)	4028,0	3929,0	3781,5	3576,0	3413,0	3224,0
30	Dakika(minute)	4025,0	3927,0	3778,0	3572,5	3410,5	3221,0
1	Saat(hour)	4023,0	3925,0	3775,0	3570,0	3408,0	3218,5
2	Saat(hour)	4021,0	3922,0	3772,0	3567,0	3405,0	3216,0
4	Saat(hour)						
8	Saat(hour)						
24	Saat(hour)						
48	Saat(hour)						
72	Saat(hour)						
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N= 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0464	0,0208	0,0304	0,0414	0,0324	0,0382
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,954	1,933	1,902	1,861	1,829
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,954	1,933	1,902	1,861	1,829	1,790
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,977	1,943	1,918	1,882	1,845	1,810
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,988	0,972	0,959	0,941	0,922	0,905
H _{dr} ² cm	1,000	0,977	0,944	0,919	0,885	0,851	0,819

Ek 13. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 13. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): kaolin-saf su (NaCl) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 4 Tarih (Date): 20.04.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				145,26		137,65	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				124,27		124,27	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				20,99		13,38	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				55,82		55,82	
Su Muhtevası (Water Content) % :				37,6		24,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5320,0	4959,0	4864,0	4734,0	4588,0	4402,0
10	Saniye (second)	5188,0	4923,0	4805,0	4650,0	4452,0	4283,0
15	Saniye (second)	5176,0	4919,0	4796,0	4642,0	4445,0	4278,0
30	Saniye (second)	5144,0	4910,5	4781,0	4628,0	4437,0	4270,5
1	Dakika(minute)	5092,0	4899,0	4767,0	4619,0	4431,0	4266,0
2	Dakika(minute)	5024,0	4890,5	4758,5	4613,0	4427,0	4262,0
4	Dakika(minute)	4983,0	4885,0	4753,5	4609,0	4423,0	4258,5
8	Dakika(minute)	4971,0	4880,0	4750,0	4606,0	4420,0	4255,0
15	Dakika(minute)	4967,0	4877,0	4747,0	4603,0	4417,5	4252,5
30	Dakika(minute)	4964,0	4873,5	4744,0	4600,0	4414,0	4250,0
1	Saat(hour)	4962,0	4871,0	4742,0	4597,0	4412,0	4247,0
2	Saat(hour)	4960,0	4869,0	4739,0	4594,5	4409,0	4244,0
4	Saat(hour)	4958,0	4867,0	4738,0	4591,0	4405,0	4241,0
8	Saat(hour)	-	4865,0	4735,0	-	4404,0	4241,0
24	Saat(hour)	-	4863,0	4733,0	4588,0	4401,0	4236,0
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	4958,0	-	-	-	-	-
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0724	0,0192	0,0262	0,0292	0,0374	0,0332
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,928	1,908	1,882	1,853	1,816
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,928	1,908	1,882	1,853	1,816	1,782
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,964	1,918	1,895	1,868	1,834	1,799
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,982	0,959	0,948	0,934	0,917	0,900
H _{dr} ² cm	1,000	0,964	0,920	0,898	0,872	0,841	0,809

Ek 14. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 14. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLIDASYON DENEYİ			
İşin Adı	(Job Name): Kaolin-0.5 M NaCl	Yapan	(Tested By):
Sondaj No	(Boring No):		
Örnek No	(Sample No): 5	Tarih	(Date): 30.05.2012
Derinlik	(Depth):		
Özgül Ağırlık:	2,696	Örnek Çapı:	5 cm
(Specific Gravity)		(Sample Diam.)	
		Ring No :	2
		(Ring No)	

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık	(Ring + Wt. Of wet soil) gr :			133,30		135,29	
Ring + Kuru Ağırlık	(Ring + Wt. Of dry soil) gr :			123,31		123,31	
Su Ağırlığı	(Wt. Of Moisture) gr :			9,99		11,98	
Ring Ağırlığı	(Wt. Of Ring) gr :			68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı	(Wt. Of dry soil) gr :			54,86		54,86	
Su Muhtevası	(Water Content) % :			18,2		21,8	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5256,0	4826,0	4661,0	4475,0	4230,0	4048,0
10	Saniye (second)	5080,0	4771,0	4580,0	4306,0	4113,0	3906,0
15	Saniye (second)	5065,0	4763,0	4568,0	4294,0	4102,0	3899,0
30	Saniye (second)	5031,0	4745,0	4546,0	4276,0	4091,0	3892,0
1	Dakika (minute)	4980,0	4722,5	4525,0	4266,0	4083,0	3888,0
2	Dakika (minute)	4916,0	4700,0	4514,0	4259,0	4078,5	3884,0
4	Dakika (minute)	4871,0	4789,0	4507,0	4254,5	4074,5	3880,0
8	Dakika (minute)	4849,0	4783,0	4502,0	4250,5	4070,5	3877,0
15	Dakika (minute)	4842,0	4679,0	4498,0	4247,0	4067,5	3874,0
30	Dakika (minute)	4838,0	4675,0	4494,0	4244,0	4064,0	3871,0
1	Saat (hour)	4834,0	4671,5	4491,0	4241,0	4061,0	3868,0
2	Saat (hour)	4831,0	4668,5	4488,0	4238,0	4058,0	3865,0
4	Saat (hour)	-	4665,0	4485,5	4235,0	4055,0	-
8	Saat (hour)	-	-	-	-	-	3859,0
24	Saat (hour)	4824,0	4661,0	-	4230,0	4049,0	3856,0
48	Saat (hour)			-			
72	Saat (hour)			4474,0			
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0864	0,0330	0,0374	0,0490	0,0362	0,0384
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,914	1,881	1,843	1,794	1,758
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,914	1,881	1,843	1,794	1,758	1,720
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,957	1,897	1,862	1,819	1,776	1,739
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,978	0,949	0,931	0,909	0,888	0,869
H _{dr} ² cm	1,000	0,957	0,900	0,867	0,827	0,789	0,756

Ek 15. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 15. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-saf su (CaCl₂) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 6 Tarih (Date): 09.05.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				143,16		136,31	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				123,45		123,45	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				19,71		12,86	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				55,82		55,82	
Su Muhtevası (Water Content) % :				35,3		23,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5559,0	5337,0	5101,0	4855,0	4622,0	4407,0
10	Saniye (second)	5496,0	5268,0	5014,0	4738,0	4477,0	4253,0
15	Saniye (second)	5488,0	5254,0	4998,0	4714,0	4462,0	4247,0
30	Saniye (second)	5468,0	5228,0	4964,0	4690,0	4451,0	4239,0
1	Dakika (minute)	5439,0	5191,0	4933,0	4669,0	4443,0	4234,0
2	Dakika (minute)	5403,0	5162,0	4909,0	4660,0	4438,0	4229,0
4	Dakika (minute)	5373,5	5146,0	4895,0	4653,0	4435,0	4226,0
8	Dakika (minute)	5361,0	5137,0	4886,0	4650,0	4431,0	4222,0
15	Dakika (minute)	5356,0	5131,0	4880,5	4646,0	4428,0	4218,5
30	Dakika (minute)	5352,0	5117,5	4875,0	4643,0	4424,5	4215,0
1	Saat (hour)	5347,0	5114,0	4869,0	4638,0	4421,5	4211,0
2	Saat (hour)	5343,0	5111,0	4865,0	4636,0	4417,0	4207,0
4	Saat (hour)	5340,0	5108,0	4862,0	4634,0	-	4204,0
8	Saat (hour)	5336,0	-	-	-	4411,0	-
24	Saat (hour)	5335,0	-	4856,0	4630,0	4408,0	4202,0
48	Saat (hour)		-				
72	Saat (hour)		5101,0				
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0448	0,0472	0,0490	0,0450	0,0428	0,0410
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,955	1,908	1,859	1,814	1,771
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,955	1,908	1,859	1,814	1,771	1,730
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,978	1,932	1,884	1,837	1,793	1,751
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,989	0,966	0,942	0,918	0,896	0,875
H _{dr} ² cm	1,000	0,978	0,933	0,887	0,843	0,803	0,766

Ek 16. Kaolin-0.5 M CaCl₂ karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 16. Kaolin-0.5 M CaCl₂ karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 7 Tarih (Date): 11.06.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				146,39		138,56	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				125,76		125,76	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				20,63		12,80	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,46		68,46	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				57,30		57,30	
Su Muhtevası (Water Content) % :				36,0		22,3	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5079,0	4891,0	4712,0	4275,0	3861,0	3649,0
10	Saniye (second)	4978,0	4827,0	4422,0	4095,0	3701,0	3485,0
15	Saniye (second)	4968,0	4821,0	4395,0	4073,0	3694,0	3479,0
30	Saniye (second)	4949,0	4807,0	4348,0	4043,0	3688,0	3474,0
1	Dakika(minute)	4931,5	4785,0	4318,0	4023,0	3682,0	3469,0
2	Dakika(minute)	4917,0	4764,0	4304,0	4015,0	3677,0	3465,0
4	Dakika(minute)	4909,0	4749,0	4296,0	4008,5	3672,5	3462,0
8	Dakika(minute)	4904,5	4739,5	4291,0	4004,0	3668,0	3458,5
15	Dakika(minute)	4901,5	4731,5	4287,5	4001,0	3665,0	3455,5
30	Dakika(minute)	4899,0	4730,0	4284,5	3997,0	3662,0	3452,5
1	Saat(hour)	4897,0	4727,5	4282,5	3993,5	3659,0	3449,5
2	Saat(hour)	4894,5	4722,0	4280,5	3991,0	3657,0	3447,0
4	Saat(hour)	-	-	4279,0	3987,0	3653,0	-
8	Saat(hour)	4891,0	4717,0	-	-	-	-
24	Saat(hour)	4889,0	4712,5	4274,0	-	3649,5	3437,5
48	Saat(hour)				-		
72	Saat(hour)				3864,0		
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0380	0,0357	0,0876	0,0822	0,0423	0,0423
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,962	1,926	1,839	1,757	1,714
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,962	1,926	1,839	1,757	1,714	1,672
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,981	1,944	1,883	1,798	1,735	1,693
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,991	0,972	0,941	0,899	0,868	0,847
H _{dr} ² cm	1,000	0,981	0,945	0,886	0,808	0,753	0,717

Ek 17. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 17. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-saf su (NaCl) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 8 Tarih (Date): 28.09.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				135,85		131,32	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				119,25		119,25	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				16,60		12,07	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,44		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				50,81		66,71	
Su Muhtevası (Water Content) % :				32,7		18,1	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5255,0	4351,0	4133,0	3984,0	3811,0	3637,0
10	Saniye (second)	4999,0	4321,0	4067,0	3887,0	3700,0	3507,0
15	Saniye (second)	4965,0	4316,0	4056,0	3878,0	3692,0	3501,0
30	Saniye (second)	4883,0	4305,5	4039,0	3864,0	3683,0	3494,0
1	Dakika(minute)	4749,0	4294,0	4026,0	3855,0	3677,0	3489,0
2	Dakika(minute)	4545,0	4284,5	4018,0	3849,0	3672,0	3484,0
4	Dakika(minute)	4401,0	4278,0	4012,0	3844,0	3667,0	3480,0
8	Dakika(minute)	4378,0	4273,0	4006,0	3838,0	3662,5	3476,0
15	Dakika(minute)	4372,0	4269,0	4002,0	3834,5	3658,5	3473,0
30	Dakika(minute)	4368,0	4265,5	3997,5	3827,0	3654,0	3469,0
1	Saat(hour)	4365,0	4262,0	3994,0	3822,0	3650,0	3464,0
2	Saat(hour)	4362,0	4259,5	3990,0	3821,5	3646,0	-
4	Saat(hour)	4358,0	-	3987,0	-	3641,0	3458,0
8	Saat(hour)	4356,0	-	-	-	-	-
24	Saat(hour)	-	-	3982,0	3811,0	3637,0	3450,0
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	4133,0	-	-	-	-
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,1798	0,0436	0,0302	0,0346	0,0348	0,0374
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,820	1,777	1,746	1,712	1,677
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,820	1,777	1,746	1,712	1,677	1,640
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,910	1,798	1,762	1,729	1,694	1,658
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,955	0,899	0,881	0,865	0,847	0,829
H _{dr} ² cm	1,000	0,912	0,809	0,776	0,747	0,718	0,687

Ek 18. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 18. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLIDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-0.5 M NaCl Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 9 Tarih (Date): 30.11.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				143,32		136,36	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				122,18		122,18	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				21,14		14,18	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				54,63		54,63	
Su Muhtevası (Water Content) % :				38,7		26,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5530,0	4748,0	4033,0	3861,0	3706,0	3527,0
10	Saniye (second)	5295,0	4545,0	3934,0	3784,0	3597,0	3401,0
15	Saniye (second)	5268,0	4515,0	3925,0	3774,0	3588,0	3394,0
30	Saniye (second)	5215,0	4452,0	3911,0	3762,0	3577,0	3384,0
1	Dakika(minute)	5150,0	4377,0	3900,0	3752,0	3570,0	3380,0
2	Dakika(minute)	5082,0	4321,0	3892,0	3745,0	3564,0	3376,0
4	Dakika(minute)	5024,0	4290,0	3887,0	3739,0	3559,0	3375,5
8	Dakika(minute)	4969,0	4271,0	3882,0	3735,0	3554,0	3367,0
15	Dakika(minute)	4943,0	4261,5	3879,0	3731,0	3549,5	3362,0
30	Dakika(minute)	4931,0	4251,0	3875,0	3727,0	3545,0	3358,0
1	Saat(hour)	4924,0	4240,0	3872,0	3723,0	3540,0	3354,0
2	Saat(hour)	-	4232,0	3869,0	3716,0	3534,0	3350,0
4	Saat(hour)	4917,0	4228,0	3868,0	3715,0	3531,0	3343,0
8	Saat(hour)	-	4225,0	-	-	-	-
24	Saat(hour)	4905,0	-	3862,0	3710,0	-	-
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	4212,0	-	-	-	3333,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,1250	0,1072	0,0342	0,0302	0,0350	0,0388
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,875	1,768	1,734	1,703	1,668
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,875	1,768	1,734	1,703	1,668	1,630
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,938	1,821	1,751	1,719	1,686	1,649
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,969	0,911	0,875	0,859	0,843	0,825
H _{dr} ² cm	1,000	0,938	0,829	0,766	0,738	0,711	0,680

Ek 19. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 19. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-saf su (CaCl₂) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 10 Tarih (Date): 02.11.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				143,43		139,87	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				123,36		123,36	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				20,07		16,51	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				55,82		55,82	
Su Muhtevası (Water Content) % :				36,0		29,6	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5368,0	4838,0	4551,0	4218,0	3994,0	3833,0
10	Saniye (second)	5100,0	4765,0	4380,0	4094,0	3905,0	3588,0
15	Saniye (second)	5070,0	4754,0	4354,0	4079,0	3896,0	3578,0
30	Saniye (second)	5009,0	4748,0	4307,0	4059,0	3886,0	3572,0
1	Dakika(minute)	4949,0	4718,0	4273,0	4046,0	3879,0	3566,0
2	Dakika(minute)	4899,0	4697,0	4256,0	4039,0	3872,0	3562,0
4	Dakika(minute)	4874,0	4684,0	4248,0	4033,0	3867,0	3557,5
8	Dakika(minute)	4866,0	4676,5	4242,0	4028,0	3862,0	3554,0
15	Dakika(minute)	4860,0	4672,0	4239,0	4024,0	3858,0	3550,5
30	Dakika(minute)	4855,0	4667,5	4235,0	4020,0	3854,0	3547,5
1	Saat(hour)	4851,0	4664,0	4230,0	4015,0	3849,0	3543,0
2	Saat(hour)	4846,0	4660,0	4227,0	4010,0	3844,0	3539,0
4	Saat(hour)	4844,0	4659,0	4224,0	4005,0	3839,0	3537,0
8	Saat(hour)	-	4657,0	-	-	-	-
24	Saat(hour)	4837,0	-	4218,0	-	3833,0	-
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	4649,0	-	3994,0	-	3525,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N= 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,1062	0,0378	0,0666	0,0448	0,0322	0,0616
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,894	1,856	1,789	1,745	1,712
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,894	1,856	1,789	1,745	1,712	1,651
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,947	1,875	1,823	1,767	1,729	1,682
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,973	0,937	0,911	0,884	0,864	0,841
H _{dr} ² cm	1,000	0,948	0,879	0,831	0,781	0,747	0,707

Ek 20. Kaolin-0.5 M CaCl₂ karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 20. Kaolin-0.5 M CaCl₂ karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Kaolin-0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 11 Tarih (Date): 31.01.2013
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,696
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				146,64		139,50	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				127,27		127,27	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				19,37		12,23	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				58,82		58,82	
Su Muhtevası (Water Content) % :				32,9		20,8	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5372,0	4675,0	4667,0	4529,0	4358,0	4173,0
10	Saniye (second)			4609,0	4435,0	4234,0	4033,0
15	Saniye (second)			4602,0	4427,0	4228,0	4028,0
30	Saniye (second)			4591,0	4414,0	4220,0	4022,0
1	Dakika(minute)			4583,0	4405,0	4213,0	4017,0
2	Dakika(minute)			4574,0	4397,5	4208,5	4012,5
4	Dakika(minute)			4568,0	4392,0	4203,0	4009,0
8	Dakika(minute)			4563,0	4386,0	4199,0	4005,0
15	Dakika(minute)	4675,0		4558,5	4382,0	4195,0	4001,5
30	Dakika(minute)			4554,0	4378,0	4191,0	3998,0
1	Saat(hour)			4550,0	4374,0	4188,0	3994,5
2	Saat(hour)			4546,0	4370,5	4185,0	3991,0
4	Saat(hour)			4544,0	4369,0	4184,0	3987,0
8	Saat(hour)			-	4364,0	4183,0	-
24	Saat(hour)		4665,0	-	-	-	-
48	Saat(hour)			-	-	-	-
72	Saat(hour)			4529,0	4359,0	4174,0	3976,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,1394	0,0020	0,0276	0,0340	0,0368	0,0394
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,861	1,859	1,831	1,797	1,760
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,861	1,859	1,831	1,797	1,760	1,721
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,930	1,860	1,845	1,814	1,779	1,741
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,965	0,930	0,922	0,907	0,889	0,870
H _{dr} ² cm	1,000	0,932	0,865	0,851	0,823	0,791	0,757

Ek 21. Bentonit numunesinin 0 gün için konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 21. Bentonit numunesinin 0 gün için konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name) : Bentonit-saf su Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No) :
 Örnek No (Sample No) : 12 Tarih (Date): 04.01.2012
 Derinlik (Depth) :

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				124,73		111,49	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				96,44		96,44	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				28,29		15,05	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				28,89		28,89	
Su Muhtevası (Water Content) % :				97,9		52,1	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0 Db		5686,0	5500,0	4384,0	3822,0	3129,0	2472,0
10 Saniye (second)		5624,0	5460,5	4333,0	3753,0	3073,0	2424,0
15 Saniye (second)		5620,0	5458,0	4329,0	3747,0	3068,0	2420,0
30 Saniye (second)		5614,0	5452,0	4320,5	3734,0	3057,0	2412,5
1 Dakika(minute)		5604,0	5443,0	4308,0	3716,0	3041,0	2401,0
2 Dakika(minute)		5589,5	5429,0	4288,5	3689,0	3019,0	2383,5
4 Dakika(minute)		5571,0	5406,0	4261,0	3650,5	2985,0	2360,0
8 Dakika(minute)		5553,0	5367,5	4221,0	3596,0	2938,5	2325,0
15 Dakika(minute)		5534,0	5312,0	4170,5	3528,0	2879,0	2279,5
30 Dakika(minute)		5521,0	4930,0	4098,0	3431,0	2791,5	2214,0
1 Saat(hour)		5519,0	4621,5	4015,0	3325,0	2688,0	2128,0
2 Saat(hour)		5509,0	4486,5	3939,0	3236,0	2592,0	2032,0
4 Saat(hour)		5504,0	4439,0	3884,0	3182,5	2531,0	1954,5
8 Saat(hour) Df		5499,0*		3850,0	3150,0	2498,0	1915,0
24 Saat(hour)		5494,5	4390,0	3818,0	3128,0	2478,0	1887,0
48 Saat(hour)							
72 Saat(hour)							
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,0383	0,2220	0,1132	0,1388	0,1302	0,1170
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,962	1,740	1,627	1,488	1,358
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,962	1,740	1,627	1,488	1,358	1,241
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,981	1,851	1,683	1,557	1,423	1,299
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,990	0,925	0,842	0,779	0,711	0,650
H _{dr} ² cm	1,000	0,981	0,856	0,708	0,606	0,506	0,422

Ek 22. Bentonit-0.5 M NaCl numunesinin 0 gün için konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 22. Bentonit-0.5 M NaCl numunesinin 0 gün için konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-0.5 M NaCl Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 13 Tarih (Date): 04.01.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				126,02		112,17	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				97,04		97,04	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				28,98		15,13	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				28,59		28,59	
Su Muhtevası (Water Content) % :				101,4		52,9	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0 Db		5648,0	4614,0	4140,0	3520,0	2908,0	2238,0
10 Saniye (second)		5522,0	4568,0	4088,0	3478,0	2849,0	2196,0
15 Saniye (second)		5515,0	4563,0	4083,0	3474,0	2843,0	2192,0
30 Saniye (second)		5499,0	4554,0	4073,0	3464,0	2831,0	2183,0
1 Dakika(minute)		5473,0	4541,0	4059,0	3450,0	2813,0	2171,0
2 Dakika(minute)		5448,0	4520,0	4038,5	3425,5	2787,5	2154,0
4 Dakika(minute)		5379,5	4488,0	4005,0	3388,5	2751,5	2129,0
8 Dakika(minute)		5286,0	4444,0	3958,0	3334,0	2699,0	2092,0
15 Dakika(minute)		5121,0	4392,0	3902,0	3264,0	2635,0	2046,0
30 Dakika(minute)		4903,0	4325,0	3828,0	3170,5	2544,0	1979,0
1 Saat(hour)		4773,0	4262,0	3753,5	3074,0	2438,0	1893,0
2 Saat(hour)		4697,5	4219,0	3695,0	3001,0	2344,5	1797,0
4 Saat(hour)		4659,0	4189,0	3653,0	2956,0	2288,5	1720,0
8 Saat(hour) Df		4629,0*		3625,0	2927,0	2258,0	1680,0
24 Saat(hour)		4606,5	4142,0	3599,0	2906,0	2240,0	1653,5
48 Saat(hour)							
72 Saat(hour)							
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,2083	0,0944	0,1082	0,1228	0,1336	0,1169
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,792	1,697	1,589	1,466	1,333
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,792	1,697	1,589	1,466	1,333	1,216
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,896	1,745	1,643	1,528	1,400	1,274
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,948	0,872	0,822	0,764	0,700	0,637
H _{dr} ^{1/2} cm	1,000	0,899	0,761	0,675	0,583	0,490	0,406

Ek 23. Bentonit-0.5 M CaCl₂ numunesinin 0 gün için konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 23. Bentonit-0.5 M CaCl₂ numunesinin 0 gün için konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name) : Bentonit-0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No) : 14 Tarih (Date): 04.01.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				126,42		111,72	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				97,23		97,23	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				29,19		14,49	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,48		68,48	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				28,75		28,75	
Su Muhtevası (Water Content) % :				101,5		50,4	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0 Db		5380,0	4407,0	3867,0	3260,0	2614,0	2019,5
10 Saniye (second)		5270,0	4359,0	3808,0	3191,0	2559,0	1988,0
15 Saniye (second)		5262,0	4352,0	3802,0	3183,0	2554,0	1984,5
30 Saniye (second)		5242,0	4338,0	3788,0	3167,0	2541,0	1976,5
1 Dakika(minute)		5105,0	4315,0	3764,0	3144,0	2522,5	1965,0
2 Dakika(minute)		5053,0	4282,0	3731,0	3109,5	2496,0	1950,0
4 Dakika(minute)		4968,0	4235,0	3683,0	3060,0	2457,0	1929,0
8 Dakika(minute)		4849,0	4171,0	3613,5	2990,5	2403,0	1897,0
15 Dakika(minute)		4722,0	4102,0	3536,5	2911,0	2347,0	1857,0
30 Dakika(minute)		4594,0	4027,5	3444,0	2813,0	2250,0	1799,0
1 Saat(hour)		4522,0	3972,0	3370,0	2731,0	2162,5	1725,5
2 Saat(hour)		4485,0	3936,0	3321,0	2677,0	2100,0	1652,0
4 Saat(hour)		4453,5	3908,0*	3288,0	2643,0*	2062,0	1618,0*
8 Saat(hour)		-	-	-	-	-	-
24 Saat(hour)		4405,0	3867,0	3247,0	2610,0	-	1545,0
48 Saat(hour)						-	
72 Saat(hour)						2024,0	
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,1950	0,1080	0,1240	0,1300	0,1180	0,0949
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,805	1,697	1,573	1,443	1,325
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,805	1,697	1,573	1,443	1,325	1,230
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,903	1,751	1,635	1,508	1,384	1,278
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,951	0,876	0,818	0,754	0,692	0,639
H _{dr} ² cm	1,000	0,905	0,767	0,668	0,569	0,479	0,408

Ek 24. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 24. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): bentonit-saf su (NaCl) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 15 Tarih (Date): 20.04.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				123,50		107,92	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				93,09		93,09	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				30,41		14,83	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				25,54		25,54	
Su Muhtevası (Water Content) % :				119,1		58,1	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	4935,0	3078,0	2631,0	2076,0	5748,0	5182,0
10	Saniye (second)	4700,0	3041,0	2579,0	2029,0	5699,0	5155,0
15	Saniye (second)	4662,0	3034,0	2573,0	2023,0	5694,0	5151,0
30	Saniye (second)	4595,0	3025,0	2556,0	2009,0	5684,0	5146,0
1	Dakika(minute)	4485,0	3008,5	2533,0	1988,0	5669,0	5132,0
2	Dakika(minute)	4323,0	2983,0	2500,0	1960,5	5647,0	5125,0
4	Dakika(minute)	4081,0	2950,0	2455,0	1922,0	5616,0	5107,0
8	Dakika(minute)	3764,0	2905,0	2395,0	1867,5	5574,0	5081,0
15	Dakika(minute)	3471,0	2854,0	2328,0	1805,5	5525,0	5050,0
30	Dakika(minute)	3273,0	2794,0	2251,5	1726,0	5453,0	5004,0
1	Saat(hour)	3195,0	2744,0	2184,0	1651,0	5369,0	4942,5
2	Saat(hour)	3158,0	2705,5	2147,0	1599,0	5288,5	4874,0
4	Saat(hour)	3130,0	2669,0	2130,5	1556,0	5220,0	4814,0
8	Saat(hour) Df	-	2656,0	2103,0	-	5203,0	4770,0
24	Saat(hour)	-	2633,0	2081,5	1537,0	5179,0	4760,0
48	Saat(hour)	-					
72	Saat(hour)	3077,0					
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,3716	0,0890	0,1099	0,1078	0,1138	0,0844
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,628	1,539	1,430	1,322	1,208
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,628	1,539	1,430	1,322	1,208	1,124
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,814	1,584	1,484	1,376	1,265	1,166
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,907	0,792	0,742	0,688	0,632	0,583
H _{dr} ² cm	1,000	0,823	0,627	0,551	0,473	0,400	0,340

Ek 25. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 25. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-0.5 M NaCl Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 16 Tarih (Date): 30.05.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				126,67		110,92	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				94,86		94,86	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				31,81		16,06	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,56		67,56	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				27,30		27,30	
Su Muhtevası (Water Content) % :				116,5		58,8	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5391,0	4917,0	3805,0	3155,0	2542,0	4751,0
10	Saniye (second)	5303,0	4858,0	3753,0	3108,0	2498,0	4710,0
15	Saniye (second)	5292,0	4846,0	3745,0	3102,0	2492,0	4706,0
30	Saniye (second)	5266,0	4815,0	3728,0	3088,0	2480,0	4696,0
1	Dakika(minute)	5231,0	4764,0	3704,0	3068,0	2463,0	4683,0
2	Dakika(minute)	5187,0	4650,0	3669,0	3040,0	2438,0	4665,0
4	Dakika(minute)	5140,0	4538,0	3620,0	3000,0	2403,5	4639,0
8	Dakika(minute)	5097,0	4367,0	3554,0	2945,0	2354,0	4602,5
15	Dakika(minute)	5059,5	4189,0	3477,5	2879,0	2294,5	4556,0
30	Dakika(minute)	5023,5	4024,0	3384,0	2789,0	2210,5	4480,0
1	Saat(hour)	4996,0	3929,0	3307,0	2700,0	2111,5	4403,0
2	Saat(hour)	4974,0	3880,0	3255,5	2633,0	2024,0	4310,0
4	Saat(hour)	-	3850,0	3227,0	2585,0	1964,0	-
8	Saat(hour)	-	-	-	-	-	4227,0
24	Saat(hour)	4916,0	3804,0	-	2543,0	1917,0	4225,0
48	Saat(hour)			-			
72	Saat(hour)			3153,0			
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,0950	0,2226	0,1304	0,1224	0,1250	0,1052
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,905	1,682	1,552	1,430	1,305
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,905	1,682	1,552	1,430	1,305	1,199
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,953	1,794	1,617	1,491	1,367	1,252
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,976	0,897	0,809	0,745	0,684	0,626
H _{dr} ² cm	1,000	0,953	0,804	0,654	0,556	0,467	0,392

Ek 26. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 26. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-saf su (CaCl₂) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 17 Tarih (Date): 09.05.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				125,70		110,71	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				95,46		95,46	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				30,24		15,25	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,56		67,56	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				27,90		27,90	
Su Muhtevası (Water Content) % :				108,4		54,7	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5305,0	5014,0	3673,0	3097,0	2421,0	1767,0
10	Saniye (second)	5223,0	4981,0	3624,0	3034,0	2366,0	1724,0
15	Saniye (second)	5213,0	4972,0	3618,0	3027,0	2359,0	1719,0
30	Saniye (second)	5191,0	4962,0	3603,0	3010,0	2344,0	1709,0
1	Dakika(minute)	5161,0	4947,0	3582,0	2985,0	2323,5	1693,0
2	Dakika(minute)	5121,0	4917,0	3553,0	2951,0	2293,0	1674,0
4	Dakika(minute)	5080,0	4855,0	3512,0	2902,0	2253,0	1644,0
8	Dakika(minute)	5054,0	4732,0	3454,0	2835,0	2195,0	1608,0
15	Dakika(minute)	5041,0	4291,0	3388,5	2756,0	2127,0	1560,0
30	Dakika(minute)	5033,0	3988,0	3306,0	2655,0	2033,0	1492,0
1	Saat(hour)	5027,5	3833,0	3231,5	2563,0	1936,0	1407,0
2	Saat(hour)	5024,0	3772,0	3179,5	2503,0	1862,0	1333,0
4	Saat(hour)	5020,0	3737,0	3145,0	2466,0	-	1271,0
8	Saat(hour) Df	5013,0	-	-	-	1793,0	-
24	Saat(hour)	5010,0	-	3097,0	2419,0	1769,0	1183,0
48	Saat(hour)		-				
72	Saat(hour)		3670,0				
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,0590	0,2688	0,1152	0,1356	0,1304	0,1168
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,941	1,672	1,557	1,421	1,291
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,941	1,672	1,557	1,421	1,291	1,174
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,971	1,807	1,615	1,489	1,356	1,233
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,985	0,903	0,807	0,745	0,678	0,616
H _{dr} ² cm	1,000	0,971	0,816	0,652	0,554	0,460	0,380

Ek 27. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 27. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 18 Tarih (Date): 11.06.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				146,40		138,57	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				96,20		96,20	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				50,20		42,37	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,56		67,56	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				28,64		28,64	
Su Muhtevası (Water Content) % :				175,3		147,9	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5163,0	4650,0	3370,0	2742,0	4645,0	4076,0
10	Saniye (second)	5046,0	4563,0	3310,0	2676,0	4591,0	4024,0
15	Saniye (second)	5033,0	4548,0	3301,0	2668,0	4584,0	4017,0
30	Saniye (second)	5005,0	4515,0	3281,0	2649,0	4569,0	4004,0
1	Dakika(minute)	4971,0	4465,0	3254,0	2622,5	4547,0	3985,0
2	Dakika(minute)	4930,0	4315,0	3215,0	2585,0	4516,5	3960,0
4	Dakika(minute)	4862,5	4097,0	3160,0	2534,0	4473,5	3923,5
8	Dakika(minute)	4797,5	3866,0	3087,0	2465,0	4416,0	3873,5
15	Dakika(minute)	4748,5	3671,0	3011,0	2389,0	4347,5	3815,0
30	Dakika(minute)	4711,5	3531,0	2931,5	2304,0	4264,0	3731,0
1	Saat(hour)	4692,0	3466,0	2877,5	2243,0	4188,0	3646,0
2	Saat(hour)	4681,0	3431,0	2842,5	2205,0	4141,0	3581,5
4	Saat(hour)	-	-	2828,0	2171,0	4102,0	-
8	Saat(hour)	4662,0	3397,0	-	-	-	-
24	Saat(hour)	4651,0	3368,5	2776,0	-	4075,0	3514,0
48	Saat(hour)				-		
72	Saat(hour)				2121,0		
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,1024	0,2563	0,1188	0,1242	0,1140	0,1124
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,898	1,641	1,523	1,398	1,284
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,898	1,641	1,523	1,398	1,284	1,172
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,949	1,769	1,582	1,460	1,341	1,228
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,974	0,885	0,791	0,730	0,671	0,614
H _{dr} ² cm	1,000	0,949	0,783	0,626	0,533	0,450	0,377

Ek 28. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 28. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-saf su (NaCl) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 19 Tarih (Date): 28.09.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				124,17		109,24	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				92,83		92,83	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				31,34		16,41	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				25,28		25,28	
Su Muhtevası (Water Content) % :				124,0		64,9	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	4780,0	3041,0	2631,0	2420,0	4281,0	3727,0
10	Saniye (second)	4636,0	3014,0	2595,0	2382,0	4235,0	3670,0
15	Saniye (second)	4618,0	3010,0	2590,0	2378,0	4228,0	3665,0
30	Saniye (second)	4570,0	3000,5	2577,0	2368,0	4220,0	3656,0
1	Dakika(minute)	4500,0	2981,0	2561,0	2355,0	4206,0	3644,0
2	Dakika(minute)	4394,0	2963,0	2539,0	2337,0	4187,0	3627,0
4	Dakika(minute)	4235,0	2935,0	2505,0	2310,0	4174,0	3604,0
8	Dakika(minute)	3879,0	2895,0	2476,0	2275,0	4135,0	3572,0
15	Dakika(minute)	3497,5	2850,5	2407,0	2229,0	4091,0	3534,0
30	Dakika(minute)	3231,0	2800,0	2345,0	2176,0	4029,0	3476,0
1	Saat(hour)	3144,0	2750,0	2298,0	2113,5	3953,0	3404,0
2	Saat(hour)	3109,0	2716,0	2266,0	2037,0	3866,0	-
4	Saat(hour)	3094,0	-	2244,0	2030,0	3794,0	3223,0
8	Saat(hour) Df	3075,0	-	-	-	-	-
24	Saat(hour)	-	-	2216,0	-	3727,0	3118,0
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	2631,0	-	-	-	-
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm)							
(Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,3410	0,0820	0,0830	0,0780	0,1108	0,1218
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H)							
(Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,659	1,577	1,494	1,416	1,305
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,659	1,577	1,494	1,416	1,305	1,183
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,830	1,618	1,536	1,455	1,361	1,244
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,915	0,809	0,768	0,728	0,680	0,622
H _{dr} ² cm	1,000	0,837	0,654	0,589	0,529	0,463	0,387

Ek 29. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 29. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLIDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-0.5 M NaCl Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 20 Tarih (Date): 30.11.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				125,23		114,11	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				94,40		94,40	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				30,83		19,71	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				68,45		68,45	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				25,95		25,95	
Su Muhtevası (Water Content) % :				118,8		76,0	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5863,0	5397,0	4221,0	3581,0	2962,0	2696,0
10	Saniye (second)	5783,0	5343,0	4188,0	3553,0	2935,0	2650,0
15	Saniye (second)	5774,0	5335,0	4182,0	3550,0	2931,0	2644,0
30	Saniye (second)	5756,0	5314,0	4171,0	3542,0	2924,0	2636,0
1	Dakika(minute)	5730,0	5280,0	4156,0	3531,0	2915,0	2623,0
2	Dakika(minute)	5693,0	5232,0	4136,0	3514,0	2902,0	2603,0
4	Dakika(minute)	5650,0	5159,0	4106,0	3492,0	2883,0	2571,0
8	Dakika(minute)	5603,0	5054,0	4063,0	3459,0	2856,5	2534,0
15	Dakika(minute)	5562,0	4949,0	4011,0	3419,5	2821,0	2477,0
30	Dakika(minute)	5528,0	4782,0	3936,0	3369,0	2765,0	2390,0
1	Saat(hour)	5497,0	4581,0	3843,0	3277,5	2753,0	2268,0
2	Saat(hour)	5468,0	4418,0	3738,0	3125,0	2750,0	2104,0
4	Saat(hour)	5440,0	4362,0	3670,0	3088,0	2748,0	1822,0
8	Saat(hour)	-	4334,0	-	-	2744,0	-
24	Saat(hour)	5400,0	-	3585,0	3023,0	-	-
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	4231,0	-	-	-	1599,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n		0,0926	0,2332	0,1272	0,1116	0,0436	0,2194
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,907	1,674	1,547	1,435	1,392
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,907	1,674	1,547	1,435	1,392	1,172
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,954	1,791	1,611	1,491	1,414	1,282
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,977	0,895	0,805	0,746	0,707	0,641
H _{dr} ² cm	1,000	0,954	0,802	0,649	0,556	0,500	0,411

Ek 30. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 30. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-saf su (CaCl₂) Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 21 Tarih (Date): 02.11.2012
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

Ring No : 1
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				125,77		115,09	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				95,62		95,62	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				30,15		19,47	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				28,07		28,07	
Su Muhtevası (Water Content) % :				107,4		69,4	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5431,0	4355,0	3768,0	3112,0	4691,0	4691,0
10	Saniye (second)	5308,0	4305,0	3709,0	3036,0	4655,0	4136,0
15	Saniye (second)	5298,0	4299,0	3703,0	3016,0	4650,0	4129,0
30	Saniye (second)	5276,0	4284,0	3683,0	3005,0	4641,0	4101,0
1	Dakika(minute)	5244,0	4263,0	3659,0	2976,0	4627,0	4073,0
2	Dakika(minute)	5203,0	4234,0	3624,0	2937,0	4606,0	4047,5
4	Dakika(minute)	5149,0	4192,0	3576,0	2879,0	4576,0	-
8	Dakika(minute)	5080,0	4136,0	3512,0	2803,0	4537,0	3961,5
15	Dakika(minute)	4951,0	4080,0	3443,0	2715,0	4491,0	3945,0
30	Dakika(minute)	4617,0	3996,0	3348,0	2610,0	4428,0	3867,0
1	Saat(hour)	4472,0	3931,0	3258,0	2503,0	4356,0	3780,0
2	Saat(hour)	4416,0	3884,0	3204,0	2436,0	4292,0	3698,0
3	Saat(hour)	4398,0	3863,0	3174,0	2386	4234,0	3662,0
8	Saat(hour) Df	-	3849,0	-	-	-	-
24	Saat(hour)	4355,0	-	3114,0	-	4192,0	-
48	Saat(hour)		-		-		-
72	Saat(hour)		3768,0		2317,0		3570,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N= 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,2152	0,1174	0,1308	0,1590	0,0998	0,2242
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,785	1,667	1,537	1,378	1,278
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,785	1,667	1,537	1,378	1,278	1,054
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,892	1,726	1,602	1,457	1,328	1,166
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,946	0,863	0,801	0,729	0,664	0,583
H _{dr} ² cm	1,000	0,895	0,745	0,642	0,531	0,441	0,340

Ek 31. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deney sonuçları

Tablo E 31. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında konsolidasyon deneyi verileri

KONSOLİDASYON DENEYİ

İşin Adı (Job Name): Bentonit-0.5 M CaCl₂ Yapan (Tested By):
 Sondaj No (Boring No):
 Örnek No (Sample No): 22 Tarih (Date): 31.01.2013
 Derinlik (Depth):

Özgül Ağırlık: 2,672
 (Specific Gravity)

Örnek Çapı: 5 cm
 (Sample Diam.)

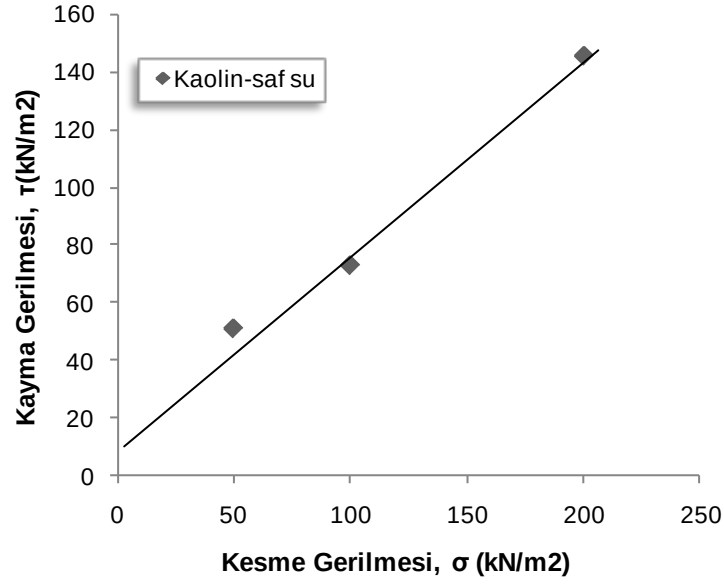
Ring No : 2
 (Ring No)

Su Muhtevası Hesap Çizelgesi (Water Content Determination)				Deney Başında (At the beginning of the test)		Deney Sonunda (At the end of the test)	
Ring + Yaş Ağırlık (Ring + Wt. Of wet soil) gr :				128,56		109,50	
Ring + Kuru Ağırlık (Ring + Wt. Of dry soil) gr :				96,63		96,63	
Su Ağırlığı (Wt. Of Moisture) gr :				31,93		12,87	
Ring Ağırlığı (Wt. Of Ring) gr :				67,55		67,55	
Kuru Örnek Ağırlığı (Wt. Of dry soil) gr :				29,08		29,08	
Su Muhtevası (Water Content) % :				109,8		44,3	
Yükler (Load) kg/cm ²	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Zaman (time)	Her Yük Kademesi İçin Dial Okuması (Dial Reading)						
0	Db	5264,0	3902,0	3333,0	4194,0	3601,0	3001,0
10	Saniye (second)	4985,0	3873,0	3289,0	4143,0	3550,0	2946,0
15	Saniye (second)	4950,0	3868,0	3283,0	4136,0	3543,0	2940,0
30	Saniye (second)	4870,0	3856,0	3265,0	4120,0	3528,0	2926,0
1	Dakika(minute)	4658,0	3837,0	3243,0	4097,0	3506,0	2907,0
2	Dakika(minute)	-	3806,0	3210,0	4059,0	3469,0	2881,0
4	Dakika(minute)	4485,0	3760,0	3161,0	4020,0	3432,0	2845,0
8	Dakika(minute)	4393,0	3697,0	3099,0	3959,0	3373,0	2794,0
15	Dakika(minute)	4237,0	3626,0	3028,0	3891,0	3307,0	2735,0
30	Dakika(minute)	4101,0	3550,0	3946,0	3813,0	3224,0	2654,0
1	Saat(hour)	4006,0	3489,0	2884,0	3743,0	3147,0	2566,0
2	Saat(hour)	3962,0	3445,0	2844,0	3699,0	3092,0	2492,0
4	Saat(hour)	3939,0	3424,0	2827,0	3677,0	3071,0	2448,0
8	Saat(hour)	3933,0	-	-	3646,0	3061,0	-
24	Saat(hour)	3903,0	-	-	-	-	-
48	Saat(hour)	-	-	-	-	-	-
72	Saat(hour)	-	3329,0	2777,0	3599,0	3002,0	2387,0
Kademedeki Boy Değişimi (1 dial bölümü, N = 0,002 mm) (Change in sample height)							
Hi = (Df - Db) x 0,1 n	0,0000	0,2722	0,1146	0,1112	0,1190	0,1198	0,1228
Kademedeki Drenaj Boyu Hesabı (H) (Length of longest drainage path)							
H ₀ =	2,000	2,000	1,728	1,613	1,502	1,383	1,263
H ₁ = H ₀ - Δ Hi cm	2,000	1,728	1,613	1,502	1,383	1,263	1,140
H = (H ₀ + H ₁) / 2 cm	2,000	1,864	1,671	1,558	1,443	1,323	1,202
H _{dr} = H / 2 cm	1,000	0,932	0,835	0,779	0,721	0,662	0,601
H _{dr} ² cm	1,000	0,869	0,698	0,607	0,520	0,438	0,361

Ek 32. Kaolin numunesinin 0 gün için kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 32. Kaolin numunesinin 0 gün için kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-saf su 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m^2)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m^2)	51,0	73,0	146,0

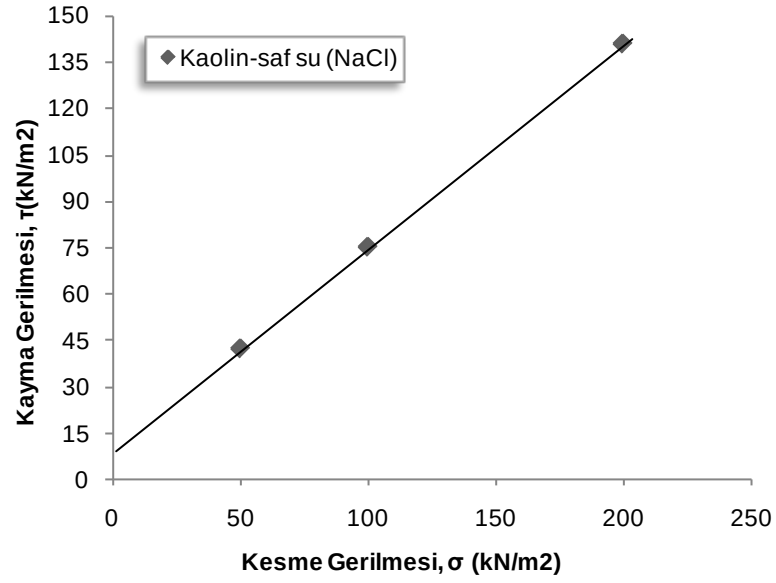


Şekil E 32. Kaolin numunesinin 0 gün için kayma dayanımı grafiği

Ek 33. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 33. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M NaCl 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m^2)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m^2)	42,0	75,0	141,0

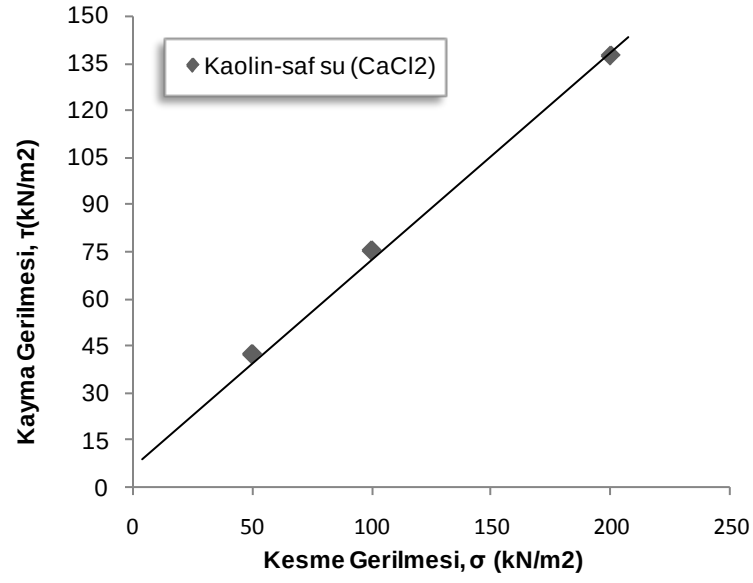


Şekil E 33. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 34. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 34. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M CaCl ₂ 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	42,0	75,0	137,0

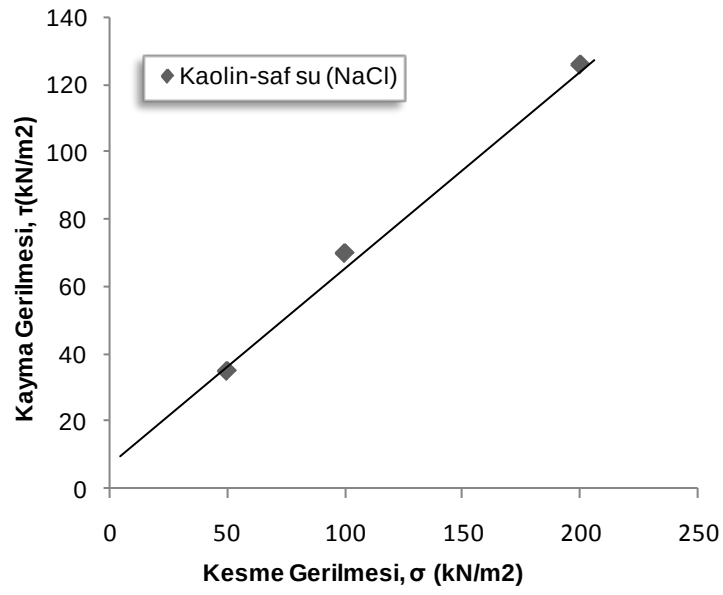


Şekil E 34. Kaolin numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 35. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 35. Kaolin-saf su 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-saf su(0.5 M NaCl) 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	35	70	126

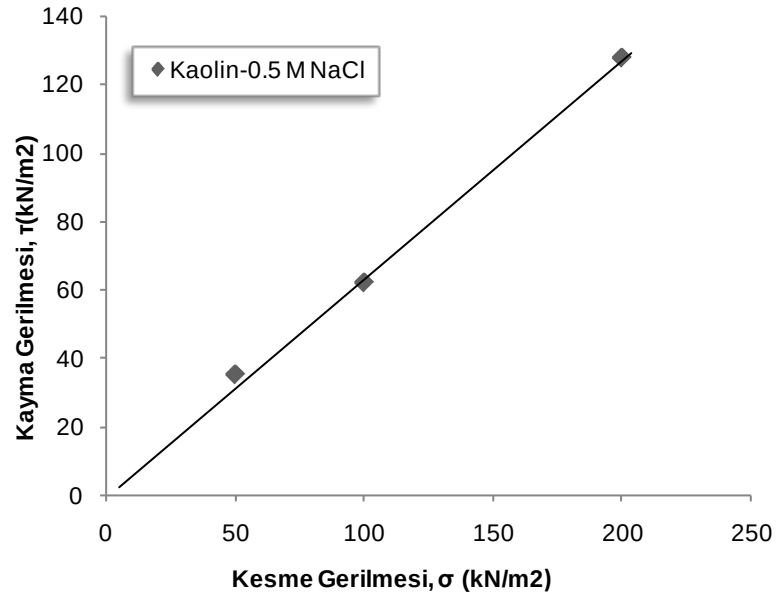


Şekil E 35. Kaolin-saf su 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 36. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 36. Kaolin-0.5 M NaCl 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M NaCl 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	35	62	128

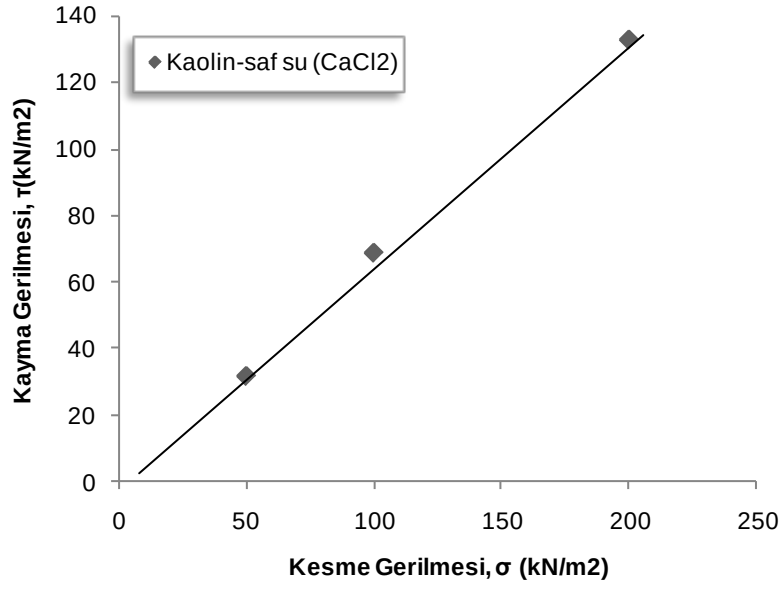


Şekil E 36. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 37. Kaolin-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 37. Kaolin-saf su 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-saf su (0.5 M CaCl_2) 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	32	69	133

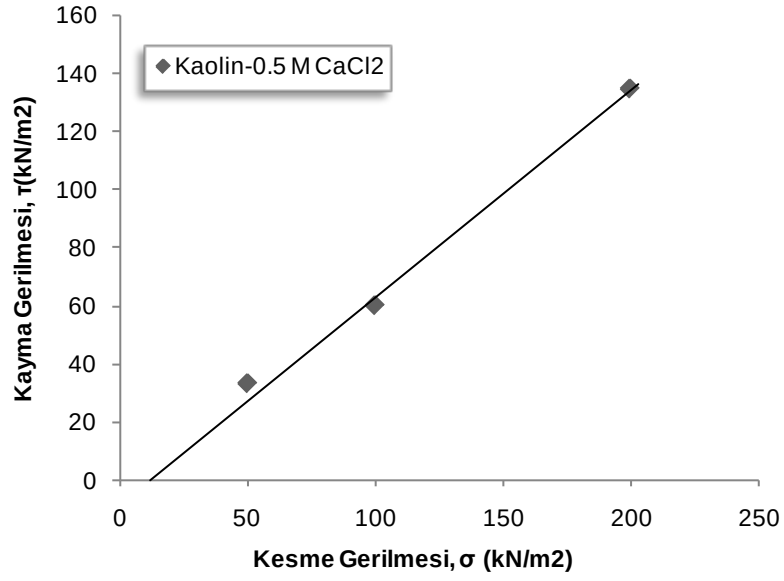


Şekil E 37. Kaolin-saf su 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 38. Kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 38. Kaolin-0.5 M CaCl_2 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M CaCl_2 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	33	60	135

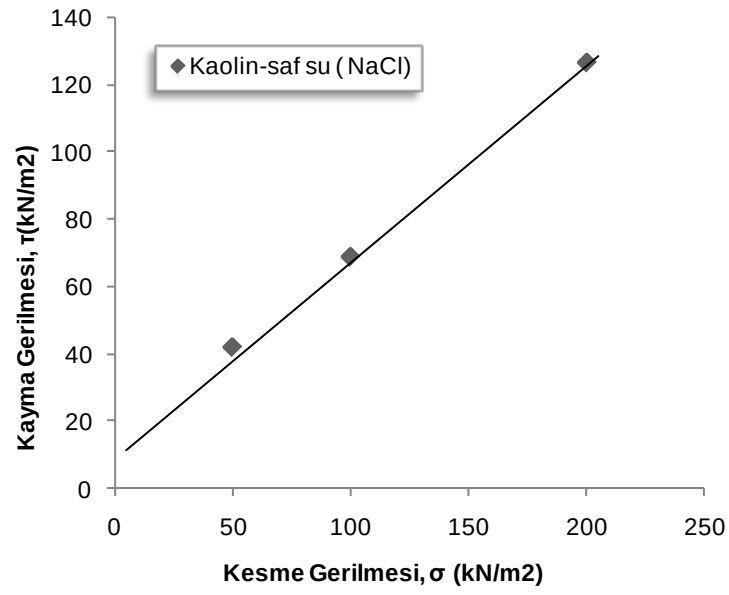


Şekil E 38. Kaolin-0.5 M CaCl₂ 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 39. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 39. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-saf su (0.5 M NaCl) 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	42	69	127

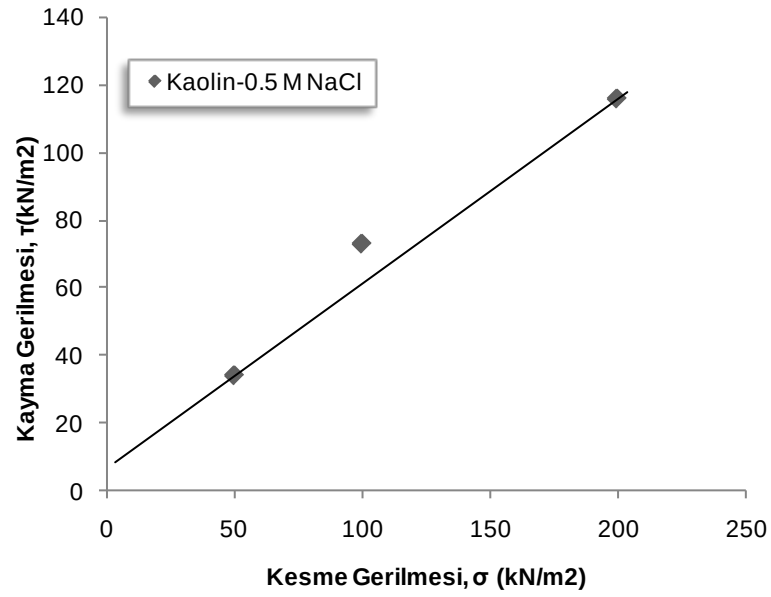


Şekil E 39. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 40. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 40. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M NaCl 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	34	73	116

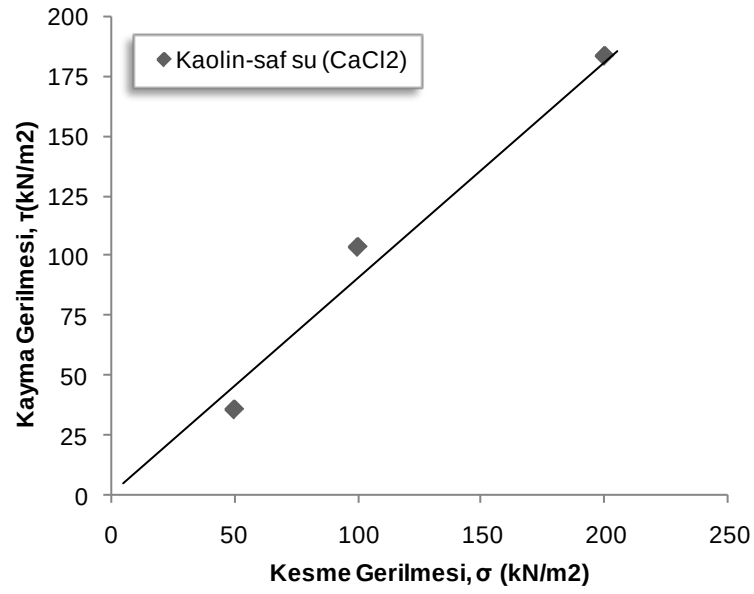


Şekil E 40. Kaolin-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 41. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 41. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-saf su (0.5 M CaCl_2) 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	36	104	184

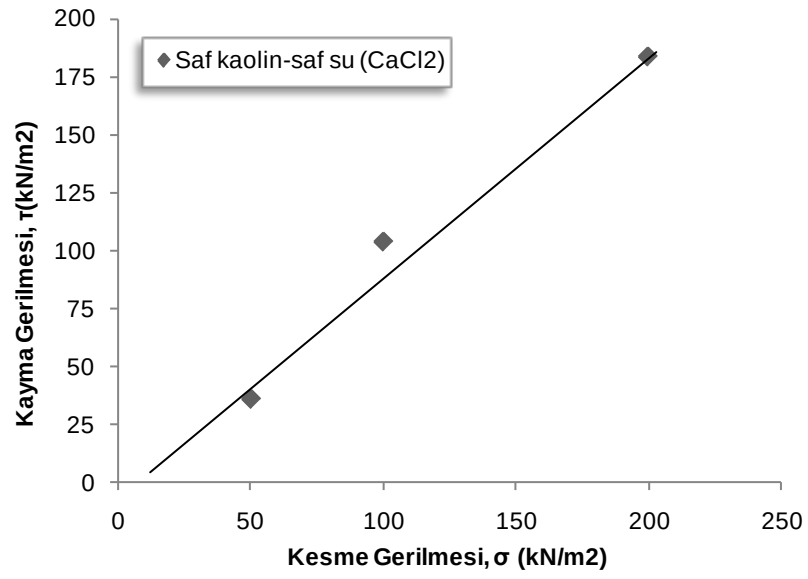


Şekil E 41. Kaolin-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 42. Kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 42. Kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Kaolin-0.5 M CaCl_2 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	40	75	128

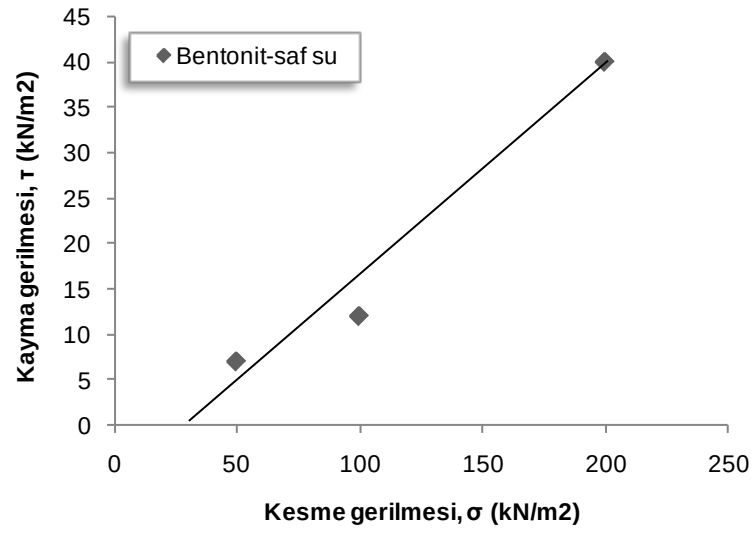


Şekil E 42. Kaolin-0.5 M CaCl_2 karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 43. Bentonit numunesinin 0 gün için kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 43. Bentonit numunesinin 0 gün için kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-saf su 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	7	12	40

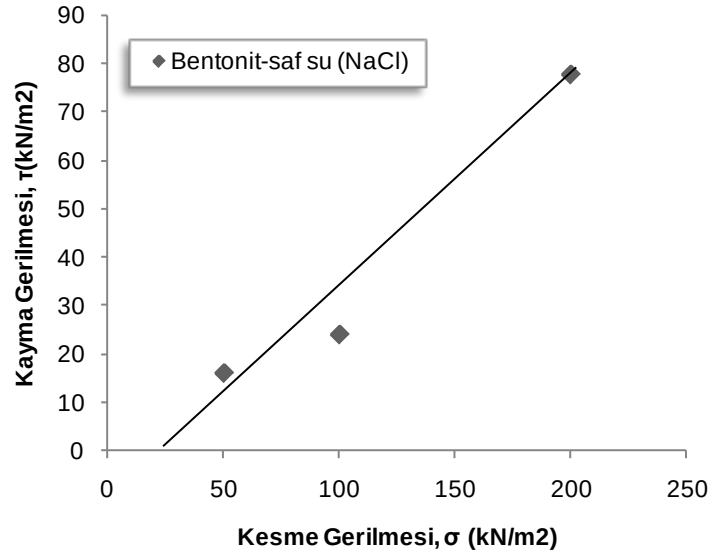


Şekil E 43. Bentonit numunesinin 0 gün için kayma dayanımı grafiği

Ek 44. Bentonit numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 44. Bentonit numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-0.5 M NaCl 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	16	24	78

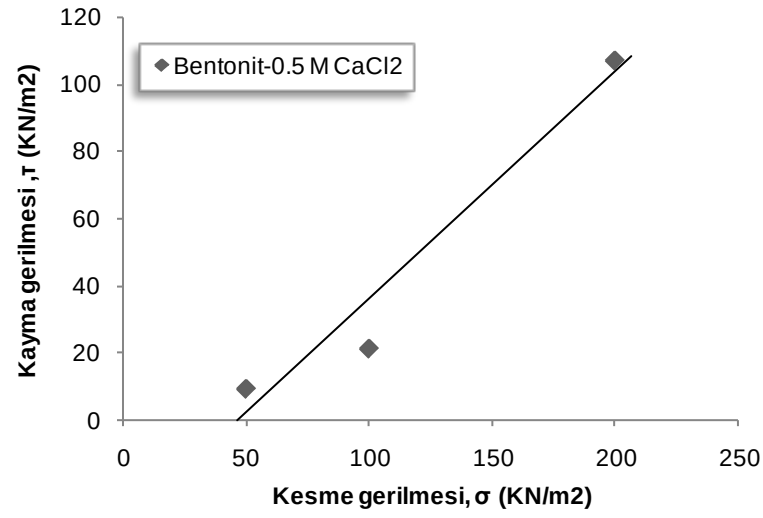


Şekil E 44. Bentonit numunesinin 0 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 45. Bentonit numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 45. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 0 gün için kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-0.5 M CaCl ₂ 0 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	9	21	107

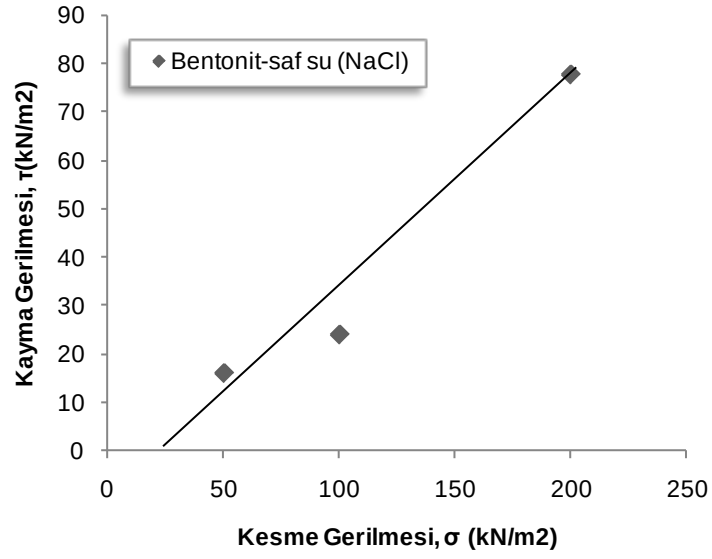


Şekil E 45. Bentonit numunesinin 0 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 46. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 46. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-saf su (0.5 M NaCl) 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	16	24	78

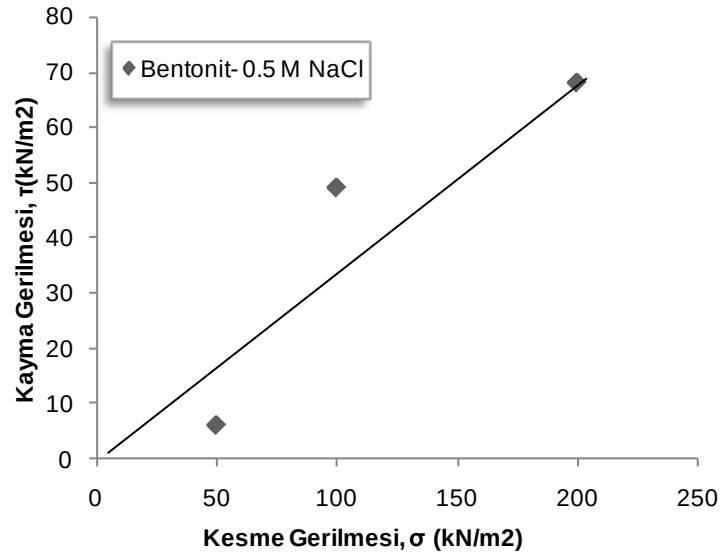


Şekil E 46. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 47. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 47. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-0.5 M NaCl 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	6	49	68

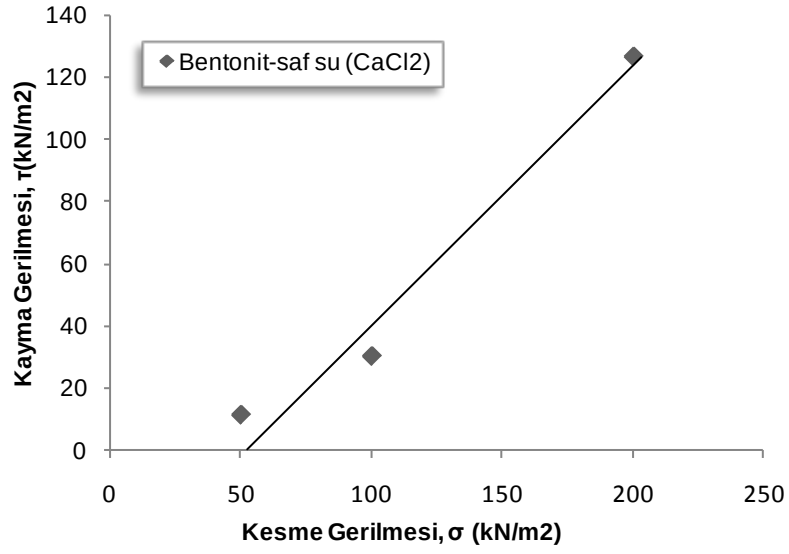


Şekil E 47. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 60 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 48. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 48. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için CaCl₂ varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-saf su (0.5 M CaCl ₂) 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	11	30	127

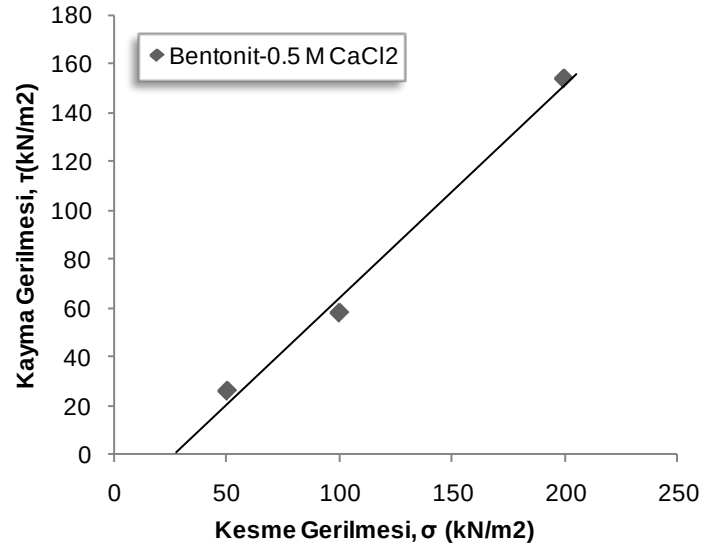


Şekil E 48. Bentonit-saf su karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 49. Bentonit-0.5 M CaCl_2 karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 49. Bentonit-0.5 M CaCl_2 karışımının 60 gün için CaCl_2 varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-0.5 M CaCl_2 60 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	26	58	154

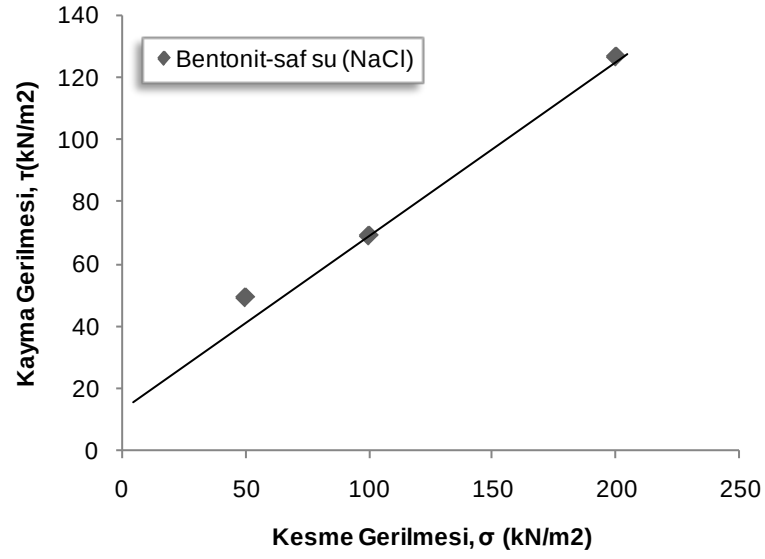


Şekil E 49. Bentonit-0.5 M CaCl_2 karışımının 60 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 50. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 50. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-saf su (0.5 M NaCl) 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	49	69	127

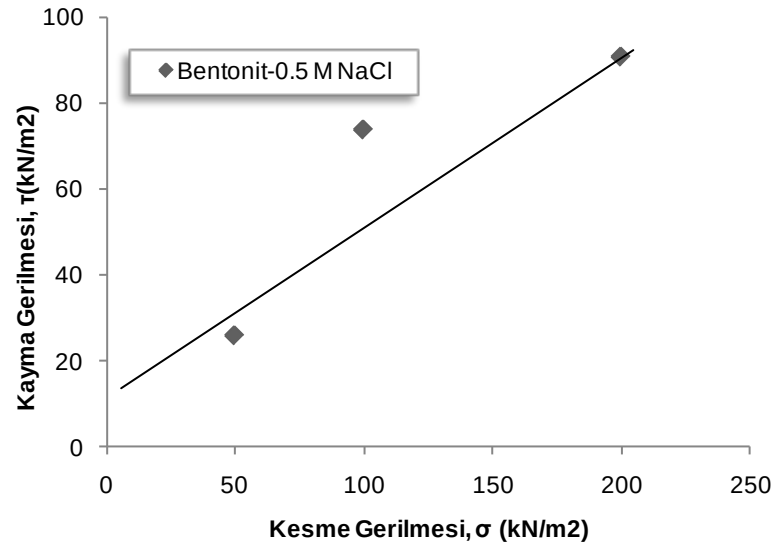


Şekil E 50. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Ek 51. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 51. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-0.5 M NaCl 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	26	74	91

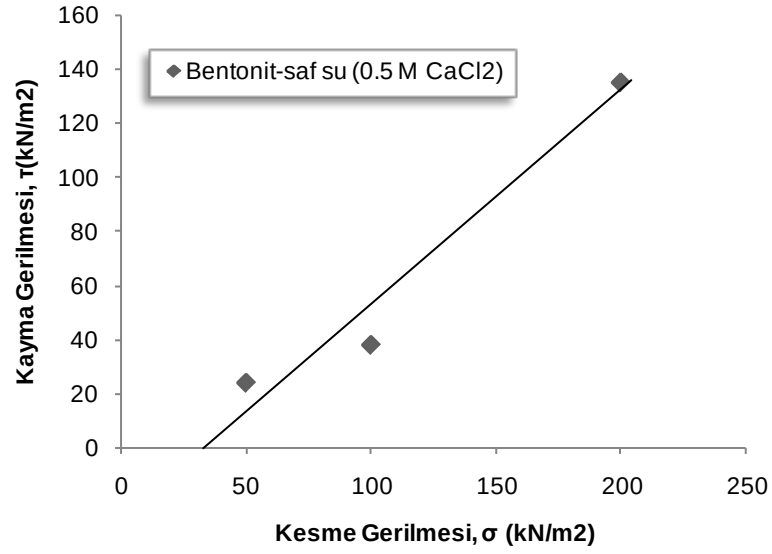


Şekil E 51. Bentonit-0.5 M NaCl karışımının 250 gün için 0.5 M NaCl varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 52. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 52. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanım deneyi verileri

Bentonit-saf su (0.5 M CaCl ₂) 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	24	38	135

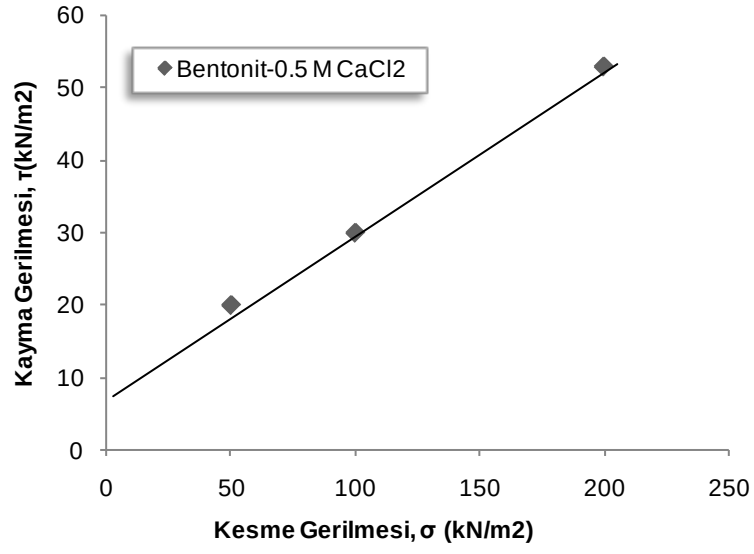


Şekil E 52. Bentonit-saf su karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı grafiği

Ek 53. Bentonit-0.5 M CaCl_2 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanımı deney sonuçları

Tablo E 53. Bentonit-0.5 M CaCl_2 karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl_2 varlığında kayma dayanım deney verileri

Bentonit-0.5 M CaCl_2 250 gün			
Normal Gerilme (kN/m ²)	50	100	200
Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	20	30	53



Şekil E 53. Bentonit-0.5 M CaCl₂ karışımının 250 gün için 0.5 M CaCl₂ varlığında kayma dayanımı grafiği