



**ISLATMA-KURUTMA DÖNGÜSÜNE MARUZ
BIRAKILMIŞ KİL ZEMİNİN ŞİŞME VE
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ

Doç. Dr. Semet ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ISLATMA-KURUTMA DÖNGÜSÜNE MARUZ BIRAKILMIŞ KİL ZEMİNİN ŞİŞME VE
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Swelling and Strength Characteristics of Clay Soil Subjected to the Wetting-Drying Cycle)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Erzurum
Ocak, 2021

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ISLATMA-KURUTMA DÖNGÜSÜNE MARUZ BIRAKILMIŞ KİL ZEMİNİN ŞİŞME VE
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Doç.Dr.Semet Çelik danışmanlığında, Merve Gürtürk Öztuğ tarafından hazırlanan bu çalışma, 03/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3/0)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Suat AKBULUT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr.Ögr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
Atatürk Üniversitesi

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek lisans Tezi olarak Doç.Dr.Semet Çelik danışmanlığında sunulan “İslatma-Kurutma Döngüsüne Maruz Bırakılmış Kil Zeminlerin Şişme ve Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%0	30
Kuramsal Temeller	%5	30
Materyal ve Yöntem	%14	35
Bulgular ve Tartışma	%1	20
Tezin Geneli	%7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ	Doç. Dr. Semet ÇELİK
12.1.2021	12.1.2021
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih vesayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih vesayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana her türlü imkanı sağlayan, deneylerimde ve tez yazımım boyunca yardımını hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Semet ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince emeği geçen Sayın Arş. Gör. Emrah TURAN'a, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği laboratuvarındaki görevlilere ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve koşulsuz desteğinden ötürü sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISLATMA-KURUMA DÖNGÜSÜNE MARUZ BIRAKILMIŞ KİLLİ ZEMİNLERİN MUKAVEMET VE ŞİŞME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Amaç: Nüfus artışı ve hızlı kentleşmeye bağlı olarak imar alanları kısıtlanmıştır. İmar alanlarının kısıtlanması problemli ve şişen zeminlerinin yapılaşmaya açılmasını gerektirmiştir. Bu çalışmanın amacı, farklı ön yükleme basınçlarının yüksek plastisiteli bir kil zeminin şişme ve mukavemet özellikleri üzerine etkisini araştırmaktır.

Yöntem: Bu tez çalışmasında, Erzurum Oltu-Narman bölgesinden alınan yüksek plastisiteli kil zeminin optimum su içeriği belirlenmiştir. Daha sonra, optimum su içeriğinde sıkıştırılan zeminlerden örselenmemiş numuneler alınmıştır. Alınan örselenmemiş numunelere 3 farklı ön yükleme basıncı uygulanmış ve oturma sona erene kadar beklenilmiştir. Ön yükleme uygulanan numuneler ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmuş ve her bir döngü sonunda kıvam, şişme basıncı, serbest şişme yüzdesi ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Bulgular: Yüksek basınç altında ön yükleme tabi tutulmuş numunelerin şişme basıncı, serbest şişme yüzdesi ve serbest basınç mukavemeti değerlerinin yüksek olduğu, döngü sayısı arttıkça değerlerin azaldığı görülmüştür. 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa basınç altında ön yükleme tabi tutulmuş kil zeminin 8 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen şişme basınçları, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki şişme basınçlarına göre sırasıyla % 91,3, % 93,0, % 93,5 oranlarında azalmıştır. 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa basınç altında ön yükleme tabi tutulmuş kil zeminin 8 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen serbest şişme yüzdeleri, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki serbest şişme yüzdelere göre sırasıyla % 80,8, % 84,5, % 87,3 oranlarında azalmıştır. 540 kPa basınç altında ön yükleme tabi tutulmuş kil zeminin 6 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen serbest basınç mukavemeti, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki serbest basınç mukavemetine göre % 87 azalmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemeti 540 kPa ön yükleme basıncına maruz bırakılmış ve ıslatma-kurutma döngüsüne maruz bırakılmamış numuneden elde edilmiştir (675,3 kPa).

Sonuç: En yüksek şişme basıncı, $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (220,9 kPa). Aynı basınç altında ön yükleme yapılmış numuneler göz önüne alındığında, ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça şişme basınçlarının azaldığı ve ardışık iki döngü arasındaki şişme basıncında meydana gelen en büyük azalmanın döngü yapılmamış numune ile 1. döngü sonundaki numuneler arasında olduğu görülmüştür. Yapılan serbest şişme yüzdesi deneyleri sonucunda, ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin azaldığı ve döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin farklı ön yükleme yapılmış tüm numunelerde sabit değere (% 0,9) ulaştığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti, $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir. Islatma-kurutma döngü sayısı arttıkça serbest basınç mukavemeti azalmıştır. Islatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak kıvam limitlerinde önemli değişiklik görülmemiştir.

Anahtar Kelimeler: ıslatma-kurutma, kil, serbest basınç mukavemeti, şişme

Ocak 2021, 75 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF SWELLING AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF CLAY SOIL SUBJECTED TO WETTING-DRYING CYCLE

Merve GÜRTÜRK ÖZTUĞ

Supervisor: Assoc. Dr. Semet ÇELİK

Purpose: Zoning areas are constrained due to population increase and rapid urbanization. The limited zoning areas required the problematic and expansive soils to be zoned for construction. The aim of this study is to investigate the effect of different preloading pressures on the swelling and strength properties of a high plasticity clay soil.

Method: In this thesis study, optimum water content of high plasticity clay taken from Erzurum Oltu-Narman region was determined. Afterwards, undisturbed samples were taken from the soils that were compacted at optimum water content. Three different preloading pressures were applied to the undisturbed samples and held until the settlement completed. Preloaded samples were subjected to a wetting-drying cycle and at the end of each cycle, consistency limits, swelling pressure, free swelling percentage and unconfined compression tests were conducted.

Findings: The swelling pressure, free swelling percentage and unconfined compressive strength values of the samples preloaded under high pressure were observed to be high, and to have decreased as the number of cycles increased. The swelling pressure values, determined at the end of 8 wetting-drying cycles, of clay soil preloaded under 54 kPa, 270 kPa and 540 kPa pressures, were decreased by 91,3%, 93,0%, and 93,5%, respectively, with reference to the swelling pressures before the wetting-drying cycles. The free swelling percentage values, determined at the end of 8 wetting-drying cycles, of clay soil preloaded under 54 kPa, 270 kPa and 540 kPa pressures, were decreased by 80,8%, 84,5%, and 87,3%, respectively, with reference to the free swelling percentages before the wetting-drying cycles. The unconfined compressive strength of the clay soil preloaded under 540 kPa, determined at the end of 6 wetting-drying cycles, decreased by 87% compared to the unconfined compressive strength before the wetting-drying cycles. The highest unconfined compressive strength (675,3 kPa) was achieved with the sample subjected to 540 kPa preload pressure and not subjected to a wetting-drying cycle.

Results: The highest swelling pressure (220.9 kPa) was obtained with the samples which were preloaded with $\sigma'_p = 540$ kPa and not subjected to the wetting-drying cycle. Considering the samples preloaded under the same pressure, the swelling pressures were observed to have decreased as the number of wetting-drying cycles increased, and the largest decrease in swelling pressure between the two consecutive cycles was between the sample not subjected to the cycle and the samples after the 1st cycle. As a result of the swelling percentage experiments, it has been noted that the free swelling percentages decrease with the number of wetting-drying cycles, and they converged to reach a constant value (0.9%) in all samples with different preloading. The highest unconfined compressive strength was obtained with the samples which were preloaded with $\sigma'_p = 540$ kPa and not subjected to a wetting-drying cycle. As the number of wetting-drying cycles increased, the free compressive strength decreased. There was no significant change in consistency limits depending on the number of wetting-drying cycles.

Keywords: wetting-drying, clay, unconfined compressive strength, swelling

January 2021, 75 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	2
KURAMSAL TEMELLER	3
Kil.....	3
Kil mineralinin yapısı ve özellikleri.....	4
Kil mineral tipleri.....	6
Killerin fiziko- kimyasal özellikleri	8
Killerde Şişme	11
Şişme mekanizması.....	13
Şişmeye etki eden faktörler	15
Tek indeks metodu ile şişen zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi	17
Şişen zeminlerin dolaylı yöntemlerle sınıflandırılması.....	18
Doğrudan ölçümlerle şişme basıncı	22
Literatür Özetleri.....	24
MATERYAL ve YÖNTEM	31
Materyal	31
Kil.....	31
Yöntem.....	34
Hidrometre deneyi.....	35
Özgül ağırlık deneyi.....	36
Kıvam limit deneyleri	36
Standart proktor deneyi.....	38

Şişme basıncı deneyi	39
Serbest şişme yüzdesi deneyi	40
Serbest basınç deneyi	40
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	42
Kıvam Limitleri Deney Sonuçları	42
Şişme Basıncı Deney Sonuçları	44
Serbest Şişme Yüzdesi Deney Sonuçları	48
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	52
SONUÇ ve ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	62



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Özgöl yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi	9
Tablo 2. Çeşitli kil mineralleri için katyon değişim kapasitesi değerleri	10
Tablo 3. Kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu	14
Tablo 4. Şişmeye etki eden faktörler	16
Tablo 5. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki.	17
Tablo 6. Şişme potansiyeli, rötre limiti ve lineer rötre arasındaki ilişki.....	17
Tablo 7. Potansiyel şişen zeminlerin sınıflandırılması	22
Tablo 8. Deneyde kullanılan kil numunenin kimyasal bileşimi	33
Tablo 9. Kil zeminin bazı geoteknik özellikleri	34
Tablo 10. Deney programı	35
Tablo 11. Islatma-kuruma döngüsüne bağlı olarak kıvam limitleri değişim deney sonuçları...42	
Tablo 12. Döngü sayıları-şişme basıncı değişimi	44
Tablo 13. Döngü sayılarına bağlı olarak serbest şişme yüzdesi	48
Tablo 14. Döngü sayıları-serbest basınç mukavemeti değerleri	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi.....	5
Şekil 2. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi.....	5
Şekil 3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi.....	6
Şekil 4. Montmorilonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi.....	7
Şekil 5. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi.....	8
Şekil 6. Derinlikle su içeriği değişimi.....	12
Şekil 7. Kil yüzeyi ve adsorbe edilen su mekanizması.....	15
Şekil 8. Deneysel zeminler için kil yüzdesi ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki.....	18
Şekil 9. Hacim değişikliğinin (a) kolloid içeriği, (b) plastisite indisi ve (c) rötre limiti ile ilişkisi.....	19
Şekil 10. Şişme potansiyelinin plastisite indisi ile ilişkisi.....	20
Şekil 11. Şişme potansiyeli için sınıflandırma grafiği.....	21
Şekil 12. Şişme-konsolidasyon eğrisi.....	23
Şekil 13. Deneylerde kullanılan kil zemin.....	31
Şekil 14. Deneylerde kullanılan kil zeminin Casagrande plastisite kartındaki yeri.....	32
Şekil 15. Kil zeminin dane çapı dağılım eğrisi.....	32
Şekil 16. Doğal kil numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi.....	33
Şekil 17. Hidrometre deney düzeneği.....	36
Şekil 18. Özgül ağırlık deney düzeneği.....	36
Şekil 19. Düşen koni deney düzeneği.....	37
Şekil 20. Otomatik kompaksiyon deney aleti.....	39
Şekil 21. Ödometre deney düzeneği.....	40
Şekil 22. Serbest basınç deney aleti.....	41
Şekil 23. Islatma-kuruma döngü sayılarına bağlı olarak likit limitin değişimi.....	43
Şekil 24. Islatma-kuruma döngü sayılarına bağlı olarak plastik limitin değişimi.....	43
Şekil 25. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=54$ kPa).....	44
Şekil 26. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=270$ kPa).....	45
Şekil 27. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa).....	46

Şekil 28. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi.....	46
Şekil 29. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi ($\sigma'_p=54$ kPa).....	49
Şekil 30. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi ($\sigma'_p=270$ kPa).....	49
Şekil 31. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa).....	50
Şekil 32. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi	51
Şekil 33. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=54$ kPa)	52
Şekil 34. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=270$ kPa).....	53
Şekil 35. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa).....	54
Şekil 36. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Aktivite
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
CH	Yüksek plastisiteli kil
EI	Şişme indisi
FS	Serbest Şişme Yüzdesi
G_s	Özgöl ağırlık
PI	Plastisite indisi
q_u	Serbest Basınç Mukavemeti
USBR	ABD İslah Bürosu
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
S_f	Serbest Şişme
w	Su muhtevası
w_L	Likit limit
w_P	Plastik limit
w_{opt}	Optimum su muhtevası
γ_{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı

GİRİŞ

Zemin yapı etkileşimi geçmiş zamanlarda çok önemsenen bir unsur olmamasına karşın, günümüzde nüfus yoğunluğunun kentleşmenin yoğun olduğu alanlarda birikmesi ile birlikte bu kentleşme tarım alanları, sanayi bölgeleri gibi imar alanlarını daha da kısıtlar hale gelmiştir. Bu durum yapılaşmaya uygun alanların dışındaki yerlerde kayalık, bataklık ve hatta derelerin ıslahıyla dere yatakları gibi problemlili zeminlerde zorunlu hale getirmiştir. Yapıların problemlili alanlarda yükselmesi, zeminin önemini arttırmış zemin yapısının ve yük altındaki davranışının anlaşılabilmesini zorunlu kılmıştır. Problemlili zeminler olarak tanımlanan, yeryüzünde zeminlerin büyük çoğunluğunu kapsayan ‘şişen zeminler’ mühendislik yapılarında önemli problemlere neden olmaktadır. Şişen zemin problemleri ilk defa 1938 yılında ABD Islah Bürosu (USBR) mühendisleri tarafından tanımlanmıştır (Chen 1988).

Klasik zemin mekaniği, öncelikle, doygun ve tamamen kuru zeminlerle ilgilenir; ancak doygun veya tamamen kuru koşullar her zaman yer yüzeyine yakın zeminlerin çoğunun gerçek durumları temsil etmez. Bu zeminlerin durumu, yağışın sızması veya buharlaşma sürecinden etkilenir ve bu nedenle bu zeminlerin çoğu tam doygun veya kuru durumda değildir. Doğadaki yer yüzeyine yakın alanların çoğunun bu şekilde zeminlerden oluştuğu bilinmektedir. Özellikle, doygun olmayan zeminlerin mekaniği, oldukça doğrusal olmayan sorunlara yol açar ve geoteknik mühendislik uygulamalarının doygun olmayan zemin mekaniğine uygulanmasını en zor hale getiren daha fazla değişken içerir.

Doygun olmayan bazı kil zeminlerin, su ile etkileşmesi sonucunda su içeriği artmakta ve buna bağlı olarak kildeki hacim artışı meydana gelmektedir. Bu hacimsel artışı engellemek için uygulanan ek basınca “şişme basıncı” denilmektedir. Killer günlük veya mevsimsel döngüde ıslanıp kurumasıyla hacimsel değişiklik göstermektedir. Yeryüzünde ihtiva ettiği su miktarının az olduğu ve buharlaşmanın fazla olduğu kurak veya yarı kurak bölgelerde görülen şişen killer, bir yapının temelinde zemin olarak değerlendirildiklerinde, ıslanmaya maruz kaldıklarında temel tabanında büyük ölçüde şişme basınçlarının oluşmasına sebep olurlar. Kilin su muhtevastaki değişimi zeminde hacimsel değişikliklere sebep olmaktadır. Bu hacimsel değişim nedeniyle özellikle mevsimsel olarak yağmurun yoğun olduğu zamanlarda kilin suya doygunluğunun artması ile şişme oluşmakta ve kurak mevsimlerde ise büzülme meydana gelmektedir. Bu durum mühendislik yapılarının önemli bir sorunu iken şişme büzülme durumu geoteknik mühendisliğin başlıca problemlerinden biri olarak ele alınmaktadır.

Şişen kil minerallerinde hacim değişimini ve şişme basınçlarını tahmin etmek, çok sayıda mühendislik ve endüstriyel uygulama için büyük önem taşımaktadır. Şişen zeminlerin neden olduğu yıllık hasarın depremler, yangınlar, seller ve kasırgalar dahil olmak üzere diğer tüm doğal tehlikelerin toplamından daha pahalı olduğu bildirilmiştir (Chen 1988). Şişen zeminlerin, su içeriği değişimlerinin neden olduğu tek tip olmayan deformasyonlar ve rastgele hareketler dolayısıyla büyük hasara sebep olduğu bilinmektedir. Endüstride, atık bertarafı için kullanılan mühendislik ürünü kil bariyerlerin, şişme özelliklerinden, kendi kendini kapatma yeteneklerinden ve düşük iletkenliklerinden yararlanır.

Islatma-kurutma döngülerine maruz kalan kil zeminlerin şişme basınçlarında ve dayanımlarında değişimler oluşmaktadır. Bu nedenle mühendislik yapıları inşa edilmeden önce zeminin nasıl davranacağı bilinmeli ve önlemler alınmalıdır. Zeminin gelen yükleri güvenle taşıyabilmesi ve oturmaların izin verilebilir sınırlar içinde kalması gerekmektedir.

Amaç ve Kapsam

Zemin-yapı etkileşimi, yapı tasarımlarında dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Bazı zeminler yapıdan gelen yükleri güvenle taşıırken bazı zeminlerde ise problemler yaşanmaktadır. Özellikle kil zeminler, mevsimsel değişimler sebebiyle hacim değişikliklerine uğrarlar. Fazla yağışın olduğu mevsimlerde kil zeminler kabarak şişerler ve kuraklığın yaşandığı mevsimlerde ise kil zeminlerde büzülme meydana gelir. Bu kabarma-büzülme olayı yapıda ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Bu yüzden zeminin geoteknik özellikleri öğrenilmeli ve yapılacak yapılar bu şartlar göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasının amacı, optimum su içeriğinde sıkıştırılmış ve farklı basınçlar altında (54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa) ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak şişme ve mukavemet özelliklerini araştırmaktır. Bu kapsamda Erzurum ili Oltu-Narman bölgesinden alınan yüksek plastisiteli CH kili kullanılmıştır. Optimum su içeriğinde sıkıştırılmış kil zeminden örselenmemiş örnekler alınmıştır. Daha sonra, örselenmemiş numuneler ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutularak her bir döngü sonunda kıvam limitleri, şişme basınçları, serbest şişme yüzdeleri ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, farklı ön yükleme basınçları uygulanmış, zeminlerin ıslatma-kurutma döngüleri sonucunda mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Kil

Silt veya kumdan oluşan zeminler, kayaların fiziksel ve hafif kimyasal ayrışma süreçlerinin sonucudur ve ana kayalarının temel yapısının çoğunu korur. Bununla birlikte, killi zeminlerde durum böyle değildir çünkü geniş kimyasal ayrışmaya maruz kalmışlardır ve ana kayalardan oldukça farklı yeni bir malzemeye dönüştürülmüşlerdir. Sonuç olarak, killerin mühendislik özellikleri ve davranışları da diğer zeminlerden oldukça farklıdır. Kil terimi, kaolinit, illit, montmorillonit gibi özel minerallere işaret etmektedir. Mikroskobik bir ölçekte olmasına rağmen biraz daha büyük olan kil mineralleri, killi zeminleri oluşturmak için çeşitli şekillerde bir araya getirilir. Bu mikroskobik konfigürasyonlara zemin özelliği denir ve büyük ölçüde oluşum ve çökeltme tarihine bağlıdır. Örneğin, yerinde ayrılmış ve hala başlangıç konumunda olan bir kalıntı kil, sedimantasyonla taşınan ve çökeltilen deniz kilinden çok farklı bir özelliğe sahip olacaktır. Bu farklılıklar, bu tür zeminlerin farklı davranmasının nedeninin bir sonucudur. Bazen neredeyse saf kilden oluşan zemin katmanlarıyla karşılaşsak da, çoğu killer siltli ve kumlarla karışık haldedir. Bununla birlikte, küçük bir kil yüzdesi bile bir zeminin davranışını önemli ölçüde etkiler. Kil içeriği yaklaşık yüzde 50'yi aştığında, kum ve silt parçacıkları esasen kil içinde yüzer ve zeminin mühendislik özellikleri üzerinde çok az etkiye sahip olurlar (Ishibashi and Hazarika 2010).

Killer, aynı tane boyutundaki diğer zeminlerden ayrı olarak, su ile birleşiminden plastik davranış gösterirler. Plastik durumda şekil verilebilirken kadar, pişirildiğinde büyük mukavemet artışları gösteren bir katıya dönüşürler. Islatıldığında çoğunlukla hacim artışı meydana gelir; kurutulduğunda ise hacmi azalırken, çatlaklarda oluşur (Yuksel 2007).

Bir kil zemindeki ana mineraller, mühendislik davranışını etkileme eğilimindedir. Örneğin, bir killi zeminin plastisitesi, kil fraksiyonunun miktarından ve mevcut kil minerallerinin türünden etkilenir. Çünkü kil mineralleri bir zeminde tutulan su miktarını büyük ölçüde etkiler. Özellikle, kil fraksiyonunda artan karışık katmanlı kil ve montmorillonit içeriği ile mukavemet azalır.

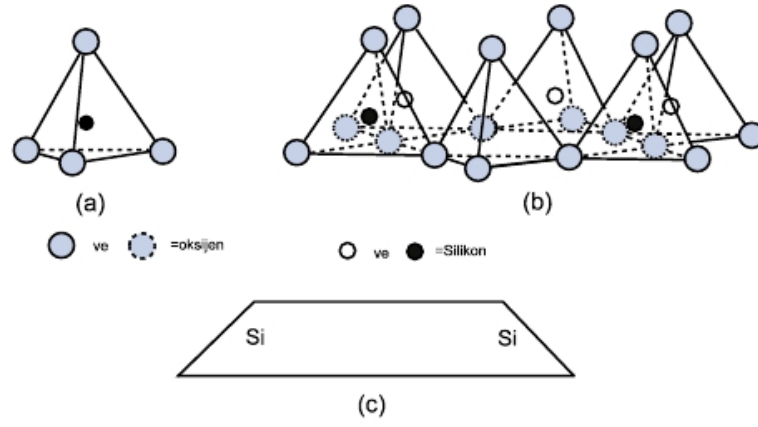
Doğada sıklıkla bulunan killer, tarım faaliyetinin mihenk taşı olmasının yanı sıra, endüstri dalında da önemli bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca killer, farklı mühendislik uygulamalarında temel zemini, yapı malzemesi, yapıda meydana gelen yer üstü ve yer altı kazı çalışmalarında sorun oluşturabilen bir zemin türü olarakda mühendislerin karşısına çıkmaktadır (Şengül 2003).

Kil mineralinin yapısı ve özellikleri

Mineraller kristal yapıda ve zeminin bileşenlerini oluşturan katı maddeleri oluşturmaktadır. İnce taneli zeminlerin mineral parçacıkları çoğunlukla yassıdır. Mineraller kimyasal bileşime ve yapıya göre sınıflandırılır. Geoteknik mühendislerinin ilgisini çeken minerallerin çoğu, yeryüzünde en bol bulunan elementlerden ikisi olan oksijen ve silikondan oluşur. Silikatlar, yapısal bir birimi olan bir grup mineraldir.

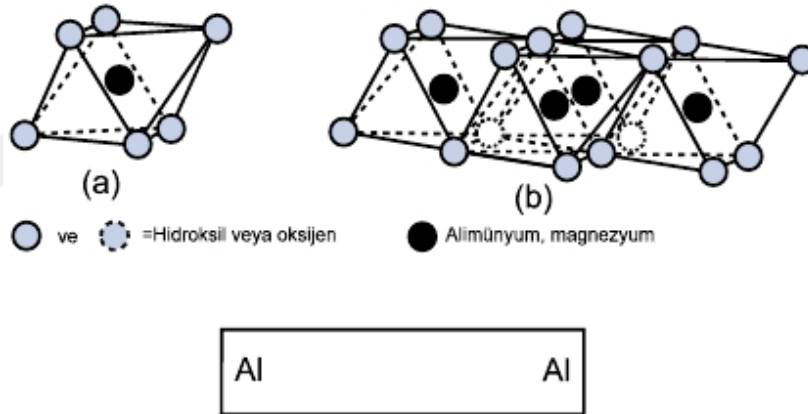
Merkezi bir silika katyonu (pozitif yüklü iyon), tetrahedronun her köşesinde bir tane olmak üzere dört oksijen anyonuyla (negatif yüklü iyonlar) çevrilidir (Şekil 1). Tek bir tetrahedron üzerindeki yük 24 birimdir ve nötr bir yük elde etmek için katyonlar eklenmeli veya oksijen iyonlarını paylaşan tek tetrahedronlar birbirine bağlanmalıdır. Silikat mineralleri, katyonların eklenmesi ve tetrahedronların etkileşimleriyle oluşur. Silika tetrahedronlar, bitişik tetrahedronlar arasında üç oksijen iyonunun paylaşıldığı ince silika tetrahedron katmanları olan silikat tabakalardır. Silikat levhalar, alümina levhalar gibi diğer yapısal birimleri içerebilir. Alümina levhalar, bir oktahedronda altı oksijen veya hidroksil atomu ile çevrelenmiş bir alüminyum iyonundan oluşan alümina minerallerinin birleşiminden oluşur (Das 1990).

Killeri oluşturan ana kristalli malzeme grupları, kaolinit, illit ve montmorillonit mineralleridir. Kaolinit, yaklaşık 0.72 nm kalınlığında bir tabaka halinde birbirine bağlanan ve tekrar tekrar istiflenen bir silis tabakası ve bir alümina tabakasından oluşan bir yapıya sahiptir. Katmanlar, hidrojen bağları ile bir arada tutulur. Sıkıca istiflenmiş katmanlar, çok sayıda hidrojen bağından kaynaklanır. Kaolinit, nemli tropikal bölgelerdeki killerde yaygındır. İllit, iki silikat tabaka ile bir alümina tabakasının tekrarlanan tabakalarından oluşur. Her biri 0.96 nm kalınlığındaki tabakalar, potasyum iyonları ile bir arada tutulur. Montmorillonit, merkezi bir alümina-oktahedral levha ile iki silika tetrahedral tabakadan oluşan birimlerden oluşur. Silika ve gipsit tabakaları, her bir silis tabakasının tetrahedronlarının uçları ve oktahedral tabakanın hidroksil tabakalarından birinin ortak bir tabaka oluşturacağı şekilde birleştirilir. Hem silika hem de gipsit katmanlarında ortak olan atomlar, hidroksiller yerine oksijendir. Silika-gipsit-silika biriminin kalınlığı yaklaşık 10 Å'dır. Bu birleştirilmiş birimlerin üst üste istiflenmesinde, her birimin oksijen katmanları, komşu birimlerin oksijenine bitişiktir, bunun sonucunda aralarında zayıf bir bağ ve mükemmel bir klivaj vardır. Su tabakaların arasına girerek önemli ölçüde genişlemelerine neden olarak yapı 10 Å kalınlığında yapısal birimlere bölünebilir. Önemli miktarda montmorillonit minerali içeren zeminler yüksek şişme ve büzülme özelliği gösterecektir. İllit mineral grubu, montmorillonit grubu ile aynı yapıya sahiptir. Potasyumun birimler arasında bağlayıcı malzeme olarak bulunması illit minerallerinin daha az şişmesine neden olur (Murthy 2002).



Şekil 1. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi (Fell *et al.* 1992).

Al ya da Mg iyonunun oktahedron yapısı, ortada Al iyonu, kenarlarında O_2 ya da hidroksil iyonu bulunduran düzgün sekiz yüzlü biçimindedir. Düzgün sekiz yüzlülerin birer kenarları aynı düzlemde olacak biçimde birleşmesiyle “oktahedron tabakası” veya “alümina tabakası” meydana gelmiştir. Şekil 2’de silis oktahedron ve oktahedron tabaka gösterilmektedir (Fell *et al.* 1992).

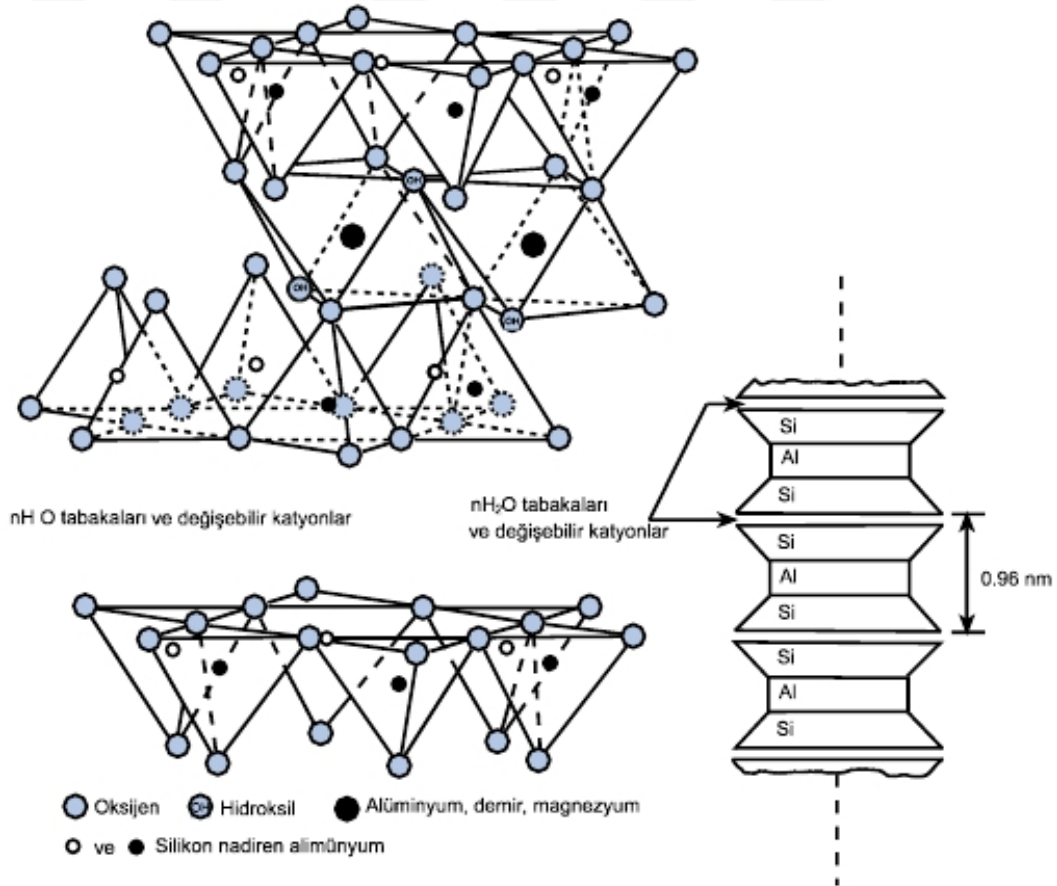


Şekil 2. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi (Fell *et al.* 1992).

Kil mineralleri az miktarda kompleks kristaller halindedir ve kristal kombinasyonlarına göre sınıflandırılırlar. Aynı gruptaki kil mineralleri hemen hemen aynı özelliklerle birbirine bağlanır. Alkali mineraller veya alkali metaller, kil mineralinin ana bileşeni olarak killerde bulunur. Bazı killer yalnızca bir tür kil mineralinden oluşur. Bazıları da kil minerallerinin yanı sıra kuvars, kalsit, feldispat ve pirit gibi diğer kil olmayan malzemeleri de içerirler. Kilin oluştuğu ortamın sıcaklığı, ortamın basınç değeri ve asit dengesi oluşacak kil mineralinin türünü belirler. Düşük sıcaklık ve basınç değerinde ve asidik koşullarda kaolinit tipi mineral oluşur fakat alkali iyon olarak potasyum varsa ve kil konsantrasyonu belli bir değer üzerinde ise montmorillonit oluşumuna neden olur. $350^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve orta basınç altında kaolinit yerine pirofilit oluşur. Artan ısı ve basınçta farklı alüminyum killeri oluşur (Holtz *et al.* 1981).

Montmorillonit grubu kil minerali

Kaolinit kil yapısındaki silika ve alüminyum levha biriminin OH⁻ yüzü, Şekil 4'te gösterildiği gibi, üç katmanlı bir istif oluşturmak için başka bir silika tabakasının yüzünü çekebilir. Bu montmorillonit kil yapısının temel birimini yaklaşık 10 Å kalınlığında yapar. Fakat çap / kalınlık oranı çok daha büyüktür (100'den fazla) ve bu nedenle, şekildeki bir parçacığın kalınlığı 0,05 µm kadar küçük olabilir. Bu nedenle, tek bir kil parçacığı yapmak için bu temel üç yapraklı birimin yaklaşık 50 kat istifine sahip olmak gerekir. Montmorillonit kilindeki tek tek üç yapraklı birimler arasındaki bağlar, silika tabakalarının O²⁻ ve O²⁻ yüzeyleri ve birincil bağlardan çok daha zayıf (ikincil bağ) yüzeylerinden kaynaklanmaktadır. Çoğu durumda su kolayca içeri girer ve açıkta kalan O²⁻ ve O²⁻ yüzeyleri arasındaki çok zayıf bağ nedeniyle bu temel tabakalar arasından çıkar. Bu durum, kili büyük şişme ve büzölmeye karşı oldukça savunmasız kılar (Ishibashi and Hazarika 2010).



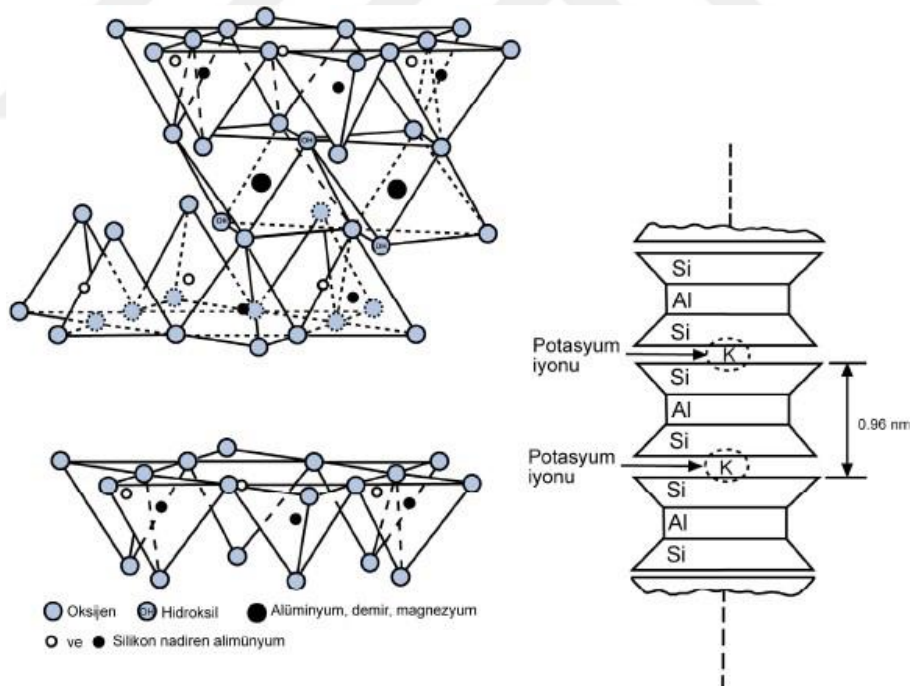
Şekil 4. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell *et al.* 1992)

Kristaller birbirlerine su ve katyonlar ile bağlanmıştır ve kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca büyüyebilir. Montmorillonit kristallerinin çapları 0.01-2 mikron arasında değişir. Montmorillonit kili ve benzeri kil grupları (Semektit) çok kararsız ve problemlili killerdir. Yapılar bu tip kil üzerine inşa edilirse, ıslatma-kurutma döngüleri nedeniyle duvarda

ciddi farkta oturmalar ve çatlaklar oluşturur, bazı durumlarda ise geoteknik mühendisleri Bentonit(smektit grubu) gibi yüksek şişme potansiyeline sahip killeri sondaj kuyu duvarlarını geçici olarak desteklemek için su ile karıştırılarak kullanırlar. (Ishibashi and Hazarika 2010).

İllit grubu kil minerali

Bu kilin temel yapısı, montmorillonit (üç katmanlı tabaka yığını) ile aynıdır. Bununla birlikte, potasyum iyonları (K^+), Şekil 5'de görüldüğü gibi, silika tabakaların karşılıklı O^{2-} ve O^{2-} yüzeyleri arasına doldurulur. Bu ikincil bağ, kaolinitin hidrojen bağıyla karşılaştırıldığında çok güçlü değildir fakat montmorillonit kilinkinden çok daha güçlüdür. Şekil 5'de illit kilinin bir elektron yapısını gösterilmektedir. Bu kilin özellikleri, kaolinit ve montmorillonit arasında sınıflandırılır. Doğal ortamda çeşitli kil türlerinin oluşumu, temel atomların mevcudiyetine, sıcaklığa, drenaj durumuna, vb. bağlıdır. Öte yandan, montmorillonit bol miktarda silis gerektirir ve yağış üzerinde (kurak bölgeler) yüksek buharlaşmanın olduğu bir iklim koşulunu destekler. İllit, muskovit (yaygın mika, $KAl_2(AlSi_3O_{10})(F, OH)_2$), biyotit (koyu mika, $K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(F, OH)_2$) gibi ana kayalar için potasyuma ihtiyaç duyar (Ishibashi and Hazarika 2010).



Şekil 5. İllit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell *et al.* 1992)

Killerin fiziko- kimyasal özellikleri

Özgül yüzey alanı

Özgül yüzey alanı, laboratuvarında kontrollü olarak tutulan polar miktarı ile belirlenen bir kil numunesinin yüzey alanının ölçüsüdür. Belirlenen laboratuvar koşulları altında daha sonra

özgül yüzey alanına dönüştürülür. Numunenin özgül yüzey alanı, test numunesi içindeki geçerli kil mineralinin bir göstergesidir. Çift tabaka kalınlıklı kil danelerinin yüzey alanlarına direkt bağlıdır. Çift tabaka kalınlıklı yüzey alanları arttıkça artmaktadır. Tablo 1’ de bazı kil minerallerinin çap, kalınlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir (Rosembalm 2013).

Tablo 1. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi (Holtz and Kovacs 1981)

Mineral	Kalınlık (nm)	Çap (nm)	Özgül yüzey alanı (m ² /gr)
Montmorillonit	3	10-1000	800
İllit	30	10000	80
Klorit	30	10000	80
Kaolinit	50-2000	300-4000	10-30

Tablo 1’de gösterildiği gibi, farklı mineraller için özgül yüzey alanı önemli ölçüde örtüşebilir. Bu durumda, geçerli kil mineralojisini tanımlamak için ek testler yapılmalıdır.

Elektriksel iletkenlik

Ortamin elektriği taşıma kapasitesinin bir ölçüsü de kil-su sistemlerinin elektriksel iletkenlikleridir. Kil-su sistemlerinin elektriksel iletkenlikleri, karışımlardaki iyonların tipi ve miktarına bağlıdır. Suyun içerisindeki hareketli iyonlar olan katyonlar (+) ve anyonların (-) dağılımları vardır. Bu katyonlar ve anyonlar, doğal sudaki çözülmüş minerallerden ve diğer maddelerden oluşmaktadır. Katyonlar, kil yüzeyinin yakınında daha fazla ve suyun en dış kısmında daha az dağılır. Anyon dağılımı, katyon dağılımının tersidir. Kil yüzeyindeki negatif yük nedeniyle, katyonların etkisi anyonlara hakimdir. Bu katyonlar ayrıca çevrelerindeki dipolleri (su molekülleri) çekerler. Bu tür sulara elektrostatik su denir ve bir katyon hareket ettiğinde birlikte hareket ederler. Boşluğun geri kalanı, serbest su adı verilen normal suyla doldurulur. Elektro-osmoz, zemin mekaniği alanında elektrostatikte suyun benzersiz özelliklerini kullanmanın iyi bir örneğidir. Elektrostatik su ile hareketli katyonlar, sahadaki su içeriğini azaltmak için suyun toplandığı ve drenaj için dışarı pompalandığı anoda çekilir. Bu, yumuşak zemin iyileştirmesinin kolay bir işlemidir (Rosembalm 2013).

pH değeri

Kilin bir başka benzersiz ve önemli özelliği de elektriksel yüzey yükleridir. Killerin yüzeyi, bir partikülde ortaya çıkan yük nötr olsa bile genellikle negatif yüklüdür. İlk olarak, killerin atomik bileşiminde görüldüğü gibi, O²⁻ ve OH⁻ yüzeyde açığa çıkar. İkinci olarak, ortamdaki alüminyum iyonu (Al³⁺), demir iyonu (Fe²⁺), magnezyum iyonu (Mg²⁺) vb. gibi diğer atom türlerinin mevcudiyetinden dolayı, tetrahedral silika tabakasının merkezindeki Si⁴⁺

atomları daha düşük değerlikli iyonlar ile değiştirilir. Oktahedral tabakadaki değerlik iyonları Al_3^+ ve Al_2^+ atomları, kristal yapılarını değiştirmeden Fe_2^+ ve Mg_2^+ ile değiştirilir. Değiştirilen düşük değerli katyonlar (pozitif yük), tüm kil partikülünü negatif yüklü hale getirir ve böylece kil mineralinin yüzeyi daha negatif yüklü olmaktadır. Asitliğe (pH) bağlı olarak, kenar pH = 7 ortamında OH^- çekmekte veya pH <5'te OH^- ve H^+ çekmektedir.

pH'ı artırmak için, kil partiküllerinin kenarı bu mekanizma nedeniyle negatif yüklü olabilir. Düşük pH ortamı için, bununla birlikte, kaolinitin kenarları pozitif yüklü olabilir. Önceki tüm koşullar, kil yüzeyinin negatif yüklü olmasına ve bazı koşullarda muhtemelen pozitif kenara sahip olmasına katkıda bulunur. Killerin elektriksel yüzeyi ve kenar yükleri, kilin pH değerinde önemli rol oynar (Ishibashi and Hazarika 2010).

Kasyon değişim kapasitesi

Kasyon değişim kapasitesi veya KDK seviyesi, kil mineralleri ile meydana gelen izomorfik değişimlerine bağlıdır (Mitchell and Soga 2005). İzomorfik değişimler, idealize bir yapı yerine katyonlar içeren dört yüzlü ve oktahedral tabakalardan kaynaklanır (yani, silikon yerine alüminyum, alüminyum yerine magnezyum vb.). İzomorfik değişim meydana geldiğinde, kil yapısı içinde dengeyi korumak için çoklu katyonlar yapı içindeki değerler katyonlar ile değiştirilir. Kasyon değişimini ölçme miktarı, 100 g kil başına milieşdeğer (meq) olarak hesaplanır. KDK değeri, baskın kil mineralini tahmin etmek için bir kılavuzdur. Ek olarak, KDK kil mineralinin izomorfik değişime ne kadar kararlı olduğunu gösterir. Ölçülebilir KDK arttığında kil minerali içindeki izomorfik değişim de artar. Tablo 2, yaygın kil mineralleri için KDK değerlerini özetlemektedir. Görülebileceği gibi, Kaolinit en düşük KDK'ya sahipken, Vermikülit en yüksek KDK'ya sahiptir (Rosebalm 2013).

Tablo 2. Çeşitli kil mineralleri için kasyon değişim kapasitesi değerleri (Grim 1962)

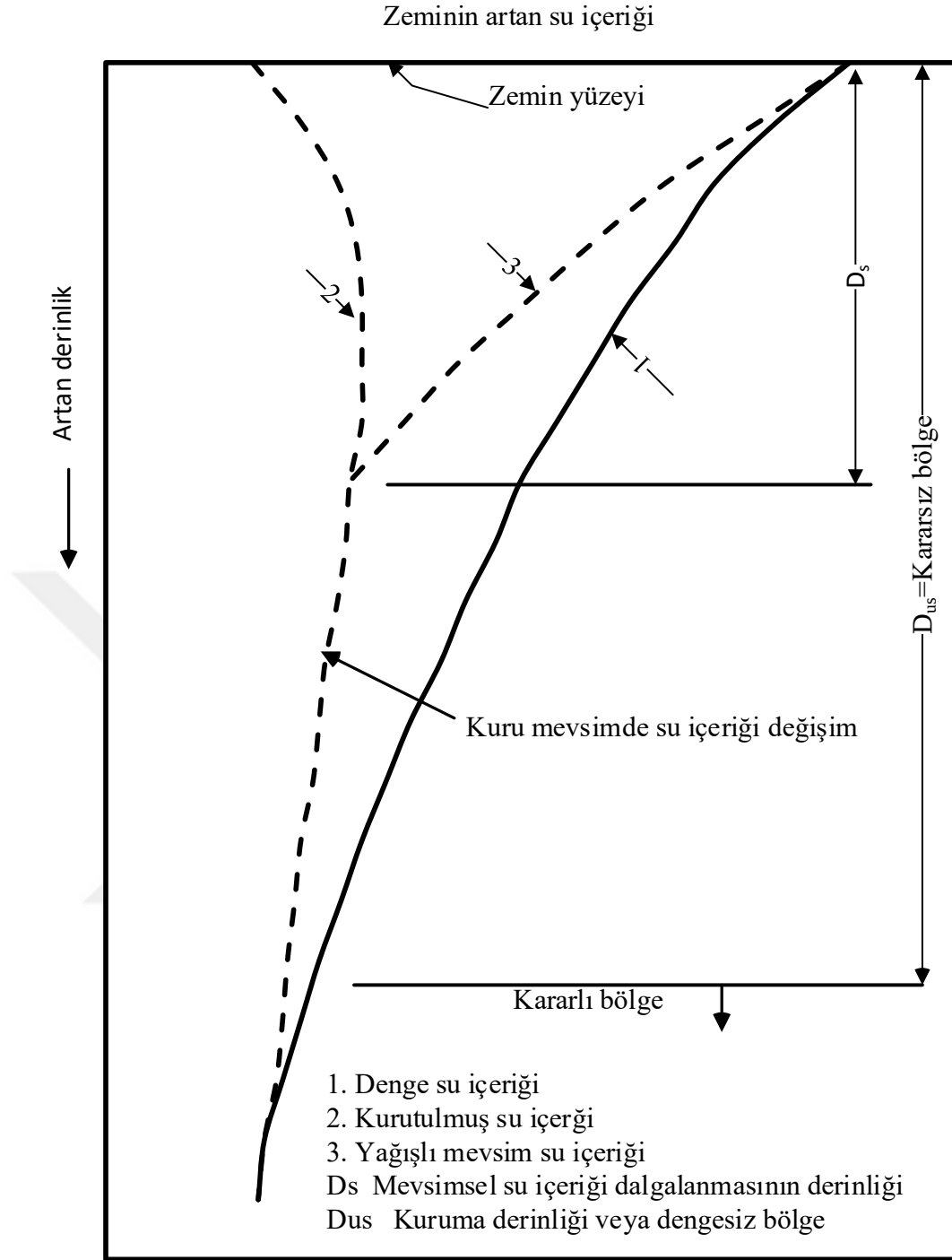
Kil minerali	KDK (meq/100gr)
Montmorillonit	80-150
Vermikülit	100-150
Halosit H_2O	10-40
İllit	10-40
Klorit	10-40
Sepiyolit	20-30
Halosit 2 H_2O	5-10
Kaolinit	3-15

Meq: sıvı içerisindeki elektrolit miktarını ifade eden bir birimdir.

Killerde Şişme

Killi zeminler şişen zeminler olarak da adlandırılır. Bu zeminler kısmen doyduklarında su ilavesiyle hacimleri artmaktadır. Kuruduklarında büyük ölçüde büzülürler ve yüzeylerinde çatlaklar meydana gelir. Bu tür kil zeminler yüksek plastisite indisine sahiptirler. Gerek kurak gerekse yağışlı mevsimlerde bu zeminleri tanımak kolaydır. Kuru mevsimlerde zemin yüzeyinde rötre çatlakları görülür. Bu çatlakların maksimum genişliği 20 mm veya daha fazla olabilir ve derinlere kadar devam ederler. Kuru halde oldukça serttirler. Yağışlı mevsimlerde bu zeminler çok yapışkan haldedirler (Murthy 2002).

Şişen zeminler, ana kayanın aşınmasının sonucu oluşan rezidüel zeminlerdir. Bu zeminlerin bazı bölgelerde derinlikleri 6 m veya daha fazla olabilir. Normal şartlarda yeraltı su seviyesi derinlerdedir. Bu nedenle zeminler sadece yağışın olduğu mevsimlerde ıslanır ve kurak geçen mevsimlerde kurur veya kısmen doyurulur. İyi tanımlanmış, dönüşümlü olarak yağışlı ve kurak mevsimleri olan bölgelerde, bu zeminler düzenli döngülerde şişer ve büzülür. Zeminlerdeki su içeriği değişimi zemin kütlelerinin şiddetli hareketlerine neden olduğu için, bu tür zeminler üzerine inşa edilen herhangi bir yapı, tekrarlayan çatlamalara ve ilerleyen hasarlara maruz kalır. Kuru ve yağışlı mevsimlerde şişen zeminlerin su içeriği derinliğe göre ölçülürse, değişim Şekil 6'dakine benzer olur (Murthy 2002).



Şekil 6. Derinlikle su içeriği değişimi (Chen 1988)

D_{us} derinliği içinde kalan bölge, kararsız bölge (veya aktif bölge) ve bunun altında kalan bölge kararlı bölge olarak adlandırılabilir. Bu kararsız bölge içinde inşa edilen yapılar, muhtemelen mevsimlere göre yukarı ve aşağı hareket edecek ve bu farklı oturmalar önemli derecede olursa yapı hasar görmeye başlayacaktır (Murthy 2002).

Kuru mevsimde, kararsız bölge içinde bir temel inşa edilirse, kısmen doymuş zemin yağışlı mevsimde su almaya başladığından temelin tabanı bir şişme basıncına maruz kalır. Bu şişme basıncı, temelin serbest şişme durumu için sunduğu kısıtlamalardan kaynaklanmaktadır.

Maksimum şişme basıncı 2 MPa'a kadar çıkabilir. Yapı tarafından temel üzerine uygulanan taban basıncı şişme basıncından daha az ise, yapının en azından kısmi olarak kaldırılması muhtemel olacaktır ve bu da yapıda çatlaklara yol açacaktır. Uygulanan taban basıncı şişme basıncından fazla ise yapı için herhangi bir sorun olmayacaktır. Öte yandan yapı yağışlı mevsimde inşa edilirse, uygulanan taban basıncı yüksek ya da düşük olsun, kurak mevsim yaklaştıkça mutlaka oturma yapacaktır. Daha iyi uygulama, kurak mevsimde bir yapı inşa etmek ve onu yağışlı mevsimden önce tamamlamaktır (Murthy 2002).

Şişen killer yapı temellerinde farklı hareketlere neden olabilirler. Temel altında şişen zemin olması durumunda, yapımı takip eden birkaç ay içerisinde problem olabileceği gibi, daha uzun bir sürede de sorun yaratabilir. Eğer zeminin su içeriğinde değişiklikler olarsa, bu durum şişmeyi harekete geçirebilir. Şişen zeminlerden etkilenen yapılar, genellikle hafif yapılara ait temeller, duvarlar, kaldırımlar, karayolları ve kanallar gibi yapılardır.

Şişme mekanizması

Şişen kil alt sınıflarının, birikimlerinden ve jeolojik geçmişlerinden dolayı, gerçek mikro ve makro yapıları nedeniyle yalnızca kil-tanecik-kil-tanecik etkileşimleri tarafından oluşan davranışlara sahip olmaması beklenebilir. Yük geçmişleri nedeniyle, özellikle ayrıştıklarında aşırı konsolide olabilirler. Zamanla aşınma, makro yapıda başka değişikliklere de neden olur. Neredeyse tüm iklimlerde kuraklık veya kuruma dönemleri ve ıslanma veya nemlenme dönemleri vardır. Bu döngüler ilerledikçe, kil kütlesi nem içeriğinde bir miktar derinliğe kadar değişikliklere maruz kalır. Kuruma döngüleri sırasında bu, yüzey ve yüzeye yakın kilin büzülmesi ve çatlakların oluşması anlamına gelir. Kuruma yeterince şiddetliyse, bu çatlaklar zemin kütlesine birçok yerden girebilir ve yataya yakın olduğu kadar dikeye yakın hale gelebilir. Nem killi zemin kütlesine tekrar girdikçe, killer başlangıçta suyun nüfuz ettiği çatlaklar boyunca nemi alır ve şişme olayı gerçekleşir. Sonunda, nem hareketinin bu çatlak kanalları şişerek kapanır ve daha fazla nem transferi daha fazla nemli alanlardan daha az olanlara kadar, nem kaynağı devam ederse, killi zemin kütlesi bir tür denge nem rejimi durumuna gelir. Bu, nem potansiyeli farklılıkları nemi daha fazla hareket ettirmek için yeterli eğim sağlanamadığında meydana gelir. Buna benzer bir olay yapıların altında da meydana gelir (Ishibashi and Hazarika 2010).

Şişme basıncının oranı zeminde bulunan kil minerallerine, zeminin yapısına ve dokusuna, katyon değerine, tuz konsantrasyonuna, çimentolanma ve organik madde varlığı gibi faktörlere bağlıdır. Diğer tüm diğer faktörler aynı kalmak şartıyla montmorillonit illitten; illitte kaolinitten daha büyük şişmeye sahiptir. Düzensiz dokuya sahip zeminler, yönelmiş dokulu

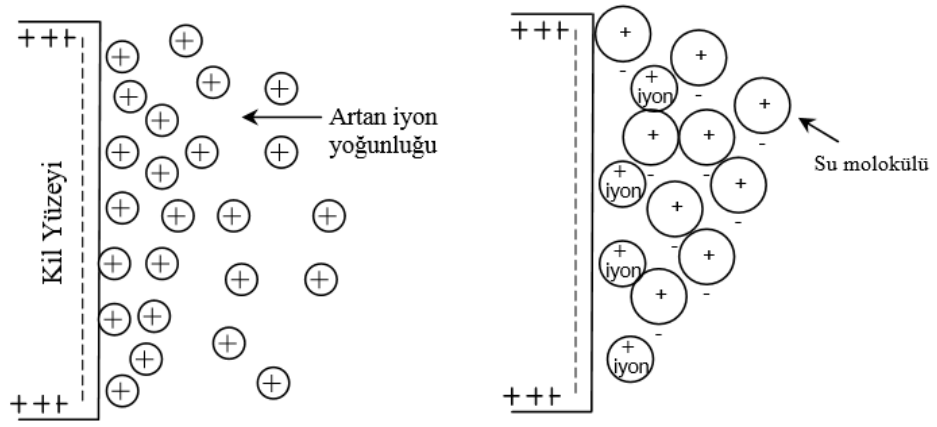
zeminlerden daha fazla şişme eğilimindedirler. Bir kildeki tek değerlikli katyonlar (sodyum montmorillonit), iki değerlikli katyonlar (kalsiyum montmorillonit) killerden daha fazla miktarda şişme gösterirler (Taşçı 2011).

Kil minerali bazı anyon ve katyonları çekme ve onları farklılaşabilir bir durumda tutma özelliğine sahiptir. Değişebilir iyonlar, birim silika-alumina kil mineralinin dış yüzeyinde tutulur ve değişme reaksiyonu silika-alumina biriminin yapısını etkilemez (Ishibashi and Hazarika 2010). Kil mineralinde en fazla değişebilme özelliği bulunduran katyonlar Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ 'dır. Kuru kilde negatif yük, elektrostatik çekim ile tutulan parçacıkları çevreleyen Ca^{2-} , Mg^{2-} , Na^- ve K gibi değiştirilebilir katyonlarla dengelenir. Kile su eklendiğinde bu katyonlar ve birkaç anyon kil partiküllerinin etrafında yüzer. Bu konfigürasyon, dağınık çift katman olarak adlandırılır. Katyon konsantrasyonu, partikül yüzeyinden uzaklaştıkça azalır. Su molekülleri kutupsaldır. Hidrojen atomları, bir oksijen atomu etrafında eksenel simetrik değildir; bunun yerine, 105° 'lık bir bağlı açıda oluşurlar. Sonuç olarak, bir su molekülünün bir tarafında pozitif, diğer tarafında negatif bir yük vardır. Dipol olarak bilinir. Kutuplu su, hem kil partiküllerinin negatif yüklü yüzeyi hem de çift tabakadaki katyonlar tarafından çekilir. Katyonlar da zemin parçacıklarına çekilir. Bu yüklerin bulunması, kilin çözültiden iyonları alabilme yeteneğinin kanıtıdır (Ishibashi and Hazarika 2010). Kilin değişebilir katyon kapasite şişme potansiyeli ile doğrudan ilgilidir. Tablo 3 bu ilişkiyi ifade etmektedir (Genç 2009).

Tablo 3. Kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu (Genç 2009)

Katyon cinsi	Na	Mg	Ca	K	Fe	H
Şişme %	29	26	23	21	18	15

Kil numunesi su içeriğini artırma sürecindeyken, özellikle montmorillonit kil, dış cephe tabakalarının açıkta kalan OH^- ve OH^- yüzeyleri arasındaki zayıf ikincil bağlar nedeniyle şişer. Su içeriği azaldığında, tersine çevrilmiş şişme, büzülme olarak karşımıza çıkar. Isınma üzerine büyük miktarda şişme veya kuruduktan sonra büzülme, bina ve temellerde yıkıcı hasarlara neden olur. Şişme ve büzülme potansiyelleri kil türleri ile yakından ilgilidir (Ishibashi and Hazarika 2010).



Şekil 7. Kil yüzeyi ve adsorbe edilen su mekanizması (Mitchell 1993)

Jeolojik yükler de şişme üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Jeolojik yük, zeminin hafızasında her daim bulunur ve zemin daha önceki şişme ve büzülme davranışlarının etkilerini yansıtır (Holtz and Kovacs 1981). Gerilmenin şişme potansiyeline etkisi, gerilme tarihçesi (aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslatma kurutma ve yaşlanma), arazi şartları ve zemin profili (bir zeminin başlangıçtaki gerilme durumu, şişme potansiyeli gösteren sahip tabakaların yeri ve kalınlığı) ve yüklemenin (sürşarj yükü taneler arasındaki bağ kuvvetlerini düzenlemeye uğraşır ve şişme miktarını azaltır) şişme potansiyeli üzerinde etkisi vardır (Taşçı 2011).

Kil parçacıklarının şişme davranışı ozmotik basınç kavramı veya su emme teorisi ile açıklanmaktadır (Ashayeri and Yasrebi 2009). Ozmotik basınç konseptinde, suyun kil partikülleri aralığına girip çıkmasını önlemek için gerekli basınç, boşluk oranı ve su içeriği cinsinden ifade edilir (Mitchell 1993). Öte yandan su emme teorisi, kil parçacıklarının yüzey hidrasyonunun bir sonucu olarak şişmeyi açıklar.

Taneler arasındaki çimentolaşma, şişme eğilimi gösteren killerin hacim artışı engelleyen asıl faktördür. Demir hidroksitler, karbonatlar ve çeşitli organik moleküller çimentolaşma mekanizmasını tetikleyen maddelerdir. Zeminin içinde Fe_2O_3 ve CaO bulunması, şişme ve büzülme engelleyen kil taneleri arasında çimento bağlarının gelişmesine neden olur (Shi *et al.* 2002).

Şişmeye etki eden faktörler

Bir kil zeminin şişmesini etkileyen faktörler, aslında üç farklı şekilde ele alınmaktadır. Bunlar, içsel kuvvet alanının asıl doğasını etkileyen zemin özellikleri, içsel kuvvet sisteminde oluşmuş olan değişimleri etkileyen çevresel özellikler ve gerilme durumu diye sıralanabilir. İçsel kuvvetlerde, kilin mineralojisi ve zemin suyu kimyası dikkate alınabilir. Tüm minerallerin elektriksel alanlarındaki çeşitlilikleri sebebiyle farklı yapıdaki kil mineralleri farklı şişme özelliklerine sahiptirler. Bir zeminin şişme miktarı, zemin içindeki kil minerallerinin miktarı ve

yapısına, kil partikülünün yüzey alanına ve bu partikülü çevreleyen zemin suyunun kimyası ile doğrudan bağlantılıdır. Bu hareket, büyük oranda su bulunan genleşen kil mineralinin kapasitesi ve elektriksel kuvvetler sebebi ile kohezif şekilde oluşmasının bir sonucudur. Zemin plastisitesi şişme potansiyelini kontrol eden ve oluşturan aynı mikro ölçekli özelliklerden de etkilenir. Bu yüzden, şişme potansiyelinin bir belirtisi olarak açıklanabilir. Partiküller arasındaki elektriksel kuvvet alanı, partiküller arası boşluklara bağlıdır. Bu sebeple, kuru yoğunluk ve partiküllerin fiziksel bileşimi şişme potansiyelini etkiler. Kompaksiyon veya jeolojik yükler doğrultusunda fazlalaşan zemin yoğunluğu, daha büyük ölçülerde şişmeye sebep olur (Uzundurukan 2006).

Tablo 4. Şişmeye etki eden faktörler (Erol *et al.* 1988)

Zemin Özellikleri	
Katıların bileşimi	Aktif kil mineralleri, montmorillonitleri ve montmorillonitlerin karışık tabaka kombinasyonları ve diğer kil minerallerini kapsar.
Gözenek sıvısı tuzlarının konsantrasyonu	Gözenek sıvısındaki katyonların yüksek konsantrasyonu, hacim değişiminin büyüklüğünün etkilenmesine yol açar: Ozmoz'dan kaynaklanan şişme uzun zaman periyodunda önemli boyutta olabilir.
Gözenek sıvısının bileşimi	Monovalent katyonların hakim olması çekme-şişmeyi arttırır. Divalent ve trivalent katyonlar çekme-şişmeyi yavaşlatır.
Kuru yoğunluk	Artan kuru yoğunluk dane boşluklarının azalmasına ve şişmenin artmasına sebep olur.
Yapı	Topaklanmış partiküller, dağınık partiküllerden daha fazla şişme eğilimindedirler; çimentolaşmış partiküllerde şişme düşme eğilimindedir, su verilmiş dokuda şişme artar.
Çevre Şartları	
İklim	Nemli iklimler, ıslak zemin profilini geliştirirken, kuru iklimler kuruluğu geliştirir.
Yeraltı suyu	Dalgalanma ve sığ su tabakaları kabarma için gerekli nemin kaynağını sağlar.
Drenaj	Az yüzey drenajı nem birikintilerine yol açar.
Bitkilerle kaplı olması	Ağaçlar, çalılar ve çimler terlemeyle nem birikintilerini iletirler: Nem bitkileri soyulmuş olan alanlar altında toplanma eğilimindedir.
Arazi geçirimliliği	İnce çatlaklar geçirimliliği ve şişme hızını önemli ölçüde arttırabilir.
Sınırlamak	Çevre basınçlarının artmasıyla şişme azalır, yarılmış alanların şişmesi daha muhtemeldir: yanal basınçlar, aşırı düşey basıncı aynı düzeyde tutmayabilir.

Tek indeks metodu ile şişen zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi

Şişen zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi için basit zemin testleri kullanılabilir (Chen 1988). Bu tür testlerin gerçekleştirilmesi kolaydır ve şişen zeminlere sahip olan arazilerin incelenmesinde rutin deneyler olarak kullanılmalıdır. Bu deneyler:

1. Atterberg limit deneyleri
2. Lineer rötre deneyi
3. Kolloidal içerik deneyi

Atterberg limitleri

Plastisite indisi ve likit limitin çoğu kilin şişme özelliklerini belirlemek için faydalı indeksler olduğu belirtilmiştir. Killerin likit limiti ve şişmesi, bir kilin emmeye çalıştığı su miktarına bağlı olduğundan, bunların birbirleriyle ilişkili olması doğaldır. Killerin şişme potansiyeli ile plastisite indisi arasındaki ilişki Tablo 5 'de verilmiştir (Holtz and Gibbs 1956).

Tablo 5. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Holtz and Gibbs 1956).

Plastisite İndisi (Ip), %	Şişme Potansiyeli
0-15	Düşük
10-35	Orta
20-55	Yüksek
35 ve yukarısı	Çok yüksek

Lineer Rötre

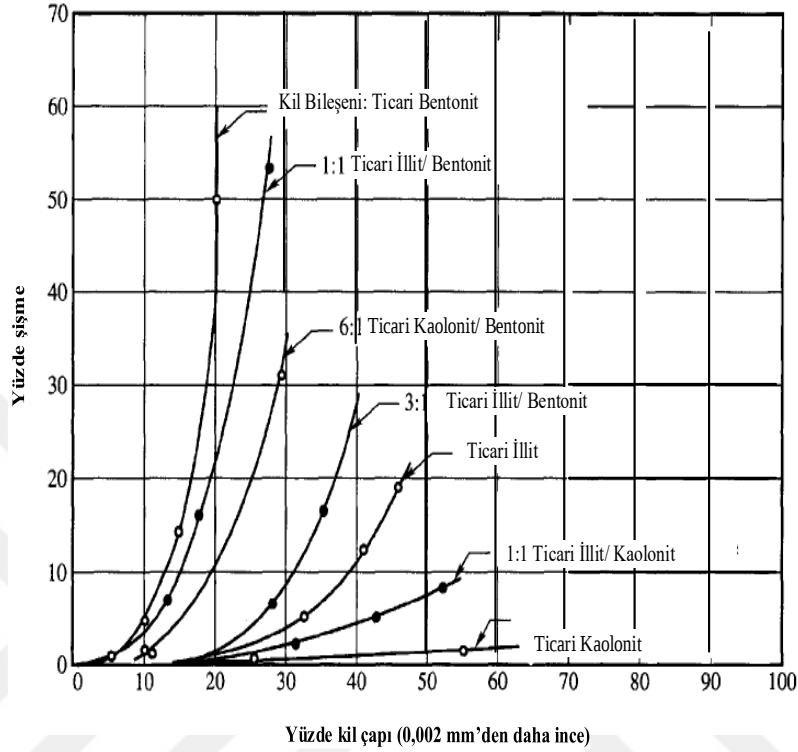
Şişme potansiyelinin, çok basit bir deneyle ölçülen lineer rötre ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Rötre limiti ve lineer rötreye göre potansiyel şişmenin sınıflandırılması Tablo 6'da gösterilmiştir (Altmeyer 1955).

Tablo 6. Şişme potansiyeli, rötre limiti ve lineer rötre arasındaki ilişki (Altmeyer 1955)

Rötre limiti, %	Lineer rötre, %	Şişme Derecesi
<10	>8	Kritik
10-12	5-8	Sınır
>12	0-5	Kritik değil

Kolloidal içerik

Şekil 8’de gösterildiği gibi kolloid içeriği ile şişme potansiyeli arasında doğrudan bir ilişki vardır (Chen 1988). Belirli bir kil türü için, şişme miktarı zeminde bulunan kil miktarı ile artacaktır.



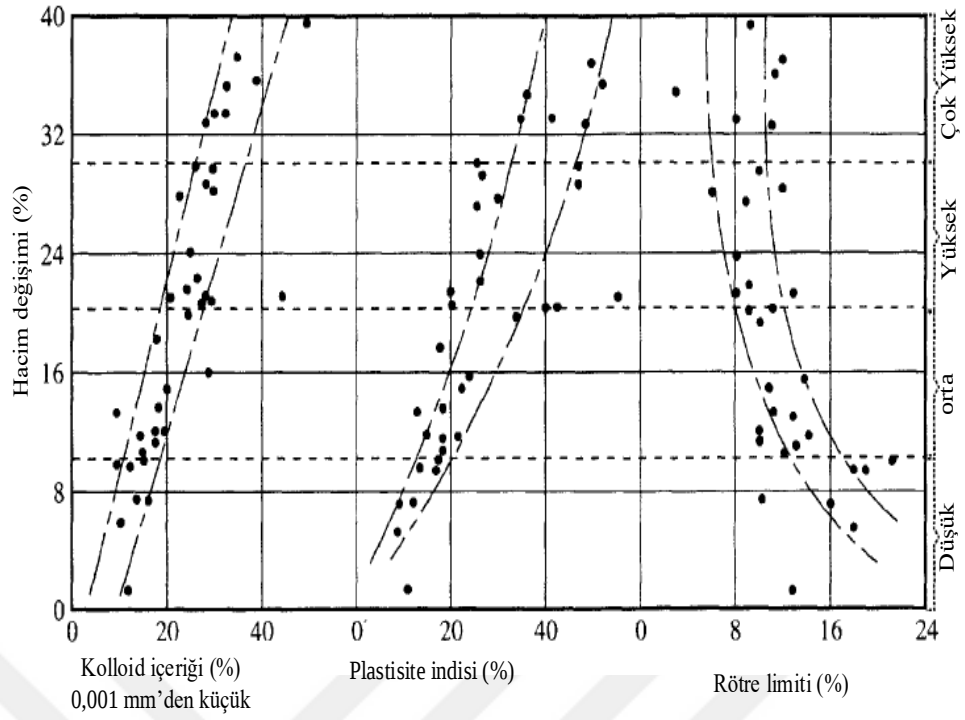
Şekil 8. Deneysel zeminler için kil yüzdesi ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Chen 1988)

Şişen zeminlerin dolaylı yöntemlerle sınıflandırılması

Çeşitli parametreler kullanılarak, şişme potansiyeli dolaylı yöntemlerle değerlendirilebilir (Chen 1988).

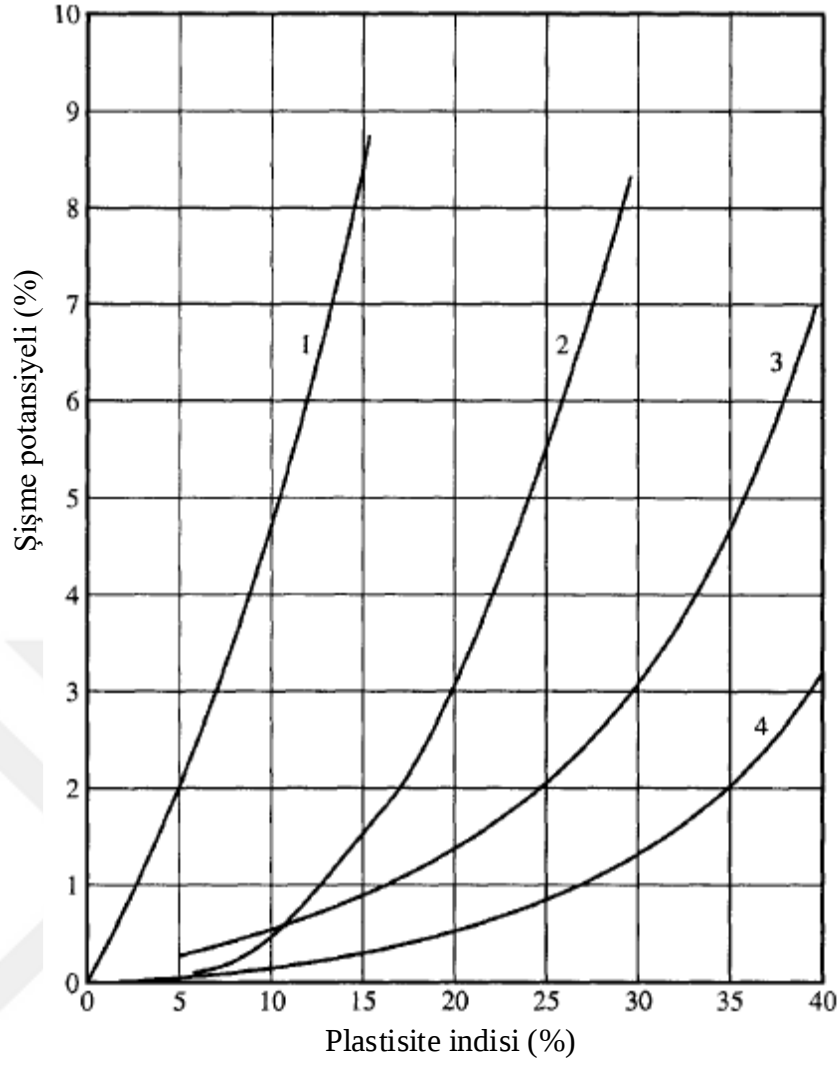
ABD Islah Bürosu (USBR) metodu

Holtz and Gibbs (1956), birkaç zemin özelliğinin aynı anda değerlendirilmesine dayanan bu yöntemi geliştirmiştir. Bu özelliklerin şişme potansiyeli ile tipik ilişkileri Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Hacim değişikliğinin (a) kolloid içeriği, (b) plastisite indisi ve (c) rötre limiti ile ilişkisi (Holtz and Gibbs 1956)

Plastisite indisindeki artışla birlikte şişme potansiyelindeki artış Şekil 10'da gösterilmektedir (Chen 1988). Şekil 10'daki eğriler incelendiğinde, şişme potansiyelinin Holtz and Gibbs (1956) tarafından elde edilen grafiklere göre şişme potansiyelini daha düşük göstermektedir. Şekil 10'daki grafikler 30 yıllık bir süre boyunca gerçekleştirilen binlerce teste dayanmaktadır ve bu nedenle daha gerçekçidir.



1. Holtz and Gibbs (Sürşarj basıncı 1 psi)
2. Seed, Woodward and Lundgren (Sürşarj basıncı 1 psi)
3. Chen (Sürşarj basıncı 1 psi)
4. Holtz and Gibbs (Sürşarj basıncı 6,94 psi)

Şekil 10. Şişme potansiyelinin plastisite indisi ile ilişkisi (Chen 1988)

Aktivite metodu

Skempton (1953) aşağıdaki ifadeyle aktiviteyi tanımlamıştır.

$$A = \frac{I_p}{\text{Kil yüzdesi } (\leq 2\mu\text{m})} \quad (1)$$

Burada;

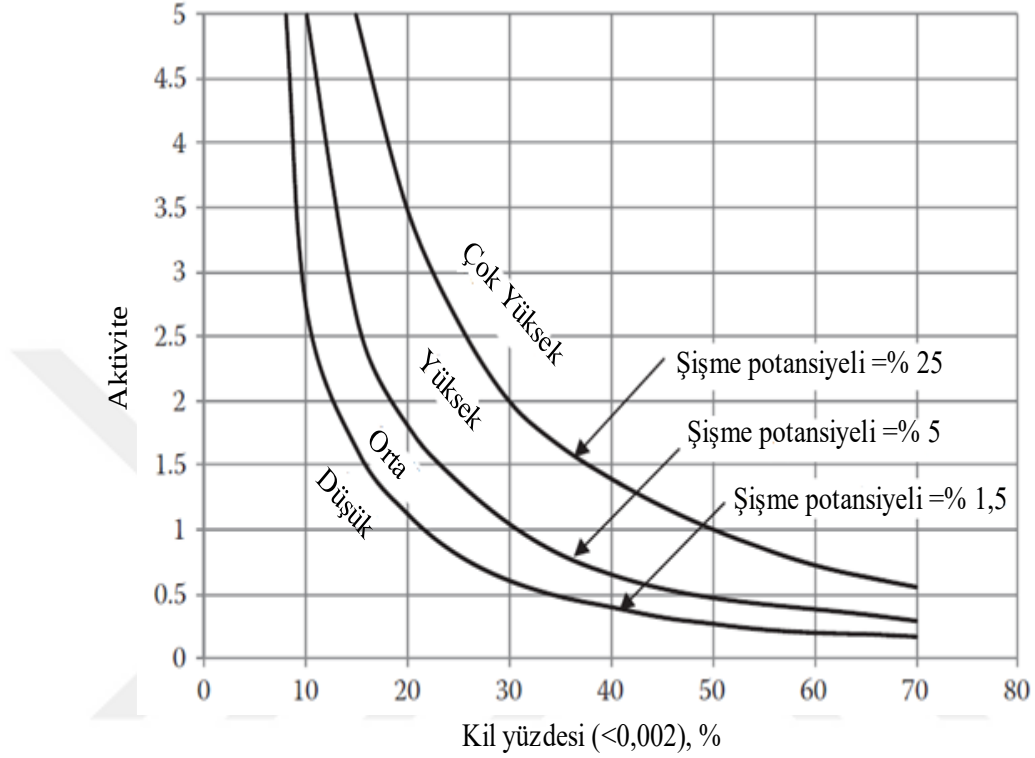
I_p =Plastisite indisi

Seed *et al.* (1962) tarafından önerilen aktivite yöntemi, bentonit, illit, kaolinit ve farklı oranlarda ince kum karışımlarından yapay olarak hazırlanmış zeminlere dayanmaktadır. Yapay olarak hazırlanan numuneler için aktivite aşağıdaki formülle belirlenmektedir.

$$A = \frac{I_p}{\text{Kil yüzdesi } (\leq 2\mu\text{m}) - n} \quad (2)$$

Burada n doğal zeminlerde 5 ve yapay karışımlarda 10'dur.

Önerilen sınıflandırma grafiği Şekil 11'de gösterilmektedir (Seed *at al.* 1962). Bu yöntem, USBR yönteminin iyileştirilmiş halidir.



Şekil 11. Şişme potansiyeli için sınıflandırma grafiği (Seed *at al.* 1962)

Şişme İndisi (EI)

ASTM Zemin ve Kaya Komitesi tarafından, şişen zeminlerin özelliklerini ölçmek için birleşik bir yöntem olarak Şişme İndisinin (EI) kullanılmasını önerilmiştir. Şişme indisinin, zeminin likit limiti, plastik limiti ve plastisite indisi gibi temel bir indeks özelliği olduğu iddia edilmektedir (Murthy 2002).

Şişme indisi aşağıdaki formül kullanılarak elde edilir.

$$EI = \frac{\Delta h}{h_i} 1000 \quad (3)$$

Burada:

Δh =Numunenin kalınlığındaki değişim

h_i = Numunenin başlangıçtaki kalınlığı

Potansiyel şişen bir zeminin sınıflandırılması Tablo 7’de göre yapılabilir. Bu yöntem, şişen zemin özelliklerini karşılaştırmak için basit bir deney prosedürü sunar. Deney prosedürü ASTM D-829’da sunulmaktadır.

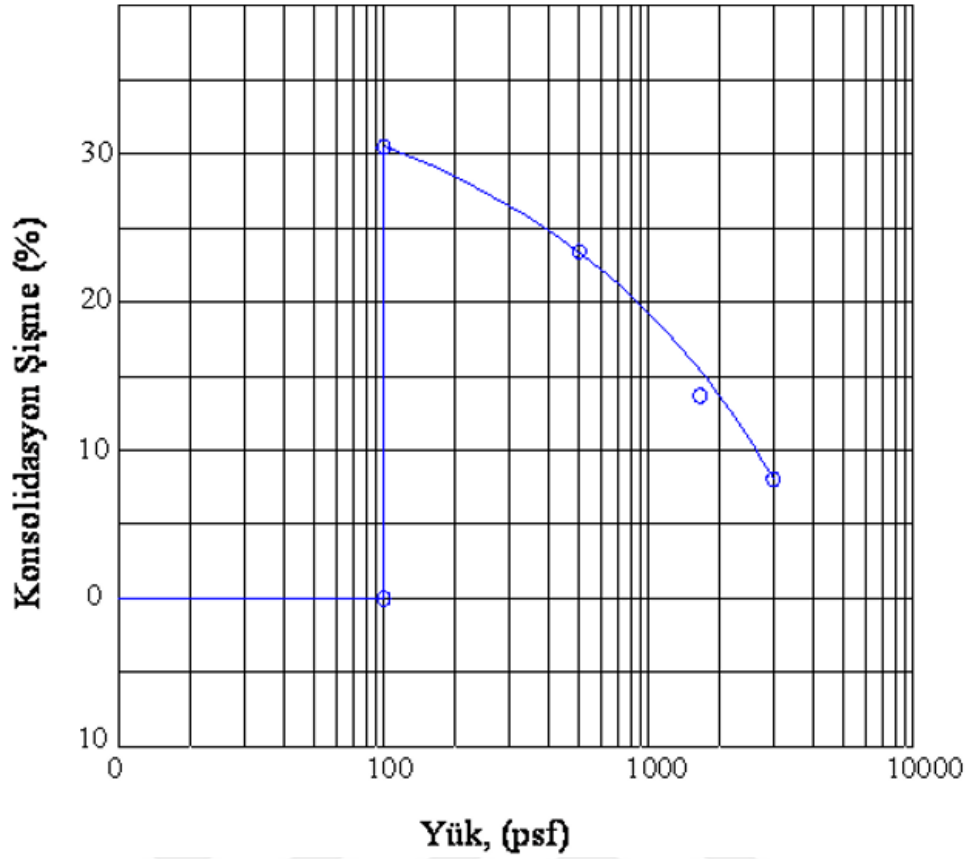
Tablo 7. Potansiyel şişen zeminlerin sınıflandırılması (Chen 1988)

Şişme İndisi, EI	Şişme potansiyeli
0-20	Çok düşük
21-50	Düşük
51-90	Orta
91-130	Yüksek
>130	Çok yüksek

Doğrudan ölçümlerle şişme basıncı

Şişme basıncı, su ile temas halindeki zeminde hacim genişlemesini önlemek için gereken basınç olarak tanımlanır. Burada bir laboratuvar ödometresinde ölçülen şişme basıncının arazidekinden farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Gerçek şişme basıncı her zaman laboratuvar da ölçülenden daha düşüktür.

Kil zeminin şişme basıncı, üzerine inşa edilmiş olan yapının zemine verdiği yükten daha fazla olduğu ve yapının farklı tabakalardaki zemine oturduğu hallerde, mühendislik yapılarında kalıcı hasarlar oluşmaktadır. Şişen kil zeminler üzerinde inşa edilmiş olan, karayolu kaplamaları, hafif yapılar, istinat ve bahçe duvarları, boru hatları gibi yapılarda, yüksek şişme basınçları sebebiyle önemli hasarlar, çatlaklar, kırılmalar oluşmaktadır. Şişme basıncının ölçülmesi için birçok bilim insanı farklı deneyler kullanmıştır. Bunlardan en çok kabul gören konsolidasyon deneyi ve sabit hacim metodudur. Birincisinde başlangıç koşulları (örneğin; birim hacim ağırlık, su muhtevası, yükseklik) belirli bir zemin numunesi, ödometre aletinde belli bir sürşarj yükü uygulanıp su altında şişmeye bırakılır. Şişme gerçekleşikten sonra konsolidasyon deneyi yapılarak şişme-logP eğrisi oluşturulur. Zemin numunesinin başlangıçtaki şartlara göre sıkışması için gerekli olan basınç bu eğriden elde edilir (Uzundurukan 2006). Örnek bir şişme-konsolidasyon eğrisi şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Şişme-konsolidasyon eğrisi (Chen 1975)

Sabit hacim metodunda ise zemin numunesi ödometre aletine konulduktan sonra zemin numunesine su verilir. Az miktarda yük artırımları ile numunenin şişmesine engel olunur. Numunenin şişmesine engel olan basınç şişme basıncı olarak ifade edilir (Uzundurukan 2006).

Aşağıdaki üç alternatif deney yöntemi, bir zemin numunesinin yanal olarak sınırlandırılmasını ve serbest suya erişimi olan bir ödometre yerleştirilmesini gerektirir.

A yöntemi: Serbest şişme deneyi

Numune ödometre aletine yerleştirilir ve ödometre hücresi su ile doldurulur. En az 1 kPa düşey basınç altında serbest şişmelerine izin verilir. Daha sonra, numune, ilk boşluk oranı / yüksekliği elde edilene kadar yüklenir (ASTM D 4546-03). Serbest şişme yüzdesi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$FS (\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Burada, ΔH şişme miktarını ve H_0 ise numunenin başlangıç yüksekliğini göstermektedir.

B yöntemi: Yük altında şişme deneyi

Konsolidometreye serbest su yerleştirilmeden önce numuneye oturma basıncını aşan düşey bir basınç uygulanır. Düşey basıncın büyüklüğü genellikle yerinde örtü yükü basıncına veya yapı yüküne veya her ikisine eşittir, ancak deney sonuçlarının uygulanmasına bağlı olarak değişebilir. Örneğe serbest suya erişim verilir. Bu, şişmeye, şişmeye, ardından büzülmeye, büzülmeye veya büzülmeye ve ardından şişmeye neden olabilir. Hareket ihmal edilebilir olduktan sonra uygulanan basınçta şişme veya oturma miktarı ölçülür (ASTM D 4546-03).

C yöntemi

Şişme basıncı elde etmek için numune serbest su altında kaldıktan sonra düşey basınçta ayarlamalar yapılarak numune sabit yükseklikte tutulur. Bundan sonra deney yöntemi ASTM D 2435'e göre konsolidasyon deneyi yapılır. Boşaltma verileri şişme potansiyelini belirlemekte kullanılır (ASTM D 4546-03).

Literatür Özetleri

Literatürde killerin ıslatma-kurutma döngüsünü araştıran birçok çalışma mevcuttur. Yapılan literatür taramasında, killi zeminde ıslatma-kurutma döngüsünün etkisinin araştırılmasından ziyade daha çok killi zeminlerde farklı katkı maddeleri kullanılarak (kireç, uçucu kül vs) iyileştirilen zeminler ıslatma-kuruma döngülerine tabi tutulmuştur. Literatür özeti aşağıda sunulmaktadır.

Al-Homoud *et al.* (1995), yaptıkları çalışmada zemin numunelerinin şişme potansiyelinin ıslatma kurutma çevrimleriyle nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda ıslatma-kuruma çevrimlerinin şişme potansiyelini azalttığını gözlemlemişler ve şişme potansiyelinde oluşan maksimum azalmanın ilk çevrim sonunda meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Basma *et al.* (1996), yaptıkları çalışmada şişen killerin şişme-büzülme davranışını, farklı plastisite ve şişme döngüsü olan dört zemin üzerinde incelemişlerdir. Saha koşullarına özgü kurutma sıcaklıklarını simüle etmek için kısmi ve tam büzülme olmak üzere iki büzülme şeması benimsemişlerdir. Ayrıca, ultra sonik bir araştırma ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ile sırasıyla döngüsel şişmeye bağlı fiziksel ve mikro yapısal değişiklikleri de incelemişlerdir. Birkaç döngüden sonra her iki durumda da şişmenin dengeye ulaşıldığı görülmüştür.

Guney *et al.* (2007), yaptıkları çalışmada ıslatma-kurutma çevriminin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Şişme potansiyeli ve

şişme basıncı deneyleri, çeşitli miktarlarda kaolinit-bentonit kil zemin karışımları ve yüksek plastisiteli kil zemin örneği üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, farklı oranlarda kireç ilave edilmiş numuneler üzerinde tekrarlanmıştır. Sonuçlar, kireç stabilizasyonunun ilk olumlu etkisinin birinci döngüden sonra kaybolduğunu ve sonraki döngülerde şişme potansiyelinin arttığını göstermiştir. Öte yandan, işlenmemiş zemin örneklerinin şişme potansiyeli ve şişme basıncı, birinci döngüden sonra azalmaya başlamış ve dördüncü döngüden sonra dengeye ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Akcanca (2009), yaptığı çalışmada atık depolama alanlarında kullanılması amacıyla geçirimsiz şilte oluşumunda kum, bentonit-kireç karışımının uygunluğunu araştırmıştır. Bu amaçla, %20, %30, %40 ve %50 bentonit oranındaki kum-bentonit karışımlarına %0, %1, %2 ve %3 oranında kireç eklenerek hazırlanan numuneler, 5 ıslatma kurutma döngüsüne tabi tutulmuş ve döngüler sonunda geçirimsizlik ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, şişme basıncı deney verilerine göre, farklı oranlarda kireç eklenmesi ile şişme basıncı değerinde azalma olduğu fakat ıslanma kurutma döngüleri sonunda şişme miktarının azalmasının nispeten geri kazanıldığı görülmüştür. Geçirimsizlik deney verilerine göre; %20, %30 ve %40 bentonit eklenen karışımlarda %1 kireç oranlı karışım için geçirimsizlik değeri azalırken %2 ve %3 kireç miktarları için geçirimsizlik değerleri yükselmiştir. %50 bentonit miktarlı karışımda ise %1 ve %2 kireç miktarları için geçirimsizlik değeri azalırken %3 kireç oranı için geçirimsizlik değerinin yükseldiğini belirtmişlerdir.

Türköz (2009), çalışmasında sıkıştırılmış kil zeminlerin şişme davranışı üzerinde ıslatma-kuruma çevriminin etkisini ve buna bağlı mikro yapıdaki değişimi incelemiştir. Bu amaçla, Eskişehir ilinden alınan zemin numunesi kullanılmış ve farklı oranda (kuru ağırlığının %0, %5, %10 ve %15'i) bentonit karışımı dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır. Killer üzerindeki döngüsel şişmenin etkisi, büzülme limitlerine kadar tamamen büzülmeye tabi tutulan kil numunelerinin mikro yapısal değişiklikleri ele alınmıştır. Şişen kilin şişme davranışına etkisi döngüsel olarak değerlendirmişlerdir.

Yazdandoust and Yasrobi (2010), yaptıkları çalışmada ıslatma ve kurutma döngüsünün polimer ile stabilize edilmiş killerin şişme davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tahran (İran'ın başkenti) çevresindeki bir bölgeden farklı plastisite indisine sahip üç şişen zemin elde etmişlerdir. Bu zeminler, farklı miktarlarda iki polimer, üre Formaldehit ve Melamin Formaldehit ile stabilize edilmiştir. Şişme deneyleri, bu polimerlerin şişen toprakların şişme potansiyelini azalttığını göstermiştir. Sonuçlar, polimer-stabilize edilmiş numunelerde şişmenin baskılanmasının, birinci döngüden sonra kaybolmadığını ve işlem görmüş numunelerin şişme potansiyelinin ve basıncının, ıslatma ve kurutma sırasında işlem görmemiş

numunelerin basıncından daha düşük olduğunu göstermiştir; bununla birlikte, döngüsel şişme ve büzülmede, tüm numunelerin şişme potansiyeli ve basıncı ilk döngüden sonra azalmaya başlamıştır. Tüm numuneler dördüncü döngüden sonra dengeye ulaştığını bulmuşlardır.

Kalkan (2011), yaptığı çalışmada döngüsel ıslatma-kurutma olaylarının etkilerini azaltmak için, bu zeminlerin stabilizasyon teknikleri ile değiştirilmesi gerektiğinden bahsetmiştir. Bu amaçla, şişen killi zemin örnekleri silis dumanı atık malzemesi kullanılarak modifiye edilmiş ve ıslatma ve kurutma döngülerinin, modifiye edilmiş şişen killi toprakların şişme davranışları üzerindeki etkileri laboratuvar koşulları altında araştırılmıştır. Doğal bir kil zemin ve killi zemin-silika dumanı karışımları optimum nem içeriğinde sıkıştırılmıştır ve tüm numuneler ıslatma-kurutma ve şişme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, silis dumanının, kurutma ve ıslatma işlemine tabi tutulan modifiye edilmiş şişen killi zeminlerin aşamalı deformasyonu azalttığı görülmüştür.

Akcanca and Aytekin (2012), yaptıkları çalışmada ıslatma-kurutma döngülerinin, sıhhi depolama sahalarının yapımında kullanılan, sızdırmaz astarı olan kum-bentonit karışımlarının şişme basınçları üzerindeki etkisi, karışımların kireç ile muameleden öncesini ve sonrasını araştırmışlardır. Şişme basınçlarının ıslatma-kurutma döngülerinden etkilenip etkilenmediğini görmek için şişme basınç deneyleri yapmışlardır. İlk seri numuneleri sadece kum ve kireç ilave bentonit karışımı olarak hazırlamışlardır. Her numune üzerinde beş ıslatma-kurutma döngüsü gerçekleştirilmiş ve her döngünün sonunda şişme basınç değerlerini ölçmüşlerdir. Şişme basıncı deneyleri sonuçları, şişme basıncının karışımlara kireç eklendiğinde azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, ıslatma-kurutma çevrimleri ile şişme basınçlarında azalmalar gözlenmiştir. Bu araştırmanın deneylerinin sonuçları, şişme basınçlarını kontrol etmek için kireç stabilizasyonunun yararlı etkisinin, ıslatma-kurutma döngüleri tarafından kısmen kaybolduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, test sonuçları kireç ile stabilize edilmiş kum-bentonit karışımlarından yapılan numunelerin şişme basınçlarının, sadece kum-bentonit karışımlarından elde edilen örneklerin şişme basınçlarından daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Rosebalm (2013), doktora çalışmasında iki farklı zeminin hacim değiştirme davranışı üzerindeki çoklu ıslatma / kurutma döngülerinin etkisinin değerlendirilmesi ve nicelleştirilmesi üstüne araştırma yapmışlardır. Islatma ve kurutma döngülerindeki değişiklikler, matriks emişteki salınımları karşılaştırırken aşırı olduğunu bulmuştur. Kurutma döngüsü sırasında, şişen zemin aşırı koşullara maruz bırakılmış, bu da nem içeriğini büzülme sınırından daha az azaltmıştır. Bununla birlikte, Anthem ve Colorado toprakları beş farklı sıkıştırılmış koşulda yeniden kalıplanmış ve beş farklı σ_{Net} 'e yüklenmiştir. Her numune altı ıslatma ve kurutma

döngüsüne tabi tutmuşlardır. Kurutma çevrimi için, radyal gerilimin eksenel gerilime göre sabit bir değişim oranına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, ıslatma döngüsü için, korelasyonları geliştirmek için yeterli radyal gerinim verisi yoktu ve bu nedenle, ıslatma çevrimleri için 55 farklı test ölçümüne / gözlemine dayanan bir varsayım yapmışlardır. Genel olarak, her bir döngüden sonra, daha düşük σ_{Net} değerleri için daha yüksek şişme sergilendiği; daha yüksek σ_{Net} değerleri için daha yüksek çökme potansiyeli gözlenirken, σ_{Net} bir eşik σ_{Net} değerinden daha düşük / yüksek olduğunda ayrıca, şişme basıncı her durumda bir azalma geçirdiğini gözlemişlerdir. Her iki toprak türünde de dördüncü döngüden sonra şişme basıncında azalma ve bir denge durumunun oluştuğunu görmüşlerdir.

Estabragh *et al.* (2013), çalışmalarında şişen bir zeminin ıslatma ve kurutma döngüleri sırasında mekanik davranışına yönelik deneysel bir araştırmanın sonuçlarını sunmuşlardır. Deneysel testler, iki farklı aşırı yük basıncı altında (10 ve 20 kPa) modifiye edilmiş bir ödometre ile yapmışlardır. Testler sırasında, numuneler farklı tipte ıslatma sıvıları (damıtılmış su, tuzlu su ve asidik su) ile ıslatılmıştır. Numunelerin hacimsel deformasyonu, boşluk oranı ve su içeriği ıslatma ve kurutma döngüleri sırasında belirlemişlerdir. Sonuçlar, artan ıslatma ve kurutma döngüleri ile şişme potansiyelinin arttığını göstermiştir. Damıtılmış suyun şişme potansiyeli üzerindeki etkisi, özellikle farklı aşırı yükleme basınçları için tuzlu su veya asidik su ile aynı değerler bulunmamıştır. Boşluk oranı ve su içeriğindeki değişiklikler, denge koşulunda ıslatma ve kurutma yollarının neredeyse S-şekilli bir eğriye yakınsadığı gösterilmiştir. Bu eğri, doğrusal bir kısım ve iki kavisli kısımdan oluşmuş ve deformasyonun çoğu, %90 ve %40'luk doyma eğrileri arasında bulmuşlardır.

Chen and Ng (2013), çalışmalarında farklı ıslatma-kurutma geçmişlerine tabi tutulmuş doymamış sıkıştırılmış kil üzerinde emme kontrollü izotropik sıkıştırma testlerinden deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Bu kil, ıslatma-kurutma döngüsünden sonra biriken şişme ve kuruma sonrasında geri dönüşü olmayan büzülme gibi ıslatma-kurutma döngülerine karmaşık hacimsel tepki göstermiştir. Islanmanın neden olduğu geri döndürülemez şişme, konsolidasyon öncesi gerilmede önemli bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Islatma-kurutma-ıslatma döngüsünün ters bir etki gösterirken, ıslatma-kurutma çevriminin daha küçük bir konsolidasyon öncesi gerilime ve verim sonrası sıkıştırma eğrisinin aşağı doğru kaymasına yol açtığını gözlemlemişlerdir. Bu gözlemler, ıslatma kurutma döngülerinden kaynaklanan doymunluk derecesindeki hem geri döndürülemez şişme hem de geri döndürülemez değişiklik olarak bildirilmiştir.

Stoltz *et al.* (2014), çalışmalarında ardışık kurutma / ıslatma döngülerinin kireçle işlenmiş kil bir zeminin hidromekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ele almışlardır.

Sönmemiş kireçle oluşturulmuş numuneler, ardışık kontrollü emme (ozmotik teknik) kurutma / ıslatma döngülerine tabi tutularak sönmemiş kireç dozajının ve kürlenme süresinin etkisini dikkate almışlardır. Sonuçlar, malzemenin şişme özelliklerinde aşamalı bir artış ve artan sayıda kurutma / ıslatma döngüsü ile aşamalı bir mukavemet kaybı olduğunu göstermiştir. Bozulmanın boyutu, doğrudan eklenen sönmemiş kirecin miktarı ve emme döngülerinin genliği ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Cıva intrüzyon porozimetri testleri, birbirini takip eden döngülerin aşamalı bir değişikliğe yol açtığını ve dolayısıyla makroskopik özelliklerin kısmen bozulmasını açıkladığı gösterilmiştir. Bu çalışma, birbirini izleyen kurutma / ıslatma döngüleri ile hava koşullarının, kireçle işlenmiş bir zeminin özelliklerini önemli ölçüde değiştirebileceğini, dolayısıyla hava etkilerinin, işlenmiş zemin yapısının uzun vadeli tasarımında hesaba katılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Aldaoood *et al.* (2014), çalışmalarında kireçle stabilize edilmiş jipsli zeminlerin uzun süreli stabilitesini değerlendirmek için, ıslatma-kurutma döngülerinin farklı alçı içerikli (% 0, 5, 15 ve 25) ince taneli zeminin mekanik davranışına etkisini araştırmışlardır. Zemin numuneleri % 3 kireç ile stabilize edilmiş ve 28 güne kadar farklı kür sürelerine tabi tutulmuş, ardından her biri 96 saatlik 6 ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmuştur. Sonuçlar, sıkıştırılmış zemin örneklerinin dayanımının kür süresiyle arttığını ve % 5 alçı içeren zemin örneklerinde maksimum serbest basınç dayanımına ulaşıldığı gösterilmiştir. Islatma-kurutma döngüleri, zemin numunelerinin basınç dayanımı ve P-dalgası hızı üzerinde olumsuz bir etkiye sahipken, bu etkiler alçı içeriğine göre değişiklik göstermiştir. % 25 alçı içeren zemin örneklerinde daha büyük mukavemet kaybı meydana gelmiştir. Bu değişimler, bu çevrimler sırasında su içeriğindeki artış, kuruma sırasında çatlak ilerlemesi ve ıslanma sırasında alçıtaşı çözünmesi ile açıklamışlardır.

Estabragh *et al.* (2015), çalışmalarında şişen bir zeminin davranışı, ıslatma ve kurutma döngülerini içeren bir dizi deney yoluyla incelenmiştir. Farklı sabit ek basınçlar altında modifiye edilmiş bir ödometre ile şişen bir zeminin (bentonit ve kaolin karışımı, CH) sıkıştırılmış numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Numunelerin boşluk oranı ve su içeriği farklı aşamalarda belirlenmiştir. Sonuçlar, şişme ve büzülmenin, deformasyonların aynı olduğu denge koşuluna ulaşıldıktan sonra geri dönüşümlü olduğunu ve ıslatma- kurutma döngüleri (su içeriği, boşluk oranı) bir S-biçimli kıvrıma dönüştürüldüğü gösterilmiştir. Ayrıca Histerisizlik olayı, emme oranındaki boşluk oranının değişimi ile incelenmiştir ve ıslatma kurutma döngülerindeki artışla yavaş yavaş azaldığını ifade etmişlerdir. Sonuçlar, daha düşük başlangıç su içeriğine sahip numunelerin (optimumun kuru tarafında), daha yüksek başlangıç

su içeriğine (optimumun sağ tarafında) sahip örneklerden daha fazla şişme potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Yenginar (2018), çalışmasında kireç ve uçucu kül ile iyileştirilmiş Ankara kilini, ıslatma-kuruma çevrimine maruz bırakmıştır. Deneyler 3 parametre ve 4 seviyesi bulunan Taguchi'nin L16 ortogonal dizin tablosu kullanılarak yapılmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında sırasıyla ağırlıkça % 0, % 3, % 7 ve % 10 oranlarında kireç ve % 0, % 10, % 25 ve % 40 oranlarında ise uçucu kül kullanmışlardır. Numuneler 0, 1, 4 ve 7 döngü sayısında ıslatma-kuruma döngüsüne tabii tutmuşlardır. Bu işlemlerden sonra serbest basınç mukavemeti ve şişme deneyi yapmışlardır. Yapılan deneyler doğrultusunda şişen kil numunesi serbest basınç mukavemetindeki ve şişme potansiyelindeki değişim üzerindeki en önemli nedenin karışımdaki uçucu kül oranı olduğuna ulaşmışlardır. Sonuçlar üzerinde ıslanma-kuruma döngü sayıları ve kireç oranının daha az etkili olduğu görülmüştür. Özellikle, %7 kireç ve %25 uçucu kül bulunması ile ıslanma-kurutma döngüleri sonunda Ankara kilinin serbest basınç mukavemetini en yüksek, şişme yüzdesini en düşük olarak elde etmişlerdir.

Khan (2016), yaptığı çalışmada ıslatma kurutma döngülerinin düşük plastisiteli killerdeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada 1, 3 ve 5 numaralı ıslatma-kurutma çevrimi için kesme dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde farklı likit limitleri ($LL = 40$ ve $LL = 80$) olan iki farklı eğim konumundan (DFW, Texas) toplanan zemin örneklerini kullanmıştır. Benzer döngüler için yoğunluk, boşluk oranı, nem içeriklerini de belirlemiştir. Deneysel sonuçlar, birinci, üçüncü ve beşinci döngü için boşluk oranındaki düşük plastik kil değişiklikleri için sırasıyla % 44,5, % 54,6 ve % 57,9 olduğu gösterilmiştir. Birinci, üçüncü ve beşinci döngü için boşluk oranındaki değişikliklerin sırasıyla % 44,7, %52,0 ve % 55,0 olduğu yüksek plastik kil için de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Düşük plastik kilin nem içeriğindeki artış, birinci, üçüncü ve beşinci döngülerde sırasıyla % 51,3, % 63,6 ve % 68,7 iken, yüksek plastik kil için artışlar % 42,6, % 52 ve % 56,8 olarak bulmuşlardır.

He *et al.* (2017), çalışmalarında ıslatma-kurutma sırasında % 12,7 ve % 16,0 su içeriğinde sıkıştırılan Téguline kilinin hava geçirgenlik gelişimini araştırmışlardır. Sonuçlar, nihai su muhtevasının, boşluk oranının ve doyma derecesinin, ıslatma-kurutma döngülerinin artmasıyla azaldığını göstermiştir. 4-5 ıslatma-kurutma döngüsü sonrasında, eksenel yönde değil, numune yüzeyindeki radyal yönde çatlaklar oluşmuştur. Sıkıştırılmış numunelerin hava geçirgenlik katsayısı, ıslatma-kurutma işlemlerine tabi tutulan numunelerden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, hava geçirgenlik katsayısının ıslatma-kurutma döngüleri ile arttığını ve başlangıçtaki su muhtevasının ıslatma-kurutma davranışı ve hava geçirgenlik özellikleri üzerinde önemsiz bir etki olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, eksenel doğrultuda hava

geçirgenlik katsayısı, ilk 2 ıslatma-kurutma döngüsünden sonra radyal doğrultudakinden daha büyük, eksenel doğrultuda daha büyük büzülme ile anizotropik bir davranış göstermiştir. Bu bulgular ıslatma-kurutma döngülerinin toprak mikroyapısı üzerindeki etkilerinin hava geçirgenliği ölçümleri ile etkili bir şekilde araştırılabileceğini açıkça ifade etmişlerdir.

Hu *et al.* (2018), çalışmalarında ıslatma-kurutma döngülerinin sıkıştırılmış doymamış zeminin mekanik davranışı ve elektriksel direnci üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Sıkıştırılmış doymamış kil numuneleri üzerinde farklı sayı ve döngüsel genliği göz önünde bulundurarak ıslatma-kurutma döngüleri yapmışlardır. Direnç ölçümünde AC (alternatif akım) iki elektrot yöntemi uygulamışlardır. Deneysel sonuçlar ıslatma-kurutma döngülerinin artan sayısı ve döngüsel genliğinin sıkıştırılmış ve doymamış numunelerin hem mukavemetini hem de elektriksel direncini azaltabileceğini ifade etmişlerdir. 3-4 ıslatma kurutma döngüsünden sonra, mukavemet ve elektriksel direnç sabit değer olma eğiliminde olduğu görülmüştür. Gözenek yapısının değişimi, ıslatma-kurutma döngülerine maruz kalan zeminin elektriksel direncinin azalmasına yol açan ve sonuç olarak mevcut çalışmada zeminin mukavemetinin azalmasına neden olduğunu belirlemişlerdir.

Çetin (2003), yaptığı çalışmada şişme potansiyeli olan doğal ve farklı miktarlarda bentonit ve kaolen bulunan kil karışımları kullanmıştır. Doğal kil ve kireç-çimento ile stabilize edilen numuneler ile su muhtevası, katkı maddeleri ve ıslatma kurutma çevrimleri gibi çevresel etkenler dikkate alınarak şişme özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, ıslatma-kurutma döngülerinin doğal zeminlerde şişme potansiyelini büyük ölçüde azaltırken, kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde ıslatma-kurutma döngülerinin şişme potansiyeli üzerinde az miktarda artışa sebep olduğunu göstermişlerdir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

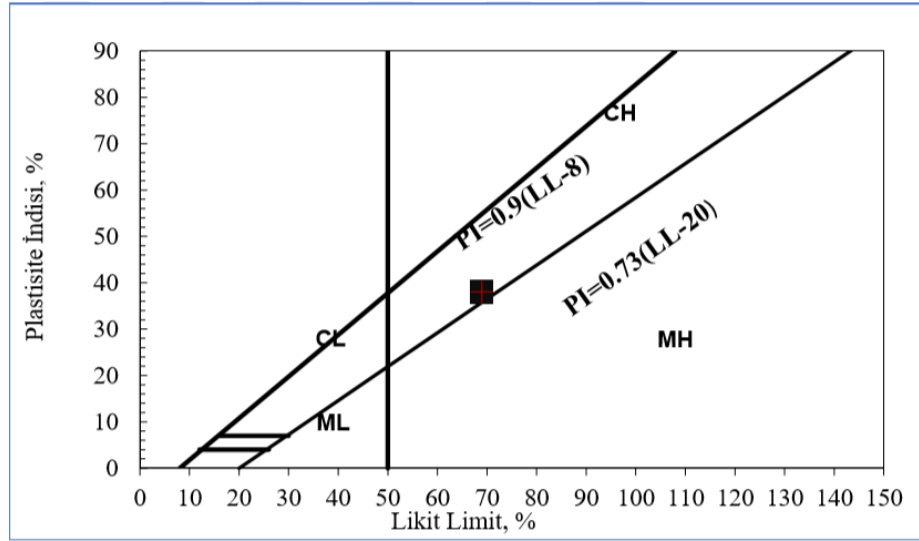
Kil

Tez çalışması kapsamında, Erzurum il sınırları içerisinde bulunan Oltu-Narman havzasından alınan doğal kil numunesi kullanılmıştır. Atatürk Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen doğal kil numuneler etüvde 24 saat 105 °C'de kurutulduktan sonra Los Angeles aşındırma cihazında öğütülmüştür. Deneyde kullanılan kil Şekil 13'de gösterilmiştir.

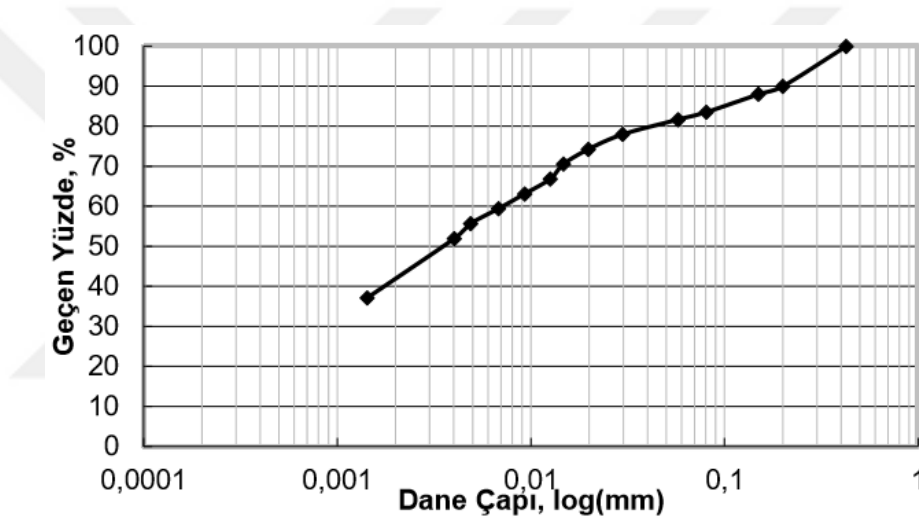


Şekil 13. Deneylerde kullanılan kil zemin

Deneyde kullanılan doğal kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sistemi(USCS)'ne göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Kullanılan kil numunesinin Casagrande plastisite kartındaki yeri Şekil 14'te ve dane çapı dağılım eğrisi Şekil 15'te görülmektedir.

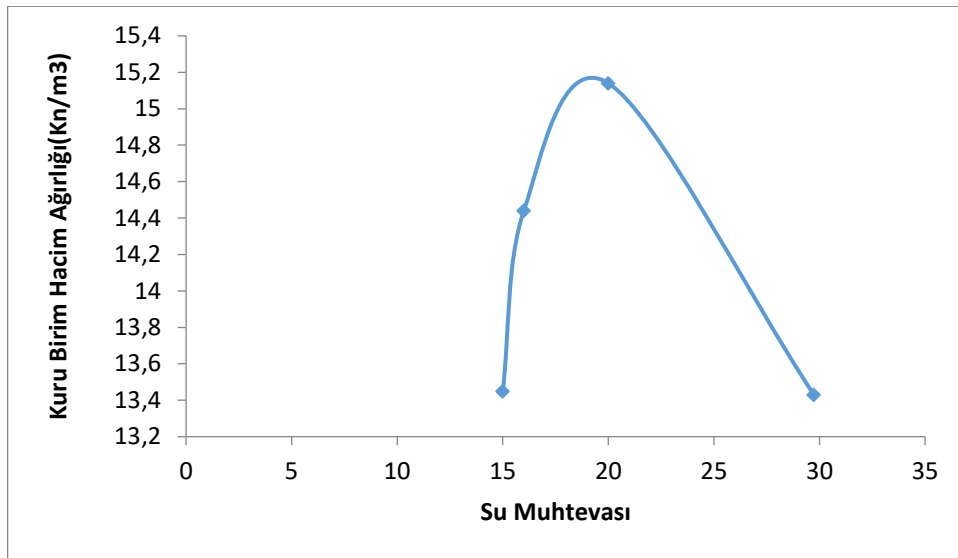


Şekil 14. Deneylerde kullanılan kil zeminin Casagrande plastisite kartındaki yeri



Şekil 15. Kil zeminin dane çapı dağılım eğrisi

Kullandığımız doğal kil numunesi için standart proktor deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 16’de verilmiştir. Verilen grafiğe göre optimum su muhtevası (w_{opt}) % 20, maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) $15,14 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunmuştur.



Şekil 16. Doğal kil numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan X ışını fraksiyonu (XRF) analizi sonucunda ulaşılan verilere göre kil numunesinin kimyasal bileşiminde; Kuvars, Plajiyoklaz, Kil minerali ve kalsit bulunmuştur. Yapılan deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 8’de verilmiştir. Kil numuneler 105°C’de kurutulmuş ve analizleri Thermo ARL markalı XRF cihazın UQ programında yapılmıştır.

Tablo 8. Deneyde kullanılan kil numunenin kimyasal bileşimi (Altun 2019)

İçerik	Doğal kil (%)
A.Za	8,50
Al ₂ O ₃	16,5
CaO	1,5
Fe ₂ O ₃	8,0
K ₂ O	1,6
MgO	2,1
MnO	<0,1
Na ₂ O	1,4
P ₂ O ₅	0,2
SiO ₂	59,3
TiO ₂	0,6

Yapılan deneyler sonucunda kil zeminin geoteknik özellikleri Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Kil zeminin bazı geoteknik özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Özgül ağırlık	-	2,60
Optimum su muhtevası	%	20
Maksimum kuru birim hacim ağırlık	kN/m ³	15,14
Likit limit	%	69
Plastik limit	%	31
Plastisite İndisi	%	38
Aktivite	-	0,92
Şişme Basıncı	kPa	80,8
Serbest basınç mukavemeti (q_u)	kPa	221,5
Zemin Sınıfı (USCS)	-	CH

Yöntem

Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan deney prosedürleri hakkında bilgi verilmiştir. Öncelikle Erzurum İli Oltu-Narman havzasından alınan yüksek plastisiteli kil zemin Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarına getirilmiş ve 105 °C etüvde kurutularak Los Angeles aşındırma cihazında öğütülmüştür. Öğütülen kil zemin 40 nolu elekten elenmiş ve deneylere hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kullanılan zemin numunesinin özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri (elek analizi, hidrometre, kıvam limiti, özgül ağırlık) yapılmıştır. Kil zeminin optimum su muhtevasının belirlenmesine yönelik olarak da standart proktor deneyi yapılmıştır. Standart proktor deneyi sonucunda optimum su muhtevası belirlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevasında kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan numunelerden serbest basınç deneyleri ve şişme deneyleri için örselenmemiş numuneler alınmıştır. Serbest basınç deneyleri için 35 mm çapında 70 mm yüksekliğinde numuneler, şişme deneyleri için ise 50 mm çapında 20 mm yüksekliğinde örselenmemiş numuneler alınmıştır. Kalıptaki numuneler ön yüklemeye tabi tutulmuştur. Numuneler üzerine 54kPa 270kPa, 540kPa ön yükleme basıncı uygulanmıştır. Ön yükleme yaparken konsolidasyon deney düzeneği modifiye edilerek kullanılmıştır. Oturma bitene kadar ön yüklemeye devam edilmiştir. Ön yüklemeye maruz bırakılan numuneler ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuştur. Islatma kurutma döngüsü bir zemin numunesinin ıslatılıp şişmesine izin verildiği sonra oda sıcaklığında ilk su muhtevasına gelene kadar kurutulduğu ve son işlemde şişmesi için

tekrar ıslatıldığı anlamına gelir. Her bir ıslatma-kurutma döngüsü sonunda kıvam limitleri deneyleri, şişme deneyleri ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Tablo 10’da deney programı gösterilmiştir. Deneyler 3 kez tekrar edilmiştir.

Tablo 10. Deney programı

Döngü sayıları	Kıvam limitleri	Şişme basıncı	Serbest Şişme yüzdesi	Serbest basınç
0	✓	✓	✓	✓
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	
8	✓	✓	✓	

Hidrometre deneyi

Kil zemin elek analizine tabi tutulmuştur. Eleme sonucunda 200 nolu elekten geçen kısım ince taneli zemin olarak değerlendirilmektedir. Hidrometre analizi silt ve kil gibi ince taneli zeminlerin tane sınıflamasında yaygın olarak kullanılan bir deney metodu olup, esası Stokes yasasına dayanmaktadır. Stokes Yasasında, viskoz sıvı içinde çökelen tanelerin çökme hızı, taneler ve sıvının karışımından oluşan süspansiyonun yoğunluğuna ve tane çapına bağlıdır. Çökme hızı ve zamana göre tanenin çapı hesaplanmaktadır. Deney için ASTM 152-H tipi hidrometre kullanılmıştır. Hidrometre analizi için 200 nolu elekten elenen etüvde kurutulmuş numuneden 50 gr alındıktan sonra üstü örtülerek saf su eklenip karıştırılarak numune bu şekilde 24 saat bekletilmiştir. Mezürün içindeki toplam karışıma saf su eklenerek 1000 ml’ye tamamlanmıştır. Mezür avuç içi ile iyice kapatılarak bir dakika süre ile alt-üst edilmiştir. Düzgün bir yüzeye konulmuştur. Karışımın sıcaklığı ölçülmüştür. 0,25 dk, 0,5 dk, 2 dk, 5 dk, 10 dk, 15 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat, 3 saat ve 24 saatte okumalar yapılmıştır. Okuma yapılmadan 20 sn önce hidrometre aleti karışımın içine salınım yapmayacak şekilde dikkatlice konularak değer ölçümü yapılmıştır. Karışımından çıkarılan hidrometre aleti aynı sıcaklıktaki saf suya konulmuştur. Düşüş mesafesi ve zaman değişimi ile tane çapı dağılımı hesaplanmıştır. Hidrometre deneyi ASTM-D422(2007) standartlarına göre yapılmıştır. Şekil 17’de hidrometre deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 17. Hidrometre deney düzeneği

Özgöl ağırlık deneyi

Çalışma kapsamında kullanılan doğal kil numunesinin özgöl ağırlığını belirlemek amacı ile standart piknometre şişeleri kullanılarak ASTM D854 (2014) standardına göre özgöl ağırlık deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Özgöl ağırlık deney düzeneği

Kıvam limit deneyleri

Kıvam, kohezyonlu zeminlerde zeminin sertlik-yumuşaklık durumunu gösterir. Zeminlerde su muhtevastaki azalış veya artışa göre hal değışimleri olacaktır. İnce taneli zeminler su katılıp yoğurulduklarında plastik özellik gösterirler. Plastik durumda zemine şekil verilmesi kolaydır. Likit kıvamda zemin kendi ağırlığı altında yavaşça akabilir. 1911 yılında

Atterberg tarafından zeminlerin su muhtevasına bağlı olarak gösterdiği değişimler deneylerle tarif edilmiştir. Atterberg tarafından belirlenen sınır su muhtevaları kıvam limitleri olarak adlandırılmaktadır. Deneyler BS 1377 ve ASTM D4318 standartlarına göre yapılmıştır.

Likit limit deneyi

Çalışma kapsamında kullanılan kilin likit limit değerlerini belirlemek için düşen koni penetrometre deneyi BS 1377'ye göre yapılmıştır. İlk olarak numune 40'nolu elekten elenmiştir. Daha sonra kil numuneye su eklenerek homojen bir yapı oluşana kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan kil-su karışımı içinde hava kabarcığı olmayacak şekilde penetrasyon kalıbına yerleştirildikten sonra yüzeyi düzleştirilerek penetrometre deney aletinin tabanına yerleştirilmiştir. Penetrasyon kabına yerleştirilen numune üzerine dokunma pozisyonuna getirilen 80 gr kütlesindeki koninin, kendi kütle etkisi ile serbest düşüşüne izin verilerek 5 saniye süreyle zemine batması sağlanmıştır. Aletin üzerinde bulunan deformasyon saatinden batma miktarı okunmuştur. Bu işlem farklı su muhtevaları kullanılarak 5 kere tekrarlanmıştır. Batma miktarı belirlenen numunelerden örnekler alınmış ve bu numuneler etüvde kurutularak su içerikleri hesaplanmıştır. Su içeriği/ batma miktarı grafiği çizilerek düşen koninin 20 mm batmasına karşılık gelen su içeriği, likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Her ıslatma-kurutma döngüleri sonunda kıvam limitleri belirlenmiştir. Deney düzeneği şekil 19'da gösterilmiştir



Şekil 19. Düşen koni deney düzeneği

Plastik limit

24 saat etüvde kurutulmuş, tanelenmiş ve 40 nolu elekten elenerek hazırlanan numuneden bir miktar alınmıştır. Bir miktar saf su katılarak karıştırılıp yoğrulmuştur. Böylece hazırlanan zemin cam plaka üzerinde ele yapışmayan ve plastik küçük bir top biçimini alana

kadar iyice yoğrulur. Küre şeklindeki numune, avuç içi ile yuvarlanarak silindir şekli verilir. Çap 3 mm'ye düştüğü anda kopma ve çatlama meydana gelene kadar işlem devam ettirilir. Numuneden parçalar alınarak numunenin su muhtevası belirlenir. Bu su muhtevası kilin plastik limitidir.

Zeminin plastik davranış gösterdiği su muhtevası aralığı plastisite indisidir. Bu indis likit limit ile plastik limit arasındaki farka eşittir. PI ile ilişkilendirilen birçok mühendislik özelliği olduğu için ince daneli zeminler için önemli bir parametredir (Holtz 1986).

$$PI = w_L - w_P \quad (5)$$

PI: Plastisite indisi

w_L : Likit limit

w_P : Plastik Limit

Standart proktor deneyi

Kompaksiyon, boşluk hacminin azalmasıyla danelerin birbirine yaklaşarak yoğunluğunun artması ile tarif edilebilir. Kompaksiyon deneyleri zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlığıyla, optimum su muhtevasının bulunması için yapılır. Kompaksiyon deneyinde sıkışmışlığın ölçülü kuru birim hacim ağırlığı değeridir. Kuru birim hacim ağırlığı ise su muhtevasına bağlı olarak değişir. En iyi sıkışma optimum su muhtevasında gerçekleşir.

Standart proktor deneyinde kil numuneler su ilave edilerek yoğrulmuş, 10,2 cm yüksekliğinde ve 11,7 cm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisine her tabakaya 25'er vuruş yapılmak suretiyle üç tabaka halinde sıkıştırma yapılmıştır. Bu işlem kil numunesine su ilave edilerek farklı su içeriklerinde tekrarlanmıştır. Deney sonucunda yatay ekseninde su içerikleri, düşey ekseninde kuru birim hacim ağırlıkları yer almak suretiyle çizilen kompaksiyon eğrilerinden numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri belirlenmiştir. Standart proktor deneyi ASTM D698-12 'ye göre yapılmıştır. Şekil 20'de otomatik kompaksiyon deney aleti görülmektedir.



Şekil 20. Otomatik kompaksiyon deney aleti

Şişme basıncı deneyi

Ön yüklemeye tabi tutulan numunelere daha sonra ıslatma-kurutma döngüleri uygulanmıştır. Islatma-kurutma döngüsünde numuneler 48 saat su içerisinde tutulan numuneler daha sonra tartılarak ilk ağırlıklarına gelene kadar oda sıcaklığında yaklaşık 22 °C de 24 saat kurutulmuştur. Döngüleri tamamlanan numunelere şişme basınç deneyi uygulanmıştır. Şişme basıncının belirlenebilmesi için ödometre deney aleti kullanılmıştır. Deneyler ASTM-D4546-90 Metot-C (2003) standardına göre yapılmıştır. Döngülerini tamamlamış numuneler deney aletine yerleştirilmiş, okuma saati değeri sıfırlanarak hücreye su ilavesi yapılmış ve şişmeyi engellemek için düşey gerilme uygulanmıştır. Deformasyonun yük altında sabit kaldığı durumda deneye son verilmiştir. Uygulanan en son ağırlığın meydana getirdiği basınç şişme basıncıdır. Deney numunesi deney sonunda etüvde kurutularak tartılmış numunenin su muhtevası olarak tayin edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Ödometre deney düzeneği

Serbest şişme yüzdesi deneyi

Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriğinde sıkıştırılan numunelerden konsolidasyon halkası kullanılarak örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örselenmemiş örnekler 3 farklı ön yükleme basınç altında oturma tamamlanana kadar beklenilmiştir. Daha sonra, 8 ıslatma kurutma döngüsüne tabi tutularak her bir döngü sonunda serbest şişme yüzdeleri belirlenmiştir. Bunun için numune ödometre cihazına yerleştirilmiş ve hücre suyla doldurulmuştur. 1 kPa basınç altında numunelerin serbest şişmelerine izin verilmiştir. Şişme tamamlandıktan sonra aşağıdaki bağıntı kullanılarak serbest şişme yüzdeleri belirlenmiştir.

$$FS (\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 \quad (6)$$

Burada, ΔH şişme miktarını ve H_0 ise numunenin başlangıç yüksekliğini göstermektedir.

Serbest basınç deneyi

Ön yükleme deneyi uygulandıktan sonra kil numuneler ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuştur. Islatma-kurutma döngüsünde numuneler 48 saat su içerisinde tutulmuş daha sonra tartılarak ilk ağırlıklarına gelene kadar oda sıcaklığında yaklaşık 22 °C de 24 saat kurutulmuştur. Döngüsü biten numunelere (ASTM D2166- 16) standardına göre serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Numuneler serbest basınç cihazına yerleştirilmiş, alt plaka üzerinde ortalanmıştır. Yükleme cihazı, üst baskı levhası numune ile sadece temas edecek şekilde dikkatlice ayarlanmıştır. Gerilme-deformasyon eğrisinin şeklini tanımlamak için yeterli aralıklarla yük, deformasyon ve zaman değerleri kaydedilmiştir. Deneyde düşey yönde

yükleme gerçekleştirilmiştir. Eksenel yük artışı altında oluşan numunenin boy kısılması ölçülmüştür. Yük, yük h creti ile ölçülürken, silindirik zemin numunelerindeki deformasyon  l mleri LVDT’ler ile yapılmıştır. Yükleme hızı 0,8 mm/dk olarak seçilmiştir. Serbest basınç deney düzeneği şekil 22’de verilmiştir.



şekil 22. Serbest basınç deney aleti

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Erzurum-Oltu bölgesinden temin edilen CH (Yüksek Plastisiteli) kili üzerinde laboratuvarında standart proktor deneyi yapılmış ve optimum su içeriği belirlenmiştir. Daha sonra optimum su içeriğinde standart enerji ile kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan numunelerden örselenmemiş numuneler alınmış ve numuneler ıslatma-kurutma döngülerine maruz bırakılmıştır. Islatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuş numuneler üzerinde kıvam deneyleri, şişme deneyleri ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Aşağıda her bir deneye ait sonuçlar başlıklar halinde sunulmuştur.

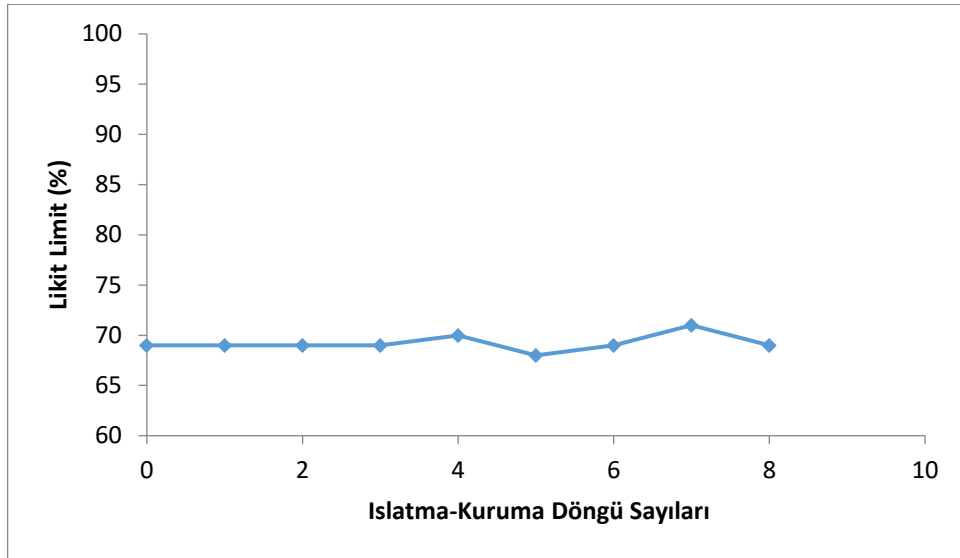
Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

CH kili üzerinde her bir ıslatma-kuruma döngüsü sonunda kıvam deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 11’de verilmiştir.

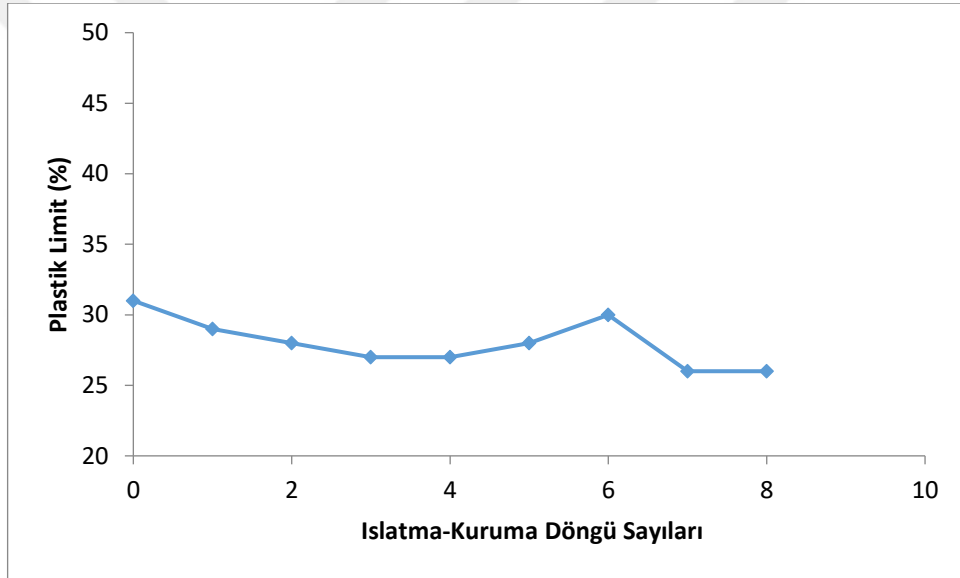
Tablo 11. Islatma-kuruma döngüsüne bağlı olarak kıvam limitleri değişim deney sonuçları

Döngü Sayıları	Likit Limit, W_L , (%)	Plastik Limit, W_P , (%)	Plastisite İndisi, PI , (%)
0	69	31	38
1	69	29	40
2	69	28	41
3	69	27	42
4	70	27	43
5	68	28	40
6	69	30	39
7	71	26	45
8	69	26	43

Islatma-kuruma döngü sayılarına bağlı olarak likit limitin değişim Şekil 23’te, plastik limitin değişimi Şekil 24’te gösterilmiştir.



Şekil 23. Islatma-kuruma döngü sayılarına bağlı olarak likit limitin değişimi



Şekil 24. Islatma-kuruma döngü sayılarına bağlı olarak plastik limitin değişimi

Her bir ıslatma-kuruma döngüsü sonunda kıvam deneyleri yapılmış ve likit limit ve plastik limit elde edilmiştir. Tablo 11 ve Şekil 23-24 incelendiğinde döngü sayılarına bağlı olarak kıvam limitlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Likit limit değeri % 69-71 arasında plastik limit değeri ise % 26-31 arasında değişmiştir. Döngü sayıları ile kıvam limitleri arasında korelasyon analizleri yapılmıştır. Yapılan korelasyon analizleri sonucunda döngü sayısı ile likit limit arasında anlamlı bir ilişki görülmemiş ancak döngü sayıları ile plastik limit arasında -0,63 lük bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Yani ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça plastik limit azalmıştır. Nihayetinde döngü sayılarının kıvam limitleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı söylenebilir.

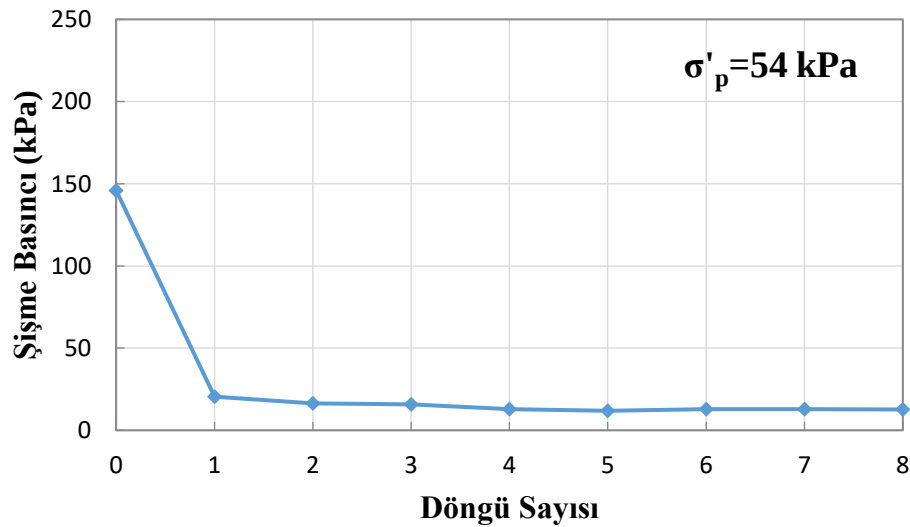
Şişme Basıncı Deney Sonuçları

Kompaksiyon kalıbında standart enerji ile optimum su muhtevasında sıkıştırılan kil zeminlerden ödometre halkaları kullanılarak örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan numuneler üzerine 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa'lık ön yükleme yapılarak oturma tamamlanana kadar beklenilmiştir. Daha sonra ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuş ve her döngü sonunda şişme basınçları belirlenmiştir. Şişme basınç deneyleri ASTM D 4546 standardına göre kil numunelerinin tek boyutlu şişme potansiyellerini ölçebilmek amacıyla yapılmıştır. Şişme basıncı deneyleri 8 ıslatma- kurutma döngüsü için tekrarlanmıştır. Döngü sayıları ve şişme basınç değerleri Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Döngü sayıları-şişme basıncı değişimi

Döngü Sayıları	Şişme Basıncı (kPa)		
	$\sigma'_p=54$ kPa	$\sigma'_p=270$ kPa	$\sigma'_p=540$ kPa
0	146	188,8	220,9
1	20,4	33,1	35
2	16,4	30,8	33,3
3	15,8	19,7	23,2
4	12,9	19,4	23,3
5	11,9	15,7	22
6	12,8	14,9	20,6
7	12,9	13,3	17,2
8	12,7	13,2	14,3

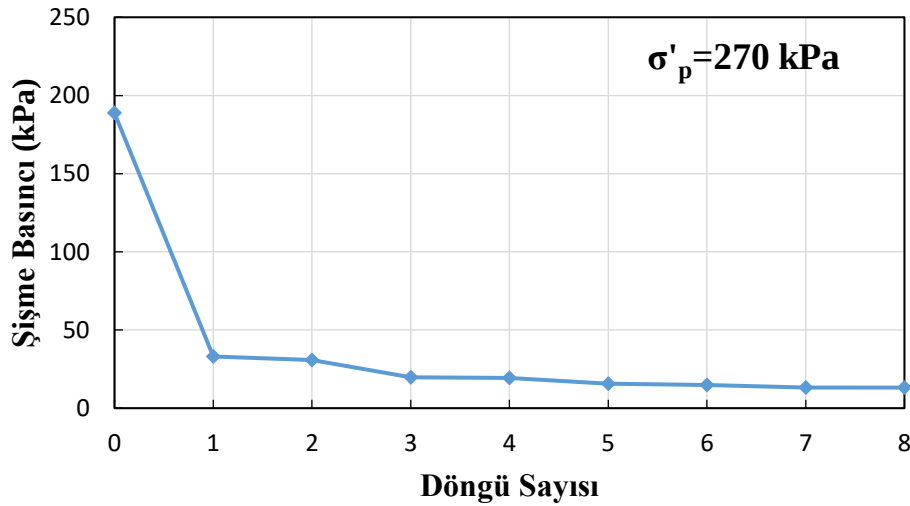
$\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi Şekil 25'te gösterilmiştir



Şekil 25. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=54$ kPa)

Şekil 25 incelendiğinde, en yüksek şişme basıncı ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (146,0 kPa). Islatma-kurutma döngüsü arttıkça şişme basınçları da azalmıştır. $\sigma'_p=54$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda şişme basıncı, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 86, 8. döngü sonunda da %91,3 azalmıştır. Ardışık iki ıslatma-kurutma döngüsü göz önüne alındığında şişme basıncındaki en büyük azalma 1. döngüden sonra meydana gelmiştir. Döngü sayısı arttıkça ardışık iki döngü arasındaki şişme basıncı değişimi de azalmıştır. 7. ve 8. ıslatma-kurutma döngüleri sonunda şişme basınçlarında önemli bir değişim meydana gelmemiştir.

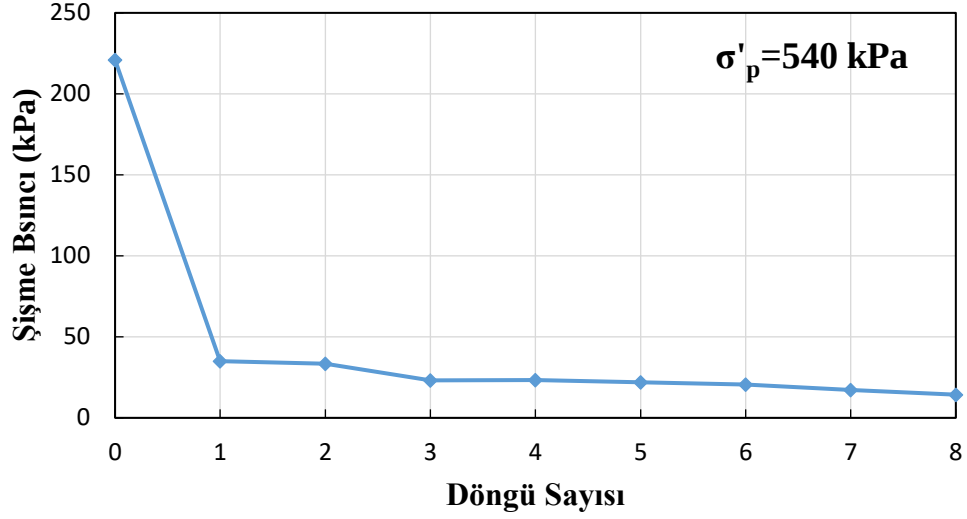
$\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin, ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=270$ kPa)

Şekil 26 incelendiğinde, en yüksek şişme basıncı ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (188,8 kPa). Islatma-kurutma döngüsü arttıkça şişme basınçları da azalmıştır. $\sigma'_p=270$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin 1. ıslatma-kurutma çevrimi sonunda şişme basıncı, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 82,5, 8. döngü sonunda da % 93 azalmıştır. Ardışık iki ıslatma-kurutma döngüsü göz önüne alındığında şişme basıncındaki en büyük azalma 1. döngüden sonra meydana gelmiştir. Döngü sayısı arttıkça ardışık iki döngü arasındaki şişme basıncı değişimi de azalmıştır. Şişme basınçları 8. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda yaklaşık olarak sabitlenmiştir.

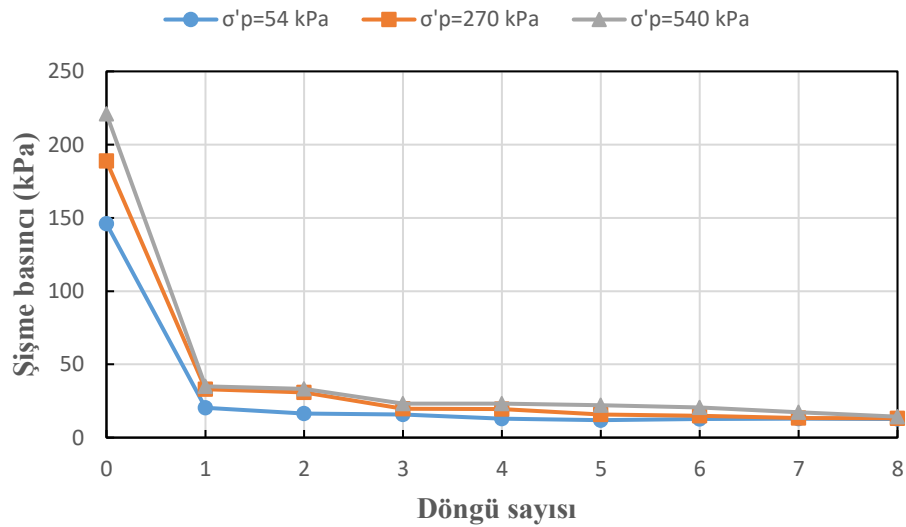
$\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 27. Döngü sayısına bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa)

Şekil 27 incelendiğinde, en yüksek şişme basıncı ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (220,9 kPa). Islatma-kurutma döngüsü arttıkça şişme basınçları da azalmıştır. $\sigma'_p=540$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda şişme basıncı, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 84,2, 8. döngü sonunda da % 93,5 azalmıştır. Ardışık iki ıslatma-kurutma döngüsü göz önüne alındığında şişme basıncındaki en büyük azalma 1. döngüden sonra meydana gelmiştir. Döngü sayısı arttıkça ardışık iki döngü arasındaki şişme basıncı değişimi de azalmıştır.

Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngüleri sonucunda elde edilen şişme basınçları toplu olarak Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi

Standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmış ve ön yükleme yapılmamış numunenin şişme basıncı 80,8 kPa olarak belirlenmiştir. Şekil 28 incelendiğinde, daha yüksek basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin şişme basıncının da daha yüksek olduğu görülmektedir. 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa basınç altında ön yüklemeye tabi tutulmuş kil zeminin 8 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen şişme basınçları, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki şişme basınçlarına göre sırasıyla % 91,3, % 93,0, % 93,5 oranlarında azalmıştır. Islatma-kurutma döngü sayısı arttıkça şişme basınçlarının azaldığı ve farklı ön yükleme basınçlarında ön yükleme yapılmış numunelerin şişme basınçlarının birbirlerine yaklaştığı görülmektedir.

Islatma kurutma döngülerinin şişen killer üzerindeki etkilerini araştıran diğer çalışmalarda döngü sayısının artmasıyla şişme potansiyelinin ve şişme basınç değerlerinin azaldığı, yoğunluğu artmasıyla şişme potansiyelinin arttığı görülmüştür.

Basma *et al.* (1996) yaptıkları çalışmada, artan ıslatma-kurutma döngüleri ile hem şişme basıncı hem de şişme potansiyelinin azaldığını, ıslatma-kurutma döngüsü ilerledikçe dengeye ulaştığını belirtmişlerdir. Şişme basıncındaki ve şişme potansiyelindeki azalmanın, döngüsel şişme işleminin neden olduğu kil matrisinin kademeli olarak tahrip olmasına dayandırılmaktadır. Aynı zamanda, döngüsel şişme süreci, büyük mikro agregaların yapısının, yapısal elemanların yönünün bozulmasıyla yeniden yapılandırılmasına ve yeniden yönlendirilmesine yol açtığı görülmektedir. Sonuç olarak, tüm bu olaylar, doğal kil zemin örneklerinin şişme davranışını, ıslatma-kurutma döngüleri nedeniyle meydana gelen şişme-büzülme döngüsü değiştirmiştir. Her bir kildeki değişikliklerin karakteri ve büyüklüğü kendine has özelliklere sahiptir ve ilk mikro yapıya ve yapısal bağların karakterine bağlı olduğu görülmektedir. İncelenen her zemin türünün ilk şişme-büzülme döngüsünden sonra, yapıdaki tahribat ve buna bağlı bozulma nispeten hızlıdır ve büyük ölçüde oluşmaktadır. Ek olarak, ilk döngüden sonra kil sistemi dengeye ulaşmamıştır. Bununla birlikte, denge, özellikle sistemin hacminde maksimum değişiklik ile birlikte yapısal elemanların tahrip edilmesi ve yönünün bozulması meydana geldiğinde, birkaç şişme ve büzülme döngüsünden sonra elde etmişlerdir (Basma *et al.* 1996).

Rao *et al.* (2004) ve Holtz and Gibbs (1956), yoğunluk arttıkça zemin şişme potansiyelinin de artacağını göstermiştir. Ayrıca belirli bir yoğunluk için su içeriğini artırmanın şişme potansiyelini azaltacağını da belirtmişlerdir.

Şişme basıncındaki maksimum azalma 1. döngü sonrasında görülmüştür (Akcanca, 2009; Al-Homoud *et al.* 1995; Guney *et al.* 2007). Islatma-kurutma döngüleri ile yapılan literatür çalışmalarında şişme basınç değerleri döngü sayısının artmasıyla azalış göstermiş ve

4. Döngü sonrasında sabitlenme eğiliminde olmuştur (Güney *et al.* 2007; Kalkan, 2011; Yazdandoust and Yasrobi, 2010).

Yaptığımız deneysel çalışma literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermektedir.

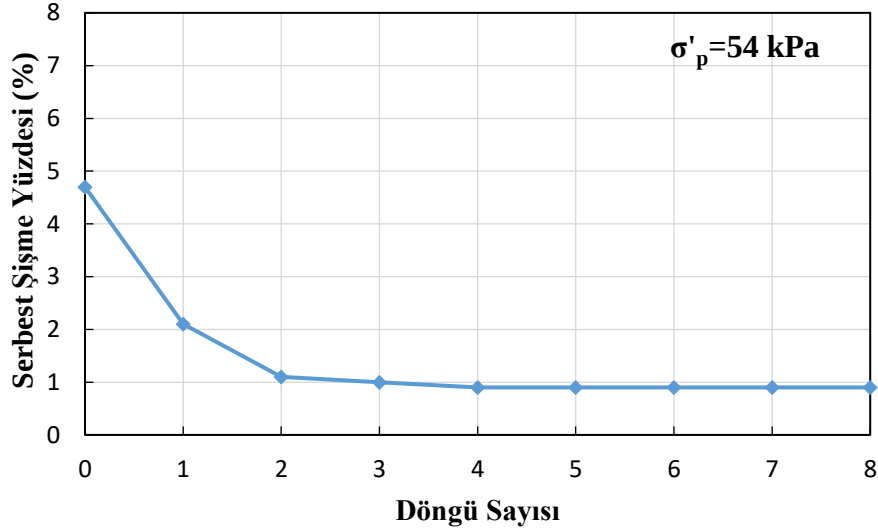
Serbest Şişme Yüzdesi Deney Sonuçları

Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriğinde sıkıştırılan numunelerden konsolidasyon halkası kullanılarak örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örselenmemiş örnekler 3 farklı ön yükleme basınç altında oturma tamamlanana kadar beklenilmiştir. Daha sonra, 8 ıslatma kurutma döngüsüne tabi tutularak her bir döngü sonunda serbest şişme yüzdeleri belirlenmiştir. Döngü sayılarına bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değişimi Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. Döngü sayılarına bağlı olarak serbest şişme yüzdesi

Döngü Sayıları	Serbest Şişme Yüzdesi (%)		
	$\sigma'_p=54$ kPa	$\sigma'_p=270$ kPa	$\sigma'_p=540$ kPa
0	4,7	5,8	7,1
1	2,1	2,2	2,5
2	1,1	2,6	2,7
3	1,0	1,2	1,3
4	0,9	1,1	1,1
5	0,9	1,1	1,1
6	0,9	0,9	1,1
7	0,9	0,9	0,9
8	0,9	0,9	0,9

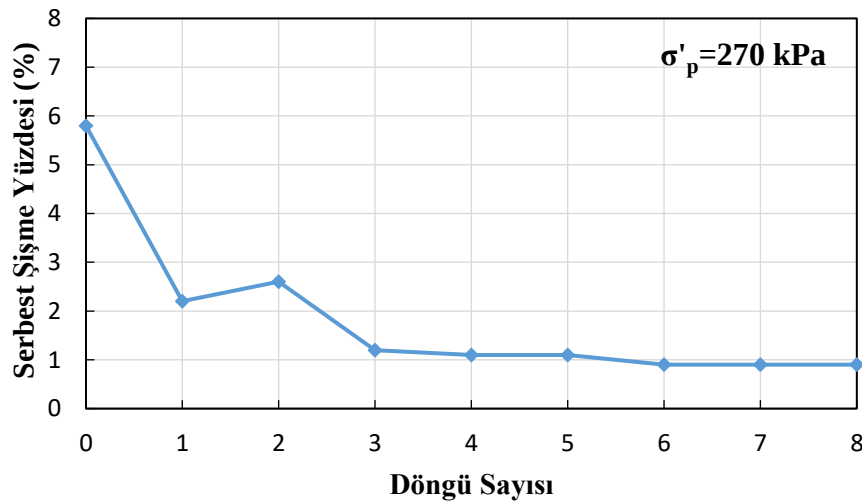
$\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değişimi Şekil 29’da verilmiştir.



Şekil 29. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değışimi ($\sigma'_p=54$ kPa)

Şekil 29 incelendiğinde, en yüksek serbest şişme yüzdesi ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (% 4,7). Islatma-kurutma döngüsü arttıkça serbest şişme yüzdeleri azalmıştır. $\sigma'_p=54$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin, 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest şişme yüzdesi, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 55,4 azalmıştır. 4. Islatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdesi, döngüye tabi tutulmamış numuneye göre % 81 azalmıştır. 4. ıslatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdelерinde değışim meydana gelmemiştir.

$\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değışimi Şekil 30'da verilmiştir.

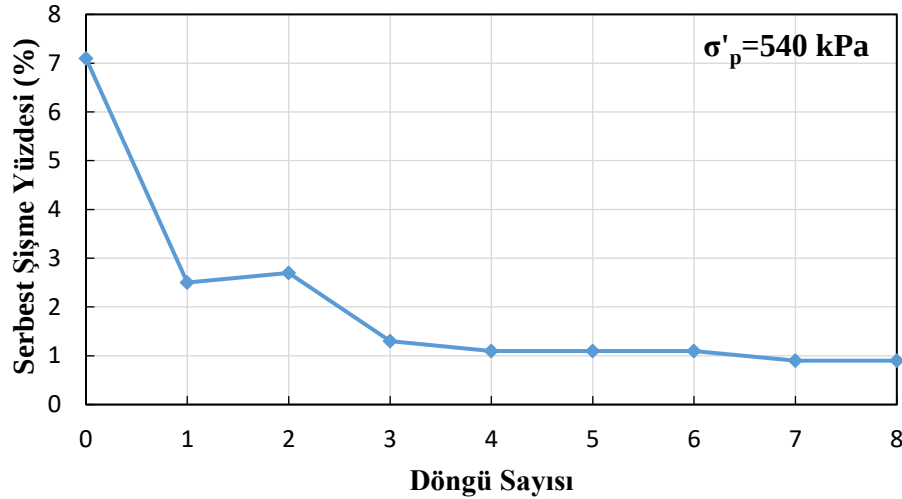


Şekil 30. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değışimi ($\sigma'_p=270$ kPa)

Şekil 30 incelendiğinde, en yüksek serbest şişme yüzdesi ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numuneden elde edilmiştir (% 5,8). Islatma-kurutma döngüsü arttıkça serbest

şişme yüzdeleri azalmıştır. $\sigma'_p=270$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin, 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest şişme yüzdesi, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 62 azalmıştır. 6. ıslatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdesi, döngüye tabi tutulmamış numuneye göre % 84,5 azalmıştır. 6. ıslatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdelerinde değişim meydana gelmemiştir.

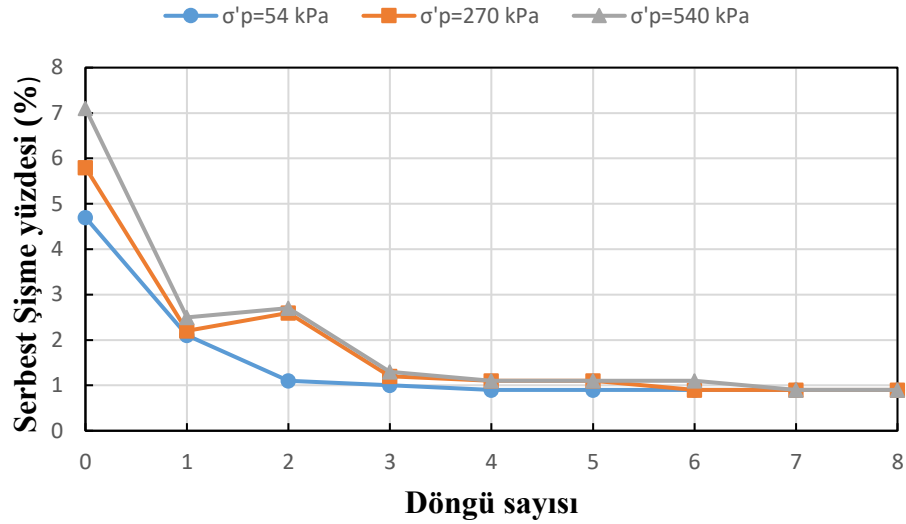
$\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi Şekil 31’de verilmiştir.



Şekil 31. Döngü sayısına bağlı olarak serbest şişme yüzdelerinin değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa)

Şekil 31 incelendiğinde, en yüksek serbest şişme yüzdesi ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numuneden elde edilmiştir (% 7,1). ıslatma-kurutma döngüsü arttıkça serbest şişme yüzdeleri azalmıştır. $\sigma'_p=540$ kPa gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuş numunelerin, 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest şişme yüzdesi, ıslatma-kurutmaya tabi tutulmamış numuneye göre % 64,8 azalmıştır. 7. ıslatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdesi, döngüye tabi tutulmamış numuneye göre % 87,3 azalmıştır. 7. ıslatma-kurutma döngüsünden sonra serbest şişme yüzdelerinde değişim meydana gelmemiştir.

Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngüleri sonucunda elde edilen serbest şişme yüzdeleri toplu olarak Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak serbest şişme yüzdelерinin değışimi

Şekil 32 incelendiğinde, daha yüksek basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin serbest şişme yüzdelерinin başlangıç ıslatma-kurutma döngülerinde daha yüksek olduğu görölmektedir. Islatma-kurutma döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin azaldığı ve döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin farklı ön yükleme yapılmış tüm numunelerde sabit değere (% 0,9) ulaştığı görölmektedir. Serbest şişme yüzdelерinin sabit % 0,9 değeri ne ulaşması, $\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön konsolide edilmiş numunelerde 4. ıslatma-kurutma döngüsünde, $\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön konsolide edilmiş numunelerde 6. ıslatma-kurutma döngüsünde ve $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön konsolide edilmiş numunelerde ise 7. ıslatma-kurutma döngüsünde olmuştur.

Serbest şişme yüzdelерinin ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça azalmasının ve sonra dengeye ulaşmasının, numunenin şişme-büzölmesi sırasında kil yapısının bozulması ve rötре çatlaklarından kaynaklandığı düşünölmektedir. Literatürde, ıslatma-kuruma döngüleri ile hem şişme basıncı hem de şişme potansiyelinin azaldığı, ıslatma-kurutma döngüsü ilerledikçe dengeye ulaştığını belirtmişlerdir. Şişme basıncındaki ve şişme potansiyelindeki azalmanın, döngüsel şişme işleminin neden olduğu kil matrisinin tahrip olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Basma *et al.* 1996).

Abbaszadeh (2011), kurutma döngüsü sırasında büzölme süreci meydana geldikçe numunede dikey ve yatay çatlakların oluştuğı belirtilmiştir. Tekrar ıslatma döngüsünde ise oluşan çatlaklar suyun numuneye sızması için tercihli yollar oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

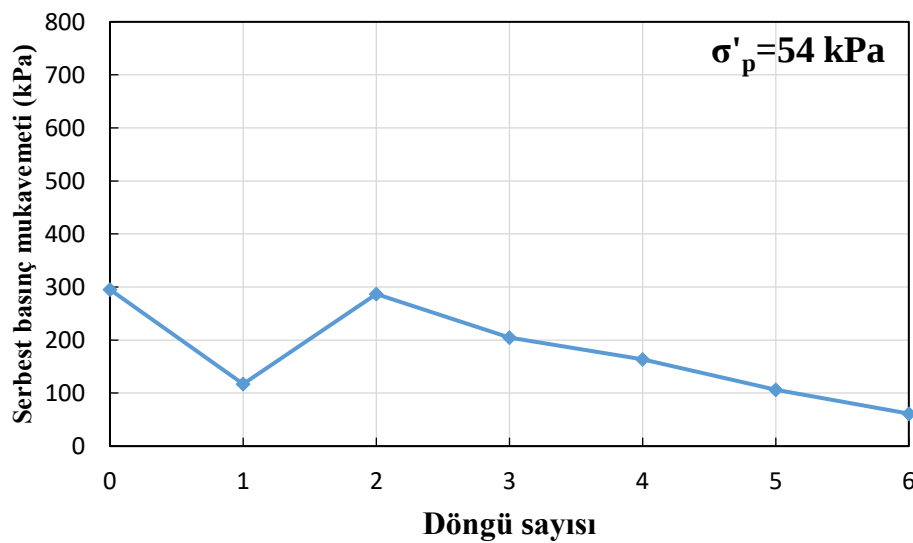
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Optimum su muhtevasında kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan kil zeminden 35mm çapında ve 70mm yüksekliğinde örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örselenmemiş örnekler 3 farklı (54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa) ön yükleme tabi tutulmuş ve oturmasını tamamlaması beklenmiştir. Ön yükleme tabi tutulan numuneler 6 ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmuş ve her bir döngü sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri ASTM-D 2166 (2016) standardına uygun olarak yapılmıştır. Islatma-kurutma döngü sayılarına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Tablo 14’te verilmiştir.

Tablo 14. Döngü sayıları-serbest basınç mukavemeti değerleri

Döngü Sayısı	Serbest Basınç Mukavemeti(kPa)		
	$\sigma'_p=54$ kPa	$\sigma'_p=270$ kPa	$\sigma'_p=540$ kPa
0	295,3	463	675,3
1	117,3	283	441,8
2	286,5	311,9	565,9
3	204,5	183	280,4
4	163,5	158,5	200,0
5	106,3	118,3	165,8
6	61,3	75,6	87,9

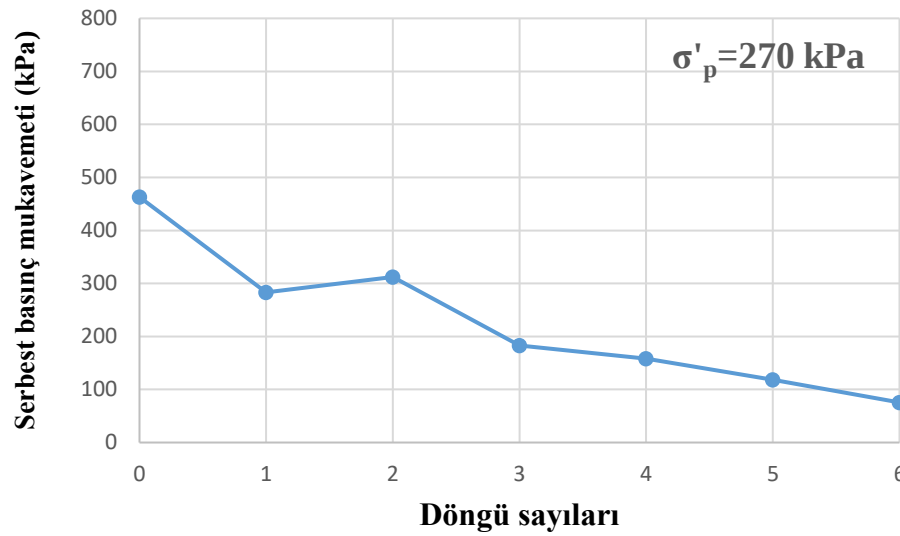
$\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Şekil 33’te verilmiştir.



Şekil 33. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=54$ kPa)

Şekil 33 incelendiğinde, en yüksek serbest basınç mukavemetinin ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden (295,3 kPa) elde edilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemeti 6. döngü sonunda elde edilmiştir (61,3 kPa). 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest basınç mukavemeti, döngü yapılmamış numuneye göre % 79,25 azalmıştır. Döngü sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetleri azalmalar meydana gelmiştir. 2.döngüde serbest basınç mukavemeti 1.döngüye göre artmış daha sonra 6. döngüye kadar azalmıştır.

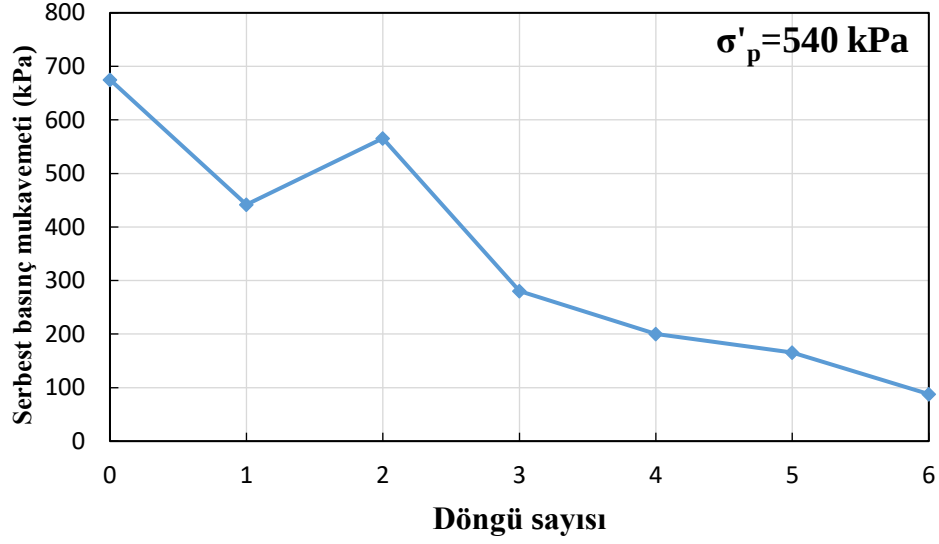
$\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Şekil 34’de verilmiştir.



Şekil 34. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=270$ kPa)

Şekil 34 incelendiğinde, en yüksek serbest basınç mukavemetinin ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden (463,0 kPa) elde edilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemeti 6. döngü sonunda elde edilmiştir (75,6 kPa). 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest basınç mukavemeti, döngü yapılmamış numuneye göre % 83,6 azalmıştır. Döngü sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetleri azalmalar meydana gelmiştir.

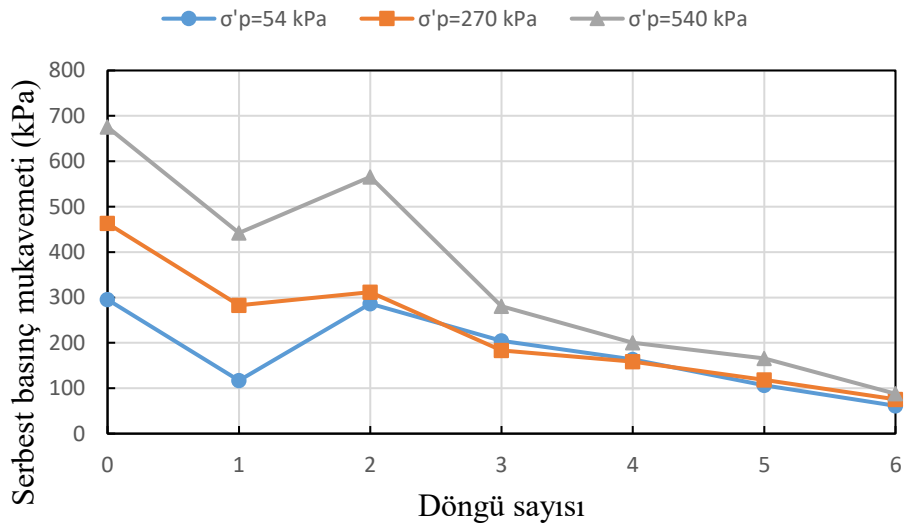
$\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Şekil 35’de verilmiştir.



Şekil 35. Döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ($\sigma'_p=540$ kPa)

Şekil 35 incelendiğinde, en yüksek serbest basınç mukavemetinin ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden (675,3 kPa) elde edilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemeti 6. döngü sonunda elde edilmiştir (87,9 kPa). 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda serbest basınç mukavemeti, döngü yapılmamış numuneye göre % 87 azalmıştır. Döngü sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetleri azalmalar meydana gelmiştir. 2.döngüde serbest basınç mukavemeti 1.döngüye göre artmış daha sonra azalmıştır.

Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngüleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemetleri toplu olarak Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 36. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin ıslatma-kurutma döngülerine bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Zeminin optimum su içeriğindeki serbest basınç mukavemeti 221,5 kPa olarak belirlenmiştir. Şekil 36 incelendiğinde, en yüksek serbest basınç mukavemeti, 540 kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve herhangi bir ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (673,3 kPa). En düşük serbest basınç mukavemeti ise, 54 kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve 6.ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmuş numunelerden elde edilmiştir (61,3 kPa). Genel olarak, farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça düştüğü söylenebilir.

Islatma-kurutma çevrimlerine bağlı olarak zeminin serbest basınç mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Islatma-kurutma döngüsüne bağlı olarak serbest basınç mukavemetinin azalmasının kil matrisinin tahrip olmasından ve oluşan çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Islatma-kurutma döngülerine bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerindeki değişim bir önceki döngü ile kıyaslandığında her zaman azalma meydana gelmemiştir. Bunun sebebinin kil zeminde ıslatma-kurutma döngüsünden dolayı kil matrisindeki bozulmaların ve oluşan rötre çatlaklarının homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Stoltz *et al.* (2014) ve Aldaood *et al.* (2014) yaptıkları çalışmalarda kireçle stabilize ettikleri kil numuneleri ıslatma kurutma döngülerine tabi tutmuş ve aşamalı bir mukavemet azalışı kaydetmişlerdir.

Yenginar (2018) yaptığı çalışmada kil zemine farklı oranlarda kireç ve uçucu kül eklemiş yaptığı ıslatma kurutma döngüleri sonrasında ise ilk döngü sonrası serbest basınç mukavemetinde azalış daha sonraki döngülerde ise artış olduğunu saptamıştır.

Yaptığımız çalışma, literatürde bu konu ile ilgili yapılmış az sayıda çalışma ile paralellik göstermektedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, Erzurum-Oltu bölgesinden temin edilen yüksek plastisiteli (CH) kil zemin üzerinde Standart proktor deneyi yapılarak optimum su içeriği belirlenmiştir. Daha sonra optimum su içeriğinde kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan kil zeminden örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örselenmemiş numuneler, farklı derinliklerden alındığını temsilen 3 farklı basınç ($\sigma'_p=54$ kPa, 270 kPa ve 540 kPa) altında ön yüklemeye tabi tutulmuş ve oturma bitene kadar beklenilmiştir. Ön yükleme yapılmış numuneler ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuş ve her bir döngü sonunda kıvam limitleri, şişme basınçları, serbest şişme yüzdeleri ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerden yola çıkılarak ortaya konan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Yapılan kıvam deneyleri sonucunda, kıvam limitlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Likit limit değeri % 69-71 arasında plastik limit değeri ise % 26-31 arasında değişmiştir.
- Şişme basıncı deneyleri için, ön yükleme yapılmış numuneler üzerinde 8 ıslatma-kurutma döngüsü yapılmıştır. Yapılan şişme basıncı deneyleri sonucunda, ön yükleme basıncı arttıkça şişme basıncı da artmıştır. En yüksek şişme basıncı, $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (220,9 kPa). Aynı basınç altında ön yükleme yapılmış numuneler göz önüne alındığında, ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça şişme basınçlarının azaldığı ve ardışık iki döngü arasındaki şişme basıncındaki en büyük azalmanın döngü yapılmamış numune ile 1. döngü sonundaki numuneler arasında olduğu görülmüştür. $\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki şişme basıncı döngü yapılmamış numuneye göre % 86, $\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki şişme basıncı döngü yapılmamış numuneye göre % 82,5 ve $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 1. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki şişme basıncı döngü yapılmamış numuneye göre % 84,2 azalmıştır. Islatma-kurutma döngüsü arttıkça şişme basınçlarında azalma devam etmiştir. 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa basınç altında ön yüklemeye tabi tutulmuş kil zeminin 8 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen şişme basınçları, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki şişme basınçlarına

göre sırasıyla % 91,3, % 93,0, % 93,5 oranlarında azalmıştır. Farklı ön yükleme basınçlarına maruz bırakılmış numunelerin 8. döngü sonundaki şişme basınçlarının birbirine yaklaştığı ve yaklaşık sabitlendiği görülmüştür.

- Serbest şişme yüzdesi deneyleri için, ön yükleme yapılmış numuneler üzerinde 8 ıslatma-kurutma döngüsü yapılmıştır. Yapılan serbest şişme yüzdesi deneyleri sonucunda, ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin azaldığı ve döngü sayısı arttıkça serbest şişme yüzdelерinin farklı ön yükleme yapılmış tüm numunelerde sabit değere (% 0,9) ulaştığı görülmektedir. Serbest şişme yüzdelерinin sabit % 0,9 değerine ulaşması, $\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerde 4. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda, $\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerde 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda ve $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunelerde ise 7. ıslatma-kurutma döngüsü sonunda olmuştur. 54 kPa, 270 kPa ve 540 kPa basınç altında ön yüklemeye tabi tutulmuş kil zeminin 8 ıslatma-kurutma döngüsü sonunda belirlenen serbest şişme yüzdeleri, ıslatma-kurutma döngüsü yapılmadan önceki serbest şişme yüzdelерine göre sırasıyla % 80,8, % 84,5, % 87,3 oranlarında azalmıştır.
- Serbest basınç deneyleri için, ön yükleme yapılmış numuneler üzerinde 6 ıslatma-kurutma döngüsü yapılmıştır. Yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda, ön yükleme basıncı arttıkça serbest basınç mukavemeti de artmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemeti, $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış ve ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmamış numunelerden elde edilmiştir (673,5 kPa). $\sigma'_p=54$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki serbest basıncı mukavemeti, döngü yapılmamış numuneye göre % 79,25, $\sigma'_p=270$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki serbest basıncı mukavemeti döngü yapılmamış numuneye göre % 83,6 ve $\sigma'_p=540$ kPa basınç altında ön yükleme yapılmış numunenin 6. ıslatma-kurutma döngüsü sonundaki serbest basıncı mukavemeti döngü yapılmamış numuneye göre % 86,9 azalmıştır. Genel olarak ıslatma-kurutma döngüsü arttıkça numunelerin serbest basınç mukavemetleri düşmüş ve farklı ön yükleme basınçları altında kompakte edilmiş numunelerin 6. döngü sonundaki serbest basınç mukavemetleri birbirine yaklaşmıştır.

Büyük yükler altında sıkışmış kil zeminlerin şişme basınçlarının, serbest şişme yüzdelерinin ve serbest basınç mukavemetlerinin daha yüksek olduğu, ıslatma-kurutma döngü sayısı arttıkça şişme basınçlarının, serbest şişme yüzdelерinin ve serbest basınç

mukavemetlerinin azaldığı yapılan deneysel çalışmada görülmüştür. Özellikle ıslatma-kurutma döngülerine maruz şişen zeminlerde oluşturulan yüksek yarmalarda ve derin kazılarda büyük şişme basınçlarının ve serbest şişme yüzdelerinin meydana gelebileceği ve buralarda yapılacak olan mühendislik yapılarının bu durumun göz önüne alınarak tasarlanmasının gerekli olduğu unutulmamalıdır.



KAYNAKLAR

- Ashayeri, I., Yasrebi, S., 2009. Free-Swell and Swelling Pressure of Unsaturated Compacted Clays; Experiments and Neural Networks Modeling. *Geotech Geol Eng* **27**.
- Abbaszadeh, M., 2011. The Effect of Cracks on Unsaturated Flow and Volume Change Properties of Expansive Clays and Impacts on Foundation Performance. Doctoral Thesis, Arizona State University.
- Atun, B., 2019. Biyopolimer İle Etkileştirilmiş Kil/Merve Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Altmeyer, W. T., 1955. Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials*, **81** (2), 17-19.
- Akcanca, F., 2009. Katı Atık Depoları İçin Geçirimsiz Şilte Oluşturulmasında Kum Bentonit-Kireç Karışımının Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Akcanca, F. and Aytekin, M., 2012. Effect of Wetting-Drying Cycles on Swelling Behavior of Lime Stabilized Sand-Bentonite Mixtures. *Environmental Earth Sciences* **66**(1): 67–74.
- Al-Homoud, A. S., Basma, A.A., Malkawi, A.I.H. and Bashabsheh, M.A.L., 1995. Cyclic Swelling Behavior of Clays. *Journal of geotechnical engineering* **121**(7): 562–65.
- Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M., 2014. Impact of Wetting–Drying Cycles on the Microstructure and Mechanical Properties of Lime-Stabilized Gypseous Soils. *Engineering Geology* **174**: 11–21.
- ASTM D2166 / D2166M - 16, Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM D422, (2004), Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2004.
- ASTM D698 (2012), Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-Lbf/Ft³ (600 Kn-M/M³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D854-14, (2014), Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA. Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D4318 (2010) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, Annual Book of ASTM Standards, 04.08. Philadelphia (PA): 2010.
- ASTM-D4546–90-Metot-C., (2003). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.
- ASTM-D5084. (2010). Standard Test Methods For Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken, Pa.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A.S., Malkawi, A.I.H. and Al-Bashabsheh, M.A., 1996. Swelling-Shrinkage Behavior of Natural Expansive Clays. *Applied Clay Science* **11**(2–4): 211–27.
- Çetin, M., 2003. Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi.
- Chen, F. H., 1975. Engineering Effects of Moisture Change in Soils, Concluding Proceedings International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils. Texas A & M Press.

- Chen, F.H., 1988. Foundation on Expansive Soils., American Elsevier Science Publication, New York.
- Chen, R. and Ng, C.W.W., 2013. Impact of Wetting–Drying Cycles on Hydro-Mechanical Behavior of an Unsaturated Compacted Clay. *Applied Clay Science* 86: 38–46.
- Das, B. M., 1990. Principles of Geotechnical Engineering PWS-Kent.
- Erol, O. A., Dhowian, W. and Youssef, A., 1988. Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in Kingdom of Saudi Arabia.
- Estabragh, A. R., Moghadas, M. and Javadi, A.A., 2013. Effect of Different Types of Wetting Fluids on the Behaviour of Expansive Soil during Wetting and Drying. *Soils and Foundations* 53(5): 617–27.
- Fell, R., Macgregor, P. and Stapledon, D., 1992. Geotechnical Engineering of Embankment Dams. Balkema, Rotterdam.
- Genç, S., 2009. Şişen Zeminler ve Bentonit-Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Grim, R.E., 1962. Applied Clay Mineralogy. McGraw Hill Book Co. New York.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., and Tuncan, M., 2007. Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution* 42(2): 681–88.
- He, Y., Cui, Y., Ye, W.M. and Conil, N., 2017. Effects of Wetting-Drying Cycles on the Air Permeability of Compacted Téguline Clay. *Engineering Geology* 228(April): 173–79.
- Holtz, W. G., Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays. *ASCE Transactions*, 121, 641-663.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 733 p.
- Hu, Z., Peng, K.L., Zheng, X., Henglin Li, L., 2018. Strength and Deformation of Unsaturated Compacted Clay under Wetting-Drying Cycles. *E&ES* 189(3): 32054.
- Ishibashi, Isao, and Hemanta Hazarika. 2010. Soil Mechanics Fundamentals Soil Mechanics Fundamentals.
- Kalkan, E., 2011. Impact of Wetting-Drying Cycles on Swelling Behavior of Clayey Soils Modified by Silica Fume. *Applied Clay Science* 52(4): 345–52.
- Khan, A., 2016. Impact Of Wet-Dry Cycle On Mechanical Properties Of Expansive Clay Under Low Overburden Stress. Master of Science, Texas at Arlington University.
- Mitchell, J.K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Mitchell, J. K. and Soga, K., 2005. Fundamentals of soil behavior. Vol. 3. New York: John Wiley & Sons.
- Murthy, V.N. S., 2002. Geotechnical Engineering Principles And Practices Of Soil Mechanics and Foundation Engineering. CRC press.
- Rao, K.S.S., Tripathy, S., 2003. Effect of Aging on Swelling and Swell – Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil, *Geotechnical Testing Journal*, 26 (1), 1-11.
- Rosembalm, D.C., 2013. Volume Change Behavior of Expansive Soils Due to Wetting and Drying Cycles. Doctoral Thesis, Arizona State University.
- Seed H. B., Woodward R. J. and Lungreen R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3), 53-87.
- Sengül, T., 2003. Ağır Metal ve Tuzlarla Kirlenmiş Killi Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi.
- Shi, B., Jiang, H., Liu, Z., Fang, H. Y., 2002. Engineering geological characteristic of expansive soils in China. *Engineering Geology*, 67, 63-71.
- Skempton, A. W., 1953. The Colloidal Activity of Clay, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Zurich, Vol. 1, 57-61.
- Stoltz, G., Cuisinier, O. and Masrouri, F., 2014. Weathering of a Lime-Treated Clayey Soil by Drying and Wetting Cycles. *Engineering Geology* 181: 281–89.

- Türköz, M., 2009. Sıkıştırılmış Şişen Killerin Mikroyapısal Değişiminde Şişme-Büzülme Çevrimin Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 22(1): 77–91.
- Uzundurukan, S., 2006. Zeminlerin Şişme Özelliklerine Etkiyen Temel Parametrelerin Belirlenmesi ve Modellenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Yazdandoust, F., and Yasrobi, S.S., 2010. Effect of Cyclic Wetting and Drying on Swelling Behavior of Polymer-Stabilized Expansive Clays. Applied Clay Science 50(4): 461–68.
- Yenginar, Y., 2018. Islatma-Kurutma Çevriminin Ankara Kilinin Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi . Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- Yuksel, B. 2007. Konsolidasyon Sürecinde Kil Yapısındaki Değişimin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Merve ÖZTUĞ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	T.C
Adres:	Atatürk Üniversitesi
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Kaya Karakaya Anadolu Lisesi
Lisans:	Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı (2020)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	