



**KİLLERİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME
DAVRANIŞLARINA REÇİNELERİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Akif IŞIK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KİLLERİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME
DAVRANIŞLARINA REÇİNELERİN ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Akif İŞİK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**KİLLERİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞLARINA
REÇİNELERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Dr. Öğretim Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK danışmanlığında, Mehmet Akif İŞİK tarafından hazırlanan bu çalışma 20/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Semet ÇELİK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI GHALEHJOUGH

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 26.09.2019 tarih ve 38 / 65 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİLLERİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞLARINA REÇİNELERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet Akif İŞİK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Zayıf zeminler, çeşitli zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak iyileştirilebilmektedir. Zemin iyileştirme katkısız olarak veya katkı maddeleri kullanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada yüksek plastisiteli bentonit kili ile düşük plastisiteli kaolin kilinin mukavemet ve donma-çözülme davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, killere belirli yüzdelerde (%5, %10, %15, %20) poliüretan, epoksi, reçine ve stiren akrilik ilave edilerek katkılı numuneler elde edilmiştir. Elde edilen katkılı numuneler üzerinde serbest basınç ve donma çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 1 ve 7 gün kürde bekletilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneyler sonucunda, poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkılarının düşük ve yüksek plastisiteli killerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür.

2019, 83 sayfa

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, kil, serbest basınç mukavemeti, donma-çözülme, polimer, reçine

ABSTRACT

MS Thesis

INVESTIGATION THE EFFECTS OF RESINS ON THE STRENGTH AND FREEZING-THAWING BEHAVIORS OF CLAYS

Mehmet Akif İŞİK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Geotechnical Science

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Weak soils can be improved using a variety of soil improvement techniques. Soil improvement can be done without additives or with additives. The aim of this study is improving the strength and freezing-thawing properties of high plasticity bentonite clay and low plasticity kaolin clay. For this purpose, samples with polyurethane, epoxy resin and styrene acrylic additives in certain percentages (5%, 10%, 15%, 20%) were obtained into the high plasticity bentonite clay and low plasticity kaolin clay. Unconfined compressive strength and freezing-thawing tests were performed on the treated clay samples. Experiments were performed on the samples that were cured for 1 and 7 days. As a result of the experiments, it was observed that polyurethane, epoxy resin and styrene acrylic additives had positive effects on the unconfined compressive strength and unconfined compressive strength after freezing-thawing cycles of low and high plasticity clays.

2019, 83 pages

Keywords: Soil improvement, clay, unconfined compressive strength, freeze-thaw, polymer, resin

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince destek ve yardımlarıyla bana yol gösteren, tezimin yazımı aşamasında değerli ilgi ve alakalarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yürütülmüştür. Bu kapsamda deneysel çalışmalar esnasında yardımları ve önerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan Arş. Gör. Fatih ARTUK’a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerde kullanılan polimer katkı malzemelerinin temin edilmesinde yardımda bulunan Şahika Boya ve Kimya San. A.Ş.’ne, deneylerde kullanılan killerin temin edilmesinde yardımda bulunan Karakaya Bentonit San. ve Tic. A.Ş. ve Utelka Deri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarının yetkililerine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım sırasında desteğini ve yardımını esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni yalnız bırakmayan, hiçbir zaman desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili babam, annem, abim ve kardeşlerime sonsuz sabır, hoşgörü ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Mehmet Akif İŞİK

Eylül, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
1.2. Kaynak Özetleri.....	2
1.2.1. Polimer kullanılmadan yapılan zemin iyileştirme.....	3
1.2.2. Polimer kullanılarak yapılan zemin iyileştirme.....	8
2. KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1. Killer.....	12
2.1.1. Kaolinit mineralleri	13
2.1.2. İllit mineralleri.....	14
2.1.3. Smektit mineralleri	15
2.2. Zemin İyileştirme	18
2.2.1. Katkısız zemin iyileştirme.....	19
2.2.2. Katkılı zemin iyileştirme	23
2.3. Zeminlerde Donma-Çözülme	25
2.3.1. Donma-çözülmenin zeminlerin mukavemetine etkisi	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Bentonit kili (B).....	27
3.1.2. Kaolin kili (K)	29
3.1.3. Polimerler	31
3.2. Yöntem	35
3.2.1. Numunelerin hazırlanması	35
3.2.1.a. Katkısız bentonit ve kaolin numunelerinin hazırlanması	36

3.2.1.b. Katkılı bentonit numunelerinin hazırlanması:	36
3.2.1.c. Katkılı kaolin numunelerinin hazırlanması:	37
3.2.2. Kıvam limitleri deneyleri	39
3.2.3. Harvard mini kompaksiyon deneyi	40
3.2.4. Serbest basınç deneyi	41
3.2.5. Donma-çözülme deneyi.....	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	44
4.1. Harvard Mini Kompaksiyon Deneyi Sonuçları.....	44
4.2. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	45
4.2.1. Poliüretan katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları.....	46
4.2.2. Epoksi reçine katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları	51
4.2.3. Stiren akrilik katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları	56
4.3. Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları.....	61
4.3.1. Poliüretan katkılı numunelere ait donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları	62
4.3.2. Epoksi reçine katkılı numunelere ait donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları	67
4.3.3. Stiren akrilik katkılı numunelere ait donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları	72
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

P_{max}	Maksimum yük
A_f	Kırılma anındaki alan
ASTM	Uluslararası amerikan test ve materyalleri topluluğu
B	Bentonit kili
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
K	Kaolin kili
KDK	Katyon değişim kapasitesi
LVDT	Potansiyometrik cetvel
MH	Yüksek plastisiteli silt
NaCl	Sodyum klorür
q_u	Serbest basınç mukavemeti
SC	Killi kum
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
SM	Siltli kum
TS	Türk standardı
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Silis levhasının yapısı (a), Alüminyum levhasının yapısı(b).....	12
Şekil 2.2. Kaolinit grubu minerallerin yapısı.....	13
Şekil 2.3. Kaolinit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.....	14
Şekil 2.4. İllit grubu minerallerin yapısı	15
Şekil 2.5. İllit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü	15
Şekil 2.6. Smektit minerallerin genel yapısı	16
Şekil 2.7. Montmorillonit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü	17
Şekil 2.8. Dinamik kompaksiyon.....	20
Şekil 2.9. Ön konsolidasyon	21
Şekil 2.10. Düşey drenlerin kullanılması.....	22
Şekil 2.11. Taş kolon imal aşamaları	23
Şekil 2.12. Kireç ile iyileştirme	24
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan bentonit kili	28
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kaolin kili.....	30
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan poliüretan.....	32
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan stiren akrilik.....	33
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan epoksi reçine.....	35
Şekil 3.6. Katkılı numunelerin hazırlanışı	39
Şekil 3.7. Hazırlanan numunelere kür uygulanması	39
Şekil 3.8. Düşen koni penetrometre deney aleti	40
Şekil 3.9. Harvard mini kompaksiyon deney aleti	41
Şekil 3.10. Serbest basınç deney aleti.....	42
Şekil 3.11. Donma-çözülme cihazı	43
Şekil 4.1. Bentonit ve kaolin kiline ait kompaksiyon eğrileri.....	45
Şekil 4.2. Bentonit ve kaolin kilinin kırılma şekilleri.....	46
Şekil 4.3. Bir günlük kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	47
Şekil 4.4. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	47

Şekil 4.5. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	48
Şekil 4.6. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	49
Şekil 4.7. Katkısız ve poliüretan katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri.....	49
Şekil 4.8. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	52
Şekil 4.9. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	52
Şekil 4.10. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	53
Şekil 4.11. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	54
Şekil 4.12. Katkısız ve epoksi reçine katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri	54
Şekil 4.13. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	57
Şekil 4.14. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri	57
Şekil 4.15. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	58
Şekil 4.16. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri	59
Şekil 4.17. Katkısız ve stiren akrilik katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri.....	59
Şekil 4.18. Bentonit ve kaolin killlerinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	62
Şekil 4.19. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	63
Şekil 4.20. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	63
Şekil 4.21. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	64

Şekil 4.22. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	65
Şekil 4.23. Poliüretan katkılı ve katkısız kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri.....	65
Şekil 4.24. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	68
Şekil 4.25. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	68
Şekil 4.26. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	69
Şekil 4.27. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	70
Şekil 4.28. Epoksi reçine katkılı ve katkısız kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri	70
Şekil 4.29. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	73
Şekil 4.30. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	73
Şekil 4.31. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	74
Şekil 4.32. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri.....	75
Şekil 4.33. Stiren akrilik katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kil minerallerine ait bazı özellikler	18
Çizelge 2.2. Montmorillonit ve kaolinite ait likit limit ve plastik limit değerleri.....	18
Çizelge 3.1. Bentonitin fiziksel özellikleri	28
Çizelge 3.2. Bentonitin kimyasal içeriği.....	29
Çizelge 3.3. Bentonit kilinin bazı geoteknik özellikleri	29
Çizelge 3.4. Kaolin kilinin kimyasal içeriği	30
Çizelge 3.5. Kaolin kilinin bazı geoteknik özellikleri	30
Çizelge 3.6. Poliüretanın kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	32
Çizelge 3.7. Stiren akriliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri	34
Çizelge 3.8. Epoksi reçinenin kimyasal ve fiziksel özellikleri	35
Çizelge 3.9. Katkısız bentonit ve kaolin numuneleri	36
Çizelge 3.10. Poliüretan katkılı bentonit numuneleri	36
Çizelge 3.11. Epoksi reçine katkılı bentonit numuneleri	37
Çizelge 3.12. Stiren akrilik katkılı bentonit numuneleri.....	37
Çizelge 3.13. Poliüretan katkılı kaolin numuneleri	38
Çizelge 3.14. Epoksi reçine katkılı kaolin numuneleri	38
Çizelge 3.15. Stiren akrilik katkılı kaolin numuneleri.....	38
Çizelge 4.1. Kil numunelerin kompaksiyon parametreleri	44
Çizelge 4.2. Bentonit ve kaolin killeriine ait 1 günlük serbest basınç mukavemetleri	45
Çizelge 4.3. Poliüretan katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	46
Çizelge 4.4. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	48
Çizelge 4.5. Poliüretan katkısının bentonit ve kaolin killeriinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim.....	50
Çizelge 4.6. Epoksi reçine katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	51

Çizelge 4.7. Epoksi reçine katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	53
Çizelge 4.8. Epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin killерinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim.....	55
Çizelge 4.9. Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	56
Çizelge 4.10. Stiren akrilik katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri	58
Çizelge 4.11. Stiren akrilik katkısının bentonit ve kaolin killерinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim.....	60
Çizelge 4.12. Bentonit ve kaolin killерine ait 1 gün kürde bekletilen numunelerin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	61
Çizelge 4.13. Poliüretan katkılı bentonit numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	62
Çizelge 4.14. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	64
Çizelge 4.15. Poliüretan katkısının bentonit ve kaolin killерine ait donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim	66
Çizelge 4.16. Epoksi reçine katkılı bentonit numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	67
Çizelge 4.17. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	69
Çizelge 4.18. Epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin killерine ait donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim	71
Çizelge 4.19. Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	72
Çizelge 4.20. Stiren akrilik katkılı kaolin numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları	74

Çizelge 4.21. Stiren akrilik katkısının bentonit ve kaolin killlerine ait donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim	76
--	----



1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği alanında yapılarda meydana gelen hasarların büyük bir kısmı kil zeminlerde oturma, kabarma ve dinamik etkiler sonucunda ortaya çıkan hareketlerden kaynaklanmaktadır. Zeminin hareket türü, zeminin fiziksel, kimyasal özellikleri mineralojik yapısı ve dokusal özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu zeminler hidrofil özellikte olup su ile teması halinde hacimsel artış, bünyesindeki suyu kaybetmesi halinde ise büzülme meydana gelmektedir. Bu hacim değişikliği kil zemin üzerinde inşaa edilen yapılarda önlem alınmaması halinde büyük hasarlara neden olmaktadır (Holtz and Kovacs 1981).

Dünya üzerindeki zemin türleri incelendiğinde killi zeminlerin oldukça geniş bir alana yayılmış olduğu görülmektedir. Artan nüfus, yapıların inşasının killi zeminler üzerinde de yapılmasını zorunlu kılmaktadır (Aydın 2010).

Killi zeminler olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılmaması halinde sıklıkla yerinden alınarak yerine yeni bir zemin türü konulmaktadır. Killi zeminin inşaa sahasından uzaklaştırılması esnasında çok sayıda iş makinesi kullanılmakta, killi zemin yerine konulacak granüler zemin için ise taş ocakları kurulması gerekmektedir. Bu durum sera gazı salınımı artırması yanı sıra iş güvenliği için sorunlar oluşturmaktadır. Bu yöntem ekonomiklik ilkesine aykırı düşmekle birlikte önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Killi zeminlerin yerinden alınması yerine aynı zemini kullanarak olumsuz zemin özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilebilmektedir. Bu tür zeminlerin iyileştirilmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri kimyasallar kullanılarak yapılan iyileştirme metodudur. Esas olarak bu metotda zemine kireç, çimento, cüruf, pomza, bitüm, silis dumanı gibi katkı maddeleri ilave edilerek olumsuz mühendislik özellikleri iyileştirilmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Kil zeminler inşaat mühendisliği alanında en çok problem oluşturan zemin türleri içerisinde yer almaktadır. Killi zeminlerin olduğu alanlarda planlanan yapı inşası için olası problemlerin tahmin edilmesi ve önlemler alınması gerekmektedir. Artan nüfus miktarına bağlı olarak zeminin tasarım aşamasında planlanan yapıdan gelen yükleri taşıyamaması veya yetersiz kalması nedeniyle bu tür alanlarda zemin yerinden alınıp yerine granüler zemin konulmaktadır. Bu çözüm yapının maliyetini artırmakta, ekonomiklik ilkesinden uzaklaşmaktadır. Yapılan birçok araştırmada yeni teknikler geliştirilerek bu duruma çözüm bulunmaya çalışılmaktadır. Uygulanan tekniklerden sıklıkla kullanılan kimyasal iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile zemin içerisine zeminin olumsuz yanlarını iyileştirecek katkıları katılarak çözüm bulunmaya çalışılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, düşük plastisiteli bir kaolin kili ve yüksek plastisiteli bir bentonit kiline optimum su muhtevasında, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında epoksi reçine, stiren akrilik ve poliüretan katılarak, bu katkıların kaolin ve bentonit killerinin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle kaolinin ve bentonitin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Katkıların mukavemet özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi için katkılı numunelere serbest basınç deneyi ve donma-çözülme deneyi yapılmış, sonuçlar katkısız kil numunelere ait deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylece kaolin ve bentonitin epoksi reçine, stiren akrilik ve poliüretan katkıları ile stabilizasyonunun sağlanması hedeflenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

Tez çalışması kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden olan katkıları ile yapılan iyileştirme üzerine literatür taraması yapılmıştır. Zemin iyileştirmesinde kullanılan katkıları atık malzemeler olabileceği gibi çeşitli kimyasallar veya polimerlerde bu amaçla kullanılabilmektedir.

1.2.1. Polimer kullanılmadan yapılan zemin iyileştirme

Asitler yüksek oranlarda hidrojen iyonu içermesi ve bu hidrojen iyonlarının zemin stabilizasyonunda önemli bir parametre olmasından dolayı kullanılabilir. Ancak, asitlerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilmesi için, tüm güvenlik gereksinimlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Fosforik asidin nemli ve kürlenmiş killi zeminlerin taşıma gücünü ve dayanıklılığını arttırdığı tespit edilmiştir (Demirel and Davidson 1960).

Tuzlar ve asitler, zemin stabilizasyonu için kullanılan bazı iyonik stabilizatör örnekleridir. Sodyum klorür (NaCl), iyonik stabilizasyon için yaygın olarak kullanılan bir tuzdur. Singh and Das (1999) tarafından yapılan bir araştırmada, CBR, serbest basınç mukavemeti ve dolaylı çekme dayanımı gibi mühendislik özelliklerinin, zemin iyileştirmede sodyum klorürün kullanılması ile dikkate değer bir şekilde iyileştirildiği sonucuna varmışlardır.

Sulu kireç veya çabuk kirecin düşük plastisiteli kil (CL) veya yağsız kil üzerindeki etkisini bulmak için Beckham and Hopkins (1997) tarafından bir araştırma yapılmıştır. Araştırmada, ağırlıkça %2 ile %10 arasında değişen beş farklı kireç oranı belirlenerek deneylere tabi tutulmuştur. Serbest basınç değerleri incelenmesinde, 7 günlük kürlenme döneminde %0-2 oranında artış meydana gelmiştir. Zemin stabilizasyonu için optimum kireç içeriğinin %2 olduğu belirtilmiştir.

Lo and Wardani (2002), %2 çimento ve %4 F sınıfı uçucu kül katkılı siltin özellikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda katkı maddelerinin eklenmesiyle, daneler arasında bağların oluşarak serbest basınç mukavemetinin arttığı ortaya konmuştur.

Lorenzo and Bergado (2004) yapmış oldukları çalışmada Bangkok'un kıyı ve alçak bölgelerinde bulunan killere çimento katarak, kil zemini iyileştirmeye çalışmışlardır.

Çalışma sonunda çimento içeriği ve kürlenme süresinde artış ile birlikte serbest basınç değerlerinde artış meydana geldiği belirtilmiştir.

Kavak ve Bilgen (2005), yaptıkları çalışmada bentonit kiline belli oranlarda yüksek fırın cürufu ve kireç ilave ederek serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Ağırlıkça %5 oranında yüksek fırın cürufu ve %7,5 oranında kireç karışımlı numunenin 28 günlük kür süresi sonunda katkısız numuneye göre yaklaşık 25 kat daha fazla yük taşıdığı gözlemlenmiştir.

Süt (2006), yaptığı çalışmada Ankara Çukurambar semtinden aldığı zemin numunesine %2, %4, %6 ve %8 oranlarında kireç karıştırıp kıvam limitleri deneylerini yapmış, artan kireç yüzdelerine göre likit limitte azalma, plastik limitte artış gözlemlemiştir. Buna bağlı olarak plastisite indisinde düşüş ve %2 üzerindeki kireç katkılarında zeminin non-plastik davrandığını belirlemiştir. Kompaksiyon ve CBR deneyleri sonucunda çalışmada kullanılan numunenin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için ağırlıkça optimum kireç yüzdesinin %3-4 arasında olduğunu belirlemiştir.

Türköz (2006), yaptığı çalışmada Eskişehir Meşelik kili üzerinde farklı iki sıkıştırma enerjisinde, farklı katkı oranlarının şişmeye olan etkisini incelemiş, standart proktor ve modifiye proktor enerjisinde yapılan şişme deneylerinde yüksek sıkışma gösteren modifiye proktor deneyinin şişme yüzdesinin fazla olduğunu ayrıca kireç katkısının serbest şişme yüzdesinin kontrolünde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

Çakılcıoğlu (2007), çalışmasında %10 sabit kireç oranı ile bentonit kiline %5-10-15-20-25 oranlarında uçucu kül ve zeolit eklemiş ve bu numuneler üzerinde özgül ağırlık, likit limit ve plastik limit, kompaksiyon, serbest basınç, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi, CBR deneyi ve kesme kutusu deneyleri yaparak karışım oranlarının etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler neticesinde uçucu kül, kireç ve kil ile stabilitesi istenen zeminlerin temel tabakası olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Aytekin (2009), illit ağırlıklı Almanpınar kiline uçucu kül ilave ederek 1-8-16-32 gün küre bırakılmış numuneler üzerinde konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Uçucu kül ilave edilen numunelerin kesme mukavemeti ve konsolidasyon hızının arttığı; permeabilitenin ise azaldığını ayrıca kür sürelerinin artmasıyla doğru orantılı olarak numunelerin dayanım değerlerinin arttığını belirtmiştir.

Yılmaz and Civelekoglu (2009), bentonit kili üzerinde katkı kullanarak iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında alçı taşı bentonit ile karıştırmışlardır. Karışımları optimum su içeriğinde standart olarak sıkıştırdıktan sonra bir haftalık kür uygulamışlardır. Hazırladıkları numunelerin şişme potansiyelini ölçmüş ve serbest basınç deneyleri uygulamışlardır. Çalışmaların sonucu olarak, yüksek plastisiteli kil (CH) grubu killerin iyileştirilmesinde alçı taşının kullanımının uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Kızılçelik (2010), yaptığı çalışmada yüksek plastisiteli Uzunçiftlik kiline sönmüş ve sönmemiş kireç katkıları ekleyerek deney yapmış, serbest basınç mukavemetlerinin kür süreleriyle doğru orantılı olarak arttığını, deformasyonların azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca yaptığı CBR deneylerinde doğal katkısız numune ile %5 kireç katkılı numuneyi kıyasladığında %5 kireç katkılı numunenin doğal numuneye göre CBR değerinin yaklaşık 5 kat arttığını, şişme miktarının ise 2,75 mm'den 0,45 mm'ye indiğini gözlemlemiştir.

Tüylüce (2010), yaptığı çalışmada Bursa ilinin Gemlik mevkisinden alınmış olan deniz kiline %5 oranında kireç ilave etmiştir. Saf deniz kiline oranla %5 kireçli deniz kilinin CBR değerlerinde yaklaşık olarak beş kata kadar artış ve şişme potansiyelinde altı kata kadar azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca kompaksiyon deneyleri sonucunda saf deniz kiline oranla %5 kireçli deniz kilinin dayanımında standart kompaksiyon için yaklaşık olarak yedi kat, modifiye kompaksiyon için yaklaşık olarak dört kat artış gözlemlenmiştir.

Aydın (2010), sönmüş kireç ve uçucu kül kullanarak Ankara-Yenikent yerleşim alanındaki killerin geoteknik özelliklerindeki iyileşmeyi incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda kireç katkısının söz konusu bölgede bulunan CH killerin stabilitesinde uçucu küle göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. %7 kireç katkısının bölgedeki killerin iyileştirilmesinde optimum oran olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, şişme özelliklerine olan etki incelendiğinde ise uçucu külün çok az bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Kalay (2010), çalışmasında pomza, mermer ve kireç katkılı yüksek plastisiteli bir kil üzerinde deneyler yaparak her bir katkının ideal oranlarını belirlemiştir. Daha sonra bu ideal oranlı karışımlara ikinci bir katkı malzemesi olarak pomza, mermer tozu veya kireç ilave ederek deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, yüksek plastisiteli kile katkı olarak %6 oranında kireç ilave edildiğinde en yüksek serbest basınç mukavemetine ulaşıldığı görülmüştür. %30 ideal pomza katkısına farklı oranlarda mermer tozu veya kireç katarak yaptığı deneylerde ise kireçli karışımlarda daha yüksek serbest basınç mukavemeti elde edildiğini belirtmiştir.

Sarialioğlu (2010), yaptığı çalışmada Ulubey T1 tünel güzergâhındaki (Ordu - Ulubey) yol üstyapı tabanında yer alan bentonit kili üzerinde iki farklı katkı olarak yüksek kalsiyumlu kireç ve Consolid444+Solidry (C+S) malzemeleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda CBR değerleri açısından her iki katkı da oldukça iyi artış oranlarına ulaşırken, (C+S) katkısından daha yüksek sonuçlar alınmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne uygun bir üstyapı taban malzemesi oluşturması açısından, %7 oranında kireç katkısı yeterli olmuştur. %2 oranında (C+S) katkısının da likit limit, plastik limit ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı kriterleri dışında, stabilizasyon şartlarını sağladığını belirlemiştir. Her iki katkının artan oranlarıyla kür edilen zeminin serbest basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre, kohezyon değerlerinin benzer derecelerde azaldığı ve içsel sürtünme açısı değerlerinin de arttığı görülmüştür. Ancak yapılan deneyler ve maliyet analizi değerlendirildiği zaman kireç ile stabilizasyonun daha ekonomik olduğu belirtilmiştir.

Bilgen (2011), yaptığı çalışmada saf bentonitin serbest basınç mukavemeti 260 kPa iken %7,5 kireç ve %5 cürufun katkı olarak kullanıldığında 28 günde serbest basınç mukavemetinin 5000 kPa değerini aştığını ayrıca birim deformasyonların ise %10-15 mertebelerinden %1-2'lere düştüğünü gözlemlemiştir.

Bilgen vd (2012), yaptıkları çalışmada kirecin deniz suyu ile birlikte bentonit kilinin mukavemet değeri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sırasında, bentonit kili, kireç ve deniz suyu ile hazırlanan numuneler, standart kompaksiyon ile sıkıştırıldıktan sonra 0, 1, 7 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Çeşme suyu ve deniz suyu ile hazırlanan numuneler 28 gün sonra serbest basınç deneyine tabi tutulduğu zaman deniz suyu ile elde edilen mukavemet değeri çeşme suyuna göre yaklaşık 2 kata varan artış göstermiştir. Buna ilave olarak kireç, deniz suyu ve bentonit ile birlikte kullanıldığı zaman 28 gün sonunda mukavemet değerinin 7 kat arttığını tespit etmişlerdir.

Akcanca vd (2012), yaptıkları çalışmada sızdırmazlık amaçlı kullanılabilen bentonitin kumlu ve kireçli karışımlarının kompaksiyon ve kayma direnci parametrelerini incelemişlerdir. Bentonite karışım ağırlığının %50, %60, %70 ve %80 oranlarında kum ve her bir kum karışımı için %0, %1, %2 ve %3 oranlarında kireç katılmasıyla hazırlanan numuneler üzerinde kompaksiyon ve kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, kum bentonit karışımlarına kireç ilavesiyle optimum su muhtevasının arttığını ve maksimum kuru yoğunluğun azaldığını, karışımdaki bentonit oranı arttıkça kohezyonun arttığını ve içsel sürtünme açısının azaldığını gözlemlemiştir.

Kamal (2012), yaptığı çalışmada İstanbul Beylikdüzü'den alınan yüksek plastisiteli bir kil üzerinde iki farklı granülometriye sahip numune hazırlamıştır. Bu numunelere %20 uçucu kül ve %3 kireç ve %40 uçucu kül ve %3 kireç ilave ederek farklı ufalama seviyesine bağlı olarak sönmüş kireç ve uçucu külün zemin üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deney sonuçları neticesinde, ince granülometriye sahip numune iri granülometriye sahip numuneye göre daha iyi iyileşme özelliği göstermiştir. Ayrıca deney sonuçları %20 uçucu kül + %3 kireç ve %40 uçucu kül + %3 kireç ilavesi ile çok

etkin iyileştirme sağlandığını göstermektedir. Sadece uçucu kül ve sadece kireç kullanıldığı takdirde bu seviyede iyileştirme sağlanmadığı tespit edilmiştir.

Sharma *et al.* (2012) düşük plastisiteli kili (CL) stabilize etmek için, kile C sınıfı uçucu kül ve kireç katmışlardır. Yapılan çalışmada %20 oranında uçucu kül ve %8,5 oranında kireç katkısı uygun görülmüştür. Uçucu kül ve kireç karışımı ilavesi ile serbest basınç mukavemetinde 1,6 kat, CBR değerlerinde %5,7 artış meydana geldiği belirtilmiştir.

Çimen vd (2013), çalışmalarında bor oksit barındıran kolemanit mineralini kullanarak bentonitin mukavemet özellikleri üzerinde inceleme yapmışlardır. Bentonit kiline %2, %4, %8 ve %10 ağırlıkça oranlarda kolemanit katılmıştır. Serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri sonucunda elde edilen veriler ışığında maksimum serbest basınç mukavemetinin, katkı oranı %2 olan grupta meydana geldiği ortaya konmuştur. Ayrıca, katılan kolemanit miktarını artırdıkça şişme basıncında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

1.2.2. Polimer kullanılarak yapılan zemin iyileştirme

Rauch *et al.* (2002), polimer ilavesinin etkisinin olup olmadığını tespit etmek amacıyla, beş tip zemin üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Zemin üzerinde meydana gelen değişiklikleri incelemek için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde kaolinit, illit, montmorillonit, iki adet yüksek plastisiteli doğal kil ve üç farklı kimyasal sıvı kullanmışlardır. Mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri ölçmek için standart laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan polimerlerin özelliklerine yer verilmezken yapılan deney sonuçları sunulmuştur. Polimerlerin kullanılan kil numunelerinin mühendislik özelliklerinde tutarlı değişiklikler meydana getirmediği sonucuna varmışlardır.

Geiman (2005), yumuşak killi zeminin daha kolay işlenilebilmesi için sentetik sıvı polimer stabilizatörlerinin etkisini çalışmışlardır. Enviroseal M10-2001® şirketinden temin ettikleri polimerlerin kimyasal yapısı belirtilmemiştir. Hem geleneksel hem de

geleneksel olmayan stabilizatörler eklenerek Virginia bölgesinden üç farklı zemin türü üzerinde çalışmışlardır. Alınan zemin örneklerinin CL, CH ve SM (düşük plastisiteli kil, yüksek plastisiteli kil ve siltli kum) zemin sınıfına ait olduğunu belirtmişlerdir. Sıvı polimerler içeren geleneksel olmayan stabilizatörlerin, kireç, çimento gibi geleneksel stabilizatörler kadar etkili olmadığını vurgulamışlardır.

Tingle *et al.* (2007), geleneksel olmayan stabilizatörlerle ilişkili fiziksel ve kimyasal bağ olgusunu daha iyi anlayabilmek için Polietilen Vinil Asetat Kopolimer ile iyileştirilmiş killi zeminler üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Kaolinit kili üzerinde yapılan polimer iyileştirmesinin X ışını kırınım testi (XRD) ve Taramalı elektro-mikroskop (SEM) analizi yapmışlardır. Kaolinit kilinin söz konusu polimerler katılarak 7 günlük kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç deneyi sonucuna göre %3 ila %9 oranında mukavemetinin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca yüksek plastisiteli kil grubuna ait Sodyum Montmorillonit kil numunelerinde ise %2 ile %5 oranında serbest basınç mukavemetinde artış olduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum Montmorillonit numuneleri üzerinde yapılan 7 günlük kürlenme ile serbest basınç mukavemetinin %3 ile %6 oranında arttığı belirtilmiştir. Bu bulgular ışığında söz konusu polimer emülsiyonları ile işleme tabi tutulan 7 günlük kürlenmiş kil numunelerinde serbest basınç mukavemetinde anlamlı bir artış gözlenmediği sonucuna varılmıştır.

Naeini *et al.* (2012), İran'da bulunan yumuşak kile katyonik sıvı polimer katarak zemin iyileştirme çalışması yapmıştır. Ayrıca, polimer katkısı yanı sıra %10 ve %20 oranlarında bentonit ile karıştırılmış yumuşak killer de deneylere tabi tutulmuştur. Belirlediği %0, %2, %3, %4 ve %5 ağırlıkça yüzdelerde ve belirli kür sürelerinde (0, 2, 4, 6, 8 ve 14 gün) serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde optimum polimer katkısının %4 olan numunede meydana geldiği belirtmişlerdir. Ayrıca, plastisite indeksinde artışla birlikte serbest basınç değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür.

Anjaneyappa (2013), Hindistan (Bangalore)'deki yerel zemin üzerinde çalışmış ve zemini SC (killi kum) olarak sınıflandırmıştır. Zeminde ağırlıkça %0,5, %1,0 ve %1,5

oranlarında eklenen polimer katkısının önemli bir değişiklik meydana getirmediğini vurgulamıştır. Ancak polimer oranının artışının taşıma gücünü artırdığı ortaya konmuştur.

Anagnostopoulos *et al.* (2014), suda çözünebilen iki tür epoksi reçine kullanarak siltli zeminin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Serbest basınç, çekme dayanımı, kayma mukavemeti parametreleri, elastisite modülü ve uzun süreli mekanik davranış deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda reçine miktarına bağlı olarak mukavemet parametrelerinde iyileşme olduğu belirtilmiştir.

Nowamooz (2016) yapmış olduğu çalışmada yüksek plastisiteli bir kile poliüretan katarak stabilizasyona olan etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu koni penetrasyon, basınç ölçme deneyleri sonucuna göre poliüretan katkısının zeminin yük karşısında gösterdiği direnci önemli oranda artırdığı ortaya konmuştur.

Kurt Albayrak vd (2016) çalışmalarında hidrofob organokilin mukavemet özelliklerini iyileştirmek amacıyla stiren akrilik katkısı kullanmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde stiren akrilik kopolimer katkısının doğal killerin ve hidrofob organakillerin serbest basınç mukavmetlerini artırdığı, şişme basıncı değerlerini azalttığı belirlenmiştir.

Hamidi and Marandi (2018), killi zeminler üzerinde yapılan iyileştirmelerde kullanılan çimento ve kirecin dayanım özelliklerinde belirli bir artış sağlamadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, yumuşak killi zeminlerin dayanım parametrelerini arttırmak için yeni katkı maddeleri kullanmanın gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu amaçla, yumuşak killi zeminlerin stabilizasyonu için çimento ve epoksi reçinesi kullanmışlardır. Deneylere tabi tutulan killi zemin örnekleri bentonit ve kaolinittir. Örnekler üzerinde bir dizi mikro yapı ve makro yapı deneyi yapılmıştır. Sonuçlara göre, epoksi reçinenin kullanılmasının, dayanım parametrelerini 100 ile 1000 kat artırdığını belirtmişlerdir. Bu durumda epoksi reçine ile stabilizasyonun önemli ve belirgin olarak zayıf zeminler için kullanılabilir olduğunu vurgulamışlardır.

Saygılı (2018), yapmış olduğu çalışmada sıvı haldeki polimerik metil difenil izosiyanat polimerini kaolin kiline farklı oranlarda katarak serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değışimleri incelemiştir. Çalışmada %3, %6, %9 ve %12 oranlarında 3,7,14 ve 28 günlük kür uygulanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Mukavemette, polimer katkı oranının ve kür süresinin artmasıyla kayda değeri miktarda artışlar olduğu tespit edilmiştir.

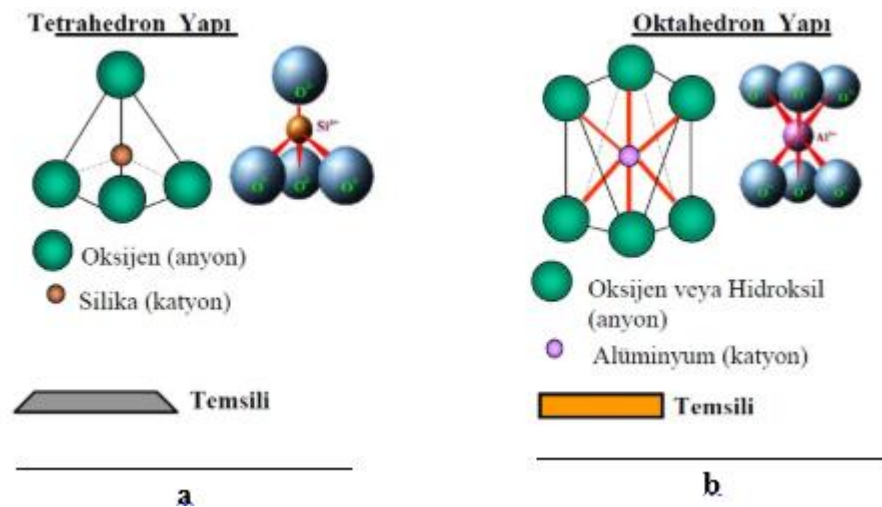


2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Killer

Killer, taneleri 0,002 mm veya daha küçük boyuta sahip hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan ikincil minerallerdir. Su ile temas etmesi halinde plastik özellik kazanan killer, pişirildiğinde yapısı bozularak daha dayanımlı bir yapı kazanırlar. Killerin su ile teması halinde şişme (hacimsel artış), kurutulduğunda ise büzülme (hacimsel azalış) meydana gelmektedir. Bu durum geoteknik mühendisliği açısından dikkat edilmesi gereken özellikleri arasında yer almaktadır.

Kil mineralleri, iki, üç veya dört levhadan oluşmaktadır. Bu levhalar iki levhali mineraller, bir silis levhası (tetrahedral - dört yüzlü) ve bir oktahedral (sekizyüzlü) levhadan oluşmaktadır. Tetrahedral silis levhasının ve oktahedral tabaka yapısının basitleştirilmiş çizimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Üç levhaya sahip kil mineralleri ise, iki silis levhası arasına sıkışmış dioktahedral (tabaka katyonu iki değerlikli: Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+}) veya trioktahedral (tabaka katyonu üç değerlikli: Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}) levhadan oluşur. Dört levhali mineraller, 2:1 tabaka + bir tabaka arası hidroksit levhasından oluşur (Ünsal 2007).



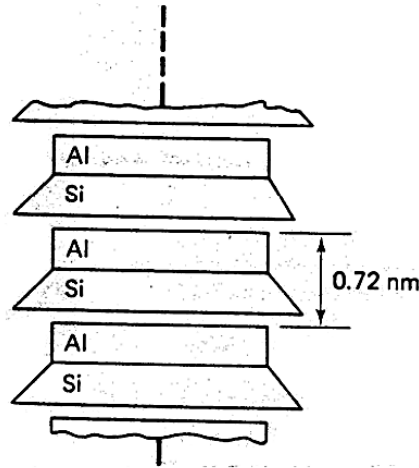
Şekil 2.1. Silis levhasının yapısı (a), Alüminyum levhasının yapısı(b) (Grim 1968)

Kil mineralleri başlıca üç ana gruba ayrılır (Holtz and Kovacs 1981);

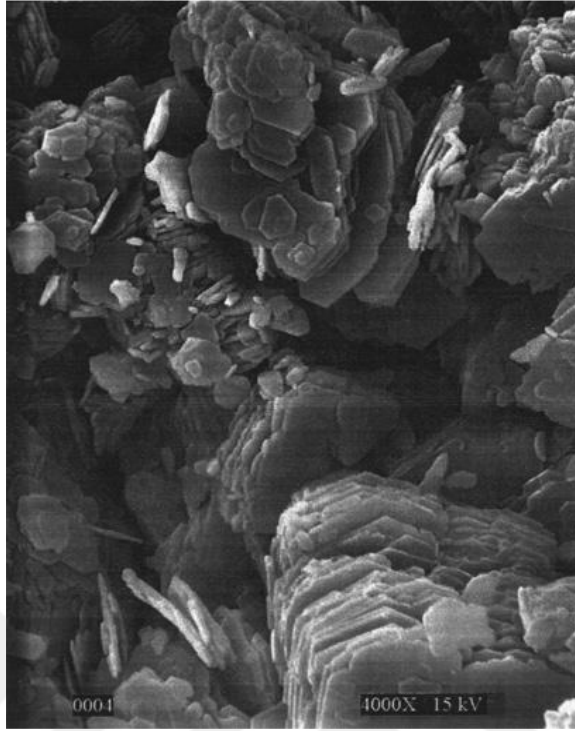
- a) Kaolinit Grubu Kil Mineralleri
- b) İllit Grubu Kil Mineralleri
- c) Smektit (Montmorillonit) Grubu Kil Mineralleri

2.1.1. Kaolinit mineralleri

Mağmatik kayaçların feldispatların ayrışması sonucunda meydana gelen kaolinit mineralleri, ayrışmanın olduğu yerlerde saf kaolinit yatakları meydana getirirler (Ünsal 2007). Yapısal formülü $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ olan kaolinit mineralleri, bir alümina ve bir silika levhasından oluşmaktadır. Hidrojen ve Van der Waals kuvvetleri ile bloklar birbirine bağlanmıştır. Bu bağlar, bloklar arasına suyun girmesini önleyecek kadar kuvvetli olup, şişme özellikleri oldukça azdır (Mitchel and Soga 2005; Ünsal 2007). Bu durum kaolinit killerinin su ile teması halinde stabilitelerini bozmamaktadır. Kaolinit grubu kil minerallerinin temsili genel yapısı Şekil 2.2'de, tipik bir kaolinitin elektron mikroskobuyla (SEM) çekilen görüntüsü Şekil 2.3'de verilmiştir.



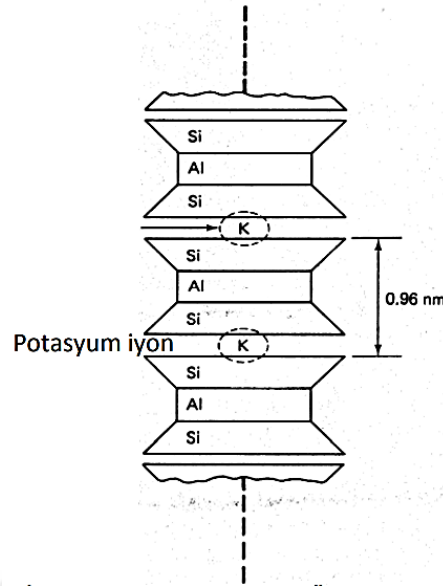
Şekil 2.2. Kaolinit grubu minerallerin yapısı (Önalp 1997)



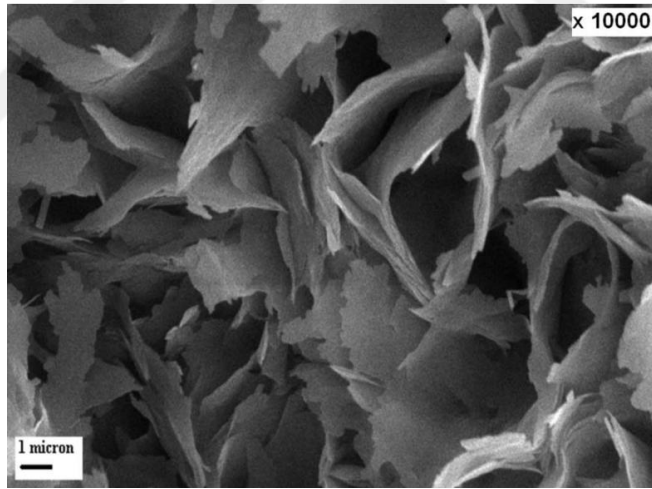
Şekil 2.3. Kaolinit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü (Murray 2007)

2.1.2. İllit mineralleri

Yeryüzünde sıklıkla karşılaşılan illit minerali, tabakalar arasında potasyum elementi tarafından sağlanan bağ sayesinde tabakaların bir arada durmasını sağlayan yapıya sahiptir (Ünsal 2007). Şekil 2.4’de illit mineralinin yapısı ve Şekil 2.5’de SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.4. İllit grubu minerallerin yapısı (Önalp 1997)

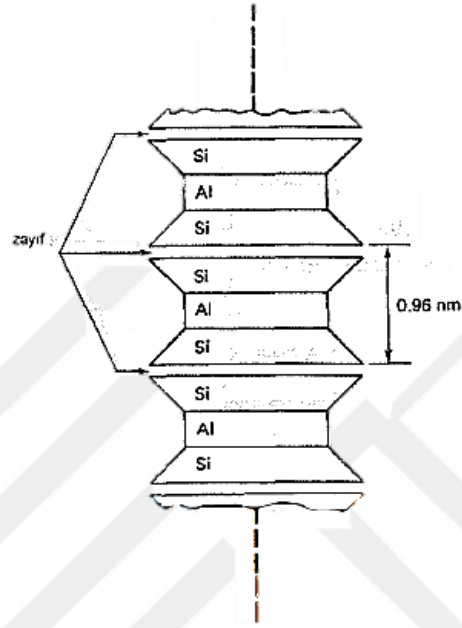


Şekil 2.5. İllit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü (Gualtieri *et al.* 2008)

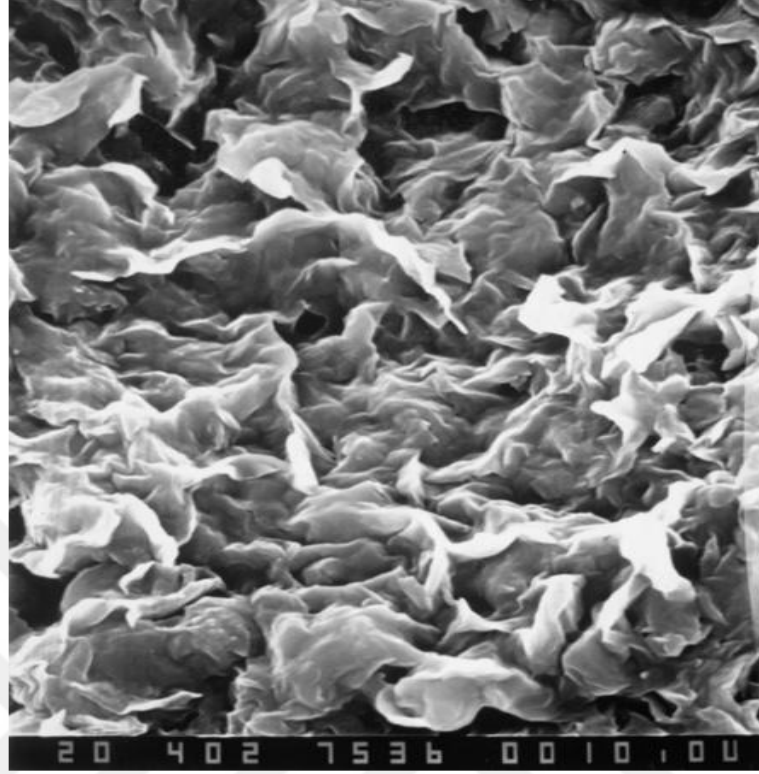
2.1.3. Smektit mineralleri

Smektit mineralleri, iki silis levhası arasına sıkışmış oktahedral levhadan oluşan yapıya sahiptir (Şekil 2.6). Kimyasal bileşimleri, $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$ şeklindedir. Tabakalar arası bağlar, Van der Waals kuvvetlerinden ve yapıdaki yük eksikliğini dengelemek için bulunan katyonlardan ileri gelmektedir. Bu bağlar zayıf olup su veya

diğer polar sıvıların adsorbsiyonu ile kolaylıkla kırılabilir. Bu nedenle smektit mineralleri çok yüksek hacim artışları gösterirler. Şekil 2.7’de smektit mineralinin SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.6. Smektit minerallerin genel yapısı (Önalp 1997)



Şekil 2.7. Montmorillonit minerali elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü (Murray 2007)

Volkanik küllerin, tüflerin ve lavların ayrışması sonucu oluşan, alüminyum ve magnezyumca zengin olan içerisinde büyük oranda montmorillonit (smektit) minerali bulunan killere bentonit denilmektedir. Bentonit ilk defa 1888 yılında ABD'nin Wyoming eyaletinde Fort Benton yakınlarında bulunmuş ve 1898 yılında Knight tarafından bu isimle adlandırılmıştır (Grim 1962). Genel kimyasal formülü $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$ olup plastikliği yüksek, yumuşak, kuvvetli kolloidal özellik gösteren, kolaylıkla şekil verilebilen bir kildir. Ticari tanımlama ise; suyla temas ettiğinde şişme özelliği gösterebilen, asitle aktiflendirilmiş, yüzey alanı geniş olan bir kil minerali şeklindedir (İpekoğlu 1997). Bentonitler doğada gri, beyaz, pembe, yeşil gibi çeşitli renklerde bulunurlar. Bentonit içerisinde kaolin, illit gibi doğal killerin dışında jips, dolomit, kalsit, kuars ve volkanik kül gibi kil dışı minerallerde yer almaktadır (Grim 1962). Çizelge 0.1'de kil minerallerinin bazı özellikleri verilmiştir. Çizelge 2.2'de ise montmorillonite ve kaolinite ait plastik limit ve likit limit değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kil minerallerine ait bazı özellikler (Mitchell and Soga 2005)

Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Tane Boyutu (μm)	0,5-5,0	0,02-2,0	0,01-1,0
Tane Şekli	6 köşeli pul	Pul	Eş boyutlu yaprak
Dış Yüzey Alanı (m^2/g)	10-30	70-100	70-120
İç Yüzey Alanı (m^2/g)	-	-	550-650
Plastisite	Düşük	Orta	Yüksek
Likit Limit	29-70	60-120	110-710
Plastisite indisi	26-38	34-60	51-100
Kohezyon	Düşük	Orta	Yüksek
Şişme Kapasitesi	Düşük	Orta	Yüksek
Elektrik Yükü	0	1,0-1,5	0,5-0,9
KDK (meg/100g)	3-15	10-40	80-150
Özgül Ağırlık	2,6-2,8	2,6-3,0	2,35-2,7
Tabakalar atası mesafe (nm)	0,7	1,0	1,0-2,0
Tabakalar arası bağ	Hidrojen	Potasyum iyonları	Van der Waal's bağları (zayıf çekim kuvveti)
Net negatif yük (cmol/kg)	2-5	15-40	80-120

Çizelge 2.2. Montmorillonit ve kaolinite ait likit limit ve plastik limit değerleri (Bergaya and Yuan 2019)

Özellik	Kaolinit	Montmorillonit
Likit Limit	30-110	100-900
Plastik Limit	25-40	50-100

2.2. Zemin İyileştirme

Geoteknik mühendisliğinde, yapı yükünü taşıyan yüzeysel temellerin yetersiz olması durumunda, zemin taşıma gücünün yetersiz olması durumunda, sıvılaşma ve oturma

problemlerinin olması durumunda zemin iyileştirme yöntemlerine ve derin temel tasarımına başvurulmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temel tasarımlarından daha ekonomik ve uygulanabilirlik açısından avantajlı olması nedeniyle tasarımda alternatif olarak uygulanmaktadır (Öntürk 2011; Gaafer *et al.* 2015).

Zemin iyileştirme yöntemlerinde, zeminin tek bir özelliği değil birçok özelliği iyileştirilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri, zeminin taşıma gücünü artırmak, sıvılaşma problemini azaltmak ve zemin kayma mukavemetini artırmak gibi birçok özelliğin iyileştirilmesini amaçlamaktadır (Gaafer *et al.* 2015).

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanırken, zeminin türü, maliyet, yeraltı suyunun durumu, iyileştirme alan ve derinliği gibi faktörler göz önünde bulundurularak amaca yönelik iyileştirme yöntemi seçilmektedir (Alpyürür 2016). Zemin iyileştirme yöntemleri literatürde birçok farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Fakat genel olarak sınıflandırmak istenirse katkısız ve katkılı yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1. Katkısız zemin iyileştirme

Bu zemin iyileştirme yöntemi genel olarak ve yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Katkısız zemin iyileştirme yöntemi, zemin değiştirme, kompaksiyon, ön konsolidasyon, düşey drenler, taş kolonlar dahil birçok teknik kullanılarak gerçekleştirilebilir (Gaafer *et al.* 2015).

Zemin değiştirme; Zemin koşullarını iyileştiren en eski ve en basit yöntemlerden biridir. Temel koşul, zayıf zeminlerin (Örn. Organik zeminler ve orta veya yumuşak kil) kum, çakıl veya kırma taş gibi malzemelerle değiştirilmesiyle zeminin iyileştirilmesidir. Eğer zemin dolgu zemin ise hemen hemen her zemin kullanılabilir. Zeminler, değiştirme tabakası olarak kullanıldığında, sıkıştırılması diğerlerinden daha zor olabilir (Salam 2007).

Yüzeysel temel altında değiştirilen zeminin kullanılması, konsolidasyon oturmasını azaltabilir ve zemin taşıma kapasitesini artırabilir. Daha ekonomik olması ve inşaat için daha az zaman kaybına neden olmasından dolayı diğer tekniklere ve derin temellere göre daha avantajlı olduğu söylenebilir (Gaafer *et al.* 2015).

Kompaksiyon; Bu yöntem yüzeysel ve derin olmak üzere 2 şekilde uygulanmaktadır. Her ki yöntemde de zeminin yüzeyine darbe, titreşim gibi etkilerle zeminin yüzeysel ve derin kısımlarında zeminin özelliklerini iyileştirmesi amaçlanmaktadır. Kompaksiyon, kohezyonsuz iri ve düşük plastisiteli ince daneli zeminler için etkili bir yöntemdir (Alpyürür 2016). Kompaksiyon, zemin dayanımının artmasına, oturmaların azalmasına, drenaj ve geçirimsizlik koşullarının uygun hale gelmesinde etkili bir yöntemdir (Al 2018).



Şekil 2.8. Dinamik kompaksiyon (Coduto *et al.* 2015)

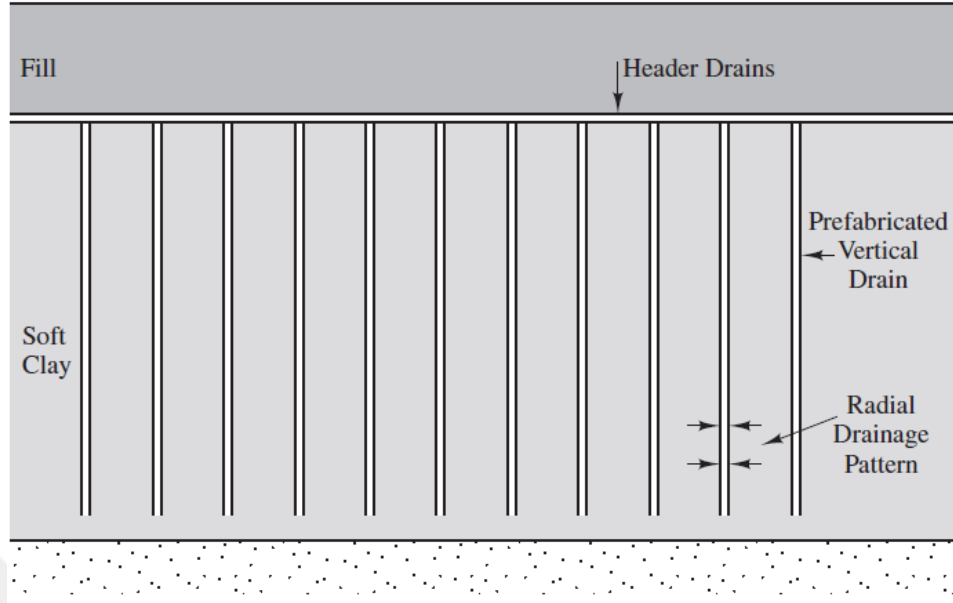
Ön konsolidasyon: Ön konsolidasyon veya ön yükleme tekniği ile basitçe yapının inşaatından önce zemin üzerine ek dolgular yerleştirilerek zeminin büyük konsolidasyon oturmalarının önceden gerçekleşmesi sağlanarak zeminin yapı yükleri altında daha az oturması sağlanmaktadır. Yeterli konsolidasyon gerçekleştikten sonra, dolgu

kaldırılabilir ve inşaat işlemi gerçekleşir. Genel olarak, bu teknik killi zeminlerde yeterli ve etkili olmaktadır (Stapelfeldt 2006).



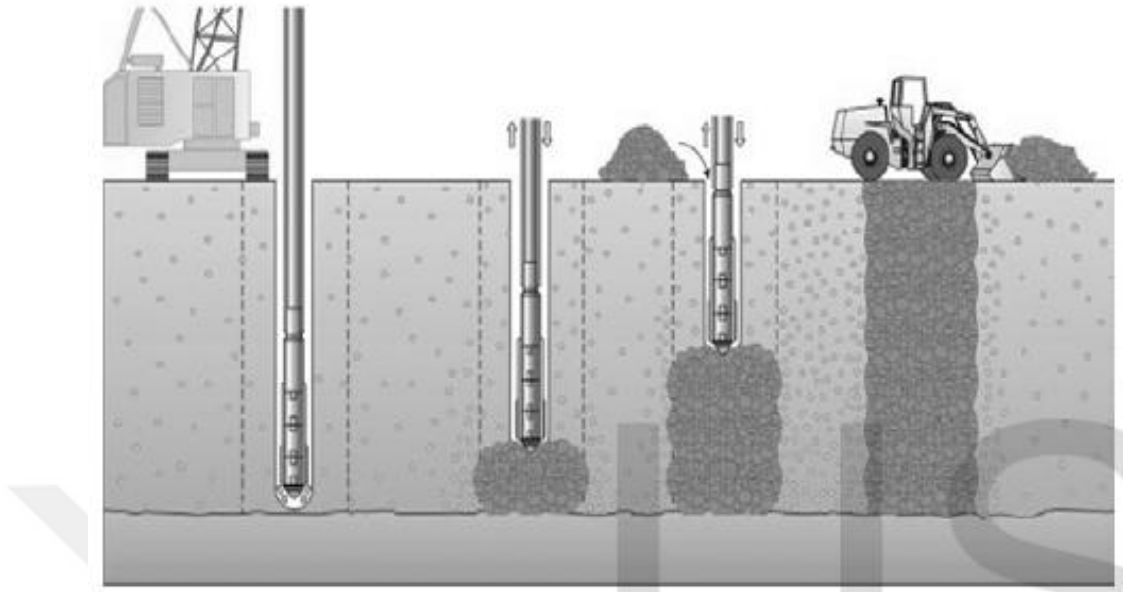
Şekil 2.9. Ön konsolidasyon (Coduto *et al.* 2015)

Düşey drenler: Düşey drenajlar, geçirimsiz zeminlerin drenajını hızlandırmak için ek bir yük altında drenajların yüklendiği eşsiz bir tekniktir. Drenler suyun zeminden uzaklaşması için daha kısa bir yol sağlar. Bu nedenle, kil katmanlarını drene etmek için süre uzun yıllarda birkaç aya kadar azaltılabilir. Genel olarak düşey drenaj tipleri kum drenajları ve prefabrik düşey drenajlardır (Gaafer *et al.* 2015).



Şekil 2.10. Düşey drenlerin kullanılması (Coduto *et al.* 2015)

Taş kolonlar: Taş kolonlar, kayma mukavemetini arttırmak, aşırı oturmaları azaltmak ve gözenek suyu akışı için yatay drenaj yollarını kısaltarak konsolidasyonu hızlandırmak için kohezif zeminlerde yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Wang 2009). Taş kolonlar, çevresindeki zeminlere ek kayma mukavemeti sağlayan granül yapısı nedeniyle kum drenajlarından daha çok tercih edilir. Yükler zemini çevreleyen taş kolonlara aktarılarak oturmaların daha az olması sağlanır (Gaafer *et al.* 2015). Şekil 2.11’de taş kolon yöntemi görülmektedir.



Şekil 2.11. Taş kolon imal aşamaları (Gaafer *et al.* 2015)

2.2.2. Katkılı zemin iyileştirme

Zemin iyileştirme yöntemi, zeminin taşıma gücünü artırmak ve zemin danelerini birbirine bağlayarak oturma problemini azaltmak için yaygın olarak kullanılır. Zemin iyileştirme yönteminde katkı maddeleri veya harçlar, gereken iyileştirmeyi sağlamak için zeminle karıştırılır. Katkılı zemin iyileştirme yöntemi birçok katkı malzemesi ile gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda verilecektir.

Çimento ile iyileştirme; Çimento, 1960’larda zemin iyileştirme yöntemlerinin icadından bu yana en eski bağlayıcı maddedir. Yeterli miktarda ilave edilmesi şartıyla, geniş bir zemin aralığını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Kil içeriği arttıkça, zeminin toz haline getirilmesi ve işlenmesi zorlaşır ve sertleşmesi için daha fazla miktarda çimento eklenmelidir. Çimento reaksiyonu zemin minerallerine bağlı olmayıp herhangi bir zeminde bulunabilecek suyla olan reaksiyonudur (Gaafer *et al.* 2015).

Kireç ile iyileştirme; Zeminin kireç ile iyileştirilme yöntemi çimento ile yapılan iyileştirmeye göre daha yavaş ve daha düşük dayanım kazandırır. Zeminin kireç ile

iyileştirilmesi kilin su içeriğindeki bir azalmaya, pH'daki (daha fazla alkali) bir artışa, plastik limitindeki bir artışa, plastisite indisindeki bir düşüş ve büzülme kabarma potansiyelindeki bir azalmaya eşlik eder. Kireç kil parçacıkları etrafındaki elektrostatik alanı etkiler ve topaklanma ve daha granüler bir yapıya bürünme eğiliminde olur. Kil-kireç karışımı 700 ile 1400 kPa arasında serbest basınç mukavemeti ve 200 ila 3000 MPa arasında modüllere sahiptir. Kireç ile iyileştirme genellikle kaldırım temel tabakalarını iyileştirmek için kullanılır. Şekil 2.12'de kireç ile iyileştirme işlemi görülmektedir (Briaud 2013).



Şekil 2.12. Kireç ile iyileştirme (Briaud 2013)

Uçucu kil ile iyileştirme; Zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi günümüzde giderek daha popüler bir alternatiftir. Uçucu kül, kömürle çalışan elektrik enerjisi üretim tesislerinin bir ürünüdür; kireç ve çimento ile karşılaştırıldığında az çimentolu özelliklere sahiptir. Uçucu küllerin çoğu ikincil bağlayıcılardır. Bu bağlayıcılar istenen etkiyi kendi başlarına veremezler. Bu nedenle, kili iyileştirmek için uçucu kül kullanılması genellikle kireç veya çimento ile uyumlu olmalıdır (Makusa 2012).

Zemin iyileştirme yöntemleri genel olarak yukarıda ifade edildiği şekilde olmaktadır ve diğer yöntemler ise genel olarak zemine kimyasal katkı maddelerinin eklenmesi, ısıtma yöntemleri ve enjeksiyon yöntemleri olarak uygulanmaktadır.

2.3. Zeminlerde Donma-Çözülme

Zeminler mevsim koşullarından mekanik ve fiziksel olarak etkilenmektedir. Soğuk iklime sahip bölgelerdeki zeminler yılda birkaç kez donma-çözölmeye maruz kalmaktadırlar. Bu durum zeminlere ait taşıma gücü, geçirimsizlik gibi birçok özelliğı etkileyebilmektedir. Bu nedenle inşası düşünölen zeminlerde donma çözölme olayına dikkat edilmesi gerekmektedir.

2.3.1. Donma-çözölmenin zeminlerin mukavemetine etkisi

Zeminlerde suyun bulunması donma anında hacim artışına neden olmaktadır. Bu da zeminlerin özellikle ince daneli zeminlerin, bünyelerinde fazla miktarda su barındırmalarından dolayı donma çözölme olaylarından çok fazla etkilenmesine yol açmaktadır. Donma-çözölme tekrar sayısının artması zeminlerde yapısal çatlaklar oluşmasını artırmaktadır (Andersland and Ladanyi 1994). Bu çatlaklar zeminin mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir.

İnşaat Mühendisliğı alanında gerek üst yapı gerekse altyapı çalışmalarında donma çözölme olayı sonrasında zemin üzerinde bulunan yükler, donma-çözölme önemli oranda etkileyebilmektedir.

Zeminler yük altında veya yüksüz durumda iken donma çözölme maruz kalması halinde çevrim sayısına bağılı olarak farklı davranışlar sergileyebilmektedirler. Literatürde zeminin donma-çözölme maruz kalması sonucunda ortaya çıkan olumsuzluklara çözüm bulabilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Nitekim, Wang *et al.* (2007) Qinghai-Tibet Demiryolu Projesi'nde killi bir zemin üzerinde farklı gerilmeler

(200, 400, 600 ve 800 kPa) altında ve 1, 3, 5, 7, 10, 15 ve 21 donma-çözülme çevrim sayısı kullanılarak 3 eksenli basınç deneyleri yapmıştır.

Serbest basınç mukavemeti üzerine donma çözülmenin etkisi incelendiğinde literatürde yapılan çalışmalarda zeminin herhangi bir yük altında olmadığından artan çevrim sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemetinde azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Ghazavi and Roustae (2010) tarafından yapılmış olan çalışmada 1, 3, 5 ve 10 donma çözülme çevrimi sonrasında kil numunesinin serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Donma-çözülme öncesi serbest basınç mukavemeti ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerine bakıldığında zaman donma çözülmenin serbest basınç mukavemetinde azalma meydana getirdiği görülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında temin edilen bentonit, kaolin kili ve bu killerin iyileştirilmesi için kullanılan poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik polimerlerinin özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1. Bentonit kili (B)

Deneylerde kullanılan doğal kalsiyum (Ca) bentonit kili yüksek plastisiteli (CH) bir kildir. Bentonit, Çankırı iline bağlı Şabanözü ilçesi Çapak köyü mevkinde bulunan bentonit kil yatağından alınıp Karakaya Bentonit San. Ve Tic. A.Ş. firması tarafından kuru ve öğütülmüş olarak hazırlanan 50 kg'lık torbalarda temin edilmiştir (Şekil 3.1). Bentonitin fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği firmadan temin edilmiş ve bazı geoteknik özellikleri ise Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Bentonitin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de, kimyasal içeriği Çizelge 3.2'de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.3'de verilmiştir. Bentonitin dane birim hacim ağırlığı 27,3 kN/m³ olarak bulunmuştur (ASTM D 854).



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan bentonit kili

Çizelge 3.1. Bentonitin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	İşlem Görmemiş Bentonit API 13 A Bölüm 10 ve TS EN ISO 13500 Bölüm 10 Standartları	Test Sonuçları
Nem (%)		10
Elek analizi(200 mesh)	4 max	1,95
Dispers Plastik Viskozite (PV)	10 min	14
(Akma Noktası / Plastik Viskozite)	1.5 max	0,5
Dispers Halinde Süzüntü hacmi	12.5 max	11
600 devir/ dakika Fan viskometre okuması		4e

Çizelge 3.2. Bentonitin kimyasal içeriği

Bileşen	Oranı
SiO ₂	%61,28
Al ₂ O ₃	%17,79
Fe ₂ O ₃	%3,01
CaO	%4,54
Na ₂ O	%2,70
MgO	%2,10
K ₂ O	%1,24
Kızdırma Kaybı	%7,34

Çizelge 3.3. Bentonit kilinin bazı geoteknik özellikleri

Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)	Zemin grubu*
459	87	372	CH

*Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre

3.1.2. Kaolin kili (K)

Deneylerde kullanılan kaolin kili düşük plastisiteli (CL) bir kildir. Kaolin, Balıkesir iline bağlı Sındırgı ilçesi Mumcu köyü mevkinde bulunan kaolin kil yatağından alınıp Utelka Deri Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. tarafından kuru ve öğütülmüş olarak hazırlanan 50 kg'lık torbalarda temin edilmiştir (Şekil 3.2). Kaolin kilinin kimyasal içerikleri firmadan temin edilmiş ve bazı geoteknik özellikleri ise Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kaolin kilinin kimyasal içeriği Çizelge 3.4'de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.5'de verilmiştir. Kaolin kilinin dane birim hacim ağırlığı 26,3 kN/m³ olarak bulunmuştur (ASTM D 854).



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kaolin kili

Çizelge 3.4. Kaolin kilinin kimyasal içeriği

Bileşen	Oran
SiO ₂	%69,10
Al ₂ O ₃	%15,20
Fe ₂ O ₃	%0,20
CaO	%0,10
Na ₂ O	%0,03
K ₂ O	%11,07
CR ₂ O ₃	%0,01
SO ₃	%4,29

Çizelge 3.5. Kaolin kilinin bazı geoteknik özellikleri

Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)	Zemin grubu*
49	26	22	CL

*Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre

3.1.3. Polimerler

Polimer, çok sayıda küçük molekülün kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu makromoleküldür. Monomer adı verilen küçük moleküller uygun koşullarda polimerizasyon tepkimesi sonucu birbirleriyle kimyasal bağ yaparlar ve polimer moleküllerine dönüşürler (Saçak 1998). Bentonit ve kaolin kilinin stabilizasyonunu sağlamak için katkı olarak kullanılan polimerlerin (stiren akrilik, epoksi reçine, poliüretan) özellikleri bu bölümde verilmiştir.

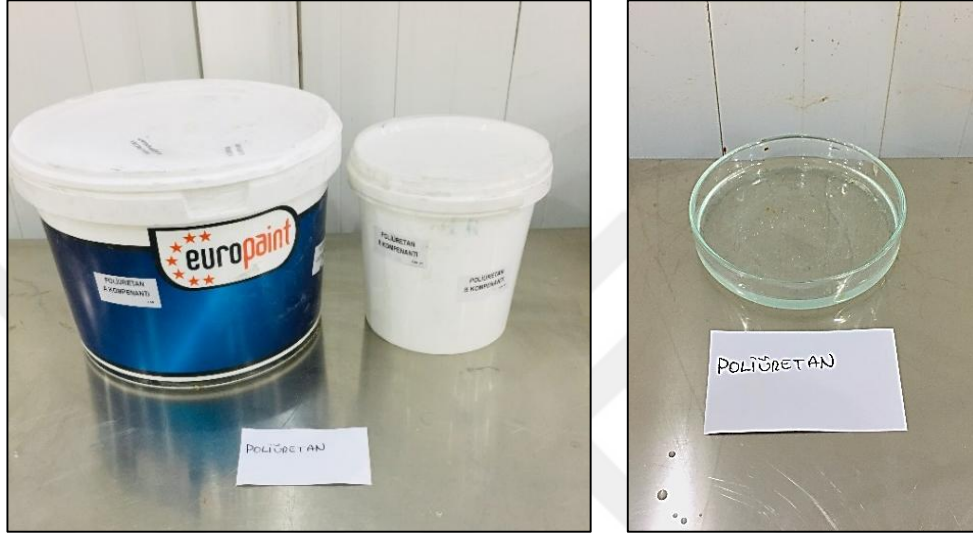
Poliüretan: Poliüretan, izosiyanat (NCO gruplu polimer) ve poliyol (polialkol, OH gruplu polimer) gruplarının polimerizasyonu ile elde edilir. Örneğin diizosiyanat ile dialkol monomerlerinin polimerizasyonu sonucu bir poliüretan reçinesi elde edilebilir. Farklı izosiyanatlar, poliyoller veya katkı maddeleri kullanılarak değişik özellikte poliüretanlar geliştirilmiştir. Poliüretan 1940'larda keşfedilmiştir. Poliüretan çok farklı malzemelerin üretiminde kullanılan termoset bir polimerdir.

Mühendislikte en önemli kullanım alanları:

- Rijit ve elastik polimer,
- Boya,
- Lif takviyeli kompozit matrisi şeklindedir.

Poliüretan sıvı, katı veya köpük formda üretilebilir. Poliüretanlarda hidrojen bağı vardır ve kristal yapılıdır. Pek çok yumuşak kauçuk benzeri polimer ile blok kopolimer oluşturabilir. Elde edilecek blok kopolimeri termoplastik elastomer malzemelere benzer özellikler gösterir. Ancak termoset olduğu için hem aşınmaya daha dayanıklıdır, hem de daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Poliüretan boya ile metal yüzeyleri korunur, sıcaklık ve neme karşı direnç sağlar. Ahşap yüzeylerin korunmasında poliüretan vernik kullanımı yaygın olarak kullanılır (Anonim 2019).

Deneylerde bentonit kili ve kaolin kilinin stabilizasyonu için kullanılan poliüretan polimeri Şekil 3.3’de, bu polimere ait özellikler ise Çizelge 3.6’da verilmiştir. Poliüretan, üretici firmanın verdiği oranda sertleştirici/poliüretan değeri 0,132 olmak üzere sertleştirici ile birlikte kullanılmıştır.



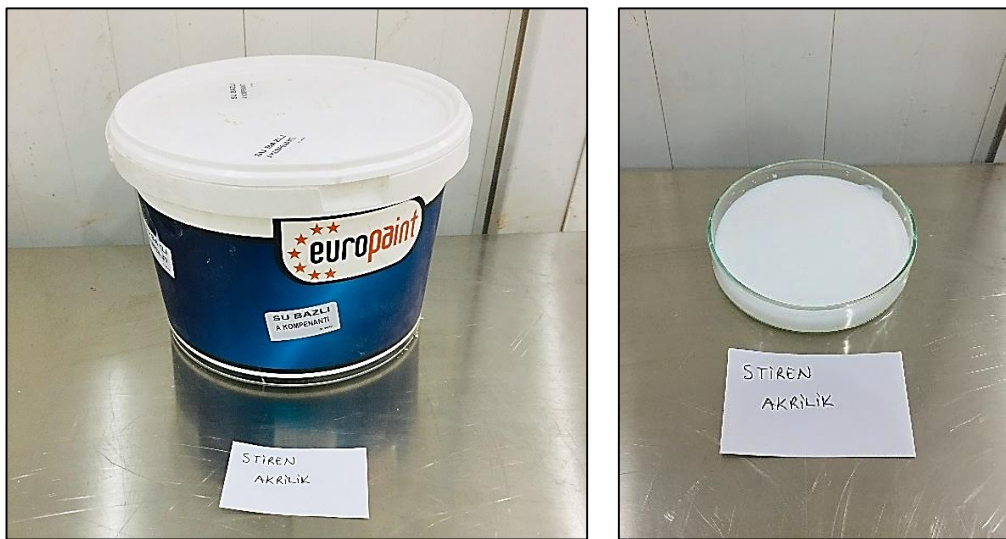
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan poliüretan

Çizelge 3.6. Poliüretanın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Standart
Katı 1/2 h 150 °C)	%	50±1	DIN EN ISO 3251
PH		3.5-5.5	DIN ISO 976
Viskozite Brookfield			
RVDV-II	mPas	1000-5000	DIN EN ISO 2555
MFFT(minimum film oluşturma sıcaklığı)	°C	8± 2	ISO 2115
Yoğunluk	g/cm ³	1.08	ISO 8962
İyonik Yük		Anyonik-Nonyonik	
Film Görünüşü		Berrak ve Parlak	
Cam geçiş sıcaklığı (Tg)	°C	22± 2	DIN 53 765(DSC)

Stiren Akrilik: Stiren akrilik, etil benzenin katalizör ortamında dehidrojenasyonu ile sentezlenir. Stiren, kütle polimerizasyonu, çözelti polimerizasyonu, emülsiyon polimerizasyonu ve süspansiyon polimerizasyonu olmak üzere dört şekilde polimerleştirilebilir. Katyonik metotla stirenin polimerleşmesinden düşük molekül kütleli polistirenler elde edilirken, radikalik metotla stirenin polimerleşmesinden amorf ve büyük molekül kütleli polistirenler elde edilir. Polistiren ilk olarak II. Dünya Savaşı öncesi üretilmiş ve özellikle Almanya ve Amerikada kullanılmıştır. 1970’de polistiren ve stirenin kopolimerlerinden elde edilen plastikler dünyada üretilen plastiklerin %13’ü kadardır. Polistiren zinciri 750–1300 monomer birimden meydana gelen, 100°C’nin altında şeffaf ve katı, 100°C’nin üzerinde yumuşayıp akışkan hale dönüşen ve kolayca kalıplanıp şekillendirilebilen bir polimerdir Stiren akriliğin başlıca kopolimerleri stiren-akrilonitril, stiren-butadien, akrilonitrilstiren-butadien kopolimerleridir. Stiren akrilik aynı zamanda birçok kauçuk ile karıştırılabilir. Bu metotla bazı eksik özellikleri (ısıya ve darbeye karşı az dayanıklı olması) giderilebilir (Deveci 2008).

Deneylerde bentonit kili ve kaolin kilinin stabilizasyonu için kullanılan stiren akrilik polimeri Şekil 3.4’de, bu polimere ait özellikler ise Çizelge 3.7’de verilmiştir.



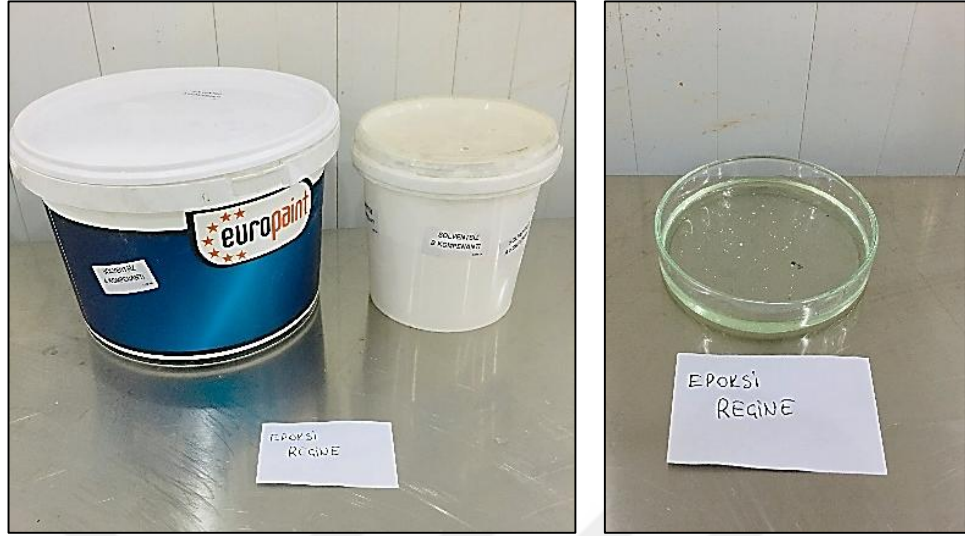
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan stiren akrilik

Çizelge 3.7. Stiren akriliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Standart
Uçucu olmayan içerik, 1 saat / 125°C	%	50±1	DIN EN ISO 3251
pH		<7	DIN EN ISO 3682
Viskozite Brookfield RV DV-II	mPa.s	500-2000	DIN EN ISO 2555
Parlama noktası	°C	25	DIN EN ISO 2719

Epoksi reçine: Epoksi reçine bir dizi kimyasal tepkime sonucu ısıya dayanıklı hale gelen bir polimerdir. Reçine, sertleştiriciler ve reaktif çözücüler gibi diğer katkı maddelerinden meydana gelmektedir. Epoksi reçine güçlü kimyasal ve mekanik özellikleri nedeni ile sanayide en yaygın kullanılan ürünlerdir. Reçinelerin kullanım alanlarının giderek artması hem günlük hayatta hem de bazı meslek kollarında etkilenmeyi beraberinde getirmektedir. Dünyada her yıl 500.000 tondan fazla epoksi reçinesi kullanılmakta olup bunun %40'ı kaplama alanı oluşturmaktadır. Kimyasal yapıları oldukça sert olup, ısıya, soğuğa, suya ve kimyasallara dayanıklı moleküllerdir. Ayrıca metal, plastik, lastik, tahta, cam, seramik, beton yüzeylere ve elektrik yalıtım ekipmanlarına güçlü yapışma özelliği gösterirler. Bu özellikleri nedeniyle sanayide en yaygın kullanılan ürünlerdendir (Aytekin vd 2015).

Deneylerde bentonit kili ve kaolin kilinin stabilizasyonu için kullanılan epoksi reçine polimeri Şekil 3.5'de, bu polimere ait özellikler ise Çizelge 3.8'de verilmiştir. Epoksi reçine, üretici firmanın verdiği oranda sertleştirici/epoksi reçine değeri 0,5 olmak üzere sertleştirici ile birlikte kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan epoksi reçine

Çizelge 3.8. Epoksi reçinenin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Test Metodu
EEW (g/eq)	190-210	KD-AS-001
Viskozite (25°C'de cps)	500-700	KD-AS-005
Hy-Cl (wt.%)	0,05	KD-AS-010
Özgül Ağırlık (20°C)	1,14	KD-AS-040

3.2. Yöntem

Deneyler ve analizlere tabi tutulacak numunelerin hazırlanışı, deney prosedürü ve analizler bu bölümde açıklanmıştır.

3.2.1. Numunelerin hazırlanması

Çalışma kapsamında serbest basınç ve donma çözülme deneyleri için katkılı ve katkısız numunelerin elde edilişi aşağıda verilmiştir. Kullanılan katkılar, killerin optimum su muhtevasında su ağırlığının belirlenen oranlarında (%5, %10, %15, %20) katılmıştır.

3.2.1.a. Katkısız bentonit ve kaolin numunelerinin hazırlanması

Bentonit ve kaolin killeri Çizelge 3.9’da verilen optimum su muhtevası oranlarında su ile karıştırılarak katkısız numuneler elde edilmiştir.

Çizelge 3.9. Katkısız bentonit ve kaolin numuneleri

Numune Grubu	Karışım Oranları	
	Kil (g)	Su (g)
B	120	36
K	120	30

3.2.1.b. Katkılı bentonit numunelerinin hazırlanması:

Bentonit kiline poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkıları Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12’de verilen miktarlarda eklenerek katkılı bentonit numuneleri elde edilmiştir. Karışımlar, üretici firma tarafından önerilen oranlar kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.10. Poliüretan katkılı bentonit numuneleri

Numune Grubu	Karışım Oranları			
	Bentonit (g)	Su (g)	Poliüretan	
			Sertleştirici (g)	Poliüretan (g)
BP5	120	34,2	0,21	1,59
BP10	120	32,4	0,42	3,18
BP15	120	30,6	0,63	4,77
BP20	120	28,8	0,84	6,36

Çizelge 3.11. Epoksi reçine katkılı bentonit numuneleri

Numune Grubu	Karışım Oranları			
	Bentonit (g)	Su (g)	Epoksi Reçine (g)	
			Sertleştirici (g)	Epoksi (g)
BE5	120	34,2	0,6	1,2
BE10	120	32,4	1,2	2,4
BE15	120	30,6	1,8	3,6
BE20	120	28,8	2,4	4,8

Çizelge 3.12. Stiren akrilik katkılı bentonit numuneleri

Numune Grubu	Karışım Miktarları		
	Bentonit (g)	Su (g)	Stiren Akrilik (g)
BS5	120	34,2	1,8
BS10	120	32,4	3,6
BS15	120	30,6	5,4
BS20	120	28,8	7,2

3.2.1.c. Katkılı kaolin numunelerinin hazırlanması:

Kaolin kiline katılan poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik Çizelge 3.13, Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15’de belirtilen yüzdelerde eklenerek katkılı kaolin numuneleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.13. Poliüretan katkılı kaolin numuneleri

Numune Grubu	Karışım Oranları			
	Kaolin (g)	Su (g)	Poliüretan	
			Sertleştirici (g)	Poliüretan (g)
KP5	120	28,5	0,17	1,33
KP10	120	27	0,35	2,65
KP15	120	25,5	0,53	3,98
KP20	120	24	0,7	5,3

Çizelge 3.14. Epoksi reçine katkılı kaolin numuneleri

Numune Grubu	Karışım Oranları			
	Kaolin (g)	Su (g)	Epoksi Reçine (g)	
			Sertleştirici (g)	Epoksi (g)
KE5	120	28,5	0,5	1,0
KE10	120	27	1,0	2,0
KE15	120	25,5	1,5	3,0
KE20	120	24	2,0	4,0

Çizelge 3.15. Stiren akrilik katkılı kaolin numuneleri

Numune Grubu	Karışım Miktarları		
	Kaolin (g)	Su (g)	Stiren Akrilik (g)
KS5	120	28,5	1,5
KS10	120	27	3,0
KS15	120	25,5	4,5
KS20	120	24	6,0

Şekil 3.6’da numune hazırlanışı ve Şekil 3.7’de ise hazırlanan numunelere kür uygulanması görülmektedir. Hazırlanan numunelere deneyler 1 gün ve 7 gün sonunda olmak üzere iki farklı kür süresinde yapılmıştır.



Şekil 3.6. Katkılı numunelerin hazırlanışı



Şekil 3.7. Hazırlanan numunelere kür uygulanması

3.2.2. Kıvam limitleri deneyleri

Kil numuneler üzerinde düşen koni penetrometre metodu ile likit limit (BS 1377), ve plastik limit (ASTM D 4318) deneyleri gerçekleştirilmiştir. 40’nolu elekten geçirilen

numuneler önce saf su ile karıştırılarak yoğurulmuştur. Daha sonra penetrasyon kalıbına yerleştirilmiş ve konik uç 5 sn boyunca numuneye düşürülerek batma miktarı ölçülmüştür. Bu işlem farklı su muhtevalarında 5 kere tekrarlanmıştır. Tekrarlanan numuneler üzerinde su muhtevası için numuneler alınmış ve etüvde kurutularak su içerikleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler ile yatayda su içeriği düşeyde batma miktarı olacak şekilde çizilen grafikte 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.8’de düşen koni penetrometre deney aleti görülmektedir.



Şekil 3.8. Düşen koni penetrometre deney aleti

3.2.3. Harvard mini kompaksiyon deneyi

Kil numuneler ve katkılı kil numunelere ait kompaksiyon parametreleri olan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, Harvard mini kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Kil numunesine su ilave edilerek yoğurulmuş, 71 mm yüksekliğinde ve 32 mm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisine her tabakaya 10’ar vuruş yapılmak suretiyle 5 tabaka halinde sıkıştırma yapılmıştır. Bu işlem kil numunesine su ilave edilerek farklı su içeriklerinde tekrarlanmıştır. Deney

sonucunda yatay ekseninde su muhtevaları, düşey ekseninde kuru birim hacim ağırlıkları yer almak suretiyle çizilen kompaksiyon eğrilerinden numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.9’da Harvard mini kompaksiyon cihazı görülmektedir.



Şekil 3.9. Harvard mini kompaksiyon deney aleti

3.2.4. Serbest basınç deneyi

Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde ASTM D 2166 esas alınarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan katkısız ve polimer katkılı numunelerden 35x70mm boyutlarında 6’şar adet silindirik numune alınmıştır. Numunelerden 3 tanesi 1 gün, 3 tanesi 7 gün kürde bekletilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 3.10’da serbest basınç deney düzeneği gösterilmiştir. Yük hücresi ile yük ölçülürken, potansiyometrik cetvel (LVDT) yardımıyla düşey deplasman değerleri alınmıştır.



Şekil 3.10. Serbest basınç deney aleti

Serbest basınç mukavemeti (q_u): Bağntı 3.1. ile hesaplanmıştır;

$$q_u = P_{\max} / A_f \quad (3.1)$$

3.1. bağıntısında, $P_{\max}$ okunmuş olan en yüksek basınç değerini, A_f zemin numunelerinin kırılma anında sahip oldukları en kesit alanını ifade etmektedir.

3.2.5. Donma-çözülme deneyi

Hazırlanan numuneler donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler alüminyum folyoya sarılarak donma-çözülme cihazında 5 çevrim donma çözölmeye tabi tutulmuştur (Şekil 3.11). Çevrimlerin sonunda numunelere serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Donma-çözölme işlemi için hazırlanmış numuneler cihaza konulduktan sonra ilk sıcaklığı -20°C 'ye getirilmiş ve 6 saat bekletilmiştir, ikinci işlemde sıcaklık $+25^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar getirilmiş ve 6 saat bekletilmiştir (Akbulut and Zaimoğlu 2018). Bu işlem 1. çevrim olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.11. Donma-çözülme cihazı

(a), donma-çözülme cihazında bekletilen alüminyum folyo içerisindeki numuneler (b)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma kapsamında bentonit ve kaolin killeri poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik polimerlerinin katılması ile elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen Harvard mini kompaksiyon, serbest basınç ve donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

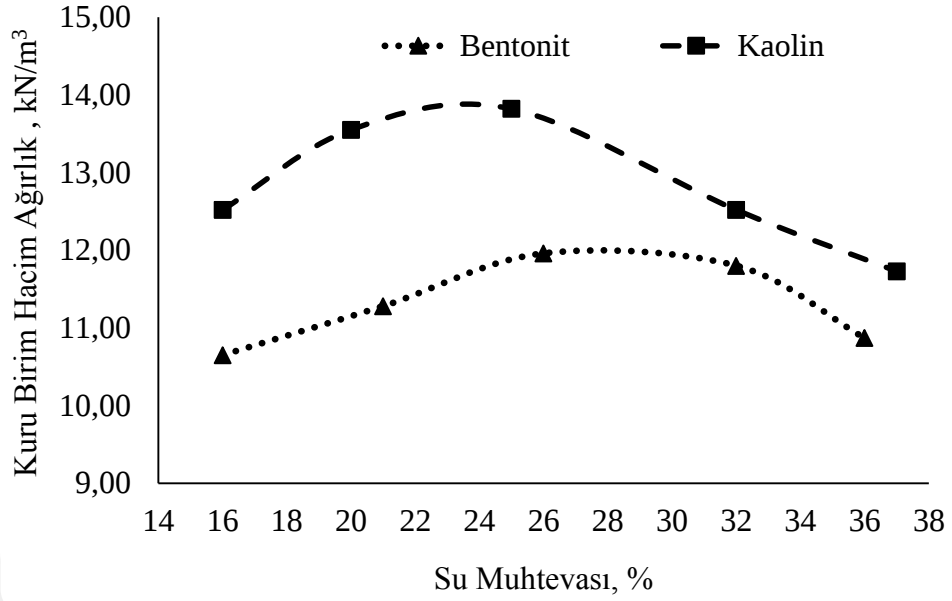
4.1. Harvard Mini Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

Katkısız bentonit ve kaolin kilinin Harvard mini kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kil numunelerin kompaksiyon parametreleri

Numune	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
B	30	11,9
K	25	13,2

Harvard mini kompaksiyon deneyi ile elde edilen veriler ile elde edilen bentonit ve kaolin kiline ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Bentonit ve kaolin kiline ait kompaksiyon eğrileri

4.2. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Katkıların, bentonit ve kaolin killерinin serbest basınç mukavemetine olan etkisi serbest basınç deneyi ile belirlenmiştir. Harvard mini kompaksiyon deney aleti kullanılarak optimum su içeriğinde yapılan sıkıştırma sonucunda elde edilen numuneler 1 ve 7 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bentonit ve kaolin killерine ait 1 gün kür uygulanan katkısız numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Bentonit ve kaolin killерine ait 1 günlük serbest basınç mukavemetleri

Numune	Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)
	1. Gün
B	283
K	307

Şekil 4.2’de 1 gün kürde bekletilen katkısız bentonit ve kaolin kil numunelerinin kırılma şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Bentonit ve kaolin kilinin kırılma şekilleri

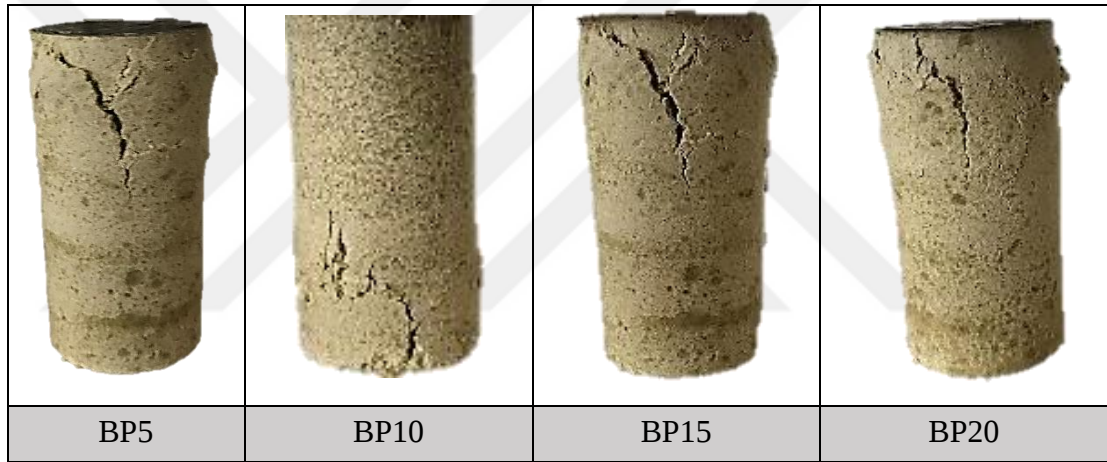
4.2.1. Poliüretan katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları

Bentonit kiline, belirlenen oranlarda poliüretan eklenmesi ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Poliüretan katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
BP5	348	372
BP10	411	486
BP15	442	534
BP20	451	548

Çizelge 4.3'e göre poliüretan yüzdesinde meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Değerler incelendiğinde 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinin 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerlerinde 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerlere göre katkı oranı yüzdelere göre (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %7, %18, %21 ve %22 oranında mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Poliüretan katkılı bentonit numunelerine ait kırılma şekilleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Bir günlük kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri



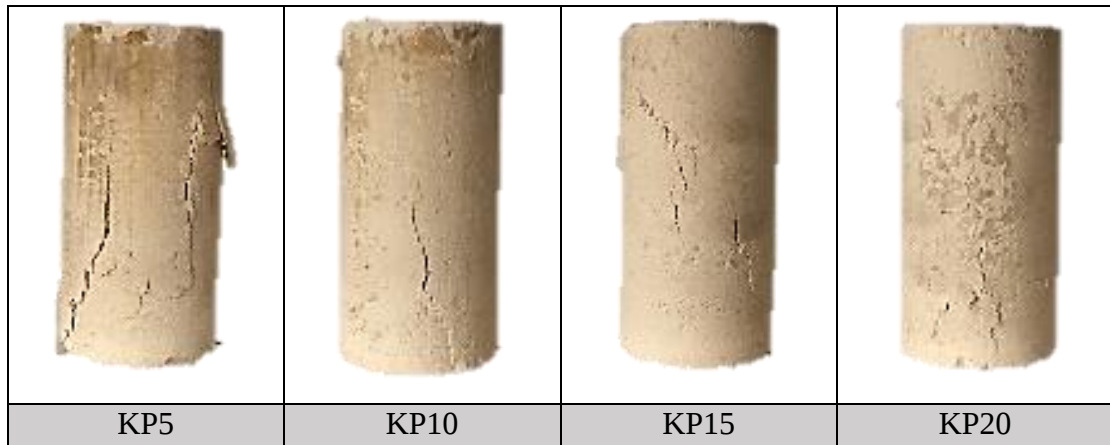
Şekil 4.4. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri

Kaolin kiline poliüretan eklenmesi ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

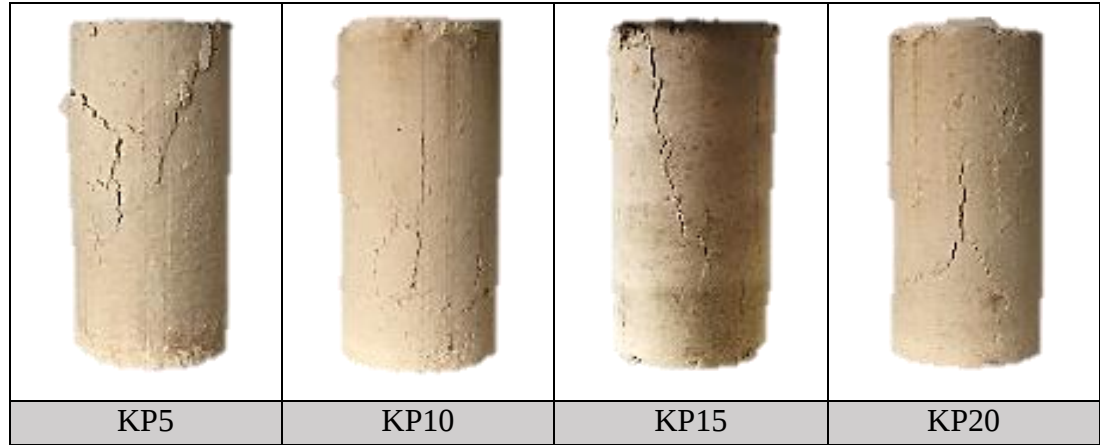
Çizelge 4.4. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
KP5	359	411
KP10	406	443
KP15	446	483
KP20	493	523

Kaolin kiline poliüretan katılması ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Kür süresinin 7 güne çıkarılması halinde serbest basınç mukavemetlerinde artışın devam ettiği belirlenmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerlerinde 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerlere göre katkı oranı yüzdelere göre (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %15, %9, %8 ve %6 oranında mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Poliüretan katkılı kaolin numunelerin serbest basınç deneyi sonrası görülen kırılma şekilleri kür sürelerine bağlı olarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.

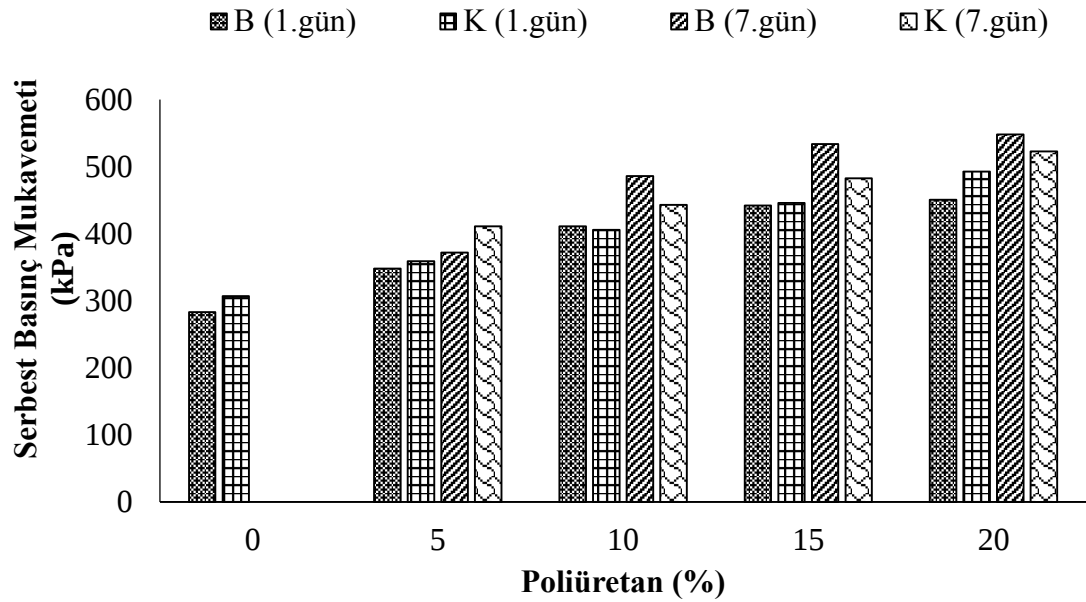


Şekil 4.5. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri



Şekil 4.6. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri

Bentonit ve kaolin kiline eklenen poliüretan katkısı ile serbest basınç mukavemetlerinde katkısız killerin serbest basınç mukavemetlerine göre meydana gelen değişim Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Katkısız ve poliüretan katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri

Bentonit ve kaolin kiline %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilen poliüretan katkısının, katkısız killere göre serbest basınç dayanımında artış meydana getirdiği

görülmüştür (Şekil 4.7). Poliüretan katkısı ile kil türüne bağlı olarak 1 ve 7 günlük kür uygulanması sonucunda serbest basınç mukavemetlerinde, katkısız killere göre meydana gelen artış oranları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Poliüretan katkısının bentonit ve kaolin killерinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiğı değişim

Kil	Poliüretan (%)	Artış Oranı (%)	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	23	31
	10	45	72
	15	56	89
	20	59	94
Kaolin	5	17	34
	10	32	44
	15	45	57
	20	61	70

Çizelge 4.5 incelendiğinde bentonit ve kaolin kiline poliüretan ilave edilmesi sonucu elde edilen numunelere 1 günlük kür uygulanması halinde serbest basınç mukavemetinde sırasıyla, %23 ile %59 arasında ve %17 ile %61 arasında, 7 günlük kür uygulanması halinde sırasıyla, %31 ile %94 arasında ve %34 ile %70 arasında değişen oranlarda artış meydana geldiğı belirlenmiştir.

Saygılı (2018), yaptığı çalışmada yerli üreticilerden temin edilen bir poliüretan çeşidi olan sıvı haldeki polimerik metil difenil izosiyanat polimerinin, kaolin kilinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Polimerik metil difenil izosiyanat sıvı polimeri optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kaolin numuneler içerisine farklı oranlarda eklenerek serbest basınç dayanımlarındaki değişimler değerlendirilmiştir. Sıvı polimer yüzde 3, 6, 9 ve 12 oranlarında numunelere optimum su muhtevasını geçmeyecek şekilde, su ile yer değiştirerek eklenmiş ve hazırlanan polimer katkılı numuneler 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca küre tabii tutulmuşlardır. Kür süresi sonunda farklı katkı oranlarına sahip numuneler serbest basınç testlerine tabii

tutulmuş, polimer katkı oranı ve kür süresi arttıkça dayanımlarda kayda değer miktarda artışlar tespit edilmiştir.

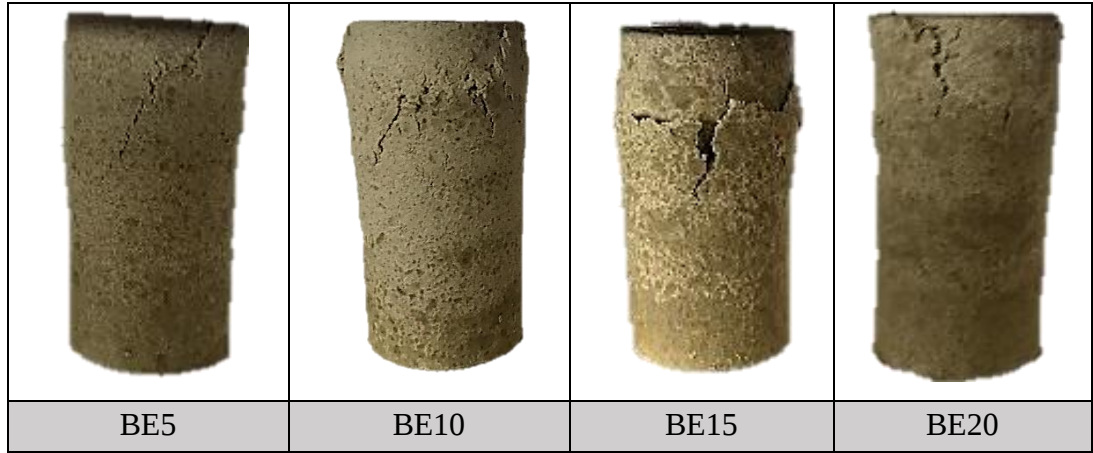
4.2.2. Epoksi reçine katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları

Epoksi reçine katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Epoksi reçine katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
BE5	297	314
BE10	334	346
BE15	340	375
BE20	372	398

Epoksi reçine katkı yüzdesinde meydana gelen artışla birlikte serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinin 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 4.6). 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerlerinde 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerlere göre katkı oranı yüzdelere göre (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %6, %4, %10 ve %7 oranında mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Epoksi reçine katkılı bentonit kili numunelerinin serbest basınç deneyi sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri



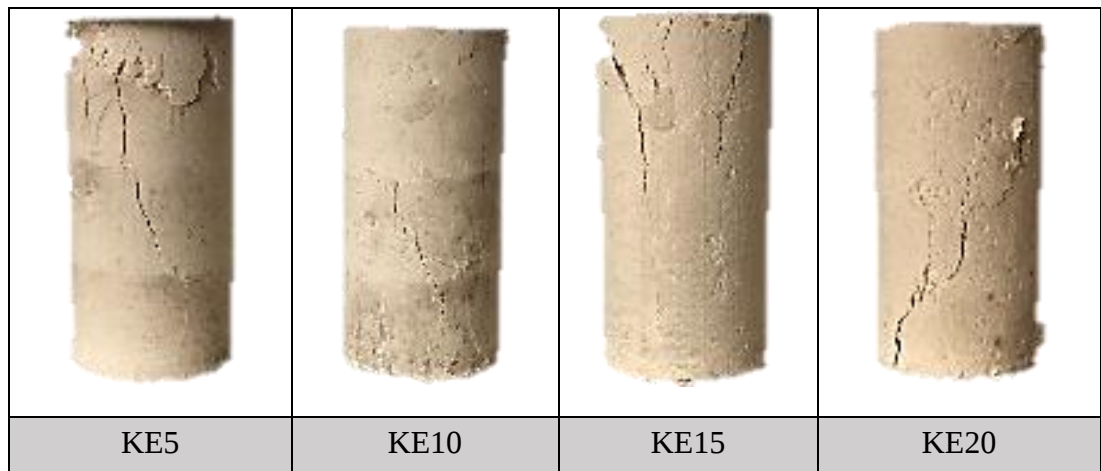
Şekil 4.9. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri

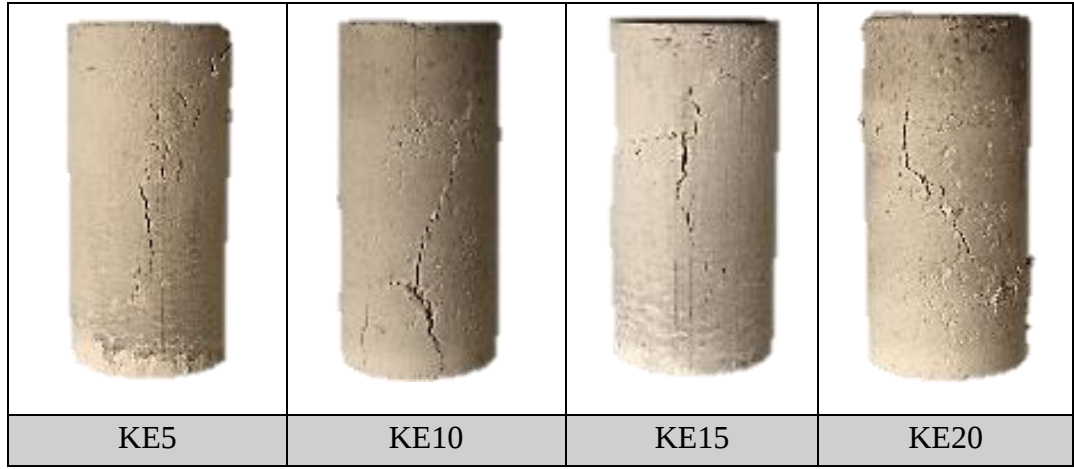
Düşük plastisiteli bir kil olan kaolin kiline epoksi reçine katılmasıyla elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Epoksi reçine katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
KE5	331	361
KE10	338	375
KE15	362	392
KE20	384	405

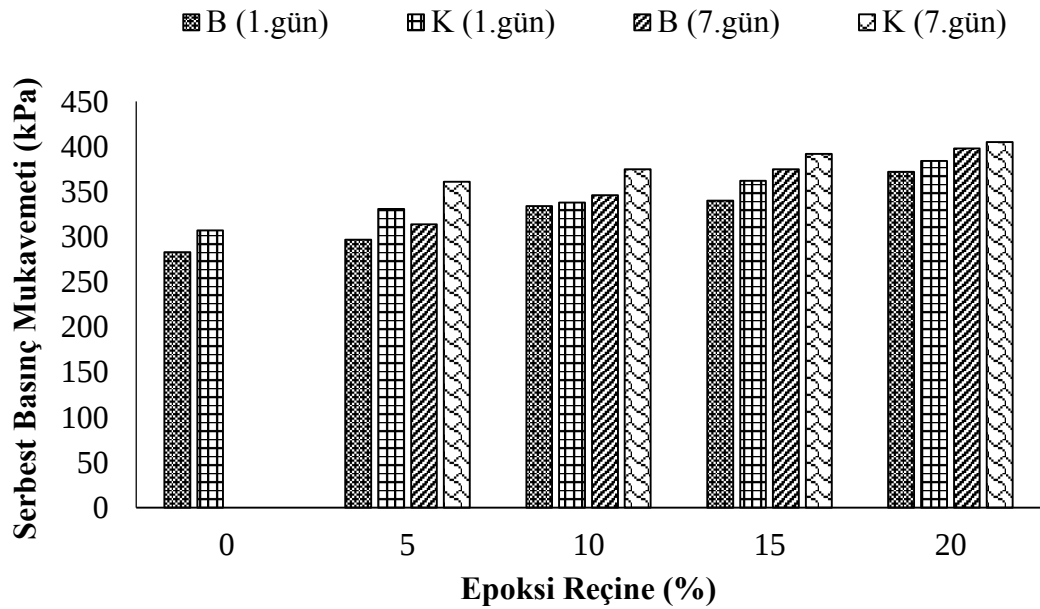
Çizelge 4.7'ye göre epoksi reçine katılarak elde edilen katkılı kaolin numunelerinde katkı oranının artması ile serbest basınç mukavemetinde artış meydana geldiği görülmüştür. 1 ve 7 gün kür uygulanan numunelerde katkı oranına bağlı olarak serbest basınç mukavemetinde artışın devam ettiği görülmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerlere göre katkı oranı yüzdelere göre (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %9, %11, %8 ve %6 oranında artmıştır. Kaolin kiline epoksi reçine ilave edilmesiyle elde edilen numunelere ait serbest basınç deneyi sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

**Şekil 4.10.** Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri



Şekil 4.11. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri

Bentonit ve kaolin kiline epoksi reçine ilave edilmesi ile serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.12’te verilmiştir.



Şekil 4.12. Katkısız ve epoksi reçine katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri

Bentonit ve kaolin killerin serbest basınç mukavemetlerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan epoksi reçine katkısının, killerin serbest basınç mukavemetini artırdığı

görülmüştür. 7 günlük kür uygulanarak serbest basınç mukavemetleri belirlenen numunelerde epoksi reçine katkısının her iki kilin serbest basınç mukavemetinde de artış meydana getirdiği belirlenmiştir (Şekil 4.12). Çizelge 4.8’de epoksi reçine katkısı ile bentonit ve kaolin killerin serbest basınç mukavemetlerinde katkısız killerin serbest basınç mukavemetlerine göre meydana gelen artış oranları görülmektedir.

Çizelge 4.8. Epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin killerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim

Kil	Epoksi Reçine (%)	Artış Oranı (%)	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	5	11
	10	18	22
	15	20	33
	20	31	41
Kaolin	5	8	18
	10	10	22
	15	18	28
	20	25	32

Bentonit ve kaolin kiline epoksi reçine ilave edilmesi sonucu elde edilen numunelere 1 günlük kür uygulanması halinde serbest basınç mukavemetinde katkısız bentonit ve kaolin killere göre sırasıyla, %5 ile %31 arasında ve %8 ile %25 arasında, 7 günlük kür uygulanması halinde ise sırasıyla, %11 ile %41 arasında ve %18 ile %32 arasında değişen oranlarda artış meydana geldiği belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

Hamidi and Marandi (2017), yaptıkları çalışmada epoksi reçinenin bentonit ve kaolin killeri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda epoksi reçinenin bentonit ve kaolin stabilizasyonunda olumlu etki gösterdiğini ve katkı ile beraber mukavemetin arttığını gözlemlemişlerdir.

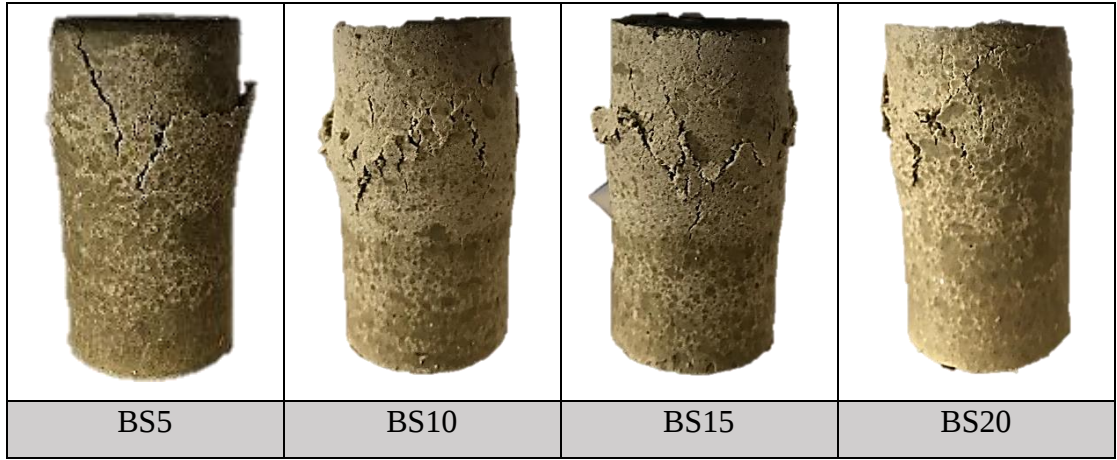
4.2.3. Stiren akrilik katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları

Bentonit kiline stiren akrilik ilave edilmesiyle elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
BS5	298	309
BS10	301	312
BS15	308	330
BS20	369	409

Çizelge 4.9’a göre stiren akrilik yüzdesinde meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Değerler incelendiğinde 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinin 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerler incelendiğinde katkı oranı yüzdelere göre (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %4, %4, %7 ve %11 oranında mukavemet artışı olduğu görülmüştür. Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerine ait serbest basınç deneyi sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’da verilmiştir.



Şekil 4.13. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri



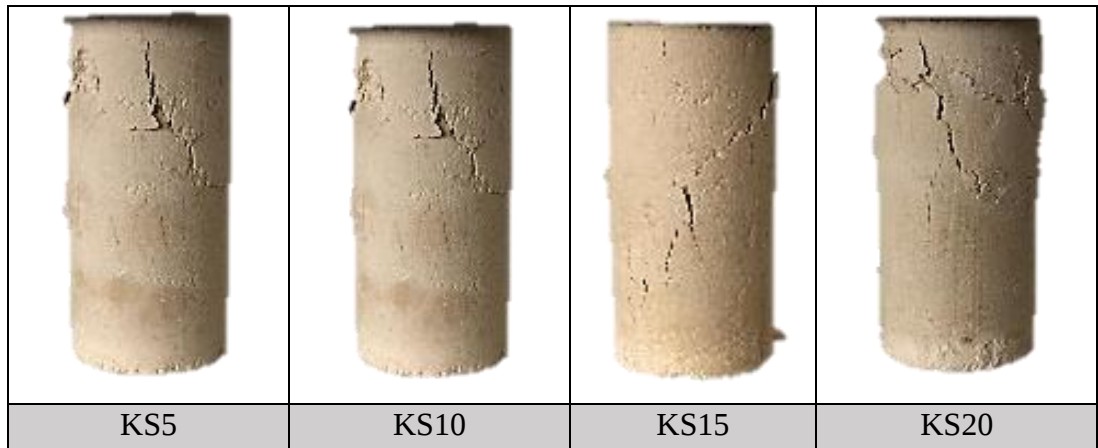
Şekil 4.14. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin kırılma şekilleri

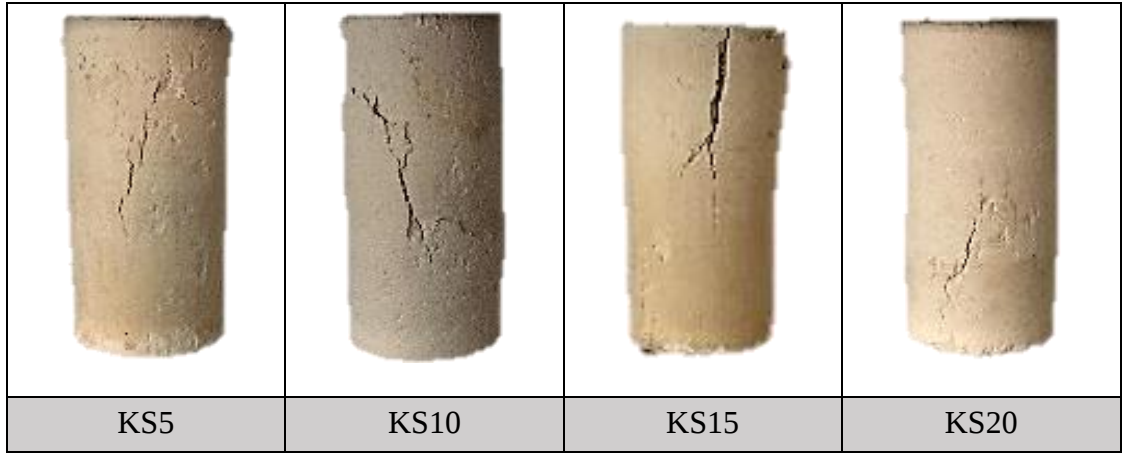
Kaolin kiline stiren akrilik ilave edilmesiyle elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Stiren akrilik katkılı kaolin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	1. Gün	7. Gün
KS5	240	251
KS10	270	284
KS15	280	308
KS20	287	317

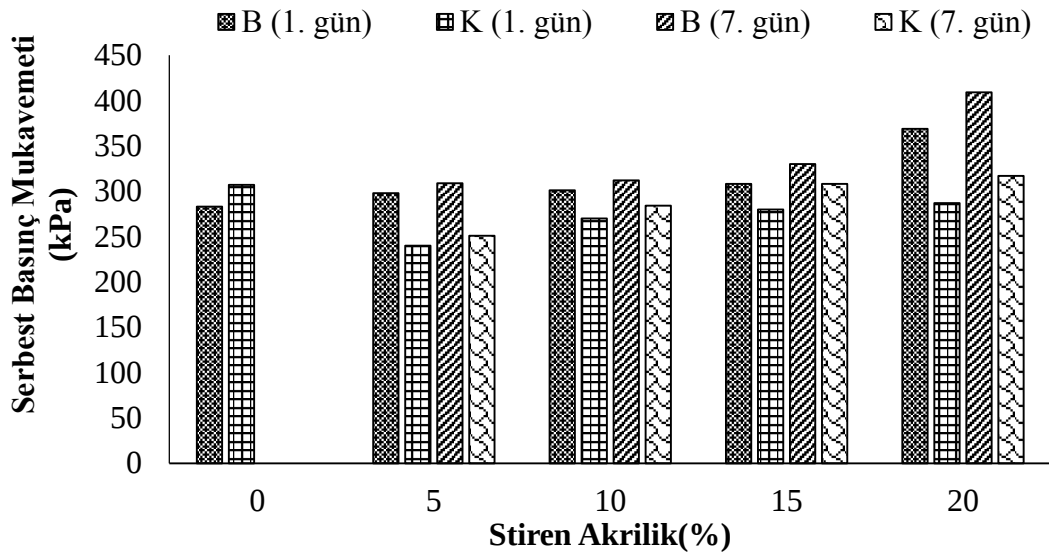
Kaolin kiline stiren akrilik katılması ile elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız kaolin kili ile kıyaslandığında azalmıştır. Ancak, katkı oranı arttıkça, serbest basınç mukavemetinin de arttığı görülmüştür. bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. 7 gün kür uygulanması ile serbest basınç mukavemetlerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir (Çizelge 4.10). 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen değerlere göre katkı oranı yüzdelerinde meydana gelen artışla (%5, %10, %15 ve %20) sırasıyla %5, %5, %10 ve %11 oranında artmıştır. Stiren akrilik katkılı kaolin numunelerine ait serbest basınç deneyi sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.

**Şekil 4.15.** Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri



Şekil 4.16. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin kırılma şekilleri

Bentonit ve kaolin kiline stiren akrilik ilave edilmesiyle numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Katkısız ve stiren akrilik katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri

Bentonit kiline %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilen stiren akrilik katkısının, katkısız bentonitin serbest basınç mukavemetinde artış meydana getirdiği görülmüştür. Kaolin kilinde ise serbest basınç mukavemeti değerlerinde katkısız kaolin kiline göre önce azalma meydana gelmiş, katkı oranının artmasıyla ise artış görülmüştür (Şekil

4.17). Stiren akrilik katkısının kil türüne bağlı olarak 1 ve 7 günlük kür uygulanması sonucunda katkısız kil numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim oranları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Naeini *et al.* (2011), yaptıkları çalışmada su bazlı polimerin killi zeminler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yüksek plastisiteli bentonite (CH) farklı oranlarda (%2, %3, %4 ve %5) polimer katılarak labaratuvar deneyleri yapmışlardır. Artan polimer oranıyla beraber mukavemetinde de artış gözlemlemişlerdir.

Çizelge 4.11. Stiren akrilik katkısının bentonit ve kaolin killerinin serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim

Kil	Stiren Akrilik (%)	Artış Oranı (%)*	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	5	9
	10	6	10
	15	9	17
	20	30	44
Kaolin	5	-22	-18
	10	-12	-8
	15	-9	1
	20	-7	3

*‘ - ’ numunenin serbest basınç mukavemetinde azalma olduğu anlamına gelmektedir.

1 gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit numunelerin 1 günlük serbest basınç mukavemetlerinde katkısız kile göre %5 ile %30 arasında, 7 günlük serbest basınç mukavemetlerinde %9 ile %44 arasında artış meydana gelmiştir. Kaolin numunelerinde ise stiren akrilik katkısı ile 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde katkısız kile göre %7 ile %22 arasında, %5 ve %10 katkılı, 7 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde ise %18 ve %8 oranlarında azalma görülürken, %15 ve %20 katkılı kaolin numunelerde %1 ve %3 oranlarında artış meydana gelmiştir (Çizelge 4.11). Stiren akrilik katkısının düşük plastisiteli bir kil olan kaolinin serbest basınç mukavemetini katkısız kile göre genel olarak azalttığı %15 katkı oranından sonra ise artırdığı söylenebilir.

4.3. Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları

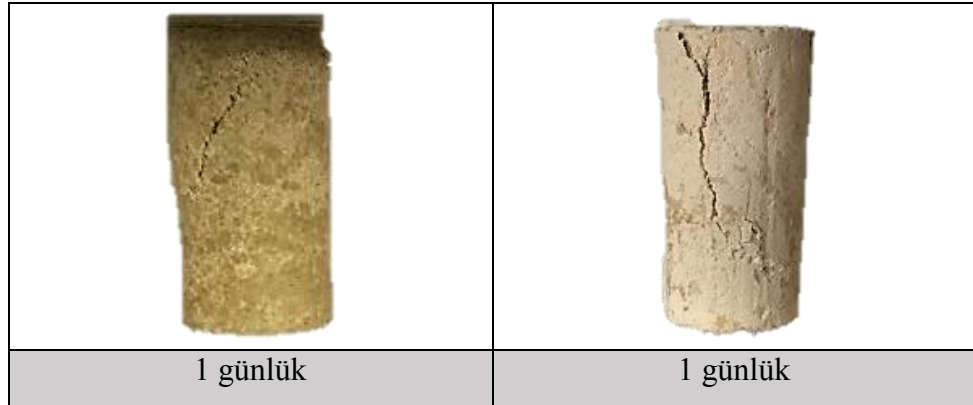
Çalışma kapsamında bentonit kili, kaolin kili ve bu killere poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik polimerlerinin katılması ile elde edilen katkılı numunelerin 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır.

Bentonit ve kaolin killeriine ait 1 gün kürde bekletilen katkısız numuneler üzerinde gerçekleştirilen donma çözülme deneyi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Bentonit ve kaolin killeriine ait 1 gün kürde bekletilen numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

Numune	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Kütle Kaybı (%)
	1. Gün	1. Gün
B	239	0,4
K	286	1,20

1 gün kürde bekletilen bentonit kili üzerinde gerçekleştirilen donma çözülme deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti, donma-çözölmeye maruz kalmamış numunelerin serbest basınç mukavemeti ile karşılaştırıldığında serbest basınç mukavemetinde %16 oranında azalma meydana geldiği görölmüştür. 1 gün kürde bekletilen kaolin kilinde ise donma çözöölme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen azalma %7 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.18’de 1 gün kürde bekletilen bentonit ve kaolin kili numunelerinin donma çözöölme sonrası kırılma şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.18. Bentonit ve kaolin killlerinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri

4.3.1. Poliüretan katkılı numunelere ait donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları

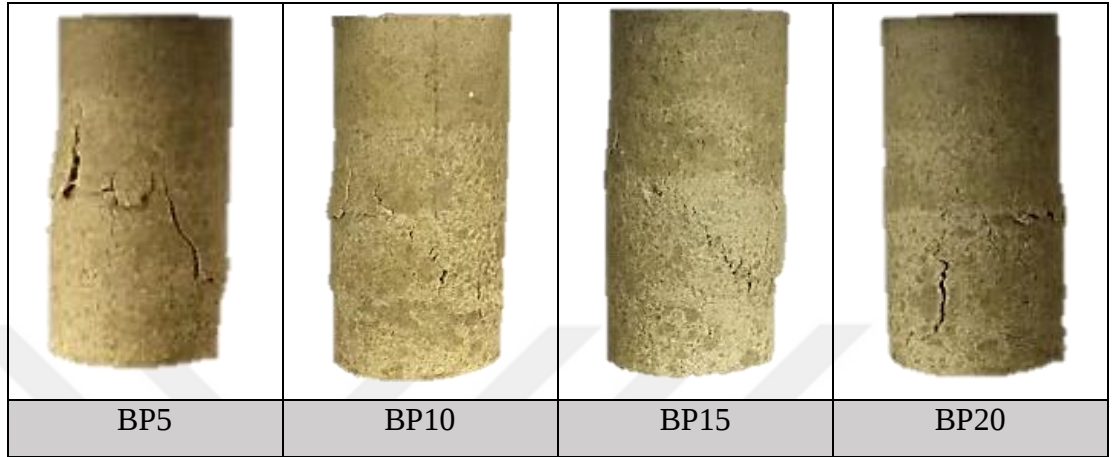
Bentonit kiline poliüretan ilave edilmesi ile elde edilen numunelerin 5 çevrim donma çözölmeye tabi tutulması sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Poliüretan katkılı bentonit numunelerinin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

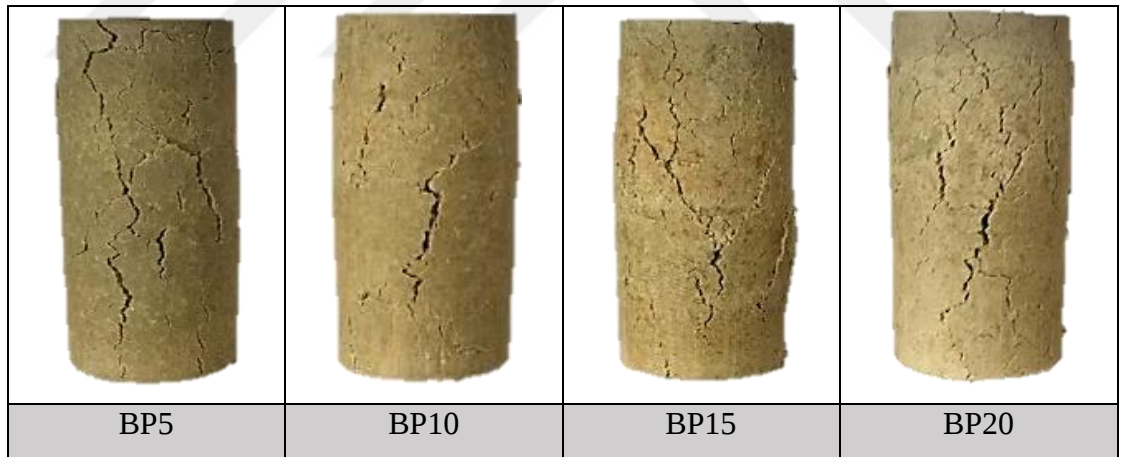
Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle Kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
BP5	337	345	0,2	0,2
BP10	365	374	0,2	0,3
BP15	375	383	0,4	0,3
BP20	397	486	0,4	0,3

Çizelge 0.13 incelendiğinde poliüretan katkılı bentonit numunelerinin donma çözölmeye maruz bırakılması ile 7 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha

yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 4.13). Poliüretan katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



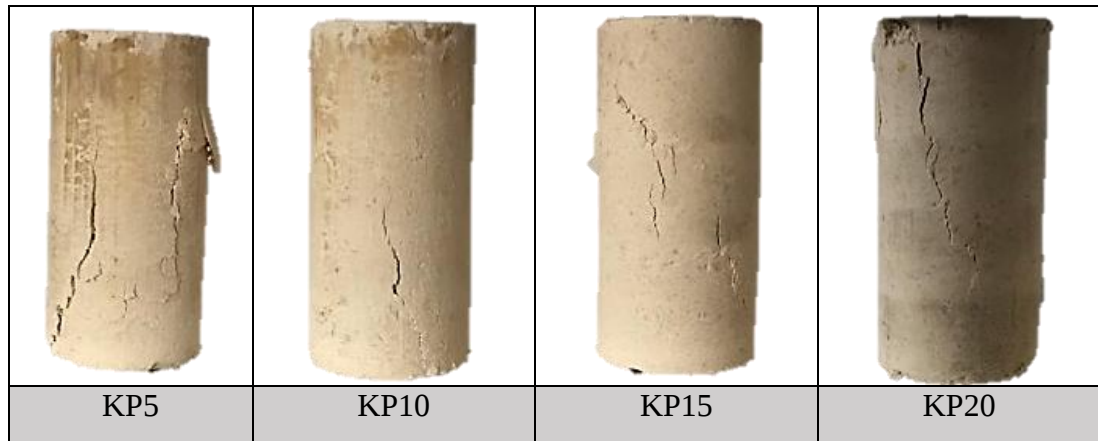
Şekil 4.20. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri

Poliüretanın kaolin kiline katılması ile elde edilen numuneler üzerinde 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.14’de verilmiştir.

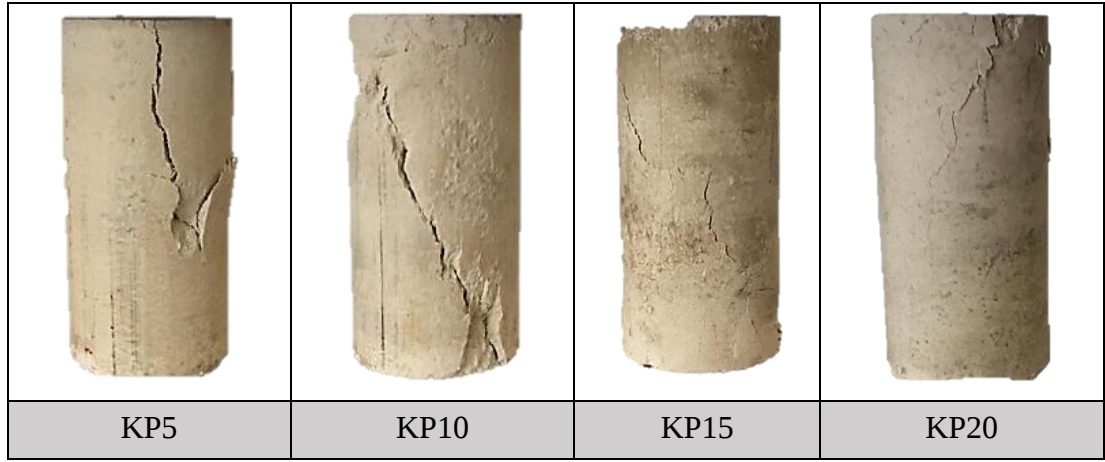
Çizelge 4.14. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle Kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
KP5	311	342	0,5	0,5
KP10	342	369	0,6	0,7
KP15	407	432	0,6	0,8
KP20	453	488	0,7	1,0

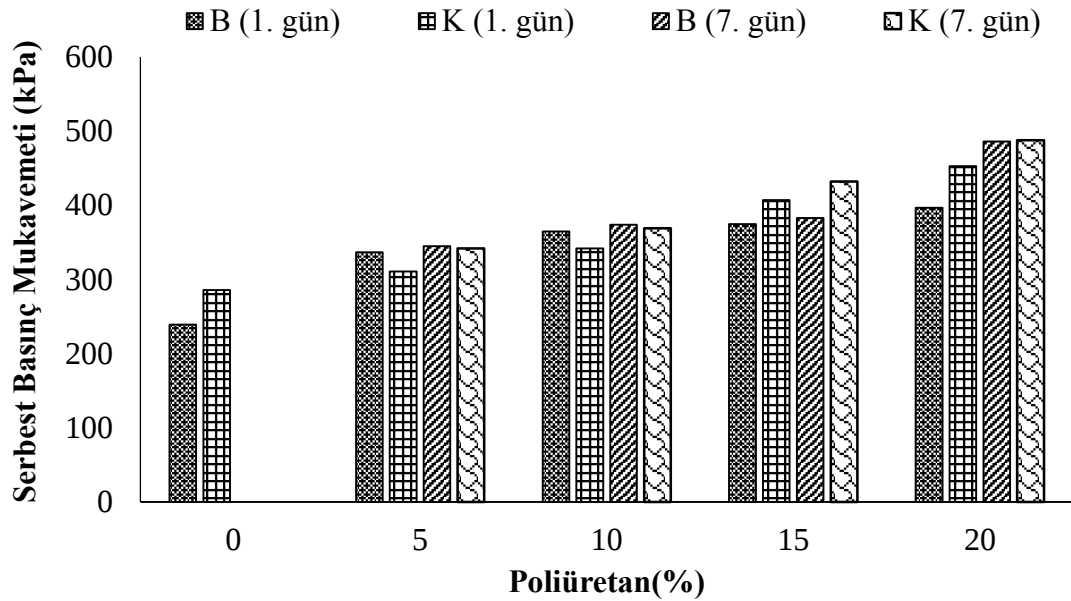
Çizelge 4.14 incelendiğinde 1 günlük poliüretan katkılı kaolin numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin 7 günlük numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinden daha düşük olduğu görülmektedir. Poliüretan katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası görülen kırılma şekilleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Bir gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.22. Yedi gün kürde bekletilen poliüretan katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.23. Poliüretan katkılı ve katkısız kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Şekil 4.23’da poliüretan katkılı ve katkısız kil numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde 5 çevrim donma çözülmeye maruz bırakılan poliüretan katkılı kil (bentonit ve kaolin) numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde katkısız kille karşılaştırıldığında bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Kür süresinin 1 günden

7 güne çıkarılması halinde donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde artış meydana gelmiştir. Bu durum poliüretan katkısının kür süresine bağlı olarak mukavemeti artırdığı şeklinde ifade edilebilir.

Poliüretan katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri, donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.15’de donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde, donma-çözölmeye tabi tutulmadan gerçekleştirilen serbest basınç mukavemetlerine göre meydana gelen azalış oranları görölmektedir.

Çizelge 4.15. Poliüretan katkısının bentonit ve kaolin killere ait donma çözölmeye sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiğı değışim

Kil	Poliüretan (%)	Azalış Oranı (%)	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	3	7
	10	11	23
	15	15	28
	20	12	11
Kaolin	5	13	17
	10	16	17
	15	9	11
	20	8	7

1 gün kürde bekletilen poliüretan katkılı bentonit kil numunelerinde 5 çevrim donma çözölmeye deneyi sonrasında artan katkı oranı ile numunelerde serbest basınç mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Kür süresinin 7 gün olması halinde ise mukavemet kaybı daha yüksek oranlara çıkmıştır. %20 poliüretan oranında ise donma-çözölmeye sonrası mukavemet kaybı azalmıştır (Çizelge 4.15).

Poliüretan katkılı kaolin kili numunelerin donma çözölmeye maruz bırakılması halinde serbest basınç mukavemetlerinde artan katkı oranlarının, serbest basınç mukavemetlerinde hem 1 günlük hemde 7 günlük numunelerde azalma meydana getirdiğı görölmüştür (Çizelge 4.15).

4.3.2. Epoksi reçine katkılı numunelere ait donma-çözölme sonrası serbest basınç deney sonuçları

Epoksi reçine katkılı bentonit ve kaolin killерinin mukavemet özelliklerine donma çözölmenin etkisi incelenmiştir. Yapılan 5 çevrim donma çözölme deneyi sonrasında bentonit kiline ait serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Epoksi reçine katkılı bentonit numunelerinin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
BE5	270	287	0,3	0,2
BE10	288	296	0,3	0,4
BE15	291	306	0,3	0,4
BE20	304	322	0,8	0,5

Bentonit kiline epoksi reçine katılmasıyla elde edilen numunelerin donma çözölme sonrasında serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, 1 gün kürde bekletilen numunelerin artan katkı oranı ile birlikte serbest basınç mukavemetinde iyileşme olduğı görölmektedir. Kür süresinin 7 güne çıkarılması halinde donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin 1 gün kürde bekletilen numunelerin serbest basınç mukavemetinden daha yüksek olduğı görölmektedir (Çizelge 4.16).

Epoksi reçine katkılı bentonit kil numunelere 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrası yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen kırılma şekilleri Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.24. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.25. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri

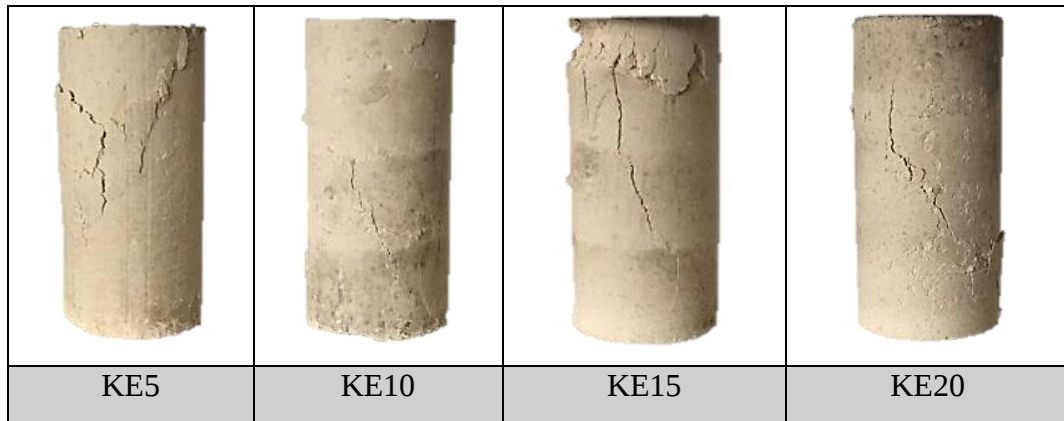
Epoksi reçine katkılı kaolin kil numunelerinde 5 çevrim donma çözülme deneyi yapılması sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Poliüretan katkılı kaolin numunelerinin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

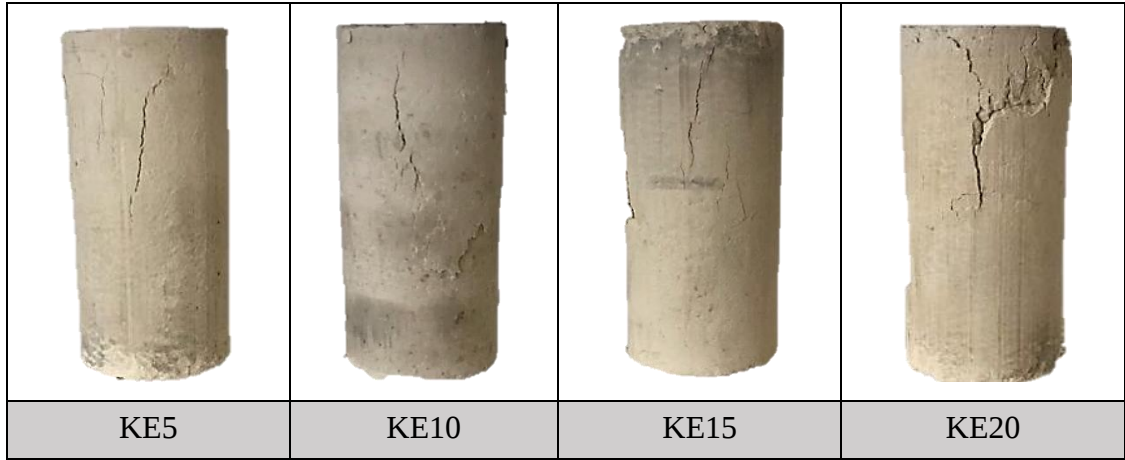
Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
KE5	297	307	0,4	0,3
KE10	308	315	0,4	0,4
KE15	314	327	0,5	0,5
KE20	343	359	0,5	0,6

Çizelge 4.17 incelendiğinde epoksi reçine katkı yüzdesinde meydana gelen artışla birlikte donma çözülmeye maruz kalan numunelerin katkı oranının artışı ile serbest basınç mukavemetinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca, 7 gün kürde bekletilen numunelerde donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinin 1 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

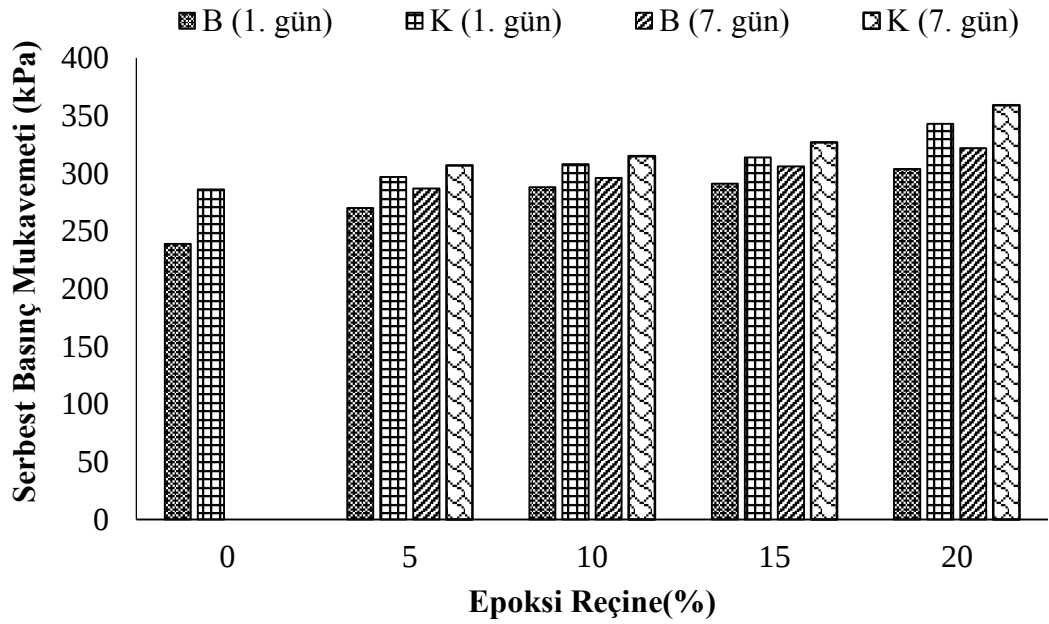
Epoksi reçine katkılı kaolin kil numunelere 5 çevrimlik donma çözülme sonrası yapılan serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen kırılma şekilleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.261. Bir gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.272. Yedi gün kürde bekletilen epoksi reçine katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.28. Epoksi reçine katkılı ve katkısız kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Epoksi reçine katkılı ve katkısız kil numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişim Şekil 4.28'de görülmektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde donma çözülme sonrası epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin

killerinin serbest basınç mukavemetini iyileştirdiği ve kür süresinin uzamasının ise numunelerin serbest basınç mukavemetlerine olumlu etkisi olduğu görülmektedir.

Epoksi reçine katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri ile donma-çözülme sonrası elde edilen serbest basınç mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.18’de donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde, donma-çözölmeye tabi tutulmadan gerçekleştirilen serbest basınç mukavemetlerine göre meydana gelen azalış oranları verilmiştir.

Çizelge 4.18. Epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin kilerine ait donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiği değişim

Kil	Epoksi Reçine (%)	Azalış Oranı (%)	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	9	9
	10	14	14
	15	14	18
	20	18	19
Kaolin	5	10	15
	10	9	16
	15	13	17
	20	11	11

Çizelge 4.18’e göre, epoksi reçine katkılı bentonit numunelerin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemet kaybının, katkı yüzdesindeki artışla devam ettiği görülmektedir. 1 ve 7 günlük numunelerin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetleri incelenirse, numunelerin kür süresine bağlı mukavemet kaybında önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Kaolin kiline ait epoksi reçine katkılı numunelerin donma çözölme sonrası serbest basınç mukavemetindeki değişim

oranlarına bakıldığında ise katkı oranına bağlı olarak mukavemet kayıp oranları arasında dalgalanma olmasına karşın genel olarak mukavemet kaybının artan katkı oranı ile artış gösterdiği söylenebilir (Çizelge 4.18).

4.3.3. Stiren akrilik katkılı numunelere ait donma-çözülme sonrası serbest basınç deney sonuçları

Stiren akrilik katkılı bentonit ve kaolin killlerinin 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bentonit kiline stiren akrilik ilave edilen katkılı numunelere 1 ve 7 günlük kür uygulandıktan sonra elde edilen donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerinin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
BS5	283	302	0,2	0,2
BS10	277	299	0,2	0,3
BS15	279	306	0,3	0,4
BS20	320	376	0,4	0,9

Stiren akrilik katkılı bentonit numunelerinin 5 çevrim donma çözülmeye maruz bırakılması sonucunda 7 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin 1 gün kürde bekletilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Katkı oranının artmasının donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen iyileşmeyi de arttırdığı görülmektedir (Çizelge 4.19).

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da stiren akrilik katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.29. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.30. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri

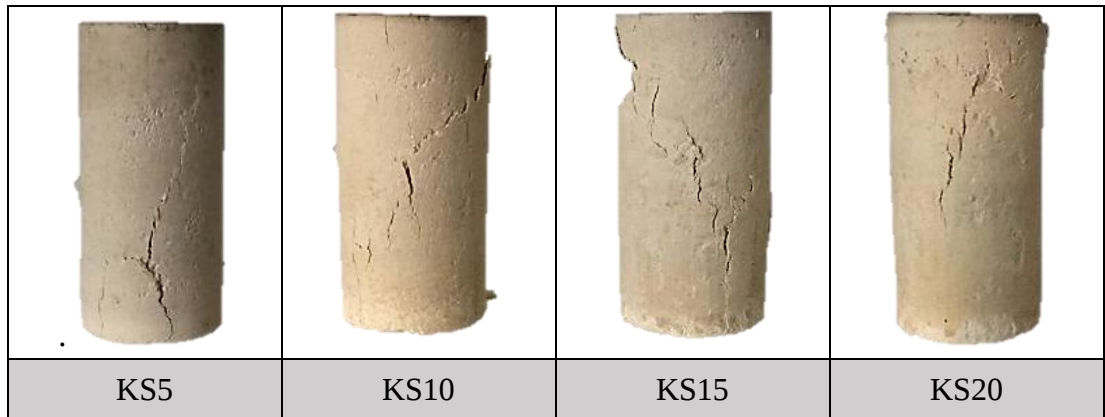
Stiren akrilik katkılı kaolin kil numunelerin 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Stiren akrilik katkılı kaolin numunelerinin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve kütle kayıpları

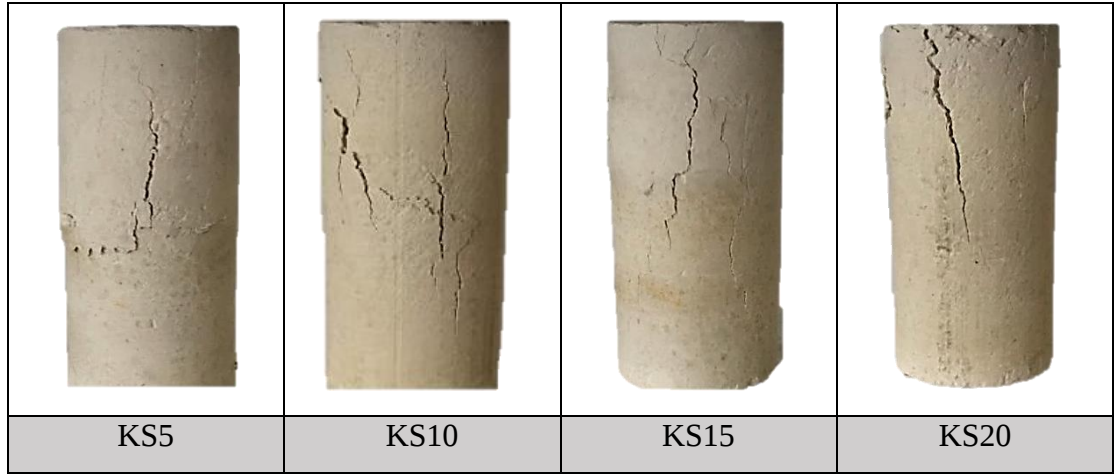
Deney grubu	Serbest basınç mukavemeti (kPa)		Kütle kaybı (%)	
	1. gün	7. gün	1. gün	7. gün
KS5	225	228	0,5	0,4
KS10	240	248	0,5	0,6
KS15	251	269	0,8	0,6
KS20	269	303	0,8	0,6

Kaolin kiline stiren akrilik katılmasıyla elde edilen numunelerin donma çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde, 1 gün kürde bekletilen numunelerin artan katkı oranı ile birlikte serbest basınç mukavemetlerinde iyileşme olduğu görülmektedir. Kür süresinin 7 güne çıkarılması halinde donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin 1 gün kürde bekletilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 4.20).

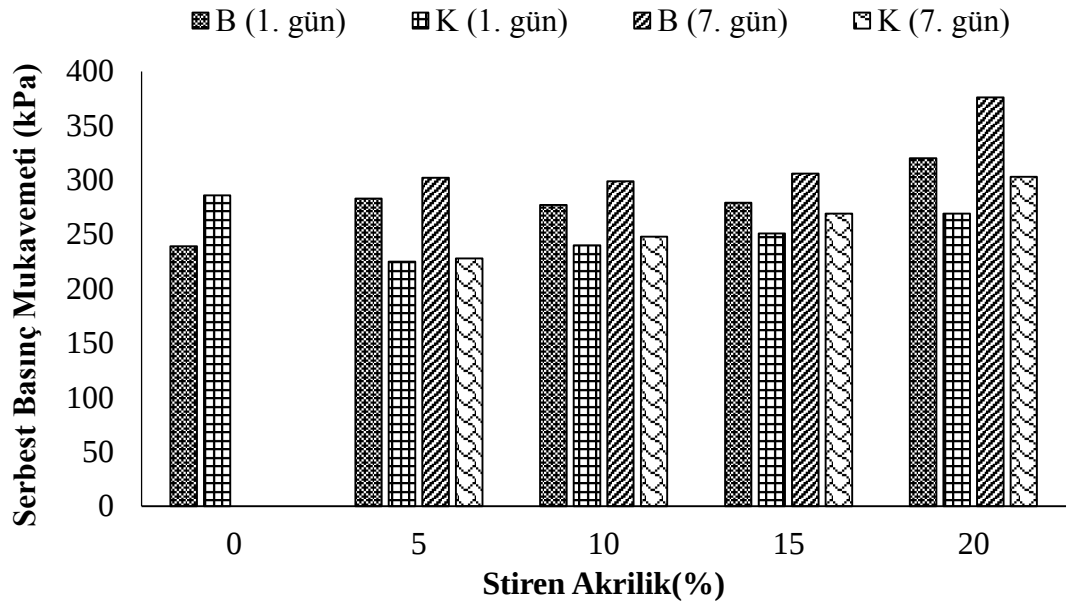
Stiren akrilik katkılı kaolin kil numunelere 5 çevrim donma çözülme deneyi sonrası yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda oluşan kırılma şekilleri Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Bir gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.32. Yedi gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı kaolin kilinin donma çözülme sonrası kırılma şekilleri



Şekil 4.33. Stiren akrilik katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Şekil 4.33'de stiren akrilik katkılı kil numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 4.33 incelendiğinde, stiren akrilik katkılı bentonit numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde katkısız numunenin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre artış meydana geldiği görülmektedir. Ancak kaolin kilinine

ait veriler incelendiğinde stiren akrilik katkısının donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini katkısız kilin serbest basınç mukavemetine göre düşürdüğü belirlenmiştir. İlâveten kaolin kilinde stiren akrilik katkı oranının artırılması halinde donma çözülme sonrasındaki mukavemetin yeniden arttığı görülmüştür.

Stiren akrilik katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri ile donma-çözülme sonrası elde edilen serbest basınç mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.21’de donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde, donma-çözölmeye tabi tutulmadan gerçekleştirilen serbest basınç mukavemetlerine göre meydana gelen azalış oranları verilmiştir.

Çizelge 4.21. Stiren akrilik katkısının bentonit ve kaolin killlerine ait donma çözöölme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana getirdiğı değışim

Kil	Stiren Akrilik (%)	Azalış Oranı (%)	
		1 gün	7 gün
Bentonit	5	5	2
	10	8	4
	15	9	7
	20	13	8
Kaolin	5	6	9
	10	11	13
	15	10	13
	20	6	4

Çizelge 4.21’de verilen değerler incelendiğinde, bentonit kiline artan oranlarda stiren akrilik katkısının 1 ve 7 gün kürde bekletilen numunelerde serbest basınç mukavemetinde meydana gelen düşüş oranlarını da artırdığı görölmektedir. Ancak, kaolin kilinde artan katkı oranı ile serbest basınç mukavemetinde meydana gelen düşüş

oranında belirli bir orantının olmadığı mukavemet kayıplarının farklılık gösterdiği görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında; bentonit ve kaolin killeri %5, %10, %15 ve %20 oranlarında poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katılmasıyla elde edilen katkılı numunelere 1 ve 7 gün kür uygulanması sonucunda serbest basınç mukavemetlerinde ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır;

Serbest basınç mukavemetlerindeki değişim;

- Bentonit ve kaolin killeri, poliüretan yüzdesinde meydana gelen artışla, numunelerin serbest basınç mukavemetleri artmıştır.
- Epoksi reçine katkı yüzdesindeki artışla, bentonite ve kaolin killeri serbest basınç mukavemetlerinin arttığı görülmüştür.
- Bentonite ilave edilen %5, %10, %15 ve %20 stiren akrilik katkısının serbest basınç mukavemetini artırdığı görülmüştür. Kaolin kilinde ise serbest basınç mukavemeti değerleri stiren akrilik yüzdesindeki artışla önce azalmış, katkı oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetinde yeniden artış meydana geldiği görülmüştür.
- 7 gün kürde bekletilen poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkılı bentonit ve kaolin kil numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin, 1 gün kürde bekletilen katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim;

- 5 çevrim donma çözülmeye maruz bırakılan poliüretan katkılı bentonit ve kaolin kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde, katkısız bentonit ve kaolin kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerine göre iyileşme meydana geldiği görülmüştür.

- Poliüretan katkılı numunelerde kür süresinin 1 günden 7 güne çıkarılması halinde donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde artış meydana gelmiştir.
- Epoksi reçine katkısının bentonit ve kaolin killerin donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerini artırdığı ve kür süresinin uzamasının ise numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür.
- 1 ve 7 gün kürde bekletilen stiren akrilik katkılı bentonit kil numunelerinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde, katkısız bentonitin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre artış meydana geldiği görülmüştür. Kaolin kiline ilave edilen stiren akrilik katkısı ise katkısız kaolin kilinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini azaltmış, ancak stiren akrilik yüzdesinde meydana gelen artışla donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde artış meydana gelmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda, reçinelerin yüksek ve düşük plastisiteli killerin serbest basınç mukavemetini artırdığı görülmektedir. Aynı zamanda reçinelerin, yüksek ve düşük plastisiteli killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri üzerinde de genel olarak olumlu bir etkisi vardır. Bu sonuçlar ışığında, reçinelerin kil zeminlerin mukavemet ve donma çözülme davranışlarının iyileştirilmesinde kullanılabileceği söylenebilir. İlerleyen çalışmalarda arazi uygulamalarının yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, R. K., and Zaimoğlu, A. Ş. (2019). Effect Of Aspect Ratio On The Freezing-thawing of a Clay. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(1), 66-74.
- Akcanca, F., Aytekin, M. ve Vekli, M., 2012. Kum ve Kireç Katkılı Bentonitin Kompaksiyon ve Kayma Direnci Parametrelerinin İncelenmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi, 4 - 5 Ekim Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Al, N., 2018. Zemin İyileştirme Teknikleri: Bir Uygulama Örneği. Y. Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Alpyürür, M., 2016. Zemin İyileştirmesinde Öğütülmüş Gazbeton Kullanımı. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Anagnostopoulos, C. A., Kandiliotis, P., Lola, M. and Karavatos, S., 2014. Effect of epoxy resin mixtures on the physical and mechanical properties of sand. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(17), 3478-3490.
- Andersland, O.B. and Ladanyi, B., 1994. An introduction to frozen ground engineering. Second Edition. The American Society of Civil Engineering, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Anjaneyappa, A., 2013. Influence Of Compaction Energy On Soil Stabilized With Chemical Stabilizer. International Journal of Research in Engineering and Technology, 211-215.
- Anonim, 2019. <http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/04.Polipart1.pdf> (16.09.2019)
- ASTM D 2166, 2003. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Annual book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D 4318, 2000. Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- ASTM D 854, 2014. Standard test methods for specific gravity of Soil solids by west conshohocken (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Aydın, S., 2010. Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç Ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Aytekin, A., Toğral, A., and Yılmaz, Ö., 2015. Epoksi Reçineleri ve Mesleki Dermatozlarla İlişkisi. Ankara Medical Journal, 15(2).
- Aytekin, S., 2009. Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi Adana.
- Beckham, T. L. and Hopkins, T. C., 1997. Stabilization of subgrade soil using hydrated lime product. Kuntucky Transportation Center College of Engineering University of Kentucky, 97(19), 1-7.
- Bergaya, F. and Yuan, P., 2019. Lime stabilization: Reactions, properties, design, and construction. State of the Art Report, 5, 564-605.

- Bilgen, G., 2011. Öğütülmüş Çelikhane Curufu, Kireç Ve Deniz Suyunun Killerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Bilgen, G., Kavak, A. ve Çapar, Ö. F., 2012. Deniz Suyu ve Kirecin Bentonit Kilinin Mukavemet Değerlerine Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim, Isparta.
- Briaud, J. L., 2013. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., 998p, New Jersey, ABD.
- BS 1377-3 , 2018. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purpose. Chemical and Electro-Chemical Testing.
- Çakılcıoğlu, İ., 2007. Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi Sakarya.
- Çimen, Ö., Dereli, B., Yıldırım, F., Şefkatlioğlu, Ö. F., Eralp, A. ve Günaydın, H. İ., 2013. Manisa - Kula Yöresi Volkanik Tüfünün Yüksek Plastisiteli Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, 5-7 Aralık, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Coduto, D. P., Kitch, W. A. and Young, M. R., 2015. Foundation Design: Principles and Practices.
- Demirel, T. and Davidson, D. T., 1960. Reactions of phosphoric acid with Clay Minerals. University Bulletin. 266
- Deveci, H., 2008. Karboksil Gruplu Stiren Kopolimerleri ve Modifiye Polistirenlerin Sentezi ve Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi Konya.
- Gaafer, M., Bassioni, H., and Mostafa, T., 2015. Soil Improvement Techniques. Int. J. Sci. Eng. Res, 6(12), 217-222.
- Geiman, C. M. 2005. Stabilization of soft clay subgrades in virginia a phase i laboratory study (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Ghazavi, M. and Roustae, M. 2010. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, Cold Regions Science and Technology, Vol.61, 125-131.
- Grim, R.E., 1962. Applied Clay Mineralogy, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, 422p., New York,
- Grim, R.E., 1968. Clay Mineralogy. 2nd ed. McGraw-Hill, 596p., New York
- Gualtieri, A. F., Ferrari, S., Leoni, M., Grathoff, G., Hugo, R., Shatnawi, M., Paglia, G. and Billinge, S., 2008. Structural characterization of the clay mineral illite-1M. Journal of Applied Crystallography, 41(2), 402-415.
- Hamidi, S. and Marandi, S. M., 2018. Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin. Applied Clay Science, 151, 92-101.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. 733.
- İpekoğlu B., Kurşun İ., Bilge Y., Barut A., Türkiye Bentonit Potansiyeline Genel Bir Bakış, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 16-17 Ekim 1997.
- Kalay, E., 2010. Farklı Katkı Maddeleri İle Zemin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

- Kamal, N., 2012. Kireç Ve Uçucu Kül İle Stabilize Edilmiş Killerin Yol Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kavak, A. ve Bilgen, G., 2005. Yüksek Fırın Cürufu ve Kirecin Katkı Olarak Kil Üzerindeki Etkileri ve Yol Yapımında Kullanımının Araştırılması. I. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Kızılcıkelik, M. M., 2010. Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Kurt Albayrak, Z. N., Akbulut, S., Çelik, S., 2016. Stiren Akrilik Kopolimer İle Modifiye Edilmiş Hidrofob Organokilin Mukavemet ve Şişme Davranışlarının Araştırılması. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Lo, S. and Wardani, S. P., 2002. Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ash mixture. *Canadian Geotechnical Journal* 39(1), 77-89.
- Lorenzo, G. A., and Bergado, D. T., 2004. Fundamental parameters of cement-admixed clay—New approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1042-1050.
- Makusa, G. P., 2012. Soil stabilization methods and materials. Lulea University of Technology.
- Mitchell, J. K. and Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley&Sons. Inc., New York 422.
- Murray, H. H., 2007. *Applied Clay Mineralogy*. Developments in Clay Science, 2, 11-14
- Naeini, S. A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 943-949.
- Nowamooz, H., 2016. Resin injection in clays with high plasticity. *Comptes Rendus Mécanique*, 344(11-12), 797-806.
- Önalp, A., 1997. *Geoteknik bilgisi I: Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle*. Birsen Yayınevi
- Öntürk, K., 2011. Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı. Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Rauch, A. F., Harmon, J. S., Katz, L. E. and Liljestrand, H. M., 2002. Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay. *Transportation Research Record*, 1787(1), 33-41.
- Saçak, M., 1998. *Polimer Kimyasına Giriş*. A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara, 158s.
- Salam, S. A., 2007. The effect of replacement soil on reducing settlement of footing on deep soft clay using numerical approach. Cairo University, Giza, Egypt, Thesis.
- Sarılioğlu, Ş., 2010. Ulubey T1 Tünel Güzergâhındaki Yol Üstyapı Tabanında Yeralan Bentonit Killerinin Çeşitli Katkı Malzemeleriyle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Saygılı, A., 2018. Killi zeminlerin polimerik metil difenil izosiyanit sıvı polimeri ile iyileştirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9: 1 S. 475-482.
- Sharma, N. K., Swain, S. and Sahoo, U. C., 2012. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197-1205.

- Singh, G. and Das, B. M., 1999. Soil stabilization with sodium chloride. *Transportation Research Record* 1673(1), 46-54.
- Stapelfeldt, T., 2006. Preloading and vertical drains. Electronic publication, http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/Preloading_and_vertical_drains.pdf.
- Süt, İ., 2006. Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin CBR Değeri Üzerindeki Etkisinin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi Ankara.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A. and Rushing, J. F., 2007. Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 1989(1), 59-67.
- Türköz, M., 2006. Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killerine Uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi* 19(2), 75-88.
- Tüylüce, F., 2010. Deniz Killerinin Kireç Stabilizasyonu İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Ünsal, N., 2007. İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji. Alp Kırtasiye& Kitabevi Limited Şti.
- Wang, G., 2009. Consolidation of soft clay foundations reinforced by stone columns under time-dependent loadings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1922-1931.
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y. Chang, X. and Wen, Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qighai-Tibet clay. *Cold Region and Science Technology*, Vol. 48, Sf. 34-43.
- Yılmaz, I. and Civelekoğlu, B., 2009. Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44(1-2), 166-172.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Erzurum Şehrinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Erzurum’da okudu. Lisans eğitimine 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2015’te mezun oldu. 2015 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesinin Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2016 yılında girdiği ESKİ Genel Müdürlüğü’nde İnşaat Mühendisi olarak halen çalışmaktadır.

