LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BİYOPOLİMER KATKILI YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Şifa GÜNEK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024

(Her hakkı saklıdır.)

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

LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BİYOPOLİMER KATKILI YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Investigation of Freezing-Thawing Properties of a Fiber-Reinforced Biopolymer Added High Plasticity Clay)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şifa GÜNEK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Erzurum

Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Şifa GÜNEK tarafından hazırlanan "Lif ile Güçlendirilmiş Biyopolimer Katkılı Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı çalışması 30/01/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Semet ÇELİK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı.

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK danışmanlığında sunulan "Lif ile Güçlendirilmiş Biyopolimer Katkılı Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	**Tezin Benzerlik Oranı (%)**	**Maksimum Oran (%)**
Giriş	*18*	**30**
Kuramsal Temeller	*26*	**30**
Materyal ve Metot	*17*	**35**
Araştırma Bulguları ve Tartışma	*13*	**20**
Sonuçlar ve Öneriler	*14*	**20**
Tezin Geneli	*20*	**25**

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

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	**Tez Danışmanı**
Şifa GÜNEK	Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
06.02.2024	**06.02.2024**
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

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

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

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

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim ve tez sürecimin tüm aşamalarında sabırla yanımda olan, tecrübeleriyle ve bilgileriyle bana her zaman destek olup yol gösteren değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK'a ve deneylerimde yardımını esirgemeyen sayın Arş. Gör. Dr. Fatih ARTUK' a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme, yardımlarıyla ve desteğiyle sürecimi kolaylaştıran sevgili eşim Musab GÜNEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şifa GÜNEK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BİYOPOLİMER KATKILI YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Şifa GÜNEK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Amaç: Bu çalışmada, lif ve biyopolimerin, yüksek plastisiteli bir kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine olan ortak etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yüksek plastisiteli bir kil, farklı yüzdelerde sentetik bir lif (polyester iplik) ile güçlendirilmiş ve farklı yüzdelerde biyopolimer (keçiboynuzu gam) ile modifiye edilmiştir. Elde edilen lif ve biyopolimer katkılı killer farklı kür süreleri sonunda 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş ve donma-çözülme sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

Yöntem: Çalışmada, keçiboynuzu gam ve polyester iplik ile bir arada kullanılarak yüksek plastisiteli kil stabilize edilmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli bir kile farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam (%0,5, %1 ve %1,5) ve 5 mm uzunluğunda polyester iplik (%0,15, %0,30 ve %0,60) ilave edilerek katkılı killer elde edilmiştir. Elde edilen katkılı killer 1, 7, 28 ve 56 gün küre tabi tutulmuştur. Kür süresi sonunda, 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulan katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri belirlenerek, doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Deney sonuçları, 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış keçiboynuzu gam ve polyester iplik katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinin, aynı koşullardaki doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam katkılı killerin ve farklı yüzdelerde polyester iplik katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Keçiboynuzu gam ve polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artış, donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerini artırmıştır. En yüksek donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri 56 gün küre tabi tutulan numunelerde elde edilmiştir.

Sonuç: Keçiboynuzu gam ve polyester iplik katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinin doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam katkılı killerin ve farklı yüzdelerde polyester iplik katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Lif yüzdesi, keçiboynuzu gam yüzdesi ve kür süresi artıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri de artmıştır. Deney sonuçları, bir biyopolimer olan keçiboynuzu gam ile sentetik bir lif olan polyester ipliğin bir arada kullanılmasının özellikle soğuk iklimlere maruz bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli killerin donma-çözülme çevrimlerinden daha az etkileneceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kil, lif, biyopolimer, donma-çözülme, serbest basınç mukavemeti

Ocak 2024, 70 Sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF FREEZING-THAWING PROPERTIES OF A FIBER-REINFORCED BIOPOLYMER ADDED HIGH PLASTICITY CLAY

Şifa GÜNEK

Supervisor: Assist Prof. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Purpose: In this study, it was aimed to investigate the combined effect of fiber and biopolymer on the post-freezing-thawing unconfined compressive strength of a high plasticity clay. For this purpose, a high plasticity clay was reinforced with different percentages of a synthetic fiber (polyester fiber) and modified with different percentages of biopolymer (locust bean gum). The fiber and biopolymer added clays were subjected to 10 freezing-thawing cycles at the end of different curing periods and the unconfined compressive strengths of the samples were determined after freezing-thawing.

Method: In this study, high plasticity clay was stabilized with combining of locust bean gum and polyester fiber. In this context, different percentages of locust bean gum (0,5%, 1% and 1,5%) and 5 mm long polyester fiber (0,15%, 0,30% and 0,60%) were added to a high plasticity clay. The obtained fiber and biopolymer added clays were cured for 1, 7, 28 and 56 days. At the end of the curing periods, the post-freezing-thawing unconfined compressive strength of the fiber and biopolymer added clays, which were subjected to 10 freezing-thawing cycles, were determined and compared with the post-freezing-thawing unconfined compressive strength values of natural clay.

Findings: According to test results showed that the unconfined compression strength values after freezing-thawing of locust bean gum and polyester fiber added clays exposed to 10 freezing-thawing cycles, the unconfined compression strength values after freezing-thawing of natural clay under the same conditions are higher than clays with different percentages of locust bean gum and clays with different percentages of polyester fiber. The increase in the percentage of locust bean gum and polyester fiber increased the unconfined compressive strength values after freezing-thawing. The highest unconfined compressive strength values after freezing-thawing were obtained in samples subjected to 56 days of curing.

Results: It has been observed that the post-freezing-thawing unconfined compressive strength values of locust bean gum and polyester fiber-added clays are higher than the post-freezing-thawing unconfined compressive strength values of natural clay, clays with different percentages of locust bean gum and polyester fiber-added clays. As the fiber percentage, locust bean gum percentage and curing time increased, the unconfined compressive strength values after freezing-thawing also increased. Experimental results revealed that the combine effects of carob gum, a biopolymer, and polyester fiber, a synthetic fiber, will be less affected by the freezing-thawing cycles of high plasticity clays, especially in regions exposed to cold climates.

Keywords: Clay, fiber, biopolymer, freezing-thawing, unconfined compressive strength

January 2024, 70 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
KISALTMALAR VE SİMGELER xi
GİRİŞ 1
KURAMSAL TEMELLER 3
Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışları 3
Zemin İyileştirme 3
Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri 4
Derin zemin iyileştirme yöntemleri 5
Kil Mineralleri 5
Kil Minerallerinin Oluşumu ve Bazı Özellikleri 6
Polimer 9
Biyopolimer 9
Biyopolimerlerin Sınıflandırılması 10
Keçiboynuzu Gam 10
Lif 11
Lif Çeşitleri 11
Literatür Özetleri 12
Polimerlerle ilgili çalışmalar 12
Liflerle ilgili çalışmalar 15
Polimer ve liflerle yapılan çalışmalar 18
MATERYAL VE YÖNTEM 19
Kil 19
Biyopolimer 20
Lif 20

Numunelerin Hazırlanması 21
Doğal kil numunelerinin elde edilmesi 21
Biyopolimer katkılı killerin elde edilmesi 21
Lif katkılı killerin elde edilmesi 22
Biyopolimer-lif katkılı killerin elde edilmesi 22
Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi 24
Donma-Çözülme Deneyi 25
Serbest Basınç Deneyi 27
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 28
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 30
Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Deneyi Sonuçları 30
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları 46
SONUÇ VE ÖNERİLER 50
KAYNAKÇA 52
ÖZGEÇMİŞ 57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Killerin Sınıflandırılması 6
Tablo 2. Kil Zemine Ait Bazı Özellikler 19
Tablo 3. Kompaksiyon Parametreleri 23
Tablo 4. Kullanılan Katkı Yüzdeleri 23
Tablo 5. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (1. gün; 10 çevrim) 30
Tablo 6. Donma Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (7. gün; 10 çevrim) 32
Tablo 7. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (28. gün; 10 çevrim) 34
Tablo 8. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (56. gün; 10 çevrim) 36
Tablo 9. DÇ Sonrası Serbest Basınç Mukavemetlerinde Doğal Kile Göre Meydana Gelen Artış Yüzdeleri 39
Tablo 10. SEM Analizi Yapılan Numuneler 46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Oktahedral yapının şematik diyagramı 6
Şekil 2. Tetrahedral yapının şematik diyagramı 7
Şekil 3. Kaolinit yapısının şematik diyagramı 7
Şekil 4. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı 8
Şekil 5. İllit yapısının şematik diyagramı 8
Şekil 6. Keçiboynuzu gamı 11
Şekil 7. Bazı doğal ve yapay lifler; **(a)** Karbon lif **(b)** Cam lif **(c)** Aramid lifi 12
Şekil 8. Etüvde kurutulan kil 19
Şekil 9. Öğütülmüş kil 20
Şekil 10. Deneylerde kullanılan keçiboynuzu gam tozu 20
Şekil 11. 5 mm uzunluğunda kesilmiş lif 21
Şekil 12. Deneylerde kullanılan manyetik karıştırıcı 22
Şekil 13. Kil-lif karışımı 22
Şekil 14. Kil-lif-biyopolimer karışımı 23
Şekil 15. (a) Karıştırma işlemi **(b)** Yağlanmış metal kalıp 24
Şekil 16. Hazırlanan numuneler 24
Şekil 17. Donma-çözülme deney aleti 25
Şekil 18. Donma-çözülme çevrimine hazır numuneler 26
Şekil 19. Kabine ait sıcaklık-zaman ilişkisi grafiği 26
Şekil 20. Serbest basınç deney düzeneği 27
Şekil 21. (a) Serbest basınç deneyi öncesi numune **(b)** Serbest basınç deneyi sonrası numune 28
Şekil 22. KBG yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi 31
Şekil 23. Lif yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi 31
Şekil 24. KBG yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi 33
Şekil 25. Lif yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi 33

Şekil 26. KBG yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi.....35
Şekil 27. Lif yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi.....35
Şekil 28. KBG yüzdesindeki artışla 56 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi.....37
Şekil 29. Lif yüzdesindeki artışla 56 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi.....37
Şekil 30. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim).....40
Şekil 31. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim).....40
Şekil 32. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim).....41
Şekil 33. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (28 gün; 10 çevrim).....42
Şekil 34. Gerilme-Deformasyon ilişkisi(28 gün; 10 çevrim).....42
Şekil 35. Gerilme-Deformasyon ilişkisi(28 gün; 10 çevrim).....43
Şekil 36. Farklı kür sürelerinde sadece biyopolimer katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri 44
Şekil 37. Farklı kür sürelerinde sadece lif katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri.....45
Şekil 38. Farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri 46
Şekil 39. SEM analizi görüntüleri **(a)** B0-L0 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B0-L0 numunesi 47
Şekil 40. SEM analizi görüntüleri **(a)** B1,5-L0 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B1,5-L0 numunesi 47
Şekil 41. SEM analizi görüntüleri **(a)** B0-L0,60 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B0-L0,60 numunesi 48
Şekil 42. SEM analizi görüntüleri **(a)** B1,5-L0,60 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B1,5-L0,60 numunesi.....48

KISALTMALAR VE SİMGELER

A_f **:** Kırılma anındaki alan

ASTM **:** Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

B : Biyopolimer

CH **:** Yüksek plastisiteli kil

D **:** Doğal kil

DAYTAM : Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi

DÇ **:** Donma – Çözülme

KBG **:** Keçiboynuzu gam

L : Lif

P_{max} **:** Maksimum yük

q_u **:** Serbest basınç mukavemeti

rpm **:** Dakikadaki devir sayısı

SEM **:** Taramalı Elektron Mikroskobu

USCS **:** Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

GİRİŞ

Zeminler, yapıların temelleri altında temel zemini olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel zemini her zaman istenen özellikleri sağlamayabilir. Olumsuz bu özellikler bazen projenin uygulanabilirliğini belirleyecek ölçüde önemli olabilir. İnşaat sahasının alternatif diğer alanlarla değiştirilmesi ya da tercih edilmeyen zeminin projeye uygun yeni bir zeminle değiştirilmesi çevresel ve ekonomik faktörlerden kaynaklı genellikle tercih edilmemektedir. Bu sebeple temel zemininin istenen özelliklere uygun olarak iyileştirilmesi en çok tercih edilen yöntemdir.

Zemin iyileştirmesi, zeminlerin bazı özelliklerinin istenilen bir projeye uygun olarak farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi şeklinde tanımlanabilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde genellikle zeminin boşluk oranının azaltılması ortak amaç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Geoteknik mühendisliği alanında kil zeminlerle çok sık karşılaşırız. Kil zeminler hidrofil özellikte olduğundan su ile temas ettiklerinde hacimlerinde artış, bünyelerindeki suyu kaybettiklerinde ise hacimlerinde azalma (büzülme) meydana gelmektedir. Bu hacim değişikliği, temel zeminin kil olması halinde gerekli önlemler alınmazsa büyük hasarlara sebep olmaktadır (Holtz and Kovacs 1981). Kil zeminlerin mühendislik özelliklerinin kilin mineralojik ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Kil zeminlerin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen diğer bir parametre ise donma-çözülmedir. Kil zeminlerin istenmeyen bu özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında yer alan katkılarla zemin iyileştirme en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Geleneksel olarak kullanılan katkılar arasında çimento, kireç gibi kimyasal malzemeler bulunurken uçucu kül, silis dumanı gibi atık malzemelerde sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat bu malzemelerin çevreye verdiği zarardan dolayı son yıllarda karbon salınımına sebep olmayan yeni malzeme arayışına gidilmiştir. Bu kapsamda çevre dostu, yeşil polimerler olarak bilinen biyopolimerler ile zemin iyileştirmesi yaygın olarak araştırılmaya başlanmıştır. Lifler de zemin iyileştirmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde biyopolimer ve liflerin bir arada kullanılması ile zeminlerin iyileştirilmesi ise yeni bir çalışma konusudur.

Tez çalışması kapsamında yapılmış deneyler, Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle doğal bir kil zemin temin edilerek laboratuvara getirildikten sonra, öğütülerek deneylerde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Doğal kil numunesinin temel geoteknik özellikleri Güven vd (2023) çalışmasından alınmıştır. Kullanılacak olan biyopolimer ve lif oranları belirlendikten sonra kil ile farklı oranlarda (%0,5, %1, %1,5) biyopolimer etkileştirilerek biyopolimer katkılı killer, kil ile farklı oranlarda (%0,15, %0,3, %0,6) lif etkileştirilerek lif katkılı killer elde edilmiştir. Ardından lif, biyopolimer katkılı killere katılarak liflerle güçlendirilmiş biyopolimer katkılı killer elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler 1, 7, 28 ve 56 gün kür (22±2 °C sıcaklıkta, %18.5 nem) edildikten sonra donma-çözülme sonrası dayanımlarını belirlemek için 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulmuştur. Numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımları doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Biyopolimer ve lifin zemin iyileştirmesinde ortak kullanımının hem çevreci bir uygulama olacağı hem de ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışları

Soğuk iklim bölgelerinde donma; mevsimsel, sürekli, süreksiz olmak üzere üç başlıkta incelenebilir. Sürekli soğuk iklim bölgelerinde, zeminin tamamında, süreksiz soğuk iklim bölgelerinde ise zeminin bazı bölgelerinde donma gerçekleşmektedir (Andersland and Ladanyi 2004).

Mevsimsel donmanın yaşandığı soğuk iklim bölgelerinde donma-çözülme çevrimleri yılda birkaç kere tekrarlanabilir. Donma-çözülme döngüleri zeminlerde hacim değişimlerine ve boşluk oranında artışa sebep olur. Bu değişimler zeminin geçirimlilik, su muhtevası, boşluk oranı, kıvam limitleri, porozite, konsolidasyon katsayısı, şişme basıncı ve mukavemeti gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etki eder (Çiftlikli̇oğlu 2018). İnce daneli zeminlerde donma sırasında ilk etapta su potansiyeli fazla olan ve donma noktasının yüksek olduğu büyük gözeneklerde buz parçacıkları meydana gelirken, daha sonra küçük gözeneklerdeki sular donar (Erol 2007).

Özellikle soğuk iklim bölgelerinde iri ve ince taneli zeminler donma-çözülme döngülerinden olumsuz etkilenmektedir (Akbulut *et al.* 2007). Donmuş zeminlerin geoteknik özellikleri, donma sürecine, donan zeminin çözülme sürecine, mevsimsel ya da uzun dönemli sıcaklık değişimlerine göre değişmektedir. Suyun mevsimsel olarak, zeminin boşluklarında donması ve çözülmesi zemin ortamda hacimsel farklılıklar oluşturarak zemin taşıma gücünde azalmaya neden olmaktadır. Dayanımda meydana gelen kayıplar; bina, karayolu, demiryolu, toprak dolgu ve sulama kanalı gibi mühendislik yapılarında hasar meydana getirebilmektedir (Erol 2007). Bu yüzden 0 °C'nin altındaki sıcaklık değerlerinin oluştuğu bölgelerde inşa edilecek mühendislik yapılarının projelendirilme ve inşa aşamalarında sıcaklık farklılıklarının zeminin fiziksel, mekanik ve geoteknik özelliklerine olan etkisinin bilinmesi önem arz etmektedir.

Zemin İyileştirme

Bir zemin malzemesi, istenen mühendislik özelliklerini sağlamıyorsa veya tasarım şartlarını karşılamıyorsa zayıf zemin olarak kabul edilir. Böyle bir durumda aşağıdaki alternatifler değerlendirilebilir (Nicholson 2015).

- Projenin söz konusu yerde yapılması zorunlu değilse özelliklere uygun yeni bir inşaat sahasıyla değiştirilmesi.
- Mevcut zayıf zeminin değiştirilmesi.
- Saha şartlarına uygun olarak projenin tekrar tasarlanması.
- Zayıf zeminin uygun zemin iyileştirme yöntemiyle iyileştirilmesi.

Zemin iyileştirmenin temel amaçları;

- Zeminin taşıma gücü değerini arttırmak,
- Zeminin geçirimliliğini ve sıkışabilirliğini azaltmak,
- Oturmaları ve deformasyonu azaltmak,
- Kayma mukavemeti değerini arttırmak,
- Zeminin sıvılaşmasını azaltmak,
- Zeminin konsolidasyonunu hızlandırmaktır.

Zemin iyileştirme yöntemleri ihtiyaca göre farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Zemine uygulanacak iyileştirme yönteminde zeminin tane boyutuyla olan uyumu oldukça önemlidir. Zemin iyileştirme yöntemleri yüzeysel ve derin zemin iyileştirme yöntemleri olarak sınıflandırabilir:

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri

Kompaksiyon: Zeminin çeşitli mekanik yollarla sıkıştırılması, zemin taneciklerinin aralarındaki hava boşluğunu azaltılıp daha sıkı olmalarını sağlamak amacıyla yapılır (Özaydın 1997).

Çimento ile zemin iyileştirme: Çimento yaygın olarak kumlu ve killi zeminleri iyileştirmek için kullanılmakta olup ayrıca birçok farklı şekilde de kullanılır. Çimento zemin taneleri arasında bağlayıcılık sağlar (Orhan 2019).

Kireçle zemin iyileştirme: Kireç ile stabilizasyon killi zeminler için en uygun yöntemdir. İnce taneli zemine kireç karıştırılarak, zeminin mukavemeti artırılır (Özaydın 1997).

Bitüm ile zemini iyileştirme: Bitüm malzemesi zeminin kohezyonunu arttırmak ve geçirimsizlik sağlamak için kullanılır. Kohezyon etkisinden dolayı zemin su ve rüzgar erozyonuna karşı direnç kazanır (Özaydın 2012).

Liflerle zemin iyileştirme: Son zamanlarda zeminin çekmeye direncini artırmak için yüksek çekme mukavemetine sahip doğal ve suni farklı lifler zemine katılarak iyileştirmede kullanılmaktadır.

Polimer ile zemin iyileştirme: Polimerle zemin iyileştirmesi, polimerlerin zemin ile stabilizyonunu ifade eder. Geleneksel kimyasal bağlayıcılardan farklı olarak, polimer katkısı ile daha düşük karışım oranıyla bile yüksek taşıma gücü değerleri elde edilebilir. Kullanılan polimerin miktarı az olsa bile, farklı polimerlerin zeminin erozyonunu azalttığı, kayma mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Şimdiye kadar zemin iyileştirmesinde en çok tercih edilen polimerler, sentetik polimerler ve biyopolimerlerdir (Latifi *et al.* 2016).

Derin zemin iyileştirme yöntemleri

Önyükleme: Önyükleme ile yapı inşasına başlanmadan önce zemin üzerine dolgu yapılarak boşluklardaki suyun drenajı sağlanarak konsolide olması amaçlanır. Böylelikle ilerde gerçek yükler altında meydana gelebilecek oturmalar azaltılmış olur (Chu *et al*. 2009).

Dinamik kompaksiyon: Özel ekipmanlar yardımıyla belirli bir yükseklikten belirli bir ağırlığın zemin üzerine düşürülerek zeminin boşluk oranının azaltılması işlemidir.

Taş kolonlar: Taşıma gücü yetersiz yumuşak killi zeminlere yapılan yüzeysel temellerin taşıma gücünü artırmak ve oturma değerlerini kontrol etmek için kullanılan zemin iyileştirme yöntemidir. Zayıf killi tabaka boyunca devam edip daha sağlam tabakaya oturan veya yeteri kadar derinlikte belirli ölçülerde, su jeti ve vibroflot ile açılan deliklere belirli tane çapına sahip kırma taş vb. malzemenin, vibroflot ünitesinin geri çekilirken yavaş yavaş sıkıştırılmasıyla doldurularak elde edilen elemanlardan oluşan iyileştirme yöntemidir (Orhan 2019).

Jet grout: Çimento bulamacının (grout), yüksek bir hızla zemine enjekte edilerek bir zemin-beton matrisi oluşturma işlemidir.

Enjeksiyon: Enjeksiyonla zemine basınç altında uygulanan enjeksiyon malzemesinin zeminin kayma mukavemetini artırması ve permeabilitesini azaltması amaçlanmaktadır. Bu yöntem ilk olarak barajlarda sızdırmazlığı artırıp mukavemeti artırmak amacıyla kullanılmıştır. Kullanım alanı oldukça geniştir.

Kil Mineralleri

Kil mineralleri, ana kimyasal bileşimi alüminyum silikat olan, plastisite ve kohezyon özelliğine sahip minerallerdir. Kil doğada oldukça bol miktarda bulunur ancak saf kil bulmak oldukça zordur (Kızılçelik 2010). Boyutu genellikle 0,002 mm'den daha küçüktür. Kilin tane boyutu önemli bir parametredir fakat tek başına kilin zemindeki özellikleri hakkında yeterli bilgiyi vermez. Kil gibi ince taneli zeminlerin tane boyutuna ek olarak belki de en önemli özelliği mineralojik oluşumlarıdır (Chen *et al.* 2013).

Literatürde kil terimi, kaolinit, illit vb. mineraller için kullanılır. Kil zeminler ise kil mineralleri ve farklı bir kısım minerallerden meydana gelen zeminlerdir. Plastisiteleri ve kohezyonları yüksektir. Kil mineralleri çok küçük boyutlu olmalarına rağmen çok aktiftirler. Bir zemin içinde az oranda kil mineralinin bulunması o zeminin geoteknik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir.

Kil mineralleri çok büyük ve karmaşık mineral yapısına sahip olmaları, farklı birçok madde içermeleri, oluşum, yapı ve özelliklerinin farklı oluşu gibi nedenlerden dolayı birçok farklı şekilde sınıflandırılırlar (Tablo 1).

Tablo 1. Killerin Sınıflandırılması (Malayoğlu ve Akar 1995)

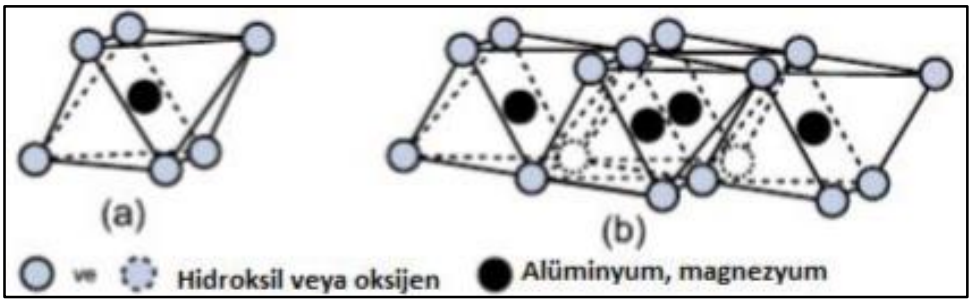
Killerin Sınıflandırılması		
Minerolojik Yapılarına Göre	**Yapılarına göre**	**Fiziksel Özelliklerine Göre**
Kaolin Grubu		Plastiklik özelliğine göre
Montmorillonit Grubu	Amorf Grup	Tane boyutuna göre
Mika Grubu		Renk özelliğine göre
Klorit Grubu	Kristal Grup	Üretildikleri yatak veya bölgeye göre
İllit Grubu		Refrakter özelliğine göre

Kil Minerallerinin Oluşumu ve Bazı Özellikleri

Kil mineralleri kayaçların kimyasal yollarla ayrışması sonucunda oluşan kristalsi küçük boyutlu taneciklerdir. Kil minerallerinin boyutları 2 mikrondan küçük olduğundan elektron mikroskobu dışında görülmeleri çok zordur.

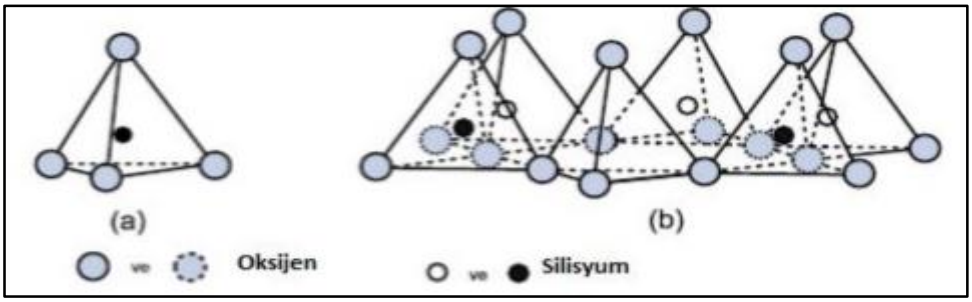
İki farklı kristal levha türü olan tetrahedron ve oktahedron plakaları farklı bağlar ve farklı metal iyonları ile birbirine bağlandığında farklı kil mineralleri ortaya çıkar (Holtz and Kovacs 1981).

Oktahedral levhalar alüminyum, magnezyum, demir veya diğer atomları çevreleyen altı oksijen veya hidroksilden oluşan oktahedral birimlerinin birleşmesinden oluşmaktadır (Şekil 1). Oksijen veya hidroksillerin levhadaki dizileri iki düzlem üzerindedir (Taşcı 2011).



Şekil 1. Oktahedral yapının şematik diyagramı (Fell *et al.* 1992)

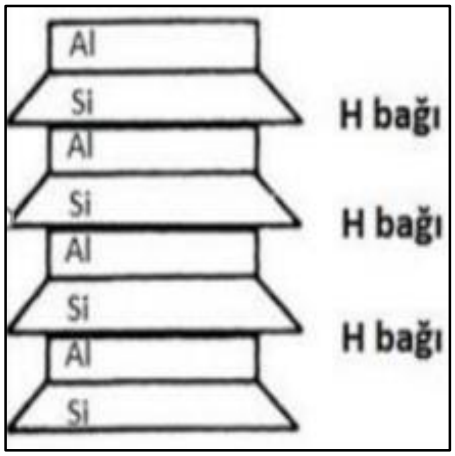
Tetrahedral levha tek silis atomunu kuşatan dört oksijen atomundan oluşan silika tetrahedral birimlerinin birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 2). Her tetrahedronun tabanındaki oksijenler aynı düzlem üzerindedirler ve düzleme katılmayan oksijen köşelerinin hepsi aynı yönü işaret eder.



Şekil 2. Tetrahedral yapının şematik diyagramı (Fell *et al.* 1992)

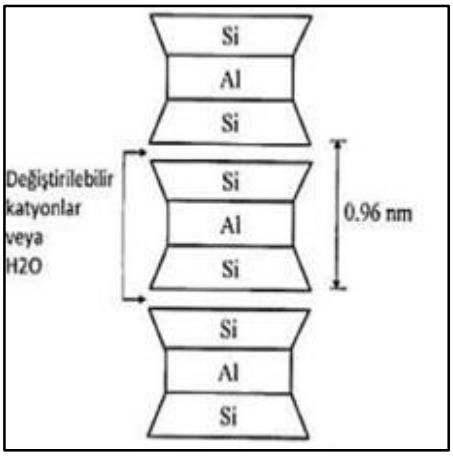
Oluşan bu levhaların değişik bağlarla birleşmesi sonucu farklı kil mineralleri oluşur. Sonuç olarak bilinen bütün kil mineralleri, iki temel levhanın değişik bağlarla bir araya gelmesiyle oluşur (Türköz *et al.* 2007).

Kaolinit: Kaolinit bir oktahedral ve bir tetrahedral levhanın sürekli olarak tekrarlanması sonucu oluşmuştur (Şekil 3). Yaklaşık 0,72 nm kalınlığa sahip olup diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Sürekli olarak tekrarlanan levhalardaki hidroksiller ve oksijenler arasında hidrojen bağı bulunur. Kaolinit minerali düşük şişme potansiyeline sahiptir (Türköz *et al.* 2007).



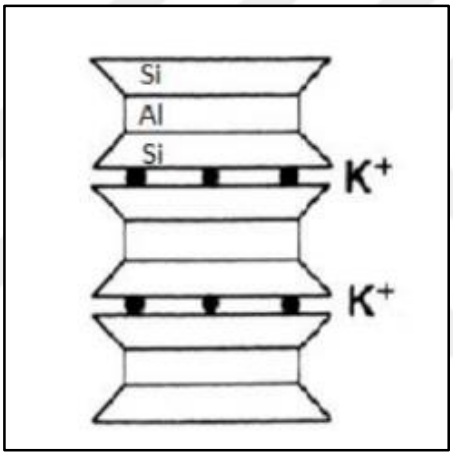
Şekil 3. Kaolinit yapısının şematik diyagramı (Başer 2009)

Montmorillonit: Önemli bir kil minerali olan montmorillonit iki silika levhası ile bir alümina levhasından oluşur (Şekil 4). Küçük kristallere sahip montmorillonit kilinin suyu bünyesine alma kapasitesi çok fazladır. Montmorillonit kilinin tabakaları arasında su bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, en fazla 2:1 tabaka yapısına sahip olan montmorillonit kili kullanıldığı söylenebilir. Şişebilen bir kil türü olan 2:1 tabakalı killerin tabakaları arasında bulunan iyonların özelliği bağlanma şeklini etkilemektedir.



Şekil 4. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı (Başer 2009)

İllit: İllit mineralini oluşturan levhalar arasındaki bağ potasyum iyonu ile sağlanmaktadır. İllit (2:1) tabakalıdır (Şekil 5).



Şekil 5. İllit yapısının şematik diyagramı (Başer 2009)

Killerin bazı özellikleri aşağıda tanımlanmıştır.

Renk: Killer doğada farklı renklerde bulunur. Saf kil olarak isimlendirilen kaolin beyaz renktedir. Bunun dışında killer sarı, pembe, kırmızımsı, mavimsi, grimsi, yeşil ve siyah renklerde de bulunabilirler. Kilin rengi içerisinde bulunan mineraller hakkında bilgi verir. Örneğin limonit bulunması halinde kilin rengi esmer, demir peroksit bulunması halinde kilin rengi kırmızı, manganez bioksit bulunması halinde kilin rengi siyahımsı, organik madde bulunması halinde ise kilin rengi menekşe olarak görülür.

Plastisite: Kil plastisite özelliğinden dolayı yeterli su eklendiğinde şekil alır ve işlenebilir.

Kohezyon: Kil tanecikleri arasındaki adezyona kohezyon adı verilir. Bu özellik kil su ile yoğrulduğunda ortaya çıkar.

Özgül yüzey alanı: Tane boyutu küçüldükçe kilin özgül yüzey alanı arttığı için kilin su tutma kapasitesi artar.

Kil minerallerinin tanımlanmasında farklı teknikler kullanılmaktadır.

Taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi bir zemindeki kil minerallerinin tanınmasında kullanılmaktadır (Holtz and Kovacs 1981).

Değişik kil mineralleri kimyasal analiz yapılarak da tanımlanabilmektedir ancak kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak kil minerallerinin tanımlanması zordur (Türköz *et al.* 2007).

Polimer

Polimerler çok sayıda monomerin kovalent bağlarla birleşmesi sonucu oluşan molekül kütleleri oldukça fazla iri bileşiklerdir (Saçak 1998). Polimerler; düşük yoğunluğa sahip, kolayca şekil verilebilen, dış ve yapısal etkilere karşı dayanıklı, mukavemetleri oldukça yüksek, diğer ürünlere nazaran daha ekonomik, hafif olduğundan birçok farklı alanda sıklıkla kullanılır.

Aynı türdeki monomerlerin birbirleri ile bağlanması sonucu meydana getirdiği polimer zincirine homopolimer, birbirinden farklı iki cins monomerin bağlanması sonucu ortaya çıkan polimere kopolimer, üç farklı cins monomerin kovalent bağlar ile bağlanması ile oluşan zincire de terpolimer denir (Saçak 1998).

Polimerler birçok farklı özelliğe sahip olduğundan çeşitli şekilde sınıflandırılabilirler. En önemli sınıflandırmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Doğada bulunup bulunmadığına ve hangi formda olduğuna bağlı olarak (doğal – sentetik)
- Organik ve inorganik olarak (organik – inorganik polimerler)
- Molekül ağırlığına göre (oligomerler – makromoleküller)
- Sentez reaksiyonuna bağlı olarak (kademeli - zincir)
- Zincirlerin kimyasal ve fiziksel yapısına bağlı olarak (doğrusal, dallı, çapraz bağlı, kristalli amorf polimerler)
- Zincir yapısına göre (homopolimer - kopolimer)

Biyopolimer

Biyopolimerler; doğada canlı mikroorganizmalar tarafından oluşturulan, kimyasal sentez gerektirmeyen organik polimerlerdir. Biyopolimerlerin birçok çeşidi bulunur bu nedenle kullanım alanları oldukça geniştir.

Tekrarlayan yapıları nedeniyle, biyopolimerler metaller, yüzey partikülleri ve diğer birçok polimer ile farklı reaksiyon göstermeye yatkındırlar (Etemadi *et al.* 2003).

Çevre kirliliği, dünya çapında devam eden önemli bir sorundur. Yeşil polimerler olarak bilinen biyopolimerlerin çevreye zarar vermedikleri bilinmektedir. Bu nedenle son yıllarda literatürde biyopolimerlerin önem kazandığı söylenebilir.

Biyopolimerlerin Sınıflandırılması

Biyopolimerler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilmektedir (Bozkurt *et al.* 2012).

-Doğal Biyopolimerler: Doğada kendiliğinden oluşan polimerlere, doğal polimer adı verilmektedir.

- Proteinler (jelatin, aktin, elastin, kollajen, vb.),
- Polisakkaritler (kitin, nişasta, dekstran, selüloz, vb.)
- Mikrobiyal poliesterler
- Polinükleotitler (DNA ve RNA)

- Sentetik Biyopolimerler

- Poliesteramidler
- Poliortoesterler
- Polianhidritler
- Polialkilsiyonoakrilatlar
- Poliiminokarbonatlar

Keçiboynuzu Gam

Gam yapışkan bir bitkiden elde edilen doğal bir ürün olarak bilinir. Teknik anlamda ise suda çözünen, jelleştirici ve koyulaştırıcı etkiye sahip polimerik bir karbonhidrat olarak bahsetmek mümkündür.

Dünyanın en eski ağaçlarından biri olan keçiboynuzu (*Ceratonia siliqua L.),* Akdeniz ikliminin etkisi ile yetişen makilerin en tipik örneklerinden birisidir (Taşlıgil 2011). Sadece soğuk suda çözünür ve plastisiteye sahiptir. Diğer gamlarla birlikte kullanıldığında jel mukavemetini artırır (Maier *et al.* 1993).

Keçiboynuzu gamı, üç kısımdan oluşan keçiboynuzu tohumunun yağ dokusunun öğütülmesiyle elde edilen kremsi beyaz bir tozdur (Şekil 6). Bir polisakkarit çeşitidir. Keçiboynuzu gamı kıvam arttırıcı ve gıda katkı maddesi olarak kullanılır. Kalınlaştırıcı ve stabilize edici gam grubuna dahildir.

Keçiboynuzu gamı soğuk su ile temas ettiğinde şişer ve ağırlığının 50 katına kadar su tutar (Coppen 1995) .

Şekil 6. Keçiboynuzu gamı

Lif

Bir boyutu diğer boyutuna oranla daha büyük olan, doğal ve yapay yollar ile üretimi yapılabilen, dayanımları ve elastisite modülleri yüksek olan malzemeler için lif terimi kullanılır (Ekincioğlu 2002).

Yapılan araştırmalar lif kullanımının çok eskilere dayandığını göstermektedir. Doğadan kolayca temin edilebilen lif türlerine doğal lif denir. At kuyruğu, keçi kılı, keten, kenevir, kendir, saman doğal killere örnek olarak verilebilir. Yapay liflerin ise tam olarak bilinmemekle beraber yaklaşık 19. yüzyılın sonlarına doğru ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Lifler elastisite modüllerinin ve dayanımlarının yüksek olması sebebiyle bilimsel çalışmalarda çok fazla tercih edilir. Doğal ve yapay lifler farklı alanlarda sıklıkla kullanılır. Liflerin özelliklerini geliştirmek adına da birçok farklı çalışma yapılmaktadır (Chawla 1998).

Lif Çeşitleri

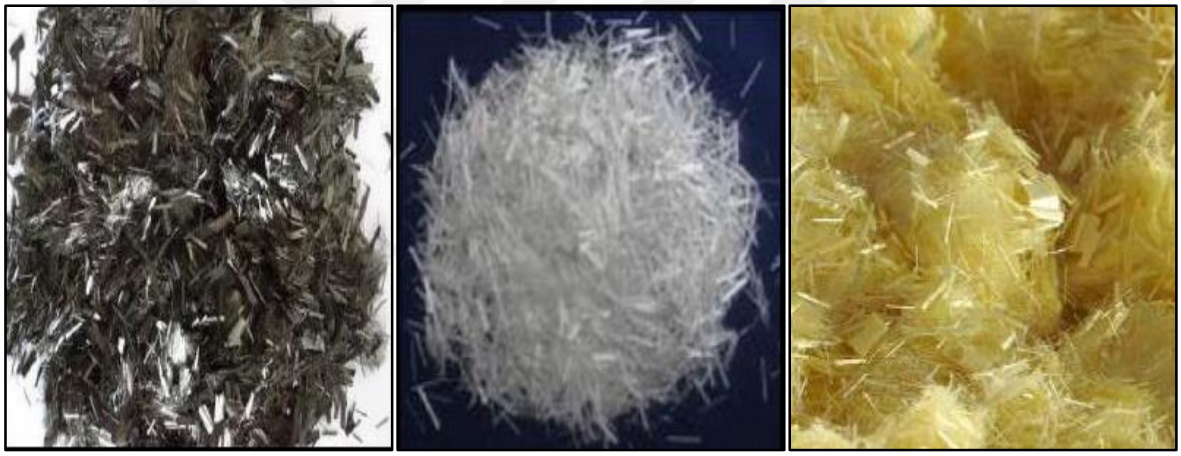
Lifler, yapılarına göre doğal ve yapay olmak üzere iki farklı gruba ayrılır. Doğal lifler, bitkiler, hayvanlar ve mineraller gibi doğal kaynaklardan olduğu gibi kullanılabilen liflerdir. Yapay lifler ise istenilen bazı özellikleri sağlamak için üretilen insan yapımı liflerdir. Özelliklerine ve kullanımlarına bağlı olarak birçok farklı lif türü vardır (Bunsell 1988).

Doğal lifler: Doğal kaynaklardan işlenmeden kullanılan liflerdir. Bu lifler işlenmeden kolayca elde edilebildiğinden, ekonomiktirler ve oldukça fazla tercih edilirler. Bambu, şeker kamışı, tahta, at yelesi ve saman bilinen en eski doğal liflerden bazılarıdır (Ekincioğlu 2002). Örnek olarak bazaltın yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle elde edilen bazalt lifi, mükemmel korozyon direncine ve izolasyona sahip, çevre kirliliğine yol açmayan bir liftir.

Sentetik lifler: İçerisinde plastikler, polimerler, polipropilen, polietilen ve aramid bulunan hidrokarbon bazlı katkılardır. Bu malzemeler suya ve sülfata dayanıklıdır ve yıllarca doğada bozulmadan kalır. Polimer lifler, yüksek mukavemetleri, alkali ortam koşullarına karşı yüksek dirençleri ve düşük maliyetleri nedeniyle takviye olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Katkı maddesi olarak kullanıldığında çekme dayanımını artırır ve mikro çatlamayı önlerler.

Metal lifler: Metaller, plastik deformasyon özelliklerinden dolayı birçok farklı alanda tercih edilmektedir. Metal lifler, yüksek mukavemetlerinden dolayı diğer liflere göre daha fazla kullanılmaktadır.

Cam lifler: Cam lifler; korozyona dayanıklı, sert ve esnek malzemelerdir. Ayrıca diğer malzemelerle etkileşime girmezler. Maliyetinin düşük olması nedeniyle endüstriyel uygulamalar başta olmak üzere farklı alanlarda da kullanılmaktadır (Barbero 1999). Bazı doğal ve yapay lifler Şekil 7'de görülmektedir.



(a) **(b)** **(c)**

Şekil 7. Bazı doğal ve yapay lifler; **(a)** Karbon lif **(b)** Cam lif **(c)** Aramid lifi (Anonim 2009)

Literatür Özetleri

Tez kapsamında kil zeminlerin iyileştirilmesinde biyopolimer ve lifin ortak etkisi araştırılmıştır. O nedenle literatür araştırması; polimerle zemin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar, liflerle zemin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar, polimer ve liflerle zemin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar başlıkları altında gerçekleştirilmiştir.

Polimerlerle ilgili çalışmalar

Naeini and Sadjadi (2008) çalışmalarında, zeminde iyileştirme amacıyla atık polimer malzemesinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Atık polimerden elden edilen lif doğal zemine ağırlıkça (%0-%4) oranlarında katılarak atık lif katkılı numuneler elde edilmiştir. Daha

sonra killi zeminlerin geoteknik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre; atık lif katkısıyla oluşturulan katkılı numunelerde mukavemetin önemli oranda arttığı ve yine lif oranının artışıyla mukavemetlerde artış olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayhan (2011) çalışmasında kil zemine biyopolimer katılmasıyla oluşan katkılı zeminin geoteknik özelliklerini incelemiştir. Ksantan gam ve kitosan biyopolimerleri doğal kil zemine farklı yüzdelerde (%0,25, %0,5, %0,75) katılarak katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan katkılı numuneler üzerinde kıvam limitleri, konsolidasyon, şişme basıncı ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda; ksantan gam ve kitosan biyopolimerlerinin kil zeminlerin likit limit değerlerini artırdığı, şişme potansiyelini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Swain *et al.* (2012) çalışmalarında geopolimer ve biyopolimerin şişen zeminler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sodyum bazlı alkali aktivatörler ve uçucu küle biyopolimer olarak zantam gam, guar gam ve geopolimer eklenerek katkılı numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelere serbest basınç dayanımı, şişme basıncı ve bazı geoteknik deneyler yapılmıştır. %40 uçucu kül ve %15 bentonit karışımının şişme basıncını yüksek oranda azalttığı ve biyopolimerlerin uygun oranda katkısının durabiliteyi artırdığı görülmüştür. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda guar gam katkısının serbest basınç mukavemetini zantan gamdan daha fazla artırdığı sonucuna varılmıştır.

Bagherinia (2013) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) kil zemin üzerinde polimerlerin etkisini araştırmıştır. Derin karıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelere donma-çözülme ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda düşük plastisiteli kilin mukavemetinin doymamış polyester ve biyopolimer katkısıyla arttığının, ancak yüksek plastisiteli kilin mukavemetinde fazla etkisinin olmadığı görülmüştür. Serbest basınç mukavemet deneyinden elde edilen en yüksek dayanım, 28 gün kür süresinde %0,02 guar gum, %3 kireç ve %20 doymamış polyester katkılı düşük plastisiteli kil numunesinde 8 MPa olarak bulunmuştur.

Kurt Albayrak (2014) yapmış olduğu doktora çalışmasında, laboratuvar ortamında hazırlanan nanokil-kompozitlerin bazı geoteknik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneyler kapsamında , hidrofob (su sevmeyen) bir organokil farklı oranlarda polimerlerle ve diğer katkı malzemeleriyle karıştırılarak nanokil-kompozit numuneleri elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler elektrokinetik, geoteknik ve dinamik deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda nanokil-kompozit numunelerin hidrofob yapılarını koruduğu, mukavemet özelliklerinde ise azalmalar olduğu saptanmıştır.

Chang *et al.* (2015) çalışmalarında kıvam arttırıcı özelliği ile bilinen ksantan gam biyopolimerini zemini iyileştirmek için kullanmışlardır. Farklı zemin çeşitleri ve farklı

biyopolimer yüzdelerinde hazırlanan numuneler bazı geoteknik deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda ksantan gam biyopolimerinin ince taneli zeminler ile daha iyi etkileşime girdiği ve zemin mukavemetini yüksek oranlarda arttırdığı sonucuna varılmıştır. Yüksek yüzdelerde biyopolimerle gerçekleştirilen deneylerde, biyopolimer kıvam arttırıcı özelliğinden dolayı karıştırma zorluğu neden olmuş ve istenen sonuçlar elde edilememiştir. Bu sebeple zemin için en uygun oranın % 1-% 1,5 olacağı ve üstünde oranlardan kaçınılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Keçecioğlu (2016) çalışmasında, kum zeminlere biyopolimer katkısının etkisini derin karıştırma yöntemi kullanarak incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda biyopolimer olarak sığır jelatini, xanthan gum, guar gum, tara gum, metil selüloz, karboksi metil selüloz, sodyum alijinat ve tapiyoka nişastası farklı oranlarda kullanılarak katkılı numuneler hazırlanmıştır. Katkılı numuneler laboratuvarda derin karıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanmış ve 3, 7, 28 günlük kürlere tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kum zeminlerin iyileştirilmesinde biyopolimerlerin olumlu sonuç vereceği görülmüştür. Sığır jelatini yüzdesinin ve kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca donma-çözülme sonrasında numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde önemli değişikliklerin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Pulat vd (2017) biyopolimer katkısının killi zeminlerin kompaksiyon, permeabilite ve kayma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada geoteknik uygulamalarda en çok tercih edilen biyopolimerler olan zantan gam, kitosan ve kitini kullanmışlardır. Bu biyopolimerleri farklı yüzdelerde (%0,25-%1) doğal zemin ile karıştırarak katkılı numuneler elde etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda biyopolimerlerin kuru birim hacim ağırlık değerlerini, kohezyon ve içsel sürtünme açısını belli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Optimum su içeriğinde ise önemli ölçüde bir değişim görülmemiştir. Sonuç olarak biyopolimerlerin geçirimsiz kil bariyerlerde, çöp depolama alanları altındaki kil bariyerlerde ve baraj gövdelerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gencer (2018) yüksek lisans tez çalışmasında, biyopolimer ile etkileştirilmiş kil-ponza tozu karışımlarının bazı mühendislik özelliklerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında kil, ponza tozu ile belirlenen oranlarda karıştırıldıktan sonra hazırlanan kil-ponza katkılı numunelere farklı yüzdelerde biyopolimer eklenmiştir. Hazırlanan numunelere bazı geoteknik deneyler yapılmış ve deney sonuçlarına göre biyopolimer yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin arttığı, hidrolik iletkenlik değerlerinin ise azaldığını görülmüştür.

Özenç (2018) çalışmasında polimer ve biyopolimer ile iyileştirilmiş zeminlerin farklı kür süresi ve donma – çözülme çevrimi etkisi altında geoteknik özelliklerinde ortaya çıkan değişimleri araştırmıştır. Ksantan gam, guar gam biyopolimerleri ve anyonik polimer kaolin kili ile karıştırılarak katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler %0,5-%2,0 oran aralığındaki katkı içeriğinde sıkıştırılmıştır. Numuneler 5 ve 10 çevrim donma- çözülmeye ve 7, 14 ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelerin serbest basınç değerleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda biyopolimer katkılı numunelerde, katkı yüzdesi ve kür süresinin artışıyla serbest basınç mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Anyonik polimer katkısı kullanılması durumunda ise serbest basınç dayanımında belirli bir değere kadar artış olduğu sonrasında ise azalma başladığı görülmüştür. Donma – çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ise serbest basınç dayanımında önemli oranda azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Altun (2019) yüksek lisans tez çalışmasında mermer tozu katılmış kil zeminlere biyopolimer katkısı ilave ederek mukavemet değerlerini, kıvam özelliklerini, kompaksiyon parametrelerini araştırmıştır. Bu amaçla doğal kil mermer tozu ile (%5, %15, %25) oranlarında karıştırılmış ve mermer tozu katkılı yeni kil numuneler elde edilmiştir. Daha sonra mermer-kil katkılı numuneler (%0,5, %1, %1,5) oranlarında keçiboynuzu gam ile karıştırılmış ve biyopolimer-kil-mermer katkılı numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen numunelere yapılan deney sonuçlarına göre, biyopolimer-kil-mermer katkılı numunelerin likit limit değerlerinin saf kile göre arttığı sonucuna varılmıştır. Keçiboynuzu gamı oranındaki artışla numunelerin serbest basınç mukavemeti artmıştır.

Sarıgöl (2021) tez çalışması kapsamında polipropilen ve homopolimer katkı malzemeleri ile kilin farklı donma-çözülme çevrimlerinde birim gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemek için serbest basınç deneylerini uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, polipropilen katkılı numunelerin serbest basınç değerlerinin homopolimer katkılı numunelerin serbest basınç değerlerinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Liflerle ilgili çalışmalar

Crockford *et al.* (1993) çalışmalarında polipropilen lif ile karıştırılan kil zeminlerin yol kaplama malzemesi olarak kullanımının yolun kullanım süresine etkisini incelemişlerdir. Lif katkısının; malzeme davranışını deformasyon bazında yumuşamadan pekleşmeye doğru değiştirdiği sonucuna varılmıştır.

Puppala and Musenda (2020) çalışmalarında kil zemini iyileştirmek için polipropilen lifini kullanmışlardır. Deneylerde 2 farklı şişebilen zemin türü, 2 farklı lif (%0-0,9 arasında 4

farklı oranda) kullanılmıştır. Hazırlanan kil ve lif-kil katkılı numunelere şişme, tek eksenli basınç, hacimsel rötre ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda lif katkısının tek eksenli basınç dayanımında doğal kile göre artış sağladığı, şişme basıncı ve hacimsel rötreyi ise azalttığı kanısına varılmıştır.

Lasbik *et al.* (2002) çalışmalarında kilin iyileştirilmesinde polipropilen lifin etkisini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında farklı oranlarda ve uzunluklarda liflerle kil-lif katkılı numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kil-polipropilen lif karışımının mekanik özelliklerinin lif içeriği ve lif uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini ve lif katkısının tek eksenli basınç dayanımını artırdığını saptamışlardır.

Ang and Erik (2003) çalışmalarında siltli killerin lifle iyileştirilmesinde numune boyutunun dayanım ve gerilme-birim deformasyon özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda numune boyutlarının kil-lif karışımının dayanım değerini büyük oranda etkilediği belirlenmiştir. Yine yapılan deneylerle lif katkılı zemin numunelerinin çaplarının 70 mm den büyük olması durumunda dayanımı daha doğru bir şekilde temsil edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Cai *et al.* (2006) çalışmalarında polipropilen lif ve kireç katkılarının killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında %0,05, %0,15 ve %0,25 yüzdelerinde lif ve %2, %5 ve %8 yüzdelerinde kireç kullanılarak katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan katkılı numunelere; şişme basıncı, tek eksenli basınç, direkt kesme ve çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda lif oranının artmasının mukavemeti ve büzülmeyi arttırdığını, şişme potansiyelini ise azalttığını saptamışlardır.

Kumar *et al.* (2006) çalışmalarında polyester lif katkısının kilin tek eksenli basınç dayanımı değerine etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,1, %0,5, %1, %1,5 ve %2 yüzdelerinde düz ve dalgalı lifler kullanılarak hazırlanan katkılı numunelere tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda lif katkısının kilin tek eksenli basınç dayanımını arttırdığı ve kil-lif-kum kombinasyonuyla basınç dayanımının daha çok arttığı belirlenmiştir.

Baykal and Özkul (2006) çalışmalarında kısa liflerin; killerin süneklik, sertlik ve çekme çatlaklarını azaltmaya yönelik olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında lastik talaşından elde edilen lif kil ile karıştırılıp katkılı numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin basınç ve kesme dayanımı davranışları incelenmiştir. İncelemeler sonucunda kilin drenajlı ve drenajsız kesme dayanımının değişmediği, ancak modifiye proktor enerjisiyle oluşturulan numunelerin drenajsız kayma mukavemetinin çok az düştüğü belirlenmiştir.

Rafalko *et al.* (2007) çalışmalarında kilin iyileştirilmesinde kısa ve uzun liflerin kimyasal stabilizatörlü veya stabilizatörsüz olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre uzun liflerin kimyasal stabilizatörsüz olarak kullanılması durumunda kilin sertliği ve dayanımının diğer durumlara göre en yüksek durumda olduğu; lifin kimyasal stabilizatörlü kullanılması durumunda ise kısa lifin kilin sertliğini maksimum oranda arttırdığı fakat dayanım artışının çok az olduğu gözlemlenmiştir. Lif oranının %1'den daha fazla kullanılması durumunda karıştırma işleminin zorlaştırdığı gözlemlenmiştir.

Zaimoğlu (2010) çalışmasında, ince daneli zemine polipropilen lif içerikli malzeme katılarak sağlanan katkılı malzemenin donma-çözülme ssonrasında tek eksenli serbest basınç dayanımını incelemiştir. Sonuç olarak kütle kaybında %50 oranında artış olduğu ve polipropilen lif oranı artıkça genellikle eksenel gerilmenin de arttığı sonucuna varılmıştır.

Akbulut vd (2015) çalışmalarında atık tavuk tüyünün yüksek plastisiteli (CH) kil zemin üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında atık tavuk tüyü; telek lifi ve tüf lifi şeklinde farklı oranlarda kil zemine eklenerek kil-lif katkılı numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelere donma-çözülme öncesinde ve 5-10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Tüy lifi ile iyileştirilmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin tüm donma-çözülme çevrimlerinde arttığı sonucuna varılmıştır.

Zaimoğlu *et al.* (2016) yapmış oldukları çalışmada farklı boylardaki (3mm, 6mm ve 12mm) polipropilen lifleri, ince taneli zemin içerisine rastgele ekleyerek donma-çözülme deneyi ile zemine olan etkisini araştırmışlardır. Lif oranı yapılan ön deneyelerle zeminin toplam kuru ağırlığının %0,15, %0,20 ve %0,25'i olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre donma-çözülme çevrim sayısının artması ile serbest basınç dayanımında azalma olduğu ancak lif uzunluğunun artışı ile donatılı numunelerin donatısız numunelere göre daha sünek davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Özdemir (2019) yüksek lisans tez çalışmasında doğal/sentetik lif ve uçucu kül katkılı killerin bazı geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Araştırma kapsamında; doğal bir kile farklı oranlarda (%0,5, %1, %1,5) ve farklı boyutlarda (2 mm, 5 mm) doğal (saman, kendir) ve sentetik lifler eklenerek lif katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan lif katkılı kil numunelere %10 uçucu kül eklenerek lif-uçucu kül katkılı numuneler elde edilmiş; daha sonra bu numunelere kıvam, serbest basınç ve donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; lif yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin arttığı ve en iyi sonucun kendir lifi ile sağlandığı belirlenmiştir. Donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde de doğal kile göre artma meydana geldiği görülmüştür.

Polimer ve liflerle yapılan çalışmalar

Costa *et al.* (2017) çalışmalarında enzim ve lif katkısının kildeki kuruma çatlaklarına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kil zemine ağırlıkça farklı yüzdelerde (lif: %0,3, enzim: %0,35, quar zamkı: %0,1) katkıları katılmış ve farklı katkılı numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde çeşitli geoteknik deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda enzim-lif kombinasyonunda en iyi iyileştirme sonucuna varılmıştır. Aynı numune doğal kil içeren numuneyle karşılaştırıldığında kilde oluşan çatlak sayısının ve çatlak genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Alavijeh *et al.* (2021) çalışmalarında polipropilen liflerin kireç ve ksantan gamı biyopolimeri ile stabilize edilmiş organik zeminin basınç dayanımı ve çekme dayanımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada doğal zemine %0,5 oranında polipropilen lif, %1 ve %3 oranında kireç ve %1 ve %1,5 oranında ksantan gam eklenmiştir. Katkılı ve katkısız numunelere tek eksenli basınç ve çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Kür süresi olarak 7-21 gün kullanılmıştır. Deneyler sonucunda liflerin ve biyopolimerin basınç dayanımını artırdığı kür süresinin mukavemeti artırdığı ve liflerin zemini daha sünek hale getirip, zeminin çekme dayanımını artırdığı belirlenmiştir.

Chen *et al.* (2022) siltli kil bir zemine farklı oranlarda polipropilen lif ve zantan gam ilave ederek katkılı numuneler elde etmiştir. Elde edilen numunelere deneyler yapılarak biyopolimer içeriğinin, lif içeriğinin ve kürleme süresinin mukavemet özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak biyopolimer ve elyafların birlikte kullanımının, her bir katkı maddesinin ayrı ayrı kullanılmasından daha yüksek bir dayanıma yol açtığı ve kür süresinin uzatılmasının biyopolimer ile zemin partikülleri arasındaki etkileşimi arttırdığı sonucuna varılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kil

Çalışmada kullanılan kırmızı renkli doğal kil (D) Erzurum Oltu yöresinden temin edilmiştir. Laboratuvara getirilen doğal kil etüvde 105 °C sıcaklığında 24 saat kurutulmuştur (Şekil 8). Kurutulan kil Los Angeles aşındırma cihazı kullanılarak öğütülmüş ve deneylerde kullanılmıştır (Şekil 9). Kil zemin üzerinde Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda deneyler yapılarak bazı geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen geoteknik özellikler Tablo 2'de görülmektedir.Yapılan hidrometre analizinde, kil yüzdesi (<0.002mm) %58 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Kil Zemine Ait Bazı Özellikler (Güven vd 2023)

Geoteknik Özellik	Değer
Geçen Yüzde (<0.002mm) (%)	58
Özgül Ağırlık	2,72
Optimum Su İçeriği (%)	21
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)	16,3
Likit Limit (%)	59
Plastik Limit (%)	26
Plastisite İndisi (%)	33
Zemin Sınıfı (USCS*)	CH
Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)	390

*Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

Şekil 8. Etüvde kurutulan kil

Şekil 9. Öğütülmüş kil

Biyopolimer

Deneylerde biyopolimer olarak Smart Kimya'dan temin edilen toz haldeki keçiboynuzu gam (KBG) kullanılmıştır (Şekil 10). Keçiboynuzu gam, hidrokolloidlerin bir çeşidi olan Galaktomannan olup viskozitesi 2000-3500, pH'ı 5-7 arasındadır. Baklagiller grubu içerisinde yer alan karob ağacından elde edilen keçiboynuzu gamın, jelleştirici, dengeleyici ve kıvam artırıcı özellikleri bulunmaktadır (Dey *et al.* 2012).

Şekil 10. Deneylerde kullanılan keçiboynuzu gam tozu

Lif

Çalışmada kullanılan sentetik lif, 2H Tekstil'den temin edilmiştir. 0,15 mm kalınlıktaki polyester iplik 5 mm uzunluğunda kesilerek kil kuru ağırlığının %0,15, %0,30, % 0,60 oranlarında kullanılmıştır (Şekil 5.11).

Şekil 11. 5 mm uzunluğunda kesilmiş lif

Numunelerin Hazırlanması

Çalışma kapsamında katkılı ve katkısız numunelerin elde edilişi aşağıda verilmiştir. Numuneler hazırlanırken Harvard Minyatür Kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su içerikleri kullanılmıştır. Doğal kil numunenin ve keçiboynuzu gam katkılı kil numunelerin kompaksiyon parametreleri Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Kompaksiyon Parametreleri (Güven vd 2023)

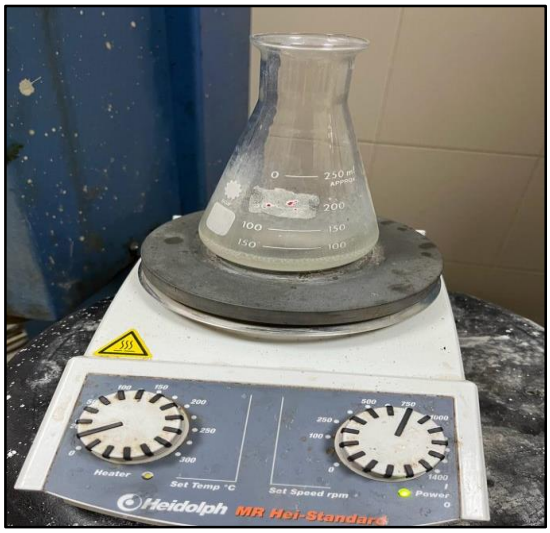
Numune	Optimum su içeriği (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)
B0-L0	21	16,3
B0,5-L0	22,5	16,4
B1-L0	23	15,5
B1,5-L0	24	15,6

Doğal kil numunelerinin elde edilmesi

Kil, etüvde (105°C)'de 24 saat kurutulup öğütüldükten sonra deneyler için hazır hale getirilmiştir. Belirlenen optimum su muhtevasında Harvard Minyatür Kompaktör ile sıkıştırılarak katkısız doğal kil numuneleri hazırlanmıştır.

Biyopolimer katkılı killerin elde edilmesi

Biyopolimer katkılı killer elde edilirken, öncelikle her bir biyopolimer katkılı kilin optimum su içeriği kadar su tartılmıştır. Daha sonra bu su miktarının ağırlıkça yüzdesi (%0,5, %1, %1,5) kadar biyopolimer tartılmıştır. Biyopolimer katkılı killer hazırlanırken belirlenen oranlarda suya katılmış keçiboynuzu gamı, manyetik karıştırıcıda 800-1000 rpm hızında çözünene kadar karıştırılmış, elde edilen solüsyon kile ilave edilmiş ve homojen şekilde karıştırılmıştır (Kurt Albayrak ve Gencer 2021). Şekil 12'de deneylerde kullanılan manyetik karıştırıcı görülmektedir.



Şekil 12. Deneylerde kullanılan manyetik karıştırıcı

Lif katkılı killerin elde edilmesi

Lif katkılı killerin elde edilmesi için kilin ağırlıkça yüzdesi (%0,15, %0,30, %0,60) kadar lif, kil içerisine ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır (Şekil 13). Daha sonra kilin optimum su muhtevasında karıştırma işlemine devam edilmiş ve lif katkılı kil numuneler elde edilmiştir.

Şekil 13. Kil-lif karışımı

Biyopolimer-lif katkılı killerin elde edilmesi

Biyopolimer-lif katkılı killer elde edilirken öncelikle kil ve kilin ağırlıkça yüzdesi (%0,15, %0,30, %0,60) cinsinden belirlenmiş olan lif tartılarak kuru halde karıştırılmıştır. Ardından biyopolimer katkılı killerin optimum su muhtevası kadar su ve su miktarının ağırlıkça yüzdesi (%0,5, %1, %1,5) kadar biyopolimer tartılmış ve biyopolimer 800-1000rpm hızda manyetik karıştırıcı kullanılarak çözülmüştür. Karıştırılmış olan kil-lif karışımı içerisine biyopolimer-su karışımı ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılmış ve biyopolimer-lif

katkılı kil numuneler elde edilmiştir (Şekil 14). Çalışmada kullanılan katkı yüzdeleri Tablo 4'te görülmektedir.

Şekil 14. Kil-lif-biyopolimer karışımı

Tablo 4. Kullanılan Katkı Yüzdeleri

Numune	Lif (%)	Biyopolimer (%)
B0-L0	-	-
B0,5-L0	-	0,5
B1-L0	-	1
B1,5-L0	-	1,5
B0-L0,15	0,15	-
B0-L0,30	0,30	-
B0-L0,60	0,60	-
B0,5-L0,15	0,15	0,5
B1-L0,15	0,15	1
B1,5-L0,15	0,15	1,5
B0,5-L0,30	0,30	0,5
B1-L0,30	0,30	1
B1,5-L0,30	0,30	1,5
B0,5-L0,60	0,60	0,5
B1-L0,60	0,60	1
B1,5-L0,60	0,60	1,5

Oranların seçiminde literatürden yararlanılmış ve ön deneyler sonucunda karar verilmiştir. Hazırlanan tüm bu karışımlarda, karışımlar tam olarak homojen oluncaya kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan karışımlar daha önce taban ve yan yüzeyleri ince bir tabaka olacak şekilde yağlanmış 71 mm yüksekliğinde ve 32 mm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisinde Harvard Minyatür Kompaksiyon deney aleti kullanılarak

sıkıştırılmıştır. Numune kalıp içerisinde sıkıştırıldıktan sonra kalıp ilave yakası çıkartılmış ve metal kalıp üzerindeki fazlalıklar alınmıştır. Üzeri tam olarak düzlenen numune hidrolik numune çıkarma aleti yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır.

Şekil 15(a)'da yapılan karıştırma işlemi, Şekil 15(b)'de yağlanmış metal kalıp görülmektedir.

Şekil 16'da ise hazırlanan numuneler görülmektedir. Numuneler 1, 7, 28, 56 gün laboratuvar ortamında (22±2 °C, %18,5 nem) bekletilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

(a) **(b)**

Şekil 15. (a) Karıştırma işlemi **(b)** Yağlanmış metal kalıp

Şekil 16. Hazırlanan numuneler

Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon; dayanımın artması, oturma ve geçirimlilik parametrelerinin iyileştirilmesi için zeminlerin tabakalar halinde serilerek sıkıştırması işlemi olarak tanımlanabilir. Kompaksiyonun asıl amacı; zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru yoğunluğu veren su muhtevasına ulaşmaktır.

Kil numunelerin ve katkılı kil numunelerin kompaksiyon parametreleri olan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Güven vd (2023) çalışmasından alınmıştır. Çalışmada kompaksiyon parametreleri Harvard Minyatür Kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir.

Donma-Çözülme Deneyi

Donma çözülme (DÇ) deneyi için optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler belirlenen her bir kür süresi (1, 7, 28 ve 56 gün) sonrasında 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur.

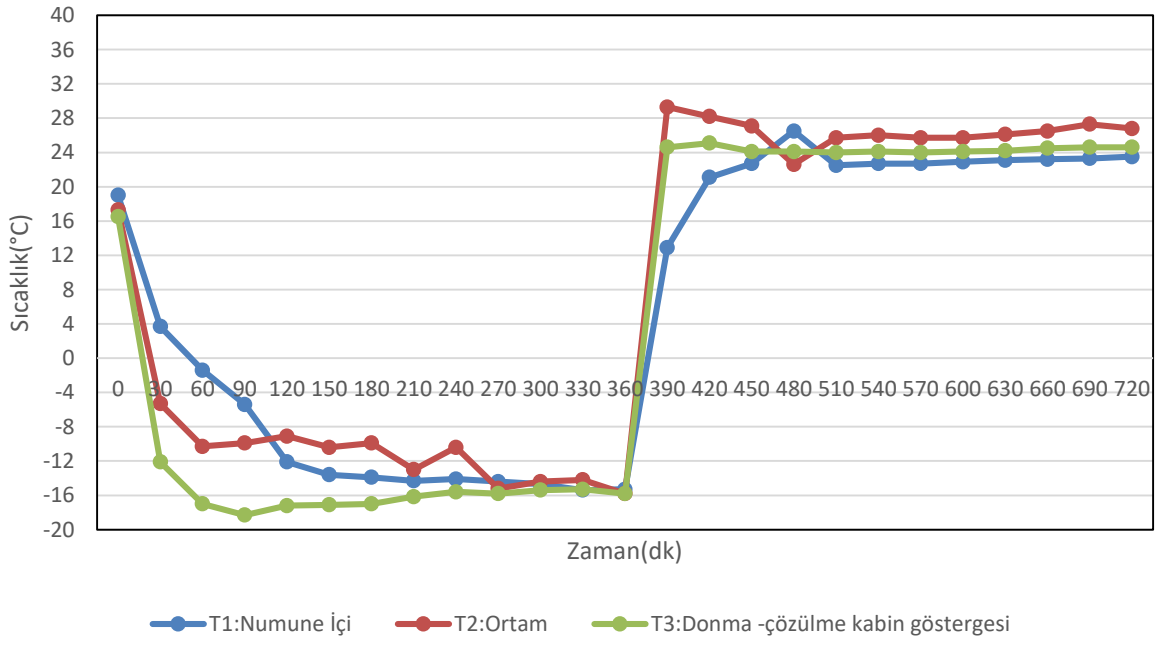
Donma çözülme deneyleri; boyutları 110 cm x 55 cm x 55 cm olan, minimum -25°C maksimum +60°C olarak programlanabilen, kabin içi homojen sıcaklık dağılımı bir fan ile sağlanan, tam otomatik donma çözülme kabininde gerçekleştirilmiştir (Akbulut ve Zaimoğlu 2019).

Donma-çözülme çevrimi uygulanacak numuneler su muhtevalarında değişme olmaması için alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Sıcaklık değerleri donma için -20°C çözülme için +25°C (Ghazavi and Roustaie 2012; Akbulut ve Zaimoğlu 2019) seçilmiştir. 6 saat donma 6 saat çözülme olmak üzere her bir çevrim 12 saatte tamamlanacak şekilde cihaz ayarlanmıştır. Cihaz, ayarlanan döngü sonuna geldiğinde otomatik olarak tüm işlemleri durdurur. Çevrim boyunca donma-çözülme kabininin kapağının açılmamasına dikkat edilmiş ve çevrim sonrasında kabinden çıkarılan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Tüm yüzdeler için deneyler 3 adet numune üzerinde yapılmış ve ortalamaları kullanılmıştır. Şekil 17'de kullanılan otomatik donma-çözülme kabini görülmektedir. Şekil 18'de ise donma-çözülme çevrimine hazır numuneler görülmektedir.

Şekil 17. Donma-çözülme deney aleti

Şekil 18. Donma-çözülme çevrimine hazır numuneler

Donma-çözülme cihazı ekranında okunan sıcaklık değeriyle konulan numune ve kabin içerisinde oluşan sıcaklık arasında fark olup olmadığını belirlemek amacıyla donma -çözülme kabininin rejimi kontrol edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan deneme numunesinin merkezine termokupl (T1) yerleştirilmiştir. Diğer termokupl (T2) ise kabinin içerisinde tam ortasına denk gelecek şekilde asılı halde yerleştirilmiştir. Termokupl yerleştirilen numune donma-çözülme kabini içerisine konularak 12 saat süre ile her 30 dakikada bir T1, T2 ve donma-çözülme kabininin ekranındaki sıcaklıklar kaydedilmiştir. Kaydedilen sıcaklıklar kullanılarak kabininin rejimini belirlemek için zaman-sıcaklık ilişkisi çizilmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Kabine ait sıcaklık-zaman ilişkisi grafiği

Serbest Basınç Deneyi

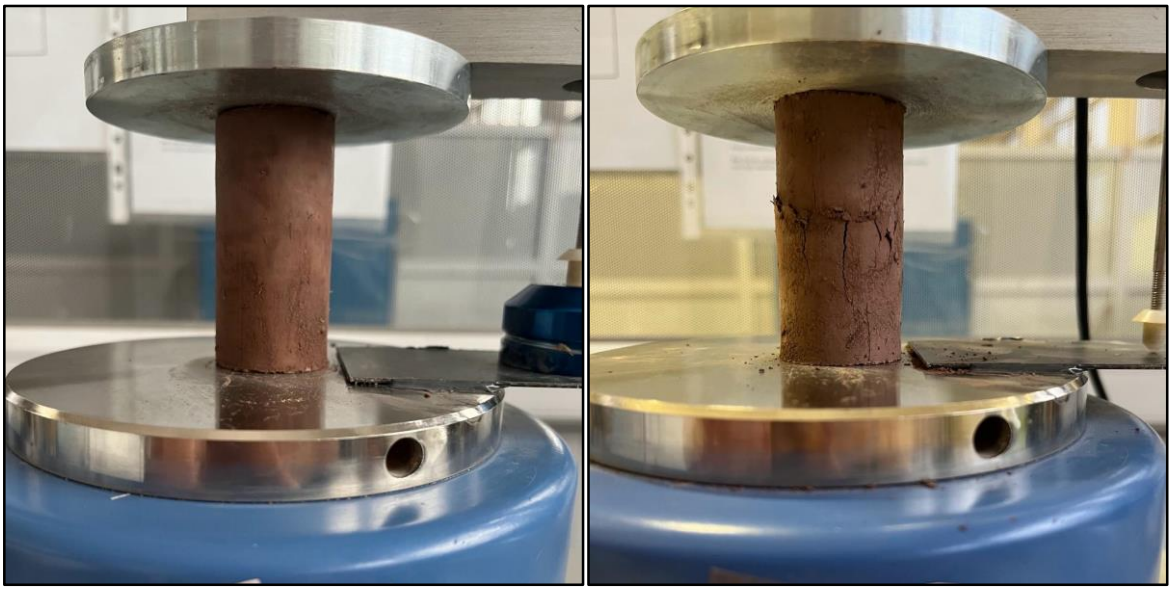
Killi ince daneli zeminlerin serbest basınç mukavemetini elde etmek için serbest basınç deneyi yapılır. Serbest basınç deneyi, hazırlanan numunenin üzerine gelecek eksenel doğrultudaki yük karşısında göstereceği dayanımı bulmak amacıyla yapılır.

Donma-çözülme deneyine tabi tutulan tüm numuneler üzerinde serbest basınç deneyi ASTM D 2166 standardına göre yapılmıştır. Deney aletine yerleştirilip sabitlenen numunelere yükleme hızı 0,8 mm/dk olacak şekilde düşey yönde kuvvet uygulanmıştır (Şekil 20). Numunenin kırıldığı andan bir kaç dakika sonrasına kadar deney devam ettirilmiş daha sonra sonlandırılmıştır. Deney boyunca kuvvet ve deformasyonlar bilgisayara kurulan program aracılığıyla okunmuş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin çiziminde kullanılmıştır. Deney tüm yüzdeler için 3'er kez tekrar edilmiş ve ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri kullanılmıştır. Şekil 21'de deney öncesi ve sonrası numune görülmektedir.

A_f zemin numunelerin kırılma anındaki en kesit alanı ve P_{max} kırılma anındaki yük değeri olmak üzere q_u serbest basınç mukavemeti Eşitlik 1. ile hesaplanmıştır.

$$q_u = P_{max} / A_f \quad (1)$$

Şekil 20. Serbest basınç deney düzeneği



(a) **(b)**

Şekil 21. (a) Serbest basınç deneyi öncesi numune **(b)** Serbest basınç deneyi sonrası numune

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Katı yüzeylerin fiziksel büyüklüğü hakkında bilgi sahibi olmak için yapılan yüzey karakterizasyonu yöntemlerinden biri de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yöntemidir.

SEM ile analiz, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ve bu elektron demetinin numunenin tüm yüzeyi boyunca taratılması ile gerçekleşir. Taratma sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan etkileşimler sinyallere dönüştürülüp güçlendirilen sinyaller ekrana yansıtılır. SEM yönteminde elektron demeti ile numune atomları arasında farklı etkileşimler oluşabilir. Yüksek enerjili demet elektronları ile numune atomlarının dış yörünge elektronlarının etkileşimi sonucu numune yüzeyi hakkında bilgi veren düşük enerjili elektronlar oluşmaktadır. Yine aynı şekilde yörünge elektronları ile enerjisi az elektron demeti girişimleri sonucu oluşan ikincil elektronların görüntüsü sinyale dönüştürülerek görüntü elde edilir (Tezcan 2008).

Büyütme faktörü, SEM analizi görüntülerinde yapılan büyütme olarak tanımlanabilir. Büyütme faktörü ile numune boyunca tarama çizgisinin genişliği arasında ters orantı vardır. Yani sonsuz küçük bir noktaya odaklanan elektron demetiyle değişik oranlarda büyütme sağlanabilir. Ulaşılabilecek büyütme oranı 10 kat (10X) ile 100000 kat (100000X) arasında sınırlıdır (Tezcan 2008).

Çalışma kapsamında bazı numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri öncesi ve sonrası mikro yapıdaki değişimleri incelemek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM

analizi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'nde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Zeiss Sigma 300 marka cihaz kullanılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

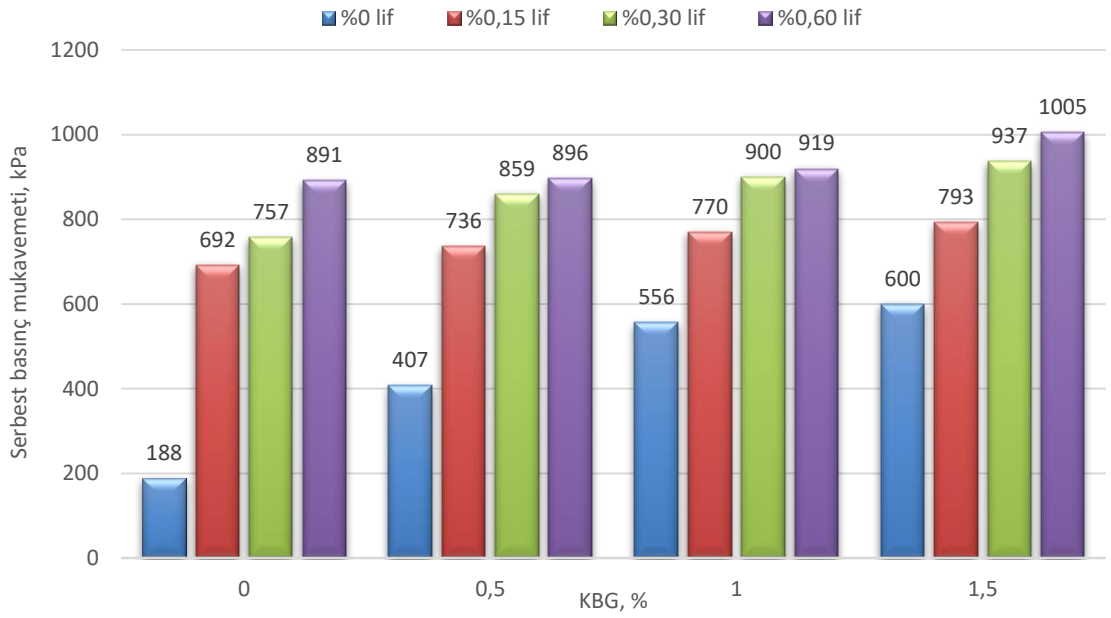
Bu tez çalışması kapsamında farklı oranlarda biyopolimer (%0,5, %1, %1,5) ve lif (%0,15, %0,30, %0,60) kil zemin içerisine ilave edilerek katkılı numuneler elde edilmiştir. Bu numuneler 1, 7, 28 ve 56 gün kürde bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler 10 çevrim donma çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin donma-çözülme sonrası dayanımlarını belirlemek amacıyla donma-çözülme çevrim sayısını tamamlayan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır.

1 gün kürde bekletilen ve donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (1. gün; 10 çevrim)

	1. gün	**LİF (%)**			
		0	**0,15**	**0,3**	**0,6**
KBG (%)	**0**	188	692	757	891
	0,5	407	736	859	896
	1	556	770	900	919
	1,5	600	793	937	1005

Şekil 24'te KBG yüzdesindeki Şekil 25'te ise lif yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 22. KBG yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 22'ye göre 1 günlük numunelerde biyopolimer yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,5 biyopolimer katkısı (B0,5-L0) %116 oranında, yalnız %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %196 oranında, yalnız %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0) %219 oranında artırmıştır.

Şekil 23. Lif yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 23'e göre 1 günlük numunelerde lif yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0,15) %268 oranında , yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0,30) %303 oranında, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0,60) %374 oranında artırmıştır.

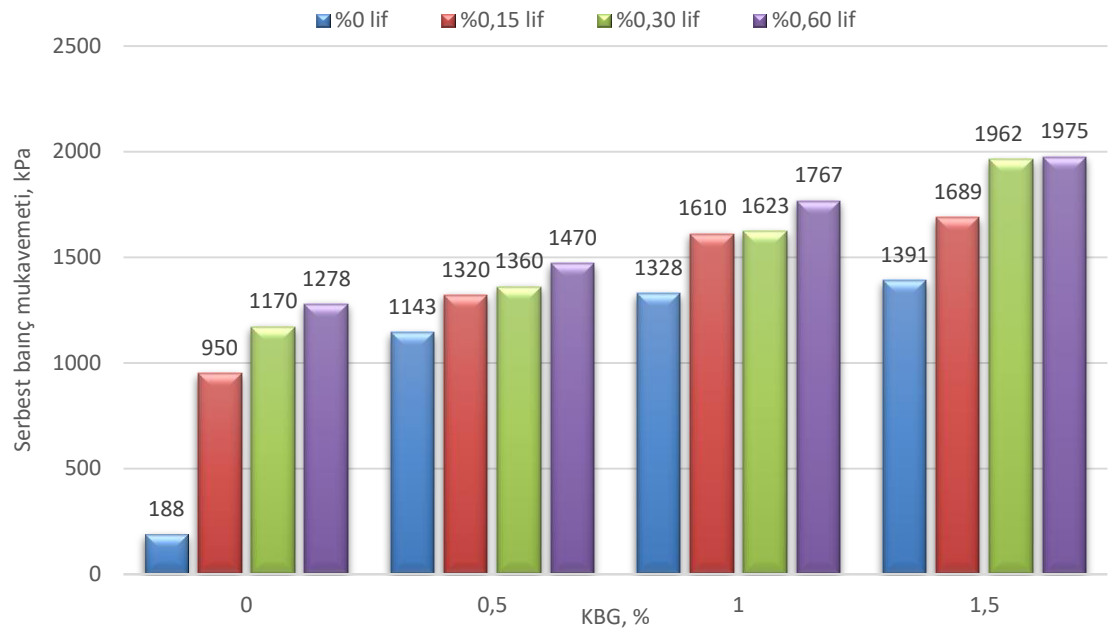
Keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde 1 gün kürde bekletilen B1,5-L0,60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre %435 oranında arttığı görülmektedir.

7 gün kürde bekletilen ve donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Donma Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (7. gün; 10 çevrim)

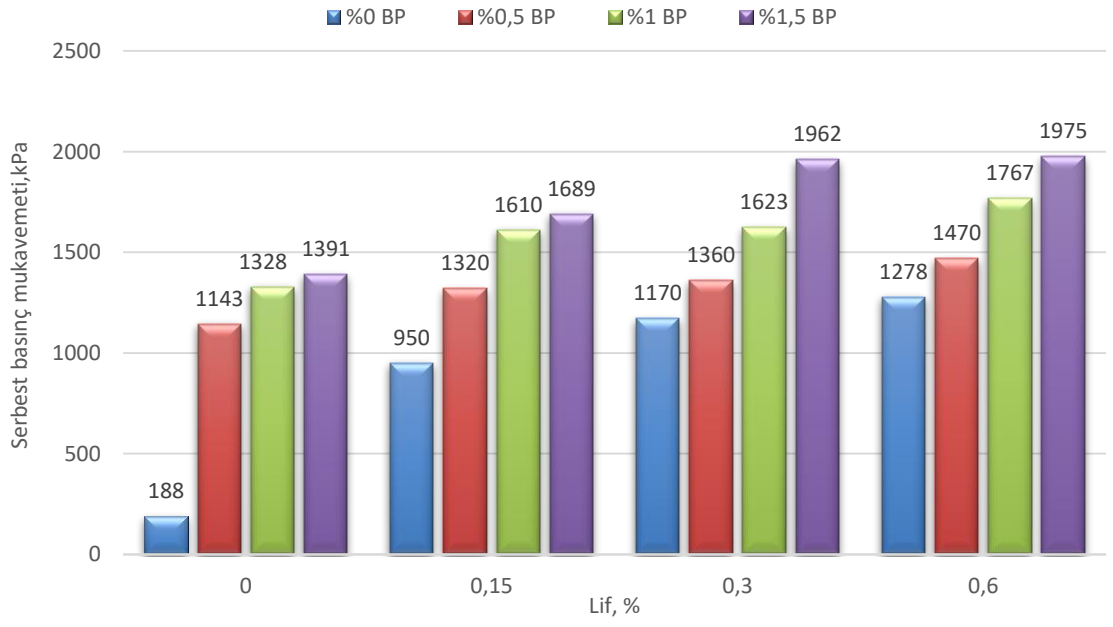
	7. gün	**LİF (%)**			
		0	**0,15**	**0,3**	**0,6**
KBG (%)	**0**	188	950	1170	1278
	0,5	1143	1320	1360	1470
	1	1328	1610	1623	1767
	1,5	1391	1689	1962	1975

Şekil 24'te KBG yüzdesindeki, Şekil 25'te ise lif yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 24. KBG yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 24'e göre 7 günlük numunelerde biyopolimer yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,5 biyopolimer katkısı (B0,5-L0) %508 oranında, yalnız %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %606 oranında, yalnız %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0) %640 oranında artırmıştır.



Şekil 25. Lif yüzdesindeki artışla 7 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 25'e göre 7 günlük numunelerde lif yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0,15) %405 oranında , yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0,30) %522 oranında, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0,60) %580 oranında artırmıştır.

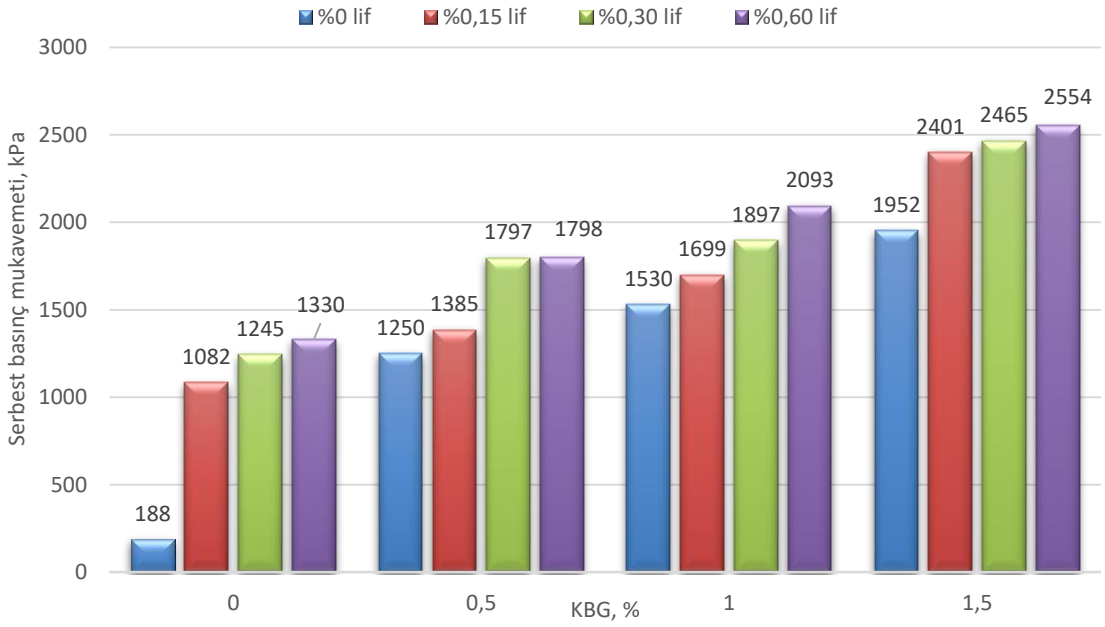
Keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde 7 gün kürde bekletilen B1,5-L0,60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre %951 oranında arttığı görülmektedir.

28 gün kürde bekletilen ve donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (28. gün; 10 çevrim)

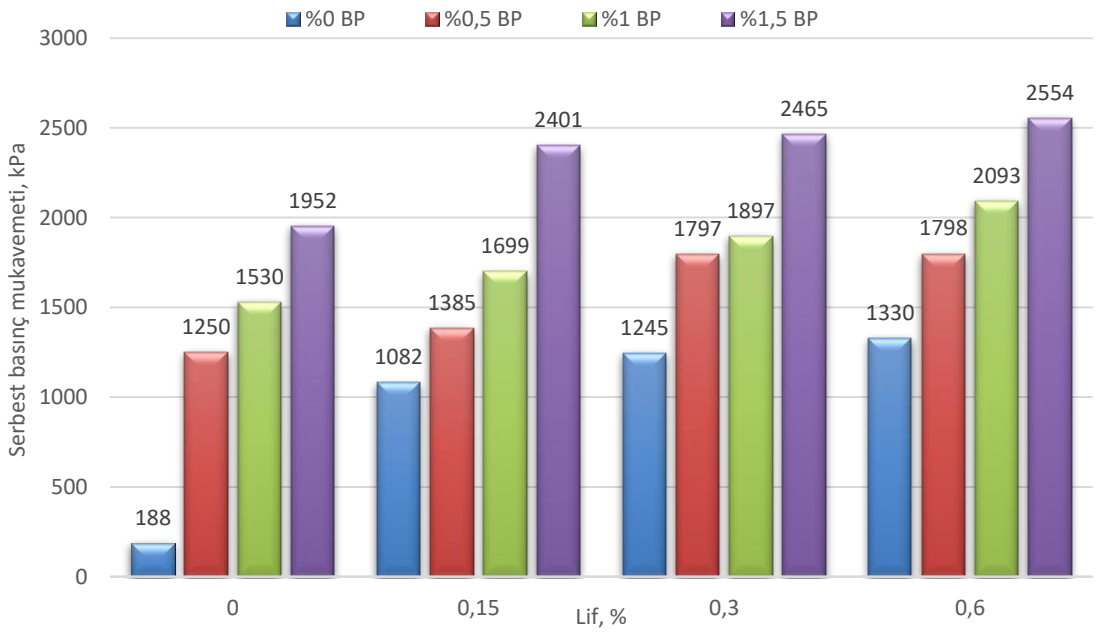
	28. gün	**LİF (%)**			
		0	**0,15**	**0,3**	**0,6**
KBG (%)	**0**	188	1082	1245	1330
	0,5	1250	1385	1797	1798
	1	1530	1699	1897	2093
	1,5	1952	2401	2465	2554

Şekil 26'da KBG yüzdesindeki, Şekil 27'de ise lif yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 26. KBG yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 26'ya göre 28 günlük numunelerde biyopolimer yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,5 biyopolimer katkısı (B0,5-L0) %565 oranında, yalnız %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %714 oranında, yalnız %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0) %938 oranında artırmıştır.



Şekil 27. Lif yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 27'ye göre 28 günlük numunelerde lif yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0,15) %476 oranında, yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0,30) %562 oranında, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0,60) %607 oranında artırmıştır.

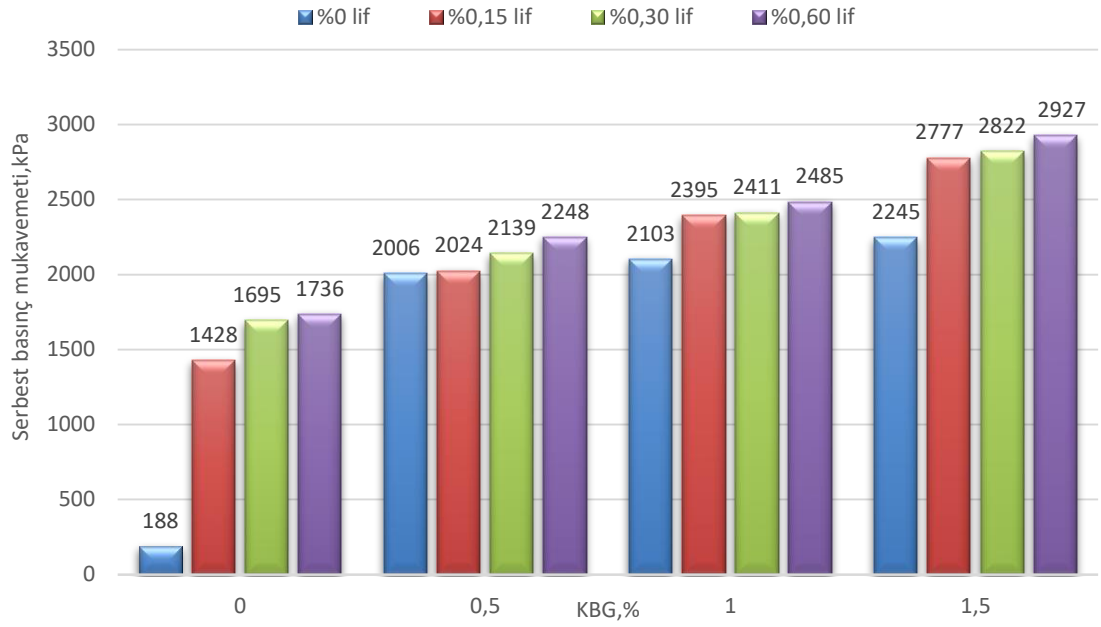
Keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde 28 gün kürde bekletilen B1,5-L0,60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre %1259 oranında arttığı görülmektedir.

56 gün kürde bekletilen ve donma-çözülme çevrimine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetleri (56. gün; 10 çevrim)

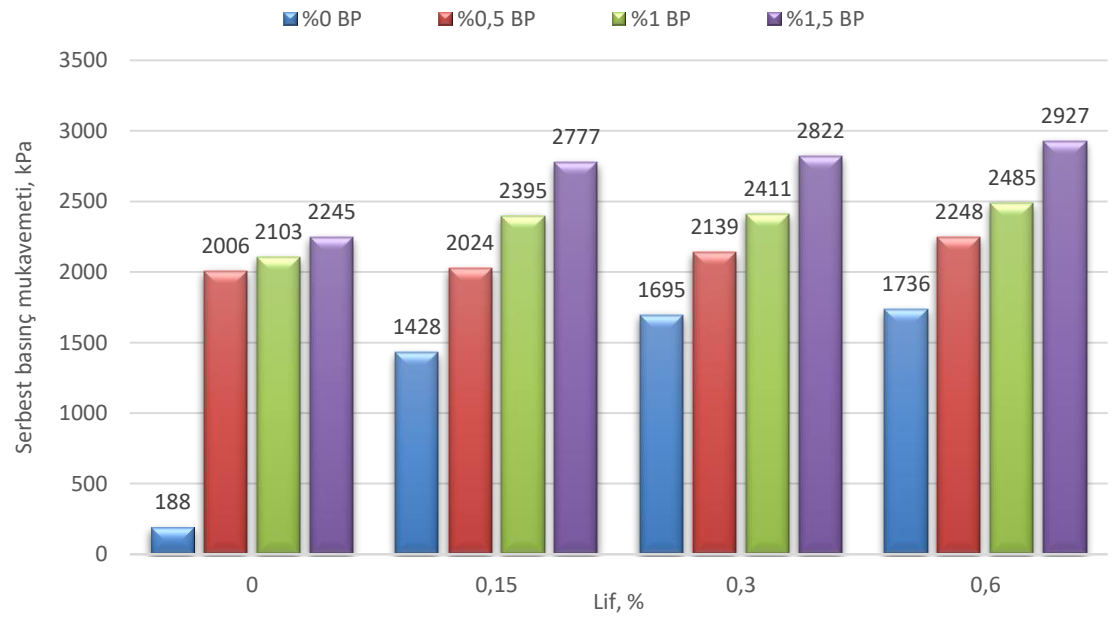
	56. gün	**LİF (%)**			
		0	**0,15**	**0,3**	**0,6**
KBG (%)	**0**	188	1428	1695	1736
	0,5	2006	2024	2139	2248
	1	2103	2395	2411	2485
	1,5	2245	2777	2822	2927

Şekil 28'de KBG yüzdesindeki, Şekil 29'da ise lif yüzdesindeki artışla 56 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 28. KBG yüzdesindeki artışla 56 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 28'e göre 56 günlük numunelerde biyopolimer yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,5 biyopolimer katkısı (B0,5-L0) %967 oranında, yalnız %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %1019 oranında, yalnız %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0) %1094 oranında artırmıştır.



Şekil 29. Lif yüzdesindeki artışla 56 günlük numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 29'a göre 56 günlük numunelerde lif yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkısı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0,15) %660 oranında , yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0,30) %802 oranında, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0,60) %823 oranında artırmıştır.

Şekil 22- Şekil 29 incelendiğinde, keçiboynuzu gam ve lif yüzdelerinde meydana gelen artışla numelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Liflerin, killerin serbest basınç mukavametini artırdığı bilinmektedir. Lasbik *et al*. (2002) polipropilen lif ile kil karışımlarının geoteknik özelliklerini araştırdıkları çalışmada, lif katkısının zeminin tek eksenli basınç dayanımını artırdığını saptamışlardır. Abdi *et al*. (2021) kireç ve polipropilen lif takviyesinin, basınç ve kesme dayanımı özelliklerine etkisini incelenmişler ve killi karışımlara rastgele eklenen polipropilen liflerinin serbest basınç, kesme dayanımı ve sünekliği arttırdığı sonucuna varmışlardır. Biyopolimerler de killerin serbest basınç mukavemetini artırmaktadır. Biyopolimerler genel olarak elektrik yüklü büyük özgül yüzeylere sahip olduklarından ince daneli zeminlerle etkili bir şekilde etkileşime girebilirler. Buna bağlı olarak yüksek mukavemetli biyopolimer-zemin matrisleri meydana gelir (Chang *et al.* 2016). Chang *et al*. (2015), kum ve kil zeminleri zantan gam ile iyileştirmiş, her iki zemin türü için de zantan gamın mukavemeti artırıcı bir etkisi olduğunu belirtmiş, ancak ince daneli zeminlerle biyopolimerin daha iyi etkileştiğini ifade etmişlerdir.

Keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde 56 gün kürde bekletilen B1,5-L0,60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetine göre %1457 oranında arttığı görülmektedir.

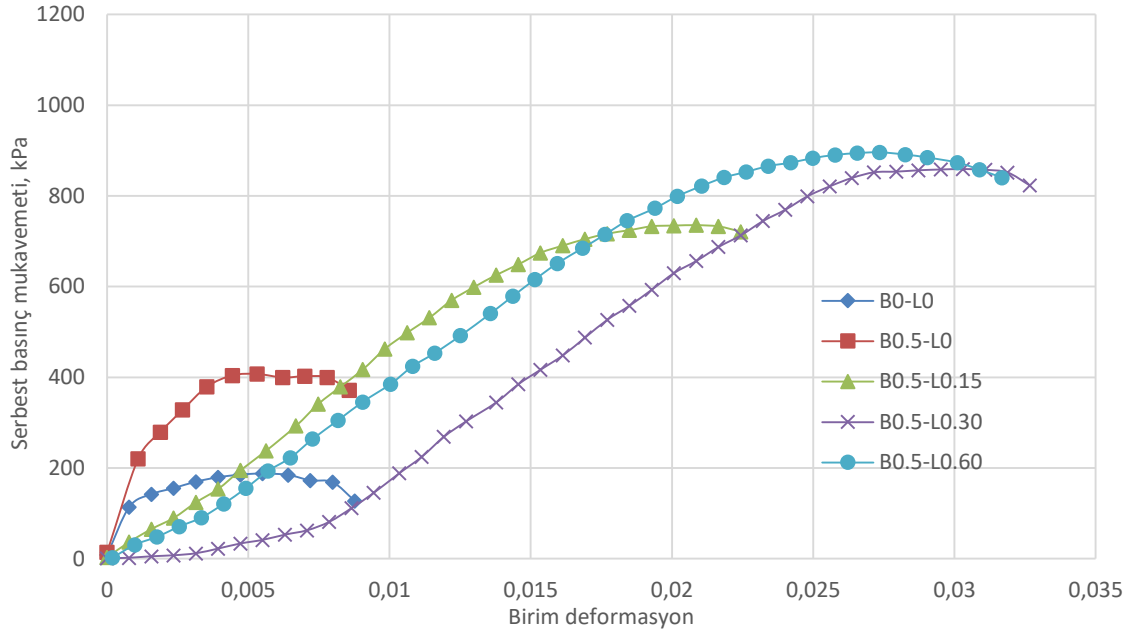
Tablo 9'da donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde doğal kile göre meydana gelen artış yüzdeleri verilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde donma-çözülme sonrası mukavemetlerde en fazla artışın 56 günlük küre tabi tutulan B1,5-L0,60 numunesinde elde edildiği görülmüştür.

Tablo 9. DÇ Sonrası Mukavemetlerinde Doğal Kile Göre Meydana Gelen Artış Yüzdeleri

Numune	1 gün	7 gün	28 gün	56 gün
	%	%	%	%
B0-L0	0	0	0	0
B0,5-L0	116	508	565	967
B1-L0	196	606	714	1019
B1,5-L0	219	640	938	1094
B0-L0,15	268	405	476	660
B0-L0,30	303	522	562	802
B0-L0,60	374	580	607	823
B0,5-L0,15	291	602	637	977
B1-L0,15	310	756	804	1174
B1,5-L0,15	322	798	1177	1377
B0,5-L0,30	357	623	856	1038
B1-L0,30	379	763	909	1182
B1,5-L0,30	398	944	1211	1401
B0,5-L0,60	377	682	856	1096
B1-L0,60	389	840	1013	1222
B1,5-L0,60	435	951	1259	1457

Donma-çözülme zemin iskeletinde ve dane yapısında değişikliğe neden olmakta ve buna bağlı olarak donma-çözülme etkisi altında zeminin dayanımı değişmektedir (Hohmann-Porebska 2002). Deneyler sonucunda lif ve biyopolimer katkısının kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini olumlu yönde etkilediği görülmüştür (Tablo 9). Biyopolimer ile iyileştirilmiş zeminin boşluklarında oluşan ve danelerin etrafını saran hidrojel, donma-çözülme sırasında zeminin nem kaybını azaltır (Hamza *et al*. 2023). Bu nedenle donma-çözülme davranışı iyileşir. Liflerin katkı malzemesi olarak kullanımı çekme dayanımını artırır ve mikro çatlakları engelleyici etki yapar (Nicholson 2015). Deneyler sonucunda rastgele dağılmış liflerin zeminin sadece çekme dayanımını değil serbest basınç dayanımını da artırdığı görülmüştür (Consoli *et al.* 2005).

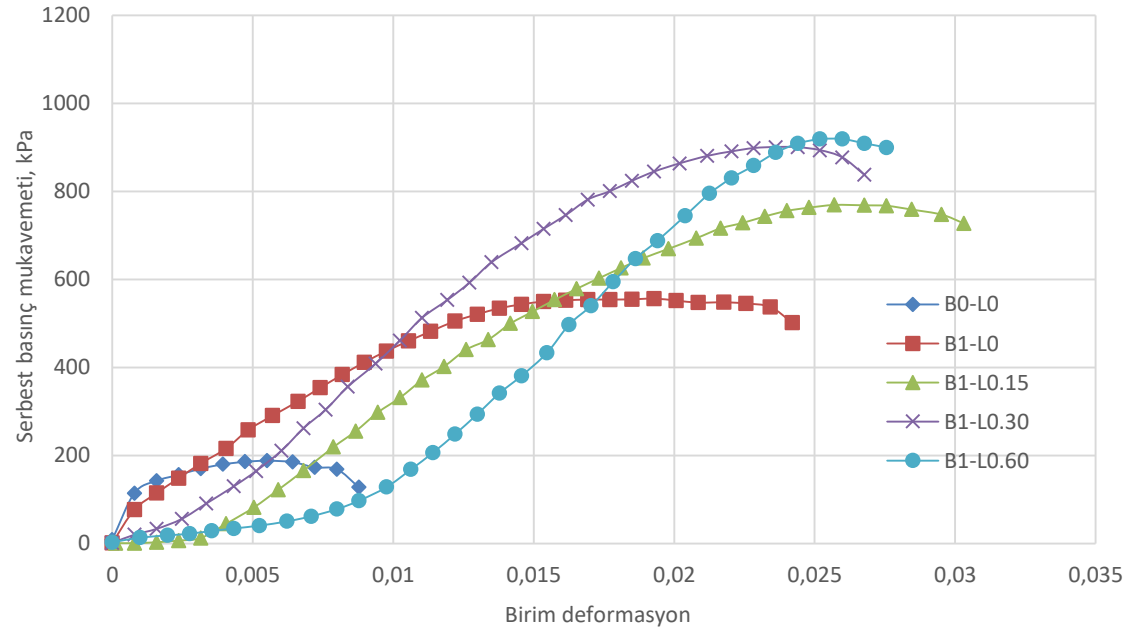
1 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B0,5-L0, B0,5-L0,15, B0,5-L0,30, B0,5-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen Gerilme-Birim Deformasyon ilişkileri Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 30. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim)

Şekil 30 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 30 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

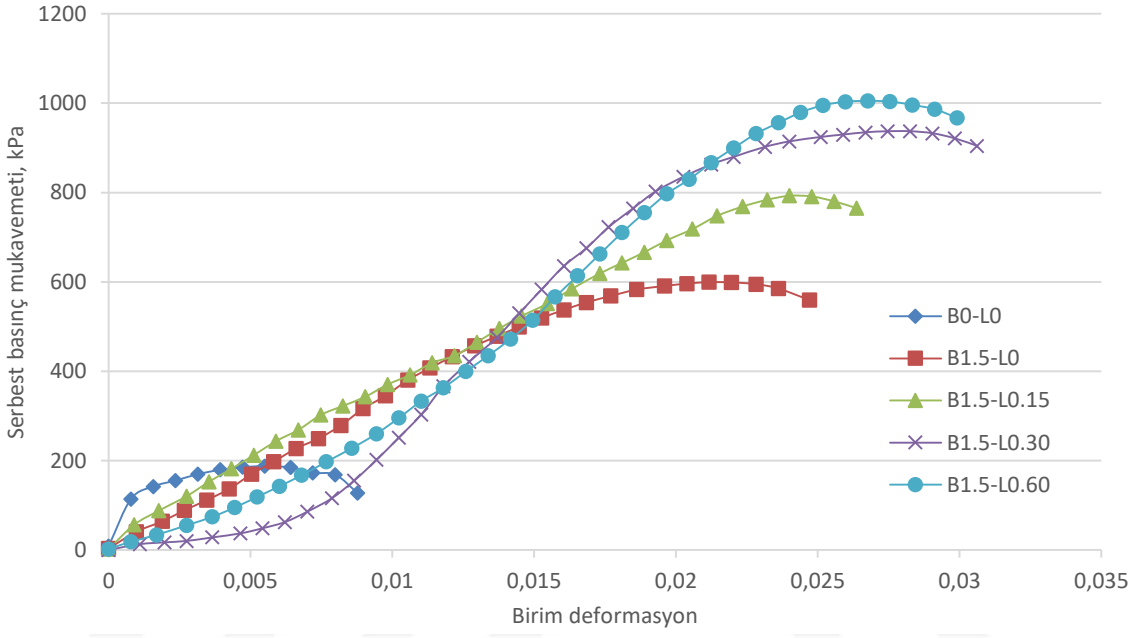
1 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B1-L0, B1-L0,15, B1-L0,30, B1-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme deformasyon ilişkileri Şekil 31'de gösterilmiştir.



Şekil 31. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim)

Şekil 31 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 31 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

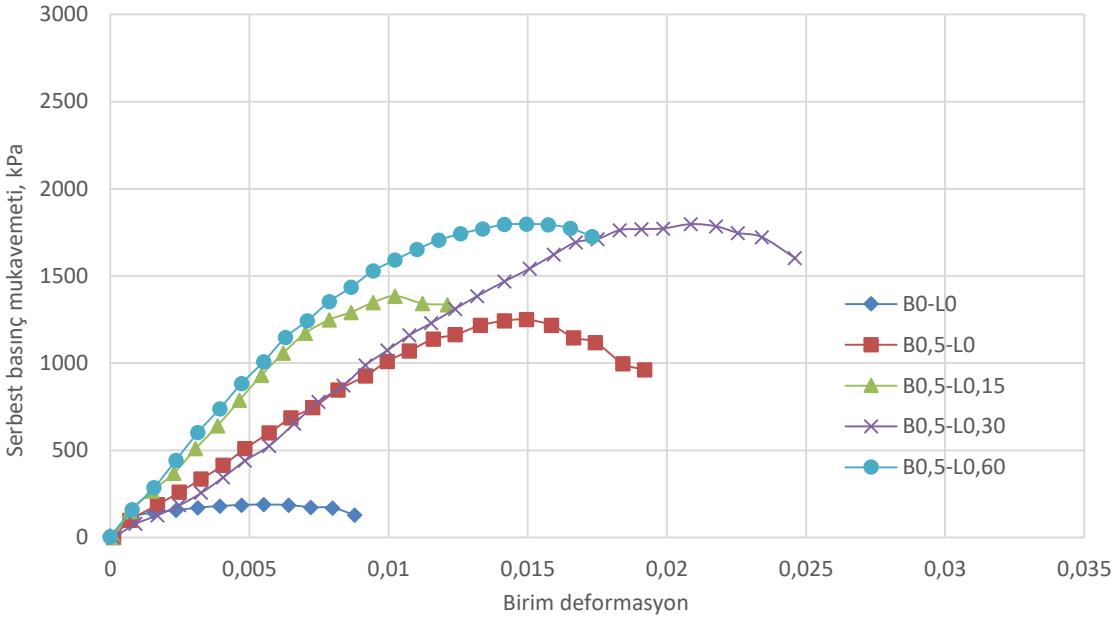
1 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B1,5-L0, B1,5-L0,15, B1,5-L0,30, B1,5-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme deformasyon ilişkileri Şekil 32'de gösterilmiştir.



Şekil 32. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (1 gün; 10 çevrim)

Şekil 32 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 32 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

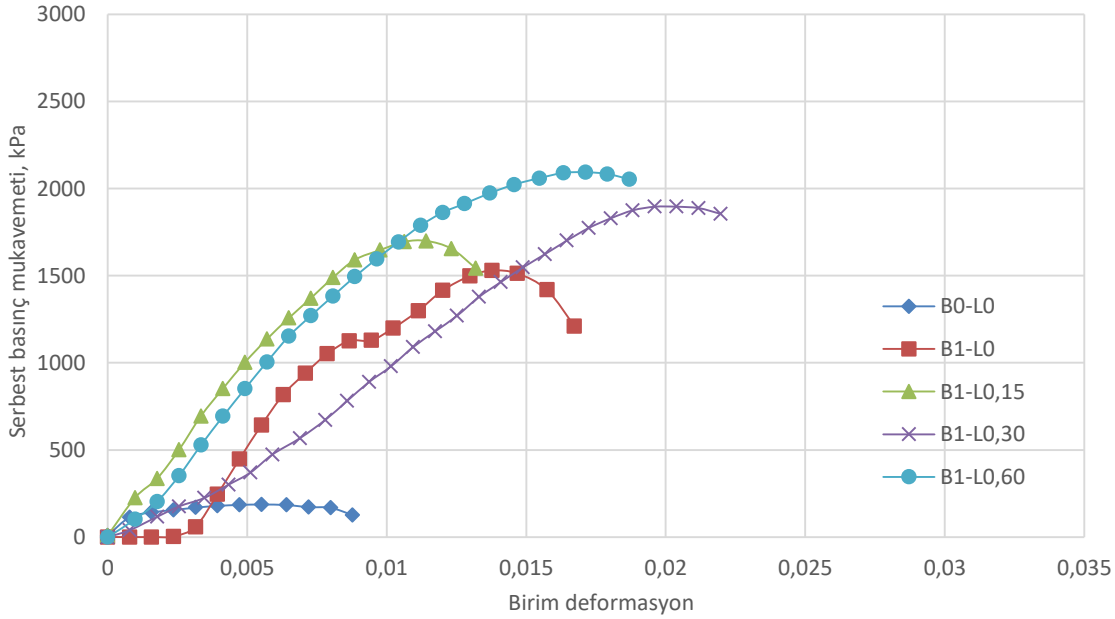
28 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B0,5-L0, B0,5-L0,15, B0,5-L0,30, B0,5-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme deformasyon ilişkileri Şekil 33'te gösterilmiştir.



Şekil 33. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (28 gün; 10 çevrim)

Şekil 33 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 33 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

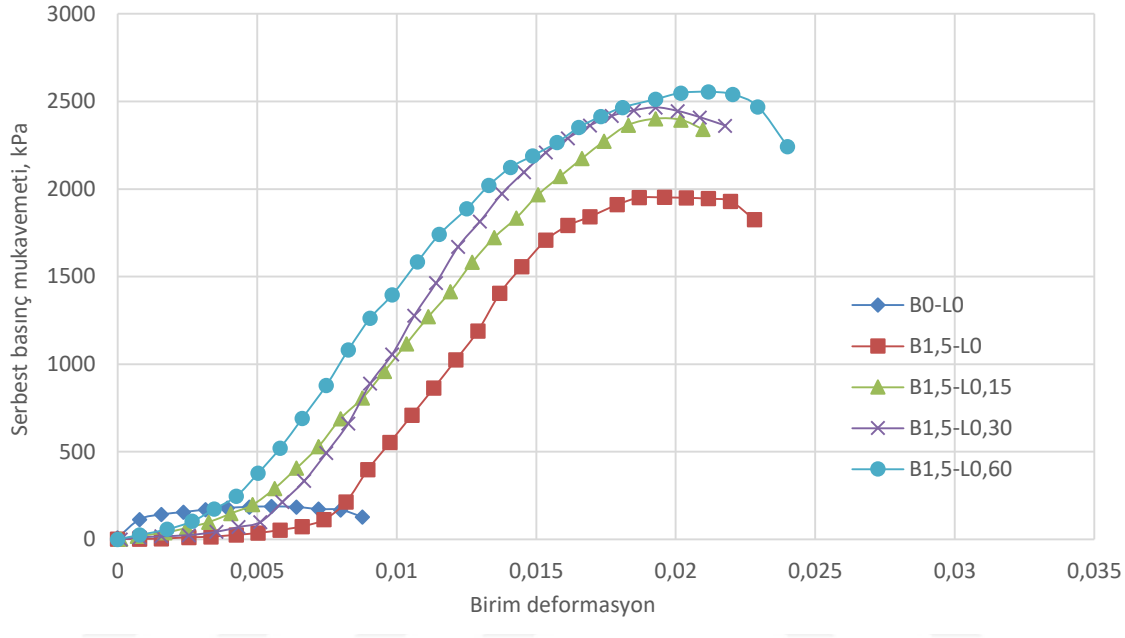
28 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B1-L0, B1-L0,15, B1-L0,30, B1-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme deformasyon ilişkileri Şekil 34'te gösterilmiştir.



Şekil 34. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (28 gün; 10 çevrim)

Şekil 34 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 34 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

28 günlük küre ve 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan B0-L0, B1,5-L0, B1,5-L0,15, B1,5-L0,30, B1,5-L0,60 numunelerinin serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme deformasyon ilişkileri Şekil 35'te gösterilmiştir.

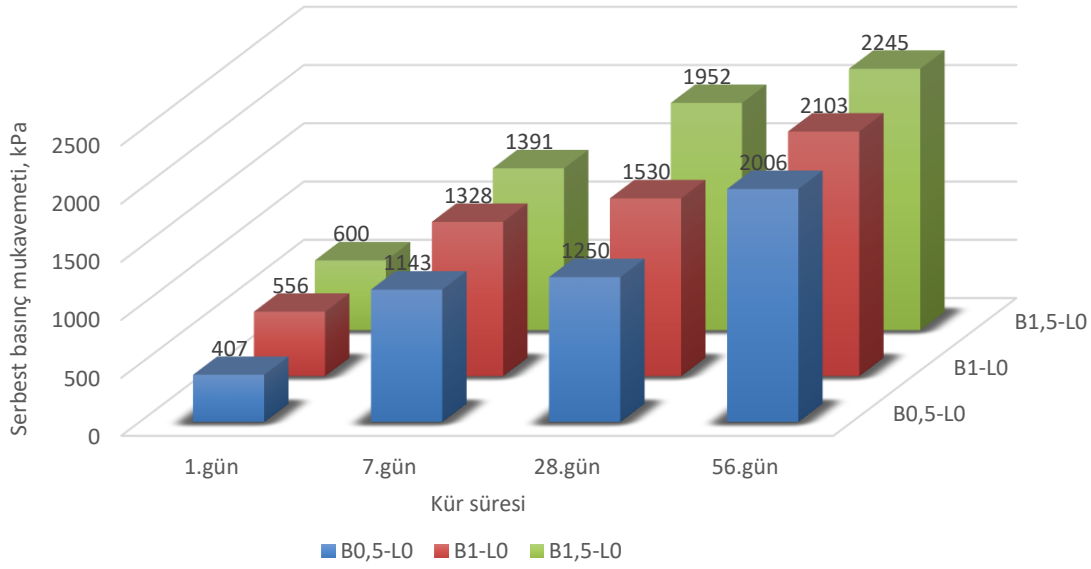


Şekil 35. Gerilme-Deformasyon ilişkisi (28 gün; 10 çevrim)

Şekil 35 incelendiğinde B0-L0 numunesinin diğer numunelerden daha gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Yine Şekil 35 incelendiğinde biyopolimer ve lif yüzdesinin artışıyla genel olarak sünek davranışın arttığı görülmektedir.

Sera *et al.* (1990) gevrek malzemelerin süneklik ve mukavemet değerlerinin doğal lif katkısı ile iyileştirilebilirliğini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda doğal liflerin, malzemenin sünekliğini ve mukavemetini artırdığı görülmüştür.

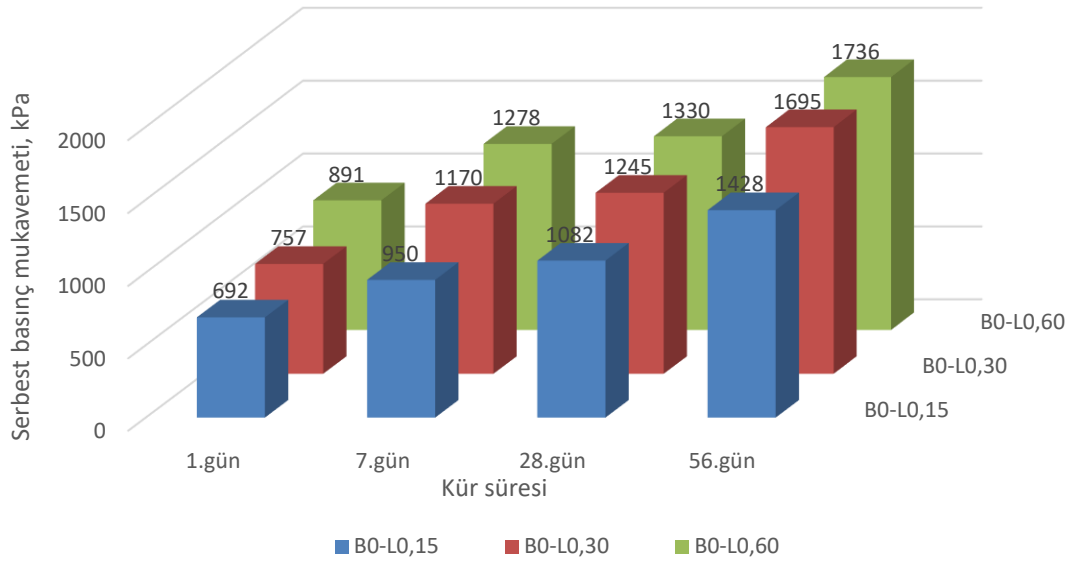
Şekil 36'da kür süresi ve lif oranındaki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 36. Farklı kür sürelerinde sadece biyopolimer katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Şekil 36 incelendiğinde yalnız biyopolimer katkısıyla hazırlanan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanım değerinin %1,5 biyopolimer katkılı (B1,5-L0) numunede 56 gün kür süresinde elde edilmiş olduğu anlaşılmaktadır. En düşük serbest basınç dayanım değeri ise %0,5 biyopolimer katkılı (B0,5-L0) numunede 1 gün kür süresinde elde edilmiştir. Şekil 36'da görüldüğü üzere kür süresi artıkça yalnız biyopolimer katkılı numunelerde donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde artma eğilimi görülmektedir.

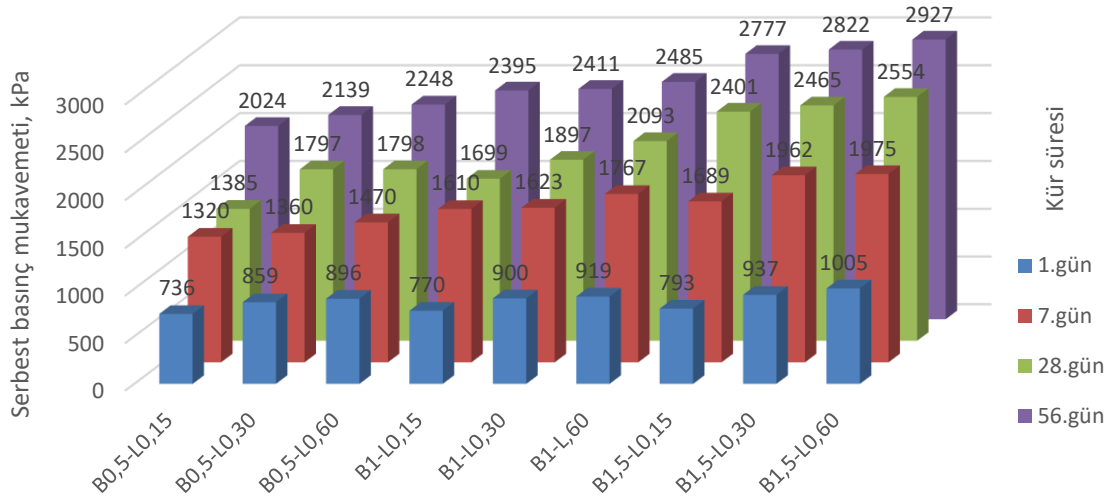
Şekil 37'de kür süresi ve lif oranındaki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 37. Farklı kür sürelerinde sadece lif katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Şekil 37 incelendiğinde yalnız lif katkısıyla hazırlanan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanım değerinin %0,60 lif katkılı (B0-L0,60) numunesinde 56 gün kür süresinde elde edildiği anlaşılmaktadır. En düşük serbest basınç dayanım değeri ise 0,15 lif katkılı (B0-L0,15) numunede 1 gün kür süresinde elde edilmiştir. Şekil 37'de görüldüğü üzere kür süresi artıkça yalnız lif katkılı numunelerde donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde artma eğilimi görülmektedir.

Şekil 38'de ise farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 38. Farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri

Şekil 38 incelendiğinde biyopolimer ve lif katkısıyla hazırlanan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanım değerinin %1,5 biyopolimer ve %0,6 lif katkılı (B1,5-L0,60) numunesinde 56 kür süresinde elde edildiği anlaşılmaktadır. En düşük serbest basınç dayanım değeri ise 0,5 biyopolimer ve 0,15 lif katkılı (B0,5-L0,15) numunede 1 gün kür süresinde elde edilmiştir. Şekil 38'de görüldüğü üzere kür süresi artıkça biyopolimer ve lif katkılı numunelerde donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde artma eğilimi görülmektedir.

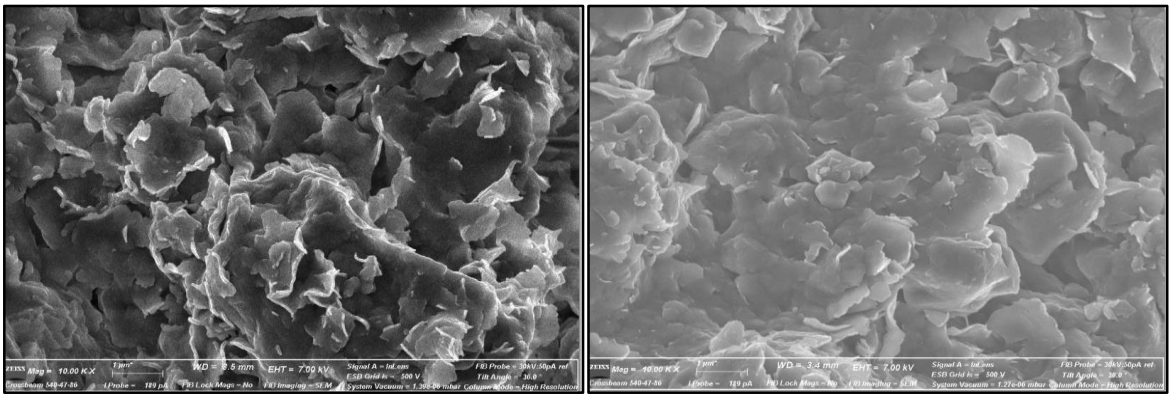
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları

SEM Analizleri, 28 gün kürde bekletilen, donma-çözülme çevrimine tabi tutulmamış ve 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş bazı numuneler üzerinde yaptırılmıştır. SEM analizi yaptırılan numuneler Tablo 10' da verilmiştir.

Tablo 10. SEM Analizi Yaptırılan Numuneler

28 gün	28 gün DÇ
B0-L0	B0-L0
B1,5-L0	B1,5-L0
B0-L0,60	B0-L0,60
B1,5-L0,60	B1,5-L0,60

SEM analizi sonucunda 28 günlük küre tabi tutulan doğal kil numunesinin donma-çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası görüntüleri Şekil 39'da verilmiştir.

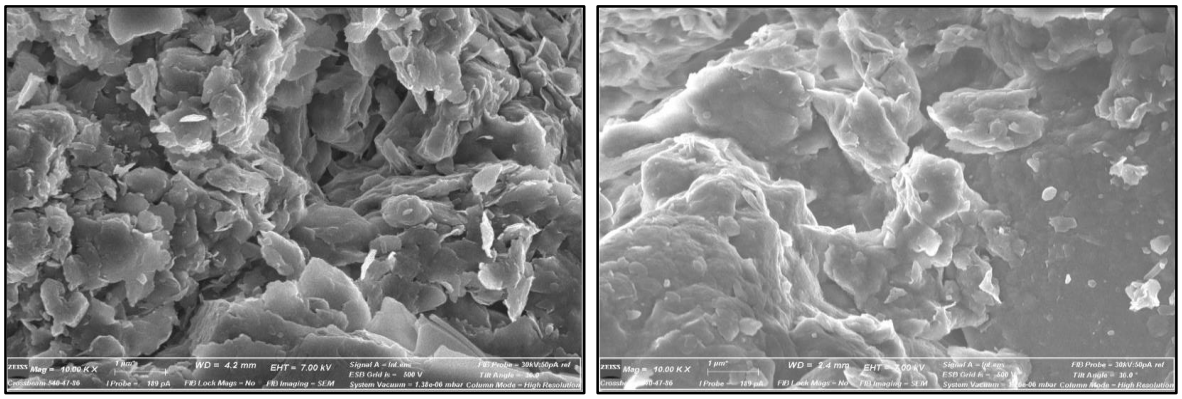


(a) **(b)**

Şekil 39. SEM analizi görüntüleri **(a)** B0-L0 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B0-L0 numunesi (28 gün- 10K büyütülmüş)

Şekil 39(a)'da katkısız doğal kil numunesinde kil tabakalarının birbirlerini çok iyi tutamadığı, bu yüzden numunenin yapısında küçük boşlukların olduğu ve kil minerallerinin pürüzlü bir yüzeyi olduğu görülmektedir. Şekil 39(b)'de görüldüğü üzere donma-çözülme sonrası doğal kil numunesinde kil tabakaları arasında boşluk oranı çok fazla değişmemiş fakat daha pürüzsüz bir yüzey oluşmuştur.

SEM analizi sonucunda 28 günlük küre tabi tutulan %1,5 keçiboynuzu gam katkılı B1,5-L0 numunesinin donma- çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası görüntüleri Şekil 40'ta verilmiştir.

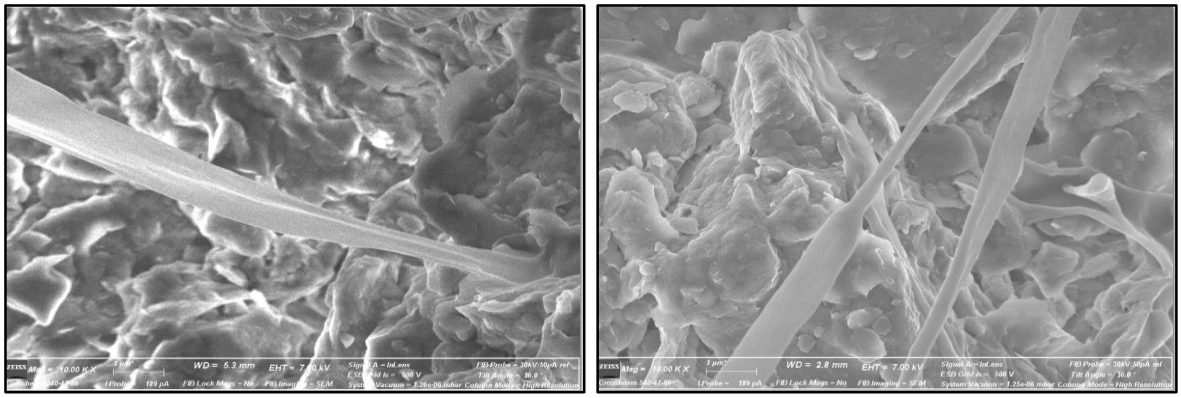


(a) **(b)**

Şekil 40. SEM analizi görüntüleri **(a)** B1,5-L0 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B1,5-L0 numunesi (28 gün- 10K büyütülmüş)

Şekil 40(a)'da %1,5 keçiboynuzu gam katkılı kil numunesinde kil tabakalarının birbirlerini doğal kil numunesine göre daha iyi tuttuğu bu nedenle boşlukların azaldığı görülmektedir. Biyopolimer katkısı ile daha dolu bir yapı ve pürüzsüz bir yüzey meydana gelmiştir. Şekil 40(b)'de görüldüğü üzere donma-çözülme sonrası keçiboynuzu gam katkılı numunede, donma-çözülme öncesine göre mineraller arasındaki boşluk artmıştır.

SEM analizi sonucunda 28 günlük küre tabi tutulan %0,60 lif katkılı B0-L0,60 numunesinin donma- çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası görüntüleri Şekil 41'de verilmiştir.

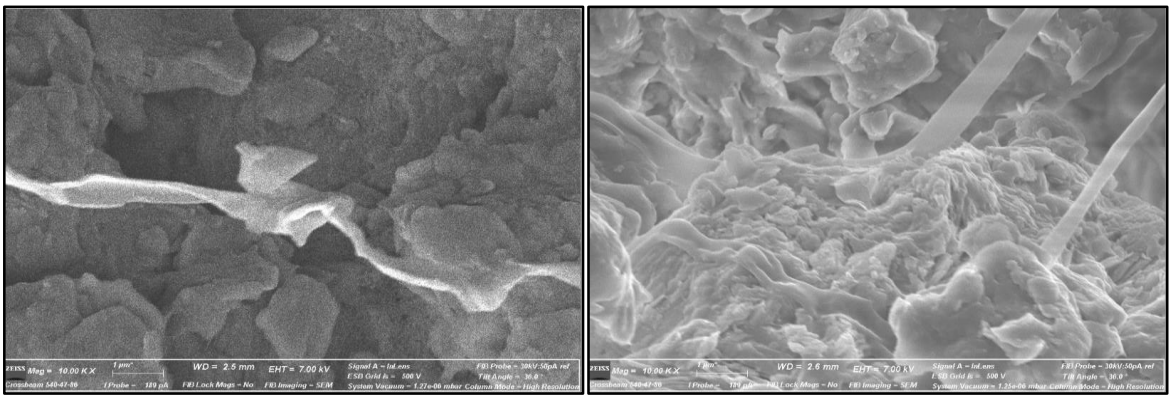


(a) **(b)**

Şekil 41. SEM analizi görüntüleri **(a)** B0-L0,60 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B0-L0,60 numunesi (28 gün- 10K büyütülmüş)

Şekil 41(a)'da %0,60 lif katkılı kil numunesinde kil tabakalarının birbirlerini doğal kil numunesine göre daha iyi tuttuğu bu yüzden boşlukların azaldığı görülmektedir. Lif katkısı ile daha yoğun bir yapı meydana gelmiştir. Şekil 41(b)'de görüldüğü üzere donma-çözülme sonrası lif katkılı numunede, donma-çözülme öncesine göre mineraller arasındaki boşluklar artmıştır.

SEM analizi sonucunda 28 günlük küre tabi tutulan %1,5 keçiboynuzu gam ve %0,6 lif katkılı B1,5-L0,60 numunesinin donma- çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası görüntüleri Şekil 42'de verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 42. SEM analizi görüntüleri **(a)** B1,5-L0,60 numunesi **(b)** Donma-çözülme sonrası B1,5-L0,60 numunesi (28 gün- 10K büyütülmüş)

Şekil 42(a)'da %1,5 keçiboynuzu gamı ve %0,60 lif katkılı kil numunesinde kil tabakalarının birbirlerini doğal kil numunesine göre çok daha iyi tuttuğu, kil partikülleri arasında oluşan hidrojel nedeni ile boşlukların azaldığı görülmektedir. Lif ve biyopolimerin

ortak etkisiyle diğer tüm numunelerden daha boşluksuz ve yoğun bir yapı meydana gelmiştir. Şekil 42(b)'de görüldüğü üzere donma-çözülme sonrası lif ve biyopolimer katkılı numunede, donma-çözülme öncesine göre minerallerin birbirini tutması azalmıştır.

Sonuç olarak SEM görüntülerinden biyopolimer ve lif katkısı ile katkısız kil numunesine göre daha yoğun bir yapı oluştuğu anlaşılmış olup bu, donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinde meydana gelen artışı desteklemektedir. Naeini *et al*. (2012) çalışmalarında, ince taneli kil partiküllerinin negatif yüklü olduğunu, katyonik polimerler ile kolayca elektrostatik bağ oluşturabildiklerini ve bu nedenle kil partiküllerinin birbirlerini daha iyi tutabildiklerini ifade etmişlerdir. Yine SEM görüntülerinden donma-çözülme çevrimleri sonrasında daha boşluklu bir yapı oluştuğu görülmüştür. Darbari *et al*. (2017) donmaya maruz kalmış kilde, donma ile gözeneklerde buz mercekleri oluşmasının boşlukları artırdığını ifade etmişlerdir. Donma-çözülme döngüleri zeminlerde hacim değişimlerine ve boşluk oranında artışa sebep olur, bu değişimlerin zeminin geçirimlilik, su muhtevası, boşluk oranı, kıvam limitleri, porozite, konsolidasyon katsayısı, şişme basıncı ve mukavemeti gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir (Çiftlikli oğlu 2018).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada keçiboynuzu gam ve polyester iplik ile yüksek plastisiteli bir kil stabilize edilmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli kil bir zemine farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam (%0,5, %1 ve %1,5) ve 5 mm uzunluğunda polyester iplik (%0,15, %0,30 ve %0,60) ilave edilerek katkılı killer elde edilmiştir. Elde edilen katkılı killer 1, 7, 28 ve 56 gün küre tabi tutulmuştur. Kür süreleri sonunda 10 çevrim donma-çözülmeye tabi tutulan katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, doğal kile ait deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve aşağıda sıralanmıştır.

- Lif ve biyopolimer katkısının, kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Keçiboynuzu gam ve polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri artmıştır.
- 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış keçiboynuzu gam ve polyester iplik katkılı killerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinin aynı koşullardaki doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam katkılı kil numunelerin ve farklı yüzdelerde polyester iplik katkılı kil numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Her bir katkı oranı için kür süreleri karşılaştırıldığında genel olarak, kür süresi arttıkça numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri artmıştır.
- Donma-çözülme çevrimleri sonucu en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerinin %1,5 keçiboynuzu gam, %0,60 polyester iplik katkılı numunelerde (B1,5-L0,60) elde edildiği görülmüştür., 1, 7, 28 ve 56 gün küre tabi tutulan B1,5-L0,60 numunesinde donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri sırasıyla, 600 kPa, 1975 kPa, 2554 kPa ve 2927 kPa olarak belirlenmiştir.
- SEM analizleri sonucunda lif ve biyopolimer katkılı numunelerde, doğal kile göre daha yoğun ve daha az boşluklu bir yapı oluştuğu söylenebilir. Donma-çözülme çevrimleri ise boşlukları artırmıştır.

Deney sonuçları, bir biyopolimer olan keçiboynuzu gam ile sentetik bir lif olan polyester ipliğin bir arada kullanılmasının özellikle soğuk iklimlere maruz bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli killerin donma-çözülme çevrimlerinden daha az etkileneceğini göstermektedir.

Biyopolimer ve lifin zemin iyileştirmesinde ortak kullanımının çevreci bir uygulama olduğu söylenebilir. İlerleyen çalışmalarda, lif ve biyopolimer katkılı killerin şişme-oturma davranışlarının da incelenmesi ve mekanizmanın tam olarak anlaşılabilmesi için farklı mikro analizlerin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Abdi, M. R., Ghalandarzadeh, A., Chafi, L. S., 2021. An Investigation into the Effects of Lime on Compressive and Shear Strength Characteristics of Fiber-Reinforced Clays. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(4), 885-898.

Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., 2007. Modification of Clayey Soils Using Scrap Tire Rubber and Synthetic Fibers. Applied Clay Science, 38(1-2), 23-32.

Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş., 2019. Effect of Aspect Ratio on the Freezing-Thawing of a CH Clay. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(1), 66-74.

Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş., Işık, F., Arasan, S., 2015. Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Atık Doğal Liflerin Kullanılabilirliği. 6.Geoteknik Sempozyomu, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Alavijeh, B. E., Zare, B., Mokhtari, M., 2021. Investigation of the Effect of Polypropylene Fibers on Compression Strength and Tensile Strength Oforganic Soil Stabilized with Lime and Xanthangum Biopolymer. Amirkabir Journal of Civil Engieneering, 53(5), 1853-1870.

Altun, B., 2019. Biyopolimer ile Etkileştirilmiş Kil/Mermer Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Andersland, O. B., Ladanyi, B., 2004. Frozen Ground Engineering. 2nd Edition, 384 p, USA.

Ang, E., Erik, L., 2003. Specimen Size Effects for Fiber-Reinforced Silty Clay in Unconfined Compression. Geotechnical Testing Journal, 26(2), 192-200.

Anonim., 2019. https://insapedia.com/frp-malzeme-lif-takviyeli-polimer-kompozit-malzeme adresinden alındı.

Ayhan, A., 2011. Biyopolimer Katkıları ile Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Bagherinia, M., 2013. Killerin Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Barbero, E., 1999. Introduction to Composite Materials Design. CRC Press, 562 p, U.S.A.

Başer, O., 2009. Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust. Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering, Ankara.

Baykal, G., Özkul, Z. H., 2006. Shear Strength of Clay with Rubber Fiber Inclusions. Geosynthetics International, 13(5), 173-180.

Bozkurt, A., Çelik, S. Ü., Hosseini, S. S., 2012. Alternatives Toward Proton Conductive Anhydrous Membranes for Fuel Cells: Heterocyclic Protogenic Solvents Comprising Polymer Electrolytes. Progress in Polymer Science, 37(9), 1265-1291.

Bunsell, A., 1988. Fiber Reinforcement for Composite Materials. Composite Materials Series, 2.

Cai, Y., Shi, B., Ng, C. W., Tang, C.S., 2006. Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineering Properties of Clayey Soil. Engineering Geology, 87, 231-240.

Chang, I., Im, J., Prasidhi, A. K., Cho, G. C., 2015. Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Strengthening. Construction and Building Materials, 74, 65-72.

Chang, I., Im, J., Cho, G-C., 2016. Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering. Sustainability, 8 (3), 251.

Chawla, K. K., 1998. Composite Materials: Science and Engineering. Springer-Verlag, 380-404, New York.

Chen, R., Zhang, L., Budhu, M., 2013. Biopolymer Stabilization of Mine Tailings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(10), 1802-1807.

Chen, C., Wei, K., Gu, J., Huang, X., Dai, X., Liu, Q., 2022. Combined Effect of Biopolymer and Fiber Inclusions on Unconfined Compressive Strength of Soft Soil. Polymers, 14, 787.

Chu, J., Ivanov, V., Lee, M. F., Oh, X. M., He, J., 2009. Soil and Waste Treatment Using Biocement. In Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories, 9, 165-170.

Consoli, N. C., Casagrande, M. D., Coop, M. R., 2005. Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(11), 1434-1436.

Coppen, J., 1995. Gums, Resins and Latexes of Plant Origin. Non-Wood Forest Products 6. Rome: FAO.

Costa, S., Xue, J., S.Kim, Y.Xie., 2017. Controlling Desiccation Cracks in Clay with Fibre and Enzyme. 2nd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, University of Leeds, UK.

Crockford, W., Grogan, W., Chill, D., 1993. Strength and Life of Stabilized Pavement Layers Containing Fibrillated Polypropylene. Transportation Research Record 1418, National Research Council, Washington.

Çiftliklioğlu, K., 2018. Donma-Çözülme Çevrimlerinin Uçucu Kül ve Kireç Katkılı Killerin Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, İstanbul.

Darbari, Z., Jaradat, K.A., Abdelaziz, S.L., 2017. Heating–Freezing Effects on The Pore Size Distribution of a Kaolinite Clay. Environmental Earth Sciences, 76, 713.

Dey, P., Maiti, S., Sa, B., 2012. Locust Bean Gum and its Application in Pharmacy and Biotechnology: An Overview. International Journal of Current Pharmaceutical Research, 4(1), 7-11.

Ekincioğlu, Ö., 2002. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi. Sika Teknik Bülten, s. 10-11.

Erol, A., 2007. C Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Siltlerin Dayanım ve Donma-Çözülme Direncinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Etemadi, O., Petrisor, I. G., Kim, D., Wan, M-W., Yen, F., 2003. Stabilization of Metals in Subsurface by Biopolymers: Laboratory Drainage Flow Studies. Soil and Sediment Contamination:An International Journal, 12(5), 647-661.

Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., 1992. Geotechnical Engineering of Embankment Dams. A.A.Balkema, 675, Rotterdam.

Gencer, G., 2018. Biyopolimer ile Etkileştirilmiş Kil/Ponza Tozu Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Ghazavi, M., Roustaie, M., 2012. The Influence of Freeze-Thaw Cycles on the Unconfined Compressive Strength of Fiber-Reinforced Clay. Cold Regions Science and Technology, 61, 125-131.

Güven, B., Günek, Ş., Kurt Albayrak, Z. N., 2023. Kilin Mukavemeti ve Donma-Çözülme Sonrası Mukavemeti Üzerinde Biyopolimer ve Lif Katkısının Ortak Etkisinin Araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(4), 951-961.

Hamza, M., Zhihong, N., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., Madni, M. F., 2023. Geotechnical Behavior of High-Plastic Clays Treated with Biopolymer: Macro–Micro-Study. Environmental Earth Sciences, 82(91), 1-18.

Hohmann-Porebska, M., 2002. Microfabric Effects in Frozen Clays in Relation to Geotechnical Parameters. Applied Clay Science, 21(1-2), 77-87.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall, New Jersey.

Keçecioğlu, M., 2016. Kum Zeminlerin Biyopolimerler ile İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kızılçelik, M. M., 2010. Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, Kocaeli.

Kumar, A., Walia, B., Mohan, J., 2006. Compressive Strength of Fiber Reinforced Highly Compressible Clay. Construction and Building Materials, 20(10), 1065-1070.

Kurt Albayrak, Z. N., 2014. Laboratuvarda Geliştirilen Nanokil-Kompozitlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kurt Albayrak, Z. N., Gencer, G., 2021. The Usability of Clay/Pumice Mixtures Modified with Biopolymer as an Impermeable Liner. KSCE Journal of Civil Engineering, 25(1), 28-36.

Lasbik, I., Lima, D. C., Carvalho, C. A., Silva, C. H., Minette, E., Barbosa, P. S., 2002. Geotechnical Characterization of a Clayey Soil Stabilized with Polypropylene Fiber Using Unconfined Compression and Resilient Modulus Testing Data in Resilient Modulus Testing for Pavement Components. ASTM SPT 1437, 114-125.

Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Majid, M. A., 2016. Improvement of Problematic Soils with Biopolymer-An Environmentally Friendly Soil Stabilizer. Journal of Materials in Civil Engineering , 29(2), 04016204.

Maier, H., Anderson, M., Karl, C., Magnuson, K., 1993. Guar, Locust Bean, Tara and Fenugreek Gums. Industrial Gums Polysaccharides and Their Derivatives, s. 181-226.

Malayoğlu, U., Akar, A., 1995. Killerin Sınıflandırılmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi. 1.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 120-135, İzmir.

Naeini, S. A., Sadjadi, S., 2008. Effect of Waste Polymer Materials on Shear Strength of Unsaturated Clays. Electronic Journal of Geotechnial Engineering, 13, 10-15.

Naeini, S. A., Naderinia, B., Izadi, E., 2012. Unconfined Compressive Strength of Clayey Soils Stabilized with Waterborne Polymer. KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943-949.

Nicholson, P. G., 2015. Soil Improvement and Ground Modification Methods. Butterworth Heinemann, 454 p, USA.

Orhan, M., 2019. Geoteknik Mühendisliği ve Temel İnşaatı. Gazi Kitabevi, Ankara.

Özaydın, K., 1997. Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özaydın, K., 2012. Zeminlerin İyileştirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi. Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Özdemir, B., 2019. Doğal/Sentetik Lif ve Uçucu Kül Katkılı Killerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Özenç, H., 2018. Biyopolimer Katkısı ile İyileştirilen Zeminlerin Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Pulat, H. F., Taytak, B., Aksoy, Y. Y., 2017. Biyopolimer Katkıların Killi ve Kumlu Zeminlerin Permeabilite ve Kayma Dayanımına Etkisinin Araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 268-273.

Puppala, A. J., Musenda, J., 2020. Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change in Expansive Soils. This Paper Appears in Transportation Research Record, 1736, 134-140.

Rafalko, S. D., Brandon, T. L., Filz, G. M., Mitchell, J. K., 2007. Fiber Reinforcement for Rapid Stabilization of Soft Clay Soils. Fiber Transportation Research Record, 2026(1), 21-29.

Saçak, M., 1998. Polimer Kimyasına Giriş. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara.

Sarıgöl, H. A., 2021. Polimerlerle Katkılı Yüksek Plastisiteli Bir Kilde Donma-Çözülme Çevrimlerinin Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sera, E., Austriaco, R., Pama, R., 1990. Natural Fibers as Reinforcement. Journal Of Ferrocement, 20(2), 109-124.

Swain, S. K., Priyadarshini, P. P., K.Patra, S. 2012. Soy Protein/Clay Bionanocomposites as Ideal Packaging Materials. Polym Plast Technol Eng, 51(12), 1282-1287.

Taşcı, G., 2011. Problemli Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi , Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Taşlıgil, N., 2011. Keçiboynuzu (Ceratonia Siliqua L.)'nun Coğrafi Yayılışı ve Ekonomik Özellikleri. ODÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 2(3), 252-266.

Tezcan F., 2008. Aljinat/Kil Biyopolimer Nanokompozit Filmlerin Eldesi ve Karakterizasyonu.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, İstanbul.

Türköz, M., Tosun, H., Zorluer, İ., Orhan, A., Seyrek, E., Savaş, H., 2007. Seismic Hazard and Total Risk Analyses for Large Dams in Euphrates Basin, Turkey. Engineering Geology, 89(1-2), 155-170.

Zaimoğlu, A. Ş., 2010. Freezing-Thawing Behavior of Fine-Grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers. Cold Regions Science and Technology, 60(1), 63-65.

Zaimoğlu, A. Ş., Çalik, Y., Akbulut, R. K., Yetimoglu, T., 2016. A Study on Freeze-Thaw Behavior of Randomly Distributed Fiber-Reinforced Soil. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 60(1), 3-9.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Şifa GÜNEK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Geoteknik Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Güven, B., Günek, Ş., Kurt Albayrak, Z. N., 2023. Kilin Mukavemeti ve Donma-Çözülme Sonrası Mukavemeti Üzerinde Biyopolimer ve Lif Katkısının Ortak Etkisinin Araştırılması. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(4), 948-957.	