



**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN BAZI
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE
SENTETİK LİF VE BİYOPOLİMER KATKILARININ
ORTAK ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Büşra GÜVEN

**Danışman: Doç. Dr. 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

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDE SENTETİK LİF VE BİYOPOLİMER KATKILARININ ORTAK ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the Combined Effect of Biopolymer and Synthetic Fiber Additives on Some
Engineering Properties of a High Plasticity Clay)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra GÜVEN

Danışman: Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Erzurum
Eylül, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Büşra GÜVEN tarafından hazırlanan “Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Bazı Mühendislik Özellikleri Üzerinde Sentetik Lif ve Biyopolimer Katkılarının Ortak Etkilerinin Araştırılması” başlıklı çalışması 22/08/2024 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. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU
Atatürk Üniversitesi

Danışman: Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI
Erzurum Teknik Üniversitesi

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

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK danışmanlığında sunulan “Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Bazı Mühendislik Özellikleri Üzerinde Sentetik Lif ve Biyopolimer Katkılarının Ortak Etkilerinin 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	6	30
Kuramsal Temeller	26	30
Materyal ve Metot	27	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	19	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	24	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
Büşra GÜVEN	Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
26.07.2024	26.07.2024
İmza:	İmza:

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

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih 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, bilgileriyle ve tecrübeleriyle bana her zaman destek olup yol gösteren değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. 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 Muhammed Ali PINARBAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Büşra GÜVEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE SENTETİK LİF VE BİYOPOLİMER KATKILARININ ORTAK ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Büşra GÜVEN

Danışman: Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Amaç: Bu çalışmada, lif ve biyopolimerin, yüksek plastisiteli bir kilin mukavemetine olan ortak etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yüksek plastisiteli bir kil içerisine farklı yüzdelerde sentetik lif (polyester iplik) ile biyopolimer (keçiyoynuzu gam) ilave edilmiştir. Elde edilen lif ve biyopolimer katkılı kil numunelerinin kıvam limitleri ve serbest basınç mukavemetleri (1-28gün) belirlenmiştir.

Yöntem: Çalışmada, keçiyoynuzu gam, sentetik lif ile birlikte kullanılarak yüksek plastisiteli kil zeminin bazı mühendislik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli kile farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam (%0,5, %1 ve %1,5) ve 5 mm uzunluğunda sentetik lif (%0,15, %0,30 ve %0,60) ilave edilerek hazırlanan karışımların düşen koni deneyi ile kıvam limitleri belirlenmiştir. Ayrıca bu karışımlardan Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti ile hazırlanan numuneler 1-28 gün küre tabi tutulmuş ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları doğal kilin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Deney sonuçları, keçiyoynuzu gam ve lif katkılı killerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin, aynı koşullardaki doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam katkılı killerin ve farklı yüzdelerde lif katkılı killerin serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Keçiyoynuzu gam ve lif yüzdesinde meydana gelen artış, serbest basınç mukavemeti değerlerini artırmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri 28 gün küre tabi tutulan numunelerde elde edilmiştir. Keçiyoynuzu gam katkılı killerin keçiyoynuzu gam yüzdesindeki artışla likit limit değerlerinde genellikle artış meydana geldiği, sadece lif ve lif-keçiyoynuzu gam katkılı killerin likit limitlerinde belirgin bir değişim meydana gelmediği belirlenmiştir.

Sonuç: Keçiyoynuzu gam ve lif katkılı killerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam katkılı killerin ve farklı yüzdelerde lif katkılı killerin serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Kür süresi, lif yüzdesi ve keçiyoynuzu gam yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemeti değerleri de artmıştır. Keçiyoynuzu gam oranındaki artışla, likit limitlerde genellikle artış meydana geldiği görülmektedir. Keçiyoynuzu gam katkılı numuneler non-plastik özellik göstermiş olup plastik limit deneyleri gerçekleştirilememiştir. Lif oranındaki artışla katkısız ve keçiyoynuzu gam katkılı killerin likit limitleri incelendiğinde, Lif oranındaki artışla, likit limitlerin çok fazla değişmediği söylenebilir. Yüksek plastisiteli kil (CH) olan doğal kilin, lif katkısıyla yine CH sınıfında olduğu, zemin sınıfında bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kil, biyopolimer, lif, serbest basınç mukavemeti, kıvam limitleri

Eylül 2024, 57 Sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE COMBINED EFFECT OF BIOPOLYMER AND SYNTHETIC FIBER ADDITIVES ON SOME ENGINEERING PROPERTIES OF A HIGH PLASTICITY CLAY

Büşra GÜVEN

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

Purpose: This study aims to investigate the combined effect of fiber and biopolymer on the strength of a high plasticity clay. For this purpose, different percentages of synthetic fiber (polyester yarn) and biopolymer (locust bean gum) were added to a high plasticity clay. The consistency limits and unconfined compressive strengths (1-28 days) of the obtained fiber and biopolymer added clay samples were determined.

Method: In the study, the change of some engineering properties of high plasticity clay soil was investigated by using locust bean gum and synthetic fiber. In this context, the consistency limits of the mixtures prepared by adding different percentages of locust bean gum (0,5%, 1% and 1,5%) and 5 mm long synthetic fiber (0,15%, 0,30% and 0,60%) to high plasticity clay were determined by the fall-cone test. In addition, the samples prepared from these mixtures with the Harvard miniature compactor were subjected to curing for 1-28 days and unconfined compressive strengths of samples were determined. The obtained test results were compared with the test results of natural clay.

Findings: The experimental results showed that the unconfined compressive strength values of the clays with locust bean gum and fiber additives were higher than the unconfined compressive strength values of the natural clay under the same conditions, clays with different percentages of locust bean gum additives and clays with different percentages of fiber additives. The increase in the percentage of locust bean gum and fiber increased the unconfined compressive strength values. The highest unconfined compressive strength values were obtained in samples subjected to 28 days of curing. It was determined that the liquid limit values of clays with locust bean gum additives generally increased with the increase in the locust bean gum percentage, and there was no significant change in the liquid limits of only fiber and fiber-locust bean gum additive clays.

Conclusion: It was observed that the unconfined compressive strength values of clays with locust bean gum and fiber additives were higher than the unconfined compressive strength values of natural clay, clays with different percentages of locust bean gum additives and clays with different percentages of fiber additives. As the curing period, fiber percentage and locust bean gum percentage increased, the unconfined compressive strength values also increased. It is seen that with the increase in locust bean gum ratio, there is generally an increase in liquid limits. Locust bean gum additive samples showed non-plastic properties and plastic limit tests could not be performed. When the liquid limits of clays without additive and with locust bean gum additives are examined with the increase in fiber ratio, it can be said that the liquid limits do not change significantly with the increase in fiber ratio. It is seen that with fiber additive there is no change in the soil classification of high plasticity clay (CH).

Keywords: Clay, biopolymer, fiber, unconfined compressive strength, consistency limits

September 2024, 57 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Kil Mineralleri.....	3
Zemin iyileştirme	4
Polimerler.....	7
Biyopolimerler	7
Keçiboynuzu gam.....	8
Lifler.....	8
Literatür Özetleri	9
Polimerler ile ilgili çalışmalar	9
Lifler ile ilgili çalışmalar.....	12
Polimer ve lifler ile ilgili yapılan çalışmalar	15
MATERYAL VE YÖNTEM	17
Kil.....	17
Biyopolimer	18
Lif.....	18
Numunelerin Hazırlanması	19
Doğal kil numunelerinin hazırlanması	19
Biyopolimer katkılı kil numunelerin hazırlanması	19
Lif katkılı kil numunelerin hazırlanması.....	20
Biyopolimer-lif katkılı kil numunelerin hazırlanması.....	20
Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi.....	22
Kıvam Limitleri Deneyleri	23

Serbest Basınç Deneyi.....	24
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	26
Kıvam Limitleri Deney Sonuçları.....	26
Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	28
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	29
SONUÇ VE ÖNERİLER	38
KAYNAKÇA	40
ÖZGEÇMİŞ.....	44



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Killerin Sınıflandırılması.....	4
Tablo 2. Kilin Bazı Özellikleri	17
Tablo 3. Kullanılan Katkı Yüzdeleri.....	21
Tablo 4. Kıvam Limitleri	26
Tablo 5. Kompaksiyon Parametreleri	29
Tablo 6. Serbest Basınç Mukavemetleri	30
Tablo 7. Serbest Basınç Mukavemetleri	30
Tablo 8. Serbest Basınç Mukavemetlerinin Artış Yüzdeleri	34

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı kil minerali yapıları	4
Şekil 2. Keçiboynuzu gam	8
Şekil 3. Etüvde kurutulan kil.....	17
Şekil 4. Öğütülmüş kil.....	18
Şekil 5. Keçiboynuzu gam tozu.....	18
Şekil 6. 5 mm uzunluğunda kesilmiş lif.....	19
Şekil 7. Deneylerde kullanılan manyetik karıştırıcı	20
Şekil 8. Kil-lif karışımı.....	20
Şekil 9. Kil-lif-biyopolimer karışımı.....	21
Şekil 10. (a) karıştırma işlemi, (b) yağlanmış metal kalıplar.....	22
Şekil 11. Hazırlanan numuneler	22
Şekil 12. Harvard mini kompaktör	23
Şekil 13. Düşen koni deney düzeneği	24
Şekil 14. Serbest basınç deney düzeneği.....	25
Şekil 15. (a) Serbest basınç deneyi öncesi numune, (b) Serbest basınç deneyi sonrası numune.....	25
Şekil 16. Keçiboynuzu gam oranındaki artışla likit limitlerin değişimi.....	27
Şekil 17. Lif yüzdesindeki artışla likit limitlerde meydana gelen değişim	27
Şekil 18. Lif yüzdesinin artmasıyla Atterberg limitlerinin değişimi.....	28
Şekil 19. Lif katkılı kil numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yerleri	28
Şekil 20. Kompaksiyon eğrileri.....	29
Şekil 21. Biyopolimer yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	30
Şekil 22. Lif yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	31
Şekil 23. Biyopolimer yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	32
Şekil 24. Lif yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi	32
Şekil 25. Farklı kür sürelerinde sadece biyopolimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri	35

Şekil 26. Farklı kür sürelerinde sadece lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri	36
Şekil 27. Farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri	37



KISALTMALAR VE SİMGELER

A_f	: Kırılma anındaki alan
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
B	: Biyopolimer
CH	: Yüksek plastisiteli kil
D	: Doğal kil
B	: Keçiboynuzu gam
L	: Lif
P_{max}	: Maksimum yük
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

GİRİŞ

Sanayi ve endüstrinin gelişiminin doğal sonucu olarak ortaya çıkan ihtiyaçları karşılamak amacıyla inşa edilen tüm yapılar zemin ortamı ile ilişkilendirilmek zorundadır. Üst yapı ne kadar iyi projelendirilirse projelendirilsin, üzerine inşa edilecekleri zeminin mühendislik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu zeminlerden birisi olan kil zeminlerle doğada çok sık karşılaşırız. Killer, $<0,002$ mm dane boyutuna sahip olan, bünyesindeki suyu kaybettiği zaman oturma eğilimi gösteren, büzülen, bünyesine suyu aldığı zaman şişen, kil ve mineral daneciklerinden oluşan zemin sınıfıdır. Temel zeminin kil olması halinde meydana gelebilecek olan bu hacim değişikliği gerekli önlemler alınmazsa büyük hasarlara sebep olmaktadır (Holtz and Kovacs 1981).

Zemin iyileştirmesi, zeminlerin bazı özelliklerinin istenilen projeye uygun olarak farklı kimyasal ve fiziksel yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi şeklinde tanımlanabilir. Kil zeminlerin mühendislik özelliklerinin kilin kimyasal ve minerolojik özelliklerine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Kil zeminlerin proje kapsamında istenmeyen özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok tercih edileni ise katkılarla zemin iyileştirme yöntemidir.

Katkılarla zemin iyileştirme yönteminde çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanı, polimerler tercih edilmekle birlikte, çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanının çevreye verdiği zararlardan 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. Bununla birlikte lifler de zemin iyileştirmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde liflerin ve biyopolimerin kullanılarak zemin iyileştirilmesi ile ilgili oldukça fazla çalışma yer alırken, liflerin ve biyopolimerin birlikte kullanılması ile zeminlerin iyileştirilmesi ile ilgili çalışma yok denecek kadar azdır. Bu amaçla tez çalışması kapsamında literatürdeki bu eksiklik göz önünde bulundurularak, CH kiline farklı oranlarda lif ve biyopolimer ilave edilerek hazırlanan numunelerin bazı mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılmış deneyler, Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 1. aşamada doğal bir kil zemin temin edilerek laboratuvara getirildikten sonra, öğütülerek deneylerde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Kullanılacak olan lif ve

biyopolimer oranları belirlendikten sonra 2. aşamada kil ile farklı oranlarda (%0,15, %0,30, %0,60) lif etkileştirilerek lif katkılı killeri, 3. aşamada kil ile farklı oranlarda (%0,5, %1, %1,5) biyopolimer etkileştirilerek biyopolimer katkılı killeri elde edilmiştir. 4. aşamada lif, biyopolimer katkılı killere katılarak liflerle güçlendirilmiş biyopolimer katkılı killeri elde edilmiştir. 5. aşamada ise hazırlanan numuneler kıvam limitleri deneyine ve 1-28 gün kür (%18.5 nem, 22 ± 2 °C sıcaklıkta) edildikten sonra dayanımlarını belirlemek için serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin 1 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları, doğal kilin serbest basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Biyopolimer ve lifin zemin iyileştirmesinde ortak kullanımının hem ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı hem de çevreci bir uygulama olacağı düşünülmektedir.

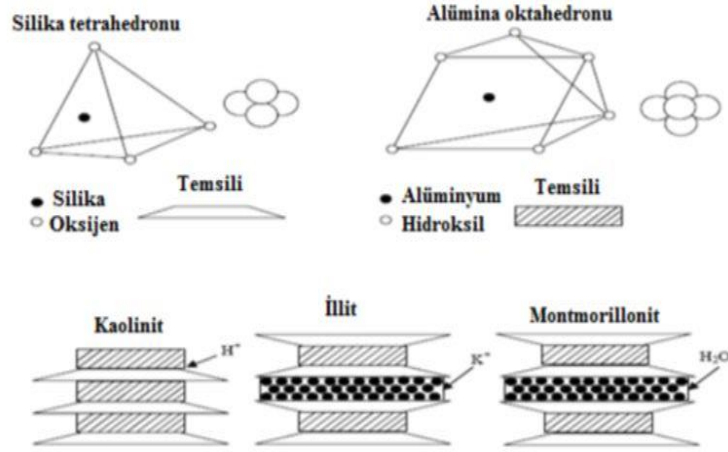
KURAMSAL TEMELLER

Kil Mineralleri

Killer; dane boyutu 0,002 mm'den küçük, alümina ve silis içeriği fazla, ince daneli tortular olup, suyla etkileşince çoğunlukla plastikleşen, kuruma veya pişmeyle sertleşebilen minerallerdir.

Doğada çoğunlukla saf olarak bulunmayan kilin içerisinde alüminyum silikatlarla birlikte demir, magnezyum, potasyum, kalsiyum, sodyum, kuvars gibi mineraller bulunur. Kil minerallerinin oluşumunda ana kayacın etkisi büyüktür. Kil minerallerinin oluşumunda taşınma, yıkanma ve kimyasal reaksiyonlar da etkilidir. Kil minerallerinin çok büyük ve karmaşık bir mineral dizisine sahip olmaları, bünyesinde bulundurduğu yabancı maddelerin varlığı, oluşum yeri ve özelliklerinin değişik olması gibi etmenlerden dolayı killer birçok şekilde sınıflandırılabilirler (Malayoğlu ve Akar 1995).

Kil tabakalarını oluşturan iki tip atomik kristal yapı bulunur. Bunlardan biri oktahedral, diğeri ise tetrahedral yapıdır. Oktahedral yapı üçer oksijen ya da hidroksilden oluşan iki tabaka arasında bulunan katyon (alüminyum, demir ya da magnezyum) atomu modelidir. Tetrahedral yapı ise köşelerde oksijen atomu bulunan düzgün dört yüzlünün ortasına bir silikon atomunun yerleşmesiyle oluşan atom modelidir ve bu atom modeli SiO_2 (silisyum dioksit) olarak ifade edilir. Kil minerallerinin kristal yapıları, bu temel birimlerin oluşturdıkları tabakaların değişik kombinasyonlarla üst üste gelmeleri ile oluşur (Ünlü 2009). Kil mineralleri; kilin türü, kristal yapısı, kil dışında bulunan minerallerin türü ve kil içinde bulunma yüzdesine bağlı olarak değişik özellikler taşır (Eser 2010). Şekil 1'de farklı kil minerallerinin yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Farklı kil minerali yapıları (Çankaya ve Sökmen 2017)

Killerin sınıflandırılmasında genel olarak minerolojik özellikleri, kimyasal içerikleri, geometrik yapıları ve kullanım alanları etkili olmaktadır (Malayoğlu ve Akar 1995). Killerin sınıflandırılması Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Killerin Sınıflandırılması (Malayoğlu ve Akar 1995)

Minerolojik özelliklerine göre	Kimyasal içeriklerine göre	Fiziksel sınıflandırma	Geometrik yapılarına göre
Kaolin grubu	Kalsit içerikli	Plastik özelliğine göre	Kristal grup
Mika grubu	Boksit içerikli	Tane boyutuna göre	Amorf grup
Montmorillonit (smektit) grubu	Karbonat içerikli	Renk özelliğine göre	
İllit grubu	Silikat içerikli	Refrakter özelliğine göre	
Klorit grubu	Demir içerikli		
Attapulgit grubu	Yüksek alüminyum içerikli		

Zemin iyileştirme

Zeminin özelliklerinin yetersiz olduğu durumlarda; temelleri sağlam tabakaya oturtmak, yapı temellerini zayıf zeminin taşıyabileceği şekilde boyutlandırmak, zayıf zemini tamamen kaldırarak yerine sağlam zemin doldurmak vb. yöntemler uygulanabilmektedir (Özaydın 2012). Geoteknik mühendisliğinde, zeminlerde meydana gelen şişme, büzülme, oturma gibi problemlerin ortadan kaldırılabilmesi amacıyla problemlili zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi önemli bir yere sahiptir. Zemin iyileştirme yöntemleri her bölge için değişiklik gösterebilir. Bu nedenle belirlenecek zemin iyileştirme yöntemine karar verilmeden önce zeminin cinsine, yer altı suyu durumuna, hedeflenen iyileştirmenin türü ve derecesine, projenin iyileştirme maliyeti ve iyileştirme süresine, civar yapılara ve çevreye etkilerine dikkat edilmeli, atıkların değerlendirilmesi olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır.

(Özaydın 2012). Zemin iyileştirme yöntemlerinin amacı: oturmaları, boşluk oranını, zeminin sıvılaşma potansiyelini ve zeminin geçirimsizliğini azaltmak; zeminin taşıma gücünü arttırmak ve konsolidasyonu hızlandırmaktır. İnşa edilecek yapının altında bulunan temel zemininin taşıma gücünün artmasıyla birlikte zemin yapıyı daha emniyetli bir şekilde taşır.

Zeminlerin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Özaydın 2012).

- Mekanik Yöntemler: Değişik kompaksiyon (sıkıştırma) tekniklerinin uygulanmasıdır.
- Hidrolik Yöntemler: Zemin suyunun çıkarılması, kontrolü/yönlendirilmesidir.
- Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler: Isıtma/dondurma, katkı malzemeleri eklenmesi, enjeksiyon teknikleridir.
- Donatılı Zemin: Zemin içinde donatı elemanları kullanılmasıdır.

Mekanik yöntemler ile zemin iyileştirme

Dinamik kompaksiyon yöntemi: Ağır bir cismin belirli bir yükseklikten bırakılması ile zeminin sıkıştırılmasıdır. Bu yöntemde ağırlığın zemine düşmesiyle birlikte zeminin yoğunluğu artmaktadır. Zeminde meydana gelen sıkıştırmanın miktarı, düşme seviyesi ve düşme sayısı ile doğrudan ilişkilendirilir (Ekinci ve Selçukhan 2021).

Vibro kompaksiyon yöntemi: Derin ve granüler zeminlere yerleştirilen bir sondanın yüksek enerjili titreşimlerle sıkıştırılıp zeminin daha yoğun hale getirilmesi işlemidir. Granüler zeminlerde yoğunluğun artması ile sıvılaşma riski azalır ve kayma mukavemeti artar (Demiröz ve Karaduman 2009).

Patlatma ile kompaksiyon yöntemi: Patlamaların meydana getirdiği şok dalgalarından dolayı oluşan titreşimler ile zeminin sıvılaşması ve sıkışması işlemidir. Tecrübe esaslı bir yöntemdir.

Kompaksiyon kazıkları yöntemi: Kompaksiyon kazığı, gevşek kum tabakasının yoğunluğunu arttırmak için kullanılan yer değiştirme kazığıdır. İnce kumun sıvılaşma potansiyelini azaltmada ve yumuşak çökellerin, taşıma gücünü artırmada daha çok tercih edilir (Demiröz 1992).

Yüzeysel kompaksiyon yöntemi: Yol dolgularında veya iyileştirme yapılmış bir zeminde silindirler kullanılarak yapılan sıkıştırma işlemidir.

Kohezyonlu zeminler için iyileştirme teknikleri

Ön yükleme ile zemin iyileştirme: Yapının inşaatından önce en az yapı yükü kadar olmak şartı ile zemine çakıl ve kum dolgu yüklenmesi ile gerçekleştirilir. Yüklenen ağırlık ile oluşacak gerilmeler ile zemin tabakalarının konsolide olması sağlanmaktadır. Zeminin taşıma gücü, konsolidasyon basıncı ve uygulanan ağırlık doğrultusunda artırılmaktadır. Belli bir süre bekleyip istenilen oturma sağlandıktan sonra dolgu malzemesi kaldırılarak yapının inşaatına başlanabilir. Bu yöntemle yapıda meydana gelmesi istenmeyen oturmalar engellenmiş olur (Ekinci ve Selçukhan 2021).

Elektro-osmoz yöntemi: Boşluk suyunun anotton (+) katota (-) doğru hareket ettirilmesine elektro-osmoz denir. İnce taneli zeminlerin ön konsolidasyonu ve drenajını hızlandırmak için tercih edilen bu yöntemde anot su ile beslenmezse ve katotta biriken su sistem dışına pompalanırsa konsolidasyon sağlanmış olur (Uzuner 2006).

Isıtma ve dondurma yöntemi: Isıl işlemlerden dondurma yönteminde, zeminin bünyesinde bulunan su donuncaya kadar soğutulur böylece daha büyük dayanıma sahip geçirimsiz bir zemin elde edilmiş olur. Donmuş zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri donmamış zeminlere göre daha yüksektir. Isıl işlemlerden ısıtma yöntemi ise killi ve siltli zeminlerin ısıtılmasıyla bünyesinde bulunan suyu kaybedip katılaşması yöntemidir. Bu yöntemle yeterince ısıtılan zemin daha yüksek mukavemete sahip olur (Akyıldız 2019).

Enjeksiyon yöntemi: Basınç altında, zemin içerisinde bulunan boşluklara akışkan malzemelerin enjekte edilmesi yöntemidir (Altun 2010). Bu yöntemde, zemindeki boşlukların büyüklüğüne ve enjeksiyonun amacına göre uygun enjeksiyon malzemesi belirlenmelidir. Enjeksiyon yönteminin kompaksiyon, sızdırma, jet enjeksiyonu ve çatlatma gibi uygulama şekilleri vardır. İnce daneli zeminlerde uygulanan çatlatma enjeksiyon yöntemi, zemin çatlatılarak zemin içerisinde çimento kanalları ile oluşturulan zemin iyileştirme yöntemidir. Jet enjeksiyonu (jet grout) ile hazırlanan çimento şerbetinin, yüksek basınç altında zemin içine püskürtülerek, çevredeki zemin ile karıştırılmasıyla kolonlar oluşturulmasıdır (Özaydın 2012).

Taş kolon yöntemi: Genellikle yumuşak ve orta yumuşak zeminlerde tercih edilir. Taş kolonların işlevi zemin üzerine gelen yükleri zeminle birlikte taşımaktır. Hem oturmaların azaltılmasına, hem de taşıma gücünün artırılmasında katkıda bulunurlar ve aynı zamanda oturmaları hızlandırırlar. Taş kolonlar vibroflotla açılan deliklerin dane çapı 20-75mm arası çakıl veya kırmataşla doldurulup sıkıştırılması ile teşkil edilir (Ayan 2009).

Katkı malzemeleriyle zemin iyileştirme

Kireç stabilizasyonu: İnce daneli zeminlere kireç katılması yöntemidir. Kil mineralleri ve kireç arasında meydana gelen çimentolanma etkisi ile zeminin mukavemeti artar, plastisitesi azalır (Özaydın 2005).

Kireç- baca külü stabilizasyonu: Kömürle çalışan termik santrallerin bacalarından çıkan küllerin kireç ile karıştırıldıkları zaman kireç-killi zeminin reaksiyona girmesi sonucu zemin mukavemetini arttırılır. Baca külü iri daneli zeminler arasındaki boşlukları doldurduğu için iri daneli zeminlerde de tercih edilebilir (Özaydın 2005).

Bitüm ile stabilizasyon: Asfalt stabilizasyonu zemini suyun zararlı etkilerinden korur ve daneleri bir arada tutar (Özaydın 2005).

Çimento stabilizasyonu: Zemin daneleri arasında çimentonun içinde bulunan puzolonik madde sayesinde bağlayıcılık sağlanır.

Geosentetikler ile zemin iyileştirme: Geosentetikler, polimer malzemelerden (polyester, polipropilen, polivinil klorür, polietilen ve polipropilen) meydana gelmektedir. Başlıca geosentetikler; geomembran, geofam, geotekstil, geogrid, geohücre, geotüp, geonet, geotekstil kaplama ve geokompozitler olarak karşımıza çıkmaktadır. Geogridler yapılarda güçlendirme ve iyileştirmede, geohücreler erozyon kontrolü, yüzey ve şev stabilizasyonunda, geotekstiller koruma, filtrasyon ve ayırmada, geomembranlar ise geçirimsizlik amacıyla kullanılmaktadırlar (Yetiz 2018).

Polimerler

Çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklere polimer denir. Polimerler, monomerlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Saçak 2012). Birçok polimer türü vardır. Bunlardan biri de biyopolimerlerdir.

Biyopolimerler

Biyopolimerler yaşayan organizmalar tarafından oluşturulan, herhangi bir sentez sonucu oluşmamış, biyolojik olabileceği gibi canlıların hayati fonksiyonlarından bağımsız olarak tabiatda var olan organik polimerlerdir (Çankaya ve Sökmen 2017).

Biyopolimerlerin Sınıflandırılması (Bozkurt *et al.* 2012):

Sentetik Biyopolimerler:

- Poliortoesterler

- Poliesteramidler
- Polianhidritler
- Polialkisiyonoakrilatlar
- Poliiminokarbonatlar

Doğal Biyopolimerler:

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

Keçiboynuzu gam

Keçiboynuzu gum çekirdeği çoğunlukla “Keçiboynuzu zamkı” olarak adlandırılan doğal polimerin üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Keçiboynuzu zamkının tercih edilmesinin sebebi, düşük oranlarda viskoz çözelti oluşturma özelliğine sahip olmasıdır. Keçiboynuzu zamkı iyonik olmadığından genellikle pH, tuzlar ve ısı işlemlerden etkilenmez (Şener ve Hakgüder Taze 2022). Bir polisakkarit türü olan keçiboynuzu gam, keçiboynuzu tohumunun yağ dokusunun öğütülmesiyle elde edilir, kıvam artırıcı, dengeleyici ve jelleştirici özelliklere sahiptir (Dey *et al.* 2012). Beyaz renkli kremi bir tozdur (Şekil 2).



Şekil 2. Keçiboynuzu gam

Lifler

Lif, bir boyutu, diğer boyutuna göre çok büyük olan, doğal yollarla veya insan eliyle üretilen, dayanımları ve elastisite modülleri aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyük olan yapı malzemesi olarak tanımlanmıştır (Erdoğan 2003).

Lifler üretildikleri malzemelerin farklı özelliklere sahip olmasından dolayı çeşitleri fazladır. Lifler mineral kökenlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

- Metal lifler (çelik vb.)
- Polimer lifler (karbon, polipropilen lif vb.)
- Mineral lifler (cam lif vb.)
- Doğal lifler (selüloz lif vb.)

Metal lifler: Metal lifler oldukça incedirler ve 0,001-0,080 mm çapındaki metal tellerinden üretilmektedir.

Polimer lifler: Sentetik lifler korozyon direnci, toksik olmaması, yüksek çekme mukavemeti ve sertliği nedeniyle takviye malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Cam lifler: Cam liflerin yapımında kullanılan temel hammadde camdır. Cam liflerinin sürtünme mukavemetleri ve uzama yetenekleri düşüktür. Isıyı ve elektriği iletmemesinden dolayı ısı ve elektrik izolasyon maddesi plastik malzemelerin mukavemetini arttırmak için takviye maddesi olarak kullanılmaktadır.

Doğal lifler: Doğal lifler hayvansal, bitkisel ve mineral liflerden oluşur. Yüksek mukavemeti, düşük maliyeti, hafifliği, yüksek sertliği, sürdürülebilirliği ve çevre dostu olması nedeniyle modern endüstride "Eko-kompozit" olarak anılan doğal lif teknolojisi, son zamanlarda geoteknik mühendisliğinde popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir (Yazıcı ve Keskin 2021).

Literatür Özetleri

Tez kapsamında kil zeminlerin iyileştirilmesinde biyopolimer ile lifin ortak etkisi araştırılmıştır. Bu nedenle polimerlerle zemin iyileştirilmesi, liflerle zemin iyileştirilmesi ve polimer-liflerle zemin iyileştirilmesi konularında literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

Polimerler ile ilgili çalışmalar

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

Chang and Cho (2014) çalışmalarında β -1,3/1,6-glukan biyopolimerini kullanmışlardır. Numunelerdeki β -1,3/1,6-glukan biyopolimeri oranı arttıkça; kıvam limitlerinde, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında, şişme indeksinde ve optimum su muhtevalarında artış olduğu görülmüştür.

Chang *et al.* (2015), çalışmalarında ksantan zmkını zemini iyileştirmek için kullanmışlardır. Farklı zemin türlerinde ve farklı oranlarda ksantan zmkı ile deneyler yapılmıştır. Ksantan zmkı ince daneli zeminler ile daha iyi tepkimeye girmekte ve zeminin mukavemetini belirli oranlarda arttırmaktadır. Biyopolimerin yüksek oranlarda katıldığı deneylerde yüksek viskozite, işlenebilirliği zorlaştırdığından istenen sonuçlar elde edilememiştir. Bu sebepten dolayı yüksek oranda ksantan zmkından kaçınılması gerektiği, zemin için ideal ve ekonomik olan oranın % 1 - % 1,5 aralığında olacağı düşünülmektedir.

Cabalar *et al.* (2018), bu çalışmada, ksantan zmkı biyopolimeri ile geliştirilmiş düşük plastisiteli bir kilin geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Numuneler, ksantan zmkı biyopolimerinin ağırlıkça çeşitli oranlarda (%0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 ve 3,0) karıştırılmasıyla ve daha sonra farklı kür sürelerinde bekletilmesiyle (0, 7, 28 ve 56 gün) hazırlanmıştır. Ksantan zmkı biyopolimerinin kil üzerindeki etkisini göstermek için, numuneler üzerinde yoğun bir dizi serbest basınç dayanımı, laboratuvar kanatlı kesme, düşen koni, ödometre, geçirgenlik, şişme ve çekme deneylerine tabii tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, kil numunelerinin mukavemeti hem biyopolimer içeriği hem de kürlenme süresi ile artmıştır. Deney sonuçları ayrıca, ksantan zmkı biyopolimerli numunelerin geçirimsizliğinin daha düşük, şişme yüzdesi değerlerinin ise işlem görmemiş numunelere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ksantan zmkı biyopolimer uygulaması, bir kilin iyileştirilmesi için çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif malzeme olarak tanımlanmıştır.

Bagherinia (2019), çalışmasında suya doymun düşük plastisiteli kil (CL) zemininin stabilizasyonunda biyopolimer (NaAL) ve kimyasallar kullanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar şöyledir: biyopolimerin maksimum serbest basınç mukavemeti değeri %1 oranı ve 28 günlük kür süresi için yaklaşık 5,347 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, katkısız düşük plastisiteli kilin 28 günlük kür süresi ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %1227 oranında artış meydana geldiği görülmüştür.

Chang and Cho (2019) çalışmalarında, mikrobiyal biyopolimerlerin son zamanlarda zemin iyileştirmede yeni bir malzeme olarak kullanıldığından bahsetmişlerdir. Çalışmada, biyopolimerlerin, küçük miktarlarda bile kullanıldıklarında (çimento gibi geleneksel bağlayıcıların gerekli miktarının 1/10'u veya daha azında) zemine önemli ölçüde güçlendirme sağladıkları ifade edilmiştir. Özellikle, agar sakızı, gellan sakızı ve ksantan sakızı dahil olmak

üzere termo-jelleştirici biyopolimerlerin, suya doymuş koşullar altında bile zemini fark edilir şekilde güçlendirdiğinin bilindiği, bununla birlikte, gellan sakızı ve zemin partikülleri arasındaki mikroskobik etkileşimlerin ve güçlendirme özelliklerinin açıkça ayrıntılı bir incelemesinin henüz yapılmamış olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, zemin-gellan zankı etkileşimlerinin gellan zankı uygulanmış zemin karışımlarının (kum-kil) güçlendirme davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kum-kil karışımlarının mukavemetlerinin, saf kum veya kile göre gellan zankı uygulamasıyla etkili bir şekilde arttığını göstermiştir. Güçlendirme davranışı, gellan sakızı ile ince partiküllerin bir araya toplanmasının yanı sıra ince ve kaba partiküllerin birbirine bağlanmasına atfedilir. Gellan sakızı, sadece parçacıklar arası kohezyonu değil aynı zamanda kil içeren zeminlerin sürtünme açısını da önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Majedi vd (2013), çalışmalarında, su sevmeyen bir organokilin belirli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) lateks polimeri, %10 oranında gliserin ve yeterli miktarda su kullanılarak sol-jel yöntemi ile nanokil-kompozit numuneler geliştirilmiş ve bu numuneler bazı geoteknik deneylere tabii tutmuşlardır. Deney sonuçları şöyledir: Nanokil-kompozit numunelerin dane birim hacim ağırlıkları polimer yüzdesinin artışı ile azalmış, deney şartlarına göre kompaksiyon deneyi sonuçları nanokil-kompozit numunelerin polimer yüzdelinde meydana gelen artışla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalma olduğu ve optimum su muhtevalarının ise belirli bir miktar arttığı görülmüştür. Serbest basınç mukavemeti, polimer katkı yüzdesi miktarı arttıkça azalmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen nanokil-kompozit numune verilerinin hidrolik ve dinamik problemlerin çözümünde ümit vadettiği görülmüştür.

Barani and Barfar (2021) çalışmalarında, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir sıvı koyulaştırıcı biyopolimer olan ksantan zankı biyopolimerinin kilin kurutma sırasındaki kırılma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç noktalı eğme (eğilme kırıışı) testleri yapmışlardır. Sonuçlar, ksantan zankı biyopolimerinin yüksek su içeriklerinde eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Ok ve Bağrıaçık (2022), son zamanlarda çevresel sorunlardan dolayı biyopolimerler gibi çevre dostu malzemelerin kullanım alanlarının hızla artış göstermekte olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada guar gum biyopolimeri kullanılarak kohezyonlu bir zeminin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Bu amaçla kohezyonlu zemine %1, %2 ve %3 oranında biyopolimer karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler farklı sürelerde kür edilmiş ve 1, 3, 5, 10 çevrim donma çözölmeye tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, biyopolimer katkılı, kohezyonlu bir zeminin serbest basınç mukavemeti ve şişme basıncı üzerinde olumlu etkisi

olduğu görülmüştür. Bu etkilerinin donma çözülme ve kür süresini olumlu ölçüde değiştiği görülmüştür.

Lifler ile ilgili çalışmalar

Kumar *et al.* (2006) çalışmalarında, polyester lifleri yumuşak kil zeminle karıştırarak serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişimi araştırmıştır. Numuneler, %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında düz ve kıvrımlı polyester elyaflarla kilin karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca çeşitli oranlarda kumun kile (%0 ile %12 arasında değişen) karıştırılmasından sonra sıkıştırılan numuneler de test edilmiştir. Kilin serbest basınç dayanımının lif ilavesiyle arttığı ve kil kum karışımına lif karıştırıldığında mukavemetin daha da arttığı gözlenmiştir.

Zaimoğlu (2010) çalışmasında, ince daneli zemine polipropilen lif katarak elde ettiği lif katkılı malzemelerin donma-çözülme sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımını incelemiştir. Sonuç olarak polipropilen lif oranı arttıkça kütle kaybında %50 oranında artışı ve genellikle eksenel gerilmenin de artışı sonucuna varılmıştır.

Estabragh *et al.* (2013) çalışmalarında, rastgele güçlendirilmiş bir killi zeminin konsolidasyon ve kayma davranışı üzerindeki ayrık palmiye liflerinin etkilerine yönelik deneysel bir araştırmanın sonuçlarını sunmaktadır. %10, %20 ve %30 oranında lif içeriğiyle üç farklı donatılı zemin numunesi hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde konsolidasyon ve üç eksenli deneyi yapılmıştır. Sonuçlar, elyaf takviyesinin zemin içerisine dahil edilmesinin ön konsolidasyon basıncında azalmaya, sıkıştırılabilirlik ve şişme indekslerinde artışa neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca dayanım ve sürtünme açısı toplam ve efektif gerilmeler açısından önemli ölçüde artar.

Mahdad (2014), çalışmasında donatısız ve rastgele donatılı (polipropilen lifli) orta sıklıktaki bir kum zemin üzerine oturan yüzeysel bir şerit temelin davranışını model yükleme deneyleri ile araştırmıştır. Deneylerde rölatif sıklık değeri %65 olarak belirlenmiştir. Sabit rölatif sıklıkta, üç farklı lif uzunluğu (5 mm, 10 mm ve 20 mm) ve farklı lif yüzdeleri kullanılarak ortalama taşıma basıncı ve oturma ilişkileri belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar şöyledir: Polipropilen lif yüzdesinin ve uzunluğunun artmasıyla taşıma kapasitesinin arttığı ve taban basınçları ortalama aynı olarak dikkate alındığında, oturmaların azaldığı gözlenmiştir.

Chen *et al.* (2015), bu makale, polipropilen elyaf ile geliştirilmiş çimento-kil karışımının mukavemet davranışı üzerine bir laboratuvar değerlendirmesi sunmaktadır. Atık polimer tekstil torbaları çevreye zararlıdır ve acilen yeniden kullanmanın sürdürülebilir yolları

aranmaktadır. Bu atık polimer tekstil torbalarını geri dönüştürmenin yeni bir yöntemi, bunları sıkıştırılmış kaldırım tabanı/alt temeller gibi yumuşak zemin iyileştirme projelerinde uygulamaktır. Zeminlerde, elyaf demetlerinin etkinliğini doğrulamak için, elyaf takviyeli çimento ile geliştirilmiş yumuşak Şanghay kili üzerinde bir dizi laboratuvar araştırması yürütülmüştür. Testlerde iki tip polimer elyaf kullanılmıştır; ilki monofilament polipropilen elyaf, diğeri ise polimer tekstil torbalardan ayrılan elyaf demetleridir. Testler, fiber-zemin-çimento karışımı numunesi bir süre kürlendikten sonra serbest basınç dayanımı (UCS) testi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, elyaf katkı maddesinin mukavemeti ve sünekliği önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir.

Akbulut vd (2015) çalışmalarında atık tavuk tüyünün yüksek plastisiteli (CH) kil zemin üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında atık tavuk tüyü, tuf lifi ve telek lifi 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 (3 mm, 6 mm ve 12 mm) polipropilen lifleri, ince taneli zemin içerisine rastgele ekleyerek zemine olan etkisini donma-çözülme deneyi ile araştırmışlardır. Lif oranı yapılan ön deneylerle zeminin toplam kuru ağırlığının %0,15, %0,20 ve %0,25'i olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre lif uzunluğunun artışı ile donatılı numunelerin donatısız numunelere göre daha sünek davranış gösterdiği belirlenmiş ve donma-çözülme çevrim sayısının artması ile serbest basınç dayanımında azalma olduğu belirlenmiştir.

Çalık (2017)'in yapmış olduğu çalışmada, farklı uzunluk ve oranlardaki polipropilen liflerle rastgele donatılandırılmış ince daneli zeminlerin (yüksek ve düşük plastisiteli killerin) donma-çözülme davranışını incelemek üzere laboratuvarda serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar şöyledir: yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killeri için; lif boyunun uzun olması, yüksek çevrimlerde donma-çözülme dayanımında olumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Genellikle yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil zeminleri için lif ile donatılandırılmış numuneler, donatısız numunelere göre çevrim sayısının artması ile donma-çözülme dayanımının azaldığı görülmüştür. Genellikle polipropilen lif ile rastgele donatılandırılmış numunelerin, polipropilen lif ile donatılandırılmamış numunelere göre daha sünek bir davranış gösterdiği görülmüştür.

Özdemir (2019), kile %0,5, %1 ve %1,5; 2 mm ve 5 mm saman, kendir ve monolif polyester iplik katılarak elde edilen lif katkılı kil numunelerin kıvam, kompaksiyon, serbest

basınç ve donma çözülme özelliklerini belirlemek için bu çalışmayı gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları şöyledir: kıvam limitleri deneyleri sonucunda Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre doğal kilin zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Kendir katkılı, uçucu kül katkılı ya da katkısız kil numunelerine yapılan deneylerde lif uzunluğu ve lif yüzdesi arttıkça likit limit değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Monolif polyester iplik (5 mm uzunluğunda) katkılı ve uçucu kül katkılı ya da katkısız numunelerin likit limit değerleri monolif polyester iplik yüzdesinin artmasıyla birlikte artmıştır. Yüksek plastisiteli kile liflerin katkısıyla birlikte yüksek plastisiteli silt davranışı gösterdiği görülmüştür.

Puppala and Musenda (2020) çalışmalarında kil zemini iyileştirmek için polipropilen lifini kullanmışlardır. Deneylerde 2 farklı lif (%0-0,9 arasında 4 farklı oranda) ve 2 farklı şişebilen zemin türü kullanılmıştır. Hazırlanan kil ve kil-lif katkılı numunelere tek eksenli basınç, şişme, şişme basıncı ve hacimsel rötre deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda lif katkısının şişme basıncı ve hacimsel rötre azalttığı ve tek eksenli basınç dayanımında doğal kile göre artış sağladığı kanısına varılmıştır.

Kurt Albayrak and Altun (2021) çalışmalarında mermer tozu katkılı kil numunelerinin keçiboynuzu zambkı ile iyileştirilmesi sonucu elde edilen numunelerin mukavemet özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle kil ve mermer tozu belirli oranlarda karıştırılarak mermer tozu içeren kil elde etmişlerdir. Daha sonra mermer tozu katkılı kil, belirli oranlarda keçiboynuzu zambkı ile karıştırılmış ve kil-mermer-biyopolimer katkılı numuneler elde etmişlerdir. Numuneler üzerinde bir takım geoteknik deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mermer tozu katkılı kil numunelerinin mermer tozu yüzdesinin artmasıyla serbest basınç dayanımı artmıştır. Keçiboynuzu zambkı yüzdesi arttıkça doğal kilin serbest basınç dayanımı da artmıştır. Mermer tozu katkılı kilde biyopolimer oranının artmasıyla hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısından önemli artışlar meydana gelmiştir. Kil-mermer-biyopolimer katkılı numunelerin konsolidasyonsuz drenajsız kohezyon değerleri biyopolimer yüzdesi arttıkça artmıştır. Keçiboynuzu zambkı yüzdesinin artmasıyla birlikte kil-mermer-biyopolimer katkılı numunelerin içsel sürtünme açısı da artmıştır.

Kurt Albayrak and Gencer (2021) biyopolimer ile etkileştirilmiş ponza tozu-kil karışımlarının bazı mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle doğal kil, ponza tozu ile belirli oranlarda karıştırılarak ponza içeren kil numuneler elde etmişlerdir. Çalışma kapsamında ponza tozu belirlenen oranlarda kil ile karıştırıldıktan sonra hazırlanan kil-ponza tozu katkılı numunelere farklı yüzdelere biyopolimer eklenmiştir. Hazırlanan numuneler bazı geoteknik deneylere tabii tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre biyopolimer yüzdesinin artmasıyla likit limit değerlerinin arttığını ve numunelerin plastik olmayan özellik

sergilediği görülmüştür. Ayrıca keçiboynuzu zambının artmasıyla numunelerin kuru birim ağırlıkları azalmış, serbest basınç dayanımları artmış ve hidrolik iletkenlik değerleri değişmiştir. Böylelikle bu çevre dostu biyopolimeri içeren kil/ponza taşı karışımlarının depolama alanlarında geçirimsiz şilte olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Özdemir and Kurt Albayrak (2022) çalışmalarında kile farklı yüzdelerde (%0,5, %1, %1,5) ve farklı uzunluklarda (2 mm, 5 mm) buğday samanı ilave edilerek elde edilen buğday-saman katkılı kil numunelerinin kıvam, kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan bazı geoteknik deneyler sonucunda saman yüzdesinin artmasıyla kilin serbest basınç dayanımının arttığını ve samanın, kilin 4 çevrim donma-çözülme sonrası serbest basınç dayanımına olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre buğday samanı lifinin yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu için katkı maddesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Polimer ve lifler ile ilgili yapılan çalışmalar

Ayeldeen and Kitazume (2017) çalışmalarında çimentolu yumuşak kilin davranışını iyileştirmede polimerin her iki durumda da lif veya sıvı olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Dört içerikte (0, 0,1, 0,2, 0,5 ve 1) iki tip polimer kullanılmış ve çimentolu yumuşak kil ile üç farklı çimento oranında karıştırılmıştır. Sıvı polimer, işlenebilirliği azaltan liflerin aksine, taze karışımın işlenebilirliğini arttırmıştır. Hem lifler hem de sıvı polimerler, çimentolu yumuşak kilin davranışını iyileştirmede büyük başarı göstermiştir. Çalışma sonunda, hem hedef mukavemeti hem de işlenebilirliği sağlamak için %0,2' ye kadar lif içeriği ve %0,5' e kadar sıvı içeriği önerilmiştir.

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

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

biyopolimerin basınç dayanımını artırdığı ve liflerin zemini daha sünek hale getirip, zeminin çekme dayanımını artırdığı belirlenmiştir.

Chen *et al.* (2022), çalışmalarında, liflerin (polipropilen liflerin (12mm)) ve bir biyopolimerin (ksantan sakızının) zemin mukavemeti üzerindeki birleşik etkisini değerlendirmek için serbest basınç deneyleri gerçekleştirmiş ve biyopolimer içeriğinin, lif içeriğinin, sertleşme süresinin ve durumunun etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda, biyopolimer ve liflerin birlikte kullanımının, her bir katkı maddesinin ayrı ayrı kullanılmasından daha yüksek bir serbest basınç mukavemeti sağladığı, ancak bu artışın yüksek lif içeren numuneler için belirgin olmadığı belirlenmiştir. Biyopolimer içeren numuneler, 28 gün boyunca kapalı torbada kürlendikten sonra daha yüksek mukavemet göstermiştir. Bu, biyopolimer ve zemin parçacıkları arasındaki etkileşimi aktive etmek için kürleme süresinin uzatılmasının gerekli olduğunu göstermiştir. Hava kürü-kuru durumda muhafaza edilen numuneler için serbest basınç mukavemeti, farklı eğilimler göstermiştir. Liflerin ve biyopolimerin birleşik etkisi, lif ve biyopolimer güçlendirme etkilerinin basit bir toplamı değildir. Biyopolimer, partikül bağlama kuvvetine katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda zeminde lif çalışma verimliliğini de artırır. Buna karşılık lifler, çimentolu zemin kırılma dayanıklılığının azaltılmasına yardımcı olur ve ekstra direnç sağlar. Biyopolimer, kürleme yoluyla daha güçlü hidrojen ve elektrostatik bağ ile zemin mukavemetinin iyileştirilmesi üzerinde güçlü bir etki gösterir. Lifler, zemin kırılma dayanıklılığını azaltabilir ve sünekliği artırabilir. Zemin bloklarını birbirine bağlarlar ve ayrışmayı ve numunelerin tamamen bozulmasını önlemek için içsel bir çekme kuvveti sağlarlar. Biyopolimerin eklenmesi, zeminin kırılma dayanıklılığını ve dayanıklılığını değiştirirken, lifler zeminin sünekliğini geliştirir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kil

Çalışmada Oltu-Erzurum'dan temin edilen doğal bir kırmızı kil kullanılmıştır. Kil laboratuvara getirildikten sonra 105 °C sıcaklığındaki etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3). Kil kuruduktan sonra öğütülmüş ve deneylerde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 4). Doğal kil zeminin bazı geoteknik özellikleri Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılan deneyler ile belirlenmiştir (Tablo 2). Doğal kil zemin üzerinde gerçekleştirilen hidrometre analizi sonucu kil yüzdesinin (<0,002mm) %58 olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Kilin Bazı Özellikleri (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/m ³)	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 3. Etüvde kurutulan kil



Şekil 4. Öğütülmüş kil

Biyopolimer

Çalışma kapsamında kil zemine ilave edilecek olan biyopolimer (B) Smart Kimya'dan temin edilen ve toz halde olan keçiboynuzu gam olarak seçilmiştir (Şekil 5). Keçiboynuzu gam bir tür Galaktomannan'dır. Keçiboynuzu gamın pH değeri 5-7 arasında, viskozitesi 2000-3500 arasındadır.



Şekil 5. Keçiboynuzu gam tozu

Lif

Çalışmada 2H Tekstil'den alınan sentetik bir lif (polyester iplik) kullanılmıştır. Temin edilen polyester iplik 0,15 mm kalınlıkta olup deneylerde kullanılmak üzere 5 mm uzunluğunda kesilmiş ve kilin kuru ağırlığının %0,15, %0,30, % 0,60 oranlarında tartılarak kil içerisine ilave edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. 5 mm uzunluğunda kesilmiş lif

Numunelerin Hazırlanması

Çalışma kapsamında yapılan deneyler biyopolimer katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin hazırlanışı aşağıda sunulmuştur. Numuneler Harvard Minyatür Kompaksiyon deney aleti kullanılarak sıkıştırılmış ve bu deney ile belirlenen optimum su içerikleri kullanılmıştır.

Doğal kil numunelerinin hazırlanması

105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutularak öğütülen kil deneyler için hazır hale getirilmiştir. Kil, Harvard Minyatür Kompaktör ile belirlenen optimum su muhtevasında sıkıştırılmış ve katkısız doğal kil numuneleri hazırlanmıştır.

Biyopolimer katkılı kil numunelerin hazırlanması

Biyopolimer katkılı kil numuneleri hazırlamak için, ilk önce her bir biyopolimer katkılı kilin Harvard Minyatür Kompaktör ile belirlenen optimum su içeriği kadar su tartılmıştır. Ardından tartılan su miktarının ağırlıkça yüzdesi kadar (%0,5, %1, %1,5) biyopolimer tartılmıştır. Belirlenen oranlarda suya katılmış olan keçiyoynuzu gam, 1000 rpm hızına ayarlanan manyetik karıştırıcıda çözünene kadar karıştırılmıştır (Şekil 7). Elde edilen bu solüsyon kile eklenmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır (Kurt Albayrak ve Gencer 2021).



Şekil 7. Deneylerde kullanılan manyetik karıştırıcı

Lif katkılı kil numunelerin hazırlanması

Lif katkılı kil numuneleri hazırlamak için kilin ağırlıkça yüzdesi kadar (%0,15, %0,30, %0,60) lif, kile eklenmiş ve homojen olarak karıştırılmıştır (Şekil 8). Ardından kilin optimum su muhtevasında karıştırma işlemine devam edilmiş, lif katkılı kil numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 8. Kil-lif karışımı

Biyopolimer-lif katkılı kil numunelerin hazırlanması

Biyopolimer-lif katkılı kil numuneler hazırlanırken ilk önce kil ve kilin ağırlıkça yüzdesi cinsinden belirlenmiş lif (%0,15, %0,30, %0,60) tartılarak kuru halde karıştırılmıştır. Daha sonra biyopolimer katkılı killerin optimum su muhtevası kadar su ve su miktarının ağırlıkça yüzdesi kadar (%0,5, %1, %1,5) biyopolimer tartılarak, biyopolimer 1000 rpm hızda manyetik karıştırıcı kullanılarak çözülmüştür. Karıştırılmış olan kil-lif karışımı içerisine biyopolimer-su

karışımı eklenmiş, homojen olarak karıştırılmış, biyopolimer-lif katkılı numuneler hazırlanmıştır (Şekil 9). Kullanılan katkı yüzdeleri Tablo 3'te verilmiştir.



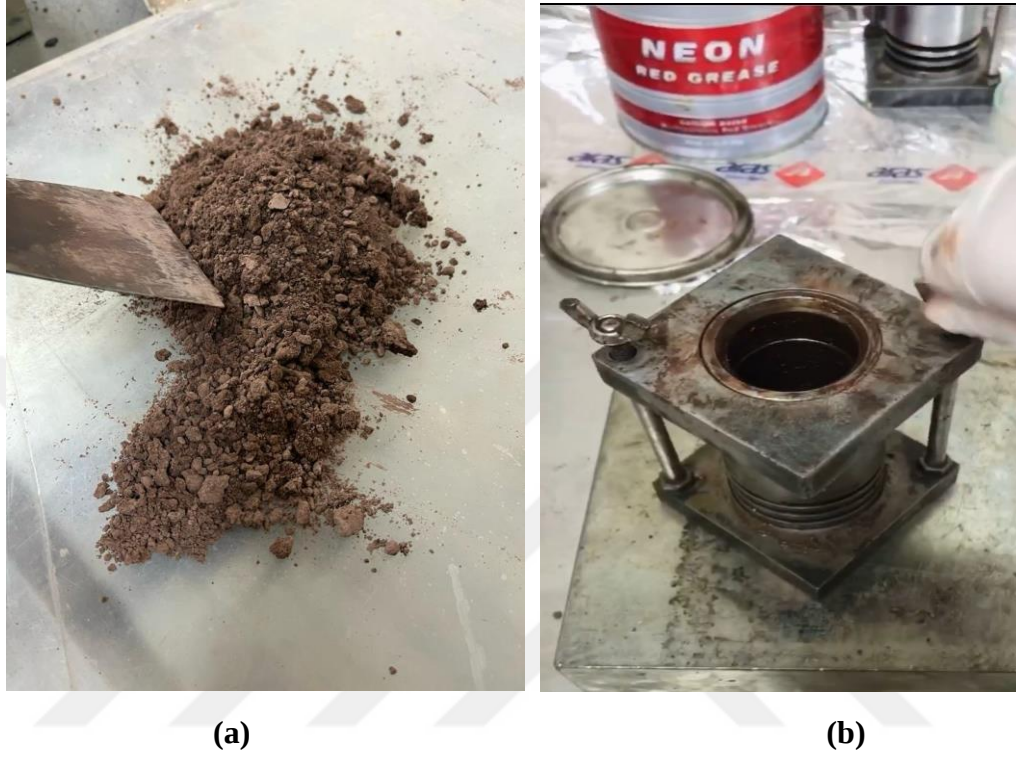
Şekil 9. Kil-lif-biyopolimer karışımı

Tablo 3. 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

Katkı oranları seçilirken literatürden faydalanılmış ve ön deneyler yapılarak karar verilmiştir. Hazırlanan karışımlarda, karışımlar tam olarak homojen hale gelinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan karışımlar yan yüzeyleri ve tabanları ince bir tabaka halinde yağlanan 32 mm çapında ve 71 mm yüksekliğindeki metal silindir kompaksiyon kalıpları içerisinde Harvard Minyatür Kompaksiyon deney aleti ile sıkıştırılmıştır. Metal kalıp

üzerindeki fazlalıklar spatula yardımıyla alınmıştır. Yüzeyi tam olarak düzlenen numune, hidrolik numune çıkarıcı alet kullanılarak kalıptan çıkarılmıştır. Şekil 10'da, karıştırma işlemi ve yağlanmış metal kalıp, Şekil 11'de ise hazırlanmış olan numuneler görülmektedir. Numuneler 1 ve 28 gün laboratuvar ortamında (22 ± 2 °C, %18,5 nem) bekletilerek küre tabi tutulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. (a) karıştırma işlemi, (b) yağlanmış metal kalıplar



Şekil 11. Hazırlanan numuneler

Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon; zeminde boşlukların azaltılması, mukavemetin artması, oturma ve geçirimsizliğin iyileştirilmesi amacıyla zeminin tabakalar halinde serilerek sıkıştırılması işlemidir.

Kompaksiyonda temel amaç; zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru yoğunluğu veren su muhtevasına (optimum su muhtevası) ulaşmaktır.

Kil numunelerin ve katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık) değerleri Harvard Minyatür Kompaksiyon deneyi ile bulunmuştur (Şekil 12). Bu deney yapılırken numunelere su eklenerek numuneler yoğrulmuş, 32 mm çapında ve 71 mm yüksekliğindeki silindirik metal kompaksiyon kalıbı içerisine her bir tabakaya 10'ar vuruş yapılarak 5 tabaka halinde sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler numunelere artan şekilde su eklenerek farklı su içeriklerinde yinelenmiş ve numunelere ait kompaksiyon parametreleri bulunmuştur.



Şekil 12. Harvard mini kompaktör

Kıvam Limitleri Deneyleri

Numunelere ait likit limit değerleri düşen koni yöntemi ile belirlenmiş ve deneyler BS 1377, Part 2, 1990' a göre gerçekleştirilmiştir. Zemin numunesi 40 No'lu elekten elenmiş ve su ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Numune, cihaza ait penetrasyon kalıbına içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirilmiş, yüzeyi düzeltilmiş ve penetrometre tabanına konulmuştur. Düşen koni 5 saniye süre ile numune içerisine batırılmış ve süre sonunda batma miktarları bulunmuştur. Bu işlem su muhtevaları artırılarak tekrar edilmiştir. Deney sonunda her bir batma değerine karşılık gelen su muhtevası değerleri hesaplanmış ve deney prosedüründe belirtildiği gibi 20 mm' lik batmaya karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Düşen koni yöntemi ile likit limit deneyinin yapılışı Şekil 13' de görülmektedir.



Şekil 13. Düşen koni deney düzeneği

Numunelere ait plastik limit değerleri ise TS 1900 ve ASTM D 4318 esas alınarak bulunmuştur. Bunun için bir miktar zemin numunesi alınmış, üzerine su eklenerek yoğrulmuştur. Bu numuneden bir miktar alınarak cam bir yüzey üzerinde 3 mm çapında çubuklar elde edilecek şekilde elle yuvarlanmıştır. Yuvarlanan çubuklarda kopmaların ve kılcal çatlamların olduğu çubukların su muhtevası belirlenerek plastik limit değeri olarak alınmıştır. Her bir deney üçer kez tekrarlanmıştır.

Likit limit ve plastik limit değerlerinin bulunmasının ardından likit limit değerinden plastik limit değeri çıkartılarak kil zeminler için önemli bir parametre olan plastisite indisi değeri elde edilmiştir.

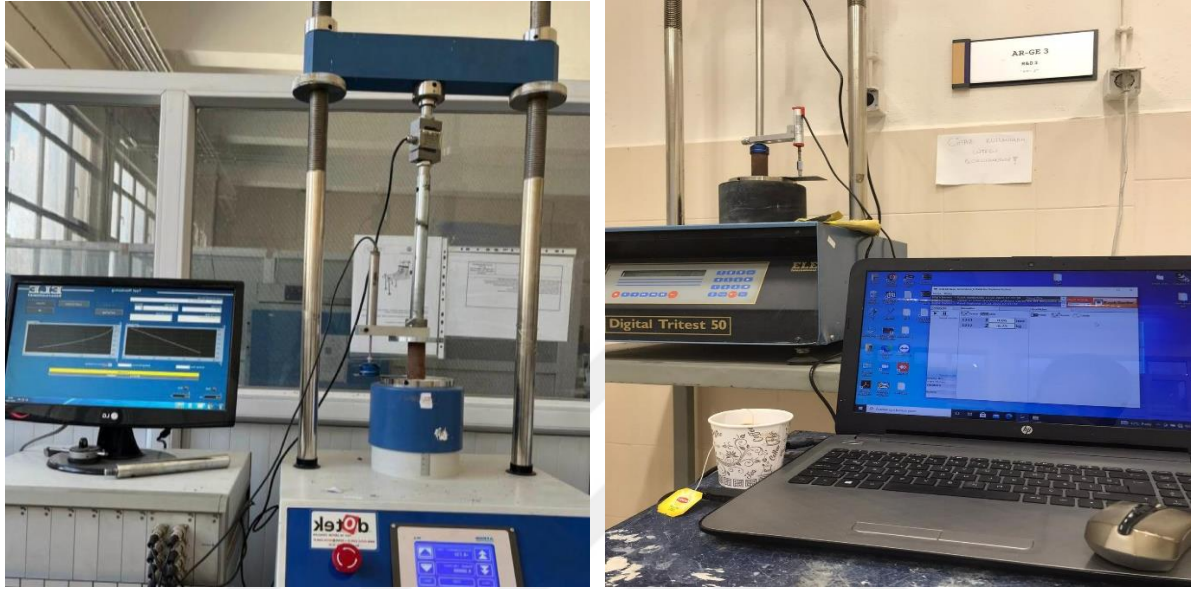
Serbest Basınç Deneyi

Numunelerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin belirlenmesi için serbest basınç deney aleti kullanılmıştır (Şekil 14). Serbest basınç deneyleri, ASTM D 2166'ya göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yükleme hızı 0,8 mm/dak. seçilmiş, Harvard Minyatür Kompaksiyon deney aleti ile sıkıştırılarak numune çıkartıcı yardımıyla kalıptan çıkartılan numuneler serbest basınç deney aletine yerleştirilmiş ve numunelere cihaz yardımıyla düşey yönde bir kuvvet uygulanmıştır. Deney süresince uygulanan kuvvet ve gerçekleşen deformasyonlar bilgisayar programı vasıtasıyla okunmuş ve kaydedilmiştir. Serbest basınç numuneleri optimum su muhtevalarında sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler tüm yüzdelere için 3'er kez tekrar edilmiş ve sonuçların yorumlanmasında ortalama

serbest basınç mukavemeti değerleri kullanılmıştır. Şekil 15'te deney öncesi ve sonrası numune görülmektedir.

Zemin numunelerin, kırılma anındaki en kesit alanı A_f , kırılma anındaki yük değeri P_{max} olmak üzere serbest basınç mukavemeti (q_u) Eşitlik 1 ile bulunmuştur.

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



Şekil 14. Serbest basınç deney düzeneği



(a)



(b)

Şekil 15. (a) Serbest basınç deneyi öncesi numune, (b) Serbest basınç deneyi sonrası numune

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

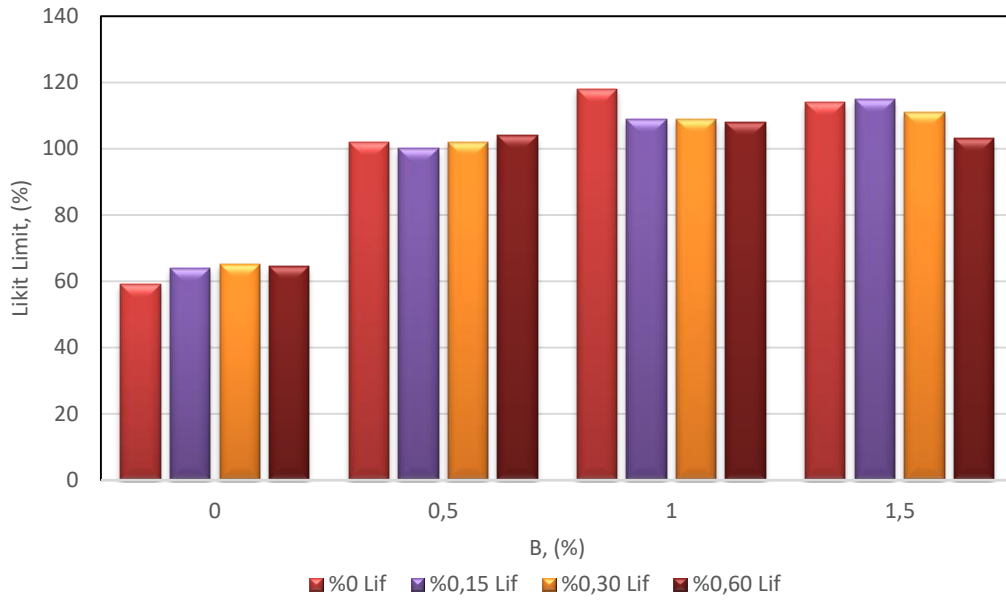
Tez çalışması kapsamında farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam biyopolimeri (%0,5, %1, %1,5) ve farklı yüzdelerde lif (%0,15, %0,30, %0,60) kil bir zemine ilave edilerek katkılı numuneler hazırlanmış ve bu numunelere plastik limit ve likit limit deneyleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan kıvam limitleri deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kıvam Limitleri

Numune	Likit limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Zemin Sınıfı (USCS)
B0-L0	59	26	33	CH
B0-L0,15	64	27	37	CH
B0-L0,30	65	29	36	CH
B0-L0,60	64,5	29	35,5	CH
B0,5-L0	102	-	-	-
B1-L0	118	-	-	-
B1,5-L0	114	-	-	-
B0,5-L0,15	100	-	-	-
B1-L0,15	109	-	-	-
B1,5-L0,15	115	-	-	-
B0,5-L0,30	102	-	-	-
B1-L0,30	109	-	-	-
B1,5-L0,30	111	-	-	-
B0,5-L0,60	104	-	-	-
B1-L0,60	108	-	-	-
B1,5-L0,60	103	-	-	-

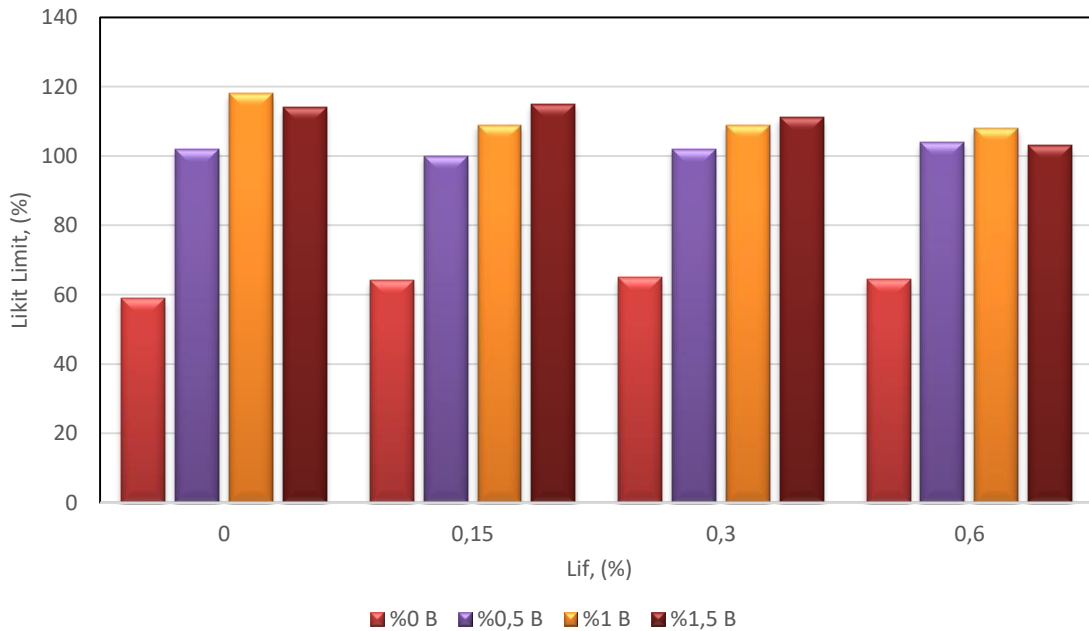
Keçiyoynuzu gam oranındaki artışla katkısız ve polyester lif katkılı numunelerin likit limitlerinin değişimi Şekil 16'da görülmektedir. Likit limit değerleri incelendiğinde, keçiyoynuzu gam oranındaki artışla, likit limitlerde genellikle artış meydana geldiği görülmektedir. Ayhan (2011) çalışmasında, kitosan ve zantan gam biyopolimerlerinin, killerin likit limitini artırdığını ortaya koymuş ve bunun kullanılan biyopolimerlerin seyreltilmiş asetik asit çözeltisinde veya saf suda çözüldükleri zaman ortaya çıkan hidroksil grupların kil yüzeyine

tutunmasından kaynaklandığını ifade etmiştir. Keçiboynuzu gam katkılı numuneler non-plastik (NP) özellik göstermiş olup plastik limit deneyleri gerçekleştirilememiştir.



Şekil 16. Keçiboynuzu gam oranındaki artışla likit limitlerin değişimi

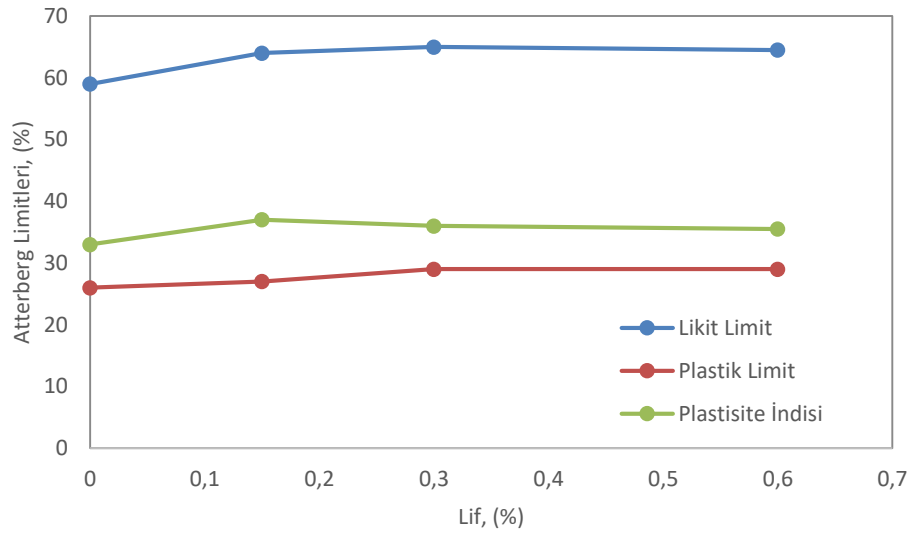
Şekil 17’de lif oranındaki artışla katkısız ve keçiboynuzu gam katkılı killerin likit limitlerinin değişimi görülmektedir. Likit limitler incelendiğinde, lif oranındaki artışla, likit limitlerde önemli bir değişim meydana gelmediği söylenebilir.



Şekil 17. Lif yüzdesindeki artışla likit limitlerde meydana gelen değişim

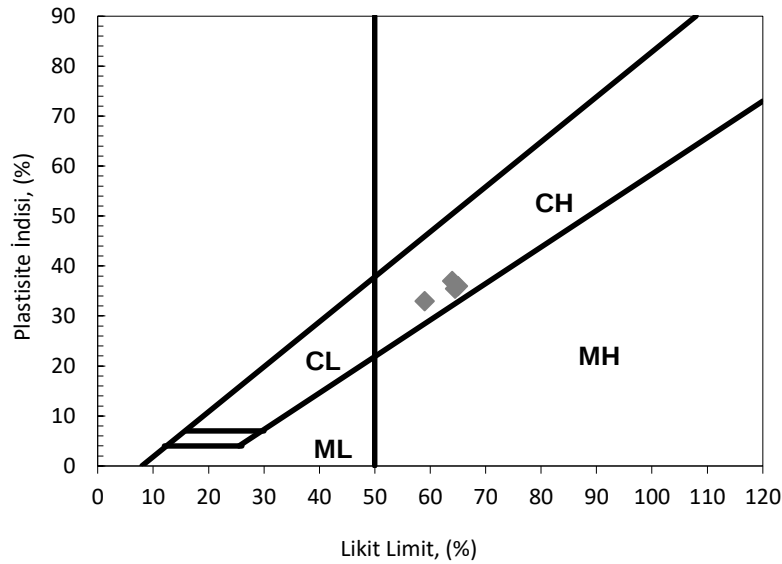
Lif yüzdesindeki artışla doğal kilin plastik limit, plastisite indisi ve likit limitlerinin değişimi Şekil 18’de verilmiştir. Şekil 18’e göre lif yüzdesinde meydana gelen artışın

numunelerin plastik limit, plastisite indisi ve likit limit değerleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı söylenebilir.



Şekil 18. Lif yüzdesinin artmasıyla Atterberg limitlerinin değişimi

Lif katkılı kil numunelerin Casagrande Plastisite Grafiği'ndeki yerleri Şekil 19'da gösterilmektedir. Buradan, yüksek plastisiteli kil (CH) olan doğal kilin, kil katkısıyla yine CH olduğu, zemin sınıfında bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



Şekil 19. Lif katkılı kil numunelerin Casagrande Plastisite kartındaki yerleri

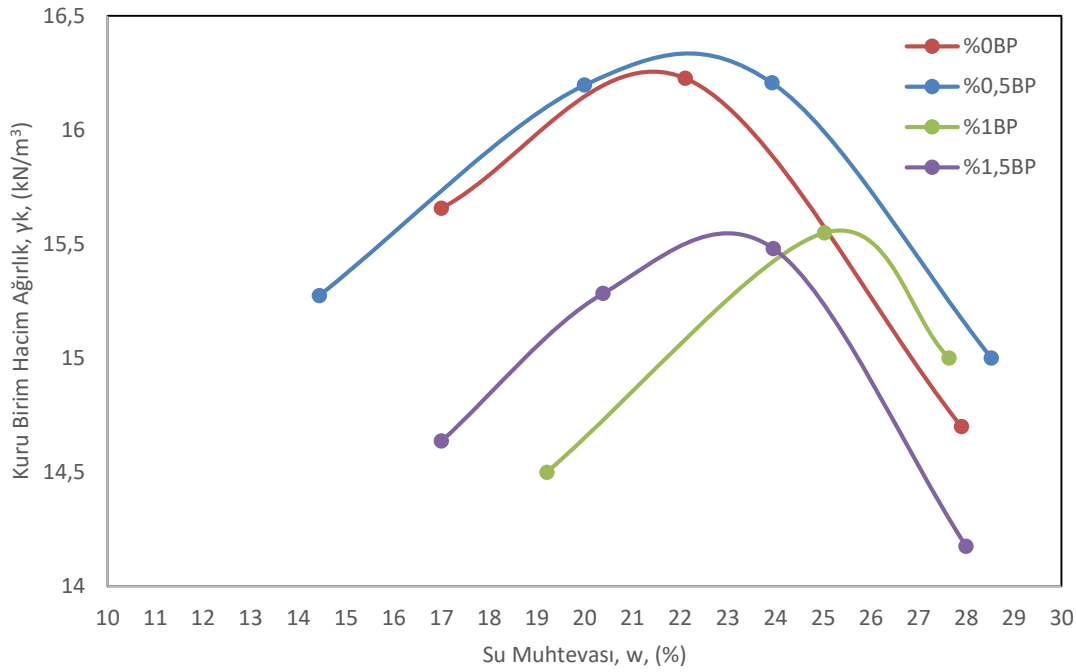
Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

Harvard minyatür kompaksiyon deneyi ile keçi boynuzu gam katkılı killerin ve doğal kilin kompaksiyon parametreleri belirlenmiş ve belirlenen kompaksiyon parametreleri Tablo 5'te gösterilmiş, kompaksiyon eğrileri ise Şekil 20'de verilmiştir. Tablo 5'e göre keçi boynuzu gam oranının artmasıyla, optimum su içeriği (w_{opt}) nispeten artmıştır. Maksimum kuru birim

hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerlerinin ise önemli bir değişim göstermediği söylenebilir. Singh and Das (2020)'de belirtildiği gibi biyopolimer içeriğinde meydana gelen artışla birlikte, kil danelerindeki difüzyon çift tabakanın viskozitesi artarak kil daneleri topak bir yapıya kavuşur. Buna bağlı olarak optimum su içeriği artar (Güven vd 2023).

Tablo 5. Kompaksiyon Parametreleri

Numuneler	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (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



Şekil 20. Kompaksiyon eğrileri

Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında farklı oranlarda keçiyoynuzu gam biyopolimeri (%0,5, %1, %1,5) ve lif (%0,15, %0,30, %0,60) kil bir zemine ilave edilerek katkılı numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 1 gün ve 28 gün kürde bekletilerek serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

1 gün ve 28 gün kürde bekletilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiş ve biyopolimer ve lif yüzdesindeki artışla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür.

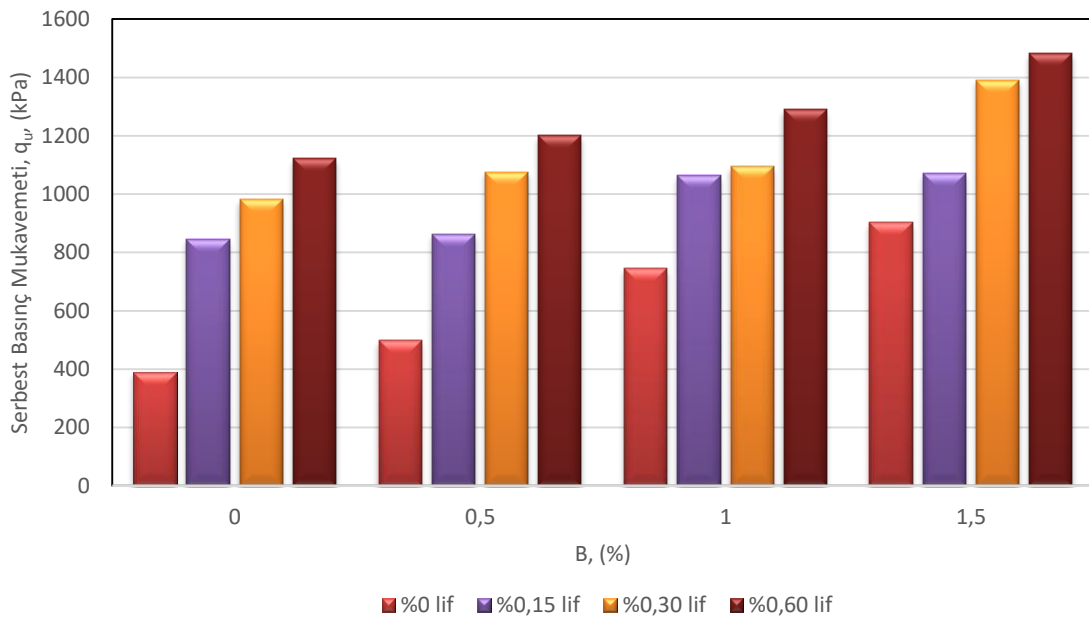
Tablo 6. Serbest Basınç Mukavemetleri (1. gün)

	1. gün kPa	Lif (%)			
		0	0,15	0,3	0,6
B (%)	0	390	846	982	1123
	0,5	498	863	1077	1202
	1	746	1064	1095	1290
	1,5	903	1072	1391	1482

Tablo 7. Serbest Basınç Mukavemetleri (28. gün)

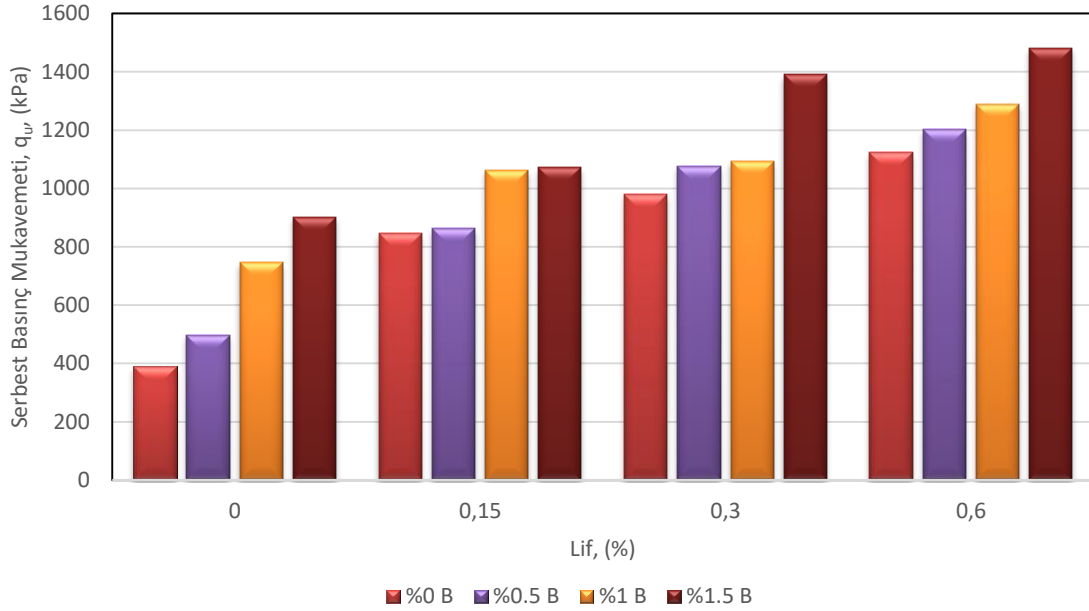
	28. gün kPa	Lif (%)			
		0	0,15	0,3	0,6
B (%)	0	390	2919	3153	3999
	0,5	3190	3440	3513	4092
	1	3580	3908	4180	4292
	1,5	3964	4193	4506	4682

Keçiboynuzu gam oranındaki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Şekil 21’de, lif yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ise Şekil 22’de verilmiştir.

**Şekil 21.** Biyopolimer yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 21’e göre 1 günlük numunelerde biyopolimer oranı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5

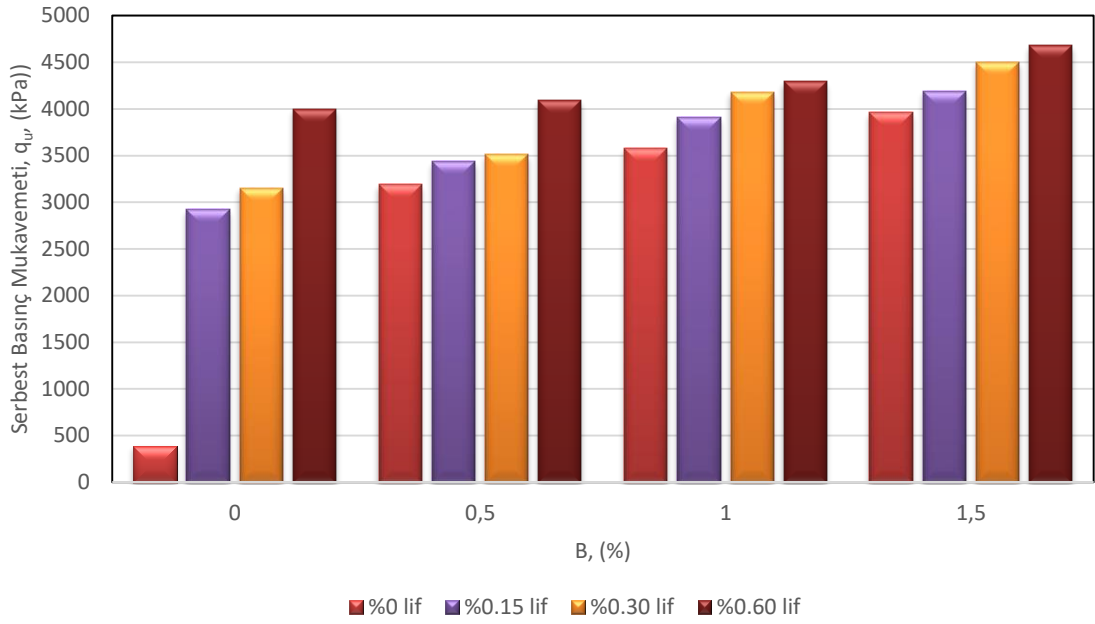
biyopolimer %0,6 lif katkılı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Katkısız kilin serbest basınç mukavemetini, sadece %0,5 biyopolimer katkısı (B0,5-L0) %28, sadece %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %91 ve sadece %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0) %132 oranlarında artırmıştır.



Şekil 22. Lif yüzdesindeki artışla 1 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

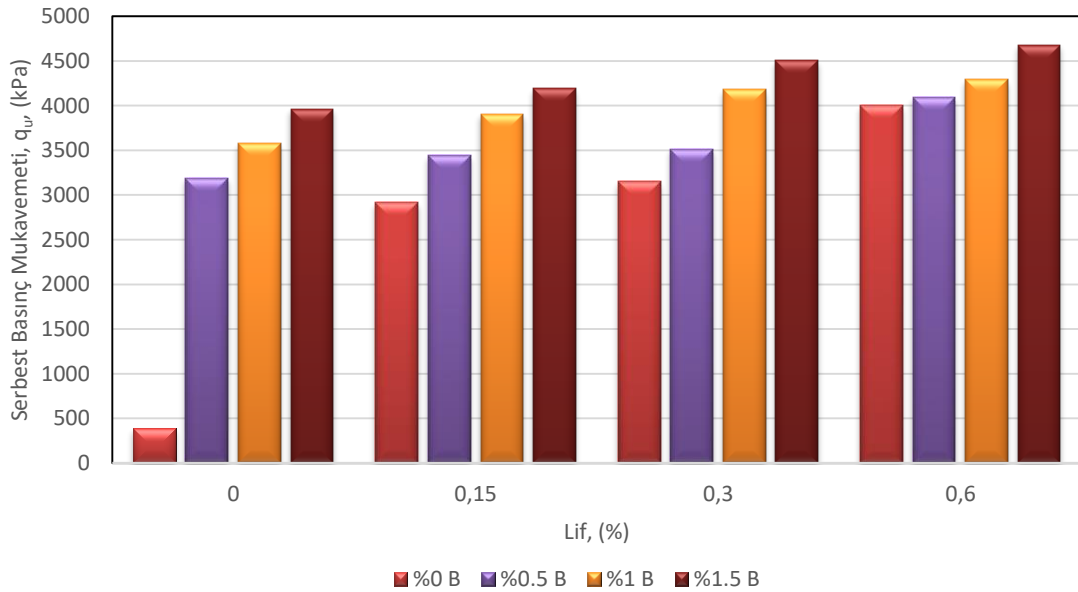
Şekil 22 incelendiğinde 1 günlük numunelerde lif oranı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkılı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0,15) %117, yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0,30) %152, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0,60) %188 oranlarında artırmıştır.

28 gün kürde bekletilen ve üzerinde serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilen numunelerin keçi boynuzu gam oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetlerinin değişimi Şekil 23'te, lif oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetlerinin değişimi ise Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 23. Biyopolimer yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 23'e göre 28 günlük numunelerde biyopolimer oranı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkılı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Katkısız kilin serbest basınç mukavemetini, sadece %0,5 biyopolimer katkısı (B0.5-L0) %718, sadece %1 biyopolimer katkısı (B1-L0) %818, sadece %1,5 biyopolimer katkısı (B1.5-L0) %916 oranlarında artırmıştır.



Şekil 24. Lif yüzdesindeki artışla 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Şekil 24'e göre 28 günlük numunelerde lif oranı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkılı (B1,5-L0,60) numunesinde elde edilmiştir. Doğal kilin serbest basınç mukavemetini, yalnız %0,15 lif katkısı (B0-L0.15) %648, yalnız %0,30 lif katkısı (B0-L0.30) %708, yalnız %0,60 lif katkısı (B0-L0.60) %925 oranlarında artırmıştır.

Serbest basınç mukavemetlerinde doğal kile göre meydana gelen artışlar yüzde olarak Tablo 8' de sunulmuştur. Biyopolimer ile lifin ortak etkisi 1 günlük numuneler için incelendiğinde %1,5 biyopolimer- %0,60 lif içeren (B1,5-L0,60) numunesinin serbest basınç mukavemetinin doğal kilin serbest basınç mukavemetine göre %280 daha fazla olduğu görülmektedir. Yalnız %1,5 biyopolimer katkılı (B1,5-L0) numunesinde serbest basınç mukavemetinin doğal kilden %132, yalnız %0,60 lif katkılı (B0-L0,60) numunesinde ise doğal kilden %188 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. 1 gün kürde bekletilen %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkılı numunenin 1482 kPa olan serbest basınç mukavemetinin, 903 kPa olan sadece biyopolimer ve 1123 kPa olan sadece lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla, %64 ve %32 daha fazla olduğu belirlenmiştir. 28 gün kürde bekletilen numunelerde ise lif ve keçiyoynuzu gam biyopolimerinin ortak etkisi incelendiğinde %1,5 biyopolimer- %0,60 lif içeren (B1,5-L0,60) numunesinin serbest basınç mukavemetinin doğal kilin serbest basınç mukavemeti ile karşılaştırıldığında %1101 daha fazla olduğu bulunmuştur. Sadece %1,5 biyopolimer katkısı (B1,5-L0 numunesi) doğal kilin serbest basınç mukavemetini %916, sadece %0,6 lif katkısı (B0-L0,60 numunesi) %925 oranlarında artırmıştır. 28 gün kürde bekletilen %1,5 biyopolimer %0,6 lif katkılı numunenin 4682 kPa olan serbest basınç mukavemetinin, 3964 kPa olan sadece biyopolimer ve 3999 kPa olan sadece lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla, %18 ve %17 fazla olduğu belirlenmiştir. 28 günlük numunelerde serbest basınç mukavemetinde daha fazla artış olduğu belirlenmiştir (Tablo 8).

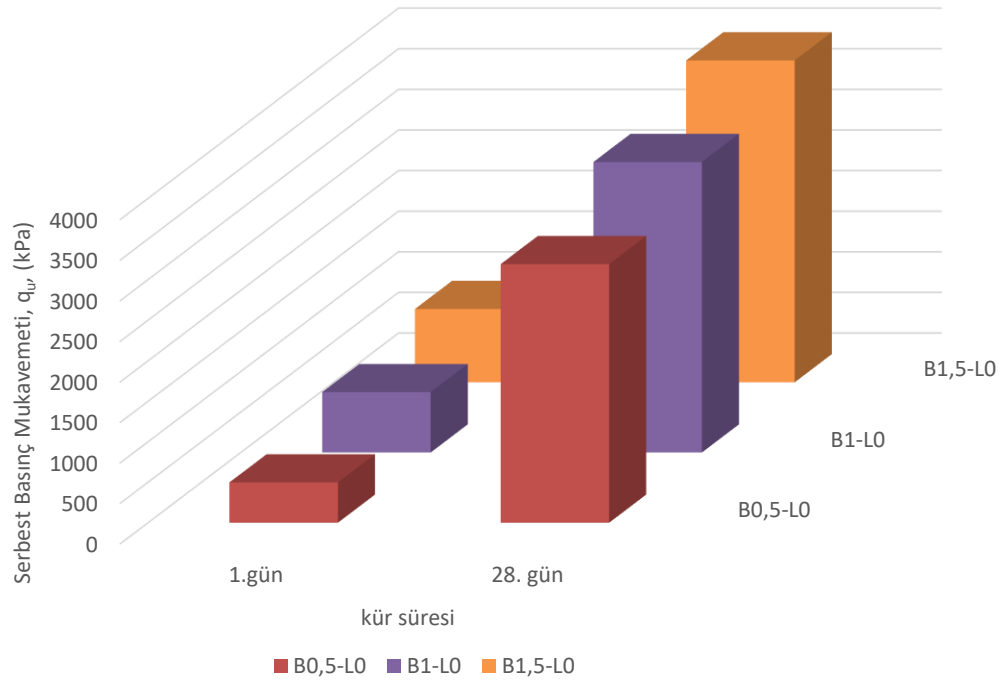
Latifi *et al.* (2016) ve Jang (2020)'de belirtildiği gibi biyopolimerler, zemin ortam içerisinde hidrojeller meydana getirerek, daneler arası boşlukları doldurmakta ve zemin danelerini birbirine bağlamaktadır. Geniş özgül yüzeyleri elektrik yüklü olan biyopolimerler ince daneli zeminlerle etkileşime girebilmekte ve ortaya mukavemeti yüksek zemin-biyopolimer matrisleri çıkmaktadır (Chang *et al.* 2016). Ayeldeen *et al.* (2016), zemin-biyopolimer karışımlarının kayma mukavemetlerinde meydana gelen iyileşmenin, biyopolimerlerin, esterler, aminler veya hidroksiller gibi farklı kimyasal fonksiyonel grupları olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Tüm bu nedenlerin, biyopolimer oranlarında meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetlerinin artmasına sebep olabileceği

düşünülmektedir. İlâveten Ma *et al.* (2018)'de belirtildiği gibi lifin çekme dayanımından dolayı kil daneleri arasındaki bağın güçlenmesi de lif oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetlerinin artmasını desteklemektedir.

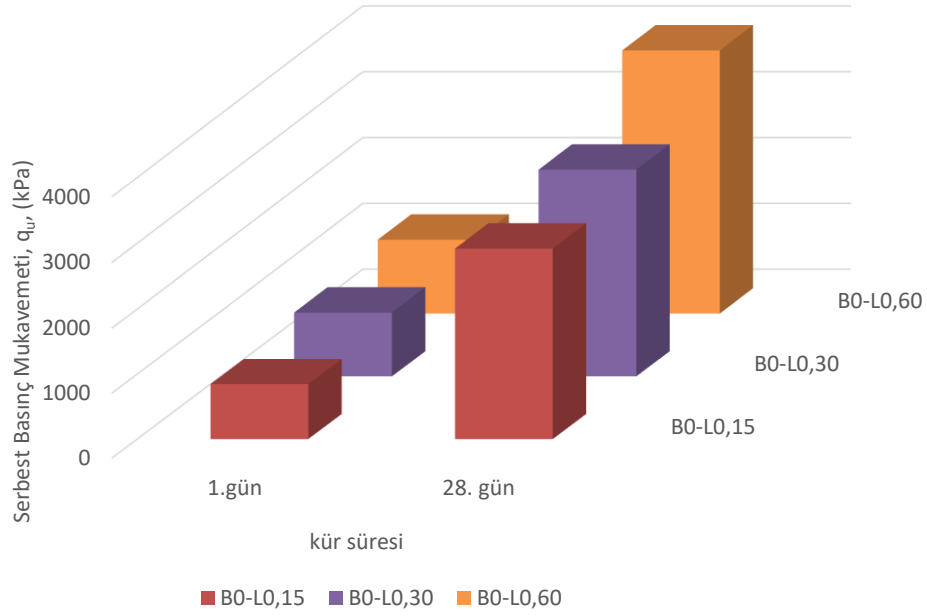
Tablo 8. Serbest Basınç Mukavemetlerinin Artış Yüzdeleri

Numuneler	Kür Süresi (Gün)	
	1 (%)	28 (%)
B0-L0	0	0
B0.5-L0	28	718
B1-L0	91	818
B1.5-L0	132	916
B0-L0.15	117	618
B0-L0.30	152	708
B0-L0. 60	188	925
B0.5-L0.15	121	782
B0.1-L0.15	173	902
B1.5-L0.15	175	975
B0.5-L0.30	176	801
B1-L0.30	181	972
B1.5-L0.30	257	1055
B0.5-L0.60	208	919
B1-L0.60	231	1001
B1.5-L0.60	280	1101

Şekil 25'te kür süresi ve biyopolimer oranındaki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin değişimi görülmektedir. Şekil 25 incelendiğinde yalnız biyopolimer katkısıyla hazırlanan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanımı değerinin %1,5 biyopolimer katkılı (B1,5-L0) numunede 28 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 25'te görüldüğü üzere 28 günlük numunelerde daha yüksek bulunmuştur.



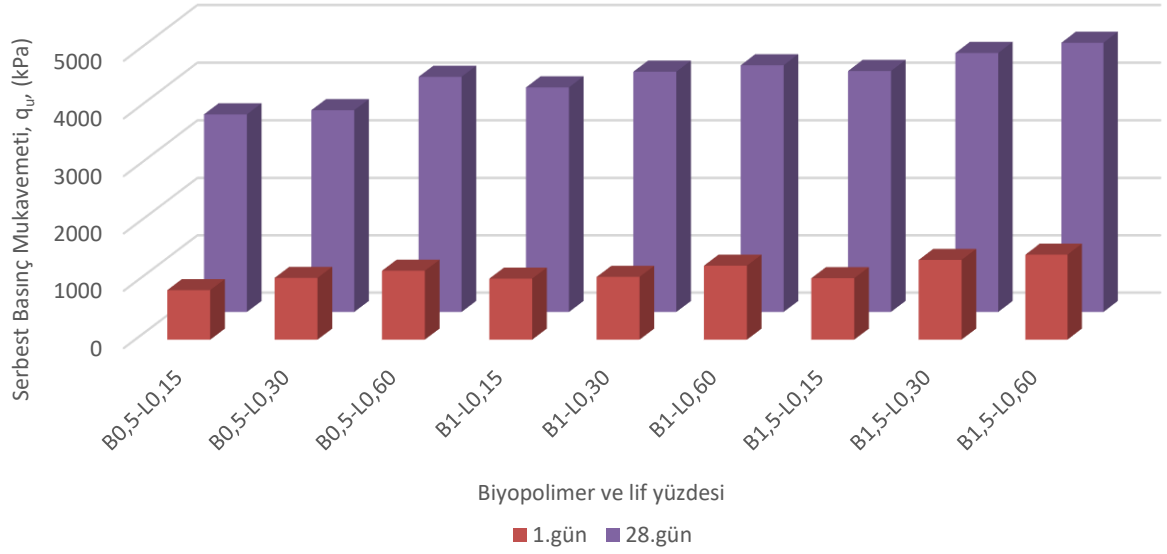
Şekil 25. Farklı kür sürelerinde sadece biyopolimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri



Şekil 26. Farklı kür sürelerinde sadece lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Şekil 26’da kür süresi ve lif oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetlerinin değişimi görülmektedir. Şekil 26 incelendiğinde yalnız lif katkısıyla hazırlanan numunelerde en yüksek serbest basınç dayanım değerinin %0,60 lif katkılı (B0-L0,60) numunesinde 28 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 26’da görüldüğü üzere 28 günlük numunelerde daha yüksek bulunmuştur.

Şekil 27’de ise farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 27 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 28 gün 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 27’de görüldüğü üzere 28 günlük numunelerde daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 27. Farklı kür sürelerinde biyopolimer ve lif katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Benzer şekilde Chen *et al.* (2022) çalışmalarında biyopolimerin kürleme yoluyla daha güçlü bağ oluşturduğunu ve bunun zemin mukavemetinin iyileştirilmesi üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu, liflerin ise zemin kırılma eğilimini azaltabileceğini ve sünekliği artırabileceğini ortaya koymuşlardır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada keçiboynuzu gam ve lif ile yüksek plastisiteli bir kil stabilize edilmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli kil bir zemine 5 mm uzunluğunda farklı yüzdelerde lif (%0,15, %0,30 ve %0,60) ve farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam (%0,5, %1 ve 1, 5) ilave edilerek katkılı kil numuneler elde edilmiştir. Elde edilen lif ve keçiboynuzu gam katkılı kil numuneler üzerinde kıvam limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler 1-28 gün küre tabi tutulmuş ve kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, doğal kile ait deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve aşağıda sıralanmıştır.

- Doğal kilin serbest basınç mukavemetine lif ve biyopolimer katkısının olumlu yönde etki yaptığı görülmüştür. Lif ve keçiboynuzu gam yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri artmıştır.
- Keçiboynuzu gam ve lif katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin aynı koşullardaki doğal kilin, farklı yüzdelerde keçiboynuzu gam katkılı kil numunelerin ve farklı yüzdelerde lif katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Her bir katkı oranı için kür süreleri karşılaştırıldığında, kür süresi arttıkça numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri artmıştır.
- En yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerinin %1,5 keçiboynuzu gam, %0,60 lif katkılı numunelerde (B1,5-L0,60) elde edildiği görülmüştür. 1 ve 28 gün küre tabi tutulan B1,5-L0,60 numunesinde serbest basınç mukavemeti değerleri sırasıyla, 1482 kPa ve 4682 kPa olarak belirlenmiştir.
- Keçiboynuzu gam oranındaki artışla, likit limitlerde genellikle artış meydana geldiği görülmüştür. Keçiboynuzu gam katkılı numuneler non-plastik özellik göstermiş olup plastik limit deneyleri gerçekleştirilememiştir.
- Lif oranındaki artışla katkısız ve keçiboynuzu gam katkılı kil numunelerin likit limitleri incelendiğinde, lif oranındaki artışla, likit limitlerde belirgin bir değişim meydana gelmediği söylenebilir. Yüksek plastisiteli kil (CH) olan doğal kilin, lif katkısıyla yine CH olduğu, zemin sınıfında bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

Deney sonuçları, keçiboynuzu gam biyopolimeri ile lifin (polyester iplik) bir arada kullanılması ile kil zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirildiğini göstermektedir. Zemin

iyileştirmesinde kullanılan geleneksel malzemelerin karbon salınımına neden olduğu bilinmekte olup zemin iyileştirmesinde çevre dostu malzemeler olan biyopolimerlerin etkin olarak kullanımının bu açıdan da faydalı olacağı düşünülmektedir. İleride yapılacak olan çalışmalarda, biyopolimer ve lif katkılı killerin mekanizmasının tam olarak anlaşılabilmesi için farklı mikro analizler yapılması ve oturma-şişme davranışlarının araştırılması önerilmektedir.



KAYNAKÇA

- Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş., Işık, F., Arasan, S., 2015. Kil Zeminlerin iyileştirilmesinde atık doğal liflerin kullanılabilirliği. 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Akyıldız, M.H., 2019. Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar. Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, 147-163.
- Alavijeh, B. E., Zare, B., Mokhtari, M., 2021. Investigation of the effect of polypropylene fibers on compression strength and tensile strength of organic soil stabilized with lime and xanthan gum biopolymer. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53 (5), 1853-1870.
- Altun, S., 2010. Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri, İMO İzmir Şubesi.
- Ayan, E., 2009. Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayeldeen, M. K., Negm, A. M., El Sawwaf, M. A., 2016. Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 371.
- Ayeldeen, M. and Kitazume, M., 2017. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement stabilized soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 45, 592-602.
- Ayhan, A., 2011. Biyopolimer Katkıları ile Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Y.Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Bagherinia, M., 2019. Derin Karıştırma Yöntemi ile Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Biyopolimer ve Bazik Kimyasallar Kullanılarak İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Barani, O.R. and Barfar, P., 2021. Effect of xanthan gum biopolymer on fracture properties of clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (1).
- 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.
- Cabalar, A.F., Awraheem, M.H., Khalaf, M.M., 2018. Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (8).
- 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.
- Chang, I., Cho, G-C., 2014. Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil. *Geomechanics and Engineering*, 7 (6), 633-647.
- Chang, I., Cho, G-C., 2019. Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: From sand to clay. *Acta Geotechnica*, 14 (2), 361 – 375.
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., Cho, G. C., 2015. Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74, 65-72.

- 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 (4), 787.
- Chen, M., Shen, S. L., Arulrajah, A., Wu, H. N., Hou, D. W., Xu, Y. S., 2015. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 43 (6), 515-523.
- 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.
- Costa, S., Xue, J., Kim, S., Xie, Y., 2017. Controlling desiccation cracks in clay with fibre and enzyme. 2nd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, UK.
- Çalık Y., 2017. Ayrık Sentetik Liflerle Rastgele Donatılandırılmış İnce Daneli Zeminlerde Donatı Uzunluğunun Donma-Çözünme Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Çankaya, N., Sökmen, Ö., 2017. Biyopolimerler ve montmorillonit kil nanokompozitleri. *Politeknik Dergisi*, 20 (3), 663-673.
- Demiröz, A., 1992. Zemin İyileştirme Metotları. Y.Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Demiröz, A. ve Karaduman M., 2009. Zemin iyileştirme metotları. *Selçuk Teknik Dergisi*, 8 (3).
- 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.
- Ekinci, A. ve Selçukhan, O., 2021. Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 481-496.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741 s, Ankara.
- Eser, N., 2010. Bazı Haloysit-Polimer Nanokompozitlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Y.Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Estabragh, A.R., Bordbar, A.T., Javadi, A.A., 2013. A study on the mechanical behavior of a fiber-clay composite with natural fiber. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 501-510.
- 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), 948-957.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.
- Jang, J., 2020. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID: 1465709, 1-17.
- 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. and 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.

- Kurt Albayrak, Z.N. and Altun B., 2021. Strength properties of biopolymer treated clay/marble powder mixtures. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 12 (4), 131–137.
- 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.
- Ma, Q., Yang, Y., Xiao, H., Xing, W., 2018. Studying shear performance of flax fiber-reinforced clay by triaxial test. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1290572.
- Mahdad, M., 2014. Polipropilen Liflerle Rastgele Donatılanmış Kum Zeminlerinin Taşıma Gücünün Araştırılması. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Majedi, P., Kurt Albayrak, Z.N., Akbulut, S., 2013. Lateks katkılı su sevmez (hidrofob) kilin bazı geoteknik özelliklerinin incelenmesi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Malayoğlu, U. ve Akar, A., 1995. Killerin sınıflandırılmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi. 1. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Ok, B. ve Bağrıaçık, B., 2022. Guar gum ile iyileştirilen kil zeminlerin donma-çözülme etkisinde mukavemet ve şişme basınçlarının araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37 (3), 589.
- Özaydın, K., 2012. Zeminlerin iyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul.
- Özaydın, K., 2005. *Zemin Mekaniği*. Birsan Yayınevi, 261 s, İstanbul.
- Özdemir, B., 2019. Doğal /sentetik lif ve uçucu kül katkılı killerin bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özdemir, B. and Kurt Albayrak, Z.N., 2022. Strength and freeze-thawing properties of wheat-straw-added clay. *Acta Geotechnica Slovenica*, 19 (1), 56-62.
- Puppala, A. J. and Musenda, J., 2020. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change in expansive soils. *Transportation Research Record*, 1736, 134-140.
- Saçak, M., 2012. *Polimer Teknolojisi*. Gazi Kitabevi, 461 s. Ankara.
- Singh, S. P. and Das, R., 2020. Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*, 15 (2), 107-122.
- Şener, Ö. ve Hakküder Taze, B., 2022. Fonksiyonel bir gıda bileşeni olarak keçiyoynuzu: özellikleri ve gıda uygulamaları. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*.
- Uzuner, B. A., 2006. *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi, 305 s, Trabzon.
- Ünlü, C. H., 2009. Mısır Koçanı Ksılanından Mikro/Nanokompozit Eldesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yazıcı, M. F. and Keskin, S. N., 2021. A Review on Soil Reinforcement Technology by Using Natural and Synthetic Fibers. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 14 (2), 631-663.
- Yetiz, F., 2018. Akçakale- Ceylanpınar Karayolunda Zemin Dolgu ve Geofoam Dolgu Alternatifleri Arasındaki Stabilitate Analizi ve Maliyet Karşılaştırması. Y.Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- 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:	Büşra GÜVEN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim 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.	