

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOPOLİMER İLE ETKİLEŞTİRİLMİŞ KİL/KİREÇ
KARIŞIMLARININ BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Dilber TEBER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

ERZİNCAN
2024

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ danışmanlığında, Dilber TEBER tarafından hazırlanan bu çalışma 12/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Semet ÇELİK İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İstemihan COŞĞUN İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Biyopolimer ile Etkileştirilmiş Kıl/Kireç Karışımlarının Bazı Geoteknik zelliklerinin Araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezimi tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 12/09/2024

(İmza)

Dilber TEBER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BIYOPOLİMER İLE ETKİLEŞTİRİLMİŞ KİL/KİREÇ KARIŞIMLARININ BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Dilber TEBER

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ

Bu tez kapsamında yüksek plastisiteye sahip bir kil zeminin iyileştirilmesi ve iyileştirilen zeminin donma çözülme davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Kil zeminin iyileştirilmesinde, doğal bir polimer türü olan sodyum aljinat biyopolimeri ve kireç kullanılmıştır. Kireç ve sodyum aljinat kil zemine hem ayrı hem de birlikte eklenerek bu katkıların sinerjik etkileri incelenmiştir. Kireç oranı olarak %0, %2, %4 ve %6 ve biyopolimer oranı olarak ise %0, %0,5, %1 ve %1,5 kullanılarak iyileştirilen numuneler 7 ve 28 günlük kür süresince bekletilmiştir. Kür süreci sonunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimlerine bırakılan numunelerde aynı oranlarda hazırlanmış ve 28 günlük kürde bekletildikten sonra 5 ve 10 donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda sadece kireç veya sadece biyopolimer ilave edilmesinin, yüksek plastisiteli kil zeminin dayanım özelliklerini artırdığı belirlenmiştir. Kil ve biyopolimerin birlikte uygulandığı zemin numunelerinde ise dayanımın daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüş ve en yüksek mukavemet sonuçları %6 kireç ve %1 sodyum aljinat uygulanan numunelerden elde edilmiştir. Donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerde de benzer şekilde katkıların birlikte kullanılması ile donma-çözülme çevrimlerinde mukavemet üzerindeki olumsuz etkinin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, sodyum aljinat biyopolimeri, hem kireçle yapılan iyileştirmede hem de donma çözülme çevrimlerinde dayanım üzerinde olumlu etkiler meydana getirebilmiştir.

2024, 40 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyopolimer, Kireç, Serbest Basınç Mukavemeti, Sodyum Aljinat

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF SOME GEOTECHNICAL PROPERTIES OF CLAY/LIME MIXTURES MODIFIED WITH A BIOPOLYMER

Dilber TEBER

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist Prof. Dr. Harun AKOĞUZ

This thesis aims to improve clay soil with high plasticity and to investigate the freeze-thaw behavior of the improved soil. A natural polymer type known as sodium alginate biopolymer and lime were applied to improve the clay soil. The synergistic effects of these additives were investigated by adding lime and sodium alginate to the clay soil separately and together. The samples were enhanced by using 0%, 2%, 4%, and 6% as lime ratios, and 0%, 0.5%, 1%, and 1.5% as biopolymer ratios were kept for 7 and 28 days of curing. At the end of the curing process, the unconfined compressive strengths of the samples were determined. The samples subjected to freeze-thaw cycles were prepared at the same ratios and were kept for 28 days of curing and then subjected to 5 and 10 freeze-thaw cycles. As a result of the experiments, it was determined that adding only lime or only sodium alginate increased the strength properties of the high plasticity clay soil. In soil samples where clay and biopolymer were applied together, it was observed that the strength had higher values and the highest strength results were obtained from samples applied with 6% lime and 1% sodium alginate. Similarly, in samples exposed to freeze-thaw cycles, it was observed that the negative effect on the strength in freeze-thaw cycles was reduced by using the additives together. As a result, sodium alginate biopolymer was able to create a positive impact on the strength both in the improvement made with lime and in freeze-thaw cycles.

2024, 40 Pages

Keywords: Biopolymer, Lime, Sodium Alginate, Unconfined Compressive Strength

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda bilgi ve birikimini her koşulda benimle paylaşan, eksiklerimi fark etmemi sağlayan ve onları düzeltmem de sabırla yanımda olup destekleyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ'a ve desteklerinden dolayı sayın Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK ve Ahmet NALDAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca beni destekleyen sevgili aileme, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan Tuba TEBER ve Kübra ZENGİN'e ve farklı bir memlekette olduğumu hissettirmeyen Özgül ailesine şükranlarımı sunarım.

Dilber TEBER

Eylül, 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi	3
2.2. Zeminlerin İyileştirilmesinde Çevresel Faktörlerin Etkisi	3
2.3. Kil	4
2.4. Kireç	6
2.5. Polimerler	7
2.6. Kireç ve Biyopolimer Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Kil Zemin	15
3.2. Kireç	15
3.3. Biyopolimer.....	16
3.4. Numunelerin Hazırlanması.....	17
3.4.1. Katkısız numunelerin Hazırlanması.....	18
3.4.2. Kireç Katkılı Numunelerin Hazırlanması	18
3.4.3. Sodyum Aljinat Katkılı Numunelerin Hazırlanması	19
3.4.4. Kireç ve Sodyum Alinat Katkılı Numunelerin Hazırlanması	19
3.5. Kompaksiyon Deneyi	20
3.6. Donma-Çözülme Deneyi	20
3.7. Serbest Basınç Deneyi.....	21
3.8. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi	22
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	23
4.1. Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	23
4.2. Donma-Çözülme Deney Sonuçları.....	32
4.3. XRD Analiz Sonuçları.....	35

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	38



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tetrahedron strüktür	5
Şekil 2.2. Oktahedron strüktür	5
Şekil 2.3. Aljinatın yapısı	8
Şekil 3.1. (a) Araziden alınan kil zemin, (b) öğütme ve elek analizi sonrası elde edilen kil zemin	15
Şekil 3.2. Kireç	16
Şekil 3.3. Sodyum aljinat	17
Şekil 3.4. (a) Karışımların zemine uygulanması, (b) uygulamada kullanılan malzemeler.	19
Şekil 3.5. Proktor Aleti	20
Şekil 3.6. (a) 7 ve 28 gün bekletilen iyileştirilen zemin örnekleri, (b) donma-çözülme deneyi için hazırlanan zemin örnekleri.	21
Şekil 3.7. Serbest basınç deney düzeneği	21
Şekil 3.8. XRD analiz cihazı	22
Şekil 4.1. Kil-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları	23
Şekil 4.2. Kil-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları	24
Şekil 4.3. Kil-kireç numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları.(a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları	25
Şekil 4.4. Kil-kireç numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları	26
Şekil 4.5. Kil- %2 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları	27
Şekil 4.6. Kil- %2 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları	28
Şekil 4.7. Kil- %4 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları	29

Şekil 4.8. Kil- %4 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları	30
Şekil 4.9. Kil- %6 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları	30
Şekil 4.10. Kil- %6 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları	31
Şekil 4.11. İyileştirilen kil zeminlerin 28 günlük, 5 ve 10 çevrim donma çözülme döngüleri sonrasında elde edilen mukavemet sonuçları. (a) doğal kil-kireç ile hazırlanmış numuneler, (b) doğal kil-biyopolimer ile hazırlanmış numuneler, (c) doğal kil-kireç-biyopolimer ile hazırlanmış numuneler.	34
Şekil 4.12. XRD analiz sonuçları.....	36

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan kireç katkısının özellikleri	16
Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan sodyum aljinat katkısının özellikleri.....	17
Tablo 3.3. Kıl zeminin iyileştirilmesinde ağırlıkça kıl zemin, kireç ve sodyum aljinat oranları	18



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

<i>mm</i>	milimetre
<i>w</i>	Su muhtevası
°C	Santigrat
%	Yüzde

Kısaltmalar

kPa	Kilopaskal
XRD	X ışını kırınım yöntemi
X-Ray	X ışını

1.GİRİŞ

Kil zeminler geoteknik mühendisliğinde pek çok alanda kullanılmaktadır. Kil zeminlerden, özellikle toprak dolgu barajlarda geçirimsizliği sağlayıcı kil çekirdek olarak, katı atık depolama alanlarında ise sızdırmazlığı sağlayıcı eleman olarak faydalanılmaktadır (Gencer 2018). Kil zeminlerin iyileştirilmesinde uzun yıllardır Portland çimentosu ve kireç başarıyla kullanılmaktadır (Prusinski ve Bhattacharja, 1999). Ancak, Portland çimentosu kullanımının bazı dezavantajlarının olduğu bilinmektedir. Portland çimentosunun artan kullanımı karbondioksit (CO_2) salınımına ve bu durumda küresel ısınmaya sebep olabilmektedir (Pavithra vd. 2016). Zeminlerin mukavemet özellikleri mühendislik yapılarının ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde kireç kullanımı ile iyileştirilebildiğinden çok sayıda bilim adamı kireçle iyileştirilmiş zeminlerin mekanik özellikleri üzerine araştırmalar yapmışlardır (Jiang vd. 2022). İnşaat mühendisliğinin pek çok uygulamasında kendine yer bulan kirecin yapısı kalker (CaCO_3) ve dolomitten ($\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$) meydana gelir. Kireç su ile birleştiğinde önce plastik özellik gösterir ve ardından sertleşerek anorganik bir malzeme meydana getirir (Geçkil 2019). Kil, silt gibi zeminlere kireç eklenerek zeminin plastisitesi düşürülebilmektedir.

Zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi belirli parametrelere bağlıdır. Bunlar kullanılan kirecin özellikleri, uygulanan zeminin cinsi, zemine katılan kireç yüzdesi, kireç zemin karışımının kür süresi ve kür koşulları olarak sıralanabilir (Geçkil 2019). Kil zeminlerin iyileştirilmesinde, sıklıkla kullanılan kireç ile birlikte doğal veya çevreci polimerlerin kullanımının, zeminin dayanımına ve diğer mühendislik özelliklerine olumlu katkısının olabileceğini gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda araştırmacılar son yıllarda özellikle bu yapı malzemelerinin zemin iyileştirmedeki avantajları üzerine çalışmalar yapmaktadırlar.

Yapılan bu çalışmanın amacı, literatürde kil zeminlerin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan kireç ile birlikte sodyum aljinat biyopolimerinin yüksek plastisiteli kil zeminin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla iyileştirilen ve iyileştirilmeyen kil zeminlerin mukavemet özellikleri serbest basınç deneyleri ile

araştırılmış ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla da donma çözölme çevrimleri uygulanmıştır.

Bu alışma için deneyler Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kil zemin bölgeden getirildikten sonra etüvde 24 saat bekletilip öğütölmüştür. Ardından öğütölmüş kil zemin elekten geçirilerek deneyler için hazır hale getirilmiştir. Kil zeminin iyileştirilmesinde kireç oranı olarak %0, %2, %4 ve %6, biyopolimer oranı olarak ise %0, %0,5, %1 ve %1,5 kullanılmıştır. Kil, kil-kireç, kil-biyopolimer ve kil-kireç-biyopolimer olmak üzere her bir karışım oranı için numuneler hazırlanılmış ve bu numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri ile 5 ve 10 çevrim donma-özölmelerin serbest basınç değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulguların, zeminlerin iyileştirilmesinde evre dostu biyopolimerlerin kullanımına dair mühendislik uygulamalarına katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi

Kötü zemin kavramı mühendislerin yapıyı yaparken karşılaşmak istemediği, hemen biçimi bozulabilen, mukavemeti düşük, yıllar içerisinde dayanıklılığını kaybeden, afetler karşısında ayakta duramayan zeminler olarak ifade edilebilir (Şengöz 2021). Bu özelliklere sahip zeminlerin, yapıların inşası öncesinde iyileştirilmesi yapı güvenliği için ciddi önem arz edebilmektedir.

Kil zeminlerin iyileştirilmesinde, genellikle taşıma gücünün artırılması veya konsolidasyon oturmalarını azaltma yoluna gidilmektedir. Kil zeminlerin iyileştirmesinde kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi özetlenebilir (Öztoprak 2016):

- Yerdeğiştirme
- Önyükleme
- Kum dren
- Plastik dren
- Vakum konsolidasyonu
- Ozmotik basınç
- Elektro ozmoz
- Kireç kazıkları
- Zemin kolonları
- Isıl ve elektro-kimyasal işlemler

Bunlara ek olarak çalışmamızda kullandığımız biyopolimer katkılı kil zemin iyileştirme yöntemi de bulunmaktadır.

2.2. Zeminlerin İyileştirilmesinde Çevresel Faktörlerin Etkisi

Zeminlerin iyileştirilmesinde araştırmacılar donma-çözülme gibi çevresel faktörlerin iyileştirmeye etkisi üzerine oldukça fazla çalışma yapmışlardır. Donma-çözülme döngülerinin zeminlerin özellikle mukavemetinde etkili bir parametre olabileceğini belirtmişlerdir. Örneğin Keskin vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada kil zemini 1 ve 2

çevrim donma çözölmeye maruz bırakmış ve deney sonuçlarında serbest basınç mukavemetinin azaldığını ifade etmişlerdir. Donma çözölmenin zeminlerin mukavemeti üzerinde etkili olduğu yapılan bu çalışmadan anlaşılmaktadır.

2.3. Kil

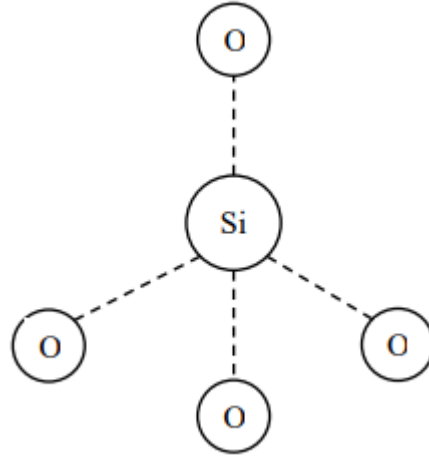
Kil mineralleri doğada farklı şekillerde bulunabilirler;

- a) Kaolinit grubu kil mineralleri; Kaolinit, dikit, nakrit, anaksit, halloysit, endelit'tir.
- b) Simektit grubu kil mineralleri; Montmorillonit, nontronit, saponit, beidellit, hektorit'tir.
- c) İllit grubu veya mika grubu kil mineralleri; İllit, muskovit, biyotit, flogopit' tir.
- d) Klorit grubu kil mineralleri; Poligorskit (atapuljit), sepiyolit, allofan' dır.
- e) Talk; su içeren magnezyum silikat' tir.

Killer su ile temas ettiklerinde yumuşar ve parçalanmadan şekil değıştirebilirler bu da killerin plastik bir özellik kazandığını gösterir (Dalgıç ve Kavak 2004).

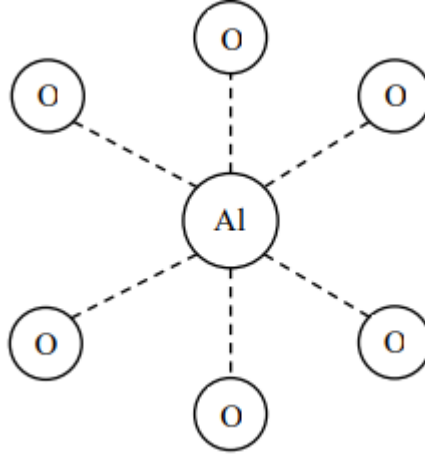
Killerin kimyasal ve mineralojik yapısını bilmeden zemini etkileyen fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamak zorlaşır. Kilin iki yapı türü vardır bunlar tetrahedron ve oktahedrondur. Bunlar kilin en temelini oluşturan silisyum ve alüminyum kristallerinin iki yapı tipidir.

Şekil 2.1’de tetrahedron yapı tipi görülmektedir.



Şekil 2.1. Tetrahedron strüktür (Kızılcelik 2010)

Şekil 2.2’de ise oktahedron yapı tipi görülmektedir.



Şekil 2.2. Oktahedron strüktür(Kızılcelik 2010)

Kil mineralleri, tetrahedron ve oktahedron tabakalarında ortak bulunan oksijen iyonunun bağlanması ile meydana gelir. Bu bağlanma ile oluşan tabakalaşma düzenli tekrarlanma ile iki ve üç tabakalı kil minerallerini oluşturur (Kızılcelik 2010).

Killerin plastisite, kohezyon, renk ve rötire gibi özellikleri vardır. Kil zeminlerde plastisite zeminin yapısını ve gerilme şekil değiştirme gibi davranışlarını etkileyebilir. Bu yüzden plastisitenin doğru tanımlanması önemlidir. Plastisite belirlenirken de kıvam limitleri deneyleri kullanılır (Uzman vd. 2003).

Kohezyon ise zeminlerdeki ortalama dik kuvvetlerin sıfır olduğu durumdaki kayma direnci olarak sđylenabilir. Kil zeminlerde kohezyon değeri oldukça yüksek olmasına rağmen kum ve çakıl gibi zeminlerde değeri k olduğu için genellikle ihmal edilmektedir (Güven 2007).

Saf killer beyaz renge sahip olurken içerisindeki farklı mineraller ile sarı, yeşil, gri gibi farklı renklerde de olabilmektedir.

2.4. Kireç

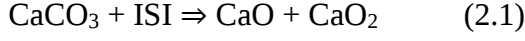
Afrika ve Amerika'nın bazı bđlgelerinde sđnm kireç bilhassa yüksek kil ihtiva eden zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Kirecin ana faydası, killi zeminlerin plastik limitini arttırdığından, zeminleri daha kuru bir duruma getirerek daha iyi ufalanmasını ve stabilize edici malzemenin daha st düzey olarak karışmasını sağlamaktadır. Ayrıca inşaat alanlarında kullanılan makinaların çalışması esnasında gezinmesini kolaylaştırdığından, kireci bu tip işlerde geçici iyileştirme için uygun bir malzeme haline getirmektedir. En iyi sonuçların elde edildiği miktar yüzde 4 ile 6 arasındadır (Bıakcı 2022).

Kireç Romalılar zamanından itibaren yol yapımı ve su içi inşaatlarda kullanılan en eski stabilizasyon malzemelerinden biridir. Kireç taşı özel fırınlarda 850 ila 14500  C sıcaklıklarda pişirilerek adına kalsinasyon denilen ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) reaksiyon gerçekleşir ve bunun sonucunda kireç meydana gelir. Reaksiyon sonucu açığa çıkan CaO su ile tekrar reaksiyona girerek ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Isı}$) ısı açığa çıkarıp sđndrlmř kalker kirecini Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit) oluşturur (Ghabae 2015).

Kireç, kalkerin ışıl işlemler sonucu parçalanması ile meydana gelen bir malzemedir. Kirecin yapısında kalsiyum karbonat (CaCO_3) veya magnezyum karbonat (MgCO_3) vardır. Kireçtaşının birçok çeşidi bulunur. Bunlar řu farklılıklarına göre gruplandırılır;

- orijin,
- jeolojik formasyon,
- mineralojik yapı,
- kristal yapısı,

- kimyasal bileşim,
- renk ve sertlik (Kızılcelik 2010).



Burada oluşan reaksiyon sonucunda sönmemiş kireç (CaO) meydana gelir. Sönmemiş kireç su ile reaksiyona girerek snmüş kireci meydana getirir. Yaygın kullanım açısından snmüş kireç daha fazla kullanılır (Kızılcelik 2010).



Kireç taşı büyük bir oranda inşaat ve yapı sektöründe agrega veya dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Beton ve inşaat harcında ise daha ince daneli kireçtaşı kumları (75 mikron -5mm) kullanılabilir. İnşaat ve yapı sektöründe kullanılacak olan bu kireç taşı temiz, kuru, kübik formda, yüksek aşınma potansiyeline ve sertliğe sahip olmalıdır (Kızılcelik 2010).

2.5. Polimerler

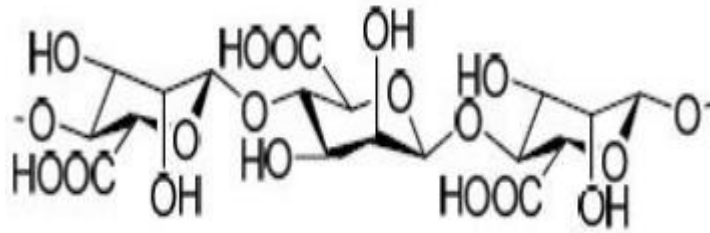
Polimer birden fazla bileşiğin kimyasal bağlarla bağlanması sonucu meydana gelen atom gruplarıdır. Polimeri diğerlerinden ayıran özelliği bileşiklerinin yüksek ağırlıklı olmasıdır. Normal yaşantıda polimer daha çok plastik, lif ya da kauçuk şeklinde kullanılır. Bu ürünlerde kullanımının yanında boya, yer kaplama gibi ürünlerde de polimer mevcuttur (Saçak 1998).

Polimerler birçok özelliğe göre sınıflandırılırlar. Polimer eşitleri genellikle üç gruba ayrılırlar ve bunlar termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir (Kılınç vd. 2023).

Kil/polimer nanokompozitlerinin potansiyel kullanım alanları şunlardır (İşçi 2015);

- a) İnşaat sektöründe (mekanik ve termal dayanım nedeniyle; panellerde, dış cephede, borularda)
- b) Otomobil endüstrisinde
- c) Elektrik ve elektronik

Doğal polimerler bitkisel ve hayvansal kökenlidir. Bitkisel kökenlilere örnek keçiyoynuzu gamı, guar gum, aloe vera jeli ve pektin verilebilir. Hayvansal kökenlilere ise kitin, aljinat, xanthum gum ve karagenanlar verilebilir. Aljinat ise (aljinik asid) kahverengi deniz yosunu ve deniz alglerinde bulunan anyonik bir polisakkarittir (Vishakha vd. 2012). Aljinatein yapısı Şekil 2.3'te sunulmuştur.



Şekil 2.3. Aljinatın yapısı (Vishakha vd. 2012)

2.6. Kireç ve Biyopolimer Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Kireç ve/veya biyopolimer kullanılarak kil zeminlerin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar özetle aşağıdaki gibidir:

Bıçakçı (2022) yaptığı çalışmada orta plastisiteli killerde oluşabilecek sorunları kireç katkısı ile çözümlemeyi hedeflemiştir. Kil zemin üzerinde tane yoğunluğu, tane çapı dağılımı, likit limit, plastik limit, standart kompaksiyon deneyi, maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, zemin sınıflaması, tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Etüvde 150 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra 4,75 mm elekten elediği kil zeminleri numune oluşturmak için hazır hale getirmiştir. Kilin likit limit deneyini Casagrande yöntemi ile plastik limit deneyini ise el ayası ile yuvarlayıp 3mm silindirik şekil vererek bulmuştur. Kil zemine kütlece %3, %6, %9 ve %12 oranlarında kireç ilave etmiş ve numuneleri 7, 14, 28 ve 90 gün kür süresince bekletmiştir. Yaptığı deneyler sonucunda tek eksenli basınç dayanımının hazırlamış olduğu tüm numunelerde arttığını belirtmiştir. En iyi sonuçlar ise 90 günlük kürde %9 kireç karışımında olduğunu ifade etmiştir. Deneyde ayrıca kür süresinin artması ile zemin iyileştirmede daha iyi sonuçlar alınacağını belirtmiştir.

Keskin vd. (2017) alışmalarında hem katkısız hem de katkı malzemeleri ile kil zeminlerin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Donma-özölme maruz bıraktıkları zeminler ile maruz bırakmadıkları zeminlerin serbest basınç mukavemetlerini karşılaştırmışlardır. Deneylerde kullandıkları kil zemin için elek analizi, hidrometre, kıyım limitleri, piknometre, kompaksiyon ve serbest şişme deneyleri yapmışlardır. Kil sınıfını belirledikleri deneyler sonucunda kullandıkları kilin CH sınıfı bir kil olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak üç farklı malzeme kullanmışlardır. Bunlar mermer tozu, pomza tozu ve kireç tozudur. Kullandıkları katkı maddelerinin oranlarını %5 ve %10 olarak belirtmişlerdir. Donma-özölme çevrimleri için ise 48 saat, 1 hafta ve 1 ay sonra 1 donma-çözölme çevrimi yapmışlar ve ardından 2 donma-çözölme çevrimi yapmışlardır. Donma-özölme maruz bırakılan numuneler -23 °C sıcaklıkta 24 saat dondurucuda ve ardından 18°C sıcaklıkta 23 saat dış ortamda bekletildiğini ifade etmişlerdir. Katkısız hazırlanan numunelerin kür süresi arttıkça fiziksel ve kimyasal bağlar sayesinde mukavemetinin arttığını belirtmişlerdir. Donma-özölme maruz kaldığı zaman serbest basınç dayanımında azalma olduğunu kireç tozunun %5 ve %10 oranında eklenmesi ile serbest basınç mukavemetinde 5 kata varan artış gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Kür süresi arttıkça kireç eklenen numunelerin serbest basınç mukavemetinin arttığını ayrıca donma-çözölme çevrimlerinden de olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Donma-özölme deneyleri sonucunda ikinci çevrime maruz kalan numunelerin birinci çevrime maruz kalan numunelerden daha yüksek bir serbest basınç dayanımı gösterdiği belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise fazladan geçen süre içerisinde zemin bağlarının güçlenmesi olduğunu tahmin ettiklerini vurgulamışlardır.

Dafalla vd. (2012) yüksek plastisiteli kil zeminin kireç ve imento ile iyileştirilmesinin kil zeminin mineralojik yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kullanılan katkı maddesi oranları olarak, kireç için %4 ve %8 imento için ise %3 ve %6 olduğunu belirtmişlerdir. Kil zemine imento eklenmesiyle puzolanik reaksiyonların bazı minerallerin değişmesine ve diğer çimentolu bileşikler oluşturmasına neden olabileceği ancak %4 ve %8 kireç oranına sahip zemin örneklerinin mineral yapısında önemli değişiklikler yapacak kadar etkili olmadığını ifade etmişlerdir. Kireç oranı arttıkça zeminin maksimum kuru yoğunluğunun düştüğünü belirtmişlerdir.

Taşçı (2011) çalışmasında yüksek plastisiteli kil zemini kireç ve silis dumanı katkıları kullanarak iyileştirilmeyi amaçlamıştır. Kireç oranını %3'te sabit tutup silis dumanı oranını değiştirerek deneylerini yapmıştır. Kıvam limiti deneyleri yapılırken kil zemine kireç eklendiğinde zeminin işlenebilirliği azalmış bundan dolayı kıvam limitleri deneylerini silis dumanı yüzdesini değiştirerek yapmıştır. %3 kireç + %10 silis dumanı oranlarının şişme basıncı ve üç eksenli basınç deney sonuçları için optimum olduğunu belirtmiştir. SEM analiz sonuçları dikkate alındığında, %3 kireç katkısına ilaveten %10 silis dumanı eklenmesi ile tane boyutlarının arttığını ve buna bağlı olarak dayanımın daha yüksek değerlere ulaştığını belirtmiştir. Sonuç olarak, problemli kil zeminin uygun oranlarda kireç ve silis dumanı katkılarıyla dayanımının artabileceğini ifade etmiştir.

Çimen vd. (2020) kil zemini belirli oranlarda kireç ve uçucu kül katkısı ile iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında kireç oranını %6'da sabit tutup uçucu kül oranını %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 olarak kil zemine uygulamışlardır. Uçucu kül miktarının artması ile serbest basınç mukavemetinin, optimum su muhtevasının ve plastik limit değerinin arttığını ayrıca şişme basıncının, maksimum kuru birim hacim ağırlığının, plastisite indisinin ve likit limitinin ise azaldığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, optimum uçucu kül yüzdesinin ağırlıkça %15 olduğunu ifade etmişlerdir.

Çiftlikçioğlu (2018) yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kireç ve uçucu kül katkısının etkisini araştırmıştır. Kullandığı katkı maddeleri ile iyileştirilen zeminin donma-çözülme sonrasındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelemiştir. Kil zemini iyileştirmesinde kireç oranı olarak %3-%6 ve uçucu kül oranı olarak ise %8-%12 kullanıldığını ifade etmiştir. Katkılı ve katkısız numuneleri 0, 1, 3, 5, 7, 10 ve 20 çevrim olarak donma-çözölmeye maruz bırakmıştır. CH1 kil için katkısız numuneler ile %6 kireç katkısı olan numunelerin 7 günlük kür sonrası incelendiğinde kireç katkılı zeminin mukavemetinde %188 artış olduğunu söylerken uçucu kül katkısının kireç kadar etkili olmadığını ifade etmiştir. CH2 kilinde ise %15'lik artış olduğunu belirtmiştir. 7 günlük kür süresi sonrasında streç filmle kaplı numuneleri 24 saat -24°C sıcaklıkta dondurucuda ve 24 saat oda sıcaklığında bekleterek donma çözölme çevrimi uygulamıştır. Donma çözölme çevrimleriyle birlikte kil zeminlerin boşluk oranlarının arttığını ve dolayısıyla dayanımlarının azaldığını ifade etmiştir. 10 donma çözölme çevrimi sonrasında boşluk yapısının rezidüel değerlere ulaşmasıyla dayanımların sabit hale geldiğini ve kireç ile

birlikte uçucu kül kullanımının soğuk iklim bölgelerinde yer alan zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir olduğunu belirtmiştir.

Ayrıca literatürde doğal polimerler olarak bilinen biyopolimerler ile zeminlerin iyileştirilmesi konusu ile ilgili de çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır:

Ok vd. (2022) çalışmalarında biyopolimer kullanarak zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Biyopolimer olarak guar gum kullanmışlardır. Guar gum oranı olarak %1, %2,%3 kullanmış ve hazırladıkları numuneleri 1, 7, 14, 21, 28 ve 56 günlük kür süresince bekletmişlerdir. Ayrıca bazı numunelerin kür süresini 196 güne kadar çıkarttıklarını da ifade etmişlerdir. Çalışmalarında biyopolimer oranının en iyi sonucu hangi oranda vereceği, kür süresinin etkisi ve donma-çözülme çevrimlerinin serbest basınç dayanımı ve şişme basıncına etkilerini gözlemlemişlerdir. 24 saat etüvde beklettikleri kil zeminin sınıflandırma deneyleri sonrasında CL sınıfı düşük plastisiteli bir kil olduğunu ifade etmişlerdir. Biyopolimer katkısı ile hazırladıkları numunelerin %1 guar gum oranında en yüksek serbest basınç mukavemetini elde ettiğini belirtmişlerdir. 1,7,14,21,28,56 ve 196 günlük kür süresince bekletilen numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuş ve deney sonucunda kür süresi uzadıkça numunelerin mukavemetlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca 56 günlük kür süresinden sonra serbest basınç dayanımında çok fazla artış olmadığını belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda belirledikleri %1 guar gum oranına sahip numuneleri 7 farklı kür süresinden sonra donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakmışlardır. Sonrasında bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapmışlardır. 1-3-5-10 çevrim sayılarında yapılan deneyler sonucunda dayanımda azalmalar olduğunu ve kür süresinin artması ile donma-çözülmede ki bu azalmaların azaldığını da ifade etmişlerdir. Biyopolimer malzeme kullanımının kil zeminde şişme parametrelerini incelemişler ve şişme parametreleri üzerinde guar gum kullanımının olumlu olarak katkı sağladığını belirtmişlerdir.

Altun (2019) çalışmasında kil zeminin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak mermer tozu ve biyopolimer kullanmıştır. Yüksek plastisiteli kil zemine ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranlarında mermer tozu ve su miktarının yüzdesi şeklinde %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında keçiyoynuzu gamı eklemiştir. Numunelerini kil, sadece biyopolimer, sadece mermer tozu ve mermer tozuyla beraber biyopolimer kullanarak hazırlamıştır. Katkıların

iyileştirilen numunelerin kıvam limitleri üzerindeki etkileri incelendiğinde mermer tozu oranı arttıkça zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin azaldığını belirtmiştir. Biyopolimer olarak kullanılan keçiyoynuzu gamının artması ile likit limit değerinin arttığını fakat %1 keçiyoynuzu gamı yüzdesinden sonra belirli oranda azalma olduğunu ifade etmiştir. Kil ve biyopolimer kullanılarak hazırlanan numunelerde serbest basınç deneyi yapılmış ve en yüksek değerin %1,5 keçiyoynuzu gamı ile hazırlanan numuneden elde etmiştir. Kil zemine %5 mermer tozu ve keçiyoynuzu gamı eklenerek yapılan deneylerde de yine en yüksek serbest basınç değerinin %1,5 keçiyoynuzu gamında bulunduğunu ifade etmiştir. Saf kil ve mermer tozu ile yapılan çalışmalarında ise %25 oranında mermer tozu eklendiğinde %63 değerinde serbest basınç değerinin arttığını ifade etmiştir. Genel olarak tüm mermer tozu oranlarında biyopolimer oranı arttıkça serbest basınç dayanımında artış meydana geldiğini belirtmiştir.

Taytak (2012) çalışmasında kaolin, bentonit ve kum zeminden oluşan karma bir zemini biyopolimer katkıları kullanarak iyileştirmeyi amaçlamıştır. Biyopolimerlerin saf su içerisinde hazırlanan zantam gam, seyreltik asetik asit ile hazırlanan kitosan ve seyreltik dimetilasetamit çözeltisi içerisinde hazırlanan kitin olduklarını ifade etmiştir. Kullanılan biopolimerlerin yüzdelерinin ise %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olduğunu belirtmiştir. Genel sonuçlar dikkate alındığında tüm biyopolimerler için %0,25 oranının optimum olabileceğini ifade etmiştir. İyileştirilen örneklerin kayma dayanımlarında artış elde edilirken içsel sürtünme açısında bu etkinin çok fazla olmadığını belirlemiştir. Biyopolimerlerin degradasyon özelliklerinden dolayı uzun dönemli etkilerinin araştırılmasının önemli olabileceğini vurgulamıştır.

Güven vd. (2023) çalışmalarında yüksek plastisiteli kil zeminin iyileştirilmesinde biyopolimer ve lif kullanmışlardır. Biyopolimer olarak keçiyoynuzu gamı ve lif olarak ise polyester iplik kullandıklarını ifade etmişlerdir. Biyopolimer oranı olarak %0,5, %1 ve %1,5, lif oranı olarak ise %0,15, %0,30 ve %0,60 kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda 1 günlük ve 28 günlük numuneler karşılaştırıldığında kür süresi arttıkça numunelerin serbest basınç dayanımları ve donma-çözölmeye maruz kalmış numunelerin serbest basınç dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir. Biyopolimer katkısının optimum oranının %1,5 olduğunu ifade etmişleridir. Örneğin 1 günlük kür süresince bekletilen katkısız numunenin serbest basınç dayanımı 399 kPa iken kil zemine %1,5 oranında

keçi boynuzu gamı eklendiğinde dayanımın 903 kPa olduğunu belirtmişlerdir. Kil zemine %0,60 oranında lif eklendiğinde ise dayanımın 1123 kPa olduğunu ifade etmişlerdir. 28 günlük kürde ise %1,5 keçi boynuzu gamı için dayanım 3964 kPa, %0,60 lif kullanıldığında ise dayanımın 3999 kPa olduğunu belirtmişlerdir. Katkı maddelerinin beraber kullanımında 28 günlük %1,5 keçi boynuzu gamı ve %0,60 lif kullanılan numunelerin dayanımı 2554 kPa olduğunu belirtmişlerdir. Donma-çözülme deneyleri için katkı malzemelerinin yüzdeleri arttıkça dayanımda artışın olduğunu ifade etmişlerdir. %1,5 keçi boynuzu gamı ve %0,60 lif oranlarının beraber uygulandığı soğuk iklime sahip bölgelerdeki kil zeminlerde olumlu sonuçlar verebileceğini ifade etmişlerdir.

Cabalar vd. (2018) çalışmalarında düşük plastisiteli kil zeminin iyileştirilmesinde xanthan gum biyopolimerinin etkisini araştırmışlardır. Zemin ağırlığına oranla %0,5, %1, %1,5, %2 ve %3 oranlarında Xanthan gum biyopolimeri kullanmışlardır. Uygulama yapılan kil zemin numunelerini 0, 7, 28 ve 56 günlük kür süresince bekletmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda biyopolimer kullanımında maksimum kuru birim hacim ağırlıkta düşüş olurken optimum su içeriğinde ise artış olduğunu belirlemişlerdir. Biyopolimer oranının %1'den az olması durumunda xanthan gum biyopolimerinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurarak kil taneleri ile etkileşimi engellediğini ve bu oranın %1'den fazla olması durumunda ise xanthan gum biyopolimerinin daha fazla kil tanesinin yerini aldığını böylece viskozitenin arttığını ve zeminin sünek bir özellik gösterdiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, kil zeminin iyileştirilmesinde biyopolimer kullanımı ile dayanım artışlarının elde edilebildiğini ayrıca kür süresi uzadıkça da dayanımın arttığını ifade etmişlerdir.

Gencer (2018) çalışmasında kil zemini iyileştirmek için ponza tozu ve biyopolimer kullanmıştır. Kil zemine ponza tozu ve biyopolimer ile ayrı ayrı uygulamalar yapmış ve ponza tozu oranı olarak %5, %15 ve %25, keçi boynuzu gam biyopolimeri oranı olarak ise %0,5, %1 ve %1,5 kullanılmıştır. Deneyler sonucunda ponza tozu oranındaki artış ile likit limitte düşüş, plastik limitte gözle görülen bir farklılık olmadığını buna bağlı olarak plastisite indisi değerinde düşüş olduğunu belirtmiştir. Ayrıca uygulama yapılmayan örneklerle karşılaştırıldığında ponza katkılı kilin serbest basınç mukavemetleri azalırken keçi boynuzu katkılı kilde mukavemetin artış gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte,

ponza katkılı kilin doğal kil numunelerinde daha düşük şişme basıncı gösterdiği de ifade edilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kil Zemin

Çalışmada kullanılan kil Erzurum'un Horasan ilçesinden getirilmiştir. Zemin bölgeden getirildikten sonra 24 saat etüvde bekletilmiş, kuruduktan sonra etüvden alınıp öğütücüde öğütülmüştür. Ardından 0,075 µm elekten geçirilerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Kil zeminin sıkıştırma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Bu deney sonucunda zeminin maksimum kuru yoğunluğu (γ_{kmaks}) 12,4 kN/m³ ve optimum su muhtevası (w) ise %30,00 olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfını belirlemek için kıvam limitleri deneyleri de yapılmış ve zeminin yüksek plastisiteli kil zemin olduğu belirlenmiştir. Numuneler farklı kireç oranlarında hazırladığından her kireç oranı için kompaksiyon deneyleri tekrarlanmış ve optimum su muhtevaları belirlenmiştir.



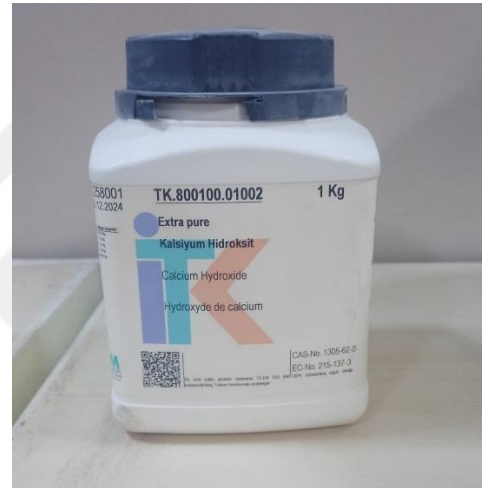
Şekil 3.1. (a) Araziden alınan kil zemin, (b) öğütme ve elek analizi sonrası elde edilen kil zemin

3.2. Kireç

Uygulamalarda ticari olarak elde edilebilen kireç (kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) kullanılmıştır. Kirecin TS-EN ISO 9001:2015 standartlarına uygun olarak üretildiği belirtilmiştir. Tablo 3.1'de kullanılan kireç katkısına ait bazı özellikler ve Şekil 3.2'de ise genel görünümü sunulmuştur.

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan kireç katkısının özellikleri

Spesifikasyon	Yaklaşık değerler (%)
Safiyet (CaOH) ₂	$\geq 87,0$
Magnezyum oksit (MgO)	$\leq 1,0$
Asitte çözünmeyen	$\leq 1,0$
Kızdırma kalıntısı	$\leq 3,0$
Partikül boyutu ($<90\mu\text{m}$)	$\geq 90,0$



Şekil 3.2. Kireç

3.3. Biyopolimer

Çalışmamızda, ticari olarak elde edilebilen sodyum aljinat biyopolimeri kullanılmıştır. Sodyum aljinatın genel görünümü ve bazı özellikleri sırasıyla Şekil 3.3. ve Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan sodyum aljinat katkısının özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm (form)	Katı
Kurutmadaki kütle kaybı	$\leq \%15,5$
Arsenik (As)	$\leq \% 0,0003$
Kadmiyum (Cd)	$\leq \%0,0001$
Cıva (Hg)	$\leq \%0,0001$
Kurşun (Pb)	$\leq \%0,001$



Şekil 3.3. Sodyum aljinat

3.4. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışma için numuneler katkısız (sadece kil), kireç katkılı, sodyum aljinat katkılı ve kireç+sodyum aljinat katkılı olarak hazırlanmıştır. Numunelerin adlandırılmasında ilk yazılan değer kil yüzdesini, ikinci değer kireç yüzdesini son değer ise sodyum aljinat biyopolimerin yüzdesini belirtmektedir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Kil zeminin iyileştirilmesinde ağırlıkça kil zemin, kireç ve sodyum aljinat oranları

Numune	Kil (%)	Kireç (%)	Sodyum Aljinat (%)	Optimum Su Muhtevası (%)
N100-0-0	100	0	0,00%	30,00%
N100-0-0,5	100	0	0,50%	30,00%
N100-0-1,0	100	0	1,00%	30,00%
N100-0-1,5	100	0	1,50%	30,00%
N98-2-0	98	2	0,00%	30,90%
N98-2-0,5	98	2	0,50%	30,90%
N98-2-1	98	2	1,00%	30,90%
N98-2-1,5	98	2	1,50%	30,90%
N96-4-0	96	4	0,00%	31,95%
N96-4-0,5	96	4	0,50%	31,95%
N96-4-1	96	4	1,00%	31,95%
N96-4-1,5	96	4	1,50%	31,95%
N94-6-0	94	6	0,00%	33,00%
N94-6-0,5	94	6	0,50%	33,00%
N94-6-1	94	6	1,00%	33,00%
N94-6-1,5	94	6	1,50%	33,00%

3.4.1. Katkısız numunelerin hazırlanması

Doğal kil zemine kompaksiyon deney sonuçlarına göre belirlenen optimum su muhtevası kadar su mezür ile ölçülerek eklenmiş ve belirli bir süre homojen hale gelene kadar karıştırıcıda karıştırılmıştır. Sonrasında zemin karışımı 38 mm çapındaki kalıplara 76 mm yükseklikte olacak şekilde kompaksiyon parametreleri dikkate alınarak yerleştirilmiştir.

3.4.2. Kireç katkılı numunelerin hazırlanması

Kil zeminin iyileştirilmesinde kireç oranı olarak %2, %4 ve %6 kullanılmıştır. Kil zemine karıştırılacak olan her bir kireç oranı için kompaksiyon deney sonuçlarına göre su

muhtevaları belirlenmiştir (Bkz. Tablo 3.3). Kil zemine belirlenen miktarlarda kireç ilave edilmiş ve belirlenen oranlarda su ilave edilerek homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Elde edilen kireç katkılı zeminler kalıplar içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Sonrasında iyileştirilen numuneler kalıplardan çıkarılmış ve kür süresince desikatör içerisinde havasız ortamda bekletilmiştir.

3.4.3. Sodyum aljinat katkılı numunelerin hazırlanması

Kil zemine su yüzdesine oranla (%0,5, %1 ve %1,5) sodyum aljinat ilave edilmiştir. Sodyum aljinatı kil zemine ilave ederken mikser içerisine sabit sıvı akışı sağlayan dozaj pompası kullanılmıştır. Kil zemin karıştırıcıdayken sodyum aljinat mikser içerisinde su ile homojen olarak karışmış ve pompa vasıtasıyla kil zemine ilave edilmiştir (Şekil 3.4).

3.4.4. Kireç ve sodyum aljinat katkılı numunelerin hazırlanması

Kil zemin ve kireç karıştırıcıda belirli bir süre karıştırıldıktan sonra sodyum aljinat pompa vasıtasıyla katkılı zemine ilave edilmiştir. Sodyum aljinatın ilavesinden sonra tekrar belirli bir süre daha karıştırma kabında tüm malzemeler karıştırılmış ve kalıplar içerisinde sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıplardan çıkarılan numuneler kür süresince beklemeye bırakılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 3.4. (a) Karışımların zemine uygulanması, (b) uygulamada kullanılan malzemeler.

3.5. Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon deneyinde ilk olarak Proktor deneyi kalıbının boş ağırlığı tartılmış daha sonra hazırlanmış olan zemin karışımı kalıp içerisine üç katman halinde, her katman için 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin tekrar tartılmıştır. Proktor kalıbındaki numunenin üst, orta ve alt kısımlarından örnekler alınarak yaş ağırlıkları kaydedilmiştir. Yaş numuneler etüve atılarak 105 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş ve bu süresinin sonunda tekrar tartılarak kuru ağırlığı belirlenmiştir. Bu işlem farklı kireç oranlarında tekrarlanmış ve optimum su muhtevaları bulunmuştur.



Şekil 3.5. Proktor aleti

3.6. Donma-Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyleri için katkısız ve katkılı numuneler 28 günlük kür süresinden sonra alüminyum folyo ile sarılarak dondurucuya bırakılmıştır (Şekil 3.6). Her bir donma-çözülme çevriminde numuneler, dondurma işlemi için -20 °C'lik buzdolabında 6 saat, çözülme işlemi için ise +25 °C sıcaklıkta 6 saat süre ile bekletilmiştir (Ghazavi ve Roustaie, 2010). Donma-çözülme için 5 ve 10 çevrim uygulanmıştır.



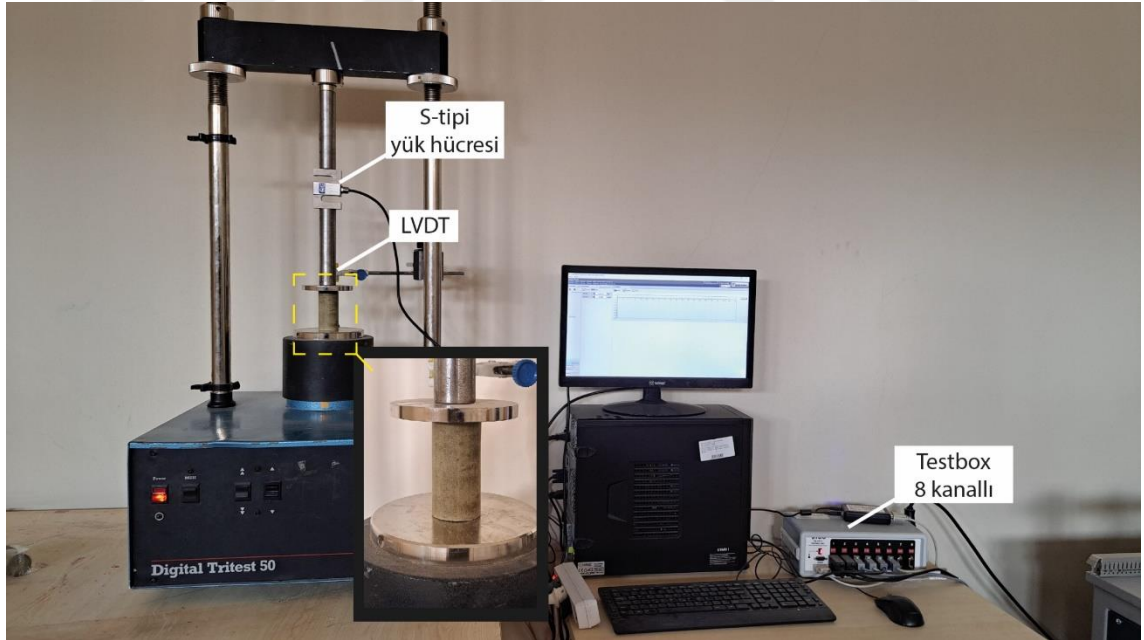
(a)

(b)

Şekil 3.6. (a) 7 ve 28 gün bekletilen iyileştirilen zemin örnekleri, (b) donma-çözülme deneyi için hazırlanan zemin örnekleri.

3.7. Serbest Basınç Deneyi

Tüm numuneler 7 ve 28 günlük kür süreleri ve donma-çözülme çevrimlerinden sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. 7 gün ve 28 gün süresince kürde bekletilen zeminler üzerinde ASTM D 2166 (Albayrak ve Altun, 2021) standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Serbest basınç deney düzeneği

3.8. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi

Uygulama öncesinde ve sonrasında mineralojik yapıda meydana gelebilecek değişikliklerin analiz edilmesi amacıyla XRD analizleri yürütülmüştür. Bu amaçla en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerinin elde edildiği zemin örneklerinin ve optimum su muhtevasında hazırlanan kil zeminin analizleri yapılmıştır. Analizler Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan Empyrean Series 2 X-ray Diffraction System cihazı (Şekil 3.8.) kullanılarak yürütülmüştür.

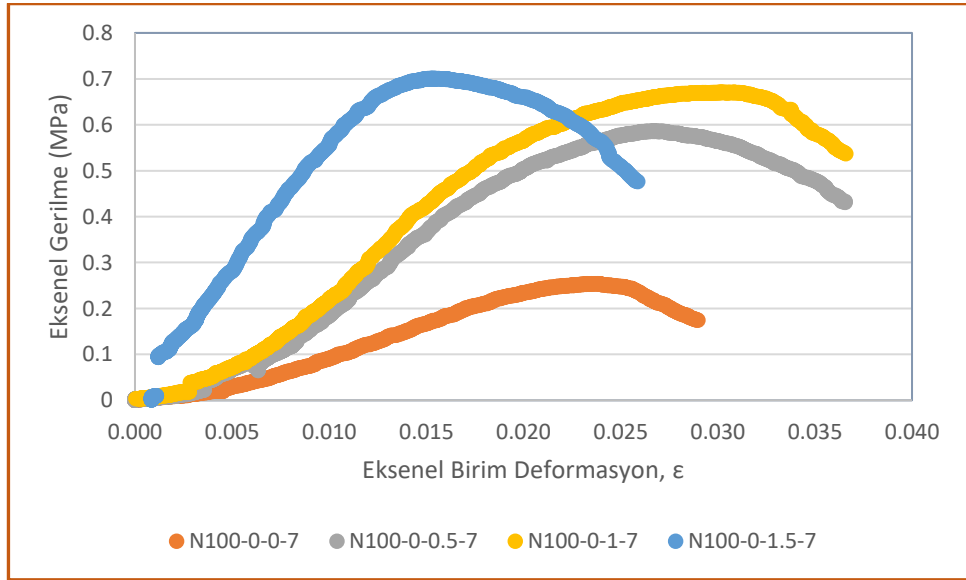


Şekil 3.8. XRD analiz cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

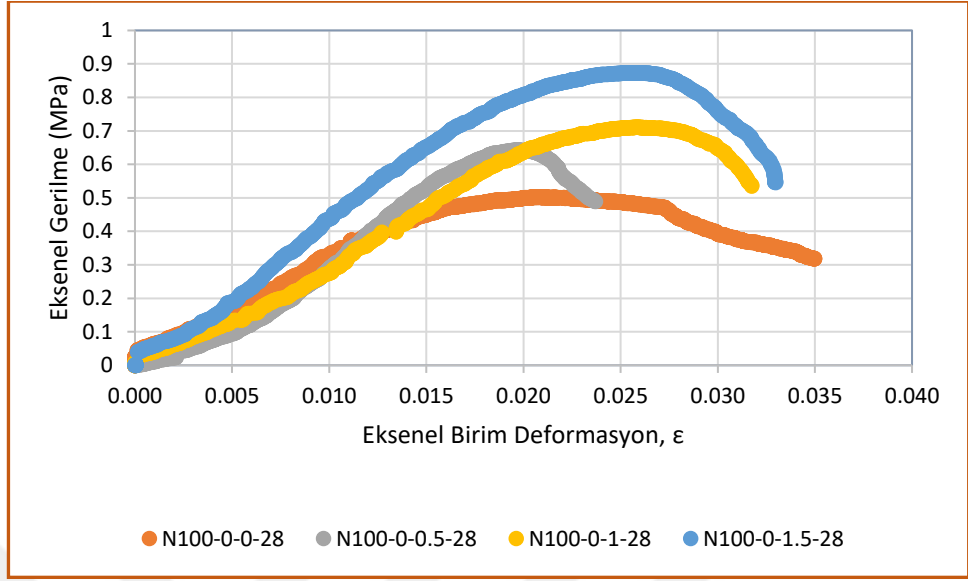
4.1. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Bu çalışmada doğal kil zeminin biyopolimer ve kireç katkısı ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kil, kil-biyopolimer, kil-kireç ve kil-biyopolimer-kireç şeklinde numuneler hazırlanılmıştır. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 günlük kür süresinde bekletilmiştir. Şekil 4.1(a), Şekil 4.1(b) ve Şekil 4.2’de kil-biyopolimer numunelerinin serbest basınç deney sonuçları sunulmuştur. Şekil 4.1(a), Şekil 4.1(b) ve Şekil 4.2 değerlendirildiğinde sadece kil olan örneklerle göre biyopolimer eklenerek hazırlanmış numunelerin mukavemet değerlerinin arttığı görülmüştür. Kür süresi uzadıkça bu mukavemet değerleri de artmıştır. 28 günlük kür süresinde bekletilmiş numuneler için %0,5, %1 ve %1,5 biyopolimer eklenmesiyle, kil numunelere göre sırasıyla %28, %42 ve %75 artış meydana gelmiştir. Kullanılan biyopolimer katkısı oranı arttıkça kil zeminin mukavemetinin de arttığı anlaşılmaktadır. Cheng ve Geng (2023) kil zemin iyileştirilmesinde çeşitli biyopolimerler ve 28 ile 42 günlük kür süresi belirleyerek yapmış oldukları çalışma sonucunda optimum biyopolimer oranının %1-2 arasında olduğunu belirtmişlerdir.



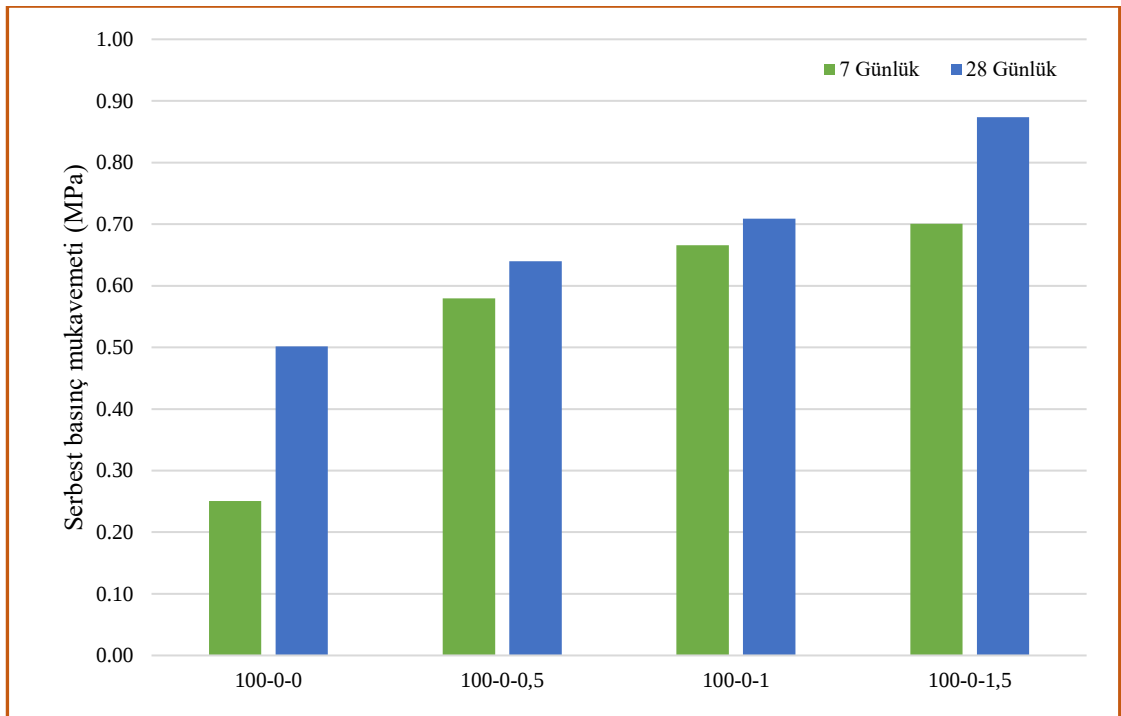
(a)

Şekil 4.1. Kil-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları



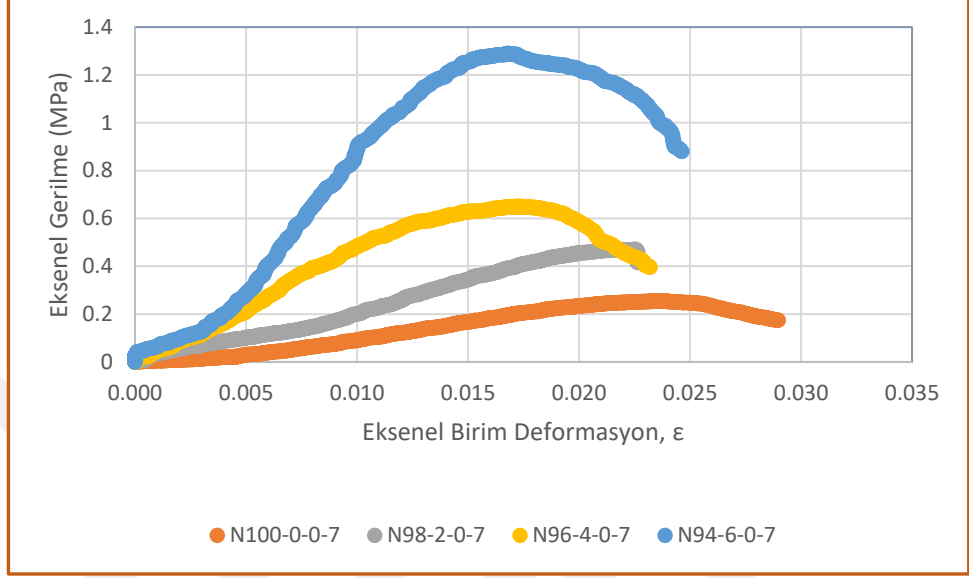
(b)

Şekil 4.1. (devamı) Kil-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları

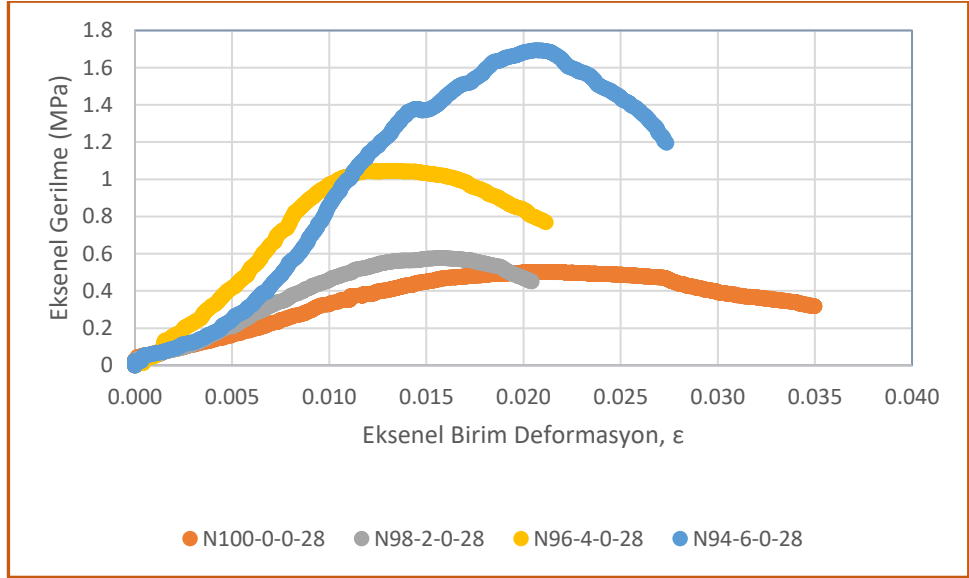


Şekil 4.2. Kil-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları

Kil-kireç numunelerinin serbest basınç deney sonuçları Şekil 4.3(a), Şekil 4.3(b) ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Şekil 4.3(a), Şekil 4.3(b) ve Şekil 4.4 değerlendirildiğinde kil numuneye göre kireç oranı arttıkça hazırlanmış olan numunelerin mukavemetlerinin de arttığı görülmüştür. Kür süresi arttıkça mukavemet değerlerinde de artış görülmüştür.

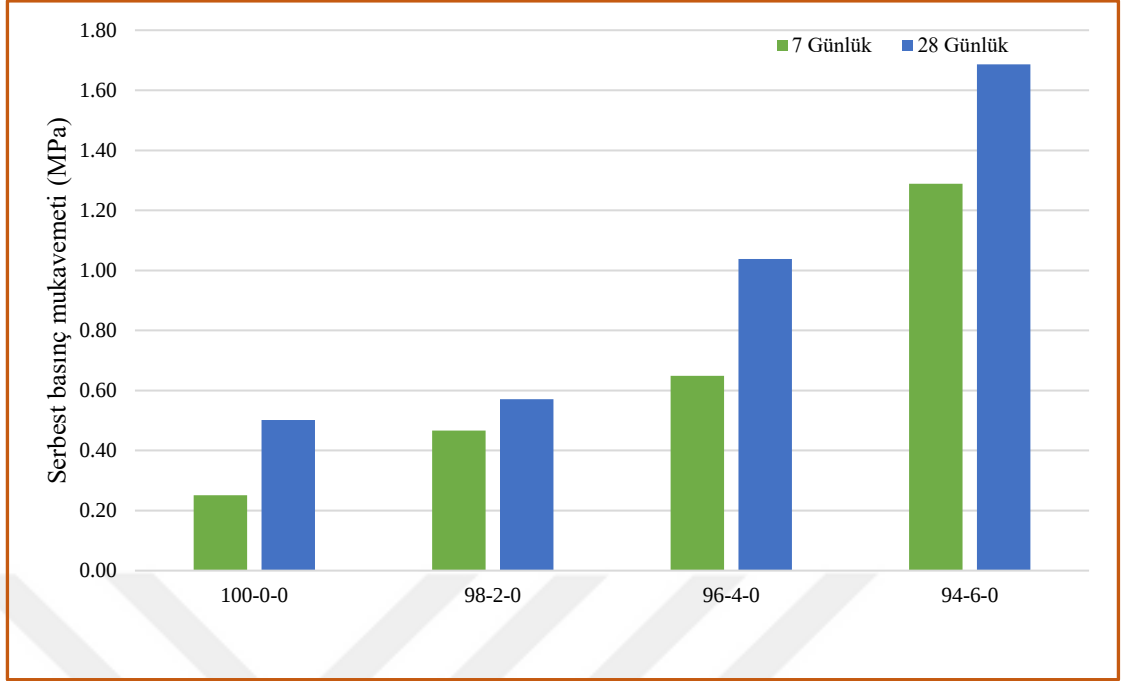


(a)



(b)

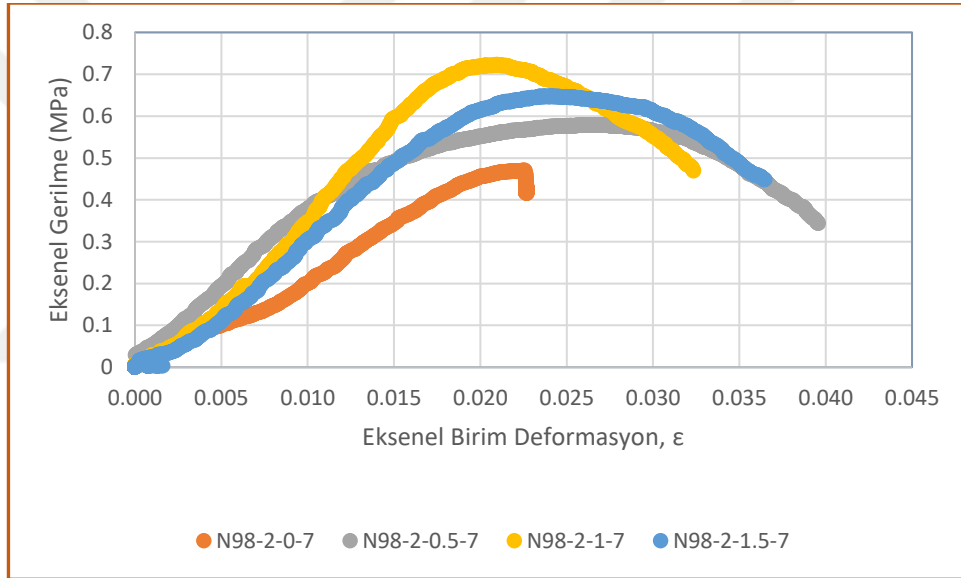
Şekil 4.3. Kil-kireç numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları



Şekil 4.4. Kil-kireç numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları

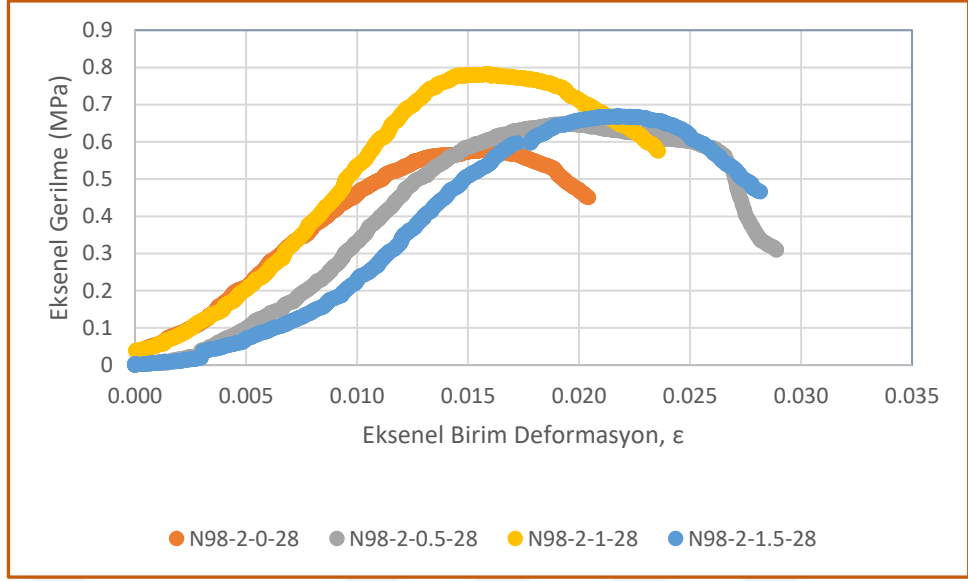
Şekil 4.5(a), Şekil 4.5(b) Şekil 4.6, Şekil 4.7(a), Şekil 4.7(b) Şekil 4.8, Şekil 4.9(a), Şekil 4.9(b) ve Şekil 4.10'da kil-kireç-biyopolimer numunelerinin serbest basınç deney sonuçları sunulmuştur. Şekil 4.5(a), Şekil 4.5(b) Şekil 4.6, Şekil 4.7(a), Şekil 4.7(b) Şekil 4.8, Şekil 4.9(a), Şekil 4.9(b) ve Şekil 4.10 değerlendirildiğinde %1 biyopolimer kullanılarak hazırlanmış numunelerden sonra biyopolimer oranının artması ile mukavemette düşmeler gözlemlenmiştir. Bu durum kil-biyopolimer ve kil-kireç numunelerde görülmemiştir. Chang vd. (2015) yaptıkları çalışmalarında biyopolimer olarak Xanthan gum kullanmışlardır. Biyopolimer oranının artması belli bir orana kadar mukavemeti arttırırken sonrasında azalma ya da sabit bir hal almaya başladığını belirtmişlerdir. Buna ek olarak biyopolimer oranının artması ile biyopolimerin çok daha fazla suyu absorbe edebileceğini bunun sonucunda da zemindeki boş alanların hacminin artabileceğini ifade etmişlerdir. Bakhshizadeh vd. (2022) sodyum aljinat ile yaptıkları çalışmalarında iyileştirme için bulunan ideal sodyum aljinat oranının %1,25 olduğunu ifade etmişlerdir. Bagherinia (2024) çalışmasında kil zemin iyileştirmesini biyopolimer olarak sodyum aljinat kullanarak yapmıştır. Hazırladığı numunelerde %1 sodyum aljinat oranından sonra mukavemette azalmalar meydana geldiğini ifade etmiştir. Çalışmasında ideal sodyum aljinat oranının %1 olduğunu belirtmiştir. Özetle biyopolimer ile yapılan çalışmalarda ideal oranın %1-1,5 arasında olabileceğini belirtmişlerdir.

Kireç ve sodyum aljinat biyopolimerinin birlikte uygulandığı numuneler gözden geçirildiğinde biyopolimer katkısının tüm numunelerde mukavemet üzerinde olumlu bir etki meydana getirdiği görülmektedir. Örneğin, %2 kireç uygulanan numuneye %0,5 biyopolimer katkısı ile 28 günlük serbest basınç mukavemetinin %12 artış gösterdiği, biyopolimer katkısı %1'e çıkarıldığında ise mukavemet artışının %36 olduğu gözlemlenmiştir. Kireç oranının %4 ve %6'lara çıkarıldığı numunelerde ise %1 sodyum aljinat katkısının sırası ile %27 ve %35'lik mukavemet artışı meydana getirdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, kil-kireç-biyopolimer ile yapılan uygulamalarda %1 biyopolimer katkısının mukavemet üzerinde olumlu etkilerinin olabileceği gözlemlenmiştir.



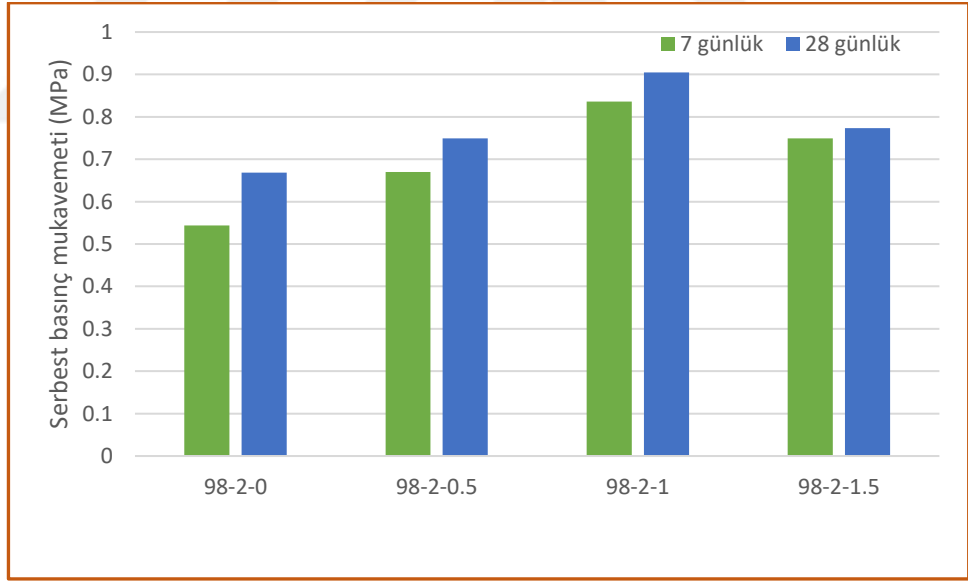
(a)

Şekil 4.5. Kil- %2 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları

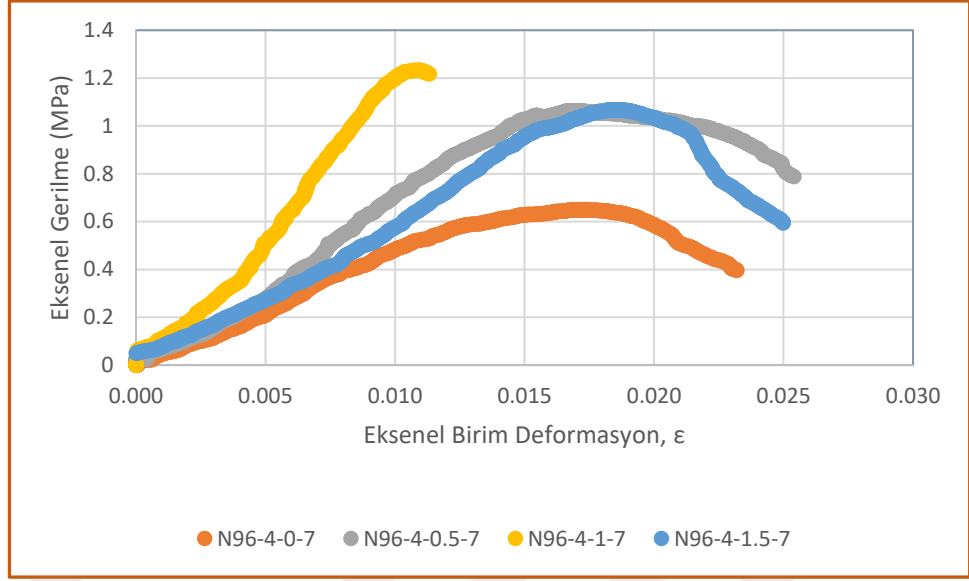


(b)

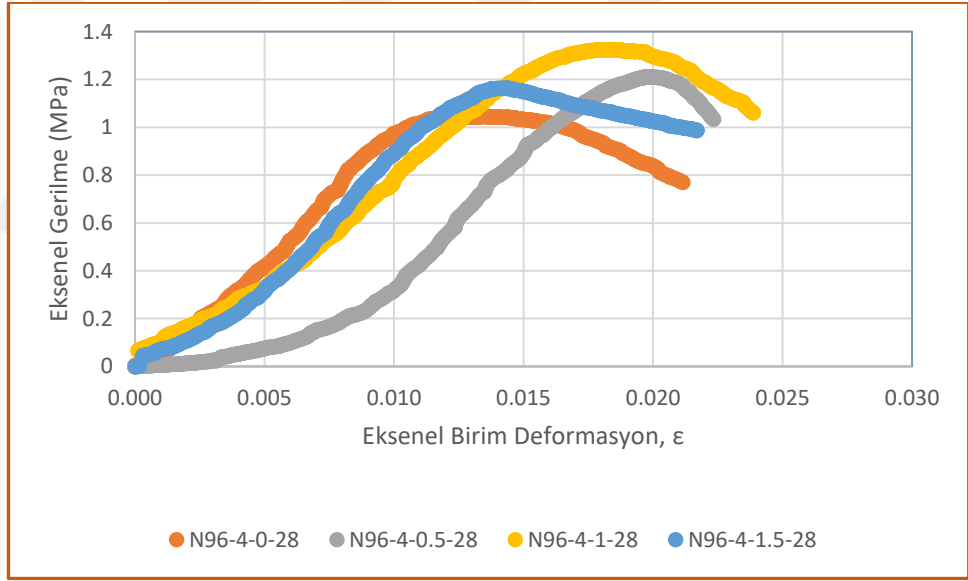
Şekil 4.5. (devamı) Kıl- %2 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları



Şekil 4.6. Kıl- %2 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları

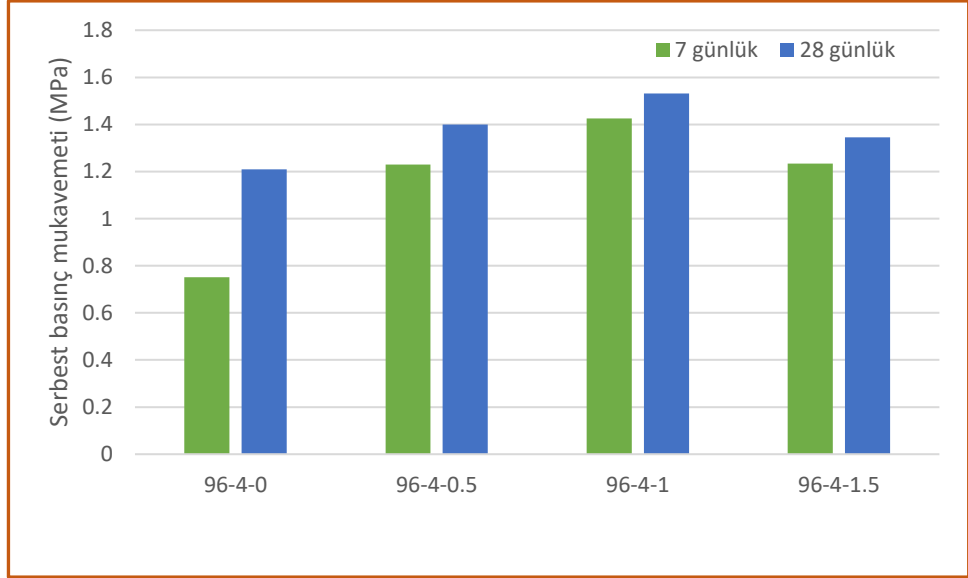


(a)

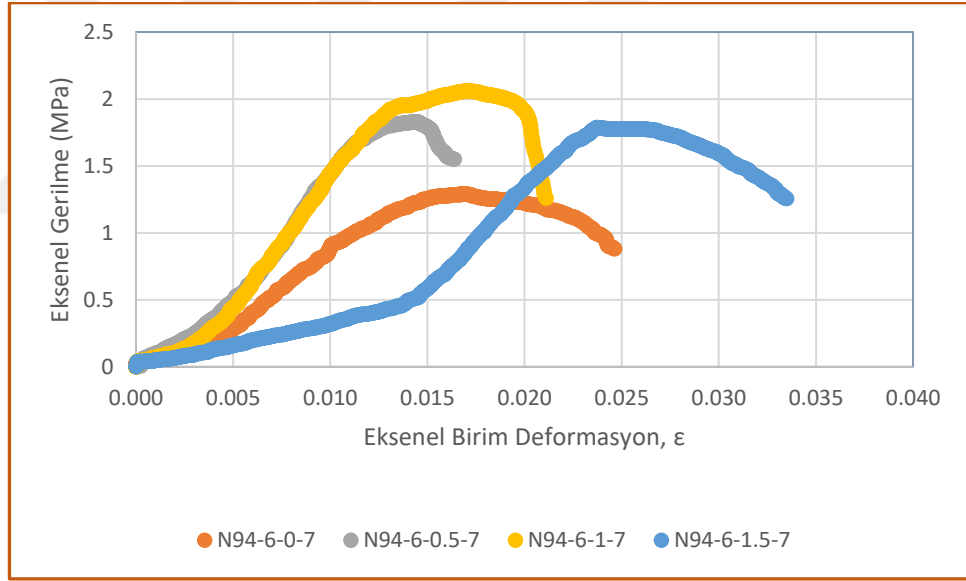


(b)

Şekil 4.7. KİL- %4 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları

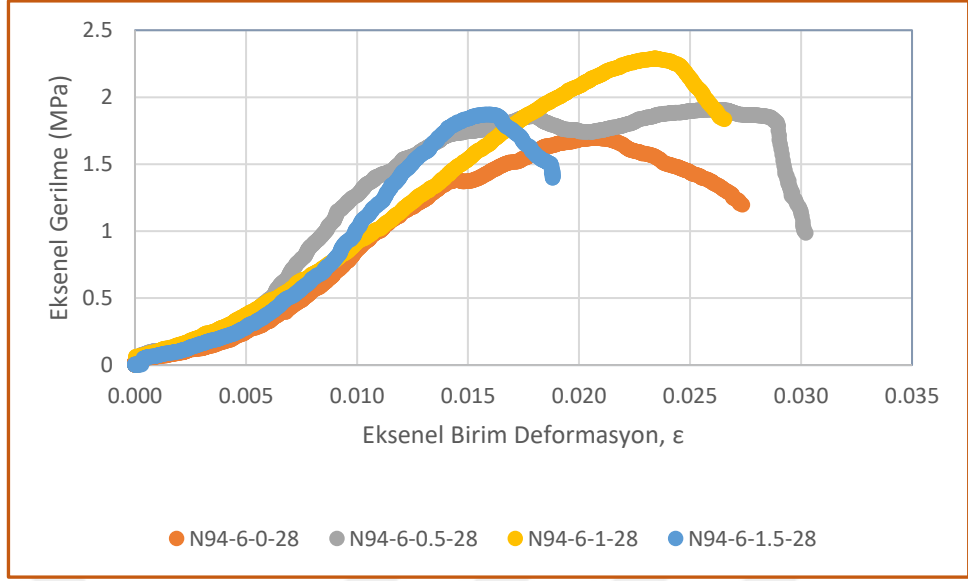


Şekil 4.8. Kıl- %4 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları



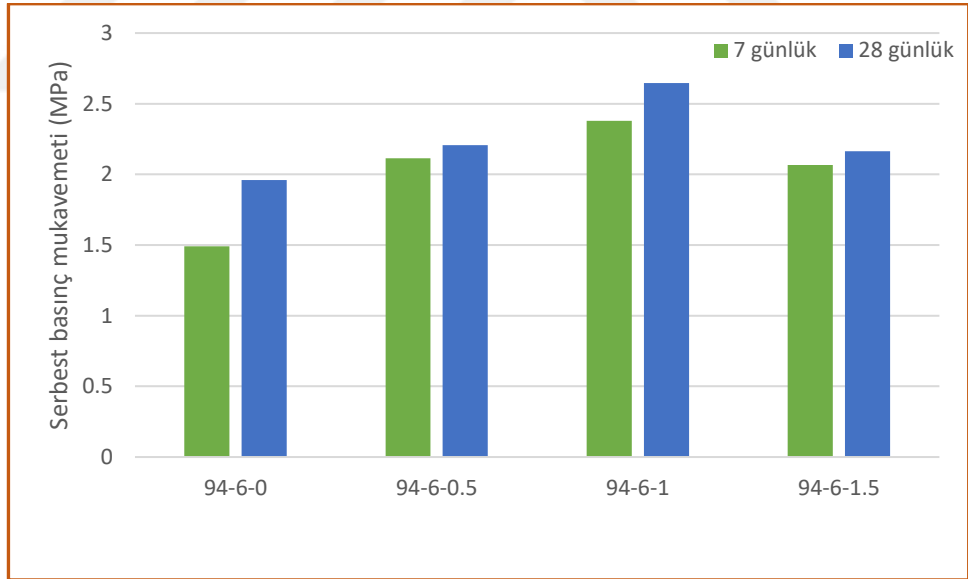
(a)

Şekil 4.9. Kıl- %6 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları



(b)

Şekil 4.9. (devamı) Kıl- %6 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları. (a) 7 günlük serbest basınç sonuçları, (b) 28 günlük serbest basınç sonuçları



Şekil 4.10. Kıl- %6 kireç-biyopolimer numunelerinin 7 ve 28 günlük serbest basınç sonuçları

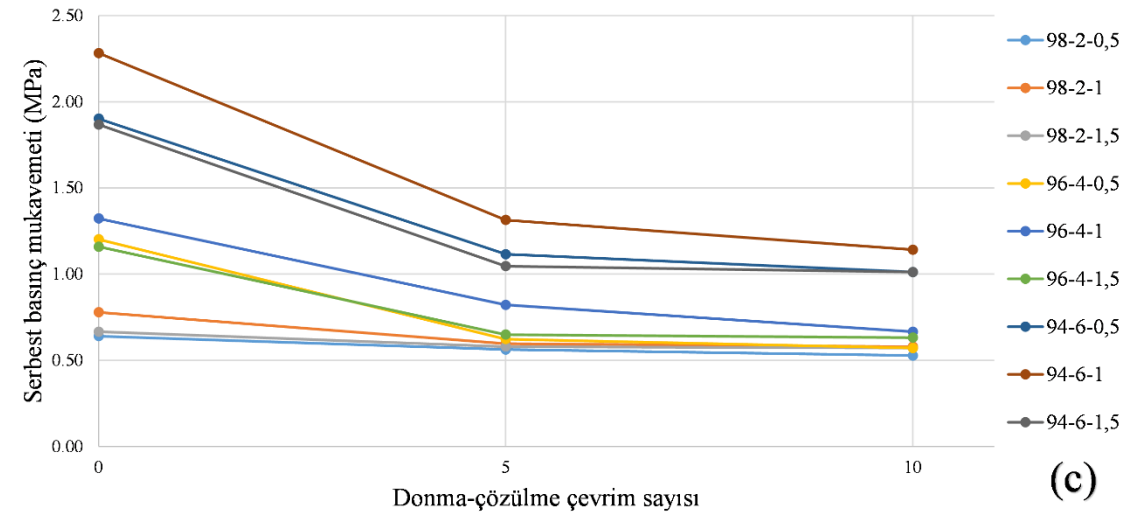
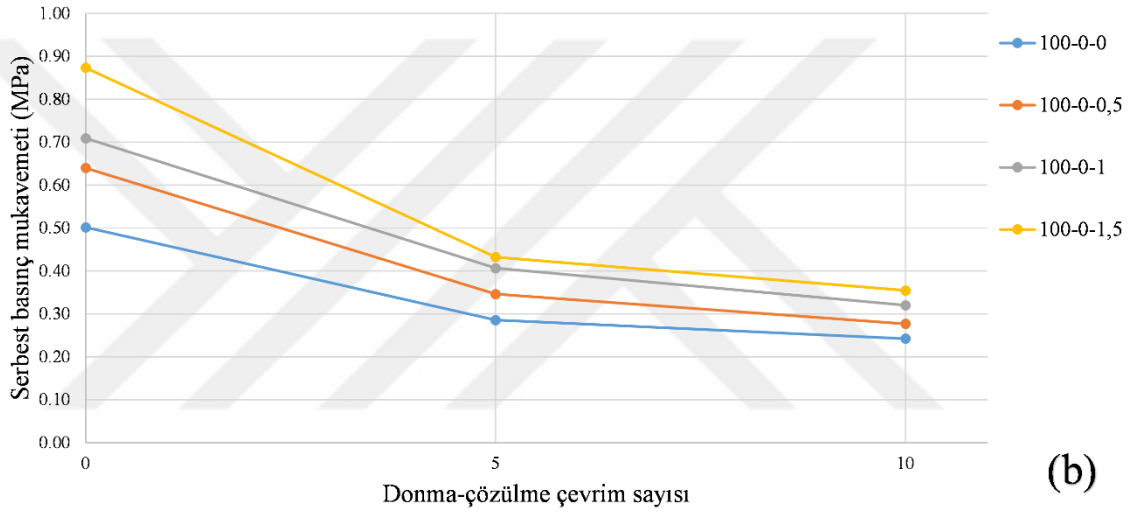
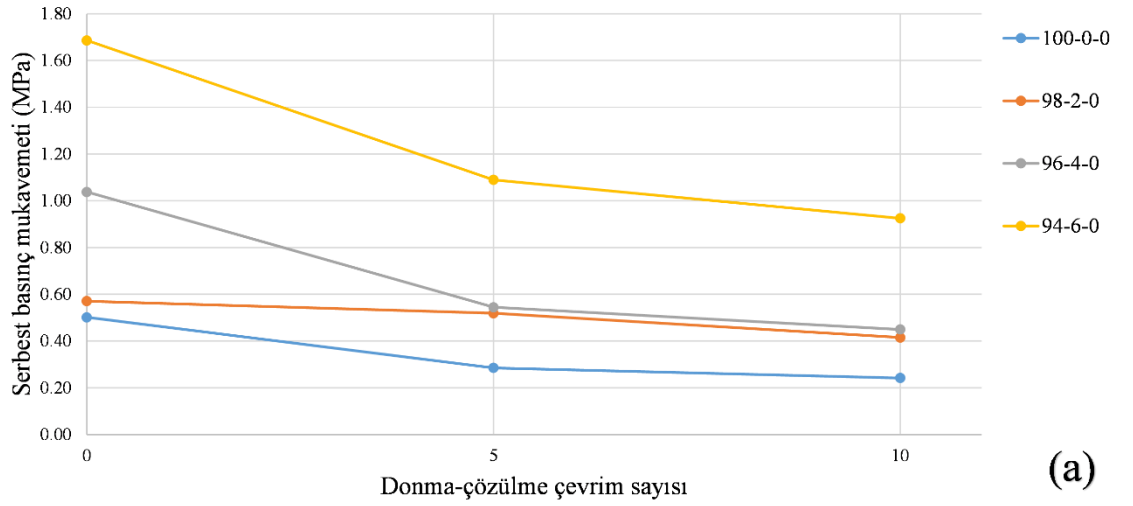
4.2. Donma-Çözölme Deney Sonuçları

İyileştirilen kil zeminler üzerinde donma-çözölmenin etkilerini inceleyebilmek amacıyla 28 günlük kür süresine sahip numuneler hazırlanmıştır. Donma-çözölme için 5 ve 10 çevrim olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Şekil 4.11’de donma-çözölme deney sonuçları sunulmuştur. Şekil 4.11 (a) değerlendirildiğinde kil- kireç ile hazırlanmış numunelerin 5 donma-çözölme çevriminde %31’lik mukavemet düşüşü olurken 10 donma-çözölme çevriminde bu düşüş %43 olmuştur. Bu sonuçlardan anlaşılabacağı gibi 5 donma-çözölme çevriminin 10 donma-çözölme çevrimine kıyasla daha etkili olmuştur. Donma-çözölme çevrimlerine maruz kalmış numunelerde ideal kireç oranı %6 olduğu görülmüştür.

Şekil 4.11 (b) ‘de görüldüğü gibi kil-biyopolimer ile hazırlanmış numunelerin 5 donma-çözölme çevriminde %46’lık mukavemet düşüşü olurken 10 donma-çözölme çevriminde bu düşüş %57 olmuştur. Şekil 4.11 (a) ve Şekil 4.11 (b) dikkate alındığında sadece biyopolimer katkısının kireç katkısına nazaran donma-çözölme etkisi altında mukavemet açısından daha fazla düşüş gösterdiği anlaşılmaktadır. Biyopolimerler, bulundukları ortamın çevresel koşullarından etkilenebilen polisakkaritlerden meydana geldiğinden, sıcaklığın artırılıp azaltılması bağ yapılarını değiştirerek mukavemet üzerinde olumsuz etki meydana getirebilmektedir (Bozyigit vd. 2023). Sonuç olarak, Şekil 4.11 (b) değerlendirildiğinde ideal biyopolimer oranının %1,5 olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.11 (c) değerlendirildiğinde kil-kireç-biyopolimer numunelerinin 5 donma-çözölme çevriminde %34’lük mukavemet düşüşü olurken 10 donma-çözölme çevriminde bu düşüş %39 olmuştur. İdeal kireç oranı %6 iken ideal biyopolimer oranının ise %1 olduğu görülmüştür. Şekil 4.11 (a) ve Şekil 4.11 (b)’den anlaşılabacağı üzere 5 çevrime tabi tutulmuş numunelerin 10 çevrime tabi tutulmuş numunelerden daha fazla mukavemet düşüşü olduğu görülmektedir. Ayrıca sadece kireç katkısı ile hazırlanmış numunelere nazaran kireç ve biyopolimer katkısının birlikte uygulandığı numunelerin donma-çözölme çevrimlerinden daha az etkilendiği görülmüştür. Örneğin %2 ve %4 kireç katkılı numunelerin 10 donma-çözölme çevriminde mukavemetleri %27 ve %57 oranlarında azalırken bu numunelere %1 oranında sodyum aljinat eklenerek hazırlanan numunelerin 10 donma-çözölme çevrimindeki mukavemetlerinde ki azalmanın %26 ve %50 olduğu görülmüştür. Liu vd. (2023) kil zemini iyileştirmek için sodyum aljinat ile birlikte

kalsiyum klorür kullanmışlar ve iyileştirilen numunelere 12 donma-çözülme çevrimi uygulamışlardır. Sonuç olarak, serbest basınç mukavemetinde %20'lik bir düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmamızda iyileştirilen zeminlerin donma-çözülme çevrimlerinden daha çok etkilenmesinin sebebinin farklı bir zemin ve biyopolimer kullanımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda kireç ve sodyum aljinata ek olarak kalsiyum klorür katkısının donma-çözülme davranışlarına etkilerinin araştırılmasının kayda değer olabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, literatürde yapılan çalışmalarda biyopolimer kullanımı ile zeminlerin donma çözülme davranışlarının iyileştirilebileceği (Güven vd. 2023; Hamza vd. 2023) ve biyopolimerin kireç ile birlikte kullanımının hem mukavemetlerin artmasına hem de donma çözülme sonucunda oluşabilecek olumsuz etkilerin azalmasına katkıda bulunabileceği anlaşılmaktadır.

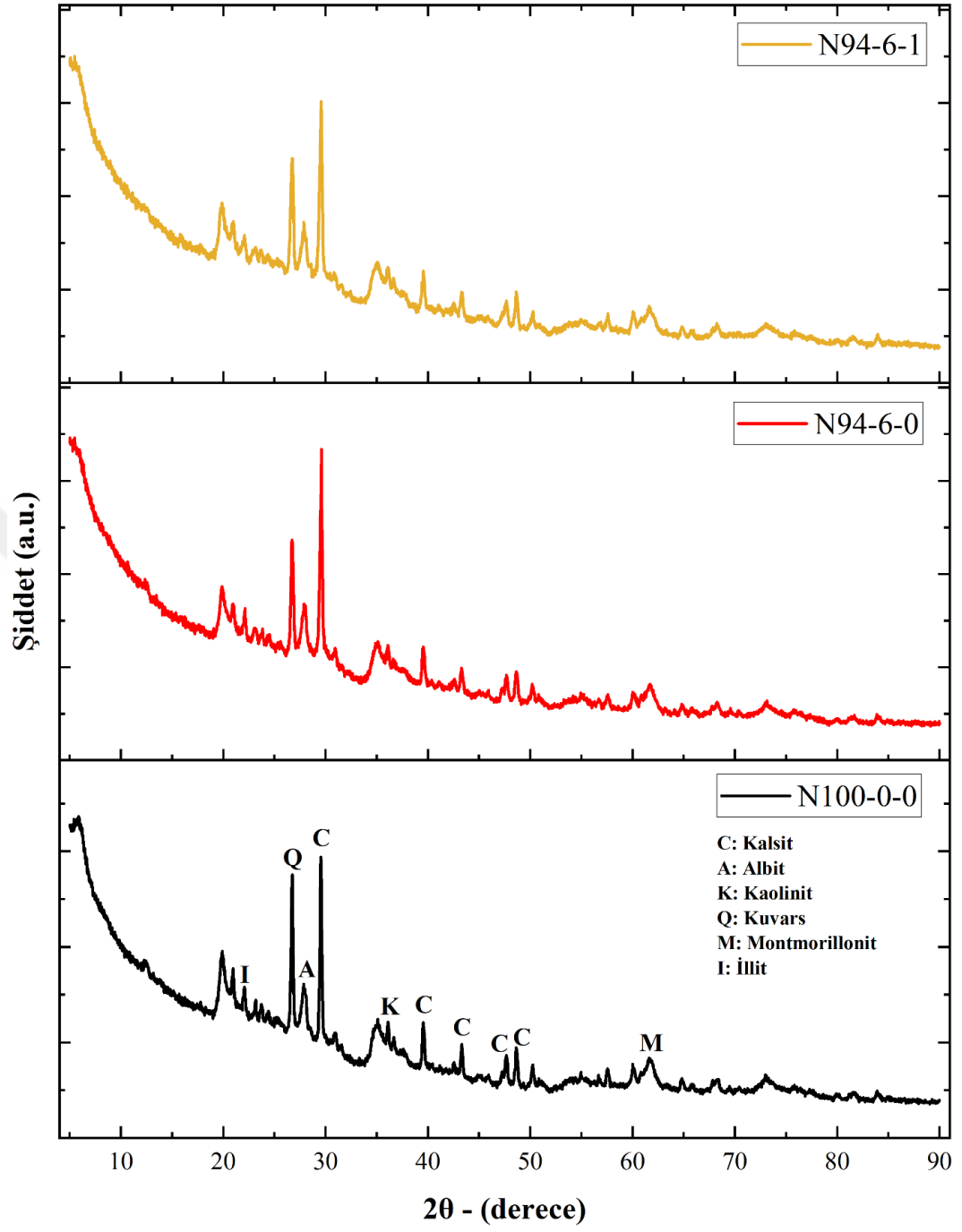


Şekil 4.11. İyileştirilen kil zeminlerin 28 günlük, 5 ve 10 çevrim donma çözülme döngüleri sonrasında elde edilen mukavemet sonuçları. (a) doğal kil-kireç ile hazırlanmış numuneler, (b) doğal kil-biyopolimer ile hazırlanmış numuneler, (c) doğal kil-kireç-biyopolimer ile hazırlanmış numuneler.

4.3. XRD Analiz Sonuçları

Uygulama sonrasında zemin örneklerinin mineralojik birleşimlerinin değerlendirilmesi amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 4.12’de sadece kil, kil-kireç ve kil-kireç-biyopolimer uygulanan numunelerin XRD analiz sonuçları sunulmuştur. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi kil zeminin, montmorillonit, illit, kuvars, kaolinit, albit ve kalsit minerallerinden oluştuğu anlaşılmaktadır (GhavamShirazi ve Bilsel, 2021).

XRD analiz sonuçları incelendiğinde, kireç veya kireç ve sodyum aljinat uygulanan zemin örneklerinin optimum su muhtevasında hazırlanan kil zemin örneğinden fazla bir değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Kil zemine uygulama yapılmasının mevcut mineral piklerinin kaybolmasına neden olmayacağı ancak kuvars pikinin bir miktar baskılanabileceği belirtilmektedir (Bhuvaneshwari vd. 2014). Çalışmamızda elde edilen sonuçlarda da benzer şekilde kireç veya kireç ve sodyum aljinat uygulanan örneklerde kuvars pikinin baskılandığı görülmektedir. Sonuç olarak, kireç veya kireç ve sodyum aljinat uygulanmasının kil zeminin mineralojik yapısında etkili olabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.12. XRD analiz sonuçları

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kireç ve sodyum aljinat biyopolimeri kullanılarak yüksek plastisiteli bir kil zeminin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Deneylerde iyileştirilecek yüksek plastisiteli kil zemine, kil oranının ağırlıkça yüzdesi şeklinde farklı oranlarda kireç (%2, %4 ve %6) ve suyun ağırlıkça yüzdesi olarak sodyum aljinat biyopolimeri (%0,5, %1 ve %1,5) uygulanmıştır. İyileştirilen kil zeminler 7 ve 28 gün süresince kürde bekletilmiştir. Çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla 28 gün kürde bekletilmiş katkısız ve katkılı killer 5 donma-çözülme ve 10 donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Tüm numunelerin belirlenen kür süresi ve donma-çözülme çevrimleri sonrasında mukavemetlerini ölçebilmek amacıyla serbest basınç deneyleri yürütülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Kireç ile iyileştirilen tüm zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri artarken optimum kireç oranının %6 olduğu belirlenmiştir.
- Biyopolimer ile iyileştirilen zemin numunelerinin de serbest basınç mukavemetleri artmış ancak kireç ile iyileştirilen numunelere nazaran bu artış daha düşük olmuştur. Optimum biyopolimer oranı %1,5 olarak belirlenmiştir.
- Kireç ile iyileştirilen numunelere biyopolimer katkısı ile serbest basınç mukavemetler daha yüksek değerlere sahip olmuştur. Kireç ve biyopolimer katkılı zeminlerde ise optimum kireç ve biyopolimer oranlarının sırasıyla %6 ve %1 olduğu tespit edilmiştir.
- Donma-çözülme çevrimleri sonucunda kireç katkısına ilaveten biyopolimer katkısının eklenmesi serbest basınç mukavemet düşüşlerine olumlu etkilerinin olduğu belirlenmiştir.
- Kür süresinin artmasının tüm zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetlerini arttırdığı görülmüştür.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlardan, kil zeminlerin iyileştirilmesinde kireç ile birlikte sodyum aljinat katkısının hem mukavemet sonuçlarına hem de donma-çözülme davranışlarına pozitif etkilerinin olabileceği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak biyopolimer kullanımı ile kil zeminlerin iyileştirmesinde çevreci bir yaklaşım elde edilebilmiş ve kireç katkısının zemin iyileştirmedeki etkinliği artırılabilmiştir.

KAYNAKLAR

- Altun, B. (2019). “Biyopolimer ile etkileştirilmiş kil/mermer karışımlarının bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi. *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 48.
- Bagherinia, M. (2024). “Mechanical, durability, and microstructure of soft clay stabilised with anionic biopolymer”. *Construction and Building Materials*, 417, 135343.
- Bakhshizadeh, A., Khayat, N., & Horpibulsuk, S. (2022). Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01006.
- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R.G. & Gandhi, S.R. “Behaviour of Lime Treated Cured Expansive Soil Composites”. *Indian Geotech J* 44, 278–293 (2014). <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0081-3>.
- Bıçakçı, M. (2022). “Kireç ile orta plastisiteli kil zemin iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 40-43
- Bozyigit, I., Zingil, H. O., & Altun, S. (2023). “Performance of eco-friendly polymers for soil stabilization and their resistance to freeze–thaw action”. *Construction and Building Materials*, 379, 131133.
- Cabalar, A. F., Awraheem, M. ve Khalaf, M. M. (2018). “Geotechnical Properties of a Low-Plasticity Clay with Biopolymer”, *Asce Library*, 30, 04018170-8
- 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.
- Cheng, Z., Geng, X., 2023. “Investigation of unconfined compressive strength for biopolymer treated clay”. *Constr Build Mater* 385, 131458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131458>
- Çiftlikçioğlu, K. (2018). “Donma-çözülme çevrimlerinin uçucu kül ve kireç katkılı killerin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 74,80,98.
- Çimen, Ö. ve Keleş, E. (2020). “Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi”, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 88.
- Dafalla, M. ve Mahmoud, M. (2012). “Study of the Mineralogical Changes of Clay Due to Cement and Lime Addition Using X Ray Diffraction Technique”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3746-3754.
- Dalgıç, A. ve Kavak, O. (2004). “Kil Mineralleri ve Sağlık”, *Dicle Tıp Dergisi*, 31(2), 74.

Geçkil, T., Sarıcı, T. ve Yıldırım, E.S. (2019). “Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 176.

Gencer, G. (2018). “Biyopolimer ile etkileştirilmiş kil/ponza tozu karışımlarının bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 47,50.

Ghabaee, S. (2015). “Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 36-37.

Ghazavi, M., Roustaie, M., (2010). “The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay”. *Cold Reg Sci Technol* 61, 125–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>

GhavamShirazi, S., Bilsel, H. “Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay”. *Acta Geotech.* 16, 827–840 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01060-1>.

Güven, B., Günek, Ş. ve Kurt Albayrak, Z. N.(2023). “Kilin mukavemeti ve donma-çözülme sonrası mukavemeti üzerinde biyopolimer ve lif katkısının etkisinin araştırılması”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 954-956.

Güven, C. (2007). “Yüksek Plastisiteli bir kilde kum miktarının kayma mukavemetine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 14.

Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., Ghani, M.U., Ijaz, Z., Noshin, S., Madni, M.F., 2023. “Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study”. *Environ Earth Sci* 82, 91. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10760-2>

İşçi, Y. (2015). “Farklı kil minerallerinin nanokompozitlere etkisi ve vermiküler/polimer nanokompozitlerinin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18.

Jiang, P., Zhou, L., Zhang, W., Wang, W., Li, N., 2022. “Unconfined compressive strength and splitting tensile strength of lime soil modified by nano clay and polypropylene fiber”. *Crystals (Basel)* 12, 285. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/cryst12020285>

Keskin, S.N., Sungur, A., Akan, R. ve Uzundurukan, S. (2017). “İnce Daneli Zeminlerde Katki Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi.” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 473-478.

Kılınç, Ö. ve Toplan, N. (2023). “Amorf polimerler.”, *ALKU Journal of Science*, 5(3), 131-148.

Kızılçelik, M. M. (2010). “Yüksek plastisiteli bir kilin kireç ile stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 5,9.

Liu, S., Du, K., Wen, K., Armwood-Gordon, C., Li, Y., Navarro, I., & Li, L. (2023). “Stabilization of Expansive Clayey Soil Through Hydrogel for Mechanical Improvements”. *Int J Civ Eng* 21, 1423–1431 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40999-023-00835-3>

Ok, B., Bağrıaçık, B., (2022). “Guar Gum ile İyileştirilen Kil Zeminlerin Donma Çözülme Etkisinde Mukavemet ve Şişme Basınçlarının Araştırılması.”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37, 589–600. <https://doi.org/https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1189181>

Öztoprak, S. (2016). “Zeminlerin iyileştirilmesi: Yöntemlere genel bakış”, *İMO İstanbul Karaköy Şubesi*, 3.

Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B.K., Mohanty, A.N., (2016). “Effect of the Na₂SiO₃/NaOH ratio and NaOH molarity on the synthesis of fly ash-based geopolymer mortar”, in: *Geo-Chicago 2016*. pp. 336–344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784480151.034>

Prusinski, J.R., Bhattacharja, S., (1999). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transp Res Rec* 1652, 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>

Saçak, M. (1998) Polimer Kimyasına Giriş *A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları*, Ankara, 1.

Şengöz, T. E. (2021). “Zemin nedir? Zemin mühendisliği nedir? İdeal zemin nasıl olmalıdır? Bozuk zeminler nasıl anlaşılır? Zemin iyileştirme yöntemleri nelerdir?”, *ResearchGate*, 62.

Taşçı, G., (2011). “Problemli Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi.”, Yüksek Lisans Tezi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği. *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Taytak, B. (2012). “Biyopolimer katkılarının killi zeminlerin kompaksiyon, permeabilite ve kayma dayanımına etkisinin araştırılması.”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 52.

Uzman, E., Öser, C., Kutu, S., Güler, M. ve Çinicioğlu, F. (2003). “Zemin özelliklerinin yerel dağılımının coğrafi bilgi sistemleri ile gösterimi.”, *Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar I. Kongresi*, İstanbul.

Vishakha, K., Kishor, B. ve Sudha, R. (2012). “Natural Polymers – A Comprehensive Review”, *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 3(4), 1607.