



**TOZ POLİMERLE MUAMELE EDİLMİŞ
BENTONİT KİLİNİN SERBEST BASINÇ
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

Tarık KARA

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

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

**TOZ POLİMERLE MUAMELE EDİLMİŞ BENTONİT KİLİNİN SERBEST
BASINÇ DAYANIMININ İNCELENMESİ**

(Investigation of Unconfined Compressive Strength of Bentonite Clay Stabilized with a
Powder Polymer)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tarık KARA

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK

Erzurum

Nisan, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Tarık KARA tarafından hazırlanan “Toz Polimerle Muamele Edilmiş Bentonit Kilinin Serbest Basınç Dayanımının İncelenmesi” başlıklı çalışması 30/04/2025 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: Dr.Öğr.Üyesi R.Kağan AKBULUT

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI

Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

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

.... / / 202..

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

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 Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK danışmanlığında sunulan “Toz Polimerle Muamele Edilmiş Bentonit Kilinin Serbest Basınç Dayanımının İncelenmesi” 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	10	30
Kuramsal Temeller	15	30
Materyal ve Metot	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	5	20
Tezin Geneli	17	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Tarik KARA	Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK
30.4.2025	30.4.2025
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

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr.Öğr.Üyesi Fatih IŞIK’a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince emeği geçen Dr.Öğr.Üyesi R.Kağan AKBULUT’a, ‘FBA-2023-12706’ proje kodlu ‘Silis Dumanı ve Selülozik Elyaf ile Desteklenmiş Toz Polimerin Problemlili Kıl Zeminlerin Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin İyileştirilmesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması’ konulu BAP projesi ve ekibine, tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli eşime ve aileme, yardımlarıyla ve desteğiyle sürecimi kolaylaştıran arkadaşım Abdulkadir KAYNAK’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tarık KARA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ POLİMERLE MUAMELE EDİLMİŞ BENTONİT KİLİNİN SERBEST BASINÇ DAYANIMININ İNCELENMESİ

Tarık KARA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK

Amaç: Bu çalışmada, USCS zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) üzerine, kuru ağırlıkça (%1,%3,%5,%10 ve %20) oranlarında sentetik bir toz polimer (PVA) eklenerek elde edilen numunelerin kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç mukavemetine (1,3,7 ve 28 gün) kür süresiyle etkisi araştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmada öncelikle katkısız ve (%1,%3,%5,%10 ve %20) polimer katkılı numuneler üzerinde düşen koni yöntemi ile kıvam deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Bu verilere göre sıkıştırılan katkısız ve katkılı numuneler, (1,3,7 ve 28 gün) kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutularak mukavemetleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar katkısız numuneyle karşılaştırılmıştır.

Bulgular: 1. ve 2. Karıştırma yöntemleriyle hazırlanan numuneler (1,3,7 ve 28 gün) kür sürelerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinde, katkısız numune 146,91 kN/m² iken, en yüksek dayanımlar 28 günlük numunelerden sağlanmış olup katkısız numuneye kıyasla 1. Karıştırma yönteminde %10 polimerli numunelerde 380,41 kN/m² ile % 158,9 oranında, 2. Karıştırma yönteminde %10 polimerli numunelerde 296,40 kN/m² ile % 101,8 oranında arttığı belirlenmiştir. %20 polimerli karışımlar bazı durumlarda daha yüksek dayanım gösterebilir %10 polimere kıyasla kayda değer artış sağlamadığı ve ekonomik açıdan daha maliyetli olduğu için optimum polimer oranı olarak %10 seçilmiştir. Ayrıca her iki karıştırma yönteminde %10 polimer kullanımıyla kür süresi beklenmeden dayanımın %50'nin üzerinde artırılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Sonuç: Genel olarak, polimer oranının artışıyla likit limitte ve plastisite indisinde düşüş, plastik limitte artış eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, zeminin işlenebilirliğinin arttığını göstermektedir. Ancak, zeminin davranışında ve yapısında olumsuz etkilerin oluşmaması için polimer ilavesi %20'nin üzerine çıkarılmamıştır. Kompaksiyon deneylerinin sonuçlarına göre, polimer oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriğinde azalma görülmüştür. Genel olarak, bentonitik kilin PVA toz polimer ile yüksek uyumlu bir etkileşim sergilediği ve kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetinde olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Geleneksel zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan kimyasal katkı malzemeleri karbon salınımına neden olurken, PVA toz polimer çevre dostu bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Toz formunda olması ve suda kolayca çözünme özelliği sayesinde, hem zemin iyileştirmesinde hem de çevresel etkiler açısından önemli faydalar ve avantajlar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, toz sentetik polimer, serbest basınç, kıvam limitleri.

Nisan 2025, 91 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF BENTONITE CLAY STABILIZED WITH A POWDER POLYMER

Tarık KARA

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fatih IŞIK

Purpose: In this study, the effects of curing duration (1, 3, 7, and 28 days) on the consistency limits, compaction characteristics, and unconfined compressive strength of clay samples obtained by adding synthetic powder polymer (PVA) in proportions of 1%, 3%, 5%, 10%, and 20% by dry weight to high-plasticity clay (CH), classified according to the USCS soil classification system, were investigated.

Method: In this study, consistency tests were initially conducted on untreated samples and polymer-treated samples with polymer ratios of 1%, 3%, 5%, 10%, and 20% using the cone penetration method. Subsequently, standard compaction tests were performed to determine the maximum dry unit weights and optimum water contents of the samples. Based on these results, the untreated and polymer-treated samples were compacted and subjected to unconfined compression tests after curing periods of 1, 3, 7, and 28 days to determine their strength. These results were then compared with those of the untreated samples.

Findings: In unconfined compression tests conducted on samples prepared using the 1st and 2nd mixing methods with curing periods of 1, 3, 7, and 28 days, the unconfined compressive strength of the untreated sample was 146.91 kN/m². The highest strengths were obtained from the 28-day cured samples. Compared to the untreated sample, the strength of samples with 10% polymer increased by 158.9% to 380.41 kN/m² in the 1st mixing method and by 101.8% to 296.40 kN/m² in the 2nd mixing method. Although mixtures with 20% polymer showed slightly higher strength in some cases, they did not provide a significant improvement compared to 10% polymer and were more costly, making 10% the optimal polymer ratio. Additionally, it was observed that using 10% polymer in both mixing methods allowed for an increase in strength of over 50% without requiring a curing period.

Results: In general, an increase in the polymer ratio has been observed to cause a decrease in the liquid limit and plasticity index, while showing a tendency for an increase in the plastic limit. This indicates an improvement in the workability of the soil. However, to avoid adverse effects on the soil's behavior and structure, the polymer addition was not increased beyond 20%. According to the results of compaction tests, as the polymer ratio increases, both the maximum dry unit weight and optimum water content decrease. Overall, bentonitic clay has demonstrated a highly compatible interaction with PVA powder polymer, yielding positive results in unconfined compressive strength depending on the curing duration. While traditional soil improvement techniques using chemical additives contribute to carbon emissions, PVA powder polymer stands out as an environmentally friendly alternative. Its powdered form and easy solubility in water provide significant benefits and advantages both in soil stabilization and in terms of its environmental impact.

Keywords: Bentonite, powder synthetic polymer, compressive strength, consistency limits

April 2025, 91 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 DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Amacı	2
KURAMSAL TEMELLER.....	3
İnce Daneli Zeminler.....	3
Siltler	3
Killer	3
Zemin İyileştirilmesi	6
Derin iyileştirme yöntemi	7
Yüzeysel iyileştirme yöntemi.....	7
Polimerler.....	10
Doğal polimerler	11
Sentetik polimerler	14
Polimer – zemin ilişkisi.....	20
Zemin uygulamalarında kullanılan bazı polimerler	22
Literatür özetleri.....	26
MATERYAL VE YÖNTEM	36
Materyal	36
Bentonit kili.....	36
Polimer	37
Numune hazırlama	38
Yöntem.....	42
Standart proctor kompaksiyon deneyi.....	42

Özgöl Ağırlık Deneyi.....	43
Hidrometre deneyi.....	43
Kıvam limitleri deneyleri	44
Likit limit (düşen koni) deneyi.....	44
Plastik limit deneyi.....	45
Serbest basınç deneyi	45
Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	47
Temas açısı.....	47
Sekant modülü.....	48
Deformasyon indeksi	48
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	50
Kıvam Limitleri Deney Sonuçları	50
Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	51
Özgöl Ağırlık Deneyi Sonuçları	54
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	54
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları.....	61
Temas Açısı Analiz Sonuçları.....	62
Sekant Modülü Sonuçları.....	64
Deformasyon İndeksi Sonuçları.....	65
SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA	71
ÖZ GEÇMİŞ.....	78

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kil Minerallerinin Karşılaştırmalı Özellikleri	5
Tablo 2. Polimer Çeşitleri	10
Tablo 3. Polimerlerin Kaynaklarına göre Sınıflandırılması.....	11
Tablo 4. Zemin İyileştirme Çalışmalarında Kullanılan Polimerler	21
Tablo 5. Kum-Xanthan Gum Katkısının Zamana göre Kayma Mukavemeti Açısı	27
Tablo 6. Kum-Polimer Kayma Mukavemeti Açısı Değerleri	28
Tablo 7. Katkı Oranları	29
Tablo 8. Kil Numunelerin Kür Sürelerine göre Basınç Dağılımları	29
Tablo 9. Optimum Su İçeriği-Maksimum Kuru Birim Ağırlık	33
Tablo 10. Yüzdelik Serbest Basınç Değişimleri	33
Tablo 11. Bentonit Kiline ait XRF Sonuçları	36
Tablo 12. Polimere ait Bazı Fiziksel Özellikler.....	37
Tablo 13. Numune Katkı Oranları	38
Tablo 14. Kullanılan Numunelerin İsimlendirme Sistematiği Örneği.....	41
Tablo 15. Katkisız ve Polimer Katkılı Numunelerin Kıvan Limitleri Sonuçları.....	50
Tablo 16. Kompaksiyon Parametreleri	53
Tablo 17. Serbest Basınç Sonuçları ve % Değişimler (a) 1. Karıştırma Yöntemi, (b) 2. Karıştırma Yöntemi.....	55
Tablo 18. Temas Açısı Ortalama Değerleri	63
Tablo 19. Polimer Oranlarına Göre Sekant Modülü.....	64
Tablo 20. Polimer Oranlarına Göre Deformasyon İndeksi	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kil mineral yapısı (Tetrahedron ve Oktahedron)	4
Şekil 2. Kil minerallerinin oluşumu ve yapısı	5
Şekil 3. Zemin iyileştirme yöntemleri	7
Şekil 4. Uçucu kül ile zemin iyileştirmesi	9
Şekil 5. Kireç ile iyileştirme yönteminin yol yapımında uygulanması	9
Şekil 6. Çimento ile karıştırma yönteminin kullanıldığı alan	10
Şekil 7. Monomerlerden polimerizasyon tepkimesiyle polimer molekülü oluşumu	10
Şekil 8. (a) Hevea ağacından akan lateks sıvısı , (b) biyopolimer malzeme olan örümcek ipeği	12
Şekil 9. Polipropilenin kimyasal formülasyonu	16
Şekil 10. Polipropilenlerin moleküler yapısı	16
Şekil 11. Polipropilen lif	17
Şekil 12. Polimer- kil danelerinin morfolojisi	20
Şekil 13. Toz polimer	26
Şekil 14. Farklı oranlarda PMD katkılı kil numunelerin kür sürelerine göre basınç dayanımı.	31
Şekil 15. Konsolidasyon oturma sonuçları (a) 1 gün, (b) 7 gün, (c) 14 gün, (d) 21 günlük . .	35
Şekil 16. Bentonit kiline ait görsel	36
Şekil 17. Polivinilalkol (PVA) toz polimere ait görsel	37
Şekil 18. Karıştırma yöntemleri görseli (a) Yöntem-1, (b) Yöntem-2	38
Şekil 19. Karışım hazırlama (a) karıştırma, (b) homojen kıvam	39
Şekil 20. Kompaksiyon deney aleti	39
Şekil 21. Silindirik numune	40
Şekil 22. Kırılma işlemine ait görseller	40
Şekil 23. Sridharan kompaksiyon deneyi	43
Şekil 24. Özgül ağırlık deneyi	43
Şekil 25. Hidrometre deneyi	44
Şekil 26. Konik penetrasyon deneyi	44
Şekil 27. Plastik limit deneyine ait görseller	45
Şekil 28. (a) Yöntem-1, (b) Yöntem-2	46
Şekil 29. Serbest basınç deneyi görseli	46

Şekil 30. Katkısız ve polimer katkılı bentonit numunelerinin (a) likit limit ve (b) plastik limit deney sonuçları	50
Şekil 31. Polimer artışının kıvam limitlerindeki değişimi	51
Şekil 32. Kompaksiyon eğrileri.....	52
Şekil 33. Katkısız ve katkılı bentonit numunelerinin kompaksiyon (a) maksimum kuru birim hacim ağırlık ve (b) optimum su içeriği deney sonuçları.....	53
Şekil 34. Kür süresine göre serbest basınç sonuçları (a) 1. Karıştırma yöntemi, (b) 2. Karıştırma yöntemi	56
Şekil 35. Serbest basınç deneyi sonrası numune görseli	58
Şekil 36. Gerilme - deformasyon eğrileri- 1. Yöntem (a) 0 kür, (b) 1 kür, (c) 3 kür, (d) 7 kür, (e) 28 gün kür	59
Şekil 37. Gerilme - deformasyon eğrileri- 2. Yöntem (a) 0 kür, (b) 1 kür, (c) 3 kür, (d) 7 kür, (e) 28 gün kür	60
Şekil 38. ‘M2P10K28’ numunesinin SEM görüntüsü	61
Şekil 39. ‘SEM-EDX’ kil minarelinin kimyasal birleşim analizi	62
Şekil 40. 2. Karıştırma yöntemine göre 28 günlük temas açısı (a) %0 polimer, (b) %1 polimer (c) %3 polimer, (d) %5 polimer, (e) %10 polimer, (f) %20 polimer,.....	63
Şekil 41. 2. Karıştırma yöntemine göre 3d sekant modülü görseli	64
Şekil 42. 2. Karıştırma yöntemine göre polimer oranlarının deformasyon indeksi	66
Şekil 43. Serbest basınç deneyi sonrası (a) katkısız numune (%0 polimer), (b) %3 polimer, (c) %10 polimer, (d) %20 polimer	66

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

A_f	: Kırılma anındaki alan
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
MH	: Yüksek plastisite silt
P_I	: Plastisite indisi
P_{max}	: Maksimum yük
SC	: Killi kum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
W	: Su muhtevası
L_L	: Likit limit
W_{opt}	: Optimum su içeriği
P_L	: Plastik limit
γ_{kmaks}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_s	: Dane birim hacim ağırlık
q_u	: Serbest basınç mukavemeti

GİRİŞ

Zayıf zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, laboratuvar koşullarında farklı katkı malzemelerinin bu zeminlere eklenmesi ve zeminlerin geoteknik parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalar, problemli zeminlerin mühendislik uygulamalarında daha güvenli ve dayanıklı hale getirilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Zayıf zeminler, düşük mukavemet ve taşıma gücüne sahip, boşluklu, şişebilen ve sıkışabilir özelliklere sahip zeminlerdir. Bu zeminlerde metodolojik olarak, zeminin eksik özelliklerinin giderilmesi amacıyla katkı malzemeleri eklenmesi ve sıkıştırma gibi yöntemler kullanılarak iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, deneysel verilerle desteklenerek zeminin güçlendirilmesi ve daha sağlam hale getirilmesidir. Sahada yetersiz zemin koşullarıyla karşılaşıldığında, farklı çözüm seçenekleri düşünülebilir. Bu seçenekler arasında inşaat alanının değiştirilmesi, zeminin değiştirilmesi veya tasarımın mevcut zemin koşullarına uygun hale getirilmesi yer almaktadır. Bu yöntemler genellikle pahalı ve zaman alıcı olduğundan, mevcut zeminin iyileştirilmesi genellikle tercih edilmektedir (Özaydın 2012).

Zemin ve temel mühendisleri, zeminlerin iyileştirilmesi sürecinde neyin, ne kadar ve nasıl iyileştirileceği sorularına yanıt ararlar. Bu süreç, geoteknik açısından çok sayıda parametrenin dikkate alınmasını gerektiren kapsamlı bir konudur. İyileştirme çalışmalarında dikkate alınması gereken ana parametreler vardır. Bunlar; zemin türü (ince yada kaba daneli), yerel YASS koşulları, durabilite (Donma-çözülme, aşınma-erozyon, ıslanma-kuruma, nem), permeabilite (hidrolik iletkenlik), zeminlerin kıvam parametreleri, mukavemet parametreleri (UCS, kayma dayanımı, üç eksenli), hacimsel stabilite (Serbest basınç, rötre, deformasyon) ve oturma olarak en genel hali sıralanabilir. Bunların dışında ekonomik faktörler, iyileştirme yönteminin uygulama süresi, yöntemin güvenilirliği ve iyileştirmenin etkinliği bulunmaktadır. Bu parametreler, zemin iyileştirme çalışmalarının planlanmasında ve uygulanmasında kritik rol oynar. Zemin iyileştirilmesi başlıca; zeminin mekanik iyileştirilmesi ve zeminin kimyasal iyileştirilmesi olarak iki ana grupta toplanabilir. Son grupta yer alan kimyasal iyileştirme teknikleri konusundaki araştırmalar son yıllarda bu yöntemde kullanılan geleneksel malzemelerin (çimento, uçucu kül, kireç vb.) yerine daha fazla sonuç odaklı yeni malzemelerin (fiber, atıklar, polimerler vb.) kullanımına doğru yoğunlaşmıştır. Bu malzemelerin başını ise yaklaşık son 10 yıllık bir süreçte polimerler çekmektedir.

Zayıf ve killi zeminlere uçucu kül gibi kimyasal katkıların ilavesi ve uygun kür süresinde bekletilmesi, zeminin taşıma gücünü artırmak için etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Bu katkı malzemesi, en uygun kür süresinde bekletildiğinde yüksek dayanım sağlayabilmektedir. Ayrıca, kumlu veya siltli zayıf zeminlere çimento, polimer gibi farklı katkı malzemelerinin uygun oranlarda ilavesi, zeminin mukavemetini ve akıcılığa karşı direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Zayıf zeminlerin optimum su muhtevasında kompaksiyon yöntemiyle sıkıştırılması ve konsolidasyon deneyinin uygulanması, zemindeki boşluk oranının azalmasına ve taşıma gücünün artmasına neden olmaktadır. Bu deneysel çalışmaların sonuçları, zemin iyileştirme yöntemleri arasında önemli bir yer tutmaktadır (Soysal ve Dehghanian 2021).

Son yıllarda polimerler, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmaya başlanmış ve mukavemet artışı, geçirimsizlik özelliklerinde iyileşme, sıvılaşma riskinde azalma ve hava koşullarına dayanıklılığın artması gibi iyileştirmeler sağlamıştır (Camberfort 1977; Moustafa vd 1981; Ajayi vd 1991; Ohama 1995; Al Khanbashi ve Abdalla 2006; Zandieh ve Yasrobi 2010; Anagnostopoulos ve Papaliangas 2012; Naeini vd 2012; Ajalloein vd 2013; Anagnostopoulos vd 2013; Mohammed ve Vipulanandan 2013; Saygılı 2018). Ancak, polimerlerin ısı ve nem ile kürlenmesi, çeşitlilikleri ve fiyat farklılıkları (patentli ürünler) nedeniyle ekonomik ve uygun malzeme seçimi konusunda zorluklar yaşanabilmektedir.

Polimerlerle muamele edilen zeminlerin beklenen özelliklerinin aynı zamanda mühendislik özellikleri ve performansındaki değişiklikleri yöneten temel mekanizmaların daha eksiksiz anlaşılmasını sağlamak amacıyla polimerler kullanılarak zemin iyileştirme, araştırma alanında büyük ilgi görmüştür. Zemin iyileştirmesinde polimerik malzemelerin kullanım çeşitliliği her geçen gün artmaktadır. Zemin iyileştirilmesinde kullanılan polimer katkının, zeminle uyum sağlayabilmesi gerekmektedir. Kullanılan polimer katkılar, bazı zeminlerde olumlu sonuç verebiliyor iken, başka zeminlerde ise olumsuz sonuçlar gözlemlenmektedir (Ateş 2013).

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı bentonit tipi yüksek plastisiteli kil bir zeminin toz polimer kullanılarak serbest basınç dayanımının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla killi zeminlere polimer katkısı belli oranlarda karıştırılıp, katkısız ve katkılı numuneler elde edilmiş ve geoteknik özellikleri incelenmiştir. Yapılacak çalışmada serbest basınç dayanımının artışı irdenecek olup zemin dayanımının olumlu yönde iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

İnce Daneli Zeminler

Zemin daneleri birbirinden farklı özelliklerde ve boyutlarda olabilir. Dane boyutları zeminlerin, şişme, sıkışma, konsolidasyon ve mukavemet gibi birçok geoteknik davranışını etkilemektedir.

Zeminler, dane boyutuna göre sınıflandırıldığında; çakıl, kum, silt ve kil olmak üzere dört farklı zemin sınıfından bahsedilebilir. Bunlar da, çakıl ve kum iri daneli ;silt ve kil ince daneli zemin olarak ayrılır. Burada ince daneli zeminlerden bahsedilecektir.

Siltler

Silt, genellikle 0,002 mm ile 0,1 mm arasında değişen alüminyum silikatlardan oluşan kumdan küçük, kilden büyük taneli malzemeye verilen addır. Bu tür malzeme genellikle akarsuların taşıdığı alüvyonların bir parçası olarak bulunur. Silt, içindeki su miktarına bağlı olarak akışkanlık kazanabilir.

Killer

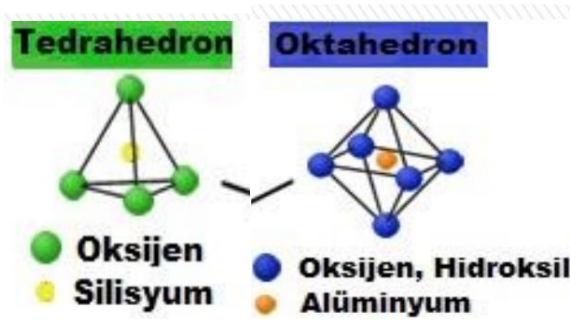
Killer, kayaların aşınması sonucu oluşan, gözle görülemeyecek kadar küçük çapta kristalimsi yapıdaki malzemelerdir. Boyutları genellikle 0,002 mm ve daha küçüktür ve hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan meydana gelirler. Killer, fiziksel ve kimyasal ayrışma süreçlerinin sonucunda oluşurlar. Killer yalnızca elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gözlemlenebilirler (Önalp 2007).

Kil minerallerinin yapısı

Kil minerali yapısında temel olarak iki kristal yapı bulunmaktadır. Şekil 1'de de görüldüğü gibi birincisi silika tetrahedron, ikincisi ise alümina oktahedron'dur. Silika tetrahedron, merkezde bir silisyum iyonu ve köşelerde oksijen iyonlarından oluşan düzgün dörtyüzlü bir yapıya sahiptir. Alümina oktahedron ise merkezde bir alüminyum iyonu ve köşelerde oksijen iyonları bulunan düzgün sekizyüzlü bir yapıya sahiptir. Bu temel yapılar, katyonların yer değiştirmesiyle farklı kil minerallerinin oluşmasına olanak tanır, ancak kristal yapıları değişmez (Taşçı 2011).

Kil yapısında, feldspat, kuvars ve kalsit gibi maddeler de bulunabilir. Alümina veya magnezyum oktahedron yapıları, merkezde alüminyum iyonu ve köşelerde oksijen ya da hidroksil iyonları içeren düzgün sekizyüzlü şeklindedir. Bu düzgün sekizyüzlülerin yüzeyleri

aynı düzlemde kalacak şekilde birleşmesiyle "oktahedron tabakası" veya diğer adıyla "alümina tabakası" oluşur (Aysu 2020).



Şekil 1. Kil mineral yapısı (Tetrahedron ve Oktahedron) (Anonim 2024)

Kil minerallerinin sınıflandırılması

Kristal yapılarına göre yaygın bulunan kil mineralleri;

Montmorillonit

Montmorillonit grubu killeri, tabakalar arasında katyonlarla kurulan van der Waals bağlarıyla bir arada tutulur, bu bağlar oldukça zayıftır. Bu nedenle, kil içine sızmaya çalışan su, zayıf tabaka arası bağları kolayca aşarak kil içine nüfuz edebilir. Montmorillonit killeri, tabakalar arasında kendi ağırlığının 20 katı kadar suyu hapsedebilme özelliğine sahiptirler. Özellikle bentonit kili, tabakalar arası zayıf bağlar sayesinde dışarıdan aldığı su oranını %500'e kadar artırabilir. Montmorillonit killeri, yüksek miktarda suyu hapsedebilme kapasiteleriyle bilinir ve bu özellikleri sayesinde su geçirimsiz tabaka olarak kullanılmaktadır. Bu özellikleri, çöp depolarında, sondaj çamurlarında, endüstriyel atıkların bertarafında ve maden işletme sahalarında tercih edilmelerini sağlamaktadır (Bosbıyık 2020).

İlit

Kil minerallerinin genel yapısı, montmorillonit grubu killere benzerlik gösterir. Montmorillonit grubu killeri ile aynı yapı özelliğine sahip olan illitler, tabakaları arasına giren potasyum iyonları sayesinde daha sağlam bir bağ yapısına sahiptirler. Bu durum, illitlerin içeri sızmaya çalışan suya karşı direncini artırır. Tabakalar arasına giremeyen su, bu bağları kıramadığı için kil içinde şişme potansiyeli oluşturamaz. İlitler, bu özellikleriyle montmorillonit grubu killer gibi şişme eğilimi göstermezler (Bosbıyık 2020).

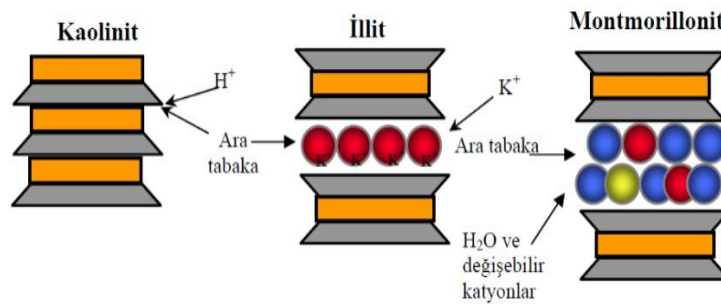
Kaolinit

Kaolinit kilinin, illit ve montmorillonit kiline göre daha büyük tane büyüklüğü vardır. Bu nedenle kohezyon, plastisite ve şişme gibi özellikleri diğer kil türlerine göre daha azdır. Kaolinit taneleri, diğer kil kristallerine kıyasla daha büyük olduğundan içsel sürtünme açısı da daha yüksektir. Kaolinit kilinin özgül yüzey alanı yaklaşık olarak 10 m²/gr, özgül ağırlığı ise 2.60-2.68 gr/cm³ arasında değişmektedir (Çetin 2003).

Yaygın olarak kullanılan kaolinit, illit ve montmorillonit kil minerallerinin oluşumu ve yapısı Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca bu minerallerinden alınan numunelerinin karşılaştırmaları Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Kil Minerallerinin Karşılaştırmalı Özellikleri (Mitchehell 1993)

Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Take Boyuntu (µm)	0.01-1.0	0.02-2.0	0.5-5.0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m ² /g)	70-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m ² /g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite indisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektirik Yükü	0.5-0.9	1.0-1.5	0
Özgül Gravite	2,35-2,7	2.6-3.0	2.6-2.8
Tabakalar arası mesafe (nm)	1.0-2.0	1.0	0,7
Tabakalar arası bağ	Van der Waal's bağları (zayıf çekim kuvveti)	Potasyum iyonları	Hidrojen



Şekil 2. Kil minerallerinin oluşumu ve yapısı (Erdil vd 2018)

Killerin bazı mühendislik özellikleri

Geniş ölçekli alan çalışmalarında, zeminin mühendislik özelliklerini tanımak ve bu özelliklerin anlaşılması, alanın geoteknik karakterinin anlaşılmasında önemlidir. Özellikle killerin geoteknik özellikleri; plastisite, kayma mukavemeti (c , ϕ), serbest basınç mukavemeti, renk, rötre, şişme özellikleri (serbest şişme yüzdesi, şişme basıncı), katyon değişim kapasitesi, sinterleşme, yağlılık ve yağsızlık gibi başlıklar altında incelenebilir (Yalvaç 2011).

Killerin kullanım alanları

Kil mineralleri, tuğla, kiremit, yer karosu, fayans, kanalizasyon borusu, dolgu malzemeleri, sondaj, kaplamalar (örneğin asfalt), çömlek, çini, cam, porselen, döküm sanayi, kâğıt, tarım, petrol, ilaç, kimya sanayi, kozmetik ürünler, polyesterler, tekstil, boya ve renk giderici maddeler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir (Şengöz 2006).

Zemin İyileştirilmesi

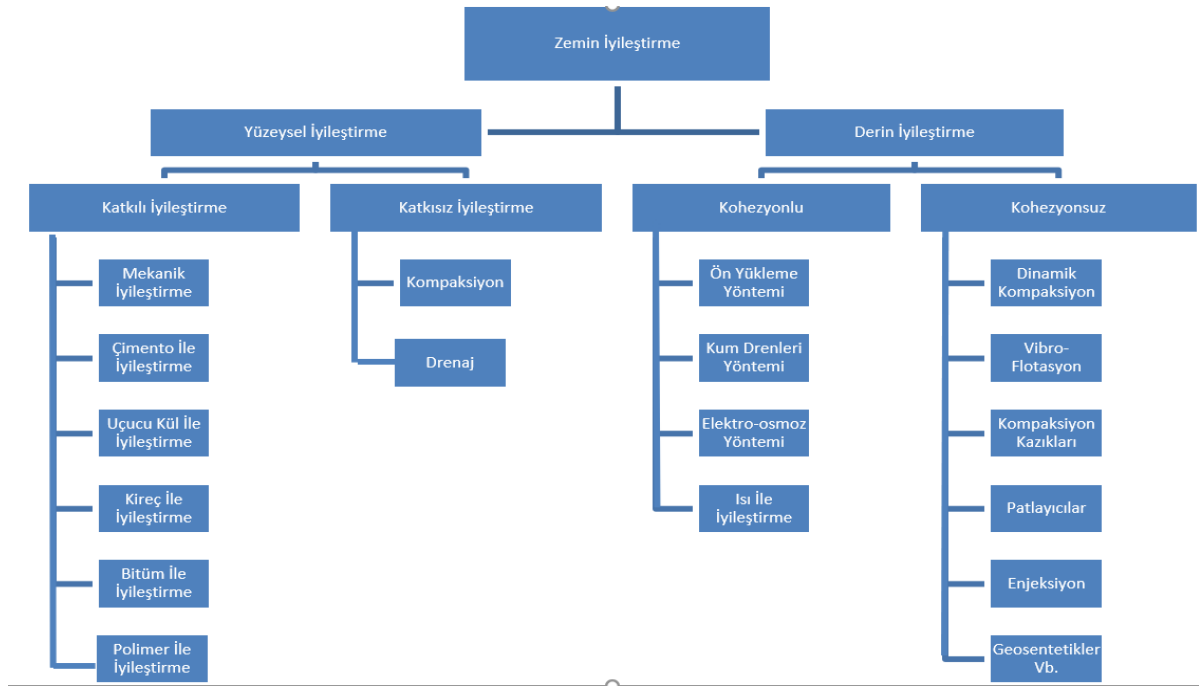
Zeminler taneli ve boşluklu maddeler topluluğudur. Zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler. İnşaat sahasının değiştirilmesi veya uygun özelliklere sahip olan bir zeminle, mevcut zeminin değiştirilmesi teknolojik ve ekonomik açıdan uygun olmayabilir. Bu durumlarda zemin iyileştirme, derin temellerden daha ekonomik bir çözüm olabilir ve ayrıca zaman avantajı da sağladığı için tercih edilen bir yöntemdir (Şahbaz 2020).

Öntürk (2011) tarafından belirtildiğine göre, zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapılarının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri kullanılarak dış kuvvetlere karşı dayanıklı hale getirilmesi mümkündür.

Zemin iyileştirme, zemin boşluklarının çeşitli katkılarla doldurulması yoluyla zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirme sürecidir. Bu süreç genellikle zeminin kayma mukavemetini artıran, ancak geçirgenlik ve sıkışma özelliklerini azaltan işlemler için kullanılır (Çetin 2011).

Ayrıca iyileştirme sonrası zeminlerde; durabilite artar, şişme-büzülme azalır, gerilme-deformasyon modülü artar, mukavemet-taşıma gücü artar, yük altında oturmalar azalır, gerilmeler altında şekil değiştirmeler azalır, donma-çözünme sonucunda olumsuz kimyasal ve fiziksel değişimler önlenir. Depremler ve tekrarlı yükler altında mukavemet ve rijitlik kaybı potansiyeli azalır, zeminin sıvılaşma potansiyelini azalır (Şengöz 2021).

Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil-3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Zemin iyileştirme yöntemleri (Uzuner 2013)

Zemin iyileştirmenin temel amacı, zeminin mühendislik özelliklerini fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanarak taşıma gücünü artırmak ve oturma gibi olumsuz etkileri azaltmaktır. Zemin iyileştirme yöntemlerinde, zeminin özellikleri, çevresel koşullar, uygulanacak yük tipi, maliyet, projenin gereksinimleri ve büyüklüğü, zaman kısıtlaması ile bölgenin jeolojik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine bağlı olarak yüzeysel ve derin iyileştirme olarak iki kategoriye ayrılmaktadır.

Derin iyileştirme yöntemi

İyileştirilecek zemin derinliğinin fazla olduğu durumlarda yüzeysel iyileştirme yöntemleri yetersiz kaldığından derin zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Derin zemin iyileştirme yöntemleri, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve yer değiştirmeyi azaltmak amacıyla kullanılan geoteknik mühendislik teknikleridir. Bu yöntemler, liman, köprü, baraj, kanalizasyon, bina, ve havaalanı gibi çeşitli inşaat projelerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Öne çıkan derin zemin iyileştirme yöntemleri arasında kum drenler, önyükleme, elektro-osmoz, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon kazıkları, vibro kompaksiyon, prefabrik drenler, patlatma, taş kolon ve jet grout gibi teknikler yer almaktadır.

Yüzeysel iyileştirme yöntemi

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri, zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla katkılı veya katkısız zeminin ince tabakalar halinde serilmesi, drenaj uygulanması ve kompaksiyon

yöntemiyle sıkıştırılması gibi tekniklerden oluşur. Katkılı iyileştirme yönteminde zemine, kireç, çimento, uçucu kül, bitüm , kimyasal atıklar, endüstriyel atıklar ve polimer gibi malzemeler karıştırılarak, uygun yöntemler kullanılarak zeminin taşıma kapasitesi arttırmak, oturmayı azaltmak, su geçirgenliğini kontrol etmek ve şişme gibi sorunları önlemek için kullanılmaktadır.

Katkısız iyileştirme

Kompaksiyon

Mekanik araçlar kullanılarak zemin boşluklarının azaltılması ve zemin tanelerinin birbirlerine daha yakın yerleşmesiyle zemin içinde sıkı bir yerleşim oluşturulması işlemine kompaksiyon denir. Bu süreç dış kuvvetlerin etkisiyle gerçekleşir ve zamana bağlı değildir. Sıkıştırma teknikleri çok sık başvurulanan yöntemlerden biridir.

Kompaksiyonun sonucu boşluk oranı azaldığı için geçirimsizlik ve zeminde sonradan olabilecek oturmalar azalır, zeminin taşıma gücü artar. Birim hacim ağırlığı artar ve mühendislik özellikleri iyileşmiş olur.

Drenaj

Bu yöntemde, yer altı suyunun düşürülmesi amacıyla zeminlerde hendekler açılır ve suyun bu hendeklerde toplanması sağlanır. Yer altı suyunun hendeklerde toplanabilmesi için eğimli drenaj sistemleri kullanılır; bu sistemler arasında delikli borular, granüle zeminler, jeotekstil tabakalar gibi çeşitli yöntemler bulunur. Drenaj sistemine gelen su, eğim vasıtasıyla hazırlanan hendeklere yönlendirilir ve buradan su pompaları veya doğal yollarla zeminden uzaklaştırılır (Gücek 2011).

Katkılı iyileştirme

Uçucu kül ile iyileştirme

Uçucu kül, kömürün yanması sırasında oluşan ve genellikle termik santrallerin atık ürünü olan bir malzemedir. Şekil 4’de görüldüğü gibi uygulama yapılırken uçucu küller, özellikle kireç ile nemli bir ortamda reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanabilen puzolanik bir özelliğe sahiptirler. Bu teknikte, uçucu kül yalnız başına değil, belirli bir oranda kireç ile birlikte kullanılır. Tipik olarak, karışımda uçucu kül %10 ile %35 arasında, kireç ise %2 ile %10 arasında bulunur. Bu kombinasyon (uçucu kül, kireç ve su), zamanla dayanım kazanabilen katkılı zeminlerin oluşturulmasına olanak tanır, çünkü uçucu küllerin puzolanik özellikleri bu süreçte etkin rol oynar.



Şekil 4. Uçucu kül ile zemin iyileştirmesi (Çetinkaya 2012)

Kireç ile iyileştirme

İnce daneli zeminlere kireç katılması, zeminin plastisitesini azaltır çünkü kireç ile zemindeki kil mineralleri arasında bir çeşit çimentolanma etkisi oluşur. Bu etkileşim sonucunda zeminin mukavemeti artar (Özaydın 2005).

Kireç ile zemin iyileştirmesi, kullanım amacına bağlı olarak farklı düzeylerde uygulanabilir. Şekil 5’de yapılan uygulamada görüldüğü gibi düşük miktarda iyileştirme genellikle geçici yollar veya yapı inşaatlarında kullanılan yürüme platformları gibi durumlar için yeterlidir. Yüksek miktarda iyileştirme ise, zeminin kalıcı olarak iyileştirilmesini sağlamak amacıyla testler, tasarım ve uygun uygulama teknikleriyle desteklenir. Özellikle karayolu inşaatlarında kireç ile zemin iyileştirmesi sıkça tercih edilmektedir (Can 2017).



Şekil 5. Kireç ile iyileştirme yönteminin yol yapımında uygulanması (Şahbaz 2020)

Çimento ile iyileştirilme

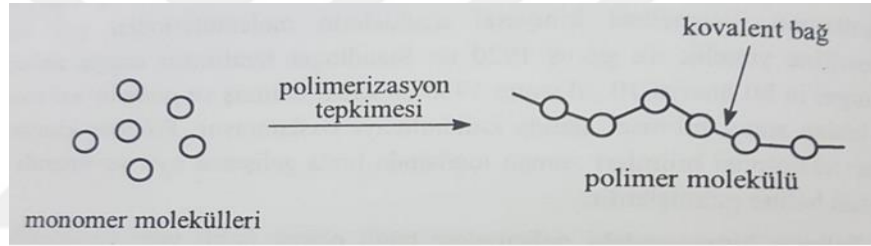
Çimento ile enjeksiyon işlemi, kireç ile enjeksiyon işlemindeki gibi çimento-su karışımı (1/10) kullanılarak Portland çimentosuyla yapılır. Şekil 6’da görüldüğü gibi hazırlanan karışım daha sonra yüksek basınçlı ekipmanlarla, problemlili zemin tabakalarına enjekte edilir. Enjeksiyon işlemi sonucunda problemlili zemin tabakalarındaki hidrolik iletkenlik azalırken, taşıma gücü ve mukavemet artar (Das 2007).



Şekil 6. Çimento ile karıştırma yönteminin kullanıldığı alan (Burgos vd 2007)

Polimerler

Polimerler, küçük moleküllerin ardışık olarak birleşmesiyle oluşan büyük moleküllerdir. Bu birleşme sürecine polimerleşme denir. Şekil 7'de gösterildiği gibi, polimerlerin yapı taşları en küçük birimler olarak adlandırılan monomerlerdir.



Şekil 7. Monomerlerden polimerizasyon tepkimesiyle polimer molekülü oluşumu (Saçak 2005)

Polimer çeşitleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Aynı tür monomerlerin birleşmesiyle oluşan polimer zinciri homopolimer olarak adlandırılır. İki farklı tür monomerin birleşmesi sonucu oluşan zincire ise kopolimer denir. Üç farklı tür monomerin birleşmesiyle oluşturulan yapıya ise terpolimer adı verilir (Uysal 2014).

Tablo 2. Polimer Çeşitleri (Uysal 2014)

POLİMER			
PLASTİKLER		ELASTOMERLER	ELYAF
Termoplastikler	Termosetler	Doğal Kauçuk	Poliamid
Polietilen	Polyester Reçine	Stiren-Bütadien	Polyester
Polistiren	Üre-formaldehit	Polibütadien	Polipropilen
Polipropilen	Fenolformaldehit reçine	Polikloropren	Selülöz
Poliamid 6	Epoksi reçineler	Butil Kauçuk	Yün

Polimerler, kaynaklarına göre doğal ve yapay (sentetik) olmak üzere iki ana grupta toplanır. Her iki grup da yapılarına göre alt gruplara ayrılır. Ayrıca, doğal polimerlerden çeşitli işlemler sonucu elde edilen yarı-sentetik polimerler de mevcuttur (Ghabaee 2015). Tablo 3, polimerlerin kaynaklarına göre detaylı sınıflandırmasını içermektedir.

Tablo 3. Polimerlerin Kaynaklarına göre Sınıflandırılması (Karaca 2018)

POLİMERLER		
Doğal Polimerler	Sentetik Polimerler	Yarı- Sentetik Polimerler
DNA, RNA, Proteinler	Polietilen	Rejenere Selüloz ve türevleri
Selüloz ve türevleri	Polipropilen	Modifiye Nişasta
Nişasta	Poli (etilen teraftalat)	
Agaroz	Polistiren	
Doğal kauçuk	Poli (vinil klorür)	

Sentetik ve doğal polimerler, günlük yaşamda her alanda karşımıza çıkarak önemli bir rol oynarlar. Polimerler, sentetik plastiklerden (örneğin polistiren) doğal biyopolimerlere (örneğin DNA ve proteinler) kadar geniş bir çeşitlilik gösterirler, bu da biyolojik yapı ve işlev için temel öneme sahiptir. Hem doğal hem de sentetik polimerler, birçok küçük molekülün polimerizasyonu ile oluşturulurlar, bu moleküller monomerler olarak adlandırılır. Polimerler, küçük molekül bileşiklere göre daha büyük moleküler kütleyle sahiptirler ve bu özellikleri, sertlik, yüksek elastisite, viskoelastisite ve kristal yerine amorf veya yarı kristal yapılar oluşturma eğiliminde olmaları gibi benzersiz fiziksel özellikler sağlarlar.

Doğal polimerler

Doğal polimerler, doğada kendiliğinden oluşan ve insanlar tarafından çeşitli alanlarda uzun süredir kullanılan polimer türleridir. Şekil 8'de gösterildiği gibi, doğal polimerler çok çeşitlidir. Bitki ve ağaçların temel yapı taşı olan selüloz, doğada en bol bulunan polimerdir ve pamuğun temel bileşenidir. Genellikle doğal polimerler, canlıların yapılarında önemli bir rol oynarlar. Örneğin, yün, saç ve tırnak gibi doğal polimerler protein yapılarına örnektir. Canlılarda ayrıca, hareketlilik, yaşlanma, duyu gibi birçok önemli işlevden sorumlu olan karbonhidratlar, deoksiribonükleik asit (DNA) ve ribonükleik asit (RNA) gibi polimerik yapılar da bulunur. Bu tür polimerlere genel olarak "biyopolimerler" denir.



Şekil 8. (a) Hevea ağacından akan lateks sıvısı , (b) biyopolimer malzeme olan örümcek ipeği (Meb materyal 2014)

Biyopolimerler

Biyopolimerler, biyolojik süreçlerin bir sonucu olarak sentezlenir ve doğal kökenleri nedeniyle genellikle peyzaja ve biyotaya daha az zararlıdır. Biyopolimerler zemin bağlayıcı olarak faydalı olduğu kanıtlanmıştır. Test edilen biyopolimerler arasında selüloz, nişasta, kitosan, curdolan ve beta-glukan bulunur.

Bazı biyopolimerler suya duyarlıdır ve ıslak zeminler zayıf biyopolimer-kil kohezyonu sergiler. Islandığında jel tipi biyopolimerler orjinal zemine kıyasla gerilme mukavemeti önemli ölçüde daha yüksek olan hidrojeller oluşturur.

Biyopolimerler, zemin iyileştirme projelerinde sentetik polimerlerin yerini giderek artan bir şekilde almaktadır. Diğer birçok kimyasal katkı maddesine göre daha çevre dostudurlar ve daha düşük konsantrasyonlarda aynı miktarda güçlendirme sağlayabilirler. Biyopolimerler, Amerikan Malzeme Test Standartları (ASTM) tarafından yapılan tanıma göre, bakteri, alg ve mantar gibi mikroorganizmaların doğal faaliyetleri sonucu tamamen biyolojik olarak parçalanabilen doğal malzemelerdir (Visch 2002).

Biyopolimerler genellikle zeminlerin hidrolik geçirirmliliğini azaltma, kayma dayanımını artırma veya erozyonu önleme gibi konularda araştırılmıştır. Bu polimerlerin, daneler arasındaki boşlukları doldurarak permeabiliteyi azaltacağı öne sürülmüştür (Yang vd 1993).

Polimerler genellikle karbon bileşiklerinden oluştuğu için organik madde olarak kabul edilirler. Sağlık, savunma sanayi, uzay teknolojileri, tekstil endüstrisi gibi çeşitli alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Diğer bir polimer sınıfı ise bitki ve hayvanlar tarafından oluşturulan biyopolimerlerdir (Keçecioğlu 2016). Bu polimerlere, hevea ağacından akan lateks sıvısı ve biyopolimer malzeme olarak kullanılan örümcek ipeği örnek olarak gösterilebilir (Meb materyal 2014).

Cabalar ve Canakci (2011) yaptıkları çalışmada, zantam gam adlı bir biyopolimerin kumla karıştırılmasının etkileri incelenmiştir. Çalışmada, zantam gam katkı oranının %1'den %3'e çıkarılmasının, kumun kayma mukavemetini 20° arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, biyopolimerlerin zeminlerin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceği yönünde olumlu bir düşünce sunmaktadır.

Geopolimerler

Geopolimer terimi, ilk olarak 1978 yılında Fransız bilim adamı Prof. J. Davidovits tarafından, inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılar için kullanılmıştır. Davidovits, doğada aglomerasyon ile oluşan kayaçların laboratuvar koşullarında yapay olarak üretilebileceğini göstermiştir.

Geopolimerler, inorganik, sert ve 1250°C'ye kadar kararlı yapıya sahiptirler ve yanıcı değildirler. Bu malzemeler, düşük sıcaklıklarda (genellikle 100°C'nin altında) alkali bir çözelti ile aktivasyon sonucu polikondenze olabilen organik polimerler gibi davranırlar.

Geopolimerizasyon basitçe, fırınlanmış kilin içerdiği alüminat ve silikatların oksijen atomu elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağlı bileşikler oluşturması olarak tanımlanabilir. Geopolimer malzemeler, genellikle ısı ile aktifleştirilmiş doğal silikon ve alümin minerallerinden (alüminyum ve silisyum oksitli bileşikler) oluşur. Bu mineraller, alkali ile aktive edilerek moleküler arası bağlar güçlendirilir ve polimerik yapılar oluşturulur. Geopolimerler kristal veya amorf yapıda olabilirler ve özellikleri bakımından doğal kayaçlara benzerler. Bu tür malzemelere alkali aktivasyonlu çimentolar veya inorganik polimer çimentolar denir.

Geopolimer malzeme çeşitleri, dokuz farklı tipte tanımlanmış olup bunlar:

- Organik maden esaslı
- Fosfat esaslı
- UK (unmelted kaolin) esaslı
- Camsuyu esaslı polisiloksonat
- MK (metakaolin) esaslı poly(sialate-siloxo)
- Silika esaslı sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate)
- Kayaç esaslı poly(sialate-multisiloxo)
- Kalsiyum esaslı (K, Ca, Na)-sialate
- Kaolin hidrosodalit esaslı polisialat geopolimerlerdir.

$$M_n\{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

Geopolimerlerde genel yapı formülü; Formülde M ile gösterilen alkali katyonlar (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) içerir. Z katsayısı, Si/Al eşdeğer oranını temsil eder. Bu oran 1'den küçük veya 300'den büyük olabilir. $Z < 1$ olduğunda geopolimerler kırılğan yapıdadır. $1 < z < 3$ aralığında çapraz bağlı seramik yapılar oluşur. $Z > 3$ ise yapının iki boyutlu tabakalar halinde lineer bağlarla yapışkan bir form kazandığı görülür. Son olarak, $z > 15$ olduğunda geopolimerler elastik bir yapıya sahip olurlar (Zhang vd 2010).

Yüksek fırın cürufları, silika tozu, uçucu küller, volkanik kül, volkanik tüf, volkanik cam, diatomit, pişmiş kil ve metakaolin ibi malzemeler, silis açısından zengin yapılarıyla bilinirler. Bu malzemeler ortamdaki kireç ile puzolanik reaksiyona girerler. Ayrıca, alkalın koşullarda NaOH veya KOH gibi güçlü bazlarla da aktivasyon sağlanabilir.

Geopolimerlerin bağlanma mekanizması, tamamen alümina-silika bağlanma modeline dayanır. Bu malzemeler, amorf silika ve alümina gibi inorganik yapıları, zemindeki diğer inorganik moleküllerle bağlanarak polimerik makromoleküller oluştururlar. Zemin yapısının büyük bir kısmını oluşturan silikatlar ve alüminatlar, alkali koşullarda geopolimer oluşumunda etkili ve doğal bağlayıcılar olarak işlev görürler (Duxson vd 2007).

Geopolimerler, içerdikleri Ca^+ , Na^+ , K^+ gibi katyonik yapıların varlığına göre farklı yapılara sahip olabilirler. Bu yapılar genellikle N-A-S-H (sodyum alümina silikat hidrat jeli) veya C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) gibi kristal örgüler oluşturur. Bu kristal örgüler, birbirlerini destekleyerek geopolimerlerin bağlanmasını güçlendirirler (Fernandez Jimenez ve Palomo 2009; Huang vd 2021).

Sentetik polimerler

Sentetik polimerler, sıvı, toz veya lif şeklinde zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği açısından gelecek vadeden ve çevre dostu bir malzeme olarak değerlendirilen sentetik polimerler, kimyasal moleküllerin polimerizasyonu yoluyla sentezlenen insan yapımı malzemelerdir. Bu polimerler, zeminin mukavemet, sertlik, geçirgenlik, erozyon direnci, su stabilitesi, hacim değişiklikleri gibi özelliklerini geliştirmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Geoteknik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen sentetik polimerler arasında poliakrilamid (PAM), polietilen (PE), polipropilen (PP), poliüretan (PU), polistiren (PS) ve Stiren Kopolimeri, polivinil asetat (PVA), polivinil alkol (PVAO) ve polivinilklorür (PVC) bulunmaktadır.

Poliakrilamid (PAM)

PAM $[-CH_2CHCONH_2-]$ akrilonitrilin hidrasyonu ile elde edilen akrilamidin polimerizasyonu yoluyla üretilir. PAM, anyonik, nötr ve katyonik yüklü moleküller olmak üzere çeşitli formlarda bulunur. Moleküler yapısı doğrusal veya çapraz bağlı olabilir; doğrusal moleküller suda çözünürken, çapraz bağlı moleküller su emici olup suda çözünmezler. PAM, içme suyunun arıtılmasında, kağıt imalatında, mineral yüzdürmede, petrol geri kazanımında, dik yamaçların ve yol kesimlerinin iyileştirilmesinde, zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde, taşıma kapasitesinin artırılmasında ve erozyonun önlenmesinde kullanılır. Erozyon kontrolü için inşaat sektöründe en yaygın kullanılan sentetik polimerdir, çünkü yüksek verimlilik sağlar, düşük maliyetlidir ve istenen sonuca ulaşmak için daha az miktarda kullanılabilir. Katyonik yüklü PAM molekülleri, su yaşamı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle erozyon kontrolü için uygun değildir; anyonik PAM ise daha az toksik özellik gösterir.

Polietilen (PE)

PE, etilen gazının polimerizasyonu sonucu elde edilen ve amorf kristal yapıya sahip olan bir poliolefin reçine ailesi üyesidir. PE, hafif, oda sıcaklığında çözünmez, düşük su emiciliğine sahiptir ve kimyasallara karşı son derece dirençlidir. Genellikle plastik torbaların, filmlerin, geomembranların ve kapların üretiminde kullanılır. Mekanik özellikleri, dallanma derecesi, kristal yapısı ve molekül ağırlığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterebilir. PE'nin ana sınıflandırmaları ultra düşük yoğunluklu polietilen (ULDPE), çok düşük yoğunluklu polietilen (VLDPE), doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), orta yoğunluklu polietilen (MDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) şeklindedir. Geoteknik mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan PE bileşiği türü ise HDPE'dir.

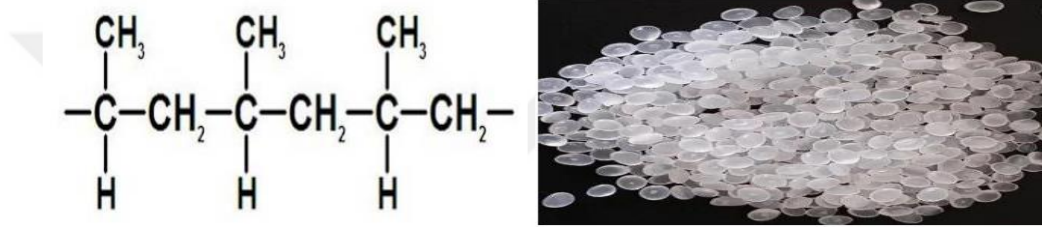
Polipropilen (PP)

PP, sert, dayanıklı ve kristalli propilen monomerlerinin zincir büyüme polimerizasyonu ile üretilen termoplastik bir polimerdir. PP, polimer yapısının ana karbon omurgasına bağlı asılı metil (CH_3) grubu dışında PE'ye benzer görünmektedir. Düşük maliyeti, daha az toksisitesi ve biyouyumluluğu nedeniyle PP çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, düşük yüzey enerjisi ve düşük gaz ve sıvı geçirgenliği ile karakterize edilir. Üç tip PP polimeri vardır: homopolimerler, homofazik kopolimerler ve heterofazik kopolimerler. PP homopolimeri daha yüksek bir mukavemet-ağırlık oranına sahiptir ve kopolimerden daha sert ve daha güçlüdür ve bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ambalaj, tekstil, kırtasiye, laboratuvar ekipmanları, otomotiv parçaları,

endüstriyel elyaflar, gıda kapları vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. PP, mekanik özelliklerinin çoğunu yüksek sıcaklıklarda korur ve alkoller, organik asitler, esterler ve ketonlar dahil olmak üzere çok çeşitli polar sıvılara karşı dirençlidir. PP, kil örnekleri içindeki fazla suyu etkili bir şekilde azaltan ve emen, dolayısıyla kilin plastisitesini değiştiren kil dokulu nanokompozitler geliştirmek için kullanılmıştır (Almajed vd 2022).

Polipropilenin özellikleri

Polipropilen yarı kristalin bir polimerdir (Tamer 2007). Polipropilen malzemenin kimyasal formülü Şekil 9’da verilmiştir. Lineer veya dallanmış zincirlerden oluşan uzun zincirler halinde bulunan polimer sistemine genel olarak termoplastik denir. Öte yandan, yüksek oranda çapraz bağ içeren polimer sistemleri termosetting olarak tanımlanır.



Şekil 9. Polipropilenin kimyasal formülasyonu (Öztürk 2007)

Polipropilen termoplastik bir polimerdir. Şekil 10’da polipropilenin molekül yapısı gösterilmiş olup, polipropilen orta derecede kristal bir yapıya sahiptir ve yorulmaya karşı yüksek direnç gösterir.



Şekil 10. Polipropilenlerin molekül yapısı (Dlubek vd 2010)

Polipropilen Avantajları; En düşük spesifik ağırlığa sahip olması, darbeye karşı yüksek direnç göstermesi, şeklini uzun süre koruma özelliğine sahip olması, kimyasallara karşı

direncinin yüksek olması, düşük elektrik iletkenliğine sahip olması ve ısı geçirgenliğinin düşük olması (Bakar vd 2007).

Polipropilenin Dezavantajları; Düşük sıcaklıklarda kırılabilir olması ve oksidasyona hızlı bir şekilde maruz kalması (Wang 1996; Ezdeşir vd 1999).

Polipropilen Lif

Polimer bazlı liflerin zemin iyileştirme uygulamalarındaki etkileri üzerine yapılan araştırmalar, liflerin tek başına kullanıldığında zemin üzerinde yeterli etki sağlamadığını göstermektedir. Şekil 11'de örneği görülen polipropilen lifler, çimento, kireç gibi bağlayıcı malzemelerle birlikte kullanıldığında zeminde donatı görevi görerek önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Özellikle kohezyonlu zeminlerde, polimer bazlı liflerin kullanımının daha etkili olduğu önceki çalışmalarla belirlenmiştir (Çetin 2011).



Şekil 11. Polipropilen lif (Tokgöz vd 2022)

İnşaat mühendisliği uygulamalarında betona eklenen ve sıkça kullanılan polipropilen lifler, düşük maliyeti, kolay işlenebilirliği, yüksek dayanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek kimyasal dayanımıyla tercih edilmektedir (Lewin 2006). Ayrıca, iyi tokluk özelliklerine sahip olması ve çatlak oluşumunu engelleyebilme yeteneği geniş kullanım alanları bulmasını sağlamaktadır (Banthia ve Gupta 2016). Bu özellikler liflerin, çeşitli yapı malzemelerinde güçlendirme ve dayanıklılık artırma amacıyla yaygın olarak kullanılmasını desteklemektedir.

Polipropilen lifler, su yapılarında çeşitli amaçlar için kullanılmakta olup yarık ve çatlakları önleme, suyun aşındırıcı etkisine karşı direnç gösterme, şevlerde derin yarık ve kopmalara engel olma, oturma ve çökmeleri azaltma, yüzey pürüzlülüğünü düşürme, homojen ve boşluksuz yapı elde etme, malzemenin su emmesini önleme gibi özelliklere sahiptir (Karahan 2006).

Poliüretan (PU)

PU polimeri, omurgada çok sayıda üretan bağlantısının bulunduğu bölümlü bir blok kopolimerdir. Bir poliöl, bir di- veya çoklu izosiyanat ve bir zincir genişletici reaktif arasındaki kimyasal reaksiyonla sentezlenir. PU, su ile reaksiyona girerek genişmiş elastik bir katı oluşturur. Kaplama endüstrisinde yaygın olarak kullanılan PU'nun öne çıkan özellikleri arasında yüksek mekanik dayanım, kimyasallara ve korozyona dayanıklılık, aşınma direnci, tokluk ve düşük sıcaklık esnekliği bulunur. Bu özellikler, polimer omurgasının yapısından büyük ölçüde etkilenir ve çeşitli uygulamalar için farklı özelliklerde tasarlanabilirler. Genel olarak, PU yalnızca dimetilformamid, dimetilsülfoksit veya N-metil pirolidon gibi yüksek derecede polar çözücülerde çözünür. PU, inşaat mühendisliğinde, tünel açma ve yer altı operasyonlarında olağanüstü su geçirmezlik performansı sağlamak için poliüretan enjeksiyon sistemlerinde kullanılmaktadır (Almajed vd 2022).

Polistiren ve stiren kopolimer

Polistiren (PS), stiren monomerinin polimerizasyonundan elde edilen aromatik, hidrofobik bir sentetik polimerdir. Petrolden elde edilen bu sıvı hidrokarbon, geniş bir uygulama alanına sahiptir ve elektronik, tıp, yalıtım, ev aletleri, otomobil ve gıda endüstrilerinde kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliği alanında ise PS, katı, köpük veya genişletilmiş PS (EPS) formlarında yaygın olarak kullanılır. EPS, düşük ısı iletkenliği ve nem emilimine sahip hafif bir polimerdir ve yaklaşık olarak %2-5 PS ve %95-98 hava içerir (Almajed vd 2022).

Stiren, akrilonitril, bütadien, akrilatlar, vinil asetat (VA), vinil klorür (VC) gibi çeşitli monomerlerle kolayca kopolimerize olabilir. Stiren Akrilik Emülsiyon (SAE) polimeri, stiren ile bütül akrilat, akrilik asit gibi diğer akrilat esterlerin polimerizasyonu ile elde edilir. Bu polimerler, kağıt, boya, kaplama, kozmetik, inşaat gibi endüstrilerde kullanılırken, SAE polimerleri sıradan akrilat emülsiyonlarına kıyasla daha hidrofobik özellik gösterir ve ısı direnci ile yapışma ve yaşlanma direnci sağlar.

Stiren-bütadien kauçuğu (SBR), stiren ve bütadien monomerlerinin çözelti veya emülsiyon içinde polimerizasyonu ile üretilen sentetik bir kauçuk kopolimeridir. SBR'nin stiren/bütadien oranı, polimerin sertliğini belirler; yüksek stiren/bütadien içeriği, polimerin daha sert olmasını sağlar. SBR, ayakkabı tabanları, lastikler, konveyörler, transmisyon kayışları, contalar, membranlar, hortumlar gibi birçok uygulamada kullanılan en yaygın polimerlerden biridir.

Polivinil Asetat (PVA)

PVA, vinil asetat (VA)'nın emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilen ucuz, renksiz, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen bir sentetik reçinedir. Başlıca kullanım alanları arasında tekstil ve kağıt boyutlandırma, yapıştırıcılar ve emülsiyon polimerizasyonu bulunur. Yapıştırıcılar, hava koşullarına, suya, yağa ve petrol ürünlerine dayanıklı, şeffaf ve sert filmler oluşturur.

PVA, cam elyaf takviyeli plastiklerde stres ve büzülme önleyici özelliklerini artırmak için yaygın olarak kullanılır. Oda sıcaklığında çeşitli solventlerde çözünürken, sıcaklığı arttıkça yumuşar ve ısıyla sertleşen reçinelere kıyasla neme ve neme karşı daha az direnç gösterir. Uzun süre su altında kaldığında şişer ve yumuşar, ayrıca asitler ve alkali ortamlarda polivinil alkol şekline hidrolize olabilir.

Polivinil alkol (PVAO)

PVAO, PVA'nın alkalın hidrolizi ile elde edilen çevre dostu, iyonik olmayan, hidrofilik, suda çözünen ve yarı kristalli bir sentetik polimerdir. Organik çözücülerde çözünmez ve etanolde sınırlı ölçüde çözünür. Biyomedikal amaçlar için yaygın olarak tercih edilen bir sentetik polimerdir (Barui 2018). Ayrıca kağıt imalatında bağlayıcı olarak, tekstil çözgü haşıllamada, sulu yapıştırıcı solüsyonları olarak ve emülsiyon veya süspansiyon polimerizasyonunda yüzey aktif madde olarak kullanılır.

PVAO, lifler ve parçacıklar gibi takviye malzemeleriyle kullanıldığında daha iyi ara yüzey yapışması sağlar ve bu nedenle iyi termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Polimerizasyon ve hidroliz derecesine bağlı olarak fizikokimyasal özellikler ve spesifik fonksiyonel uygulamalar değişir. Hidrolize edilmiş PVAC, kısmen hidrolize edilmiş PVAC'a göre daha az kristallığe ve hidrojen bağına sahip olup daha güçlü çekme mukavemeti ve yırtılma direncine sahiptir.

Polivinil klorür (PVC)

PVC, vinil klorür monomerinin zincir polimerizasyonu ile sentetik olarak üretilen bir polimerdir. Dayanıklı mekanik özellikleri, düşük maliyeti ve alkali, tuz ve yüksek polar çözücülere karşı direnci sayesinde şişe, boru, kablo yalıtımı, zemin kaplamaları, plastik ve tıbbi malzemeler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. PVC, ışıık altında nispeten düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 100 °C) hidrojen klorür açığa çıkararak bozunur.

Mckeen (2014) tarafından yapılan çalışmada, PVC kimyasal olarak inert bir malzemedir ve esnek veya sert şekilde üretilir; sert PVC Tip I, Tip II ve CPVC olmak üzere üç tipe ayrılır. Tip II, daha yüksek darbe direncine sahipken, Tip I daha yüksek kimyasal dirence sahiptir. CPVC ise yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.

Polimer – zemin ilişkisi

Polimerler, Şekil 12’de görüldüğü gibi zemin danelerinin birbirleri arasındaki etkileşimi değiştirerek, zemin danelerinin boyutunu, şeklini ve kohezyonunu değiştirirler.



Şekil 12. Polimer- kil danelerinin morfolojisi (Jeong vd 2011)

Zemin danelerinin yüzeylerinde polimer-zemin etkileşimleri meydana geldiğinden, zemindeki baskın parçacık boyutu olarak adlandırılan yüzey alanı miktarı büyük önem taşır.

Polimerler, doğrudan bağlanma yeteneği killi zemin parçacıklarında daha belirgin, büyük boyutlu kum ve silt parçacıklarıyla zayıf etkileşim gösterirler.

Polimerlerin hidrokarbon zincirlerinden oluştuğu bilinmektedir ve bu zincirlerin zemin daneleri içinde iç içe geçtiği ve dengeleyici bir etki yaptığı düşünülmektedir. Gerçekte ise, polimerler zemin daneleri ile bir araya gelerek yeni bir zemin matrisi oluştururlar ve bu bağlayıcı özellikleri sayesinde zeminde fiziksel iyileşme sağlarlar (Tingle vd 2007).

Çoğunlukla inşaat mühendisliği, geoteknik ve tarımsal projeler için zeminlerinin fiziksel özelliklerini iyileştirmek için polimer kullanılır.

Zemin içinde çok küçük konsantrasyonlarda bile çeşitli polimerlerin su tutmayı arttırdığı ve erozyonu azalttığı, zemin kayma mukavemetini arttırdığı ve zemin yapısını desteklediği görülmüştür (Almajed vd 2022).

Zemin iyileşme etkileri için test edilen polimerler arasında bir dizi sentetik polimer ve biyopolimer bulunur. Özellikle biyopolimerler üretim sırasında büyük miktarda karbondioksit üretebilen veya kalıcı çevresel hasara neden olabilen sıradan çimento gibi geleneksel kimyasal

katkı maddelerine karşı çevre dostu bir alternatif sunar. Tablo 4’de zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan polimer katkı malzemeleri ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı sunulmuştur.

Tablo 4. Zemin İyileştirme Çalışmalarında Kullanılan Polimerler

Referans	Zemin Tipi	Kullanılan Katkı	Kullanılan Katkı Oranı	Yapılan Deneyler
Cabalar ve Canakci (2011)	Kum	Xanthan gum (zantan gam)-Biyopolimer	%1, %3 ve %5	Direkt Kesme Deneyi (İçsel sürtünme açısı)
Naeini ve çalışma arkadaşları (2012)	Yumuşak kil-Bentonit	(Akrilik Polimer)-Katyonik bir sıvı polimer	%2, %3, %4 ve %5	Serbest basınç
Uysal (2014)	Sarı kum	Virgin Homopolymer (VHP) katkısı	%0.50, %1.00 ve %1.50	Kesme kutusu (Rölatif Sıkılık, Kayma Mukavemeti)
Latifi ve diğerleri (2017)	Bentonit-montmorillonit ve kaolinit	Ksantan zamkı-Biyopolimer	%1 ve %1,5	Makro ölçekli deneylerde, serbest basınç mukavemeti, direkt kesme ve tek boyutlu konsolidasyon, mikro ölçekli deneylerde, taramalı elektron mikroskobu (SEM), spesifik yüzey alanı (BET) ve lazerle dane boyutu analizi (PSA)
Saygılı (2018)	Kaolen türü kil	Melamin Formaldehit (MF)-Sıvı polimer	%3, %6, %9 ve %12	Serbest basınç
Çabalar ve arkadaşları (2018)	Düşük plastisiteli kil	Xanthan Gum-Biyopolimer	%0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0	Laboratuvar ve yn deneyi, serbest basınç, permeabilite, düşen koni, ödometre, büzülme ve şişme
Karaca (2018)	Yüksek plastisiteli bentonit kil	Kireç, çimento, silikon ve polimer	%7,5 kireç, (%5-%7.5) çimento, %4 silikon, %2 polimer	Atterberg limitleri, serbest basınç
Hamidi ve Marandi (2018)	Yumuşak kil (bentonit ve kaolinit)	Çimento ve epoksi reçinesi	-	Serbest basınç, mikro ve makro yapı deneyler

Tablo 4. (Devamı)

Saygılı (2018)	Kaolen türü kil	Polimerik metil difenil izosiyanat (PMD)-Sıvı polimer	%3, %6, %9 ve %12	Serbest basınç
Lee ve arkadaşları (2019)	Sri Lanka toprağı (Kil)	Xanthan Gum-Biyopolimer	%1, %1,5 ve %2	Serbest basınç
Bagherinia (2019)	Düşük plastisiteli kil	(NaAL)-Biyopolimer	%1	Serbest basınç
Tamgaç (2020)	Doğal kil	Kopolimer	%1, %2, %3, %4	Kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç
Kahiyah (2020)	Kil	Agar Gam, Arabik Gam, Guar Gam ve Xanthan Gam-Biyopolimer	%1, %2 ve %3	Serbest basınç
Ok ve Bağrıaçık (2022)	Kohezyonlu bir zeminin (Kil)	Guar Gum-Biyopolimerler	%1, %2 ve %3	donma-çözülme, şişme basıncı, serbest basınç
Tunç ve arkadaşları (2022)	Kil	Arabik Gam-Biyopolimer	%1, %2, %3	Konsolidasyon (zamana bağlı oturma davranışı)

Polimerlerin Diğer Yüzeysel(Katkılı) İyileştirmelere Göre Pozitif Yönleri

Polimerlerin geleneksel iyileştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında avantajları; daha az kirlilik sağlamaları, daha az malzeme miktarı gerektirmeleri, daha düşük kürlenme süresine sahip olmaları, daha az şişlik ve kabarma oluşturmaları, kararlı kimyasal özelliklere sahip olmaları ve doğal kaynakları korumalarıdır (Özen 2019). Bunların dışında polimerlerin başka bir avantajı da sıvı haldeyken suyla seyreltilebilmesi ve bu şekilde seyreltme oranının kontrol edilerek istenen katkı miktarının elde edilebilmesidir.

Zemin uygulamalarında kullanılan bazı polimerler

Zemin uygulamalarında çoğunlukla sıvı, lifli ve toz polimerler kullanılmaktadır. Bu polimer türleri aşağıda ele alınmıştır.

Sıvı polimer

Yapılan çalışmalarda çimentolu zemin iyileştirme malzemelerinin uygun olmadığı durumlarda reçine, köpük, emülsiyonlar, enzimler, asitler ve endüstriyel atıklar gibi alternatif malzemelerle iyileştirme yapıldığı görülmektedir (Rauch vd 2002; Santoni vd 2002; Newman ve Tingle 2004; Harris vd 2006; Naeini ve Ghorbanalizadeh 2010; Gilazghi 2016;).

Özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanan sıvı polimerler, zemin iyileştirme uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu polimerler, zeminin dayanımını artırır, geçirimsizliği azaltır, sıvılaşma riskini düşürür ve daneler arası adhezyonu artırarak hava koşullarına maruz kalan zeminlerde önemli performans artışları sağlar (Camberfort 1977; Moustafa vd 1981; Ajayi vd 1991; Ohama 1995; AlKhanbashi ve Abdalla 2006; Zandieh ve Yasrobi 2010; Anagnostopoulos ve Papaliangas 2012; Naeini vd 2012; Anagnostopoulos vd 2013; Ajalloein vd 2013; Mohammed ve Vipulanandan 2013; Saygılı 2018). Bu gelişmeler, çeşitli sıvı polimerlerin farklı uygulama alanları ve karışım yöntemleri ile ilgili daha detaylı araştırmaların gerekliliğini ortaya koymuştur (Harris vd 2006).

Sıvı polimerlerin çeşitliliği ve fiyat farklılıkları (patentli karışımlar) nedeniyle, uygun malzeme seçimi konusunda uygulamada zorluklar yaşanabilmektedir. Ayrıca, farklı sıvı polimerlerin uygulama şekilleri de değişiklik göstermektedir. (Rauch vd 2002; Santoni vd 2002; Harris vd 2006).

Zemin iyileştirme malzemelerine sürekli olarak yeni seçenekler eklenmesiyle, ticari olmayan (patentsiz) sıvı polimerler hakkında kür süreleri ve uygulama yöntemleri gibi konularda yeterli araştırma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda, farklı kürleme ve karışım yöntemlerinde aynı sıvı polimerin kullanılmasına rağmen farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, geleneksel zemin iyileştirme katkılarına kıyasla daha detaylı çalışmaların yapılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur (Harris vd 2006).

Sıvı polimerlerin pozitif yönleri

Üretilen yerli kaynaklardan elde edilen sıvı polimer zemin katkıları, geleneksel katkı malzemelerine kıyasla daha hızlı mukavemet kazanan, hava koşullarına daha dayanıklı ve uzun ömürlü çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu polimerler özellikle kısıtlı süre içinde zemin iyileştirme gerektiren durumlarda hızlı ve ekonomik çözümler sağlamak için ideal olarak değerlendirilmektedir.

Sıvı polimerlerin nem ve ısı altında aktive olması sonucunda kil numunelerinin dayanıklılığı artmaktadır. Yüksek sıcaklık ve nem şartlarında polimerin sertleşme süresi daha da kısalmaktadır. Bu bilgiye dayanarak, yüksek sıcaklıklı iklim ve bölgelerde, özellikle yaz aylarında

uygulanan melamin formaldehit sıvı polimerinin, ortam sıcaklığının etkisiyle daha hızlı bir dayanım artışı sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu durum, polimerin ılıman iklim koşullarına göre kür edilmesi durumunda daha belirgin hale gelmektedir (Saygılı 2018).

Kullanılan sıvı haldeki ve yüksek akışkanlıktaki polimerler, uygulamada zorluk yaşanmasını önler ve karıştırma için ekstra ekipmana ihtiyaç duyulmaz.

Killerde şev iyileştirmesi için organik patentli polimer kullanarak üç günlük kür süresinde dayanımda dört kat artış sağladıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, içsel sürtünme açıları testleri sonucunda, iki gün içinde içsel sürtünme açılarında 30 dereceden 55 dereceye kadar artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Liu vd 2011). Ticari patentli bir akrilik sıvı polimer kullanarak killi zeminlerde yüzde 5'e kadar polimer katkısı ile dayanım değerlerinde 14 günde 1.5 kat artış gözlemlemişlerdir (Naeini vd 2012). Yüksek plastisiteli killerde metilen difenil diizosiyanat grubu sıvı polimeri yüzde 12 katkı oranında kullanarak iyileştirme sonucunda on kat dayanım artışı sağlamışlardır (Gilazghi vd 2016). Metilen difenil diizosiyanat grubu sıvı polimer ile iyileştirilmiş kumlarda beş kat dayanım artışı elde ettiklerini rapor etmişlerdir (Rezaeimalek vd 2017).

Polimer lifler

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerden biri donatılandırma yöntemi olup, zemin iyileştirmesinde kullanılan ve çeşitli lif türleriyle desteklenen bir yöntemdir. Bu yöntemde, lifler zeminle etkileşime girerek adhezyon ve sürtünme kuvvetleri oluşturur ve zeminin kaymaya karşı dayanıklılığını artırır (Hausmann 1990).

Donatılandırma ile güçlendirilen zeminlere ise donatılı zemin adı verilir. Bu yaklaşım, zemin mühendisliğinde önemli bir uygulama olarak kabul edilir ve liflerin kullanımıyla ilgili araştırmalar ve uygulamalar gün geçtikçe artmaktadır.

Donatılandırma çalışmalarında önemli bir yere sahip olan liflerden biri polipropilen lifler olup, polipropilen lifler, zemin güçlendirmesinde kullanılan ve üstün özelliklere sahip olan malzemelerdir. Bu lifler, zemine eklenerek kıvam limitleri, dayanım, şişme potansiyeli, geçirimsizlik, kompaksiyon parametreleri gibi birçok geoteknik özelliğin iyileştirilmesine katkı sağlarlar.

Lifler genellikle doğal lifler ve yapay lifler olarak iki ayrılır. Doğal lifler, doğada hazır halde bulunan lif türlerini ifade eder. Doğal lifler, keten, bambu, hindistan cevizi kabuğu, jüt gibi bitkisel liflerden elde edilen lifler, yün, kıl, ipek gibi hayvansal lifler ile asbest ve karbon gibi metalik lifler olmak üzere genellikle üç ana grupta sınıflandırılır. Bu lifler doğada bulunan ve doğal kaynaklardan elde edilen çeşitli lif türlerini kapsar. Yapay lifler ise insanlar tarafından

üretilen ve günümüzde yaygın olarak kullanılan liflerdir. Yapay lifler genellikle cam, polimer ve bazalt lifler olarak üç ana grupta incelenirler. Polimer lifler, tekstil ve petrokimya endüstrilerinde üretilen akrilik, naylon, aramid, polipropilen, polietilen gibi çeşitli türlerden oluşur (Aral 2006).

Toz polimer

Polimerler, katı, sıvı veya çözelti halinde bulunabilirler ve bu durum yapısal, termal, mekanik ve fiziksel özelliklerine etki eder. Katı polimerlerde, yapısal farklılıklar ısı, mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde belirleyici olabilir. Katı haldeki bir polimerin morfolojisi, amorf, yönlendirilmiş veya kristalin yapı olmak üzere üç temel düzen içerebilir.

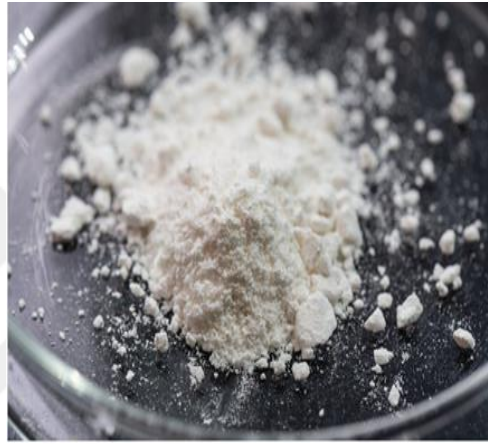
Toz polimerler, zemin iyileştirme çalışmaları ve inşaat malzemelerinin üretimi gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Şekil 13). Toz polimer çimento esaslı ürünlerde kullanılması halinde yapışma ve kırılma mukavemeti, plastikleştirme, aşınmaya karşı yüksek dayanım, yüksek su direnci, yüksek esneklik, donma çözülme direnci ve çalışma kolaylığı gibi özelliklerin gelişmesine katkı sağlarlar. Bu özelliklerinden dolayı, mantolama, seramik ve su yalıtımı yapıştırıcı ve sıvalarında, tamir harçlarında ve derz dolgu gibi çeşitli inşaat malzemelerinde kullanılırlar. Toz polimerler, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. Özellikle yüksek esneklik gerektiren çimento bazlı özel ürünlerde kullanıldıkları gibi, çimlendirme, yapay torf üretimi, köklendirme, fidecilik, toprak ve gübre karışımlarında, topraksız tarımda ve dekoratif alanlarda da yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, bebek ve yaşlı hasta bezlerinde, ameliyathanelerde, emici tamponlarda, petrokimya endüstrisinde, madencilikte, yangın geciktirici malzemelerde, elektrik kablolarının su ve yangın yalıtımında, kozmetik ürünlerde gibi birçok farklı alanda da kullanım bulmaktadırlar.

Aynı zamanda toz polimerler, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan katkı maddeleridir. Genellikle suyla reaksiyona girerek jel formasyonuna geçen veya zemin parçacıklarını bir arada tutan polimer yapılarıdır. Bu polimerlerin kullanımı, özellikle zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini artırma, erozyona karşı direnci artırma, su geçirgenliği kontrolü yapma gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Toz polimerler, zemin matrisindeki boşlukları doldurarak ve bağlayıcı bir matris oluşturarak zeminin mukavemetini artırır. Polimerler, zemin parçacıkları arasında kimyasal veya fiziksel bağlar oluşturarak zeminin mekanik özelliklerini iyileştirirler. Bu sayede zeminin yükleme kapasitesi ve dayanıklılığı artmaktadır (Chang vd 2016; Latifi vd 2016).

Zemin iyileştirilmesinde kullanılan polimerler çeşitli tiplerde olabilir. Örneğin, poliakrilamid, poliüretan gibi sentetik polimerler yaygın olarak kullanılır. Bu polimerler

genellikle toz formda uygulanır ve zeminle mekanik bir şekilde karıştırılarak veya zeminin içine enjekte edilerek uygulanmaktadır. Toz polimerlerin performansı, laboratuvar deneyleri ve saha çalışmalarıyla değerlendirilir. Bu çalışmalar, polimerlerin zeminin taşıma kapasitesini, suya karşı direncini, erozyon direncini ve uzun vadeli iyileştirmeyi nasıl etkilediğini gösterir. Polimerlerin zemin iyileştirmedeki avantajları arasında hızlı uygulanabilirlik, düşük maliyet, çevresel etkilerin azaltılması gibi faktörler bulunmaktadır (Du vd 2017).

Toz polimerlerin çevresel etkileri ve uygulama standartları, yerel yönetmelikler ve mühendislik uygulamalarına göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, polimer kullanımıyla ilgili projelerde çevresel etkilerin dikkate alınması önemlidir ve doğru uygulama yöntemleriyle birlikte standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Akray ve Şengül 2022).



Şekil 13. Toz polimer (Anonim 2020)

Literatür özetleri

Cabalar ve Canakci (2011), çalışmasında kum numunelerine katkı malzemesi biyopolimer olan Xanthan gum (zantan gam) ilave ederek etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, %1, %3 ve %5 oranlarında Xanthan gum katkısı kullanılmıştır. Bu katkı malzemesini suyla karıştırılarak 7, 26 ve 50 gün sürelerinde kür edilmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda, kum numunelerine Xanthan gum (zantan gam) katkısı eklenmesinin kür süresi ve zaman aralıklarından büyük ölçüde etkilenmediği görülmüş, Xanthan Gum katkı oranının ise kayma mukavemetini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir (Tablo 5). Xanthan gum oranının artmasıyla kayma mukavemeti açısının da arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu biyopolimerin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilecek potansiyel bir katkı malzemesi olabileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 5. Kum-Xanthan Gum Katkısının Zamana göre Kayma Mukavemeti Açısı (Çabalar ve Çanakçı 2011)

KAYMA MUKAVEMETİ AÇISI Φ (°)			
KARIŞIM ORANLARI	7 GÜNLÜK	26 GÜNLÜK	50 GÜNLÜK
%99 KUM + %1 XG	22	15	15
%97 KUM + %3 XG	37	43	37
%95 KUM + %5 XG	57	54	55

Naeini ve çalışma arkadaşları (2012), İran'da yumuşak kil zeminlerin özelliklerini iyileştirmek amacıyla katyonik bir sıvı polimer (Akrilik Polimer) katkısı kullanarak bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, %10 ve %20 oranında bentonit içeren yumuşak killer, ağırlıkça %0, %2, %3, %4 ve %5 polimer ilavesiyle hazırlanmış ve test edilmiştir. Hazırlanan numuneler, 0, 2, 4, 8 ve 14 gün boyunca kürlenmiş ve serbest basınç değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, 8 günlük kürlenmiş numunelerde serbest basınç değerlerinin hızlı bir şekilde arttığını, ancak 14 güne kadar belirgin bir artış gözlenmediğini göstermektedir. En yüksek dayanım artışı, %4 polimer içeren numunelerde görülmüştür. Ayrıca 8 günlük kür süresi ve %4 polimerlerin optimum değeri verdiği belirtilmiştir.

Uysal (2014) yaptığı çalışmada, İstanbul Silivri bölgesinden alınan sarı kum numunesinin içsel sürtünme açısını arttırmak için Virgin Homopolymer (VHP) katkısı kullanılmıştır. Tablo 6'da görüldüğü gibi çalışmada, %20, %30 ve %40 rölatif sıkılık değerlerine sahip katkısız numuneleri ile, kuru numune ağırlığına göre %0,50, %1,00 ve %1,50 oranında kum-VHP karışımı hazırlanmıştır. Bu numunelere kesme kutusu deneyleri yapıp elde edilen sonuçların, rölatif sıkılıklarını ve VPH katkıların kayma mukavemet etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, kum numunesinin kayma mukavemeti açısından en düşük değeri, %20 rölatif sıkılıkta ve polimer katkı malzemesi eklenmemiş halde, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumdur. Diğer yandan, en yüksek kayma mukavemeti açısına sahip olduğu durum ise %40 rölatif sıkılıkta ve kütlece %1,5 oranında Virgin Homopolymer (VHP) fiber içerdiğinde, içsel sürtünme açısının 39° olduğu durumdur. Çalışmada elde edilen verilere göre, VHP fiber katkı oranı artmasıyla kayma mukavemeti açısının da arttığı görülmektedir. Ayrıca, numunenin rölatif sıkılığının artırılmasının da zeminde kayma mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. Bu durum, VHP polimerlerin zeminin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve özellikle fiberlerin düşük maliyeti ve hacim kaplama avantajlarıyla kumlu zeminlerin iyileştirmesine alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 6. Kum-Polimer Kayma Mukavemeti Açısı Değerleri (Uysal 2014)

Polimer(VHP)- (Virgin homopolimer	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık %20	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık %30	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık %40
0	28	31	33
0,5	31	33	36
1	33	34	38
1,5	34	36	39

Latifi ve diğerleri (2017), problemlili kaolinit ve montmorillonit kil zeminleri biyopolimer katkılarıyla iyileştirmek amacıyla makro ve mikro ölçekli deneyler gerçekleştirmiştir. Makro ölçekli deneylerde, serbest basınç mukavemeti(UCS), direkt kesme ve tek boyutlu konsolidasyon özellikleri incelenirken, mikro ölçekli analizlerde taramalı elektron mikroskobu (SEM), spesifik yüzey alanı (BET) ve lazerle dane boyutu analizi (PSA) yöntemlerini kapsamaktadır. UCS testleri, bentonit ve kaolinit için sırasıyla %1 ve %1,5 ksantan zatkı katkı oranlarının optimum iyileştirme sonuçlarını sağladığını ortaya koymuştur. Artan katkı oranları ve kür süreleri, UCS ve direkt kesme testlerinde kayma mukavemeti değerlerini arttırmıştır. Ayrıca konsolidasyon testlerinde sertlik ve akma geriliminin artmasına neden olmuştur. Mekanik özelliklerdeki en belirgin gelişmeler, ilk 28 günlük kürlenme sürecinde gözlemlenmiş, bu süreden sonra değişiklikler sınırlı düzeyde kalmıştır.

Saygılı (2018) yaptığı çalışmada, Çanakkale (Çan-Tepeköy) yöresinden tedarik ettiği kaolen türü kil numunelerine melamin formaldehit (MF) sıvı polimerinin eklenerek dayanım özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma, melamin formaldehit sıvı polimerinin zemin iyileştirmesi amacıyla ilk kez kullanıldığı bir çalışmadır. Tablo 7’de görüldüğü gibi polimer katkısı, optimum su muhtevasını aşmayacak şekilde %3, %6, %9 ve %12 oranlarında su ile yer değiştirerek numunelere eklenmiştir. Bu çalışmada numunelerin hazırlanma süreci detaylandırılmış. Öncelikle, numuneler su ile homojen şekilde karıştırılmış. Daha sonra, sıvı polimer eklenerek tekrar karıştırılarak numuneler hazırlanmış. Bu yöntemin, daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiş (Gilazghi vd 2016). Hazırlanan polimer katkı numuneleri, 3, 7, 14 ve 28 gün kür sürecine tabi tutulmuştur, bu süreçte dayanım özellikleri incelenmiştir. Kür süresi sonunda, ASTM standardına göre serbest basınç deneyleri belirlenmiş olan 0.5 mm/dakika yükleme hızı ile yapılmış ve katkıların ortalama dayanımları hesaplanmıştır (Tablo 8).

Sonuç olarak çalışmada, MF0 (katkısız) numuneye göre, MF12 (%12 sıvı polimer katkılı) numune 28 gün sonunda yaklaşık 5 katı aşan bir dayanım artışı gözlenmiştir. Benzer şekilde, MF3 (%3 sıvı polimer katkılı) numune de 28 gün sonunda katkısız numuneye göre belirgin bir mukavemet artışı göstermiştir, ancak bu artış MF12 kadar yüksek olmasada katkısız

numuneye göre serbest basınç dayanımının 3 kattan fazla arttığı gözlenmiştir. Tablo 8'de görüldüğü üzere, MF9 ve MF12 örnekleri 28 günlük kür sürecinin sonunda birbirlerine yaklaşık dayanımlar sergilemiştir. Bu bulgulara dayanarak, optimum katkı oranının %9 olarak önerilebileceği belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada dikkat çeken bir nokta ise, dayanımın sadece 3 gün kadar kısa sürede bile yaklaşık iki katına çıkabileceğidir. Bu durum, özellikle acil müdahale gerektiren durumlarda sıvı melamin formaldehit polimeri kullanımının hızlı dayanım kazanma açısından önemli olabileceğini göstermektedir. Literatürdeki diğer çalışmalar (Liu vd 2011; Naeini vd 2012; Gilazghi vd 2016; Rezaeimalek vd 2017) da başka sıvı polimer katkısı kullanılan zeminlerin incelendiğini ve kazanılan dayanım artışlarının bu çalışma sonuçlarıyla benzer düzeyde olduğunu belirtmiştir.

Tablo 7. Katkı Oranları (Saygılı 2018)

Örnek adı	Kil kütlesi (gr)	Sıvı polimer kütlesi (gr)	Distile su kütlesi (gr)
MF3	120	3,6	14,4
MF6	120	7,2	10,8
MF9	120	10,8	7,2
MF12	120	14,4	3,6

Tablo 8. Kil Numunelerin Kür Sürelerine göre Basınç Dağılımları (Saygılı 2018)

Örnek adı	Kür süresi (gün)	Serbest basınç dayanımı (kPa)
0	0	137,9
1	3	164,1
	7	173,8
	14	249,6
	28	409,4
2	3	316,2
	7	332,1
	14	421,5
	28	504,7
3	3	197,1
	7	450,3
	14	525,7
	28	563,1
4	3	256,2
	7	330,2
	14	529,2
	28	600,4

Çabalar ve arkadaşları (2018), düşük plastisiteli killerin geoteknik özelliklerini geliştirmek amacıyla Xanthan Gum biyopolimerinin etkilerini incelemiştir. Kil numuneler, ağırlıkça %0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0 biyopolimer oranlarıyla karıştırılmış ve farklı kür süreleri (0, 7, 28, 56 gün) boyunca test edilmiştir. Çalışma kapsamında laboratuvar veyn deneyi, serbest basınç, permeabilite, düşen koni, ödometre, büzülme ve şişme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, biyopolimer oranı ve kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetinin attığını göstermiştir. Ayrıca, biyopolimerle iyileştirilen numunelerde daha düşük permeabilite, daha yüksek sıkışma indeksi ve daha yüksek şişme yüzdesi tespit edilmiştir. Biyopolimerlerin, alt temel, dolgu ve derin karıştırma gibi zemin iyileştirme uygulamalarında kullanıma uygun olduğu belirtilmiştir.

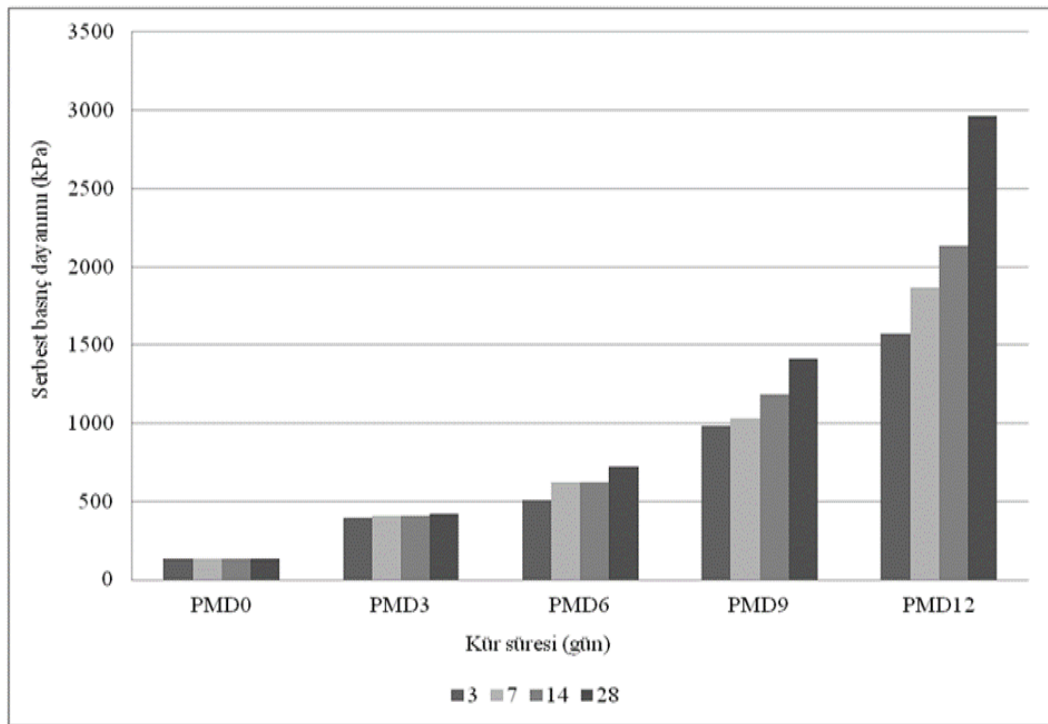
Karaca (2018), yüksek plastisiteli bentonit kilinin kireç ile iyileştirilmesinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. İlk aşamada, bentonit kilinin Atterberg limitleri belirlenmiş ve kireçle yapılan iyileştirme sonrası serbest basınç mukavemetinde artış tespit edilmiştir. %7,5 kireç ilavesiyle yapılan iyileştirme, 28 günlük kür sonunda mukavemeti 123,84 kPa'dan 843,33 kPa'a yükseltmiştir. Sonraki aşamalarda, bentonit ve %7,5 kireç karışımına çimento, polimer ve silikon eklenerek ek iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç mukavemetinin çimento ilavesi sonucu 952 kPa, %4 silikon ilavesi sonucu 1759 kPa ve %2 polimer ilave sonucu 2117 kPa'a kadar dayanımı artırılmıştır. Sonuçlar, bentonit kilinin kireçle iyileştirilmesinin çimento, polimer ve silikon katkılarıyla daha da geliştirilebileceğini ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında verimliliği artırabileceğini göstermektedir.

Hamidi ve Marandi (2018), çalışmasında, yumuşak killi zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla çimento ve epoksi reçinelerinin kullanımı incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, epoksi reçinesinin killi zeminlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmek, killi beton oluşumuyla kil minerallerinin davranışını analiz etmek ve elastik modül üzerinden optimum katkı oranını belirlemektir. Çalışma kapsamında bentonit ve kaolinit içeren iki farklı kil zemini üzerinde mikro ve makro yapı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, epoksi reçinesinin zemin dayanıklılığını 100 ila 1000 kat artırdığını ve serbest basınç dayanımının bazı örneklerde 50 MPa'a ulaştığını ortaya koymaktadır.

Saygılı (2018) yaptığı çalışmada, kaolen türü kil numunelerine Polimerik metil difenil izosiyanat (PMD) sıvı polimeri katarak dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Polimerik metil difenil izosiyanat sıvı polimer katkısı optimum su muhtevasını aşmayacak şekilde, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında su ile yer değiştirerek kaolen numunelere eklenmiştir. Hazırlanan polimer katkı numuneleri, 3, 7, 14 ve 28 kür sürecine tabi tutulmuştur. Kür süresi

tamamlandıktan sonra farklı PMD katkı oranlarındaki numunelere serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Sonuç olarak Şekil 14’de görüldüğü gibi, PMD0 (%0 sıvı polimer katkısı) numunesine kıyasla, PMD12 (%12 sıvı polimer katkısı) numunesi 28 gün sonra 20 kattan fazla bir mukavemet artışı sergilemektedir. Ayrıca, PMD3 (%3 sıvı polimer katkısı) numunesi PMD0’a göre en az mukavemet artışını göstermiş olsa da, bu numunede bile, katkısız numuneye göre 3 kattan fazla artış elde edilmiştir. Kür süresindeki artışla, dayanımdaki artış genellikle PMD12 numunesi dışında ilk üç günlük artış kadar belirgin olmamaktadır. Ancak bu durum bile katkısız numune verilerine göre çok fazla olup, özellikle acil müdahale gerektiren durumlarda sıvı PMD polimeri ile yapılan iyileştirmelerin hızlı mukavemet kazanma açısından önemli olduğunu göstermektedir. Derin karıştırma yöntemlerinde PMD sıvı polimer katkısının uygulanması, killi zeminlerdeki birçok soruna çözüm sağlayabilir. Ayrıca, bu yöntem yol altı tabakalarında da kolaylıkla uygulanabilir ve etkili sonuçlar verebilir (Saygılı 2018).



Şekil 14. Farklı oranlarda PMD katkılı kil numunelerin kür sürelerine göre basınç dayanımı (Saygılı 2018).

Lee ve arkadaşları (2019), Sri Lanka’da yol inşaatında kullanılan iyileştirme malzemeleri (özellikle banketler ve alt temeller) arasında Xanthan Gum biyopolimerinin bağlayıcı olarak etkinliğini incelemiştir. Çalışmada, biyopolimerin %1, %1,5 ve %2 oranlarında karıştırıldığı zemin örneklerinin 3 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, 28 günlük numunelerde serbest basınç dayanımının 0,21 MPa’dan 4,9 MPa’ya kadar arttığını ortaya koymuştur. Araştırma, ayrıca biyopolimerin diğer zemin

iyileştirme yöntemlerine göre daha düşük karbondioksit yaydığı ve sürdürülebilir çevre dostu bir malzeme olduğunu vurgulamış ve kullanımını önerilmiştir.

Bagherinia (2019), suya doygun düşük plastisiteli kil zeminlerin biyopolimer (NaAL) ve kimyasal katkılarla iyileştirilmesi durumunu incelemiştir. Çalışmada, %1 oranında biyopolimer içeren numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda maksimum serbest basınç mukavemeti yaklaşık 5,347 MPa olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer, katkısız düşük plastisiteli kilin 28 günlük kür süresi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %1227'lik bir artış oranını göstermektedir.

Tamgaç (2020) tarafından yapılan çalışmada, doğal kil numunelerine %1, %2, %3, %4 oranında kopolimer katkısı katmıştır. Bu katkılarla birlikte kıvam limit deneyleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Belirlenmiş olan optimum su içeriğinde kompaksiyon kalıbı ile hazırlanan numuneler, 0, 3, 7, 28 gün kür edilmiş ve bu süre sonunda serbest basınç deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği belirlenmiş, polimer ilavesinin artmasıyla birlikte numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalma gözlemlenmiştir. Tablo 9'da yer alan verilere göre, katkısız numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 16,5 kN/m³ iken, %4 polimerli numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 15,1 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, %4 polimer içeren numunelerde maksimum kuru birim hacim ağırlığı, katkısız numuneye göre yaklaşık olarak %8 oranında azalmıştır. Sonuç olarak kopolimer oranının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde başlangıçta yaklaşık olarak %1 oranında bir artış gözlenmiş, sonrasında ise bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, polimer ilavesinin numunenin yoğunluğunu düşürdüğünü ve dolayısıyla birim hacim ağırlığını azalttığını göstermektedir. Ayrıca kopolimer katkılı numunenin optimum su içeriği katkısız numunelere kıyasla artmıştır. Tablo 9'da görüldüğü gibi, katkısız numunenin optimum su içeriği %18 iken, %4 polimerli numunelerde bu değer %28 olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, polimer oranının %4 olduğu numunelerde optimum su içeriği %18'e göre %55 oranında artmıştır. Kompaksiyon kalıbında alınan optimum su içeriklerinde sıkıştırılan kil zeminlerden alınan numuneler, 3, 7 ve 28 gün süreyle kür edilmiş ve sonrasında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda katkısız numunelerin serbest basıncı 250 kPa olarak ölçülmüştür. Kür süresi ve polimer oranına göre elde edilen serbest basınç sonuçları ve bu değerlerin katkısız numuneye kıyasla yüzdelik artışları Tablo 10'da detaylı olarak sunulmuştur. Optimum polimer oranı olarak yapılan deneylerden %2 polimer katkılı, 28 gün kür edilmiş numunenin serbest basınç mukavemeti 542 kPa olarak ölçülmüş ve bu değer en yüksek serbest basınç mukavemeti olarak belirlenmiştir. Ayrıca, katkısız numuneye göre serbest basınç

mukavemetleri karşılaştırılırsa, 3 gün kürlenene numunelerin serbest basınç mukavemeti %52 artmış, 7 gün kürlenene numune %74,4 artmış ve 28 gün kürlenene numune serbest basınç mukavemeti %116,8 artmıştır.

Tablo 9. Optimum Su İçeriği-Maksimum Kuru Birim Ağırlık (Tamgaç 2020)

Polimer Yüzdesi (%)	Maksimum Kuru Birim Ağırlık kN/m^3	Optimum Su İçeriği (%)
0	16,5	18
1	15,7	27
2	15,3	28
3	15,1	27
4	15,1	28

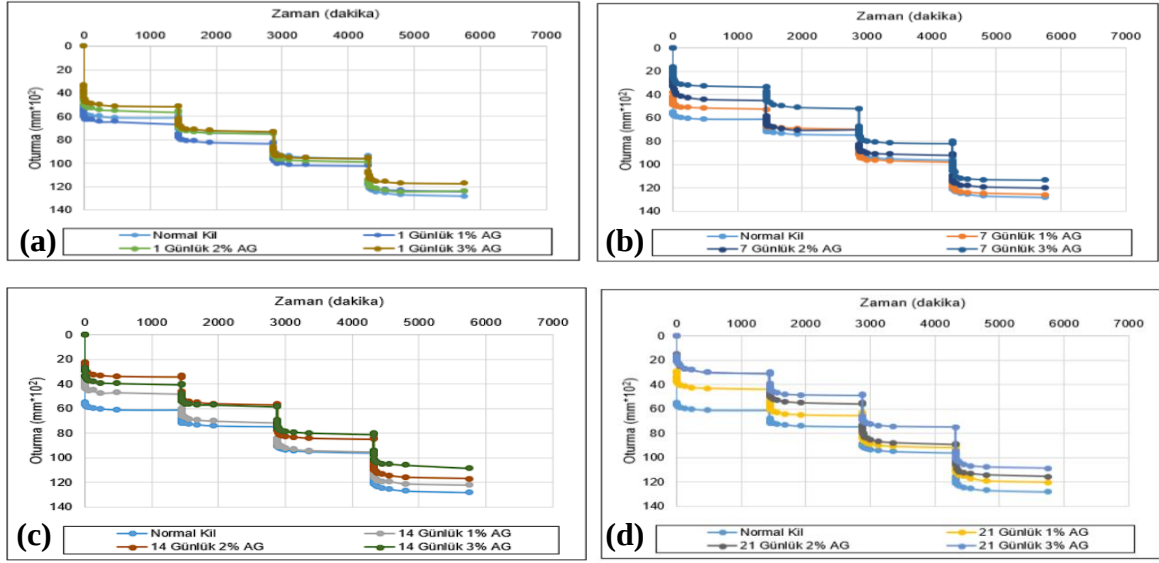
Tablo 10. Yüzdelik Serbest Basınç Değişimleri (Tamgaç 2020)

Polimer Yüzdesi (%)	Kür Süresi (Gün)	Ortalama Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)	Katkısız Zemine Göre Ortalama Yüzde Artış (%)
0	0	250	0,0
1	3	365	46,0
	7	378	51,2
	28	502	100,8
2	3	380	52,0
	7	436	74,4
	28	542	116,8
3	3	348	39,2
	7	415	66,0
	28	520	108,0
4	3	312	24,8
	7	395	58,0
	28	482	92,8

Kahiyah (2020), Adana ilinden alınan killi zemin numunelerini Agar Gam, Arabik Gam, Guar Gam ve Xanthan Gam olmak üzere dört farklı biyopolimerle %1, %2 ve %3 oranlarında karıştırarak biyopolimer katkısının zeminlerin geoteknik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Hazırlanan biyopolimer katkılı numuneler, 1, 7, 14 ve 21 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımı açısından değerlendirilmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı, Arabik Gam için %3, Guar Gam için %1, Agar Gam için %2 ve Xanthan Gam için %2 oranlarında elde edilmiştir. Çalışma, biyopolimerlerin killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini ve çevre dostu bir alternatif sunduğunu göstermiştir.

Ok ve Bağrıaçık (2022), biyopolimerler gibi çevre dostu malzemelerin kullanım alanlarının, artan çevresel sorunlarla birlikte hızla genişlediğini belirtmişlerdir. Çalışmada, Guar Gum biyopolimeri ile kohezyonlu bir zeminin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. %1, %2 ve %3 oranlarında biyopolimer eklenen zemin numuneleri, farklı kür sürelerinin yanı sıra 1, 3, 5 ve 10 çevrimlik donma-çözülme testlerine tabi tutulmuştur. Araştırma sonuçları, biyopolimer katkısının kohezyonlu zeminlerin serbest basınç mukavemeti ve şişme basıncı üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermiştir.

Tunç ve arkadaşları (2022), yaptığı çalışmada doğal kil numunesine ağırlığının %1, %2, %3 oranlarında Arabik Gam Katkılı biyopolimer ilave edilip, belirlenen numunelerden örnekler alınarak 1, 7, 14 ve 21 gün kür süresi sonunda konsolidasyon deneyi yapmış ve Arabik Gam (AG) biyopolimerinin doğal kil zemininin zamana bağlı oturma davranışı incelenmiştir. Çalışmada, AG (Alginik asit) biyopolimerinin doğal kil zemin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Konsolidasyon sonuçlarına göre, AG içeren katkılı numunelerin katkısız numunelere göre daha az oturma gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle %3 AG katkılı numunelerde, 14 ve 21 günlük kür sürelerinde en az oturma sağlanmıştır. Şekil 15'de görüldüğü gibi, katkılı numunelerin zamanla oturma değerlerinin %16,5 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kil zemininin oturma davranışını AG biyopolimeri olumlu yönde etkilediğini ve kür süresi ile birlikte oturma miktarında azalma sağladığını göstermektedir. AG'nin doğal bir malzeme olması ve çevresel avantajları, dolgulardaki oturma performansını artırmak için petrol türevi ve maliyetli katkılara alternatif bir seçenek olarak sunmaktadır. Sonuç olarak, AG'nin ekolojik dengeye zarar vermeden kullanılabileceği ve dolayısıyla çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmaktadır.



Şekil 15. Konsolidasyon oturma sonuçları (a) 1 gün, (b) 7 gün, (c) 14 gün, (d) 21 günlük (Tunç vd. 2022).

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmada kil ve polimer kullanılarak hazırlanan katkılı ve katkısız numunelerin tüm geoteknik özellikleri, Atatürk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Zemin Mekaniği laboratuvarında tespit edilmiştir.

Bentonit kili

Bentonit kili, madenlerden çıkarıldıktan sonra fabrikada çeşitli işlemlerden (örneğin, öğütme) geçirilmekte ve genellikle 25 kg'lık veya daha büyük torbalarda ambalajlanarak satışa sunulmaktadır. Bu yönüyle temini kolay olup, laboratuvar ortamında ilave bir işleme gerek duyulmadan deneylerde rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışmada, Karben Bentonit A.Ş. tarafından üretilen ve 25 kg'lık paketler halinde satılan bentonit kili tercih edilmiştir. Söz konusu bentonit kiline ait bir görsel Şekil 16'da sunulmuştur. Ayrıca, kullanılan bentonit kilinin XRF analiz sonuçları Tablo 11'de yer almaktadır.



Şekil 16. Bentonit kiline ait görsel

Tablo 11. Bentonit Kiline ait XRF Sonuçları

SiO ₂	%61,28
Al ₂ O ₃	%17,79
Fe ₂ O ₃	%3,01
CaO	%4,54
Na ₂ O	%2,70
MgO	%2,10
K ₂ O	%1,24

Polimer

Bu çalışma kapsamında, polivinil alkol (PVA) toz polimer tercih edilmiştir. PVA, çevre dostu, iyonik olmayan, hidrofilik ve yarı kristal yapıya sahip sentetik bir polimerdir. Organik çözücülerde çözünmeyen PVA, biyomedikal uygulamalar için en yaygın kullanılan sentetik polimerlerden biridir. Ayrıca, PVA, lifler ve parçacıklar gibi malzemelerle daha iyi ara yüzey yapışması sağladığı için üstün termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu nitelikleri nedeniyle, yapı kimyasalları üretiminde sıkça tercih edilen bir polimerdir. Bununla birlikte, toz formunda olması ve işlem sırasında suda çözünme özelliği, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilirliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Deneysel çalışmada, bentonitin serbest basınç dayanımını artırmak amacıyla farklı oranlarda (%0, %1, %3, %5, %10 ve %20) toz polimer eklenmiştir. Çalışmada kullanılan toz polimere ilişkin bir görsel Şekil 17’de, polimerin bazı fiziksel özellikleri ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Polimere ait Bazı Fiziksel Özellikler

Görünüm	Beyaz toz
Stabilizasyon sistemi	PolivinilAlkol
Min Film oluşturma sıcaklığı	0 °C
Katı içerik (%)	99 ± 1
Kül İçeriği (%)	10 ~ 13
Kütle Yoğunluğu	450 ~ 700



Şekil 17. Polivinilalkol (PVA) toz polimere ait görsel

Numune hazırlama

PVA esaslı toz polimer belirli oranlarda bentonit kiline karıştırılarak katkılı numuneler üretilmiş ve toz polimerin iyileştirmeye etkisini inceleyebilmek ve kontrol amacıyla katkısız numune üretilmiştir. Numune hazırlama ile ilgili detaylar aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

Polimer oranı

Bu tez çalışmasında kullanılan toz polimer Tablo 13’de verilen oranlarda kullanılmıştır. Belirlenen bu katkı oranları bentonit kilinin kuru ağırlığınca değeridir. Katkı oranlarının belirlenmesinde literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve ön deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Belirlenen bu oranlar literatür ile uyumlu olup literatür incelendiğinde en yüksek katkı oranı olarak yaklaşık %10 kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada en yüksek polimer oranı olarak %20 belirlenmiş olup literatürde çalışılmayan katkı oranının da etkisi incelenmiştir.

Tablo 13. Numune Katkı Oranları

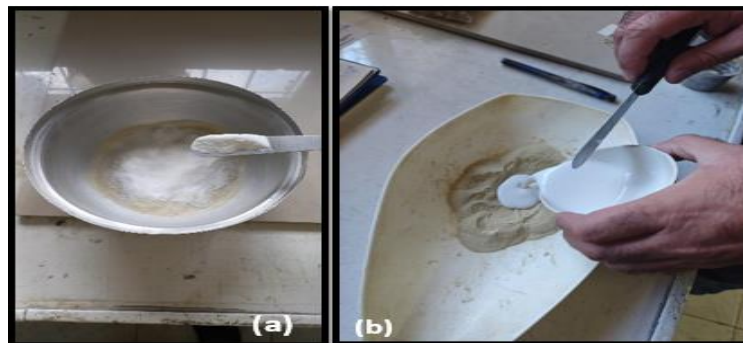
Numune Adı	P0	P1	P3	P5	P10	P20
Katkı Oranı	%0	%1	%3	%5	%10	%20

Numune karıştırma yöntemleri

Bu çalışmada literatüre uygun olarak iki farklı karıştırma yöntemi benimsenmiştir.

Yöntem-1: Bentonit ve polimer kuru halde bir kapta homojen olacak şekilde karıştırılmış, ardından su eklenmiştir.

Yöntem-2: Polimer, önceden belirlenen miktarda su ile karıştırılarak bir süspansiyon hazırlanmış, ardından bu süspansiyon bentonitle karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Karıştırma yöntemlerine ilişkin görseller Şekil 18’de sunulmuştur.



Şekil 18. Karıştırma yöntemleri görseli (a) Yöntem-1, (b) Yöntem-2

Numunelerin sıkıştırılması

Standart Proctor deneyinden elde edilen w_{opt} su içeriği değerine göre numunelere su ilave edilmiş ve karıştırılmıştır. Karışımların tam anlamıyla homojen bir hale gelmesi için Şekil 19'da gösterildiği şekilde karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan tüm numuneler 1 gece kilitli poşetlerde bekletilerek ilave edilen suyun tam olarak tüm zemin tarafından emiliminin gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 19. Karışım hazırlama (a) karıştırma, (b) homojen kıvam

İlgili su içeriklerinde hazırlanan numuneler Sridharan (2005)'te verilen kompaksiyon deney düzeneği ve prosedürü kullanılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 20).



Şekil 20. Kompaksiyon deney aleti (Sridhara 2005)

Hazırlanan numuneler, yan yüzeyleri ve tabanları ince bir yağ tabakasıyla kaplanan, 38 mm çapında ve 78 mm yüksekliğindeki metal silindir kompaksiyon kalıplarına yerleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminden sonra kalıbın üst kısmında oluşan fazlalıklar spatula yardımıyla

temizlenmiş ve numune yüzeyi tamamen düz bir hale getirilmiştir. Hazırlanan numuneler, hidrolik numune çıkarıcı ile dikkatlice kalıptan çıkarılmış ve serbest basınç deneyine hazır silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 21).



Şekil 21. Silindirik numune

Numune hazırlama prosedürü her iki karıştırma yöntemi içinde ayrı ayrı uygulanmış ve her iki karıştırma yöntemine göre numuneler elde edilmiştir.

Kür işlemi

Standartlara uygun olarak hazırlanan numuneler, laboratuvar koşullarında (22 ± 2 °C sıcaklık ve %18,5 bağıl nem) literatüre uygun şekilde 0, 1, 3, 7 ve 28 gün süreyle kürlenmek üzere nem odasına yerleştirilmiştir. Bu süreç boyunca numunelerin kurumasını engellemek amacıyla gerekli tedbirler alınmıştır (Şekil 22). Kür süresini tamamlayan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 22. Kürlenme işlemine ait görseller

Numunelerin isimlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda, karışıklığı önlemek amacıyla numunelere belirli bir isimlendirme sistemi uygulanmıştır. Bu isimlendirme sisteminde 3 grup sembol bulunmaktadır. Herbir sembol grubu ise 1 harf ve 1 sayıdan oluşmaktadır. Bu açıdan, “M1 ve M2” sembol grubu sırasıyla karıştırma Yöntemi-1 ve Yöntem-2’yi temsil ederken ikinci sembol grubunda bulunan “P0, P1, P3, P5, P10 ve P20” sembolleri ise polimer katkı oranlarını temsil etmektedir. Son sembol grubunda ise kür süresini göstermek amacıyla “K0, K1, K3, K7 ve K28” kullanılmış olup sırasıyla hazırlanan numunelerin 0 gün (kürsüz), 1 gün, 3 gün, 7 gün ve 28 gün küre maruz kaldığını göstermektedir. Açıklayıcı bir örnek teşkil etmesi açısından Tablo 14’te bazı numune isimleri ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 14. Kullanılan Numunelerin İsimlendirme Sistematığı Örneği

NUMUNE İSMİ	KARIŞTIRMA YÖNTEMİ	POLİMER ORANI (%)	KÜR SÜRESİ (GÜN)
M1P0K28	1. YÖNTEM	% 0	28
M1P1K28	1. YÖNTEM	% 1	28
M1P3K28	1. YÖNTEM	% 3	28
M1P5K28	1. YÖNTEM	% 5	28
M1P10K28	1. YÖNTEM	% 10	28
M1P20K28	1. YÖNTEM	% 20	28
M2P0K7	2. YÖNTEM	% 0	7
M2P1K7	2. YÖNTEM	% 1	7
M2P3K7	2. YÖNTEM	% 3	7
M2P5K7	2. YÖNTEM	% 5	7
M2P10K7	2. YÖNTEM	% 10	7
M2P20K7	2. YÖNTEM	% 20	7

Yöntem

Bu çalışmada, katkısız ve katkılı numuneler üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Katkısız kil numunesi üzerinde hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde kıvam limitleri deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, hazırlanan tüm numuneler Standart Proctor deneyine tabii tutulmuş ve bu deneyler sonucunda maksimum kuru b.h.a ve optimum su içerikleri tespit edilmiştir. Optimum su içeriklerine göre hazırlanan katkılı ve katkısız numuneler, hava geçirmez şekilde desikatörde 0, 1, 3, 7 ve 28 gün bekletilmiş ve ardından serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Standart proctor kompaksiyon deneyi

Kompaksiyon, mekanik enerji uygulanarak zeminin sıkıştırılması işlemidir. Bu işlem, yalnızca zeminin sıkıştırılmasını değil, aynı zamanda derecelenmesini veya su içeriğinin değiştirilmesini sağlamak amacıyla da yapılabilir (Holtz vd 2015). Kompaksiyonun temel amacı, zemini sıkıştırarak maksimum kuru birim hacim ağırlığı sağlayan optimum su içeriğine ulaşmaktır (Güven 2024).

Kompaksiyon deneyleri katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılmış olup ASTM D 698-12(2021) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi için Sridharan (2005)'te belirtilen kompaksiyon deney düzeneği ve prosedürü kullanılmış.

Bu amaçla, hazırlanan numunelere belirli miktarda su eklenmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Şekil 23'de görüldüğü üzere, hazırlanan numuneler 38 x 78 mm hacmindeki silindirik kompaksiyon kalıbına üç tabaka halinde 1/3'ü dolacak şekilde yerleştirilmiş, 1 kg ağırlığında 14 cm yüksekliğinden düşen tokmak ile her tabakaya 36 kez vurularak sıkıştırılmıştır (Sridhara 2005).

Bu sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra standart Proktor deneyindeki enerjiye eşdeğer bir enerji verilmiş olup kalıptaki fazlalıklar traşlanarak düzeltilmiş ve tartılmıştır. Sonrasında ise numunenin su içeriğinin belirlenmesi için örnek alınıp etüv kullanılarak numunelerin yaş ve kuru ağırlıkları hassas terazide ölçülmüş ve bu işlem farklı su içerikleri için 5 kez tekrarlanarak kompaksiyon eğrileri çizilmiştir. Sonuç olarak maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{d-maks}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) bulunmuştur.



Şekil 23. Sridharan kompaksiyon deneyi

Özgöl Ağırlık Deneyi

Özgöl ağırlık deneyleri ASTM D854 (2014) standardına göre yapılmış olup, 250 ml'lik piknometreler kullanılmıştır. Şekil 24'de görüldüğü gibi hava alma yöntemi olarak vakum işlemi uygulanmıştır. Deney, yalnızca katkısız kil numuneleri üzerinde uygulanmış olup iki kez tekrarlanıp ortalaması alınmış ve bu değer zemin özgöl ağırlığı olarak kaydedilmiştir.



Şekil 24. Özgöl ağırlık deneyi

Hidrometre deneyi

Kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin dane çapı dağılımını belirlemek için, Stokes Yasasına dayanan hidrometre analizi kullanılmaktadır. Stokes Yasası, viskoz bir sıvı içinde çökelen tanelerin çökme hızının, tanelerin çapına ve süspansiyonun yoğunluğuna bağlı olduğunu esas alır. Bu yöntemle, çökme mesafesi ve zamana göre tanelerin çapı hesaplanır.

Hidrometre deneyi, ASTM-D422 (2007) standardına göre yapılmış olup, Şekil 25'te görüldüğü gibi ASTM 152-H tipi hidrometre kullanılmıştır. Okumalar arasında, hidrometre aleti aynı sıcaklıktaki saf suda muhafaza edilerek bekletilmiştir. Elde edilen verilerle düşüş mesafesi ve zaman değişimi kullanılarak tane çapı dağılımı hesaplanmıştır.



Şekil 25. Hidrometre deneyi

Kıvam limitleri deneyleri

Likit limit (düşen koni) deneyi

Kil numunesine su eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan numune, penetrometre cihazına ait penetrasyon kalıbına hava kabarcığı oluşmayacak şekilde yerleştirilmiş, yüzeyi düzeltilmiş ve cihazın tabanına yerleştirilmiştir. Karışımın üzerine dokunma pozisyonuna getirilen 80 gram ağırlığındaki koni, yalnızca kendi kütlesi etkisiyle serbest düşüşe bırakılmış ve 5 saniye süreyle zemine batması sağlanmıştır. Deney sonunda, cihazdaki deformasyon göstergesinden elde edilen batma değerlerine karşılık gelen su muhtevası hesaplanmıştır.

Bu işlem, %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında polimer katkılı karışımlar için su muhtevası artırılarak tekrarlanmıştır. Elde edilen deney sonuçları, katkısız kil numunesinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney prosedürüne uygun olarak, 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Likit limit deneyi BS EN ISO 17892-12:2018+A1:2021 standardına göre yapılmıştır. Düşen koni yöntemi ile gerçekleştirilen likit limit deneyi, Şekil 26'da görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 26. Konik penetrasyon deneyi

Plastik limit deneyi

Plastik limit, ince daneli zeminlerin şekil verebilme özelliğinin sona erdiği ve zeminin çatlayarak plastikten yarı katı bir malzemeye dönüştüğü andaki su muhtevası olarak tanımlanır. Deney, likit limit için hazırlanan numuneden yaklaşık 20 gram alınarak gerçekleştirilmiştir. Numune, cam veya pürüzsüz bir yüzey üzerinde, ele yapışmayan ve plastik bir top formu alana kadar yoğrulmuştur. Hazırlanan numune, avuç içinde yuvarlanarak silindir şekli verilmiş ve çapı 3 mm'ye ulaştığında kopma ve çatlama gözlenene kadar işlem tekrar edilmiştir. Bu kıvamda dağılan numuneden parçalar alınarak su muhtevası hesaplanmıştır.

Plastik limit deneyi, ASTM D4318-17e1 (2017) standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup katkısız ve katkılı numuneler için ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 27). Ayrıca zeminlerin plastik davranış aralığını belirlemek için plastisite indisi (PI) hesaplanmıştır. Plastisite indisi, likit limit ile plastik limit arasındaki fark olarak ifade edilir. PI değeri, ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu için önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (Holtz vd 2015).



Şekil 27. Plastik limit deneyine ait görseller

Serbest basınç deneyi

Deney için hazırlanan katkısız kil numuneleri ve Bentonit-PVA karışımlarına, Standart Proktor deneyinden elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) oranında su eklenmiştir. Katkılı ve katkısız numuneler, 38 mm çapında ve 78 mm yüksekliğinde silindirik kalıba üç tabaka halinde özenle yerleştirilmiş, her bir tabakaya 36 vuruş uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma sırasında hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilmiş, kalıp üzerindeki fazlalıklar traşlanarak düzeltilmiştir.

Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için kalıbın iç yüzeyi ince bir yağ tabakası ile kaplanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, belirlenen kür süreleri boyunca bekletildikten sonra serbest basınç deney cihazına yerleştirilmiş ve düşey yönde kuvvet uygulanmıştır. Deney süresince uygulanan kuvvet ve oluşan deformasyonlar ölçülerek kaydedilmiştir. Deneylerde

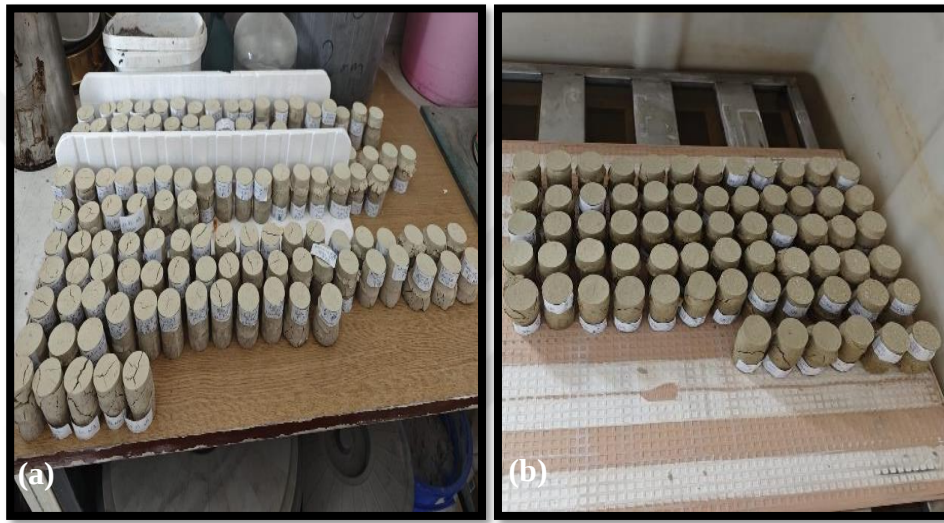
yükleme hızı 0,8 mm/dakika olarak belirlenmiş ve yükleme işlemi numunelerin kırılmasına kadar devam ettirilmiştir.

Serbest basınç deneyi, Amerikan ASTM D2166-06 (2006) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 28, birinci ve ikinci karıştırma yöntemine göre kırılan serbest basınç numunelerini, Şekil 29 ise deney düzeneğini göstermektedir.

Zemin numunelerinin serbest basıncı, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$q_u = P_{max} / A_f \quad (2)$$

A_f : Kırılma anındaki en kesit alanı, P_{max} : Kırılma anındaki yük değeri , q_u : Serbest basınç mukavemeti



Şekil 28. (a) Yöntem-1, (b) Yöntem-2



Şekil 29. Serbest basınç deneyi görseli

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), zeminlerdeki kil minerallerinin ve polimer katkıların morfolojisini, kristal yapılarını ve boyutlarını incelemek için kullanılmıştır. Bu teknikte, numuneler 200 ila 50.000 kat büyütülerek mikro ve nano düzeyde görüntüler elde edilir. SEM, odaklanmış bir elektron demetinin numune yüzeyine yönlendirilmesi ve atomlarla etkileşim sonucu oluşan saçılmanın detektörlerle analiz edilmesi prensibine dayanır. Bu sayede kil tanelerinin yüzeyindeki mikro çatlaklar, delikler ve topografik özellikler ayrıntılı şekilde gözlemlenebilir. Ayrıca, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) gibi ek analizlerle, kil tanelerinin elementel bileşimi de belirlenebilir. SEM analizleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM merkezinde yapılmıştır.

Temas açısı

Temas açısı, yüzeylerin sıvılarla etkileşimlerini ve zeminlerin elektriksel özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Sıvının katı yüzeydeki yayılma derecesini belirleyerek zeminlerin suyla etkileşimi hakkında bilgi sağlar. Temas açısı, sıvı molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetleri ile sıvı-katı arasındaki adhezyon kuvvetlerinin göreceli büyüklüğüne bağlıdır. Kohezyon kuvvetleri adhezyondan büyükse temas açısı artar; küçük bir temas açısı ise sıvı-katı çekiminin güçlü olduğunu gösterir. Temas açısı, yüzeyin temizliği, pürüzsüzlüğü ve sıvının saflığından etkilenir.

Hidrofilik özellikleriyle bilinen kil mineralleri, suyla kolayca etkileşerek düşük temas açıları sergiler. Örneğin, montmorillonit gibi mineraller yüksek su tutma ve şişme özellikleri nedeniyle düşük temas açısına sahiptir. Kilin mineral yapısı, yüzey yükleri ve iyon birikimi gibi faktörler temas açısını doğrudan etkiler; örneğin, sodyum iyonları açığı artırırken kalsiyum iyonları azaltır. Ayrıca yüzey pürüzsüzlüğü daha düşük temas açıları ile ilişkilidir.

Geoteknik uygulamalarda temas açısının optimize edilmesi, suyla etkileşimlerin kontrolünde kritik bir rol oynar. Bentonit gibi killi, geçirimsizlik ve stabilizasyon çalışmalarında yüzey-sıvı etkileşimlerini iyileştirmek için kullanılır. Temas açısı ölçümleri genellikle damlacık yöntemiyle yapılır ve zeminlerin su tutma kapasitesi, geçirgenlik ve şişme özelliklerini anlamada değerli bilgiler sunar. Temas açısı analizleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM merkezinde yapılmıştır.

Sekant modülü

Sekant modülü (E_s), zeminlerin gerilme deformasyon davranışının belirlenmesinde kullanılan temel bir parametre olup, özellikle serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri bağlamında iyileştirilmiş kil numunelerinin rijitlik düzeyini yansıtmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir (Das ve Sobhan 2013).

Zemin iyileştirme işlemleri ile birlikte, katkı maddeleri sayesinde kil danelerinde meydana gelen mikro yapısal gelişmeler, özellikle çimento esaslı reaksiyon bağları, numunelerin elastik davranış aralığını artırmakta ve sekant modülünde önemli artışlara neden olmaktadır (Keskin vd 2017). Bununla birlikte, donma çözülme çevrimleri gibi çevresel etkiler, kilin iç yapısını bozarak elastik tepkisini zayıflatmakta ve E_s değerinde azalmaya yol açmaktadır (Jahandari vd 2020). Bu azalma, iyileştirilmiş zeminlerin çevresel dayanıklılığının ve uzun vadeli mühendislik performansının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, E_s yalnızca rijitlik değerlendirmesi için değil, aynı zamanda farklı katkı türlerinin ve çevresel koşulların zemin davranışına etkisinin belirlenmesi açısından da güvenilir bir göstergedir. Sekant modülü Denklem (3)'teki formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Karimi 2023).

$$E_s = \frac{\%50 \text{ Pik Gerilme}}{\text{Karşılık gelen Gerinim}} \quad (3)$$

Deformasyon indeksi

Deformasyon indeksi (I_D), iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminlerin süneklik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde kullanılan yararlı bir parametredir. Özellikle UCS deneylerinde bulunan maksimum dayanımda ölçülen birim deformasyonların oranı ile tanımlanan katkı uygulamalarının, kilin deformasyon kapasitesine etkisini yansıtan analitik bir parametredir. (Kustov ve Ruppeneit 1985; Randhawa vd 2022).

Zemin iyileştirmesi, genellikle kil zeminlerin deformasyon kabiliyetini sınırlandırarak kırılğan davranışa yönelmesine neden olup, bu durum I_D değerinde düşüşe sebep olmaktadır. Özellikle çimento, kireç ya da enzim temelli katkılarla iyileştirilmiş numunelerde, tane yapısındaki bağların güçlenmesine, deformasyon kapasitesinin sınırlandırılmasına ve kırılğan bir davranışın ortaya çıkmasına neden olur (Janoo 1998). Aynı şekilde, tekrarlı donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan kil numunelerinde, bağların zayıflaması sonucu deformasyon kapasitesi artmakta ve I_D değeri yükselmektedir (Jahandari vd 2020). Bu durum, sünekliğini yeniden kazandığını ve kilin çevresel koşullara bağlı olarak davranış değişimi sergilediğini göstermektedir. Dolayısıyla deformasyon indeksi, yalnızca katkı performansının değil, aynı zamanda zeminlerin çevresel koşullar altındaki uzun dönem dayanım ve deformasyon

kapasitesinin değerlendirilmesi açısından da önemli bir mühendislik parametresi olarak öne çıkmaktadır. Deformasyon indeksi Denklem (4)'te verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır (Karimi 2023).

$$I_D = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ut}} \quad (4)$$

Burada; ε_{ct} ; Polimer katkılı karışımın pik gerinimi, ε_{ut} ; Katkısız kil numunesinin pik gerinimi' dir.



ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

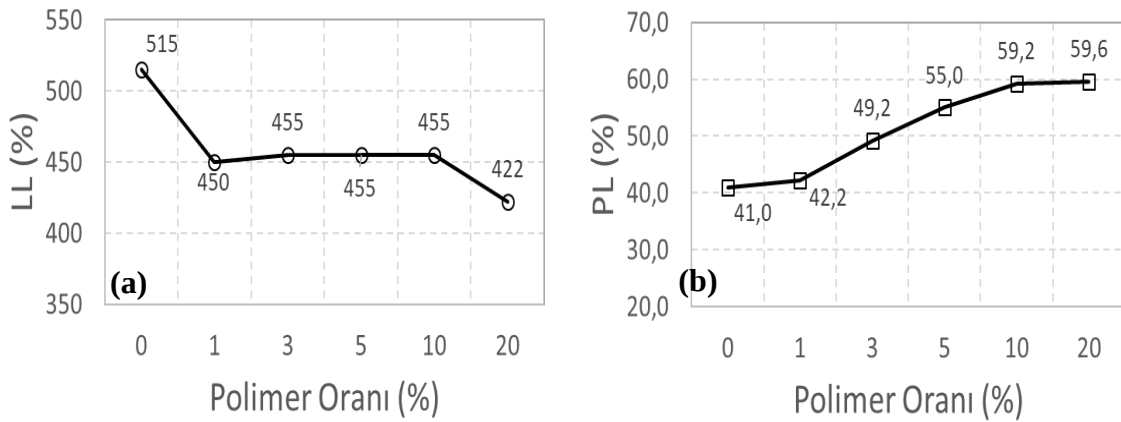
Bu çalışmada, katkısız ve polimer katkılı numuneler üzerinde özgül ağırlık, hidrometre, likit limit, plastik limit, standart Proktor ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş; deney sonuçları karşılaştırılarak polimer katkısının zemin özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Katkısız ve polimer katkılı killeri üzerinde kıvam limit deneyleri gerçekleştirilmiş olup, numunelere ait kıvam limitleri Tablo 15'te sunulmuştur. Katkılı ve katkısız numunelerin likit limit ve plastik limit değerlerine ilişkin grafikler Şekil 30'da verilmiştir. Likit limit deneyinde düşen koni yöntemi kullanılmış olup deney BS EN ISO 17892-12:2018+A1:2021 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Plastik limit deneyi ise ASTM D4318-17e1 (2017)'e göre yapılmıştır.

Tablo 15. Katkısız ve Polimer Katkılı Numunelerin Kıvam Limitleri Sonuçları

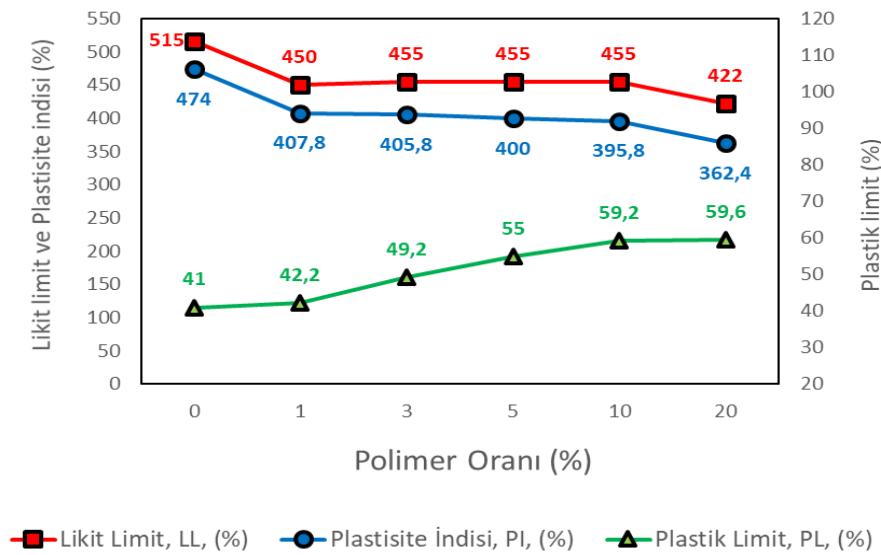
Polimer Oranı (%)	Likit Limit, LL, (%)	Plastik Limit, PL, (%)	Plastisite İndisi, PI, (%)
0	515,0	41,0	474,0
1	450,0	42,2	407,8
3	455,0	49,2	405,8
5	455,0	55,0	400,0
10	455,0	59,2	395,8
20	422,0	59,6	362,4



Şekil 30. Katkısız ve polimer katkılı bentonit numunelerinin (a) likit limit ve (b) plastik limit deney sonuçları

Katkısız numuneler üzerinde yapılan kıvam limit deneylerinde, likit limit %515, plastik limit %41 ve plastisite indisi %474 olarak tespit edilmiştir. Polimer katkılı numunelerde, katkısız numuneye kıyasla likit limit değerleri yaklaşık olarak %1 polimer için %13 azaldığı, %3, %5 ve %10 polimer oranları için %12 azaldığı ve %20 polimer oranı için %18 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde plastik limit değerlerinde ise katkısız numunelere kıyasla %1, %3, %5, %10 ve %20 polimer katkılı numunelerde sırasıyla yaklaşık olarak %3, %20, %34, %44, ve %45 artış tespit edilmiştir.

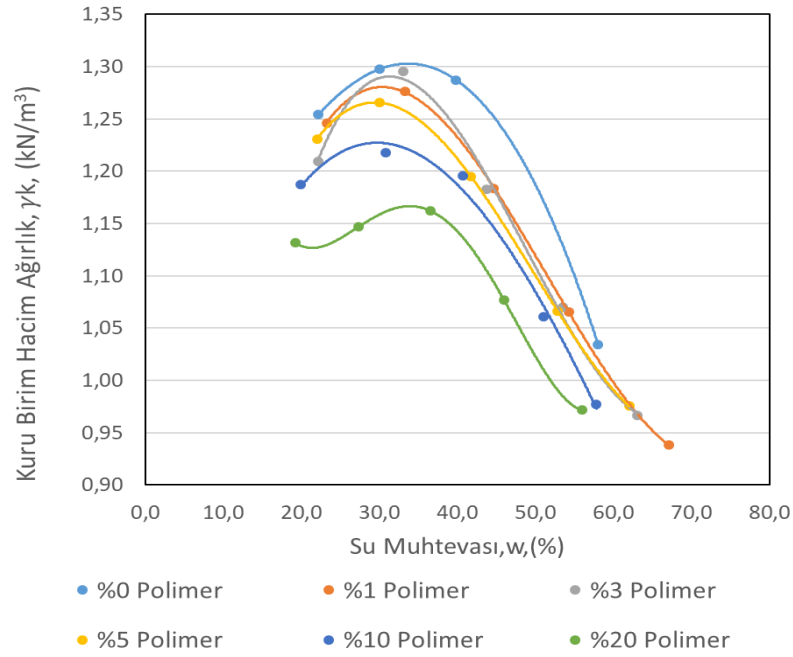
Şekil 31’de görüldüğü gibi polimer oranı arttıkça, likit limitte düşüş, plastik limitte ise artış eğilimi olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, literatürdeki çalışmalarla uyumlu olup, (Şahbaz 2020) yapmış olduğu çalışmada, kil numunelerine eklenen katkı maddelerinin likit limit değerini düşürdüğünü ve plastik limit değerini artırdığını ifade etmiştir. Ayrıca, katkısız numunelerinin plastisite indisi değerlerinin, polimer katkılı numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 31. Polimer artışının kıvam limitlerindeki değişimi

Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

Kompaksiyon deneyleri katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılmış olup ASTM D 698-12(2021) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi için Sridharan (2005)’te belirtilen kompaksiyon deney düzeneği ve prosedürü kullanılmıştır. Katkılı ve katkısız numunelere ait bu deneyden elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 32’de sunulmuştur. Şekil 32 incelendiğinde, genel olarak polimer katkı oranı arttıkça kompaksiyon eğrilerinin katkısız numunenin eğrisine göre aşağıya doğru kaydığı görülmektedir.



Şekil 32. Kompaksiyon eğrileri

Kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{k-maks}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri Tablo 16'da özetlenmiştir. Diğer taraftan, polimer oranına bağlı olarak numunelerin γ_{k-maks} ve w_{opt} değerlerindeki değişim ise Şekil 33'de verilmiştir.

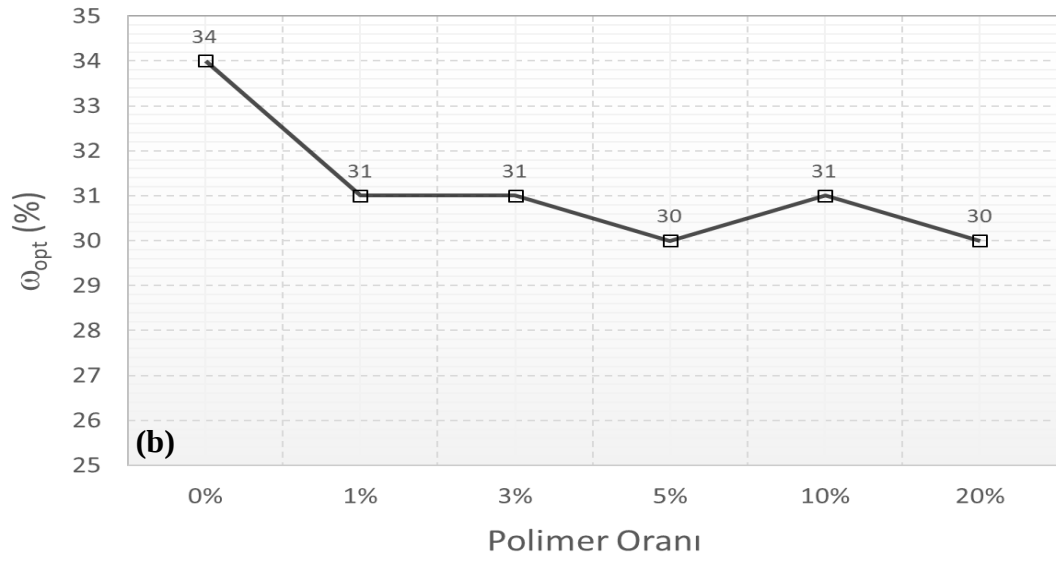
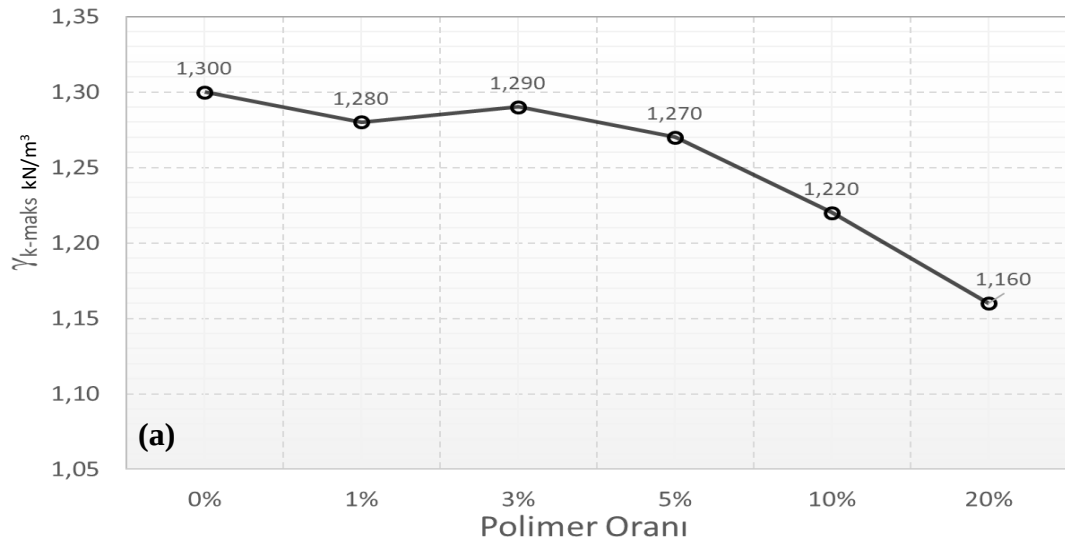
Şekil 33.a incelendiğinde, katkısız numunenin γ_{k-maks} değeri $1,3 \text{ kN/m}^3$ olduğu görülmektedir. Ancak, polimer oranının artmasıyla birlikte γ_{k-maks} değerinin kademeli olarak düştüğü ve P20 numunesinde yaklaşık %10,8 oranında azalarak $1,16 \text{ kN/m}^3$ değerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Bu azalma, polimerin özgül ağırlığının kilin özgül ağırlığından daha düşük olması nedeniyle, karışımın toplam özgül ağırlığını düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan, katkısız numunenin w_{opt} değeri %34 olarak belirlenmiştir. Polimer oranının artışıyla birlikte w_{opt} değeri %30-%31 aralığına düştüğü ve polimer oranının değişimiyle çok fazla değişmediği tespit edilmiştir (Şekil 33.b). Bu durum, kil numunesinin su ihtiyacının polimerden daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tamgaç (2020) tarafından yapılan çalışmada, polimer oranının artışıyla optimum su içeriğinin arttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise azaldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ise polimer oranındaki artışın hem optimum su içeriğini hem de maksimum kuru birim hacim ağırlığını azalttığı gözlemlenmiştir. Bu farklılığın, kullanılan kil tipinin bentonit olması ve PVA polimerinin tercih edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 16. Kompaksiyon Parametreleri

Polimer Oranı (%)	w_{opt} (%)	γ_{k-maks} (kN/m ³)
0	34	1,300
1	31	1,280
3	31	1,290
5	30	1,270
10	31	1,220
20	30	1,160

**Şekil 33.** Katkısız ve katkılı bentonit numunelerinin kompaksiyon (a) maksimum kuru birim hacim ağırlık ve (b) optimum su içeriği deney sonuçları

Özgöl Ağırlık Deneyi Sonuçları

Özgöl ağırlık deneyi yalnızca katkısız kil zemin üzerinde yapılmış ve standart piknometre kullanılarak ASTM D854 (2014) standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, kil zeminlerin özgül ağırlığı **2,726** olarak tespit edilmiştir.

Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

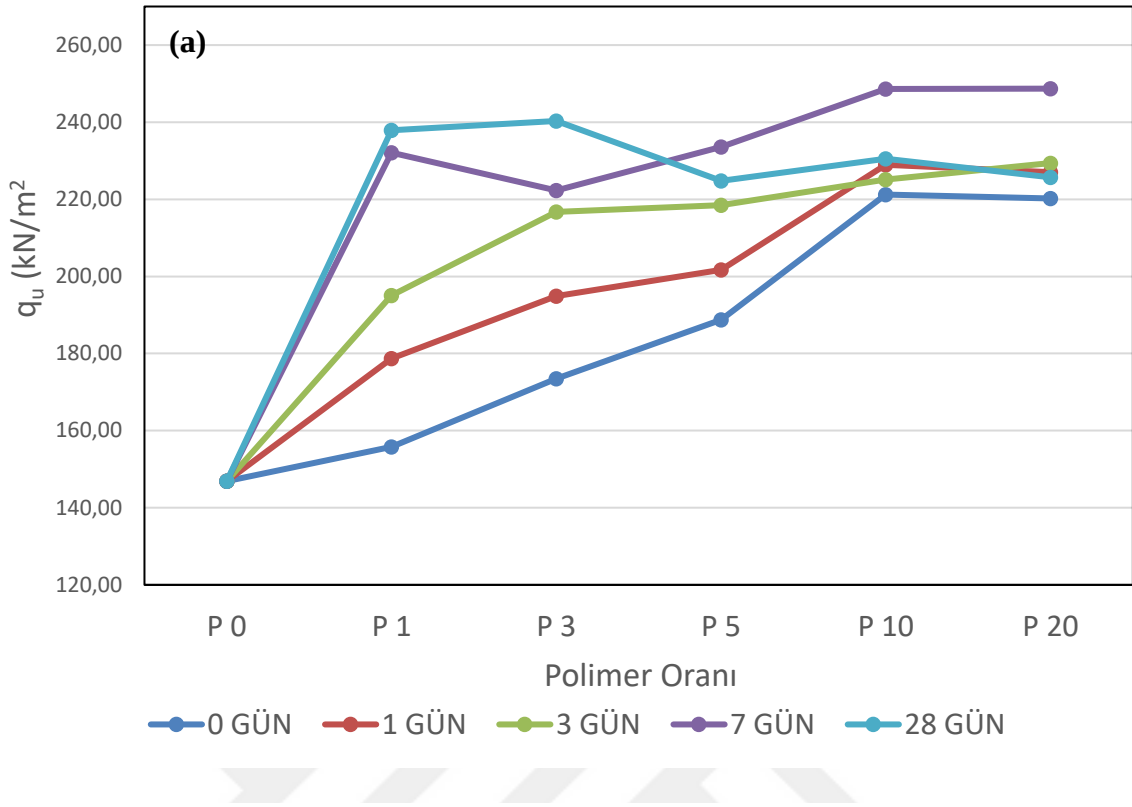
Katkısız kil numunesi ile %1, %3, %5, %10 ve %20 polimer katkılı kil numuneleri üzerinde standart kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmiş ve bu deneyden maksimum kuru birim ağırlıkları ile optimum su içerikleri belirlenmiştir. Optimum su içeriklerinde kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan katkısız ve katkılı kil numunelerinden örselenmemiş örnekler alınmış ve bu numuneler 0, 1, 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri boyunca desikatörde muhafaza edilmiştir. Bu süreçte numunelerin su içeriklerini korudukları ve su kaybının deney sonuçlarını etkileyecek seviyede olmadığı tespit edilmiştir. ASTM D2166-06 (2006) standardına uygun olarak gerçekleştirilen serbest basınç deneyi için numune hazırlama ve kütleme işlemleri her iki karıştırma yöntemi için ayrı ayrı yapılmıştır.

Katkısız kil numunesinin serbest basınç mukavemeti 146,91 kN/m² olarak bulunmuştur. Farklı karıştırma yöntemlerine göre, karışım oranları ve kür süreleri için elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 34’de görülmektedir. Buna ek olarak, katkısız kil numunelerine göre yüzdelik artış oranları Tablo 17’de verilmiştir. Genel olarak polimer oranı ve kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek serbest basınç mukavemeti, 1. Karıştırma yöntemi için %20 polimer katkılı ve 7 gün kür edilmiş numunelerden (248,70 kN/m²), 2. Karıştırma yöntemi için ise %10 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden (296,40 kN/m²) elde edilmiştir.

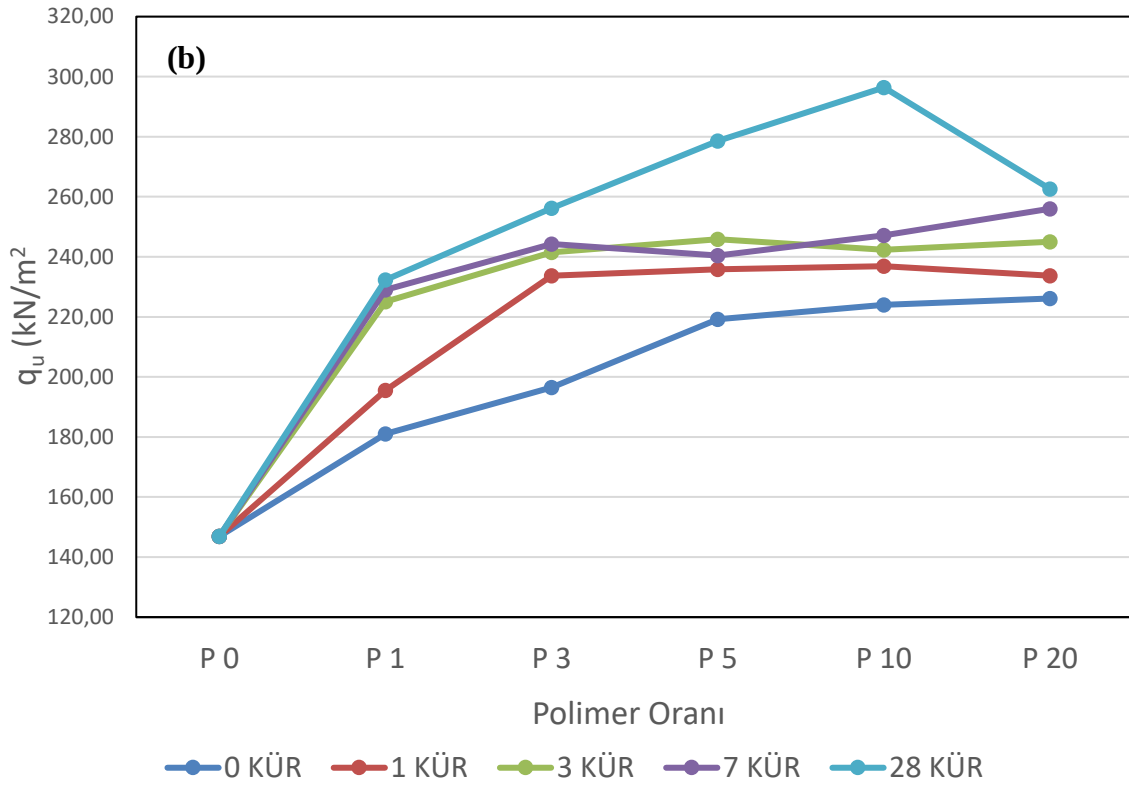
Tablo 17. Serbest Basınç Sonuçları ve % Değişimler (a) 1. Karıştırma Yöntemi, (b) 2. Karıştırma Yöntemi

(a)	1. KARIŞTIRMA YÖNTEMİ									
	0 KÜR		1 KÜR		3 KÜR		7 KÜR		28 KÜR	
	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)
P 0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0
P 1	155,79	6,0	178,73	21,7	195,08	32,8	232,09	58,0	237,88	61,9
P 3	173,44	18,1	194,91	32,7	216,75	47,5	222,34	51,3	240,32	63,6
P 5	188,73	28,5	201,73	37,3	218,48	48,7	233,62	59,0	224,82	53,0
P10	221,22	50,6	228,94	55,8	225,14	53,3	248,59	69,2	230,52	56,9
P20	220,24	49,9	227,07	54,6	229,39	56,1	248,70	69,3	225,71	53,6
(b)	2. KARIŞTIRMA YÖNTEMİ									
	0 KÜR		1 KÜR		3 KÜR		7 KÜR		28 KÜR	
	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)	q_u (kN/m ²)	Değişim (%)
P 0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0	146,91	0,0
P 1	181,10	23,3	195,54	33,1	225,05	53,2	228,99	55,9	232,36	58,2
P 3	196,55	33,8	233,73	59,1	241,55	64,4	244,30	66,3	256,22	74,4
P 5	219,17	49,2	235,86	60,6	245,86	67,4	240,42	63,7	278,65	89,7
P10	223,99	52,5	236,88	61,2	242,35	65,0	247,14	68,2	296,40	101,8
P20	226,12	53,9	233,71	59,1	244,97	66,7	256,00	74,3	262,58	78,7

1. Karıştırma Yöntemi



2. Karıştırma Yöntemi



Şekil 34. Kür süresine göre serbest basınç sonuçları (a) 1. Karıştırma yöntemi, (b) 2. Karıştırma yöntemi

1. Karıştırma yöntemi için, %10 polimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numuneye kıyasla kürsüz durumda %50,6 artış, 1 günlük kür sonunda %55,8 artış, 7 günlük kür sonunda %69,2 ve 28 günlük kür sonunda %56,9 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde, 2. Karıştırma yöntemi ile hazırlanan %10 polimer katkılı numunelerde ise kürsüz durumda %52,5 artış, 1 günlük kür sonunda %61,2 artış, 7 günlük kür sonunda %68,2 ve 28 günlük kür sonunda %101,8 oranında bir artış kaydedilmiştir. Bu veriler, polimer katkısı ve kür süresi arttıkça genellikle zeminin dayanımının önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır.

Katkısız numuneye kıyasla polimer oranı %10 iken, 1. Karıştırma yönteminde kür süresi 28 gün için %56,9 artış, kür süresi 7 gün için %69,2 dayanım artışı ile daha yüksek bir performans göstermekte, 2. Karıştırma yönteminde ise 7 gün kür için %68,2 artış, kür süresi 28 gün için %101,8 oranında daha yüksek bir dayanım artışı sağlamaktadır. Deneyler sonucunda, her iki karıştırma yönteminde de %10 polimer oranı, diğer numunelere kıyasla hem yeterli dayanım artışı sağlamakta hem de ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. %20 polimer oranı bazı durumlarda daha yüksek dayanım gösterse de, %10 polimer oranına kıyasla kayda değer bir ilave artış sağlamadığı ve ekonomik açıdan daha maliyetli olduğu için tercih edilmeyip %10 polimerli katkıları optimum polimer oranı olarak seçilmiştir. Katkısız numunelerle kıyaslandığında, farklı yüzdelerdeki polimer katkılı numuneler %10 polimerli numuneler kadar genellikle yüksek dayanım artışları göstermemişlerdir. Serbest basınç sonuçlarına göre zemin dayanımında %10 polimer oranı ile 1. Karıştırma yönteminde 7 gün, 2. Karıştırma yönteminde ise 28 günlük kür süresi, uzun vadeli dayanım açısından en uygun koşulları sağlamaktadır. 1. Karıştırma yöntemi ve 2. Karıştırma yönteminde %10 polimer oranı, hem dayanım artışı hem de ekonomik verimlilik açısından optimum seçenek olarak öne çıkmaktadır. 2. karıştırma yönteminin serbest basınç dayanımı açısından, 1. karıştırma yöntemine kıyasla çok daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiş ve bu nedenle tercih edilen yöntem olarak 2. karıştırma yöntemi seçilmiştir. Ayrıca kür süresi beklenmeden mevcut zeminin dayanımını %50'nin üzerinde arttırmasının mümkün olduğu görülmüştür. Polimer katkısının bu özelliği zamansal olarak beklenemeyecek kadar çok acil zemin iyileştirmesi gereken yerlerde hızlı bir dayanım için kullanılabilir bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır.

Karışma katılan polimer oranına bağlı olarak, deney sonunda elde edilen numunelerde boy kısalması meydana gelmiş, deformasyon gözlemlenmiş ve kırılma şekillerinin polimer oranının artmasıyla gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Şekil 35'te de görüldüğü üzere, %20 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş bir numunenin serbest basınç deneyi sonrası, başlangıçtaki şekline göre merkez bölgesinde

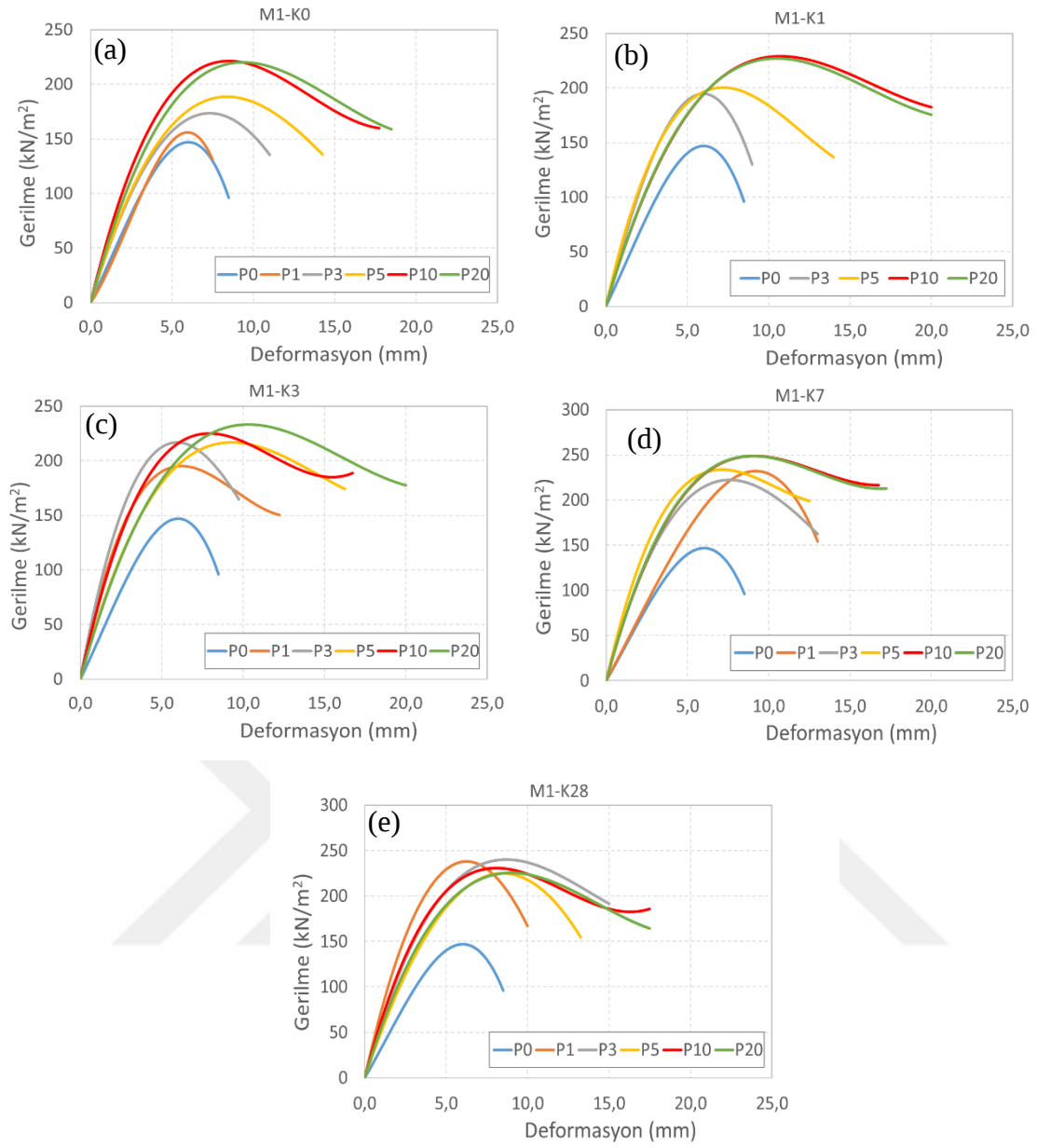
göbeklenme yaşandığı belirlenmiştir. Bu durum, polimer katkısının zemin davranışına etkisinin kırılma ve deformasyon şekillerinde de kendini gösterdiğini ifade etmektedir.



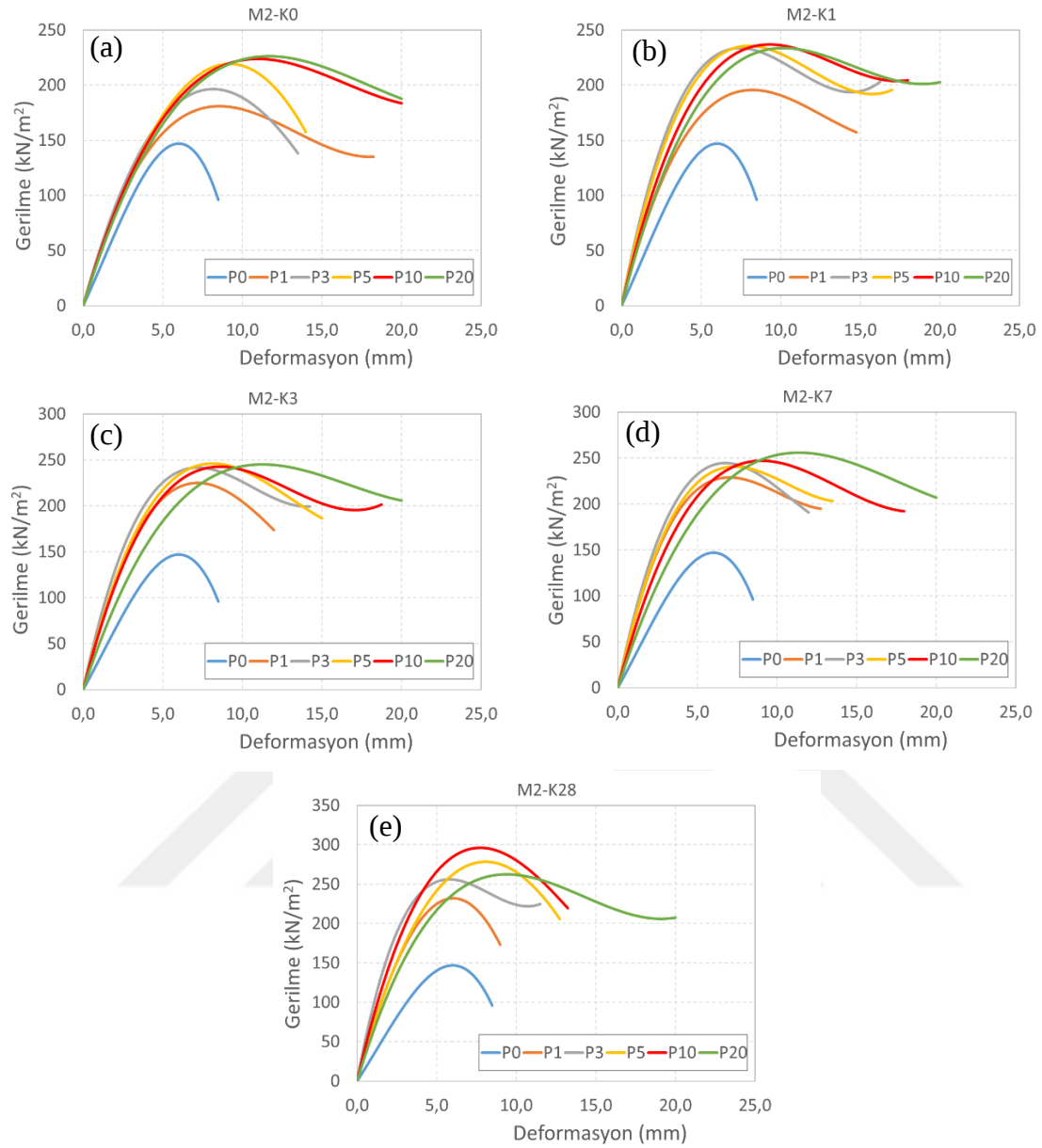
Şekil 35. Serbest basınç deneyi sonrası numune görseli

1. Karıştırma yöntemi ve 2. Karıştırma yöntemine göre, aynı kür sürelerinde gerilme deformasyon eğrileri Şekil 36 ve Şekil 37’de gösterilmiştir. Genel olarak, polimer oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetinin bir artış trendi sergilediği görülmektedir. Bu durum, polimerin kil partikülleri tarafından emilmesinden kaynaklanabilir. Polimerin kil yüzeyine adsorbe olması, partiküller arasındaki bağları güçlendirerek serbest basınç değerini artırmaktadır (Tamğaç 2020).

Latifi ve arkadaşları (2017) ile Jang (2020)’in çalışmalarında belirtildiği gibi, polimerler zemin ortamında hidrojeller oluşturarak daneler arası boşlukları doldurmakta ve zemin danelerini birbirine bağlamaktadır. Elektrik yüklü geniş özgül yüzeyleri bulunan polimerler, ince daneli zeminlerle etkileşime girerek mukavemeti yüksek zemin-polimer matrisleri oluşturabilmektedir (Chang vd 2016). Ayeldeen ve arkadaşları (2016) ise zemin-biyopolimer karışımlarındaki kayma mukavemeti iyileşmelerini, polimerlerin hidroksiller, aminler veya esterler gibi farklı kimyasal fonksiyonel grupları içermesine bağlamışlardır. Tüm bu nedenlerle, polimer oranındaki artışların serbest basınç mukavemetindeki iyileşmeyi sağladığı düşünülmektedir. Benzer şekilde Chen ve arkadaşları (2022), polimerin kürleme yoluyla daha güçlü bağlar oluşturduğunu ve bunun zemin mukavemetinin iyileştirilmesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.



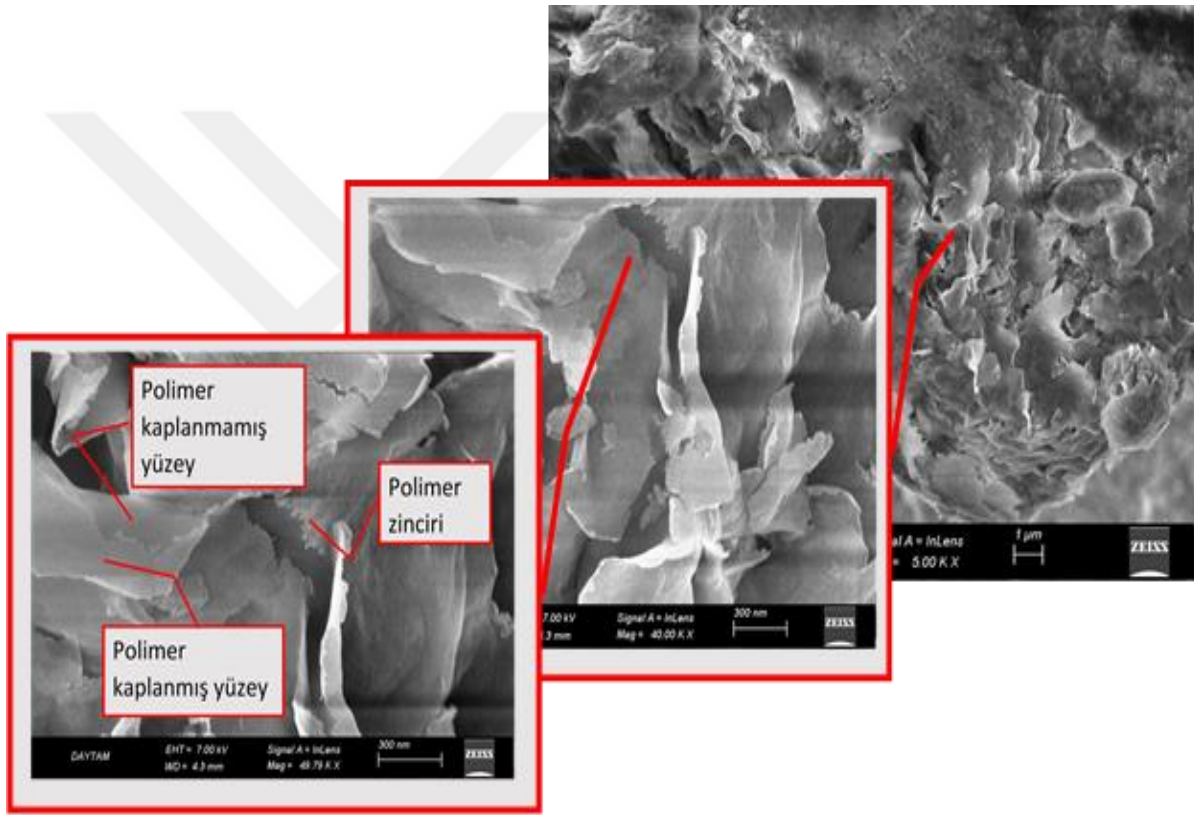
Şekil 36. Gerilme - deformasyon eğrileri- 1. Yöntem (a) 0 kür, (b) 1 kür, (c) 3 kür, (d) 7 kür, (e) 28 gün kür



Şekil 37. Gerilme - deformasyon eğrileri- 2. Yöntem (a) 0 kür, (b) 1 kür, (c) 3 kür, (d) 7 kür, (e) 28 gün kür

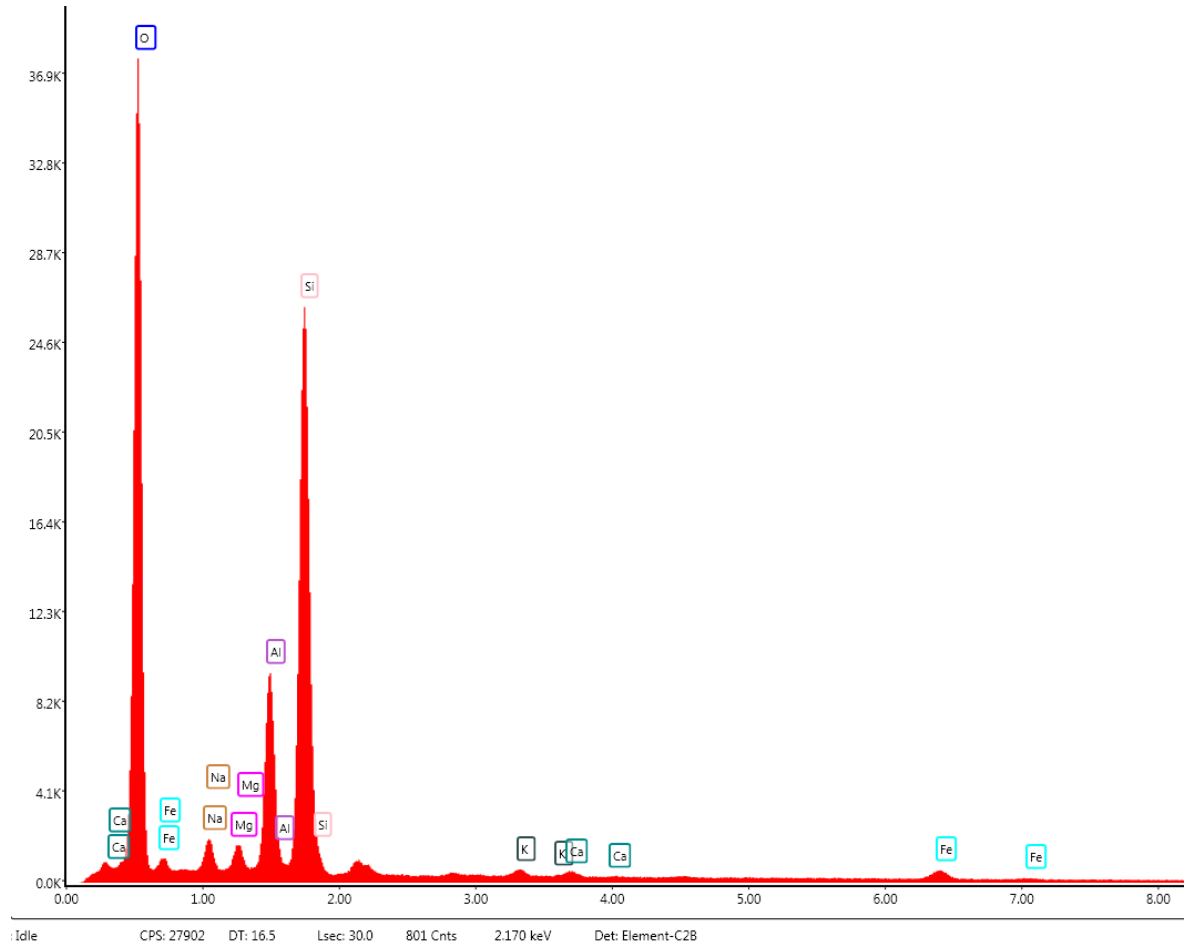
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılan analizler, numunelerin 5.000 kat ile 50.000 kat arasında büyütülmesini sağlamıştır. Şekil 38’de de görüldüğü üzere, 50.000 kat büyütme sonucunda polimerin kil plağının yüzeyini tamamen kapladığı tespit edilmiştir. Polimer, kil mineralleri ile reaksiyona girerek polimer zincirlerinin oluşumunu sağlamış ve reaksiyon sonucunda bentonit kilinin zemin davranışını iyileştirmiştir. Bu iyileştirme, serbest basınç dayanımında kayda değer bir artışla kendini göstermiştir ve polimer katkısının zemin iyileştirmesine olumlu etkisini ortaya koymuştur.



Şekil 38. ‘M2P10K28’ numunesinin SEM görüntüsü

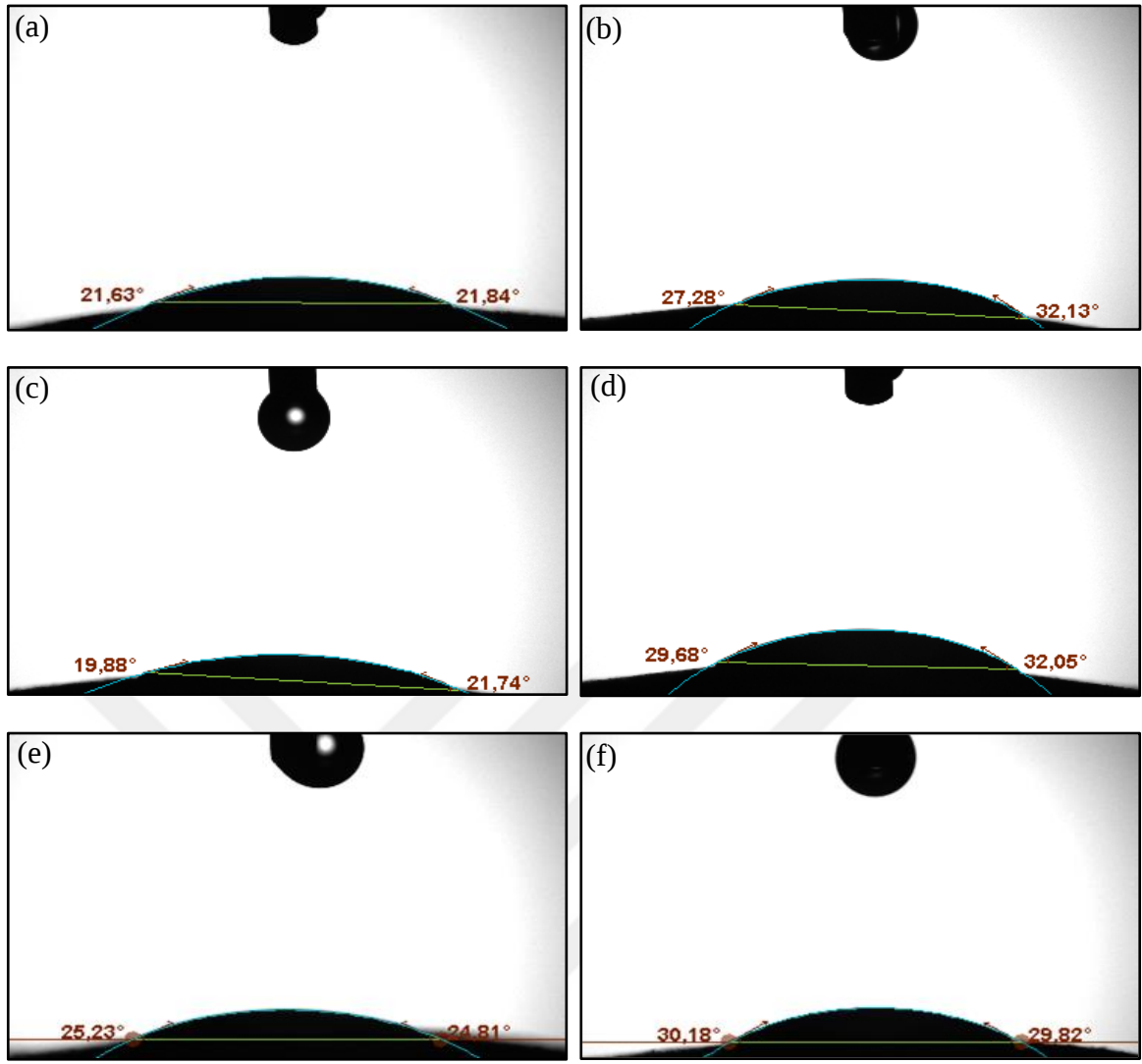
SEM-EDX analizleri, numunelerde baskın elementler olarak silisyum, alüminyum ve oksijenin tespit edildiğini göstermiştir. Silisyum oksit ve alüminyum oksit miktarlarının yüksek olması, kil mineralinin ana bileşenlerini temsil ettiğinden dolayı, bu sonuçlar analiz edilen numunenin kil olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca Şekil 39’da da görüldüğü üzere sodyum (Na), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), potasyum (K) ve demir (Fe) elementlerine de rastlanmıştır. Deneylerde kullanılan kil numunesinin sodyum bentonit olduğu analizlerde de sodyuma rastlanması ile de tespit edilmiştir.



Şekil 39. ‘SEM-EDX’ kil minarelinin kimyasal birleşim analizi

Temas Açısı Analiz Sonuçları

Sıvı yüzey ile katı yüzey arasındaki ortalama temas açısına ilişkin ölçümler Tablo 18’de de görüldüğü üzere, katkısız numuneler (P0) için 21,74 derece, %1 polimer katkılı numuneler (P1) için 29,71 derece, %3 polimer katkılı numuneler (P3) için 20,81 derece, %5 polimer katkılı numuneler (P5) için 30,87 derece, %10 polimer katkılı numuneler (P10) için 25,02 derece ve %20 polimer katkılı numuneler (P20) için 30,00 derece olarak belirlenmiştir. Polimer katkılı numunelerin temas açıları, katkısız numunelerle karşılaştırıldığında anlamlı bir iyileşme göstermemiştir. Bu bulgular, numunelere eklenen polimerin hidrofobik bir malzeme özelliği kazandırmadığını ortaya koymaktadır (Şekil 40).



Şekil 40. 2. Karıştırma yöntemine göre 28 günlük temas açısı (a) %0 polimer, (b) %1 polimer (c) %3 polimer, (d) %5 polimer, (e) %10 polimer, (f) %20 polimer,

Tablo 18. Temas Açısı Ortalama Değerleri

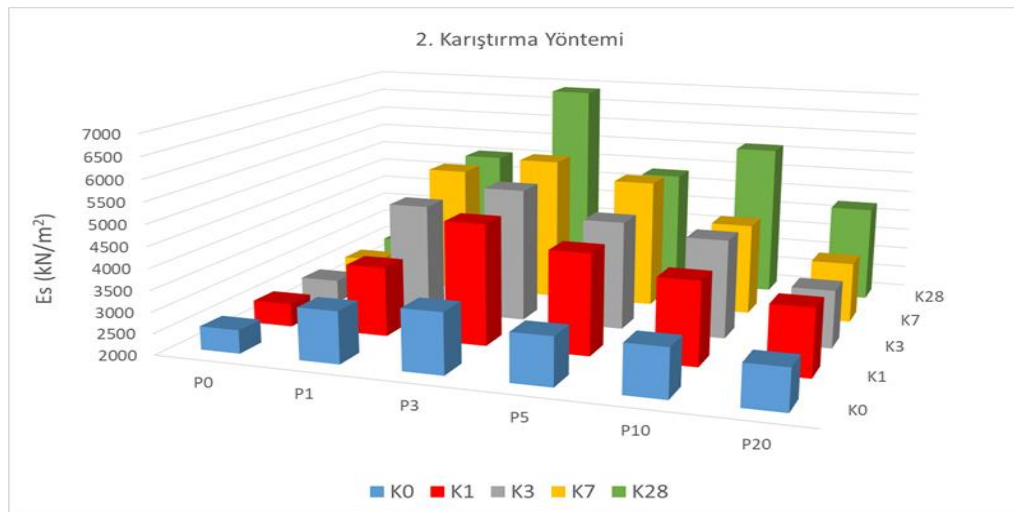
Numune Adı	Sol Açı	Sağ Açı	Ort. Açı
P0	21,63	21,84	21,74
M2P1K28	27,28	32,13	29,71
M2P3K28	19,88	21,74	20,81
M2P5K28	29,68	32,05	30,87
M2P10K28	25,23	24,81	25,02
M2P20K28	30,18	29,82	30,00

Sekant Modülü Sonuçları

Sekant modülü (E_s), zeminlerin gerilme deformasyon davranışını tanımlamada kullanılan kritik bir parametredir. Tablo 19'da da görüldüğü üzere, kür günlerinin tamamı dikkate alındığında %3 polimer içeren karışimli numunelerin daha yüksek E_s değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak gerilme deformasyon grafikleri detaylı şekilde incelendiğinde, %10 polimer içeren karışimli numunelerin q_u (serbest basınç dayanımı) değerlerinin daha yüksek olduğu, bu nedenle optimum polimer oranı %10 olarak belirlenmiştir. %3 polimer katkılı numuneler, %10 polimer katkılı numunelere kıyasla daha rijit bir davranış sergilediği için düşük deformasyon seviyelerinde kırılma meydana gelmiştir. Öte yandan, %10 polimer içeren numuneler polimer etkisinin sonucu olarak daha sünek bir davranış göstermiş ve bu durum daha yüksek deformasyon seviyelerinde kırılma ile sonuçlanmıştır. Buna bağlı olarak, %10 polimer içeren numunelerin sekant modülü, %3 polimer içeren numunelere göre daha düşük bir değere sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 2. karıştırma yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş olup, bu nedenle çalışmalar yalnızca 2. karıştırma yöntemi üzerinde yoğunlaştırılmıştır (Şekil 41).

Tablo 19. Polimer Oranlarına Göre Sekant Modülü (kN/m^2)

2. KARIŞTIRMA YÖNTEMİ					
Polimer Yüzdesi (%)	K0	K1	K3	K7	K28
0	2549,45	2549,45	2549,45	2549,45	2549,45
1	3219,68	3633,36	4612,04	5065,55	5035,95
3	3425,13	4848,34	5167,40	5455,65	6888,85
5	3130,81	4373,73	4571,86	5072,36	4827,39
10	3139,17	3960,62	4332,09	4181,12	5638,38
20	2964,73	3576,36	3357,80	3430,65	4276,59



Şekil 41. 2. Karıştırma yöntemine göre 3d sekant modülü görseli

Deformasyon İndeksi Sonuçları

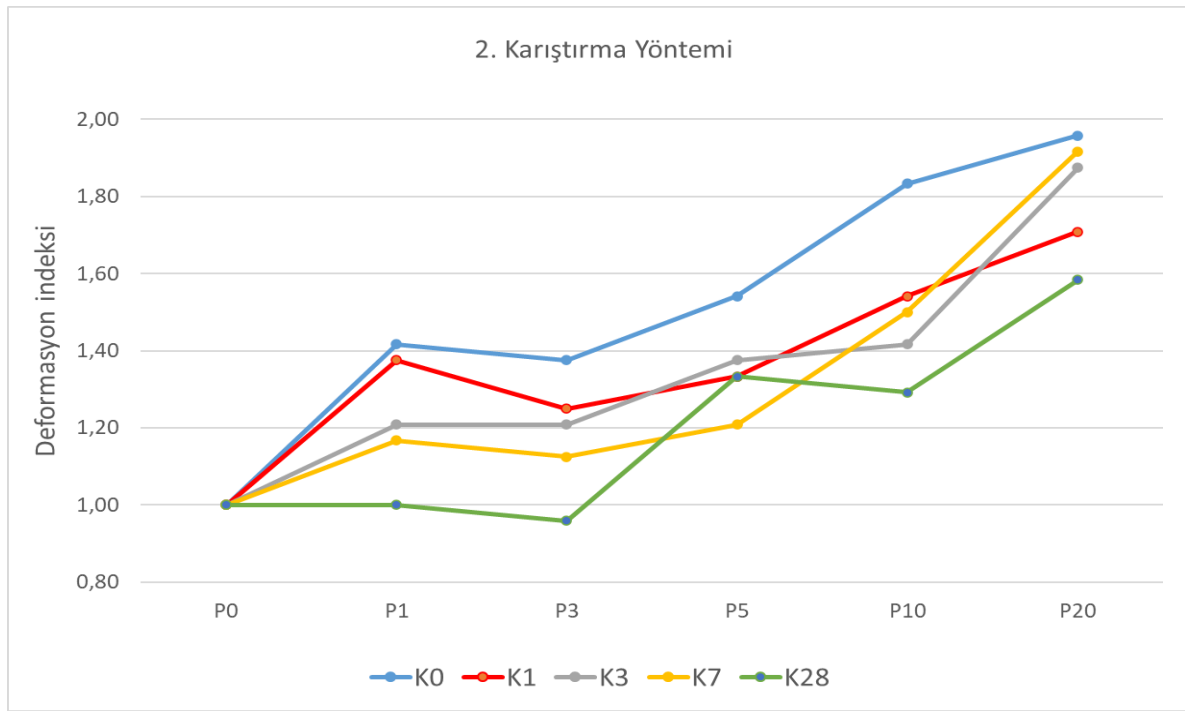
Deformasyon indeksi (I_D), katkı uygulanmış ve doğal zeminlerin süneklik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Bu indeks, katkı ile iyileştirilmiş zeminin maksimum dayanım noktasındaki birim şekil değiştirmesinin, katkısız zemine ait aynı noktadaki değerine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında, bu parametre aracılığıyla zeminlerin deformasyon karakteristikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tablo 20’de sunulan verilere göre, kür süresi boyunca değerlendirilen tüm numunelerde, polimer katkısı içeren zeminlerin daha yüksek I_D değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu bulgu, polimer içeriğinin artışıyla birlikte gevrek kırılma davranışından sünek kırılma davranışına doğru belirgin bir geçiş olduğunu göstermektedir. Nitekim, Şekil 43’te yer alan fotoğraflarda da polimer oranının yükselmesiyle birlikte zemin numunelerinde daha sünek bir deformasyon davranışının sergilendiği açıkça gözlemlenmektedir.

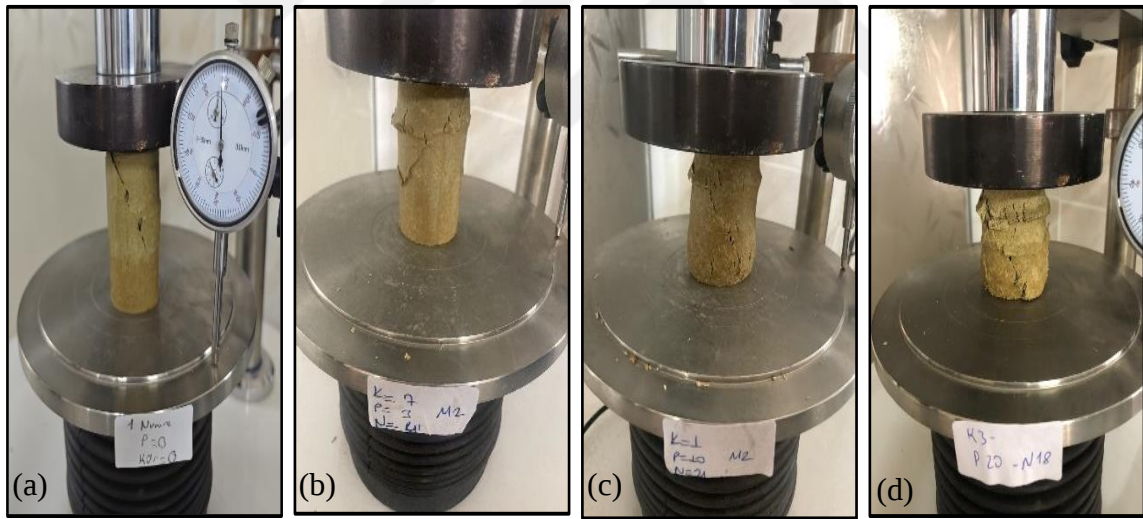
Ayrıca, Şekil 42’de gösterildiği üzere, polimerle iyileştirilmiş zemin numunelerinin deformasyon tepkileri katkısız numuneyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Serbest basınç dayanımı (UCS) test sonuçlarına göre, %1 polimer içeriğinden %20’ye kadar olan artışla deformasyon indeksi 1.125’ten 1.958’e kadar yükselmiştir. Bu durum, polimer katkısının zemin rijitliğini düşürerek sünekliğini artırdığını göstermektedir.

Tablo 20. Polimer Oranlarına Göre Deformasyon İndeksi

2. KARIŞTIRMA YÖNTEMİ					
Polimer Yüzdesi (%)	K0	K1	K3	K7	K28
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	1,417	1,375	1,208	1,167	1,000
3	1,375	1,250	1,208	1,125	0,958
5	1,542	1,333	1,375	1,208	1,333
10	1,833	1,542	1,417	1,500	1,292
20	1,958	1,708	1,875	1,917	1,583



Şekil 42. 2. Karıştırma yöntemine göre polimer oranlarının deformasyon indeksi



Şekil 43. Serbest basınç deneyi sonrası (a) katkısız numune (%0 polimer), (b) %3 polimer, (c) %10 polimer, (d) %20 polimer

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Karben Bentonit A.Ş.'den temin edilen ve USCS zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) üzerine, kuru ağırlıkça %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında sentetik bir toz polimer eklenerek kil zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle katkısız ve katkılı killer üzerinde kıvam deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Bu verilere göre sıkıştırılan katkısız ve katkılı numuneler, 0, 1, 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde gerçekleştirilen kıvam deneyleri sonucunda, katkısız numunelerin %10 polimer katkılı numuneye kıyasla likit limitte %11,65 oranında azalma, plastik limitte %44,39 oranında artış ve plastisite indisinde %16,49 oranında azalma ile maksimum farklar elde edilmiştir. Polimer oranının artışıyla birlikte likit limit ve plastisite indisi değerlerinde bir düşüş eğilimi, plastik limit değerlerinde ise artış eğilimi görülmektedir. Bu durum, yüksek plastisiteli bentonitin doğru oranlarda polimer katkısı karıştırılması ile işlenebilirliğinin arttığını göstermektedir. Polimer ilavesinin bentonit kili daha katı hale getirdiği bu sebeple zeminin davranışında ve yapısında olumsuz etkilerin oluşmaması amacıyla polimer oranında %20'nin üzerine çıkılmamıştır.

Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde gerçekleştirilen standart Proktor deneyleri, polimer oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerlerinde azalma olduğunu göstermiştir. Katkısız numunede optimum su içeriği %34 olarak belirlenirken, katkılı numunelerde bu değer %30-%31 aralığında kalmış ve bu durum, optimum su içeriğinin polimer oranından sınırlı bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. Bu durumun sebebi olarak, kilin polimerden daha fazla su ihtiyacının olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise, tüm katkılı numuneler katkısız numuneye göre daha düşük bulunmuş ve 1,300-1,160 kN/m³ arasında değişim göstermiştir. Bu sonuçlar, polimer katkısının zemin üzerinde birim hacim ağırlığını azaltıcı etkisini ortaya koymaktadır.

Katkısız numunelere göre, en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlığı, %10,8 azalma gösteren %20 polimer katkılı numunede 1,160 kN/m³ olarak görülmüştür. Polimer katkısı ile kuru birim hacim ağırlığında gözlemlenen bu düşüş, polimerin özgül ağırlığının zemine kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Polimer oranı arttıkça, katkısız numunelere kıyasla serbest basınç mukavemetlerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. %1, %3, %5, %10 ve %20 polimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numunelerle karşılaştırıldığında, 1. Karıştırma yöntemine göre kürsüz numunelerde %6,0 ile %50,6 arasında, 1 günlük kür numunelerinde %21,7 ile %55,8 arasında, 3 günlük kür numunelerinde %32,8 ile %56,1 arasında, 7 günlük kür numunelerinde %51,3 ile %69,3 arasında ve 28 günlük kür numunelerinde %53,0 ile %63,6 arasında mukavemet artışları tespit edilmiştir. 2. Karıştırma yöntemine göre ise kürsüz numunelerde %23,3 ile %53,9 arasında, 1 günlük kür numunelerinde %33,1 ile %61,2 arasında, 3 günlük kür numunelerinde %53,2 ile %67,4 arasında, 7 günlük kür numunelerinde %55,9 ile %74,3 arasında ve 28 günlük kür numunelerinde %58,2 ile %101,8 arasında mukavemet artışları kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, polimer oranının artmasıyla serbest basınç mukavemeti üzerinde güçlü bir iyileştirici etki oluşturduğunu göstermektedir.

Katkısız numunenin serbest basınç dayanımı $146,91 \text{ kN/m}^2$ olarak belirlenmiştir. En yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri 1. Karıştırma yöntemi için 7 gün kürlenene %10 ve %20 polimer katkılı numunelerde sırasıyla $248,59 \text{ kN/m}^2$ ve $248,70 \text{ kN/m}^2$ değerleri elde edilmiştir. 2. Karıştırma yönteminde ise 28 gün kürlenene %10 ve %20 polimer katkılı numunelerde sırasıyla $296,40 \text{ kN/m}^2$ ve $262,58 \text{ kN/m}^2$ değerleri belirlenmiştir.

Serbest basınç mukavemeti açısından, 1. Karıştırma yönteminde %20 polimerli numuneler bazı kür sürelerinde daha yüksek dayanım göstermesine rağmen, %10 polimerli numunelere kıyasla kayda değer bir artış sağlamadığından daha ekonomik olan 1. Karıştırma yöntemi için optimum polimer oranı %10 olarak seçilmiştir. Benzer şekilde, 2. Karıştırma yönteminde de bazı kür sürelerinde %10 polimer katkılı numuneler en yüksek dayanımı göstermemiş olsa da, 28 gün kür süresi sonunda en yüksek dayanım %10 polimer katkılı numunelerden elde edildiği için optimum polimer oranı yine %10 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kür süresinin polimerli numunelerin basınç dayanımları üzerinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.

Serbest basınç dayanımı açısından, 2. karıştırma yönteminin 1. karıştırma yöntemine kıyasla çok daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiş ve bu nedenle tercih edilen yöntem olarak 2. karıştırma yöntemi belirlenmiştir. Ayrıca, kür süresi beklenmeksizin mevcut zeminin dayanımının her iki karıştırma yöntemiyle de %50'nin üzerinde artırılmasının mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Polimer katkısının bu özelliği, zamansal kısıtlamalar nedeniyle beklenemeyecek kadar acil zemin iyileştirmesi gereken alanlarda hızlı dayanım sağlamak için kullanılabilir bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Deney sonunda elde edilen numunelerde, karışıma katılan polimer oranına bağlı olarak boy kısalması ve deformasyon meydana gelmiştir.

Ayrıca kırılma şekillerinin, polimer oranındaki artış ile birlikte gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX analizleri sonucunda, polimer katkısının bentonit kilinin mikro yapısı üzerinde önemli değişikliklere yol açtığı gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelerde, 50.000 kat büyütmede polimerin kil plağı yüzeyini tamamen kapladığı ve polimer zincirlerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kil mineralleri ile polimer arasında gerçekleşen etkileşimlerin, zemin davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda serbest basınç dayanımında kayda değer artışlar elde edilmiş, bu da polimer katkısının zemin iyileştirme potansiyelini ortaya koymuştur. Ayrıca EDX analizleri ile silisyum, alüminyum ve oksijenin yanı sıra sodyum, magnezyum, kalsiyum, potasyum ve demir elementleri de tespit edilmiş, özellikle sodyumun varlığı numunenin sodyum bentonit olduğunu doğrulamıştır.

Temas açısı analizleri, polimer katkısının bentonit kilinin yüzey özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Katkisiz numunede $21,74^\circ$ olarak ölçülen temas açısı, %1, %5 ve %20 polimer katkılı numunelerde sırasıyla $29,71^\circ$, $30,87^\circ$ ve $30,00^\circ$ değerlerine ulaşmış, ancak %3 katkıda $20,81^\circ$ 'ye düştüğü ve %10 katkıda $25,02^\circ$ olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, polimer katkısının temas açısı üzerinde düzenli veya belirgin bir değişim oluşturmadığını, dolayısıyla bentonit kiline hidrofobik bir karakter kazandırmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, polimerin zemin su etkileşimlerini sınırlı düzeyde etkilediğini ve yüzey su ilişkilerinde anlamlı bir değişim yaratmadığını ortaya koymuştur.

Sekant modülü (E_s) sonuçları, polimer katkısının zemin rijitliği ve deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Deneysel bulgulara göre, %3 polimer katkılı numuneler en yüksek E_s değerlerine sahip olup, düşük deformasyon seviyelerinde kırılma göstermeleri nedeniyle daha rijit bir yapı sergilemiştir. Buna karşılık, %10 polimer katkısı uygulanan numunelerde daha yüksek serbest basınç dayanımı (q_u) elde edilmiş ve zemin davranışında süneklik artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, %10 polimer katkılı numunelerin daha fazla deformasyona uğrayarak kırıldığına işaret etmektedir. Sonuç olarak, rijitlik açısından en yüksek E_s değeri %3 polimer katkısında görülmekle birlikte, optimum polimer oranı, dayanım ve süneklik özelliklerinin dengelendiği %10 olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, polimer katkısının zeminlerin elastik davranış aralığını ve mühendislik performansını farklı şekillerde etkileyebileceğini göstermektedir.

Deformasyon indeksi (I_D) sonuçları, polimer katkısının kil zeminlerin süneklik özellikleri üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Serbest basınç dayanımı testleri

temel alınarak yapılan değerlendirmelerde, katkı miktarının artışıyla birlikte I_D değerlerinde belirgin bir yükselme gözlemlenmiş; %1 polimer içeriğinden %20'ye kadar olan polimer artışında, deformasyon indeksi 1.125'ten 1.958'e kadar yükselmiştir. Bu artış, zemin numunelerinde genellikle gevrek kırılma davranışından sünek kırılma davranışına doğru bir geçiş olduğunu ve polimer katkısının deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, polimer katkısının zemin rijitliğini azaltarak süneklik kazandırdığını ve deformasyon indeksi açısından katkısız zeminlere kıyasla daha uygun mühendislik özellikleri sunduğunu doğrulamaktadır.

Deney sonuçları, polimerin bentonit kilinin dayanım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Geleneksel zeminin iyileştirmesi için kullanılan kimyasal katkı malzemelerinin karbon salınımına neden olduğu bilinmekte ve bu durum sürdürülebilirlik açısından endişeler yaratmaktadır. Buna karşılık, çevre dostu bir alternatif olarak polimerlerin etkin kullanımı, hem zeminde hem de potansiyel etkiler açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Bu çalışmada, polimerin bentonit killi zeminlerin iyileştirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılması, polimer ile bentonit kili arasında yüksek uyumlu bir etkileşimin ortaya çıktığını göstermektedir. Bununla birlikte, polimerin toz formunda olması ve işlem sırasında suda çözünme özelliği, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilirliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, kür koşullarının ve katkı oranlarının değiştirilmesi, daha kapsamlı mikro yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi, oturma ve şişme davranışlarının detaylı şekilde oluştuğu ve polimerlerin farklı zemin sınıfları üzerindeki etkilerinin incelenmesi gibi çalışmalar, polimerlerin zemin uygulamalarındaki potansiyelini daha detaylı bir şekilde tanımamızı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Ajalloeian, R., Matinmanesh, H., Abtahi, S. M., Rowshanzamir, M., 2013. Effect of polyvinyl acetate grout injection on geotechnical properties of fine sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 8(2), 86-96.
- Ajayi, M. A., Grissom, W. A., Smith, L. S., Jones, E. E., 1991. Epoxy-resin-based chemical stabilization of a fine, poorly graded soil system. *Transportation Research Record*, 1295, 95-108.
- Akay, N. ve Şengül, T., 2022. Sentetik Polimerlerin Flokülasyonda Verimliliğini Etkileyen Faktörler. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 961-971.
- Al-Khanbashi, A. and Abdalla, S. W., 2006. Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(6), 1603-1625.
- Almajed, A., Lemboye, K., Moghal, A. A. B., 2022. A critical review on the feasibility of synthetic polymers inclusion in enhancing the geotechnical behavior of soils. *Polymers*, 14(22), 5004.
- Anagnostopoulos, C. A. and Papaliangas, T. T., 2012. Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(7), 841-849.
- Anagnostopoulos, C. A., Kandiliotis, P., Lola, M., Karavatos, S., 2014. Research Article Effect of Epoxy Resin Mixtures on the Physical and Mechanical Properties of Sand. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(17), 3478-3490.
- Anonim. 2014. Kimya Teknolojisi: Polimerleri Özelliklerine Göre Sınıflandırma. Milli Eğitim Bakanlığı Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerleri%20%C3%96zelliklerine%20G%C3%B6re%20S%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma.pdf (28.12.2024).
- Anonim. 2020. Toz polimer nedir? Nerelerde kullanılır?. Kimteks, <https://www.kimteks.org/toz-polimer-nedir-nerelerde-kullanilir/> (30.12.2024).
- Anonim. 2024. Toprak Aşınabilirliği Erodibilite: Erozyon olayında kil minerallerinin türü ve önemi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi Havza Amenajmanı Anabilim Dalı, https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/havzaamenajmani_8eb4e.pdf (28.12.2024).
- Aral, M., 2006. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı – bir optimum tasarım. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM D2166-06. 2006. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM D422-63. 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM D4318-17e1. 2017. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM D698-12. 2021. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM D854. 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.

- Ateş, A., 2013. The Effect of Polymer-Cement Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils. *International Journal of Polymer Science*, 2013(1), 356214.
- Ayeldeen, M. K., Negm, A. M., El Sawwaf, M. A., 2016. Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 371.
- Aysu, Ş., 2020. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi. Y.Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Bagherinia, M., 2019. Derin karıştırma yöntemi ile düşük plastisiteli kil zeminin biyopolimer ve bazik kimyasallar kullanılarak iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bakar, M. A., Leong, Y. W., Ariffin, A., Ishak, Z. M., 2007. Mechanical, flow, and morphological properties of talc-and kaolin-filled polypropylene hybrid composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(1), 434-441.
- Banthia, N. and Gupta, R., 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Barui, A., 2018. Synthetic Polymeric Gel. In *Polymeric Gels*, Eds: Kunal Pal, Indranil Banerjee. Woodhead Publishing, Cambridge, İngiltere, 55-90.
- Bosbıyık, C., 2020. Bentonit ve kaolin killerin kolemanit minerali ile stabilizasyonu. Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- BS EN ISO 17892-12:2018+A1:2021. 2021. Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 12: Determination of liquid and plastic limits. London, United Kingdom: British Standards Institution.
- Burgos, M., Samper, F., Alonso, J. J., 2007. Improvements carried out in very soft dredged mud soil in the port of Valencia (Spain). In *Proceedings of the 14th European Conference SMGE on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid, Spain.
- Cabalar, A. F. and Canakci, H., 2011. Direct shear tests on sand treated with xanthan gum. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2), 57-64.
- 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), 04018170.
- Camberfort, H., 1977. The principles and applications of grouting. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 10(2), 57-95.
- Can, B., 2017. Sülfat içeriği ve sıkıştırma su muhtevasının killi zeminlerin kireç stabilizasyonuna etkisi. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- 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.
- Çetin, A. Y., 2011. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çetin, M., 2003. Değişik çevresel koşullar altında, şişen zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi. Y.Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Çetinkaya, M., 2012. Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Das, B. M., 2007. Principles of Foundation Engineering. 6th Edition, Thomson/Brooks/Cole, 750 p, Pacific Grove, California.
- Das, B.M., and Sobhan, K., 2013. Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, 768 s, Boston, USA.
- Dlubek, G., Utracki, L. A., Jamieson, A. M., 2010. Polymer Physics: From Suspensions to Nanocomposites and Beyond. Wiley, 800 p, Hoboken, New Jersey, ABD.
- Du, Y. J., Yu, B. W., Liu, K., Jiang, N. J., Liu, M. D., 2017. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(2), 04016217.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., van Deventer, J. S., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of materials science, 42(9), 2917-2933.
- Erdil, A., Horuz, A., Korkmaz, A., Akinoğlu, G., 2018. Topraklarda amonyum fiksasyonu ve etkileri. International Journal of Life Sciences and Biotechnology, 1(1), 17-28.
- Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkiran, İ., Yağcı, M.A., Cöbek, M., Bilgiç, T., 1999. Polimerler I, 2. Baskı, Pagev Yayınları, 167 s, İstanbul.
- Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., 2009. Nanostructure/microstructure of fly ash geopolymers. In Geopolymers, Ed: A. Luke. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 89-117.
- Ghabaee, S., 2015. Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gilazghi, S. T., Huang, J., Rezaeimalek, S., Bin-Shafique, S., 2016. Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization. Engineering Geology, 211(1), 171-178.
- Gücek, S., 2011. Mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı. Y.Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Güven, B., 2024. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin bazı mühendislik özellikleri üzerinde sentetik lif ve biyopolimer katkılarının ortak etkilerinin araştırılması. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hamidi, S., and Marandi, S. M., 2018. Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin. Applied Clay Science, 151(1), 92-101.
- Harris, P., von Holdt, J., Sebesta, S., Scullion, T., 2006. Recommendations for stabilization of high-sulfate soils in Texas. Transportation research record, 1952(1), 71-79.
- Hausmann, M. R., 1990. Engineering Principles of Ground Modification. McGraw-Hill Publishing Company, 632 p, New York, ABD.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., 2015. Geoteknik Mühendisliğine Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, 831 s, Ankara.
- Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., Little, D. N., 2021. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. Construction and Building Materials, 305(1), 124685.

- Jahandari, S., Mojtahedi, S. F., Zivari, F., Jafari, M., Mahmoudi, M. R., Shokrgozar, A., Kharazmi, S., Hosseini, B. V., Rezvani, S., Jalalifar, H., 2020. The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 269–281.
- Jang, J., 2020. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 1465709.
- Janoo, V. C., 1998. Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials. United States Department of Transportation.
- Jeong, E., Lim, J. W., Seo, K. W., Lee, Y. S., 2011. Effects of physicochemical treatments of illite on the thermo-mechanical properties and thermal stability of illite/epoxy composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17(1), 77-82.
- Kahiyah, M. T. M. A., 2020. Investigation of engineering properties of clayey soils improved with biopolymers. MS Thesis, Cukurova University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Adana.
- Karaca, K., 2018. Kimyasal stabilizasyon tekniklerinin bentonit üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Karahan, O., 2006. Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Karimi, B., 2023. Effect of particle shape on the behavior of polymer-improved sandy soil used in pavements due to freeze-thaw cycles. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(2), 128-151.
- Keçecioglu, M., 2016. Kum Zeminlerin Biyopolimer ile İyileştirilmesi. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Keskin, S. N., Sungur, A. H. M. E. T. C. A. N., Akan, R., & Uzundurukan, S. O. N. E. R. (2017). İnce Daneli Zeminlerde Katki Maddelerinin Ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 473-478.
- Kustov, V. V., and Ruppeneit, K. V. 1985. Soil deformation characteristics in compression tests. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22(4), 155-161.
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., Mohamad, E. T., 2017. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016204.
- Latifi, N., Rashid, A. S. A., Siddiqua, S., Abd Majid, M. Z., 2016. Strength measurement and textural characteristics of tropical residual soil stabilised with liquid polymer. *Measurement*, 91(1), 46-54.
- Lee, S., Chung, M., Asce, M., Park, H. M., Song, K. I., Chang, I., Asce, A.M., 2019. Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 06019012.
- Lewin, M., 2006. Handbook of Fiber Chemistry. 3rd Edition, Chemical Rubber Company Press, 1056 p, Boca Raton, ABD.
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang, H., Wang, G., Kamai, T., 2011. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1-2), 114-120.

- Mitchell, J.K., 1993. Fundamentals of Soil Behaviour. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 437 p, New York, USA.
- Mohammed, A. S. and Vipulanandan, C., 2014. Compressive and tensile behavior of polymer treated sulfate contaminated CL soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 71-83.
- Moustafa, A., Bazaraa, A., Nour El Din, A., 1981. Soil stabilization by polymeric materials. *Macromolecular Materials and Engineering*, 97(1), 1-12.
- Naeini, S. A. and Ghorbanali, M., 2010. Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer. *Journal of Applied Sciences*, 10(22), 2839-2846.
- Naeini, S. A., Naderinia, B., Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 943-949.
- Newman, K. and Tingle, J. S., 2004. Emulsion polymers for soil stabilization. In *Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey, ABD.
- Ohama, Y., 1995. Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology. Noyes Publications, Park Ridge, 236 p, New Jersey, USA.
- 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), 589-600.
- Önalp, A., 2007. *Geoteknik Bilgisi I - Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği*. Birsan Yayınevi, 461 s, İstanbul.
- Öntürk, K., 2011. Zemin iyileştirmesinde polisaj, kireç ve uçucu külün kullanımı. Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özaydın, K., 2005. *Zemin Mekaniği*. İstanbul, Birsan Yayınevi, 261 s, İstanbul.
- Özaydın, K., 2012. Zeminlerin iyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul.
- Özen, E. S., 2019. Kumlu zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde doymamış polyester kullanımı. Y.Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Öztürk, S., 2007. Engineering properties of kaolinite clay reinforcement with polypropylene fibers. MS Thesis, Bogazici University Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, İstanbul.
- Randhawa, K. S., Chauhan, R., Kumar, R., 2022. An investigation on the effect of lime addition on UCS of Indian black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*, 50(5), 797–803.
- Rauch, A. F., Harmon, J. S., Katz, L. E., Liljestrang, H. M., 2002. Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay. *Transportation Research Record*, 1787(1), 33-41.
- Rezaeimalek, S., Huang, J., Bin-Shafique, S., 2017. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. *Construction and Building Materials*, 146(1), 210-220.
- Saçak, M., 2005. *Polimer Teknolojisi kitabı*. Gazi Kitabevi, 461 s, Ankara.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S., Webster, S. L., 2002. Stabilization of silty sand with nontraditional additives. *Transportation research record*, 1787(1), 61-70.

- Saygılı, A., 2018a. Killi zeminlerin polimerik metil difenil izosiyanat sıvı polimeri ile iyileştirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(1), 475-482.
- Saygılı, A., 2018b. Kaolen Türü Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Melamin Formaldehit Sıvı Polimeri Kullanarak İyileştirilmesi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(2), 133-139.
- Soysal, H. M. ve Dehghanian, K., 2021. İnşaat mühendisliğinde zayıf zeminler ve zemin iyileştirme yöntemleri. MAS Uygulamalı Bilimler Dergisi, 6(3), 716-742.
- Sridharan, A. and Sivapullaiah, P. V., 2005. Mini compaction test apparatus for fine grained soils. Geotechnical Testing Journal, 28(3), 240-246.
- Şahbaz, İ., 2020. Çimento ve polipropilen lif kullanarak killi zeminlerin iyileştirilmesi. Y.Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Şengöz, T. E., 2006. Killerin Kullanım Alanları, Killerin Mühendislik Özellikleri ve İmara Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Çalışmalarında Killerin Önemi. Y.Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Konya.
- Şengöz, T.E., 2021. Zemin Nedir? Zemin Mühendisliği Nedir? İdeal Zemin Nasıl Olmalıdır? Bozuk Zeminler Nasıl Anlaşılır? Zemin İyileştirme Yöntemleri Nelerdir?. ResearchGate, https://www.researchgate.net/profile/Tuerkay-Sengoez/publication/355184661_Zemin_Nedir_Zemin_Muhendisligi_Nedir_Ideal_Zemin_Nasil_Olmalidir_Bozuk_Zeminler_Nasil_Anlasilir_Zemin_Iyilestirme_Yontemleri_Nelerdir_C_Copyright_by_Turkay_Ercan_Sengoz/links/616559160bf51d4817778a82/Zemin-Nedir-Zemin-Muehendisligi-Nedir-Ideal-Zemin-Nasil-Olmalidir-Bozuk-Zeminler-Nasil-Anlasilir-Zemin-Iyilestirme-Yoentemleri-Nelerdir-C-Copyright-by-Tuerkay-Ercan-Sengoez.pdf (28.12.2024).
- Tamassoki, S., Nik Daud, N. N., Jakarni, F. M., Mohd Kusin, F., Rashid, A. S. A., Roshan, M. J., 2022. Performance evaluation of lateritic subgrade soil treated with lime and coir fibre-activated carbon. Applied Sciences, 12(16), 8279.
- Tamer, N., 2007. Termoplastik Poliüretan Hazırlanması Ve Polimer Harmanlarında Kullanımı. Doktora Tez, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tamgaç, G.K., 2020. Sıvı stabilizasyon malzemesiyle iyileştirilmiş kil bir zeminin geoteknik özelliklerinin araştırılması. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Taşci, G., 2011. Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi. Y.Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., Rushing, J. F., 2007. Stabilization mechanisms of nontraditional additives. Transportation research record, 1989(1), 59-67.
- Tokgöz, G., Karaahmetli, S., Tokgöz, S., 2022. Kentsel peyzajlarda geçirimli beton kullanımı ve özelliklerinin değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(2), 1067-1078.
- Tunç, U., Bağrıaçık, B., Aslan, H., Altay, G., Şenol, A., 2022. Arabik Gam Katkılı Doğal Kil Zeminin Konsolidasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(3), 731-740.
- Uysal, N., 2014. Polimerlerle Stabilize Edilmiş Kumların Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Uzuner, B. A., 2013. Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, 384 s, Trabzon.
- Visch, S. M., 2002. Biopolymers; what is their place in future society in relation with sustainable design. Sustainable Design Report, 1(1), 1-8.
- Wang, Z., 1996. Toughening and reinforcing of polypropylene. Journal of applied polymer science, 60(12), 2239-2243.
- Yalvaç, E., 2011. Killerin mühendislik özelliklerine atıksuların etkisi. Y.Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yang, I. C. Y., Li, Y., Park, J. K., Yen, T. F., 1993. The use of slime-forming bacteria to enhance the strength of the soil matrix. Developments in Petroleum Science, 39(1), 89-96.
- Zandieh, A. R. and Yasrobi, S. S., 2010. Retracted article: Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer. Geotechnical and Geological Engineering, 28(2), 139-145.
- Zhang, G., He, J., Gambrell, R. P., 2010. Synthesis, characterization, and mechanical properties of red mud-based geopolymers. Transportation research record, 2167(1), 1-9.



ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Tarık KARA
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı, (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Kara, T., Kaynak, A.K., Işık, F., Akbulut, R.K., 2024. Toz polimerle iyileştirilen bentonitin serbest basınç mukavemetine kür süresinin etkisi. International 8th Usbılım Health, Engineering and Applied Sciences Congress,(67-77), Diyarbakır.	