



**SIVI STABİLİZASYON MALZEMESİYLE
İYİLEŞTİRİLMİŞ KİL BİR ZEMİNİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ

Doç. Dr. Semet ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır)

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

**SIVI STABİLİZASYON MALZEMESİYLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİL BİR ZEMİNİN
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Geotechnical Properties of a Clay Soil Improved with Liquid Stabilization Material)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

ERZURUM
Temmuz, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Gülşah KILIÇ TAMĐAÇ tarafından hazırlanan ‘‘Sıvı Stabilizasyon Malzemesiyle İyileştirilmiş Kil Bir Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması’’ başlıklı çalışması 01/07/2020 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: Yrd. Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Danışman: *Atatürk Üniversitesi*
Doç. Dr. Semet ÇELİK

Jüri Üyesi: *Atatürk Üniversitesi*
Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI GHALEHJOUGH
Erzurum Teknik Üniversitesi

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

Unvan Ad SOYAD

Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Semet ÇELİK* danışmanlığında sunulan “Sıvı Stabilizasyon Malzemesiyle İyileştirilmiş Kil Bir Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%0	30
Kuramsal Temeller	%16	30
Materyal ve Yöntem	%13	35
Bulgular	%5	20
Tartışma	%5	20
Tezin Geneli	%16	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ	Doç. Dr. Semet ÇELİK
8.7.2020	8.7.2020
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

Tez çalıőmamda gerek deneyler, gerekse tez yazımı sűresince yardımını esirgemeyen tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Semet ÇELİK'e teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmam sűresince emeĐi geçen Dr Öğr. Üyesi Zeynep Neőe KURT ALBAYRAK'a, Atatűrk Ūniversitesi İnaőat MűhendisliĐi Geoteknik Anabilim laboratuvarındaki arkadaőlarım, her tűrlű desteĐi esirgemeyen eőime ve aileme, deneylerimizde kullandıĐımız polimer malzeme temininde desteklerini sunan BİMA firmasına teőekkűrlerimi sunarım.

Gűlőah KILIÇ TAMĐAÇ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIVI STABİLİZASYON MALZEMESİYLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİL BİR ZEMİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Amaç: İnşaat mühendisliği uygulamalarında proje sahalarındaki zeminler bazı durumlarda istenen özellik ve kalitede değildir. Proje sahasındaki zeminler zayıf, şişebilen, ileri derecede sıkışabilir ve yüksek derecede geçirimli olabilirler. Bu tür problemlili zeminler geoteknik mühendisliğinde önemli konulardan birisidir. Zemin stabilizasyon yöntemleri inşaat mühendisliğinde zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılır, böylece kullanıma uygun istenen özelliklere sahip zeminler elde edilir. Problemlili zeminlerin iyileştirilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. **Yöntem:** Bu tez kapsamında, Erzurum ili Oltu-Narman bölgesinden alınan kil zemine katkı olarak ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında bir kopolimer ilave edilmiş ve kıvam, kompaksiyon, serbest basınç, şişme ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.

Bulgular: Polimer yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim ağırlık değerleri azalırken, optimum su içerikleri artmıştır. Şişme basıncı deney sonuçlarına göre tüm katkılı numunelerin 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki şişme basınçlarının, katkısız numunenin şişme basıncından daha düşük olduğu görülmüştür. Geçirimsizlik deneyleri sonucunda, katkılı numunelerin tüm polimer yüzdesinde ve kür sürelerinde geçirimsizlik katsayılarının katkısız numuneden düşük olduğu görülmüştür.

Sonuç: Yapılan kıvam deneyleri sonucunda polimer yüzdesi ile kıvam limitleri arasında bir korelasyon görülmemiştir. . En yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir (542 kPa). Şişme basınçları açısından optimum polimer yüzdesi %2 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullandığımız kopolimerin hidrolik iletkenliği düşürmede etkili olduğu söylenebilir.

Anahtar kelimeler: zemin stabilizasyonu, kil, polimer, kopolimer, serbest basınç mukavemeti, şişme, geçirimsizlik

Temmuz 2020, 71 sayfa

ABSTRACT
MASTER'S THESIS
INVESTIGATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF A CLAY SOIL
IMPROVED WITH LIQUID STABILIZATION MATERIAL

Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ

Supervisor: Assoc. Prof. Semet ÇELİK

Purpose: In civil engineering applications, the soils in the project sites are sometimes not at the desired quality and properties. The soils in the project site can be weak, swellable, highly compressible and highly permeable. Such problematic soils are one of the important issues in geotechnical engineering. Soil stabilization methods are used in civil engineering to improve soil properties, so that soils with suitable desired properties are obtained. Different methods are used to improve problematic soils. The improvement of soils with additives is widely used because it is more economical than other improvement methods.

Method: Within the scope of this thesis, a copolymer of 1%, 2%, 3% and 4% by weight was added as a additive to the clay soil taken from the Oltu-Narman region of Erzurum, and consistency, compaction, unconfined compression, swelling and permeability tests were performed.

Findings: As the percentage of polymer increased, maximum dry unit weight values decreased while optimum water contents increased. As a result of the unconfined compression tests, it was seen that the polymer percentage positively affects the unconfined compressive strength. According to the swelling pressure test results, it was observed that the swelling pressures of all polymer added samples at the end of the curing period of 3, 7 and 28 days were lower than the swelling pressure of the untreated sample. As a result of the permeability tests, it has been observed that the permeability coefficients of all the polymer percentages and curing times of the all polymer added samples are lower than that of the untreated sample

Results: As a result of the consistency tests, there was no correlation between the polymer percentage and the consistency limits. The highest unconfined compressive strength was obtained from samples containing 2% polymer and cured for 28 days (542 kPa). The optimum polymer percentage in terms of swelling pressures was determined as 2%. It can be said that the copolymer used in the tests is effective in reducing the hydraulic conductivity.

Keywords: Soil stabilization, clay, polymer, copolymer, unconfined compressive strength, swelling, permeability.

July 2020, 71 pages

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	2
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Killer	3
Kil minerallerinin genel özellikleri	3
Kil Minerallerinin Sınıflandırılması.....	5
Kil mineralleri ve aktivitelerinin tanımlanması	7
Özgül yüzey	8
Difüzyon Çift Tabaka ve Kil Minerallerinin Hidratasyonu	8
Değişebilir katyonlar ve katyon değişim kapasitesi	9
Kil partikülleri ve su ilişkileri	9
Polimerler.....	9
Problemlili zeminler ve zemin iyileştirme yöntemleri	10
Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri.....	14
Derin zemin iyileştirme yöntemleri	16
Literatür Özetleri.....	19
Polimerler ile zemin iyileştirme	19
Diğer zemin iyileştirme yöntemleri	22
MATERYAL ve YÖNTEM	29
Materyal	29
Kil.....	29
Polimer	31
Yöntem.....	32
Özgül ağırlık (Piknometre) deneyi.....	32
Hidrometre deneyi.....	33
Kıvam (Atterberg) limitleri deneyleri	34

Kompaksiyon (Proktor) deneyi	36
Serbest basınç deneyi	36
Şişme Basıncı Deneyi	37
Hidrolik iletkenlik (permeabilite) deneyi	38
ARAŞTIRMA BULGULARI ve tartışMA	40
Kıvam Limitleri Deney Sonuçları	40
Standart Proktor Deneyi Sonuçları	43
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	45
Şişme Basıncı Deney Sonuçları	47
Geçirimsizlik Deney Sonuçları	49
SONUÇ VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	58

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Kil Minerallerinin Tipik Özellikleri	7
Tablo 2. Kil Zeminin Bazı Endeks Özellikleri	30
Tablo 3. Polimerin Özellikleri	31
Tablo 4. Katkısız ve Katkılı Numunelerin Kıvam Limitleri Deney Sonuçları.....	40
Tablo 5. Katkısız ve polimer katkıli killerin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları ve Optimum Su İçerikleri.....	44
Tablo 6. Polimer Yüzdesi ve Kür Süresine Bağlı Olarak Numunelerin Serbest Basınç Mukavemetlerindeki Yüzde Değişimler	46
Tablo 7. Polimer Katkılı Numunelerin Şişme Basınçları	48
Tablo 8. Polimer Katkılı Numunelerin Kür Süresine Bağlı Olarak Geçirimlilik Katsayıları..	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi a) Tetrahedron (Grim, 1959) b) Tetrahedral (tetrahedron) (Grim, 1959) c) Silika levhasının şematik gösterimi	4
Şekil 2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) a) Oktahedron (Grim 1959) b) Oktahedral tabaka (Grim 1959) c) Silika levhasının şematik gösterimi (Lambe 1953).....	4
Şekil 3. Kaolinit mineral grubunun minerolojik yapısı.....	5
Şekil 4. İlit mineral grubunun minerolojik yapısı	6
Şekil 5. Montmorillonit mineral grubunun minerolojik yapısı	6
Şekil 6. Kil minerallerinin Casagrande plastisite kartındaki alanları.....	7
Şekil 7. Farklı zemin tane çapı aralıkları için uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri.....	12
Şekil 8. Zemin iyileştirme yöntemleri.....	14
Şekil 9. Deneyleerde kullanılan kil zemin	29
Şekil 10. Kil zeminin Casagrande plastisite kartındaki yeri	30
Şekil 11. Kil zeminin dane çapı dağılım eğrisi	30
Şekil 12. Deneyleerde kullanılan kopolimer.....	31
Şekil 13. Özgül ağırlık deneyi.....	33
Şekil 14. Hidrometre deney düzeneği	34
Şekil 15. Düşen koni deney düzeneği	35
Şekil 16. Otomatik Kompaktör	36
Şekil 17. Serbest basınç deney düzeneği.....	37
Şekil 18. Ödometre deney aleti	38
Şekil 19. Düşen seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği	39
Şekil 20. Katkısız numuneye ait likit limit grafiği	40
Şekil 21. %1 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği	41
Şekil 22. %2 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği	41
Şekil 23. % 3 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği	42
Şekil 24. % 4 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği	42
Şekil 25. Polimer yüzdesindeki artışla kıvam limitlerinde meydana gelen değişim.....	43
Şekil 26. Katkısız ve polimer katkılı killere ait standart kompaksiyon eğrileri.....	44
Şekil 27. Polimer yüzdesine bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının değişimi.....	44
Şekil 28. Polimer yüzdesine bağlı olarak optimum su içeriklerinin değişimi.....	45

Şekil 29. Farklı kür süresi ve polimer yüzdesindeki artışa bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi.....	46
Şekil 30. Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi.....	48
Şekil 31. Polimer katkılı numunelerin şişme basınçlarının katkısız numuneye göre yüzde değişimi.....	49
Şekil 32. Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarının değişimi.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
c_u	Kohezyon
PI	Plastisite indisi
q_u	Serbest Basınç Mukavemeti
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
w	Su muhtevası
w_L	Likit limit
w_n	Doğal su muhtevası
w_{opt}	Optimum su içeriği
w_p	Plastik limit
γ_{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı

GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca zeminler hem yapı malzemesi hem de temel malzemesi olarak çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Bu nedenle zeminlerin yapısı ve özellikleri mühendislik uygulamalarında büyük önem arz etmektedir.

Zeminler cins olarak çeşitlilik gösterdiği gibi bulunduğu bölgenin sahip olduğu iklim koşullarındaki farklılıklarda bu çeşitliliği artırmaktadır. Bunun yanında hızlı kentleşme ve nüfusun artmasıyla birlikte inşaat alanları kısıtlanmış buna bağlı olarak mühendislik uygulamaları açısından zayıf zeminlerinde kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Bu zorunluluk neticesinde zemin iyileştirme alternatifleri önem kazanmıştır.

Zayıf zeminler taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme potansiyelinin yüksek olması ve geçirimsizlik gibi sorunların bir veya birkaçının bulunduğu zeminlerdir. Zemin iyileştirmede zeminin bu gibi yetersiz özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır.

Killer doğada çok yaygın olarak bulunan doğal malzemelerdir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle killi zeminlerde taşıma gücü zayıflığı, oturma potansiyeli fazlalığı, şişme potansiyeli ve geçirimsizliğin yüksek olması gibi problemlerle sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu gibi durumlarda uygulama projesinin yerinin değiştirilmesi veya farklı iyileştirme yöntemleri kullanılarak mevcut problemlerli zeminin kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanır. Bu amaçla gelişen teknoloji ve zemin iyileştirme konusunda yapılan çalışmalar sonucunda zemin iyileştirme yöntemleri de çeşitlilik kazanmıştır.

Bu iyileştirme yöntemlerinden biri de katkılarla zemin iyileştirmesidir. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan katkılarla zemin iyileştirme yöntemi hem maliyet hem de uygulama açısından avantaj sağlayan bir yöntemdir. Katkılarla zemin iyileştirme yöntemi katkı olarak kullanılan malzeme ya da malzemelere göre farklılık gösterir. Çimento, kireç, uçucu kül, mermer tozu, ponza, lastik kırıntısı ve sentetik lifler zemin iyileştirmede kullanılan katkı malzemelerinden bazılarıdır. Bu malzemeler zemine karıştırılarak zeminde kimyasal reaksiyon oluşturup mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Aynı zamanda atık malzemelerin iyileştirmede kullanılması çevresel açıdan da yarar sağlamaktadır.

Bunların yanında zemine kimyasal maddeler karıştırılarak da zeminde iyileştirme yapılabilmektedir. Kimyasal zemin stabilizasyonu olarak bilinen bu yöntemde zemine kimyasal madde ya da maddeler karıştırılarak zeminin iyileştirilmesi amaçlanır. Bu çalışma kapsamında kimyasal kopolimer malzeme katkısı kullanılarak kil zeminin iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur.

Amaç ve Kapsam

Bu tez kapsamında, Erzurum ili Oltu-Narman bölgesinden alınan kil zeminin mekanik özelliklerinin polimer katkı malzemesi ile iyileştirilmesi konusu araştırılmıştır. Kil malzeme ağırlıkça çeşitli yüzdelerde polimer ile farklı kür sürelerinde stabilize edilmiş, mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak katkı maddesi olarak polimerin farklı yüzdelerde ve belirli kür sürelerinde kil zeminin stabilizasyonu üzerindeki etkileri ortaya koyulmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

Killer

İnşaat mühendisliğinde belli bir su muhtevasında belli bir plastisiteye sahip, kurduğunda sertleşen ve diğer mineral bileşikleriyle birlikte bazı kil minerallerini de içeren kohezyonlu zeminlere kil denilmektedir (Holtz *et al.* 2015). Bunun yanında Hatheway (2000)'de herhangi bir niteleyici ve tamamlayıcı bir ifade olmadan kilin bu şekilde tanımlanmasının yanlış anlamalara sebep olabileceği ifade etmiştir.

Kil minerallerinin genel özellikleri

Killer, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal ikincil minerallerdir. Dane boyutu 2 mikron veya daha küçüktür. Ayrıca aktif elektrokimyasal partiküllere sahiptir. Bu da zemin içerisinde oldukça az miktarda bile kilin bulunması halinde zeminin mühendislik özelliklerini etkileyeceği anlamına gelmektedir (Önalp 2002).

Kil mineralleri çok karmaşık bir yapı gösterdiklerinden dolayı günümüzde kabul görmüş bir sınıflandırma sistemi mevcut değildir. Kil minerallerinin sınıflandırılmasında;

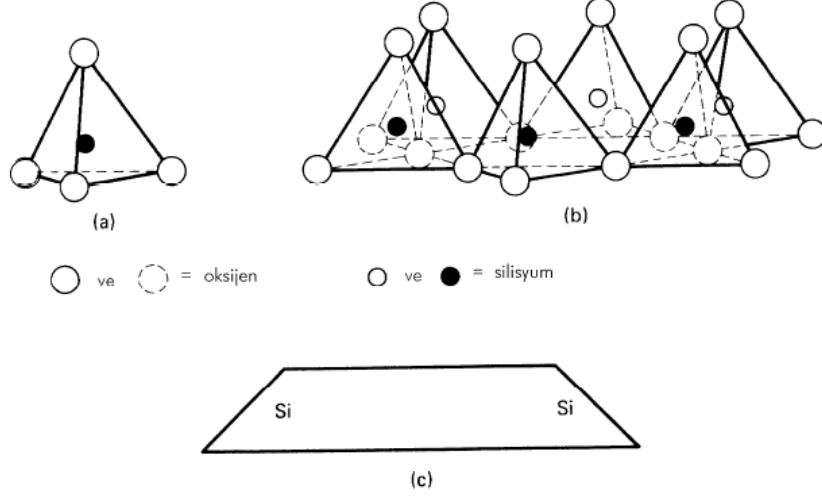
- Tabakalanma (tabaka kalınlığı, tabakaların ara mesafesi, vb.),
- İyon içeriği (tabakalar arasında diğer organik veya inorganik minerallerin varlığı, cinsi, miktarı, vb.),
- Tabakaların dizilişi ve düzeni olmak üzere farklı özellikler göz önünde bulundurulmaktadır (Tunç 2010).

Kil mineralleri çok küçük boyutta ve elektrokimyasal olarak çok aktif bir kristal yapıya sahiptirler. Bu özelliğinden dolayı zeminin yapısında az miktarda kil minerali bulunması bile zemin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Kil yüzdesi %25-%35 oranlarına ulaştığında zeminin yapısında bulunan iri tanelerin (silt, kum ve çakıl) mühendislik davranışına olan etkileri azalacaktır. Bunun yanında suyun varlığı kil zeminlerin davranışları üzerinde önemli farklılıklara sebep olmaktadır (Holtz *et al.* 2015).

Kristal levhaları tetrahedral veya silika (Si) ile oktahedral veya alümina (Al) olmak üzere iki çeşittir. Bu levhaların farklı metalik iyonlarla ve değişik bağlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır. Bunlar;

1. Silis tetrahedron; 4 oksijen, 1 silis atomundan oluşan dört yüzlü kristal bloğudur.
2. Tetrahedral tabaka; tetrahedronların birleşmesi ile oluşur (Holtz *et al.* 2015).

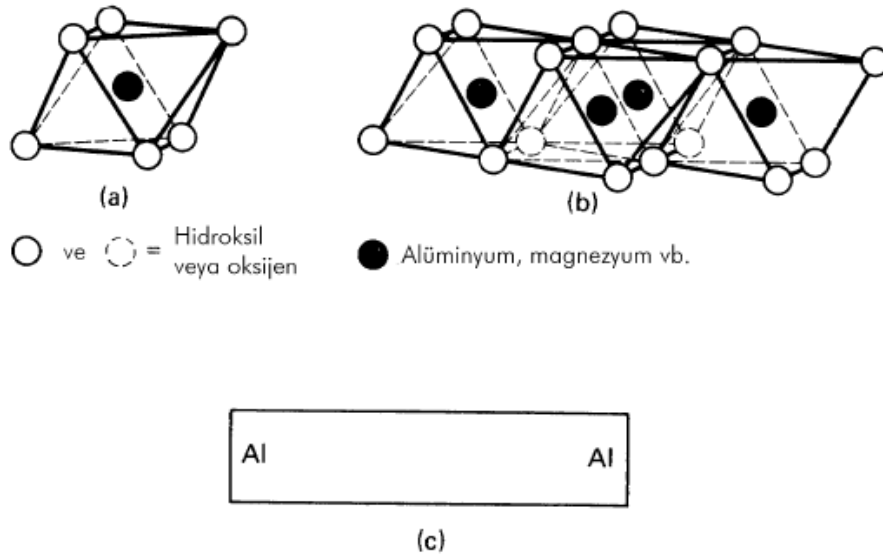
Şekil 1’de silis tetrahedron ve tetrahedral tabaka gösterilmektedir.



Şekil 1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi a) Tetrahedron (Grim, 1959) b) Tetrahedral (tetrahedron) (Grim, 1959) c) Silika levhasının şematik gösterimi (Lambe, 1953)

3. Alüminyum/magnezyum oktahedron; 6 hidrosil iyonuna bağlı alüminyum veya magnezyum iyonlarından oluşan 6 köşeli 8 yüzlü kristal yapı bloğudur.
4. Oktahedral tabaka; oktahedronların birleşmesi ile oluşan tabakalardır (Holtz *et al.* 2015).

Şekil 2’de silis oktahedron ve oktahedron tabaka gösterilmektedir.



Şekil 2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) a) Oktahedron (Grim 1959) b) Oktahedral tabaka (Grim 1959) c) Silika levhasının şematik gösterimi (Lambe 1953)

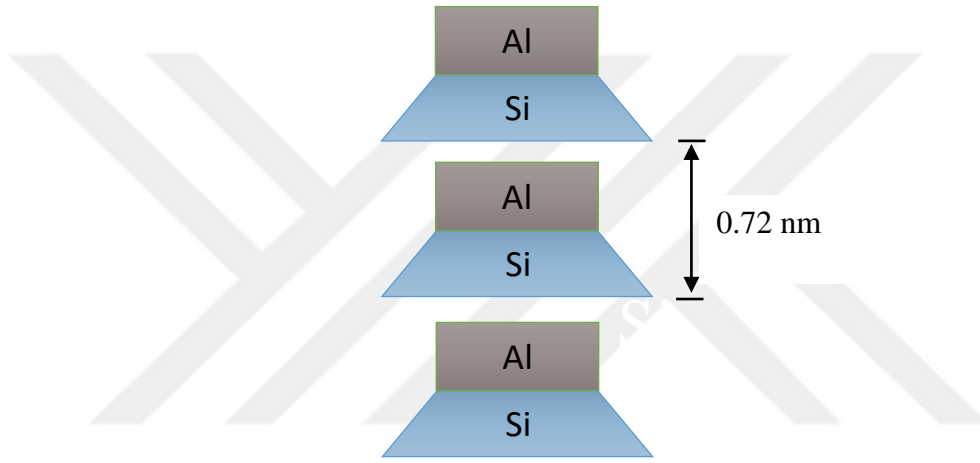
Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

Kil mineralleri başlıca üç ana gruba ayrılır (Holtz *et al.* 2015);

- Kaolinit grubu kil mineralleri
- İllit grubu kil mineralleri
- Montmorillonit grubu kil mineralleri

Kaolinit

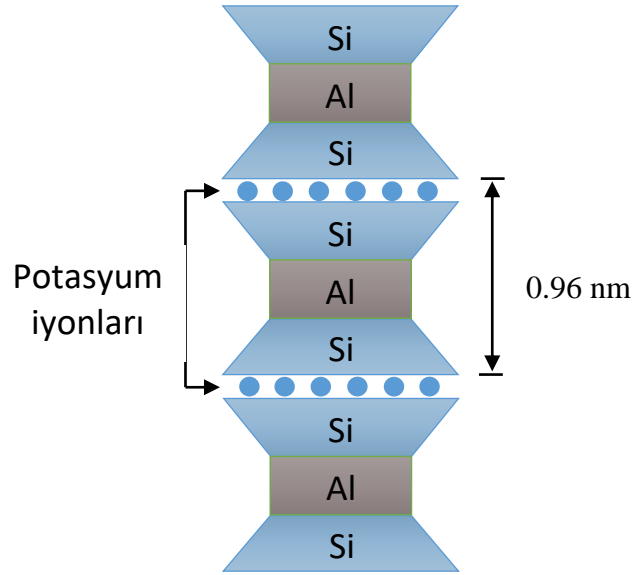
Kaolinit 1 tetrahedral ve 1 oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Tabakalar arasındaki kuvvetli hidrojen bağları sayesinde tabakalar arasına su girişi olmadığı için şişme azalır (Katti *et al.* 1969). Şekil 3'te kaolinit mineral grubunun minerolojik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. Kaolinit mineral grubunun minerolojik yapısı (Mitchell and Soga 2005)

İllit

İllit 1 oktahedral tabakanın 2 tetrahedral tabakasının arasına sıkışmasından oluşmaktadır. Tabakalar arasında bulunan potasyum iyonları su moleküllerinin araya girmesine engel olmakta potasyum iyonları tabakalar arasındaki bağın kuvvetli olmasını sağlamaktadır (Katti *et al.* 1969). Şekil 4'te illit mineral grubunun minerolojik yapısı gösterilmektedir.

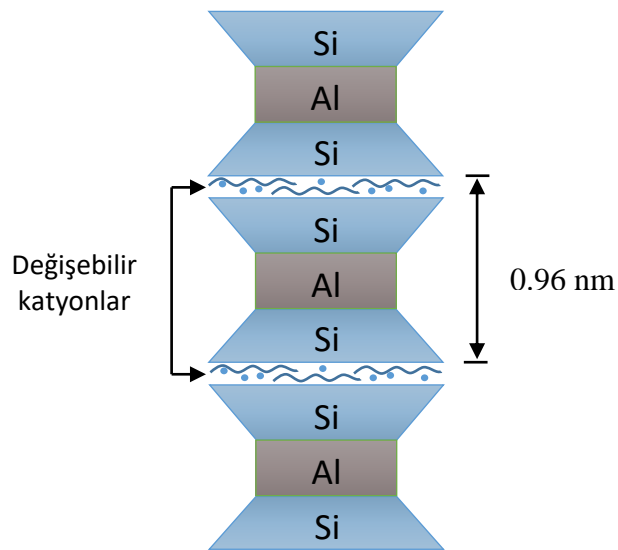


Şekil 4. İlit mineral grubunun minerolojik yapısı (Mitchell and Soga 2005)

Montmorillonit

Montmorillonit bir oktahedral tabakanın 2 tetrahedral tabaka arasında sıkışmasından oluşmaktadır. Tabakalar arasındaki bağ zayıf olduğundan dolayı tabakalar arasında su girişi zeminde hacim değişimine neden olmaktadır. Montmorillonitlerin hacim değiştirme ve plastisite özellikleri yüksektir. Bu montmorillonitlerin diğer kil minerallerine oranla suya eğilimlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. (Katti *et al.* 1969).

Montmorillonit mineralleri illit mineraline benzeyen bir kristal yapısına sahiptirler (Holtz *et al.* 2015). Şekil 5’da montmorillonit mineral grubunun minerolojik yapısı görülmektedir.



Şekil 5. Montmorillonit mineral grubunun minerolojik yapısı (Mitchell and Soga, 2005)

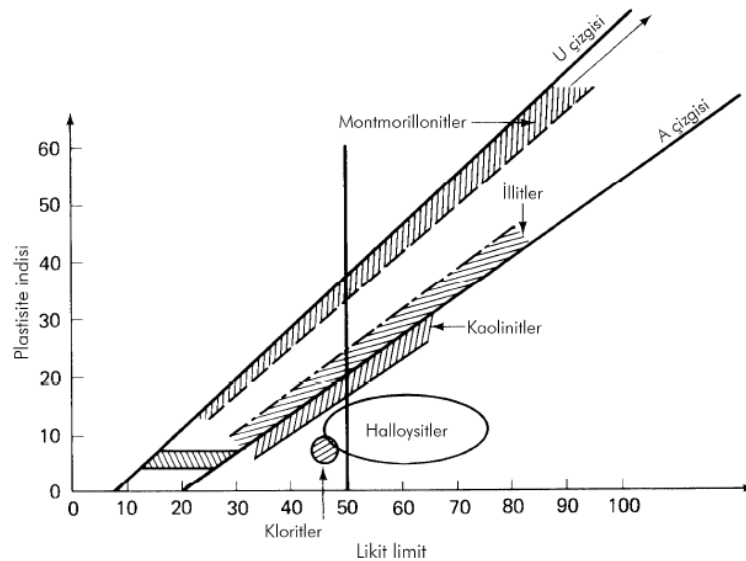
Tablo 1. Kil Minerallerinin Tipik Özellikleri (Yong and Warkentin 1975)

Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Tipik kalınlık (nm)	50-2000	30	3
Tipik çap (nm)	300-4000	10000	100-1000
Özgül yüzey (km^2/kg)	0,01-0,02	0,065-0,1	0,7-0,84
Katyon değiştirme kapasitesi (meq/100g)	2-15	10-40	80-150

Kil mineralleri ve aktivitelerinin tanımlanması

Kil mineralleri çok küçük yapıda oldukları için klasik optik minerolojisi teknikleri dışında tekniklerle tanımlanması gerekmektedir. Düzenli ve birbirini tekrarlayan şekilde kristal yapıya sahip mineralleri tanımlarken X ışını kırınımı kullanılabilir. Farklı kristal yapıdaki mineraller farklı kırınım göstermektedir. Yaygın olarak bilinen mineraller bu yöntemle belirlenebilirken kil minerallerinin karışımından oluşan zeminler, organik madde içeren zeminler, kil olmayan diğer mineralleri içeren zeminler ve karışık tabakalı kil mineralleri içeren zeminlerde bu yöntem verimli olmamaktadır (Holtz *et al.* 2015).

Kil minerallerinin tanımlanmasında kullanılan diğer bir yöntemde Diferansiyel ısı analizi (DTA) yöntemidir. Bu yöntemde kil numunesi asal kontrol maddesi ile birlikte özel bir etüv fırınına konulur. Asal kontrol maddesi ile kil numune arasındaki ısı farkı ölçülür. Bu yöntem ile kil minerali faz değişimine uğrar. Aynı zamanda özellikleri bilinmeyen kil mineralleri ile ilgili de kayıtlar tutularak karşılaştırılır. Buna benzer bir yöntem olan Termal Gravimetri Analizinde (TGA) de benzer şekilde ısı artışı sırasında numunenin kütlesindeki kayıp miktarı ölçülerek sonuçlar karşılaştırılır (Holtz *et al.* 2015).



Şekil 6. Kil minerallerinin Casagrande plastisite kartındaki alanları (Mitchell and Soga 2005)

Kilin aktivitesini;

$$A = PI / \text{kil yüzdesi} \quad (1)$$

olarak tanımlanmaktadır. (Skempton 1953). 2µm'den daha küçük boyuttaki zeminlerde kil yüzdesi ağırlıkça yüzde olarak kabul edilmektedir. Killerin aktivitesi; (0,75<A<1,25) ise normal, A<0,75 ise aktif olmayan, A>1,25 ise aktif kil olarak sınıflandırılmaktadır (Holtz et al. 2015).

Aktivite özellikle aktif olmayan ve yüksek aktiviteye sahip killerin sınıflandırılması ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Holtz *et al.* 2015).

Özgül yüzey

Bir malzemenin yüzey alanının hacmine veya kütesine oranına özgül yüzey denir.

$$\text{Özgül Yüzey} = \text{Yüzey Alanı} / \text{Birim Hacim} \quad (2)$$

Bu bağıntı dane şekli ne olursa olsun iri daneli zeminlerin birim hacme düşen yüzey alanları ve özgül yüzeylerinin ince danelilerden küçük olduğunu göstermektedir. Bir zeminin özgül yüzeyi ile dane boyutu ters orantılıdır (Holtz *et al.* 2015).

Difüzyon Çift Tabaka ve Kil Minerallerinin Hidratasyonu

Doğada kil mineralleri hidratlı yani her bir kristali su molekülleri ile çevrelenmiş şekilde bulunmaktadır. Bu su absorbe su (zemin danesine tutunan su) olarak adlandırılmaktadır (Yong and Warkentin 1975).

Absorbe su kalınlığı yaklaşık olarak aynıdır ancak kil minerallerinin boyut farklılığına bağlı olarak etkileri farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak montmorillonitin kaolinite göre aktivite, plastisite, şişme, büzülme ve yüklemeye bağlı hacim değişimi fazladır (Holtz *et al.* 2015).

Absorbe su tabakalarındaki katyonlar kil kristallerinin yüzeyine yakın yerlerde yoğun olarak bulunurlar. Absorbe sudaki bu katyon yoğunluğunu dengelemek için termal olarak kil yüzeyinden uzaklaşarak difüzyon yaparlar. Bu difüzyon pozitif yüklü katyonlarla negatif yüklü kil kristal yüzeyleri arasındaki elektriksel çekimle dengelenir. Kil danesi yüzeyi ve katyonların difüzyona uğramış tabakasından oluşan bu iki bileşen çift katman difüzyonunu oluştururlar. Çift katman difüzyonu kil, su ve elektrolit sistem davranışının anlaşılmasını sağlayarak killerin şişme, plastisite ve daneler arası etkileşimin açıklanmasında yardımcı olmaktadır (Holtz *et al.* 2015).

Değişebilir katyonlar ve katyon değişim kapasitesi

Kil kristallerinin yüzeyindeki negatif yükler kristal kafesindeki kusurlardan ve izomorf yer değiştirmeden kaynaklıdır. Farklı killerin farklı yük dengesizlikleri vardır. Bu nedenle katyonları çekme eğitimi de farklılık göstermektedir. Bir katyon aynı değerlilikte başka bir katyon ile veya orijinal katyonun yarısı değerlilikte olan iki katyon ile kolaylıkla yer değiştirebilir. Bundan dolayı bunlar değişebilir iyonlar olarak adlandırılır. Montmorillonit kili rölatif büyüklüğü ve özgül yüzeyine bağlı olarak daha büyük bir yük dengesizliğine sahiptir. Ayrıca kaolinite oranla daha fazla çekim gücüne sahiptir (Holtz *et al.* 2015).

Bir kilin katyon değişim kapasitesi (Cation Exchange Capacity, CEC) her yüz gram kuru kil için milieşdeğer (meq) birim cinsinden tanımlanır. Bazen bu değer baz değişim kapasitesi (Base Exchange Capacity, BEC) veya iyon değişim kapasitesi (Ion Exchange Capacity, IEC) olarak adlandırılır (Holtz *et al.* 2015).

Kil partikülleri ve su ilişkileri

Kil mineralleri ve yüzeylerine tutulan absorbe suyun birleşimi zeminlerin temel fiziksel özelliklerini oluşturmaktadır. Her bir kil danesi etrafındaki absorbe su tabakasıyla etkileşim halindedir. Bunun sonucunda farklı iyonlar, farklı bileşenler ve organik malzemelerin varlığı zemin yapılarının çeşitliliğini artırmaktadır. Kil daneleri elektrostatik olarak birbirlerini iterler. Bu itme iyon yoğunluğu, daneler arası uzaklık ve diğer faktörlere bağlıdır. Ayrıca kil daneleri hidrojen ve Van der Waals kuvvetleri diğer kimyasal ve organik bağlardan dolayı bir çekim etkisi altındadır. Danelerin birbirini çekmesi topaklanmaya, itmesi dağılma ve ayrılmaya sebep olur (Holtz *et al.* 2015).

Polimerler

Monomer adı verilen çok sayıda küçük molekülün kovalent bağlarla birbirine bağlanması sonucu oluşan makromoleküllere polimer denir. Monomerler kendi aralarında polimerizasyon tepkimeleriyle kimyasal bağlar oluşturarak polimer moleküllerine dönüşürler (Saçak 1998).

Polimerler sentezlenirken birden fazla monomer kullanılabilir. Bu nedenle de polimer zinciri boyunca farklı kimyasal yapılar yer alır. Polimer zinciri boyunca tek bir kimyasal yapı olursa homopolimer, iki farklı monomer bulunursa kopolimer, üç farklı monomer kullanılmışsa terpolimer olarak adlandırılır (Saçak 1998).

Polimerlerin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan özellikler aşağıda belirtilmiştir (Çetin 2011).

- Hafiftirler
- Kolay şekillendirilebilir ve kolay tasarlanabilirler
- Kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır
- Atmosferik koşullara karşı dayanıklıdırlar
- Mekanik dayanımları yüksektir
- Yalıtıkcıdır, elektrik, ısı ve sesi iletmezler
- Hijyeniktirler
- Özellikleri istekler doğrultusunda değiştirilebilir
- Şeffaflık, matlık özellikleri
- Ekonomiktirler.

Kopolimerler, iki farklı monomerin reaksiyonu sonucu oluştuğu için kendini oluşturan iki monomerlerin özelliklerini aynı anda taşımaktadır. Böylece kendini oluşturan monomerlerden daha üstün özelliklere sahip olmaktadır (Çetin 2011).

Problemler ve zemin iyileştirme yöntemleri

Zemin iyileştirme, zeminin uygulanacak mühendislik uygulamasına göre belirli özelliklerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik uygulamalarla stabilize edilmesi olarak tanımlanabilir. Zemin iyileştirme, yerine zemin ıslahı, modifikasyonu ve stabilizasyonu gibi çeşitli terimlerde eş anlamlı olarak kullanılabilir (Özaydın 2012).

Bir zemin veya saha, gerekli minimum mühendislik özelliklerine sahip değilse ve / veya tasarım gereklilikleri için yetersiz performans sağladığı değerlendirilmişse “zayıf” olarak değerlendirilebilir. Bir zemin minimum gereksinimlere yakınsa “marjinal” olarak kabul edilebilir. “Kötü” veya yetersiz zemin ve / veya saha koşulları geçerli olduğunda, durum için mevcut alternatifleri göz önünde bulundurmak gerekir. Bu alternatifler şunları içerebilir (Nicholson 2014);

- Projeden vazgeçilmesi: Bu, ancak başka bir uygun alan bulunduğu ve hiçbir zorlayıcı taahhüt, projenin söz konusu yerde kalmasını gerektirmediğinde veya maliyet tahminlerinin pratik olmadığı düşünüldüğünde pratik bir çözüm olarak düşünülebilir.
- Mevcut “zayıf” zeminin değiştirilmesi: Bu yöntem yaygın bir uygulamadır, ancak malzemeler için maliyet kısıtlamaları ve taşıma, seçili malzemelerin kullanılabilirliği ve maliyeti ve çevre sorunları nedeniyle kullanımda azalma olmuştur.

- Projenin veya tasarımın (genellikle yapısal elemanlar dahil) zemin ve saha koşullarına uyacak şekilde yeniden tasarlanması: Yaygın bir örnek, büyük ölçüde uygulanan yükleri uygun bir zemin tabakasına aktararak yumuşak, zayıf ve sıkıştırılabilir zeminleri atlamak için çakma kazıkların ve delgili şaftların kullanılmasıdır.
- Mevcut zemin iyileştirme tekniklerini kullanarak zeminin özelliklerinin ve / veya davranışının iyileştirilmesi: Zemin iyileştirme yöntemleri, birçok zemin problemini çözmek ve mevcut zeminlerin istenen mühendislik özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, daha geleneksel yaklaşımlara göre genellikle ekonomik ve çevreye duyarlı alternatifler bulunmaktadır.

Zemin iyileştirilmesinin amacı esasen zayıf zeminin özelliklerini değiştirmek ve / veya bir projenin davranışını ve performansını iyileştirmektir. Genellikle iyileştirme için hedeflenen özellikler arasında:

- Oturmayı önlemek için sıkışabilirliği azaltmak
- Mukavemet, taşıma kapasitesini arttırmak
- Yeraltı suyu akışını kısıtlamak için geçirimsizliği azaltmak
- Drenaja izin vermek için geçirimsizliği arttırmak
- Depreme bağlı sıvılaşma potansiyelini azaltmak sayılabilir.

Bir projenin üç aşamasından birinde iyileştirmeler yapılabilir (Nicholson 2014). Bu aşamalar;

İnşaat öncesi iyileştirmeler: Genellikle en çok arzu edilen ve en ekonomiktir. Bu tür iyileştirmeler bir inşaata uygun bir zemin hazırlamak için yapılır ve genellikle bir projenin başarısını sağlamak için planlama ve tasarımın bir parçası olur. İnşaat öncesi iyileştirmelere örnek olarak zemin sıkılaştırma, ön konsolidasyon, drenaj, hidrolik akışların drenajı ve modifikasyonu, planlanan destek ve çeşitli enjeksiyon teknikleri verilebilir.

İnşaat aşamasındaki iyileştirmeler: Projenin inşası sırasında yapılan ve bir projenin kalıcı bileşenleri haline gelebilecek iyileştirme teknikleridir. Örnek olarak, sıkıştırılmış çakıl kolonları, sıg toprak muamelesi (gradasyon kontrolü, yüzeysel kompaksiyon ve katkılarla iyileştirme dahil), zemin dondurma, geosentetiklerle inşaat, zemin çivileri, kazı ve hafif dolgular sayılabilir. Hafriyat inşaatı, bir veya daha fazla iyileştirme hedefine ulaşmak için bir dizi farklı metodoloji ve iyileştirme süreci içerebilir. Bunlar, inşa edilmiş eğimler ve setler, istinat duvarı dolgusu ve yollar gibi mühendislik dolgularını içerir.

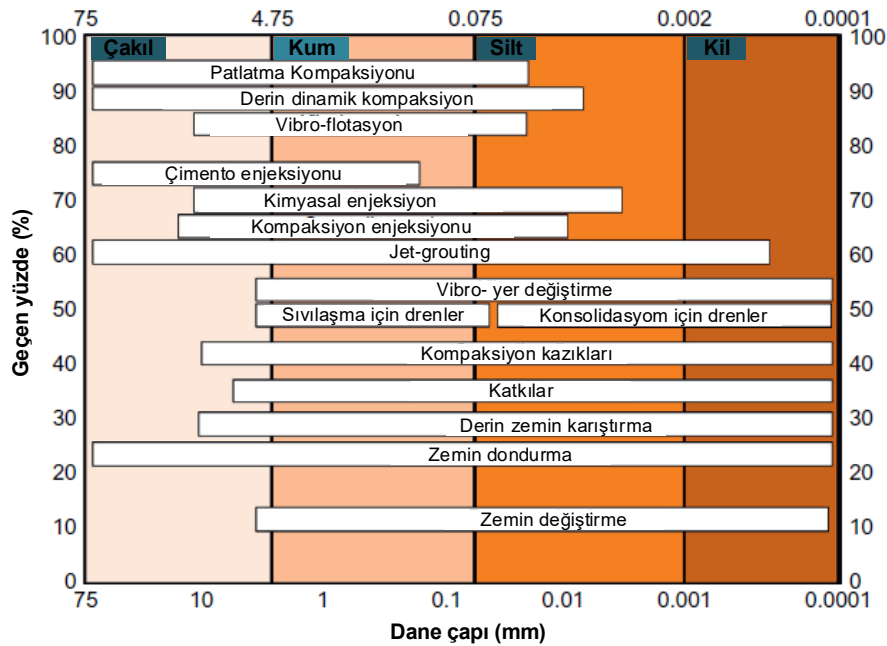
İnşaat sonrası iyileştirmeler: Bir projenin inşaat aşamasının tamamlanmasından sonra yapılır ve genellikle iyileştirici süreçlerdir. Bu uygulamalar çok maliyetli olabilir, ancak bir

projenin tamamlanmasından sonra (veya çok sonra) karşılaşılan sorunları düzeltmek veya başarısız veya tehlikeli hale gelen doğal özellikleri stabilize etmek için son alternatifleri olarak kullanılır. Örnek olarak, oturma sorunlarını, göçmüş veya göçmeye yakın şevleri, sızma sorunlarını ve benzerlerini dengeleme yöntemleri gösterilebilir. İnşaat sonrası iyileştirmeler için kullanılan yöntemler, zemin çivileri, drenaj ve hidrolik akışın düzenlenmesi ve uzaklaştırılmasını vb. içerir (Nicholson 2014).

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi veya zemin istenen bir işlevi yerine getirmesi için değiştirilmesi yeni bir fikir değildir. Sıkılaştırma, drenaj ve katkı maddelerinin kullanımı gibi zemin iyileştirmenin temel ilkelerinden bazıları binlerce yıldır varlığını sürdürmektedir. Örnek olarak Mezopotamya ve Eski Mısır verilebilir (Nicholson 2014).

Geoteknik bir problemle karşılaşıldığında, istenen sonuçları en iyi şekilde elde edecek çözümlerin türünü belirlemede bir dizi değişken göz önünde bulundurulmalıdır. Hem zemin ve saha koşullarının fiziksel özellikleri, hem de sosyal, politik ve ekonomik faktörler iyileştirme yöntemini belirlemek için oldukça önemlidir. Değişkenler aşağıda sıralanmıştır.

- **Zemin tipi:** Hangi yaklaşımın veya malzemelerin uygulanacağını kontrol edecek en önemli parametrelerden biridir. Bazı zemin iyileştirme yöntemleri sadece belirli zemin tipleri ve / veya tane büyüklükleri için geçerlidir. Zemin tane boyutlarına bağlı uygun çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinin grafiksel gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.

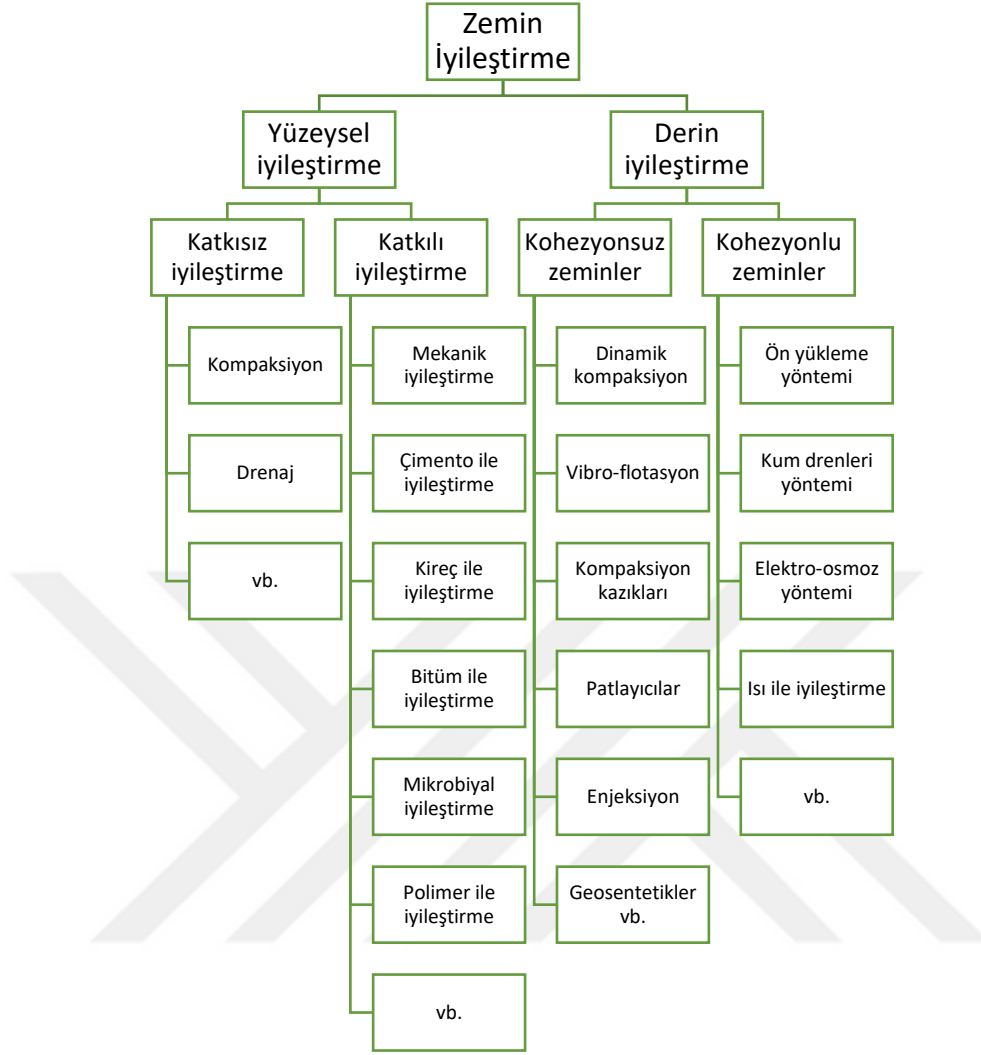


Şekil 7. Farklı zemin tane çapı aralıkları için uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri (Nicholson 2014)

- **İyileştirmenin yeri, derinliği ve alanı:** Birçok zemin iyileştirme yönteminin, daha derin zemin tabakalarına uygulaması zorlukları mevcuttur. Projenin alan boyutuna bağlı olarak, proje için hangi sürecin en uygun olduğuna karar vermede ekonomik ve ekipman yetenekleri de önemli bir rol oynayabilir. Konum, özellikle bitişik yapılar, gürültü ve titreşim endişeleri varsa veya suyun sıcaklığı ve / veya mevcudiyeti bir faktörse, yöntem seçiminde önemli bir rol oynayabilir.
- **İstenen / gerekli toprak özellikleri:** Farklı mühendislik özelliklerine ulaşmak için farklı yöntemler kullanılır.
- **Malzemelerin bulunabilirliği:** Projenin konumuna ve her bir uygulanabilir zemin iyileştirme yaklaşımı için gerekli malzemelere bağlı olarak, bazı malzemeler hazır bulunmayabilir veya nakliye maliyeti ve lojistiği belirli yöntemlerin kullanılmasını engelleyebilir.
- **Beceri, yerel deneyim ve yerel tercihlerin bulunması:** Mühendis, tercih edilen bir yöntemin bilgi ve anlayışına sahip olabilir. Bazı yerler ve proje sahipleri, alışılmadık ve yerel olarak “kanıtlanmamış” bir şeyi denemeye direnebilir. Bu öncelikle sosyal bir konudur, ancak özellikle daha uzak ve daha az gelişmiş yerlerde göz ardı edilmemeli veya reddedilmemelidir.
- **Çevresel endişeler:** Doğal çevre üzerindeki etkilerin daha iyi anlaşılması ve daha fazla farkında olunmasıyla, daha fazla dikkat daha az çevresel etki sağlayan yöntemlere başvurulmuştur. Bu endişe, inşaat projelerinin üstlenilme şeklini büyük ölçüde değiştirmiş ve yöntemler, ekipman ve özellikle zemin iyileştirme için kullanılan malzemeler üzerinde önemli bir etkisi olmuştur.
- **Ekonomi:** Her şey düşünüldüğünde, iyileştirme yönteminin seçimi ile ilgili nihai karar genellikle önerilen bir yöntemin nihai maliyetine bağlıdır. İki veya daha fazla uygun yöntem arasında seçim yapmada belirleyici faktör ekonomi olacaktır. Bazen projenin daha erken bitirilmesi gibi zaman kısıtlamaları olması durumunda daha pahalı bir yöntem tercih edilebilir.

Bu faktörlerin tümü, önerilecek iyileştirme yöntem(ler)inin en iyisinin seçilmesinde rol oynayabilir. Bu karar verilirken her projenin duruma özel olarak ele alınması gerekir (Nicholson 2014).

Çok sayıda zemin iyileştirme teknikleri bulunmaktadır. Hangi iyileştirme tekniğinin kullanılacağını etkileyen faktörler yukarıda açıklanmıştır. Bazı iyileştirme yöntemleri hazır inşaat ekipmanlarına ihtiyaç duyarken, bazıları özel ekipman gerektirir. Uygulamada en sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Zemin iyileştirme yöntemleri (Uzuner 2000)

Zemin iyileştirme yöntemlerinin bazıları aşağıda açıklanmıştır.

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri

Kompaksiyon: Zemine enerji uygulanarak zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve boşlukların azaltılması sonucu daha sıkı bir yapıya sahip olmalarını sağlayan mekanik işleme verilen isimdir (Özaydın 1989).

Drenaj: Genel olarak suyu zeminden uzaklaştırma işlemi olarak ifade edilir. Yüzeysel drenajda, açılan hendeklerle sular uzaklaştırılır. Hendekler, suların uzaklaşması için, eğimli inşa edilirler. Hendek tabanlarında suyun akışını sağlayacak düzenlemeler (delikli borular, geotekstiller vb.) yaparak ve içleri uygun filtre malzemesi ile (kum, çakıl) doldurularak oluşturulur. Zemin kitle içi drenaja tabi tutulabilir. Yeraltı su düzeyi çeşitli yöntemlerle indirilebilir, yeraltı suyu uzaklaştırılabilir, dondurulabilir (Uzuner 2013).

Mekanik İyileştirme: Mekanik iyileştirme, herhangi bir kimyasal maddeyi zemine karıştırmadan ve kimyasal reaksiyon meydana gelmeden kompaksiyon veya sıkıştırma yöntemleri kullanılarak zemin özelliklerinin istenilen hale getirilmesidir (Aytekin 2004).

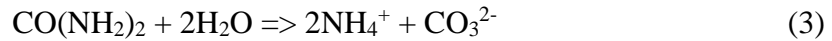
Çimento ile iyileştirme: Pratik amaçlar için, çimento çoğu granüler zeminlerde etkili ve ekonomiktir. Bununla birlikte, çimento kullanımı, özellikle zemin ıslaksa ve aşırı büzülme özellikleri söz konusu olduğunda, yüksek dozaj gereklilikleri ve inşaat (karıştırma) zorlukları nedeniyle kohezyonlu zeminler için nispeten etkisiz veya ekonomik olarak verimsiz olabilir. İdeal çimento stabilizasyonu en çok, az miktarda silt veya kil içeren çakıllı zeminler ve kumlar da dahil olmak üzere iyi derecelenmiş granüler zeminlere uygulanabilir. Birçok ülke, temel indeks ve derecelendirme özelliklerine göre çimento stabilizasyonu için uygulanabilir zeminlerin aralığını sınırlayan tasarım kılavuzlarına sahiptir. Çimento zemin karışımları kategorileri arasındaki temel fark, eklenen çimento miktarıdır. Bu değer, çimento ile modifiye edilmiş zemin için ağırlıkça sadece yüzde birkaç dan, zemin türüne bağlı olarak zemin çimento için % 6-10'a (killer için % 15'e kadar) kadar değişmektedir. Genel olarak, daha ince taneli ve daha yüksek plastisiteli zeminler, stabilizasyon için daha fazla çimento kullanılmasını gerektirecektir. Stabilizasyonun kalitesi ve derecesi, çimentonun toz haline getirilmesi, zeminin toz haline getirilmesi, karıştırma derecesi ve kalitesi, sıkıştırma derecesi, yeterli nem ve uygun kürlenme gibi bir dizi değişkene bağlı olacaktır (Nicholson 2014).

Kireç ile İyileştirme: İnce daneli zeminlere kireç karıştırılarak puzzolanik reaksiyon oluşturulup zeminde çimentolaşma ile mukavemet artışı sağlanması esasına dayanan iyileştirme yöntemidir. Gerçekleşen puzzolanik reaksiyon nem ve ısı etkisi ile zamana bağlı geliştiği için zamanla mukavemet artışı devam etmektedir. Ayrıca kireç stabilizasyonu zeminin plastisitesinin, şişme basıncı ve kabarma potansiyelinin azalmasını, dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır (Özaydın 1989).

Bitüm ile iyileştirme: Bitümlü katkı maddeleri en çok su geçirmeme ve / veya zeminlere yapışma mukavemeti sağlama amacıyla kullanılır. Katran, tarihsel olarak su geçirmez ve ahşap koruyucu olarak kullanılırken, günümüzde esas olarak yol uygulamalarında kullanılmaktadır. Asfalt ve kalsiyum zengini katkıları (çimento, kireç, C Sınıfı uçucu kül) arasındaki önemli bir fark, asfaltlar zeminle karıştırıldığında gerçekte hiçbir kimyasal reaksiyonun meydana gelmemesidir. Zemindeki iyileşme temel olarak asfalt kaplı zemin partiküllerinin fiziksel olarak bağlanmasıdır. Sertleştikten sonra, özellikle iyi sıkıştırıldığında, bir zemin kütlelerine ilave güç ve stabilite sağlar. Mukavemet ve stabilite iyileştirmelerine ek olarak, asfalt stabilizasyonu, zemin partiküllerinin nem emilimini geciktiren bir bariyerle kaplayarak “su geçirmezlik” etkisi sağlar. Kullanım amacına ve

uygulamaya bağlı olarak, çeşitli asfalt ürünleri kullanılabilir. Asfalt bağlayıcılar sıcak karışım veya soğuk karışım uygulamaları olarak kullanılabilir (Nicholson 2014).

Mikrobiyal İyileştirme: Biyolojik zemin iyileştirme tekniği bir diğer adıyla MICP (Mikrobiyal aracılı kalsit çökmesi), zemin iyileştirme tekniklerine yeni bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Mikrobiyal aracılı kalsiyum karbonat çökmesi bir dizi reaksiyon sonucunda gerçekleşmektedir. Bu teknik zemine yüksek üreaz enzimine sahip aerobik olarak yetiştirilen bakterinin dahil edilmesiyle üreaz enziminin üreyi hidroliz etmesi sonucunda amonyum ve karbonat iyonlarının oluşmasını ihtiva etmektedir. Bu süreçteki kimyasal reaksiyon eşitlik 3’de verilmiştir.



Kalsiyum kaynağının varlığında (sıklıkla kalsiyum klorür, CaCl_2), eşitlik 4’de verilen kimyasal reaksiyonda olduğu gibi zemin matrisi boyunca kalsiyum karbonat (CaCO_3 , kalsit) oluşmaktadır (Cheng *et al.* 2013).



Yapılan çalışmalarda kalsiyum karbonat reaksiyonunu etkileyen birçok faktör olduğu bulunmuştur. Bunlar pH, sıvı besiyeri, sıcaklık, üre aktivitesi, bakteri, zemin türü vb. şekilde sıralanabilir. Bunların dışında uygulamanın şeklinin de reaksiyonu belirgin şekilde etkilediği yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır (Akoğuz *et al.* 2018).

Polimerler ile Zemin İyileştirme: Polyester, polipropilen ve kopolimer gibi polimerlerin kullanılması ile yapılan iyileştirmeler geoteknik mühendisliğinde yeni iyileştirme alternatifleri arasına girmiştir. Yüksek çekme mukavemetine sahip bu malzemeler zeminde gerilmeleri üstlenerek dağıtma eğilimi oluşturmaktadır (Çetin 2011).

Derin zemin iyileştirme yöntemleri

Dinamik Kompaksiyon: Geleneksel sıkıştırma tekniklerinin sınırlı derinliği ve doğal zeminlerin daha büyük derinliklerde sıkıştırılması ihtiyacı nedeniyle, ağır bir tokmağın zemin yüzeyine düşürülmesi fikri 1975 yılında Louis Menard tarafından ortaya atılmıştır. Bu teknik, kaba taneli zeminlerin sıkıştırılması için en uygun yöntemdir (Briaud 2013). Dinamik kompaksiyon ağır bir kütlenin önceden ayarlanmış bir H yüksekliğinden düşürülerek zeminin sıkıştırılması esasına dayanır. Tipik bir kombinasyon 20 m yükseklikten düşen 20 tonluk bir ağırlık olabilir. Ağırlık düşürme bir noktaya birkaç kez tekrarlanır. Sonra vinç başka yere hareket eder ve işlem bir ızgara deseninde tekrar edilir. Her düşüşte, çarpmanın yarattığı enerji basınç ve kesme dalgası ile daha derinlere yayılır. Bu sıkıştırma işleminin etkinliği zemin

dinamik tepki özelliklerine bağlıdır. Dinamik sıkıştırma yöntemiyle ile sıkıştırılabilen maksimum derinlik(D), zemin özellikleri, yeraltı suyu seviyesi, her bir noktadaki düşme sayısı ve ızgaralar arasında geçen süre dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenir (Briaud 2013).

Aşağıdaki denklem (Lukas 1995) tarafından önerilmektedir:

$$D = n\sqrt{M.H} \quad (5)$$

Burada:

n: arazi faktörü (<1)

M: ton cinsinden düşen tokmağın kütlesi

H: düşme yüksekliğidir.

Derin Vibrasyon (Vibroflasyon) Yöntemi: Bu yöntemde 0,3-0,5 m çapında 1,5-2,5 m uzunluğunda vibroflot adı verilen silindirik bir vibratör kullanılır. Önce bir vincin ucuna asılan vibroflot kendi ağırlığı altında, titreşim ve su jeti yardımıyla zemine indirilir. İstenilen derinliğe ulaşıldığında su jeti durdurularak kuyu içi kum çakıl ile doldurularak vibratör çalıştırılır. Bu işlem esnasında üstten bir miktar su akıtılır. Bu şekilde vibroflot etrafında sıkıştırılmış bir bölge oluşturulur. Bu şekilde vibroflot yukarı çekilerek uygulama devam ettirilir. Sonuç olarak 1-2 m çapında sıkıştırılmış bir silindir kütle elde edilir. Bu işlem 1-2 m aralıklarla tüm zemine uygulanır (Uzuner 2000).

Patlatma Metodu: Patlayıcıların, patlama etkisi dolayısıyla ortaya çıkan şok dalgaları ve titreşimlerin zeminin sıvılaşması ve sıkışmasına yol açtığı yöntemdir. Patlatma yönteminin en büyük avantajları ekonomik olması ve derinliklerde kullanılabilir olmasıdır. Lakin halen yöntemin teoriden çok tecrübeye dayanarak uygulanır oluşu geniş kitleler tarafından tercih edilmemesine neden olmaktadır (Ekinci 2011).

Enjeksiyon: Zemin içerisine süspansiyon, emülsiyon veya solüsyon halindeki maddelerin basınç altında uygulanması işlemidir. Yöntemin amacı zeminin geçirirmliliğini azaltmak ve kayma mukavemetini arttırmaktır. Bu yöntem ilk olarak barajlarda sızdırmazlığı artırıp mukavemeti iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. Kullanım alanı oldukça geniştir.

Enjeksiyonda;

- Zeminin tane çapı, tabakaların durumu, kayanın ayrışmışlığı
- Yeraltı suyunun durumu
- Zemin ve kayanın permeabilitesi, süreksizliklerin durumu göz önünde bulundurulmalıdır (Öztoprak 2011).

Geotekstil ile İyileştirme: Yumuşak killer üzerine oturan dolguların takviyesinde ve zemin iyileştirmesinde kullanılmaktadır. Geotekstil ile iyileştirmede en önemli amaç zeminin geçirimsizliğini azaltmak ve taşıma gücünü artırmaktır. İyileştirmede kullanılan geotekstillerin ayırma, donatı, filtrasyon ve drenaj olarak farklı amaçları vardır. Dolgu inşasında en önemli fonksiyonu kaymayı önlemek amacıyla çekme donatısı olarak kullanılmasıdır (Demiröz ve Karaduman 2009).

Ön yüklemeye (Sürşarj) Metodu: Özellikle suya doygun kohezyonlu zeminlerde, oturmaları azaltmak ve taşıma gücünü artırmak amacıyla zemin üzerine yük yerleştirilerek belli bir süre (birkaç ay yada yıl) bekletilmesi esasına dayanan iyileştirme yöntemidir. Bu şekilde zemin konsolide edilir (Uzuner 2000).

Elektro-osmoz yöntemi: Elektro-osmoz 1800'lerin başlarında keşfedilmiş ve 1940'ların başında Leo Cassagrande tarafından zeminlere uygulanmıştır. Elektro-osmoz ince taneli zemine sürülen iki elektrot (örn. çelik çubuklar) arasında bir doğru elektrik akımı oluşturulduğunda, suyun anottan (pozitif yük) katoda (negatif yük) akmasıdır. Bu su hareketinin nedeni şöyledir. Kil parçacıkları negatif yüklüdür ve bu nedenle sodyum, kalsiyum ve magnezyum gibi katyonları yüzeylerine çeker. İki metal arasında doğru akımı oluşturulduğunda kil parçacıklarının yüzeyini çizen katyonlar, elektriksel çekim yoluyla katoda doğru kaymaya başlar. Bu sınır katyon tabakasının hareketi, zemin suyunu onunla sürükler. Katotta biriken su boşaltılır ve kilin su içeriği azalır, buna bağlı olarak mukavemet ve sertlik artar (Briaud 2013).

Derin Karıştırma Metodu: Yumuşak kil zeminlerde özel ekipmanlar yardımıyla kireç veya çimentonun karıştırılması ile zemin içinde kolonlar oluşturulması yöntemidir. Derin karıştırmada amaç;

- Sönmemiş kireç veya çimento karıştırarak zeminin su muhtevasını azaltmak
- Zemin ile puzzolonik reaksiyonlar oluşturarak rijit kolonlar oluşturmaktır.

Zemin ile çimento ve/veya kireç arasında kimyasal reaksiyonlar oluşması yöntemin başarılı olması için gereklidir.(Özaydın 2012).

Isıtma ve Dondurma Yöntemi ile Termal İyileştirme: Zeminin fiziksel veya mekanik özelliklerinin ısıtılma veya dondurma yolu ile geçici veya kalıcı olarak değiştirilme yöntemidir. Isıtma yöntemi zeminin özelliklerini tamamen kalıcı olarak değiştirip daha sert ve dayanıklı zemin elde edilmesini sağlar. Zemin dondurma yöntemi ise geçici iyileştirme yöntemlerinin gerektiği yeraltı kazılarında geniş kullanıma sahiptir (Ekinci 2011).

Jet Grouting Uygulaması: Jet-Grout uygulamasında, zeminin taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu durumlarda, zemin üzerine planlanan inşaatların yapılmasına uygun hale getirmek için su ve çimento karıştırılarak basınçlı hava ile zemine enjekte edilmektedir. Kullanılacak stabilizatör seçilerek zemine enjeksiyonla uygulanır. Bu yöntem basınç altında uygulandığı için, viskoziteli stabilizatörler kullanıldığında sadece yüksek geçirgenlikli zeminlerde kullanılabilir. Jet Grout, geçirgenliği düşük olduğu için killi zeminlerin stabilizasyonunda uygulanamaz (Taube and Herridge 2002).

Literatür Özetleri

Polimerler ile zemin iyileştirme

Chou (1987), çalışmasında üçü CH (yüksek plastisiteli kil), biri MH (yüksek plastisite silt) ve diğeri CL (düşük plastisiteli kil) olan beş farklı zemin üzerinde bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Polimer oranı ağırlıkça %0,5 olarak alınmış ve bu da genellikle kireç (%1,5 ila %8 ve çimento (%3 ila %16) için kullanılan çok daha yüksek uygulama oranları ile karşılaştırılmıştır. 7 günlük külden sonra, muamele edilmiş numunelerin mühendislik özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Newman and Tingle (2004), çalışmalarında altı farklı üreticiden altı farklı sıvı polimer emülsiyonunu siltli kuma ekleyerek araştırma yapmışlardır. Numuneler ağırlıkça % 2,75 polimer ile optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Polimerler kullanılarak elde edilen numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yaparak, ağırlıkça %2,75, %6,0 ve %9,0 çimento eklenmiş numunelerle karşılaştırmışlardır. Tüm numunelerde 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinin arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bir toprak stabilizatörü olarak polimer emülsiyonunun potansiyelini göstermiştir. Buna ek olarak, ağırlıkça %2,75 olarak kullanılan üç polimer (P1- Akrilik Vinil Asetat Kopolimeri, P2- Polietilen-Vinil Asetat Kopolimeri ve P4-Polimerik Tescilli İnorganik Akrilik Kopolimeri) ağırlıkça %9,0 çimentoya benzer serbest basınç mukavemetleri vermişlerdir.

Brandon *et al.* (2005), çalışmalarında Virginia ulaştırma departmanı için yumuşak kil zeminin iyileştirilmesi için sentetik sıvı polimer stabilizatörlerinin etkisizliğini araştırmışlardır. Virginia'nın üç farklı yerinden üç farklı zemin türü üzerinde çalışılmış ve hem geleneksel hem de geleneksel olmayan stabilizatörler kullanılmıştır. Zeminler USCS'ye göre CL, CH ve SM olarak sınıflandırılmıştır. Sıvı polimerler dahil olmak üzere geleneksel olmayan stabilizatörlerin kireç, Portland çimentosu ve tescilli çimento stabilizatörleri gibi geleneksel stabilizatörlere kıyasla etkili olmadığını bulmuşlardır.

Tingle *et al.* (2007), çalışmalarında geleneksel olmayan stabilizatörlerle ilişkili fiziksel ve kimyasal bağlanma olayını daha iyi anlamak için polimer (Polietilen Vinil Asetat Kopolimer) ile stabilize edilmiş killi zeminlerde bir araştırma yürütmüşlerdir. X ışını kırınım analizi, polimerlerle karıştırılmış Kaolinit zeminde gerçekleştirilmiş ve polimer muamelesinden sonra parçacıklar arasındaki boşluklarda ihmal edilebilir değişikliklerin gözlemlendiği belirtilmiştir. Polimer ile iyileştirilen Kaolinit kilinin 7 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetlerinin %3 ila %9 oranında azaldığı belirtilmiştir. Sodyum Montmorillonit örnekleri için ise, 7 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemetlerinin %2 ila %5 arasında arttığı bulunmuştur. Ayrıca, Kalsiyum Montmorillonit örnekleri için 7 günlük kür süresi ile serbest basınç mukavemetlerinin %3 ila %6 arasında arttığı bulunmuştur. Bu bulgularla polimer ile muamele edilmiş ve 7 günlük kür süresi sonunda kil numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinde anlamlı bir artış gözlenmediği sonucuna varılmıştır.

Naeini *et al.* (2012), çalışmalarında katyonik sıvı polimer (Akrilik Polimer) katkısını İran'daki yumuşak bir kile katarak araştırma yapmışlardır. %10 ve %20 bentonit karıştırılmış yumuşak killer polimer ilave edilerek test edilmiştir. Kullanılan polimerin ağırlıkça yüzdesi %0, %2, %3, %4 ve %5 olarak belirlenmiş ve bir süre kür edildikten sonra serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kür süreleri 0, 2, 4, 8 ve 14 gün olarak seçilmiştir. 8 güne kadar kür edilen numunelerde serbest basınç mukavemetlerinde hızlı artışlar meydana gelmiş daha sonra 14 güne kadar nerdeyse hiç artmamıştır. En yüksek mukavemet artışı ve optimum stabilizatör miktarını gösteren %4 stabilizatöre sahip örneklerde bulunmuştur. %4 polimer ve 8 günlük kürlenme ile optimum ve makul sonuçların bulunduğu belirtilmiştir.

Bagherinia (2013), çalışmasında, kil zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmesinde polimerlerin kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuvarda (düşük plastisiteli, CL ve yüksek plastisiteli, CH) iki farklı kil zemin üzerinde serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapmıştır. Polimer olarak, doymamış polyester toplam ağırlığın %5, %10 ve %20'si miktarlarında kullanılmıştır. Ayrıca, farklı yüzdelerde biyopolimer ve %3 kireç deneylerde kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarından polyester yüzdesinin artmasıyla CL kilinin serbest basınç mukavemetinin arttığı, CH kilinin serbest basınç mukavemetinin ise azaldığı belirlenmiştir. Kür süresinin artması ile her iki kilin serbest basınç mukavemetlerinde önemli değişiklikler olmamıştır.

Iyengar *et al.* (2013), çalışmalarında ASTM D2487'ye göre GM-GC olarak sınıflandırılan Katar temel altı zeminlerinde bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan zemin temel olarak çakıl-kum-silt-kil karışımıdır. İki anyonik tip (E ve R polimeri) ve birisi katyonik tip (S polimeri) olan üç farklı polimer ile ağırlıkça %0,25 ila %2,0 arasında değişen

oranlarda çalışmışlardır. Ek olarak zemin ağırlıkça %5,0, %7,0 ve %9,0 oranlarında normal Portland çimentosu ile karıştırılmıştır. Polimer ile stabilize edilen numuneler, çimento ile stabilize edilen numunelerle karşılaştırılmış ve polimer ile stabilize numunelerin daha etkili olduğu belirtilmiştir. Polimer ile stabilize edilmiş numunelerin daha yüksek serbest basınç mukavemeti, daha yüksek sertlik, daha yüksek tokluk ve uygulanan yükleri dağıtma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

Anjaneyappa (2013), çalışmasında Hindistan'da SC olarak sınıflandırılmış zeminlere kuru ağırlıkça %0,5, %1,0 ve %1,5 oranında polimer ekleyerek özelliklerini incelemiştir. Polimer eklenmesi ile zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluğunda anlamlı bir değişikliğin gözlenmediğini, ancak polimer miktarındaki artışla birlikte, mukavemet ve performans özelliklerinin iyileştirildiğini ifade etmişlerdir.

Nowamooz (2016), çalışmasında yüksek plastisiteli bir kilde poliüretan katkının etkisini incelemiştir. Koni penetrasyon ve basınç deneyleri sonucuna göre poliüretan katkısının zeminin yüke karşı direncini önemli oranda artırdığı belirlenmiştir.

Gencer ve Kurt Albayrak (2018), çalışmalarında Ponza katkılı kil zeminlerin biyopolimer ile etkileştirilmesi sonucu elde edilen numunelerin bazı geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla Erzurum yöresine ait bir kil, Bitlis'ten temin edilen ponza tozu ile belirli yüzdelerde karıştırılmış, daha sonra elde edilen ponza katkılı killere belirli yüzdelerde biyopolimer eklenmiştir. Deney sonuçları, biyopolimer katkılı kil-ponza karışımlarının likit limit değerlerinin doğal kile göre arttığını, numunelerin non-plastik özellik sergilediğini göstermiştir. Ayrıca biyopolimer yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetleri artmış, hidrolik iletkenlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

Hamidi and Marandi (2018), çalışmalarında epoksi reçinesinin killi zeminlerin mekanik parametreleri ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla yapılan mukavemet deney sonuçları çimento ve epoksi reçinesi ile stabilizasyon verimliliğinin toprakta bulunan kil minerallerinin yüzdesine bağlı olduğunu göstermiştir. Kil-epoksi reçine-çimento karışımlarında, kaolinitin süneklik değerleri serbest basınç dayanımına (UCS) kıyasla önemli ölçüde iyileşirken, bentonit numunelerinde hem süneklik hem de serbest basınç dayanımı önemli ölçüde iyileşmiştir.

Altun (2019), çalışmasında, Erzurum Oltu yöresine ait bir doğal kilin Pazaryolu-Erzurum'dan temin edilen mermer tozu biyopolimer ile etkileştirilmesi sonucu elde edilen numunelerin kıvam özelliklerini, kompaksiyon parametrelerini ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, biyopolimer katkılı kil-mermer karışımlarının likit limit

değerlerinin doğal kile göre arttığını göstermiştir. Biyopolimer katkılı numuneler non-plastik özellik sergilemiştir. Standart proktor deney sonuçları incelendiğinde, biyopolimer yüzdesinde meydana gelen artışla, kil/mermer numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Biyopolimer yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemeti artmıştır. Ayrıca kesme kutusu deney sonuçlarına göre de biyopolimer katkılı kil/mermer karışımlarının konsolidasyonsuz-drenajsız kohezyon değerleri ve kayma mukavemeti açısı değerlerinin arttığı görülmüştür.

Işık (2019), çalışmasında yüksek plastisiteli bentonit kili ile düşük plastisiteli kaolin kilinin mukavemet ve donma-çözülme davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, killere %5, %10, %15, %20 yüzdelerde poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik ilave ederek katkılı numuneler elde etmiştir. 1 ve 7 gün kürde bekletilen katkılı numuneler üzerinde serbest basınç ve donma çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkılarının düşük ve yüksek plastisiteli killerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür.

Diğer zemin iyileştirme yöntemleri

Hışmanoğlu (2006), çalışmasında Şanlıurfa Germuş (Dağeteği) Yöresi kilinden alınan 4 numune üzerinde zeminin geoteknik özellikleri, şişme değerleri ile kilin X-Ray Difraksiyon analizleri yapılmıştır. Çalışmada, şişmenin yapılar (yol, su ve kanalizasyon hatları, 1-2 katlı hafif yapılar vs.) üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda şişme değerlerinin genel olarak derinlik artışı ile birlikte azaldığını belirlenmiştir.

Garaisayev (2008), çalışmasında İstanbul-Esenyurt'tan alınan şişme potansiyeli yüksek olan bir kilin sönmüş kireç ile stabilizasyonunu incelemiştir. Kireç ilavesi ile kilin kıvam limitlerinde değişiklikler meydana gelmiş ve zemin sınıfı değişmiştir. Zeminin kompaksiyon özelliklerinde değişiklikler olmuş, kireç kilin işlenebilirliğini artırmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda %3 kireç ilavesinin uzun dönemde yeterince çimentolaşma oluşturmadığı ve serbest basınç değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmadığı görülmüştür. Kireç ilavesi ile porozite artmıştır.

Gündüz (2008), çalışmasında kil zeminlerin iyileştirilmesinde tinkal atığının etkisini araştırmıştır. Şişme yüzdesi ve serbest basınç değerlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Deney sonuçlarında, Tinkal atığının yapısında kil bulunması ve dolomitin kil ile reaksiyon vermemesinden dolayı killerin, taşıma gücüne ve şişme potansiyelinin iyileştirilmesinde katkı sağlamadığı belirlenmiştir.

Şengül (2010), çalışmasında yüksek su muhtevalı killi yol taban zeminlerinin kireç stabilizasyonu ve hücresel dolgu teknikleriyle iyileştirilmesini ve bu iki farklı iyileştirme yönteminin karşılaştırılmasını yapmıştır. Bu amaçla, kili yüksek su muhtevalı hale getirmek amacıyla optimum su muhtevası %20 artırılarak killi zemine %5, %10, %15 oranlarında kireç karıştırılarak CBR deneyleri yapılmıştır. CBR deneyleri sonucunda CBR değeri %0,2 iken %15 kireçle stabilize edildikten sonra %7'lere yükselmiştir. Ayrıca yüksek su muhtevalı zemin %5, %10, %15 oranlarında kireçle, hücresel dolguyla değişik oranlarda kireç ve hücresel dolgu teknikleri ile iyileştirilerek plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her iki iyileştirme yönteminin de tek başlarına yeterli iyileştirmeyi sağlamadığı görülmüştür. Ancak önce kireçle stabilize edilip sonra hücresel dolgu sistemi ile güçlendirme yapıldığında yatak katsayısı ve taşıma kapasitesinde artış, düşey gerilme, oturma ve dolgu kalınlığında azalma sağlanmıştır.

Muratoğlu (2010), çalışmasında Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü alanında 6 farklı kil üzerinde atık mermer tozunun etkisini araştırmıştır. Kil zeminlere %5, %10, %15 oranlarında mermer tozu ilave edilerek 25 farklı numune elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde tanımlama deneyleri yapıldıktan sonra konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda boşluk oranı, sıkışma katsayıları ve permeabilite katsayısı belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda kil zemine %10-15 oranında atık mermer tozu ilave edildiğinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Aydın (2010), çalışmasında Yenikent yerleşim alanı killerinin sönmüş kireç ve uçucu kül kullanılarak geoteknik özelliklerinin iyileşmesini incelemiştir. Bu amaçla şişme potansiyelinin belirlenmesi için, kuru ağırlıkça %1, 3, 5, 7, 9 oranlarında kireç; %5, 10 oranlarında uçucu kül katkılı sıkıştırılmış numuneler şişme deneylerine tabi tutulmuştur. Şişme deneyi sonuçlarına göre, %5 kireç katkısından itibaren şişme potansiyeli önemli ölçüde azalmış, %7, %9 kireç katkısında, şişme yüzdesi ve basıncı sırasıyla, %89, %65 ile %94, %75 azalarak çok düşük değerlere ulaşmıştır. Kireç ve uçucu kül katkılarının serbest basınç dayanımına etkisini belirlemek üzere, %5 ve %10 oranlarında kireç ve uçucu kül katkılı olarak sıkıştırılmış numuneler üzerinde, 1, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda, serbest basınç dayanımları ortalama değerlere göre sırasıyla, kireç katkılı örneklerde, %78, %181; uçucu kül katkılı örneklerde ise %41, %84 arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak Yenikent kil zeminlerinde, şişme ve serbest basınç dayanımı parametrelerinde iyileştirme için, optimum kireç katkısının %7 olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Küçükali (2011), çalışmasında Batıkent yerleşim alanındaki yüksek plastisiteli killerin şişme ve dayanım özelliklerine kireç, jips ve kireç-jips karışımlarının etkisini araştırmıştır. Bu amaçla %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan numunelerden şişme basıncı, şişme yüzdesi ve tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiştir. Deneyler sonucunda kilin en yüksek basınç dayanımının %12 oranında kireç katılması ile 90 günde elde edildiği görülmüştür. %3 oranında jips katılması şişme ve dayanım özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Kireç ve jips karıştırılması ise iyileştirme potansiyelini azaltmıştır.

Bilge (2011), çalışmasında killi zeminlerin katkı malzemeleriyle iyileştirilmesini araştırmıştır. Katkı malzemesi olarak yüksek fırın cürufu(YFC), uçucu kül, kireç ve zeolit kullanılmıştır. Bu çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5, %10, %15 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit ilave edilmiş ve kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda, yüksek fırın cürufu, kireç, uçucu kül ve zeolitin CH sınıfı yüksek plastisiteli killi zeminlerde stabilizasyonda alternatif çözüm olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Kürde bekletilen numunelerde en yüksek mukavemeti %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit göstermiştir.

Vural (2012), çalışmasında kil zeminin şişme ve dispersibilite karakteristikleri üzerinde çimento ve doğal zeolit katkısının etkisini araştırmıştır. %3 çimento ile farklı yüzdelerde (%1, %3, %6, %10, %15 ve %20) doğal zeolit karıştırılmıştır. Daha sonra katkılı ve katkısız örnekler üzerinde serbest basınç, şişme yüzdesi, şişme basıncı, dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kil tipine ve kür süresine bağlı olarak dayanımda önemli artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Dispersif ve şişme potansiyeline sahip bu kil numunelerde çimento ve zeolit etkili bir iyileştirme yapılabileceği söylenmiştir.

Sharma *et al.* (2012), çalışmalarında düşük plastisiteli kile (CL), C sınıfı uçucu kül ve kireç karıştırarak stabilize etmişlerdir. Çalışma kapsamında %20 oranında uçucu kül ve %8,5 oranında kireç katkısı kullanılmıştır. Uçucu kül ve kireç katkısı ile serbest basınç CBR değerlerinde %5,7, mukavemetinde 1,6 kat artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Çelik ve Yılmaz (2013), çalışmalarında Erzurum Oltu – Narman yöresinden alınan kırmızı ve yeşil ki 1 numunelerin geoteknik özellikleri üzerinde kuvars kumunun etkisini araştırmışlardır. Her iki kil numunesine de optimum su muhtevasında ağırlıkça %10, %20, %30 ve %50 oranlarında öğütülmüş kuvars kumu eklenmiş, geoteknik özelliklerini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda öğütülmüş kum oranı arttıkça optimum su muhtevası, kıvam limitleri ve şişme basınçları azalmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkta, içsel sürtünme açısında artış meydana gelmiştir. Killerin kayma mukavemetleri artmıştır.

Yılmaz (2014), çalışmasında çimento fırını tozunun (ÇFT) şişen zeminlerin şişme potansiyelini azaltmaya olan etkisini incelemiştir. Bu amaçla çimento fırın tozu, zemine ağırlıkça yüzde 0 ila 12 oranında ilave edilerek örnekler 7 ve 28 gün süreyle küre tabi tutulmuştur. Daha sonra karışımların tane büyüklüğü dağılımı, Atterberg limitleri ve şişme yüzdesi ve şişme oranı belirlenmiştir. % 12 çimento fırını tozu ilavesiyle, şişme yüzdesinin kürlenmeden % 36,63'ten % 6,74'e, 7 günlük kürele % 35,58'den % 6,32'ye ve 28 günlük kürele %33,63'den %6,00'a düştüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre çimento fırını tozunun şişen zeminleri iyileştirmede etkili olduğu ifade edilmiştir.

Zorluer ve Gücek (2014), çalışmalarında kil zeminlerin iyileştirilmesinde mermer tozu ve uçucu külün kullanılabilirliği araştırmışlardır. Deneyler için kil zemin kuru ağırlığına göre %5, %10 ve %15 oranlarında mermer tozu ve %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ile karıştırılarak farklı numuneler elde edilmiştir. Numuneler; aksel basınç, Kaliforniya taşıma oranı, şişme, donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası aksel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre; mermer tozu ve uçucu kül katkısının dayanımı yükselttiği, şişmeyi azalttığı gözlenmiştir.

Ünver (2015), çalışmasında düşük plastisiteli killi bir zemini Soma ve Çatalağzı uçucu külü ile stabilize etmiştir. Bu amaçla katkısız ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 uçucu kül katkılı numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Soma uçucu külü kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde Çatalağzı uçucu külüne oranla daha etkili olmuştur.

Batman (2015), çalışmasında Erzurum Oltu-Narman yöresinden alınan konsolide olmuş kırmızı ve yeşil kile kuvars kumunun etkisini incelemiştir. Her iki kil numunesine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %50 oranlarında öğütülmüş kuvars kumu eklenmiş geoteknik özelliklerini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda öğütülmüş kum oranı arttıkça optimum su muhtevasında, kıvam limitlerinde ve şişme basınçlarında azalma meydana gelmiştir. Kum katkısı içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemetlerini arttırmıştır.

Eskişar ve Altun (2017), çalışmalarında, kaolin ağırlıklı bir zeminde iyileştirme amacıyla kalsiyum karbür kullanımının zeminin mühendislik özelliklerini nasıl etkilediğini araştırılmışlardır. Zemine farklı oranlarda kalsiyum karbür katılarak Atterberg limit ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Plastisite indisinin sabit bir değere yakınsadığı %7-8 oranındaki kalsiyum karbür miktarı sabitleme noktası olarak belirlenmiştir. %12 oranında kalsiyum karbür kullanıldığı zaman en büyük mukavemet değeri de gözlenmiştir. %10

kalsiyum karbür eklenirse katkısız zeminin iki katı kadar mukavemet elde edilmiştir. Kalsiyum karbürün Portland çimentosuna alternatif olabilecek bir zemin katkısı olduğu düşünülmektedir.

Behnood (2018), çalışmasında zeminlerde tuzların ve sülfatın varlığından kaynaklanan problemler ve zemin iyileştirme yöntemleri üzerinde durmuştur. Bu amaçla farklı katkı maddeleri kullanılmıştır. Tuzların zeminlere olumsuz etkilerini gidermek için düşük kalsiyum esaslı katkı maddeleri önerilmiş uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun zeminlerde tuzların olumsuz etkilerini iyileştirme konusunda verimli olduğu belirlenmiştir.

Ta'negonbadi and Noorzad (2018), çalışmalarında kereste ve kâğıt endüstrisi yan ürünü olan LS (Lignosülfat)'ın kil zemin iyileştirmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla LS eklenen kil zemin ıslatma- kurutma çevrimlerine tabi tutulmuş üç eksenli basınç (UU) ve kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda LS eklenmesinin kilin mukavemet özelliklerini artırdığı görülmüştür. İçsel sürtünme açısında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Islatma- kurutma çevrimlerinin üç eksenli basınç (UU) deneylerinin sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Nazaroghlu (2019), çalışmasında illit kilinin iyileştirilmesinde uçucu külün etkisini araştırmıştır. Bu amaçla ilk olarak kil ve uçucu küle elek analizi, piknometre, kıvam limit deneyleri, standart proktor deneyleri, üç-eksenli basınç ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra karışımın ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25'i oranlarında uçucu kül ve kil karışımlarından hazırlanan numuneler üzerinde konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak deney sonuçları katkısız kil numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %15 uçucu kül-kil karışımında en düşük konsolidasyon ve permabilite katsayısı elde edilmiştir. %5 uçucu kül-kil karışımında ise zeminin sürtünme açısı ve mukavemeti artmıştır.

Alami (2019), çalışmasında kum ve kil zeminlerin iyileştirilmesinde kırıntı lastik parçalarının etkisini araştırmıştır. %60, %70, %80 ve %100 kaolin kili %0, %20, %30, %40 oranında kum ile karıştırılarak 28 günlük kür sonucunda mukavemet deneylerine tabi tutulmuştur. Daha sonra %0, %1, %2, %4 oranlarında lastik parçası eklenerek mukavemet deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kırıntı lastik oranının optimum değeri %2 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda %5 kireç eklenmesi bazı numunelerde dayanımı %146'ya kadar artırabildiği belirlenmiştir.

Totiç vd (2019), çalışmalarında, Bartın Üniversitesi Kutlubey-Yazıcılar yerleşkesinde killi zemin örneklerinin iyileştirilmesi amacıyla Çatalağzı Termik Santrallerinden atık malzeme olarak elde edilen uçucu külü kullanmışlardır. Killi zeminlere %5 ila %25 arasında farklı

oranlarda uçucu kül karıştırılarak elde edilen karışımların kıvam limitlerindeki değişimler belirlenmiştir. Daha sonra standart proktor deneyi ile optimum su muhtevası belirlenmiş belirlenen su muhtevasına göre hazırlanan numuneler 1, 8, 16 ve 32 günlük kür sonucunda CBR ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre kilin mekanik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler tespit edilmiştir.

Dadanlar (2019), çalışmasında Ankara kilinin stabilizasyonunda atık cam kullanımının uygunluğu araştırmıştır. Çalışmada Ankara kiline belirli oranlarda atık cam tozu ilave edilerek tek eksenli sıkışma dayanımı ve serbest şişme indeksinde yarattığı değişim ve makaslama parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır. Atık cam ile stabilize edilen zemin donma çözünme ve ıslanma kuruma döngülerine tabi tutulup doğal koşullarda dayanımında meydana gelen değişim tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda şişen killerde atık cam tozunun alkali maddeler ile aktive edilmesi halinde kilin mühendislik özellikleri üzerinde etkisinin daha fazla arttığı belirlenmiştir. Atık cam tozu CaO ile aktive edildiğinde daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. %5 CaO ve %15 atık cam tozu katkısı ile 14 günlük kür sonucunda sıkışma dayanımında %291 oranında artış olmuştur. Ayrıca şişme indeksinde %72,7 oranında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir.

Diallo ve Ünsever (2019), çalışmalarında Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünden alınan kil zemin üzerinde iyileştirme yapmışlardır. Bu amaçla ağırlıkça %2 kireç, farklı yüzdelerde uçucu kül veya inşaat yıkıntı beton atıkları ile iyileştirme yapılmıştır. Kil zemin üzerinde, sınıflandırma, Atterberg limit ve granülometri deneyleri yapılmış kompaksiyon deneyi ile farklı su muhtevalarında maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriği belirlenmiştir. Karışımların mukavemetlerini belirlemek amacıyla optimum su muhtevasında silindirik numuneler hazırlanarak 3,7, 28 gün kür edildikten sonra serbest basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca katkı malzemelerinin şişme üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda oluşturulan karışımların mukavemetlerinde iyileşme tespit edilmiştir. Mukavemet kür süresiyle artış göstermiştir.

Bağrıaçık ve Güner (2020), çalışmalarında endüstriyel atık olan içme suyu arıtma tesisi çamurları ile uçucu kül malzemelerin kumlu zemin ortamında geçirimsizlik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla kum zemine %2, %4, %6, %8, %10, %12, %14, %16, %18, %20, %22 oranlarında ağırlıkça içme suyu arıtma çamuru ve uçucu kül eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde model deneyler yapılarak katkı oranları ve zamana bağlı olarak geçirimsizlik davranışı incelenmiştir. Deneyler sonucunda iki endüstriyel atık malzeme de kumun geçirimsizliğinde önemli oranda artış sağlamıştır. Endüstriyel atık

malzemelerin %2 oranında kullanılması 106 kat artış sağlarken %22 oranında kullanılması durumunda 1691 kata kadar artışlar tespit edilmiştir.



MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

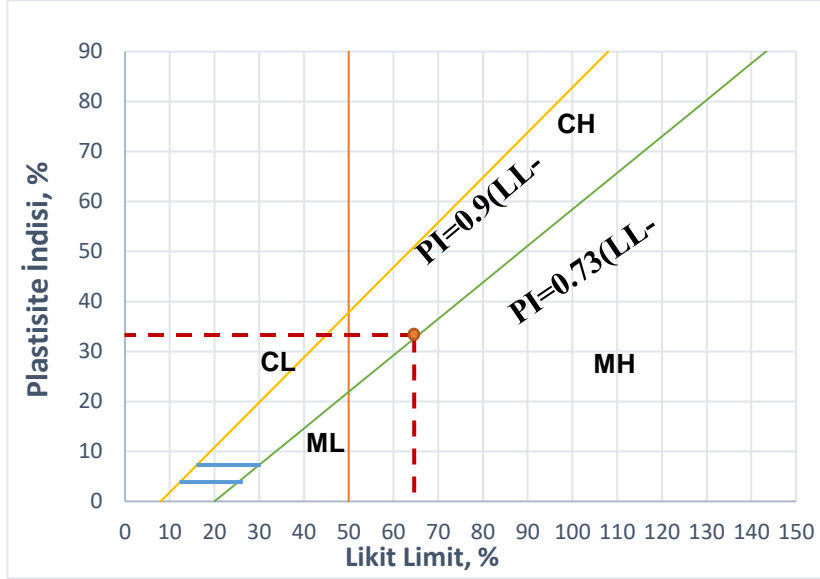
Tez çalışması kapsamında yüksek plastisiteli bir kil ve Bima firmasından temin edilen SOILTAC ticari markalı kopolimer kullanılmıştır.

Kil

Çalışmada, kullanılan yüksek plastisiteli kil zemin, Erzurum il sınırlarında bulunan Oltu-Narman havzasından temin edilmiştir. Deneyleerde kullanılan kil Şekil 9'da görölmektedir. Kullanılan kilin Casagrande plastisite kartındaki yeri Şekil 10'da ve bazı endeks özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 9. Deneyleerde kullanılan kil zemin

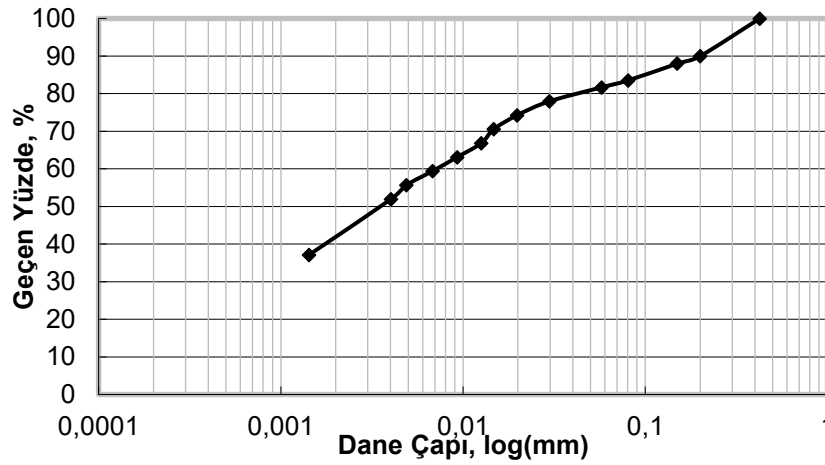


Şekil 10. Kil zeminin Casagrande plastisite kartındaki yeri

Tablo 2. Kil Zeminin Bazı Endeks Özellikleri

Özellikler	Değerler
Özgül Ağırlık	2,60
Su Muhtevası	%18
Likit Limit	%64
Plastik Limit	%31
Plastisite İndisi	%33
Zemin Sınıfı	CH

Çalışmada kullanılan kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması (USCS)'na göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Kile ait dane çapı dağılım eğrisi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Kil zeminin dane çapı dağılım eğrisi

Polimer

Kullanılan polimer, toprak stabilizasyon ve toz kontrol malzemesidir. Her türlü zeminin stabilizasyonu için kullanılmasının yanı sıra erozyon ve toz kontrolü için de kullanılan ekolojik olarak güvenli sıvı bir kopolimerden üretilmiştir.

Zemine uygulanan polimer malzemenin yapısındaki moleküller iyileştirilecek zemin partikülleri arasında bağlar oluşturur. Polimerin yapısı birbirine düz ve çapraz bağlanan nanopartiküllerden oluştuğu için iyileştirmede avantaj sağlar. Zeminin yapısındaki suyu uzaklaştırarak zeminin suya dayanıklı ve daha uzun ömürlü bir yapı kazanmasını sağlar. Kürlemenin ardından Polimer tamamen saydam hale gelir ve doğal örtünün orijinal kalmasını sağlar. Kullanılan polimer ile çimentoya benzer bir kalite elde edilebilir. Şekil 12’de deneylerde kullanılan polimer gösterilmektedir. Tablo 3’te ise polimerin özellikleri verilmiştir (Anonymous 2020).



Şekil 12. Deneylerde kullanılan kopolimer

Tablo 3. Polimerin Özellikleri (Anonymous 2020)

Özellik	Özellik/ Değer
Fiziksel Hal	Mobil Sıvı
Renk	Süt Beyazı (Kürlenildikten sonra saydam)
Koku	Yumuşak/hafif (Kürlenildikten sonra kokusuz)
Buharlaşma Hızı	< 1 (BuAC = 1)
Nihai Yoğunluk	> 1 (Hava = 1)
Kaynama Noktası	>100°C (212°F)
Donma Noktası	< 0°C (32°F)
Suda Çözünürlük	%100 (Kürlenene kadar)
Özgül Ağırlık	1,05 - 1,10
PH Değeri	4,5 - 6
Kimyasal Grup	Vinil Kopolimer Emülsiyonu
Malzemeler	Vinil asetat kopolimeri: % 50-60 Su:% 40-50
Kararlılık	Oda sıcaklığında kararlı. Donma, çözülme veya kaynama sonrasında pıhtılaşma olabilir.

Yöntem

Tez çalışması kapsamında, Erzurum İli Oltu-Narman havzasından alınan yüksek plastisiteli kil zemin Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında 105⁰C etüvde kurularak Los Angeles aşındırma cihazında öğütülmüştür. Öğütülen kil zemin 40 nolu elekten elenmiş ve deneylere hazır hale getirilmiştir. 40 nolu elekten elenmiş doğal kil zemin ve katkılı kil zemin üzerinde yapılan deneyler ve deney prosedürleri aşağıda sunulmuştur.

- Doğal kil zemin üzerinde elek analizi, hidrometre deneyi ve özgül ağırlık deneyi yapılmıştır.
- Doğal kil ve doğal kile kuru ağırlığının %1, %2, %3 ve %4 oranlarında polimer ilave edilmiş ve kıvam deneyleri yapılmıştır.
- Doğal ve katkılı kil zemin üzerinde Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Standart Proktor deneyleri sonucunda katkısız ve her bir katkı yüzdesine ait optimum su içerikleri belirlenmiştir.
- Belirlenen optimum su içeriklerinde kompaksiyon kalıbından hazırlanan numunelerden örnekler alınarak 0, 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.
- Belirlenen optimum su içeriklerinde kompaksiyon kalıbında hazırlanan numunelerden alınan örselenmemiş örnekler üzerinde 0, 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda şişme deneyleri yapılmıştır.
- Belirlenen optimum su içeriklerinde kompaksiyon kalıbında hazırlanan numunelerden alınan örselenmemiş örnekler 0, 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda geçirimsizlik deneylerine tabi tutulmuştur.
- Katkısız ve katkılı numuneler hazırlandıktan sonra hava almayacak şekilde desikatörde 3, 7 ve 28 gün bekletilerek küre tabi tutulmuştur.

Özgül ağırlık (Piknometre) deneyi

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan polimer viskoz sıvı formda olduğu için kil ile homojen olarak karışabilmesi için su kullanılması gerekmektedir. Özgül ağırlık deneyi sadece katkısız kil zemin üzerinde uygulanmıştır. Deney standart piknometre kullanılarak ASTM-D854 (2014) standardına göre yapılmıştır. Şekil 13'te özgül ağırlık deneyine ait bir fotoğraf görülmektedir.



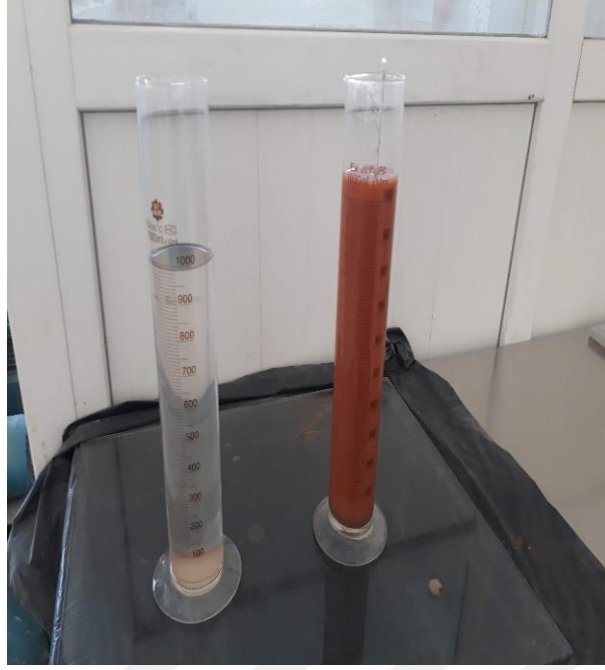
Şekil 13. Özgül ağırlık deneyi

Hidrometre deneyi

Kil zemin deney öncesinde Los Angeles aleti yardımıyla öğütülerek elek analizine tabi tutulmuştur. Elek analizi sonucunda 200 nolu elekten geçen kısım ince taneli zemin olarak değerlendirilmektedir.

Kil ve silt gibi ince taneli zeminlerin tane çapı dağılımını deneysel olarak belirlemek için bir süspansiyon içindeki küresel katı maddelerin tane çapına bağlı olarak çökme hızlarının değiştiği esasına dayanan Stokes Yasasından yararlanılmaktadır. Stokes Yasasında, viskoz sıvı içinde çökelen tanelerin çökme hızı taneler ve sıvının karışımından oluşan süspansiyonun yoğunluğuna ve tane çapına bağlıdır. Çökme mesafesi ve zamana göre tanenin çapı hesaplanmaktadır. Deney için ASTM 152-H tipi hidrometre kullanılmıştır. Hidrometre analizi için 200 nolu elekten geçip etüvde kurutulan numunedan 50 gr alındıktan sonra üstünü örtecek şekilde saf su eklenip karıştırılarak numune bu şekilde 24 saat bekletilmiştir. Mezurun içindeki toplam karışıma saf su eklenerek 1000 ml'ye tamamlanmıştır. Mezur avuç içi ile iyice kapatılarak bir dakika süre ile alt-üst edilmiştir. Daha sonra düzgün bir yüzeye konulmuştur

Karışımın ısı ölçülmüştür. 0,25 dk, 0,5 dk, 2 dk, 5 dk, 10 dk, 15 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat, 3 saat ve 24 saatte okumalar yapılmıştır. Okuma yapılmadan 20 sn önce hidrometre aleti karışımın içine salınım yapmayacak şekilde konularak değerler okunmuştur. Karışımdan çıkarılan hidrometre aleti aynı sıcaklıktaki saf suda bekletilmiştir. Düşüş mesafesi ve zaman değişimi ile tane çapı dağılımı hesaplanmıştır. Hidrometre deneyi ASTM-D422 (2007) standartlarına göre yapılmıştır. Şekil 14'de hidrometre deneyine ait bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 14. Hidrometre deney düzeneği

Kıvam (Atterberg) limitleri deneyleri

Likit limit (düşen koni) deneyi

Bu deneyde, bir kabın içine yerleştirilen su ve zemin karışımının üzeri tamamen düzeltilmiştir. Daha sonra karışımın üzerine dokunma pozisyonuna getirilen 80 gr kütledeki koninin, kendi kütlesi etkisi ile serbest düşüşüne izin verilerek 5 saniye süreyle zemine batması sağlanmıştır. Aletin üzerinde bulunan deformasyon saatinden batma miktarı okunmuştur. Aynı işlem farklı su muhtevalarında tekrarlanarak deney konisinin 20 mm batmasına karşılık gelen su içeriği likit limit olarak tanımlanmıştır.

Daha sonra belirlenen su muhtevası baz alınarak %1, %2, %3, %4 olmak üzere farklı yüzdelerde kopolimer, su ve zemin kullanılarak deney tekrarlanmıştır. Kopolimer killere ait deney sonuçları, katkısız kilin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Likit limit deneyi BS1377, (1990) standardına göre yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Düşen koni deney düzeneği

Plastik limit deneyi

İnce taneli zeminlerin şekil verebilme özelliklerinin sona ererek zeminin kırılmaya çatlama başladığı plastikten yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü andaki su muhtevasına plastik limit denir.

Deney gerçekleştirilirken likit limit için hazırlanan deney numunesinden yaklaşık 20 gram alınarak cam veya pürüzsüz bir yüzeyde ele yapışmayan ve plastik küçük bir top biçimini alana kadar iyice yoğrulmuştur. Küre şeklindeki numune, avuç içi ile yuvarlanarak silindir şekli verilmiştir. Silindir çapı 3 mm'ye indiği anda kopma ve çatlama meydana gelene kadar numune yoğrulup yuvarlanarak küre haline getirilmiştir. Çap 3 mm'ye düştüğü anda kopma ve çatlama meydana gelene kadar işlem devam ettirilmiştir. Dağılan numunedan parçalar alınarak numunenin su muhtevası belirlenmiştir. Bu işlem katkısız ve farklı yüzdelerde hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Plastik limit deneyi ASTM-D4318 (2017) standardına göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre plastisite indisi belirlenmiştir.

Zeminin plastik davranış gösterdiği su muhtevası aralığını belirtmek için plastisite indisi denen bir indis tanımlanmıştır. Bu indis likit limit ile plastik limit arasındaki farka eşittir. PI ile ilişkilendirilen birçok mühendislik özelliği olduğu için ince daneli zeminler için önemli bir parametredir (Holtz *et al.* 2015).

$$PI=W_L-W_P$$

(6)

PI: Plastisite indisi

w_L: Likit limit

w_P: Plastik Limit

Kompaksiyon (Proktor) deneyi

Mekanik bir enerji uygulanarak zemin veya kayaların sıkıştırılması işlemine kompaksiyon denir. Sıkıştırmanın yanında zeminin derecelenmesi ya da su muhtevasını değiştirme gibi amaçlar içinde kompaksiyon yapılmaktadır (Holtz *et al.* 2015).

Standart proktor deneyinde, zemin numunesine bir miktar su ilave edilerek karıştırılmıştır. Hazırlanan numune kompaksiyon kalıbının 1/3'ü dolacak şekilde 3 tabaka halinde kalıba yerleştirilerek her tabaka kompaksiyon aleti ile 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Bu şekilde 3 tabaka halinde sıkıştırılarak doldurulan metal kompaksiyon kalıbı üzerindeki fazlalıklar traşlanıp düzeltildikten sonra sonra tartılmış ve su muhtevasının belirlenmesi için numune alınmıştır. Bu işlem 5 defa tekrarlanarak değişik su muhtevaları için kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Kompaksiyon deneyi katkısız ve farklı yüzdelerde hazırlanan katkılı zemin üzerinde tekrarlanmıştır. Standart proktor deneyi ASTM-D698 (2012) standardına göre yapılmıştır. Otomatik kompaktör Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16. Otomatik Kompaktör

Serbest basınç deneyi

Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriğinde sıkıştırılan katkısız ve polimer katkılı numunelerden 35 mm çapında 70 mm yüksekliğinde numuneler alınmıştır. Katkısız numunenin t=0 anında serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Katkılı numunelerde ise, her bir katkı

yüzdesi için 3 gün, 7 gün, 28 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Şekil 3.8’de görülen serbest basınç deney aleti kullanılarak düşey yönde yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük, yük hücresi ile ölçülürken, silindirik zemin numunelerindeki deformasyon ölçümleri, numune dışından yer değiştirme sensörleri (LVDT) ile yapılmıştır. Yükleme hızı 0,8 mm/dk olarak seçilmiştir. ASTM-D2166 (2016) esas alınarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deney düzeneği Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Serbest basınç deney düzeneği

Şişme Basıncı Deneyi

Hazırlanan numunelerin şişme basınçlarının belirlenmesi için sabit basınçlı ödometre deney aleti kullanılmıştır. Deney ASTM-D4546–90-Metot-C (2003) standardına göre yapılmıştır. Hazırlanan numuneler hücreye yerleştirilerek serbest su girişine izin verilerek aynı anda hacmi sabit tutmak için yüklemeler yapılmıştır. Yükleme yapılırken deformasyon 0,005 mm civarında tutularak 0,01 mm’den daha büyük deformasyon olmamasına dikkat edilmiştir. Deformasyonun yükleme yapılmadan sabit kaldığı ağırlıkta deneye son verilmiştir. Uygulanan son ağırlığın oluşturduğu basınç şişme basıncıdır. Deney numunesi deney bitiminde etüvde kurularak tartılmış numunenin su muhtevası belirlenmiştir. Ödometre deney aleti Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 18. Ödometre deney aleti

Hidrolik iletkenlik (permeabilite) deneyi

Çalışma kapsamında, deney numuneleri optimum su muhtevasında hazırlanmış ve standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak hazırlanan numuneler düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine yerleştirilmiş ve numune doygun hale gelinceye kadar beklenmiştir. Bunun için permeabilite hücreleri su sızdırmayacak şekilde kapatılmıştır. Hücreler kapatıldıktan sonra düşen seviyeli permeametre hücrelerine su verilmiştir. Permeabilite hücresinde bulunan havanın boşaltılması amacıyla hava vanası açılarak su çıkışı olana kadar beklenmiştir. Su çıkışı olunca hava vanası kapatılmıştır. Daha sonra saat tutularak mezüre bir süre su akıtılmıştır. Bu süre içerisinde mezüre giren su miktarına bakılmıştır. Kararlı akış elde edildikten sonra permeabilite katsayısı Eşitlik - 7 ile hesap edilmiştir. Bulunan permeabilite katsayılarının ortalaması alınmıştır. Deney ASTM-D5084 (2010) standardına göre yapılmıştır.

$$k = \frac{aL}{At_1} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (7)$$

a : Tüp kesit alanı (cm²)

A : Kalıbın kesit alanı (cm²)

L : Örnek uzunluğu (cm)

t_1 :Deney süresi (s)

h_1 :Başlangıçtaki su yüksekliği (cm)

$h_2:t_1$ süresi sonundaki su yüksekliği (cm)

Deney düzeneği Şekil 19'da görölmektedir.



Şekil 19. Düşen seviyeli geçirimlilik deney düzeneği

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

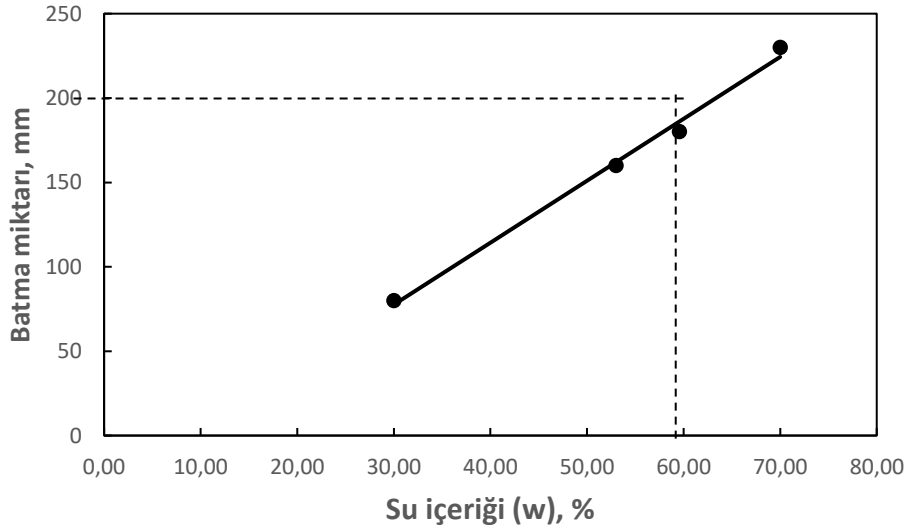
Bu çalışma kapsamında, katkısız ve polimer katkıli numuneler üzerinde gerçekleştirilen likit limit, plastik limit, standart Proktor, serbest basınç, şişme ve geçirimsizlik deneyleri yapılmış, katkısız ve katkıli numunelere ait deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

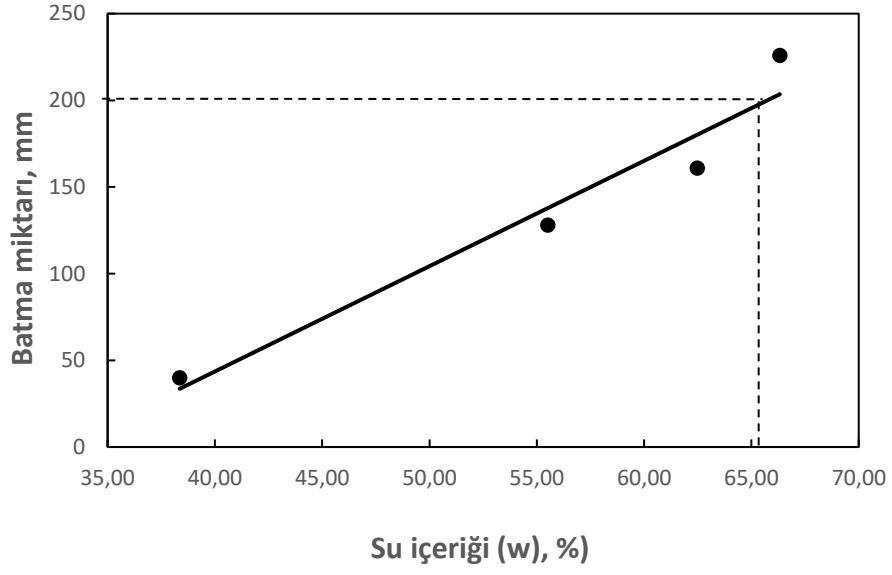
Katkılı ve katkısız killer üzerinde kıvam deneyleri yapılmıştır. Tablo 4’de katkısız ve katkıli numunelerin kıvam limitleri görülmektedir. Katkısız numuneye ait likit limit grafiği Şekil 20’de ve katkıli numunelere ait likit limit grafikleri ise Şekil 21-Şekil 24’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Katkısız ve Katkıli Numunelerin Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

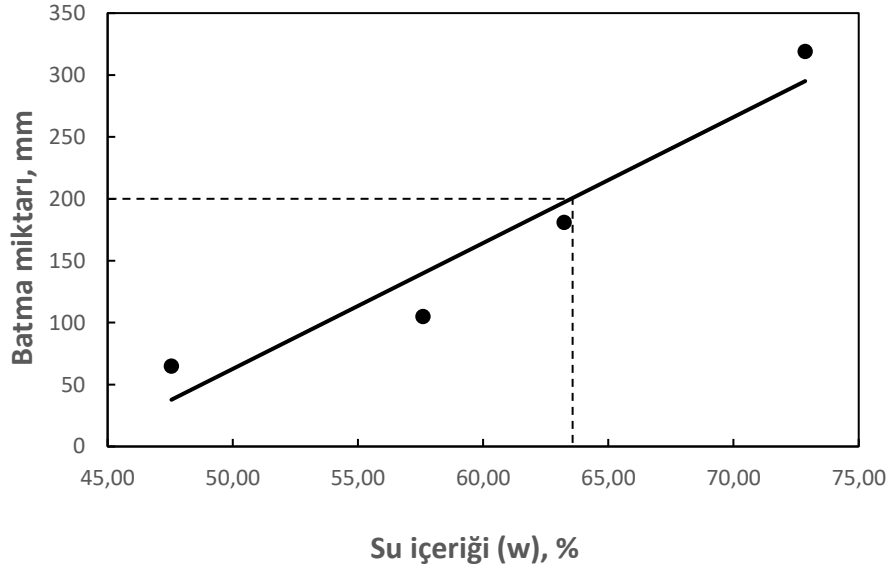
Polimer Yüzdesi (%)	Likit Limit, WL, (%)	Plastik Limit, WP, (%)	Plastisite İndisi, PI, (%)
0	64,0	31,0	33,0
1	65,7	32,7	33,0
2	63,5	28,3	35,2
3	62,6	29,4	33,2
4	67,0	31,1	35,9



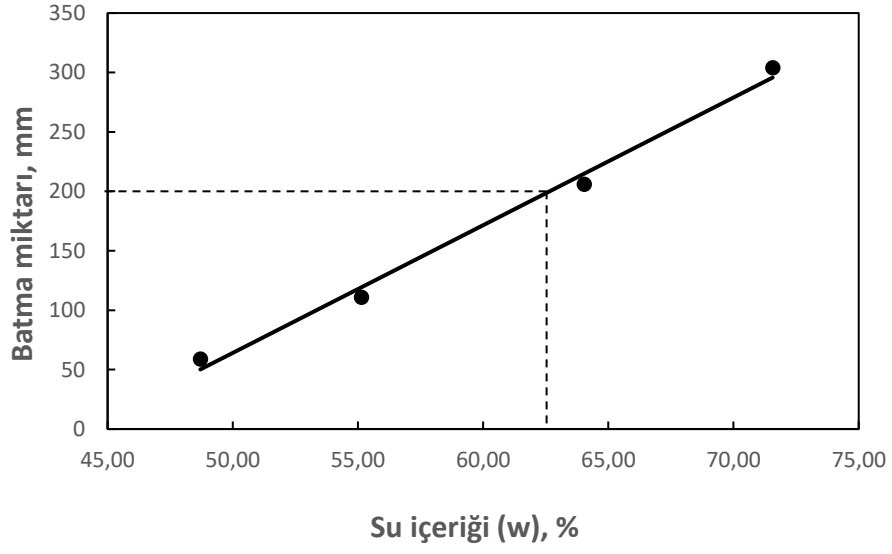
Şekil 20. Katkısız numuneye ait likit limit grafiği



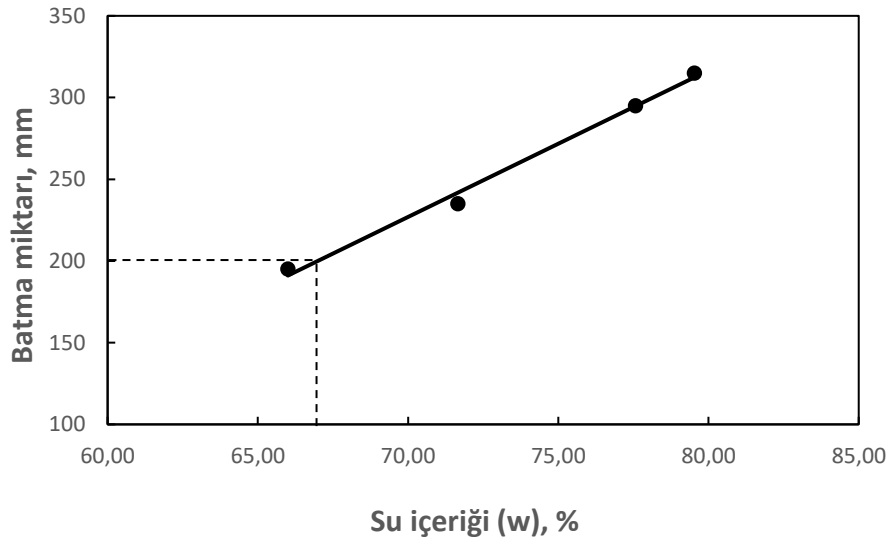
Şekil 21. %1 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği



Şekil 22. %2 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği

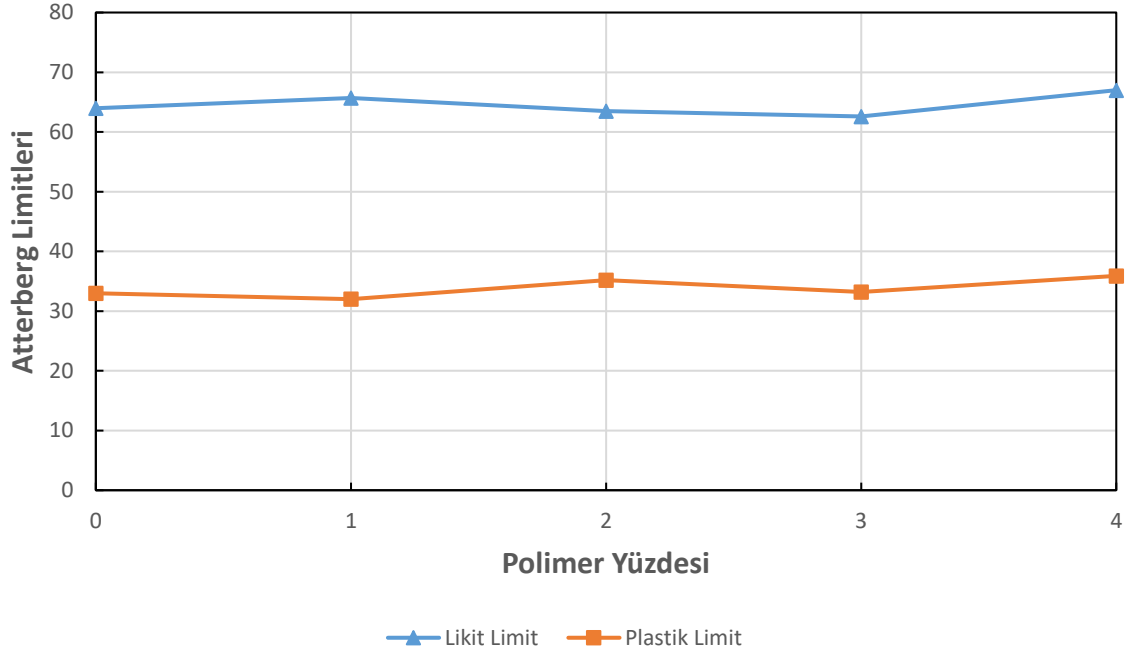


Şekil 23. % 3 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği



Şekil 24. % 4 polimer katkılı numuneye ait likit limit grafiği

Polimer yüzdesindeki artışla, katkısız ve katkılı numunelerin kıvam limitlerinin değişimi Şekil 25'te verilmiştir.

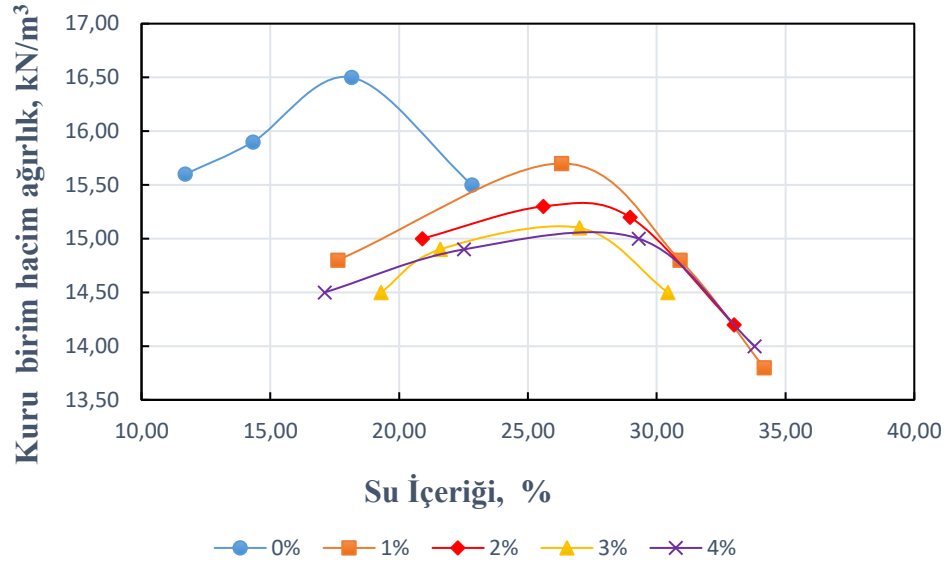


Şekil 25. Polimer yüzdesindeki artışla kıvam limitlerinde meydana gelen değişim

Katkısız numuneler üzerinde yapılan kıvam deneyleri sonucunda likit limit % 64,0 ve plastik limit % 31,0 olarak belirlenmiştir. % 4 katkı yüzdesine kadar kıvam limitlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Likit limitte maksimum %3,5, plastik limitte maksimum %4,4 ve plastisite indisinde maksimum %2,9 fark oluşmuştur. Polimer yüzdesi ile kıvam limitleri arasında bir korelasyon görülmemiştir. Literatürde polimer katkısının kıvam limitleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ile ilgili çalışmalarda çalışmamızı desteklemektedir. Onyejekwe and Ghataora (2015), polimer katılan yüksek plastisiteli killerin likit ve plastik limitlerinde önemli bir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir. Aynı şekilde, Rauch *et al.* (2002) üç farklı yüksek plastisiteli kil zemine polimer katkısının plastisite indisinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığını ifade etmişlerdir.

Standart Proktor Deneyi Sonuçları

Katkısız ve %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numuneler üzerinde standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Katkısız ve polimer katkılı killere ait standart kompaksiyon eğrileri Şekil 26'da, optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Tablo 5'de verilmiştir.

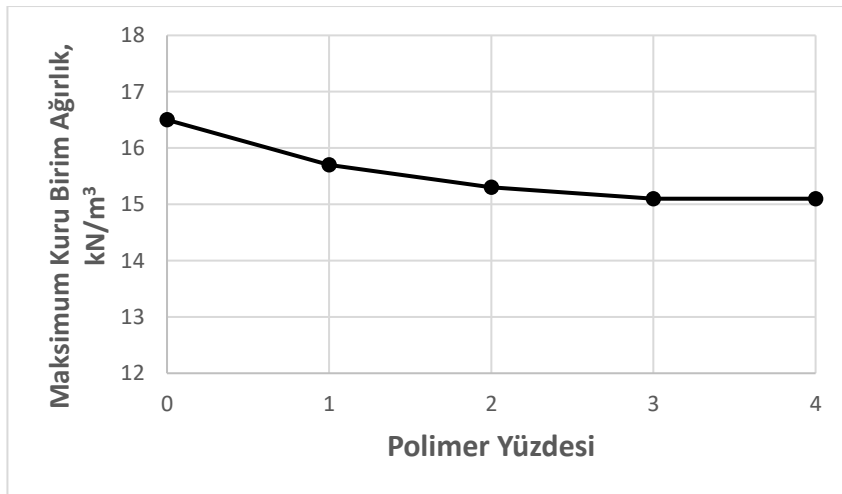


Şekil 26. Katkısız ve polimer katkıli killere ait standart kompaksiyon eğrileri

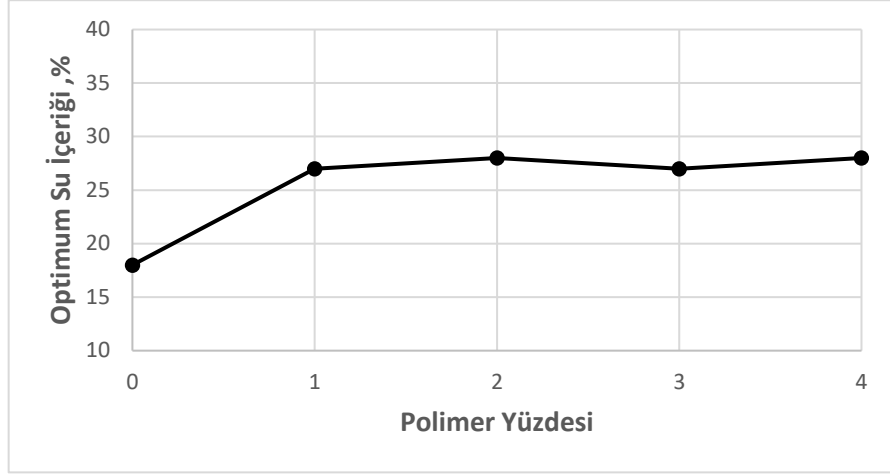
Tablo 5. Katkısız ve polimer katkıli killerin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları ve Optimum Su İçerikleri

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

Polimer yüzdesine bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlıkların değişimi Şekil 27'de optimum su içeriklerinin değişim ise Şekil 28'de gösterilmiştir.



Şekil 27. Polimer yüzdesine bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlıkların değişimi



Şekil 28. Polimer yüzdesine bağlı olarak optimum su içeriklerinin değişimi

Şekil 27 ve Şekil 28 incelendiğinde en yüksek maksimum kuru birim ağırlık değerleri katkısız numunelerden elde edilmiştir. Polimer yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri de azalmıştır. Katkısız numuneye ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri $16,5 \text{ kN/m}^3$ iken, %4 polimer yüzdesinde maksimum kuru birim hacim ağırlık $15,1 \text{ kN/m}^3$ olmuştur. % 4 polimer yüzdesine sahip numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı katkısızza göre yaklaşık %8 azalmıştır. Optimum su içeriklerinde ise, katkılı numunelerin optimum su içerikleri katkısız numuneye göre artmıştır. Katkısız numuneye ait optimum su içeriği %18 iken, %4 polimer yüzdesine sahip numunelerde %28 olmuştur. Katkısız numuneye karşılaştırdığımızda % 4 polimer yüzdesine sahip numunelerde optimum su içeriği %55 artmıştır.

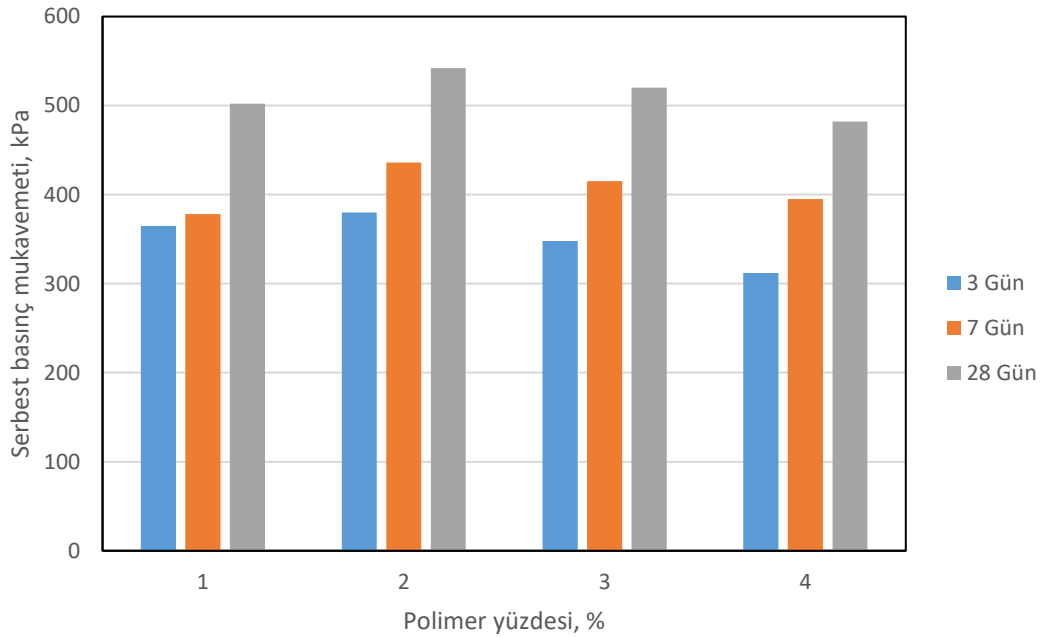
Pant (2016) yaptığı çalışmada, optimum su içeriğinin polimer yüzdesine bağlı olarak azaldığını maksimum kuru birim hacim ağırlığın ise arttığını ifade etmiştir. Çalışmamızda ise polimer yüzdesine bağlı olarak optimum su içeriği artarken, maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Bu farklılığın kullanılan zeminlerin farklılığı ve/veya uygulama şekline kaynaklandığı düşünülmektedir.

Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Katkısız ve %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numuneler üzerinde Standart Kompaksiyon deneyi yapılarak maksimum kuru birim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriklerinde sıkıştırılan kil zeminlerden örselenmemiş örnekler alınarak 7, 14 ve 28 gün kür edilerek serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Katkısız numunenin serbest basınç mukavemeti 250 kPa olarak bulunmuştur. Polimer yüzdesi ve kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri ve katkısız numuneye göre yüzde artışları Tablo 6'da verilmiştir. Polimer yüzdesindeki artışla serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelene değişim Şekil 29'da verilmiştir.

Tablo 6. Polimer Yüzdesi ve Kür Süresine Bağlı Olarak Numunelerin Serbest Basınç Mukavemetlerindeki Yüzde Değişimler

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



Şekil 29. Farklı kür süresi ve polimer yüzdesindeki artışa bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerinin değişimi

Tablo 6 ve Şekil 29 incelendiğinde tüm polimer yüzdelinde kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin de arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir (542 kPa). %2 polimer katılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numunenin serbest basınç mukavemetiyle karşılaştırıldığında, 3 günlük kür süresi sonunda %52, 7 günlük kür süresi sonunda %74,4 ve 28 günlük kür süresi sonunda %116,8 artmıştır. Diğer polimer katılı

numuneleri katkısız numuneler ile kıyaslandığında benzer durum geçerlidir. Serbest basınç mukavemeti açısından optimum polimer yüzdesinin %2 olduğu yapılan deneylerde görülmüştür.

Polimer eklenmesiyle serbest basınç mukavemetlerinin artması, polimerin kil partikülleri tarafından emilmesinden dolayı olabilir. UCS değerinin artması, polimer emülsiyonunun kil parçacıklarına adsorpsiyonundan kaynaklanabilir.

Polimerler, kil mineralinin yüzeyinde elektrostatik çekim, Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağı yoluyla absorbe edilebilir. Polimerlerin emilimi ayrıca polimer çeşidi, sıcaklık, polimerin moleküler ağırlığı gibi çeşitli faktörlere de bağlıdır. Polimerin adsorpsiyonu kilin yüzey özelliklerini de etkileyebileceğinden, yüzey yükü ve partiküller arası kuvvetler de etkilenecektir (Van Olphen 1964; Theng 1982).

Killer negatif yüklüdür ve deneylerde kullandığımız kopolimer katyonik polimerdir. Bundan dolayı polimer molekülleri kil partikülleri ile kolay bir şekilde elektrostatik bir bağ oluşturabilir. Bundan dolayı polimerler kilin kohezyonu arttırmaktadırlar (Naeini et al. 2012).

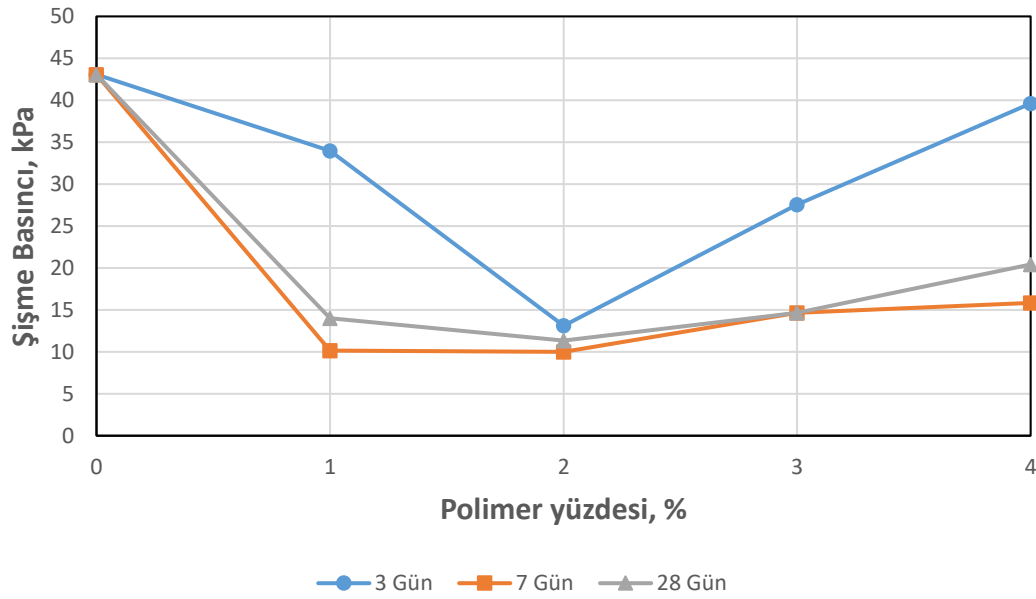
Pant (2016), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde zemin iyileştirmek için %1,5'kadar kullanılan kopolimerin zeminin serbest basınç mukavemetini arttırdığını belirtmiştir.

Şişme Basıncı Deney Sonuçları

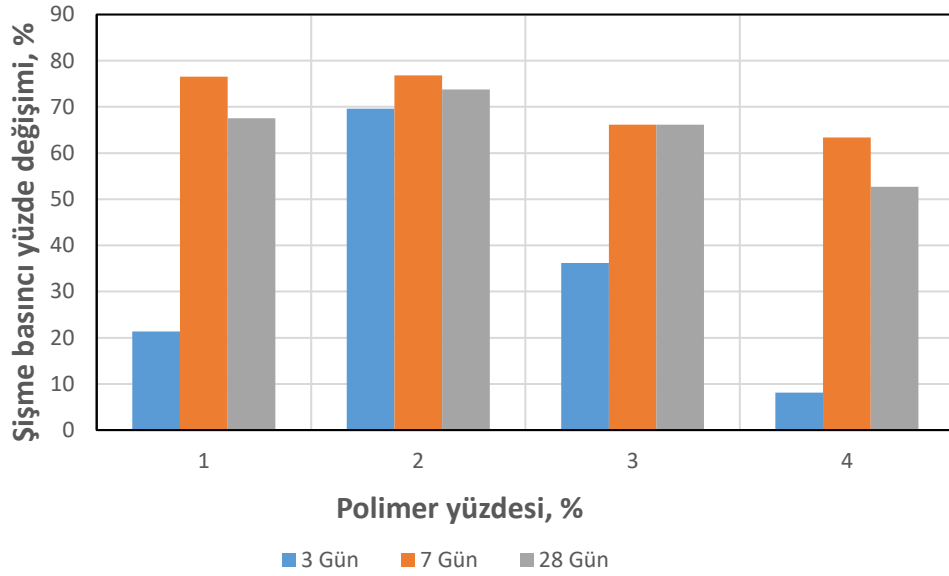
Katkısız ve %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numuneler üzerinde Standart kompaksiyon deneyi yapılarak maksimum kuru birim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriklerinde sıkıştırılan kil zeminlerden örselenmemiş örnekler alınarak 7, 14 ve 28 gün kür edilmiş, Ödometre deney aletine yerleştirilmiş ve şişme basınçları belirlenmiştir. Şişme basıncı deneyleri ASTM D 4546 standardına göre zemin numunelerinin tek boyutlu şişme potansiyellerini belirlemek için yapılmıştır. Su kaybı olmaması için 3 gün desikatörde bekletilen katkısız numunenin şişme basıncı 43,1 kPa olarak belirlenmiştir. Katkılı numunelerin ise 3, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra şişme basınçları belirlenmiştir. Deneyler en az üç kez tekrar edilmiştir. Farklı kür sürelerine tabi tutulmuş polimer katkılı numunelerin şişme basınçları Tablo 7'de verilmiştir. Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi Şekil 30'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Polimer Katkılı Numunelerin Şişme Basınçları

Polimer Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kPa)		
	3 Gün	7 Gün	28 Gün
1	33,9	10,1	14,0
2	13,1	10,0	11,3
3	27,5	14,6	14,6
4	39,6	15,8	20,4

**Şekil 30.** Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak şişme basınçlarının değişimi

Şekil 31 ve Tablo 8 incelendiğinde, tüm katkılı numunelerin 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki şişme basınçlarının katkısız numunenin şişme basıncından daha düşük olduğu görülmüştür. En düşük şişme basıncı %2 polimer katkılı ve 7 gün kür edilmiş numuneden elde edilmiştir. %2 polimer katkılı ve 7 gün kür edilmiş numunenin şişme basıncı, katkısız kile göre yaklaşık %77 azalmıştır. Katkılı numunelerin 7 gün kür süresi sonundaki şişme basınçlarının 28 gün kür süresi sonundaki şişme basınçlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Polimer katkılı numunelerin şişme basınçlarının katkısız numuneye göre yüzde değişimi Şekil 31’de gösterilmiştir. Tüm katkılı numunelerde en düşük şişme basınçları 7 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir.



Şekil 31. Polimer katkılı numunelerin şişme basınçlarının katkısız numuneye göre yüzde değişimi

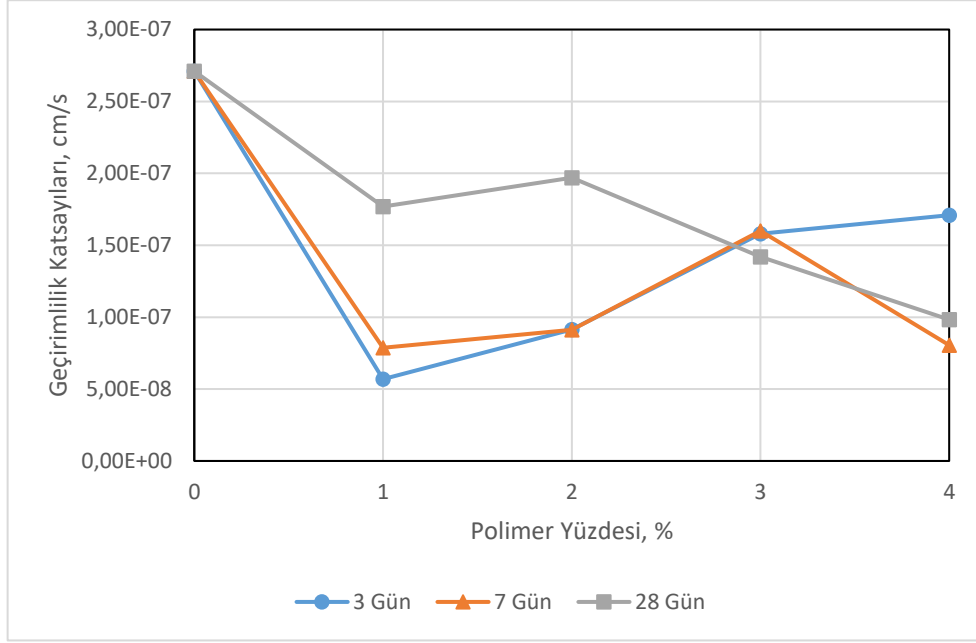
Şişme basınçları açısından optimum polimer yüzdesi %2 olarak belirlenmiştir. Literatürde yapılan polimer katkılı zeminler üzerinde yapılan şişme basıncı deneylerinde polimer yüzdesinin olumlu yönde etkisinin olduğu belirtilmiştir (Hasan and Shafiqu 2017). Çalışmamızda optimum kopolimer yüzdesi %2 olarak bulunmuştur. 28 gün kür edilmiş numunelerin şişme basınçları 7 gün kür edilmiş numunelerin şişme basınçlarından daha yüksek çıkmıştır.

Geçirimsizlik Deney Sonuçları

Optimum su muhtevasında, standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan katkısız ve polimer katkılı numunelerden örnekler alınarak düşen seviyeli geçirimsizlik deneyine tabi tutulmuştur. Düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi ASTM D5084 standardına göre yapılmıştır. Polimer katkılı numunelerin 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayıları belirlenmiştir. Katkısız numunenin geçirimsizlik katsayısı $2,71 \times 10^{-7}$ cm/s olarak belirlenmiştir. Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarının değişimi Tablo 8 ve Şekil 32’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Polimer Katkılı Numunelerin Kür Süresine Bağlı Olarak Geçirimsizlik Katsayıları

Polimer Yüzdesi %	Geçirimsizlik katsayısı (k), cm/s		
	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
1	5,69E-08	7,87E-08	1,77E-07
2	9,15E-08	9,13E-08	1,97E-07
3	1,58E-07	1,60E-07	1,42E-07
4	1,71E-07	8,06E-08	9,83E-08



Şekil 32. Polimer yüzdesindeki artış ve kür süresine bağlı olarak geçirimsizlik katsayılarının değişimi

Tablo 8 ve Şekil 32 incelendiğinde, katkılı numunelerin tüm polimer yüzdelinde ve kür sürelerinde geçirimsizlik katsayıları katkısız numuneden düşük çıkmıştır. Deneilerde kullandığımız kopolimerin hidrolik iletkenliği düşürmede etkili olduğu söylenebilir. %1 polimer katkılı kil numunenin 3 günlük kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayısı en düşük çıkmıştır ($5,69 \times 10^{-8}$ cm/s). Katkısız kil numunesi ile kıyaslandığında, %1 polimer katkılı numunenin 3 günlük kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayısı yaklaşık 4,7 kat azalmıştır. Başka bir ifadeyle, %1 polimer katkılı numunenin 3 günlük kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayısı, katkısız numuneye göre yaklaşık %80 azalmıştır.

% 1 polimer katkılı numunelerin 7, 14 ve 28 gün kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayıları, katkısız numunenin geçirimsizlik katsayısına göre sırasıyla yaklaşık, 4,7, 3,4 ve 1,5 kat azalmıştır.

% 2 polimer katkılı numunelerin 7, 14 ve 28 gün kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayıları, katkısız numunenin geçirimsizlik katsayısına göre sırasıyla yaklaşık, 2,9, 3,0 ve 1,4 kat azalmıştır.

% 3 polimer katkılı numunelerin 7, 14 ve 28 gün kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayıları, katkısız numunenin geçirimsizlik katsayısına göre sırasıyla yaklaşık, 1,7, 1,6 ve 1,9 kat azalmıştır.

% 4 polimer katkılı numunelerin 7, 14 ve 28 gün kür süresi sonundaki geçirimlilik katsayıları, katkısız numunenin geçirimlilik katsayısına göre sırasıyla yaklaşık, 1,6, 3,4 ve 2,8 kat azalmıştır.

3 günlük kür sonundaki geçirimlilik katsayıları genelde daha küçük çıkmıştır. Polimerin sebep olduğu flokülasyon etkisinin başlangıçta geçirimliliği azalttığı düşünülmektedir. Bu tür flokülasyon etkisi, kür zamanı arttıkça ortadan kalkacak ve geçirimlilik katsayısı da artacaktır (Wu *et al.* 2016).



SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, Erzurum ili Oltu-Narman Havzasından temin edilen ve USCS zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli bir kile (CH), kuru ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında bir kopolimer eklenerek kil zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. İlk önce katkılı ve katkısız killer üzerinde kıvam deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, katkılı ve katkısız numuneler standart kompaksiyon deneyine tabi tutularak maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri. Optimum su içeriklerinde sıkıştırılan katkısız ve katkılı numuneler 3, 7 ve 28 gün kür süreleri sonunda serbest basınç, şişme basıncı ve geçirimsizlik deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında ortaya konan sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde yapılan kıvam deneyleri sonucunda likit limitte %3,5, plastik limitte %4,4 ve plastisite indisinde %2,9 maksimum fark olmuştur. Polimer yüzdesi ile kıvam limitleri arasında bir korelasyon görülmemiştir.
- Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde yapılan standart Proktor deneyleri sonucunda, kopolimer yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Optimum su içeriklerinde ise, polimer yüzdesine bağlı olarak artış görülmüştür.
- Polimer yüzdesi arttıkça katkısız numunelere göre serbest basınç mukavemetleri de artmıştır. %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numunelerle kıyaslandığında, 3 günlük kür süresi sonunda sırasıyla, %46, %52, %39,2 ve %24,8 bir mukavemet artışı; 7 günlük kür süresi sonunda sırasıyla, %51,2, %74,4, %66 ve %58 mukavemet artışı ve 28 günlük kür süresi sonunda sırasıyla, %100,8, %116,8, %108 ve %92,8 bir mukavemet artışı olmuştur. En yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir.
- Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan şişme deney sonuçlarına göre, tüm katkılı numunelerin 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki şişme basınçları katkısız numunenin şişme basıncından daha düşük çıkmıştır. Katkısız numunenin şişme basıncı 43,1 kPa iken %2 polimer katkılı ve 7 gün kür edilmiş numunenin şişme basıncı 10,0 kPa olarak bulunmuştur. %2 polimer katkılı numunenin 7 gün kür süresi sonundaki şişme basıncı, katkısız numuneye göre %77 azalmıştır. Tüm katkılı numunelerin 28 gün kür süresi sonundaki şişme basınçları, 7 gün kür süresi sonundaki şişme basınçlarından

daha düşük çıkmıştır. Şişme basınçları açısından optimum polimer yüzdesi %2 olarak belirlenmiştir.

- Düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri sonucunda, katkılı numunelerin tüm polimer yüzdelinde ve kür sürelerinde geçirimsizlik katsayıları katkısız numuneden düşük çıkmıştır. %1 polimer katkılı kil numunenin 3 günlük kür süresi sonundaki geçirimsizlik katsayısı en düşük çıkmıştır ($5,69 \times 10^{-8}$ cm/s). Deneylerde kullanılan kopolimerin hidrolik iletkenlik üzerinde çok fazla etkili olmadığı söylenebilir.

Arazide yüksek plastisiteli kil zeminlerin (CH) mukavemet, şişme ve geçirimsizlik özelliklerini iyileştirmek için %2 polimer katkısının kullanılabilceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Akoğuz, H., Çelik, S., ve Barış, Ö., 2018. Zeminlerin Biyolojik İyileştirilmesinde *Viridibacillus Arenosi* Bakterisinin Zemin Ortamına Olan Etkisinin Gözlemlenmesi. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Alami, M. E., 2019. Improvement of Strength Properties of Clayey Soils for Construction Purposes. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi.
- Altun, B., 2019. Biyopolimer ile Etkileştirilmiş Kil/Mermer Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Anjaneyappa, A., 2013. Influence of Compaction Energy on Soil Stabilized with Chemical Stabilizer. *Int J Res Eng Technol*, 2(8), 211-215.
- Anonymous.2020.Soilworks:Soil Stabization and Dust Control. www.soilworks.com (28.06.2020).
- ASTM D2166 / D2166M - 16, Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM D422, (2004), Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2004.
- ASTM D698 (2012), Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-Lbf/Ft³ (600 Kn-M/M³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D854-14, (2014), Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA. Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D4318 (2010) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, Annual Book of ASTM Standards, 04.08. Philadelphia (PA): 2010.
- ASTM-D4546–90-Metot-C., (2003). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.
- ASTM-D5084. (2010). Standard Test Methods For Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken, Pa
- Aydın, S., 2010. Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç Ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği. Teknik Yayınevi, 261, Ankara.
- Bagherinia, M., 2013. Killerin Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Bağrıaçık, B. ve Güner, E. D., 2020. Endüstriyel Atık Katkılı Kum Zeminlerin Geçirimsizlik Davranışının Araştırılması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 1-9.
- Batman, A., 2015. Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Behnood, A., 2018. Soil and Clay Stabilization with Calcium-and Non-Calcium-Based Additives: A State-of-the-Art Review of Challenges, Approaches and Techniques. *Transportation Geotechnics*, 17(4), 14-32.
- Bilge, T., 2011. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi

- Brandon, T. L., Filz, G. M. and Geiman, C. M., 2005. Stabilization of Soft Clay Subgrades in Virginia: Phase I Laboratory Study. (Master of Science), Polytechnic Institute, Virginia State University.
- Briaud, J.-L., 2013. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley & Sons, USA.
- BS1377. (1990). Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standard Methods .”, UK: London
- Cheng, L., Cord-Ruwisch, R. and Shahin, M. A., 2013. Cementation of Sand Soil By Microbially Induced Calcite Precipitation at Various Degrees of Saturation. Canadian Geotechnical Journal, 50(1), 81-90.
- Chou, L., 1987. Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, and Construction. TRB National Research Council.
- Çelik, S. ve Yılmaz, M., 2013. Kil Zeminin Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Özelliklerine Öğütülmüş Kumun Etkisinin Araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2), 32-36.
- Çetin, A. Y., 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Dadanlar, A., 2019. Şişen Killerin Stabilizasyonunda Katkı Malzemesi Olarak Atık Cam Kullanımı. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi.
- Demiröz, A. ve Karaduman, M., 2009. Zemin iyileştirme metotları. Selçuk Teknik Dergisi, 8(3), 176-192.
- Diallo, M. L. ve Ünsever, Y. S., 2019. İnşaat yıkıntı atığı ve kireçle kil zeminin stabilizasyonu üzerine deneysel bir çalışma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 10.
- Ekinci, A., 2011. Zemin İyileştirme Yöntemleri, Zemin Etüdü Ve Uygulama Alanlar. Researchgate, www.researchgate.net/publication. (22.03.2020).
- Eskişar, T. ve Altun, S., 2017. Kalsiyum Karbür İle İyileştirilen Bir Zeminin Mühendislik Özellikleri. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- Garaisayev, S., 2008. Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu.(Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi
- Gencer, G. ve Kurt Albayrak, Z. N., 2018. Biyopolimer İle Etkileştirilmiş Kil/Ponza Tozu Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Grim, R. E., 1959. Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Mineral. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 85(2), 1-18.
- Gündüz, O., 2008. Şişen Zeminlerin Tinkal Atığı ile Stabilizasyonu ve Meşelik Killerine Uygulanması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi.
- 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(2), 92-101.
- Hasan, S. H. and Shafiq, Q., 2017. Expansive Clayey Soil Improvement Using Polyethylene High Density Polymer. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(1), 24.
- Hatheway, A., 2000. Clays Never Use the Term by Itself. AEG News, 43(2), 13-26.
- Hışmanoğlu, E., 2006. Şanlıurfa Germuş (Dağeteği) Yöresi Killerinin Geoteknik Özellikleri Ve Şişme Potansiyelinin İrdelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. and Sheahan, T. C., 2015. Geoteknik Mühendisliğine Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, 831, Ankara.
- Işık, M. A., 2019. Killerin Mukavemet ve Donma-Çözülme Davranışlarına Reçinelerin Etkisinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.

- Iyengar, S. R., Masad, E., Rodriguez, A. K., Bazzi, H. S., Little, D. and Hanley, H. J., 2013. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization And Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 472-483.
- Katti, R., Kulkarni, S. and Fotedar, S., 1969. Shear strength and swelling pressure characteristics of expansive soils. *Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Soils*, 334-347,
- Küçükali, Ö., 2011. Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi.
- Lambe, T. W. (1953). The Structure of Inorganic Soil. Paper Presented at the Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Lukas, R., 1995. Dynamic Compaction, *Geotechnical Engineering Circular No. 1. Ground Engineering Consultants, Incorporated*, 105, United States.
- Mitchell, J. K. and Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons Hoboken, NJ, Canada.
- Muratoğlu, İ., 2010. Atık Mermer Tozu Katkılı Killi Zeminlerin Konsolidasyon ve Permeabilite Özelliklerinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi,
- Naeini, S. A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined Compressive Strength of Clayey Soils Stabilized with Waterborne Polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 943-949.
- Nazaroghlu, M. B., 2019. Zeminlerin Özelliklerini Uçucu Kül ile İyileştirilmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Aydın Üniversitesi.
- Newman, K. and Tingle, J. S., 2004. *Emulsion Polymers for Soil Stabilization*. Airport Technology Transfer Conference, New Jersey, ABD.
- Nicholson, P. G., 2014. *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth-Heinemann, 368, USA.
- Nowamooz, H., 2016. Resin Injection in Clays With High Plasticity. *Comptes Rendus Mécanique*, 344(11-12), 797-806.
- Onyejekwe, S. and Ghataora, G. S., 2015. Soil Stabilization Using Proprietary Liquid Chemical Stabilizers: Sulphonated Oil and a Polymer. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 74(2), 651-665.
- Önalp, A., 2002. *Geoteknik Bilgisi. I. Birsen Yayınevi Ltd.Şti.*, İstanbul.
- Özaydın, K., 1989. *Zemin Mekaniği*. Meya Matbaacılık ve Yayıncılık, 395, İstanbul.
- Özaydın, K., 2012. Zeminlerin İyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Öndördüncü Ulusal Kongresi*, Isparta.
- Öztoprak, S., 2011. *Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış ve Uygulamadan Örnekler*. İMO, İstanbul.
- Pant, A. D., 2016. Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine Grained Soil. (Master of Science), Southern Illinois University at Carbondale, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Rauch, A. F., Harmon, J. S., Katz, L. E. and Liljestrang, H. M., 2002. Measured Effects Of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay. *Transportation Research Record*, 1787(1), 33-41.
- Saçak, M., 1998. *Polimer Kimyasına Giriş*. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, 156, Ankara.
- Sharma, N. K., Swain, S. and Sahoo, U. C., 2012. Stabilization of a Clayey Soil With Fly Ash And Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197-1205.
- Skempton, A., 1953. *The Colloidal Activity Of Clays*. Selected Papers on Soil Mechanics, Thomas Telford Limited, 106-118, London.

- Şengül, E., 2010. Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Ta'negonbadi, B. and Noorzad, R., 2018. Physical and Geotechnical Long-Term Properties of Lignosulfonate-Stabilized Clay: An Experimental Investigation. *Transportation Geotechnics*, 17, 41-50.
- Taube, M. G., & Herridge, J., 2002. Stone Columns for Industrial Fills. 33rd Ohio River Valley Soil Seminar (ORVSS), ABD.
- Theng, B., 1982. Clay-Polymer Interactions: Summary and Perspectives. *Clays and Clay Minerals*, 30(1), 1-10.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., and Rushing, J. F., 2007. Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. *Transportation Research record*, 1989(1), 59-67.
- Totiç, E., Göktepe, F. and Yaşar, M., 2019. Uçucu Kül Katkısının Killi Zeminlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 769-778.
- Tunç, A., 2010. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamalar. Nobel Yayın Dağıtım, 912, Ankara.
- Uzuner, B. A., 2000. Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, 205, Trabzon.
- Ünver, E., 2015. Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Van Olphen, H., 1964. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. John Wiley & Sons, 53(2), 230-230.
- Vural, P., 2012. Şişme Ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento Ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Wu, Y.-j., Lu, Y.-t., Niu, K. and Dean, S., 2016. Experimental Study On Solid-Liquid Separation of Construction Waste Slurry by Additive Agent-Combined Vacuum Preloading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(8), 1365-1373.
- Yılmaz, M. K., 2014. Improvement of Expansive Soils by Using Cement Kiln Dust. (Master of Science), The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University.
- Yong, R. and Warkentin, B., 1975. Soil Properties and Soil Behavior. Elsevier, Amsterdam. Appendix A: Liquid and plastic limit test, 14(2), 16.10-18.10.
- Zorluer, I. ve Gucek, S., 2014. The Effects of Marble Dust and Fly Ash on Clay Soil. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(1), 59-67.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı:	Gülşah KILIÇ TAMĞAÇ
Doğum tarihi:	01 Şubat 1994
Doğum Yeri:	Güzelova/Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Tel:	0541 617 71 47
E-mail:	gulsahkilig13@gmail.com
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı (2020)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	