

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT YIKINTI ATIĞI BAZLI GEOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ
ZEMİNLERİN DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ahmet Furkan POLAT

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. Mesut GÖR

Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ

Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2025



© 2025 [Ahmet Furkan POLAT]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

İNŞAAT YIKINTI ATIĞI BAZLI GEOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ahmet Furkan POLAT

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

2025, 69 sayfa

İnşaat faaliyetleri sonucunda, kullanım ömrünü tamamlamış yapılardan çıkan atıklar (tuğla, beton, cam vb.) ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu durum, çevre kirliliği gibi önemli problemlere zemin hazırlamaktadır. Sürdürülebilir bir çevre için hem doğal kaynakların korunması hem de inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümle yeniden yapılarda kullanımı büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, geri dönüştürülmüş beton, tuğla ve cam tozuna dayalı bir geopolimer bağlayıcı kullanmanın uygulanabilirliğini araştırılmış ve killi zeminlerin fiziksel ve mekanik davranışlar üzerine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda zeminin kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri ve serbest basınç mukavemetinin belirlenmesi için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan serbest basınç deneyi, kıvam ve kompaksiyon deneyleri sonucunda, inşaat yıkıntı atığının zeminin plastisitesini düşürdüğü, ancak kompaksiyon parametreleri üzerinde ise iyileştirme sağladığı belirlenmiştir. Kil zeminin iyileştirilmesinde, serbest basınç mukavemetine olan etkisinin incelenmesi için inşaat yıkıntı atığı geopolimer bağlayıcı olarak artan yüzdelerde %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranında zemine ilave edilmiş, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda iyileştirilen numunelerin serbest basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca numunelerin donma-çözülme davranışına dayanıklılığını belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresi sonucunda 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözülme çevrimleri yapılarak hem donma-çözülme öncesi hem de donma-çözülme sonrası mukavemet davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, geri dönüştürülmüş tuğla, beton ve cam tozuna dayalı geopolimer bağlayıcı ile iyileştirilmiş killi zeminlerin serbest basınç mukavemetinin, iyileştirilmemiş zemine göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle %30 İYA ve 12M NaOH kullanıldığında zeminin serbest basınç mukavemeti 190 kPa'dan 1832 kPa'ya yükselmiş, donma-çözülme deneylerinde ise 11 çevrim sonunda bu değer 1023 kPa olarak düşüş göstermiştir. Bu durum, donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan zemin numunelerinin serbest basınç dayanımında azalma olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Donma-Çözülme, Geopolimer, İnşaat Yıkıntı Atıkları, Zemin İyileştirme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FREEZING-THAWING BEHAVIOR OF SOILS IMPROVED WITH GEOPOLYMER BASED ON CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

Ahmet Furkan POLAT

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Assistant Professor Adem IŞIK

2025, 69 pages

As a result of construction activities, waste materials (brick, concrete, glass, etc.) generated from buildings that have reached the end of their service life cause significant environmental problems. This situation paves the way for critical issues such as environmental pollution. For a sustainable environment, both the preservation of natural resources and the recycling of construction demolition waste for reuse in buildings are of great importance. Within the scope of this study, the feasibility of using a geopolymer binder derived from recycled concrete, brick, and glass powder was investigated, and its effects on the physical and mechanical behaviors of clayey soils were examined. In this context, unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to determine the consistency limits, compaction parameters, and UCS of the soil. As a result of the UCS test, consistency tests, and compaction tests, it was observed that the construction demolition waste reduced the plasticity of the soil, but it was determined that it improved the compaction parameters. To examine the effect of construction demolition waste-based geopolymer binder on the UCS of clayey soil, the binder was added to the soil in increasing percentages of 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, and 30%. The UCS test was conducted on the improved samples after 7 and 28 days of curing. Additionally, to determine the freeze-thaw resistance of the samples, freeze-thaw cycles were applied after the 28-day curing period, including 1, 3, 5, 7, 9, and 11 cycles, and the strength behavior of the samples was examined both before and after the freeze-thaw process. As a result of the experiments, it was determined that the UCS of clayey soils improved with the geopolymer binder based on recycled brick, concrete, and glass powder was significantly higher compared to the unimproved soil. Specifically, when 30% CDW and 12M NaOH were used, the UCS of the soil increased from 190 kPa to 1832 kPa. However, in freeze-thaw tests, this value decreased to 1023 kPa after 11 cycles. This finding revealed that the UCS of soil samples subjected to freeze-thaw cycles decreased.

Keywords: Construction Demolition Waste, Freeze-Thaw, Geopolymer, Soil Improvement.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında desteğini, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, beni bu süreçte yönlendiren ve her zaman yanımda olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen, bilgi ve birikimleriyle bana rehberlik eden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ ve Sayın Doç. Dr. Mesut GÖR’e de ayrıca teşekkür ederim.

Uzun yıllardır varlıklarıyla her zaman yanımda olup desteğini esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Yük. Müh. Muhammed Kerem TÜRKEŞ ve Müh. Harun Serdar ÇELİK’e de teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olarak, sonsuz desteğini hissettiren ve bana daima yol gösteren rahmetli babama, üzerimde tarifsiz emeği olan ve minnetimi kelimelerle ifade edemeyeceğim kıymetli anneme, her zaman desteğini hissettiğim kardeşlerime ve beni her durumda anlayan, motive eden sevgili eşim Ayşegül’e sevgi ve minnetle teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını, bana inanan, destek olan ve her zaman yanımda olan tüm sevdiklerime ithaf ediyorum.

Ahmet Furkan POLAT

Ocak, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri	3
2.1.1. Mekanik stabilizasyon	6
2.1.1.1. Dinamik kompaksiyon.....	6
2.1.1.2. Derin vibrasyon (vibro-flotasyon)	8
2.1.1.3. Taş kolonlar	9
2.1.2. Kimyasal stabilizasyon	12
2.1.2.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu.....	12
2.1.2.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu.....	16
2.1.2.3. Bitüm ile zemin stabilizasyonu.....	18
2.1.2.4. Uçucu kül ile stabilizasyon.....	20
2.1.3. Jet grout	23
2.1.4. Geosentetikler ile stabilizasyon	26
2.2. Zeminlerde Donma ve Çözülme Olayı	27
3. MATERYALVE YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	32
3.1.1. Zemin.....	32
3.1.2. İnşaat yıkıntı atığı	32
3.1.3. Alkali aktivatör	35
3.2. Yöntem	36
3.2.1. Elek analizi ve hidrometre deneyi	37
3.2.2. Standart proktor deneyi.....	39
3.2.3. Serbest basınç numunesi hazırlama	40

3.2.4. Serbest basınç deneyi.....	44
3.2.5. Donma-çözülme deneyi	45
4. BULGULAR.....	47
4.1. Deney Sonuçları.....	47
4.1.1. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kıvamına etkisi	47
4.1.2. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kompaksiyon davranışına etkisi	48
4.1.3. İnşaat yıkıntı atığının geopolimer bağlayıcı olarak zeminin serbest basınç mukavemetine etkisi	50
4.1.4. İnşaat yıkıntı atığının geopolimer bağlayıcı olarak zeminin donma-çözülme davranışına etkisi	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	62
KAYNAKÇA	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin zemin tipleri ve dane çaplarına göre ayrılmasıI.	4
Şekil 2.2. Stabilizasyon yöntemleri	5
Şekil 2.3. Suudi Arabistan demir yolu yapımında kullanılan kompaksiyon örneği	7
Şekil 2.4. Vibro flotasyon yöntemi.....	9
Şekil 2.5. (A) Islak-üstten beslemeli yöntem ve (B) Kuru-alttan beslemeli yöntem.....	10
Şekil 2.6. Kireç zemin stabilizasyonun sahada uygulanması	13
Şekil 2.7. Çimento ile zemin stabilizasyonu.....	16
Şekil 2.8. Bitüm ile zemin stabilizasyonu	19
Şekil 2.9. Uçucu külün ile zemin stabilizasyonu.....	21
Şekil 2.10. Jet grout zemin iyileştirmede yöntemleri (a) Tek Akışkanlı Sistem, (b) İki Akışkanlı Sistem, (c) Üç Akışkanlı Sistem	23
Şekil 2.11. Geosentetikler ile Zemin İyileştirme	27
Şekil 2.12. Donma süreci.....	28
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kil zemini: (a) Doğal halde elde edilen kil numunesi,(b) Etüvde kurutulmuş ve 40 No’lu (0.425mm) elekten geçirilerek elde edilen kil malzemesi	32
Şekil 3.2. Soldan sağa doğru İnşaat yıkıntı atığı, beton, cam ve tuğla parçaları	33
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan ayrıştırılmış inşaat atıkları: Tuğla, cam ve beton parçaları	34
Şekil 3.4. Soldan sağa doğru İYA’nın öğütülmesi ve eleme işlemleri sonrası elde edilen tuğla, beton ve cam tozları.....	34
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan İYA’nın öğütülmüş ve 200 No’ lu (<75 µm) elekten elenmiş toz hali.....	35
Şekil 3.6. Sodyum Hidroksit görselleri (soldan sağa; 1 kg’lık torba, pul formu)	36
Şekil 3.7. Elek Analizi ve Hidrometre sonuç grafiği ile dane dağılımı eğrisi.....	37
Şekil 3.8. Deneyde kullanılan standart likit limit aleti	38
Şekil 3.9. Plastik limit deneyi numuneleri.....	38
Şekil 3.10. Zemin numunesinin Casagrande Plastisite kartındaki yeri	39
Şekil 3.11. Standart proktor deney aleti	40
Şekil 3.12. İYA’dan elde edilen %60 tuğla tozu, %20 beton tozu ve %20 cam tozunun mekanik karıştırıcıda homojen şekilde karıştırılması işlemi.	41

Şekil 3.13. Belirli molaritede hazırlanmış NaOH çözeltisinin zemin numunesi ile karıştırılma aşamaları. (a) Hazırlanan NaOH çözeltisi (b) NaOH çözeltisinin zemin numunesine ilavesi, (c) Karışımın homojen hale getirilmesi	41
Şekil 3.14. Optimum su muhtevasında hazırlanan zemin ile geopolimer bağlayıcının karıştırılması	42
Şekil 3.15. Sıkıştırma öncesinde, 3 farklı kapta eşit ağırlıkta hazırlanan numuneler.....	43
Şekil 3.16. Laboratuvar ortamında hazırlanan deney numunesi hazırlama aleti.....	43
Şekil 3.17. Deney aletinde sıkıştırılan numunenin çıkarılması	44
Şekil 3.18. Numunelerin streç film ile sarılması ve desikatöre konulması	44
Şekil 3.19. Serbest basınç deney aleti.....	45
Şekil 3.20. Donma-çözülme cihazı ve donma-çözülme deney numuneleri	46
Şekil 3.21. Donma-çözülme sonrası serbest basınç deneyi	46
Şekil 4.1. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kıvam limitlerine etkisi	48
Şekil 4.2. İnşaat yıkıntı atığının zeminin kompaksiyon davranışına etkisi	49
Şekil 4.3. 7 günlük kür süresi sonucu serbest basınç mukavemeti değerleri.....	51
Şekil 4.4. 28 günlük kür süresi sonucu serbest basınç mukavemeti değerleri.....	52
Şekil 4.5. İnşaat yıkıntı atığı oranının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi.....	53
Şekil 4.6. Donma-çözülme çevrimlerinin katılaşmış kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	54
Şekil 4.7. Donma-çözülme çevrimlerinin %4 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	55
Şekil 4.8. Donma-çözülme çevrimlerinin %8 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	56
Şekil 4.9. Donma-çözülme çevrimlerinin %12 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	57
Şekil 4.10. Donma-çözülme çevrimlerinin %16 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	58
Şekil 4.11. Donma-çözülme çevrimlerinin %20 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	59

Şekil 4.12. Donma-çözülme çevrimlerinin %30 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 4.13. Kil zemin numunesine farklı oranlarda geopolimer bağlayıcı İYA eklenmesiyle donma-çözülme çevrimleri sonrası deviatör gerilme değişimi.	61



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Zemin iyileştirme metotları.....	6
Tablo 2.2. Tavsiye Edilen Kireç Karışım Oranları	13
Tablo 2.3. Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Miktarı	17
Tablo 3.1. Tekkim firmasına ait sodyum hidroksit kimyasal bileşeni.....	36



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASBS	Aşırı Boşluk Suyu Basıncı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BSBO	Boşluk Suyu Basınç Oranı
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CBR	Kalifornia Taşıma Oranı
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
cm	Santimetre
Fe	Demir
GC	Killi Çakıl
GM	Siltli Çakıl
GP	Kötü Derecelendirilmiş Çakıl
gr	Gram
GW	İyi Derecelendirilmiş Çakıl
İYA	İnşaat Yıkım Atığı
kPa	Kilopaskal
LL	Likit Limit
M	Molarite
MH	Yüksek Plastisiteli Silt
ML	Düşük Plastisiteli Silt
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
°C	Santigrat
PL	Plastik Limit
SC	Kili Kum
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SM	Siltli Kum

SP	Kötü Derecelendirilmiş Kum
SW	İyi Derecelendirilmiş Kum
UCS	Serbest Basınç Deneyi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
μm	Mikrometre
%	Yüzde



1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde nüfus her geçen gün hızla artmaktadır. Bu hızla beraber inşaat sektöründeki faaliyetlerde de (endüstriyel yapılar, konutlar, yollar, barajlar, köprüler vb.) artış görülmektedir. Dünya genelinde bu artış neticesinde büyük oranda katı atık oluşmaktadır. İnşaat sektörüne bağlı oluşan bu atık dünya çapında oluşan katı atığın %30 dan fazlasını kapsadığı bildirilmiştir (Ginga vd., 2020). Tüm dünyada sorun olan inşaat yıkıntı atıklarından (beton, tuğla, seramik, cam vb.) çıkan malzemeleri depolanması, çok büyük alan gerektirmesi ve çok maliyetli olması nedeniyle geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması büyük önem arz etmektedir. İnşaat yıkıntı atığı (İYA) ekonomik değeri çok düşüktür ve depolanması veya bertaraf edilmesi beraberinde birçok çevresel ve ekonomik sorunlar meydana getirmektedir. Dolayısıyla İYA depolanması, yetersiz kontrol ve önlemler sonucunda bu atık malzemelerin toksik madde içerme olasılığı çok yüksek olduğundan, insan ve çevre sağlığını tehlikeye atabilir. Bu nedenle, İYA'nın depolanması veya geri dönüştürülmesinin uygun bir şekilde ele alınması, çevre, sosyal ve ekonomik açıdan fayda sağlamak için büyük önem taşımaktadır.

Dünya genelinde yıllık inşaat atıkları yönetimi, Birleşik Krallık İYA'nın %17'sini geri dönüştürürken, Brezilya %4-5'ini geri dönüştürmektedir (J.P. Moretti, 2016; Q. Zhang 2018). Diğer başka bir açıdan bazı ülkeler İYA'nın geri dönüşümünü artırma konusunda karardır. Japonya'da İYA'nın yeniden kullanım ve geri dönüşüm oranı %90'dır. Hollanda İYA'nın %75'ini kullanıyor ve bazı Avrupa ülkelerinde yeniden kullanım oranı yaklaşık %80'dir (T.W. Ann, 2013; S. Butera 2014). Ülkemizde ise başlatılan kentsel dönüşüm projeleri ile yılda 10 milyon ton İYA'nın 6 milyon tonunun geri dönüştürülmesi hedeflenmektedir (T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü. Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2014-2017). İnşaat sektörüne bağlı oluşan bu atık malzemelerin ekonomik ve çevresel sorunlara karşı oluşturacağı etkiyi azaltmak için ve geri dönüşümü sağlamak amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan araştırmalarda İYA'dan olan (beton, tuğla, seramik, cam vb.) malzemelerin zemini iyileştirilmesinde kullanımı sonucunda zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

Geopolimerleri ilk kez 1978 yılında tanımlayan ve sınıflandıran kişi Joseph Davidovits olmuştur. Geopolimerler amorf veya yarı kristal yapılı olan, alüminyum oksit ve silisyum oksit esaslı inorganik polimerdir. Geopolimerler, alüminioslikatlar (uçucu kül, cüruf, volkanik kül, silis dumanı, metakaolin vb) ile alkali aktivatörler (sodyum hidroksit, sodyum silikat ve

potasyum hidroksit) reaksiyonları sonucu ortaya çıkarlar (Duxson vd., 2007). Geopolimerlerin mühendislik uygulamalarındaki yaygın kullanımı, genellikle yüksek maliyetleri nedeniyle sınırlıdır ve bu durum, özellikle Portland çimentosu ve kireç gibi geleneksel stabilizatörlerin tercih edilmesiyle gölgelenmiştir. Başarılı uygulamalarda geopolimerler özellikle sera gazı salınımı, doğal kaynak kullanımı ve enerji tüketimi açısından çimento ve kireçten daha çevre dostu olduğu kanıtlanmıştır. Portland çimentosu üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonları, küresel sera gazı salınımına önemli etkide bulunur ve fosil yakıtların yanmasından sonra bu alanda ikinci sıradadır. Bununla birlikte, geopolimerler daha az enerji tüketimi gerektirir ve çevreye daha az sera gazı salar.

Soğuk iklim bölgelerinde, mevsimsel iklim değişiklikleri nedeniyle sıcaklık dalgalanmalarının etkisiyle zeminler yıl içerisinde birden fazla kez donma-çözölmeye maruz kalmaktadır. Donma ve çözölmeye çevrimleri sonrasında su tutma kapasitesi yüksek olan killi zeminlerde, zeminin gerilme-şekil değıştirme davranışında meydana gelen değışimlerin incelenmesi, geoteknik mühendisliğinde önemli bir araştırma alanıdır. Bu durum, özellikle ince daneli zeminlerin çeşitli mühendislik özelliklerini (taşırma gücü, su içeriğı, geçirirnililik vb.) olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Dondan etkilenen zeminler üzerinde gerçekteştirilen incelemeler, donmuş zeminlerde buz kristallerinin oluştuğunu, ısınan hava sonucuyla birlikte ince daneli zeminlerin su muhtevasında önemli artışlar meydana geldiğini ve bu duruma bağılı olarak zemin mukavemetlerinde belirgin azalmaların ortaya çıktığını ortaya koymuştur (Cruzda ve Hohmann, 1997; Shita ve Baghdadi, 2001; Qi ve ark., 2008; Baykal ve Sayğılı, 2012; Kamei vd., 2012).

Bu tez çalışmasının amacı, inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan İYA'larının (beton, tuğıla, cam vb.) geri dönüştürölerek geopolimer bağılayıcı olarak kullanılmasıyla killi zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirilmesi araştırılmıştır. Bu çalışmada, geri dönüştürölmiş İYA'larının killi zeminlerin kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri ile bu İYA'ları ile oluşturulan geopolimer bağılayıcının serbest basınç mukavemeti ve donma-çözölmeye çevrimlerine karşı dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, İYA farklı oranlarda (%4, %8, %12, %16, %20 ve %30) geopolimer bağılayıcı olarak ilave edilen zemin numuneleri üzerinde 7 gün ve 28 gün süreyle kür uygulandıktan sonra serbest basınç ve 28 günlük kür süresi sonunda ise donma-çözölmeye deneyleri gerçekteştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, İYA'larından üretilen geopolimer bağılayıcıların killi zeminlerin stabilizasyonunda etkili bir alternatif olabileceğı ve çevresel sürdürölülebilirlik açısından önemli katkılar sunabileceğı ortaya konulmuştur.

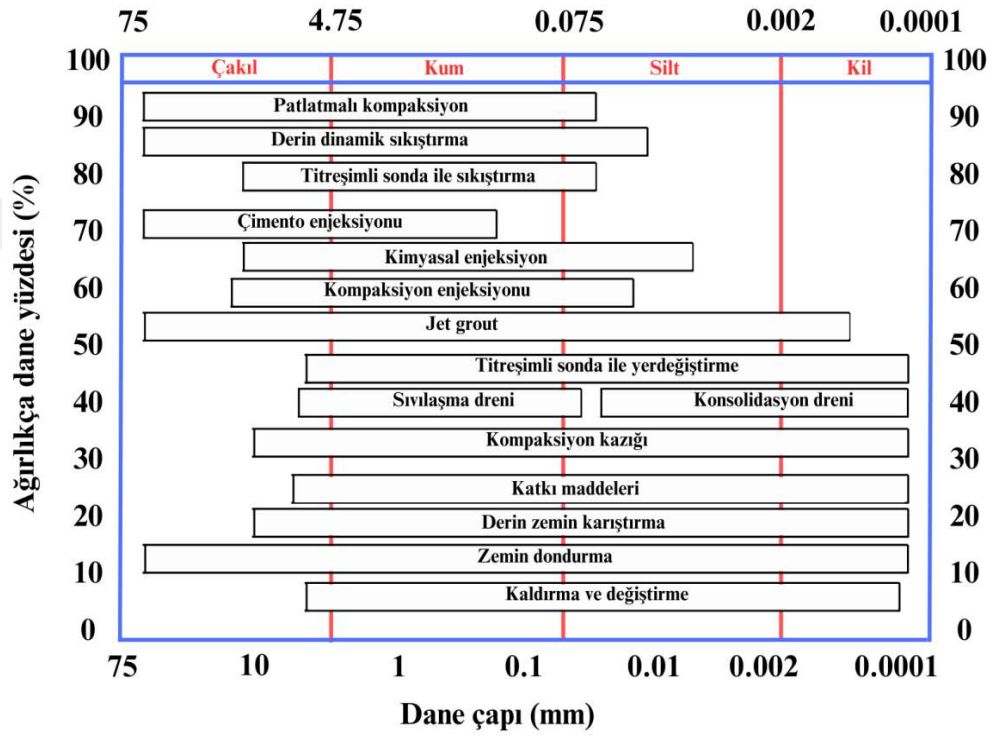
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda hızlı artan nüfus nedeniyle ve buna bağlı olarak artan yapı talepleri, güvenli ve ekonomik yapıların oluşturulmasını gerekli kılmıştır. Bu nedenle, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla zemin stabilizasyon yöntemlerine başvurulmaktadır. Böylece taşıma gücü yüksek, oturma açısından sağlıklı ve azalan sıvılaşma potansiyeli gibi özelliklere sahip zeminler elde edilmektedir. Zeminin mühendislik özelliklerini stabil hale getirmek amacıyla birçok stabilizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başında mekanik stabilizasyon gelir. Ancak, mekanik stabilizasyonun uygulanmasının uygun olmadığı durumlarda kimyasal stabilizasyon devreye girer. Kimyasal stabilizasyon yöntemlerinde, katkı maddesi kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar son yıllarda daha sık tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tür uygulamalar, gün geçtikçe daha yaygın hale gelmektedir. Ülkemizde ise çimento ve kirecin bol miktarda bulunması, bu maddeleri en çok tercih edilen katkı maddeleri haline getirmektedir. Zemin stabilizasyonu sonucunda genellikle mukavemetin artması, taşıma gücünün yükselmesi ve hacim değişikliğinin azalması beklenir. Özellikle daneler arasındaki boşlukların doldurulması, zeminin dayanımını artıran önemli bir etkidir. Zemin iyileştirmenin temel amacı ise kayma direncini artırmak, geçirgenliği kontrol altına almak ve sıkışabilirliği azaltmaktır.

2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zeminlerin stabilizasyonu iki temel yöntemle gerçekleştirilmektedir. İlk yöntem olan mekanik stabilizasyon, zemine herhangi bir katkı maddesi (çimento, bitüm, kireç, reçine vb.) eklenmeden, zemin yapısında kimyasal reaksiyon oluşturulmaksızın sıkıştırma (kompaksiyon) veya farklı zemin türleri ile karıştırılarak uygun dane dağılımının sağlanması ile zeminin istenen özelliklere getirilmesidir. İkinci yöntem kimyasal stabilizasyon ise zemine katkı maddesi (çimento, bitüm, kireç, reçine vb.) karıştırılarak kimyasal reaksiyonlar oluşturulması ve bu sayede zeminin istenilen niteliklere ulaşmasının sağlanmasıdır. Bu yöntem, kimyasal stabilizasyon olarak adlandırılmaktadır. Kimyasal stabilizasyonda katkı maddelerinin kullanılması son yıllarda giderek tercih edilmektedir. Ülkemizde de yaygın olarak bulunan çimento ve kirecin fazla olması nedeniyle bu malzemeleri en çok tercih edilen seçenek haline getirmiştir. Stabilizasyon yönteminin son yıllarda artmasının en önemli nedeni taşıma gücü yüksek zeminlerin azalması olarak öne çıkmaktadır.

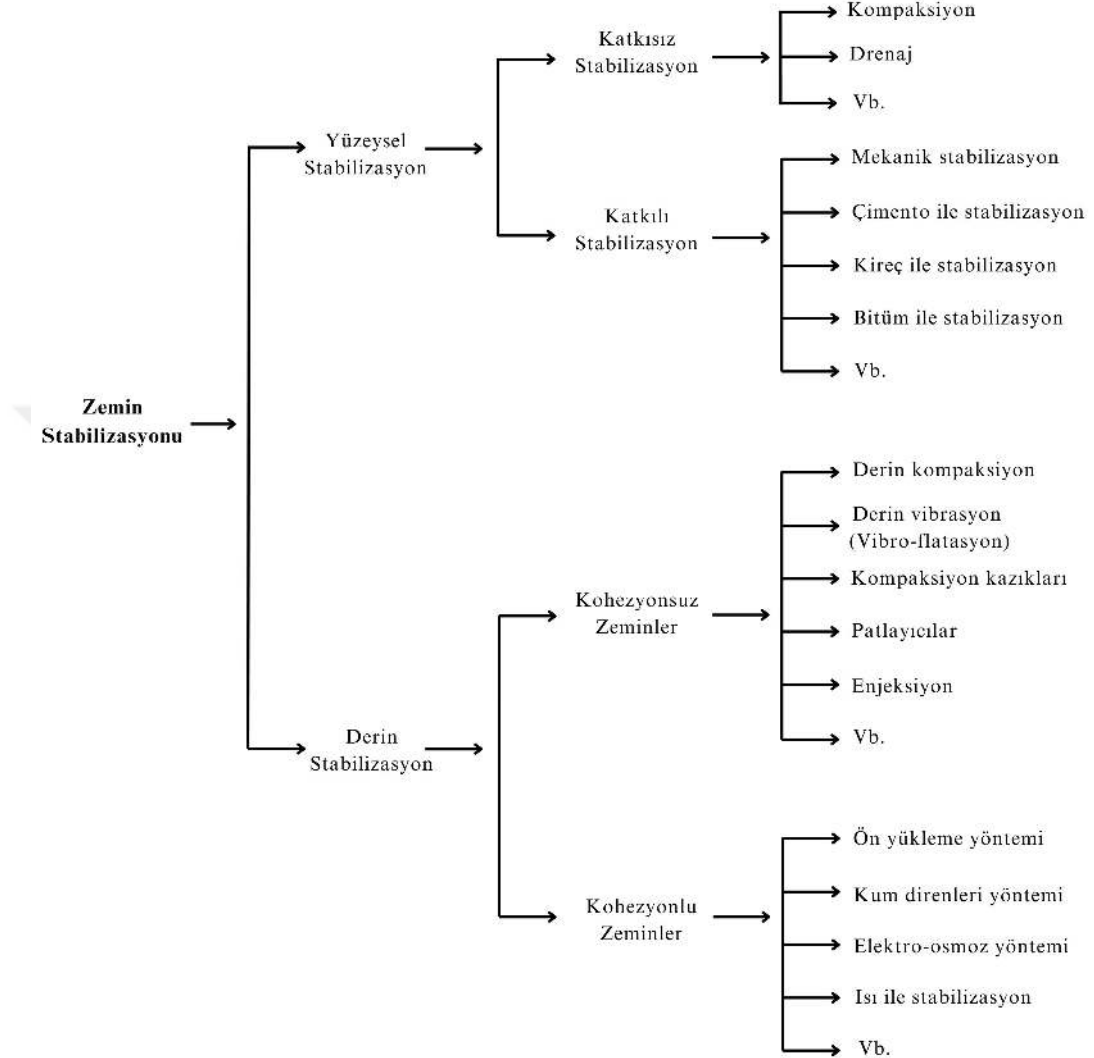
Zeminler mühendislik özellikleri açısından farklılık göstermektedir. Bu mühendislik özellikleri zeminin cinsine ve arazi koşullarına göre değişiklik arz eder. Bu değişiklikler sebebiyle çeşitli zemin stabilizasyon yöntemi ortaya çıkmıştır. Zemin dane boyutlarına göre stabilizasyon yöntemleri Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. Zemin iyileştirilmesindeki temel amaç taşıma gücü açısından yetersiz olan zeminlerin mekanik ve kimyasal yöntemler kullanarak taşıma gücünün artırılması, oturma miktarının sınırlandırılması, boşlukların doldurulması ve genel stabilitenin sağlanması hedeflenmektedir. Böylece İnşaat alanındaki zeminlerin istenilen niteliklere sahip, kullanıma uygun zeminler elde etmektir.



Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin zemin tipleri ve dane çaplarına göre ayrılması (Mitchell ve Katti 1981; Nicholson, 2015).

Şekil 2.1’de farklı zemin türleri (çakıl, kum, silt ve kil) için kullanılabilecek çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri, zemin dane boyutuna ve ağırlıkça yüzdesine göre gösterilmiştir. Yöntemler arasında derin dinamik kompaksiyon, jet grouting, kimyasal enjeksiyon gibi stabilizasyon teknikleri bulunmaktadır. Her yöntemin uygulanabilirliği, zemin türüne ve dane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Zemin stabilizasyon yöntemleri yüzeysel stabilizasyon ve derin stabilizasyon olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yüzeysel stabilizasyon, katkısız ve katkılı olmak üzere iki kategoriye ayrılmakta. Bunlar katkısız stabilizasyon yöntemleri olan kompaksiyon ve drenaj, katkılı stabilizasyon yöntemlerinde ise çimento, kireç ve bitüm kullanımı gibi çeşitli yöntemler yer almaktadır. Derin stabilizasyon yöntemleri ise kohezyonsuz

ve kohezyonlu zeminler için farklı yöntemler içermektedir. Kohezyonsuz zeminlerde dinamik konsolidasyon, vibro-flotasyon, kompaksiyon kazıkları ve patlayıcılar gibi yöntemler kullanılırken, kohezyonlu zeminlerde ise ön yükleme, kum drenleri ısı ile stabilizasyon ve elektro-osmoz gibi teknikleri kullanılmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2017)

Zemine uygulanacak stabilizasyon yönteminin belirlenmesinde zeminin türüne ve özelliklerine göre seçilmesi büyük önem taşır. Zemine uygun stabilizasyon yöntemi seçildiğinde, ekonomi, zaman ve teknoloji açısından avantajlar sağlanabilmektedir (Bozkurt, 2020). Tablo 2.1'deki zeminin cinsi kullanılacak olan stabilizasyon yöntemini belirlemede önemli bir etkidir. Örneğin İnce ve kaba granüller zemin cinsi için yük taşıma ve deformasyon direncini artırmak amacıyla asfalt, çimento, mekanik karıştırma ve kompaksiyon gibi yöntemler kullanırken; düşük plastisite indeksine sahip killeri için kompaksiyon, çimento ve kireç; yüksek plastisite

indeksine sahip killer için ise kireç tercih edilen yöntemlerdir. Stabilizasyon metodu seçilirken zeminin granülometrisi, plastisite indeksi ve zeminin olumsuz özellikleri belirlendikten sonra zemine uygun stabilizasyon yöntemine karar verilir ve zeminin olumsuz özellikleri iyileştirilerek yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Tablo 2.1. Zemin iyileştirme metotları (Tunç, 2002)

Amaç	Zemin cinsi	Stabilizasyon yöntemi
Yük taşıma ve deformasyon direnci arttırmak	İnce daneli zeminler	Asfalt, çimento mekanik karıştırma, kompaksiyon
	İri daneli zeminler	Asfalt, çimento mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Düşük plastisiteli killer	Kompaksiyon, çimento, kireç
	Yüksek plastisiteli killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce daneli zeminler	Çimento, asfalt, uçucu kül
	Düşük plastisiteli killer	Çimento, kireç
Su geçirimsizliği	Düşük plastisiteli killer	Çimento, asfalt, kireç
Kabarma büzülme kontrolü	Düşük plastisiteli killer	Çimento kompaksiyon, kireç
	Yüksek plastisiteli killer	Kireç
Esnekliği azaltmak	Yüksek plastisiteli killer	Kireç
	Elastik kil veya siltler	Çimento

2.1.1. Mekanik stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon en az iki farklı doğal zeminin karıştırılarak zeminin granülemetri dağılımını değiştirmeyi, zeminin taşıma kapasitesini artırmayı, zeminin oturmasını azaltmayı ve mühendislik iyileştirilmesini sağlamak için yapılır. Bu yöntemde zemin karışımındaki iri daneler arasındaki boşlukların oranını azaltmak için ince zemin daneleriyle doldurulur ve böylece zemini daha dayanıklı hale getirilir. Bu yöntem sonucunda içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametreleri artarak zeminde iyileşme sağlanır. Mekanik stabilizasyonda zemin yüzeyine yakın tabakalar için darbeli silindir, tokmaklar ve diğer mekanik araçlar kullanırken; daha derin tabakalar için ise dinamik kompaksiyon veya vibro-kompaksiyon gibi derin derin sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır.

2.1.1.1 Dinamik kompaksiyon

Zeminlerin mekanik özelliklerini ve taşıma kapasitesini iyileştirmek amacıyla belirli bir yükseklikten belirli bir ağırlığın zemine düşürülmesi ve buna bağlı olarak boşluk oranını

azaltılması işlemine dinamik kompaksiyon denir. Bu yöntem ilk defa 1930'lu yıllarda Almanya'da otoyol inşaatlarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra 1957'li yıllarda İngiltere'deki Road Araştırma Laboratuvarında çalışmalar yapılmış ve kullanılmaya başlanmıştır (Loos, 1936). Dinamik kompaksiyon da ağır bir kütlenin (5-40 ton) bir vinç yardımıyla 5 metre ile 35 metre arasındaki yükseklikten birçok kez bırakılması sonucu zemin tabakalarının sıkılaştırılması sağlanmaktadır. Elde edilen sıkışma derecesi ve zeminin yüzeyinden itibaren sıkıştırılan tabaka kalınlığı; düşen kütlenin ağırlığı düşme yüksekliği, düşme sayısı ve zeminin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Uzuner 2000). Suudi Arabistan'da demir yolu yapımında kullanılan kompaksiyon yöntemi Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



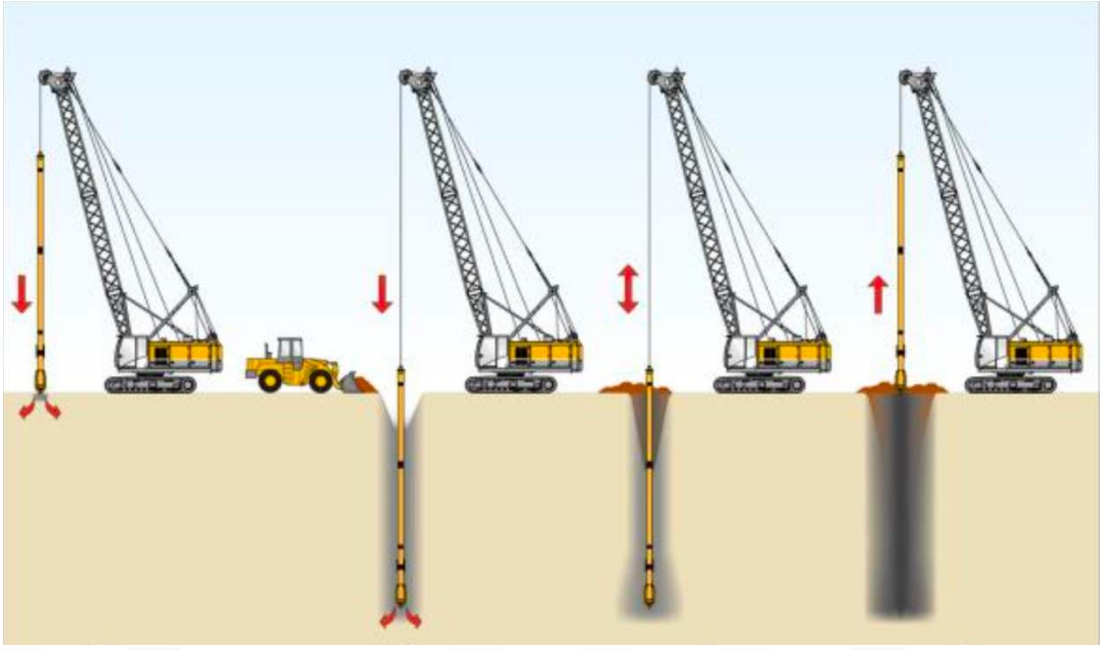
Şekil 2.3. Suudi Arabistan demir yolu yapımında kullanılan kompaksiyon örneği (Keller Middle East, 2024)

Du (2023) bu çalışma kapsamında dinamik kompaksiyonun neden olduğu granüler zeminlerdeki (daneli zeminler) yer değiştirme etkilerini incelemek amacıyla hem laboratuvar deneyleri hem de analiz etmek için modelleme oluşturmuşlardır. Laboratuvar deneyi çalışmalarında, farklı enerji seviyeleri oluşturulması için sıkıştırma plakası farklı yüksekliklerden (10 cm, 20 cm, 40 cm ve 60 cm) zemine düşürülerek zeminde çökme (çukur) oluşumu gözlemlenmiştir. Deneylerde her enerji seviyesi için zeminde oluşan çökme davranışları ve zeminin içsel yer değiştirmesi incelenmiştir. Zeminde oluşan çukurun derinlik ve genişlik gibi geometrik özellikleri ile zemindeki içsel yer değiştirme arasındaki ilişkiyi analiz etmek için matematiksel model olan stokastik ortam teorisi geliştirilmiştir. Deneyler sırasıyla

T1, T2, T3 ve T4 olarak adlandırılan ve 10 cm, 20 cm, 40 cm ve 60 cm düşme yüksekliğine sahip dört grupta yapılmıştır. Zemin üzerine her vuruşundan ardından zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeleri renkli kâğıt katmanlar ile ayrılmış 2 m x 2 m boyutlarındaki bir rezervuara, 3 cm kalınlığında zemin katmanları yüklenerek hesaplamışlardır. Bu veriler sonucunda geliştirilen modelin yer değiştirme tahminleri ile laboratuvar deneyi sonuçları karşılaştırılmış ve dinamik kompaksiyon sonucu oluşan çukurun geometrik özelliklerini doğru bir şekilde yansıttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu modelin geleneksel yöntemlere göre daha basit ve hesaplamalarda nispeten daha doğru sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

2.1.1.2 Derin vibrasyon (vibro-flotasyon)

Vibroflotasyon tekniği mekanik zemin iyileştirilme amacıyla kullanılan yöntemlerden biridir ve genellikle kumlu, çakıllı, siltli veya düşük plastisiteli killi zeminlerde kullanılır. Bu yöntemde vibroflot olarak adlandırılan silindirik bir vibratör vinç yardımıyla iyileştirme yapılacak bölgeye getirilir ve uç kısmından yüksek basınçlı su jeti kullanılarak titreşim eşliğinde zeminde boşluk oluşturarak belirli bir derinliğe indirilir. Hedef derinliğe ulaşıldıktan sonra su basıncı düşürülerek bir miktar su yukarı yönlendirilir. Bu sayede zemin daha sıkı hale gelir ve su basıncıyla birlikte zemin daneleri arasındaki boşluk yer değiştirir, bundan dolayı sıkıştırma etkisinde artış sağlanır. Gerekirse, sıkıştırmaya katkı sağlamak için işlem sırasında veya sonrasında granüler dolgu malzemesi (kum veya çakıl gibi) eklenerek boşluklar doldurulur (Şekil 2.4). Bu yöntem zeminin taşıma kapasitesini, zeminin stabilitesini artırmak için ve ekonomik olmasından dolayı tercih edilen yöntemlerden biridir.



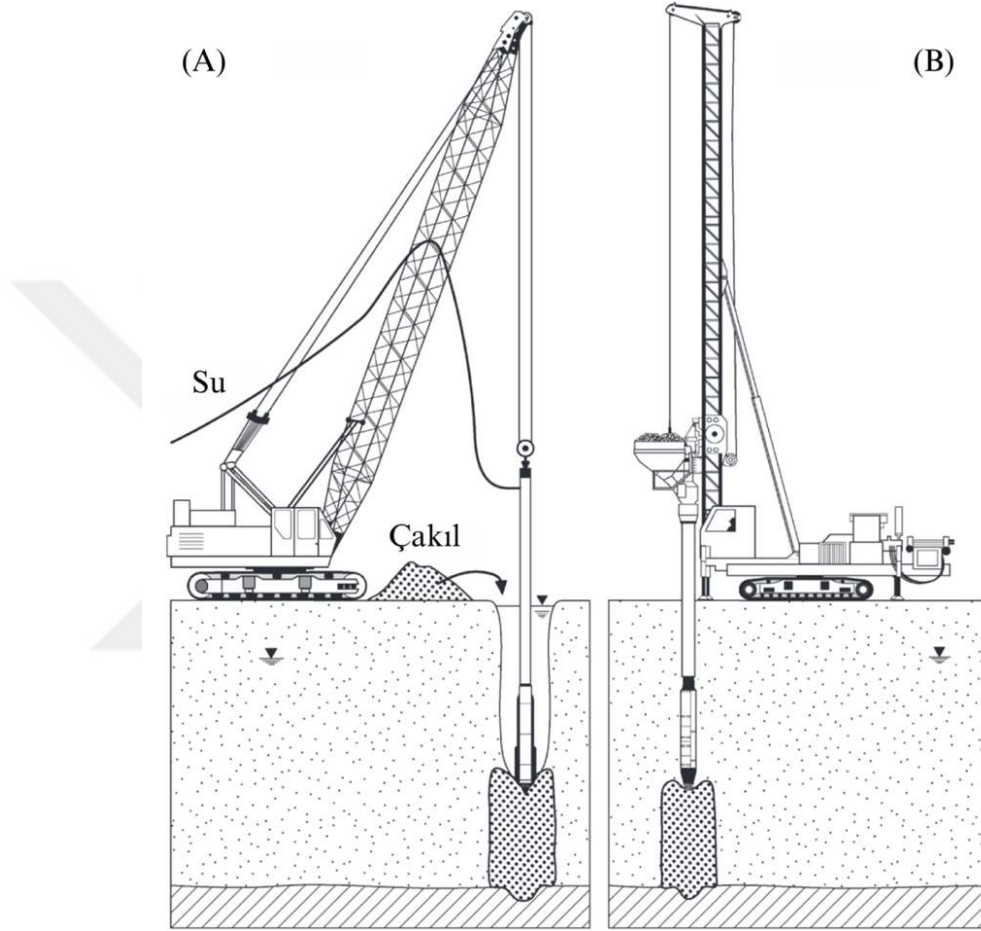
Şekil 2.4. Vibro flotasyon yöntemi (Ecodrill, 2024)

Selçuk (2009) çalışmasında zemin sıvılaşmasına karşı optimum taş kolon tasarımını sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Bu çalışmada deprem sırasında oluşan hasarların önemli bir kısmının zemin sıvılaşmasından kaynaklandığını belirtmiş ve bu sorunu önlemek için vibrokompaksiyon ile inşa edilen taş kolonların etkili bir çözüm olduğunu belirtmiştir. Vibrokompaksiyon uygulaması ile zemine inşa edilen taş kolonlar, zeminin drenaj kapasitesini ve rölatif sıklığını arttırarak, dinamik yükler altında gelişen aşırı boşluk suyu basıncını (ASBS) azaltmıştır. Çalışmada, taş kolonların çapı ve aralıklarının değiştirilmesiyle boşluk suyu basınç oranının (BSBO) belirli bir eşik değerinin altına indirildiği bir tasarım modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak taş kolonların aralığının artmasıyla BSBO'nun arttığını, hidrolik iletkenliğin arttığında ise BSBO'nun azaldığını göstermiştir ve modelin oluşturulmasında kullanılan teorik ve sayısal yaklaşımların uyumlu olduğu görülmüştür.

2.1.1.3 Taş kolonlar

Zemin iyileştirmesinde temel amaç, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve konsolidasyon süresini kısaltmaktır. Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan Taş kolon yöntemi, diğer birçok iyileştirme yöntemine göre daha ekonomik ve hızlı uygulanabilir olmasından dolayı tercih edilen yöntemlerden biridir. Taş kolonlar, uygulandıkları zeminin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmakla birlikte, ağır yüklere maruz kalan problemlili zeminlerdeki deformasyonları da büyük ölçüde azaltmaktadır (Şahinkaya, 2016). Taş kolon yöntemi ilk kez

1830'da Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Bu yöntem Avrupa'da 1950'den sonra 1972'de Amerika'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de taş kolonlar, zemin koşullarını iyileştirmede ve zeminin dayanıklılığını artırmak amacıyla kullanılabilir bir yöntemdir. (Black vd., 2007). Taş kolon yöntemi, ıslak (üstten beslemeli) ve kuru (alttan beslemeli) yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.5'te her iki yöntemin uygulama detayları gösterilmiştir (Kirsch ve Kirsch, 2017).



Şekil 2.5. (A) Islak-üstten beslemeli yöntem ve (B) Kuru-alttan beslemeli yöntem (Kirsch ve Kirsch, 2017)

Lee ve Pande (1998) Mohr-Coulomb modelini kullanarak arazi koşullarının kritik durumunu modelleyerek taş kolonların elektroplastik analizi gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde taş kolonla güçlendirilmiş zeminin üzerindeki dairesel model temelin davranışını eksenel simetrik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tahmin etmişlerdir. Bu sayısal tahmin sonuçlarını deneysel gözlemlerle karşılaştırmış ve sonuçların tutarlı olduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar ile temelin elektroplastik analizini yapmak amacıyla yeni bir tasarım planı önermişler ve bu analizde homojenleştirme yöntemini kullanmışlardır. Bu planda temel

özelliklerinden biri, elektroplastik ve elastik rejimler için denge ve uygunluk koşullarını kullanmalarıdır. Bunun için farklı koşullara bağlı olarak değişen gerilme ve şekilde değiştirme adımlarının şemasını oluşturmuşlardır.

Murugesan ve Rajagopal (2006), yaptıkları araştırmada sonlu elemanlar analizi kullanılarak geosentetik ile kaplı taş kolonun yük kapasitesindeki iyileştirmeyi araştırmışlardır. Araştırmaları, taş kolonların geosentetik ile kaplandığında taşıma kapasitesi ve rijitlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmadaki tüm analizler Hindistan Teknoloji Enstitüsü Madras'ta geliştirilen sonlu eleman programı olan GEOFEM kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda, taş kolonların geosentetik ile kaplandığında taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin arttığı, geosentetik malzemenin taş kolonun yanal genişlemesini sınırlandırdığını bildirmişlerdir. Özellikle geosentetik kaplamanın küçük çaplı taş kolonlarda daha etkili olduğunu ve kolonun üst kısımlarında kaplama yapmanın performansını önemli derecede artırdığı sonucuna varmışlardır.

Sarıcı (2014) Taş kolon yapımı genel olarak ikiye ayrılır. Bu yöntemler sıkıştırma yöntemi ve yer değiştirme yöntemidir. Sıkıştırma yönteminde granüler zemin büyük vibratörler ile sıkıştırılarak bir kolon formu elde edilir. Bu yöntem gevşek durumdaki granüler zeminler için uygundur ve yer altı su seviyesi sınırlayıcı etki yapar. Yer değiştirme yöntemi ise iki alt kategoriye ayrılır. Bunlar kuru yöntem ve ıslak yöntemdir. Islak yöntem, özellikle yer altı su seviyesi yüksek olduğu ve zeminin çok yumuşak olduğu durumlarda tercih edilir. Bu yöntemde titreşimli bir prob düşük basınçlı ve yüksek hacimli su jeti ile mevcut zeminde ilerlerken zemini yerinden çıkarır ve bir boşluk oluşturur. Boşaltılan alanlara düzenli bir şekilde taş kolonlar imal edilir. Kuru yöntem ise yer altı su seviyesinin düşük olduğu ve zeminin sıkı olduğu durumlarda tercih edilir. Bu yöntemde ise titreşimli prob hava basıncı ile zemini yatay yönde yer değiştirir ve ortaya çıkan boşluğa taş kolonlar imal edilir.

Das vd., (2023) bu çalışmalarında Hindistan'daki Vallur Petrol Terminali'nde taşıma kapasitesi, oturma ve sıvılaşma problemlerini taş kolon ile zemin iyileştirme yöntemini kullanmışlardır. Proje sahasındaki zemin, üsteki tabakada çok yumuşak siltli kil ve alttaki tabakada sıvılaşma riski taşıyan gevşek siltli kum tabakalarından oluşmaktadır. Zemin iyileştirmesi yapılmadan önce proje gereksinimlerini karşılayamamış; taşıma kapasitesinin düşük, oturma miktarının ise yüksek olduğu tespit etmişlerdir. Daha sonra tüm zemin katmanlarını analitik hesaplamalar ve Plaxis 2D sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal analizler ile modellemişlerdir. Analizler sonucunda taş kolonların zemin taşıma

kapasitesini 3 ila 4,5 kat arttığı ve oturma miktarının %84-92 oranında azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, taş kolonların yerleştirilmesiyle fazla boşluk suyu basıncının belirgin bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Taş kolon ile zemin iyileştirmede sığ temellerin altındaki gevşek zeminlerin sıvılaşma riskini azaltmak ve taşıma kapasitesini iyileştirmek için etkili bir çözüm olduğunu kanıtlamışlardır.

2.1.2 Kimyasal stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon yöntemi, mekanik stabilizasyon yönteminin yetersiz olduğu durumda, zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla içine farklı katkı malzemeleri eklenerek (imento, kireç, uçucu kül, bitüm, polimer vb.) zeminin mukavemetini artırmak, dayanıklılığı güçlendirmek, taşıma kapasitesini artırmak, geçirimliliği azaltmak ve oturmaları en aza indirmek için kullanılan zemin iyileştirme yöntemidir. Kimyasal katkılar kullanılarak zemin iyileştirme en eski ve en yaygın yöntemdir. Antik Yunan, Mısır ve Roma dönemlerine kadar uzanmaktadır. İlk olarak ABD Ordusu Mühendis Su Yolu Deney İstasyonunda (WES, 1977) yürütülen bir çalışma, potansiyel stabilizatörler olarak değerlendirilen malzemelerin kapsamlı bir raporunu vermektedir. Belgede yedi ana malzeme kategorisi listeleniyor: asitler, asfaltlar, çimentolar, kireçler, reçineler, tuzlar ve diğerleri. Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri imento, bitüm, kireç ve bazı özel kimyasal bileşiklerdir (Hausmann, 1990).

2.1.1.1 Kireç ile zemin stabilizasyonu

Kireç zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir. Romalılar tarafından Appian Yolu'nu inşa etmek için kimyasal stabilizasyon yöntemi olan kireç kullanımını başlatarak tarihe geçmişlerdir. Zeminin mevcut fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, kireçle karıştırılarak değerştirilmesi ve bu sayede mukavemet ile dayanıklılığın artırılması işlemine kireç stabilizasyonu denir (şekil 2.6). Zemin iyileştirmesinde yaygın olarak kullanılan kireç tipleri genellikle kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) veya kalsiyum oksit (CaO) içerir. Bu iki kireç türü, zeminin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla sıklıkla tercih edilir.



Şekil 2.6. Kireç zemin stabilizasyonunun sahada uygulanması (Engineering Civil, 2024)

Kireç kullanılarak killi zeminlerin iyileştirilmesinde, genellikle sönmüş kireç (Ca(OH)_2) tercih edilir. Sönmemiş kireç (CaO), yüksek yanma potansiyeline ve tehlikeli özelliklere sahip olduğundan dolayı çoğunlukla tercih edilmez. Zemine kireç ilavesiyle gerçekleştirilen kireç stabilizasyonu, kireç ve su arasındaki reaksiyon sonucunda kalsiyum oksit (CaO) veya kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) gibi bileşiklerin oluşumuyla gerçekleşir. Bu kimyasal olay, kireçli zeminin mukavemetini artırır zeminin mekanik ve hidromekanik özelliklerini iyileştirir. Bunun yanı sıra kireç, toprak içerisindeki organik maddelerin ayrışmasını hızlandırarak zeminin daha stabil bir yapı kazanmasına yardımcı olur. Farklı zemin türlerine göre etkili bir iyileştirme için gerekli olan kireç miktarları, Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Tavsiye Edilen Kireç Karışım Oranları (Ingles,& Metcalf, 1972).

Zemin Cinsi	Modifiye için (%)	Stabilizasyon için (%)
Plastik killer	1 - 3	3 - 8
İnce çatlaklı kaya	2 - 3	-
Yüksek plastisiteli killer	1 - 3	3- 10
Siltli killer	1 - 3	2 - 4
İyi derecelenmiş killi çakıl	1 - 3	- 3
Organik zeminler	-	-
Kumlu Killer	-	- 5
Kumlar	-	-

Kavak, (1996) tarafından zemin stabilizasyonu üzerine yapılan araştırmalarda, özellikle kireç, çimento ve bitümlü katkı maddeleri sıklıkla tercih edilmektedir. Kireç ile yapılan stabilizasyon uygulamalarının sonucunda, zeminin kısa sürede optimum su muhtevasında artış gözlemlenmekte, proktor yoğunluğu azalma eğilimi göstermekte, plastisite indisinde düşüşler yaşanmakta, proktor eğrisi daha yatay bir hale gelmekte ve CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerlerinde iyileşmeler görülmektedir.

Tonoz vd., (2004), Ankara killlerinin kireç ile stabilizasyonunun serbest basınç dayanımındaki değişimlerini incelemişlerdir. Araştırma kapsamında, %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç içeren altı farklı zemin karışımı hazırlanmıştır. Çalışmada, 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri boyunca serbest basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi de önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, optimum kireç oranı %4 olarak belirlenmiştir. Kür süresinin 28 gün olduğu ve bu süre zarfında serbest basınç dayanımlarında %85'e kadar artışların gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, kireçle stabilizasyon yönteminin etkinliği için en az 28 gün süresince kür uygulamasının yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Zhang (2008), yüksek likit limitli killerin kireçle stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest şişme kapasitesi ve CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kür süreleri 3, 7 ve 14 gün olarak belirlenmiş olup, kireç oranları %2, %4, %6 ve %8 olarak seçmişlerdir. Çalışmadan elde edilen bulgularına göre, artan kireç miktarıyla birlikte optimum su içeriği, plastik limit ve CBR değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Buna karşılık, likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme değerlerinin azalma eğilimi gösterdiği tespit etmişlerdir. Ayrıca, %2 kireç içeren ve 14 gün boyunca kür koşullarında bekletilen numunelerde şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı bir diğer önemli sonuç olarak göstermişlerdir.

Kızılçelik (2010) tarafından yapılan çalışmada, Kocaeli ili Uzunçiftlik bölgesinden alınan yüksek plastisiteli ve su içeriği yüksek killi zeminin kireçle iyileştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada, zemine doğal su içeriğinde sönmüş ve sönmemiş kireç eklenmiştir. %5 kireçli ve katkısız durumdaki mukavemetler karşılaştırılmıştır. Ayrıca, deneylerde kireç katkılı numunelerde boy kısalmasının %15'ten %1,5'e düştüğü gözlemlenmiştir. Sönmüş ve sönmemiş kireç ile yapılan deneylerin sonuçlarının birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. Sonuçlara göre, artan mukavemet değerleri ve azalan deformasyonlar sayesinde kireç karışımının yol alt yapısında kullanılabileceği ve bunun yol kesitlerini küçülterek maliyetlerin

düşmesine katkı sağlayabileceği vurgulanmıştır. Sönmüş kireç eklenen zeminde, kirecin etkisiyle su içeriğinin azalarak optimum su içeriğine yaklaştığı ve zeminin mukavemetinin arttığı ifade edilmiştir.

Di Sante vd., (2014) bu çalışmada kil zeminin kireç ile karıştırılarak yapılan stabilizasyon işlemlerinin ardından kür süresi boyunca oluşan fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kireçle karıştırılmış zeminin pH ölçümleri, SEM analizleri, hidrolik geçirimsizliklerinin belirlenmesi ve kimyasal analizler ile zaman içindeki mekanik ve hidrolik performansları incelenmişlerdir. Ardından killi zemine kuru ağırlığının %5'i oranında kireç eklenerek kompaksiyon işlemleri yapılmıştır. Oluşan karışım 2, 7 ve 28 günlük kür süresine tabi tutularak bu karışıma ait SEM analizleri yapılmış ve kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen mikroyapısal değişiklikler incelenmiştir. Sonuç olarak kireçle karıştırılan killi zemin numunesinin hızlı bir şekilde suya doymun hale getirilmesinin, kimyasal reaksiyonların daha düzenli bir şekilde gelişmesini sağlamış. pH ölçümlerinin, kireçle stabilize edilmiş bir zemin elde etmek için gereken reaksiyon sürelerini izlemek ve test sonuçlarının doğru yorumlanması için yararlı bir yöntem olduğu bulunmuştur. Ayrıca, kür koşullarının numunelerin hidrolik iletkenliği önemli ölçüde etkileyerek doymun olmadan koşullarda kür süresi arttıkça hidrolik iletkenliğin azaldığını bulunmuştur.

Bozkurt (2020) bu çalışma kapsamında yüksek plastisiteli bir killi zeminin kireç katkısı ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesindeki rolü incelenmiştir. Bu çalışmada, Yalova bölgesinden temin edilen sarı renkli kil numunesi üzerinde sınıflandırma deneyleriyle CH tipi kil olduğu saptanmıştır. CH sınıfına ait killi bir zemine %2, %3 ve %4 oranlarında sönmüş kireç ile %3 oranında sönmemiş kireç ekleyerek numunelerin mukavemet özellikleri incelenmiştir. Daha sonra katkısız kilin ve %2, %3 ve %4 oranında kireç katkılı numunelerin kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda katkısız ve kireç katkılı hazırlanan numuneler, anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük süreler sonunda serbest basınç mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Serbest basınç deney sonuçlarına göre en uygun iyileştirme kireç oranının %3 olduğu belirlenmiş ve 28 günlük kür süresi sonunda %3 sönmüş kireç katkısının serbest basınç mukavemetini katkısız kile numunesine göre yaklaşık 4 kat artırdığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak belirli oranlarda kireç karışımı kullanılarak killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

2.1.1.2 Çimento ile zemin stabilizasyonu

Zeminlerin çimento ile stabilizasyonu, toz haline getirilmiş zeminlerin su ve çimento ile karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmesi ve ardından bu karışımın yüksek yoğunlukta sıkıştırılarak fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı hale getirilmesi işlemidir. Zeminin türü ve kullanılan agregaların boyutuna bağlı olarak, çimento stabilizasyonunun çeşitli varyasyonları bulunmaktadır. Çimento, suyla reaksiyona girdikçe, sertleşme sonrasında zemin parçacıklarını saran veya agregalar arasında güçlü bağlar oluşturan hücresel bir yapı oluşur, böylece dayanıklı bir yapısal malzeme elde edilir. Eğer zemin parçacıkları çimentonun boyutundan daha küçükse, zemin parçacıkları çimento parçacıklarını saran ve daha zayıf bağlar oluşturan bir yapı oluşturur. Ancak, uygun şekilde karıştırıldığında ve inşa edildiğinde, çimento ile stabilize edilmiş bir zemin sistemi, ıslanma-kuruma veya donma-çözülme döngülerine maruz kalsa bile, genellikle amaçlanan performansı sergiler.



Şekil 2.7. Çimento ile zemin stabilizasyonu (Cement Treated Material, 2024)

Çimento ile zemin iyileştirme, uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. İlk olarak 1917’de İngiltere’de zemin iyileştirme çalışmalarında, 1920’li yıllarda ise Amerika Birleşik Devletleri’nin eyalet karayollarının güçlendirilmesinde uygulanmaya başlanmıştır. Günümüz koşullarında Türkiye’de de sıkça tercih edilen bu yöntem, özellikle artan trafik yüklerinin etkisiyle yol temel ve alt temel katmanlarının iyileştirilmesinde öne çıkmaktadır. Çimento

stabilizasyonu hem karayollarında hem de havalimanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kireçle zemin stabilizasyonuna benzer şekilde zeminlerin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini artırmak için etkili bir çözüm sunmaktadır. Farklı zemin sınıfları için gerekli çimento oranları, zemin özelliklerine göre değişiklik göstermekte olup, bu oranlar Tablo 2.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Miktarı (Yılmaz, 2015).

AASHTO Zemin Sınıfı	Birleştirilmiş Zemin Sınıfı (USCS)	Çimento İçeriği (% ağırlıkça)	Çimento İhtiyacı Sınırları(%) hacimce (%) ağırlıkça	
A-1-a	GW,GP,GM,SW,SP,SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM,GP,SM,SP	6	7-9	5-8
A-2	GM,GC,SM,SC	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL,ML	10	8-12	7-12
A-5	ML,MH,CH	10	8-12	8-13
A-6	CL,CH	12	10-14	9-15
A-7	MH,CH	13	10-14	10-16

Sivapullaiah ve vd., (2003) çalışmasında, kırmızımsı doğal zemin üzerine %20 bentonit, %1 çimento ve %1 kireç ilave edilerek zemin davranışı incelenmiştir. Numuneler, kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası temel alınarak hazırlanmıştır. Farklı katkı oranlarıyla hazırlanan numuneler 0, 7 ve 28 gün boyunca kür edilerek konsolidasyon ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, zeminin kompaksiyon özelliklerinde değişimler gözlemlenmiştir. Optimum su muhtevasında herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen, kuru birim hacim ağırlık artışı tespit edilmiştir. Kireç veya çimento katkısının zemin stabilitesini artırmadığı, ancak kirecin sıkışabilirliği çimentodan daha fazla artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, bentonit ve kireç karışımının 7 gün sonrasında dayanımı artırdığı, çimento ve bentonit karışımının ise 7 gün içinde hızlı bir dayanım artışı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Hassan ve Ravaska (2009), Finlandiya'nın çeşitli bölgelerinden alınan üç farklı yüksek plastisiteli killer üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, bu killerin farklı oranlarda çimento ile karıştırılmasıyla çimentonun etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda serbest basınç mukavemetinin arttığını, sıkıştırılabilirliğin ise artan çimento miktarı ile azaldığını ve plastik limitin yükseldiğini göstermişlerdir.

Şahbaz (2020), Bu çalışmada düşük plastisiteli killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için çimento ve polipropilen lif katkı malzemelerinin etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarında, doğal zemine farklı oranlarda %5, %10 çimento ve %0,5, %1 ve %1,5 polipropilen lif kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı, kıvam limitleri, kompaksiyon ve şişme deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda, çimento katkısının killi zeminlerin stabilizasyonunu önemli ölçüde arttırmıştır. Özellikle kür süresinin artmasıyla birlikte çimento katkılı numunelerde dayanımın sürekli bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Polipropilen lif katkısı ise zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmiş ancak polipropilen liflerin zeminde topaklanması nedeniyle serbest basınç dayanımında hafif bir azalmaya neden olmuştur. Bu çalışma, zayıf zeminlerde yapı temellerinin güvenli şekilde inşa edilebilmesi için çimento ve polipropilen lif kullanımının etkili bir çözüm göstermektedir.

2.1.1.3 Bitüm ile zemin stabilizasyonu

Bitüm ile yapılan ilk zemin iyileştirme çalışmaları, 1925-1932 yılları arasında ABD'nin Missouri, Güney Carolina, Iowa ve Nebraska eyaletlerinde uygulanmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmalarında, yol altyapısının sıvı asfaltla karıştırılmasının, sağlam bir temel oluşturduğu gözlemlenmiştir (Cilason, 1964). Kireç ve çimento ile yapılan zemin iyileştirmeleri sonucunda zeminin mukavemeti artarken, bitüm ile yapılan iyileştirmelerde ise zeminin suyun olumsuz etkilerinden korunması ve zemin danelerinin birleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bitümlü zemin stabilizasyonunda, zemin özellikleri ve iklim koşullarına bağlı olarak asfalt ve katran gibi maddeler kullanılır. Bitüm, özel tankerler aracılığıyla zemine püskürtülerek yüzeyle etkileşime girer ve zeminin dağılmasını önleyerek dayanıklılığı artırır (Şekil 2.8). Bu uygulama, zemin parçacıklarını birleştirerek su ve rüzgâr erozyonuna karşı direnci artırır. Ayrıca, su oranı yüksek bölgelerde tercih edilmekte ve karayolu yapımında yaygın olarak kullanılır (Uzuner, 2007). Bitüm, petrol türevli, siyah, yapışkan ve sıcakken akışkan bir malzemedir. Zeminlerin boşluk oranları yüksek olduğu için geçirimsizliği artırmada kimyasal katkı olarak kullanımı genellikle pratik ve ekonomik değildir; ancak, bitümlü zemin iyileştirilmesiyle zeminin geçirimsizliği önemli ölçüde artırılabilir. Bu sayede, zemin kaplamalarında sağlam bir alt temel oluşturulur. Kireç ve çimento gibi malzemelere göre daha pahalı olduğundan daha az tercih edilse de kumlu zeminlerde, özellikle kaplama temellerinde ideal bir malzemedir.



Şekil 2.8. Bitüm ile zemin stabilizasyonu (Tipco Asphalt, 2024)

Özaydın, (1989) Asfaltla yapılan stabilizasyon, zemini suyun olumsuz etkilerinden koruyarak daneleri bir arada tutar. Bitüm, danelerin yüzeyini kaplayarak ince daneli zeminlerin suyla temas ederek yumuşamasını engellerken, iri daneli zeminlere kohezyon kazandırır. Bu yapışma sonucunda zemin, rüzgâr ve su erozyonuna karşı daha dayanıklı hale gelir

Uzuner (2000) tarafından belirtildiği gibi, bitümlü malzemelerin en önemli özelliklerinden biri, zemin içerisindeki daneler arasındaki geçirgenliği azaltmasıdır. Stabilize edilecek zeminde kil ve organik maddelerin bulunmaması durumunda, bitüm daneler arasında yapışmayı sağlarken, zemini suya karşı geçirimsiz hale getirerek daneler arasındaki su bağlarını da koruyabilir veya her iki işlevi aynı anda yerine getirebilir. Bu stabilizasyon yönteminde genellikle %5-10 oranında asfalt veya katran katkı maddesi olarak kullanılır. Bitümlü stabilizasyon çoğunlukla karayolu yapımında ve yüzey kaplama işlemlerinde tercih edilmektedir.

Shah ve Ahmad (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bitüm emülsiyonu ekleyerek alüvyonlu zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirilmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, alüvyonlu zeminin mukavemetini artırmak ve bunu CBR değeri dikkate alınarak bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır; bu yaklaşımın maliyet açısından uygun bir çözüm olabileceği ifade edilmiştir. Katyonik bitüm emülsiyonu (CMS) ve az miktarda çimento ile stabilizasyon sonucunda zemin dayanımının kayda değer şekilde artırılabilceği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle Katyonik bitüm emülsiyonu ile alüvyonlu zemin için

uygun karışım parametreleri belirlenmiş; daha sonra kuru yoğunluk ve CBR değerlerindeki değişimleri analiz etmek amacıyla dört farklı malzeme durumu üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneyler, dört farklı karışım durumunda (saf zemin, %3 bitüm emülsiyonu eklenmiş zemin, %3 bitüm emülsiyonu ve %2 çimento eklenmiş zemin, %3 bitüm emülsiyonu, %2 çimento eklenmiş ve 5 saat bekletilmiş zemin) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, bitüm emülsiyonunun ve çimentonun alüvyonlu zeminlerin stabilizasyonunda etkili olduğunu ortaya koymuş; özellikle yol alt temel malzemesi olarak kullanıldığında hem ekonomik bir çözüm sunduğunu hem de zemin dayanımına önemli ölçüde katkı sağladığını göstermiştir.

2.1.1.4 Uçucu kül ile stabilizasyon

Kömür yakıtlı elektrik ve buhar üretim tesislerinde elektrik enerjisi üretimi sırasında, düşük kalorili kömürlerin yakılması sonucunda uçucu kül adı verilen atıklar ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu uçucu külün depolanması ve taşınması önemli bir çevresel sorun oluşturabilmektedir. Uçucu küller depolama için genellikle katı atık depolama sahaları ya da su ile karıştırılarak kül barajlarına pompalanmaktadır. Bu atık ürün birçok endüstriyel imalatlarda kullanılmasına rağmen her yıl depolanan miktar artmaktadır (Ferguson ve Levorson 1999; White vd., 2005; Yeboah ve Burns 2011). Atık olarak ortaya çıkan uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde, inşaat sektöründe önemli bir potansiyele sahip olduğu özellikle çimento ve hazır beton üretiminde çimentonun bir kısmının yerine kullanıldığında, maliyetlerin düşürülmesinin yanı sıra betonun çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin iyileştiği bilinmektedir. Uçucu kül, zeminle karıştırıldığında kimyasal reaksiyonlarla bağlayıcı özellik göstererek zeminin mekanik özelliklerini iyileştirir (Şekil 2.9). Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda da etkili ve ekonomik bir çözüm sunabildiğini ortaya koymuştur. Uçucu kül; altyapı ve taban malzemesi olarak, alt drenaj katmanında, dolgu stabilizasyonunda, iri daneli malzemelerin boşluklarını doldurmakta ve kireç ile zemin enjeksiyonunda kullanım alanına sahiptir.



Şekil 2.9. Uçucu külün ile zemin stabilizasyonu (Baxmeyer Construction, 2024)

Uçucu küller ASTM C 618-01 kimyasal bileşimine göre C ve F sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. Kimyasal bileşiminde %10'dan fazla kireç (CaO) içeren küller C sınıfı, daha az kireç içerenler ise F sınıfı olarak sınıflandırılmaktadır. Antrasit ve bitümlü kömürleri yanmasıyla F tipi uçucu küller elde edilir; bu küller düşük kireç içeriğine sahip olup, silis ve alümina içerirler. Bu nedenle, tek başlarına çimentolaşma özellikleri zayıftır, ancak normal ısı derecesinde ve nemin etkisiyle birlikte kireç ile reaksiyona girdiklerinde puzolanik özellikler göstermektedirler. C tipi uçucu kül ise linyit ve kömürün yanmasıyla elde edilir ve yüksek miktarda kireç (CaO) içerir. C tipi uçucu küller, içerdiği kireç miktarı nedeniyle herhangi bir ek katkı maddesine ihtiyaç duymadan bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu özellikleri sayesinde C sınıfı uçucu küller, geleneksel geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. (ASTM C 618; Tumluer, 2006).

Murmu vd. (2018) Hindistan'ın Maharashtra eyaletinin Nagpur bölgesinde bulunan zemin numunesine kıvam deneyleri (Atterberg deneyleri) sonucunda yüksek plastisiteli kil olduğunu ve Sipat Ulusal Termik Santrali temin edilen F sınıfı uçucu külün farklı oranlarda karıştırılması, bu karışıma geopolimer olarak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisini eklenerek gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucu zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde serbest basınç dayanımı (UCS), şişme potansiyeli (FSR), büzülme sınırı testleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda geopolimerin, uçucu kül ile zemin iyileştirilmesinde 7, 14, 28 ve 90. günlerde kürlenme süresinde zemin ile uçucu kül karışımlarının serbest basınç mukavemetlerini önemli ölçüde arttırdığını ve şişme-büzülme

davranışını azalttığını göstermişlerdir. Bu nedenle uçucu kül ile geopolimerin karışımı geleneksel stabilizatörlere sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Wong vd. (2020) Bu çalışmada, yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül ve geri dönüştürülmüş tuğla tozu kullanarak geopolimer bağlayıcı malzemeler hazırlamışlardır. Farklı NaOH konsantrasyonları (6, 8 ve 10 M) ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları (1.5, 2.0 ve 2.5) ile karışımlar oluşturmuş ve bu karışımları akışkanlık ve basınç dayanımı su emilimi özellikleri açısından değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, tuğla tozunun karışımların akışkanlığını en çok etkileyen faktör olduğunu tespit etmişlerdir. %10 tuğla tozu içeren ve 10 M NaOH ile $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2.5 olduğu karışımlarda 28 günlük basınç dayanımının 44,21 MPa'ya ulaştığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, tuğla tozu oranının %10'un üzerine çıkarılması durumunda, karışımdaki kristalize SiO_2 miktarının artışıyla bağ yapısının düzensizleştiği ve dayanımın azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, NaOH konsantrasyonunun su emilimi üzerinde daha etkili olduğu, ancak tuğla tozunun bu özellikler üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Sonuç olarak, araştırmacılar uçucu kül ve geri dönüştürülmüş tuğla tozunun uygun oranlarda kullanımıyla sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı geopolimer malzemelerin üretilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Bilici vd. (2020) Eskişehir ilinde kiremit üretimi için kullanılan kil zeminine, Kütahya Seyitömer Termik Santrali'nden atık malzeme olarak uçucu kül katılarak zeminin dayanımına olan etkileri incelemişlerdir. Bu çalışmada, zemin iyileştirme için kullanılan uçucu kül hem çevresel fayda sağlamakta hem de ekonomik katkı sunmaktadır. Bu amaçla, kömürle çalışan termik santrallerden elde edilen uçucu kül ile kil zemin farklı oranlarda karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan zemini tanımlamak için elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limitleri deneyleri sonucunda düşük plastisiteli kil olarak sınıflandırmışlardır. Atık olarak kullanılan uçucu kül ise ASTM C 618 standardına göre F sınıfına girmektedir. Uçucu kül ile zemin numunesi farklı oranlarda (%3, %6, %9, %12, %15) karıştırılmış ve bağlayıcı reaksiyon olarak %3 oranında kireç sabit tutularak 0, 7 ve 28 günlük kür süreci sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda zemin dayanımında en uygun katkı oranı %3 kireç + %12 uçucu kül olduğu belirlemişlerdir ve zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini olumlu etkiler sağladığını göstermişlerdir.

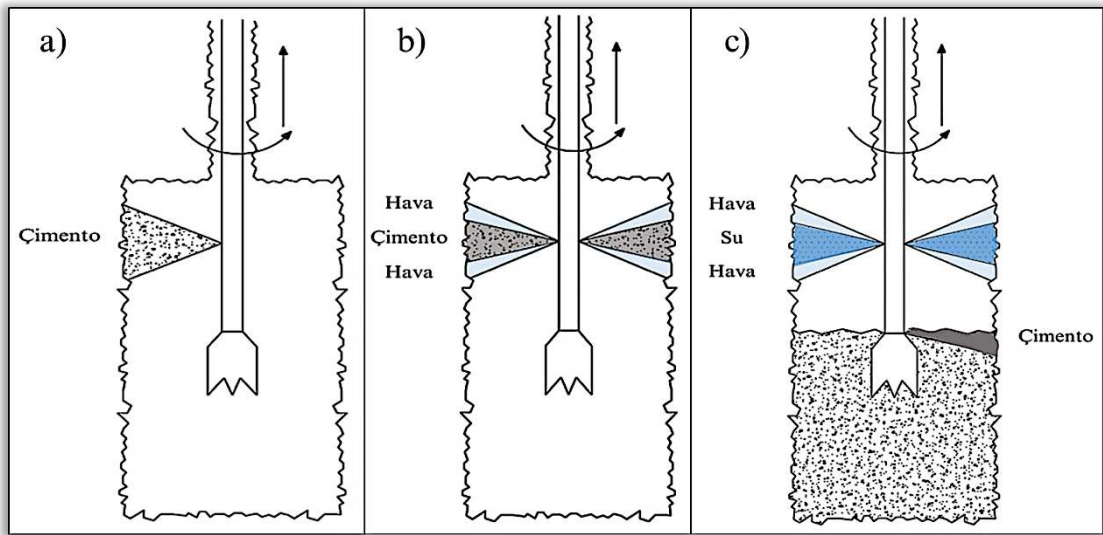
Uçucu kül sahada zemin iyileştirmesi için İlk olarak, mevcut zemin düzeltilir ve uçucu kül zemine katmanlar halinde serilir. Ardından, optimum su içeriği sağlamak için karışım homojen

bir şekilde ıslatılır ve karıştırılır. Bu aşamadan sonra sıkıştırma işlemi yapılır. İstenilen yoğunluğa ulaşıldıktan sonra kontrol testleri yapılır ve karışımın kalite standartlarına uygunluğu kontrol edilir.

2.1.3 Jet grout

Jet grout yöntemi ilk olarak 1965 yılında Japonya’da kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek basınçlı sıvı jetleri yardımıyla zemine çimento enjekte ederek iyileştirme sağlayan bir zemin güçlendirme tekniğidir. Bu yöntem, 1970’lerde Batı Avrupa’ya, 1980’lerin başında ise Amerika’ya yayılmaya başlamıştır. Jet grout yöntemi, taşıma gücü zayıf zeminlerde taşıma kapasitesini artırmak, zeminin su sızdırmazlığı artırmak ve zemini stabilize etmek için kullanılır. Bu yöntemde üç ana teknik vardır: Bunlar, tek akışkanlı jet grout, iki akışkanlı jet grout ve üç akışkanlı jet grout olarak adlandırılır.

Tek akışkanlı jet grout da sadece çimento şerbeti yüksek basınç ile enjekte ederek kullanılır. İki akışkanlı jet grout da çimento şerbeti ile hava jeti eklenerek etki alanı genişletilerek daha etkili bir karışım sağlanır. Üç akışkanlı jet grout sistemde ise çimento şerbeti, su ve hava jetleriyle yüksek basınçta zemine enjekte edilerek daha homojen bir şekilde karıştırılır. Jet grout yöntemiyle yapılan zemin iyileştirme teknikleri Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Jet grout zemin iyileştirmede yöntemleri (a) Tek Akışkanlı Sistem, (b) İki Akışkanlı Sistem, (c) Üç Akışkanlı Sistem

Njock vd. (2018) İngiltere’de yapılan jet grout yöntemi zamanla daha büyük geometrik yapılar, uygulama kolaylığı, ekonomik olarak uygunluğu ve daha iyi mekanik özellikler sağlama

ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde geliştirildi. Bu çalışmada, jet grout tekniğinin temel kavramlarını ve ilgili vaka analizleriyle geliştirilmesi ve uygulanmasına ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. Çalışmanın temel amacı, ekonomik verimlilik ve kalite kontrol açısından jet grout uygulamaları için uygun koşulları belirlemektir. Bu doğrultuda, jet grout yönteminin artan ihtiyaçlara cevap verecek şekilde nasıl geliştirildiğ i ve iyileştirildiğ i tarihsel olarak incelenmiştir. Makalede, iki akışkanlı sistemin, tek akışkanlı sisteme göre aynı jet enerjisi kullanıldığında iki kat daha etkili olduğ u kanıtlanmıştır. Ayrıca, iki akışkanlı ve üç akışkanlı jet grout yöntemlerinin uygulama süresi ve delme işlemleri açısından avantaj sağladığ ı vurgulanmıştır. Jet grout uygulamaları sırasında kalite kontrolünün önemi vurgulanmakta ve jet kolonlarının kalitesini etkileyen bir takım temel faktörlere dikkat edilmektedir. Grout harcı için kullanılan imento oranı, su/imento oranı ve imento şerbetine eklenen sodyum silikat oranı bu unsurlar arasında yer almakta ve bu faktörlerin jet kolonlarının kalitesi üzerinde doğrudan etkisi olduğ u ifade etmişlerdir. Yanlış ya da fazla miktarda sodyum silikat kullanımı, jet kolonlarının mekanik özelliklerine ve ekonomik verimliliğ ine olumsuz etki yapabileceğ ini belirtmişlerdir.

Mısıır (2020) Jet grout yöntemiyle Konya ili Meram ilçesinde kohezyonlu bir zemin üzerine inşa edilecek bir yaşam kompleksi için temel zemin güçlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada taşıma gücü ve oturma problemleri nedeniyle 3351 adet 60 cm çapında ve 15 metre uzunluğ unda jet grout kolonları imal edilmiştir. İmal edilen 3351 adet kolonun kalite kontrolü yapılabilmesi için sahada süreklilik ve yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada rastgele seçilen 25 jet grout kolonu üzerinde yükleme test deneyi yapılarak deplasman tahminleri yapılmıştır. Sonuç olarak güçlendirme projesinin emniyetli bir şekilde uygulandığ ı ve yeterli zemin özelliklerini sağladığ ı tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında ise yükleme-boşaltma döngüsüne bağlı olarak oluşabilecek deplasmanların tahminin de Quasi-Newton eğitim algoritması tabanlı yapay sinir ağları yöntemi ile yapılmıştır. Yapay sinir ağı sistemi yöntemiyle elde edilen verilerden girdi olarak jet grout kolon çapı, kazık uzunluğ u ve uygulanan aksenal yük ile güçlü bir orantı göstermektedir.

Elahi vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, zemin iyileştirmek amacıyla zemin-imento kolonları yöntemi ve bu yöntemin uygulanması için en yaygın olarak kullanılan jet grout yöntemi kullanılmıştır. İran'da gerçekleştirilen projede 4, 8, 15 metre uzunluğ unda ve 80 cm çapında zemin-imento kolonlarını jet grout yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu zemin-imento kolonları sayesinde iyileştirme ve kazı duvarına ait stabilizasyon değerlerindeki performansı ölçmüşlerdir. Gerçekleştirilen bu iyileştirmenin öncesi ve sonrasına

ait zemin çökme oranları karşılaştırıldığında, iyileştirme işlemi gerçekleştirilmeden önce ortalama olarak 186 mm olan çökme miktarı, jet grout yöntemi ile yapılan iyileştirme sonrasında ortalama olarak 68mm civarlarına ulaştığı görülmüştür. Zemine uygulanan zemento kolonlarının jet grout yöntemi ile iyileştirilmesinden sonra temelde bulunan çökme miktarının büyük bir oranda azaldığı görülmüştür. Bunlara ek olarak, gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda uygulanan bu yöntemin istinat duvarlarının stabilizasyonu için çok etkili olduğu görülmüştür. İstinat duvarların tepe noktalarının maksimum yer değiştirme değeri ortalama olarak 3,4 cm ve duvarların arka noktalarının maksimum çökme değeri ise 12 mm ile sınırlı olduğu görülmüştür.

Yalcin vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, harçla karıştırılmış turba zeminine benzer yapıdaki kompozit forma sahip zemine ait taşıma kapasitesi, jet grout kolonları yöntemi kullanılarak performans değerlerini önemli bir miktarda iyileştirebilen bir tasarım parametresi olarak belirtilmiştir. Yeni yapılan endüstriyel bölgelerin gereksinimlerinin ve inşaat yapımı için uygun alanlarda bulunan azalmanın birleşmeye olan etkisinden dolayı yoğun olarak bulunan turba zeminlerine ait taşıma kapasitesinin artırılmasına yönelik çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir. Turba zemini üzerine yapılan çalışmalarda genellikle bozulmuş zemine ait örnekler ele alınmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, eksenel yükleme testleri kullanılmış olup bozulmamış turba zeminlerinin birbirleri ile özelliklerini karıştırmak amacıyla laboratuvar ortamında jet grout cihazı kullanılmıştır. Elde edilen örnekler, özel olarak tasarımı yapılan çelik kutular sayesinde bozulmadan toplanmış olup kutular içerisinde bulunan turba zemini jet grout kolonları yöntemi ile iyileştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda iyileştirilen toprağın davranışlarına ait verileri elde etmek amacıyla PLAXIS 3D simülasyon programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kare temellerde (2 x 2) zemine ait taşıma kapasitesi, iyileştirilmemiş toprağa kıyasla 4 kat, şerit temellerde (3 × 1) ise bu oranın 4,5 kat arttığı görülmüştür.

Wang vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çöp yığınlarından oluşan temeller ile diğer saha temelleri arasında keskin bir fark bulunduğu belirtilmiştir. Çöp yığınlarından oluşan temellerin, düzensiz parçalardan oluşması, dağınık bir yapıda bulunması ve çeşitliliği nedeniyle çalışmalarda referans olarak kullanılabilecek çok az sayıda veri vardır. Çalışma, Shenzhen’de bulunan bir çöp sahasında iyileştirme çalışması yapmak amacıyla İYA’nın yoğun olarak bulunduğu bir çöp yığını üzerinde bulunan yola taşıyıcı tabakasında jet grout yöntemi kullanılarak güçlendirme yapmışlardır. Tek kazıklı ve kompozit yapıda olan bir temele ait taşıma kapasitesi, yüksek basınç oranına sahip jet grout yöntemi ile yapılan kazıklara ait çekme

testi, tek kazıklı ve kompozit yapıda olan temelin taşıma kapasitesi için statik yük testi, tasarımlara ait tahminler ve sayısal analizler yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan jet grout çalışmalarından elde ettikleri sonuçlara göre tahmini tasarıma ait ortalama kolon eksenel yük değerlerinin 267,8 kPa ve saha testine ait eksenel değer ortalama olarak 182,58 kPa ile 196,89 kPa arasında değerler verdiği görülmüştür. Elde edilen bu değerlerin minimum 175 kPa'lık bir özdeğer tasarıma ait yeterlilikleri sağladığı görülmüştür. Tek kazıklı jet grout yöntemi ile oluşturulan kompozit temele ait taşıma kapasitesine ait verileri ABAQUS sayısal simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Tek kazıklı ve kompozit yapıda bulunan temelin taşıma kapasitesine ait karakteristik değer 186,01 kPa olarak elde edilmiştir ve oturma-yük eğrisine ait değişim ile tasarıma ait yeterlilikleri sağlayan saha test sonuçları aynı değerleri vermiştir. Çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda, yüksek basınçlı jet grout yöntemi ile elde edilen kazıklar sayesinde inşaat atıkları ile oluşturulan temellerin yüksek performanslı dayanım sonuçları verdiği görülmüştür.

2.1.4 Geosentetikler ile stabilizasyon

Geosentetikler, polipropilen, polietilen, poliester, poliamid (naylon) ve polivinil klorür gibi sentetik hammaddelerden üretilen ve zemin stabilizasyonu için kullanılan malzemelerdir. Kolay taşınabilir olmaları, hafiflikleri, uygulama kolaylıkları ve uzun ömürleri nedeniyle, geosentetiklerin kullanımı giderek artmaktadır. Zemin mühendisliğinde farklı projelere göre çeşitli işlevler üstlenen geosentetikler, zemin tabakalarını ayırma, filtreleme, geçirimsizlik tabakası oluşturma, güçlendirme, koruma ve erozyondan korunma gibi çok sayıda fonksiyona sahiptir. Geosentetik malzemeler, zemine yerleştirilerek yük dağılımını iyileştirir ve stabiliteyi artırır. Şekil 2.11'deki geogrid veya geotekstil gibi geosentetik malzemeler zeminin yüzeyine serilerek üzerine dolgu malzemesi uygulanır. En yaygın kullanılan geosentetik malzemeler arasında geotekstilller, geogridler, geomembranlar, geonetler, geokompozitler ve geosentetik kil kaplamaları yer almaktadır. Bu malzemeler, uygulama alanlarına göre güçlendirme, drenaj, hidrolik bariyer, tabaka ayırma ve koruma işlevleri görmektedir. Geosentetiklerin bu özellikleri, onları inşaat projelerinde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir.



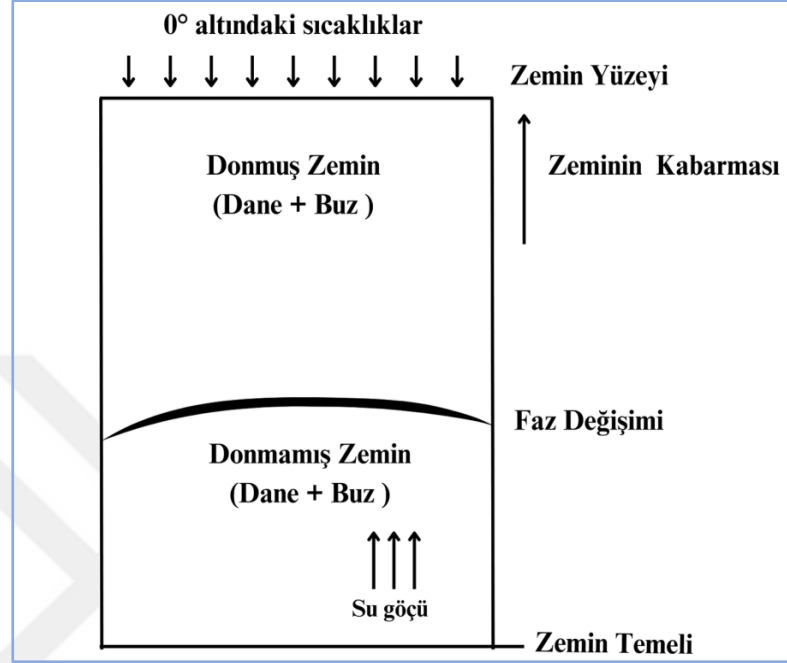
Şekil 2.11. Geosentetikler ile Zemin İyileştirme (Maccaferri, 2024)

Akyıldız (2019), bu çalışmasında geosentetik malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarındaki avantajlarından bahsetmiştir. Geosentetik malzemelerin ekonomik, çevresel ve pratik çözümler sağlayıp bunu yanı sıra özellikle zemin güçlendirme ve stabilizasyon uygulamalarında önemli iyileştirmeler sağladığını ifade etmiştir. Yol inşaatlarında ayırma, güçlendirme, geçirimsizlik sağlama, drenaj gibi çeşitli amaçlarlar kullanılabildiklerini vurgulamıştır. Sonuç olarak, geosentetik malzemelere duyulan ihtiyacın gelecekte daha da yaygınlaşacağını belirtmiştir.

2.2 Zeminlerde Donma ve Çözülme Olayı

Soğuk iklim bölgelerinde zeminler her yıl bir veya daha fazla donma-çözülme döngüsüne maruz kalarak yapısal değişiklikler geçirir. Donma ve çözülme zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişimlere yol açan doğal bir süreçtir. Bu süreç zeminlerin sıkışabilirlik, permeabilite ve mukavemet gibi mühendislik yapılarının performansını olumsuz etkiler. Soğuk iklim bölgelerinde yapılan mühendislik yapılarının tasarımlarında donma-çözülmenin zemin üzerindeki etkisi dikkate alınması gerekmektedir. Donma olayına karşı hassas olan zeminlerde, donmanın ardından hava sıcaklığı yükseldiğinde zemindeki buz mercceklerini eritir. Eriyen su zeminin dane dağılımını bozarak zemini daha gevşek hale getirir ve taşıma kapasitesinde azaltmaya yol açar. Bu durum, donma-çözülme süreçleri sonrasında zeminde oturma ve deformasyonların oluşmasına yol açabilir (Işık, 2014).

Zeminin donma sürecinde, zeminin donmamış bölgesinden donmuş bölgesine doğru bir su hareketi gerçekleşir. Bu hareketle birlikte önce yeni buz mercekleri meydana gelir ve ardından mevcut buz tabakaları su ile beslenerek hacmini artırır. Bu hacim artışı, buz tabakalarını büyütür ve zemin hacminde genişlemeye yol açar ve zeminde dikey yönde yer değiştirme gözlemlenir. Talamucci (2003), bu olayı "don kabarması" olarak adlandırmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Donma süreci (Talamucci, 2003)

Goodarzi vd. (2016), yumuşak bir yapıya sahip olan kilin stabilizasyonu için çimento ve çimento-silika dumanı karışımı kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deney numunelerine, %2.5 ile %20 arasında değişen oranlarda çimento ve çimento-silika dumanı eklenmiştir. Hazırlanan numuneleri 28 güne kadar kürlenirmişlerdir. Kürlenme sonucunda çimento ile karıştırılan numunelerde serbest basınç dayanımında kontrol numunelerine kıyasla 2.5 kata kadar iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Çimento-silika dumanı karışımıyla elde edilen numunelerde ise 28 gün kür sonucunda serbest basınç dayanımında 3 kattan daha fazla performans artışı elde etmişlerdir. Daha sonra kürleme sıcaklığının etkisini incelemek için numunelerin bir setini 40°C’de kürlenmiş ve yüksek sıcaklıkta kürlenen bu numunelerin serbest basınç dayanımı sonuçlarının neredeyse iki katına çıktığını tespit etmişlerdir.

Keskin vd. (2017) Bu çalışmada, katkı malzemesi içermeyen ve katkı maddeleriyle stabilize edilen ince daneli zeminlerin, farklı kür süreleri boyunca donma-çözülme çevrimlerine maruz kalmadan önce ve sonrasında serbest basınç mukavemetlerindeki değişiklikleri incelemişlerdir.

Deneylerde zemin iyileştirmesi amacıyla mermer tozu, pomza tozu ve kireç tozu olmak üzere üç farklı katkı malzemesi kullanılmışlardır. Kullanılan katkı malzemeleri ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında numuneler hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneler, anında, 48 saat, 1 hafta ve 1 ay sonra olmak üzere farklı kür sürelerinin ardından, 1 ve 2 donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak serbest basınç deneyi yapmışlardır. Donma-zlme yöntemi ASTM D500 standardına göre -23 C soğuklukta 24 saat dondurucuda ve +18 C sıcaklıkta 23 saat dış ortamda bekletmişlerdir. Katkısız kil numunelerinde kr süresi arttıkça serbest basınç dayanımı artmıştır ve bu artışın, kr süresi boyunca zemin daneleri arasındaki bağları güçlenmesinden kaynaklandığı düşmüşlerdir. Ancak donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız kil numunelerinde serbest basınç dayanımının da azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Kireç katkısının serbest basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı, %5 pomza katkısının da belirli bir artış sağladığı, ancak %10 pomza katkısının ve mermer tozu katkısının dayanım üzerinde olumlu bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır. Donma-zlme çevrimlerine maruz kalan numunelerde her durumda serbest basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Özellikle kireç ve pomza katkısının zemin yapısında olumlu etkiler sağladığı, ancak donma-çözülme çevrimlerinin bu katkıları olumsuz etkilediği belirtilmiştir. İlk donma-çözülme çevriminde 48 saatlik bir süre boyunca zeminler dayanım kaybı yaşamış, ancak ikinci çevrim sonunda, birinci çevrime kıyasla daha yüksek serbest basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu durumun, ikinci çevrim sırasında geçen ekstra srenin zemin bağlarının yapısını güçlendirerek serbest basınç dayanımının artırmasıyla açıklanabileceği tahmin etmişlerdir. Yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda, kireç ve pomza tozunun katkı oranlarının zemin numunesinin dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu anlamışlardır. Buna karşılık, mermer tozunun serbest basınç dayanımına olumlu bir etkisi olmadığı fark etmişlerdir. Pomza ve kireç tozlarının, kilin mineral yapısına etki ederek, katkı oranına göre zemin bağ yapısında değişiklikler oluşturduğu düşünmüşlerdir. Deneylerde, bir donma-çözülme çevriminin etkisini anlamak için 48 saatlik bir süre gerektiği belirtmişlerdir. İkinci donma-çözülme çevrimi sonunda, ilk çevrimdeki serbest basınç dayanımına göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu artışın sebebinin, iki çevrim arasında geçen sürede zemin bağlarının güçlenmesi olduğu tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, geçen ek srenin zemin yapısına olumlu etkide bulunduğu ifade edilmiştir.

Ding vd. (2018) alışmalarında donma-çözülme döngülerinin imento ve polipropilen (PP) fiber ile stabilize edilmiş kilin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. 7 günlük standart krleme sonrası numuneler, su eklenmeden stabilize edilmiş bir sistem içerisinde donma-çözülme deneyi yapılmış ve ardından serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu

Çalışmada, boyutsal değişim oranları, gerilme-şekil değiştirme eğrileri, pik sonrası gerilme oranı, serbest basınç dayanım değerleri analiz edilmiştir. Bu alışma sonucunda serbest basınç dayanımı, artan imento oranıyla belirgin şekilde artmış ve %0,20 gibi optimal fiber oranında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Donma-özölme çevrimlerinin ilk aşamalarında serbest basınç dayanımında ciddi düşüşler gözlenmiş, ancak beşinci döngüden sonra bu değişimler azalmıştır.



3. MATERYALVE YÖNTEM

Erzincan ili sınırları içerisinde bir inşaat sahasından temin edilen kil numunesinin mühendislik özelliklerini ve davranışını belirlemek amacıyla Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde zemin numunesinin sınıflandırılmasını amaçlamaktadır. Deneyler arasında likit limit, elek analizi, hidrometre deneyi, Atterberg limit deneyleri bulunmaktadır. Yapılan deney sonucunda plastisite kartına göre zemin sınıfı belirlenmiştir. Zemin iyileştirmesine konu olması amacıyla geopolimer bağlayıcı kullanmak için aynı bölgedeki yıkım sahasından tuğla, beton ve cam atıkları temin edilmiştir. Bu temin edilen atık malzemeler ayrıştırılarak, laboratuvarında bulunan öğütücüde ayrı ayrı toz haline getirildikten sonra 200 numaralı elekten, ASTM C136 standardına uygun olarak elenmiştir.

İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kıvamına ve kompaksiyon parametresine etkisini incelemek amacıyla, doğal haldeki kil numunesine %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranında İYA ilave edilerek kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kıvam üzerine etkisi ve kompaksiyon davranışı incelenmiştir.

İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin dayanımına etkisini incelemek amacıyla, geopolimer bağlayıcı oluşturmak için elek altında kalan inşaat yıkıntı atıkları ile kimyasal bir malzeme olan sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak farklı molaritelerde (3M, 6M, 9M ve 12M) geopolimer bağlayıcılar hazırlanmıştır. Daha sonra en uygun molarite belirlendikten sonra bu geopolimer karışımı zemin numunesine %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranında katılarak 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda zeminin drenajsız kayma mukavemeti serbest basınç deneyleriyle belirlenmiştir.

Ayrıca numunelerin donma-çözülme davranışına dayanıklılığını belirlemek amacıyla, serbest basınç numuneleri 28 günlük kür süresi sonunda 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılarak hem donma-çözülme öncesi hem de donma-çözülme sonrası mukavemet davranışları incelenmiştir.

3.1 Materyal

3.1.1 Zemin

Deneyisel çalışma kapsamında, zemin malzemesi Erzincan ilinden doğal olarak temin edilen kil kullanılmıştır. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Laboratuvarında etüvde kurutularak deneyde kullanılmıştır. Küçük daneler haline getirilip ardından bilyeli değirmende öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütülen tozlar 40 No'lu (0,425 mm) elekten geçirilerek eleme işlemi yapılmıştır. Zemin Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

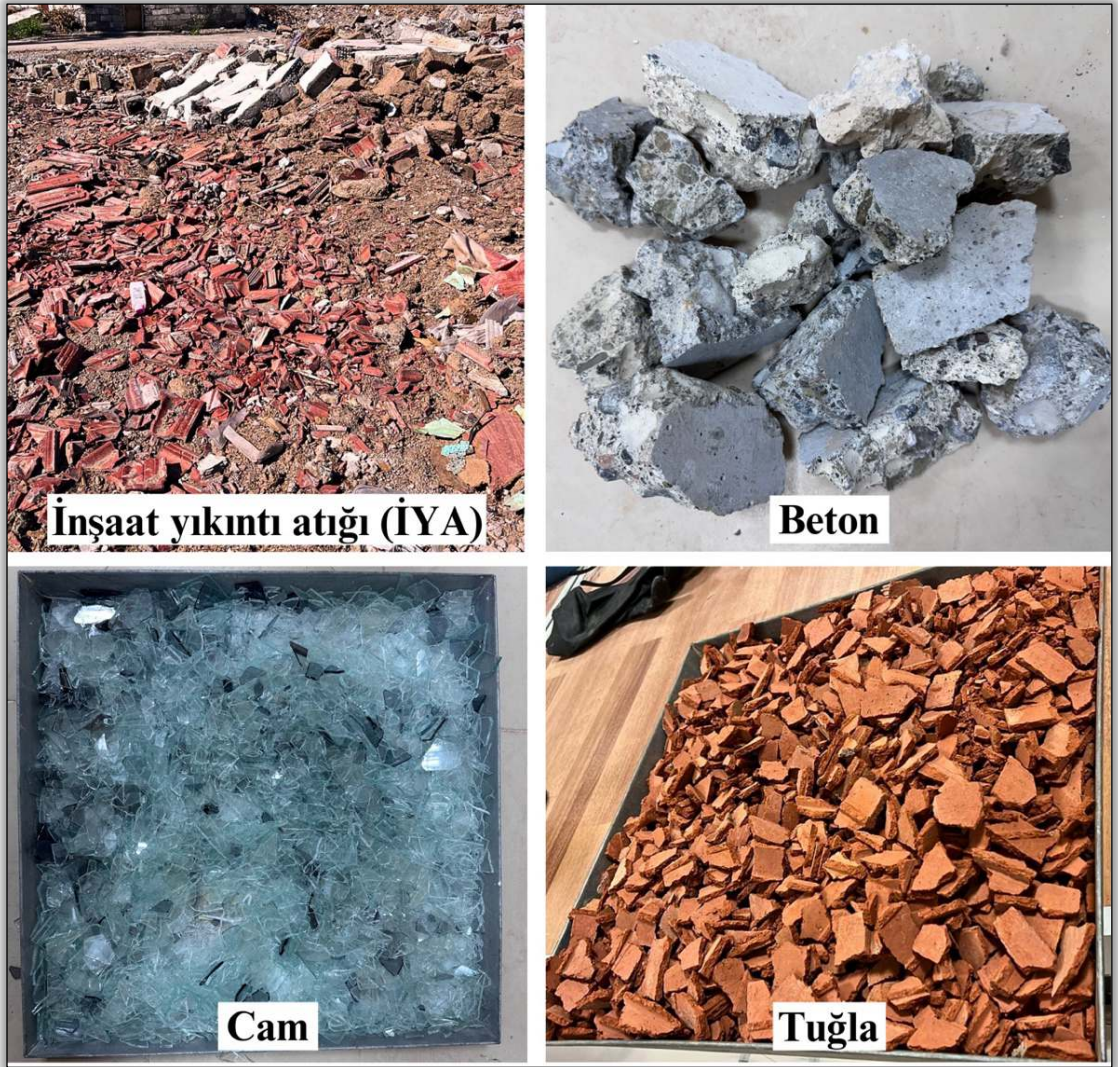


Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kil zemini: (a) Doğal halde elde edilen kil numunesi, (b) Etüvde kurutulmuş ve 40 No'lu (0.425mm) elekten geçirilerek elde edilen kil malzemesi

3.1.2 İnşaat yıkıntı atığı

Zemin iyileştirmesi amacıyla geopolimer bağlayıcı oluşturmak için Erzincan ili sınırlarını içerisindeki yıkım sahasından temin edilen tuğla, beton ve cam atıkları kullanılmıştır (Şekil 3.2). Atık malzemeler laboratuvar ortamında önce fiziksel olarak ayrıştırılmış (Şekil 3.3), ardından her bir malzeme laboratuvarında bulunan öğütücüde ayrı ayrı toz haline getirilmiştir (Şekil 3.4). Öğütme işlemi sonrasında, elde edilen tuğla, beton ve cam tozları, 200 No'lu ($<75 \mu\text{m}$) elekten elenerek ince toz haline getirilmiştir (Şekil 3.5). Geopolimer oluşturulması için bağlayıcı malzeme olarak %60 tuğla tozu, %20 beton tozu ve %20 cam tozu kullanılmış olup, bu karışımlar deneylerde sabit olarak kullanılmıştır.

Literatürde, alümina ve silika içeriğinin fazlalığı nedeniyle tuğla ve kiremit atıklarının beton ve cam atıklarına kıyasla daha yüksek mukavemet sunduğu belirtilmiştir. (Alhawat ve diğ., 2024). Cam atıkları, partiküllerinin kaba yapısı ve düşük alümina ve kalsiyum oksit içeriği nedeniyle zayıf performans sergilerken, tuğla ve kiremit atıkları daha tutarlı bir mikroyapı oluşturmaktadır (Komnitsas vd., 2015; Akduman vd., 2021; Kul vd, 2024). Dolayısıyla, yüksek basınç dayanımı elde etmek için tuğla ve kiremit oranlarının beton ve cam atıklarına göre daha yüksek seçilmesini gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışmamızda, 200 No' lu (0.075 mm) elekten geçen malzemelerle tuğla ve kiremit atıkları %60, beton atıkları %20 ve cam atıkları %20 oranında olacak şekilde kullanıldı; bu sayede hem İYA'ların bertarafı hem de yüksek dayanımlı bir geopolimer bağlayıcı oluşturulması amaçlanmıştır.



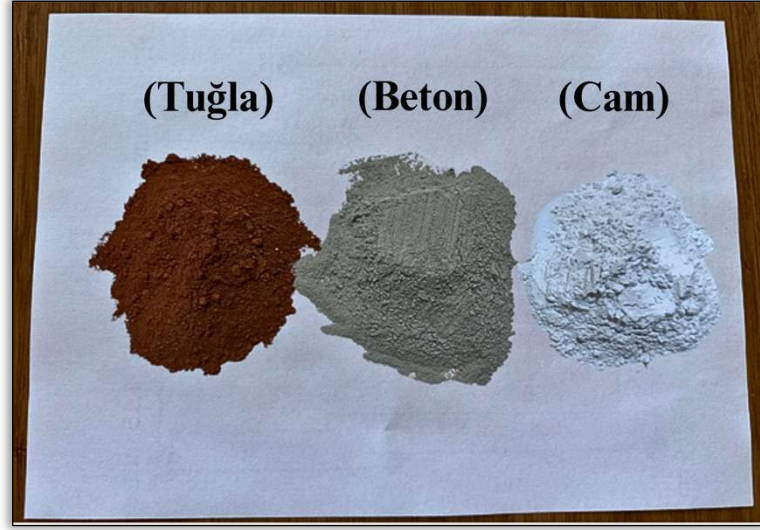
Şekil 3.2. Soldan sağa doğru İnşaat yıkıntı atığı, beton, cam ve tuğla parçaları



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan ayrıştırılmış inşaat atıkları: Tuğla, cam ve beton parçaları



Şekil 3.4. Soldan sağa doğru İYA'nın öğütülmesi ve eleme işlemleri sonrası elde edilen tuğla, beton ve cam tozları



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan İYA'nın öğütülmüş ve 200 No' lu (<75 µm) elekten elenmiş toz hali

3.1.3 Alkali aktivatör

Sodyum hidroksit (NaOH) özellikle geopolimer ile zemin iyileştirmede yaygın olarak kullanılan bir alkali aktivatördür. Sodyum klorürün (NaCl) sulu çözeltilerinin elektrolizi ile üretilen NaOH, katı veya sıvı formda bulunabilir. Katı haldeyken pul, boncuk ve çubuk şeklinde olabilir ve kimyasal içerikleri arasında fark yoktur. NaOH'nin su ile reaksiyonu (çözülme reaksiyonu) oldukça ekzotermiktir ve sulu çözeltilde NaOH, hidroksit (OH-) ve sodyum (Na+) iyonlarına ayrışır. Bu reaksiyon, ortamın alkali seviyesini artırarak sistemin pH'ını yükseltir. Artan alkalite, bağlayıcı malzemelerin yapısındaki Al ve Si minerallerinin çözülme derecesini de artırır. Kolay erişilebilirliği, yüksek kalite standardı ve ekonomik açıdan uygun maliyeti sayesinde dikkat çekmektedir. Aktivatör olarak belirli molaritede (3M, 6M, 9M ve 12M) hazırlanan NaOH çözeltisi, belirli oranda hazırlanan (%60 tuğla tozu, %20 beton tozu ve %20 cam tozu) İYA tozlarına karıştırılmıştır. Kullanılan NaOH kimyasalı TEKKİM firmasından temin edilmiş olup %98 saflık derecesine sahiptir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sodyum Hidroksit görselleri (soldan sağa; 1 kg’lık torba, pul formu)

Tablo 3.1. Tekkim firmasına ait sodyum hidroksit kimyasal bileşeni.

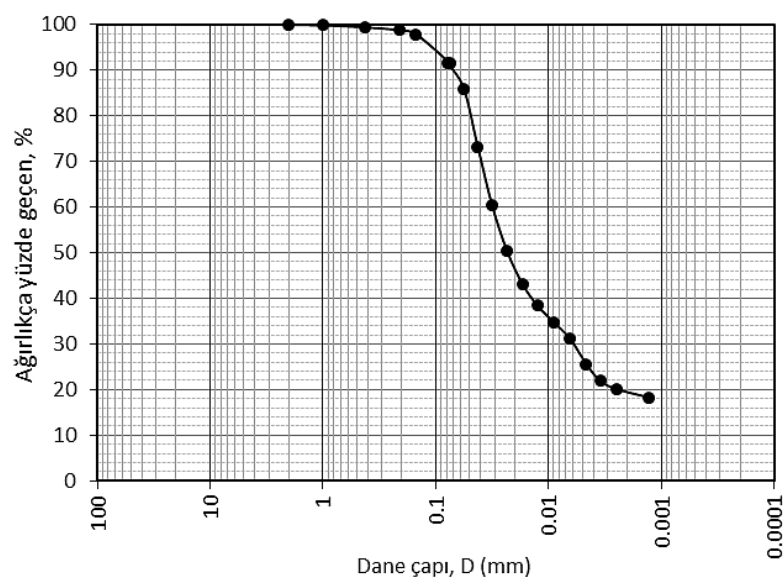
Parametreler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Safılık	%	98
Sodyum Karbonat (Na_2CO_3)	%	0,5
Sodyum Klorür (NaCl)	%	0,02
Demir (Fe)	%	0,001

3.2 Yöntem

İYA’nın (tuğla, beton ve cam tozu) geopolimer bağlayıcı olarak killi zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla, Erzincan ili sınırları içerisinde yer alan bölgeden temin edilen killi zemin numunesi kullanılmıştır. İnşaat yıkıntı atıklarının zemin numunesinin kıvamına, kompaksiyon özelliklerine ve kayma mukavemeti üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında, elek analizi (ASTM C136), kıvam limitleri (ASTM D4318), standart proktor deneyi (ASTM D698), serbest basınç deneyi (ASTM D 2166) ve donma-çözülme deneyi (ASTM D560) gerçekleştirilmiştir. İYA ile iyileştirilen zemin numuneleri belirli kür süresi sonunda, atık miktarının zemin iyileştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.2.1 Elek analizi ve hidrometre deneyi

Zeminler, farklı boyutlarda danelere sahip olduğu için, dane boyut dağılımını ve sınıflandırmasını belirlemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyde dane boyutu dağılımını belirlemek için elek analizi ve hidrometre deneyi kullanılmıştır. Elek analizi deneyi, ASTM C136 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Zemin numunesi, 4 numaralı elekten başlayarak 40 numaralı eleğe kadar elenmiştir. Eleklerde kalan ve geçen zemin miktarlarının yüzdeleri hesaplanmıştır. Zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi Şekil 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3.7. Elek Analizi ve Hidrometre sonuç grafiği ile dane dağılımı eğrisi

Likit limit, ince daneli zeminlerin plastik halden sıvı hale geçtiği su muhtevası değeridir. Bu değeri belirlemek için yapılan deneye “likit limit deneyi” denir. Likit limit, birkaç yöntemle belirlenebilir. Bunlardan biri, Casagrande Yöntemidir. Bu deneyde Casagrande tarafından önerilen, standart likit limit aleti kullanılmıştır (Şekil 3.8). Zemin artan su muhtevalarına göre hazırlanmıştır. Zemin numunesi ASTM D 4318 standartlarına göre belirlenen şekilde bu alete yerleştirilerek her defasında yaklaşık 1-1.5cm kapanma meydana gelene kadar ki vuruş sayısı kaydedilip su muhtevası hesaplanması için numune alınır. Likit limitte amaç, 25 vuruşa tekabül eden su muhtevasındaki likit limit değerini belirlemektir.



Şekil 3.8. Deneyde kullanılan standart likit limit aleti

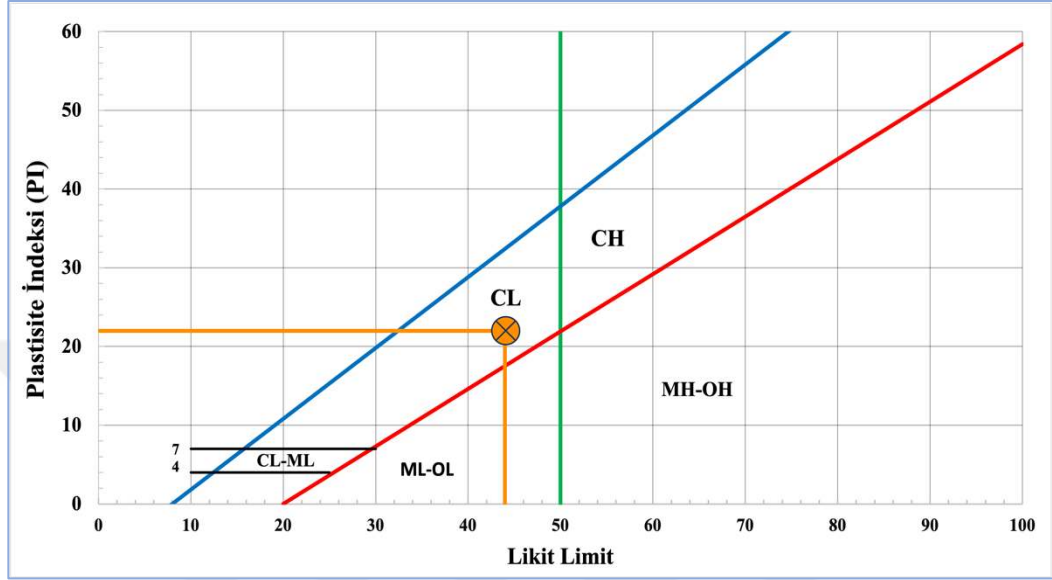
Plastik limit İnce daneli zeminlerde, istenilen şekil zemin numunesinde herhangi bir kırılma oluşturmada verilebildiği, bu tür zeminler "plastik kıvamdaki zeminler" olarak adlandırılır. Zeminin plastik kıvamını koruduğu en düşük su içeriği ise "plastik limit" olarak tanımlanır. Plastik limit, zemin örneğinin tamamen kuru olup plastik, yani şekil verilebilir hale geldiği su içeriğini ifade eder.

Plastik limit deneyinde, zemine belirli bir miktar su eklenir ve karıştırılarak hazırlanır. Elde edilen zemin örneği, bir cam plaka üzerinde elde yuvarlanır. Zemin çubuğunun çapı yaklaşık 3 mm olduğunda, zemin çubuğunda kopmalar meydana gelir ve bu durumdaki su içeriği ölçülür. Ölçülen bu su muhtevası değeri zeminin plastik limitini belirler (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Plastik limit deneyi numuneleri

Kil numuneleri üzerinde yapılan kıvam deneyleri (Atterberg deneyleri) sonucunda, likit limit ile plastik limitin farkında plastisite indisi değeri bulunmuştur. Zemin numunesinin likit limiti %44, plastik limiti %22 ve plastisite indisi %22 olarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre, bu zemin numunesi CL grubuna girmektedir. Şekil 3.10' da gösterilmiştir



Şekil 3.10. Zemin numunesinin Casagrande Plastisite kartındaki yeri

3.2.2 Standart proktor deneyi

İnşaat sahasından alınan killi zemin numunesinin kompaksiyon özellikleri ve İYA'nın bu özelliklere etkisi, yapılan standart proktor deneyleri ile belirlenmiştir (Şekil 3.11). İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kompaksiyon özelliklerine etkisi incelenmesi amacıyla bu çalışmada %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranında İYA zemine katılarak kompaksiyon parametreleri etkisi incelenmiştir ve proktor eğrileri elde edilmiştir. Böylece, optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 3.11. Standart proktor deney aleti

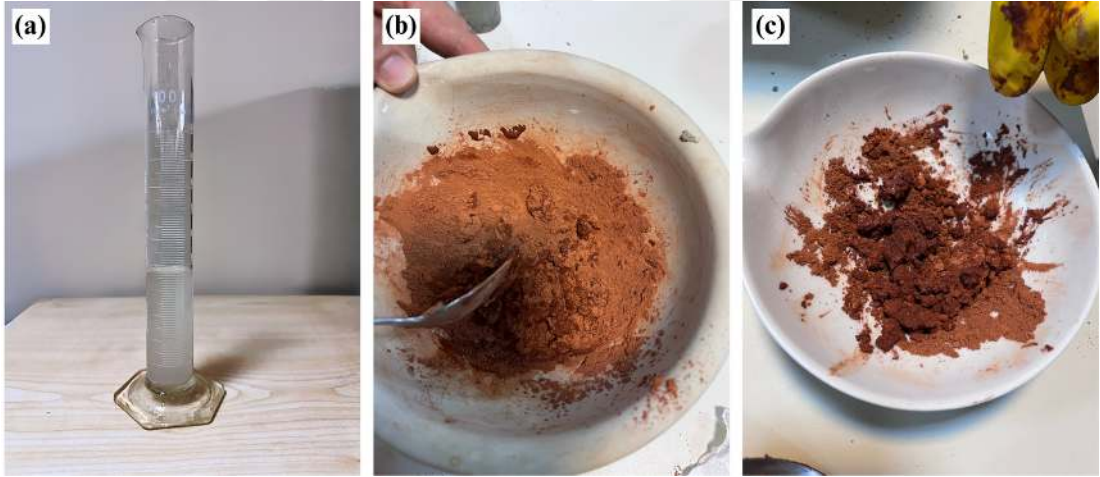
3.2.3 Serbest basınç numunesi hazırlama

Deneyde kullanılacak kil zemin üzerinde yapılan fiziksel deneyler sonucunda, zemin düşük plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra bu çalışmada geopolimer bazlı İYA katılan zemin numunesinin serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme davranışının incelenmesi amacıyla, laboratuvar ortamında özel olarak geliştirilen silindirik numune hazırlayıcı kullanılarak, serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır.

Serbest basınç deneyi için, geopolimer bağlayıcı hazırlanması amacıyla 200'nolu elekten elenen İYA bileşenlerinden %60 tuğla tozu, %20 beton tozu ve %20 cam tozu kullanılarak homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 3.12). Karışım, laboratuvarda bulunan mekanik karıştırıcıda iyice karıştırılmış ve homojenize edilmiştir. Geopolimer bağlayıcı elde etmek için İYA'ya, daha önce farklı molaritelerde (3M, 6M, 9M ve 12M) hazırlanmış NaOH çözeltisi eklenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.12. İYA'dan elde edilen %60 tuğla tozu, %20 beton tozu ve %20 cam tozunun mekanik karıştırıcıda homojen şekilde karıştırılması işlemi.



Şekil 3.13. Belirli molaritede hazırlanmış NaOH çözeltisinin zemin numunesi ile karıştırılma aşamaları. (a) Hazırlanan NaOH çözeltisi (b) NaOH çözeltisinin zemin numunesine ilavesi, (c) Karışımın homojen hale getirilmesi

Geopolimerleşme için hazırlanan çözeltinin İYA oranı (çözelti/bağlayıcı) 0,4 olarak belirlenmiştir. Daha sonra kil zemin numunesi optimum su muhtevasında hazırlanmış olup, İYA geopolimer bağlayıcı olarak %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranlarında zemine karıştırılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Optimum su muhtevasında hazırlanan zemin ile geopolimer bağlayıcının karıştırılması

Karışımı hazırlanan zemin numunesi deneylerde sabit ağırlık olacak şekil de üç tabaka halinde kalıba sıkıştırılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.15). Deney numuneleri laboratuvar ortamında hazırlanan numune hazırlama deney aleti yardımı ile standart numune boyutlarında ($D=38$ mm, $H=76$ mm) olarak hazırlanmıştır (Şekil 3.16). Deney aleti çapı 38 mm olan silindirik bir numune alıcının modifiye edilip deneysel çalışma amacına yönelik olarak elde edilmiştir.

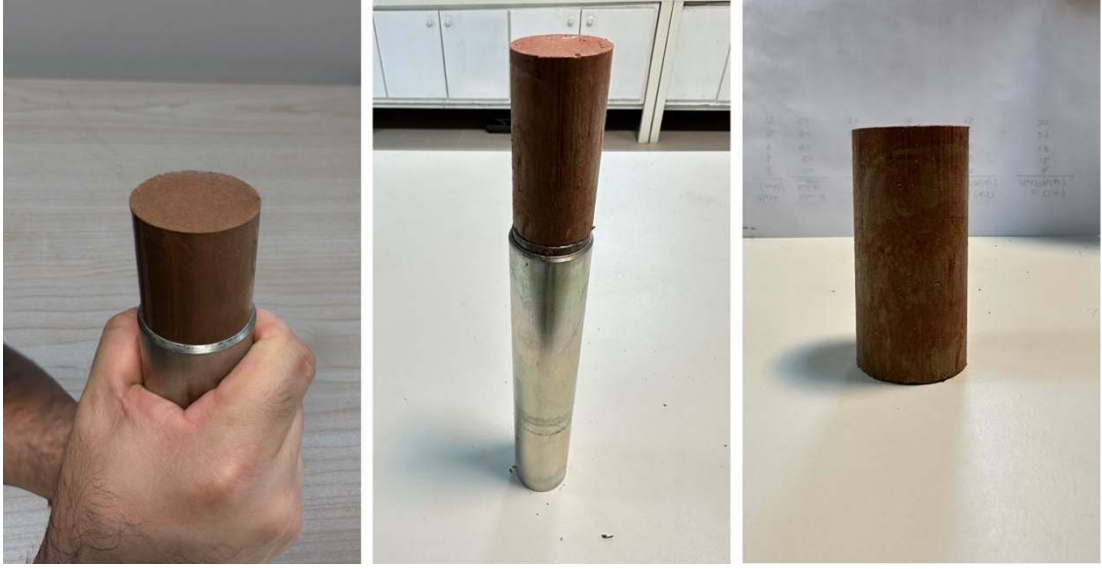


Şekil 3.15. Sıkıştırma öncesinde, 3 farklı kapta eşit ağırlıkta hazırlanan numuneler



Şekil 3.16. Laboratuvar ortamında hazırlanan deney numunesi hazırlama aleti

Zemin numunesi silindirik numune hazırlayıcıda manuel olarak çelik çubuk yardımı ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin numunesi daha sonra silindirik deney aletinden çıkartılarak yüksekliği 76 mm olacak şekilde tıraşlanmış ve istenilen kür süresi için streç film ile detaylı bir şekilde sarılanarak su muhtevasını kaybetmesini engellemek amacıyla kilitli hava almaz poşete geçirilip desikatöre konulmuştur (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18).



Şekil 3.17. Deney aletinde sıkıştırılan numunenin çıkarılması

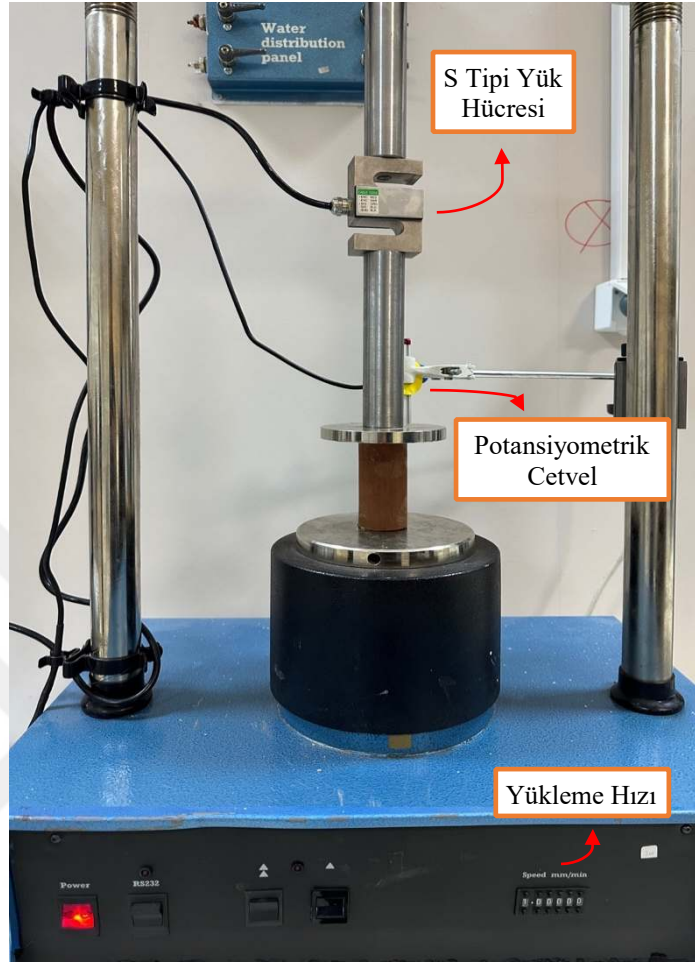


Şekil 3.18. Numunelerin streç film ile sarılması ve desikatöre konulması

3.2.4 Serbest basınç deneyi

Erzincan ilindeki bir inşaat sahasından temin edilen kil numunesi üzerinde, İYA'nın geopolimer bağlayıcı olarak etkisini incelemek için serbest basınç deneyleri ASTM D2166 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır (Şekil 3.19). Zemin numuneleri, İYA olarak %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranlarında geopolimer bağlayıcı içerecek şekilde hazırlandı. Numuneler 38 mm çapında ve 76 mm boyunda silindirik şekilde hazırlandı ve desikatöre konularak 7 ve 28 günlük kürde bekletilmiştir. Kür süresinin sonunda, numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelenmiştir. Eksenel kuvvete maruz kalan numunelerde boy kısalması ve çatlaklar oluşmuştur. Numunenin göçmesine neden olan en yüksek gerilme değeri, zeminin

serbest basınç mukavemet değeri olarak kabul edilir. Deneylerde 1 mm/dk yükleme hızında yapılmıştır.



Şekil 3.19. Serbest basınç deney aleti

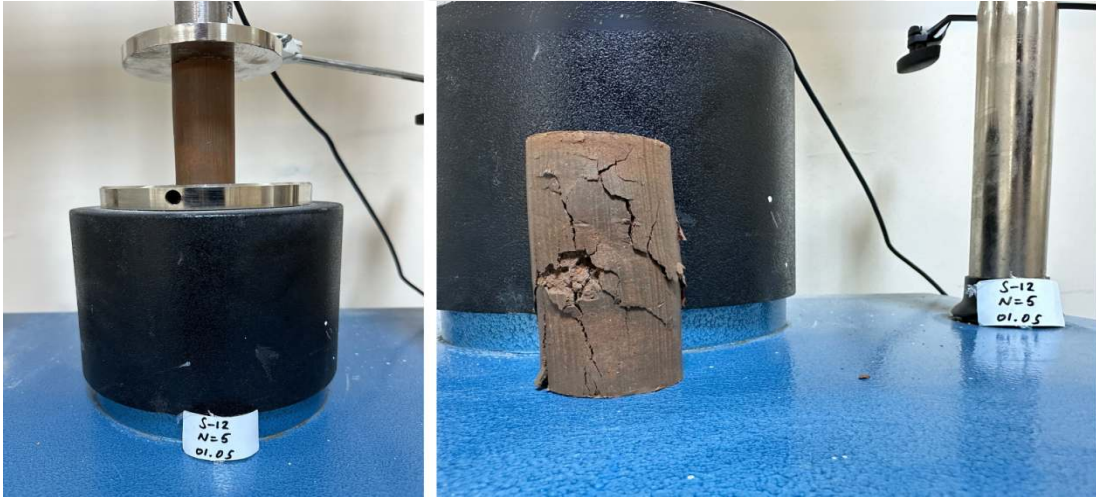
3.2.5 Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme deneyi yapılacak zemin numunelerin hazırlanma biçimi, serbest basınç deneyindeki gibidir. Donma-Çözülme deneyi 28 günlük kür süresi sonunda belirli oranlarda %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 İYA eklenerek iyileştirilmiş numunelerin don olayına karşı dayanıklı olup hassasiyetini tespit etmek amacıyla donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. 24 saatlik bir donma ve ardından 24 saatlik bir çözülme işlemi, bir donma-çözülme çevrimi olarak kabul edilmektedir. Daha sonra, 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözülme çevrimlerinde, bu süreçlerin kil numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.21). Deneylerden elde edilen sonuçlar, donma-çözülme çevrimine maruz kalmamış doğal kil zemin ve belirli oranlarda İYA katılan zeminin mukavemet değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu deneyde kullanılan donma-çözölme kabini deney döngüsü ve sürelerle bağılı sıcaklık adımları ASTM D560 standardına göre, 24 °C / -20 °C aralığında etkileri ölçölür. Deney aletinde numuneler öncelikle -20 °C 24 saat bekletildikten sonra otomatik olarak +24 °C de 24 saat daha bekletilmek suretiyle geçiş yapılmaktadır. Bu şekilde geçen 48 saatin sonu 1 çevrim olarak adlandırılmaktadır. Donma-çözölme cihazı ve deney numuneleri gösterilmektedir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Donma-çözölme cihazı ve donma-çözölme deney numuneleri



Şekil 3.21. Donma-çözölme sonrası serbest basınç deneyi

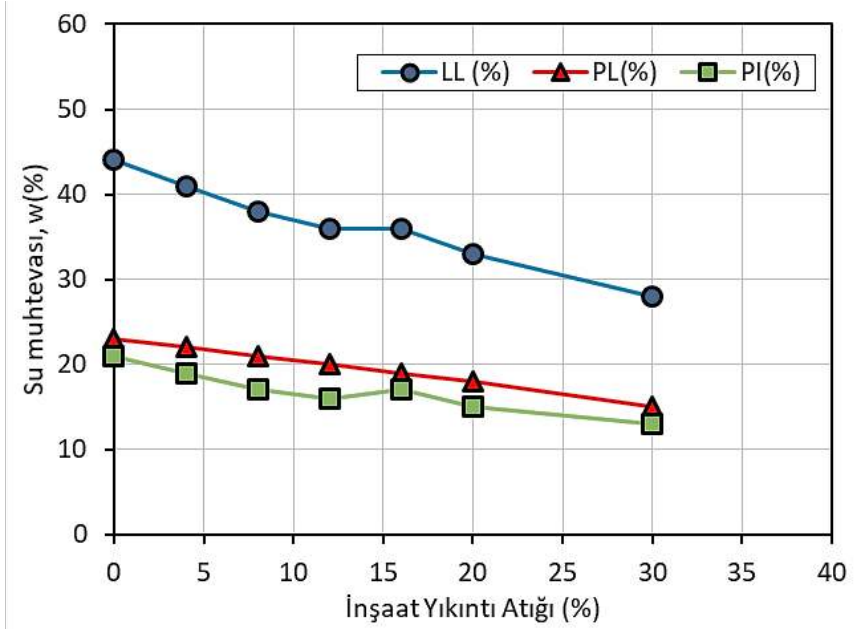
4. BULGULAR

4.1. Deney Sonuçları

Erzincan ilindeki bir inşaat sahasından alınan killi zemin numunesine, farklı oranlarda (%4, %8, %12, %16, %20 ve %30) İYA eklenerek kıvam limitleri, kompaksiyon davranışı, serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme süreçlerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kıvam limitleri ve kompaksiyon özellikleri için İYA herhangi bir aktivatör (NaOH) eklenmeden, serbest basınç mukavemeti için ise belirli oranlarda (3M, 6M, 9M ve 12M) NaOH çözeltisiyle aktive edilerek geopolimerleşme sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar, İYA oranlarındaki artışla kıvam limitlerinde ve plastisitesinde azalma, optimum su muhtevasında düşüş ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış olduğunu ortaya koymuştur. Artan oranlarda İYA, zeminin kayma ve serbest basınç mukavemetini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Ayrıca, 28 günlük kür süresinin ardından, geopolimerle iyileştirilmiş zemin numunelerine 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözülme çevrimi uygulanmış ve bu döngüler sonrası serbest basınç mukavemetinde azalma gözlemlenmiştir.

4.1.1. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kıvamına etkisi

İYA ağırlıkça %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranlarında zemine katılarak zemin üzerinde kıvam limitleri deneyleri (likit limit, plastik limit) deneyleri yapılmıştır. Kıvam limit deneylerinde kullanılan İYA kimyasal aktivatör kullanılmadan yani geopolimerleşme oluşmadan zemin numunesine eklenmiştir. Deney sonucu elde edilen değerler Şekil 4.1' de katkı miktarlarına bağlı olarak likit, plastik limit ve plastisite indeksiindeki değişimleri verilmiştir.



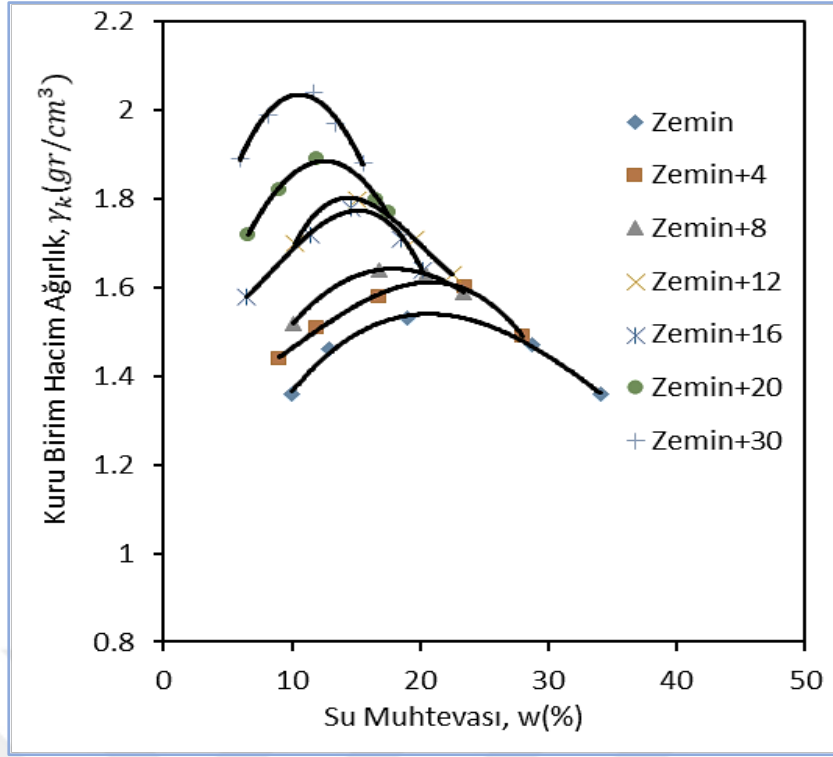
Şekil 4.1. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kıvam limitlerine etkisi

Grafığe göre İYA miktarının artması sonucu zeminin likit limitinde (LL) bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, zemine eklenen İYA zeminin su tutma kapasitesini düşürdüğü ve dolayısıyla likit limit değerinin düşmesine sebep olmuştur. Plastik limit (PL) değerine bakıldığı zaman ise, İYA miktarının artmasıyla birlikte azalma meydana gelmiştir. Bu azalma, zeminin daha düşük su muhtevasında plastik hale geldiğini ifade eder.

Likit limit ile plastik limit arasındaki farka plastisite indeksi (PI) denir. Grafikte İYA miktarının artmasıyla plastisite indeksinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalma, İYA zeminin plastisite özelliklerini azalttığını ve zeminin daha az plastik davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Böylece zemin daha stabil ve dayanıklılık açısından iyileşme göstermiştir.

4.1.2. İnşaat yıkıntı atıklarının zeminin kompaksiyon davranışına etkisi

İnşaat sahasından alınan killi zemin numunesinin kompaksiyon özellikleri ve İYA'nın zemine %4, %8, %12, %16, %20 ve %30 oranlarında katılması sonucu kompaksiyon özelliklerine etkisi yapılan standart proktor deneyleri ile belirlenmiştir. Ağırlıkça artan İYA yüzdelere göre zemin numunesinin kompaksiyon davranışı Şekil 4.2' de verilmiştir. Artan İYA miktarlarına göre zeminin kompaksiyon özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 4.2. İnşaat yıkıntı atığının zeminin kompaksiyon davranışına etkisi

Grafikte öncelikle su muhtevası arttıkça kuru birim hacim ağırlığının arttığı ve ardından belirli bir noktadan sonra azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, deneydeki zeminlerin su muhtevasının değişmesiyle birlikte farklı sıkışma davranışları sergilediğini göstermektedir. Karışımındaki zeminler için en yüksek kuru birim hacim ağırlığı değeri, farklı su muhtevalarında elde edilmiş ve bu nokta optimum su muhtevasıdır.

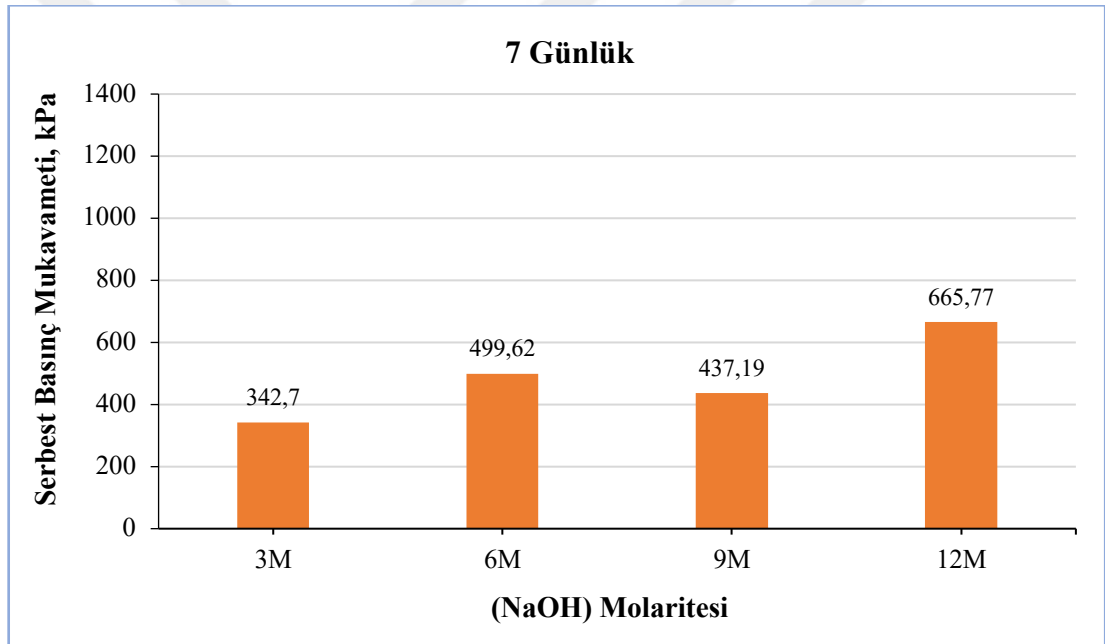
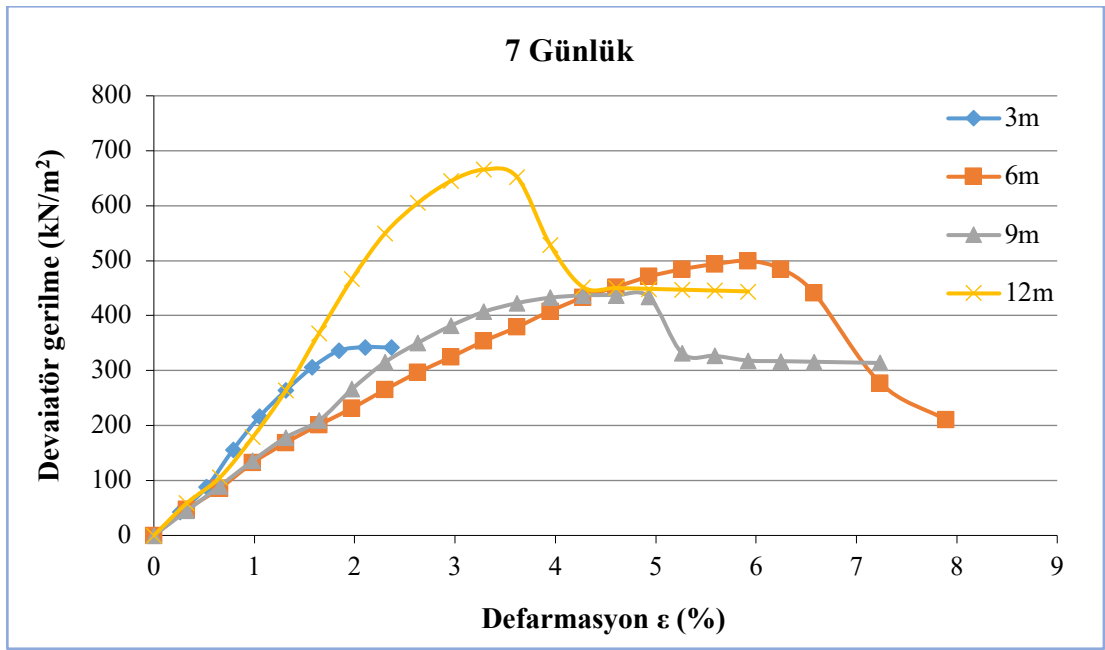
Su muhtevası artırıldığı zaman zeminin su içeriği arttığı için daha az sıkışabilir hale gelmektedir bu da zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı göstermiştir. Zemine eklenen İYA (%4, %8, %12, %16, %20 ve %30) miktarı arttıkça, kuru birim hacim ağırlığında bir artış gözlemlenmiştir. Artan İYA zeminin yoğunluğunu artırmış ve zeminin kompaksiyon özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir.

İnşaat yıkıntı atığı miktarı arttıkça plastisitesi düştüğü ve bunun sonucunda zemin daha sıkışabilir hale gelmiştir. Bu durum plastisitenin azalmasıyla birlikte zeminin yoğunluğunu arttırmış ve bu da kuru birim hacim ağırlığının artışına sebep olmuştur. Bu bulgular, zemin iyileştirme çalışmalarında istenen bir durumdur.

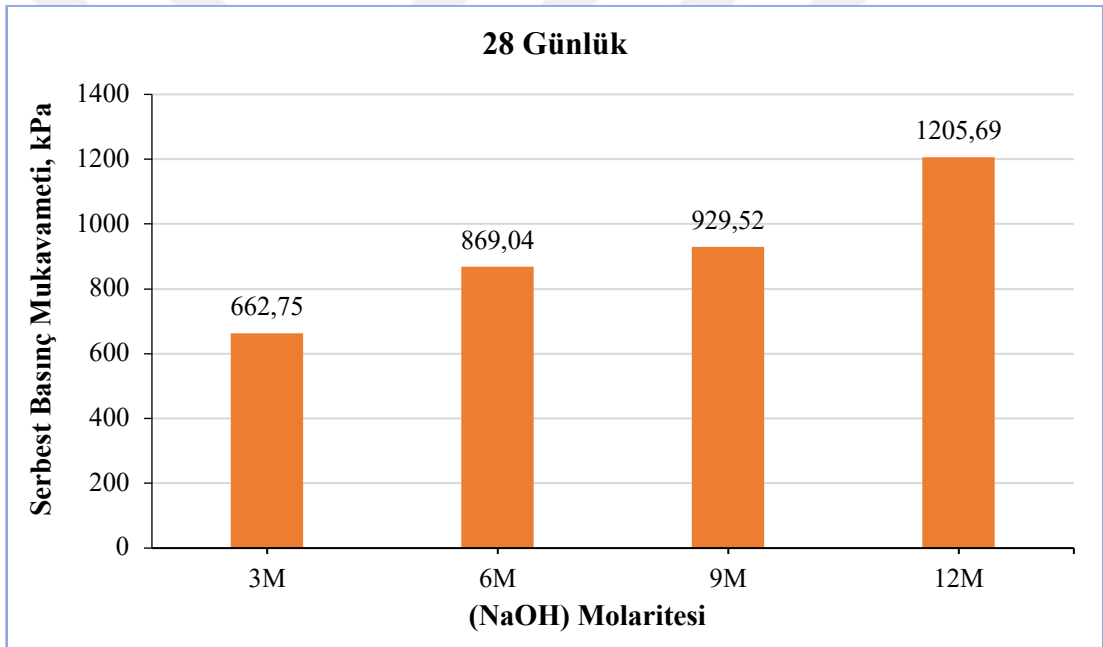
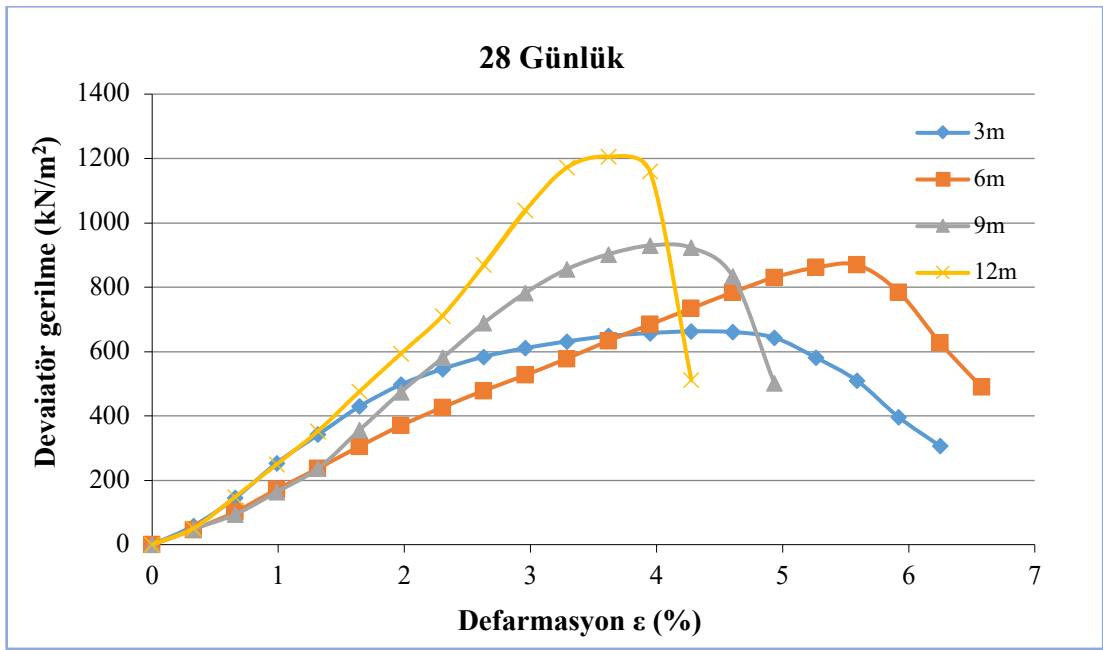
4.1.3. İnşaat yıkıntı atığının geopolimer bağlayıcı olarak zeminin serbest basınç mukavemetine etkisi

Bu çalışmada, farklı NaOH molaritelerinde (3M, 6M, 9M ve 12M) ve artan miktarlarda (katkısız, %4, %8, %12, %16, %20 ve %30) İYA kullanarak oluşturulan geopolimer bağlayıcının, optimum su muhtevasında hazırlanan zemin numunesine karıştırılarak zemin numunesi üzerindeki serbest basınç mukavemetine olan etkileri incelenmiştir. Şekil 4.3'teki 7 günlük kür süresinde, NaOH molaritesi arttıkça serbest basınç mukavemetinde genel bir artış gözlemlenmektedir. En düşük mukavemet değeri 3M NaOH ile elde edilirken (342,7 kPa), en yüksek mukavemet değeri 12M NaOH ile elde edilmiştir (665,77 kPa). Artan NaOH molaritesinin, erken kür süresinde mukavemeti artırdığını göstermektedir. NaOH molaritesinin serbest basınç mukavemetine etkisi 7 ve 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım deney sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' de gösterilmiştir.

Şekil 4.4'teki kür süresi 28 güne çıkarıldığı zaman, tüm NaOH molaritelerinde serbest basınç mukavemetinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. En düşük mukavemet değeri 3M NaOH ile elde edilirken (662,75 kPa), en yüksek mukavemet değeri yine 12M NaOH ile elde edilmiştir (1205,69 kPa), bu da NaOH konsantrasyonunun ve kür süresinin serbest basınç mukavemeti artırıcı etkisini göstermektedir. Grafikleri birbirleri ile karşılaştırıldığı zaman 28 günlük kür süresinin, 7 günlük kür süresine göre daha yüksek serbest basınç mukavemet sonuçları vermektedir. Bu sonuç, kür süresinin artmasıyla birlikte geopolimer bağlayıcıların dayanım kazanma sürecini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Grafiklere göre en yüksek mukavemet değerleri 7 ve 28 günlük kür süresinde de 12M NaOH ile elde edilmiştir.



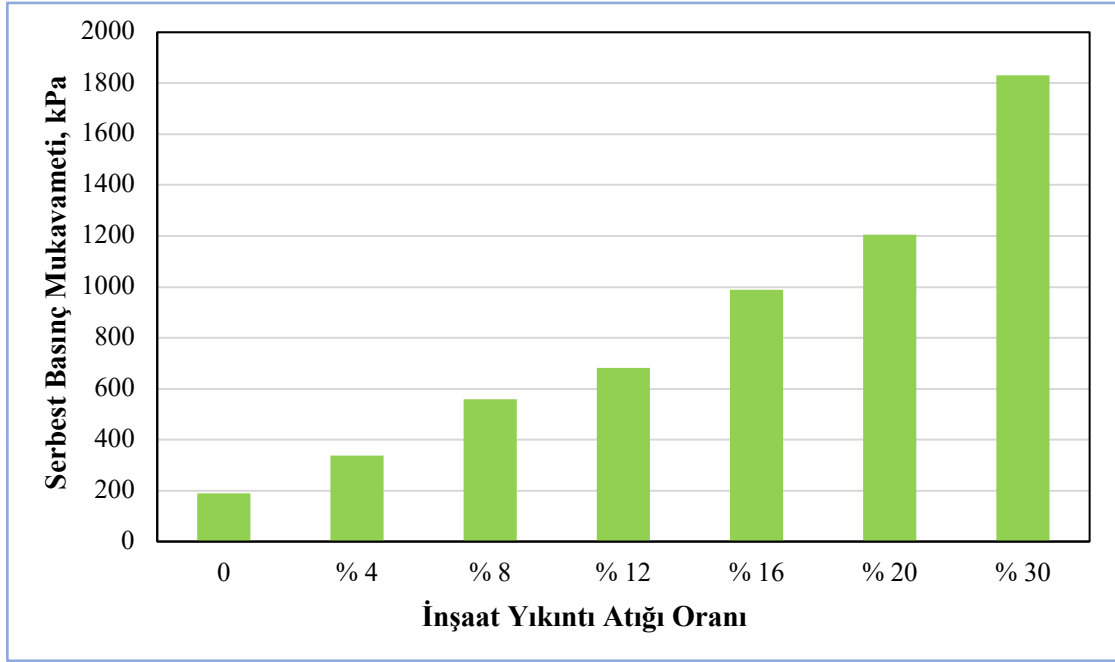
Şekil 4.3. 7 günlük kür süresi sonucu serbest basınç mukavemeti değerleri



Şekil 4.4. 28 günlük kür süresi sonucu serbest basınç mukavemeti değerleri

Şekil 4.5'teki 28 günlük kür süresinde 12 molar NaOH çözeltisi kullanılarak hazırlanan İYA bazlı geopolimerlerin killi zemin üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, zemine artan oranlarda geopolimer bazlı İYA ilave edilmiştir. Hazırlanan zemin numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. İnşaat yıkıntı atığı oranı arttıkça serbest basınç mukavemeti sürekli olarak artış göstermiştir. Katkısız zeminde serbest basınç mukavemeti 190 kPa, %4 oranında 338 kPa, %8 oranında ise 558 kPa seviyesine yükselmiştir. Bu yükseliş devam etmiş ve %30 oranında maksimum değere ulaşarak

1832 kPa değerine çıkmıştır. Sonuç olarak artan İYA oranıyla orantılı olarak killi zeminin serbest basınç mukavemetini belirgin bir şekilde artırmıştır ve İYA'nın NaOH ile birleşerek zeminde daha güçlü bir geopolimer yapı oluşmasını sağladığı belirlenmiştir.

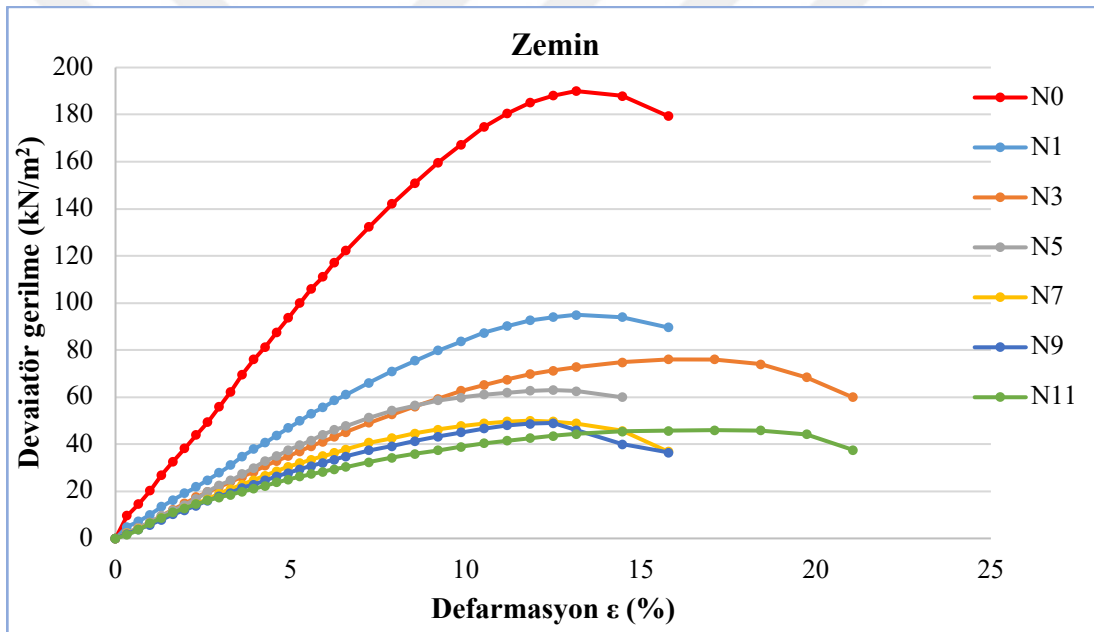


Şekil 4.5. İnşaat yıkıntı atığı oranının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

4.1.4. İnşaat yıkıntı atığının geopolimer bağlayıcı olarak zeminin donma-çözülme davranışına etkisi

Aşağıda verilen grafikler dikkate alındığında, geopolimer bazlı İYA oranı arttıkça deviator gerilme değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, geopolimer katkısının zeminin dayanım özelliklerini iyileştirici etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça deviator gerilme değerlerinde genel bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, donma-çözülme çevrimlerinin zemine zamanla zarar verdiğini ve mukavemeti olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ancak, İYA oranının yüksek olduğu durumlarda (örneğin %30), çevrimlerin olumsuz etkisinin daha az belirgin olduğu ve zemin mukavemetinin büyük ölçüde korunduğu görülmüştür. Sonuç olarak, geopolimer bazlı İYA katkılı zeminin dayanımını artırırken, çevrim sayısının artışı zeminin mukavemetinde azalmaya neden olmuş; ancak yüksek geopolimer bazlı İYA katkısıyla bu azalma etkisi önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. Bu durum, geopolimer bazlı İYA'nın donma-çözülme döngülerine karşı zeminin dayanıklılığını artırmada etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir.

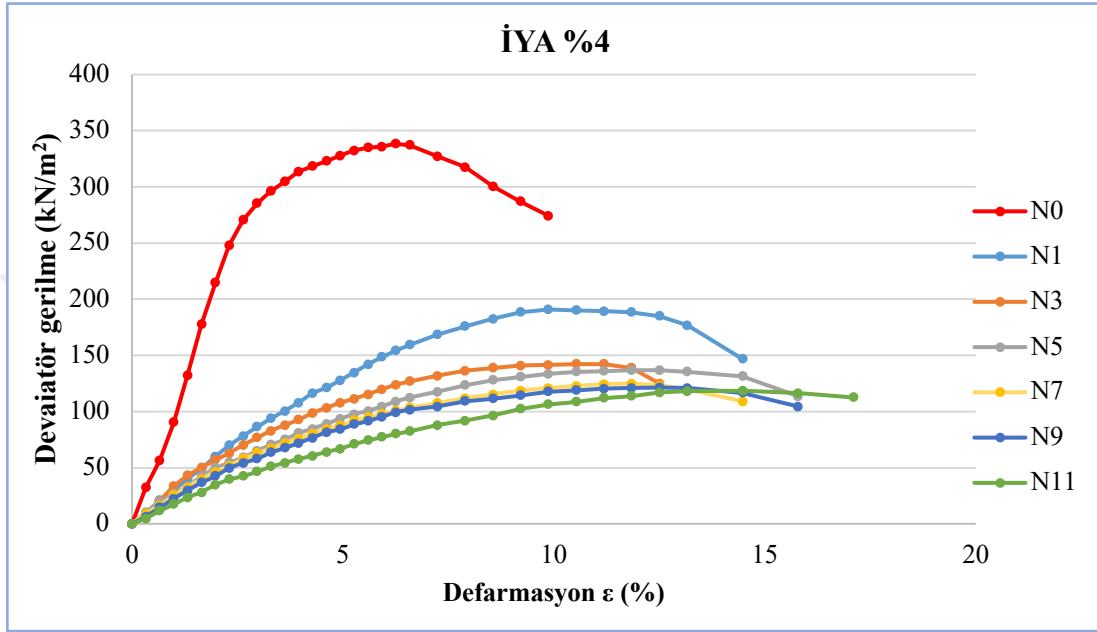
Şekil 4.6'daki yapılan donma-çözülme deneyinde, kil zemin numunesinin çevrimsiz durumda (N0) zemin deviatör gerilme değeri en yüksek seviyede, 190 kN/m^2 olarak ölçülmüştür. Ancak 1. çevrimde (N1), bu değer yaklaşık %50 oranında azalarak 95 kN/m^2 'ye düşmüştür. Bu düşüş, donma-çözülme döngülerinin zeminin serbest basınç mukavemetini büyük bir oranda azalttığını göstermektedir. 3. çevrimde (N3) deviatör gerilme değeri daha da azalmış ve 76 kN/m^2 'ye gerilemiştir. 5. çevrimde (N5) bu değer 63 kN/m^2 , 7. çevrimde (N7) ise 50 kN/m^2 olarak ölçülmüş ve gerilme kaybı devam etmiştir. 9. çevrimde (N9) deviatör gerilme değeri 49 kN/m^2 ile 11. çevrimde (N11) ise son olarak 46 kN/m^2 'ye ulaşmıştır. Genel anlamda, 11 çevrim sonunda zemin deviatör gerilme kapasitesi başlangıç değerine göre yaklaşık %76 oranında azalmış ve ilk çevrimden sonraki düşüşler daha yavaş gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, kil zeminlerin donma-çözülme döngülerine karşı oldukça hassas olduğunu ve serbest basınç mukavemetinde önemli kayıplar yaşandığını açıkça ortaya göstermektedir.



Şekil 4.6. Donma-çözülme çevrimlerinin katkısız kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

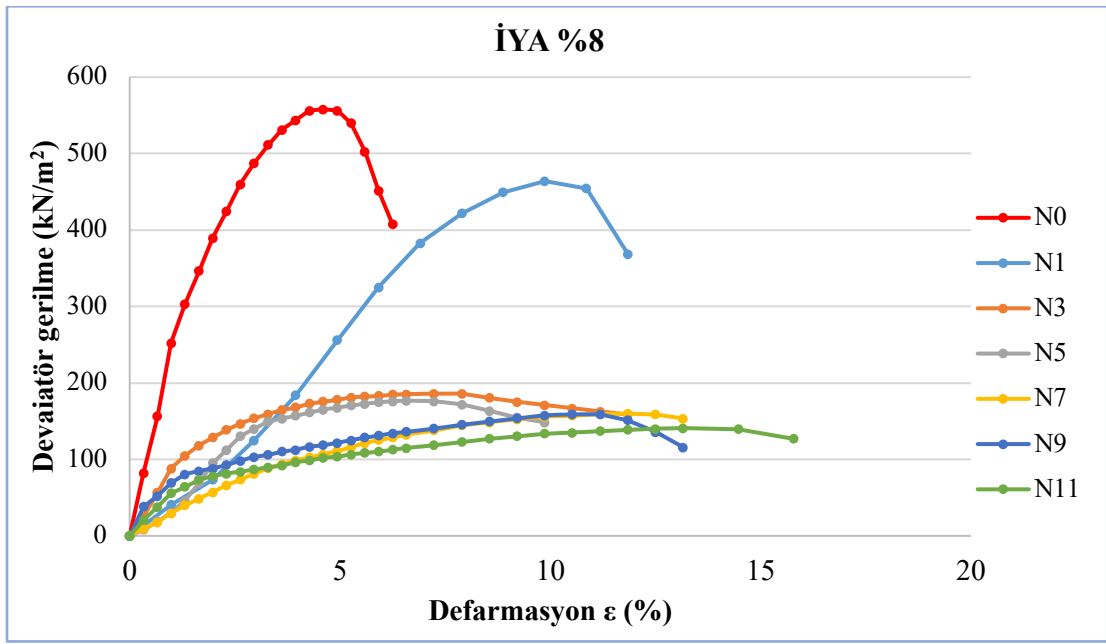
Şekilde 4.7'deki zemine %4 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, çevrimsiz durumda (N0) deviatör gerilme değeri 338 kN/m^2 olarak ölçülmüş ve bu değer, katkı eklenmemiş duruma göre önemli bir artış göstermiştir. 1. çevrimde (N1), deviatör gerilme değeri yaklaşık %44 oranında azalarak 189 kN/m^2 'ye düşmüş, ancak bu azalma katkısız zemine kıyasla daha düşük oranda gerçekleşmiştir. 3. çevrimde (N3) deviatör gerilme değeri 142 kN/m^2 'ye, 5. çevrimde (N5) ise 136 kN/m^2 'ye düşmüş ve bu noktadan itibaren azalma daha yavaş devam etmiştir. 7. çevrimde (N7) deviatör gerilme değeri 125

kN/m², 9. çevrimde (N9) 121 kN/m², 11. çevrimde (N11) ise 118 kN/m² olarak ölçülmüştür. Katkı eklenmiş zeminde, 11. çevrim sonunda deviator gerilme kapasitesi başlangıç değerine göre yaklaşık %65 oranında azalmıştır. Ancak, katkısız zemine göre, hem başlangıçta daha yüksek bir gerilme kapasitesi elde edilmiş hem de çevrimler boyunca daha düşük düşüş kaybı yaşanmıştır. Bu durum, geopolimer bazlı İYA katkısının zeminin mekanik dayanımını artırarak donma-çözülme etkilerini belirgin şekilde azalttığını göstermektedir.



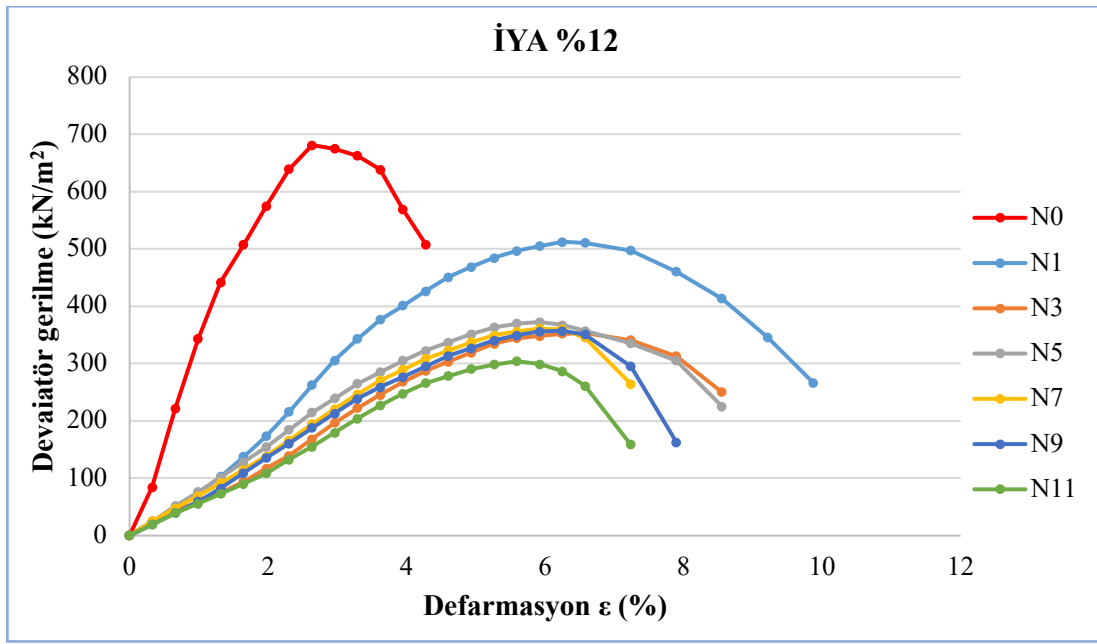
Şekil 4.7. Donma-çözülme çevrimlerinin %4 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviator gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekil 4.8'deki zemine %8 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, çevrimsiz durumda (N0) deviator gerilme değeri 558 kN/m² olarak ölçülmüş ve bu değer, katkısız zemine ve %4 İYA katkılı zemine göre önemli bir artış göstermiştir. 1. çevrimde (N1), gerilme değeri yaklaşık %17 oranında azalarak 464 kN/m²'ye düşmüştür. Ancak, 3. çevrimde (N3) bu azalma daha belirgin hale gelmiş ve gerilme değeri 186 kN/m²'ye kadar gerilemiştir. 5. çevrimde (N5) değer hafif bir azalma ile 177 kN/m, 7. çevrimde (N7) ise 160 kN/m² olarak ölçülmüştür. 9. çevrimde (N9) gerilme değeri 159 kN/m² ile neredeyse sabitlenmiş ve 11. çevrimde (N11) son olarak 141 kN/m²'ye ulaşmıştır. Genel olarak, %8 İYA katkılı zeminin başlangıç deviator gerilme değeri katkısız ve %4 İYA katkılı zemine göre daha yüksek olmakla birlikte, 11 çevrim sonunda toplam gerilme kaybı yaklaşık %75 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, %8 İYA katkısının zeminin dayanımını artırmakla birlikte, çevrimler ilerledikçe dayanım kaybının belirgin bir şekilde devam ettiğini göstermektedir.



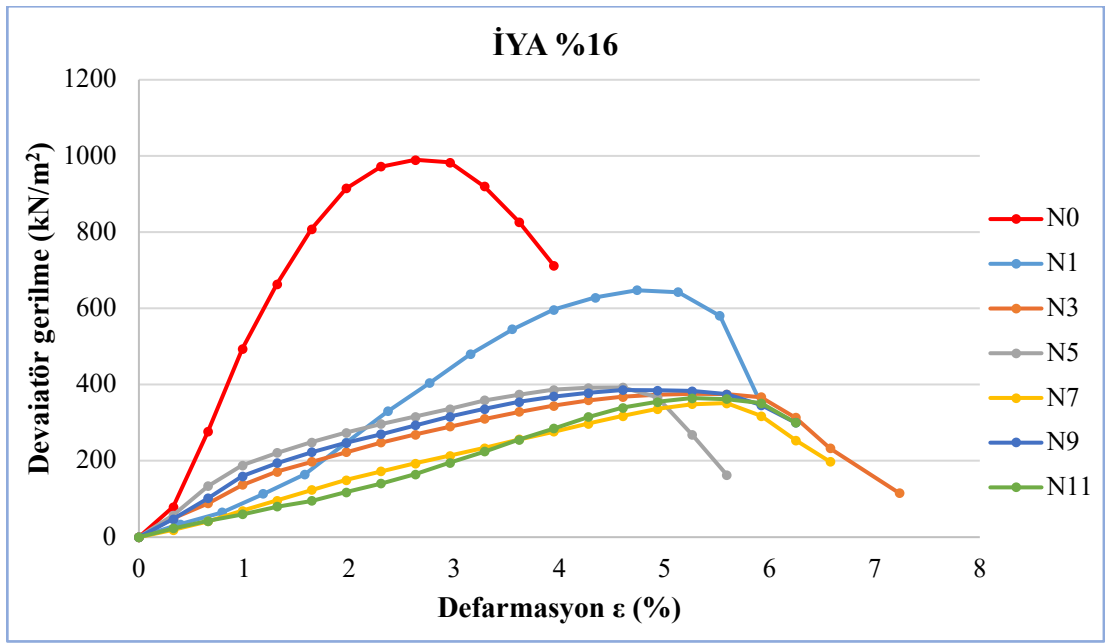
Şekil 4.8. Donma-çözülme çevrimlerinin %8 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviator gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekilde 4.9'daki zemine %12 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, çevrimsiz durumda (N0) deviator gerilme değeri 675 kN/m² olarak ölçülmüş ve bu değer hem katkısız zemine hem de %4 İYA katkılı zemine kıyaslandığı zaman çok daha yüksek bir dayanım göstermiştir. 1. çevrimde (N1), gerilme değeri yaklaşık %24 oranında azalarak 512,7 kN/m²'ye düşmüş, ancak bu azalma hem katkısız zemine hem de %4 İYA katkılı zemine göre daha sınırlı kalmıştır. 3. çevrimde (N3) gerilme değeri 353 kN/m²'ye gerilemiştir. 5. çevrimde (N5) değer 372 kN/m² ile önceki çevrime göre hafif bir artış göstermiş, 7. çevrimde (N7) ise yeniden 361 kN/m²'ye düşmüştür. Daha sonraki çevrimlerde azalmalar daha yavaş gerçekleşmiş, 9. çevrimde (N9) 357 kN/m², 11. çevrimde (N11) ise 304 kN/m² olarak ölçülmüştür. Genel olarak, 11. çevrim sonunda deviator gerilme kapasitesi başlangıç değerine göre yaklaşık %55 oranında azalmış. Ancak katkısız ve %4 İYA katkılı zeminlere göre çok daha yüksek serbest basınç dayanımı elde edilmiş.



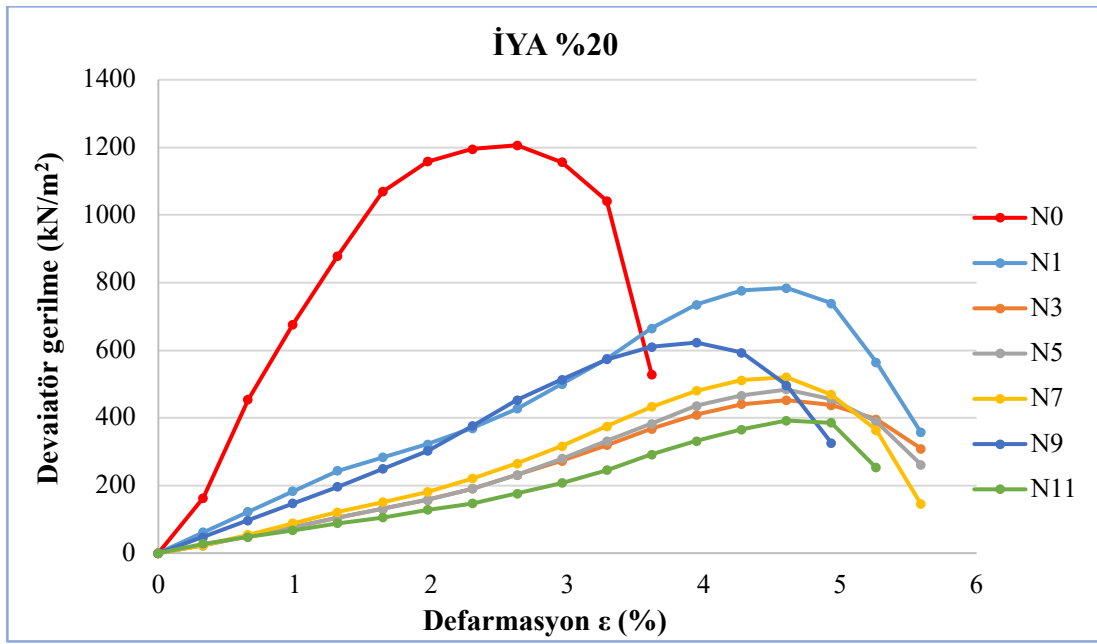
Şekil 4.9. Donma-çözülme çevrimlerinin %12 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviator gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekil 4.10'daki zemine %16 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, çevrimsiz durumda (N0) deviator gerilme değeri 990 kN/m² olarak ölçülmüş ve bu değer, önceki tüm katkı oranlarına kıyasla oldukça yüksek bir dayanım sağlamıştır. 1. çevrimde (N1), gerilme değeri yaklaşık %35 azalarak 648 kN/m²'ye düşmüş, ancak bu azalma diğer katkı oranlarına göre daha sınırlı kalmıştır. 3. çevrimde (N3) gerilme değeri 376 kN/m²'ye düşerken, 5. çevrimde (N5) bu değer hafif bir artış göstererek 393 kN/m²'ye ulaşmıştır. 7. çevrimde (N7) yeniden bir azalma ile 352 kN/m², 9. çevrimde (N9) ise tekrar artışla 386 kN/m² olarak ölçülmüştür. 11. çevrimde (N11) gerilme değeri son olarak 365 kN/m² olmuştur. Bu sonuçlar, %16 İYA katkısının zemine yüksek başlangıç dayanımı sağlamasının yanı sıra donma-çözülme döngüleri boyunca dayanımın dengeli bir şekilde sürdürüldüğünü göstermektedir. Çevrimler sırasında oluşan artış ve azalmalar, zeminin mekanik olarak daha stabil bir performans sergilediğini ve dayanım kaybının diğer katkı oranlarına kıyasla daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.



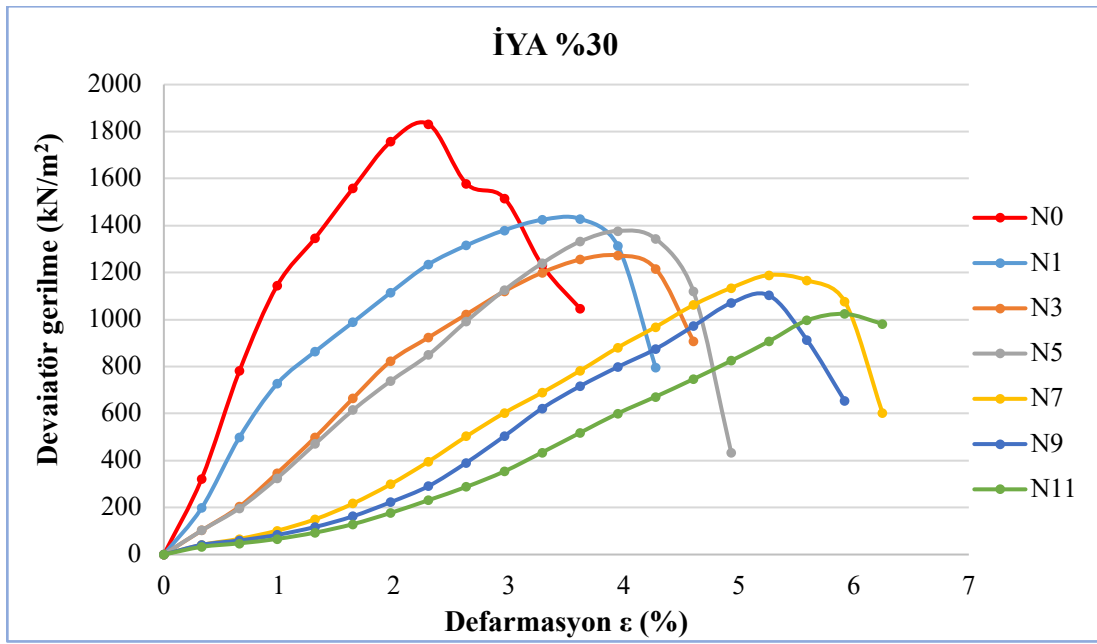
Şekil 4.10. Donma-çözülme çevrimlerinin %16 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviatör gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekil 4.11'deki zemine %20 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, çevrimsiz durumda (N0) deviatör gerilme değeri 1206 kN/m² olarak ölçülmüş ve bu değer, önceki tüm katkı oranlarına göre daha yüksek bir dayanım sağlamıştır. 1. çevrimde (N1), gerilme değeri 784 kN/m²'ye düşmüş, ancak bu azalma, çevrimsiz duruma kıyasla yüksek başlangıç dayanımı sayesinde daha sınırlı bir performans kaybı göstermiştir. 3. çevrimde (N3) gerilme değeri 452 kN/m²'ye, 5. çevrimde (N5) ise 483 kN/m²'ye ulaşarak çevrim sırasında bir miktar toparlanma göstermiştir. 7. çevrimde (N7) bu değer yeniden bir azalma ile 520 kN/m²'ye yükselmiş, 9. çevrimde (N9) tekrar artış kaydederek 622 kN/m² olarak ölçülmüştür. 11. çevrimde (N11) ise deviatör gerilme değeri 392 kN/m² olarak ölçülmüş ve bu çevrim sonu değerinin, başlangıç dayanımına göre önemli bir azalmaya işaret ettiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, %20 İYA katkısının zemine oldukça yüksek bir başlangıç dayanımı sağladığını, ancak donma-çözülme döngüleri boyunca dayanım kayıplarının belirgin şekilde arttığını göstermektedir.



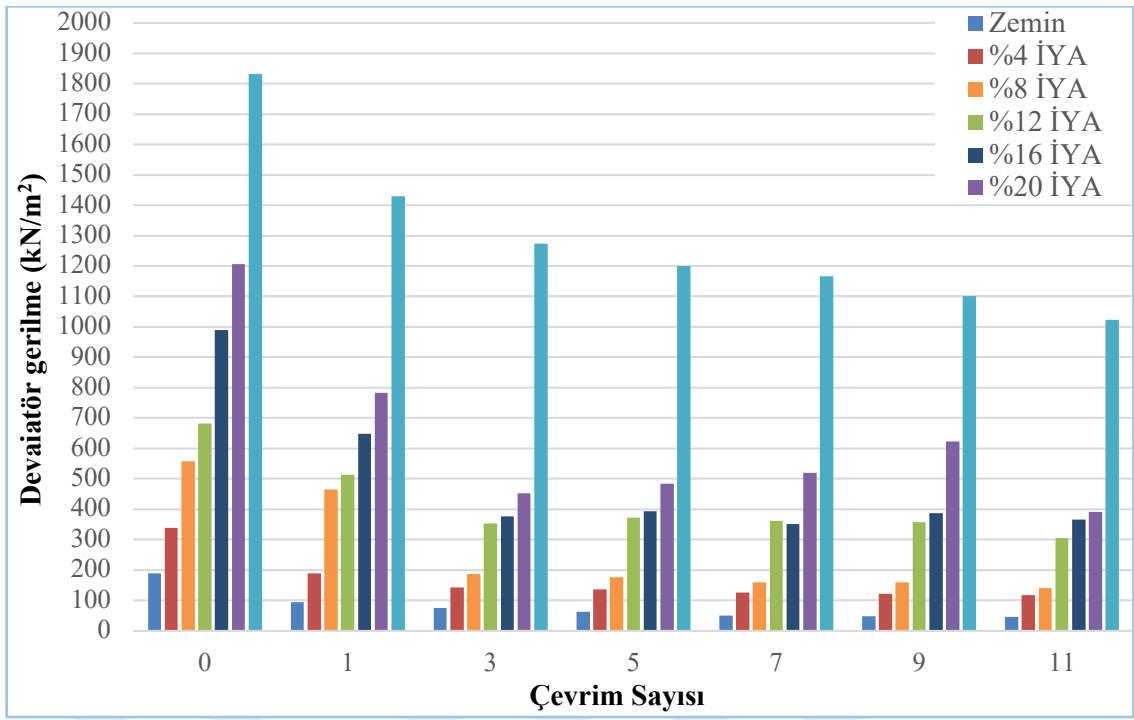
Şekil 4.11. Donma-çözülme çevrimlerinin %20 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviator gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekilde 4.12'deki Zemine %30 oranında geopolimer bazlı İYA eklenerek yapılan deney sonuçlarına göre, donma-çözülme çevrimsiz durumda (N0) deviator gerilme değeri 1832 kN/m^2 olarak ölçülmüş ve bu değer, önceki tüm numunelere (katkısız, %4 ve %12 İYA katkılı) kıyasla çok daha yüksek bir serbest basınç dayanımı göstermiştir. 1. çevrimde (N1), gerilme değeri yaklaşık %22 azalarak 1429 kN/m^2 'ye düşmüş, ancak bu azalma oranı önceki katkı oranlarına göre daha sınırlı kalmıştır. 3. çevrimde (N3) gerilme değeri 1273 kN/m^2 'ye, 5. çevrimde (N5) 1200 kN/m^2 'ye düşmüş, ancak çevrim sayısı ilerledikçe düşüş yavaşlamıştır. 7. çevrimde (N7) değer 1167 kN/m^2 , 9. çevrimde (N9) 1100 kN/m^2 , 11. çevrimde (N11) ise 1023 kN/m^2 olarak ölçülmüştür. 11. çevrim sonunda deviator gerilme kapasitesi başlangıç değerine göre yaklaşık %44 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar, %30 oranında geopolimer bazlı İYA katkısının, zeminin serbest basınç dayanımının en yüksek seviyeye çıkararak donma-çözülme döngülerine karşı en dayanıklı katkı sağladığını göstermektedir. Katkı oranındaki artışın, zemin dayanımını artırmada oldukça etkili olduğu ve donma-çözülme çevrimleri boyunca dayanım kaybını önemli ölçüde sınırladığı görülmektedir.



Şekil 4.12. Donma-çözülme çevrimlerinin %30 oranında geopolimer bazlı İYA katılarak oluşturulan kil zemin numunesinin deviator gerilme-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi

Şekil 4.13'teki zemin numunelerine farklı oranlarda (katkısız, %4, %8, %12, %16, %20 ve %30) geopolimer bazlı İYA eklenerek donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki deviator gerilme dayanımları incelenmiştir. Katkısız zemin, 0. çevrimde 190 kN/m² ile dayanımı sergilerken çevrim sayısının artmasıyla dayanım önemli ölçüde azalmış ve 11. çevrimde 46 kN/m²'ye kadar düşmüştür. Katkılı numunelerde ise, donma-çözülme çevrimlerine karşı dayanım başlangıçta katkı oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. %4 ve %8 İYA katkılı numuneler düşük dayanım sergilerken, %12 ve %16 katkılı numuneler daha dengeli sonuçlar vermiştir. Özellikle %20 ve %30 İYA katkılı numuneler, donma-çözülme etkisine karşı dayanımını daha uzun süre korumuş, bu oranlar arasında %30 İYA katkılı numune 0. çevrimde 1832 kN/m² ve 11. çevrimde 1023 kN/m² dayanım ile en yüksek performansı göstermiştir. Ancak, tüm katkı oranlarında geopolimer bazlı İYA katkılı numunelerin, başlangıç dayanımı açısından katkısız zemin numunesine kıyasla daha düşük performans sergilediği gözlemlenmiştir. Donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça tüm numunelerde dayanım düşüşü meydana gelmiş, ancak yüksek katkı oranlarının (%20 ve %30) çevrimler boyunca daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Kil zemin numunesine farklı oranlarda geopolimer bağlayıcı İYA eklenmesiyle donma-çözülme çevrimleri sonrası deviator gerilme değişimi.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, Erzincan ilindeki bir inşaat sahasından doğal olarak temin edilen killi zemin numunelerine, farklı oranlarda (%4, %8, %12, %16, %20 ve %30) İYA katılarak zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, İYA oranındaki artışın, zeminin kıvam limitlerinde ve plastisite özelliklerinde belirgin bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerinde azalma meydana gelirken, plastisite indeksi (PI) de azalmış, bu da zeminin daha stabil ve daha az plastik davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu değişiklikler, zeminin dayanımı açısından önemli iyileşmelere işaret etmektedir.

Kompaksiyon deneyleri, artan İYA oranlarının zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığını artırdığını ve optimum su muhtevasında düşüşe neden olduğunu göstermiştir. %30 İYA katılı hazırlanan numunelerde, kuru birim hacim ağırlığının önemli ölçüde arttığı ve zeminin sıkışabilirliğinin iyileştirdiğini gözlemlenmiştir. Bu durum, artan İYA katısının zeminin yoğunluğunu artırarak sıkışma davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Serbest basınç deney sonuçları, farklı molaritelerde (3M, 6M, 9M ve 12M) hazırlanan NaOH çözeltilerinin, farklı oranlardaki (%4, %8, %12, %16, %20 ve %30) İYA ile karıştırılarak zemine geopolimer bağlayıcı olarak ilave edilmesiyle elde edilen etkileri incelenmiştir. Bu karışımla hazırlanan zemin numuneleri, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda incelenmiştir. %30 İYA ve 12M NaOH kullanıldığında serbest basınç mukavemeti 1832 kPa seviyesine ulaşmıştır; bu değer katkısız zeminde 190 kPa olarak ölçülmüştür. Geopolimer bağlayıcı olarak kullanılan İYA'lar, yüksek molaritedeki NaOH çözeltileriyle birlikte zeminde daha güçlü bir geopolimer yapı oluşturarak zeminin mekanik dayanımını düzenli bir şekilde iyileştirmiş ve zeminlerin serbest basınç mukavemetini belirgin şekilde artırdığını göstermiştir.

Donma-çözülme deneylerinde, killi zeminlerin donma-çözülme süreçlerine karşı hassasiyetlerini ve bu süreçler sonrasında sergiledikleri davranışları analiz etmek amacıyla, 28 günlük kür süresinde bekletilen artan miktarlarda İYA içeren geopolimer bazlı hazırlanan kil zemin numuneleri üzerinde donma-çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Numunelere 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözülme çevrimleri uygulanmış ve ardından serbest basınç deneyi yapılmıştır. Numunelerin hem donma-çözülme öncesi hem de donma-çözülme sonrası mukavemet davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deney sonuçları, çevrim sayısının artmasıyla zeminin serbest basınç mukavemetinde genel bir azalma gözlemlenmiş ancak yüksek oranlarda

(%20 ve %30) İYA katkılı numunelerin donma-çözölme çevrimlerine karşı dayanıklılığını önemli ölçüde sürdürdüğü gözlemlenmiştir. %30 İYA katkılı zemin numunesi, 0. çevrimde 1832 kPa olan mukavemet değerini 11. çevrimde 1023 kPa seviyesinde koruyarak, geopolimer bazlı İYA katkısının donma-çözölme döngülerine karşı zeminin dayanıklılığını artırmada etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, İYA’lardan oluşturulan geopolimer bazlı bağlayıcılar, killi zeminlerin stabilizasyonunda hem mühendislik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, iyileştirme yöntemlerinin yalnızca geleneksel malzemeler olan çimento ve kirece bağlı kalmadan, atık malzemeler kullanılarak da gerçekleştirilebileceği ve bu malzemelerle benzer düzeyde performans sağlanabileceği görülmüştür. Özellikle yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde, geopolimer bazlı malzemelerin zemin stabilitesini artırarak taşıma gücünü iyileştirebileceği görülmüştür.

Çalışmada elde edilen bulgular, geopolimer bağlayıcıların yalnızca zemin stabilitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda inşaat atıklarının (İYA) yeniden değerlendirilmesiyle sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanabileceği vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, İYA’nın yalnızca çevreci bir çözüm değil, aynı zamanda ekonomik ve mühendislik açısından etkili bir alternatif olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, gelecekteki zemin iyileştirme projelerinde geopolimer teknolojisinin daha yaygın bir şekilde benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. İlerleyen çalışmalarda, farklı inşaat atık türleri ve geopolimer kombinasyonlarının detaylı şekilde incelenmesi, deney kapsamının genişletilmesi ve uzun vadeli performans analizlerinin yapılması önerilmektedir. Bu tür kapsamlı araştırmalar hem zemin iyileştirme performansını artıracak hem de çevresel atık yönetimine yönelik daha sürdürülebilir çözümler sunacaktır. Ayrıca, bu yenilikçi ve çevreci malzemelerin yaygınlaşması, geleneksel yöntemlere güçlü bir alternatif oluşturarak mühendislik projelerinde daha ekonomik ve çevre dostu bir yaklaşımın benimsenmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- ASTM D2166. (2010). *D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/d2166-06.html>
- ASTM D560-03. (2012) *D560 Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*. ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/standards/d560>
- ASTM D4318, (2010), *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/d4318-17.html>
- ASTM C136, (2006), *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/c0136-06.html>
- ASTM D698-07E1, (2009), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/d0698-07e01.html>
- ASTM C618-22, (2023), *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/c0618-22.html>
- Akduman, Ş., Kocaer, O., Aldemir, A., Şahmaran, M., Yıldırım, G., Almahmood, H., & Ashour, A. (2021). Experimental investigations on the structural behaviour of reinforced geopolymer beams produced from recycled construction materials. *Journal of Building Engineering*, 41, 102776.
- Akyıldız, M. H. (2019). Geosentetik türlerinin inşaat mühendisliğindeki uygulamaları ve sağladığı kolaylıklar. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 791-796.
- Alhawati, M., Yıldırım, G., Ashour, A., Özcelikci, E., Aldemir, A., & Şahmaran, M. (2024). A study on the influencing parameters in developing construction and demolition waste-based geopolymer concretes and their sustainability assessment. *Construction and Building Materials*, 426, 136143.
- Ann, T. W., Poon, C. S., Wong, A., Yip, R., & Jaillon, L. (2013). Impact of construction waste disposal charging scheme on work practices at construction sites in Hong Kong. *Waste Management*, 33(1), 138-146.
- Ayan, E. (2021). Kilin Kireç ve Çimento ile Stabilizasyon Karşılaştırmaları. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

- Aytekin, M. (2000). Deneyisel zemin mekaniği. *Akademi Yayınevi*.
- Baxmeyer Construction. "Soil Stabilization", <https://baxmeyerconstruction.com/soil-stabilization/>, Son erişim tarihi: 15.07.2024.
- Baykal, G., & Saygılı, A. (2012). A new technique to improve freeze–thaw durability of fly ash. *Fuel*, 102, 221-226.
- Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., & Savaş, H. (2020). Kıl zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 910-919.
- Black, J. A., Sivakumar, V., Madhav, M. R., & Hamill, G. A. (2007). Reinforced stone columns in weak deposits: laboratory model study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(9), 1154-1161.
- Bozkurt, E. (2020). Arazide yüksek su muhtevası içeren bir kilin kireç ile stabilizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli
- Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2014). Composition and leaching of construction and demolition waste: inorganic elements and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 276, 302-311.
- Cement Treated Material. "Slurries", <https://cementtreatedmaterial.com/slurries/>, Son erişim tarihi: 12.08.2024.
- Chen, Q., Zhang, Q., Qi, C., Fourie, A., & Xiao, C. (2018). Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 186, 418-429
- Cilason, N., 1964. Toprak Stabilizasyonu, *K.G.M.*, Yayın No: 122, Ankara.
- Czurda, K. A., & Hohmann, M. (1997). Freezing effect on shear strength of clayey soils. *Applied clay science*, 12(1-2), 165-187.
- Das, T., Sharma, M., & Choudhury, D. (2023). Bearing capacity and liquefaction assessment of shallow foundations resting on vibro-stone column densified soil in vallur oil terminal, *India. Indian Geotechnical Journal*, 53(6), 1392-1413.
- Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazzieri, F., & Pasqualini, E. (2014). Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. *Applied Clay Science*, 99, 100-109.
- Ding, M., Zhang, F., Ling, X., & Lin, B. (2018). Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene fiber and cement stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 154, 155-165.

- Du, J., Zhang, Y., Wu, S., Dong, Y., & Shi, J. (2023). Experimental and Analytical Modeling of Ground Displacement Induced by Dynamic Compaction in Granular Soils. *Buildings*, 13(2), 539.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42, 2917-2933.
- Ecodrill. "Ground Improvement", <https://ecodrill.es/en/ground-improvement/>, Son erişim tarihi: 10.06.2024.
- Engineering Civil. "What is Soil Stabilization and What are the Methods of Soil Stabilization", <https://www.engineeringcivil.com/what-is-soil-stabilization-and-what-are-the-methods-of-soil-stabilization.html>, Son erişim tarihi: 28.06.2024.
- Elahi, H. R., Sabermahani, M., & Mousavi, S. H. (2023). Excavation Support and Foundation Ground Improvement Using Jet Grouting Method—A Case Study. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 427, p. 01003). EDP Sciences.
- Ferguson, G., & Levorson, S. M. (1999). Soil and pavement base stabilization with self-cementing coal fly ash. *American Coal Ash Association*.
- Ginga, C. P., Ongpeng, J. M. C., & Daly, M. K. M. (2020). Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production. *Materials*, 13(13), 2970.
- Goodarzi, A. R., Akbari, H. R., & Salimi, M. J. A. C. S. (2016). Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132, 675-684.
- Gregory, J., AzariJafari, H., Vahidi, E., Guo, F., Ulm, F. J., & Kirchain, R. (2021). The role of concrete in life cycle greenhouse gas emissions of US buildings and pavements. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(37), e2021936118.
- Hassan, M. M., & Ravaska, O. (2008). Strength and permeability characteristics of cement stabilized soft Finnish clay (pp. 227-233). *Taylor & Francis*, London.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Kayabali, K. (2002). Geoteknik mühendisliğine giriş. *Gazi Kitabevi*.
- Hsieh, Y. M., Li, H. H., Huang, T. H., & Jeng, F. S. (2008). Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of sandstone affected by microscopic properties—Revealed by bonded-particle model. *Engineering Geology*, 99(1-2), 1-10.

- Işık, A. (2014). Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-çözülme Olayının DeneySEL İncelenmesi. Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1973). *Soil Stabilization*. John Wiley&Sons. New York.
- Kamei, T., Ahmed, A., & Shibi, T. (2012). Effect of freeze–thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 124-129.
- Kavak, A. (1996). The behavior of lime stabilized clays under cyclic loading. Doktora Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Keskin, S. N., Sungur, A., Akan, R., & Uzundurukan, S. (2017). İnce Daneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 473-478.
- Keller Middle East. "Etihad Rail Stage 2 & 3 Package 2A", <https://www.kellerme.com/projects/etihad-rail-stage-2-3-package-2a>, Son erişim tarihi: 05.06.2024
- Kızılcılık, M. M. (2010). Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Kirsch, K., & Kirsch, F. (2017). Ground improvement by deep vibratory methods (p. 252). *Taylor & Francis*, London.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368-376.
- Kul, A., Ozcelikci, E., Ozel, B. F., Ilcan, H., Sahin, O., Gunal, M. F., ... & Sahmaran, M. (2024). Optimizing mechanical performance of geopolymers produced from construction and demolition waste: A comparative study of materials from different origins. *Construction and Building Materials*, 426, 136171.
- Lee, J. S., & Pande, G. N. (1998). Analysis of stone-column reinforced foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(12), 1001-1020.
- Loos, W. (1936). Comparative studies of the effectiveness of different methods for compacting cohesionless soils. *In Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (Vol. 3, pp. 174-179).
- Maccaferri. "Zemin Güçlendirme", <https://www.maccaferri.com/tr/uygulamalar/zemin-guclendirme>, Son erişim tarihi: 20.07.2024.

- Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement-state of the art report. In *Proc., 11th Int. Conf. on SMFE* (Vol. 4, pp. 509-565).
- Moretti, J. P., Sales, A., Almeida, F. C., Rezende, M. A., & Gromboni, P. P. (2016). Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 317-323.
- Murmu, A. L., Dhole, N., & Patel, A. (2020). Stabilisation of black cotton soil for subgrade application using fly ash geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 21(3), 867-885.
- Murugesan, S., & Rajagopal, K. (2006). Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), 349-358.
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann.
- Njock, P. G. A., Chen, J., Modoni, G., Arulrajah, A., & Kim, Y. H. (2018). A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-31.
- Özaydın, K., 1989. Zemin Mekaniği, *Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü*. İstanbul
- Qi, J., Ma, W., & Song, C. (2008). Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold regions science and technology*, 53(3), 397-404.
- Sarıcı, T. (2014). Geosentetik ile Güçlendirilmiş Taş Kolonların Taşıma Kapasitesinin Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- Shah, K. A., & Ahmad, E. (2020). A Study on Alluvial Soil Stabilization using Bitumen Emulsion. *Int. J. Eng. Res*, 9(06), 229-239.
- Shihata, S. A., & Baghdadi, Z. A. (2001). Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of materials in civil engineering*, 13(4), 243-247.
- Sivapullaiah, P. V., Kantha, H. L., & Kiran, K. M. (2003). Geotechnical properties of stabilised Indian red earth. *Geotechnical & Geological Engineering*, 21, 399-413.
- Sivrikaya, O., & Toğrol, E. (2010). İnce daneli zeminlerde SPT sonuçlarının düzeltilmesi üzerine bir çalışma. *İTÜ Dergisi/d*, 2(6).
- Şahbaz, İ. (2020). Çimento ve polipropilen lif kullanarak killi zeminlerin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Şahinkaya, F. (2016). Yüzen Taş Kolonlar ile İyileştirilmiş Zeminlerin Sismik Yükler Altındaki Davranışının Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, *Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat.

- Talamucci, F. (2003). Freezing processes in porous media: formation of ice lenses, swelling of the soil. *Mathematical and computer modelling*, 37(5-6), 595-602.
- Tipco Asphalt. "Special Emulsions", <https://tipcoasphalt.com.kh/products/special-emulsions>, Son erişim tarihi: 12.07.2024.
- Tunç, A. (2002). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, *Atlas Yayınevi*, Ankara.
- Tonoç, M. C., Ulusay, R., & Gokceoglu, C. (2004). Effects of lime stabilization on engineering properties of expansive Ankara clay. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: A European Perspective*, 466-474.
- Tumluer, G. (2006). Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Uzuner, B. A. (2000). Temel mühendisliğine giriş. *Derya Kitabevi*, Trabzon, 342-359.
- Uzuner, B. A. (2007). Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekanigi. 7. Basım, *Derya Kitabevi*, Trabzon.
- Wang, T., Liu, X., Liu, L., Xiong, W., & Li, Z. (2024). Research on the Reinforcement Effect and Bearing Characteristics of High-Pressure Jet-Grouting Piles on Covered Road Composite Ground in Landfill Sites. *Buildings*, 14(2), 444.
- White, D. J. (2005). *Fly Ash Soil Stabilization for Non-uniform Subgrade Soils: Influence of subgrade non-uniformity on PCC pavement performance* (Vol. 2). Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
- Wong, C. L., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Yap, S. P. (2020). Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder. *Journal of Building Engineering*, 32, 101655.
- Yalcin, H., Kaya, Z., Çadır, C. C., Uncuoğlu, E., Erol, A., & Akin, M. (2023). Improvement of an Undisturbed Peat Soil with Jet Grout Columns: Physical and Numerical Modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(10), 14059-14078.
- Yeboah, N. N. N., & Burns, S. E. (2011). Geological disposal of energy-related waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 697-705.
- Zhang, W. H., Xi, W. Y., Wang, B. T., & Hong, B. N. (2008). Test study of high liquid limit clay modified by quick lime used as sub-grade material. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 126-130.