



**GEPOLİMER BAĞLAYICI VE MİKRO FİBER DONATI
İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLT
ZEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Kutluhan KURUCU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU
2022**

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GEPOLİMER BAĞLAYICI VE MİKRO FİBER DONATI İLE STABİLİZE EDİLEN
YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLT ZEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

(Mechanical Properties of a High Plasticity Silty Soil Stabilized With GeopolimERIC Binder
and Micro Fiber Inclusion)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kutluhan KURUCU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

BAYBURT
Ağustos, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĐI

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU danışmanlığında, 202202003 numaralı Kutluhan KURUCU tarafından hazırlanan “*Geopolimer Bağlayıcı ve Mikro Fiber Donatı ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Silt Zeminin Mekanik Özellikleri*” adlı bu çalışma 15/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:

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

...../...../.....

Prof. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “*Geopolimer Bağlayıcı ve Mikro Fiber Donatı ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Silt Zeminin Mekanik Özellikleri*” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

15/08/2022

Kutluhan KURUCU

TEŞEKKÜR

“Geopolimer Bağlayıcı ve Mikro Fiber Donatı ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Silt Zeminin Mekanik Özellikleri” isimli yüksek lisans çalışması Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca her türlü ilgi ve desteğini benden esirgemeyen, ufuk açıcı, yapıcı eleştirileri ile çalışmam süresince bana yön gösteren tez danışmanım çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca yanımda olan çok değerli dostlarıma ve arkadaşlarıma teker teker teşekkürler eder, bu yolda yanımda oldukları için saygılarımı sunarım.

Yaşamım boyunca her anımda yanımda olan mutluluğum ve istikbalim için fedakârlıktan kaçmayan sevgili annem Zehra KURUCU ve sevgili babam Mustafa KURUCU'ya, değerli ablalarım Emine KURUCU ve Ebru KURUCU'ya ve değerli abim Bedirhan KURUCU'ya en içten şükranlarımı sunarım.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GEOPOLİMER BAĞLAYICI VE MİKRO FİBER DONATI İLE STABİLİZE EDİLEN
YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLT ZEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Kutluhan KURUCU

Ağustos 2022, 49 Sayfa

Yapılan bu tez çalışması, kütlece %50 sodyum hidroksit ve %50 sodyum silikat bileşenlerinden oluşan aktivatörle aktive edilmiş C-Sınıfı uçucu kül, ve fiber donatı katkısı ile, yüksek plastisiteli siltli bir zeminin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır. Çalışma kapsamında 3 mm ve 12 mm uzunluğunda fiber donatı kullanılmıştır. Farklı fiber donatı uzunluk kombinasyonlarının alkali aktif C-sınıfı uçucu kül ile iyileştirilmiş, yüksek plastisiteli siltli bir zeminde eğilme ve kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tez çalışması üç kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar; (i) Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile maksimum serbest basınç dayanımı veren aktivatör ve uçucu kül bileşenlerinin optimum miktarlarının belirlenmesi, (ii) 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki fiber donatıların farklı oranlarda geopolimer harca eklenmesi sureti ile donatı içeriğinin maksimum eğilme dayanımı ve tokluk parametreleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, (iii) 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların farklı oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen donatı kombinasyonlarının geopolimer esaslı zemin harçlarının maksimum eğilme gerilmesi, tokluk, kayma mukavemeti parametreleri üzerine olan etkilerinin incelenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında zemin tanımlama deneyleri, serbest basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatı kombinasyonlarının, yalnız 3 mm ya da yalnız 12 mm uzunluğundaki donatılara göre daha yüksek maksimum eğilme dayanımı ve kohezyon değeri verdiği görülmüştür. 12 mm uzunluğundaki donatılar kullanılarak iyileştirilen zeminlerin tokluk değerinin 3 mm uzunluğu ve farklı donatı kombinasyonlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anaktar kelimeler: Zemin stabilizasyonu, geopolimer, fiber donatı uzunluk kombinasyonu, yanıt yüzey yöntemi (YYY), eğilme dayanımı, tokluk.

ABSTRACT

MASTER THESIS

MECHANICAL PROPERTIES OF A HIGH PLACTICITY SILTY SOIL STABILIZED WITH GEOPOLIMERIC BINDER AND MICRO FIBER INCLUSION

Kutluhan KURUCU

August 2022, 49 pages

This thesis study is based on the improvement of a high plasticity silty soil with the addition of activator-activated C-Class fly ash, consisting of 50% sodium hydroxide and 50% sodium silicate components by mass, and fiber reinforcement. Fiber reinforcement with a length of 3 mm and 12 mm was used in the study. The effect of different fiber reinforcement length combinations on bending and shear strength parameters on a high plasticity silty soil improved with alkali active C-class fly ash was investigated. The thesis study consists of three parts. These parts are; (I) the response surface Method (YYY), which provides maximum unconfined compressive strength to determine the optimum amount of fly ash and activator components, (ii) 3 mm to 12 mm and a length of fiber reinforcement reinforcement mortar geopolimer by the addition of different proportions of the maximum flexural strength and toughness parameters effects on the determination of the content of (iii) 3 mm and 12 mm in length, obtained by mixing different proportions of combinations of equipment Donti geopolimer ground-based mortars, the maximum bending stress, toughness, it consists of the stages of studying the effects on shear strength parameters. Within the scope of the study, soil identification experiments, free compressive strength, three-axis compressive strength, three-point bending experiments were performed. As a result of the study, it was found that the combinations of 3 mm and 12 mm long reinforcement gave a higher maximum bending strength and cohesion value compared to only 3 mm or only 12 mm long reinforcement. It was observed that the toughness value of the floors improved by using 12 mm long reinforcement was higher than that of 3 mm length and different reinforcement combinations.

Keywords: ground stabilization, geopolymer, fiber inclusion combination, response surface methodolgy (RSM), bending strength, flexural strength, toughness.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------|
| ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI | i |
| TEŞEKKÜR | ii |
| ÖZ | iii |
| ABSTRACT | iv |
| İÇİNDEKİLER | v |
| TABLolar DİZİNİ | vii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| BİRİNCİ BÖLÜM | 1 |
| Giriş | 1 |
| İKİNCİ BÖLÜM | 5 |
| Kuramsal Çerçeve..... | 5 |
| Zemin İyileştirme Yöntemleri..... | 5 |
| Yüzeysel iyileştirme yöntemleri..... | 7 |
| Katkısız stabilizasyon..... | 7 |
| Kompaksiyon yöntemi..... | 7 |
| Yüzeysel drenaj yöntemi..... | 7 |
| Katkılı stabilizasyon..... | 8 |
| Bitüm katkısı ile stabilizasyon..... | 8 |
| Çimento katkısı ile stabilizasyon..... | 8 |
| Kireç katkısı ile stabilizasyon..... | 9 |
| Uçucu kül katkısı ile iyileştirme..... | 10 |
| Derin iyileştirme yöntemleri..... | 12 |
| Vibro kompaksiyon metodu..... | 12 |
| Patlatma ile kompaksiyon metodu..... | 12 |
| Dinamik kompaksiyon metodu..... | 13 |
| Geopolimer..... | 13 |
| Geopolimerlerin kimyası..... | 14 |
| Geopolimerlerin alkali ile aktivasyonu..... | 16 |
| Geopolimerlerin kullanım alanları..... | 16 |
| Alkaliler..... | 17 |

| | |
|---|-----------|
| Sodyum hidroksit..... | 17 |
| Sodyum karbonat..... | 17 |
| Sodyum meta silikat..... | 18 |
| Sodyum silikat..... | 18 |
| Fiber donatı..... | 19 |
| Makro sentetik fiber donatı..... | 19 |
| Mikro fiber sentetik donatı..... | 20 |
| ÜÇÜNCÜ BÖLÜM..... | 21 |
| Materyal ve Yöntem..... | 21 |
| Doğal malzeme..... | 21 |
| Uçucu kül..... | 22 |
| Alkali aktivatör..... | 22 |
| Fiber donatı..... | 23 |
| DÖRDÜNCÜ BÖLÜM..... | 25 |
| Araştırma Bulguları..... | 25 |
| Deneylerden Elde Edilen Veriler..... | 25 |
| Yanıt yüzey yöntemi ile deney tasarımı ve bileşenlerin optimizasyonu..... | 25 |
| Bağımsız değişkenlerin optimizasyonu..... | 28 |
| Numune hazırlama..... | 29 |
| Eğilme dayanımı..... | 30 |
| Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının eğilme dayanımına etkisi..... | 31 |
| Fiber donatı miktarının eğilme dayanımına etkisi..... | 33 |
| Üç nokta eğilme deneyinden elde edilen yük-deformasyon eğrilerinden tokluk parametresinin belirlenmesi..... | 35 |
| Donatı içeriğinin tokluk parametresi üzerindeki etkisi..... | 35 |
| Farklı fiber donatı kombinasyonlarının eğilme dayanımına etkisi..... | 37 |
| Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi..... | 39 |
| 3 mm donatı, 12 mm donatı ve donatı kombinasyonlarının kayma mukavemeti parametrelerine etkisi..... | 40 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 42 |
| Kaynakça..... | 44 |
| ÖZ GEÇMİŞ..... | 49 |

TABLULAR DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Tablo 1. Zemin Çeşitlerine Göre Stabilizasyon Metotları | 6 |
| Tablo 2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri | 10 |
| Tablo 3. Uçucu Küllerin Sağlaması Gereken Fiziksel Değerler | 11 |
| Tablo 4. Alkali Aktivasyon Tarihsel Gelişimi | 16 |
| Tablo 5. Geopolimerlerin Kullanım Alanları | 17 |
| Tablo 6. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Kompozisyonu | 17 |
| Tablo 7. Sodyum Meta Silikatın Kimyasal Kompozisyonu | 18 |
| Tablo 8. Sodyum Meta Silikatın Kimyasal Kompozisyonu | 18 |
| Tablo 9. Sodyum Silikatın Kimyasal Kompozisyonu | 18 |
| Tablo 10. Deneyler ve Standartları | 21 |
| Tablo 11. Doğal Zemine Ait Özellikler..... | 21 |
| Tablo 12. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri..... | 22 |
| Tablo 13. Na_2SiO_3 ve NaOH Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler..... | 23 |
| Tablo 14. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatıların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri..... | 23 |
| Tablo 15. Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkezi Değerleri..... | 25 |
| Tablo 16. Deneysel Tasarım Matrisi | 26 |
| Tablo 17. Anova Sonucu | 27 |
| Tablo 18. Eğilme Dayanımı ile Aktivatör Oranı Belirlenmesi | 31 |
| Tablo 19. 3 mm ve 12 mm Uzunluğundaki Donatıların Farklı Donatı Oranlarında Eğilme Dayanım Sonuçları | 33 |
| Tablo 20. 3 mm ve 12 mm Uzunluğundaki Karışık Donatıların Farklı Karışım Oranlarında Eğilme Dayanım Sonuçları..... | 37 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1. Farklı zeminlerde stabilizasyon uygulaması..... | 6 |
| Şekil 2. Vibro kompaksiyon metodu basamakları | 12 |
| Şekil 3. Dinamik kompaksiyon uygulaması | 13 |
| Şekil 4. Uçucu kül katkılı geopolimer üretim süreci | 15 |
| Şekil 5. Makro sentetik fiber donatı..... | 20 |
| Şekil 6. Mikro sentetik fiber donatı | 20 |
| Şekil 7. Doğal zemine ait dane boyutu dağılımı..... | 22 |
| Şekil 8. Mikro sentetik fiber donatı. a) 3 mm, b) 12 mm..... | 23 |
| Şekil 9. İstatistiksel analiz sonucu üretilen modelle yapılan tahminlerin deneysel verilerle karşılaştırılması..... | 28 |
| Şekil 10. Aktivatör miktarı (X_1) ve Uçucu kül oranı (X_2) değişiminin serbest basınç dayanımı üzerine etkisi..... | 29 |
| Şekil 11. a) Silindirik numuneler, eğilme kirişleri b) tek eksenli basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve üç eksenli basınç dayanımı deney örnekleri. | 30 |
| Şekil 12. Üç nokta eğilme deneyine ait deney şeması..... | 31 |
| Şekil 13. 7 günlük ve 28 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri..... | 32 |
| Şekil 14. Üç nokta eğilme deneyi sonrası farklı kür şartları için elde edilen yük-deplasman eğrileri. a) 7 gün, b) 28 gün | 33 |
| Şekil 15. 28 günlük 3 mm ve 12 mm donatı uzunluklarının farklı oranlarda eğilme dayanım değerleri..... | 35 |
| Şekil 16. Tokluğun (Enerji yutma kapasitesi) yük-deformasyon eğrisinden belirlenmesi..... | 35 |
| Şekil 17. Farklı donatı içerikleri için elde edilen tokluk değerleri..... | 36 |
| Şekil 18. Eğilme deneyi sonrasında farklı donatı içerikleri için elde edilmiş olan yük-deplasman eğrileri (a) 3 mm uzunluğundaki donatı ve (b) 12 mm uzunluğundaki donatı..... | 37 |
| Şekil 19. Hibrit fiber donatı içeriğinin eğilme dayanımına etkisi..... | 38 |
| Şekil 20. Hibrit fiber donatılar için elde edilen tokluk değerleri..... | 39 |
| Şekil 21. Eğilme deneyi sonrasında karışık fiber donatılar için elde edilmiş olan yük-deformasyon eğrileri..... | 39 |
| Şekil 22. a) Yoğun şekilde sıkıştırılmış bir zemine ait mohr-coulomb kırılma zarfı b) p-q diyagramı ile c ve ϕ nin belirlenmesi | 40 |

| | |
|--|----|
| Şekil 23. 3 mm donatı, 12 mm donatı ve hibrit donatıların üç eksenli basınç dayanım değerleri..... | 41 |
| Şekil 24. Donatı içeriğine göre içsel sürtünme açıları değerleri..... | 41 |



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|----------------------|---|
| A | : Aktivatör Ağırlığı |
| A.q | : Yeterli Hassasiyet |
| CCD | : Merkezi Kompozit Tasarımı |
| D | : Arzu Edilebilirlik Değerleri |
| UK | : Uçucu Kül Ağırlığı |
| Z | : Zemin Ağırlığı |
| Z+UK | : Kuru Madde Toplam Ağırlığı |
| X₁ | : Aktivatör Miktarı |
| X₂ | : Uçucu Kül Oranı |
| 50SH-50SS | : %50 Sodyum Hidroksit %50 Sodyum Silikat |
| 60SH-40SS | : %60 Sodyum Hidroksit %40 Sodyum Silikat |
| 70SH-30SS | : %70 Sodyum Hidroksit %30 Sodyum Silikat |
| 80SH-20SS | : %80 Sodyum Hidroksit %20 Sodyum Silikat |
| 90SH-10SS | : %90 Sodyum Hidroksit %10 Sodyum Silikat |

Kısaltmalar

| | |
|-------------|---|
| ASTM | : Amerikan Test ve Malzeme Kurumu |
| CBR | : Kaliforniya Taşıma Oranı |
| CU | : Konsolidasyonlu Drenajsız |
| CD | : Konsolidasyonlu Drenajlı |
| UU | : Konsolidasyonsuz Drenajsız |
| USCS | : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması Sistem |

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Yer bilimi, kayaların ve zeminlerin oluşumunu, yapısal kimliklerini ve hareketlerini inceler. Zeminler kayaçların kimyasal ve fiziksel olaylarla parçalanması sonucu oluşan, içinde organik ve inorganik maddeler bulunan ve çeşitli etkiler altında şekil değişimi gösteren materyallerdir.

Günümüzde insan nüfusunun artmasına paralel olarak, yapı talebinde artış görülmektedir. Artan yapı kapasiteleri daha yüksek temel taban basınçlarını doğurmaktadır. Artan talebe bağlı olarak mühendislik özellikleri yetersiz olan zeminler kullanıma açılmaktadır. Bu durumda zeminlere ait temel özelliklerin yapı taleplerine bağlı olarak modifiye edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Genel olarak stabilizasyon, zeminlerin mühendislik özelliklerinin amaca uygun bir şekilde iyileştirme çalışmalarıdır (Önalp, 1983). Zeminlerin mühendislik özellikleri yetersiz olması durumunda aşağıdaki uygulamalar gerçekleştirilebilir:

- Zayıf olan zemini kazı yardımıyla çıkararak sağlam zemine temeli inşa etmek.
- Zayıf olan zeminin yerine mühendislik özelliği iyi olan zeminle değiştirmek.
- Yapının bulunduğu yeri değiştirmek ve yeniden projelendirmek.
- Temel tasarımını mevcut probleme göre güncellemek.
- Uygun zemin iyileştirme yöntemlerinden biri ile zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek (Kocabey, 2019).

Uygun zemin iyileştirme uygulamalarının belirlenmesi, ekonomi, zaman, zemin tipi, tedarik kapasitesi, proje tecrübesi, çevresel etkiler gibi farklı etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Global ölçekte deniz seviyesinin yükselmesi, sel, heyelan, kuraklık gibi doğal doğal afetlerin oluşum sıklığının artması, su kaynaklarının ve tarım alanlarının azalması ve buna bağlı düzensiz göç gibi olumsuzlukların temel kaynağı dünya genelinde ortalama sıcaklığın artışı olarak gösterilebilir. Özellikle son yüzyılda, aşırı CO₂ salınımı atmosferde sera etkisine sebebiyet vermekte ve bu durum ortalama sıcaklığın artışına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle küresel ölçekte, CO₂ salınımını azaltmak oldukça önemlidir.

Portland çimentosu yüksek CO₂ salınımına neden olan bir malzemedir. Çimento üretimi sırasında ortalama 1400°C 'ye varan sıcaklıkla birlikte kalsinasyon süreci oluşumu sağlar.

Kalsinasyon ile kalsiyum karbonat (CaCO_3), ısıtılan reaksiyon sonucunda kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit (CO_2) ürünlerine dönüştürülür. Yüksek sıcaklık, genellikle fosil yakıt yakılması sureti ile elde edildiğinden bu aşamada yüksek miktarda CO_2 salınımı gerçekleşir. Buna ek olarak, kalsinasyon süreci içerisinde de son ürün olarak CO_2 elde edilir. Yapılan istatistiklere göre, çimento üretimi ile ortaya çıkan CO_2 , dünya genelinde CO_2 salınımının %5-8'ini oluşturmaktadır ve üretimde büyük oranda yenilenemeyen enerji tüketilmektedir (Scrivener, & Kirkpatrick, 2008). Bu nedenle yüksek miktarda enerji gerektiren ve büyük oranlarda CO_2 salınımına neden olan bu bağlayıcıların yerine daha az enerji ile üretilen ve daha az CO_2 salınımına neden olan geopolimer bağlayıcıların kullanımı giderek artmaktadır.

Geopolimer, katı atık ve yan ürünlerin kullanımı için ideal olan, inşaat mühendisliği alanında kullanımı giderek artan, düşük CO_2 salınımı sağlayan, konvansiyonel bağlayıcılara alternatif bir malzemedir. Çevresel anlamda problem oluşturabilecek atıkların değerlendirilmesinde uygun maliyetli çözüm sunar. Geopolimerizasyon, silikat ve alüminatların kimyasal olarak birleşmesi sonucu oluşan bir üründür. Alkali çözeltide çözülen puzzolanik bileşik ya da silika ve alümina kaynakları geopolimer oluşumunda önemli rol oynayan öncüller olarak adlandırılır. Alkali aktivatör olarak adlandırılan geopolimerizasyonda aktif rol oynayan bir diğer unsur da aktivatörlerdir. Alkali aktivatörler, genellikle periyodik tabloda alkali metaller olarak adlandırılan 1. Grup elementlerinden olan, yüksek pH'lı bileşiklerdir. Öcül olarak adlandırılan kaynaklardan yüksek pH sayesinde silika ve alümina eldesinde kullanılırlar. Elde edilen ürünlerin öncül içerisinde bulunan kalsiyum ya da sodyum içerikli ürünlerle tepkimeye girmesi sonrasında kalsiyum silika hidrat (CSH) gibi yüksek mukavemetli ürünlerin oluşmasına neden olurlar (Khale, & Chaudhary, 2007). Geopolimerik bağlayıcılar sürdürülebilir, çevre dostu, mekanik performansı iyi olan, ekonomik bağlayıcılardır. Bu nedenle Geopolimerik bağlayıcılar, çimento ya da kireç gibi konvansiyonel bağlayıcılar yerine kullanılacak alternatif bağlayıcı olarak kullanımı zemin iyileştirme uygulamalarında da yaygındır.

Yapılan çalışma kapsamında alkali aktive edilmiş zemin iyileştirme uygulamasına optimum bileşenler Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak belirlenmiştir. Yanıt yüzey yöntemi birden çok bağımsız değişken ile bu değişkenlerin sebep olduğu sonuçlar arasında istatistiksel ilişki kurma esasına dayanan Box ve Wilson (1951) tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Yöntem daha sonra deney tasarımlarının elde edilmesinde ve deneysel verilerin irdelenmesinin yararlanılacak hale getirilmiştir. Söz konusu yöntem ile mühendislik problemlerinin sebep-sonuç ilişkilerinin istatistiksel modellenmesi, sebep-sonuç ilişkilerinin irdelenmesi mümkün hale gelmektedir (Kamiloğlu, & Turan, 2022). Yöntemin amacı ele alınan

çalışma kapsamında belirlenen bağımsız değişkenleri belirli amaçlar doğrultusunda optimize etmek ya da bağımsız değişkenle ile değişkenlerin yol açtığı deneysel sonuçlar arasında tutarlı istatistiksel modeller ortaya koymaktır (Arslan, 2020).

Yanıt yüzey yöntemi, olayın ilerleyişini etkileyen parametreler arasındaki etkileşimin durumunu, etkileşim oluyorsa hangi parametre arasında etkileşimin daha güçlü olduğunu, tasarlanan olayın hangi parametrelerden daha fazla etkilendiğini tespit edebilmekte ve bundan kaynaklı da birçok alanda kullanılan yöntemlerden bir tanesidir (Türkyılmaz, 2011).

Optimizasyon tabanlı bakış açısı ile yanıt yüzey yöntemi, herhangi bir sistemi ya da herhangi bir deneyi iyileştirmek, geliştirmek ve optimize edebilmek için geliştirilen istatistiksel ve matematiksel yöntem olarak nitelendirilebilmektedir (Taşdemir, 2020).

Yanıt yüzey yöntemi, diğer tasarım yöntemleriyle karşılaştırıldığında en büyük avantajları, birden çok parametreleri ve etkileşimlerini değerlendirmek için deney sayılarını azaltmaktadır (Masike, 2019). Bağımlı değişkenlerin ikili etkileşimini matematiksel denklemler ile inceleme kolaylığı sağlamaktadır (Balçıkınlı, 2016).

Yanıt yüzey yöntemi, bölge araştırması, ürünün optimizasyonu ve eleme deneyleri olarak 3 kademede meydana gelmektedir. Bölge araştırması eleme deneyiyle belirlenen parametrenin optimum noktaya tespitini belirlemektedir. Eleme deneyleri, deneyin daha verimli ve daha az yapılmasıdır. Optimuma yaklaştıkça başlanıldığında gerçek yanıt fonksiyonu eğrilik göstermektedir. Bu eğrilerin bulunmasında doğrusal olmayan modeller kullanılmaktadır. Tasarım için model belirlenir ve belirlenen modelle optimum nokta belirlenir (Arslan, 2020).

Yanıt yüzey yöntemi esasen, bağımsız değişkenlerin yanıt olarak adlandırılan deneysel sonuca (y) etki miktarlarının (ζ) istatistiksel olarak belirlenmesi, bu etki miktarları dikkate alınarak belirli hata değerleri (ϵ) ile bağımsız değişken ile deneysel sonuç arasında matematiksel bir fonksiyonun türetilmesi temeline dayanır. Bu ilişki aşağıdaki formül ile kabaca ifade edilebilir.

$$y = f(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n) + \epsilon \quad (1)$$

Eşilik (1)'de (y) ile ifade edilen sonucun isabetli şekilde tahmin edilmesinde uygun fonksiyon tipinin (f) belirlenmesi önem arz etmektedir. Yanıt yüzey yönteminde yanıt ile sonuç arasındaki fonksiyonlar doğrusal, lineer olmayan, üssel, exponansiyel ya da çeşitli derecelerde polinomiyal modeller yardımı ile kurulabilir. Eşitlik (2)'de ikinci derecen polinom şeklinde türetilen sonuç ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi modelleyen eşitlik görülmektedir. Söz konusu eşitlikte x_n bağımsız değişkenleri, β katsayısı ise istatistiksel ilişki sonrası belirlenen regresyon katsayılarını temsil etmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 \quad (2)$$

Yanıt yüzey yöntemi ile yapılan tasarım 3 başlık altında (i) Güvenilir ölçüm için ele deneylerinin gerçekleştirilmesi, (ii) Bağımsız değerler ile deneysel sonuçlar arasında en uyumlu modelin belirlenmesi, (iii) Sonuca etki eden parametrelerin iki ya da üç boyutlu olarak belirlenmesi (Yanıt yüzeyin 3D olarak çıkarılması) olarak sınıflandırılabilir.



İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Çerçeve

Yapılan çalışma kapsamında farklı fiber donatı uzunluk kombinasyonlarının alkali aktif C-sınıfı uçucu kül ile iyileştirilmiş, yüksek plastisiteli siltli bir zeminde eğilme ve kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Zeminlerde kullanılan iyileştirme metotları ve yapılan literatür çalışmalarına bu kısımda yer verilmiştir.

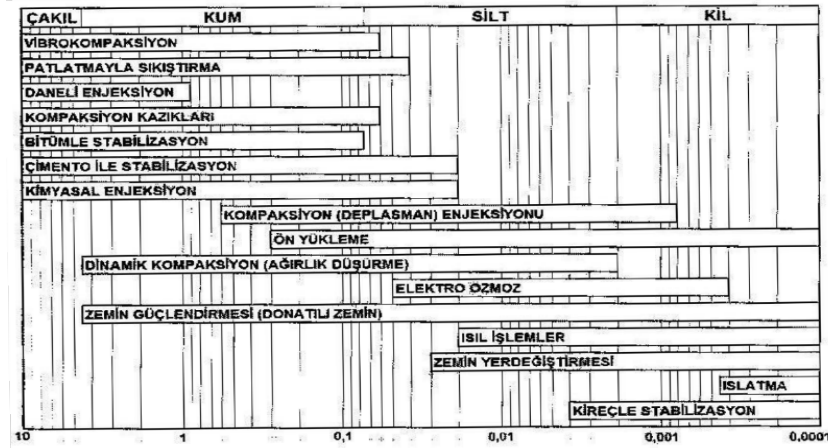
Zemin İyileştirme Yöntemleri

Mühendislik yapıların inşa edileceği arazinin zemin özelliklerini belirleyerek zeminin mühendislik özelliklerini uygun hale getirmek amacıyla zemini ıslah etme (iyileştirme) işlemine zemin stabilizasyonu denir. Zemini iyileştirmek amacıyla kullanılan metotlar ise “zemin iyileştirme yöntemleri” olarak adlandırılır. Zeminlerin iyileştirilmesinin amaçları iri daneli zeminlerde sıklığı arttırmak, zeminin kayma direncini arttırmak, ince daneli zeminlerin kıvamını arttırmak (Alptekin, 2020). Toplam oturmaları azaltmak, Permeabiliteyi düşürmek, zemindeki sıvılaşma riskini azaltmak veya kaldırmak ve dolgu ile şevler için gerekli stabilizasyonu sağlamaktır (Bostancı, 2020).

Zemin dayanımı yeterli olmadığında, sağlam olmayan zemini kaldırıp yerine sağlam zemin doldurmak, zemini yerinde iyileştirmek, yapıların oturacağı sağlam olmayan zemini geçerek sağlam zemine yapıları oturtmak veya yapı temel sistemini değiştirmek zemin iyileştirme yöntemlerini tanımlamaktadır (Alptekin, 2020).

Yüzeysel zemin iyileştirme uygulamaları kimyasal zemin iyileştirme yöntemleri ve mekanik zemin iyileştirme yöntemleri olarak iki alt sınıfa ayrılabilir. Mekanik stabilizasyon; hiçbir katkı maddesi (kireç, bitüm, çimento vb.) kullanmadan ve zeminle kimyasal reaksiyona girmeden sıkıştırmak, mühendislik özellikleri yüksek başka bir zeminle karıştırılarak uygun dane dağılımı elde etmek için uygulanan stabilizasyon yöntemidir. Kimyasal stabilizasyon ise zeminin herhangi katkı maddesi ile karıştırarak zemininin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla kimyasal reaksiyon sonucunda zeminin uygun hale gelmesidir (Bozkurt, 2020).

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulamaları zemin türüne göre değişmektedir. Zemin dane çapına göre uygulanacak iyileştirme yöntemleri uygulama aralığı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı zeminlerde stabilizasyon uygulaması (Çelik, 2020).

Zeminlerde ıslah amacına ve çeşitlerine göre uygulanacak stabilizasyon metotları Tablo'1 de verilmiştir (Çelik, 2020).

Tablo 1. Zemin Çeşitlerine Göre Stabilizasyon Metotları (Çelik, 2020)

| Zemin cinsleri | | Stabilizasyon yöntemleri |
|-----------------------------|----------|---|
| Çeşitli Dolgular | Sığ | Kazı/Geri dolu |
| | Derin | Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar |
| | Sığ | Kazı/Geri dolgu, geotekstil |
| | Derin | Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar |
| Yumuşak Killer | Tabakalı | Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar |
| | Sığ | Kazı/Geri dolgu, geotekstil |
| | Derin | Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar |
| Killer | Tabakalı | Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar |
| | | Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal(dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj |
| Gevşek Siltler | Sığ | Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı |
| | Derin | Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları |
| Gevşek Kumlar | Sığ | Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon |
| | Derin | Vibroflasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma) |
| Sıvılaştırılabilir zeminler | | Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj |
| Şişen zeminler | | Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları |
| Çatlaklı kayalar | | Enjeksiyon, ankraj, püskürtme beton, yüzey altı yatay drenaj |

Zemin stabilizasyon yöntemleri uygulama derinliğine bağlı olarak yüzeysel iyileştirme ve derin iyileştirme yöntemleri olarak ikiye ayrılır.

Yüzeysel iyileştirme yöntemleri.

Zeminlerin taşıma gücünü arttırabilecek birçok farklı metot ve teknoloji vardır. Yüzeysel zemin iyileştirmesinin kullanıldığı durumlar genellikle üst yapının yüklerinin fazla olmadığı, genelde ulaştırma projelerinde tercih edilmektedir (Önen, 2021).

Zayıf zeminlerin tabaka derinliği az olan, drenaj ve sıvılaşma problemlerinin sığ bölgelerde çözülebilen yerlerde ekonomik olması tercih edilen yüzeysel metot teknolojinin de gelişmesiyle çeşitlilik kazanmıştır. Yüzeysel iyileştirme yöntemi ikiye ayrılmaktadır.

Katkısız stabilizasyon.

Zemine herhangi bir katkı maddesi katılmadan uygulanan iyileştirme yöntemidir. Katkısız zemin iyileştirme yöntemleri ikiye ayrılmaktadır.

Kompaksiyon yöntemi.

Kompaksiyon (sıkıştırma) yöntemi zemin daneleri arasındaki hava boşluklarının azaltılması ve birbirlerine yaklaştırılması sonucu daha sıkı bir şekle sahip olmasını sağlayacak mekanik araçlar kullanarak zeminin sıkışması yöntemidir (Özaydın, 1997).

Zemin kompaksiyonunun esas ölçüsü olarak kuru birim hacim ağırlığı esas alınır. Kuru zemine biraz su ilave edilerek daneler arasındaki sürtünme azaltarak yağlanma etkisiyle daneler daha kolay sıkışır ve yerleşir (Özaydın, 1997).

Kompaksiyon metoduyla zemin içerisindeki havanın dışarı atılmasıyla zemin daneleri birbirine daha yaklaşmaktadır. Kompaksiyon metoduyla oturma, şişme azalırken, taşıma kapasiteleri, kayma mukavemeti ve maksimum kuru ağırlık yükselir (Çakır, 2001).

Yüzeysel drenaj yöntemi.

Zemin suyu kayma mukavemetini azalttığından dolayı zeminin taşıma gücünü düşürür. Zeminden suyu uzaklaştırmak zeminin stabilitesini arttırmaktadır (Uzuner, 2006).

Yer altı suyunun uzaklaştırılması için yapılan iyileştirme metodudur. Suyun yapılara ve zemine zarar vermemesi önemlidir. Bundan dolayı hemen hemen her yapıda uygulanmaktadır (Alptekin, 2020).

Yüzeysel drenaj sistemleri basitçe hendekler veya toplama amaçlı suyu yönlendirme için şevlerin başına veya palyelere yerleştirilen çelik borulardır (Önen, 2021).

Katkılı stabilizasyon.

Zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katı maddelerinin zemine enjekte edilerek ve serilerek yerinde bir karışım hazırlanması işlemi ile yapılan iyileşme işlemidir. Katkı maddesi olarak geri dönüşüm ve doğal malzemeler kullanılmasının yanında kireç, çimento ve bitüm gibi kimyasal maddeler tercih edilir. Zeminde katkıların kullanılmasının amaçları, deformasyonu azaltmak, geçirimsizliği azaltmak, aşınmayı azaltmak ve dayanıklılığı arttırmaktır (Hausmann, 1989).

Bitüm katkısı ile stabilizasyon.

Bitüm ile stabilizasyon zemini suyun zararlı etkilerinden korunmasında rol oynamaktadır. Bitümlü zemin stabilizasyonunda asfalt ve katran kullanılmaktadır. Bitüm zeminin özelliklerine ve iklim koşullarına göre seçilmektedir. Danelerin birleştirilmesinde de etkilidir. Bunun sonucunda rüzgâr ve su erozyonuna karşı direnç sağlamaktadır. Su oranı yüksek bölgelerde tercih edilmektedir. Bitümlü stabilizasyon karayollarında yaygın olarak kullanılır (Uzuner, 2007).

Çimento ve kireç iyileştirmelerine nazaran az tercih edilmesinin sebebi pahalı olmasıdır. Bitümlü malzeme kumlu zeminlerde daha iyi sonuç vermektedir. Bitümlü malzemede plastisite indisi 10'dan fazla olmaması 200 No'lu elekten geçen en fazla %18 olması ve likit limit de 40'dan fazla olmaması şartları getirilmiştir (Tumluer, 2006).

Çimento katkısı ile stabilizasyon.

Çimento ile zemin stabilizasyonu 1920'de karayollarında kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda iyileştirmede kireçle birlikte yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ekonomik olması sebebiyle dünyanın birçok ülkesinde kullanımını arttırmaktadır (Şengül, 2010).

Ham maddesi alçı taşı ve kalker olan çimento, iyi bir yapıştırıcıdır. Çimento ile stabilizasyon farklı alanlarda farklı amaçlar için kullanılabilirler. Özellikle hareketli yüklerin büyük ve devamlı olduğu havaalanı pistleri ve ulaşım yapılarında uygulanmaktadır (Tumluer, 2006).

Zemin stabilizasyonlarında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar için gerekli silika maddeleri çimentonun içerisinde mevcuttur. Çimento, içerisinde puzolanik maddesi bulunmayan zeminler için etkili stabilizasyon malzemesidir. Beton için bağlayıcı özelliğinden

dolayı önemli bir faktördür. Betondan avantaj olarak farkı çimento oranının çok az olmasıdır (Özaydın, 2000).

Çimento ile stabilize edilebilecek zeminlere eklenecek ideal çimento miktarı Atterberg ve pH deneyleriyle belirlenebilmektedir. Uygulanan çalışmalara bakıldığında zemin iyileştirilmelerinde kullanılan çimento miktarı %5-15 arasında değişmektedir. Organik zeminler haricinde tüm zeminlerde uygulanması etkilidir. Çimento ile iyileştirilen zeminlerde hacimsel artış gözlenmekte ve çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle plastisite indisi 30'dan az olan zeminlerde uygulanmaktadır. (Şengül, 2010).

İyi derecelendirilmiş granüler zeminler, çimento ile stabilizasyon için uygun zeminlerdir. İnce daneli zeminlerde çimento oranı geçirgenliği artırırken iri daneli zeminlerde ise azaltmaktadır. Killi zeminlerde çimento kullanmak likit limit değerini düşürür ve mukavemeti, plastisite indisini ve işlenebilirliği artırır (Çetin, 2011).

Kireç katkısı ile stabilizasyon.

Kireç stabilizasyonu en eski bilinen iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Zemine kireç koyularak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi bunların sonucunda taşıma gücünün veya mukavemetinin artırılması için yapılan olaya kireç stabilizasyonu denilmektedir. Genellikle ince daneli zeminlere sahip karayollarının iyileştirilmesinde kullanılmaktadır (Can, 2017).

Kireç katkısı ile zemin stabilizasyonu zeminin plastisite indisi ve likit limiti azalırken elastisite modülü, işlenebilirliği, dayanım, suya dayanım, plastik limit ve mukavemetlerinde artışlar görülmektedir (Çakılcıoğlu, 2007).

Kireç stabilizasyonunda yaygın olarak sönmüş kireç kullanılmaktadır. Son yıllarda sönmemiş kireç kullanımı artsa da yakıcılığı bakımından tehlike arz ettiği için genellikle tercih edilmemektedir. Kireç, kullanılacak iyileştirme yerlerine göre farklı oranlarda olmaktadır. Kalıcı zeminlerde yüksek miktarda, geçici yol kaplamalarında düşük miktarda iyileştirme uygulanmaktadır. Kireç oranı LL, PL ve pH deneyleriyle belirlenebilmektedir (Tumluer, 2006).

Kireç genellikle killi zeminlerde uygulanır. Kireç; ince, orta ve çok ince daneli zeminle reaksiyona girerek mukavemet artışı göstermektedir. Organik zeminler ve kil içermeyen zeminlerde kireç stabilizasyonu uygun değildir (Tumluer, 2006).

Kireç stabilizasyonunda birtakım değişimler meydana gelmektedir. Kısa dönem ve uzun dönemde meydana gelen değişimler şeklinde ayrabiliriz. Kısa dönemde, CBR değerleri, serbest basınç değerleri, plastik limit değerleri ve su muhtevası artmaktadır. Plastisite indisi ve likit limit değerlerinde düşüş görülmektedir. Uzun dönemde ise; CBR değerlerinde kısa döneme

göre daha fazla artış görülmektedir. Aynı zamanda şişme ve büzülme karşı dirençte ve dona karşı dayanımda artışlar görülmektedir (Yıldız, 2020).

Kireçle zemin iyileştirmesi, diğer iyileştirme yöntemlerinden daha düşük maliyetle uygulanan bir yöntemdir. Uzun vadede fazladan bakım maliyetini düşürülmesinden dolayı etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Kısa vadede etkili olması ve ekonomik olduğundan özellikle yollarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Yıldız, 2020).

Uçucu kül katkısı ile iyileştirme.

Uçucu küller, yapay puzolan malzemedir. Kömür toz halde yakıldıktan sonra filtrelerde toplanan, ince partiküler haldeki malzeme uçucu kül olarak nitelendirilmektedir. Kömür yakıldıktan sonra geriye %20 oranında uçucu kül kalmaktadır (Yıldız, 2020). Uçucu küller aynı zamandan atık kül olarak da bilinmektedir. Yıllık atık kül üretimi çok yüksek olduğundan beton imlatında, zemin iyileştirme uygulamaları kapsamında kullanılmaları ile çevreye verdikleri zararlar nispeten ortadan kaldırılabilmektedir (Sarsılmaz, 2017).

Uçucu kül (UK), zemin iyileştirme uygulamalarında önemli kimyasal etkiye sahiptir. Kimyasal olay genellikle tek yönlüdür. Silt ve killi zeminler en sıkıntılı olanlarıdır. Bu zeminler su ile temasa girdiklerinde yumuşak hale geçerler. Siltli ve killi zeminler uçucu küle stabilize edildikleri zaman katyon değişimleri ve sonrasında topaklanma işlemi kalsiyum hidroksit sayesinde hızlanır. Reaksiyon başlar ve içerisindeki kirece göre birkaç gün devam eder (Şengül, 2010). Uçucu küllü zemin stabilizasyonunda, plastik limit, likit limit, permabilite, mukavemet değerleri, kompaksiyon gibi özellikler üzerinde olumlu etkisi vardır (Yıldız, 2020).

Uçucu kül ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilir ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan uçucu küllerdir. CaO yüzdesi % 10'dan düşük olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılır. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri yoktur. C sınıfı uçucu küller yarı bitümlü kömürden veya linyitten üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcılık özellikleri de söz konusudur (Akyüncü, 2012).

Genelde taşıma gücü ve şişme problemi olan zeminlerde uçucu kül takviyesi ile iyileştirme işlemleri uygulanmaktadır. Uçucu kül katkısı, zemin iyileştirmesinde, ek kazı ve dolgu maliyetini azaltır, yapım hızını artırır ve mukavemeti artırır. Bazı iyileştirmelerde kireç ya da çimentoyla karıştırılabilir (Çetin, 2011). Uçucu küle ait fiziksel özellikler Tablo 2'de, reaksiyon için gereken fiziksel değerler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. *Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri (Gücek, 2011)*

| Çap (Mikron) | Renk | Şekil | Yoğunluk (g/cm ³) | İncelik |
|--------------|------|-------|-------------------------------|---------|
|--------------|------|-------|-------------------------------|---------|

| | | | | |
|---------|-----|----------|-----------|------------------------------|
| 1 – 200 | Gri | Yuvarlak | 2,2 - 2,7 | Yaklaşık çimento inceliğinde |
|---------|-----|----------|-----------|------------------------------|

Tablo 3. Uçucu Küllerin Sağlaması Gereken Fiziksel Değerler (Çalık, 2012)

| | ASTM C 618 (2002) | | TS 639 (1975) |
|---|----------------------|----------|------------------|
| | F sınıfı | C sınıfı | |
| İncelik: | 34 | 34 | - |
| 45 mikron göz açıklıklı kalan miktar, maks. % | | | |
| Özgül yüzey, min. mm ² /g | - | - | 300000 |
| Dayanım aktivite indeksi: | 75 | 75 | 70 |
| 28. gün, min. % | | | |
| Su ihtiyacı: | | | |
| Kontrol numunesine kıyasla, maks. % | 105 | 105 | - |

Yılmaz (2016), yaptığı çalışmada, düşük plastisiteli killi zeminlere farklı oranlarda uçucu kül ekleyerek zemin iyileştirmesi uygulaması gerçekleştirmiştir. Uygulama sonucunda maksimum serbest basınç dayanımı elde edebilmek için uçucu kül katkısı %25 oranında kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Aksoy (2008), yaptığı çalışmada, killi zemin içerisine %10'a kadar belirli oranda uçucu kül katarak elde ettiği karışımın plastisitesini, optimum su muhtevasını ve serbest basınç dayanımı araştırmıştır. Çalışma sonucunda çucu kül eklenmesi sureti ile karışımın optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımı arttığı, plastisitesinde herhangi bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

Ünver (2015), yaptığı çalışmada, düşük plastisite killi zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesini araştırmıştır. %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında uçucu kül katkılı ve uçucu kül katkısız numuneler üzerinde şişme, dispersibilite ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda zeminin şişme, dispersibilite ve dayanımının uçucu kül katkısı ile birlikte iyileştiği gözlenmiştir.

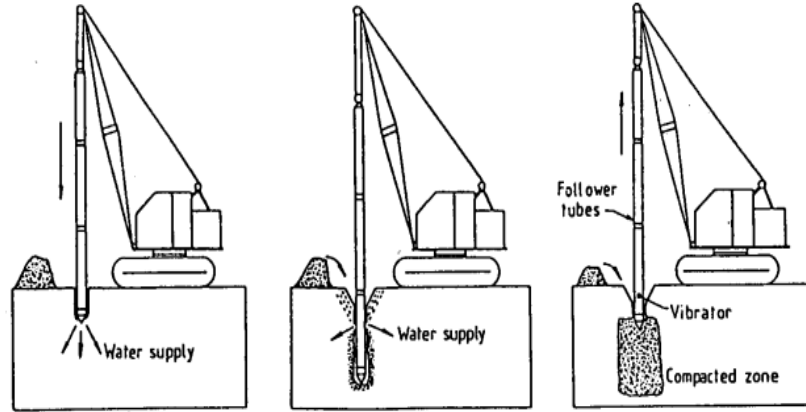
Brooks (2009), yaptığı çalışmada, pirinç kabuğu külünün ve uçucu kül katkısının şişen zemin içerisindeki dayanım özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda %12 oranındaki pirinç kabuğu külü ve %25 oranında uçucu kül katkı maddesi kullanılarak şişmiş zeminde yüksek dayanım elde edilmiştir.

Derin iyileştirme yöntemleri.

Çok sayıda zemin iyileştirme metotları vardır. Sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri vibro kompaksiyon metodu, patlatma ile kompaksiyon ve dinamik kompaksiyon metotlarıdır (Ayan, 2009).

Vibro kompaksiyon metodu.

Vibro kompaksiyon metodunda 0,3 ile 0,5 m çapında, 1,5 ile 2,5 m uzunluğunda ve 3 ton ağırlığında büyük silindir biçiminde bir vibratör kullanılır (Çelik, 2020). Vibratör denilen sonda vinç ve uzatma borularıyla üzerindeki su jeti ve kendi ağırlığı ile titreştirilerek zemine sokulur. Vibrasyon genliği zemine büyük yükler vermektedir. Vibratör zemine 1-2 m/dak. hızla zemine girer. Titreşmiş olan zemin oturur ve vibratörün köşelerinde bir çöküntü oluşur. Alana getirilen çakıl kum bu boşluğa doldurularak zemin devamlı doldurulur. Belirtilen derinliğe inen titreşimli sonda üstten malzeme devamlı eklenirken zemini sıkıştırarak yavaş yavaş yukarı çekilir. İyileştirme alanında sonda çapından daha büyük bir kolon oluşur (Gökçer, 2018). Yönteme ait işlemler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Vibro kompaksiyon metodu basamakları (Gökçer, 2018).

Patlatma ile kompaksiyon metodu.

Patlayıcıların patlama etkisiyle ortaya çıkarttığı titreşim ve şok dalgaları zeminin sıvılaşması ve sıkılaşmasına sağlayan metottur. Patlatma metodu ile granüllü zeminlerin ve yumuşak zeminlerin taşıma kapasitesi artırılabilir. Rölatif yoğunlukta %35-85 artış sağlanmaktadır. Granüllü zeminler tam doymun olmalıdır ki patlatma ve taşıma kapasitesi artırılması başarılı olsun. Zeminde ki hava boşluklarının fazlalığı taşıma kapasitesinin iyileştirilmesini zorlaştırmaktadır. Patlatma metodunun avantajları diğer yöntemlerde üstünlüğü istenilen derinliğe inilmesi ve ekonomik olmasıdır. 40 metre derinliğe kadar inilerek

patlatma yapılabilir. Uygulama süreleri kısadır ama çok tercih edilmemektedirler çünkü doğaya karşı çok fazla zararları vardır (Selçukhan, & Ekinci, 2021).

Patlatma işlemi TNT ve dinamit kullanımı ile yapılmaktadır. Patlatma yapıldıktan sonra çevreye verdiği zararlar belirli değildir. Patlayıcıların genel olarak faydalandığı yerler suyun alt kısmındaki gevşek zeminlerin 1-3 m üst kısmıdır (Öksüz, 2006).

Dinamik kompaksiyon metodu.

1930 yıllarında Almanya'da otoyol inşaatı sırasında kullanılmaya başlamıştır. 1950 yıllarından itibaren İngiltere'de uygulama alanı bulmuştur (Loos, 1936).

Dinamik konsolidasyon, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlere ağır yükler düşürülerek sıvılaşma, şok dalgaları, yüzey çatlaması ve yoğunluğunun artırılmasını amaçlar. Bu yöntem %70-80 relatif sıkılığa kadar ve kalınlığı 20 m'ye kadar olan gevşek iri daneli zeminleri sıkıştırabilmektedir. Dinamik kompaksiyon yöntemi iri daneli zeminlerde ve moloz dolgularda başarılı olmuştur (Ayan, 2009).

Dinamik kompaksiyon metodunda 10-40 m yükseklikten 10-40 tonluk ağırlık düşürülmektedir. Ağırlığın zemine vurmasıyla ortaya çıkan şok dalgaları, düşme yerinde zemini sıkıştırmaktadır (Ayan, 2009). Dinamik kompaksiyon metodu Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dinamik kompaksiyon uygulaması (Öz, 2015).

Geopolimer

Geopolimer bağlayıcı 1978'de Davidovits tarafından bulunmuştur. Kimya alanı dışında da birçok mühendislik alanında ilgi çekmiştir. Geopolimerler, asit ve sülfata karşı dirençleri, çevre dostu olmaları ve yüksek seviyelerde dayanıma düşük kür sürelerinde ulaşabilmeleri nedeniyle normal Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı olarak ortaya çıkmaktadır (Thokchom, Ghosh, & Ghosh, 2009).

Çimentonun, üretim sırasında çevreyi olumsuz etkilemesi, üretim maliyetinin yüksek olması gibi olumsuz özellikleri bulunmaktadır. Bu olumsuzluklardan dolayı çimentoya alternatif bağlayıcılar üretilmeye ihtiyaç duyulmuştur. Geopolimerler, alkali özellik gösteren aktivatörlerle alüminli ve silis içerikli malzemelerin çözünmesi suretiyle elde edilir. Geopolimerizasyon işleminde Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO içeren uçucu küller ve yüksek fırın cürüfları, tüf, tüfit gibi bazı doğal volkanik taşlar, pirinç kabuğu külü, metakaolin dibi bağlayıcılar kullanılarak çimentoya alternatif bir bağlayıcı üretilir. Söz konusu bağlayıcıların sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” olarak adlandırılan amorf yapıda inorganik polimerler oluştururlar (Görür, 2015).

Panias ve arkadaşları (2007) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer üretiminde sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su içeriğinin geopolimerlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda sodyum silikat miktarının artmasına su içeriğinin azalmasına bağlı olarak iyileştirilmiş zemin numunesinin basınç dayanımı değerinin arttığı gözlenmiştir.

Olivia ve Nikraz (2012) yaptıkları çalışmada, uçucu küle geopolimer üretmişler ve kütleme sıcaklığını, geopolimer özelliklerini, karışım oranını ve alkali yüzdesini etkileyen parametrelerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda serbest basınç dayanımı 55 MPa civarında olan numuneler elde etmişlerdir.

Atiş (2015) yaptığı çalışmada, sodyum hidroksit ve uçucu kül bazlı geopolimer harç örneklerini incelemiştir. Farklı kür süreleri, farklı kür sıcaklıkları ve farklı sodyum hidroksit molaritelerinin eğilme ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucuna karışımdaki alkali aktivatör oranı, kür süresi arttıkça eğilme ve basınç değeri arttığı görülmüştür.

Collins ve Sanjayan (1999) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanarak alkali aktive edilmiş beton hazırlanmıştır. Uçucu kül katılarak elde edilen betonunun dayanımının Portland çimentolu betonların dayanımı ile aynı olduğu ve işlenebilirliğin arttığı gözlenmiştir.

Geopolimerlerin kimyası.

Geopolimer, alüminosilikat hammaddesi ile alkali aktivatör arasında gerçekleşen reaksiyon sonucunda oluşmaktadır. Bu reaksiyon silikat ve alümin monomerleri meydana getiren Si-AL-O bağlarını oluştururlar. Monomerler önce oligomerlere ve sonra silikat polimerlere dönüşür. Alkali (Na_2O) ve alüminosilikat arasında gerçekleşen reaksiyonda alümin silikat hidrat (NASH) jeli oluşur (Davidovits, 1991).

Geopolimer kelimesi genel olarak alkali ile aktive edilen çimentolar, alkali bağlı seramikler, hidroseramikler, inorganik polimerler vb. alkali alüminosilikatları tanımlamak için kullanılmaktadır. Geopolimerizasyon teknolojisinde katı madde olarak feldispat, uçucu kül, kaolinit ve maden atıkları vb. gibi endüstriyel alüminosilikat kaynaklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu alüminosilikat kaynakların reaktivitesi mineralojik yapılarına, morfolojilerine, inceliğine, kimyasal yapılarına ve camsı faz içeriğine bağlıdır. Kararlı geopolimerlerin gelişmesinde ana kriterler, malzemelerin yeteri kadar amorf olması ve yeterli reaktif içeriğe, alüminyum serbest bırakmasına bağlıdır. Alüminosilikat materyalleri aktive etmek için potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), hidroksit (NaOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkali aktivatörleri kullanılmaktadır. Geopolimerlerin özellikleri belirli uygulamayla doğru karışım, uygun hammadde seçimi ve işleme tasarımı ile optimize edilmektedir (Duxson, ve diğerleri, 2007).

Uçucu kül esaslı geopolimerin basit ve temel olarak gelişimi, uçucu kül içerisinde bulunan alüminosilikatın ayrışması ve daha sonra polikondensasyondur. Reaksiyonlar normal sıcaklık altında devam etmekte bu sayede kaynak verimli olduğu kabul edilmektedir (Xiem, 2016).

Geopolimerlerin oluşumundaki kritik rol uçucu külün alkali ile aktifleştirilmesi olayı olarak düşünülebilir. NaOH, KOH, Na_2SiO_3 ya da K_2SiO_3 gibi alkali çözeltilerde alümina, silika veya alüminosilikatlarda (-Si-O-Al- veya -Si-O-Si-) alüminosilikat bağları kırılmaktadır. Daha sonra Si^{+4} ve Al^{+3} türleri reaksiyona girer ve SiO_4 ve AlO_4 tetrahedradan oluşur. Si/Al oranı oluşan polimerin yapısını önemli derecede etkilemektedir (ALNKAA, 2019). Şekil 4'de geopolimer oluşum süreci gösterilmiştir.



Şekil 4. Uçucu kül katkılı Geopolimer üretim süreci (ALNKAA, 2019).

Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu atık maddeler, doğal başkalaşım kayalarları, volkanif tüfler alkali silikat ve alkali tuzların düşük sıcaklıklarda tepkimeler gerçekleştirmesiyle geopolimerizasyon süreci başlamaktadır. Geopolimer fırınlanan kil

içerisinde bulunun silikatların ve alüminatların oksijen atomu elektronlarının paylaşarak kovalent bağlı bileşikler meydana getirmesi olarak belirlenmektedir (Davidovits, 2008).

Geopolimerlerin alkali ile aktivasyonu.

Alkali ile aktivasyon 1939 yılında Feret'in çimento içerisinde kullanılmasıyla başlamıştır. Alkali aktivasyon ile yapılan çalışmalar Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. *Alkali Aktivasyon Tarihsel Gelişimi (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, & Jalali, 2008)*

| Tarih | Gelişme | Yazar |
|-----------|--|------------------------------|
| 1939 | Çimento içerisinde cüruf kullanılması | Feret |
| 1940 | Alkali-cüruf birleşiminin kullanılması | Purdo |
| 1959 | Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi | Glukhovsky |
| 1986 | Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla "alkalin çimentolar" adının ilk kez kullanılması | Glukhovsky |
| 1989 | Cürufun alkali aktivasyonu | Talling ve Brandstet |
| 1990 | Cürufu çimentoların aktivasyonu | Wu ve diğer. |
| 1991 | Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılarının geliştirilmesi | Roy ve diğer. |
| 1993 | Cüruf çimentosu | Roy ve Malek |
| 1994 | Alkalın bağlayıcılar | Krivenko |
| 1995 | Alkaliler ile aktive edilmiş cürufun mikro yapı incelemeleri | Wang ve Scrivener |
| 1996 | Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimsizliği ve boşluk yapısı | Shi |
| 1997 | Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları | Fernández-Jiménez ve Puertas |
| 1998 | Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı | Katz |
| 1999 | Geopolimer sistemlerin kimyası ve teknoloji | Davidovits |
| 2000 | Alkaliler ile aktive edilmiş uçucu kül- cüruf çimentosu | Puertas |
| 2001-2002 | Alkaliler ile aktive edilmiş cürufu beton | Bakharev |
| 2003 | Atıkların bertaraf edilmesi | Palomo |
| 2004 | Zeolit oluşumu | Grutzeck |
| 2008 | Geopolimerlerin tek başına kullanımı | Hajimohammadi ve ark. |
| 2009 | Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları | Provis ve van Deventer |

Geopolimerlerin kullanım alanları.

Geopolimerlerin birçok bilimsel ve endüstriyel alanda kullanımı araştırılmaktadır. Buradaki yönelimin amacı yanıcı ve yanmaz olmayan plastikler üretmek üzerine olmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda, uçak kabinleri, yüksek sıcaklığa dayanan polimer üretimi ve pist alanlarında çeşitli uygulamalar yapmıştır. Yapılan diğer araştırmalarda, seramik karolarda, dekoratif taş eserlerde, bina malzemelerinde, döküm sanayi, çimento ve betonlar, tamir ve

güçlendirme, yığma yapılarda, biyoteknolojide ve otomobil gibi kullanıldığı tespit edilmiştir (Maraş, 2019).

Alkalilerle aktifleştirilmiş uçucu kül katkısı ile elde edilen geopolimer bağlayıcıların, çimento ile üretilen betonlara göre dış etkilere karşı dayanıklılık, yüksek dayanım, hızlı dayanım kazanma, donatı ile yüksek aderans, düşük ısıl iletkenlik, hacimsel stabilite gibi avantajları bulunmaktadır. Bunların yanında tuğla ve gaz beton üretiminde kullanıldığında enerji maliyetini azaltmakta ve kür sıcaklığını düşürmektedir (Topçu, & Toprak, 2009). Geopolimerlerin kullanım alanları Tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 5. *Geopolimerlerin Kullanım Alanları (Atabey, 2017)*

| Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların kullanım alanları | |
|--|---|
| Yapısal betonlarda | Yüksek sıcaklığa dayanıklı beton yapımı |
| Duvar blok elemanı üretiminde | Petrol kuyuları |
| Beton kaldırım yapımında | Tehlikeli atık stabilizasyon betonları |
| Beton büz yapımında | Sulama sistemleri ve dalgakıran yapımında |
| Elektrik direklerinde | Döşeme yapımı, temel yapımı |
| Gaz beton uygulamalarında | Prefabrik yapı inşaatı |

Alkaliler

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle aktivatör olarak kullanılan alkalilerin, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum meta silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum silikat diğer adıyla cam suyu (Na_2SiO_2) olduğu gözlemlenmiştir (Yakupoğlu, 2010).

Sodyum hidroksit.

Sodyum hidroksit, beyaz renktedir ve suda ısı yayarak çözünür. Çözündüklerinde kaygan bir çözelti oluşturur. Nem tutucu özellikleri sayesinde asitli gazları yakalamak için kullanılırlar. Ucuz, kolay ve istenilen miktarda temin edilebildiğinden avantajlı bir maddedir (Yakupoğlu, 2010). Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. *Sodyum Hidroksitin Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| Oksit | Asidi metrik | Na_2CO_3 | Cl | SO_4 | Pb | Al | Fe |
|-------|--------------|--------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| % | ≥ 97 | ≤ 1 | ≤ 0.01 | ≤ 0.01 | ≤ 0.002 | ≤ 0.002 | ≤ 0.002 |

Sodyum karbonat.

Sodyum karbonat, kolay ve istenebilen miktarda rahatça bulunabilirler, ucuzdurlar. Ülkemizde yıkama sodası olarak bilinirler. Sodyum karbonatlar bazı kayalarda ve bazı deniz bitkilerinde mineral olarak bulunurlar (Yakupoğlu, 2010). Sodyum karbonatın kimyasal özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. *Sodyum Meta Silikatın Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| | | | | | | |
|-------|--------------|---------|-----------------|------------------|-----------------|---------|
| Oksit | Asidi metrik | Cl | PO ₄ | SiO ₂ | SO ₄ | N |
| % | ≥ 99.9 | ≤ 0.002 | ≤ 0.001 | ≤ 0.002 | ≤ 0.005 | ≤ 0.001 |
| Oksit | Pb | Al | Ca | Fe | K | Mg |

Sodyum meta silikat.

Sodyum meta silikat, silmaco silikatlarından elde edilmiştir (Yakupoğlu, 2010). Sodyum meta silikat kimyasal özellikleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. *Sodyum Meta Silikatın Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| | | | | |
|----------|-------------|---------------|------------------|-------------------|
| Özellik | Molar oranı | Ağırlık oranı | SiO ₂ | Na ₂ O |
| Değerler | 0,94 | 0,91 | 44,94 | 49,38 |
| Sınır | 0,91-1,01 | 0,88-0,98 | 44,30-46,30 | 47,90-49,90 |

Sodyum silikat.

Sodyum silikat, suda çözünen bir cam türü olduğundan cam suyu denilmektedir. Yüksek erime noktasına sahiptir. Seramik olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır (Yakupoğlu, 2010). Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. *Sodyum Silikatın Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| | | |
|--|----------------------|--------|
| Test | Standart | Sonuç |
| Görünüş | Berrak, viskoz likit | Berrak |
| Bome derecesi (20 ° C) | min. 40 | 40.68 |
| Yoğunluk (g/cm ³) (20 ° C) | min. 1.382 | 1.390 |
| Na ₂ O (%) | 11.0 – 12.0 | 11.62 |
| SiO ₂ (%) | 22.0 – 24.0 | 23.06 |
| Modül | 2 ± 0,2 | 1.98 |
| Katı madde miktarı (%) | Min. 33.60 | 34.68 |
| Fe miktarı (ppm) | Max. 80.00 | 30.00 |

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, atık malzeme olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin aktive edilmesiyle üretilebilmektedir. Alkali aktivasyonla üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek performans, düşük enerji giderir ve çevrenin daha az kirlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca atık malzeme kullanımı, depolamayı azaltmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentosu ve betonlarına göre yüksek ve erken dayanım, düşük hidratasyon ve donma-çözülme etkilerine karşı daha avantajlıdır. Saydığımız olumlu özellikler, uygun aktivatör çözeltilisinin kullanımına ve seçilen aktivatörün uygunluğuna bağlıdır. Uygun değil ise hızlı priz, yüksek büzülme değeri ve çiçeklenme gibi sorunlarla karşılaşılabilir (Yardımcı, & Aydın, 2016).

Fiber donatı

Zeminlerin doğal lif kullanarak donatılı hale getirilmesi olayı eski çağlardan beri süre gelen bir zemin iyileştirme yöntemidir. Eklenen donatıların zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlenmiştir. Zemine donatı eklenmesinin amacı, oturmaları azaltmak, taşıma gücünü arttırmak, yanal deformasyonları sınırlamak ve zemin stabilitesini sağlamaktır. Doğal ve sentetik fiberlerin maliyetlerinin düşük olması, sentetik fiberler geri dönüşüm ürünlerinden üretilmesi, ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Eskişar, & Altun, 2015).

Eskişar ve Altun (2015), fiber donatı uzunluğu ve donatı içeriğinin artmasına bağlı olarak fiber donatılı zeminlerin serbest basınç mukavemetlerinin arttığını gözlemlemiştir. Fiber donatı katkılı zeminlerde sünekliliğin arttığı gözlenmiştir. Fiber donatılı zeminlerin donatısız zeminlere göre donma-çözülme etkisi altında mekanik davranışlarının sünek biçimde devam ettiği gözlenmiştir.

Makro sentetik fiber donatı.

Makro sentetik fiber donatılar beton içerisinde homojen dağılılabilen, yüksek performans gösteren hammaddeden üretilen özel tasarımlarla yük altında ve plastik betonun her yerinde çatlak kontrolü sağlayan standart donatılara göre çevreci ve uzun ömürlü, yeni nesil betonlardır. Geleneksel donatılar betonarme yapılarda dayanıklılığı ve sağlamlığı arttırmak için kullanılmaktadır. Makro fiber donatılar yapılarından kaynaklı korozyona uğramazlar. Korozyona uğramadıklarından dolayı sağlam bir şekilde kalırlar (Oral, 2020).

Geleneksel donatılara yanında alternatif ürün arayışı ve gelişen teknolojiyle birlikte makro sentetik fiber donatılı malzemelerin üretilmesinde zemin hazırlamıştır. Makro fiber donatılar betonun içerisine belirli miktarda katılarak kullanılmaktadır. Makro sentetik fiber donatıların avantaj sağladığı yerler; endüstriyel zeminler, baraj projeleri, kablo kanalları, hidroelektrik santralleri, maden galerileri, nihai kaplama betonları, prekast beton elemanları, ray altı betonları, otoparklar, saha betonları ve tesis betonlarıdır (Oral, 2020).

Makro sentetik fiber donatıların teknik özelliklerinin sağladığı avantajlar; çatlak oluşumunun engellenmesi, eğilme-çekmeye karşı direnç, mekanik dayanım, yüksek durabilite, kimyasal çözücülere ve korozyona karşı dayanım, çevrimsel yüklerle karşı dayanım olarak sıralanabilir (Oral, 2020). Makro sentetik fiber donatı Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Makro sentetik fiber donatı (Aydoğdu, 2019).

Mikro fiber sentetik donatı.

Kerpiç olarak adlandırılan yapı malzemesinde kullanılan ve malzemenin aderansını ve çekme dayanımını iyileştirici etki gösteren saman ürünlerinin, modern çağda geliştirilmiş başka bir hali fiber donatılardır. Bu donatılar, zemin harçlarında ve betonlarda kullanılmak için geliştirilmiş, modifiye tekstil, cam ve plastik malzemelerden üretilmektedir (Aydoğdu, 2019).

Beton, döküm ve priz alma aşamalarından sonra rötre denilen büzülme çatlaklarına, sonrasında elastik ve plastik deformasyonlar karşısında yapısal çatlaklara maruz kalmaktadır. Bu çatlamlar dayanıklılık ve dayanım açısından betonda olumsuz etkiler bırakmaktadır. Ayrıca betonun maruz olduğu çekme dayanımları kendinde mikro çatlaklar oluşturmaktadır. Tüm bu olaylar karışında betonda içsel gerilmeleri almak ve gerilmelerden kaynaklı oluşacak çatlakları önlemek amacıyla birçok türde, şekilde ve boyutta sentetik fiber üretilmekte ve gelişmektedir (Aydoğdu, 2019).

Mikro fiber sentetik lifler çok ince liflerden oluşmaktadır. Uzunlukları lifin malzemesi ve üreticiyi göre değişiklik göstermektedir (Aydoğdu, 2019). Mikro fiber sentetik donatı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Mikro sentetik fiber donatı (Aydoğdu, 2019).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Bu yüksek lisans tezinin çalışmasının amacı, farklı fiber donatı uzunluk kombinasyonlarının alkali aktif C-sınıfı uçucu kül ile iyileştirilmiş, yüksek plastisiteli siltli bir zeminde eğilme ve kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Bu kısımda tez çalışmasında kullanılan materyaller, numuneler için yapılan deneyler ve referans alınan standartlara yer verilmiştir.

Doğal malzeme.

Deneyde kullanılan doğal malzeme Ordu il merkezinden 2 m derinlikteki inceleme çukurundan alınmıştır. Deney çalışmalarından önce getirilen doğal malzeme 24 saat etüvde kurutulmuştur. Doğal malzeme tamamen kurutulduktan sonra 4 No'lu elekten geçirilmiş ve stabilizasyon çalışması kapsamında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan doğal zemin, ASTM D 2487 standartlarına göre gerçekleştirilen deney sonucu ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına göre yüksek plastisiteli silt (MH) olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve uygulanan ASTM standartları Tablo 10'da verilmiştir.

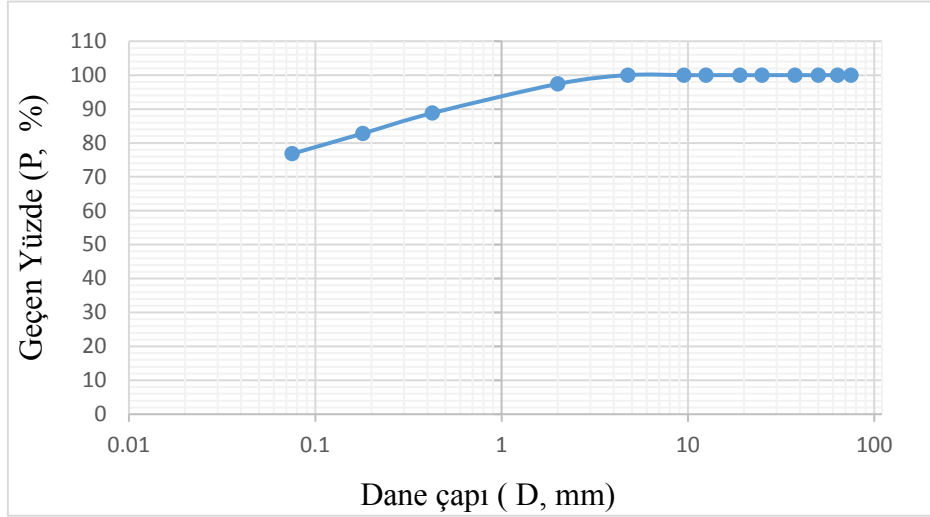
Tablo 10. *Deneyler ve Standartları*

| Deneyin adı | Standart |
|---------------------------------|-------------|
| Elek analizi | ASTM D 422 |
| Organik madde tayini | ASTM D 2974 |
| Özgül ağırlık deneyi | ASTM D 854 |
| Kıvam limitlerinin belirlenmesi | ASTM D 4318 |
| Standart kompaksiyon deneyi | ASTM D 698 |
| Serbest basınç deneyi | ASTM D 2166 |
| Üç eksenli basınç deneyi | ASTM D2850 |
| Eğilme deneyi | ASTM D790 |

Doğal zemine ait mühendislik özellikleri Tablo 11'de verilmiştir. Doğal zeminin granülometri eğrisi şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 11. *Doğal Zemine Ait Özellikler*

| | |
|--|-------|
| USCS sınıflandırılması | MH |
| Özgül ağırlık, G_s | 1.67 |
| Maksimum kuru yoğunluk, γ_{kmax} (kN/m ³) | 13.67 |
| Optimum su içeriği, W_{opt} (%) | 24.6 |
| Likit limit, LL (%) | 60.7 |
| Plastik limit, PL (%) | 33.2 |



Şekil 7. Doğal zemine ait dane boyutu dağılımı.

Uçucu kül.

Çalışmada birincil bağlayıcı olarak kullanılan uçucu kül OYAK enerji şirketinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Fiziksel özellikler | |
| 45 µ elek üzeri (%) | 4.0 |
| Özgül ağırlık (gr/cm ³) | 2.44 |
| Blaine (cm ² /g) | 2496 |
| Puzolanik aktivite | 15.8 |
| Kimyasal özellikler | |
| SiO ₂ (%) | 23.08 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 6.25 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 2.58 |
| CaO (%) | 47.03 |
| MgO (%) | 1.60 |
| SO ₃ (%) | 14.61 |
| K ₂ O (%) | 0.47 |
| Na ₂ O (%) | 0.32 |
| Kızdırma kaybı (%) | 3.95 |
| Cl (%) | 0.0334 |

Alkali aktivatör.

Deneyleerde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) çözeltileri kullanılmıştır. Cam suyu olarak isimlendirilen sodyum silikat (Na₂SiO₃) ilgili firmalardan sulu çözelti olarak temin edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) katı olarak alınmış ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi laboratuvarında 10 M sulu çözelti olarak hazırlanmıştır. 10 M sulu

çözelti, 1 litrelik mezür içerisinde yerleştirilen 400 gr ağırlığındaki NaOH üzerine su dökülerek NaOH tanelerinin tamamen su içerisinde çözülene kadar karıştırılması, NaOH peletlerinin tamamen çözülmesi akabinde mezür içerisinde su eklenerek 1 litreye tamamlanması sureti ile elde edilmiştir. Reaksiyon egzotermi olduğundan hazırlanan çözeltinin hava ile teması kesilerek soğuması beklenmiştir. Çalışmada kullanılan alkalilere ait kimyasal ve fiziksel özelliklere Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Na_2SiO_3 ve NaOH Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

| Özellikler | Sodyum hidroksit | Sodyum silikat |
|-------------------------------|------------------|----------------|
| Molekül formülü | NaOH | Na_2SiO_3 |
| Molekül ağırlığı (g/mol) | 40.02 | 181.92 |
| Renk | Beyaz | Beyaz |
| pH | 13.2-14.12 | 11-12.63 |
| Yoğunluk (g/cm ³) | 2.14 | 1.35-1.46 |
| Na ₂ O (%) | - | 8.85 |
| SiO ₂ (%) | - | 28.65 |
| H ₂ O (%) | - | 64.72 |

Fiber donatı.

Çalışmada kullanılan mikro sentetik fiber donatılar, Kordsa Firması’nın ürettiği ve Kratos Mikro Sentetik Fiber donatı olarak adlandırılan üründür. Çalışma kapsamında 3 mm ve 12 mm donatı uzunluğunda mikro sentetik fiber donatılar kullanılmıştır. Kratos mikro sentetik fiber donatı Şekil 8’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. Mikro sentetik fiber donatı. a) 3 mm, b) 12 mm

Tez çalışmasında kullanılan mikro fiber donatılara ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 14. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatıların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

| Fiber sınıfı | Ham madde | Özgöl Ağırlık (gr/cm ³) | Uzunluk (mm) | Çekme gerilmesi (MPa) | Alkali direnci | Korozyon direnci | Erime sıcaklığı (°C) | Fiber adedi / kg |
|--------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------|----------------|------------------|----------------------|------------------|
| EN 14889-2 Sınıf-I | Poliamid 6.6 | 1.14 | 12 | 900 | Çok İyi | Çok İyi | 260 | 111 E6 |



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

Tez çalışması kapsamında Ordu il merkezinden alınan birleşik zemin sınıflandırmasına (USCS) göre yüksek plastisiteli silt (MH) sınıfında olan zeminin geopolimer malzeme ve fiber donatı ile stabilizasyonu incelenmiştir. Bu bölüm kapsamında yapılan deney sonuçları ve araştırma bulguları detaylı şekilde ele alınmıştır.

Deneylelerden Elde Edilen Veriler

Yanıt yüzey yöntemi ile deney tasarımı ve bileşenlerin optimizasyonu.

Çalışmanın bu kısmında, tepki yüzey yöntemi (YYY) kullanılarak maksimum serbest basınç dayanımları elde edebilmek için uçucu kül ve aktivatör miktarının optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Deney tasarımı ve istatistiksel analizler için Design-Expert 12 istatistik yazılımı kullanılmıştır. Deney tasarımında $\alpha=0.5$ için merkezi kompozit tasarımı (CCD) uygulanmıştır. Üç faktörlü deneysel tasarım, üç faktöriyel noktanın (alt ve üst limitlerini temsil eder), üç eksenel (yıldız) noktanın (faktöriyel limitlerinin dışında olduğunu temsil eder) ve beş merkez noktanın (bağımsız değişkenlerin ortalama değerleri) tekrarlarını içerir. Bu amaçlar doğrultusunda uçucu kül ve aktivatör miktarlarının UCS değeri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla beş seviyeli merkezi kompozit tasarım (CCD) yapılmıştır. Deney tasarımında, bileşenlerin ağırlıkça yüzdeleri bağımsız değişken olarak dikkate alınmıştır. Bağımsız değişkenler; X_1 (Uçucu Kül Ağırlığı (UK): zemin ağırlığı (Z)), X_2 (Aktivatör Ağırlığı (A): Kuru madde toplam ağırlığı (Z+UK)) olarak belirlenmiştir. Numunelerin serbest basınç mukavemetleri (UCS) yanıt olarak kabul edilmiştir. Bağımsız değişkenlerin üst, alt ve merkezi noktaları Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkezi Değerleri

| Bağımsız Değişkenler | UK/Z | A/(Z+UK) |
|----------------------|--------------|----------|
| Seviye | X_1 | X_2 |
| Kodlanmış | Gerçek Değer | |
| +1 | 0.25 | 0.10 |
| +0.5 | 0.375 | 0.15 |
| 0 | 0.50 | 0.20 |
| -0.5 | 0.625 | 0.25 |
| -1 | 0.75 | 0.30 |

Silindirik zemin numuneleri Tablo 16’da gösterilen deney tasarımları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Tasarım üç ve altı tekerrürlü toplam 29 deneyden oluşmaktadır. Oluşturulan numunelerin imalatında dikkate alınan uçucu kül ve aktivatör miktarı Tablo 16’ya göre belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak, 88 mm yüksekliğinde ve 44 mm çapındaki numuneler haline getirilmiş, 27 °C sabit sıcaklıkta 7 gün süreyle küre tabi tutulmuştur. Kürlenmiş numuneler, ASTM D2166 dikkate alınarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen serbest basınç dayanımı (UCS) değeri, RSM tasarımında yanıt olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 16. *DeneySEL Tasarım Matrisi*

| Deney sayısı | Bağımsız değişkenler (Kodlanmış) | | Bağımsız değişkenler (Gerçek) | | Yanıtlar Y (MPa) |
|--------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|
| | X ₁ (UK/Z) | X ₂ (A/UK+Z) | X ₁ (UK/Z) | X ₂ (A/UK+Z) | |
| 1 | -1 | -1 | 0.25 | 0.10 | 0.04 |
| 2 | -1 | -1 | 0.25 | 0.10 | 0.05 |
| 3 | -1 | -1 | 0.25 | 0.10 | 0.053 |
| 4 | +1 | -1 | 0.75 | 0.10 | 0.25 |
| 5 | +1 | -1 | 0.75 | 0.10 | 0.14 |
| 6 | +1 | -1 | 0.75 | 0.10 | 0.08 |
| 7 | -1 | +1 | 0.25 | 0.30 | 5.4 |
| 8 | -1 | +1 | 0.25 | 0.30 | 3.32 |
| 9 | -1 | +1 | 0.25 | 0.30 | 3.7 |
| 10 | +1 | +1 | 0.75 | 0.30 | 5.87 |
| 11 | +1 | +1 | 0.75 | 0.30 | 6 |
| 12 | +1 | +1 | 0.75 | 0.30 | 7 |
| 13 | -0.5 | -0 | 0.375 | 0.20 | 1.29 |
| 14 | -0.5 | -0 | 0.375 | 0.20 | 2.48 |
| 15 | -0.5 | -0 | 0.375 | 0.20 | 1.46 |
| 16 | +0.5 | 0 | 0.625 | 0.20 | 1.175 |
| 17 | +0.5 | 0 | 0.625 | 0.20 | 0.93 |
| 18 | +0.5 | 0 | 0.625 | 0.20 | 1.06 |
| 19 | 0 | -0.5 | 0.50 | 0.15 | 0.331 |
| 20 | 0 | -0.5 | 0.50 | 0.15 | 0.57 |
| 21 | 0 | -0.5 | 0.50 | 0.15 | 0.402 |
| 22 | 0 | +0.5 | 0.50 | 0.25 | 1.83 |
| 23 | 0 | +0.5 | 0.50 | 0.25 | 1.65 |
| 24 | 0 | +0.5 | 0.50 | 0.25 | 2 |
| 25 | 0 | 0 | 0.50 | 0.20 | 0.67 |
| 26 | 0 | 0 | 0.50 | 0.20 | 1.09 |
| 27 | 0 | 0 | 0.50 | 0.20 | 0.8 |
| 28 | 0 | 0 | 0.50 | 0.20 | 0.84 |
| 29 | 0 | 0 | 0.50 | 0.20 | 1.2 |

İstatistiksel analizle elde edilmiş olan uyumsuzluk değeri, p değeri ve regresyon katsayısı değerleri dikkate alınmış ve model için indirgenmiş kübik model kullanılmıştır. İstatistiksel olarak anlamsız olan terimlerin elenmesi için model üzerinde geri analiz yapılmıştır ($p > 0,1$). Oluşturulan modelin doğrulanması için ANOVA yapılmış ve ANOVA sonuçları Tablo 17’de verilmiştir. Tabloda modellerin R^2 değerlerinin 1’e yakın olduğu gözlenmiştir ki bu istenilen bir olaydır. Daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla tahmin edilen R^2 ve ayarlanmış R^2 terimleri kullanılır. Tablo 17’de modellerin tahmin edilen R^2 ile düzeltilmiş R^2 değerlerinin nispeten yüksek olduğu gözlenmiştir. Tahmin edilen R^2 ve düzeltilmiş R^2 arasındaki fark 0,2’den daha az olduğundan, R^2_{pre} , R^2_{adj} ile uyum içerisindedir. Yeterli hassasiyet (A.q), sinyal-gürültü oranı 4’ten büyük olduğunu ölçer. Yeterli hassasiyet değerinden, modelin tasarım alanında gezinmek için kullanılabilmesi ve oranının yeterli bir sinyal gösterdiği görülmektedir. ANOVA sonuçlarından modelin F değerinin 71.11 olduğu ve p değerinin 0.0001’den küçük olduğu görülmektedir. F ve p değerleri modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. 0.528’lik uyum eksikliği F-değeri, uyumsuzluğunun önemsiz olduğu anlamına gelmektedir.

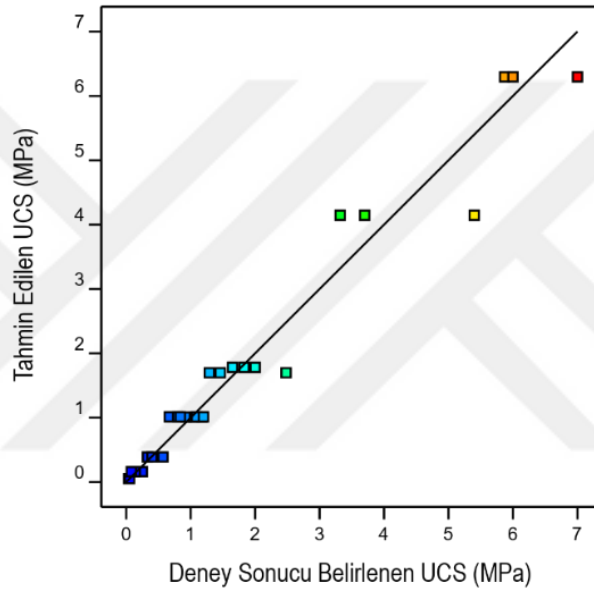
Tablo 17. *Anova Sonucu*

| Serbest basınç dayanımı, Y_1 | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------|----------|---------|
| Kaynak | Kareler toplamı | df | Ortalama kare | F-değeri | p-değeri | |
| Model | 105.29 | 7 | 15.04 | 71.11 | <0.0001 | Önemli |
| X_1 | 0.7107 | 1 | 0.7107 | 3.36 | 0.0810 | |
| X_2 | 2.91 | 1 | 2.91 | 13.75 | 0.0013 | |
| X_1X_2 | 3.12 | 1 | 3.12 | 14.77 | 0.0009 | |
| X_1^2 | 1.35 | 1 | 1.35 | 6.38 | 0.0197 | |
| X_2^2 | 0.0602 | 1 | 0.00602 | 0.2847 | 0.5992 | |
| $X_1^2 X_2$ | 1.81 | 1 | 1.81 | 8.54 | 0.0081 | |
| $X_1 X_2^2$ | 2.09 | 1 | 2.09 | 9.90 | 0.0049 | |
| Kalan | 4.44 | 21 | 0.2115 | | | |
| Uyum eksikliği | 0.0684 | 1 | 0.0684 | 0.3127 | 0.5822 | Önemsiz |
| Saf hata | 4.37 | 20 | 0.2187 | | | |
| Cor. Total | 109.73 | 28 | | | | |
| Standart Sapma | 0.4599 | R^2 | 0.96 | | | |
| Ortalama | 1.78 | Adj. R^2 | 0.95 | | | |
| C.V. (%) | 25.81 | Pre. R^2 | 0.91 | | | |
| | | Sinyal/Gürültü | 25.8416 | | | |

İstatistiksel analiz neticesinde oluşturulan RSM modeli ile bağımsız değişkenlere bağlı olarak USC değerini veren denklem geliştirilmiştir.

$$\begin{aligned}
q_U = & -11.08921 + 28.66479X_1 + 139.01531X_2 \\
& -366.33667X_1X_2 - 15.45079X_1^2 - 221.83412X_2^2 \\
& + 186.253333X_1^2X_2 + 501.23333X_1X_2^2
\end{aligned}
\tag{3}$$

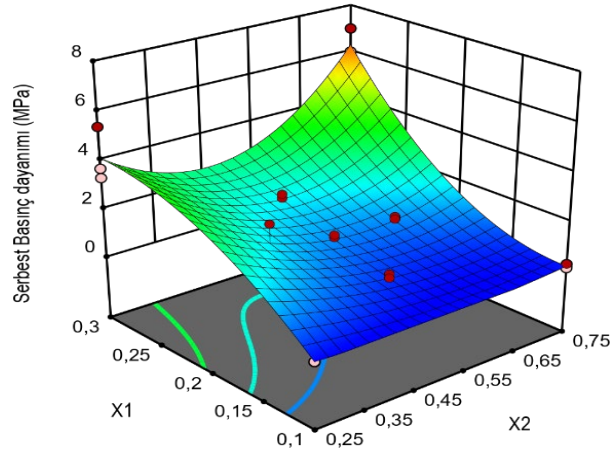
Şekil 9, oluşturulan model vasıtası ile tahmine dilen serbest basınç dayanımı değerleri ile deneysel olarak belirlenmiş serbest basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. ANOVA sonuçlarında da görülebileceği gibi model tarafından tahmin edilen değerler ile deneysel veriler arasında $R^2=0.96$ mertebesinde bir uyum görülmektedir. Buradan hareketle, model tahmini ile deneysel sonuçlar arasında statik olarak iyi eşleşme olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, RSM modelinin öğrenilen artıklarla uyumlu tahmin verdiği ve sabit varyansta varsayımlarını doğruladığı varsayılabilir.



Şekil 9. İstatistiksel analiz sonucu üretilen modelle yapılan tahminlerin deneysel verilerle karşılaştırılması.

Bağımsız değişkenlerin optimizasyonu.

Çalışmanın bu bölümünde, maksimum serbest basınç dayanımını elde edebilmek amacıyla ideal bağımsız değişken miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Design Expert 12 istatistik yazılımındaki optimizasyon aracı kullanılmıştır. Optimizasyonda yanıtlar için sunduğu bazı tercihler ve yazılımın bağımsız değişkenleri dikkate alınmıştır. Optimum çözümlerin belirlenmesi için 0 ile 1 arasında arzu edilebilirlik değerleri (D) dikkate alınmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda maksimum dayanımı veren bağımsız değişkenlerin oranları $D=0.899$ değeri ile $X_1=0.75$, $X_2=0.28$ olarak seçilmiştir. Şekil 10'da yanıt üzerindeki bağımsız değişkenlerin birleşik etkisini ve yüzey çizimleri gösterilmektedir.



Şekil 10. Aktivatör miktarı (X_1) ve Uçucu kül oranı (X_2) değişiminin serbest basınç dayanımı üzerine etkisi.

Numune hazırlama.

Optimum uçucu kül ve aktivatör miktarının belirlenmesinde serbest basınç deneyi, farklı donatı uzunluk kombinsyonlarına sahip donatı içeriğinin kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisinin incelenmesinde üç eksenli basınç deneyleri dikkate alınmıştır. Bu deneyler kapsamında 44 mm çapında ve 88 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Numuneler 3 kademede ve toplam 15 standart proktor tomağı vuruşuyla numune kabına yerleştirilmiş böylece standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırma sağlanmıştır.

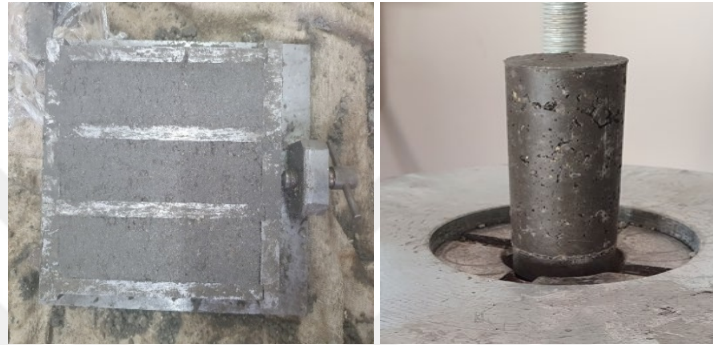
Farklı donatı uzunluk kombinsyonlarının ve donatı içeriğinin eğilme dayanımına etkisinin irdelenmesi amacıyla 3 nokta eğilme deneyi ile eğilme dayanımları belirlenmiştir. Bu kapsamda 40 mm yüksekliğe, 40 mm genişliğe ve 160 mm uzunluğa sahip numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 3 kademede ve toplam 21 tokmak vuruşuyla numune kabına yerleştirilmiş ve standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmıştır.

Deney sonunda numunelerin su içeriğini kaybetmemesi için numuneler elastik film yardımıyla sarılmıştır. Hazırlanan numuneler 27 °C etüvde 7 gün ve 28 gün boyunca küre tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımının belirlenmesi kapsamında yapılan deneyler; optimum aktivatör içeriği dahilinde farklı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlarının eğilme dayanımına etkisi, farklı oranlarda 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların eğilme dayanımına etkisi, 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların farklı oranlarda karışımının eğilme dayanımına etkisi olarak sıralanabilir. Kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla yapılan üç eksenli basınç deneyleri; farklı oranlarda zemine eklenen 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların kayma mukavemeti parametrelerine etkisinin belirlenmesi ve 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların farklı karışım kombinasyonlarının kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2 tekerrürle gerçekleştirilmiş, elde edilen

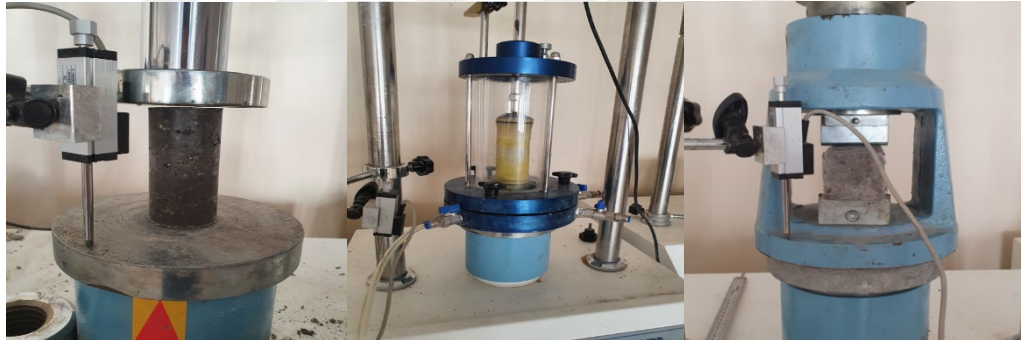
sonuçların ortalamaları dikkate alınmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 7 gün ve 28 gün küre tabi tutulan zemin örnekleri üzerinde, üç eksenli basınç deneyleri ise 28 gün küre maruz bırakılan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 11a'da üç nokta eğilme deneyinde kullanılan zemin numuneleri ve tek eksenli ve üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan silindirik zemin numunesi görülmektedir. Şekil 11b'de ise sırasıyla serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve üç nokta yükleme deneylerine ait resimler görülmektedir.

Şekil 11'de numune örnekleri ve dayanım cihazında kırılmaları gösterilmiştir.



(a)

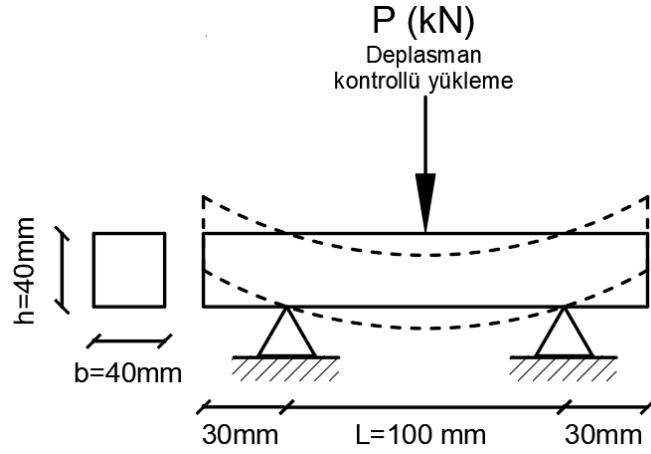


(b)

Şekil 11. a) Silindirik numuneler, eğilme kirişleri b) tek eksenli basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve üç eksenli basınç dayanımı deney örnekleri.

Eğilme dayanımı.

Eğilme deneyi malzemenin malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğilme dayanımı deneyi genelde üç noktalı ve dört noktalı olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Deney kapsamında genel görünümü Şekil 12 'de belirtilen, mesnet açıklığı 100 mm, olan 40 mm x 40 mm boyutlarındaki kare prizma şekilli numuneler, üç nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney kapsamında kirişin orta noktasına yükleme hızı 1 mm/dakika olacak şekilde monotonik yük uygulanmıştır. Deneyler kapsamına ASTM D790 standartları esas alınmıştır.



Şekil 12. Üç nokta eğilme deneyine ait deney şeması.

Tez çalışması kapsamında hazırlanan üç nokta eğilme deneyi numunelerinin homojen elastik olarak kabul edilmiştir. Numunenin orta noktasına etkiyen yük nedeniyle, eğilme kaynaklı oluşan maksimum gerilme kirişin dış yüzeyinde orta noktada oluşur. Bu noktada oluşan gerilme değeri, deney sonucunda hazırlanan yük-deformasyon (kiriş sehim) grafikleri dikkate alınarak Eşitlik (4) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4)$$

Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının eğilme dayanımına etkisi.

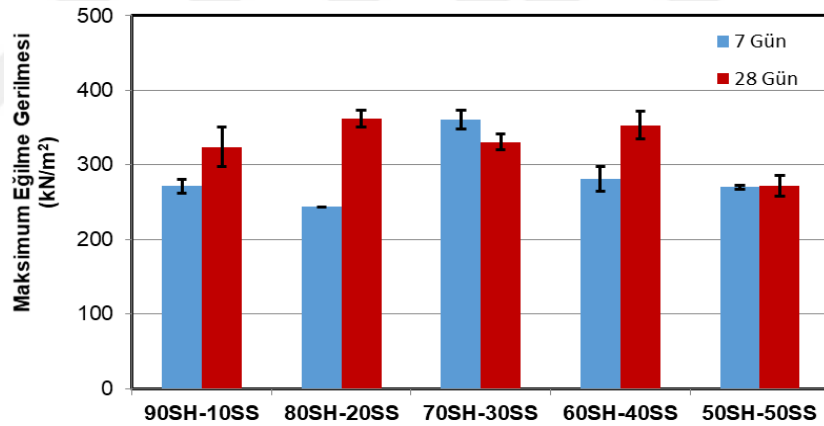
Çalışmanın bu kısmında, sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) oranlarının eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Farklı sodyum silikat/ sodyum hidroksit oranları ile elde edilen numunelerin maksimum eğilme dayanımları Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Eğilme Dayanımı ile Aktivatör Oranı Belirlenmesi

| Aktivatör içeriği | Eğilme dayanımları (kN/m^2) | |
|-------------------|--|--------|
| | Kür süreleri | |
| | 7.Gün | 28.Gün |
| %50SH- %50SS | 269.99 | 271.50 |
| %60SH- %40SS | 280.78 | 352.72 |
| %70SH- %30SS | 360.84 | 330.67 |
| %80SH- %20SS | 243.65 | 362.00 |
| %90SH- %10SS | 271.50 | 323.71 |

Beş farklı aktivatör oranı dikkate alınarak, toplam 10 adet numune hazırlanmıştır. Aktivatör oranları 50SH-50SS (%50 sodyum hidroksit-%50 sodyum silikat), 60SH-40SS (%60 sodyum hidroksit- %40 sodyum silikat), 70SH-30SS (%70 sodyum hidroksit-%30 sodyum silikat), 80SH-20SS (%80 sodyum hidroksit-%20 sodyum silikat) ve 90SH-10SS (%90 sodyum hidroksit-%10 sodyum silikat) olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğilme deneylerinin sonuçlarına

göre 7 gün kürlenmiş numunelerde maksimum eğilme dayanımı değerini 70SH-30SS numunesi vermiştir. 70SH-30SS numunesinin eğilme dayanımı 360.84 kN/m^2 olarak tespit edilmiştir. 28 günlük deney sonucunda maksimum dayanımı 80SH-20SS numunesi vermiştir. 80SH-20SS numunesinin eğilme dayanımı 362 kN/m^2 olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımındaki 7 günlük ve 28 günlük kür sürelerine bakıldığında zaman artan kür sürelerinin dayanım değerleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Farklı aktivatör oranlarında 7 günlük ve 28 günlük eğilme sonuçları Şekil 13’de verilmiştir. Şekil 13’ün incelenmesi sonucunda 7 gün kürlenmiş numunelerde sodyum silikat oranının aktivatör içerisinde artırılması ile %70 sodyum hidroksit-%30 Sodyum silikat oranına kadar maksimum eğilme gerilmesi değerlerinde artış görülmektedir. Bu sınır değerden sonra maksimum eğilme dayanımı değerleri artan sodyum silikat değeri ile azalma eğilimine girmektedirler. Benzer bir değişimin 28 gün kürlenmiş numunelerde de görülmektedir. 28 gün kürlenmiş numunelerde bu sınır değer %80 sodyum hidroksit-%20 sodyum silikat oranı olduğu görülmektedir. Ancak 80SH-20SS ile 60SH-40SS aralığında maksimum eğilme gerilmelerinde artan sodyum silikat değeri ile dikkate değer bir değişimin olmadığı görülmektedir.

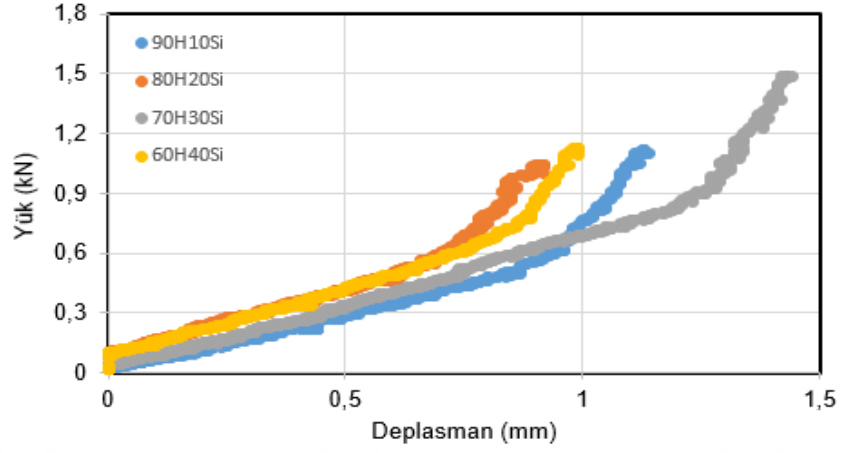


Şekil 13. 7 günlük ve 28 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri.

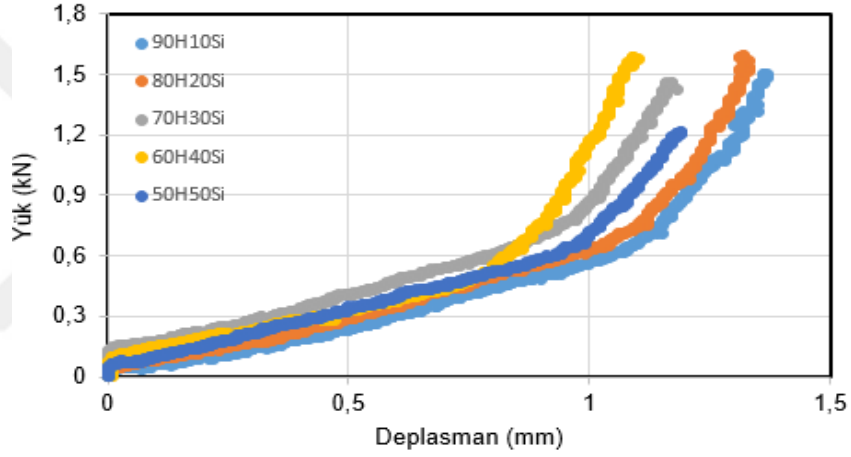
Eğilme deneyi sonucu farklı kür süreleri için üç nokta eğilme deneylerinden elde edilmiş yük ile deplasman eğrileri Şekil 14a ve Şekil 14b’de gösterilmiştir. Buna göre artan kür süresinin, malzeminin deformasyon miktarı ve maksimum yük değeri üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında numunelerde donatı olmaması nedeniyle gevrek şekilde kırılmışlardır. Yük-deplasman eğrilerinin incelenmesi sonucunda karakteristik eğri tipinin kırıklı iki doğru şeklinde olduğu görülmektedir.

Deneyin ilk aşamalarında düşük olan yük deplasman eğrisinin eğimi belli bir deplasman mertebesinde sonra artmaktadır. Üç nokta yükleme deneyinin ilk aşamalarında uygulanan yüke bağlı olarak kiriş yüksek öortebelerde deplasman yapmaktadır. Monotonik

yüklemenin devam etmesi ile kırılmaya yakın eğilme yükü değerlerine yaklaşan kirişin deplasman olması zorlaşmakta bu nedenle birim deplasman için gerekli yük değeri artmaktadır. Bu durum yük deplasman eğrisinde belli bir değerden sonra eğrinin eğiminin artmasını açıklamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 14. Üç nokta eğilme deneyi sonrası farklı kür şartları için elde edilen yük-deplasman eğrileri. a) 7 gün, b)28 gün

Fiber donatı miktarının eğilme dayanımına etkisi.

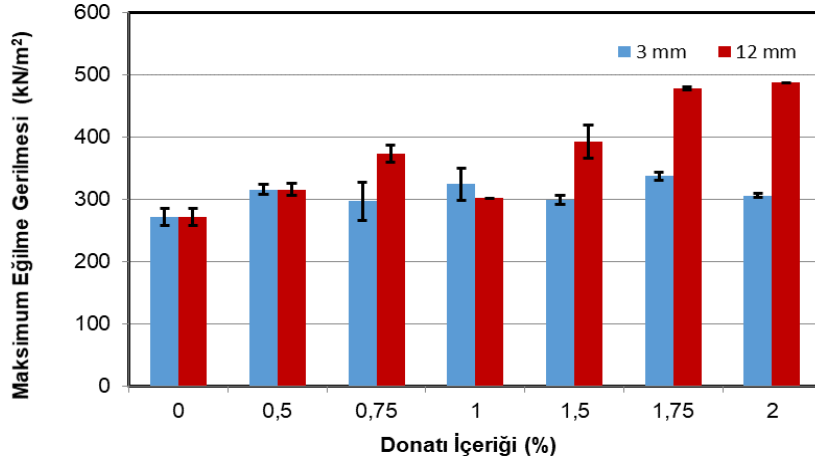
Bu kısımda 7 farklı orandaki (%0, %0.5 %0.75 %1 %1.5 %1.75 ve %2) donatı oranlarının eğilme dayanımlarına etkisi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 3 mm ve 12 mm uzunluğunda fiber donatılar, optimizasyon kısmında belirlenmiş olan ideal oranlardaki uçucu kül ve aktivatör ile karıştırılmıştır. Farklı donatı miktarlarının eğilme dayanım sonuçları Tablo 19'de verilmiştir.

Tablo 19. 3 mm ve 12 mm Uzunluğundaki Donatıların Farklı Donatı Oranlarında Eğilme Dayanım Sonuçları

| Donatı İçeriği | Eğilme Dayanımları (kN/m ²) | |
|----------------|---|-------|
| | 28.Gün | |
| | 3 mm | 12 mm |

| | | |
|-------|--------|--------|
| %0 | 271.50 | 271.50 |
| %0.50 | 315.59 | 315.59 |
| %0.75 | 296.79 | 373.61 |
| %1.00 | 324.53 | 301.67 |
| %1.50 | 299.12 | 393.33 |
| %1.75 | 337.17 | 478.03 |
| %2.00 | 305.96 | 487.31 |

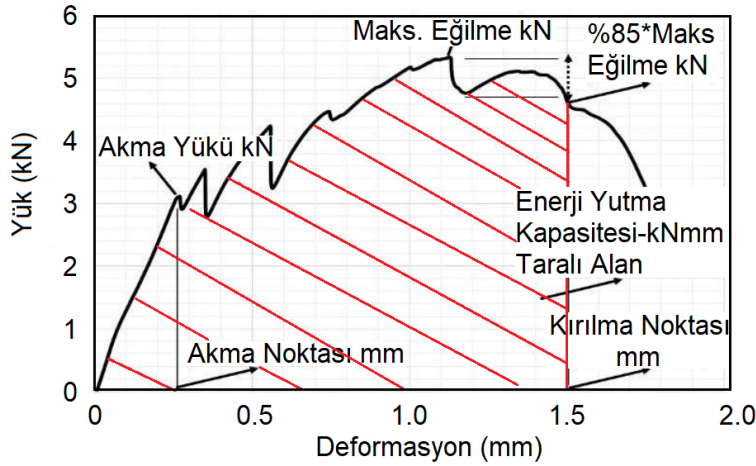
Çalışma kapsamında yedi farklı donatı oranında toplam 28 tane numune hazırlanmıştır. Donatı oranları %0, %0.50, %0.75, %1.0, %1.50 ve %2.0 dir. Eğilme dayanımı deneylerinin sonucunda 3 mm donatı uzunluğunda 28 günlük deney sonucunda maksimum dayanım %1.75 donatı oranına sahip numunesi vermiştir. %1.75 donatı oranına sahip numunenin dayanımı 337.17 kN/m² olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı sonucunda 12 mm donatı uzunluğunda 28 günlük deney sonucunda maksimum dayanımı %1.75 ve %2 donatı oranına sahip numune vermiştir. Söz konusu donatı oranları için numunelerin eğilme dayanımı 478.03 kN/m² ve 487.31 kN/m² olarak tespit edilmiştir. 3 mm ve 12 mm donatı uzunluğunda farklı donatı oranlarında eğilme dayanımları Şekil 15’ de gösterilmiştir. Şekilden 12 mm uzunluğundaki donatı miktarının artırılması ile maksimum eğilme dayanımın %1.75 değerine kadar arttığı görülmektedir. Ancak, %1.75 donatı içeriği değerinden sonra artan donatı içeriği ile maksimum eğilme dayanımlarında dikkate değer bir artış olmadığı görülmektedir. 3 mm uzunluğundaki donatılar için % 1.75 oranının ideal olduğu bu değerden sonra artan donatı içeriğinin numunelerin maksimum eğilme dayanımlarında azalmaya sebebiyet verdiği görülmektedir. Eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında numunelerin içerisine donatı eklenmesi maksimum eğilme dayanımı değerlerini arttırmaktadır. 28 günlük kür sonucunda 3 mm ve 12 mm donatıların eğilme dayanım sonuçlarına bakıldığında 12 mm uzunluğundaki donatıların 3 mm uzunluğundaki donatılardan daha yüksek eğilme dayanımı verdiği gözlenmektedir.



Şekil 15. 28 günlük 3 mm ve 12 mm donatı uzunluklarının farklı oranlarda eğilme dayanım değerleri.

Üç nokta eğilme deneyinden elde edilen yük-deformasyon eğrilerinden tokluk parametresinin belirlenmesi.

Malzemenin plastik deformasyon sınırları içerisinde enerji absorbe etme yeteneği tokluk olarak isimlendirilir. Üç nokta eğilme deneyi sonrasında elde edilen yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan tokluk olarak hesaplanabilir. Şekil 16’de stabilize edilen numunelerde tokluk parametresinin hesaplanmasında göz önünde bulundurulan alan belirtilmiştir. Alan hesaplanmasında maksimum eğilme yükü sonrasında yükün %15 azaldığı yük değeri (Maksimum yükün %85’i) baz alınarak eğrinin altına dalan alan belirlenerek tokluk değeri saptanmıştır.

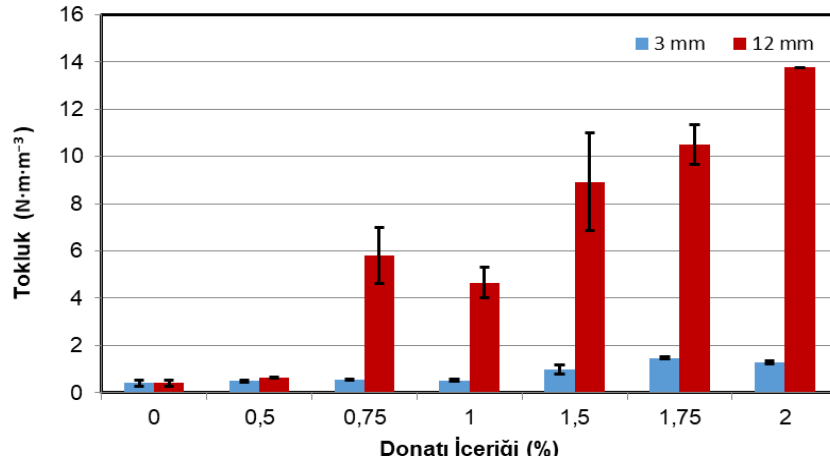


Şekil 16. Tokluğun (Enerji yutma kapasitesi) yük-deformasyon eğrisinden belirlenmesi (Öksüzer, 2022).

Donatı içeriğinin tokluk parametresi üzerindeki etkisi.

Şekil 17’de 3 mm ve 12 mm’lik farklı donatı içeriği için elde edilmiş tokluk değerleri görülmektedir. Buna göre fiber donatının malzemenin tokluk değeri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. 12 mm uzunluğundaki donatının, 3 mm uzunluğundaki donatıya göre tokluk

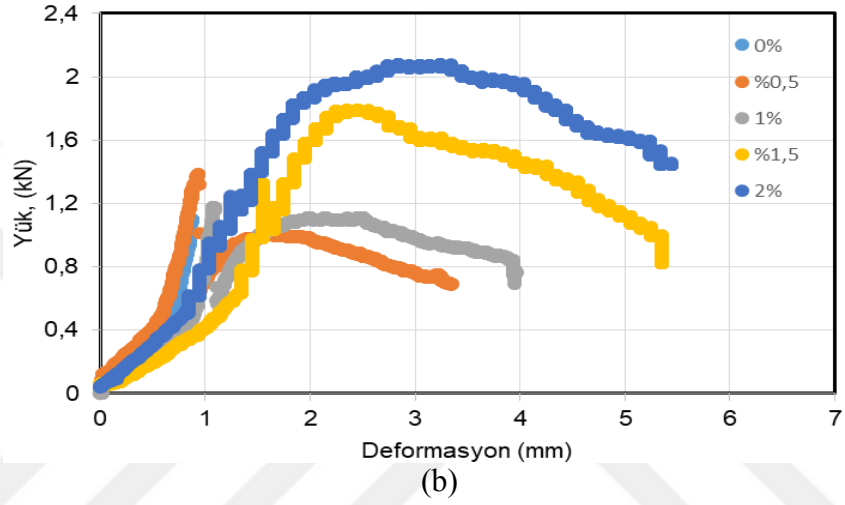
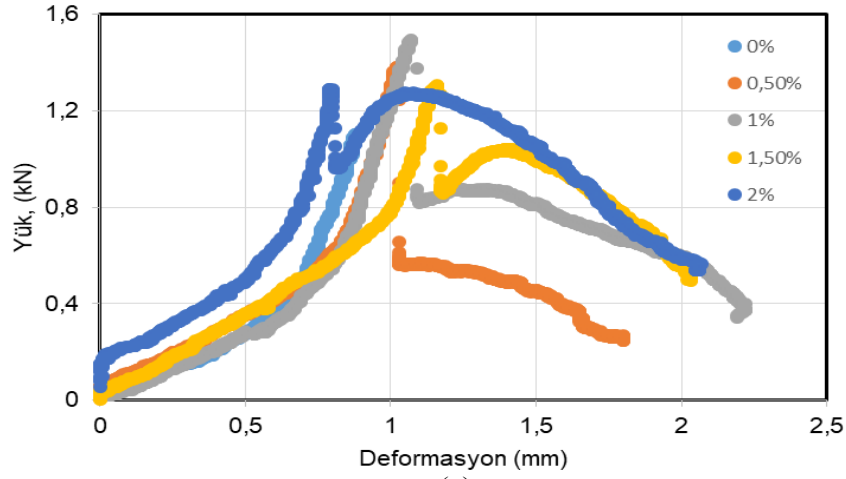
üzerinde belirgin üstünlüğü bulunmaktadır. Eğilme deneyi sonucunda farklı donatı içeriklerinin tokluk değeri üzerindeki etkisi Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Farklı donatı içerikleri için elde edilen tokluk değerleri.

Farklı miktarlardaki 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatı ile elde edilen, geopolimer esaslı numuneler üzerinde yapılmış olan eğilme deneyleri sonucunda elde edilmiş yük-deformasyon eğrileri Şekil 18’de gösterilmiştir. Buna göre Şekil 18’den zemin donatısı içermeyen numunenin belirli bir değerde uzama yapmadan kırıldığı görülmektedir. Öte yandan zemin donatısı bulunan numunelerde belirli bir yük değerinde numune kırılmakta, ancak yükün sıfırlanmadığı sonrasında düşük değerlerde de olsa numunenin yük almaya devam ettiği yük-deformasyon eğrilerinde iki pik olduğu görülmektedir. Şekil 18a’da artan donatı miktarının yük-deformasyon eğrilerini belirli bir donatı içeriği değerine kadar genişlettiği görülmektedir. Bunun yanında, kırılma sonrasında oluşan ikinci pik değerinin artan donatı içeriği ile yükselmektedir.

Şekil 18b’den 12 mm donatı uzunluğundaki numunelerin eğilme dayanımının daha yüksek olduğu, yük-deformasyon eğrilerinin daha genişlediği anlaşılmaktadır. 3 mm’lik donatı uzunluğuna sahip numunelere benzer olarak 12 mm uzunluğundaki düşük donatı içeriklerinde (%0,5, %1) yük deformasyon eğrilerinde 2 adet pik olduğu görülmektedir. Artan donatı miktarı ile kırılma sonrasında oluşan 2. pikteki eğilme yükünün arttığı, giderek kırılma yüküne yaklaştığı (%1.50) ve bu yükü geçerek (%2,0) yük-deformasyon eğrilerinin tek pikli hale geldiği görülmektedir.



Şekil 18. Eğilme deneyi sonrasında farklı donatı içerikleri için elde edilmiş olan yük-deplasman eğrileri (a) 3 mm uzunluğundaki donatı ve (b) 12 mm uzunluğundaki donatı.

Farklı fiber donatı kombinasyonlarının eğilme dayanımına etkisi.

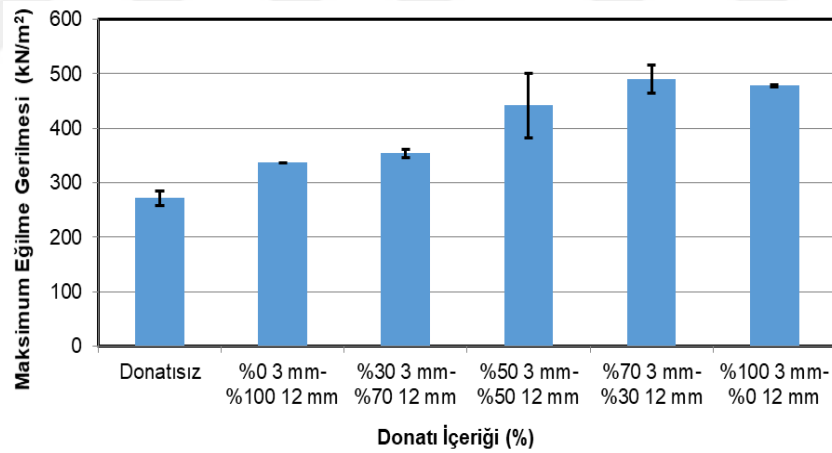
Bu kısımda hibrit donatı kullanımının eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatılar farklı oranlarda karıştırılmış, optimum oranlarda aktivatör ve uçucu kül karışımı ile zemin numuneleri hazırlanmıştır. Maksimum eğilme dayanımını veren donatı içerikleri dikkate alınarak, çalışmada kullanılacak olan fiber donatı içeriği %1.75 olarak belirlenmiştir. Karışık fiber donatı oranları (%100 3 mm- %0 12 mm), (%30 3 mm-%70 12 mm), (%50 3 mm-%50 12 mm), (%70 3 mm-%30 12 mm) ve (%0 3mm- %100 12 mm) dir. Çalışma kapsamında 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki fiber donatılar kendi aralarında karıştırılmış, optimizasyon kısmında belirlenmiş olan ideal oranlarda uçucu kül ve aktivatör ile karıştırılmıştır. Hibrit fiber donatı miktarlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 20. 3 mm ve 12 mm Uzunluğundaki Karışık Donatıların Farklı Karışım Oranlarında Eğilme Dayanım Sonuçları

| | |
|----------------|--------|
| Donatı içeriği | 28.Gün |
|----------------|--------|

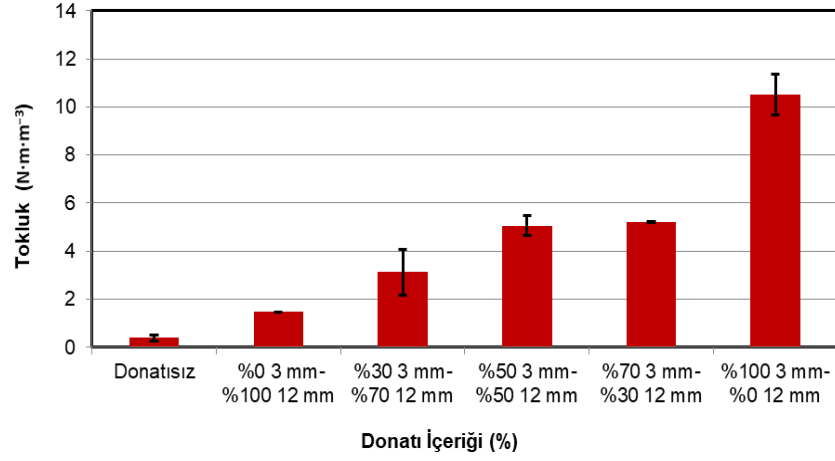
| | Eğilme dayanımı (kN/m ²) |
|--------------------|--------------------------------------|
| Donatısız | 271.50 |
| %0 3 mm-%100 12 mm | 337.17 |
| %30 3 mm-%70 12 mm | 353.88 |
| %50 3 mm-%50 12 mm | 442.06 |
| %70 3 mm-%30 12 mm | 489.63 |
| %100 3 mm-%0 12 mm | 478.03 |

Eğilme dayanım deneylerinin sonuçlarına göre 28 günlük numuneler üzerindeki deney sonucunda maksimum dayanımı %70 3 mm-%30 12 mm numunesi vermiştir. %70 3 mm-%30 12 mm numunesinin eğilme dayanımı 489.63 kN/m² olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanım sonuçlarına bakıldığında numune içerisindeki 3 mm uzunluğundaki fiber donatı oranının artırılması eğilme dayanımı arttırmaktadır. %0 3mm-%100 12 mm numunesinin eğilme dayanımı 337.17 kN/m² ve %100 3 mm-%0 12 mm numunesinin eğilme dayanımı 478.03 kN/m² olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanım sonuçlarına göre hibrit fiber donatıların sadece 12 mm ya da 3 mm uzunluğundaki donatılara göre daha iyi eğilme dayanımı performansı verdiği gözlenmiştir. Eğilme dayanım sonuçlarına bakıldığında numunelerin içerisine donatı koyulması numunelerin dayanımlarında artışlara sebep olduğu gözlenmiştir. Hibrit fiber donatıların eğilme dayanım sonuçları Şekil 19'da gösterilmiştir.



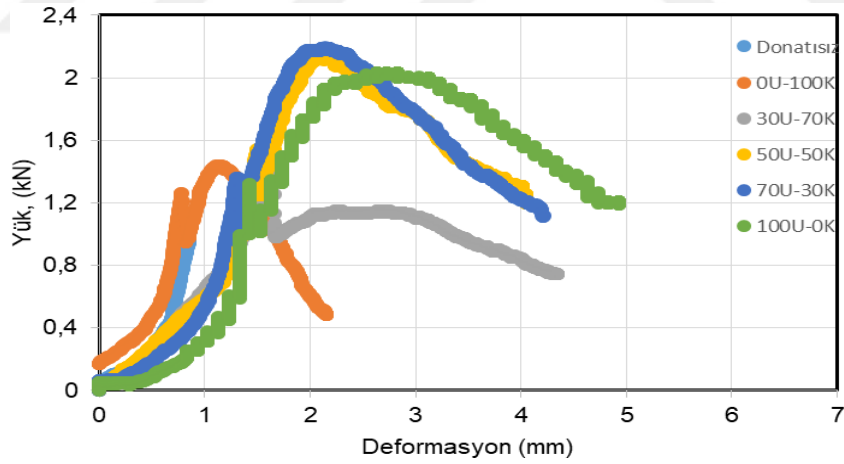
Şekil 19. Hibrit fiber donatı içeriğinin eğilme dayanımına etkisi.

Şekil 20'de hibrit fiber donatılardan elde edilmiş tokluk değerleri görülmektedir. Buna göre fiber donatıların malzemenin tokluk değeri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Buna göre zemin harcı içerisinde kullanılan donatıda 12 mm uzunluğundaki donatı yüzdesinin artması malzemenin enerji yutma kapasitesini ciddi şekilde artırmaktadır. Hibrit donatıların malzemenin tokluğu üzerinde pozitif yönde bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 20. Hibrit fiber donatılar için elde edilen tokluk değerleri.

Hibrit fiber donatılar ile elde edilen, geopolimer esaslı numuneler üzerinde yapılmış olan eğilme deneyleri sonucunda elde edilmiş yük-deformasyon eğrileri Şekil 21’de gösterilmiştir. Zemin donatısız içermeyen numunenin belirli bir değerde uzama yapmadan kırıldığı görülmektedir. Öte yandan, hibrit donatıların yük deformasyon eğrisi şeklinin 12 mm uzunluğundaki donatıya benzer olduğu, 12 mm uzunluğundaki donatının daha geniş bir alanı kapladığı görülmektedir. Hibrit donatıların ise maksimum eğilme yükleri diğer donatılara göre daha yüksektir.

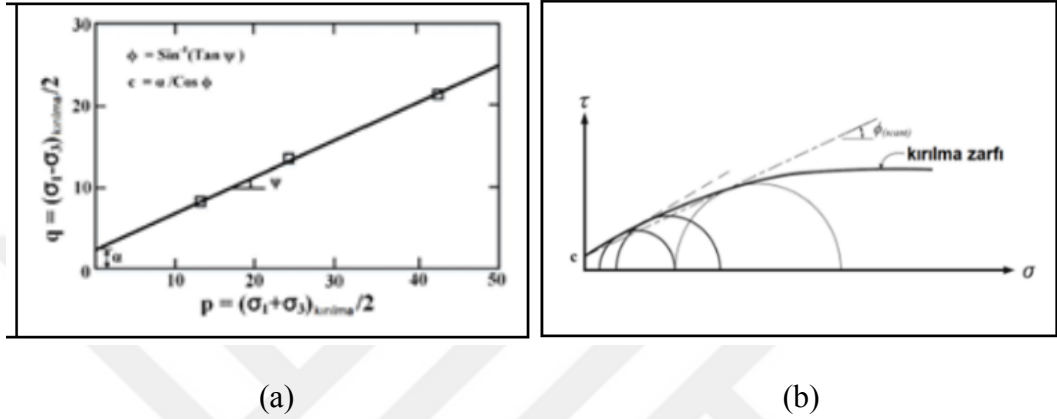


Şekil 21. Eğilme deneyi sonrasında karışık fiber donatılar için elde edilmiş olan yük-deformasyon eğrileri.

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi.

Üç eksenli basınç deneyi, zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini belirlemede kullanılan metottur. Bu çalışmamızda hazırlanan numunelerimiz Konsolidasyonsuz Drenajsız (UU) tipi üç eksenli deneyleri ASTM D-2850 standardına göre 1 mm/dakika yükleme hızı altında deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Hazırladığımız numuneler 100 kN/m², 200 kN/m² ve 400 kN/m² olmak üzere üç farklı çevre basınç altında

deneylere tabi tutulmuştur. Yoğun bir şekilde sıkıştırılmış ya da stabilize edilmiş zeminlerde Mohr-Coulomb kırılma zarfı Şekil 22(a)'da gösterildiği gibi içbükey şeklindedir. Bu zeminlerde doğrusal şekilde çizilen kırılma zarfları, kayma mukavemetinin belirlenmesinde belirsizlikler oluşturmaktadır. Bu durumdan dolayı c ve ϕ değerlerini elde etmek için Şekil 22(b)'de görülen p-q diyagramının kullanılması önerilmektedir. Bu nedenlerden dolayı çalışmada c ve ϕ parametreleri p-q diyagramları ile belirlenmiştir. Yoğun şekilde sıkıştırılmış bir zemine ait Mohr-Coulomb kırılma zarfı ve p-q diyagramı Şekil 22'de gösterilmiştir.



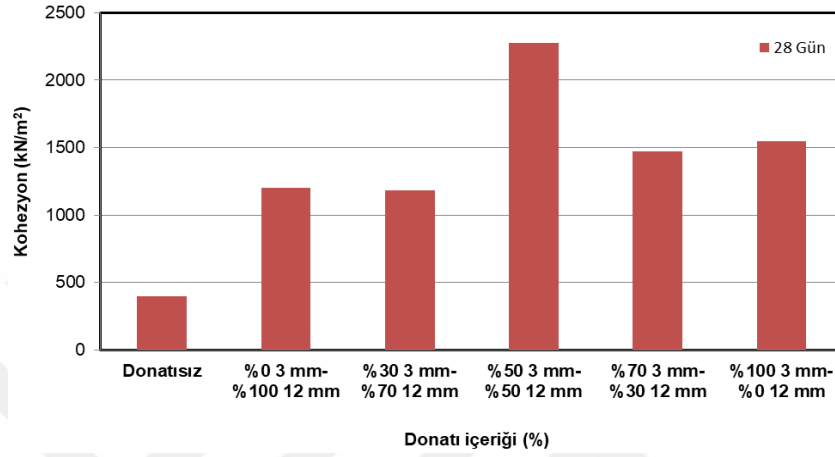
Şekil 22. a) Yoğun şekilde sıkıştırılmış bir zemine ait Mohr-Coulomb kırılma zarfı b) p-q diyagramı ile c ve ϕ nin belirlenmesi (Szendefy, 2013).

3 mm donatı, 12 mm donatı ve donatı kombinasyonlarının kayma mukavemeti parametrelerine etkisi.

Bu kısımda 3 mm donatı, 12 mm donatı ve hibrit donatıların kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda 3 mm, 12 mm uzunluğundaki donatılar ve hibrit donatılar, optimum oranlarda aktivatör ve uçucu kül karışımı ile karıştırılarak zemin numuneleri hazırlanmıştır. Drenajsız-konsolidasyonsuz üç eksenli basınç deneyleri sonrasında maksimum deviyatör gerilmeyi veren donatı içeriği dikkate alınarak, çalışmada 3 mm donatı uzunluğunda fiber donatı içeriği % 1.5, 12 mm donatı uzunluğunda fiber donatı içeriği % 1.75 ve hibrit donatıda fiber donatı içeriği % 1.75 olarak belirlenmiştir. Hibrit fiber donatı oranları (%100 3 mm- %0 12 mm), (%30 3 mm-%70 12 mm), (%50 3 mm-%50 12 mm), (%70 3 mm-%30 12 mm) ve (%0 3mm- %100 12 mm) dir. Çalışma kapsamında 3 mm, 12 mm uzunluğundaki fiber donatılar ve hibrit donatılar, optimizasyon kısmında belirlenmiş olan ideal oranlarda uçucu kül ve aktivatör ile karıştırılmıştır.

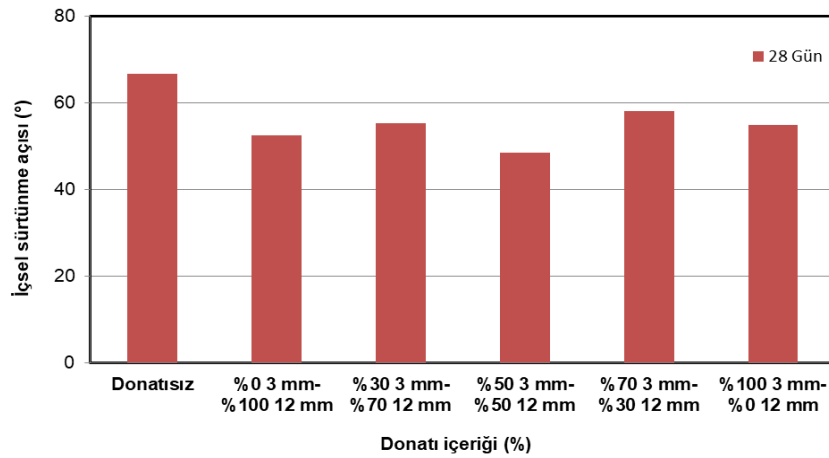
3 mm uzunluğunda, 12 mm uzunluğundaki ve hibrit donatıların üç eksenli basınç deneyi sonuçları ile elde edilen kohezyon değerleri Şekil 23'de gösterilmiştir. Kohezyon değerlerine bakıldığında hibrit fiber donatıların yalnız 12 mm ya da yalnız 3 mm uzunluğundaki donatılara göre daha yüksek kohezyon değerleri verdiği gözlenmiştir. Üç eksenli basınç deneyi sonrasında

28 gün kürlenmiş numuneler arasında maksimum kohezyon değerini %50 3 mm-%50 12 mm oranında donatı içeren zemin numunesi vermiştir. %50 3 mm-%50 12 mm numunesinin kohezyon değeri 2278.10 kN/m² olarak tespit edilmiştir. Kohezyon değerlerine bakıldığında 3 mm uzunluğundaki fiber donatının artırılması %50 3mm, %50 12mm oranına kadar kohezyonu arttırmış bu orandan sonra artan 3 mm uzunluğundaki donatı miktarı kohezyonu azaltmıştır.



Şekil 23. 3 mm donatı, 12 mm donatı ve hibrit donatıların üç eksenli basınç dayanım değerleri.

Yapılmış olan üç eksenli basınç deneyi sonucunda donatı içeriğine göre içsel sürtünme açıları Şekil 24’de gösterilmiştir. İçsel sürtünme açısı sonuçlarına bakıldığında zemin donatısı içermeyen numunenin içsel sürtünme açısının en fazla olduğu gözlenmiştir. Numuneler içerisine farklı uzunlukta ve farklı oranlarda koyulan donatılar içsel sürtünme açıları dikkate değer bir değişime sebep olmamıştır. Şekilden değişen donatı kombinasyonlarının içsel sürtünme açısı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 24. Donatı içeriğine göre içsel sürtünme açıları değerleri.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma kapsamında farklı fiber donatı uzunluk kombinasyonlarının alkali aktif C-sınıfı uçucu kül ile iyileştirilmiş, yüksek plastisiteli siltli bir zeminde eğilme ve kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma neticesinde aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ Eğilme dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre 7 günlük ve 28 günlük deney sonucunda maksimum dayanımı 70SH-30SS ve 80SH-20SS numunesi vermiştir. 70SH-30SS numunesinin dayanımı 360.84 kN/m^2 ve 80SH-20SS numunesinin dayanımı 362 kN/m^2 olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımındaki 7 günlük ve 28 günlük kür sürelerine bakıldığı zaman artan kür sürelerinin dayanım değerleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gözlenmiştir.
- ✓ 7 gün kürlenmiş deney numunelerine yapılan üç nokta eğilme deneyleri sonrasında 3 mm uzunluğundaki fiber donatılarla iyileştirilmiş zemin numunelerinde maksimum eğilme dayanımını veren donatı içeriği %1.75 olarak belirlenmiştir. 12 mm uzunluğunda fiber donatı kullanılarak yapılan zemin numunelerinde maksimum eğilme dayanımını veren donatı oranı %2 olarak belirlenmiştir. 3 mm uzunluğundaki donatılar için %1.75 donatı içeriğine kadar artan donatı içeriği eğilme dayanımını arttırmıştır. Bu değerden sonra artan donatı içeriği numunelerin eğilme dayanımı değerlerini düşürmüştür. 12 mm uzunluğundaki donatılarda ise %1.75 oranına kadar artan donatı içeriği maksimum eğilme dayanımlarında dikkate değer bir artışa sebebiyet vermekte, bu donatı içeriği değerinden sonra artan donatı içeriğinin numunenin eğilme dayanımı değerinde dikkate değer bir artışa sebebiyet vermemiştir.
- ✓ 3mm ve 12 mm unluğundaki donatıların eğilme dayanımı performansları karşılaştırıldığında 12 mm uzunluğundaki fiber donatının daha yüksek performans göstermiştir
- ✓ Farklı 3mm ve 12 mm uzunluğundaki donatı kombinasyonları yalnız 3mm ya da yalnız 12 mm uzunluğundaki zemin donatılarına göre maksimum eğilme dayanımı ve kohezyon parametreleri üzerinde daha yüksek performans göstermiştir.
- ✓ 12 mm uzunluğundaki donatının tokluğu, 3 mm uzunluğundaki donatıya ve 3mm-12mm donatı kombinasyonlarına göre tokluk üzerinde belirgin üstünlük göstermiştir.

- ✓ 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatıların eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrilerinde zemin donatısı içermeyen numunelerin belirli bir değerde uzama yapmadan kırıldığı görülmektedir. Öte yandan zemin donatısı bulunan numunelerde belirli bir yük değerinde numune kırılmakta, ancak yükün sıfırlanmadığı sonrasında düşük değerlerde de olsa numunenin yük almaya devam ettiği yük-deformasyon eğrilerinde iki pik olduğu görülmektedir. 3 mm donatı uzunluğunda artan donatı miktarının yük-deformasyon eğrilerini belirli bir donatı içeriği değerine kadar genişlettiği gözlenmiştir.
- ✓ Hibrit fiber donatılar üzerinde yapılan eğilme deneyleri sonucunda yük-deformasyon eğrilerine bakıldığında Zemin donatısı içermeyen numunenin belirli bir değerde uzama yapmadan kırıldığı görülmektedir. Hibrit donatıların yük-deformasyon eğrisi şeklinin 12 mm uzunluğundaki donatıya benzer olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Üç eksenli basınç dayanımı deneyi sonrasında 28 günlük numuneler üzerindeki deney sonucunda maksimum kohezyon değerini %50 3 mm-%50 12 mm numunesi vermiştir. Kohezyon değerlerine bakıldığında 3 mm uzunluğundaki fiber donatının artırılması bir yere kadar kohezyonu arttırmış bir yerden sonra kohezyonu azaltmıştır. 12 mm uzunluğundaki fiber donatının azaltılması bir yere kadar kohezyonu arttırmış bir yerden sonra kohezyonu azaltmıştır. Kohezyon değerlerine bakıldığında hibrit fiber donatıların sadece 12 mm ya da 3 mm uzunluğundaki donatılara göre daha iyi kohezyon değerleri verdiği gözlenmiştir. Kohezyon değerlerine bakıldığında numunelerin içerisine donatı koyulması numunelerde kohezyon değerlerinde artışlara sebep olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen içsel sürtünme açısı sonuçlarına bakıldığında zemin donatısı içermeyen numunenin içsel sürtünme açısının fiber donatılı numunelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

İleriye dönük çalışmalara rehber olması amacıyla verilebilecek öneriler şunlardır:

- ✓ Bu tez kapsamında çalışılmayan farklı donatı uzunluk kombinasyonlarının ya da farklı özelliklerdeki donatıların geopolimerlerle iyileştirilmiş zemin numunelerinin durabilite özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi literatüre fayda sağlayacaktır.

Kaynakça

- Akkaya, G. (2018). *Islak Derin Zemin Karıştırma Yöntemi ile Zemin İyileştirmesi İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 507698)
- Akyüncü, V. (2012). *F ve C Tipi Uçucu Küllerin Çimento ile İkame Edilmesiyle Üretilen Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Karşılaştırılarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 304751)
- Allnkaa, A. A. (2019). *Farklı Koşulların Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 558683)
- Alptekin, I. (2020). *1999 Gölcük Depreminin Avcılar Bölgesine Etkisi ve Avcılar Bölgesinde Uygulanan Zemin İyileştirme Yöntemleri* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 645012)
- Altındal, İ. (2020). *Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 638484)
- Arslan, F. (2020). *Tabakalı Zemin Ortamında İmal Edilen Zeolit Katkılı Derin Karıştırma Kolonu Davranışlarının Model Deneylerle Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 650423)
- Atabey, İ. İ. (2017). *F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 467802)
- Atterberg, A. (1911). The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity. *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*. 50/2, 132-158.
- Ayan, E. (2009). *Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 251281)
- Aydoğdu, A. (2019). *Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı Kangal Termik Santrali Uçucu Kül İkameli Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 584274)
- Balçıkıanlı, M. (2016). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimentosuz Cürüflü Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri ve Üretim Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444938)
- Baş, K. (2006). *Temel Takviye Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222766)
- Bekar, F. (2020). *Farklı Kür Koşullarının Alkali Aktive Edilmiş Betonların Mühendislik Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 654933)
- Bostancı, D. (2020). *Sönmemiş ve Hidrolik Kireçle Zemin İyileştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi).

- Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 667492)
- Bozkurt, E. (2020). *Arazide Yüksek Su Muhtevası İçeren Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 629836)
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*.
- Can, B. (2017). Sülfat İçeriği ve Sıkıştırılması Su Muhtevasının Killi Zeminlerin Kireç Stabilizasyonuna Etkisi. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı*, 3, s. 1011-1022. İstanbul.
- Çakılcıoğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 216270)
- Çakır, M. (2001). *Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 98397)
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 300926)
- Çelik, Z. H. (2020). *Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 610712)
- Çetin, A. Y. (2011). *Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 295471)
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (2008). *They Built the Pyramids. Published by Institute Geopolymer, Saint Quentin. France.*
- Demiröz, A., & Karaduman, M. (2009). Zemin İyileştirme Metotları. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8(3).
- Duman, V. (2020). *Midyat Taşı Atıklarının Düşük Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 633580)
- Durgunoğlu, H. T. (2004). Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. 39-52.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer Technology. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- Eskişar, T., & Altun, S. (2015). Fiber Donatılı İnce Taneli Zeminlerin Mekanik Davranışlarının Serbest Basınç Deneyleri ile İncelenmesi. 6. *Geoteknik Sempozyumu*.
- Fidan, D. (2016). *Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 444951)
- Gökçer, Ö. (2018). *Yapılarda Uygulanan Zemin İyileştirme ve Geoteknik Çalışmaların Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 520760)
- Görür, E. B. (2015). *Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 387471)

- Gücek, S. (2011). *Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerinde İyileştirilmesinde Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 284513)
- Hausmann, M. R. (1989). *Engineering Principles of Ground Modification*. New York: McGraw-Hill College. .
- Home, M. R. (1964). The Consolidation of a Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage. *International Journal of Mechanical Sciences*, 187-197.
- Kamiloğlu, H. A. & Turan, H. (2022). Farklı kür sıcaklıklarında kireçle stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi bir zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile tahmini. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 27 (6), 711-717.
- Khale, D, & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42,729-746.
- Kaptan, E. C. (2020). *Derin Karıştırma Yönteminde Elastisite Modülü ve Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 635926)
- Kayabalı, K. (2010). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Kayabalı, K., & Mollamahmutoğlu, M. (2004). *Geoteknik Deprem Mühendisliği Elkitabı, McGrawHill El Kitapları, Robert W. Day*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Kocabey, S. (2019). *Düşük Plastisiteli Killerin Kireçle Stabilizasyonunda İnceliğin Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533972)
- Loos, W. (1936). Comparative Studies of the Effectiveness of Different Methods for Compacting Internaitonal Conference on Soil Mechanics and Foundaiton Engineering. 174-179.
- Maag, E. (1938). *Über Die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes*. Lecture to Federal Technical University.
- Maraş, M. M. (2019). *Geogrid Geopolimer Panellerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Yapısal Davranışının İncelenmesi*. Kahramanmaraş.
- Masike, N. (2019). *Silis Dumanı İlaveli Derin Karıştırma Kolonlarının Üç Eksenli Basınç Dayanımı ve Konsolidasyon Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 576789)
- Oral, T. (2020). *Makro Sentetik Fiber Donatıları Kullanım Avantajlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Kriteri Dahil Edilerek Topsis ve AHP Yöntemiyle Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 659912)
- Öksüz, K. (2006). *Afşin-Elbistan Termik Santral Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 183731)
- Öksüzer, N. (2022). *Kirişlerde Eğilme Yükleme Etkisinde Şekil Değiştirme Sertleşmesi Gösteren Çimento Bağlayıcı Kompozitlerin Kendiliğinden İyileşme Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 700642)
- Önalp, A. (1983). İnşaat Mühendislerinde Geoteknik Bilgisi (Cilt 2). *Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi*, 3, 1225.

- Önen, B. (2021). *Taban Zemin Taşıma Gücü Sorunlu Yol Kesimlerinde Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Derin Karıştırma Yöntemi İçin Sinanoğlu-Limandere Şehir Geçişi Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 683210)
- Öz, M. Y. (2015). *Sivilaşmaya Karşı Jet Grouting Yöntemi ile Örnek Bir İyileştirme Uygulamasının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 410012)
- Özaydın, K. (1997). *Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi*. İstanbul.
- Özaydın, K. (2000). *Zemin Mekaniği, (2. Baskı), Birsen Yayınevi*. İstanbul.
- Öztürk, S. (2016). *Sivilaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirilmesi: Samsun-Tekkeköy Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 430787)
- Sarsılmaz, O. M. (2017). *Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması, İncelenmesi, Değerlendirilmesi ve Anılan Yöntemlerin Seçilmesi Kriterleri Üzerine Kapsamlı Bir Araştırma* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 498028)
- Scrivener, K. L. & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cem. Concr. Res.*, 38 (2), s.128-136.
- Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2021). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 481-496.
- Şengül, E. (2010). *Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 270694)
- Szendefy, J. (2013). Impact of the Soil-Stabilization With Lime. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Paris, France.
- Taşdemir, R. (2020). *Çapraz Bağlı Polikarboksilat Esaslı Adsorbentle Kurşun (II) Adsorpsiyonunun Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 608088)
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*.
- Topçu, İ. B., & Toprak, M. U. (2009). Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 153-164.
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 183645)
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- Türkyılmaz, H. (2011). *Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Prosesi ile Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 295192)
- Uzuner, B. A. (2000). *Temel mühendisliğine Giriş (2.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitapevi.
- Uzuner, B. A. (2006). *Temel Mühendisliğine Giriş (3.Baskı)*. Trabzon: Derya Kitapevi.

- Uzuner, B. A. (2007). *Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği*, (1.baskı). Ankara: Derya yayınevi.
- Vekli, M. (2009). *Taş Kolon ile Şev İyileştirilmesinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 238369)
- Xiem, N. T. (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology*.
- Yakupoğlu, A. (2010). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflü Harçların Özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 282998)
- Yardımcı, M. Y., & Aydın, S. (2016). Alkalilerle Aktive Edilmiş Standard Kürlü Harçların Statik ve Dinamik Yükleme Altındaki Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(54), 381-398.
- Yıldız, Y. (2020). *Killi Bir Zeminin Çimento ile Stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.629835)



ÖZ GEÇMİŞ

Kutluhan KURUCU, yılında’ da doğdu. İlköğrenimini ve ortaokulu kolejinde, lise öğrenimini ise Lisesinde tamamladı. yılında lisans öğrenimi gördüğü Üniversitesi Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı yıl Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Anabilim Dalı’nda lisansüstü öğrenimine başladı.

